

Frank Kirchner
Sirko Straube
Daniel Kühn
Nina Hoyer *Hrsg.*

KI-Technologie für Unterwasserroboter



Springer Vieweg

KI-Technologie für Unterwasserroboter

Frank Kirchner · Sirko Straube · Daniel Kühn ·
Nina Hoyer
(Hrsg.)

KI-Technologie für Unterwasserroboter

Hrsg.
Frank Kirchner
Robotics Innovation Center
DFKI GmbH und Arbeitsgruppe Robotik
Universität Bremen
Bremen, Deutschland

Daniel Kühn
Robotics Innovation Center
DFKI GmbH
Bremen, Deutschland

Sirko Straube
Robotics Innovation Center
DFKI GmbH
Bremen, Deutschland

Nina Hoyer
Robotics Innovation Center
DFKI GmbH und Arbeitsgruppe Robotik
Universität Bremen
Bremen, Deutschland

ISBN 978-3-031-42368-0 ISBN 978-3-031-42369-7 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-031-42369-7>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Buch ist eine Übersetzung des Originals in Englisch „AI Technology for Underwater Robots“ von Kirchner, Frank, et al., publiziert durch Springer Nature Switzerland AG im Jahr 2019. Die Übersetzung erfolgte mit Hilfe von künstlicher Intelligenz (maschinelle Übersetzung). Eine anschließende Überarbeitung im Satzbetrieb erfolgte vor allem in inhaltlicher Hinsicht, so dass sich das Buch stilistisch anders lesen wird als eine herkömmliche Übersetzung. Springer Nature arbeitet kontinuierlich an der Weiterentwicklung von Werkzeugen für die Produktion von Büchern und an den damit verbundenen Technologien zur Unterstützung der Autoren.

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert an Springer Nature Switzerland AG 2023

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Petra Steinmueller

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Nature Switzerland AG und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Gewerbeallee 11, 6330 Cham, Switzerland

Das Papier dieses Produkts ist recyclebar.

Vorwort

Daten sind das Öl des einundzwanzigsten Jahrhunderts: Dies ist der Schlüsselsatz, der den enormen Erfolg von KI-Technologien beschreibt und erklärt, den wir im letzten Jahrzehnt beobachtet haben. Dieses Buch versucht, die Möglichkeiten für KI in einem Bereich zu skizzieren, der bisher von diesen Technologien ziemlich unberührt geblieben ist, aber großes Potenzial für das Feld der KI bietet und enorm von diesen Anwendungen profitieren wird, insbesondere in Kombination mit modernen Robotertechnologien.

Wir haben eine Gruppe von KI-Experten aus verschiedenen Bereichen der künstlichen Intelligenz und verwandten Disziplinen in einem 2-tägigen Workshop in Bremen, Deutschland, vom 27. bis 28. August 2018, zusammengebracht.

Die Idee hinter dem Workshop war, diese Wissenschaftler mit dem Bereich der Unterwassertechnologien, Anwendungen und maritimen Wissenschaften zu konfrontieren und zu identifizieren, welchen Einfluss diese Umgebung auf die Methoden, Werkzeuge und Theorien haben würde, die sie so erfolgreich im terrestrischen Bereich verwenden, anwenden und entwickeln.

Im ersten Teil des Workshops stellten Kollegen aus dem Bereich der maritimen Wissenschaft und industriellen maritimen Anwendung ihre Arbeit und die Herausforderungen vor, denen sie gegenüberstehen, wenn sie vorhandene Technologie im maritimen, aber insbesondere im Unterwasserbereich verwenden.

Es stellte sich heraus, dass es für alle Teilnehmer eine Augen öffnende Erfahrung war, dass der Einsatz und die Verwendung selbst der einfachsten und robustesten mechanischen Werkzeuge eine Herausforderung darstellt und oft mit einer enormen Menge an Vorbereitung, kontinuierlicher Überwachung und Wartung verbunden ist. Wenn es darum geht, komplexere elektromechanische Komponenten oder sogar Systeme zu verwenden, steigt die Menge an Vorbereitung und Wartung exponentiell mit der Komplexität, in Bezug auf die Anzahl der verbundenen mechatronischen Teile, der Komponenten oder Systeme. Als Ergebnis steigt der Preis für jede Aktivität, die in dieser Umgebung durchgeführt wird, entsprechend an, da der einzige Weg, um einen sicheren und zuverlässigen Betrieb der Technologie in der maritimen – und insbesondere der Unterwasserumgebung – zu gewährleisten, darin besteht, den Aufwand für die Vorbereitung und Wartung

zu erhöhen. Interessanterweise gilt dies, wenn auch in unterschiedlichem Maße, sowohl für wissenschaftliche Unternehmungen als auch für industrielle Vorhaben. Der Begriff Preis hat in diesem Zusammenhang auch eine ökologische Implikation. Wenn man die Menge an Treibstoff berechnet, die ein Standard-Offshore-Wartungsschiff an einem einzigen Tag verbrennt, ist es offensichtlich, dass ein einziger durch moderne Robotik- und KI-Technologie eingesparter Tag den ökologischen Fußabdruck solcher Operationen erheblich reduziert.

Der erste Teil skizziert einige der Herausforderungen, mit denen Experimentatoren und Betreiber konfrontiert sind, während sie meereswissenschaftliche Forschung betreiben oder Offshore-Projekte (z. B. Öl und Gas, Windkraft) durchführen. Fischer gibt einen Einblick in die Welt der Unterwasserwissenschaft und stellt die Schönheit, aber auch die Zerbrechlichkeit der Unterwasserwelt vor und skizziert die Möglichkeiten für die zukünftige meereswissenschaftliche Forschung mit intelligenten Unterwassersystemen. Motta et al. bieten eine andere Sicht auf die Unterwasserumgebung, indem sie die Anforderungen beschreiben, die notwendig sind, um die reichen Ressourcen in diesem Bereich zu nutzen, da sie den Fokus auf die Notwendigkeit legen, minimalinvasiv handeln zu können, um eine Ausbeutung ohne massive Eingriffe durchzuführen.

Der zweite Teil konzentriert sich auf die grundlegenden Technologien, die benötigt werden, um die Art von intelligenten Systemen zu erreichen, die im Kap. 1 postuliert wurden. Die Anforderungen reichen von Perspektiven aus der Materialwissenschaft in Bachmayer et al., die die Möglichkeiten neuer und fortschrittlicher Materialien und Produktionsstrategien diskutieren, um robustere Systeme zu ermöglichen, die Eigenschaften wie Selbstheilung nutzen, um so der rauen Unterwasserumgebung standzuhalten, bis hin zu Hildebrandt et al., die Ansätze zur Modularität und Rekonfigurierbarkeit mit dem Fokus auf die Verbesserung der Benutzerfreundlichkeit, Vielseitigkeit und Einsatzkosten von Unterwassersystemen vorstellen. Bachmayer et al. konzentrieren sich auf eine andere, jedoch sehr wichtige Technologie, indem sie Einblicke in die Möglichkeiten zur Gestaltung neuer Antriebe geben, die es ermöglichen, Unterwasserfahrzeuge mit einer Präzision und Genauigkeit zu manövrieren und zu steuern, die den zugrunde liegenden Steuerungsalgorithmen entsprechen.

Eine weitere sehr grundlegende Anforderung ist die Kommunikation. Während die durch die Physik eingeschränkte Ausbreitung elektromagnetischer Wellen nur eine sehr schmale Bandbreite erlaubt, geben Wübben et al. Einblick in alternative Wege zur Kommunikation, indem sie semantische Konzepte als neues Kommunikationsparadigma angesichts begrenzter Bandbreiten nutzen. Schließlich konzentrieren sich Bartsch et al. auf eine weitere wichtige Fähigkeit zukünftiger Unterwasserroboter, indem sie neue Konzepte für die Unterwassermanipulation vorstellen und versuchen, Konzepte aus dem terrestrischen Aktuatordesign und -steuerung auf leistungsstarke, skalierbare Unterwasseraktuatoren zu übertragen.

Im dritten Teil konzentrieren sich die Autoren auf die Systemfunktionalität und -leistung sowie auf die Möglichkeiten zur Darstellung der Umweltstruktur und -dynamik. De Gea et al. analysieren die Möglichkeiten des maschinellen Lernens

zur Modellierung und Steuerung der zunehmenden strukturellen Komplexität von Unterwasserrobotern für präzise und intelligente Manipulation. Um diese Techniken effektiv anzuwenden, ist eine präzise Fähigkeit des Roboters zur Erkennung und Darstellung der Umgebung erforderlich, was im Fokus von Köser et al. steht, die moderne KI-Technologien zur Umgebungserkennung und -darstellung verwenden. Kampmann et al. legen den Fokus auf ein sehr wichtiges Teilsystem für die Unterwasseromanipulation, indem sie sich das Greifersystem selbst ansehen. Diese Autoren betonen die Notwendigkeit für geschickte Manipulation und nutzen neue und innovative drucktolerante Sensortechnologien, um adaptive geschickte Greiffähigkeiten in Unterwasserrobotern zu erreichen. Ein äußerst schwieriger Fall ist die Modellierung der Systemdynamik in der Wassersäule. Die Verwendung einfacher mathematischer Ansätze hat sehr enge Grenzen, wenn es um sich ändernde Eigenschaften des Mediums sowie sich ändernde Dynamiken im System selbst geht. De Gea et al. analysieren die Möglichkeiten von Deep-Learning-Technologien, um ein Modell der Dynamik eines Unterwasserroboters zu approximieren, selbst im Falle einer hochkomplexen mechanischen Struktur. Kampmann et al. betonen schließlich die Notwendigkeit für neue Sensortechnologie, indem sie speziell ein Konzept nutzen, das seit Langem in terrestrischen Anwendungen etabliert ist und verschiedene Modalitäten integriert, um präzisere, robustere und letztendlich zuverlässigere Informationen aus der Umgebung zu sammeln.

Im vierten Teil betrachten die Autoren die Möglichkeiten zur Integration neuer intelligenter Roboter in tatsächliche Unterwasserszenarien. Frese et al. erforschen die Möglichkeiten der Navigation, insbesondere in engen Räumen. Im Gegensatz zur Navigation im offenen Wasser benötigen enge Räume probabilistische Ansätze zur Modellierung und Vorhersage sowohl der Umgebung als auch der Systemdynamik, um eine Hypothese zur Selbstlokalisierung sowie eine Umgebungskarte zu berechnen. Ein wichtiger Nachteil probabilistischer Methoden ist, dass sie Trainingsdaten benötigen, um sich letztendlich optimalen Lösungen anzunähern. Diese Informationen können nicht effizient in realen Tests erworben werden. Daher wird ein möglicher Ansatz angesichts der heutigen Simulationswerkzeuge und -ansätze im Kap. 13 in Teschner et al. ausgenutzt, indem die Möglichkeiten für Simulationsrahmen für Unterwasserinterventionen zur Schulung und Optimierung der Leistung von Systemen in der realen Welt erforscht werden. Egal wie viel Training in realistischen oder simulierten Szenarien wir durchführen können, am Ende, wenn es darum geht, diese neuen Arten von Systemen in der Praxis der Meereswissenschaft oder der Meeresindustrie anzuwenden, wird ein Verifizierungsprotokoll benötigt, das die Funktion des Systems beschreibt und in gewissem Maße garantiert. Lüth et al. befassen sich mit dieser Frage, wenn sie neue und bestehende Techniken zur Überprüfung der Korrektheit von Software und Hardware von Unterwasserrobotersystemen erforschen. Schließlich werden wir nicht in der Lage sein und es ist nicht beabsichtigt, den menschlichen Bediener vollständig zu ersetzen, wenn es darum geht, intelligente Roboter in Unterwasserumgebungen einzusetzen. Tatsächlich werden diese neuen Systeme erweiterte Werkzeuge für menschliche Bediener sein, die ihnen helfen werden, die Qualität der Arbeit, die sie leisten, zu verbessern, oder die es ihnen ermöglichen werden, Dinge zu tun,

die sie bisher nicht tun konnten, oder die es ihnen ermöglichen werden, Dinge zu tun, die sie bereits getan haben, aber mit weniger oder keinen zerstörerischen Eingriffen und schließlich wird es den menschlichen Bedienern ermöglichen, viel mehr Informationen über diese zerbrechliche und doch unerbittliche und harte Umgebung zu sammeln. In jedem Fall müssen Menschen und Roboter effizient interagieren, was im Fokus von Kirchner et al. steht, wenn sie neue und innovative Techniken zur Interaktion mit Unterwasserrobotersystemen beschreiben.

Bremen, Deutschland
Juni 2019

Frank Kirchner

Inhaltsverzeichnis

Unterwasserroboter: Herausforderungen und Anwendungen	
Eine Übersicht über Herausforderungen und Potenziale für KI-Technologien	3
Frank Kirchner	
Intelligente Sensortechnologie: Ein „Muss“ für die Meereswissenschaft des nächsten Jahrhunderts	19
Philipp Fischer	
Herausforderungen für Tiefseeoperationen: Eine Branchenperspektive	39
Daniel Motta, Leone Andrade, Luiz Brêda Mascarenhas und Valter E. Beal	
Systemdesign, Dynamik und Kontrolle	
Intelligente Haut – fortgeschrittene Materialien und Fertigung für einen modularen und vielseitigen Rumpf	55
Ralf Bachmayer und Dorothea Stübing	
Modulares und rekonfigurierbares Systemdesign für Unterwasserfahrzeuge	65
Marc Hildebrandt, Kenneth Schmitz und Rolf Drechsler	
Intelligenter Antrieb	77
Ralf Bachmayer, Peter Kampmann, Hermann Pleiteit, Matthias Busse und Frank Kirchner	
Herausforderungen und Möglichkeiten in der Kommunikation für autonome Unterwasserfahrzeuge	91
Dirk Wübben, Andreas Könsgen, Asanga Udugama, Armin Dekorsy und Anna Förster	

Modulare Unterwassermanipulatoren für autonome Unterwassereinsätze	103
Sebastian Bartsch, Andrej Kolesnikov, Christof Büskens und Mitja Echim	
Intervention und Umweltanalyse	
Maschinelles Lernen und dynamische Ganzkörpersteuerung für Unterwassermanipulation	115
José de Gea Fernández, Christian Ott und Bilal Wehbe	
Adaptive Steuerung für Unterwasser-Greifsysteme	127
Peter Kampmann, Christof Büskens, Shengdi Wang, Dirk Wübben und Armin Dekorsy	
Herausforderungen bei der Unterwasser-Visuellen Navigation und SLAM	137
Kevin Köser und Udo Frese	
Multimodale Unterwasser-Sensorik für Umweltkartierung und Fahrzeugnavigation	149
Peter Kampmann, Ralf Bachmayer, Daniel Büscher und Wolfram Burgard	
Auf dem Weg zu einem Simulations-Framework für Unterwasser-Interventionen	159
Matthias Teschner und Gabriel Zachmann	
Autonomie und Missionsplanung	
Neue Richtungen für die Navigation autonomer Unterwasserfahrzeuge in beengten Räumen	171
Udo Frese, Daniel Büscher und Wolfram Burgard	
Verifizierung für autonome Unterwassersysteme	185
Christoph Lüth, Nicole Megow, Rolf Drechsler und Udo Frese	
Ein interaktives strategisches Missionsmanagementsystem für intuitive Mensch-Roboter-Kooperation	199
Elsa Andrea Kirchner, Hagen Langer und Michael Beetz	

Teil I

Unterwasserroboter: Herausforderungen und Anwendungen

Dieser Teil skizziert einige der Herausforderungen, mit denen Experimentatoren und Betreiber bei der Durchführung von meereswissenschaftlicher Forschung oder Offshore-Projekten, wie Öl, Gas und Windkraft, konfrontiert sind. Kap. 1 untersucht das Potenzial und die Herausforderungen von KI-Technologien im Bereich der Unterwassertechnologie, wo Autonomie ein entscheidender Faktor ist, um wichtige Aspekte zukünftiger maritimer Systemanwendungen zu bewältigen.

Kap. 2 gibt einen Einblick in die Welt der Unterwasserwissenschaft und stellt die Schönheit, aber auch die Zerbrechlichkeit der Unterwasserwelt vor und skizziert die Möglichkeiten für zukünftige Meereswissenschaften mit intelligenten Unterwassersystemen. Der aktuelle Stand und die Herausforderungen bei der Verwendung moderner IT-basierter Sensortechnologie in flachen Wasserbereichen werden zusammengefasst, ebenso wie die Hauptmängel und Fallstricke, wenn moderne Sensortechnologie auf die rauen Bedingungen von Küstengebieten in gemäßigten und polaren Gewässern trifft. Ein bedeutender Teil des marinen biologischen Recruitments, Produktion und Biodiversität steht in Zusammenhang mit den flachen Wasserbereichen bis zu 50 m Wassertiefe entlang der Küstenzonen der Welt, wo Licht bis zum Boden vordringt und eine hochdiverse benthische Gemeinschaft und eine Grundlage für das marine Leben produziert.

Kap. 3 bietet eine weitere Sicht auf die Unterwasserumgebung, indem es die Anforderungen beschreibt, die eine Nutzung der reichen Ressourcen in diesem Bereich stellt, wobei der Fokus auf der Notwendigkeit liegt, minimalinvasiv handeln zu können, um die Ausbeutung ohne massive Eingriffe durchzuführen. Die Industrien suchen kontinuierlich nach neuen Technologien, um ihr Geschäft umweltfreundlicher zu gestalten und es gleichzeitig rentabler und sicherer zu machen. Die umwelttechnologischen Herausforderungen werden diskutiert und ein integrierter multidisziplinärer strategischer Langzeitplan zur Erhöhung der Technologiereife und ihrer allgemeinen Anwendbarkeit wird vorgeschlagen.

Eine Übersicht über Herausforderungen und Potenziale für KI-Technologien



Frank Kirchner

Zusammenfassung Künstliche Intelligenz (KI) hat in letzter Zeit viel Aufmerksamkeit für verschiedene Errungenschaften in Bereichen wie Gesichtserkennung, Verständnis und Produktion natürlicher Sprache sowie in medizinischen Bereichen wie Tumorklassifikation, Herzinsuffizienzprognose und sogar Depressionserkennung erhalten, z. B. in Chockley und Emanuel (J Am Coll Radiol 13(12):1415–1420, 2016, [1]). Die Anwendungsbereiche für KI-Technologien erweitern sich derzeit schnell auf Pharmazie, Finanzen und natürlich Sicherheit in all ihren Formen und Ausprägungen. Was alle oben genannten Bereiche gemeinsam haben, ist die Tatsache, dass wir eine spezifische Art von KI-Technologien anwenden können, die auf der statistischen Analyse riesiger Datenmengen basieren. Dies sind die sogenannten datengetriebenen maschinellen Lernverfahren, deren Leistung exponentiell mit der Menge der für die statistische Analyse verfügbaren Daten steigt. Dabei vergisst man leicht, dass Künstliche Intelligenz tatsächlich ein viel breiteres Feld ist, das bis zum Anfang des letzten Jahrhunderts zurückreicht, als sich Wissenschaftler aus einem viel breiteren Spektrum von Disziplinen mit der Frage der Modellierung intelligenten Verhaltens beschäftigten. Eine Schlüsselfigur in diesem Bereich war Alan Turing selbst, der sich aufgrund seiner Arbeit im Bereich der Berechnungstheorie der Frage zuwandte, die in der Turing-Maschine als universellem Mechanismus bzw. als universelle Theorie für effizient berechenbare Funktionen resultierte. Es war nur konsequent, dass er anfangen würde, über die Menge von Funktionen nachzudenken, die nicht in die oben genannte Klasse fallen, und von dort ist es nur ein kleiner Schritt, über Intelligenz und die möglicherweise zugrunde liegenden Mechanismen zu diskutieren. Abb. 1 zeigt den Ursprung der Künstlichen Intelligenz als Teilmenge eines Spektrums von Disziplinen, das von Ingenieurwesen und Mechatronik

F. Kirchner (✉)

Robotics Innovation Center, DFKI GmbH und Arbeitsgruppe Robotik,
Universität Bremen, Bremen, Deutschland
E-Mail: frank.kirchner@dfki.de

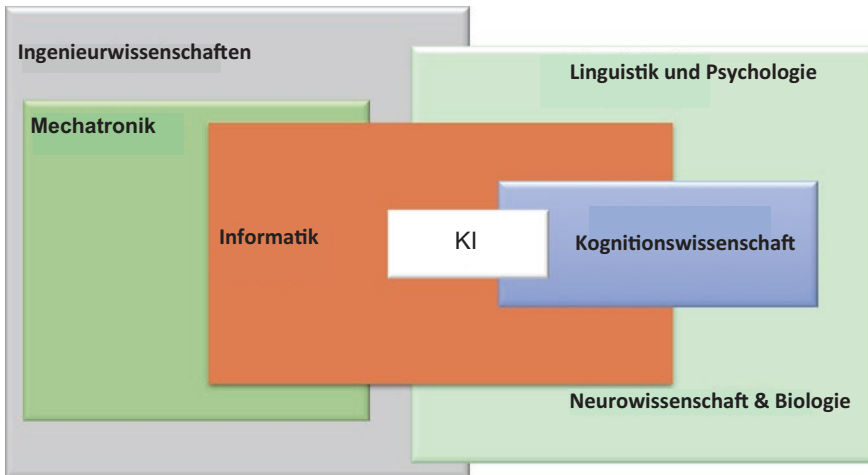


Abb. 1 Künstliche Intelligenz ist die Schnittstelle zwischen Ingenieurwissenschaften und Kognitionswissenschaften, die versucht, intelligente Funktionen in technischen Systemen zu implementieren

über Informatik bis hin zu Kognitionswissenschaften, Neurowissenschaften und sogar Linguistik und Psychologie reicht. Künstliche Intelligenz stellt daher ein Gebiet dar, das für Anwendungen von großem Interesse ist – insbesondere solche Anwendungen, die einen hohen Grad an Autonomie erfordern, wie es die Unterwasserwelt tut.

Das Plädoyer für KI und Robotik

Im Bereich der Unterwassertechnologie ist Autonomie ein entscheidender Faktor, um wichtige Aspekte zukünftiger maritimer Systemanwendungen bewältigen zu können. Die Ozeane und insbesondere der Meeresboden sind ein Reich, das der Menschheit weitgehend noch unbekannt ist. Wie bereits oft darauf hingewiesen wurde, wissen wir viel weniger über den Boden unserer Ozeane als über die Oberfläche des Mars. Andererseits ist es mehr als offensichtlich, dass die Menschheit die Ressourcen benötigt, die die Ozeane bereitstellen. Diese Ressourcen sind enorm und reichen von der Energieproduktion, über die Produktion seltener Erden bis hin zur Nahrungsmittelproduktion für eine Bevölkerung, die in den nächsten 20 Jahren auf 9 Mrd. ansteigen soll. Wenn wir jedoch akzeptieren, dass diese Ressourcen benötigt werden, müssen wir auch akzeptieren, dass wir diese natürliche Ressource so nutzen müssen, dass sie auch für zukünftige Generationen erhalten bleibt. Daher sind Technologien erforderlich, die eine nachhaltige Nutzung der Ozeane als lebenswichtige Ressource für die Menschheit ermöglichen (Abb. 2).



Abb. 2 Robotersystem Waste-Shark. Eine Studie über einen autonomen Roboter zur Sammlung von an der Wasseroberfläche schwimmender Abfall in Häfen und anderen begrenzten maritimen Umgebungen.

Künstliche Intelligenz und Robotertechnologien sind wertvolle Werkzeuge, die wir bereits in hohem Maße beherrschen und die zur nachhaltigen Nutzung maritimer Ressourcen eingesetzt werden können. Diese Technologien müssen jedoch erweitert und weiterentwickelt werden, um wirklich im Bereich der Unterwasseranwendungen anwendbar zu sein.

Diese Erweiterung und Entwicklung wird einige bedeutende Forschungsfragen auf der Seite der aktuellen KI- und Robotertechnologien und -methoden aufkommen lassen. Die Lösungen dieser Fragen werden jedoch nicht nur KI und Robotik erweitern, sondern uns tatsächlich ermöglichen, neue Forschungsrichtungen zu formulieren und daher einige drängende Fragen zu den Perspektiven der Künstlichen Intelligenz selbst zu beantworten (Abb. 3 und 4).

Wenn wir uns den Lebenszyklus eines Unterwasserproduktionsstandortes ansehen (siehe Abb. 5), können wir den Bedarf an intelligenter Technologieunterstützung in jeder Phase des Zyklus skizzieren. Während der Erkundungs- und Prospektionsphase in einem typischen Offshore-Produktionsprojekt können intelligente und insbesondere autonome Robotersysteme Daten von höherer Qualität sammeln, um geeignete Standorte mit geringerem Energieverbrauch zu identifizieren. Ein autonomes System benötigt deutlich weniger Unterstützung von der Wasseroberfläche aus als ein typisches kabelgesteuertes ferngesteuertes Fahrzeug (ROV), so dass die Größe und die Anzahl der Besatzungsmitglieder des Begleitschiffs erheblich reduziert werden können, was zu niedrigeren Erkundungskosten führt – man sollte beachten, dass reduzierte Erkundungskosten auch einen reduzierten ökologischen Fußabdruck bedeuten. Gleichzeitig kann die Qualität der Daten erhöht werden, da der intelligente Roboter in der Lage ist, in der gleichen Zeit deutlich mehr Proben zu nehmen, als dies mit einem ROV möglich wäre, was das Ergebnis intelligenter Pfad- und Missionsplanung ist, die aus KI-Technologien im Bereich der formalen Planung und Ausführungskontrolle abgeleitet sind [3].

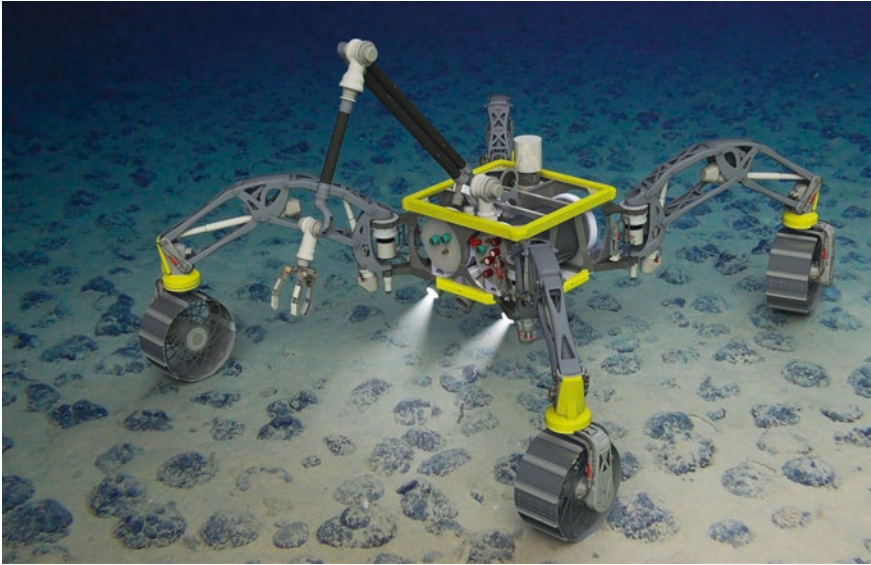


Abb. 3 Eine Designstudie des Unterwasser-Mobilmanipulationssystems Sherpa-UW, das im Robotics Innovation Center des DFKI in Bremen entworfen und gebaut wurde

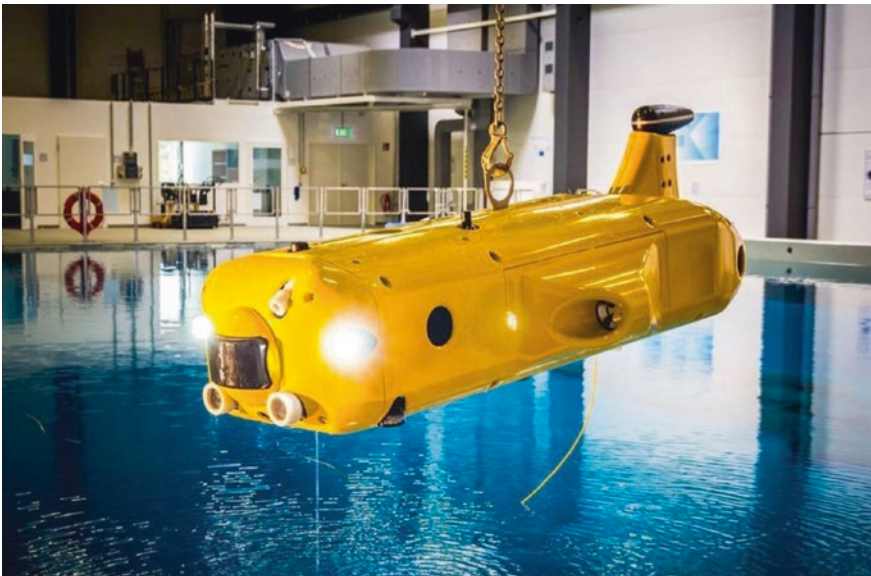


Abb. 4 Das autonome Unterwasserfahrzeug Flatfish, das in einem Kooperationsprojekt mit DFKI RIC, Bremen und SENAI Cimatec, Salvador, Brasilien, entworfen und gebaut wurde [2].

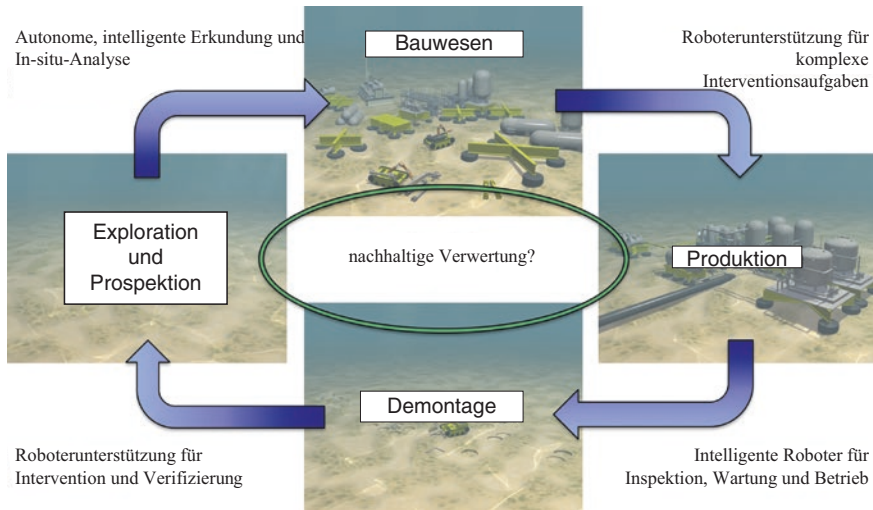


Abb. 5 Lebenszyklus der nachhaltigen Nutzung eines Unterwasserproduktionsstandortes

Angesichts der Fähigkeiten zukünftiger Robotersysteme in Bezug auf die Probenahme an Bord in situ und der Echtzeitanalyse an Bord können wir die Erkundungs- und Prospektionsmissionen noch weiter optimieren, da wir die Eignung des Standortes besser und schneller vorhersagen können. Diese Fähigkeiten resultieren aus der Möglichkeit, Hochleistungsrechenanlagen zu implementieren, die den Einsatz von datengetriebenen tiefen neuronalen Netzwerktechnologien ermöglichen. Gleichzeitig wird das System in der Lage sein, Datenanalysemethoden zur Qualifizierung von Umweltparametern – wie Biodiversität und ökologischem Wert des Standortes – zu implementieren; Parameter, die in den heutigen Ansätzen zur Nutzung eines gegebenen Standortes für die Produktion nicht unbedingt berücksichtigt werden. Wenn diese Parameter heute überhaupt erfasst werden, ist dafür in der Regel eine separate Mission nötig, die Wochen oder Monate später mit zusätzlichen Schiffen und Unterwasserausrüstung erfolgt, was wiederum den ökologischen Fußabdruck erhöht. Die intelligente Robotertechnologie kann dies in einem einzigen Durchgang mit viel höherer Präzision und oft sogar qualitativ besser als ein menschlicher Operator dies aufgrund von Ermüdung und fehleranfälliger durch den Menschen visueller Inspektion tun könnte.

Während der Produktionsphase eines solchen Projekts, die etwa 30 und mehr Jahre dauert, können intelligente Robotersysteme auf Basis von KI-Technologie die Sicherheit und den Schutz des Produktionsstandortes enorm erhöhen. Zukünftige intelligente Robotersysteme können unterseeisch ansässig sein, was bedeutet, dass sie einmal eingesetzt werden und dann monatelang oder sogar jahrelang vor Ort bleiben. Dies ist möglich, weil der Standort entweder Energie produziert oder mit einer Energiequelle verbunden ist, was die Implementierung

von Unterwasser-Stromversorgungs- und -Datenaustauscheinrichtungen (Docking-Station) ermöglicht. Da moderne probabilistische Navigationstechnologie es den Robotern ermöglichen wird, ihren Weg zur Docking-Station autonom zu finden, können sie sich dort jederzeit aufladen und die physische Verbindung zur Docking-Station nutzen, um Hochbandbreiten-Kommunikationsverbindungen mit einer Betreiberzentrale herzustellen. Diese Kommunikationsverbindung kann genutzt werden, um Informationen hochzuladen, die das System während seiner Mission erworben hat, und um neue Missionsparameter für die nächste Reise zu empfangen. Es sollte darauf hingewiesen werden, dass die Betreiberzentrale tatsächlich überall auf der Welt sein kann, da es möglich sein wird, Satellitenkommunikationsverbindungen von einer Oberflächenboje oder von einer an Land gelegenen Einrichtung zu nutzen, die über ein Unterseekabel mit dem Produktions- oder Wissenschaftsstandort verbunden ist. Dadurch wird nicht nur die Menge der Daten, die die Onshore-Betreiber erhalten werden, viel höher sein, sondern auch die Qualität der Daten und damit die Qualität der Integritätsüberwachung im Vergleich zu den heutigen Standards drastisch erhöht sein. Die Systeme werden moderne 3D-Rekonstruktionstechnologien auf Basis von KI-Methoden verwenden, die aus terrestrischen Systemen bekannt sind, wie Struktur aus Bewegung [4], 3D-Vision und multimodale (Laser- und Ultraschall-) Scanning-Techniken [5], um perfekte 3D-Rekonstruktionen der Unterwasseranlagen zu liefern, die selbst kleinste Verformungen in Strukturen oder Defekte in mechanischen Teilen zeigen, bevor sie ein ernsthaftes Problem verursachen können (Abb. 6).

Auch hier wird die Einbindung tiefer neuronaler Netze in der Lage sein, diese Stellen autonom zu identifizieren, so dass menschliche Operatoren nicht stundenlang Videomaterial ansehen müssen, um mögliche Gefahrenstellen zu identifizieren. Tatsächlich können wir moderne Lern- und KI-Techniken nutzen, um das Auftreten von Ausfällen vorherzusagen; eine Technik, die als prädiktive Wartung

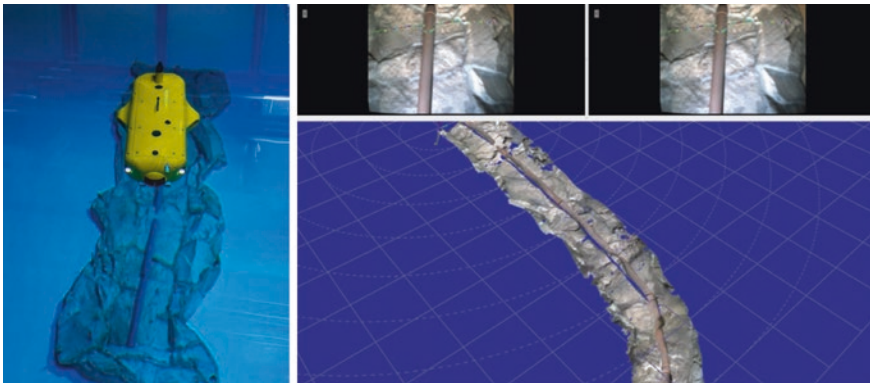


Abb. 6 Der Unterwasserroboter Flatfish während einer 3D-Rekonstruktionsaufgabe (links) und die Ergebnisse des Scannens eines Unterwasserrohrs als 3D-Modell (rechts)

bezeichnet wird und die bereits heute z. B. in Zugsystemen eingesetzt wird [6], um die Kosten (ökologischer Fußabdruck) zu senken und die Sicherheit zu erhöhen.

Da die Systeme unterseeisch ansässig sind, ist ein Operator in einer an Land gelegenen Station darüber hinaus in der Lage den Roboter online anweisen, z. B. zu einem bestimmten Ort zu gehen und Echtzeit- sowie 3D-rekonstruierte Bilder zu liefern, die es dem Operator ermöglichen, virtuell durch seine Unterwasseranlage zu gehen, die möglicherweise Tausende Meilen entfernt und Tausende Fuß unter der Oberfläche liegt. Falls der Operator eine unmittelbare Bedrohung für die Anlage feststellt, könnte er vielleicht schwerere Schäden verhindern, indem er eingreift, z. B. ein Ventil schließt oder einen Hebel dreht. Die zukünftigen Unterwasserroboter-Systeme werden mit KI-fähiger Manipulatortechnologie ausgestattet sein, die es dem Operator ermöglicht, genau das in einem multimodalen Ansatz zu tun. Multimodalität bezieht sich in diesem Fall darauf, dass der Operator nicht nur sehen und hören kann, was passiert, sondern es auch fühlen kann. Dem Operator wird haptische Feedback gegeben, was eine entscheidende Information bei von Menschen gesteuerten Manipulationsaufgaben ist [7], wie jeder bestätigen kann, der jemals versucht hat, eine Mutter auf eine Schraube zu drehen. Beachten Sie hierbei, dass das System in einem Modus der überwachten Autonomie betrieben werden kann. In diesem Modus führen die Systeme viele Aufgaben autonom aus, diese können jedoch bei Bedarf vom menschlichen Operator überschrieben werden (Abb. 7).

In der dritten Phase des Lebenszyklus muss der Standort abgebaut werden. Dies ist die Phase, in der tatsächlich in großem Umfang eingegriffen werden muss. Materialien müssen auseinandergenommen, von einem Ort zum anderen transportiert und in Transportbehälter gehoben werden, um sie an der Oberfläche zu bergen. Hier werden die fortgeschrittenen KI-basierten Manipulationsfähigkeiten zukünftiger Unterwasserroboter eine entscheidende und wichtige Rolle für die Gesamtnachhaltigkeit der Unterwasserausbeutung von maritimen Ressourcen spielen. Zunächst muss erwähnt werden, dass die heutige Unterwasser-Manipulationstechnologie tatsächlich sehr grob ist. Zum größten Teil werden schwere, hydraulische Manipulatoren verwendet, die enorme Kraft haben, aber sehr wenig Intelligenz.

Tatsächlich liegt die Intelligenz vollständig bei den menschlichen Operatoren, die die Systeme über eine Kabelverbindung von einem Oberflächenschiff aus fernsteuern. Es erfordert normalerweise jahrelanges Training und mehrere Operatoren (auf Grund von Ermüdung), um einfach einen Stecker anzuschließen [7] (Abb. 8).

Moderne Unterwasserroboter werden in der Lage sein, ihre fortgeschrittenen KI-Methoden zur Umweltrepräsentation zu nutzen, um hochgenaue 3D-Darstellungen der zu handhabenden Strukturen und Gegenstände zu erhalten. Sie werden Manipulatoren und Greifer besitzen, die nicht nur strukturell in der Lage sind, geschickte und feine Manipulations- und Greifaufgaben auszuführen, sondern auch die nötige Rechenleistung für Algorithmen besitzen, die ihre Manipulations- und Greiftechniken im Laufe der Zeit verbessern, da sie aus früheren Beispielen durch den Einsatz von Maschinenlernverfahren lernen können. Diese Systeme müssen nicht mehr Präzision durch reine Kraft ersetzen, da sie den



Abb. 7 Der Unterwasserroboter Leng. Das System wurde für eine Studie zur Erforschung der Tiefen von außerirdischen Ozeanen eingesetzt (Studie für die deutsche Raumfahrtverwaltung), wurde aber hier verwendet, um Multi-Roboter-Szenarien zu simulieren. Das rechte Bild zeigt den Roboter Leng beim Andocken an den Roboter Sherpa-UW, um große Datenmengen auszutauschen, was über Funkverbindung im Wasser ineffizient ist



Abb. 8 Ein Standard-Industriemanipulatorarm von Shilling Robotics, USA, umprogrammiert und mit taktilen Greifern und Kameras ausgestattet während einer autonomen Objekterkennungs- und Greifaufgabe

besten Weg bestimmen können, ein Objekt zu greifen, und sogar einen stabilen Griff behalten, ohne das Objekt durch Anwendung von mehr Kraft zu quetschen.

Diese Systeme werden viel mehr wie ein Mensch die Aufgabe handhaben, indem sie ein Objekt an der günstigsten Stelle greifen und dabei auch den Schwerpunkt des Objekts berücksichtigen. Tatsächlich werden zwei oder mehr solcher Roboter in der Lage sein, sehr große Objekte in einem Team zu händeln, da sie KI-Technologien aus Multi-Agenten-Systemen [8] nutzen können, um ihre Arbeit zu koordinieren und auf intelligente und aufgabenorientierte Weise zusammenzuarbeiten.

Um die Verbesserungsbereiche der aktuellen Unterwasseranwendung zusammenzufassen, gibt die folgende Auflistung einen Überblick:

- Intelligente Manipulation
 - Systeme zum Austausch von Komponenten in einer Unterwasserproduktionsanlage zu tauschen, Schließen von Steckverbindungen, Einsteckvorgänge, usw.
 - Modulare Dual-Arm-Manipulationssysteme
 - Intelligente Handhabungs-/Austauschsysteme/-prozesse
- Intelligente Mobilität
 - Minimalinvasive Operationen
 - Fortbewegungskonzepte: Gehen, Rekonfiguration
 - Halbautonome Plattform zur Handhabung schwerer Lasten
 - Bewegungskompensation an der Oberfläche (Seegang)
- Bewusstsein: Intelligente Wahrnehmung
 - Mobiler Sensorträger und Planungskomponenten
 - Kombination von akustischen und visuellen Sensorinformationen zur Verbesserung der Navigationsfähigkeiten
 - Physikalisch möglichst genaue Simulation der Unterwasserumgebungen
- Menschen-zentrierte KI
 - KI-basierte Erkundungsplanung
 - KI-basiertes Managementsystem für Multisystem-Produktionsstandorte
 - Multimodale Mensch-Roboter-Interaktion

Die Unterwasserumgebung wird zur Verbesserung von KI und Robotik beitragen

Wie im vorherigen Abschnitt hervorgehoben wurde, ist es offensichtlich, dass KI und Robotertechnologie die Leistung von Unterwassersystemen auf vielfältige Weise verbessern und damit helfen können, Lösungen für Anwendungen von der Meereswissenschaft bis zur Offshore-Energieproduktion und Meereslandwirtschaft zu entwerfen. Die Auswirkungen der Anwendung dieser neuen Technologien in der Unterwasserumgebung werden es uns auch ermöglichen, die Ressourcen der Ozeane auf nachhaltige Weise zu nutzen und diese Ressource für zukünftige Generationen zu erhalten.

Allerdings sind die maritime Forschung und Industrie viel stärker mit den Entwicklungen in der KI und Robotik verbunden, als es auf den ersten Blick scheint: Die spezifischen Herausforderungen der Technologie in Unterwasserumgebungen erfordern die Bewältigung vieler entscheidender Herausforderungen in der KI- und Robotikgemeinschaft, wie im Folgenden skizziert wird.

Tab. 1 zeigt eine Liste von Aufgaben und Herausforderungen, die Unterwasser-robotersysteme lösen können müssen, um für Unterwasseranwendungen geeignet zu sein. In der rechten Spalte stehen die Hürden, die die Unterwasserumgebung für den Entwickler neuer Technologien darstellt. Wie die Liste in der ersten Spalte zeigt, wird tatsächlich jeder Aspekt der Technologieentwicklung berührt: Angefangen bei der Konzeption und Konstruktion der physischen Struktur des Systems, die einem so hohen Druck standhalten muss, dass sie jede Hardwarekomponente zerstört, das versucht, ihnen standzuhalten, bis hin zur Mobilität in einem dichten Medium, das Kräfte auf das System ausübt, die schwer oder im schlimmsten Fall unmöglich standzuhalten sind. Auch die Art und Weise, wie das System die Umgebung im optischen Bereich wahrnimmt, ist stark eingeschränkt, da die Umgebung Streulicht und Sichtbehinderungen in einer für terrestrische Systeme kaum bekannten Art und Weise bietet. Drahtlose Kommunikation unter Wasser ist praktisch kaum möglich und Navigationstechniken haben keine globalen Referenzen, was zusammen den Bedarf an Autonomie auf ein Niveau erhöht, das normalerweise in terrestrischen oder sogar Weltraumanwendungen nicht erforderlich ist.

Die folgende Liste gibt einen Überblick über die wichtigsten Forschungsfelder, in denen Fortschritte erzielt werden müssen, wenn wir KI und Robotertechnologien nutzbringend in einer Unterwasserumgebung einsetzen wollen:

- Systemdesign
 - Druckneutrales Design, Anti-Korrosion, -Fouling
 - Elektroniksteckplätze und Batteriefächer müssen neu gestaltet werden
 - Redundante, verteilte Dataflow-Systeme
- Sensor-Design und Datenanalyse
 - Sensor-Fusionsfilter (jenseits von Kalman)
 - Machine-Learning auf Datenströmen
 - Magnetische Kartographie/Ortung
- Kommunikation
 - Georeferenzierung von Tiefseedaten

Tab. 1 Herausforderungen für KI-Technologie in Unterwasserumgebungen

Technologie	Herausforderung
Design und Konstruktion	Extremer Druck (Inflation, Ölkompensation)
Mobilität	Auftrieb, Widerstand, Strömung
Sicht (Sensorinput, Bildverarbeitung)	Sedimente, maritimer Schnee, Verzerrung, Dunkelheit
Kommunikation (drahtlos)	Schmale bis keine Bandbreite
Navigation	Kein globales Navigationssystem, akustisch, optisch
Kontrolle	Semi-autonom oder autonom

- Wie man durch 10 km Wasser lokalisieren kann
- Semantische Kompression
- Systemarchitektur
 - Langfristige autonome Systeme
 - Lernen und Anpassung
 - Kooperative autonome Systeme
 - Zusammenarbeit mehrerer Systeme
- Intelligente Mobilität und Manipulation
 - Autonome Manipulation/Intervention
- Mensch-Maschine-Schnittstelle und Missionsplanung

Wenn es eine Sache gibt, die die KI- und Roboterforschung von der Anwendung ihrer Fähigkeiten unter Wasser lernen wird, dann ist es die Tatsache, dass wir KI-basierte Roboter ganzheitlich betrachten müssen. Systeme, bei denen es ebenso wichtig ist, sich mit der Hardware des Systems zu befassen wie mit der Software, die die Hardware steuert. Tatsächlich werden die Grenzen noch mehr verwischt sein als bei jeder terrestrischen Anwendung. Der Begriff Hardware-Software-Co-Design, der oft bei terrestrischen Anwendungen verwendet wird, wird zu einem obligatorischen Erfolgskriterium. In keinem anderen Bereich wird die Umgebung das Funktionieren des Systems so stark beeinflussen wie in der Unterwasserwelt. Biofouling und Korrosion werden bis zu zehnmal schneller die Eigenschaften der Hardware verändern, als dieser Effekt an Land bekannt ist. Biofouling wird das System mit Seetang und Muscheln bedecken und die Hydrodynamik des Unterwasserfahrzeugs vollständig verändern (Abb. 9).

Daher wird ein Satz hydrodynamischer Parameter, der in der Erprobungsphase identifiziert wurde, sehr schnell veraltet sein. Die Steuerungssoftware kann dies durch Anwendung von Lernalgorithmen berücksichtigen, was eine Möglichkeit ist, das Problem zu bewältigen. Damit ein adaptiver oder lernender Algorithmus weiß, dass er sich anpassen oder lernen muss, ist es wichtig zu wissen, dass sich etwas geändert hat. Daher wird eine Selbstüberwachung – vielleicht sogar eine Art Selbstbewusstsein der Systeme – für solche Technologien absolut notwendig sein. Probabilistische Navigation im terrestrischen Bereich funktioniert heutzutage sehr gut, da es in der Regel Möglichkeiten gibt, akkumulierte Positions- und Lagefehler mittels globaler Referenzsignale zu korrigieren und zu kalibrieren [9].

Da es jedoch in der maritimen Umgebung keine globalen Referenzsysteme gibt (Satelliten-GPS dringt nicht ins Wasser ein), müssen die Navigationssysteme und die Selbstlokalisierungssysteme dieser Roboter in der Lage sein, ohne solche Unterstützung genau zu navigieren. Dies sind nur einige Beispiele und die Liste könnte leicht erweitert werden.

Was das Problem verschlimmert, ist, dass wir eine lange Liste von Kombinationen von Fähigkeiten betrachten: Das Auslassen einzelner Funktionen, die noch ungelöst erscheinen, wird unmöglich sein, wenn man das Problem genau betrachtet, weil die Lösung in der Kombination und der Fähigkeit zum Lernen

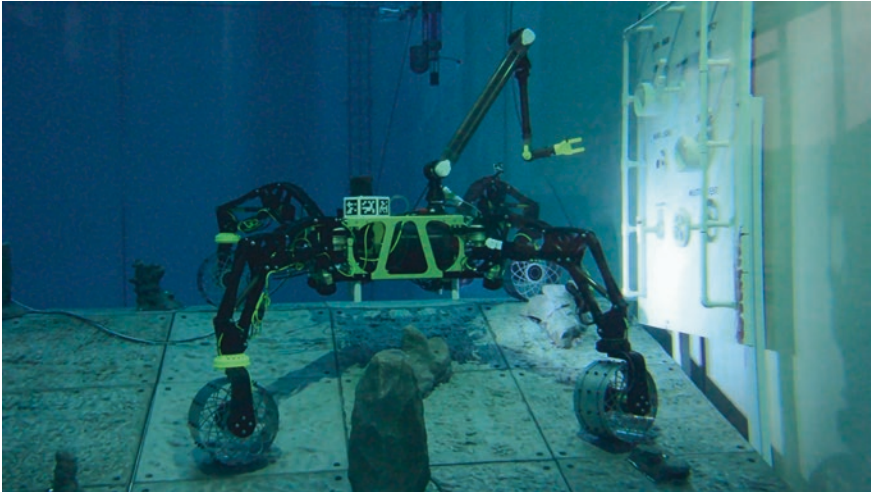


Abb. 9 Der Sherpa-UW-Roboter während einer mobilen Manipulationsaufgabe. Das System navigiert autonom zum Ziel (Offshore-Öl- & Gasinstallation) und verwendet das Greifersystem (System auf dem Foto ist für 6 km Wassertiefe ausgelegt) zur Manipulation eines Hebels an der Installation.

verborgen liegt. Die hydrodynamischen Parameter müssen berücksichtigt werden, um probabilistische Navigation anzuwenden, so dass ohne ein lernendes oder adaptives Mobilitätskontrollsystem keine Navigation und Selbstlokalisierung möglich ist. Um zu lernen oder sich anzupassen, muss ein Selbstüberwachungssystem vorhanden sein, das nicht eingespart werden kann. Es kann nicht einmal auf die Überwachung nur einiger Parameter des Systems reduziert werden, da sie alle miteinander verknüpft sind. Eine Strategie, nur die Hydrodynamik des Roboters zu überwachen, reicht nicht aus, wenn nicht auch der Zustand der Sensoren überwacht wird, die die Hydrodynamik überwachen. Der Sensor, der den Zustand der Sensoren überwacht, muss jedoch auch überwacht werden. Anstatt noch einen weiteren Sensor zu montieren, könnte es ein besserer Ansatz sein, im System eine Form der Langzeit-Leistungsmessung und einen Lernansatz zu implementieren, der lernt, die Fehlfunktion oder abnehmende Leistung eines bestimmten Sensors oder einer Sensorgruppe zu identifizieren, indem alle möglichen Informationen analysiert werden, die das System erzeugt, so dass wir eher von einer frühen Form des Selbstbewusstseins als nur von Selbstüberwachung sprechen [10] (Abb. 10).

Selbstbewusstsein in einem technischen System erfordert ein Architekturmodell, das eine effiziente Implementierung einer solchen Strategie ermöglicht. Diese Modelle sind jedoch keine Ein-/Ausschalt-Systeme. Stattdessen müssen diese Architekturen berücksichtigen, dass die Roboter monatelang oder jahrelang in diesen Umgebungen arbeiten werden und daher müssen wir eine neue Art von

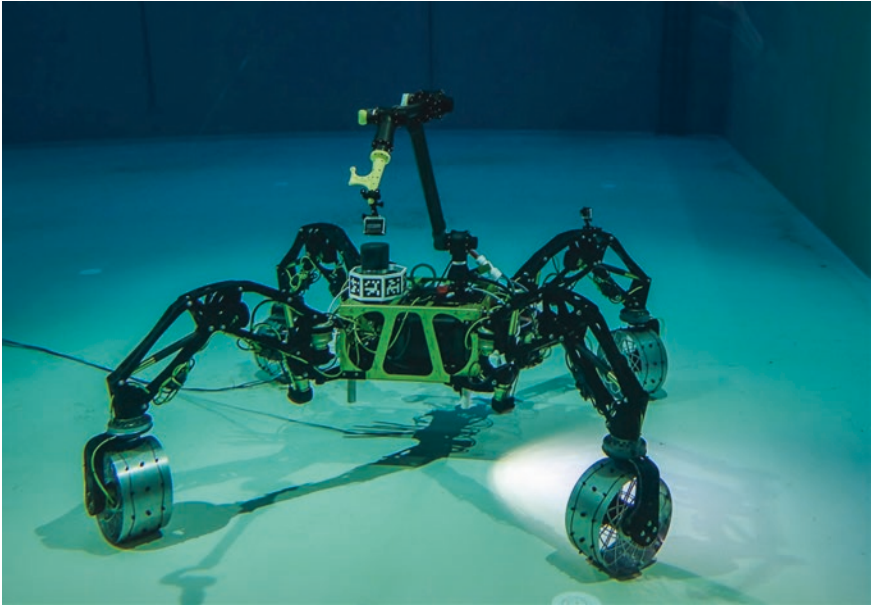


Abb. 10 Der Sherpa-UW-Roboter verwendet eine Kamera zur Selbstinspektion. Autonome Systeme in Langzeitaufgaben müssen Wege finden, um Ausfälle oder Defizite auf der Hardwareseite zu identifizieren (vorherzusagen), um sie bei Navigations- und Manipulationsaufgaben zu berücksichtigen

Architektur anwenden, die eine Gedächtnisbildung und sogar ein Vergessen über lange Zeiträume ermöglicht.

Was dieser Absatz zu sagen versucht, ist, dass es kein halbes KI-Robotersystem gibt, das wir in diesem Bereich anwenden können. Wir haben entweder das volle Spektrum oder wir haben nichts. Die Forschung in den Bereichen KI und Robotik wurde noch nie auf diese Weise herausgefordert.

Was Robotik und KI lernen werden, ist, dass wir es nicht länger Robotik und KI nennen sollten, wir sollten es einfach Robotik nennen. Robotik ohne KI ist eine entfernte Reflexion einer fernen Vergangenheit, als Automaten unsere Autos zusammenbauten, die keine Sensoren und kein Bewusstsein für ihre Umgebung hatten, und als KI ein Spiel war, das von einigen Theoretikern gespielt wurde, die versuchten, Menschen im Schachspiel zu schlagen. Wir sind jetzt auf einer anderen Ebene, wir haben die Unterscheidung zwischen System und Software überwunden, wir müssen erkennen, dass Intelligenz eine Funktion von Körper und Geist ist und die Unterwasserwelt setzt ein großes Ausrufezeichen am Ende der Zeile.

Schlussbemerkungen

Dieses Buch hat Wissenschaftler aus verschiedenen Forschungsbereichen und Teilgebieten der KI mit unterschiedlichen Fachkenntnissen zusammengebracht, um die Möglichkeiten, Herausforderungen und potenziellen Lehren zu diskutieren, die aus der Anwendung von KI-Technologien auf Unterwasserroboter gezogen werden können. Es war nicht das Ziel dieses Buches, fertige Lösungen für die verschiedenen Bereiche und Herausforderungen im Bereich der Unterwasserrobotik zu liefern, sondern das Ziel dieses Buches war es, die Probleme und Herausforderungen zu identifizieren und den Prozess der Einführung von KI-Technologien in das Feld der Unterwasserroboter zu beginnen. In vielen Kapiteln ist die Möglichkeit der Einführung von KI-Technologie sehr offensichtlich und kann auf eine direkte Art und Weise angegangen werden. Daher befassen sich die Kapitel mit Navigation, Sensor-Datenanalyse, Objekterkennung und Vorhersage von System-/Zustandsparametern alle direkt mit den Anwendungen von KI-Technologien.

Es stellte sich als etwas schwieriger heraus zu erklären, wie man KI-Technologien in den Kapiteln anwendet, die sich mit System- und Komponentendesign beschäftigen, aber auch die Mission- und Szenario-Kapitel benötigen mehr als eine direkte Anwendung von bestehenden KI-Technologien. Im Bereich des Systemdesigns können KI-Techniken zur Optimierung von Designs oder zur Minimierung von Energie oder Gewicht oder anderen Systemparametern verwendet werden ... Der wahre Wert und Nutzen für die KI-Forschung ergibt sich jedoch aus der Tatsache, dass das System oder die Komponente selbst als ein Stück künstliche Intelligenz betrachtet werden muss, in dem Sinne, dass das spezifische Design, sogar das spezifische Material, das zur Herstellung der Komponente gewählt wurde, seine Eigenschaften und Möglichkeiten, schließlich einen großen Einfluss darauf haben, was letztendlich durch KI-Technologien erreicht werden kann. Die konkrete Lektion, die auf zukünftige Forschungsrichtungen in der KI hinweist, kommt also aus diesen Kapiteln, die die größten Probleme hatten ... Das Gleiche gilt für die Mission- und Szenario-Kapitel. Hier bestand die Schwierigkeit zunächst darin, zu verstehen, wie Menschen in diese Szenarien integriert werden können. Es war verlockend, an Systeme zu denken, die völlig autonom sind und ihre Aufgabe optimal ohne menschliches Eingreifen erfüllen. Doch das kann hier nicht der Fall sein, da die menschliche Intervention immer notwendig ist und daher die Integration und die Aufgabenverteilung zwischen Mensch und Roboter oder geteilte Autonomieansätze sich als die wichtigsten Qualifikationen für KI im Bereich der Unterwasserrobotik herausstellten.

Wenn wir uns die einfachen oder direkten Fälle ansehen, wie z. B. das maschinelle Lernen der Steuerung komplexer Kinematik oder der Systemdynamik (insbesondere der Hydrodynamik), kann man leicht übersehen, dass das Feedback, das die Unterwasserwelt dem Gebiet der KI im Allgemeinen bringt, tatsächlich viel stärker ist, als es auf den ersten Blick erscheint. Anstatt einfach die KI-Algorithmen oder Werkzeuge auf das gegebene Problem anwenden zu

können, stellte sich heraus, dass die größte Herausforderung in der Integration der abgeleiteten Lösungen mit das Gesamtpaket liegt.

Das bedeutet, dass es vielleicht einfach ist, einen ML-Algorithmus anzuwenden, um z. B. die Hydrodynamik eines gegebenen Unterwasserroboters zu identifizieren, aber diese Lösung ist nutzlos, oder ihr Potenzial wird verschwendet, wenn die Leistungsfähigkeit des gelernten Modells nur für die direkte Navigation und Steuerung genutzt wird und nicht auch in die gesamte Missionsplanung einbezogen wird, indem das hydrodynamische Modell als Parameterlieferant verwendet wird, um z. B. den Energieverbrauch zu minimieren oder sogar Übergabepunkte in geteilten Mensch-Roboter-Autonomieaufgaben zu identifizieren ...

Als abschließende Bemerkung zur Arbeit an diesem Buch kann festgestellt werden, dass die gelernte Lektion sein wird, dass uns dieses Gebiet zwingt, das zu lösen, was auch als das Integrationsproblem in der KI bezeichnet wird. Man könnte argumentieren, dass dies für alle Anwendungsbereiche der KI gilt, aber das ist:

1. nicht wahr: Die meisten Anwendungen beschäftigen sich nur mit der Lösung eines spezifischen Problems und kümmern sich nicht darum, ihre Ergebnisse zu integrieren, einfach weil dies nicht erforderlich oder gefragt ist, und

2. berücksichtigt nicht die wahre Natur dieses Bereichs, denn die Unterwasserwelt ist eine extrem herausfordernde und tatsächlich unnachgiebige Umgebung. Daher muss jede Designentscheidung, egal ob aus der Hardware- oder Software-design, unter dem Gesichtspunkt der Gesamtsystemleistung und des Potenzials für eine langfristige Autonomie oder die Fähigkeit, über lange Zeiträume autonom zu sein, bewertet werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass dieses Buch uns KI-Forscher dazu zwingt, unseren traditionellen Ansatz, Hardware von Software-Design zu trennen, zu vergessen und es wirklich als einen einzigen Entwurfs schritt zu betrachten. Mehr noch, dieses Gebiet zwingt uns, ein weiteres traditionelles Paradigma der Informatik über Bord zu werfen, nämlich die Idee, dass Systeme eine bestimmte Aufgabe erfüllen müssen und dann in den Leerlaufmodus gehen oder ausgeschaltet werden. Dieses Gebiet erfordert tatsächlich, was ich 'niemals abschaltende Systeme' nennen würde, was ein anderes Wort für langfristig autonome Systeme ist. Diese Systeme benötigen Frameworks, die es ihnen ermöglichen, kontinuierlich zu lernen, ihre Erfahrungen zu speichern, damit sie sie in späteren Situationen nutzen können, und schließlich erfordert es Systeme, die viel mehr Wert darauf legen, wie man Wissen organisiert, anstatt wie man neues Wissen erwirbt. Um auf die letzte Bemerkung einzugehen: Es ist nicht möglich, dass ein autonomes Unterwasserfahrzeug eine Million Beispiele dafür verwendet, wie eine Pipeline aussieht, um die Pipeline zu identifizieren. Dies muss in einem einzigen Schuss mit einer minimalen Anzahl von Datenpunkten anstelle von Millionen von Datenpunkten erreicht werden. Daher sind die derzeit so beliebten und umfangreich genutzten datengetriebenen Lernalgorithmen für ein AUV, das mit einer neuen und noch nie zuvor erlebten Situation konfrontiert ist, nutzlos. Das bedeutet nichts anderes, als dass die Unterwasserwelt uns zwingt, KI neu zu denken. Um neue und noch nie gesehene Ansätze zu finden, wird es

das Ziel dieses Buches sein, auf diese Herausforderung hingewiesen zu haben und den Wunsch und den Willen einiger KI-Personen geweckt zu haben, sich dieser Herausforderung zu stellen.

Literatur

1. Chockley K, Emanuel E (2016) The end of radiology? Three threats to the future practice of radiology. *J Am Coll Radiol* 13(12):1415–1420. <https://doi.org/10.1016/j.jacr.2016.07.010>. ISSN 1546–1440. PMID 27652572
2. Albiez J, Joyeux S, Gaudig C, Hilljegerdes J, Kroffke S, Schoo C, Arnold S, Mimoso G, Alcantara P, Saback R, Britto J, Cesar D, Neves G, Watanabe T, Paranhos PM, Reis M, Kirchnery F (2015) Flatfish – a compact subsea-resident inspection AUV. In: OCEANS’15 MTS/IEEE Washington, (OCEANS-2015), 19–22 Oct 2015, Washington, IEEE, 2016, pp 1–8. ISBN: 978-0-9339-5743-5
3. Russell SJ, Norvig P (2003) Artificial intelligence: a modern approach, 2. Aufl., Upper Saddle River. Prentice Hall, New Jersey. ISBN 0-13-790395-2
4. Dellaert F, Seitz S, Thorpe C, Thrun S (2000) Structure from motion without correspondence (PDF). In: IEEE computer society conference on computer vision and pattern recognition
5. United States Patent, Bruce et al. (2014) PatentNo: US8,848,201B1, Sep 30
6. Goriveau R, Medjaher K, Zerhouni N (2016) From prognostics and health systems management to predictive maintenance 1: monitoring and prognostics. ISTE Ltd., and Wiley. ISBN 978-1-84821-937-3
7. Spenneberg D, Christian J, Kirchner F, Fechner S (2007) C-Manipulator: an autonomous dual manipulator project for underwater inspection and maintenance. In: Ocean engineering, Bd 4, January 2007
8. Albrecht S, Stone P (2017) Multiagent learning: foundations and recent trends. In: Tutorial at IJCAI-17 conference
9. Thrun S, Burgard W et al. (2005) Probabilistic robotics: intelligent robotics and autonomous agents
10. Graziano M (2013) Consciousness and the social brain. Oxford University Press. ISBN 978-0199928644

Intelligente Sensortechnologie: Ein „Muss“ für die Meereswissenschaft des nächsten Jahrhunderts



Philipp Fischer

Zusammenfassung Dieser Abschnitt beschreibt die Erfahrungen aus sechs Betriebsjahren von dauerhaft installierten, vollständig ferngesteuerten marinen Sensoren und experimentellen Einrichtungen in den Küstengewässern der südlichen Nordsee und im Polarfjordsystem „Kongsfjorden“ auf Spitzbergen von 2012 bis 2018. Der aktuelle Stand und die Herausforderungen bei der Verwendung moderner IT-basierter Sensortechnologie in flachen Gewässern werden zusammengefasst ebenso wie die Hauptmängel und Fallstricke, wenn moderne Sensortechnologie auf die rauen Bedingungen von Küstengebieten in gemäßigten und polaren Gewässern trifft. Ich konzentriere mich speziell auf die beiden kabelgebundenen COSYNA/MOSES-Observatorien, die das Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Meeres- und Polarforschung (AWI), und das Helmholtz-Zentrum Geesthacht (HZG) gemeinsam in der südlichen Nordsee und im Arktischen Ozean betreiben (Fischer et al. in COSYNA Unterwasserknoten, S. 31–34 [8]; Baschek et al. in Ocean Sci 13:379–410 [1]).

Einführung

Wenn wir allgemein über den Betrieb von Meeressensoren sprechen, denken wir oft an Sensoren, die von Schiffen herabgelassen werden, oder an Sensoren, die auf autonomen Unterwasserfahrzeugen (AUV) oder ferngesteuerten Fahrzeugen (ROV) installiert sind, die ohne Leine im offenen Ozean bis in große Wassertiefen für Stunden und Tage arbeiten können, unterstützt durch ein Versorgungskabel, das Strom und Datenübertragung liefert.

P. Fischer (✉)

Helmholtz Centre for Marine and Polar Sciences, Alfred-Wegener-Institute,
Bremerhaven, Deutschland

E-Mail: Philipp.Fischer@awi.de

Betrachtet man jedoch aktuelle Forschungsschwerpunkte in Biologie und Ozeanographie und speziell im Zusammenhang mit dem Klimawandel, so stellen wir fest, dass insbesondere die flachen Küstengebiete genauso wichtig sind wie der offene Ozean. Obwohl dieses Gebiet weniger als 10 % des Weltmeeres ausmacht, ist ein bedeutender Teil des marinen biologischen Recruitments, Produktion und Biodiversität mit den flachen Wasserbereichen von bis zu 50 m Wassertiefe entlang der Küstenzonen der Welt verbunden, wo Licht bis zum Boden vordringt und eine hochdiverse benthische Lebensgemeinschaft bildet und eine Grundlage für das marine Leben ist. Viele Meeresarten (z. B. Fische) haben eine mehr oder weniger zeitliche Phase in Küstengewässern, auch wenn sie in späteren Lebensphasen vollständig pelagisch sind, und der Begriff „Meroplankton“ beschreibt dabei speziell die gesamte marine Planktongemeinschaft, die zumindest teilweise von benthischen Lebensräumen abhängig ist, meist in den flachen Wasserbereichen unserer Küsten. Auf der anderen Seite werden Küstenlebensräume zunehmend vom Menschen genutzt. Küstenressourcen werden stark ausgebeutet, Küstengewässer werden intensiv für den Transport von Gütern genutzt und Küstengebiete werden immer mehr für die windbasierte Energieproduktion genutzt. Da mehr als 80 % der Menschen näher als 100 km an einer Küstenlinie leben, werden Küstengebiete auch anthropogen verändert, um besiedelte Gebiete vor den Gefahren von Sturmfluten und Überschwemmungen zu schützen, die oft mit dem Klimawandel in Verbindung gebracht werden. Das Verständnis von Küstenmeeresgebieten auf funktionaler Basis ist daher nicht nur für das marine Leben, sondern auch für eine nachhaltige sozioökonomische Zukunft der Menschheit von entscheidender Bedeutung.

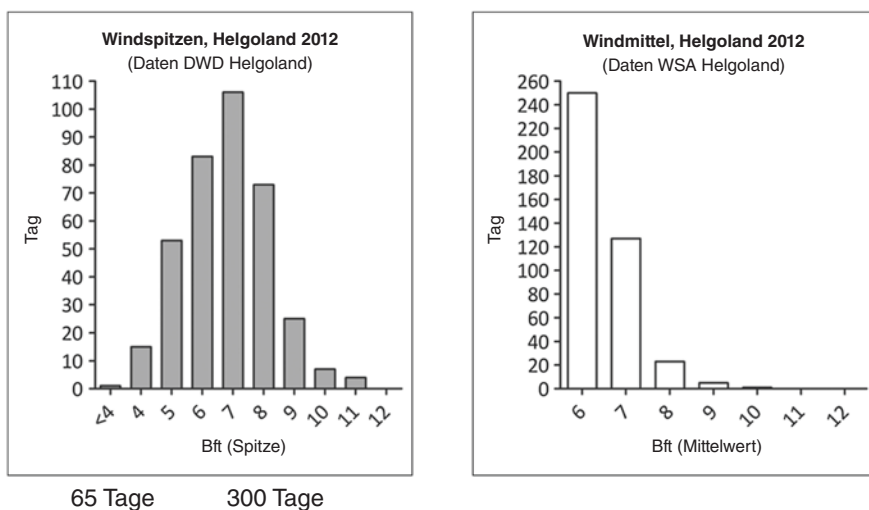
Andererseits ist die Untersuchung von flachen Küstenlebensräumen – insbesondere in gemäßigten und polaren Gebieten – oft nicht nur hinsichtlich der Komplexität dieser Ökosysteme herausfordernd. Viele dieser Gebiete sind als Hochenergiegebiete von rauen Wetterbedingungen sogar über längere Zeiträume im Jahr gekennzeichnet (Abb. 1).

Die Nordsee, (z. B.) als produktivstes und ökologisch und wirtschaftlich wichtigstes Küstengewässer der Nordhalbkugel [15], ist gekennzeichnet durch durchschnittliche Windgeschwindigkeiten von etwa 10 ms^{-1} mit Windspitzen über 5 Beaufort (bft) an mehr als 300 Tagen pro Jahr (Abb. 2, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie – BSH).

Solche rauen Wetterbedingungen reduzieren stark die verfügbaren Tage für Feldmessungen und ozeanographische oder biologische In-situ-Bewertungen, insbesondere in gemäßigten und polaren Küstengebieten, wo oft entweder das Wetter zu schlecht ist, die Temperaturen zu niedrig sind oder kein Licht vorhanden ist und daher intensive Feldarbeit, insbesondere mit kleineren Forschungsschiffen, stark eingeschränkt ist.



Abb. 1 Nordsee (links) und Kongsfjord (rechts) unter normalen Bedingungen.



<http://www.windfinder.com/forecast/helgoland>

Abb. 2 Windstatistiken aus der Nordsee 2012. Dargestellt ist die Anzahl der Tage pro Beaufort-Einheiten (bft).

Die Bedeutung passender Messzeitpunkte

Abb. 3 zeigt ein zusätzliches klassisches Phänomen beim Sampling eines Ökosystems. Die Abbildung (rote Linien) zeigt ein zeitliches Muster, zum Beispiel einer Planktonpopulation innerhalb eines Tageszyklus. Jeden Tag zeigt die Population ein Maximum und ein Minimum an Häufigkeit, vielleicht mit einem Maximum in der Nacht und einem Minimum während des Tages.

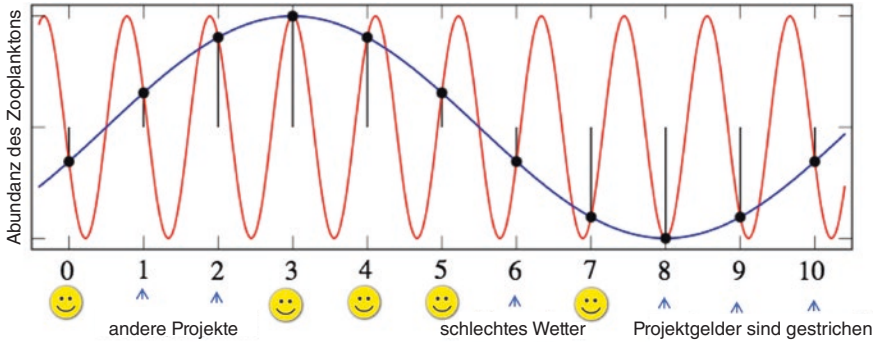


Abb. 3 Das Nyquist-Abtasttheorem: Alias-Abtastung (blau) bei der Abtastung einer realen Situation (rot) mit einer „falschen“ Frequenz.

Die blaue Linie zeigt hingegen, was passiert, wenn wir die Population einmal am Tag beproben. Wir erhalten ein regelmäßiges und perfektes sinusförmiges Muster in den Proben, aber dieses sinusförmige Muster hat nichts mit einer realen Fluktuation der Organismen zu tun. Wir nennen dies Alias-Sampling, das durch das sogenannte „Nyquist-Theorem“ beschrieben wird, das besagt, dass wir nur ein bestimmtes zeitliches Muster in einer Population erkennen können, wenn wir diese Population mit mindestens der doppelten Frequenz beproben, wie das reale zeitliche Muster auftritt. In der realen Welt ist die Situation sogar noch kritischer, weil wir oft nicht einmal eine regelmäßige Abtastfrequenz garantieren können, wie sie in der blauen Linie gezeigt wird. Die Skizze zeigt, dass am ersten Tag die Probenahme erfolgreich war. Am zweiten und dritten Tag war das Schiff von einem anderen Projekt gebucht. Von Tag drei bis fünf konnten wir aufs Meer hinaus, aber am sechsten Tag waren die Wetterbedingungen zu schlecht. Dann war es am achten Tag möglich, weitere Proben zu nehmen, aber von diesem Tag an wurde keine weitere Finanzierung gewährt. Insgesamt standen nur fünf Proben zur Verfügung. Auf der Grundlage dieser Daten hatten wir nicht einmal die Chance, das wirkliche Muster hinter dem Alias-Muster zu entdecken. Das bedeutet, wir müssten viel häufiger Proben nehmen, wenn wir es entdecken wollen. Mathematisch gesprochen, ist die Leistungsfähigkeit des Sampling-Schemas weit von ausreichend entfernt und kommt nicht annähernd an eine ausreichende Leistung heran.

In Küstengebieten ist dieser Mangel an Daten im Vergleich zu offenen Ozeangewässern jedoch noch kritischer. Während im offenen Ozean hervorragende Modelle und gründliche prädiktive Forschungskapazitäten für den Zweck der Berechnung und Vorhersage funktionaler Beziehungen zwischen ozeanographischen Dynamiken und der damit verbundenen Biota in der Wassersäule sogar über größere Skalen verfügbar sind, sind diese Fähigkeiten in Küstengebieten viel begrenzter. Küstenökosysteme sind räumlich und zeitlich hochdivers und verschiedene „Ökosysteme“ (Hartbodenbereiche, Seegraswiesen usw.) befinden sich oft im selben Gebiet, agieren aber dennoch als getrennte

„funktionale Einheiten“. Das Verständnis von Küstenprozessen und Ökosystemfunktionen bedeutet daher oft, die zahlreichen interagierenden Umweltvariablen nicht nur während einer einzigen Probenahmekampagne, sondern über einen längeren Zeitraum und unter verschiedenen Umwelt- und hydrographischen Bedingungen zu bewerten. Ein integratives Prozessverständnis von flachen Küstengewässern hängt daher von einer vergleichsweise hohen zeitlichen und räumlichen Datenverfügbarkeit ab. Diese Datenverfügbarkeit ist jedoch oft nicht gegeben: aufgrund fehlender Fahrtzeit für Küstenüberwachungsprojekte, aufgrund schlechter Wetterbedingungen für solche Fahrten und schließlich aufgrund der Tatsache, dass wir einfach kein wissenschaftlich basiertes Messnetz haben, das Küstenlinien in einer ausreichenden zeitlichen und räumlichen Auflösung abdeckt.

Stand der Technik in der Technologie bei kabelgebundenen Unterwasserobservatorien

Angesichts dieses Bedarfs an besserer und zuverlässiger Datenabdeckung an vielen unserer Weltküsten haben sich Unterwasserobservatorien in den letzten Jahrzehnten entwickelt [12]. Während die meisten dieser Observatorien wie z. B. MARS (Monterey Accelerated Research System) (<https://www.mbari.org/at-sea/cabled-observatory/>), VENUS (Victoria Experimental Network Under the Sea) [4], NEPTUNE (North-East Pacific Time-series Undersea Networked Experiments) [3] oder ALOHA [5, 10] im tiefen Ozean installiert wurden [3], wurden einige von ihnen auch für Anwendungen in flachen Gewässern konzipiert, wie das kabelgebundene Observatorium „SmartBay“ in der Galway Bay, Irland, in etwa 22 m Wassertiefe (<https://www.smartbay.ie>), das kabelgebundene Observatorium EMSO-Molène (<https://www.emso-fr.org/fr/EMSO-Molene/Infrastructure>) im Atlantik in etwa 18 m Wassertiefe, die Mittelmeerobservatorien EMSO-Nice in etwa 21 m (<https://www.emso-fr.org/fr/EMSO-Molene/Infrastructure>) und das Observatorium OBSEA in 20 m Wassertiefe (<https://www.upc.edu/cdsarti/OBSEA/about/overview.php>).

Es besteht kein Zweifel daran, dass ferngesteuerte, kabelgebundene Unterwasserobservatorien eine aufkommende Technologie ist, die perfekt ergänzend zu intensiven schiffsbasierten Probenahmekampagnen, insbesondere in den flachen Küstengebieten, eingesetzt werden kann. Nähert man sich der Küste aus einer ozeanischen Perspektive, so erhöht sich die ozeanographische und biologische Komplexität oft um mehrere Größenordnungen, so dass die meisten Modelle die flachen Küstengebiete aufgrund eines Mangels an Vor- oder sogar Nachhersagekapazität ausschließen. Um die Verlässlichkeit und die Vorhersagepräzision moderner ozeanographischer und biologischer Modelle für die Küste zu erhöhen, werden oft Datenassimilationsverfahren in Küstenmodelle eingebunden, die die Aufnahme von aktuellen Echtzeit- oder nahezu Echtzeit-Sensordaten in die Modelle ermöglichen. Diese Verfahren erfordern jedoch genaue und präzise Sensordaten von Stationen, die das ganze Jahr über betrieben werden.

Erfahrungen mit der Technologie der kontinuierlichen Unterwasserbeobachtung

In diesem Abschnitt beschreibe ich ausgewählte Aspekte, Erfahrungen und zukünftigen Bedarf an Infrastruktur- und Technologieentwicklung, um eine bessere Nutzung und Integration moderner IT-Technologie in der Küstenforschung zu ermöglichen.

Bevor wir auf die großen Bedürfnisse und Herausforderungen in der technologischen Entwicklung in den Küstenwissenschaften eingehen, ist es am wichtigsten, die Auswirkungen der marinen Umwelt selbst auf diese technologischen Entwicklungen zu thematisieren. Unsere Erfahrungen in den letzten Jahren haben deutlich gezeigt, dass viele technologische High-End-Sensoren im Labor und auch unter kurzfristigen Testbedingungen verlässlich funktionieren, jedoch bei Langzeitbetrieb – insbesondere unter den oft harten Umweltbedingungen in Küstengebieten – versagen. Dies ist besonders kritisch, wenn Sensoren oder andere wissenschaftliche Geräte ferngesteuert in Gebieten eingesetzt werden sollen, in denen über längere Zeiträume des Jahres kein direkter Zugang möglich ist, z. B. in den Polar- oder Tiefseegebieten. Leider gibt es jedoch einen erheblichen Mangel an In-situ-Teststandorten in deutschen und europäischen Gewässern, an denen maritime Unterwassertechnologie über längere Zeiträume unter realistischen Bedingungen gründlich getestet werden kann.

Um diesen Mangel an Testmöglichkeiten für maritime Sensortechnologie zu überwinden, haben das AWI zusammen mit dem Helmholtz-Zentrum Geesthacht (HZG) im Jahr 2010 ein Unterwasser-Experimentierfeld namens „MarGate“ [8] nördlich von Helgoland in der südlichen Nordsee (Abb. 4) eingerichtet.

Dieses Unterwasser-Experimentierfeld befindet sich bei N 54° 11.000/E 07° 52.00 (WGS84) etwa 500 m nördlich von Helgoland in 5–10 m Wassertiefe (abhängig von der Tide) und hat eine Größe von etwa 300 m mal 100 m. Es wurde ursprünglich als Untersuchungsstätte für die Auswirkungen künstlicher Küstenschutzmaßnahmen auf die benthische Fisch- und Makroinvertebratengemeinschaft entworfen [14–18]. Für dieses laufende wissenschaftliche Projekt wurden sechs 2,5 m hohe Tetrapodenfelder (vierfüßige Betonwellenbrecher, siehe Grafik) in 5 und in 10 m Wassertiefe ausgebracht (mit Unterstützung der Baufirma HC Hagemann Hamburg, Deutschland), die als künstliche Teststrukturen dienen. Im Sommer 2012 wurde das MarGate-Feld durch die Installation des ersten deutschen Unterwasserknotensystems, das im Rahmen von COSYNA (Coastal Observatory of the Northern and Arctic Seas) entwickelt wurde, erheblich aufgewertet und seit 2017 ist das Feld Teil des MOSES-Projekts (Modular Observation Solutions for Earth Systems). Heute bietet dieses System kontinuierlichen und steuerbaren Strom- und Netzwerkzugang unter Wasser an 10 getrennten unterwassersteckbaren Docking-Ports, die jeweils 48 V/200 W und 100 Mbit/1 Gbit Netzwerkverbindung bereitstellen. Jeder Port kann individuell angesprochen und von seinem registrierten Benutzer (=Sensorbesitzer) von überall auf der Welt gesteuert und verwaltet werden, um auch komplexe Sensoreinheiten vollständig aus der Ferne zu steuern und zu verwalten (Abb. 5).

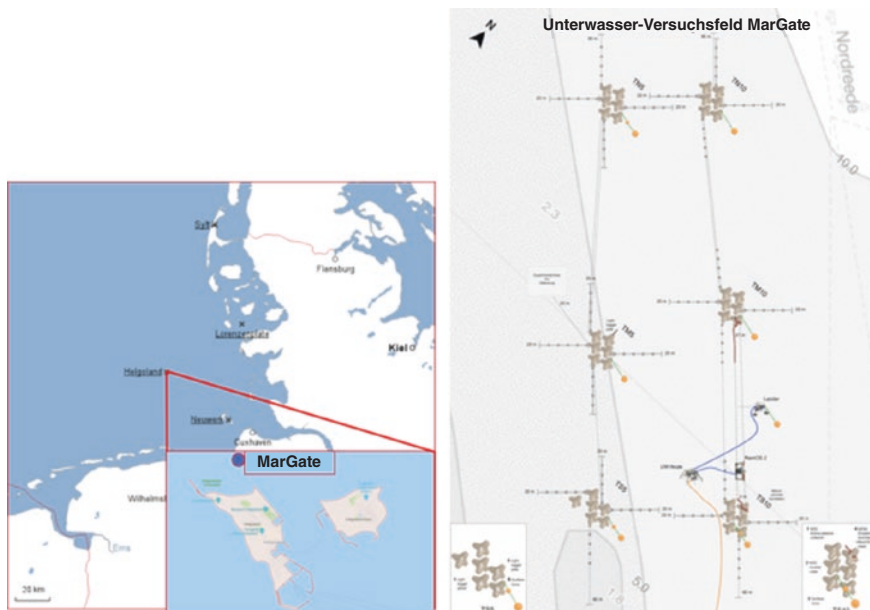
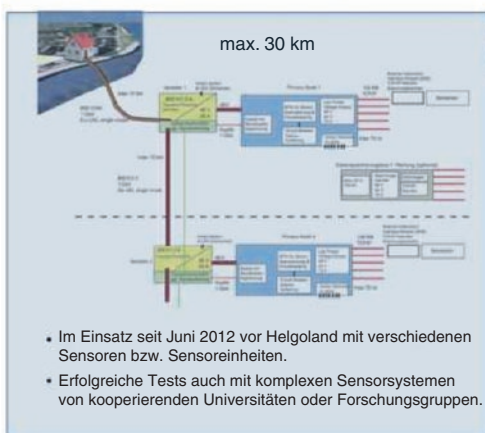


Abb. 4 Experimentiergebiet MarGate vor Helgoland. (Foto Alfred-Wegener-Institut)

Helgoland: Hauptunterwasserknoten, Steuerung, Datenspeicherung und Datenportal zum COSYNA-Server.



AWIPEV: UW-Testsystem in der Arktis (Kongsfjord)



Abb. 5 Allgemeine Aufstellung der COSYNA kabelgebundenen Unterwasserobservatorien

Um hydrographische Parameter aus dem Gebiet zu überwachen, betreibt das AWI mehrere Sensorsysteme für die wichtigsten abiotischen und biotischen Variablen (Temperatur, Salzgehalt, Tiefe, Gezeiten, Trübung, Sauerstoff, Chl-a-Fluoreszenz, 3D-Strömung) in nahezu Echtzeit (etwa 1 h Verzögerung). Darüber hinaus bietet das AWI „Zentrum für wissenschaftliches Tauchen“ ganzjährige Unterstützung durch hoch qualifizierte wissenschaftliche Taucher für die Einrichtung und Wartung der Sensoren und Versuchsaufbauten in dem Gebiet.

Seit 2010 wurden zahlreiche nationale und internationale Studien (einschließlich Bachelor- und Masterarbeiten) auf dem Unterwasser-Experimentierfeld „MarGate“ durchgeführt; von kurzfristigen Studien, die nur einige Wochen dauerten, bis hin zu Langzeitstudien, die über mehrere Jahre geplant und durchgeführt wurden.

Von 2015 bis 2018 wurde das Unterwasser-Experimentierfeld MarGate als offizieller mariner Unterwasserteststandort des EU-Projekts JERICO-NEXT eingestuft, das finanzielle Unterstützung für den internationalen Zugang gewährte. Ab 2019 sind sowohl der Unterwasserteststandort MarGate als auch das Unterwasser-observatorium vor Spitzbergen offiziell als marine Unterwasserteststandorte des EU-Projekts JERICO 3 anerkannt, dem Nachfolgeprojekt von JERICO-NEXT.

Basierend auf den Erfahrungen mit dem oben beschriebenen Testfeld MarGate in der südlichen Nordsee hat das AWI-HZG-Konsortium einen zweiten polaren Unterwasserteststandort, das „AWIPEV-Unterwasserobservatorium“, im arktischen Fjordsystem Kongsfjorden bei N 78° 54.200/E 11° 54.00 (WGS84) im Jahr 2012 in etwa 12 m Wassertiefe installiert (Abb. 5 und 6). Genauso wie in der südlichen Nordsee ist der Standort auch mit einem kabelgebundenen Unterwasser-observatorium für den kontinuierlichen ganzjährigen Sensorbetrieb und in situ experimentelle Aktivitäten ausgestattet.

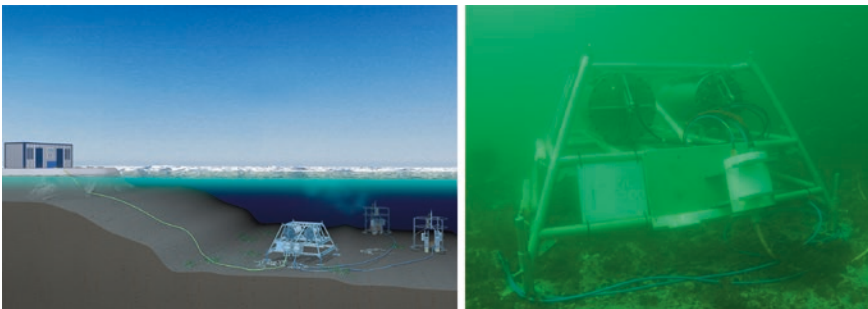


Abb. 6 Skizze (links) und reales Bild (rechts) der Aufstellung des AWIPEV-Unterwasserobservatoriums im Kongsfjorden, Spitzbergen

Fortschritte in der Umweltwissenschaft durch verkabelte Observatorien

Das Hauptziel der aktuellen Aktivitäten zur Entwicklung und zum Betrieb von kabelgebundenen Unterwasserobservatoriumstechnologien an den Helmholtz-Zentren AWI und HZG besteht darin, einen dauerhaften Zugang zu klimawandel-relevanten Schwerpunktforschungsgebieten auch unter extremen Bedingungen zu gewährleisten, z. B. bei starkem Wind oder Sturmbedingungen in der südlichen Nordsee oder bei winterlichen Bedingungen im Arktischen Ozean. Dieser permanente Zugang ist von größter Bedeutung, um die zeitlich begrenzte Sicht auf die im Forschungsfokus stehenden Ökosysteme während relevanter Phasen zu überwinden.

Abb. 7 zeigt z. B. ein voll funktionsfähiges optisches Sensorsystem, das speziell für den kabelgebundenen ferngesteuerten Betrieb entwickelt wurde und ganzjährigen Zugang zum Flachwasserökosystem des Kongsfjorden auf Spitzbergen ermöglicht. Das System verwendet stereoskopische Bildanalysealgorithmen, um Organismen höherer trophischer Ebene vollständig ferngesteuert zu „beprobieren“. Die Gerät kann nicht nur die absolute Fischdichte in Individuen pro m^3 messen, sondern auch die Fischartenzusammensetzung und sogar die Häufigkeitsverteilung der Längen ganzjährig in hoher zeitlicher Auflösung. Das System kann ferngesteuert in der Wassersäule bewegt werden und ermöglicht daher eine stratifizierte Probenahme über die Wassersäule hinweg; auch während Zeiten, in denen wir über mehrere Monate im Jahr überhaupt kein Licht haben und Temperaturen bis zu -30°C über längere Zeiträume vorherrschen.



Abb. 7 Unterwasser-Stereoskopie-Observatorium RemOs1 zur Messung von Fischreichtum, Artenzusammensetzung und Häufigkeitsverteilung der Fischlängen

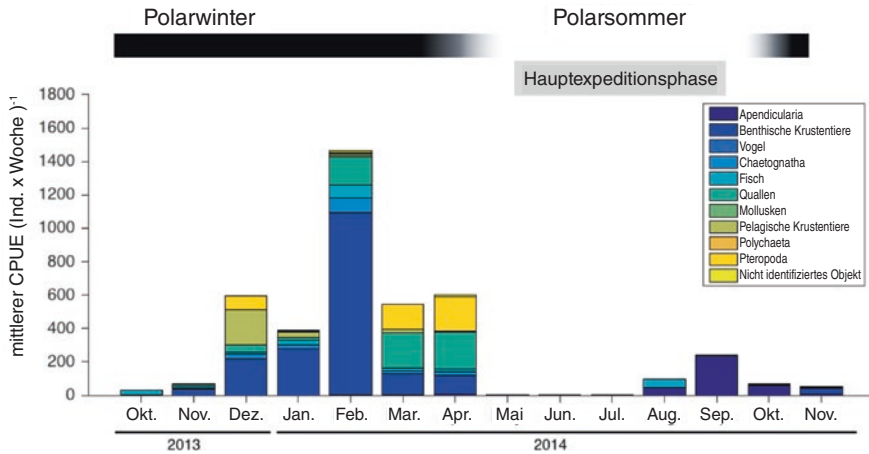


Abb. 8 Fischreichtum und Artenzusammensetzung während der Beprobungskampagne 2013 bis 2014 in einem polaren Fjordsystem auf Spitzbergen (Daten von Fischer et al. [7])

Abb. 8 zeigt die Ergebnisse einer ferngesteuerten Beprobungskampagne von 2013 bis 2014 im Kongsfjorden-System auf Spitzbergen [9]. Auf der x-Achse sehen Sie die verschiedenen Monate über die Probenahmezeit und auf der y-Achse sind Fischreichtum und Artenzusammensetzung in Bezug auf den Fang pro Zeiteinheit, d. h. die Anzahl der Fische pro Probenahmevolumen.

Die Abbildung zeigt ein ausgeprägtes saisonales Muster in diesem Fjordsystem mit maximalen Häufigkeiten im Winter und niedrigsten Werten im Sommer. Über dem Diagramm sind die wesentlichen Expeditionszeiträume im Jahr dargestellt, die im Mai und September liegen. Das Diagramm zeigt deutlich, dass wir in den letzten Jahren genau dann vor Ort waren, wenn Artenreichtum und -vielfalt im System am niedrigsten waren. Durch den Einsatz der oben beschriebenen neuen vollautomatischen ferngesteuerten Sensoren konnten wir das Ökosystem das ganze Jahr über beobachten. Auf der Grundlage dieser Daten diskutierten wir unsere Probenahmestrategien und Optionen zur Verbesserung dieser Diskrepanz zwischen wissenschaftlicher Probenahme und realer ökologischer Gemeinschaftsstruktur. Wir kamen schließlich zu dem Ergebnis, dass wir aus Sicherheitsgründen niemals in der Lage sein würden, klassische Probenahmen mit Schiffen oder tauchergestützten Probenahmegeräten in ausreichender zeitlicher Auflösung während der extremen Bedingungen im Polarwinter durchzuführen. Wir haben daher beschlossen, mehr Zeit, Personal und Geld in die Entwicklung intelligenter, ferngesteuerter, automatisierter Sensoren zu investieren, die es uns ermöglichen, das ganze Jahr über vor Ort zu sein, ohne physisch anwesend zu sein. Ein zweiter wichtiger Aspekt, der bei unserer Diskussion über ferngesteuerte IT-basierte Probenahme im Vergleich zur klassischen direkten Probenahme vor Ort in Betracht gezogen wurde, waren Überlegungen zum Tierschutz. In der oben gezeigten Fernbeprobung haben wir mehr als 5000 Exemplare aus 9 Organismengruppen in einem umweltgeschützten

Polarbereich vollständig nicht-invasiv gezählt, identifiziert und gemessen, ohne ein einziges Tier zu schädigen. Bei der Verwendung klassischer Methoden, wie diskreter Stellnetz- oder Reusenprobenahme, wäre mindestens ein großer Teil dieser Tiere für die Wissenschaft getötet worden, weil sie das Fangverfahren nicht überlebt hätten. Die Verwendung des neuen intelligenten ferngesteuerten nicht-invasiven Probenahmeverfahrens auf der Grundlage von IT und KI kann daher nicht nur vorteilhaft sein hinsichtlich der Probenahmefizienz und einer Reduzierung des in der Feldforschung benötigten Personals, sondern kann auch erheblich zu unserem Ansatz einer nicht-invasiven nachhaltigen Wissenschaft in umweltsensiblen Gebieten und Lebensräumen beitragen. IT- oder KI-basierte Messgeräte werden klassische Probenahmen von Organismen sicherlich nie ersetzen, da einige Analysen echte Proben erfordern. Neue Technologien in der In-situ-Wissenschaft werden uns jedoch die Möglichkeit geben, invasive Probenahmen so weit wie nötig zu reduzieren und diese Methoden durch IT- und KI-basierte nicht-invasive Methoden zu ergänzen.

Neben den oben beschriebenen sehr spezifischen Anwendungen von kabelgebundenen Observatorien und automatisierter Sensortechnologie (z. B. in Studien zu Fischpopulationen) bieten solche Systeme zusätzlich die Möglichkeit, spezifische Bewertungen mit der kontinuierlichen Aufzeichnung zusätzlicher hydrographischer Variablen wie Wassertemperatur, Salzgehalt oder biota-bezogener Parameter wie Chlorophyll a oder photosynthetisch aktiver Strahlung zu vervollständigen (siehe <https://dashboard.awi.de/?dashboard=3760>). Diese Daten, die über längere Zeiträume und mit hoher zeitlicher Auflösung ganzjährig gesammelt werden, bieten die einzigartige Möglichkeit, auch kurzfristige Muster und Dynamiken in Ökosystemen aufzulösen, die niemals mit einer z. B. monatlichen Probenahmekampagne aufgelöst würden. Kurzfristige Ereignisse und ihre Beziehung und Auswirkungen auf langfristige Trends gewinnen jedoch in vielen Umweltwissenschaftsdisziplinen immer mehr an Bedeutung [6, 13] und es wird angenommen, dass sie die Dynamik unseres Erdsystems und die Beziehungen zwischen den Ökosystemen erheblich beeinflussen [2, 11] – siehe auch <https://moses.eskp.de>). Dies ist besonders wichtig in sensiblen Umgebungen wie Küsten-, Polar- oder Tiefseeregionen, die als Schwerpunktforschungsgebiete der Klimawissenschaft bekannt sind, zu denen wir jedoch nur eingeschränkten Zugang aufgrund technologischer oder umweltbedingter Einschränkungen haben und die daher von einem notwendigen regelmäßigen Beprobung ausgeschlossen sind (Abb. 9).

Wissenschaft trifft auf operative Realität vor Ort

Wenn wir über zukünftige Entwicklungen in der Meerestechnologie sprechen, müssen wir jedoch auch sehen, dass wir immer noch große Mängel in der Technologie haben, insbesondere wenn wir über Sensoren für Langzeitexpositionen sprechen. Abb. 10 zeigt eines unserer Unterwasserknotensysteme in der südlichen Nordsee kurz nach der Installation im Juli 2012 und 8 Monate später.

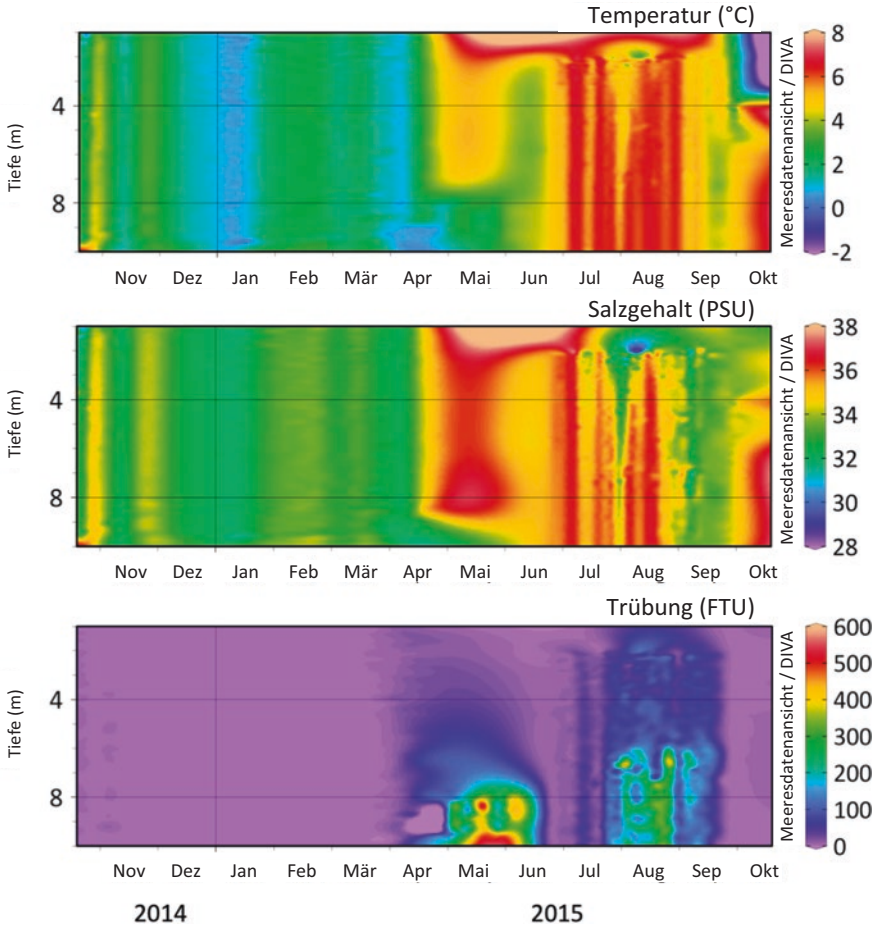


Abb. 9 Temperatur, Salzgehalt und Trübung in einem arktischen Fjordsystem (Kongsfjorden, Spitzbergen) von November 2014 bis Oktober 2015 in einer zeitlichen Auflösung von 1 Hz

Das System wurde im März 2013 nach 9 monatigem Betrieb aufgrund eines vollständigen Ausfalls sowohl der Stromversorgung als auch der Netzwerkverbindung geborgen. Das rechte Bild zeigt die massiven realen Auswirkungen auf das System in Form von Biofouling. Diese Art von massiven Auswirkung der Umwelt auf die Technologie kann kritische Teile des Systems durch eine biologisch induzierte Beschädigung von Kernkomponenten stark beeinträchtigen. Bei dem oben beschriebenen Systemausfall drangen kleine Muschellarven mit einer Größe von nur wenigen Mikrometern in die Unterwasser-Steckverbindungen ein und siedelten sich dort an. Nach nur wenigen Monaten wuchsen die Larven an Größe heran und drückten den Stecker des 1000-V-Steckverbinders aus der Buchse, was zu einem massiven Kurzschluss in der Stromleitung führte. Ein weiteres Beispiel ist in Abb. 11 dargestellt. Dort wird eine sogenannte



Abb. 10 Kernelement des Unterwasserknotensystems kurz nach der Exposition (linkes Bild) und nach 8 Monaten unter Wasser (rechtes Bild)



Abb. 11 CTD-Sensoreinheit nach 8 Monaten Exposition in den flachen produktiven Gewässern der südlichen Nordsee

CTD-Sonde gezeigt, die Temperatur, Salzgehalt, Trübung, Sauerstoff und andere Wasserparameter misst. Nach wenigen Monaten Exposition war der Sensor massiv überwachsen, was zu einer hohen Wahrscheinlichkeit von Sensorfehlern und Datenfehlern während des Betriebs führte. Diese Installationen erfordern daher entweder eine kontinuierliche Wartung und Reinigung oder/und ein hervorragendes Datenmanagement und Datenqualitätskontrollverfahren.

Anforderungen und Visionen für zukünftige wissenschaftliche In-situ-Sensortechnologie

Fasst man die Erfahrungen aus den Jahren 2012 bis 2018 mit langzeitexponierten und ferngesteuerten Sensoren in der Nordsee und in der Arktis zusammen, so haben sich in den letzten Jahren folgende sehr spezifische Anforderungen an IT- und KI-basierte Technologien für Sensoren und deren Support ergeben. Es muss jedoch erwähnt werden, dass die ausgewählten Aspekte nur Beispiele sind und eng mit unserer verwendeten Technologie der kabelgebundenen Unterwasser-observatorien zusammenhängen und die Liste in verschiedenen Bereichen der Meeresforschung unterschiedlich sein kann. Die Aspekte können jedoch als erster Schritt dienen, um einige große Lücken in der verfügbaren marinen IT-Technologie zu identifizieren und zu diskutieren, die in Zukunft möglicherweise durch KI-Lösungen angegangen werden können, unabhängig davon, welcher marine Bereich betrachtet wird. Im zweiten Teil dieses Abschnitts konzentriere ich mich auf einen breiteren Kontext in Bezug auf zukünftige Anforderungen im Bereich der KI-Unterstützung in den Meereswissenschaften. Die diskutierten Themen basieren auch auf unserer Erfahrung in den marinen Küstenwissenschaften, spiegeln jedoch eher eine Vision dessen wider, was KI in den marinen Küstenwissenschaften erreichen kann. Diese Diskussion basiert auf der Erkenntnis, dass unsere technologischen Lücken bei den marinen Sensoren je nach Fachgebiet recht unterschiedlich sind, es jedoch eine Art roten Faden gibt, der die meisten dieser Themen verbindet: Das ist die Tatsache, dass es nicht möglich ist, unter Wasser über größere Entfernungen mit einer höheren Datenübertragungsrate drahtlos zu kommunizieren. Im Vergleich zu terrestrischen oder atmosphärischen Anwendungen, bei denen drahtlose Kommunikation eine Backbone-Technologie in der Fernsensorik und Datenübertragung ist, wird diese Technologie in naher Zukunft nicht für Unterwasseranwendungen verfügbar sein. Daher müssen Sensoren oder experimentelle Geräte unter Wasser entweder kabelgebunden sein, um ferngesteuert zu werden, oder autonom. Bisher bedeutet „autonom“ in den Meereswissenschaften jedoch hauptsächlich, dass einfache Sensoren wie Thermistor-Ketten oder akustische Strömungs-Doppler-Profiler in einem bestimmten Bereich ausgesetzt sind und autonom Daten für eine längere Zeit sammeln. Obwohl in den letzten zwei Jahrzehnten eine erhebliche Verbesserung des Autonomiegrades von Sensoren erreicht wurde und heute sogar autonome Unterwasserfahrzeuge (AUV) kommerziell erwerblich sind, bedeutet Autonomie immer noch, dass eine einzelne Einheit programmiert wird, z. B. um einer bestimmten Spur zu folgen oder innerhalb einer bestimmten Wassersäule „autonom“ zu profilieren. Wissenschaftliche Herausforderungen heute sind jedoch 4D-Karten, z. B. marine hydrografische Grenzen und Gradienten in Wasserflächen, kurz- oder langfristige marine Wirbel, die komplexe 3D-Muster bilden, die sich im Laufe der Zeit ändern, oder die Verfolgung von Plankton- oder Fischschwärmen mit der Zeit, um funktionale Beziehungen zwischen der Hydrosphäre und der Biosphäre in marinen Systemen besser zu verstehen. Dies ist besonders

herausfordernd in Küstengewässern, wo die Komplexität der Unterwasserlandschaft extrem hoch ist und die Artenvielfalt ebenfalls sehr komplex ist.

Spezifische technologische Entwicklungen, die durch künstliche Intelligenz potenziell verbessert werden könnten

1. Unsere Erfahrungen haben deutlich gezeigt, dass die meisten Sensoren für kurze Expositionszeiten von nur wenigen Stunden oder Tagen konzipiert sind und dass diese Sensoren dann nicht für den Langzeitbetrieb geeignet sind. Fast keiner der Sensoren, die wir in Betrieb haben, hat einen effizienten Schutz gegen Biofouling. Leider ist es weit von der Realität entfernt, dass Sensorhersteller solche Mechanismen in naher Zukunft entwickeln werden, denn obwohl das Problem offensichtlich zu sein scheint, ist die Realisierung eines 100%igen Reinigungserfolgs äußerst problematisch. Der einzige Weg bisher für die meisten Langzeit-Sensorbetreiber in flachen produktiven Gewässern besteht darin, Taucher zu den Sensoren zu schicken, um zunächst die verschiedenen Sensoren zu inspizieren, ob eine Reinigung notwendig ist und wenn ja, den Sensor sorgfältig manuell zu reinigen. Bei unseren Installationen, d. h. in der Nordsee, muss dieses Verfahren bis zu einmal pro Woche durchgeführt werden, insbesondere im Sommer, und stellt daher einen erheblichen Zeit- und Personalaufwand dar. Die meisten Sensorbetreiber diskutieren daher die Notwendigkeit intelligenter Sensorreinigungsgeräte, die die Sensoren regelmäßig inspizieren, entscheiden, ob eine Reinigung notwendig ist und wenn ja, die eigentliche Reinigung sorgfältig durchführen und den Sensor selbst nicht beschädigen. Meines Wissens gibt es derzeit kein autonomes System (außer einem ausgebildeten Taucher), das in der Lage ist, diese ungeliebte, aber wesentliche Aufgabe unter Wasser zu erfüllen, um gute und zuverlässige Daten von langzeitexponierten Sensoren zu gewährleisten.
2. Ein weiteres großes Problem bei der zukünftigen Sensorentwicklung ist, dass den meisten Sensoren sogar grundlegende moderne Kommunikationsverfahren fehlen. Heute verfügt selbst die einfachste IT-Ausrüstung, wie z. B. jeder Drucker, über vollständig „intelligente“ automatisierte Technik und Software, um getrennte Verbindung wiederherzustellen, so dass diese nach einem Stromausfall oder einem Verbindungsverlust automatisch wieder verbunden wird. Die meisten industriellen und Verbraucher-IT-Geräte verfügen über Selbstinstallations- und Selbstkalibrierungsroutinen und interagieren mit nationalen oder internationalen Repositories für Treiber, Systemupdates oder Reparaturverfahren. Dies ist leider bei den meisten marinen Sensoren nicht der Fall, die oft nicht einmal die einfachsten Plug-in-Verbindungsverfahren aufweisen. Zukünftige Trends in der intelligenten Sensorentwicklung benötigen daher technologische Innovationen für die Entwicklung von intelligenten Überwachungstechnologien mit Selbstreparaturmechanismen, wenn die Soft-

ware falsch läuft, sowie zuverlässige Alarmfunktionen im Falle eines Kontaktverlusts. Die Meereswissenschaften benötigen dringend diese verbesserten intelligenten Sensortechnologien, die mehr oder weniger unbeaufsichtigt arbeiten, einschließlich Informationsübertragung und -sammlung über Sensor-metadaten und Sensoraktionen, um menschliche Interaktionen und menschliche Fehler im Betrieb von Meeressensoren zu reduzieren.

3. Eine weitere Lektion, die wir in den letzten Jahren des Langzeit-Sensorbetriebs gelernt haben, betrifft die Datenverwaltung und Datenüberprüfungsverfahren, die ebenfalls noch nicht für den langfristig zeitintensiven und kontinuierlichen automatischen Sensorbetrieb ausgelegt sind. Aktuelle Datenverwaltungs- und Datenvalidierungsverfahren basieren noch auf menschlichen Interaktionen und ein ausgebildeter Wissenschaftler muss die Daten manuell betrachten. Heute wird die Validierung von Sensordaten in der Meeresforschung noch durchgeführt, indem Daten manuell geplottet und stundenweise auf einem Datendiagramm betrachtet werden. Dies ist möglich, wenn ein Experiment nur für kürzere Zeiten über 2–3 Tage läuft, aber nicht, wenn ein Sensor oder mehrere Sensoren 24 h am Tag über 365 Tage im Jahr online sind. In der marinen Technologie und Datenverwaltung sind wir weit davon entfernt, modernste Datenanalysen mit maschinellem Lernen oder mit Ansätzen Künstlicher Intelligenz zur automatischen Überprüfung der Datenplausibilität und Validierung zu nutzen. Moderne maschinenbasierte Technologien könnten erheblich zur Datenanalyse beitragen, einschließlich Datenlückenanalyse und Einbeziehung fehlender Daten sowie intelligenter Modellierungsverfahren für Sensordatenprognosen, die für Online-Plausibilitätsprüfverfahren insbesondere in komplexen Daten- und Sensorsystemen verwendet werden können.
4. Eine letzte Lektion, die wir in den letzten Jahren gelernt haben, bezieht sich auf die Analyse komplexer Daten wie hochfrequenter und hochauflösender Unterwasserbilder. Abb. 12 zeigt ein Beispiel für stereoskopische Bilddaten von einem unserer Knotensysteme bei Spitzbergen.

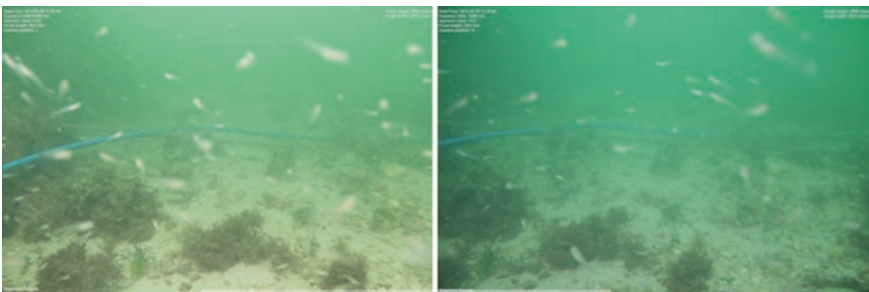


Abb. 12 Linkes und rechtes Bild von einem Unterwasser-Stereoskopie-System zur Messung von Fischreichtum, Fischartenzusammensetzung und Häufigkeitsverteilung der Fischlängen

Die Bilder zeigen einen Fischschwarm, der von den beiden Kameras des stereoskopischen Systems fotografiert wurde. Um die Fische auf den Bildern hinsichtlich ihrer Länge zu analysieren, muss man z. B. den Kopf und den Schwanz jedes Fisches auf dem linken Bild markieren und danach muss der gleiche Fisch auf dem rechten Bild identifiziert werden und der Fisch muss auf diesem Bild erneut markiert werden. Um ein einzelnes Bild zu analysieren, benötigt ein Fischökologe oft fast 30 min pro Bild, wenn ein einzelnes Bild 40 oder 50 einzelne Fische enthält. Für 48 Paare von Bildern pro Tag würde ein ausgebildeter Wissenschaftler 24 h am Tag benötigen, um diesen Datenstrom kontinuierlich und online auszuwerten. Bildanalysebasierte Wissenschaft ist in fast allen wissenschaftlichen Disziplinen sowie im marinen Bereich zunehmend wichtig. Obwohl Bildanalyse-tools und -algorithmen in den letzten Jahren erheblich verbessert wurden, sind die meisten dieser Tools und Verfahren für hochwertigere Bilder an Land konzipiert und versagen vollständig bei den oft nicht gut beleuchteten und manchmal unscharfen Unterwasserbildern. Die Meereswissenschaften benötigen daher definitiv neue und intelligente Tools und Algorithmen für eine schnelle, zuverlässige und größtenteils unbeaufsichtigte Bildanalyse, um das Potenzial der in den letzten Jahren erheblich verbesserten Hardware in der Unterwasserbildgebung besser nutzen zu können.

Bildverarbeitungstechnologie in den Meereswissenschaften unter Verwendung von Künstlicher Intelligenz

Um zukünftige Fragen in den Meereswissenschaften zu beantworten – insbesondere im Kontext des Klimawandels und der prognostizierten Zunahme von Extremereignissen, z. B. in Küstengebieten – ist es höchst unwahrscheinlich, dass wir nur durch eine Erhöhung des Automatisierungsgrades unserer Sensoren erfolgreich sein werden. Die Beantwortung der oben genannten Fragen bedeutet, dass Sensoren, Sensoreinheiten und ihre Trägerplattformen nicht nur vollautomatisiert, sondern auf einem deutlich höheren Niveau „intelligent“ werden müssen. Dies bedeutet, dass z. B. mehrere unabhängige mobile marine Sensoreinheiten während des Betriebs miteinander kommunizieren können, um einen größeren und gitterartigen Supersensor zu bilden, der spezifische Bereiche synchron abdeckt, um hydrographische oder biologische Muster über die Zeit synoptisch zu erfassen. Solche Sensorschwärme müssen darauf vorbereitet sein, den Kontakt zueinander zu verlieren oder sich in mehrere kleinere Schwärme aufzuteilen, falls spezifische hydrographische Muster in kleinere Einheiten zerfallen. In diesem Fall müssen Sensoren z. B. eigenständige Entscheidungen auf der Grundlage von Entscheidungsmatrizen treffen, die zuvor für den gesamten Sensorschwarm entwickelt wurden.

Ein weiterer Fall ist der Bedarf an autonomen Sensoren zur Erkundung der Umwelt unter extremen Bedingungen. Eine große Wissenslücke zum besseren Verständnis der Funktionsweise von Ökosystemen und die Reaktionen auf den Klimawandel (z. B. in der Nordsee oder in den Polarregionen) ist das Wissen über die Dynamik von Ökosystemen unter extremen Bedingungen. Obwohl wir wissen, dass wir in der Nordsee mehr als 300 Tage mit Windgeschwindigkeiten über 5 Beaufort haben, haben wir praktisch keine Daten über das In-situ-Verhalten des Systems und seiner biotischen Komponenten unter Sturmbedingungen. Dieses Wissen ist jedoch dringend notwendig, um ein tieferes funktionales Verständnis der erwarteten Veränderungen des Systems unter Klimawandelszenarien zu erlangen. Zukünftige marine Sensor- und Plattformtechnologie muss Lösungen bereitstellen, die auch mit hydrologischen Bedingungen wie schweren Stürmen in flachen Gewässern umgehen können und sich selbst schützen können, falls die Umweltbedingungen zu problematisch werden, um im Messmodus zu „überleben“. Systeme müssen z. B. in der Lage sein, selbst zu entscheiden, in einen Ruhezustand zu wechseln, „z. B. durch Vergraben im Sediment“, um kritische Phasen eines Sturms in flachen Gewässern zu überstehen und ihre Aufgabe fortsetzen, wenn sich die Umweltbedingungen ausreichend verbessert haben. Solche Systeme müssen auch selbst entscheiden, wann es sinnvoll wäre, von einer Mission zur Energierückgewinnung zurückzukehren, Daten unter Wasser herunterzuladen und auf neue Anweisungen zu warten.

Diese Beispiele sind nur zwei Fälle, die auf unseren Erfahrungen und Diskussionen in den letzten Jahren basieren und geben nur einen kleinen Einblick in Ideen, wie KI-gestützte IT-Sensorik Meereswissenschaften verbessern könnte. Wenn wir uns jedoch diese beiden Beispiele für vorgeschlagene neue Technologien ansehen, müssen wir auch sagen, dass diese Ideen nicht neu sind, sondern schon lange bekannt und in der realen Welt von vielen Fischschwärmen und benthischen Wirbellosen vollständig realisiert wurden. Intelligentes und umweltadaptives Schwarmverhalten, wie es im obigen Beispiel für Fischschwärme beschrieben wurde, wurde bereits vor 20 Jahren unter dem Begriff „Synchronkinese“ bei Heringen [14] veröffentlicht und jeder In-situ-Biologe ist sich der grabenden Krabben in flachen Wasserbereichen bewusst, wenn ein Sturm naht. In beiden Fällen sind sogar die zugrunde liegenden Verhaltens- und physiologischen Mechanismen gut bekannt – sie müssen „nur“ in der Welt der Künstlichen Intelligenz realisiert werden.

Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die oben beschriebenen Erfahrungen aus dem kontinuierlichen Betrieb von zwei kabelgebundenen Meeresobservatorien in flachen Wasserbereichen von 2012 bis 2018 in der Nordsee und im Arktischen Ozean deutlich machen, dass die zukunftsorientierte Meereswissenschaft in der Zukunft viel innovativere und intelligenter Unterwassersensor- und

Sensoreinheitentechnologie benötigt. Dies ist besonders wichtig im Hinblick auf den globalen Klimawandel, da die Auswirkungen des globalen Klimawandels leider am stärksten in den Polargebieten und den gemäßigten Breiten zu spüren sind, die nur teilweise aufgrund klimatischer Einschränkungen zugänglich sind. Aktuelle Forschungsstrategien betonen deutlich, dass ein tieferes und funktionales Verständnis unseres Erdsystems zwingend notwendig ist, um die bevorstehenden klimatischen und anthropogenen Herausforderungen für die Menschheit zu bewältigen und dass diese Herausforderungen nicht in getrennten Disziplinen angegangen werden können. Diese Herausforderungen erfordern einen integrierten Ansatz über wissenschaftliche Disziplinen hinweg, einschließlich Naturwissenschaften, Ingenieurwissenschaften, Künstliche Intelligenz und Computerwissenschaften. Die Anwendung und Anpassung modernster intelligenter Technologien wie schwarmfähige Drohnensensoren – die bereits in den terrestrischen und atmosphärischen Wissenschaften verfügbar sind – auf den marinen Bereich wird die Fähigkeiten der Meereswissenschaften in der Zukunft erheblich verbessern. Aufgrund der sehr spezifischen Anforderungen der Unterwassertechnologie erfordert dieser Transfer jedoch neue kombinierte Forschung in den Bereichen Ingenieurwesen, Informatik und anderen Feldern, die zur Künstlichen Intelligenz beitragen. Die Befähigung solcher vollständig autonomen Systeme unter Wasser, die sogar spezifische Aufgaben auf der Grundlage eigener Entscheidungen je nach Umweltbedingungen ausführen können, würde ein Fenster der Möglichkeiten in den Meereswissenschaften öffnen und unsere Möglichkeiten zur Bewältigung der großen Herausforderungen auf der Erde, wie dem Klimawandel und den damit verbundenen Antworten des marinen Ökosystems, erheblich erweitern.

Literatur

1. Baschek B, Schroeder F, Brix H, Riethmüller R, Badewien TH, Breitbach G, Brügge B, Colijn F, Doerffer R, Eschenbach C, Friedrich J, Fischer P, Garthe S, Horstmann J, Krasemann H, Metfies K, Merckelbach L, Ohle N, Petersen W, Prüfrock D, Röttgers R, Schlüter M, Schulz J, Schulz-Stellenfleth J, Stanev E, Staneva J, Winter C, Wirtz K, Wollschläger J, Zielinski O, Ziemer F (2017) The coastal observing system for Northern and Arctic Seas (COSYNA). *Ocean Sci* 13(3):379–410. <https://doi.org/10.5194/os-13-379-2017>
2. Beniston M, Stephenson DB, Christensen OB, Ferro CAT, Frei C, Goyette S, Halsnaes K, Holt T, Jylhä K, Koffi B, Palutikof J, Schöll R, Semmler T, Woth K (2007) Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections. *Clim Change* 81(S1):71–95. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9226-z>
3. Best MM, Bornhold BD, Juniper SK, Barnes, CR (2007) NEPTUNE Canada regional cabled observatory: science plan, S 1–7. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2007.4449316>
4. Dewey R, Round A, Macoun P, Vervynck J, Tunnicliffe V (2007) The VENUS cabled observatory: engineering meets science on the seafloor, S 1–7. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2007.4449171>
5. Favali P, Laura B, Angelo DS (2015) *Seafloor observatories: a new vision of the earth from the Abyss*. Springer, Berlin

6. Fischer EM, Schär C (2010) Consistent geographical patterns of changes in high-impact European heatwaves. *Nat Geosci* 3:398–403
7. Fischer P, Schwanitz M, Loth R, Posner U, Brand M, Schröder F (2017) First year of practical experiences of the new Arctic AWIPEV-COSYNA cabled Underwater Observatory in Kongsfjorden, Spitsbergen. *Ocean Sci* 13:259–272. <https://doi.org/10.5194/os-13-259-2017>
8. Fischer P, Baschek B, Grunwald M, Schroeder F, Boer M, Reiner L, Klaus-Stöhner J, Boehme T (2014) COSYNA underwater nodes, S 31–34. [https://doi.org/10.1643/0045-8511\(2007\)7\[886:ROTSLG\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1643/0045-8511(2007)7[886:ROTSLG]2.0.CO;2)
9. Fischer P, Schwanitz M, Brand M, Posner U, Brix H, Baschek B (2018) Hydrographical time series data of the littoral zone of Kongsfjorden, Svalbard 2017. Alfred Wegener Institute – Biological Institute Helgoland Pangaea (Dataset). <https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.896170>
10. Howe BM, Roger L, Fred D, David K (2011) ALOHA cabled observatory installation
11. Leaning J, Guha-Sapir D (2013) Natural disasters, armed conflict, and public health. *N Engl J Med* 369(19):1836–1842. <https://doi.org/10.1056/NEJMr1109877>
12. Matabos M, Mairi B, Jrme B, Maia H, Kim JS, Benoit P, Katleen RRHA, Joze S, Michael V (2016) Seafloor observatories, S 306–337. <https://doi.org/10.1002/9781118332535.ch14>
13. Perkins SE, Alexander LV, Nairn JR (2012) Increasing frequency, intensity and duration of observed global heatwaves and warm spells. *Geophys Res Let* 39(20). <https://doi.org/10.1029/2012gl053361>
14. Pitcher TJ, Parrish JK (1993) Functions of shoaling behaviour in teleosts
15. Watson RA, Green BS, Tracey SR, Farmery A, Pitcher TJ (2016) Provenance of global seafood. *Fish Fish* 17:585–595. <https://doi.org/10.1111/faf.12129>
16. Wehkamp S, Fischer P (2012) Impact of hard-bottom substrata on the small-scale distribution of fish and decapods in shallow subtidal temperate waters. *Helgol Mar Res* 67(1):59–72. <https://doi.org/10.1007/s10152-012-0304-5>
17. Wehkamp S, Fischer P (2013) Impact of coastal defence structures (tetrapods) on a demersal hard-bottom fish community in the southern North Sea. *Mar Environ Res* 83:82–92. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2012.10.013>
18. Wehkamp S, Fischer P (2013) The impact of coastal defence structures (tetrapods) on decapod crustaceans in the southern North Sea. *Mar Environ Res* 92:52–60. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2013.08.011>

Herausforderungen für Tiefseeoperationen: Eine Branchenperspektive



Daniel Motta, Leone Andrade, Luiz Brêda Mascarenhas
und Valter E. Beal

Zusammenfassung Die moderne Gesellschaft verlangt nach Gütern und Dienstleistungen, die Ressourcen wie Mineralien und Kohlenwasserstoffe erfordern. Trotz der Forschung und Entwicklung neuer Energiequellen ist die Erkundung und Verarbeitung der derzeit verfügbaren Ressourcen für viele Länder notwendig. Dennoch gibt es viele Herausforderungen, um die negativen Umweltauswirkungen zu reduzieren und sogar in einem wettbewerbsfähigen kommerziellen Szenario umzukehren. In diesem Kontext suchen Industrien kontinuierlich nach neuen Technologien, um ihr Geschäft umweltfreundlicher zu gestalten, während sie gleichzeitig rentabel und sicherer sind. Eine Möglichkeit, die sich der Industrie bietet, besteht darin, neue Öl- und Gasfelder zu erschließen. Darüber hinaus gibt es auch Möglichkeiten, die Betriebskosten der aktuellen Felder zu senken. Dies sind derzeit die Herausforderungen, denen sich die Öl-, Gas- und Bergbauindustrien in Bezug auf Tiefseeerkundungen und -operationen stellen. In diesem Kapitel werden die technologischen Herausforderungen diskutiert, die sich in der Unterwasserumgebung stellen. Weiterhin wird ein integrierter multidisziplinärer strategischer Langzeitplan zur Steigerung der Technologiereife und ihrer allgemeinen Anwendbarkeit vorgeschlagen.

D. Motta (✉) · L. Andrade · L. B. Mascarenhas · V. E. Beal
SENAI CIMATEC, Industrial Technology and Innovation Campus, Salvador, Brasilien
E-Mail: dmotta@fieb.org.br

L. Andrade
E-Mail: leone@fieb.org.br

L. B. Mascarenhas
E-Mail: breda@fieb.org.br

V. E. Beal
E-Mail: valter.beal@fieb.org.br

Einführung

Seit den frühen Anfängen haben die Menschen natürliche Ressourcen genutzt, um Hilfsmittel zu schaffen, die den technologischen Fortschritt für die menschliche Entwicklung unterstützen. Die natürlichen Ressourcen liefern im Grunde alles, was unsere moderne Gesellschaft nutzt und verbraucht: von Düngemitteln, die auf den Feldern zur Lebensmittelproduktion verwendet werden, bis hin zu Hochleistungsmagneten und Batterien, die in den neuesten und fortschrittlichsten Automobilen verwendet werden.

Der Industriesektor ist verantwortlich für die Erforschung, Gewinnung, Verarbeitung und Umwandlung dieser essentiellen Ressourcen in Güter. Es gibt eine lange Lieferkette, die Industrien und Dienstleistungsanbieter umfasst und die Millionen von qualifizierten Arbeitnehmern beschäftigt, um die Entwicklung von Ländern zu unterstützen. Die Gewinnungsindustrien bilden die Basis der Pyramide und stehen vor Herausforderungen, die natürlichen Ressourcen mit geringerem Einfluss auf unsere bereits fragile Umwelt zu erforschen. Darüber hinaus intensivieren der Wettbewerb in der Branche und der Einfluss staatlicher Vorschriften die Herausforderungen, denen sich die Industrien gegenübersehen.

Es gibt mehrere Wege, um den globalen Markt zu führen und die Wettbewerbsfähigkeit zu steigern. Derzeit sind Materialentwicklung, Automatisierung, menschenleere Fabriken, maschinelles Lernen, künstliche Intelligenz, Big Data und Internet der Dinge einige der Technologietrends, die die Industrien auf ihren Roadmaps betrachten. Natürlich überschneiden und verbinden sich all diese Bereiche miteinander. Letztendlich werden alle dazu verwendet, die Betriebskosten zu senken und die Gesamtleistung zu verbessern. Trotz der aktuellen Reife dieser und anderer Technologien kämpfen viele Industrien immer noch darum, wettbewerbsfähig, sauber und profitabel zu sein.

Dies ist bei der Öl- und Gasindustrie (O&G) nicht anders. Angesichts der Bedeutung, die Umweltvorschriften einzuhalten, ist die Entwicklung neuer Technologien zur Durchführung zuverlässiger Operationen entscheidend, um alle Herausforderungen und Anforderungen für diese Branche zu erfüllen. Trotz des Wachstums neuer Energieproduktionen, wie erneuerbaren Energien, werden Tiefseeoperationen für einen langen Zeitraum einen wichtigen Teil der globalen Öl- und Gasversorgung ausmachen. Laut McKinsey & Company werden im Jahr 2030 36 Mio. Barrel pro Tag an neuer Rohölförderung aus noch nicht genehmigten Projekten benötigt, um die erwartete Nachfrage zu decken. Mindestens 30 %, oder 9,5 Mio. Barrel, werden voraussichtlich aus Tiefwasserfeldern kommen [1].

Neben den Öl- und Gasunternehmen sind auch andere Produktionssektoren, wie (beispielsweise) Tiefseebergbau, an Unterwasserlösungen interessiert. Bis Mai 2018 hat die Internationale Meeresbodenbehörde (ISA) 29 Explorationsverträge ausgestellt, die mehr als eine Million Quadratkilometer des tiefen Ozeans abdecken. Die Technologie für den marinen Bergbau und die Umweltüberwachung hat sich schnell weiterentwickelt, und jeder Anstieg der Metallpreise erhöht die kommerzielle Attraktivität des Tiefseebergbaus [2]. Ein weiterer

Bereich, bei dem Unterwassertechnologien benötigt werden, ist die Energiegewinnung. Viele bestehende Techniken zur Energiegewinnung sind unter Wasser nicht anwendbar oder ineffizient.

Die Herausforderungen ähneln stark denen, denen sich die Öl- und Gasindustrien gegenübersehen, und es werden ähnliche Technologien entwickelt werden müssen. In diesem Kapitel werden die Bedingungen in der Tiefsee und die Herausforderungen bei den neuen Fördertechnologien diskutiert. Außerdem wird ein integrierter F&E-Ansatz vorgeschlagen, um die neuen Anforderungen zu erfüllen.

Pre-Salt-Schicht: Ein Beispiel für Herausforderungen

Die Pre-Salt-Ölfelder (fossile Kohlenwasserstoffe, die unter den Salzsichten in der Tiefsee liegen) in Brasilien sind ein Beispiel für die technologischen Herausforderungen, die bei einem Tiefwasserszenario bewältigt werden müssen. Abb. 1 zeigt einige Eigenschaften der Pre-Salt-Felder.

Ultra-Tiefwasser (mehr als 2000 m tief), tiefe Erdöl- und Gaslagerstätten, die sich über sehr große Gebiete erstrecken (tiefer als 5000 m), hohes Gas-Öl-Verhältnis, CO₂-Gehalt, hoher Druck und niedrige Temperatur unmittelbar unter einer dicken Salzsicht (mehr als 2000 m Salz), etwa 300 km von der Küste entfernt mit schweren ozeanischen Bedingungen, das sind einige der Eigenschaften des Pre-Salt-Feldes des Santos-Beckens in Brasilien [3]. Meist liegen diese Lagerstätten in der Nähe von vulkanischen Regionen, so dass das Öl eine Temperatur von bis zu 150 °C hat. Diese erleichtert die Förderung, da das Öl eine mittlere Viskosität aufweist. Dennoch ist es auch eine Herausforderung, diese geologischen Formationen zu erkunden und Bohrlöcher dort zu betreiben [4].

Aufgrund der Eigenschaften des Öls und der Lagerstätten sowie des Umweltszenarios wirft die Exploration von Pre-Salt-Feldern technologische Herausforderungen in mehreren Disziplinen auf. Charakterisierung der Lagerstätten, Ölförderung, Bohrlochtechnik, Flow Assurance, Unterwassertechnologie, Umgang mit CO₂ (und was man damit macht) sowie Logistik für das zugehörige Gas sind einige der Herausforderungen, denen man sich stellen muss [5]. Einige davon werden in den nächsten Punkten besser erklärt.

- *Charakterisierung der Lagerstätten:* In der Explorationsphase müssen die Kohlenwasserstoffe mit verschiedenen und komplementären Technologien zur Datenerfassung (z. B. seismisch und elektromagnetisch) gut identifiziert und charakterisiert werden, und für die Verarbeitung der Daten werden zuverlässige Bildgebungsalgorithmen benötigt [6, 7]. Wenn die Lagerstätten gut charakterisiert sind, kann die Zahl der Explorationsbohrungen reduziert werden, was Millionen Dollar an Investitionen spart. Darüber hinaus kann ein gut erkundetes Feld, vollständiger ausgebeutet werden. Weitere Folgen jenseits der Kosteneinsparungen sind die geringeren Umweltauswirkungen durch weniger

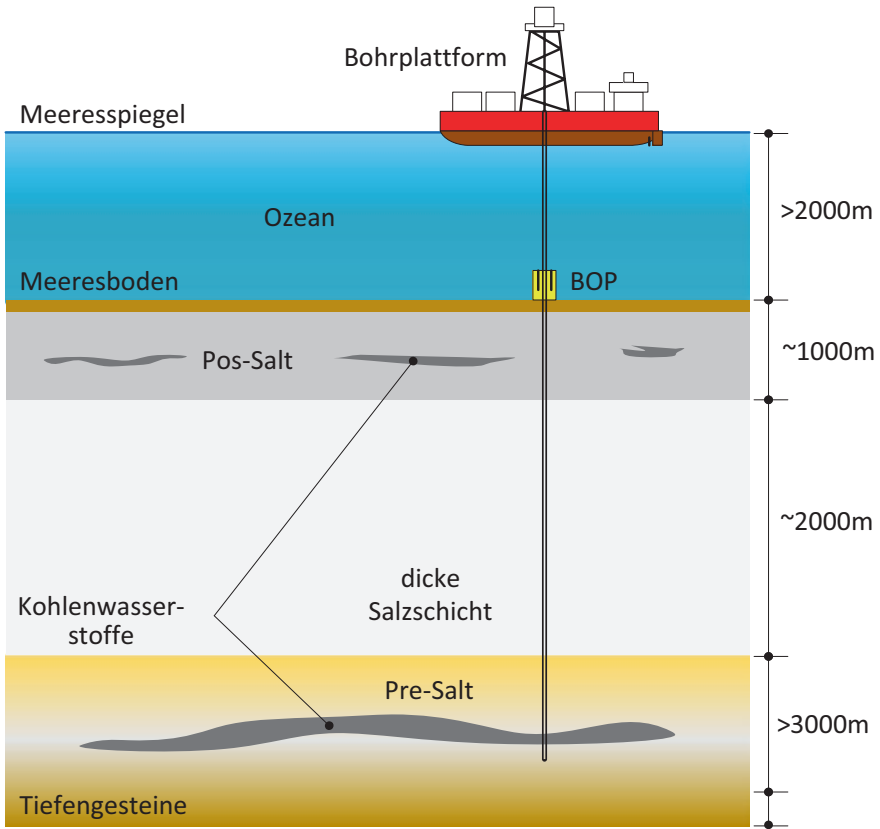


Abb. 1 Eigenschaften der Pre-Salt-Schicht

Bohrlöcher. Dies erfordert jedoch noch Verbesserungen bei den Erfassungsgeräten und -methoden (Quellen und Detektoren, weniger spezialisierte Schiffe) und schnellere Algorithmen, die mit weniger Rechenleistung verarbeitet werden können.

- **Bohrlochtechnik:** Es gibt aktuelle Entwicklungen in der Bohrlochtechnik für die Exploration und Ausbeutung von Pre-Salt-Schichten. Die Herausforderung beginnt bei den Explorationsbohrlöchern und geht bis zur Fertigstellung. Beispielsweise ist das aktuelle Sicherheitsventil, das Blowouts verhindert und das Bohrloch abdichtet, der BOP (Blowout Preventer). Die Größe, das Gewicht und die Komplexität der aktuellen hydraulikbasierten Lösung sind enorm und es fehlt noch an höherer Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit. Die Größe der Bohrplattform hängt von der Größe des BOP ab und sie nimmt zu, wenn das Bohrloch in größerer Tiefe liegt. Daher folgt die Plattform und die Zusatzausrüstung dieser Entwicklung. Die installierten Gehäuse, Zemente, Dichtungen, Säulen, Gleitschläuche, Gasliftventile, Stopfen und viele andere Zubehörteile müssen

widerstandsfähig gegen Kohlendioxid, Schwefelwasserstoff, Temperatur, Temperaturgradient, Korrosion und Erosion sein. Darüber hinaus werden neue Techniken zur Reduzierung der Bohrzeit und zur Reduzierung der Anzahl der Bohrlöcher pro Feld ebenfalls erforscht.

- *Flow Assurance*: Der Ölfluss im Pre-Salt benötigt auch Aufmerksamkeit. Der Druck und die Temperatur in der Nähe des Bohrkopfes begünstigen die Bildung von Hydraten. Darüber hinaus wird die übliche Paraffinadhäsion an den Wänden den Fluss reduzieren. Die unterschiedlichen Dichtegrade, das Vorhandensein von Gas und weitere Parameter können den Fluss reduzieren. Der Einsatz/Einführung von eingespritztem Gas oder Wasser und anderen Chemikalien zur Vermeidung von Paraffin und Hydraten an spezifischen Stellen des Bohrlochs ist ein Ansatz zur Überwindung der Flussreduktion. Dennoch muss eine sorgfältige und präzise Druck-/Flusskontrolle berücksichtigt werden, um zu vermeiden, dass Öl zurückbleibt oder im schlimmsten Fall es zu einem Bruch oder Zusammenbruch des Bohrlochs kommt. Die kontinuierliche Überwachung und Übermittlung von Druck-, Temperatur- und Flussdaten im Inneren des Bohrlochs während des Betriebs ist immer noch eine Herausforderung. Spezielle Elektronik, die den rauen Umgebungsbedingungen standhält, und Wege zur Kommunikation mit der Oberfläche sind entscheidend. Darüber hinaus spielt auch die kontinuierliche Überwachung und Beobachtung der Bohrlochvolumen/Morphologie eine wichtige Rolle bei der 4D-Seismik für den Betrieb des Bohrlochs.
- *Unterwassertechnologie*: Bei der aktuellen Technologie befindet sich die meiste Ausrüstung des Ölfeldes auf der Förder- und Verladeplattform. Die Ausrüstung, die sich zwischen der Plattform und dem Bohrkopf befindet, wird normalerweise hydraulisch angetrieben. Daher müssen viele Steigleitungen vom Meeresboden zur Plattform installiert werden. Verwendete Floater und Verankerungssysteme sind komplex, insbesondere wenn man die Tiefe der Installationen berücksichtigt. Die Kommunikation zwischen der Unterwasser-ausrüstung und der Oberfläche ist nicht leicht. Die Verkabelung ist eine Herausforderung. Unterwassersteckverbinder sind nicht standardisiert und sehr teuer. Hot Swaps sind nicht so einfach möglich, wie sie es beim Einsatz ferngesteuerte Fahrzeuge (ROVs) sein sollten. Neben Temperatur und Salzgehalt beeinflusst die unterschiedliche Geschwindigkeit der Meeresströmungen die Kommunikation mit Schallwellen. Diese sind auch in den Datenraten, die verwendet werden können, begrenzt. Die in der Ausrüstung verwendeten Materialien sind ebenfalls kritisch. Gute temperaturunabhängige Eigenschaften, Ermüdungs- und Korrosionsbeständigkeit und Gewichts-/Volumenreduktion sind erforderlich. Auch die Wetterbedingungen stellen Herausforderungen dar.

Darüber hinaus stellte sich die logistische Unterstützung unter Kosten- und Betriebsaspekten als kritisch heraus. Die Kosten für die Versorgung mit Komponenten auf See und die Sicherheitsaspekte für Arbeiter an abgelegenen Standorten etwa 300 km von der Küste entfernt, haben die Unternehmen dazu ver-

anlasst, sich in Richtung unbemannter, ferngesteuerter Plattformen weiterzuentwickeln.

Die Nachfrage nach Ölförderung an diesen Offshore-Standorten steht erst am Anfang. Laut der ANP – Agência Nacional do Petróleo in Brasilien gibt es derzeit 12 Felder, die in den Pre-Salt-Schichten Brasiliens fördern und die für mehr als die Hälfte der brasilianischen Ölförderung verantwortlich sind. Die Förderung im März 2018 betrug 2,56 Mio. Barrel pro Tag. Die Pre-Salt-Felder waren für 54,7 % davon verantwortlich. Es ist auch beeindruckend, dass das geschätzte Volumen für die 4. und 5. Pre-Salt-Lizenzzunden 30 Mrd. Barrel Öl übersteigt [8].

Unterwasserplattform: Vorteile und Herausforderungen

In einem Szenario wie in Pre-Salt-Gebieten werden unter Wasser liegende Förderplattformen für viele Unternehmen zu einem wichtigen Thema. Die langen Steigleitungen, die Öl, Gas, Wassersand, H_2S (Schwefelwasserstoff) und CO_2 transportieren, sind aus Sicherheits- und Kostenfragen problematisch. Derzeit arbeiten viele Unternehmen daran, Ausrüstung bereitzustellen, die auf Höhe des Meeresbodens installiert werden kann. Dies würde die Verarbeitungsoperationen vom Meeresspiegel auf den Meeresboden in die Nähe der Bohrlochköpfe verlagern. Die Herausforderungen sind enorm: hoher Druck, Korrosionsbeständigkeit, Installation, Betrieb und Wartung. Sobald diese Hürden jedoch genommen sind, werden die Sicherheitsprobleme, Wartungs- und Betriebskosten drastisch sinken.

Wenn die gesamte Trennung von Öl, Wasser, Sedimenten, Erdgas und, je nach Feld, CO_2 und H_2S auf dem Meeresboden stattfindet, ist dies vorteilhaft für die Steigleitungen, die das Öl vom Meeresboden zum Speicher in Meeresspiegelhöhe führen. Es wären keine zusätzlichen Ressourcen mehr nötig, um alle Bestandteile, die aus dem Bohrloch austreten, zur Oberfläche zu fördern. Nur Öl und Gas werden zur schwimmenden Speicher- und Verladeeinheit gehoben. Die Steigleitungen würden reduziert und weniger belastet. Eine Steigleitung, die nur Gas oder Öl zum Speicher leitet, ist sicherer als eine, die den zuvor genannten Komponenten ausgesetzt ist. Das Erdgas könnte direkt zu einer Versorgungsplattform geleitet werden, um Energie für die unter Wasser befindlichen Pumpen, Kompressoren, Heizungen, Steuerungssysteme, Reinigungssysteme und Sicherheitssysteme zu erzeugen. Die andere Option ist die Energieerzeugung auf dem Meeresboden. Energiegewinnungstechnologien mit Meeresströmungen und kleinen Flüssigsalzreaktoren können sicher Energie liefern und kämen ohne 3 km lange Hochspannungsleitungen aus [9]. Ausrüstung und Komponenten müssen so konzipiert werden, dass sie weniger Reinigung benötigen (Schmutzinhibitoren) oder für die Selbstreinigung ausgelegt sind. Abb. 2 zeigt eine konzeptionelle Unterwasseranlage, um ein besseres Verständnis der potenziellen zukünftigen Vorteile solcher unterseeischen Förderplattformen zu vermitteln.

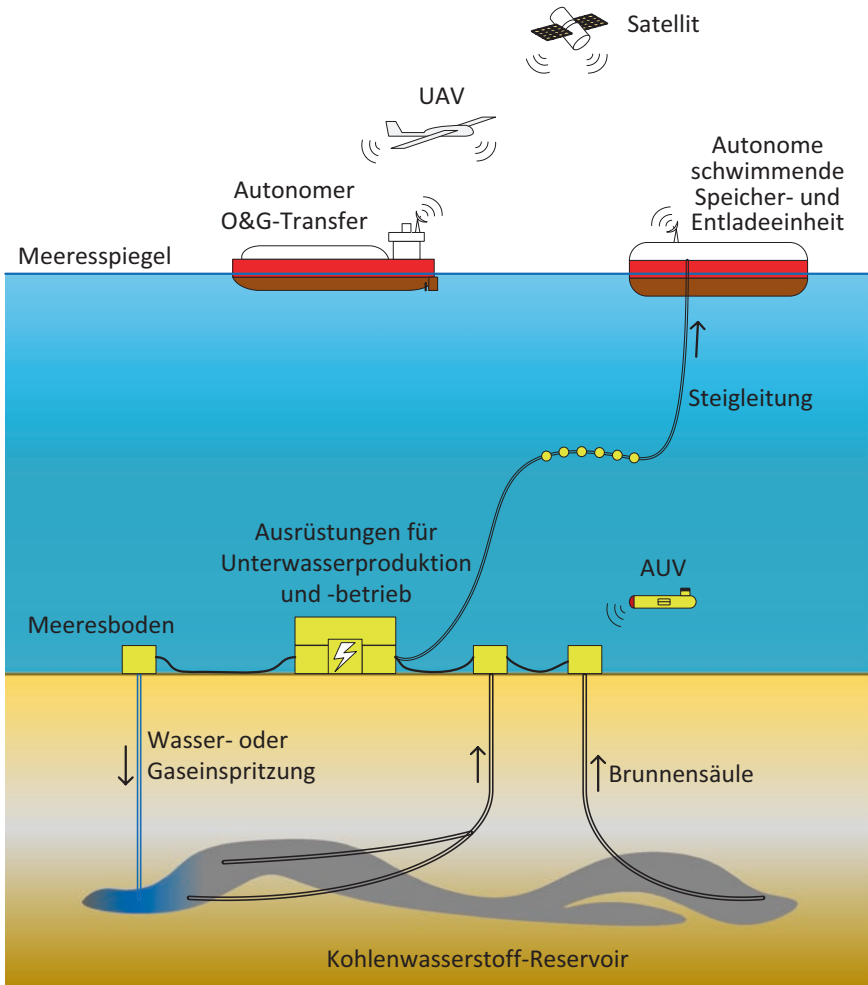


Abb. 2 Konzeptionelle Darstellung einer Unterwasseranlage

Darüber hinaus werden all diese neuen Öl- und Gasfördertechnologien die Regulierungsanforderungen beeinflussen. In einigen Ländern schreiben die Vorschriften beispielsweise vor, dass ein FPSO (Floating Production Storage and Offloading) über Ausrüstung verfügen muss, um die fiskalische Messung der Öl- und Erdgasförderung zu gewährleisten. Die Messung der Menge an Gas und Wasser, die in das Bohrloch reinjiziert wird, ist obligatorisch. Die erforderliche Messausrüstung wird von Drittunternehmen geprüft. Bei zukünftigen Unterwasseroperationen wird es erforderlich sein, dass die Messausrüstung zumindest ferngesteuert auf Unterwasseranlagen zugreifen kann. Neue Standardverfahren zur Validierung der Förder- und Reinjektionsvolumen werden erforderlich sein.

und insbesondere muss die Ausrüstung einfach und ohne Risiko für Betrieb oder andere Anlagenteile zu installieren und zu bedienen sein.

Die Standardisierung von Ausrüstung, Verbindungsstellen, Befestigungselementen, Elektronik, Anschlüssen, Kommunikationsprotokollen, drahtloser Kommunikation und anderen ist der Schlüssel zur Etablierung einer starken Industrie mit einer strukturierten Lieferkette. Es ist wichtig, diese Standards zu schaffen, die Referenzen festlegen, um die technologische Entwicklung und die Sicherheit für den Betrieb zu gewährleisten.

Autonome Systeme: Gegenwart und Zukunft

Die Entwicklung autonomer Unterwassersysteme ist eine Schlüsselkompetenz in der Technologieroadmap aller Unternehmen, die unter Wasser arbeiten. Tiefwasser (mehr als 2000 m unter der Wasserlinie) ist eine dynamische und aggressive Umgebung. Es erfordert die Entwicklung einer neuen Generation von Robotern, um Probleme wie Meeresströmungen, hohen Druck, Korrosion, mangelnde Sicht, begrenzte drahtlose Kommunikation, das Zusammenleben mit Tieren, Bewuchs und Ablagerungen zu bewältigen.

Selbstüberwachung, Selbstheilung, Austauschbarkeit, schnelle Einrichtung, Modularität und Objekterkennung sind Fähigkeiten, die in das Design jedes Systems einbezogen werden müssen, das für die Inspektion, Wartung und den Betrieb von Ausrüstung, Rohrleitungen und Steigleitungen eingesetzt wird. Neue Verfahren und Ausrüstungen zur Prüfung dieser Systeme müssen entwickelt werden, um die Qualität des Betriebs unter Tiefwasserbedingungen zu gewährleisten.

Darüber hinaus müssen Roboter mit anderen Unterwassersystemen und dem Betriebsteam kommunizieren können. Die Unterwasserumgebung beeinflusst erheblich die verfügbaren Übertragungsmöglichkeiten bei der Nutzung von akustischen, elektromagnetischen, magnetischen und optischen Signalen. Ein weiteres wichtiges Thema ist, wie man Energie für den Unterwasserbetrieb bereitstellt. Batterien sind schwierig unter Wasser aufzuladen und zu ersetzen. Batterien, die nahtlos in den Tiefen arbeiten, müssen hohen Druck aushalten, um schwere und sperrige Gehäuse für den atmosphärischen Druck zu vermeiden. Darüber hinaus sind eine hohe Energiedichte, schnelles Aufladen und eine erhöhte Lebensdauer sehr wichtig. Drahtlose Unterwasser-Sensor-Netzwerke (UWSNs) haben in letzter Zeit an Bedeutung gewonnen, aufgrund ihrer vielfältigen Anwendungsbereiche in Management, Kontrolle und Überwachung in ausgewählten Teilen der tiefen Ozeane. Auch das Design solcher UWSNs steht vor vielen Herausforderungen wie größeren Ausbreitungsverzögerungen, niedrigen Bandbreiten und den dynamischen Umweltbedingungen [10].

Ein multidisziplinärer Ansatz ist erforderlich, um effiziente und zuverlässige autonome Systeme zu entwickeln. Materialien, Softwareentwicklung, Systemintegration, Systemdesign, Systemsteuerungen, Energieversorgung, Sensorentwicklung, maschi-

nelles Lernen und Datenanalyse sind eine Gruppe von Kompetenzen, die für die Entwicklung einer neuen Generation von residenten und autonomen Unterwassersystemen erforderlich sind.

Ein Szenario für diese Automatisierung ist in Abb. 3 dargestellt. Die Idee ist, autonome Fahrzeuge wie UAVs (unbemannte Flugzeuge), ASVs (unbemannte Wasserfahrzeuge), AUVs (unbemannte Unterwasserfahrzeuge) und spezialisierte Roboter für die Überwachung, Inspektion und Interventionen im Feld einzusetzen. Die UAVs können die Überwachung von Ölverschmutzungen auf der Wasseroberfläche durchführen. Sie können AUVs aktivieren, um zu spezifischen Gebieten zu navigieren, um Proben zu sammeln und die Ölschichtdicke und -klassi-

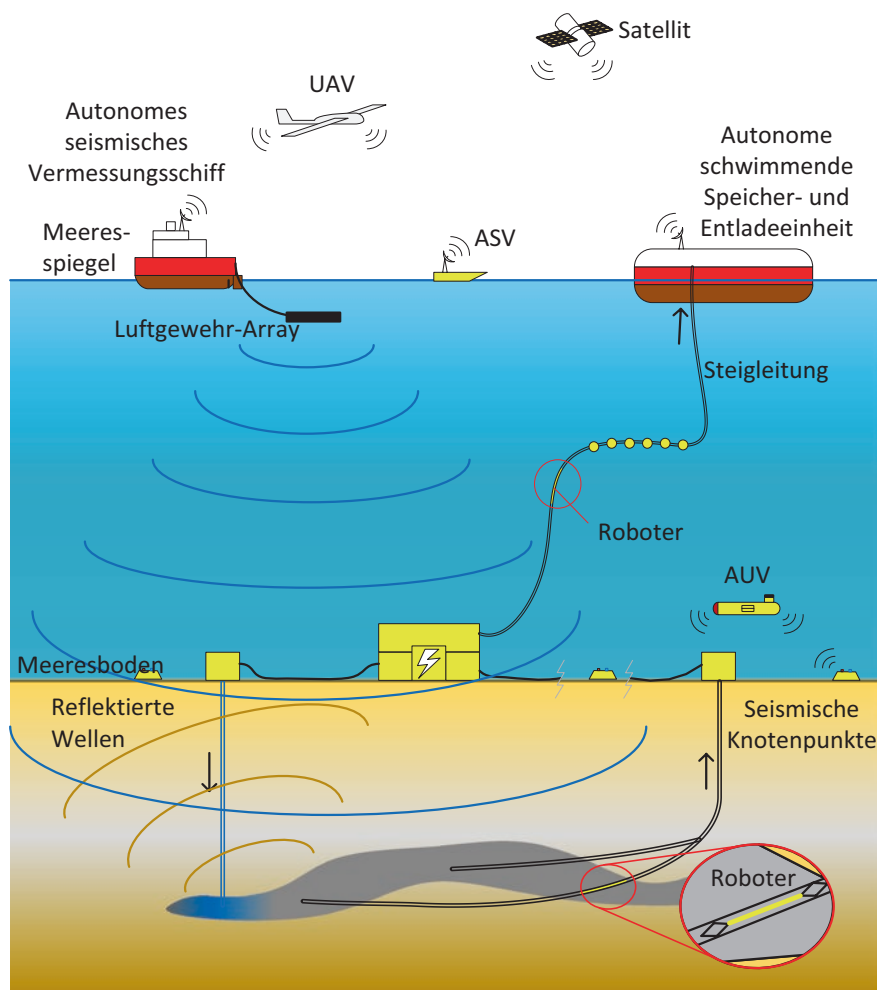


Abb. 3 Autonomer Betrieb, Überwachung, Inspektion, Wartung und 4D-Seismik

fizierung zu messen. Die UAVs und ASVs werden kontinuierlich Anlagen über dem Meeresspiegel inspizieren. AUVs wie Flatfish [11] werden die Inspektion der Ausrüstung unter Wasser von nahe der Oberfläche bis zum Meeresboden durchführen. Diese AUVs werden auch mit anderer Ausrüstung interagieren, Verbrauchsmaterialien austauschen oder beschädigte Module ersetzen. Innerhalb der Ausrüstung, Leitungen, Steigleitungen und sogar des Bohrlochs werden spezialisierte Roboter für Inspektionen, Überwachung und Interventionen eingesetzt [12]. Ein Netzwerk von seismischen Sensoren kann installiert werden, um die kontinuierliche Überwachung des Meeresbodens und die Erkennung der Reaktion des Bohrlochs auf künstliche Stimulationen zu ermöglichen. Die Datenerfassung von diesen Sensoren wird in naher Zukunft automatisiert werden, indem AUVs und optische Modems verwendet werden, wodurch die Notwendigkeit von Verkabelungen entfällt. Die Verwendung von ROVs zur Datenerfassung und kontinuierlichen Ersetzung der Sensoren ist teuer, ineffizient und birgt ein hohes Risiko für die Förderanlage. Verkabelungen zwischen den seismischen Sensoren und der Oberfläche werden für tiefe und ultra-tiefe Gewässer als unpraktisch und zu teuer erachtet. All diese Teams von autonomen Fahrzeugen werden eine Kommunikation und Entscheidungsfindung auf Maschinenebene für viele Aufgaben und kritische Situationen erfordern.

Darüber hinaus schreiben die neuen Standards der Länder für einen Zeitraum von fünf Jahren die Überwachung des Bohrlochkopfes und der Umgebung auf Druck, Temperatur sowie auf Öl- und Gaslecks nach der Stilllegung und Aufgabe des Bohrlochs vor. Spezielle Kommunikationswege und Alarmmeldungen sind ebenfalls erforderlich, um eine sichere Überwachung während dieses Zeitraums zu gewährleisten. Die Investitions- und Betriebskosten für stillgelegte Bohrlocher sind kritisch und die Anlagen erfordern eine hohe Zuverlässigkeit.

Meeresbodenabbau: Chancen und Herausforderungen

Das Leben entstand aus den Ozeanen des Planeten Erde und sie sind die wichtigsten Umweltakteure für die Lebensunterstützung und das Gleichgewicht des Planeten. Sie bedecken auch über $\frac{3}{4}$ der Planetenoberfläche. Während der komplexen Bildung der Kontinente hat der Druck von unserem inneren heißen Kern dazu geführt, dass sich neues Land bildete, mit Ergussgestein bedeckt wurde, sich aus dem Meer hob oder wieder absank. Diese Mechanismen haben dazu geführt, dass Mineralien, Öl und Gas überall in der Erdkruste zu finden sind.

Die menschliche Geschichte begann mit der Exploration und Transformation von Mineralien, die nahe an der Oberfläche lagen, wie das leichter zu findende Kupfer und Gold vor 8000 Jahren. Von der Kupfersteinzeit und der Bronzezeit an hat sich die Menschheit weiterentwickelt, unterstützt durch die umfangreiche Exploration von Erzen und fossilen Energien. Bisher sind Öl und Gas die einzigen Rohstoffe, die aus dem Meeresboden geholt wurden, obwohl die Menschheit erst spät begann, fossiles Öl und Gas zu nutzen.

Es ist bekannt, dass es hochwertige Mineralien auf dem Meeresboden gibt, wie polymetallische Knollen (Nickel, Kupfer, Kobalt und Mangan), Mangan-Krusten (Kobalt, Vanadium, Molybdän und Platin) und Sulfid-Lagerstätten (Kupfer, Blei, Zink, Gold und Silber) [13]. Diese befinden sich in hoch konzentrierten Gebieten um hydrothermale Quellen. Die schnelle Verfestigung der heißen Lava ermöglicht die Ausfällung der Metalle, wodurch diese Gebiete reicher und konzentrierter an diesen Mineralien sind. ROVs wurden verwendet, um Proben aus Tiefen bis zu 6000 m zu sammeln. Die derzeit in Betracht gezogenen Methoden zur Extraktion der Mineralien sind die kontinuierliche Eimerkette und die hydraulische Saugung [14]. Die Mineralien werden zur Plattform an der Oberfläche transportiert, dort verarbeitet und verwertbare Anteile extrahiert. Die Rückstände werden vor Ort auf dem Meeresboden deponiert.

Es gibt Kontroversen über die hohen Kosten und Umweltauswirkungen, die mit dem Tiefseebergbau verbunden sind. Die hohe Konzentration der Mineralien wird wahrscheinlich die zu erkundende Fläche reduzieren. Im Vergleich zu Landminen könnte es nur einen kleinen Bruchteil der Fläche auf dem Meeresboden benötigen, um die gleiche Menge an Mineralien zu erhalten. Dennoch sind die hydrothermalen Quellen Gebiete, in denen kürzlich neue und einzigartige Lebensformen gefunden wurden und viele weitere erwartet werden. Darüber hinaus wird der Tiefseebergbau neben den Veränderungen des Meeresbodens auch mit Schwermetallen belastete Wolken verursachen, die sich über weite Strecken ausbreiten können. Die Umweltauswirkungen könnten kleine Gruppen von Fischen betreffen – oder auch ganze Länderökonomien [15]. Das wirtschaftliche Gleichgewicht zwischen den Kosten für den Bergbau und den Umweltauswirkungen wurde noch nicht erreicht. Daher bedeutet dies, dass es eine große Chance für die Forschung und Entwicklung minimalinvasiver, sicherer und zuverlässiger Technologien zur Erkundung neuer Bergbaumöglichkeiten gibt.

Integrierter Forschungs- und Entwicklungsansatz

Unternehmen und Forschungseinrichtungen, die darauf abzielen, ihren Marktanteil zu erhöhen und wettbewerbsfähiger zu werden, entscheiden sich manchmal dafür, eigenständige Lösungen von Grund auf neu zu entwickeln. Obwohl es in einigen Fällen eine gute Strategie zu sein scheint, ist es zeitaufwendig, erfordert zu viele Ressourcen und oft sind die Ergebnisse nicht wie erwartet. Normalerweise sucht der Industriesektor nach den richtigen verfügbaren Lösungen und Forschungseinrichtungen haben nicht die Agilität und Erfahrung, um eine hohe Reife in ihren Lösungen zu erreichen.

Der Mangel an Integration und einer langfristigen Strategie bei der Entwicklung autonomer Unterwassersysteme ist ein Engpass und in einigen Fällen werden Ressourcen verwendet, um ähnliche Projekte durchzuführen.

Für die Industrie ist der Einsatz von Technologie grundlegend. Grundlagenforschung ist erforderlich, aber ein klarer Weg zur Steigerung der Reife der

Technologie zur Implementierung in ein reales Asset und zur Realisierung der Gewinne sollte im Fokus stehen. Dieser Aspekt unterstreicht zwei wichtige Punkte für Institute und Universitäten: (a) Jede Initiative muss sich auf den Einsatz der Technologie konzentrieren; (b) Integration von Kompetenzen und Disziplinen sind erforderlich, um das bestehende Wissen verschiedener Institutionen zu kombinieren.

Die Steigerung der technologischen Reife geht dem Einsatz voraus. Daher ist ein langfristiger und integrierter Forschungs- und Entwicklungsplan grundlegend, um die Ziele des Einsatzes zu erreichen. Die Entwicklung von Gemeinsamen Industrieprojekten (JIPs) ist eine gängige Praxis in der Öl- und Gasindustrie und bietet die Möglichkeit, Risiken, Ressourcen und Ergebnisse für neue Entwicklungen zu teilen. Die Integration von Kompetenzen und Disziplinen, die das Fachwissen verschiedener Partner zusammenbringen, muss ebenfalls Teil des zuvor genannten langfristigen und integrierten Forschungsplans sein.

Schlussfolgerungen

Die globale Gesellschaft muss sich um ihre natürlichen Ressourcen kümmern. Der menschliche Einfluss auf die Ozeane ist für die Umwelt kritisch, aber für die Entwicklung der Länder notwendig. Dennoch sollten keine Kompromisslösungen in Betracht gezogen werden, wenn natürliche Ressourcen erforscht, ausgebeutet und verarbeitet werden.

Die in diesem Kapitel vorgestellten Szenarien dienen dazu, die Herausforderungen zu verdeutlichen, die bereits in der Industriekette beobachtet werden. Seit dem Beginn der menschlichen Geschichte wurden Technologien geschaffen und entwickelt, um natürliche Ressourcen zu erforschen und in Wohlstand umzuwandeln. Sie hat jedoch den Planeten als Nebeneffekt degradiert. Dennoch ist Technologie der Schlüssel zur Reduzierung und sogar zur Umkehrung der Umweltauswirkungen. Daher sollten Industrien und Regierungen in neue Technologien investieren, die die Ozeane sauberer, effizienter, sicherer, zuverlässiger und dennoch rentabel erforschen können.

Es ist entscheidend, die industriellen Bedürfnisse für die Tiefseeerkundung und -ausbeutung zu adressieren. Ein integrierter und multidisziplinärer Ansatz in Bezug auf Studienfelder und zu entwickelnde Schlüsseltechnologien ist wichtig, um die Umweltherausforderungen erfolgreich zu bewältigen und eine neue Generation von Unterwassersystemen zu entwickeln, die fortschrittliche künstliche Intelligenztechnologien nutzen.

Literatur

1. Yanosek K, Rogers M (2018) Unlocking future growth for deepwater in the Gulf of Mexico
2. Cuyvers L, Berry W, Gjerde K, Thiele T, Wilhem C (2018) Deep seabed mining: a rising environmental challenge [Internet]. <https://twitter.com/IUCN/>
3. Beltrao RLC, Sombra CL, Lage ACVM, Netto JRF, Henriques CCD (2009) Challenges and new technologies for the development of the pre-salt cluster, Santos Basin, Brazil. In: Offshore technology conference. <https://doi.org/10.4043/19880-MS>
4. De Luca P, Carballo J, Filgueiras A, Pimentel G, Esteban M, Tritlla J et al (2015) What is the role of volcanic rocks in the Brazilian pre-salt? In: Annals from 77th EAGE conference and exhibition. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201412890>
5. Estrella G (2011) Pre-salt production development in Brazil. In: 20th World petroleum congress, Bd 4. <https://doi.org/10.1061/9780784409374>
6. Zhang J, Wu X, Qi Y (2013) Research on 3D marine electromagnetic interferometry with synthetic sources for suppressing the airwave interference. *Appl Geophys* 10. <https://doi.org/10.1007/s11770-013-0403-3>
7. Mittet R, Morten JP (2012) Detection and imaging sensitivity of the marine CSEM method. *Geophysics* 77:E411–E425. <https://doi.org/10.1190/geo2012-0016.1>
8. Abelha M, Petersohn E (2018) The state of the art of the Brazilian pre-salt exploration
9. Revol J-P, Bourquin M, Kadi Y, Lillestol E, De Mestral J-C, Samec K (2013) Thorium energy for the world. In: Proceedings of the ThEC13 conference, S 27–31
10. Srujana BS, Neha, Mathews P, Harigovindan VP (2015) Multi-source energy harvesting system for underwater wireless sensor networks. *Procedia Comput Sci* 46:1041–1048. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.01.015>
11. Ellefsen KO, Lepikson HA, Albiez JC (2017) Multiobjective coverage path planning: enabling automated inspection of complex, real-world structures. *Appl Soft Comput* 61:264–282. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.07.051>
12. Santos H, Paz P, Kretli I, Reis N, Pinto H, Galassi M et al (2018) Proposal and experimental trials on an autonomous robot for rigless well intervention. In: SPE annual technical conference and exhibition. Society of Petroleum Engineers, Dallas, Texas, S 17. <https://doi.org/10.2118/191513-MS>
13. Ahnert A, Borowski C (2000) Environmental risk assessment of anthropogenic activity in the deep-sea. *J Aquat Ecosyst Stress Recover* 7:299–315. <https://doi.org/10.1023/A:1009963912171>
14. Abramowski T, Baláz P (2017) Structural aggregation of feasibility factors for the assessment of the polymetallic nodules deep sea mining value chain
15. Halfar J, Fujita RM (2007) Danger of deep-sea mining. *Science* (80-) 316:987. <https://www.jstor.org/stable/20036268> (American Association for the Advancement of Science)

Teil II

Systemdesign, Dynamik und Kontrolle

Im folgenden Teil versuchen wir zu zeigen, wie moderne KI-Technologien auf vielen verschiedenen Ebenen – von der Hardware bis zur Software – genutzt werden können, um die Fähigkeiten und Anwendungsbereiche von Unterwasserrobotern zu erweitern, was in einer Vision von langfristig autonomen Unterwasserfahrzeugen mündet, die als Unterwasser-„Bewohner“ (inter-) agieren können. Wasser wird dabei einen großen Einfluss auf bereits im terrestrischen Bereich angewandte KI-Methoden haben, was auch zu vielfältigen wissenschaftlichen und technischen Herausforderungen auf dieser Seite führt. Die Kap. 4–6 werden die Schlüsselprobleme auf methodischer und technologischer Ebene behandeln, beginnend mit den physischen Herausforderungen, denen die Roboter ausgesetzt sind.

Zu Beginn dieses Teils werfen wir einen tieferen Blick auf den Rumpf der Fahrzeuge, da er am stärksten dem Wasser und den Umweltbedingungen ausgesetzt ist, und sein Optimierungspotenzial. Durch Einführung von Designänderungen können Drucktoleranz sowie mechanische Stabilität erreicht, hydrodynamische Effizienz verbessert und Korrosions- und Bewuchsschutz erhöht werden.

Die Struktur und das Design des Rumpfes sind auch ein kritischer Faktor für die Ermöglichung von Modularität und Konfigurierbarkeit der Unterwassersysteme, was zu einer verbesserten Benutzerfreundlichkeit aufgrund von Vielseitigkeit und Anpassungsfähigkeit an neue (und möglicherweise sogar unbekannte) Situationen führt. Neben der Hervorhebung der Vorteile eines modularen Systemansatzes, präsentiert Kap. 5 einen Satz von Designregeln für modulare Schnittstellen.

Um auf alle Arten von Situationen entsprechend reagieren zu können, muss ein Antriebssystem dem Roboterfahrzeug ermöglichen, sich in allen sechs Freiheitsgraden zu bewegen. Die Idee, die Vorteile eines rekonfigurierbaren Systems zu nutzen, bringt erhöhte Herausforderungen mit sich, z. B. hinsichtlich der Dimensionierung des Antriebs, um eine gute Leistung des Unterwasserroboters zu realisieren. Daher werden in Kap. 6 nicht nur Motorkonstruktion und -steuerung betrachtet, sondern auch die Optimierung des Antriebs durch maschinelles

Lernen, adaptive Identifikation und Steuerung. Es wird gezeigt, dass Selbst-Diagnosefähigkeiten, die derzeit oft bei Unterwasserfahrzeugen fehlen, durch einen integrierten Systemansatz erreicht werden können. Durch die Installation einer größeren Dichte von Sensoren in den Systemen wird die Kommunikation zur Steuerung der Einheiten immer wichtiger. Allerdings ist nicht nur die interne Kommunikation ein relevanter Faktor für die beabsichtigten Unterwasserbewohner, sondern auch die Kommunikation dem Bediener und den autonomen Unterwasserfahrzeugen oder die Kommunikation zwischen mehreren zusammenarbeitenden Systemen in einem Schwarm, z. B. für eine gemeinsame Manipulation von Objekten. Es muss gesagt werden, dass aufgrund der physikalischen Eigenschaften des Mediums Wasser eine stabile Kommunikationsverbindung mit einer hohen Bandbreite derzeit noch nicht erreicht wurde. Um diese Situation zu bewältigen, wird in Kap. 7 eine semantische Kommunikationsmethode eingeführt, die eine Reduzierung der übertragenen Datenmenge ermöglicht. Zusätzlich werden KI-Methoden wie maschinelles Lernen genutzt, um die Effizienz der Kommunikation zu erhöhen.

Die Interaktion mit der unmittelbaren Umgebung ist für Unterwasserfahrzeuge unerlässlich, sei es die Probenahme aus der Umgebung zur Erfassung und Aufzeichnung von Umweltmerkmalen oder zur Inspektion und Wartung von Unterwasserstrukturen. Um präzise und geschickte Manipulationen unter Wasser durchzuführen, müssen Manipulationsgeräte auf den Systemen installiert sein. Unabhängig vom Umgebungsdruck muss die Sensorausrüstung der Manipulatoren und/oder Endeffektoren so ausgestattet sein, dass eine fein aufgelöste Kraftmessung durchgeführt werden kann, um kraftsensitive Aufgaben auszuführen. Das letzte Kapitel in diesem Teil behandelt dieses Thema von zwei Seiten, das mechatronische Konzept sowie die Steuerungsstrategie der Manipulatoren.

Intelligente Haut – fortgeschrittene Materialien und Fertigung für einen modularen und vielseitigen Rumpf



Ralf Bachmayer und Dorothea Stübing

Zusammenfassung Der Rumpf oder die Haut autonomer Unterwasserfahrzeuge (AUVs) ist ein wesentliches Element, das eine Schutzschicht und eine hydrodynamisch effiziente Einkapselung der verschiedenen Systemkomponenten bietet sowie eine große Schnittstellenfläche mit der Umgebung. Diese grundlegenden Anforderungen stellen eine Reihe von Design-Herausforderungen dar, wie drucktolerante mechanische Stabilität, hydrodynamische Effizienz, Korrosions- und Bewuchsschutz. Aber diese Schnittstelle bietet auch eine Vielzahl von Möglichkeiten, die bisher nicht vollständig ausgeschöpft wurden. Das vorliegende Kapitel befasst sich mit diesen Herausforderungen und Möglichkeiten und identifiziert potenzielle neue Lösungen, die den Übergang von AUV-Rümpfen zu einer intelligenten Haut ermöglichen.

Einführung

Seit der Einführung autonomer Unterwasserfahrzeuge (AUVs) in den 1950er-Jahren und der Zunahme ihrer Nutzung seit den 1990er-Jahren hat sich ihre grundlegende Konstruktion und Bauweise nicht wesentlich verändert. Es gibt zwei Hauptklassen von AUVs, schwebende und Vermessungsfahrzeuge. Die bedeutendsten Entwicklungen in den letzten Jahren waren die Verfügbarkeit kostengünstiger, torpedoförmiger AUVs für flache Gewässer für die Forschungsgemeinschaft, die Entwicklung kompakterer schwebender AUVs

R. Bachmayer (✉)

MARUM – Center for Marine Environmental Sciences, Universität Bremen,
Bremen, Deutschland

E-Mail: rbachmayer@marum.de

D. Stübing

Fraunhofer IFAM, Bremen, Deutschland

(z. B. DFKI's Flatfish [1] oder Saab's Sabertooth [2]) und die Entwicklung von Langstrecken-AUV-Fähigkeiten, wie MBARI's Tethys-Klasse Fahrzeuge [3], National Oceanographic Centre's Autosub LR [4] und der Teledyne Hybrid Slocum Unterwassergleiter [5]. Langstreckenfahrzeuge in diesem Kontext sind in der Lage, Betriebsreichweiten von weit über 1000 km und Ausdauern von Wochen und Monaten zu überschreiten. Parallel dazu gab es enorme Erfolge bei der Entwicklung und dem Betrieb unbemannter Oberflächenplattformen [6], die wochen- und monatelang betrieben werden können. Mit dem Aufkommen dieser Langzeitplattformen, sowohl an der Oberfläche als auch unter Wasser, und den dringend benötigten Verbesserungen bei der Systemzuverlässigkeit hat es eine erneute Anstrengung gegeben, seefest verankerte Systeme einzusetzen. Diese Systeme sollen routinemäßig oder ereignisgesteuert Infrastrukturen oder wissenschaftlich interessante und sich verändernde Merkmale inspizieren. Die Realisierung dieser Langzeiteinsätze hat mehrere Aspekte hervorgebracht, die zuvor nicht als kritischer Pfad dieser Entwicklungen betrachtet wurden. Dazu gehören weitere Verbesserungen der Systemrobustheit gegenüber Aufprall oder Kollision, die Verhinderung von Bewuchs und die Reduzierung des hydrodynamischen Widerstands. Insbesondere Biofouling [7] ist ein wichtiges Problem, nicht nur in Bezug auf die hydrodynamische Leistung, sondern auch in Bezug auf Bewuchs von einzelnen Sensoren, die derzeit sorgfältig vor und nach der Mission kalibriert werden müssen, um mögliche Messfehler aufgrund von Bewuchsproblemen zu korrigieren [8].

Schutzfunktion – Kontrolle von Biofouling

Der Schutz vor Umwelteinflüssen ist eine zentrale Funktion des AUV-Rumpfes. Die Außenfläche des Rumpfes muss ausreichend robust sein, um die Systemintegrität nach einem Aufprall zu erhalten und eine stromlinienförmige Außenschale zu bieten, um hydrodynamische Verluste zu minimieren. In einigen Fällen ist der Rumpf auch ein integraler Bestandteil des Druckbehälters, der wichtige Unterbaugruppen wie Strom und Rechenleistung enthält. Aber vor allem stellt er die physische Barriere und Schnittstelle zwischen der Meeresumwelt und dem Fahrzeug dar. Als solche ist diese Oberfläche am stärksten von mechanischen, chemischen und biologischen Prozessen in den Ozeanen betroffen. In diesem Zusammenhang ist die Verhinderung von Biofouling, d. h. die Besiedlung des Rumpfes durch sessile Organismen, eine Voraussetzung für den Erfolg von Langzeitmissionen von AUVs. Insbesondere in der euphotischen Zone, den oberen Wasserschichten, die genug Sonnenlicht für die Photosynthese erhalten, werden Oberflächen schnell von einer Vielzahl verschiedener Organismen besiedelt, die in der Regel einem charakteristischen Sukzessionsmuster folgen (Abb. 1; siehe auch [9–11]). Üblicherweise beginnt Biofouling mit der physikalischen Adsorption von organischen Makromolekülen und der Ansiedlung einzelner Bakterien. Innerhalb von Stunden beginnt sich ein komplexerer Biofilm zu bilden, der auch ein-

zellige Algen umfasst. Dies bietet den Nährboden für die Sporen mehrzelliger Algen sowie Larven von weichen und harten zoobenthischen Organismen. Die Erkundung und Besiedlung der Oberfläche durch Sporen ist ein komplexer Prozess, der von verschiedenen Bedingungen gesteuert wird, bei denen chemische Signale eine wichtige Rolle spielen [12]. Im Allgemeinen wird die Besiedlung von hartem Substrat durch verschiedene Arten als synergetisch angesehen [13], d. h. bakterielle Biofilme sind wichtige Initiatoren für die erfolgreiche Ansiedlung von marinen Invertebratenlarven.

Bei Langzeitmissionen kann der Rumpf von AUVs ohne Schutz gegen Biofouling stark mit sessilen Organismen überwachsen, deren Larven im jeweiligen Gewässer vorhanden sind (Abb. 2). Die Verfügbarkeit der zuvor genannten Langzeitfahrzeuge hat die Bedeutung der Bekämpfung des Biofouling-Effekts gezeigt, um eine starke Leistungseinbuße oder sogar den Verlust der Plattform zu verhindern. In einigen Fällen, in denen die Systeme in Gebieten mit hoher biologischer Produktivität eingesetzt wurden, hat sich über einen Zeitraum von Wochen ein signifikanter, die Leistung einschränkender Bewuchs eingestellt. Abb. 2 zeigt ein Bild des unter Wasser befindlichen Teils eines Wellengleiters nach 2–3 Wochen Betrieb zwischen den Kapverdischen und den Kanarischen Inseln. Da diese Langzeitfahrzeuge auf energieeffizienten Antrieb optimiert sind und sich daher relativ langsam durch das Wasser bewegen, sind die Auswirkungen von Biofouling noch ausgeprägter als bei anderen marinen Systemen.

Allerdings hat Biofouling auch für die Schifffahrt viele negative Auswirkungen, z. B. Erhöhung des hydrodynamischen Widerstands, der mit erhöhtem Kraftstoffverbrauch und Emission von Treibhausgasen verbunden ist, beeinträchtigte Manövrierfähigkeit, Förderung von Materialabbau durch mikrobiell beeinflusste Korrosion sowie ökologische Auswirkungen, nämlich die Einschleppung nicht-heimischer Arten. Der Einfluss von Biofouling auf den hydrodynamischen Widerstand ist erheblich [14 und Referenzen darin], mikrobielle Biofilme können zu einer Erhöhung des Gesamtwiderstands von 11% und schwerer kalkhaltiger Bewuchs sogar von bis zu 80 % führen (bei einer Schiffsgeschwindigkeit von 15 kn, bei geringeren Geschwindigkeiten ist der Effekt noch höher).

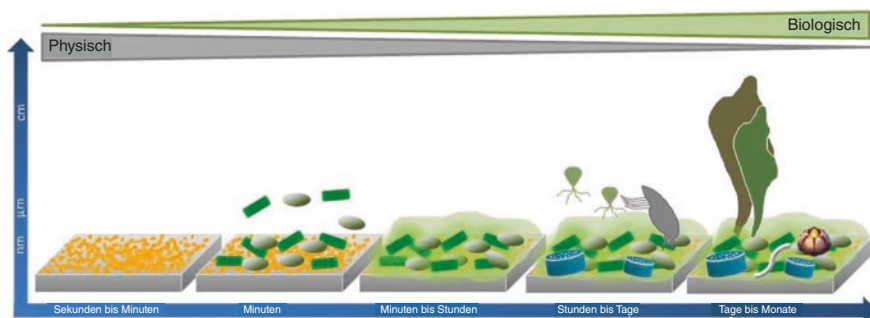
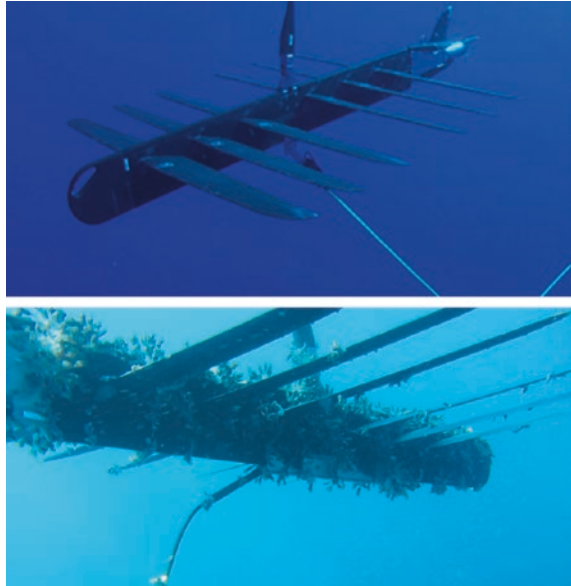


Abb. 1 Typischer Besiedlungsprozess von untergetauchten Oberflächen (Modifiziert nach [9])

Abb. 2 Das untere Bild zeigt den mit der Entenmuschel *Pollicipes pollicipes* bewachsenen MARUM's Wave Glider®. (© Dario Évora, INDP – Mindelo, Kap Verde, 2017). Das obere Bild zeigt die saubere Version zum Vergleich.



Viele dieser negativen Auswirkungen gelten auch für den Betrieb von AUVs. Daher ist die Verhinderung von Biofouling von entscheidender Bedeutung. Es gibt zwei Hauptklassen von modernem Schutz gegen Biofouling: (i) biocidale (hauptsächlich kupferbasierte) kontrollierte Depletionspolymere (CDP) oder selbst-polierende Co-Polymere (SPC), die ihre toxischen Verbindungen kontinuierlich in das umgebende Wasser abgeben [15, 16] und (ii) Fouling-Release-Beschichtungen (FRC), die die Haftkräfte von Organismen, die sich auf der Beschichtungsoberfläche ansiedeln, reduzieren [17, 18]. Beide Technologien erfordern jedoch ein Minimum an durch Strömung induzierten Scherkräften, um ihre volle Wirkung zu entfalten, weshalb die sehr geringen Geschwindigkeiten (0–2 m/s) von unbemannten Fahrzeugen eine große Herausforderung darstellen und herkömmliche Antifouling-/Fouling-Kontrollbeschichtungen unwirksam machen.

Nicht nur für den mobilen Teil ist der Fouling-Schutz wichtig, sondern auch für am Meeresboden stationierte Geräte. In größeren Wassertiefen von über 1000 m ist der Fouling-Druck geringer als in flachen Gewässern (das Epipelagial reicht im Allgemeinen bis 200 m Tiefe), dennoch ist in weichen Meeresböden hartes Substrat selten und die künstlichen Strukturen stellen attraktive Siedlungsgrundlagen dar. Daher können kritische Funktionen wie bewegliche Teile (z. B. bewegliche Steuerflächen, wie Ruder) oder Sensoren nur aufrechterhalten werden, wenn ein Überwachsen durch Fouling-Organismen verhindert wird.

Hydrodynamische Effizienz

Energieeffizienz ist ein entscheidendes Thema, insbesondere für langfristige Missionen von AUVs. Daher spielen Hydrodynamik eine wichtige Rolle, um Energieverluste, die mit hydrodynamischem Widerstand verbunden sind, zu minimieren. Der Widerstand besteht aus zwei Komponenten: viskositätsbedingten Reibungskräften und druckbedingten Kräften. Letztere sind eine Funktion der Form, die effektiv durch fortgeschrittene numerische Strömungsmechanik und experimentelle Studien in Schiffsbecken optimiert werden kann. Im Gegenzug werden die viskositätsdominierten Reibungsteile des Widerstands immer wichtiger.

Wie oben skizziert, kann Biofouling zu einer dramatischen Erhöhung des hydrodynamischen Widerstands führen, was die Bedeutung eines effektiven Rumpfschutzes unterstreicht. Aber selbst über hydraulisch glatte Rumpfoberflächen hinaus kann der Reibungswiderstand weiter reduziert werden. Ein Blick in die Natur kann wertvolle Inspirationen liefern, da die Evolution mehrere Wege zur Steigerung der hydrodynamischen Effizienz hervorgebracht hat. Die Placoidschuppen auf der Haut von schnell schwimmenden Haien sind beispielsweise mit einer gerippten Oberflächentextur in Richtung der Hauptströmung entlang des Körpers ausgestattet (Abb. 3a). Diese Ripplets reduzieren energieintensive Wechselwirkungen zwischen kleinen Wirbelstrukturen und helfen, Verluste in einer turbulenten Grenzschicht zu reduzieren (Abb. 4, [20, 21]). Eine technische Anpassung der texturierten Haifischhaut wurde realisiert (Abb. 3b) und erfolgreich hinsichtlich der Reduzierung des Reibungswiderstands im turbulenten Regime getestet [19, 22, 23].

Ein weiterer biomimetischer Ansatz ist dem biologischen Modell des Delfins entlehnt. Delfine besitzen eine dicke Schicht weichen Fettgewebes unter ihrer Epidermis, die den Widerstand durch Verzögerung des Übergangs von laminarer zu turbulenter Strömung reduzieren soll [24]. Der zugrunde liegende Mechanismus baut auf einer Stabilisierung der laminaren Grenzschicht durch die nachgiebige Oberfläche auf. Eine künstliche Anpassung der Delfinhaut wurde entwickelt, die die beiden Schichten mit unterschiedlichen Materialeigenschaften nachahmt, nämlich eine relativ dicke, weiche, nachgiebige Schicht, die das Fettgewebe darstellt, und eine härtere, aber immer noch flexible äußere Schicht, die die Dermis darstellt [22]. Diese künstliche Delfinhaut wurde auf ein Modell des Bugabschnitts eines Schiffes aufgebracht und zeigte eine Reduzierung des Reibungswiderstands um bis zu 6% (Abb. 5, [25, 26]). Dieses Konzept wäre eine vielversprechende Lösung für die Realisierung einer energieeffizienten Rumpfbeschichtung für sich langsam bewegende AUVs.

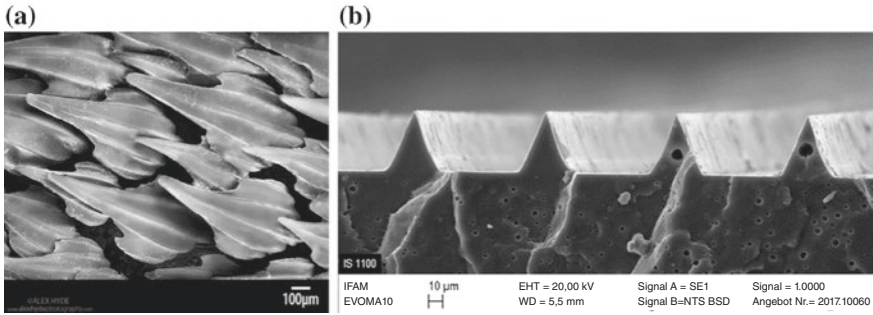


Abb. 3 Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme von Haifischhaut (© Alex Hyde, www.alexhydephotography.com) (a) und technische Umsetzung einer marinen Fouling-Release-Beschichtung mit der reibungsreduzierenden Ripplet-Textur (b)

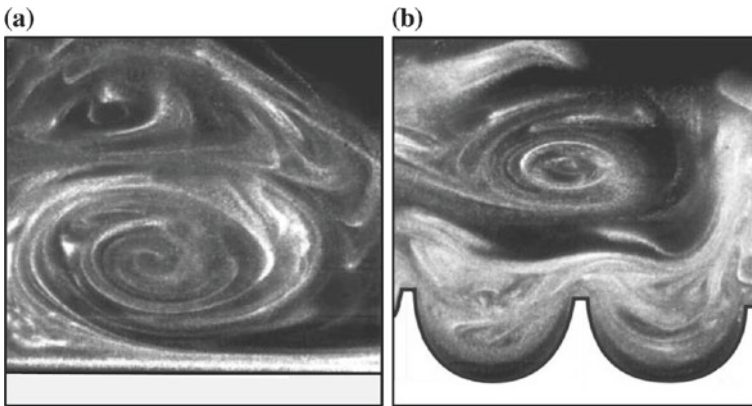


Abb. 4 Visualisierung der turbulenten Strömung von Stromlinienwirbeln in einem vertikalen Querschnitt über einer flachen Platte (a) und einer Ripplet-texturierten Oberfläche (b) [20]

Integrierte Sensorik

Die Haut stellt eine große Schnittstelle zur Umgebung dar und eignet sich daher ideal zur Erfassung und Übertragung von Umweltreizen.

Flexible Hautmaterialien, wie sie für die hydrodynamisch optimierte Delfinhauttechnologie vorgesehen sind, ermöglichen zudem die Einbettung spezifischer Sensoren (z. B. Mechanorezeptoren, akustische, kapazitive, induktive, Temperatur- oder optische Sensoren). Die weichen und nachgiebigen Silikonmaterialien, die geeignet sind, die günstigen laminaren Strömungsbedingungen entlang der Rumpfoberfläche aufrechtzuerhalten, müssen eine bestimmte Dicke (etwa 10 mm) haben und eignen sich daher gut für die Integration von Sensoren. Darüber hinaus können sie optisch transparent gemacht werden, so dass auch optische Instrumente

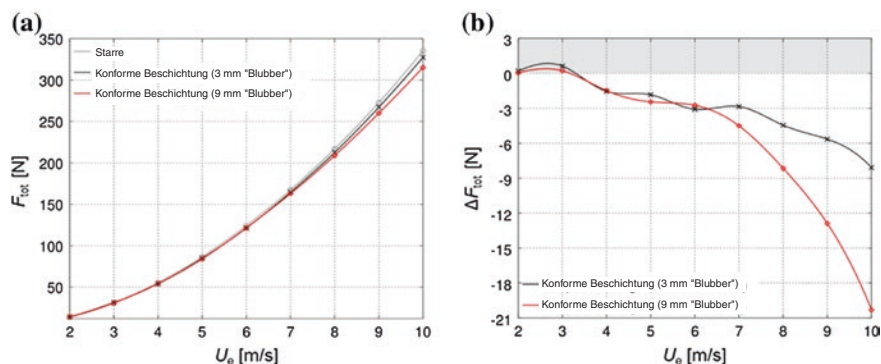


Abb. 5 Zugkraft auf Bugsegmente mit starren und mit nachgiebigen Oberflächen mit zwei verschiedenen Dicken der inneren „Fettgewebe“-Schicht in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit (a). Widerstandsreduktion im Vergleich zur starren Oberfläche, die durch die beiden nachgiebigen Beschichtungen erreicht wurde (b) [26]

integriert werden können. Allerdings muss ein möglicher Einfluss einer solchen Sensorintegration auf die hydrodynamische Leistung untersucht werden.

Ein weiteres wichtiges Asset ist die direkte und indirekte Erfassung der Oberflächenbedingungen während des Betriebs. Der direkte Ansatz umfasst integrierte Hautzustandssensoren, wie induktive/kapazitive Sensorelemente und elektroaktive Polymere (EAP), um das Ausmaß der Verschmutzung direkt durch Veränderungen der elektrischen Eigenschaften der Oberflächenschnittstelle und erhöhte Oberflächenschubspannung zu messen, während der indirekte Ansatz auf Beobachtungen der Fahrzeugleistung in Verbindung mit maschinellem Lernen zur Gewinnung von Verschmutzungsinformationen setzt.

Ausblick und zukünftige Arbeiten

Bisher wurden die oben genannten kritischen Probleme – Biofouling, Hydrodynamik und Robustheit – entweder einzeln oder als eine Kombinationen zweier Aspekte untersucht. Was getan werden muss, ist, alle drei Aspekte zusammen zu betrachten. Neue (synergistische) Lösungen sind daher notwendig, um die Funktionalität zu gewährleisten.

In dieser Hinsicht erscheint eine Kombination aus funktionaler Beschichtung und Reinigung besonders vielversprechend für stationäre Objekte, bei denen strömungsabhängige Fouling-Schutztechnologien versagen könnten. Aktive Reinigung könnte durch kleine Reinigungsroboter ähnlich dem biologischen Modell von Putzerfischen erfolgen oder passiv durch das AUV, das durch eine unterseeische mechanische Reinigungsstation fährt. Ein Wartung-on-Demand-Konzept könnte (a) direkt durch Sensoren realisiert werden, die den Ver-

schmutzungsgrad überwachen und bei Bedarf den Reinigungsbefehl ausgeben oder (b) indirekt durch die Beobachtung von abnehmender/verändernder Fahrzeugleistung aufgrund von erhöhtem Widerstand oder anderen beobachtbaren Fouling-Effekten. Mit Hilfe einer Kombination aus maschinellen Lernverfahren in Verbindung mit modellbasierten Schätzungen und Vorhersagen der Fahrzeug-Hauptparameter könnten die Reinigungsroboter lernen, wann es Zeit für eine Reinigung an bestimmten Stellen (Rumpfsegmente, Propeller, Sensoren) ist.

Perspektivisch sind Themen wie (i) Integration von Antriebsfunktionen für fortschrittliche adaptive Strukturen und Komponenten, (ii) autarke biologische Systeme zur Erzeugung von Biolumineszenz, (iii) Potenzial zur Absorption und Identifizierung spezifischer Stoffe (z. B. Schwermetalle) erwägenswert, um das Spektrum der Fähigkeiten weiter zu erweitern und die Haut des AUV wirklich intelligent zu machen.

Literatur

1. Albiez J et al (2015) FlatFish—a compact subsea-resident inspection AUV. OCEANS 2015—MTS/IEEE Washington, Washington, DC, S 1–8. <https://doi.org/10.23919/oceans.2015.7404442>
2. Johansson B, Siesjö J, Furuholmen M (2010). Seaeye Sabertooth A Hybrid AUV/ROV offshore system. OCEANS 2010 MTS/IEEE SEATTLE, Seattle, WA, S 1–3. <https://doi.org/10.1109/oceans.2010.5663842>
3. Hobson BW, Bellingham JG, Kieft B, McEwen R, Godin M, Zhang Y (2012). Tethys-class long range AUVs—extending the endurance of propeller-driven cruising AUVs from days to weeks. 2012 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles (AUV), Southampton, S 1–8. <https://doi.org/10.1109/auv.2012.6380735>
4. Furlong ME et al (2012) Autosub long range: a long range deep diving AUV for ocean monitoring. 2012 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles (AUV), S 1–8. <https://doi.org/10.1109/auv.2012.6380737>
5. Claus B, Bachmayer R (2016) Energy optimal depth control for long range underwater vehicles with applications to a hybrid underwater glider. Auton Robots 40(7):1307–1320
6. Manley J, Willcox S (2010) The wave glider: a persistent platform for ocean science. OCEANS 2010 IEEE-Sydney, S 1–5
7. Haldeman CD et al (2016) Lessening biofouling on long-duration AUV flights: behavior modifications and lessons learned. OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey, S 1–8
8. Cetinić I et al (2009) Calibration procedure for Slocum glider deployed optical instruments. Opt Express 17(18):15420–15430. <https://doi.org/10.1364/OE.17.015420>
9. Kirschner CM, Brennan AB (2012) Bio-inspired antifouling strategies. Annu Rev Mater Res 42:211–229
10. Haras D (2006) Biofilms et altérations des matériaux: de l'analyse du phénomène aux stratégies de prévention. Mater. Tech. 93:s.27–s.41. <https://doi.org/10.1051/mattech:2006003>
11. Rosenhahn A, Schilp S, Kreuzer HJ, Grunze M (2010) The role of “inert” surface chemistry in marine biofouling prevention. Phys Chem Chem Phys 12:4275–4286. <https://doi.org/10.1039/C001968M>
12. Pawlik JR (1992) Chemical ecology of the settlement of marine invertebrates. Oceanogr Mar Biol Annu Rev 30:273–335. <https://doi.org/10.1023/A:1020793726898>
13. Huggett MJ, Williamson JE, de Nys R, Kjelleberg S, Steinberg PD (2006) Larval settlement of the common Australian sea urchin *Heliocidaris erythrogramma* in response to bacteria

- from the surface of coralline algae. *Oecologia* 149:604–619. <https://doi.org/10.1007/s00442-006-0470-8>
14. Schultz MP (2007) Effects of coating roughness and biofouling on ship resistance and powering. *Biofouling* 23(5):331–341. <https://doi.org/10.1080/08927010701461974>
 15. Chambers LD, Stokes KR, Walsh FC, Wood RJK (2006) Modern approaches to marine antifouling coatings. *Surf Coat Technol* 201:3642–3652
 16. Finnie AA, Williams DN (2010) Paint and coatings technology for the control of marine fouling. *Biofouling*, pp 185–206. <https://doi.org/10.1002/9781444315462.ch13>
 17. Callow JA, Callow ME (2011) Trends in the development of environmentally friendly fouling-resistant marine coatings. *Nature Commun* 2:244
 18. Lejars M, Margaillan A, Bressy C (2012) Fouling release coatings: a nontoxic alternative to biocidal antifouling coatings. *Chem Rev* 112(8):4347–4390. <https://doi.org/10.1021/cr200350v>
 19. Bechert DW, Bruse M, Hage W, Meyer R (2000) Fluid mechanics of biological surfaces and their technological application. *Naturwissenschaften* 87:157–171
 20. Lee S-J, Lee S-H (2001) Flow field analysis of a turbulent boundary layer over a riblet surface. *Exp Fluids* 30:153–166. <https://doi.org/10.1007/s003480000150>
 21. Dean B, Bhushan B (2010) Shark-skin surfaces for fluid-drag reduction in turbulent flow: a review. *Phil Trans R Soc A* 368:4775–4806. <https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0201>
 22. Stenzel V, Schreiner C, Brinkmann A, Stübing D (2016) Biomimetic approaches for ship drag reduction—feasible and efficient? In: 10th Symposium on high-performance marine vehicles, HIPER 2016: Cortona, Italy, 17–19 October 2016, S 131–140
 23. Benschop HOG, Guerin AJ, Brinkmann A, Dale ML, Finnie AA, Breugem W-P, Clare AS, Stübing D, Price C, Reynolds KJ (2018) Drag-reducing riblets with fouling-release properties: development and testing. *Biofouling* 34(5):532–544. <https://doi.org/10.1080/08927014.2018.1469747>
 24. Gad-El-Hak M (1996) Compliant coatings: a decade of progress. *Appl Mech. Rev* 49:147–157. <https://doi.org/10.1115/1.3101966>
 25. Schrader L-U (2016) Drag reduction for ships: drawing inspiration from dolphins. In: 10th symposium on high-performance marine vehicles, HIPER 2016: Cortona, Italy, 17–19 October 2016, S 187–192
 26. Stenzel V, Schreiner C, Föste V, Baumert M, Schrader L-U (submitted) Dolphin inspired compliant coatings for drag reduction of ships. *J Coat Technol Res*

Modulares und rekonfigurierbares Systemdesign für Unterwasserfahrzeuge



Marc Hildebrandt, Kenneth Schmitz und Rolf Drechsler

Zusammenfassung Die Arbeit an einem modularen und rekonfigurierbaren Systemdesign zielt darauf ab, die Benutzerfreundlichkeit von Unterwasserfahrzeugen zu verbessern, indem ihre Vielseitigkeit und Anpassungsfähigkeit an neue Situationen und Szenarien erweitert wird. Dies wird durch ein modulares Systemdesign auf der Hardwareseite und ein rekonfigurierbares Softwaresystem erreicht. Dies ist notwendig, da das aktuelle Design von Unterwasserfahrzeugen in der Regel maßgeschneidert für eine spezifische Aufgabe oder vollständig offen ist. Die zweite Option ist zwar vielseitiger, findet sie sich aber fast ausschließlich in ROV-Systemen, da ein offenes Design in der Regel mit begrenzten hydrodynamischen Optimierungen einhergeht, die starke Schubdüsen und damit viel Energie erfordern, die nur über ein Kabel geliefert werden kann. Es gibt einige AUV-Systeme mit modularem Design, aber diese Designs integrieren die Module in der Regel nicht in das Steuerungsframework des Fahrzeugs: Zusätzliche Module sind unabhängig von der Hauptfahrzeugsteuerung und werden nur zur Datenerfassung verwendet.

M. Hildebrandt (✉)

Robotics Innovation Center, DFKI GmbH, Bremen, Deutschland

E-Mail: marc.hildebrandt@dfki.de

K. Schmitz

DSI Aerospace GmbH, Bremen, Deutschland

E-Mail: kenneth.schmitz@dsi-as.de

R. Drechsler

CPS, DFKI GmbH und Universität Bremen, Bremen, Deutschland

E-Mail: rolf.drechsler@dfki.de

Einführung

Die Arbeit an einem modularen und rekonfigurierbaren Systemdesign zielt darauf ab, die Benutzerfreundlichkeit von Unterwasserfahrzeugen zu verbessern, indem ihre Vielseitigkeit und Anpassungsfähigkeit an neue Situationen und Szenarien erweitert wird. Dies wird durch ein modulares Systemdesign auf der Hardware-seite und ein rekonfigurierbares Softwaresystem erreicht. Dies ist notwendig, da das aktuelle Design von Unterwasserfahrzeugen in der Regel maßgeschneidert für eine spezifische Aufgabe oder völlig offen ist. Die zweite Option ist zwar vielseitiger, findet sie sich aber fast ausschließlich in ROV-Systemen, da ein offenes Design in der Regel mit begrenzter hydrodynamischer Optimierung einhergeht, was starke Schubdüsen und damit viel Energie erfordert, die nur über ein Kabel geliefert werden kann. Es gibt einige AUV-Systeme mit modularem Design, aber diese Designs integrieren die Module in der Regel nicht in das Steuerungsframework des Fahrzeugs: Zusätzliche Module sind unabhängig von der Hauptfahrzeugsteuerung und werden nur zur Datenerfassung verwendet.

Überblick über aktuelle Designmethoden

Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über typische Fahrzeugdesigns, die in bestehenden Unterwasserfahrzeugen zu finden sind, und fasst ihre Schlüsseleigenschaften zusammen.

Gehäuse und Konnektivität

Eine der Schlüsselanforderungen im Design von Unterwasserfahrzeugen besteht darin, die elektronischen Komponenten des Fahrzeugs vor der Zielumgebung zu schützen, die aus dem Eintauchen in Wasser unter hohem Druck besteht. Dies kann auf verschiedene Weisen geschehen, die alle ihre spezifischen Vor- und Nachteile haben. Für diese Arbeit werden die folgenden Strategien unterschieden:

- **Druckgehäuse**
Druckgehäuse halten die Geräte bei atmosphärischem Druck eingeschlossen und stellen eine Grenze zum Wasser und Druck von außen dar. Aufgrund der großen Kräfte, die bei tiefem Eintauchen auf die Gehäuse ausgeübt werden, sind sie in der Regel zylindrisch oder kugelförmig. Trotz ihres Materialgewichts haben sie den Vorteil, dass sie Luft enthalten, Auftrieb erzeugen und die Gewichtsauswirkungen (für ein getauchtes Fahrzeug) reduzieren.
- **Harzguss**

Harzgüsse werden typischerweise für den Wasserschutz und begrenzten Druckschutz verwendet. Diese Technik wird vor allem in flach tauchenden Fahrzeugen eingesetzt, da sie billig und kompakt ist.

- Druckausgeglichene Ölfüllung

Druckausgeglichene Ölfüllungen (PBOF) werden in Verbindung mit drucktoleranten elektronischen/mechanischen Komponenten verwendet, um die Komponenten vor dem Kontakt mit Meerwasser zu schützen. Ein wesentlicher Vorteil gegenüber dem Harzguss ist die Möglichkeit, die Gehäuse für Wartungszwecke zu öffnen und zu entleeren. Da keine großen Differenzdrücke auf das Gehäuse selbst ausgeübt werden, können sie sehr vielfältig in der Form sein und haben in der Regel nur eine kleine Wandungstärke.

Eine weitere Methode zur Kategorisierung von Fahrzeugdesigns ist die Zahl der verwendeten Gehäuse. Bei einem monolithischen Ansatz wird die Anzahl der Gehäuse so gering wie möglich gehalten. Dies hat den Vorteil, dass die Zahl der externen Steckverbinder und Kabel reduziert wird, was jedoch komplexere (und in der Regel kundenspezifische) Gehäuse erfordert. Da einige Geräte (Aktuatoren wie Schubdüsen, Sensoren wie SONARs) eine direkte Immersion in Wasser erfordern, ist ein steckerloses Fahrzeug kaum möglich. Die entgegengesetzte Designstrategie ist der rahmenbasierte Ansatz, bei dem eine Zahl von Geräten (die verschiedene Gehäusetypen verwenden können) von einer Tragstruktur zusammengehalten wird und die Kommunikation durch Unterwassersteckverbinder realisiert wird. Dieser Ansatz hat den Vorteil, dass die Integration von CotS(Commercial of the Shelf)-Komponenten leichter realisiert werden kann, da viele Unterwassersensorsysteme in tauchfähigen Gehäusen erhältlich sind. Der größte Nachteil ist die Menge an Steckverbindern und Kabeln; mit zunehmender Tiefe neigen Unterwassersteckverbinder dazu, sperrig zu sein und zusammen mit der erforderlichen Verkabelung einen erheblichen Prozentsatz der Masse eines Fahrzeugs auszumachen.

Da das Ziel dieser Arbeit darin besteht, einen modularen und rekonfigurierbaren Designansatz zu finden, ist die Frage der Erweiterbarkeit ein wichtiger Faktor bei der Kategorisierung bestehender Fahrzeuge. Der wichtigste Faktor hierbei ist die Standardisierung der in dem Fahrzeug verwendeten Schnittstellen. Dies kann so einfach sein wie das Bereitstellen eines Erweiterungsports mit spezifizierten Kommunikations- und Stromkabeln, aber da es keine allgemeinen Standards für solche Ports gibt, wird die Erweiterung eines bestehenden Fahrzeugs in der Regel Arbeiten an den Gehäusen (Verkabelung, Auswahl der Schnittstelle usw.) erfordern. Es gibt einige Ökosysteme, die eine solche Vielseitigkeit ermöglichen, zum Beispiel das Digital Telemetry System (DTS) von Schilling Robotics, das ein gut spezifiziertes Schnittstellensystem für die Verwendung aller Komponenten in ihren ROV-Systemen verwendet (siehe Abb. 1). Ein weiteres Beispiel ist das Gavia AUV-System, das ein Design verwendet, bei dem eine Anzahl von Modulen zu einem AUV mit unterschiedlichen Fähigkeiten zusammengebaut werden kann (siehe Abb. 2). Sie verwenden einen monolithischen Ansatz, bei dem nach der Montage alle Module einen einzigen Druckrumpf bilden. Die Schnittstellenbildung erfolgt mit trockenen Steckverbindern an den Schottwänden der Module.

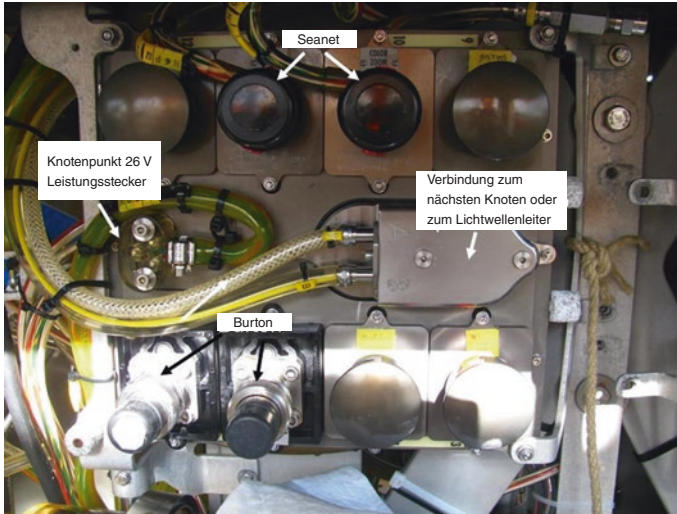


Abb. 1 DTS-Knoten eines ROV-Systems: Jeder Port liefert 26 V bei 250 W Leistung und eine wählbare Schnittstelle (Fast-Ethernet, serielle Kommunikation oder analoges Video). Es können zwei verschiedene Arten von Steckverbindern verwendet werden (Burton oder SeaNet). (Bild mit freundlicher Genehmigung von GEOMAR)



Abb. 2 Zwei verschiedene Konfigurationsoptionen für das Gavia AUV von Teledyne. Jedes Rumpfsegment enthält eine individuelle funktionale Komponente und kommt mit seiner elektro-mechanischen Schnittstelle. (Bild mit freundlicher Genehmigung von Teledyne-Gavia)

Steuerungsinfrastruktur

Bei vielen monolithischen Fahrzeugen ist die Steuerungsinfrastruktur fahrzeugspezifisch und beinhaltet direkte Verbindungen von jedem Sensor zu einer zentralen Verarbeitungseinheit. Dies kann bei größeren Fahrzeugen, insbesondere ROVs, bei denen die Erweiterbarkeit viel häufiger ist, anders sein. Da in ROV-Systemen die Fähigkeit, alle Sensordaten an einem einzigen Punkt (dem Kabel) verfügbar zu haben, aus ihrer ferngesteuerten Nutzung resultiert, sind hier schnelle Datenbusse (oftmals optischer Natur) typisch. In [8] wird

eine Steuerungsarchitektur beschrieben, die teilweise auf einer Ethernet-Verbindung zwischen mehreren Druckgehäusen basiert. Die einzelnen Sensoren und Aktuatoren sind direkt mit Verarbeitungseinheiten in den einzelnen Rümpfen verbunden und die Ethernet-Verbindung wird durch eine Anzahl von gerätespezifischen Bussen ergänzt. Referenz [2] beschreibt die oft verwendete Backseat-Steuerungsarchitektur, bei der ein Fahrzeugnavigations- und Steuerungssystem die grundlegenden Fahrzeugoperationen durchführt und ein Nutzlastcomputer für die Sensorverarbeitung und Autonomiezwecke verwendet wird.

Modulares Fahrzeugdesign

Die Idee eines modularen und rekonfigurierbaren Systemdesigns besteht darin, auf den in Abschn. „[Überblick über aktuelle Designmethoden](#)“ gegebenen Beispielen aufzubauen und eine Reihe von Designregeln zu erstellen, die die Grundlage für individuelle Fahrzeuge bilden können. Aufgrund der vielen verschiedenen Anwendungsszenarien, in denen Unterwasserfahrzeuge eingesetzt werden, konzentriert es sich nicht auf das strukturelle Design, sondern spezifiziert Verbindungsschnittstellen sowie Steuerungsdesign und Hardwareauswahlrichtlinien.

Schnittstellenverbindungen

Drei verschiedene Schnittstellenverbindungen sollen spezifiziert werden: Allgemeinzungsschnittstellen für Sensoren und Erweiterungen, Hochleistungsschnittstellen für Aktuatoren und Hochdatenraten-Schnittstellen für den Uplink oder Verbindungen zwischen Rumpfteilen.

General purpose interfaces (GPI) haben einen ähnlichen Anwendungsbereich wie Schillings DTS-Verbindungen. Sie sollten in der Lage sein, mit einer Vielzahl von Sensoren zu kommunizieren und diese Geräte auch mit Strom zu versorgen. Eine Ethernet-Kommunikationsleitung mit Gigabit-Bandbreite wird mit einer auswählbaren Stromversorgung von 12, 24 oder 48 V kombiniert. Mit der Bandbreite von Gigabit-Ethernet können eine Reihe von Sensoren angesprochen werden, von digitalen Kameras bis hin zu akustischen Sensoren wie DVL oder Imaging-SONARS. Es wurde beschlossen, die weit verbreitete, aber veraltete serielle Verbindung, die in der Schilling DTS zu finden ist, aufgrund einer einfachen Erweiterung wegzulassen: Mit der Einführung von sehr kleinen Seriell-zu-Ethernet-Konvertern (siehe Abb. 3) ist es möglich, Adapter zu erstellen, die zwischen seriellen Gerät und GPI gesteckt werden können. Aufgrund seiner geringen Größe kann der Konverter im Stecker integriert werden, was die Größe des gesamten Unterwassersteckers nur geringfügig erhöht. Der Strom wird über zwei Leitungen bereitgestellt, wobei die erforderliche Spannung und der Maximalstrom in der Konfigurationssoftware einstellbar sind. Dies ist durch die Verwendung von

Abb. 3 Seriell-zu-Ethernet-Konverter von Moxa



kleinen elektronischen Sicherheitsschaltungen möglich, die abschalten, wenn der voreingestellte Maximalstrom überschritten wird. Da diese softwaregesteuert sind, kann das Steuerungssystem dann auf ein solches Ereignis mit geeigneten Maßnahmen reagieren. Der Stecker für das GPI benötigt daher 9 (Gigabit-Ethernet einschließlich Abschirmung) plus 2 Pins. Mögliche Stecker sind die SubConn Ethernet-Serie 13-Pin oder Teledyne-Impulse MSSJ-14-Stecker, die beide für diesen Zweck getestet wurden.

Hochleistungsschnittstellen (HPI) sind für Aktuatoren sowie für die Energieübertragung (z. B. Aufladen) vorgesehen. Zu diesem Zweck sind zwei Leitungen für die Energieübertragung reserviert und zehn zusätzliche Pins können entweder als analoge Signale (z. B. für Hall-Sensor-Auslesungen) oder für die Kommunikation mit Gigabit-Ethernet konfiguriert werden. Die Spannung ist absichtlich nicht spezifiziert, da dies die Vielseitigkeit einschränken würde.

Hochdatenraten-Schnittstellen (DRI) gibt es in zwei Ausführungen: nur Daten oder Daten und Strom (DRI+P). Die Datenverbindung wird über eine Glasfaser-Schnittstelle realisiert, die Datenraten von bis zu 10 GBit bewältigen kann. Dies ist nützlich für Tether, Datenübertragung oder Inter-Compartment-Kommunikation. Die DRI+P verwendet einen hybriden Unterwasserstecker, bei dem der Glasfaseranschluss durch zwei Leitungen einer auswählbaren Stromversorgung (wieder 12, 24 oder 48 V) ergänzt wird. Dies ist nützlich, um Hochbandbreitensensoren (wie Kameras) anzuschließen, ohne einen weiteren Stecker für die Stromversorgung hinzufügen zu müssen. Es gibt eine Reihe von Steckern für beide Typen, z. B. Seacon CS-MS für die DRI oder Teledyne-Impulse Omega 53 × 2 Serie für die DRI+P.

Steuerungsdesign

Die Steuerungsinfrastruktur ist als Kombination von Verarbeitungsplatinen (PB) mit einem Gigabit-Ethernet-Uplink spezifiziert. Die Verwendung von Gigabit-Ethernet als Hauptkommunikationsbus hat eine Reihe von Vorteilen: Alle Sensor- und Steuerungsdaten sind an allen Punkten im System verfügbar, Redundanzen können leicht erstellt werden und die Integration ist unkompliziert. Zusammen

mit der Tatsache, dass eine wachsende Anzahl von Herstellern von Unterwasser-ausrüstung Ethernet als Schnittstelle übernimmt, und der Möglichkeit, Geräte mit verschiedenen Geschwindigkeiten an einem Bus zu verwenden, ergibt dies ein leistungsfähiges Rückgrat des Steuerungssystems. Die Tatsache, dass alle Daten auf dem gesamten Bus verfügbar sind, ermöglicht Funktionen wie dynamische Lastverteilung unter mehreren Verarbeitungsplatinen sowie intelligentes Energie- und Speichermanagement. Die Verarbeitungsplatinen können entweder homogen (mehrere Platinen desselben Typs) oder heterogen sein, wobei einzelne Platinen spezielle Verarbeitungsfähigkeiten haben. Dies ermöglicht eine Reihe von Kombinationen, die je nach Bedarf des einzelnen Fahrzeugs ausgewählt werden können. Ein Beispiel für ein solches Design ist in Abb. 4 dargestellt, mit dem Sonderfall, dass die Kameras nicht an den Fahrzeug-Ethernet-Bus, sondern direkt an die einzelnen PBs angeschlossen sind.

Containerbasierte Verifizierung von unprogrammierbaren Hardwarekomponenten

Autonome Unterwasserfahrzeuge müssen unabhängig arbeiten, d. h. ohne Zugang für Wartung. Bei einem Ausfall kehren AUVs idealerweise zu ihrem Bergungs-ort zurück. Um Systeme zu schaffen, die gegen Ausfälle tolerant sind, bietet die dynamische Rekonfiguration in modernen FPGAs einen hohen Grad an Flexibilität. Diese FPGAs ermöglichen die Laufzeitmodifikation der eingesetzten Hardware. Im Folgenden charakterisieren wir zwei Szenarien, die die Vorteile der Laufzeitrekonfiguration demonstrieren:

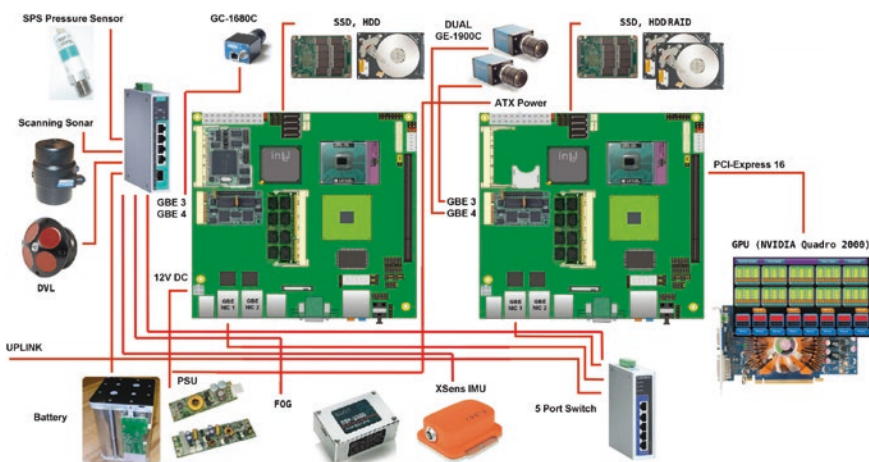


Abb. 4 Datenverbindungsdiagramm des AUV Dagon [4]

Tabelle 1 Beispielhafte Austauschmöglichkeiten für eine zur Laufzeit rekonfigurierbare FPU innerhalb des verwendeten Verarbeitungssystems. Routing, Navigation und andere Aufgaben werden durch die Berechnungen der jeweiligen FPU-Variante beeinflusst

	APX_FPU	LP_FPU	HS_FPU
Energieverbrauch	Moderat	Niedrig	Hoch
Arithmetische Fehler	Ja	Keine	Keine
Datendurchsatz	Hoch	Niedrig	Hoch

- Ein AUV driftet aufgrund einer Tiefseeströmung relativ zu seinem Bergungsort, was eine verlängerte Schubaktivität für die Rückkehr erfordert. In diesem Szenario ist die Energieeinsparung von wesentlicher Bedeutung. Um den Energieverbrauch der Hauptverarbeitungssysteme zu reduzieren, werden funktionale Einheiten (z. B. *Arithmetic Logic Unit* (ALU)/*Floating Point Unit* (FPU)/*Graphic Processing Unit* (GPU)) während der Laufzeit ersetzt. Die Substitute können ein breites Spektrum an Profilen abdecken. Tabelle 1 zeigt drei verschiedene FPU-Implementierungen. Die APX-Variante basiert auf dem Konzept des Approximate Computing. Durch die Akzeptanz tolerierbarer Rechenfehler können hohe Rechengeschwindigkeiten bei reduziertem Energieverbrauch erreicht werden. Im Gegensatz dazu liefert die Low-Power-FPU (LP_FPU) exakte Ergebnisse, während sie Energie spart. Allerdings reduziert sich der Datendurchsatz erheblich. Schließlich liefert die Standard(High-Speed)-FPU exakte Ergebnisse mit hoher Geschwindigkeit, allerdings zum Preis eines hohen Energieverbrauchs.
- Der *Built-in Self Test* (BIST) zeigt ein fehlerhaftes Untermodul in einem FPGA an. Durch Dual- oder *Triple-Modular-Redundanz* (TMR) kann der Fehler kompensiert werden. Um jedoch die TMR wiederherzustellen, wird die fehlerhafte Komponente in einen anderen Bereich des FPGA verlegt, der noch funktioniert, da zwei von drei fehlerhaften TMR-Instanzen keine Fehlerkompensation mehr zulassen würden. Die Verlegung hat keine kritische Situation verhindert, jedoch wäre der TMR-Schutz nicht in der Lage gewesen, einen weiteren Hardware-Ausfall zu tolerieren.

Wie zuvor erwähnt (siehe Abb. 4), sind die Steuerungssysteme innerhalb des AUV bereits mit Redundanzen gebaut und eingesetzt worden, um mögliche Ausfälle zu kompensieren. Die Nutzung von Rekonfigurationstechniken auf FPGA-Ebene ermöglicht mehr Flexibilität und höhere Robustheitsgrade. Es gibt viele praktische Anwendungsbeispiele für diese Technik. Dazu gehören die Erhöhung der Fehler-toleranz [3], die stromsparende Rekonfiguration [6, 7] und die Flächenreduktion durch Zeitmultiplexing [11] während der Laufzeit.

Eine praktische Anwendung der partiellen Rekonfiguration zeigt Abb. 5. Wenn ein System sich an wechselnde Anforderungen während der Laufzeit anpassen muss (d. h. Energieeinsparung vs. Rechenleistung), können verschiedene Unter-module innerhalb eines Verarbeitungssystems zur Laufzeit dynamisch ausgetauscht werden. In diesem speziellen Beispiel kann eine *High Speed* ALU und FPU verwendet werden, wenn Rechenleistung benötigt wird. Alternativ können

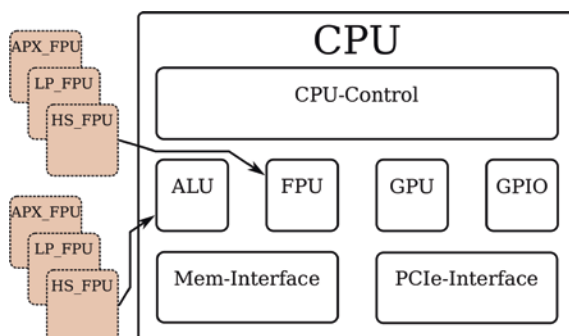
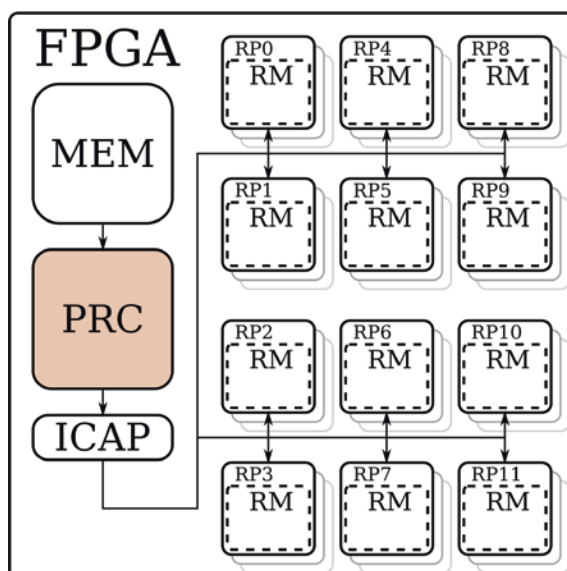


Abb. 5 Austauschmöglichkeiten von Hardware-Untermodulen zur Erreichung unterschiedlicher Betriebsprofile, abhängig von den Missionsanforderungen

Abb. 6 Übersicht zum Partial Reconfiguration Controller. Die Platzierung der rekonfigurierbaren Partitionen folgt dem Demonstrationszweck und kann in der Praxis weniger einheitlich sein



stromsparendere Varianten (*Low Power*) verwendet werden, wenn die Ausführungsgeschwindigkeit nicht von Bedeutung ist. Die Implementierung eines solchen Designs erfordert eine rekonfigurierbare Hardware-Architektur.

Zur Demonstration zeigt Abb. 6 ein generisches rekonfigurierbares FPGA mit seinen wesentlichen Komponenten. Benutzerdefinierte Slots (RP_n) im FPGA können dynamisch durch verschiedene Varianten von Logikimplementierungen neu geschrieben werden. Diese Varianten – nämlich *rekonfigurierbare Module* (RMs) – werden in einem Konfigurationsspeicher (MEM) gespeichert. RMs werden bei Bedarf von einem Partial Reconfiguration Controller (PRC) in einen Steueranschluss im FPGA geschrieben.

Die Verwendung von Teilrekonfiguration erhöht die Flexibilität des Systems und seinen Entwurfsraum erheblich. Sowohl die Verifizierung als auch der Test der zugrunde liegenden Hardware werden in der Regel *einmal* durchgeführt, bevor die Hardwarekomponente auf ihrer *gedruckten Schaltplatine* (PCB) installiert wird. Eine Änderung der Hardwarearchitektur während der Laufzeit – wie von der beabsichtigten Anwendung gefordert – erfordert auch neue Ansätze in Verifizierung und Test.

Nach der Rekonfiguration muss der korrekte Betrieb der Komponente sichergestellt werden, bevor das Design seinen regulären Betrieb fortsetzt. Ähnlich wie bei Techniken des *Build-in Self-Tests* (BIST) muss das System in der Lage sein, seinen Betriebszustand kontinuierlich zu bestimmen, da sonst eine fehlgeschlagene Rekonfiguration den sicheren Betrieb gefährden würde. Für diesen Zweck wird unter anderem die Anwendung der Container-Verifizierung vorgeschlagen.

Nach einer wegweisenden Arbeit im Jahr 2014 wurde die zuverlässige Erkennung eines „Rowhammer“-Angriffs gegen den Hauptspeicher des Systems (über Software gegen Hardware) behandelt [1]. Eine große Stärke ist der vergleichsweise geringe Hardware-Overhead bei gleichzeitiger nachweislich korrekter Funktion. Dieses Schema kann insbesondere an der Schnittstellenlogik verschiedener Abteilungen des AUV angewendet werden. Verstöße gegen Kommunikationsprotokolle (insbesondere im Falle von gemeinsam genutzten Medien) können zur Laufzeit erkannt und korrigiert werden.

Da die beabsichtigte AUV-Hardwarearchitektur mehrere Verarbeitungssysteme umfasst, die Software ausführen und daher anfällig für Angriffe oder Fehler (innerhalb des Chips) sind, kann das Gesamtsystem auch auf Befehlsebene geschützt werden. Je nach Auslöser – bösartig oder zufällig – kann die Ausführung spezifischer Befehlssequenzen das Steuersystem unbrauchbar machen, so dass ein Neustart über einen Watchdog erforderlich sein kann. Um diese mögliche Ausfallzeit zu adressieren, wurde ein komplexeres Konzept der Container-Verifizierung auf ein modernes RISC-Prozessordesign angewendet. Dieses Design wurde gegen Chipfehler und angriffsbasierte Fehlfunktionen während der Ausführung geschützt [9], basierend auf einer Befehlsüberprüfungsarchitektur.

Eine Übersicht über diese Technik ist in Abb. 7 dargestellt. Die Kommunikation zwischen dem Prozessor und seinem Hauptspeicher wird auf möglicherweise schädliche Befehle überwacht (d. h. gescreent). Zum Schutz wird ein Mechanismus mit geringer Latenz aktiviert, der die Ausführung auf einen vordefinierten Bereich mit einer Software-Ersetzung verschiebt. In der zugrunde liegenden Veröffentlichung [9] wurde eine Multiplikation durch einen weniger effizienten Ersatz ersetzt, unter der Annahme eines Fehlers in der `mul`-Befehl. Formale Verifizierung wird angewendet, um den korrekten Betrieb der hinzugefügten Logik sicherzustellen.

Das gleiche Konzept wurde aus der Softwareperspektive behandelt, so dass diese Methode auch ohne hinzugefügte (d. h. spezielle) Hardware eingesetzt werden kann. Der Aho-Corasick-String-Matching-Algorithmus wurde

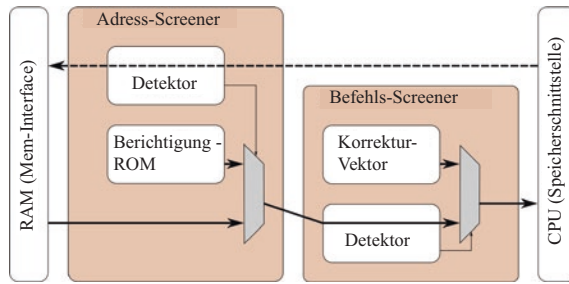


Abb. 7 Übersicht über die Befehlsüberprüfungsarchitektur, wie sie in [9] vorgestellt wurde. Der Befehls-Screener verschiebt die Ausführung, indem er den Korrekturvektor einfügt. Der Adress-Screener speist den Ersatzcode anschließend aus dem Korrektur-ROM ein (*Adressleitungen gestrichelt, Datenleitungen durchgezogen*)

verwendet, um die zur Laufzeit ausgeführte Software zu überwachen, um den Befehlsstrom auf möglicherweise schädliche Befehle (oder Sequenzen davon) zu überprüfen [10].

In ähnlicher Weise bietet die Selbstverifizierung [5] einen zusätzlichen Schutz gegen unerwartete Systemausfälle und wurde früher behandelt [12]. Im Gegensatz zur gängigen Praxis können Systeme früher in Betrieb genommen oder eingesetzt werden, wenn die Verifizierung und der Test auf Funktionen beschränkt sind, die für den Betrieb kritisch sind, und das Design somit teilweise unverifiziert bleibt. Nur wenn die Verifizierung dynamisch auf Anfrage realisiert werden kann, nachdem das System in den Betriebsmodus eingetreten ist, ist eine solche Methodik anwendbar. Der Einsatz zusätzlicher Verifizierungshardware schließt die oben genannte Lücke, da sie eine Laufzeitverifizierung des Hardware-Systems ermöglicht. Offensichtlich muss die Verifizierungsmaschine selbst zu Beginn verifiziert werden.

In [12] schlug der Autor eine Verifizierungsmaschine (d. h. einen SAT-Solver) vor, die für die Einbeziehung in ein Hardware-Design konzipiert ist. Im Gegensatz zu traditionellen SAT-Solvern benötigen sie kein Betriebssystem oder Bibliotheken jeglicher Art, da sie speicherorientiert oder sogar vollständig als eigenständiges Hardware-Submodul im Gesamtsystemdesign funktionieren können. Hohe Rechenleistung und geringe Latenz sind die Schlüsselvorteile dieser wegweisenden Arbeit auf diesem Gebiet.

All diese Techniken bieten zusätzliche Sicherheitsbarrieren während des Systembetriebs mit dem Ziel, die Zuverlässigkeit der Steuer- und Kommunikationssysteme zu erhöhen, was für den autonomen Betrieb von Unterwasserfahrzeugen unerlässlich ist.

Ausblick

Um die Machbarkeit der in dieser Arbeit vorgestellten Designideen zu testen, sollte die Entwicklung eines realen Robotersystems in Betracht gezogen werden, das diese Ideen umsetzt. Dies wurde teilweise im Design des AUV „DeepLeng“ umgesetzt, das im Rahmen des Projekts „EurEx-SiLaNa“ entwickelt wird. Andere Aspekte, insbesondere die containerbasierte Verifizierung, können auf einer Reihe von Plattformen getestet und weiterentwickelt werden, mit dem mittelfristigen Ziel, eine solche Struktur in ein funktionsfähiges Unterwasserfahrzeug zu implementieren und deren Vorteile in realen Missionen zu bewerten.

Literatur

1. Arun C, Kenneth S, Ulrich K, R Drechsler (2015) Ensuring safety and reliability of IP-based system design—a container approach. In: Rapid system prototyping (RSP), 2015 international symposium on, S 76–82. IEEE
2. Eickstedt DP, Sideleau SR (2009) The backseat control architecture for autonomous robotic vehicles: a case study with the iver2 auv. OCEANS 2009:1–8 Oct
3. Emmert J, Stroud C, Skaggs B, Abramovici M (2000) Dynamic fault tolerance in fpgas via partial reconfiguration. In: Field-programmable custom computing machines, 2000 IEEE symposium on, S 165–174. IEEE
4. Hildebrandt M, Hilljegerdes J (2010) Design of a versatile AUV for high precision visual mapping and algorithm evaluation. In: Proceedings of the 2010 IEEE AUV monterey, Monterey
5. Luth C, Ring M, Drechsler R (2017) Towards a methodology for self-verification. In: 2017 6th international conference on reliability, Infocom technologies and optimization (Trends and Future Directions) (ICRITO), S 11–15, Sept 2017
6. Noguera J, Kennedy IO (2007) Power reduction in network equipment through adaptive partial reconfiguration. In: Field programmable logic and applications, 2007. FPL 2007. international conference on, S 240–245. IEEE
7. Paulsson K, Hübner M, Bayar S, Becker J (2007) Exploitation of run-time partial reconfiguration for dynamic power management in xilinx spartan III-based systems. In: International symposium on reconfigurable communication-centric systems-on-chip, S 1–6
8. Sangekar M, Chitre M, Koay TB (2008) Hardware architecture for a modular autonomous underwater vehicle starfish. OCEANS 2008:1–8 Sept
9. Schmitz K, Chandrasekharan A, Gomes Filho J, Große D, Drechsler R (2017) Trust is good, control is better: Hardware-based instruction-replacement for reliable processor-ips. In: Design automation conference (ASP-DAC), 2017 22nd Asia and South Pacific, S 57–62. IEEE
10. Schmitz K, Keszocze O, Schmidt J, Große D, Drechsler R (2018) Towards dynamic execution environment for system security protection against hardware flaws. In: 2018 IEEE computer society annual symposium on VLSI (ISVLSI), S 557–562. IEEE
11. Trimberger S, Carberry D, Johnson A, Wong J (1997) A time-multiplexed fpga. In: Proceedings, the 5th annual IEEE symposium on Field-Programmable custom computing machines, S 22–28. IEEE
12. Ustaoglu B, Huhn S, Große D, Drechsler R (2018) SAT-Lancer: a Hardware SAT-Solver for Self-Verification. In: 28th ACM great lakes symposium on VLSI (GLVLSI). o. A.



**Ralf Bachmayer, Peter Kampmann, Hermann Pleteit, Matthias Busse
und Frank Kirchner**

Zusammenfassung Freischwimmende Unterwasserroboter können sich in allen sechs Freiheitsgraden bewegen. Während aktives Nicken und Rollen in der Regel durch das Design, d. h. hydrostatische Stabilität, begrenzt sind, basiert die Steuerung von Lage, Position und Geschwindigkeit der Roboter auf Thruster, möglicherweise in Kombination mit Steuerflächen, beweglichen Massen oder variablen Auftriebssystemen. Aktuelle Systeme verfügen oft nicht über Selbst-Diagnosefähigkeiten und Redundanz, was den übergeordneten Missions-Controller „im Unklaren“ über den Zustand des Thrusters lässt. Dieser Informationsmangel kann zu unsicheren binären Entscheidungen über das Abbrechen oder Fortsetzen von Missionen führen. Bessere Informationen, die möglicherweise die Systemredundanz berücksichtigen, ermöglichen es dem übergeordneten Missions-Controller, die Reaktion auf Fehler oder Systemleistung entsprechend zu skalieren, wodurch die Wahrscheinlichkeit für eine zumindest teilweise erfolgreiche Mission einschließlich System- und Datenwiederherstellung erhöht und für einen Daten- oder sogar für einen totalen Systemverlust gesenkt

R. Bachmayer
MARUM – Center for Marine Environmental Sciences, Universität Bremen,
Bremen, Deutschland
E-Mail: rbachmayer@marum.de

P. Kampmann
ROSEN Creation Center GmbH, Bremen, Deutschland
E-Mail: pkampmann@rosen-group.com

H. Pleteit (✉) · M. Busse
Fraunhofer IFAM, Bremen, Deutschland
E-Mail: ple@ifam.fraunhofer.de

M. Busse
Faculty of Production Engineering, Universität Bremen, Bremen, Deutschland

F. Kirchner
Robotics Innovation Center, DFKI GmbH und Arbeitsgruppe Robotik, Universität Bremen,
Bremen, Deutschland
E-Mail: frank.kirchner@dfki.de

wird. In diesem Kapitel schlagen wir vor, das Thema Antrieb aus verschiedenen Perspektiven wie Motordesign und -steuerung, Systemtechnik sowie Optimierung durch maschinelles Lernen und adaptive Identifikation und Steuerung anzugehen. Die treibende Motivation ist die Forschung nach einer Antriebslösung, die den Anforderungen an einen langfristig autonomen Unterwasserroboter hinsichtlich hoher Systemeffizienz, Zuverlässigkeit und Selbst-Diagnosefähigkeiten genügt. Dies wird durch einen integrierten Systemansatz zwischen der elektrischen Maschine, dem Propeller und möglicherweise einer Düse erreicht. Darüber hinaus wird die Forschung sich auf die Echtzeit-Systemleistung konzentrieren, indem maschinelles Lernen in Kombination mit deterministischeren modellbasierten Ansätzen für Leistungsvorhersage und Überwachung zur Fehlererkennung von weichen und harten Fehlern eingesetzt wird.

Stand der Technik und bekannte Probleme

Der Energieverbrauch unbemannter Unterwasserfahrzeuge setzt sich typischerweise aus einer Grundbelastung, einem Antriebsverbrauch sowie einem Nutzlastverbrauch zusammen. Die Grundbelastung umfasst alle für den ordnungsgemäßen Betrieb notwendigen Fahrzeugunterysteme mit Ausnahme des Antriebs. Dazu gehören Steuerungs-, Navigations- und Kommunikationssysteme sowie die Energiespeicher- und Managementkomponenten.

Die Antriebsbelast wird separat betrachtet, was ihre Bedeutung und Komplexität unterstreicht. Ein konventionelles Antriebssystem besteht aus einem Propeller, einer zentralen Welle, manchmal einem Getriebe, einem Antrieb bzw. Motor mit Gehäuse und einer Steuereinheit. Abb. 1 zeigt verschiedene Konfigurationen von Schub- und Antriebssystemen, die zum Antrieb und Manövrieren von Unterwasserfahrzeugen verwendet werden. Alternativ werden sogenannte Ringpropeller verwendet, die nicht die konventionelle Nabenanordnung für Welle und Antrieb haben, sondern eine Konfiguration, bei der die Antriebs Elemente entlang des Umfangs des Propellers angeordnet sind. In dieser Konfiguration liefert die elektrische Maschine ein höheres Drehmoment bei einer niedrigeren Geschwindigkeit und ist damit in der Lage, den Propeller direkt anzutreiben. Das spart ein zusätzliches Getriebe, das typischerweise mit zusätzlichen Verlusten und höherem mechanischen/akustischen Lärm einhergeht. Darüber hinaus kann der Propeller im Design ohne Nabe vom Rand aus gestützt werden, wodurch das Risiko einer Verstopfung des Propellers verringert wird. Ein Nachteil des Ringpropellers ist sein typischerweise relativ hohes Gewicht und die daraus resultierende Trägheit, aufgrund der Zunahme der rotierenden Masse bei einem größeren Durchmesser. Zusätzlich erhöht die relativ große Gleitfläche des Rotors die Reibungsverluste und das Risiko von kontaminierten Lagerflächen durch Verschmutzung aus dem umgebenden Wasser. Im Vergleich dazu sind die traditionellen axialen Antriebssysteme durch die verfügbare Leistung begrenzt und sind typischerweise hydrodynamisch asymmetrisch, wobei der Antriebsmotor auf



Abb. 1 Beispiele für Unterwasserantriebssysteme. Obere Reihe: Ringpropeller. Linkes Bild: Hauptantriebsschubdüse (Innendurchmesser: 266 mm). Rechtes Bild: Tunnel-Thruster-Konfiguration (Innendurchmesser: 160 mm). Untere Reihe: Linkes Bild zeigt axial gestützten Ringpropeller; rechtes Bild zeigt einen konventionellen axial angetriebenen Propeller für ein AUV. (Quelle: MARUM, Universität Bremen, Deutschland)

einer Seite des Propellers sitzt, was dessen Durchmesser und daher die installierte maximale Leistung effektiv begrenzt.

Eine weitere bedeutende Designüberlegung ist die Trennung von elektrischen und mechanischen Komponenten vom Meerwasser, das eine leitfähige und korrosive Umgebung darstellt, sowie die Auslegung der Systeme gegenüber dem Meeresdruck. Während Korrosionsprobleme in der Regel durch eine geeignete Materialauswahl, Opferanoden, Schutzbeschichtungen oder Kombinationen davon gelöst werden, ist die Frage der Gehäusegestaltung komplexer.

Derzeit gibt es drei Designansätze. Ein Ansatz besteht darin, die elektrischen Komponenten einschließlich des Motors bei Atmosphärendruck einzukapseln.

Dieser Ansatz ist die gebräuchlichste Unterbringungsmethode für Elektronik. Aufgrund der Notwendigkeit von Hochdruckdrehdichtungen für wellenangetriebene Propeller wird diese Methode jedoch erhebliche mechanische Reibungsverluste in der Dichtung haben und insbesondere bei Anwendungen in größerer Tiefe das Risiko eines dynamischen Dichtungsversagens bergen. Der zweite Ansatz besteht darin, keine durchgehende Welle zwischen Antrieb und Propeller zu verwenden, stattdessen wird die Verbindung mit einer magnetischen Kupplung, axial oder radial, hergestellt, um den inneren rotierenden Teil von der Umwelt zu isolieren. Die Methode der magnetischen Kupplung eignet sich nur für geringe Druckdifferenzen, denn die Wandungsstärken zwischen dem inneren und äußeren Teil müssen sehr dünn sein, damit die magnetische Kupplung effizient bleibt. Wenn das Innere nahe am Atmosphärendruck gehalten werden soll, kann dies die Tiefenreichweite des Systems erheblich einschränken. Als Lösung für tiefere Systeme wird das Innere mit einer isolierenden Flüssigkeit mit geringer Viskosität, normalerweise auf Ölbasis, gefüllt, die mit einem federbelasteten Kompensator leicht über dem Umgebungsdruck gehalten wird. Dies verbessert die Wärmeleitfähigkeit zwischen den Motorwicklungen, der Elektronik und dem Gehäuse, verursacht jedoch höherer Reibungsverluste aufgrund der rotierenden Maschine in der Flüssigkeit und bringt die Beschränkung mit sich, nur druck- und flüssigkeitskompatible elektronische Komponenten und Beschichtungen verwenden zu können. Die dritte Methode besteht darin, die Motorwicklungen und die Elektronik vollständig in ein festes/nachgiebiges Material einzukapseln und die freiliegenden Komponenten, d. h. Lager, Buchsen, Welle, so auszuwählen, dass sie unter Umgebungsbedingungen robust arbeiten können. Probleme ergeben sich hier aus den kleinen Spalten, die zwischen rotierenden Oberflächen erforderlich sind, die möglicherweise keine ordnungsgemäße Beschichtung zulassen, oder der begrenzten Auswahl an Materialien, die mehrere Anforderungen erfüllen müssen, wie z. B. eine effiziente elektromagnetische Wechselwirkung zwischen Stator und Rotor.

Neben den oben genannten Designüberlegungen wird die Betrachtung der Betriebsbedingungen einen großen Einfluss auf die Wahl der Lösung haben. Grundsätzlich gibt es zwei Arten von Betriebsanforderungen für Antriebssysteme: Hovering-Betrieb und Survey-Betrieb. Der Hovering-Betrieb erfordert, dass das Antriebssystem um einen Nullgeschwindigkeitsbetriebspunkt herum, bidirektional, eine Position hält [3, 4]. Im Gegensatz dazu wird der Survey-Betrieb um einen engen Bereich der Designgeschwindigkeit herum durchgeführt, wobei ein besonderer Schwerpunkt auf der Systemeffizienz an diesem Punkt liegt.

Systemdesign

Für die Zwecke dieser Studie berücksichtigen wir keine hydraulisch angetriebenen Systeme. Diese Systeme werden bisher ausschließlich in ROV-Anwendungen eingesetzt, aufgrund der hohen volumetrischen Leistungsdichte von Hydraulikmotoren. Da hydraulische Systeme eine hydraulische Leistungseinheit (HPU) benötigen, um die hydraulische Last anzutreiben, sind diese Systeme

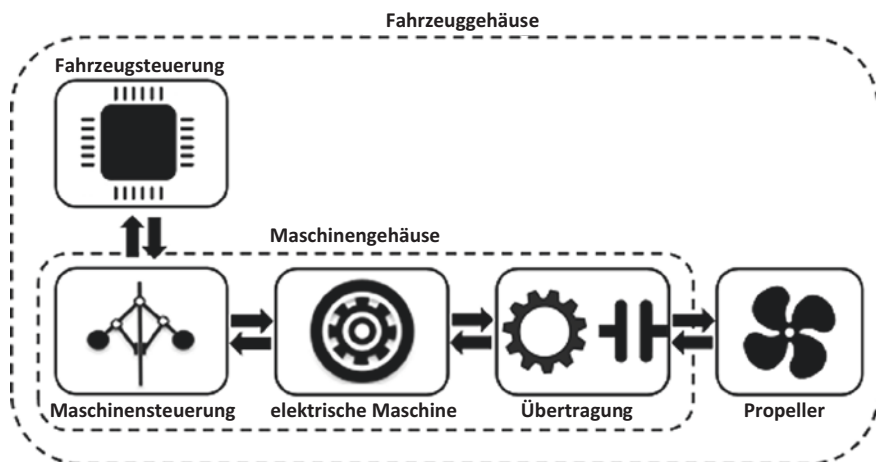


Abb. 2 Systemdiagramm eines typischen Antriebssystems. Beachten Sie, dass Direktantriebssysteme keine Getriebe verwenden und Propeller möglicherweise gekapselt sind

aufgrund ihrer geringen Energieeffizienz und der allgemeinen Systemkomplexität nicht für autonome Unterwasserfahrzeuge geeignet.

Abb. 2 zeigt ein Diagramm eines typischen elektrischen Antriebssystems und die Wechselwirkung zwischen ihren Komponenten. Zusätzlich zu diesen Wechselwirkungen ist das Antriebssystem ein integraler Bestandteil des Unterwasserfahrzeugs und interagiert mit der Hydrodynamik des Fahrzeugs.

Anforderungen an intelligenten Antrieb

Die typischen Anwendungsbereiche für autonome Unterwasserfahrzeuge haben sich im Laufe der letzten Jahrzehnte weiterentwickelt. Sie haben sich von den typischen hoch fliegenden akustischen Vermessungsanwendungen, die Sidescan- oder Multibeam-Sonar verwenden, hin zu niedriger fliegenden optischen Vermessungsmissionen ausgeweitet. Neben dem Bedarf an qualitativ hochwertigen Datenbildern und den physikalischen Zwängen, die sich aus der Lichtadsorption und Energieüberlegungen für diese Anwendungen ergeben, ist die Fähigkeit, sich dem Meeresboden zu nähern und Kollisionen zu vermeiden, von wesentlicher Bedeutung für diese Operationen. Abgesehen von der Hinderniserkennung sind sichere und zuverlässige Operationen unerlässlich, um diese Manövrierfähigkeit des Fahrzeugs zu erreichen. Um eine hohe Manövrierfähigkeit bei relativ niedrigen Geschwindigkeiten zu erreichen, sind Steuerflächen unzureichend. Sie benötigen eine Mindestgeschwindigkeit, um eine ausreichende Steuerungswirkung zu erzeugen, so dass Hindernisse in unmittelbarer Nähe sicher umfahren werden können. Um dieses Problem zu überwinden, verwenden Fahrzeuge, die ein hohes Maß an Manövrierfähigkeit benötigen, zusätzliche Thruster, um die angemessenen Steuerkräfte bereitzustellen.

Dennoch werden diese Fahrzeuge überwiegend für mikrobathymetrische und photogrammetrische Vermessungen von geologischen Formationen, Schiffswracks oder Pipelines verwendet. In jüngster Zeit gibt es in der Industrie einen Trend, sich von oberflächenbetriebenen ferngesteuerten Fahrzeugen für Inspektions- und einfache Manipulationsaufgaben hin zu zunehmend autonomen Operationen zu verlagern. Mit dieser Verschiebung von ferngesteuerten Fahrzeugen hin zu autonomen Fahrzeugen steigt der Bedarf und die Nachfrage nach AUVs, die zum Schweben fähig sind.

Dies erfordert verschiedene Arten von Antriebssystemen in autonomen Fahrzeugen. Hovering-Betrieb führt zu einer Erhöhung der dynamischen Belastung des Antriebssystems im Vergleich zum Survey-Betrieb. Für industrielle Anwendungen, insbesondere für meeresbodengestützte Systeme [16], müssen die Thruster sehr zuverlässig und robust sein. Weitere Anforderungen an die Antriebssysteme, insbesondere an die Dynamik der Systeme, ergeben sich aus der Aussicht auf zukünftige vollautomatische Interventionen mit AUVs. Angesichts der freischwebenden Basis des Fahrzeugs muss das gesamte Antriebssystem erhebliche Steuerkräfte mit einer hohen dynamischen Rate liefern, um bedeutende Manipulationsaufgaben zu bewältigen.

Diese Anforderungen spiegeln sich nicht nur in den Anforderungen an die elektrische Maschine und den Propeller wider, sondern auch in der hohen Bandbreite der Steuerung, um die notwendigen hochpräzisen Kräfte und Drehmomente zur Kompensation einwirkender Kräfte und Drehmomente [3] bereitzustellen, die das System möglicherweise erfährt. Die Anforderungen an die genaue und schnelle Schubantwort zusammen mit dem komplexen hydrodynamischen Regime, d. h. Rumpf-Thruster-Interaktion, und dem bidirektionalen Betrieb erfordern neue Ansätze der Steuerungstechnik, die nichtlineare Regler mit adaptiven Steuerungsstrategien [2] und möglicherweise maschinelles Lernen kombinieren.

Gleichzeitig sollte man nicht vergessen, dass wir durch die verfügbare Bordleistung begrenzt sind. Die erhöhten Anforderungen an das Antriebssystem gehen mit einem erhöhten Energieverbrauch einher, was eine hohen Systemeffizienz [5] nötig macht. Dies beinhaltet auch ein geeignetes thermisches Design.

Da das AUV unter einem signifikanten Umgebungsdruck arbeitet, ist die mechanische Verbindung zwischen elektrischer Maschine und Propeller von größter Bedeutung, nicht nur wegen möglicher Problem in der Zuverlässigkeit, sondern auch weil sie eine wichtige Ursache für Reibung und damit für Leistungsverluste sein können.

Die Gesamtanforderungen an das System können wie folgt zusammengefasst werden:

- Zuverlässigkeit und Robustheit
- Hoher Dynamikbereich
- Hervorragende Steuerbarkeit
- Hohe Gesamteffizienz des Antriebssystems
- Fehlererkennung und Diagnose
- Systemeffizienz
- Motordesign in Bezug auf Kühlung, maximales Drehmoment, geringen Schlupf und Hysterese.

Integrierter Systemdesignansatz

Betrachtet man die Systemanforderungen, so muss das System in seiner Gesamtheit betrachtet werden, um die gewünschte Leistung zu erzielen. Ganz anders als bei einem System für den Survey-Betrieb, bei dem ein enger Betriebsbereich eine einfache Optimierung ermöglicht, ist das hovernde Mehrschubdüsenfahrzeug erheblich komplexer. Die Optimierung einer einzelnen Teilkomponente ohne Berücksichtigung der Auswirkungen auf die anderen Komponenten führt zu einem ziemlich ineffizienten Design.

Wir werden einen iterativen integrierten Designansatz verwenden, der elektromechanische Modellierungstechniken verwendet, um das Gesamtsystemdesign zu optimieren. Dies muss die Berücksichtigung der Rumpf-Thruster-Interaktion unter Verwendung von CFD und anderen Modellierungstechniken, wie der Fluid-Struktur-Interaktion, beinhalten. Dieser Ansatz ist jedoch begrenzt auf einen sich langsam verändernden Schub meist in einer Richtung, da schnelle Schubänderungen und die daraus resultierenden Änderungen der Strömungsbedingungen, insbesondere während der Schubumkehr bei hovernden Fahrzeugen, zu extrem komplexen, chaotischen Strömungsmustern führen.

Design der elektrischen Maschine

Die Anforderungen an das Design einer elektrischen Maschine als Antriebsgerät für ein Unterwasserfahrzeug werden durch die autonomen Betriebsanforderungen in der Unterwasserumgebung bestimmt. Bei Langstreckenbeobachtungs- oder Großraumüberwachungsanwendungen ist die wichtigste Anforderung ein geringer Stromverbrauch und eine hohe Effizienz.

Für Hovering-Zwecke in Unterwasser-Manipulationsanwendungen besteht Bedarf an hoher Leistungs- und Drehmomentdichte in Kombination mit geringem Stromverbrauch und präziser Antriebssteuerung, um die Anforderungen an eine genaue Positionierung auch in störenden Umgebungen mit hoher Strömungsgeschwindigkeit erfüllen zu können.

Beide Anwendungen benötigen ein hohes Maß an Ausfallsicherheit aufgrund des autonomen Betriebsmodus.

Aus diesem Grund ist Fehlertoleranz ein wichtiger Aspekt. Ein konventionelles Dreiphasenantriebssystem verliert seine Fähigkeit, ein konstantes Ausgangsdrehmoment zu erzeugen, wenn eine der Phasen ausfällt. Fehlertolerante Antriebstopologien ermöglichen die Kompensation von auftretenden Bremsmomenten im Falle von Ausfällen und die Erzeugung eines konstanten Drehmomentausgangs auch im Nachfehlerbetrieb. Dies kann durch Mehrphasendesigns erreicht werden, bei denen mehr als die konventionellen drei elektrischen Phasen für die Antriebssysteme verwendet werden [9].

Diese Designs ermöglichen eine Redundanz in der elektrischen Maschine. Zum Beispiel kann bei einem Ausfall einer Dreiphasen-Teilmaschine in einem Sechsen-phasen-Design eine Teilmaschine die auftretenden Drehmomentschwankungen oder das Bremsmoment der ausgefallenen Maschine kompensieren.

Sensorlose Steuerungsmethoden bieten zusätzliche Fähigkeiten für eine höhere Ausfallsicherheit aufgrund der Möglichkeit, bei einem Ausfall des Winkelsensors, der für die Steuerung einer synchronen elektrischen Maschine entscheidend ist, auf die entsprechenden Steueralgorithmen umzuschalten.

Ein weiteres Thema ist die Übertragung der mechanischen Leistung auf den Propeller. Wellenangetriebene Propeller erfordern eine rotierende Wellendichtung. Dies kann die Langzeitzuverlässigkeit aufgrund von Leckagen, Reibungsverlusten und Abriebproblemen beeinträchtigen. Eine Möglichkeit, diese Schwierigkeiten zu überwinden, ist die Verwendung von magnetischen Kupplungen, wie zuvor erwähnt. Dies ist jedoch mit mehr Gewicht und Platzbedarf verbunden.

Da Ringpropeller größere Durchmesser und daher mehr Gewicht erfordern, können diese Eigenschaften für das Gesamtsystem in Bezug auf Nutzlast, Reichweite und Betriebszeit entscheidend sein. Jede zusätzliche Größe oder Gewicht des Antriebssystems ist möglicherweise nicht machbar für diese Art von Antriebssystem. Daher sollte die Art der mechanischen Übertragung genau in Bezug auf die Anforderungen der Anwendung des Fahrzeugs bewertet werden.

Neue Herstellungsansätze

Konventionelle Spulen für elektrische Maschinen werden durch Wickeln von Runddrähten hergestellt. In einigen Fällen wird rechteckiger Draht verwendet, um den Nutfüllfaktor zu erhöhen, der durch diese Mittel bis zu 60 % erreichen kann. In der Massenproduktion ist er oft viel niedriger, etwa 30–40 %.

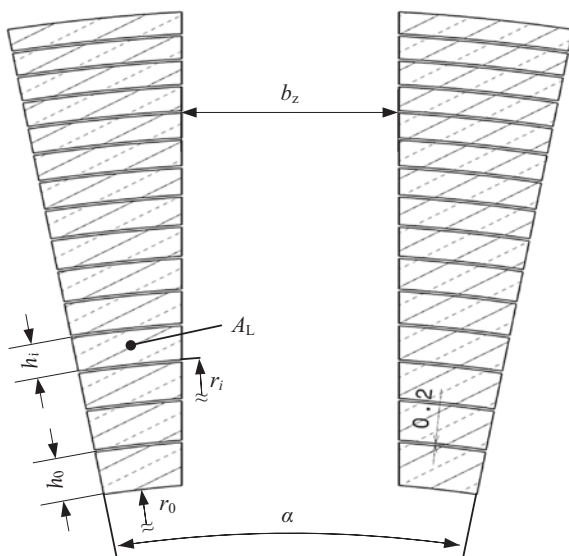
Ein neuer Ansatz ist die Herstellung von Spulen durch Gießen. Dies ermöglicht ein völlig freies Design des Querschnitts in jeder Schicht der Wicklung. So ist es möglich, einen individuellen Querschnitt für jede Schicht der Wicklung zu entwerfen (siehe Abb. 3 und Gl. 1). Mit diesem Ansatz können Nutfüllfaktoren von 80 % und darüber erreicht werden [8].

Gl. 1: Theoretisch optimale Höhe einer Wickelschicht

$$h_1 = r_i / \alpha (\alpha - \sin(\arcsin(b_z / 2r_i))) + \sqrt{(r_i / \alpha (\alpha - \sin(\arcsin(b_z / 2r_i))))^2 - 2A_L / \alpha} \quad (1)$$

Durch Erhöhung des Nutfüllfaktors erhöht sich der Gesamtquerschnitt des leitenden Materials in der Nut der Maschine, was den Gesamtwiderstand der Spule reduziert. Dies reduziert direkt die resultierenden Verluste aufgrund des ohmschen Widerstands.

Abb. 3 Variable Höhe und Breite der Leiterform

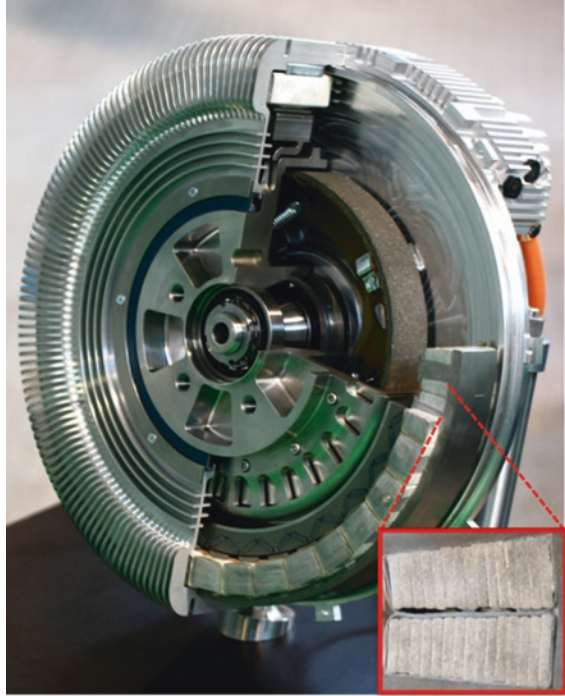


Die Dauerleistung und das Drehmoment einer elektrischen Maschine sind durch ihr thermisches Verhalten begrenzt. Durch Anpassung des Querschnitts jeder Schicht der Wicklung an die verfügbare Fläche wird nicht nur der Nutfüllfaktor erhöht, sondern auch der thermische Widerstand der gesamten Wicklung in Bezug auf die Wärmeableitung erheblich reduziert. Zusätzlich dazu ist es möglich, den Querschnittsbereich an den Endwicklungen zu erhöhen, was zu einer weiteren Reduzierung des Widerstands führt.

Die flache Leiteranordnung der Wickelschichten reduziert zusätzlich Stromverdrängungseffekte, die sonst bei höheren Drehzahlen die Verluste erheblich erhöhen würden.

All diese Effekte tragen zur Verbesserung der thermischen und elektrischen Eigenschaften eines Motors bei, ohne Größe und Gewicht zu erhöhen. Es ist weiterhin möglich, das Gewicht durch die Verwendung von Aluminium als leitendem Material zu reduzieren. Aufgrund des hohen Nutfüllfaktors und des ausgezeichneten thermischen Verhaltens führt dies zu reduzierten ohmschen Verlusten und gleichzeitig zu einer erheblichen Gewichtsreduktion. Die erhebliche Reduzierung der Verluste führt nicht nur zu einer höheren Leistung, sondern auch zu einer erhöhten Effizienz und daher zu einem verringerten Gesamtstromverbrauch [11] (Abb. 4).

Abb. 4 Hochdrehmoment-Direktantrieb PMSM mit gegossenen Aluminiumspulen



Integrierte Sensorik

Thruster für Unterwassersysteme sind im Allgemeinen empfindliche Komponenten, die anfällig für Defekte aufgrund von Lagerschäden, Abrieb und blockierten Komponenten aufgrund von Verschmutzung sind. Da die Steuerung der Freiheitsgrade in vielen Fällen nicht redundant ausgelegt ist, können Thruster als einzelne Ausfallpunkte betrachtet werden, die zu einem fatalen Verlust führen können, insbesondere bei autonomen Unterwasserfahrzeugen.

Diese Beobachtung führt zu dem Schluss, dass eine umfangreiche Überwachung der Thruster für einen sicheren Betrieb unerlässlich ist. Während die Integration von Sensortechnologie auf Aktuatoren für Anwendungen an Land weit fortgeschritten ist, fehlen der Thruster-Technologie noch die meisten Sensoren. Die Gründe dafür sind in den hohen mechanischen Anforderungen an Sensoren zu finden, die mit Flüssigkeiten unter hohem Umgebungsdruck in Kontakt kommen.

Informationen über die Thruster bezüglich der folgenden Eigenschaften sind wünschenswert:

Physische Eigenschaft	Abgeleitete Information
Strom	Motorlast
Temperatur	Thermische Belastung
Drehzahl	Steuerungseingabe
Schub	Steuerungseingabe

Insbesondere die Messung des Schubs ist beim Unterwasserantrieb sehr wichtig, da dies der Steuerausgang für klassische Unterwassersteuerungsmodelle ist [7]. Der Schub kann nicht modelliert werden, wenn man nur die Schubdüse betrachtet, er hängt von der Integrationsfläche, den Strömungsbedingungen der umgebenden Flüssigkeit und dem verwendeten Propellertyp ab. Bis jetzt sind komplexe Systemidentifikationsexperimente [14] erforderlich, um eine Zuordnung der Drehzahl des Propellers und des Schubs zu erhalten.

Die Schubfassung kann durch Messung der axialen Verschiebung der Welle und des Rotors der elektrischen Maschine erfolgen. Es gibt mehrere Ansätze zur sensorlosen Bestimmung der axialen Verschiebung von Rotoren, z. B. [13]. Diese Methoden stammen aus der Steuerung von lagerlosen Motoren. Sie verwenden interne Steuerungsparameter wie Spannungen und Ströme zur Bestimmung der Verschiebung. Durch Anwendung solcher Methoden auf die axiale Verschiebungsmessung einer elektrischen Maschine kann es möglich sein, nicht nur die Zuverlässigkeit durch das Fehlen von Sensorhardware zu verbessern, sondern auch die Präzision der Messung in rauen Umgebungsbedingungen und bei den für Unterwasseranwendungen typischen rigiden Anforderungen an die Lager zu erhöhen.

Optimierung des maschinellen Lernens

Maschinenlernalgorithmen sind besonders geeignet für Probleme, bei denen die Optimierung auf multivariaten Variablen beruht, die gegenseitige Auswirkungen haben. Die Antriebstechnologie weist mehrere Optimierungsprobleme auf, bei denen dies der Fall ist. Wir stellen drei Ansätze vor, bei denen maschinelles Lernen vorteilhaft sein könnte, und präsentieren die bisherigen Arbeiten zusammen mit unseren Forschungsrichtungen.

Die Leistung eines Antriebs hängt nicht nur von der Effizienz der elektrischen Maschine ab, sie wird auch durch die Strömungsart der Flüssigkeit und die Hydrodynamik der Antriebsstruktur beeinflusst. Neben manuellen Optimierungsansätzen auf der Grundlage von Simulationen in der numerischen Strömungsmechanik (CFD) kann ein Optimierungsansatz mit maschinellem Lernen für robotische Strukturen verwendet werden. In [17] wird die Rumpfstuktur eines AUV mit genetischen Algorithmen und CFD-Simulation optimiert. Aldias Bahatmaka [1] verwendete ebenfalls genetische Algorithmen, um das Design des gekapselten Propellers eines ferngesteuerten Fahrzeugs (ROV) zu optimieren. Das Design der Propellerblätter war ein weiteres Ziel für die Optimierung in

der Arbeit von [6]. Die Arbeit resultierte in einer Open-Source-Software, die zur Realisierung optimierter Propellerblätter für spezifische Anforderungen verwendet werden kann.

Als Schlussfolgerung aus diesen früheren Arbeiten kann festgestellt werden, dass die meisten Ansätze zur Optimierung der Hydrodynamik eines AUV oder Antriebs auf Teilebene und nicht auf Systemebene durchgeführt werden. In Bezug auf einen Antrieb schlagen wir vor, einen Optimierungsansatz zu haben, der die verschiedenen Optimierungsmöglichkeiten an einem Antrieb parallel betrachtet und somit die gegenseitigen Auswirkungen auf die Optimierung des elektrischen Antriebs, der Hydrodynamik sowie des Propellers ausnutzt.

Das Erkennen von Abweichungen von einem Antriebsmodell während des Betriebs ist eine weitere Möglichkeit, maschinelle Lernalgorithmen anzuwenden. In der Arbeit von [15] wurde ein Ansatz zum maschinellen Lernen verwendet, um mit Ausfällen im Antrieb umzugehen. Ein anderer Ansatz zur Fehlerdiagnose wird in [18] beschrieben. Hier wird ein Gauß'scher Partikelfilter verwendet, um das Fehlermodell sowie den Bewegungszustand zu schätzen.

Ein weiteres Optimierungsproblem, bei dem maschinelles Lernen geeignet ist, ist die Identifikation des Controllers.

Eigene Arbeiten in diesem Bereich befassen sich mit der Optimierung von robotischen Strukturen mit genetischen Algorithmen. Die Fehlererkennung von Antrieben mit Regressionsmodellen [12] sowie die Entwicklung von Controllern mit Partikelschwarmoptimierung zusammen mit genetischen Algorithmen [10]. Zukünftige Arbeiten im Bereich der Unterwasserantriebe werden sich auf den systemorientierten Ansatz zur Optimierung der Hydrodynamik, der Motorparameter sowie des Propellerdesigns konzentrieren. Dies erfordert maschinelle Lernansätze – höchstwahrscheinlich auf genetischen Algorithmen basierend – die Propellerdesigns, elektrische Motorenaufbauten sowie hydrodynamisch geeignete Rumpfe parallel mit gegenseitigen Abhängigkeiten entwickeln und somit ein interessantes Forschungsfeld im Bereich des maschinellen Lernens darstellen.

Schlussfolgerungen

Antriebssysteme für Unterwasserroboter können in mehrere Teilsysteme zerlegt werden, bei denen jedes Teilsystem auf das beabsichtigte Anwendungsszenario eines Roboters optimiert werden kann. Es ist absehbar, dass sich dieses Anwendungsszenario für autonome Unterwasserfahrzeuge von reinen Beobachtungsaufgaben zu Aufgaben verschieben wird, die Schwebetätigkeiten sowie die Unterstützung von Interventionseinsätzen beinhalten. Die Konsequenzen betreffen alle Teilsysteme des Antriebsdesigns. Um entgegengewirkende Kräfte zu liefern, ist ein hohes Drehmoment erforderlich, Sensoren, die den Systemzustand überwachen, sind notwendig, um die Zuverlässigkeit des Antriebssystems sowie die Präzision der Positionssteuerung zu erhöhen, indem der Schub direkt gemessen und neue Steuerungsalgorithmen angewendet werden.

Ansätze zum maschinellen Lernen ermöglichen eine weitere Designexploration in Bezug auf das Systemdesign, die Fehlererkennung sowie die Realisierung adaptiver Controller, die den Weg für rekonfigurierbare Nutzlasten ohne erneute Durchführung von Controller-Systemidentifikationsprozessen ebnen.

Literatur

1. Aldias Bahatmaka, DJ (2017) Optimization of ducted propeller design for the ROV (Remotely Operated Vehicle) using CFD. *Adv Technol Innov*
2. Bachmayer R, Whitcomb L (2003) Adaptive parameter identification of an accurate nonlinear dynamical model for marine thrusters. *Trans Am Soc Mech Eng J Dyn Syst Measur Control* 125(3):491–493
3. Bachmayer R, Whitcomb LL (2001) An open loop nonlinear model based thrust controller for marine thrusters. In: *Proceedings 2001 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems, expanding the societal role of robotics in the the next millennium* (Cat. No.01CH37180), (S 1817–1823). Maui, HI, USA
4. Bachmayer R, Whitcomb LL, Grosenbaugh MA (2000) An accurate four-quadrant nonlinear dynamical model for marine thrusters: theory and experimental validation. *IEEE J Ocean Eng* 146–159
5. Claus B, Bachmayer R, Williams CD (2010) Development of an auxiliary propulsion module for an Autonomous Underwater Glider. *J Eng Marit Environ* 224(4):255–266
6. Epps B, Kimball R (2013) OpenProp v3: open-source software for the design and analysis of marine propellers and horizontal-axis turbines. <http://engineering.dartmouth.edu/epps/openprop>
7. Fossen TI (2011) *Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control*. Wiley, Chichester
8. Kock AG-J (2011) Casting production of coils for electrical machines. In: *Electric drives production conference*
9. Kock A, Gröninger M, Mertens A (2012) fault tolerant wheel hub drive with integrated converter for electric vehicle applications. In: *IEEE vehicle power and propulsion conference*. Seoul
10. Langosz M, von Szadkowski K, Kirchner F (2014) Introducing particle Swarm optimization into a genetic algorithm to evolve robot controllers. In: *GECCO 2014—companion publication of the 2014 genetic and evolutionary computation conference*
11. Michael Gröninger FH (2014) Cast coils for electrical machines and their application in automotive and industrial drive systems. In: *4th international electric drives production conference (EDPC)*
12. Nascimento SA (2018) Modeling and soft-fault diagnosis of underwater thrusters with recurrent neural networks. In: *Proceedings of the 14th international workshop on advanced control and diagnosis*. Bucharest
13. Nian H, Quan Y, Li J (2009) Rotor displacement sensorless control strategy for PM type bearingless motor based on the parameter identification. In: *International conference on electrical machines and systems*
14. Ridao P, Battle J, Carreras M (2001). Model identification of a Low-Speed UUV. *IFAC Proc* 34(7): 395–400
15. Seyed Reza Ahmadzadeh PK (2014) Multi-objective reinforcement learning for AUV thruster failure recovery. In: *IEEE symposium on adaptive dynamic programming and reinforcement learning (ADPRL 2014)*, proceedings IEEE symposium series on computational intelligence (SSCI 2014). Florida. USA

16. Siesjö J, Roper C, Furuholmen M (2013) Sabertooth a seafloor resident hybrid AUV/ROV system for long term deployment in deep water and hostile environments. In: Unmanned untethered submersible technology (UUST) 2013
17. Ting Gao YW (2016) Hull shape optimization for autonomous underwater vehicles using CFD. *Eng Appl Comput Fluid Mech*, S 599–607
18. Yu-shan Sun X-R.R.-M-C.-H (2016) Thruster fault diagnosis method based on Gaussian particle filter for autonomous underwater vehicles. *Int J Naval Archit Ocean Eng*

Herausforderungen und Möglichkeiten in der Kommunikation für autonome Unterwasserfahrzeuge



Dirk Wübben, Andreas Könsgen, Asanga Udugama, Armin Dekorsy und
Anna Förster

Zusammenfassung Drahtlose Kommunikation ist für autonome Unterwasserfahrzeuge (AUVs) unerlässlich, um Arbeitsanweisungen zu geben, gesammelte Daten weiterzuleiten oder mehrere AUVs, die in einem Schwarm arbeiten, zu koordinieren. Die Kommunikation in der Unterwasserumgebung ist jedoch unzuverlässig und erlaubt aufgrund hoher Störungen und schlechter Signalübertragungsbedingungen keine hohen Datenraten. In diesem Kapitel werden bestehende Konzepte für Unterwasserkommunikation sowohl aus der Sicht der Informationsübertragung als auch aus dem Netzwerkaspekt heraus überprüft. Die Einführung semantischer Kommunikation hilft, die Menge der übertragenen Daten zu reduzieren, indem semantische Nebeninformationen genutzt werden. Opportunistische Netzwerke ermöglichen eine Ende-zu-Ende-Datenweiterleitung ohne permanente Konnektivität und können erweitert werden, um die am besten geeignete Kommunikationstechnologie zu nutzen, wenn Daten mit gegebener Größe und Priorität weitergeleitet werden. Maschinelles Lernen (ML) hilft, Hintergrundinformationen zu speichern und zu klassifizieren, um die Effizienz der Kommunikation zu erhöhen.

D. Wübben (✉) · A. Dekorsy

Department of Communications Engineering, Institute for Telecommunication and High Frequency Techniques, Universität Bremen, Bremen, Deutschland

E-Mail: wuebben@ant.uni-bremen.de

A. Dekorsy

E-Mail: dekorsy@ant.uni-bremen.de

A. Könsgen · A. Udugama · A. Förster

Department of Communication Networks, Institute for Telecommunication and High Frequency Techniques, Universität Bremen, Bremen, Deutschland

E-Mail: ajk@comnets.uni-bremen.de

A. Udugama

E-Mail: adu@comnets.uni-bremen.de

A. Förster

E-Mail: afoerster@comnets.uni-bremen.de

Einführung

Der autonome Betrieb von Unterwasserfahrzeugen ermöglicht flexiblere Operationen im Vergleich zu ferngesteuerten Fahrzeugen. AUVs ermöglichen eine bessere Manövrierfähigkeit als verkabelte Lösungen und den Betrieb über größere Entfernungen, was ausgefeilte Lösungen für wissenschaftliche Missionen und Suchoperationen ermöglicht. Darüber hinaus können mehrere AUVs gemeinsam in einem Schwarmkonzept betrieben werden, um effizientere und effektivere Operationen durchzuführen [1]. Neben einer zuverlässigen Stromversorgung und präzisen Positionierung ist eine effektive drahtlose Kommunikation eine der Schlüsselanforderungen für den Betrieb von AUVs [2]. Die Aufgabenbeschreibungen müssen den AUVs mitgeteilt werden und der Schwarm von AUVs arbeitet gemeinsam als Team, um das gemeinsame Ziel auf der Grundlage des Informationsaustauschs zwischen den AUVs zu erreichen [3]. Leider beeinflusst die Unterwasserumgebung die verfügbaren Übertragungsansätze wie akustische, elektromagnetische, magnetische Induktion und optische Kommunikation erheblich. Sie leiden unter kurzer Reichweite, niedriger Datenrate, hoher Störung/Dämpfung oder Verbindungsunterbrechungen. Daher ist eine zuverlässige drahtlose Kommunikation eine der Schlüsselherausforderungen in der Unterwasserrobotik und erfordert ein enges Co-Design des Kommunikationssystems und der AUV-Technologien. Zum Beispiel müssen die verteilte Koordination der AUVs mittels Konsenssteuerung [4, 5] oder verteilte Lernalgorithmen, die Konsensschätzungen auf der Grundlage lokaler Daten erreichen [6, 7], angepasst werden.

Der Betrieb eines Teams von AUVs erfordert die Kommunikation von Missionsbeschreibungen, Steuerinformationen und wissenschaftlichen Daten für die kooperative Missionsausführung in der rauen Unterwasserkommunikationsumgebung. Diese herausfordernde Aufgabe erfordert ausgefeilte Kommunikationsprotokolle, die aktiv nach Kommunikationsmöglichkeiten suchen, basierend auf einem Regime von gelernten Informationen. Darüber hinaus müssen die Bedeutung und die Wichtigkeit von Nachrichten für die verteilten AUVs durch Ausnutzung der semantischen Natur von Missionsbefehlen berücksichtigt werden, um die zu übertragende Information weiter zu optimieren. Für beide Konzepte werden geeignete Machine-Learning(ML)-Ansätze die flexible Gestaltung und Optimierung ermöglichen.

Unterwasser-Kommunikationstechnologien

Der Betrieb von unbemannten Luftfahrzeugen (UAV) über der Oberfläche wird durch Funkkommunikation ermöglicht, die den Austausch von Befehls- und Nutzlastnachrichten mit hohen Datenraten, geringen Verzögerungen und akzeptabler Zuverlässigkeit gewährleistet [8]. Für autonome Unterwassersysteme sind ähnliche Kommunikationsverbindungen zum Austausch von Steuerinformationen und

wissenschaftlichen Daten erwünscht. Leider ist die Unterwasserkommunikation aufgrund der Ausbreitungsbedingungen, die zu großen Zeitverzögerungen und niedrigen Datenraten führen, schwierig. Im Folgenden überprüfen wir die wichtigsten Prinzipien, die für die Unterwasserkommunikation verwendet werden, und listen ihre Hauptmerkmale auf.

Die Funkkommunikation basiert auf *elektromagnetischen (EM)* Wellen, die sich in der Luft mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten; hohe Datenraten können mit hohen Frequenzen erreicht werden. Leider unterliegen EM-Wellen in Unterwasserumgebungen einem starken Energieverlust, der auch mit der Frequenz im Meerwasser schnell zunimmt [9]. Die Verwendung von EM-Kommunikation mit niedriger Frequenz zur Erhöhung der Reichweite geht mit den Nachteilen einer großen Antennengröße und einer begrenzten Datenrate einher. In [10] wurde ein Unterwasser-Radiokommunikationssystem analysiert, bei dem Datenraten von etwa 400 kbit/s und 11 Mbit/s bei Entfernungen von 2 und 1,6 m mit 768 MHz demonstriert wurden. Bei 2,462 GHz und 20 cm Entfernung wird ein Durchsatz von 100 Mbit/s erreicht, während bei 5 GHz und 10 cm die Datenrate auf 10 Mbit/s reduziert wird. Entsprechend sollten wir in Wasser moderate Frequenzen für die Kommunikation über kurze Entfernungen oder niedrigere Frequenzen für längere Entfernungen verwenden.

Im Gegensatz zu EM-Wellen breiten sich *akustische* Wellen effizienter unter Wasser aus, da das Übertragungsmedium widerstandsfähiger gegen Kompression ist. Daher breiten sich akustische Wellen unter Wasser deutlich schneller und weiter aus, d. h. mit einer Geschwindigkeit von etwa 1500 m/s im Vergleich zu 340 m/s in der Luft, was die akustische Kommunikation zur typischen Physical-Layer-Technologie in Unterwassernetzwerken macht [11]. Dennoch hat auch die akustische Kommunikation viele Probleme, wie hohe Ausbreitungsverzögerungen, sehr niedrige Datenraten aufgrund der begrenzten verfügbaren Bandbreite und umgebungsabhängiges Kanalverhalten (z. B. Mehrweg und Fading). Die extremen Eigenschaften des Unterwasserkanals verursachen hohe Bitfehlerraten und temporäre Verluste der Konnektivität durch Abschattungszone. In [11] wird berichtet, dass Langstreckensysteme, die über mehrere zehn Kilometer arbeiten, eine Bandbreite von nur wenigen kHz haben, während Kurzstreckensysteme, die über zehn Meter arbeiten, mehr als 100 kHz Bandbreite haben können. In beiden Fällen werden nur niedrige Bitraten in der Größenordnung von zehn kbit/s von bestehenden Geräten erreicht. Größere Datenraten durch akustische Kommunikation zu realisieren, ist eine große Herausforderung und ausgefeilte Ansätze, die z. B. orthogonal frequency division multiplexing (OFDM), multiple-input multiple-output (MIMO) [12], Richtantennen [13] und nichtbinäre Codierung [14] verwenden, wurden kürzlich vorgeschlagen. Ein softwaredefiniertes Radio (SDR) basiertes Unterwasser-Akustiknetzwerk wurde in [15] beschrieben.

Eine dritte Alternative für den Unterwasserdatenaustausch ist die *optische Kommunikation*, die potenziell Datenraten von über 1 Gbit/s aufgrund der hohen verfügbaren Bandbreite ermöglicht. Allerdings werden optische Signale schnell im Wasser absorbiert und schwebende Partikel und Plankton verursachen

starke optische Streuung [9]. Ein hohes Maß an Umgebungslicht ist ein weiterer negativer Effekt für optische Kommunikationen. Experimentelle Ergebnisse, die 1 Gbit/s in einem simulierten aquatischen Medium aus klarem ozeanischem Wasser demonstrieren, wurden in [16] berichtet, wo eine Unterwasserkommunikation mit 5 GHz Bandbreite über eine Entfernung von 64 m realisiert wurde. Ein Rückgang von 1 GHz für 8 m Kommunikation in trübem Hafenwasser wurde ebenfalls untersucht. Daher kann diese Technologie verwendet werden, um Multi-Hop-Kommunikationssysteme aufzubauen.

Kürzlich wurde die *magnetische Induktion (MI)* als weitere Alternative für Unterwasserkommunikationen vorgeschlagen [17, 18]. MI-Kommunikation nutzt zeitlich veränderliche magnetische Felder, um Informationen zwischen den Kommunikationsentitäten zu übertragen. Für Unterwasserkommunikationen weist es mehrere einzigartige Merkmale auf, wie z. B. vernachlässigbare Ausbreitungsverzögerung, vorhersehbares und konstantes Kanalverhalten und ausreichend lange Kommunikationsreichweite mit hoher Bandbreite.

Eine Übersicht über die grundlegenden Eigenschaften von akustischen, elektromagnetischen und optischen Wellen [9] sowie der magnetischen Induktion [17] ist in Tab. 1 dargestellt. Offensichtlich hat jedes der Übertragungsschemata seine eigenen Vor- und Nachteile für Unterwasserkommunikationen und ihre Nutzung in komplexen Kommunikationsnetzwerken muss die Vorteile nutzen und die Auswirkungen ihrer Nachteile begrenzen. Im nächsten Abschnitt werden entsprechende Routing-Protokolle für Unterwasserkommunikationsnetzwerke diskutiert. Im darauf

Tab. 1 Eigenschaften von Unterwasser-Kommunikationstechnologien [17, 9]

Parameter	Akustisch	Elektromagnetisch	Optisch	Magnetische Induktion
Ausbreitungsgeschwindigkeit	~1500 m/s	~ 225.000 km/s	~ 33.333 km/s	~ 300.000 km/s
Leistungsverlust	>0,1 dB/m/Hz	~28 dB/1 km /100MHz	∝ Trübung	
Bandbreite	~kHz	~MHz	10–150 MHz	~MHz
Datenrate	~kbit/s	Mbit/s	~Gbit/s	Mbit/s
Antennengröße	~0,1 m	~0,5 m	~0,1 m	~0,5–2 m
Effektive Reichweite	~1 km	10 m	~10–100 m	~10–100 m
Hauptvorteil	Geringe Absorption unter Wasser	Hohe Geschwindigkeit, hohe Bandbreite	Sehr hohe Datenrate	Hohe Geschwindigkeit, Bandbreite vorhersehbar, konstanter Kanal
Hauptnachteil	Niedrige Geschwindigkeit, begrenzte Bandbreite	Hohe Dämpfung	Schnelle Absorption, optische Streuung, Umgebungslicht	

folgenden Abschnitt wird die semantische Kommunikation (SC) vorgestellt, um die Datenrate auf dem physischen Kanal durch Ausnutzung des gemeinsamen Wissens und durch Erkennen der Bedeutung von Nachrichten zu reduzieren.

Unterwasserkommunikationsnetzwerke

Opportunistische Routing-Protokolle werden häufig für stationäre Knoten in Unterwassernetzwerken verwendet, wie in [19] beschrieben. Im Kontext dieser Protokolle bedeutet der Begriff *opportunistisch*, dass die Art und Weise, wie eine Route erstellt wird, von herkömmlichen Netzwerken abweicht. In letzteren ist eine Route eine Reihe von Hops, die Datenpakete von einem einzelnen Hop zum nächsten weiterleiten. Wenn der einzelne nächste Hop ausfällt, wird die Verbindung unterbrochen. Opportunistische Netzwerke (OppNets) nutzen die Broadcast-Eigenschaft von drahtlosen Netzwerken, d. h. ein Knoten kann eine Verbindung zu mehreren Nachbarn haben. Das bedeutet, dass es mehr als eine Option geben kann, den nächsten Hop zum Ziel auszuwählen. Wenn eine Route ausgehandelt wird, geben opportunistische Protokolle daher eine Kandidatenset (CS) mit allen möglichen nächsten Hops an, so dass im Falle eines Ausfalls sofort ein anderer Hop verfügbar ist, wie in Abb. 1 gezeigt.

Es gibt zwei Möglichkeiten, wie das CS ausgewählt werden kann [19]: Geographische Protokolle gehen davon aus, dass die horizontalen Positionen der Stationen bekannt sind, während tiefenbasiertes Routing die vertikale Position als Auswahlkriterium verwendet. Darüber hinaus wird die CS-Auswahl abhängig davon unterschieden, ob das CS vom Sender oder vom Empfänger bestimmt wird.

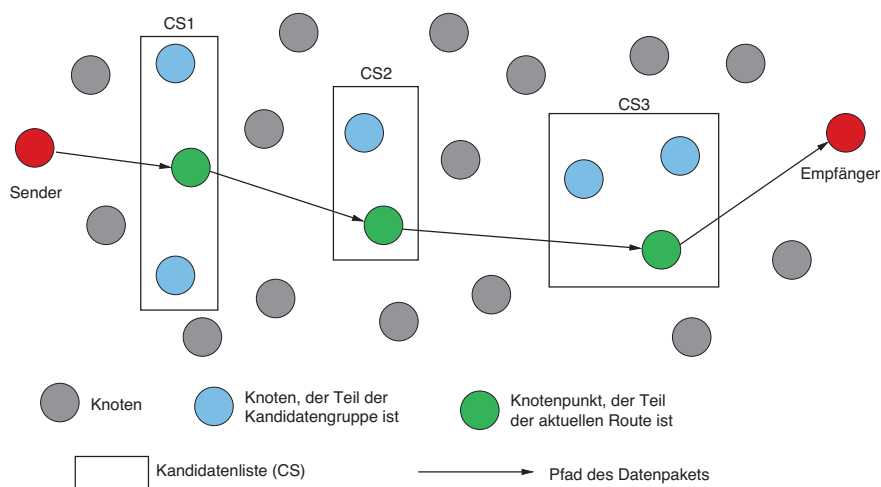


Abb. 1 Prinzip der opportunistischen Unterwasser-Routing-Protokolle, wie in [19] beschrieben

Die zuvor erwähnte Veröffentlichung gibt Beispiele für geographische Protokolle. Bei der vektorbasierten Weiterleitung (VBF) [20] ist der potenzielle Pfad zwischen Quelle und Ziel bekannt. Jeder Knoten, der sich in ausreichender Nähe zum idealen Pfad befindet, wird Teil der virtuellen Leitung, die Pakete transparent von der Quelle zum Ziel weiterleitet. Das CS ist fest und vom Quellknoten vordefiniert. Das Protokoll erfordert jedoch, dass eine Ende-zu-Ende-Konnektivität besteht, die in dünn besiedelten Netzwerken nicht unbedingt gegeben ist. Eine Verbesserung ist das Hop-by-Hop VBF [21], das besser für dünn besiedelte Netzwerke geeignet ist, da keine Ende-zu-Ende-Konnektivität erforderlich ist und das CS für jeden potenziellen Weiterleiter bestimmt wird. Der GEDAR-Ansatz (Geographic and Opportunistic Routing Protocol with Depth Adjustment for Mobile Underwater Sensor Network) [22] erweitert das Hop-by-Hop VBF um einen Wiederherstellungsmodus, in dem Knoten die Tiefe für eine Topologieänderung ändern, um die Konnektivität zu verbessern. Die zuvor erwähnte Übersicht [19] diskutiert auch andere Ansätze für Unterwasser-Mobilfunknetze (UWSN), die druckbasierte Protokolle sind, die Informationen von Tiefensensoren verwenden, um Informationen zur Wasseroberfläche weiterzuleiten. Bei tiefenbasiertem Routing (DBR) [23] ist ein Nachbarknoten, der näher an der Wasseroberfläche ist als der sendende Knoten, ein Kandidat, an den ein Paket weitergeleitet wird. Der Nachteil eines rein tiefenbasierten Ansatzes ist das Vorhandensein von lokalen Maxima, d. h. Knoten, die nicht in der Lage sind, Nachrichten an Knoten auf einer höheren Ebene weiterzuleiten, aufgrund mangelnder Konnektivität, ein sogenannter Void-Knoten. Dieses Problem wird durch HydroCast [24] überwunden, das den erwarteten Paketfortschritt als Metrik verwendet. Void-aware pressure routing (VAPR) führt Beacons als weitere Option zur Erkennung von Void-Knoten ein. In [25] wird der VAPR-Ansatz durch Energieeffizienz erweitert, um die begrenzten Batterieressourcen der Knoten zu berücksichtigen.

Der Begriff *opportunistisch* kann in einem weiteren Sinne definiert werden, wie in der zuvor diskutierten Referenz [19] angegeben. Im Gegensatz zu diesem Artikel ist die Definition von opportunistischen Netzwerken (OppNets) in [26] allgemeiner: Opportunistisches Networking wird zwischen Geräten durchgeführt, wann immer eine Konnektivität besteht, wenn auch intermittierend. Es werden keine Annahmen über eine vorab ausgehandelte Route oder Hops gemacht. Obwohl [26] nicht explizit auf Unterwassernetzwerke Bezug nimmt, werden keine Annahmen über das Kommunikationsmedium gemacht, außer für unzuverlässige drahtlose Kommunikationsverbindungen, was auf die Einsatzfähigkeit solcher generalisierten OppNets in Unterwassernetzwerken hindeutet. Auch im allgemeinen Fall von OppNets müssen die weiterzuleitenden Informationen nicht zielorientiert sein. Ziellose Nachrichten sind nützlich, wenn eine große Anzahl von Knoten eine bestimmte Information erhalten soll, was im Falle von Unterwassernetzwerken z. B. eine Warnung vor schweren Wetterbedingungen sein könnte.

Neben Unterwassernetzwerken gibt es andere Netzwerktypen, die für raue Umgebungen konzipiert sind, wie drahtlose Untergrund-Sensornetzwerke

(WUSNs), die z. B. für die Bodenüberwachung verwendet werden [27]. Der Boden hat eine höhere dielektrische Permittivität als die freie Umgebung, so dass die Pfadverluste deutlich höher sind. Feuchtigkeit, z. B. als Folge von Regen, reduziert die Signalreichweite weiter. Die gleichen Autoren haben auch Hardware für unterirdische Knoten entwickelt [28] und demonstriert [29], die in WUSNs eingesetzt werden können. Ein weiterer Einsatz von WUSNs in rauen Umgebungen mit schwierigen Signalausbreitungsbedingungen wurde in einem Kohlebergwerk demonstriert [30]. Der unterirdische Einsatz von Sensorknoten kann als Grundlage für Untersuchungen in der Unterwasserumgebung dienen, wo die Kommunikation ebenfalls mit hohen Verlusten im drahtlosen Medium zu kämpfen hat.

Die in der Literatur vorgestellten OppNet-Ansätze für die Unterwasserumgebung nutzen nicht das volle Potenzial der OppNets aus. Wenn die Anforderung einer permanenten Konnektivität aufgegeben wird, die bei aktuellen Unterwasser-OppNets noch impliziert ist, kann die Kommunikation flexibler und zuverlässiger organisiert werden. Unterwassersensoren können z. B. Daten unabhängig sammeln, die Daten lokal speichern und sie abladen, sobald sie wieder in Reichweite einer Nachbarstation sind. In diesem Zusammenhang können auch Mobilitätsmuster von Interesse sein, um vorherzusagen, wann und wie zwei Knoten sich treffen werden, damit Daten weitergeleitet werden können [31]. Auch wenn die Modelle in der Referenz für menschliche Mobilitätsmuster gedacht sind, könnte man in Betracht ziehen, wie drahtlose Unterwasserknoten sich bewegen, während sie eine Mission ausführen, so dass Modelle angepasst werden könnten. Darüber hinaus könnten Knoten ihre Positionierung aushandeln, um in gegenseitige Kommunikationsreichweite zu gelangen und somit die Konnektivität optimieren. Eine solche Unterstützung der Netzwerkknoten für die Kommunikation ist nützlich, um Verbindungen häufiger herzustellen und damit Daten schneller weiterzuleiten, was wiederum die Anforderung an den Pufferspeicher und die Ende-zu-Ende-Verzögerung für zeitkritische Daten reduziert.

Ein weiterer Aspekt ist, dass nach bestem Wissen der Autoren Unterwasser-Routing-Protokolle davon ausgehen, dass es nur eine einzige Art von Träger-technologie für das Netzwerk gibt, z. B. akustische Netzwerke. Zukünftige Unterwasserknoten könnten mehrere Schnittstellen mit verschiedenen Technologien bereitstellen. Die spezifischen Eigenschaften solcher Schnittstellen, wie in Tab. 1 gezeigt, könnten von intelligenten Routing-Protokollen genutzt werden, um Daten mit unterschiedlichen Anforderungen hinsichtlich Größe und Zuverlässigkeit weiterzuleiten. Zum Beispiel könnte die Steuerinformation, die relativ klein ist, aber oft zeitkritisch, mit MI-Verbindungen transportiert werden, die einen vorhersagbaren Kanal haben, oder mit akustischen Netzwerken, die eine große Reichweite haben, so dass die Konnektivität auch in dünn besiedelten Netzwerken aufrechterhalten werden kann. Andererseits könnten große Mengen von Überwachungsdaten, die von Sensoren gesammelt werden, durch optische Kommunikation weitergeleitet werden, die eine variable Konnektivität hat, aber eine hohe Geschwindigkeit bietet.

Semantische Kommunikation

Im Abschn. „[Unterwasser-Kommunikationstechnologien](#)“ wurden die Eigenschaften von Unterwasser-Kommunikationstechnologien diskutiert und insbesondere die relativ niedrigen Datenraten als eine große Herausforderung identifiziert. In diesem Abschnitt konzentrieren wir uns auf einen kürzlich neu entwickelten Paradigmenwechsel in der Gestaltung von Kommunikationen, um mit physischen Verbindungen mit begrenzten Raten umzugehen.

Die Gestaltung aktueller und zukünftiger Kommunikationssysteme hat sich rein auf das technische Problem der Übertragung einer Sequenz von Symbolen und der Reproduktion dieser Nachricht am Empfänger genau oder annähernd konzentriert. Dieser Gestaltungsansatz geht zurück auf die klassische Informationstheorie (CIT) von C. E. Shannon und seine auf Entropie basierende Definition von Information [32]. Dieser Ansatz ignoriert jedoch das semantische Problem, d. h., wie genau die zu übertragenden Datensymbole die gewünschte Bedeutung oder den Sinn für die zu verwendende Anwendung vermitteln müssen. Folglich unterscheiden sich die heutigen Kommunikationstechnologien nur darin, dass sie die erforderlichen Werte von technischen Metriken (z. B. Fehlerquoten, Datenrate) erfüllen, berücksichtigen aber nicht die Bedeutung der zu übertragenden Nachricht für die übergeordnete Anwendung.

Der Aspekt der Semantik ist seit mehreren Jahren Gegenstand von Forschungsaktivitäten, die sich auf die Informatik konzentrieren (z. B. künstliche Intelligenz, Big Data) und daher eher auf Anwendungsebene angesiedelt sind. Andererseits wurde auf der Ebene der Datenübertragung die Bedeutung der zu übertragenden Datensymbole nicht berücksichtigt. Eine Erweiterung des klassischen Kommunikationsmodells der reinen Charakterisierung einer Symbolsequenz hin zur semantischen Kommunikation (SC) und damit Charakterisierung der Bedeutung hinter diesen Symbolen stellt zweifellos einen innovativen Schritt in der Gestaltung zukünftiger Kommunikationssysteme dar.

Um den Begriff semantische Kommunikation zu klassifizieren, zeigt Abb. 2 drei verschiedene Kommunikationsebenen, die bereits 1949 von Weaver identifiziert wurden [33].

- **Ebene A:** Das **technische Problem** beschreibt die syntaktische Kommunikation mit dem Problem der Übertragung einer Sequenz von Datensymbolen (technische Nachricht) so zuverlässig oder genau wie möglich über einen physischen Kanal.
- **Ebene B:** Das **semantische Problem** befasst sich mit der zentralen Frage, wie die Datensymbole übertragen werden sollen, damit die Bedeutung der Nachricht (ausgedrückte Nachricht) durch die Übertragung so genau wie möglich vom Sender zum Empfänger transportiert wird.
- **Ebene C:** Das **Effektivitätsproblem** befasst sich schließlich mit der Frage der Effektivität, d. h., wie stark beeinflusst das durch den Empfang der semantischen Information gewonnene Wissen das Verhalten einer Anwendung in der gewünschten Weise.

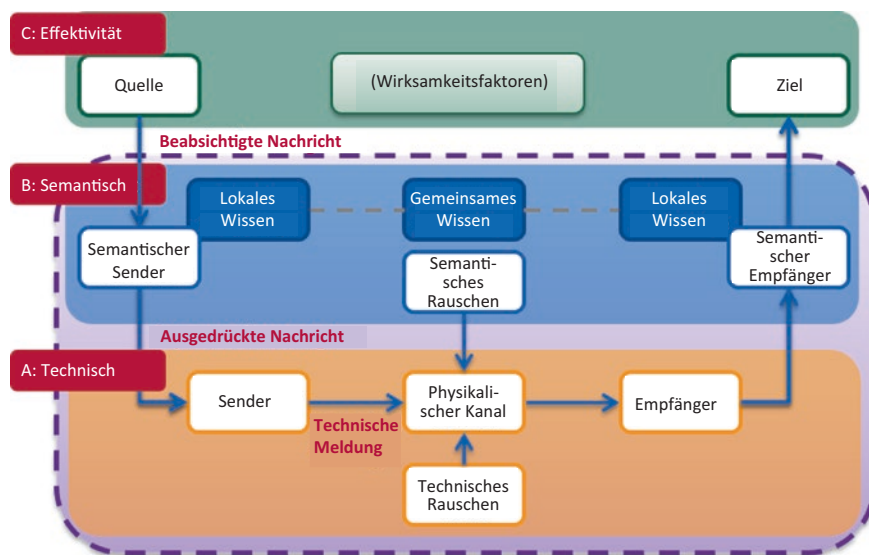


Abb. 2 Ein dreistufiges Kommunikationsmodell [34]

Die CIT konzentrierte sich also nur auf Ebene A, d. h., die Reproduktion am Empfänger entweder genau oder annähernd einer Nachricht, die vom Sender ausgesendet wurde [32]. Die Kanalkapazität definiert die maximale Informationsrate, die zuverlässig über einen Kommunikationskanal übertragen werden kann. Im Gegensatz dazu besteht das Ziel der semantischen Kommunikation darin, genau oder annähernd die *Interpretation* von Bedeutungen durch den Empfänger zu reproduzieren, verglichen mit der beabsichtigten Nachricht des Senders. Durch die Nutzung semantischer Nebeninformationen durch den Sender und den Empfänger kann eine Hochrate-Semantikcommunication mit niedrigen technischen Kanälen erreicht werden. Somit könnte semantische (Neben-)Information die Konnektivität (Datenrate, Zuverlässigkeit) erheblich erhöhen, die Latenz verbessern und die Ressourceneffizienz erhöhen. Erste Ansätze zur semantischen Kommunikation berücksichtigen die Bedeutung (Ebene B) auf der technischen Ebene (Ebene A) durch Einführung eines stochastischen Modells (semantisches Rauschen) mit der Folge, dass die klassische Informationstheorie (CIT) durch die semantische Informationstheorie (SIT) ersetzt wird [34].

Die Entwicklung eines semantischen Kommunikationssystems erfordert eine informationstheoretische Gestaltung der gesamten Informationsverarbeitungskette, um die Semantik des spezifischen Anwendungsfeldes zu berücksichtigen. Zu diesem Zweck sollte ein auf ML basierender Gestaltungsansatz, der derzeit für die Optimierung verschiedener Informationsverarbeitungsblöcke unter Verwendung von Maßnahmen aus der Informationstheorie verwendet wird [35, 36, 37], angepasst werden. Die Semantik von Befehlsnachrichten wurde jedoch

bisher in Kommunikationssystemen nicht berücksichtigt, sie stellt eine große Forschungsherausforderung dar. Neben grundlegenden Fragen der semantischen Informationstheorie erfordert dieser Schritt Grundlagenforschung in zahlreichen Fachgebieten, wie semantisches Codieren, semantische Signalverarbeitung/Kompression und semantische Protokolle.

Die Einbeziehung semantischer Kommunikation in die in Abschn. „[Unterwasser-Kommunikationsnetzwerke](#)“ diskutierten Routing-Protokolle ermöglicht einen effizienteren Informationsaustausch als im Falle von bitgenauen Kommunikationsnetzwerken. Die Berücksichtigung des Kontexts der Information auf der Sender- und Empfängerseite hilft, z. B. den Signalisierungsaufwand für Verbindungsaufbau, -abbau oder Fehlerbehebung zu reduzieren. Diese Hintergrundinformationen können aus der Umgebung gewonnen oder vom Kommunikationsprotokoll bereitgestellt werden, z. B. die Priorität der Information. Die genannten Verbesserungen für semantische Kommunikation und opportunistisches Networking erfordern, dass das System in der Lage ist, neue Informationen zu speichern und zu klassifizieren. Das bedeutet, dass ML in die Kommunikation eingeführt werden sollte, was helfen kann, z. B. zu identifizieren, an welchem Ort und zu welcher Zeit der Kanal eine bestimmte Eigenschaft hat oder bestimmte Arten von Informationen übertragen werden müssen.

Schlussfolgerungen

In diesem Kapitel wurden der Stand der Technik und die Herausforderungen für Unterwasser-Kommunikationsnetzwerke diskutiert. Bestehende Unterwasser-Netzwerke sind nicht gut auf die harten Anforderungen unter Wasser vorbereitet, da sie auf Routen mit statischen Knoten, permanenter Konnektivität und physischen Kommunikationsverbindungen basieren, die eine bitgenaue Übertragung der Daten voraussetzen. Zukünftige Anwendungen der Unterwasser-Kommunikation, wie intelligente autonome Roboter-Knoten, erhalten Anweisungen während der Arbeit vor Ort, sammeln Sensordaten oder koordinieren in Teams. Diese Aufgaben werden eine höhere Menge an Daten erfordern, die zeitnah und zuverlässig übertragen werden müssen. Semantische Kommunikation und verbesserte opportunistische Netzwerke nutzen Wissen aus der Umgebung und früheren Missionen. Darüber hinaus nutzen sie die Mobilität der Knoten und können sich daher besser an wechselnde Bedingungen für einen flexiblen und effizienten Transport der Daten anpassen.

Literatur

1. Giodini S, van der Spek E, Dol H (2015) Underwater communications and the level of autonomy of AUVs, Hydro International
2. Vedachalam N, Ramesh R, Jyothi VBN, Prakash VD, Ramadass GA (2018) Autonomous underwater vehicles—challenging developments and technological maturity towards strategic swarm robotics systems. *Marine Georesources Geotechnol* 33(1):1–14
3. Champion BT, Joordens MA (2015) Underwater swarm robotics review. In: 10th system of systems engineering conference (SoSE 2015), S 111–116, San Antonio, USA, May 2015
4. Joordens MA, Jamshidi M (2010) Consensus control for a system of underwater swarm robots. *IEEE Syst J* 4(1):65–73
5. Paul H, Fliege J, Dekorsy A (2013) In-network-processing: distributed consensus-based linear estimation. *IEEE Commun Lett* 17(1):59–62
6. Shin B-S, Yukawa M, Cavalcante RLG, Dekorsy A (2018) Distributed adaptive learning with multiple kernels in diffusion networks. *IEEE Trans Signal Process* 66(21):5505–5511
7. Wübben D, Paul H, Shin B-S, Xu G, Dekorsy A (2014) Distributed consensus-based estimation for small cell cooperative networks. In: 10th international workshop on broadband wireless access (BWA (2014) co-located with IEEE Globecom 2014. Austin, TX, USA, December, S 2014
8. Zeng Y, Zhang R, Lim TJ (2016) Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges. *IEEE Commun Mag* 54(5):36–42
9. Liu L, Zhou S, Cui J-H (2008) Prospects and problems of wireless communication for underwater sensor networks. *Wirel Commun Mobile Comput* 8(8):977–994
10. de Freitas PMCP (2014) Evaluation of Wi-Fi underwater networks in freshwater. Master Thesis, Universidade do Porto
11. Akyildiz IF, Pompili D, Melodia T (2005) Underwater acoustic sensor networks: research challenges. *Ad Hoc Netw* 3(3):257–279
12. Zhou S, Wang Z (2014) OFDM for underwater acoustic communications. Wiley, Chichester
13. Emokpae LE, Younis M (2012) Throughput analysis for shallow water communication utilizing directional antennas. *IEEE J Sel Areas Commun* 30(5):1006–1018
14. Huang J, Zhou S, Willett P, Nonbinary LDPC coding for multicarrier underwater acoustic communication. *IEEE J Sel Areas Commun* 26(9):1684–1696
15. Demirors E, Sklivanitis G, Melodia T, Batalama SN, Pados DA (2015) Software-defined underwater acoustic networks: toward a high-rate real-time reconfigurable modem. *IEEE Commun Mag* 53(11):64–71
16. Arnon S, Kedar D (2009) Non-line-of-sight underwater optical wireless communication network. *J Opt Soc Am A* 26(3):530–539
17. Akyildiz IF, Wang P, Sun Z (2015) Realizing underwater communication through magnetic induction. *IEEE Commun Mag* 53(11):42–48
18. Allen GI, Matthews R, Wynn M (2001) Mitigation of platform generated magnetic noise impressed on a magnetic sensor mounted in an autonomous underwater vehicle. In: MTS/IEEE OCEANS (2001), S 63–71, Honolulu, USA, November 2001
19. Darehshoorzadeh A, Boukerche A (2015) Underwater sensor networks: a new challenge for opportunistic routing protocols. *IEEE Commun Mag* 53(11):98–107
20. Xie P, Cui J-H, Lao L (2006) VBF: vector-based forwarding protocol for underwater sensor networks. In: *Networking technologies, services, and protocols: performance of computer and communication networks; mobile and wireless communications systems (NETWORKING 2006)*, Lecture Notes in Computer Science, Bd 3976, S 1216–1221
21. Nicolaou N, See A, Xie P, Cui J-H, Maggiorini D, Improving the robustness of location-based routing for underwater sensor networks. In: *OCEANS, (2007) Europe*. Aberdeen, June, S 2007

22. Coutinho RWL, Boukerche A, Vieira LFM, Loureiro AAF (2014) GEDAR: geographic and opportunistic routing protocol with depth adjustment for mobile underwater sensor networks. In: IEEE international conference on communications (ICC 2014), S 251–256, Sydney, NSW, Australia, August 2014
23. Yan H, Shi Z, Cui J-H (2008) DBR: depth-based routing for underwater sensor networks. In: Networking 2008 Ad Hoc and sensor networks, wireless networks, next generation internet, S 1–13
24. Lee U, Wang P, Noh Y, Vieira LFM, Gerla M, Cui J-H (2010) Pressure routing for underwater sensor networks. In: IEEE INFOCOM, San Diego, USA March
25. Wang Z, Han G, Qin H, Zhang S, Sui Y (2018) An Energy-aware and void-avoidable routing protocol for underwater sensor networks. *IEEE Access* 6:7792–7801
26. Dede J, Förster A et al (2018) Simulating opportunistic networks: survey and future directions. *IEEE Commun Surv Tutor* 20(2):1547–1573
27. Zaman I, Haseeb M, Förster A (2018) Wireless underground sensor network Testbed: a case study on channel characterization. In: 14th international conference on wireless and mobile computing, networking and communications (WIMOB), Limassol, Cyprus
28. Zaman I, Gellhaar M, Dede J, Koehler H, Foerster A (2016) A new sensor node for underground monitoring. In: International workshop on practical issues in building sensor network applications (SenseApp), Dubai, UAE
29. Zaman I, Gellhaar M, DedeJ, KoehlerH, Foerster A (2016) Demo: design and evaluation of MoleNet for wireless underground sensor networks. In: IEEE local computers conference, Dubai, UAE
30. Zaman I, Förster A, Mahmood A, Cawood F (2018) Finding trapped miners with wireless sensor networks. In: 5th international conference on information and communication technologies for disaster management (ICT-DM 2018), Sendai, Japan
31. Förster A, Muslim A, Udagama A (2018) TRAILS—a trace-based probabilistic mobility model. In: 21st ACM international conference on modelling. Analysis and simulation of wireless and mobile systems (MSWIM 2018). Montreal, QC, Canada, S 295–302
32. Shannon CE (1948) A mathematical theory of communication. *Bell Syst Techn J* 27:379–423
33. Weaver W (1949) The mathematical theory of communication, chapter Recent contributions to the mathematical theory of communication, S 1–16
34. Bao J, Basu P, Dean M, Partridge C, Swami A, Leland W, Hendler JA (2011) Towards a theory of semantic communication. In: IEEE 1st international network science workshop (NSW 2011), S 110–117, West Point, USA, June 2011
35. Hassanpour S, Wübben D, Dekorsy A (2018) A graph-based message passing approach for noisy source coding via information bottleneck principle. In: IEEE global communications conference (GLOBECOM 2018), Abu Dhabi, United Arab Emirates, December 2018
36. Hassanpour S, Wübben D, Dekorsy A (2018) On the equivalence of double maxima and KL-means for information bottleneck-based source coding. In: IEEE wireless communications and networking conference (WCNC 2018), Barcelona, Spain, April 2018
37. Monsees T, Wübben D, Dekorsy A (2019) Channel-optimized information bottleneck design for signal forwarding and discrete decoding in cloud-RAN. In: 12th international ITG conference on systems, communications and coding (SCC 2019), Rostock, Germany, February 2019

Modulare Unterwassermanipulatoren für autonome Unterwassereinsätze



Sebastian Bartsch, Andrej Kolesnikov, Christof Büskens und Mitja Echm

Zusammenfassung Die Kernkompetenz einer aktiven Unterwasserintervention ist die Fähigkeit zur Manipulation. Präzise, geschickte und autonome Unterwasser-manipulation erfordert Extremitäten und Endeffektoren, die so robust sind, dass sie den Umweltbedingungen standhalten und in der Lage sind, genügend Kraft aufzubringen, um die normalerweise schwere Arbeit zu verrichten. Gleichzeitig müssen die Systeme auch empfindlich genug sein, um eine präzise und adaptive Steuerung zu ermöglichen. Darüber hinaus müssen sowohl das mechatronische Konzept als auch die Steuerungs-strategie der Manipulatoren miteinander kompatibel sein und ideal auf der Träger-plattformen integriert sein. Dieser Beitrag zeigt den Bedarf an solchen Systemen, gibt einen Überblick über den Stand der Technik und hebt den Entwicklungsbedarf sowie die damit verbundenen Herausforderungen hervor. Erste Konzepte für leistungsfähige skalierbare Aktuatoren sowie Modellierungs- und Steuerungsstrategien für aus diesen Elementen zusammengesetzte Manipulatoren werden vorgestellt.

Einführung

Unterwasserrobotik spielt eine Schlüsselrolle bei der Weiterentwicklung auto-nomer und intelligenter Unterwassersysteme. Aktive Unterwasserinter-vention basierend auf sensibler und autonomer Manipulation ist die eigentliche

A. Kolesnikov
Robotics Innovation Center, DFKI GmbH, Bremen, Deutschland
E-Mail: andrej.kolesnikov@dfki.de

C. Büskens · M. Echm
Center for Industrial Mathematics, Universität Bremen, Bremen, Deutschland
E-Mail: bueskens@math.uni-bremen.de

M. Echm
E-Mail: mitja@math.uni-bremen.de

S. Bartsch (✉)
YardStick Robotics GmbH, Bremen, Deutschland
E-Mail: sebastian.bartsch.robotics@gmail.com

Kernfähigkeit, um eine Vielzahl nützlicher Unterwasseroperationen zu ermöglichen. Zusammen mit intuitiver Fernsteuerung oder überwachter Autonomie eröffnet die Unterwasserrobotik neue Perspektiven für Installations-, Überwachungs-, Wartungs- und Demontagemissionen.

Bisher sind an ferngesteuerten Fahrzeugen (ROVs) angebrachte Manipulatoren in der Regel monolithische Systeme, die manuell ferngesteuert werden und nur sehr wenig Sensorfeedback liefern, obwohl die Systeme meist hydraulisch angetrieben sind und daher viel Kraft liefern. Nur wenige autonome Unterwasserfahrzeuge (AUVs) sind mit Manipulatoren ausgestattet, da es kaum geeignete Manipulatoren und Steuerungsstrategien gibt, die die Anforderungen erfüllen, um autonome Unterwasserinterventionen mit autarken, frei schwebenden und mobilen Plattformen durchzuführen [1].

Folglich werden die meisten Interventionen derzeit von ROVs oder von menschlichen Tauchern durchgeführt, wenn Genauigkeit und Geschicklichkeit erforderlich sind. Dies wiederum begrenzt den Umfang möglicher Aktivitäten sowie die Betriebszeiten und Einsatzgebiete und führt zu höherem logistischem Aufwand, finanziellen Kosten und potenziellem Unfallrisiko für Unterwasserinterventionen, als es bei der Verwendung von AUVs der Fall wäre.

Die Herausforderungen, um autonome Unterwasserinterventionen zu ermöglichen, bestehen darin, Systeme bereitzustellen, die mit den Trägerplattformen kompatibel sind und speziell für die beabsichtigten Aufgaben oder für eine universelle Anwendbarkeit konzipiert sind. Der Manipulator und seine Untersysteme (Aktuatoren, Endeffektor) müssen ausreichend sensibel und genau sein, um die Aufgabe autonom auf sichere und zuverlässige Weise auszuführen. Das Trägerfahrzeug muss die dynamischen Effekte der Manipulation kompensieren (z. B. müssen die Schubdüsen Kräfte aufgrund von Bewegungen des Manipulators kompensieren). Darüber hinaus müssen die Regler von Fahrzeug und Manipulator dynamisch genug sein, um Störungen wie Strömungen und veränderte Massenverteilungen auszugleichen [2].

Ein Ansatz zur Erfüllung dieser Anforderungen ist die Entwicklung modularer Manipulatoren auf Basis skalierbarer integrierter Aktuatoremodule einschließlich Sensoren und Steuerelektronik, die flexibel nach der Anwendung konfiguriert werden können. Das bevorzugte Antriebskonzept wäre elektrisch, um mit der Energiequelle kompatibel zu sein, die von den meisten AUVs bereitgestellt wird. Die Steuerung eines Manipulators, der mit einer schwimmenden Basis im Wasser gekoppelt ist, erfordert geeignete echtzeitfähige Modelle, um synchronisierte Bewegungen erzeugen zu können, um gegenseitige dynamische Einflüsse zu reduzieren. Solche Modelle sind auch erforderlich, um die auf den Endeffektor ausgeübten Kräfte und Momente zu bestimmen und zu steuern. Da die Fluidodynamik komplex zu berechnen ist, ist ein Ansatz die Entwicklung monolithischer abstrakter Modelle für komplette Systeme auf Basis von Daten, die in Referenzexperimenten erzeugt wurden. Für das vorgeschlagene modulare Manipulatorkonzept sollen die Modelle auch auf Komponentenebene modular sein, um die flexible Konfiguration auf Basis von Simulationsergebnissen optimieren und den Regler für verschiedene Morphologien auf generische Weise automatisch generieren zu können.

Stand der Technik

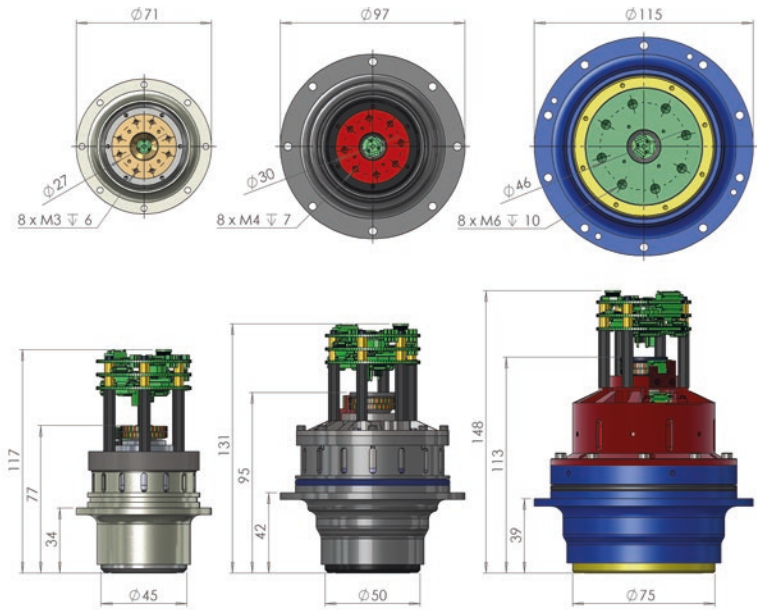
Ein umfassender Überblick über bestehende Unterwasserroboter wird in [3] gegeben. Die beschriebenen Systeme können in hydraulische und elektrische Systeme unterteilt werden, wobei die meisten kommerziell erhältlichen und verwendeten Systeme hydraulisch sind. Vorteile gegenüber elektrischen Robotern sind, dass sie aus wenigen Teilen bestehen (z. B. kein Getriebe), was sie weniger wartungsintensiv und fehleranfällig macht. Hydraulische Systeme bieten ein sehr hohes Leistungsgewicht und stehen von Natur aus unter Druck. Andererseits sind Leckagen geringer Mengen an Hydraulikflüssigkeit üblich und eine Menge zusätzlicher Ausrüstung wie Hydraulikpumpe, Reservoir, Filter, Regler, Ventile usw. sind für ihren Einsatz erforderlich. Elektrische Systeme werden seltener in kommerziellen Anwendungen eingesetzt und finden ihren Einsatz eher in wissenschaftlichen Systemen als maßgeschneiderte Prototypen für Forschungszwecke. Dies liegt an ihrer Fähigkeit zur präzisen Bewegungs- und Kraft-/Drehmomentsteuerung. Elektrischer Strom, der normalerweise bereits auf Unterwasserrobotern verfügbar ist, ist die einzige zusätzliche Anforderung für ihren Einsatz. Ihre Nachteile sind, dass sie oft nicht die Geschwindigkeits-, Zuverlässigkeits- und Stärke- oder Kraftanforderungen für die meisten industriellen Interventionen erfüllen. Diese Nachteile können jedoch durch den vorgeschlagenen Modularisierungsansatz minimiert werden, der es ermöglicht, Module verschiedener Leistungsklassen miteinander zu kombinieren, um Roboter zu konfigurieren, die die speziellen Anforderungen für eine bestimmte Aufgabe erfüllen. Weitere Module können bei Bedarf entwickelt und dem Baukasten hinzugefügt werden.

Methoden

Modulares Systemdesign

Um die Rekonfigurierbarkeit, Wiederverwendbarkeit und Vielseitigkeit von Robotern und ihren zugrunde liegenden Komponenten zu erreichen, schlagen wir einen modularisierten Ansatz für das Design von Robotersystemen vor. Das DFKI hat einen solchen Ansatz bereits in verschiedenen Projekten im Bereich der Raumfahrtrobotik verfolgt [4, 5]. Die Vorteile bestehen darin, dass Komponenten mit einem hohen Grad an technologischer Reife auf Modulebene verfügbar gemacht werden können und geeignete Robotersysteme entsprechend den Missionsanforderungen zusammengestellt werden können. Weitere Vorteile der Modularisierung sind die geringeren Herstellungskosten für die Module aufgrund der hohen Stückzahl, die Verfügbarkeit durch Lagerhaltung und die Möglichkeit eines schnellen Austauschs mit Ersatzteilmodulen.

Auf der Grundlage der Entwicklungen und Erfahrungen aus den raumfahrtbezogenen Projekten wurde ein modulares Systemdesignkonzept für elektrisch



Typ	5008-14A	7010-20A	7018-25AM
Masse (gr.)	430	930	1.560
Nenndrehmoment (Nm)	28	92	156
Nenngeschwindigkeit (°/s)	330	131	82

Abb. 1 Aktuatormodule

angetriebene Unterwasser-Aktuatormodule entwickelt. Die kompakten integrierten Module (siehe Abb. 1) bestehen aus einem bürstenlosen Gleichstrommotor (BLDC), der mit einem Harmonic-Drive-Getriebe verbunden ist und in einer speziell entworfenen Aluminiumstruktur mit entsprechendem Lager montiert ist. Eine Hohlwelle ermöglicht die axiale Verlegung eines Kabelstrangs durch den Aktuator. Ein an der Einheit befestigter Elektronik-Stack stellt den Motorantrieb sowie Schaltkreise und Logik für Steuerung, Datenerfassung und Kommunikation bereit, die in einem Field Programmable Gate Array (FPGA) implementiert sind. Die Module bieten eine gute Zugänglichkeit für die Integration sowie die Kalibrierung und sind leicht zu warten. Es wurden drei Aktuatormodule mit unterschiedlichen Größen- und Leistungsklassen entwickelt. Die beschriebenen Module sind weder wasserdicht noch druckfest.

Um eine Abdichtung und interne Druckkompensation zu erreichen, werden die Aktuatormodule in einem zusätzlichen Gehäuse aus hart anodisiertem Aluminium oder, falls erforderlich, Titan installiert. Dieser Deckel bietet eine abgedichtete Drehverbindung pro Freiheitsgrad und Flansche zur mechanischen Verbindung

der Ein- und Ausgangsseiten des Moduls mit der Struktur des Manipulators. Die Flansche bieten auch Anschlüsse für einen Hydraulikschlauch, in dem die Hydraulikflüssigkeit zur Erzeugung des internen Drucks zugeführt wird. Das Kabelbündel für die Stromversorgung und die Kommunikation mit der Motor-elektronik werden ebenfalls in den Schlauch geführt. Da bei der Konfiguration von Manipulatoren oft zwei oder drei Gelenke nahe beieinander angeordnet und um 90° zueinander gedreht sind, damit die Drehachsen sich schneiden, ist es vorteilhaft, dieses Gehäuse so zu gestalten, dass es mehrere Gelenke aufnehmen kann. Dies spart Gewicht und erfordert weniger Gelenke und Schlauchkupplungen, reduziert Hydrauliköl-Leckagen und Komplexität in Bezug auf die Abdichtung. Es wurden drei Gehäuse unterschiedlicher Größe entwickelt, die jeweils zwei identische Aktuatormodule aufnehmen können (siehe Abb. 2). Diese Pan-Tilt-Einheiten (PTUs) sind so konzipiert, dass sie mit hydraulischer Druckkompensation bis zu einer Tiefe von 6000 m, d. h. 600 bar Außendruck, verwendet werden können.

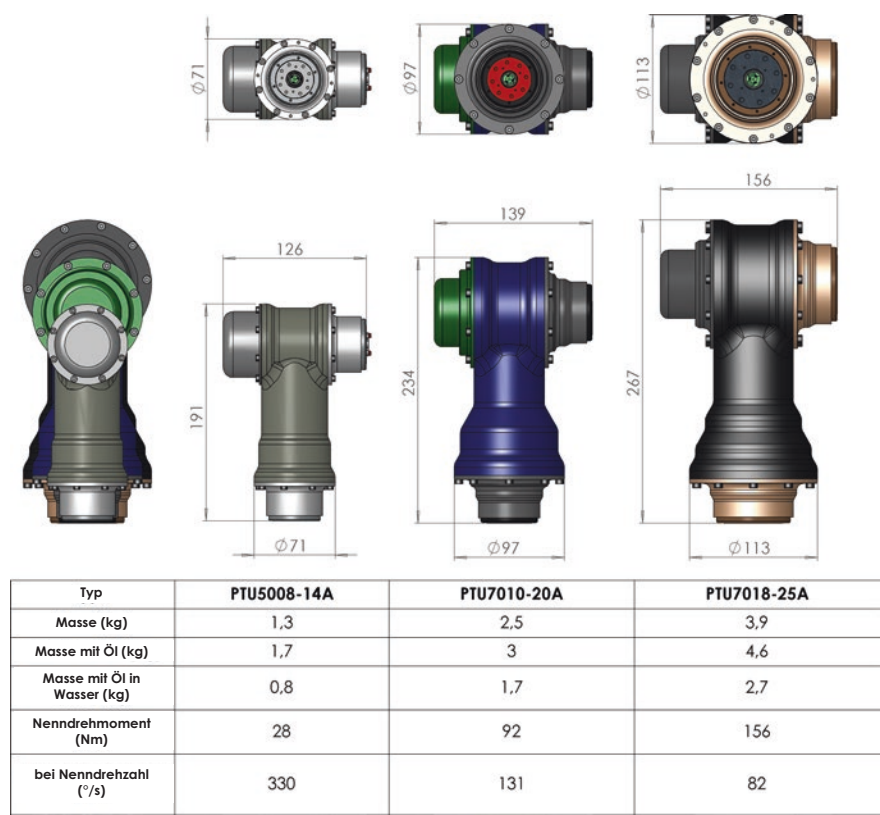


Abb. 2 Pan-Tilt-Einheiten

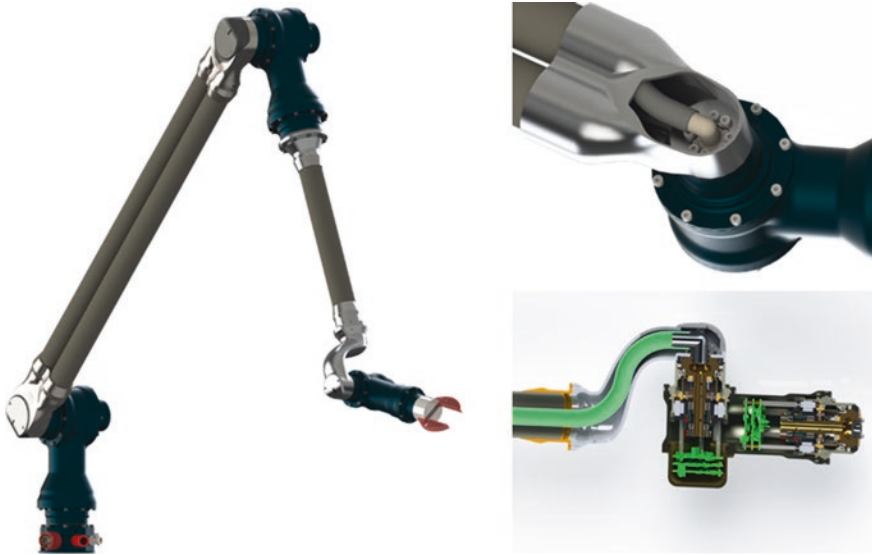


Abb. 3 6-DOF-Manipulator bestehend aus drei PTUs

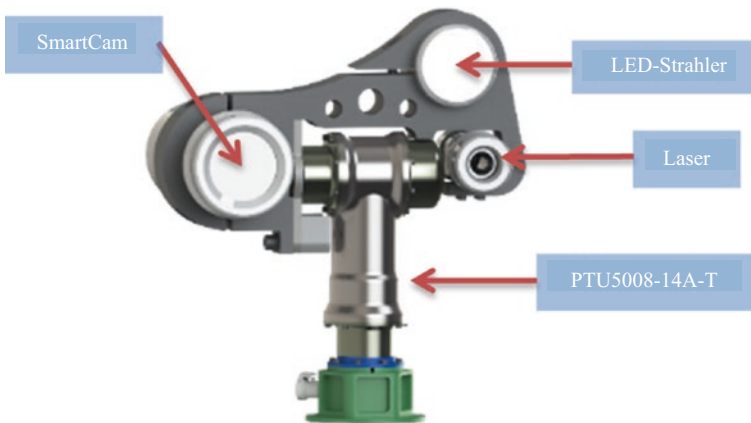


Abb. 4 PTU mit Kamerakopf, der auf Wally, dem Benthic Crawler, montiert und beim Barkley Canyon getestet wurde

Abb. 3 zeigt einen 6-DOF-Manipulator, der aus den drei verschiedenen PTU-Modulen besteht. Auch die Verlegung der Rohre zur Flutung der Komponenten mit Hydrauliköl zur Druckkompensation ist dargestellt, ebenso wie ein Querschnitt durch das letzte PTU-Element vor dem Endeffektor.

Ein PTU5008-14A-T (T für Titan-Gehäuse) wurde bereits erfolgreich über einen Zeitraum von einem Jahr in einer Tiefe von 800 m getestet. Es wurde an den Unterwasser-Crawler Wally angebracht und zur Bewegung eines Kamerakopfes verwendet (siehe Abb. 4).

Modellierung und Steuerung

Der Entwurfsprozess für modulare Unterwasserroboter ist eine herausfordernde Aufgabe aus Sicht der mathematischen Modellierung und Systemoptimierung. Um einen effizienten Entwurfsprozess durchzuführen, benötigt man genaue mathematische Modelle aller Systemkomponenten und ein ausgeklügeltes, nichtlineares Simulationssystem, um alle relevanten Umgebungsbedingungen für eine aktive Unterwasserintervention zu berücksichtigen. Im Allgemeinen verwendet der Entwurfsprozess solcher komplexen Systeme serielle Entwurfsprozesse, bei denen Entwurf, Simulation und Systemoptimierung nacheinander durchgeführt werden. Ein moderner und effizienterer Entwurfsprozess wird durch das Konzept der multidisziplinären Entwurfsoptimierung (MDO) repräsentiert. MDO ermöglicht es Systemdesignern, alle relevanten Disziplinen, wie z. B. die Optimierung von Strömungseigenschaften, präzises und adaptives Steuerungsdesign und mechatronisches Konzeptdesign, gleichzeitig zu berücksichtigen. Das Konzept findet große Beachtung in der Luft- und Raumfahrtanwendung [6, 7]. MDO benötigt drei hauptmathematische Themenbereiche: Systemmodellierung, Parameteridentifikation und Systemoptimierung.

Aufgrund der komplexen physikalischen Phänomene und gegenseitigen Einflüsse unter Wasser ist ein realistisches Simulationssystem auf Basis einer nichtlinearen Systembeschreibung erforderlich. Im Allgemeinen verwenden diese Modelle Vereinfachungen, um die Komplexität zu reduzieren, während Modellparameter verwendet werden, um das Modell an beobachtete Messungen anzupassen. Die Hauptaufgabe besteht darin, die Parameter des nichtlinearen Modells so zu bestimmen, dass das Modell den beobachteten Messungen entspricht (Parameteridentifikation). Eine automatische und effiziente Parameteridentifikation erfordert mathematische nichtlineare Optimierungsmethoden. Wenn eine gute Beschreibung aller physikalischen Einflüsse vorliegt, kann man mathematische Steuerungsalgorithmen verwenden, um skalierbare Unterwasseraktuatoren auf optimale Weise zu steuern (z. B. energieoptimal).

Optimale Steuerungsprobleme können formuliert werden als:

$$\begin{aligned} \min_{x,u} \quad & F(x,u,p) := g(x(t_f), t_f) + \int_0^{t_f} f_0(x(t), u(t), t, p) dt \\ \text{unter} \quad & \dot{x}(t) = f(x(t), u(t), t, p) \quad (OCP) \\ & C(x(t), u(t), t, p) \leq 0 \\ & \psi(x(0), x(t_f), p) = 0. \end{aligned}$$

wobei $x \in \mathbb{R}^{n_x}$ den Zustand des Systems zur Zeit $t \in [0, t_f]$ beschreibt, $u \in \mathbb{R}^{n_u}$ die Steuervariable ist, die die Dynamik $f: \mathbb{R}^{n_x} \times \mathbb{R}^{n_u} \times \mathbb{R} \times \mathbb{R}^{n_p} \rightarrow \mathbb{R}^{n_x}$ beeinflusst, und $p \in \mathbb{R}^{n_p}$ einige externe Störungen sind. Die Steuervariable muss einige Einschränkungen $C: \mathbb{R}^{n_x} \times \mathbb{R}^{n_u} \times \mathbb{R} \times \mathbb{R}^{n_p} \rightarrow \mathbb{R}^{n_c}$ sowie Anfangs- und Endbedingungen $\psi: \mathbb{R}^{n_x} \times \mathbb{R}^{n_x} \times \mathbb{R}^{n_p} \rightarrow \mathbb{R}^{n_\psi}$ erfüllen, während die Ziel-

funktion F minimiert wird. Optimale Steuerungsprobleme können als unendlich-dimensionale Optimierungsprobleme verstanden werden, da die Zustände und die Steuerungen für jeden Zeitpunkt optimal sein müssen [8, 9]. Bei der Verwendung von direkten Methoden gibt es zwei Hauptansätze, um diese unendlich-dimensionalen Optimierungsprobleme in endlichdimensionale zu transformieren, entweder in kleine und dichte Probleme oder in große und spärliche Probleme. Insbesondere für stark nichtlineare Anwendungen ist der zweite Ansatz aufgrund der numerischen Robustheit durch die Nichtlinearitäten innerhalb der Modellbewertungen und Simulationen vielversprechender.

Nichtlineare Optimierung ist ein Schlüsselement für viele Anwendungen in Industrie und Wissenschaft. Die allgemeine Frage in diesem Zusammenhang ist, wie die freien Variablen eines Modells gewählt werden müssen, um eine definierte Zielfunktion zu minimieren, während bestimmte Einschränkungen eingehalten werden. Das nichtlineare Optimierungsproblem ist wie folgt definiert: Sei $z \in \mathbb{R}^n$ der Optimierungsvektor (z. B. Designparameter des Aktuators oder diskretisierte Steuerungen und Zustände eines OCP). Weiterhin sei $F : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ die Zielfunktion und $g : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^{l_i}$, $h : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^{l_e}$ allgemeine nichtlineare Einschränkungsfunktionen. Dann wird

$$\begin{aligned} \min_z \quad & F(z) \\ \text{s.t.} \quad & g_i(z) \leq 0, i = 1, \dots, l_i \\ & h_j(z) = 0, j = 1, \dots, l_e \end{aligned}$$

als nichtlineares Programm (NLP) bezeichnet. Im Allgemeinen gibt es verschiedene Algorithmen, um solche Probleme zu lösen. Alle sind eine Art Spezialisierung von Newtons Methode. Der Solver WORHP („We Optimize Really Huge Problems“) wurde speziell für großskalige, spärliche, nichtlineare Optimierungsprobleme entwickelt und ist der bevorzugte NLP-Solver der Europäischen Raumfahrtagentur (ESA). WORHP verwendet entweder eine spärliche sequentielle quadratische Programmiermethode (SQP) mit Innenpunkt-methode für das quadratische Teilproblem oder eine Innenpunktmethode auf der nichtlinearen Ebene. Das Software-Design konzentriert sich auf hoher Robustheit und anwendungsorientiertes Design [9]. Die NLP-Formulierung und das Softwarepaket WORHP können verwendet werden, um die Hauptherausforderungen innerhalb des MDO-Prozesses zu bewältigen.

Schlussfolgerung

Autonome Unterwasserinterventionen erfordern sensitive und präzise Manipulationsfähigkeiten. Die meisten vorhandenen Manipulatoren sind jedoch hydraulische Systeme, die hohe Lasten tragen können, denen aber vielseitige Manipulationsfähigkeiten fehlen. Darüber hinaus erfordern hydraulische Systeme viel zusätzliches Equipment, das für autarke Systeme wie AUVs nicht geeignet ist.

Stattdessen würden kleine und leichte elektrische Manipulatoren oder Hybridsysteme (elektrisch/hydraulisch), die in der Lage sind, schwere Lasten unter Wasser mit hoher Präzision, Wahrnehmungsfähigkeit und Geschicklichkeit zu handhaben, eine breite Palette von nützlichen Operationen ermöglichen, die mit der aktuell verfügbaren Technologie nicht durchgeführt werden könnten. Darüber hinaus würde die Modularität solche Systeme flexibel konfigurierbar machen, um die Anforderungen für verschiedene Anwendungen zu erfüllen, ohne dass eine vollständige Neugestaltung der Gesamtsysteme erforderlich ist.

Daher beabsichtigen wir, eine neue Generation von modularen Unterwasserrobotern zu entwickeln, um sowohl Robotern als auch Menschen die Inspektion, Wartung und den Service von Unterwasserinfrastrukturen zu ermöglichen und die Tiefseeumgebung zu erkunden und zu untersuchen. Hinsichtlich Konfiguration und Steuerung werden mathematische Optimierungstechniken den effizienten Designprozess solcher Unterwasserroboter unterstützen und die Grundlage für autonome Manipulationsfähigkeiten bilden.

Literatur

1. Simetti E, Casalino G, Torelli S, Sperindé A, Turetta A (2014) Floating underwater manipulation: developed control methodology and experimental validation within the TRIDENT project. *J Field Robot* 31:364–385. <https://doi.org/10.1002/rob.21497>
2. Antonelli G (2018) Underwater robots, Chapter 4–“Control of UVMs”. Springer Tracts in Advanced Robotics 123. Springer
3. Sivčev S, Coleman J, Omerdić E, Dooly G, Toal D (2018) Underwater manipulators: a review. *Ocean Eng* 163:431–450
4. Bartsch S, Birnschein T, Langosz M, Hilljegerdes J, Kuehn D, Kirchner F (2012) Development of the six-legged walking and climbing robot SpaceClimber. In: Sunjev S, Kazuya Y, David W (Hrsg) Special Issue on Space Robotics, number Part 1. *J Field Robot*, Wiley Subscription Serv 29(3):506–532
5. Bartsch S, Manz M, Kampmann P, Dettmann A, Hanff H, Langosz M, Szadkowski KV, Hilljegerdes J, Simnofske M, Kloss P, Meder M, Frank Kirchner (2016) Development and control of the multi-legged robot mantis. In: Proceedings of ISR 2016: 47th international symposium on robotics, (ISR-2016). 21–22 June 2016, München, VDE VERLAG GmbH, S 379–386. ISBN: 978-3-8007-4231-8
6. Castellini F, Riccardi A, Lavagna M, Büskens C (2011) Launch vehicles multidisciplinary optimization, a step from conceptual to early preliminary design. In: Proceedings of the 62nd international astronomical conference. Kapstadt, Südafrika, 3–7 Oct 2011
7. Riccardi A, Castellini F, Büskens C, Lavagna M (2012) SVAGO MDO environment’s potential for educational activities. In: 5th international conference on astrodynamics tools and techniques. Noordwijk, Niederlande, 29 June–01 May 2012
8. Knauer M, Büskens C (2012) From WORHP to TransWORHP. In: Proceedings of the 5th international conference on astrodynamics tools and techniques
9. Büskens C, Wassel D, (2012) The esa nlp solver worhp. In modeling and optimization in space engineering. Springer, S 85–110

Teil III

Intervention und Umweltanalyse

Nachdem wir uns bisher auf die physischen Eigenschaften autonomer Unterwasserroboter konzentriert haben, die die Robustheit und Fähigkeit dieser Systeme bestimmen, um für längere Zeiträume unter Wasser zu bleiben, beschäftigen wir uns nun mit den Wahrnehmungsfähigkeiten in enger Verbindung mit der Funktionalität, die benötigt wird, um mit der Umwelt zu interagieren (Interventionsfähigkeiten). Eine solche Intervention beinhaltet die Fähigkeit, dynamisch zu reagieren, was nicht nur Aktuation, sondern auch die interne Wahrnehmung der Effekte impliziert.

Tatsächlich konzentrieren sich die ersten beiden Kapitel dieses Teils, ausgehend von der Hardware-Design-Perspektive des vorherigen Teils, auf die Steuerungsfähigkeiten dieser Hardware mit dynamischen Ganzkörper-Steuerungsansätzen. So kann der Roboter die Aktuatoren auf eine koordinierte Weise aktivieren, was komplexe und ganzheitliche Verhaltensweisen ermöglicht. Während Kap. 9 die Erweiterung bestehender Ganzkörper-Steuerungsschemata durch maschinelles Lernen zur Dynamisierung vorstellt, konzentriert sich Kap. 10 eher auf die Realisierung dynamischer Greiffähigkeiten. Beide Fähigkeiten erfordern eine hohe Spezialisierung im Unterwasserbereich, da die Bewegungen des Systems selbst Kräfte und Strömungen im Wasser erzeugen, die direkt berücksichtigt werden müssen, um das gewünschte Verhalten auszuführen. Darüber hinaus ändern sich, wenn das System eine Aktion mit einem Greifer ausführt, die Dynamik des gesamten im Wasser frei schwebenden Roboters, was wiederum für nachfolgende Bewegungen berücksichtigt werden muss. Das Gleiche gilt, wenn Sensor- oder Aktuatormodule am System hinzugefügt oder davon abgenommen werden.

In den beiden danach folgenden Kapiteln werden die spezifischen Herausforderungen bei der Sensorik behandelt, mit denen man im Unterwasserbereich konfrontiert ist. Kap. 11 betrachtet diese Sichtweise und untersucht visuelle Navigationsfähigkeiten mit und ohne Karten. Die Autoren zeigen, dass die Erkundung der Unterwasserumgebung hohe Unsicherheiten für etablierte Techniken aus dem terrestrischen Bereich mit sich bringt und geben einige Hinweise, wie man damit umgehen kann, damit fortschrittlichere Methoden entstehen können. Zur Erfassung der Umgebung können unterschiedliche Sensoren ver-

wendet werden, die sich auch gegenseitig ergänzen. Es ist sogar noch wichtiger für neuartige Konzepte von Unterwasserrobotern, multimodale Sensoreinheiten einzuführen, da das System wegen langer Einsätze unter Wasser ausfallsicher sein muss und die Sensorik auf viele Arten von Umweltbedingungen vorbereitet sein muss. Multimodale Sensoren können auch verwendet werden, um die Messungen in jeder Sensorkomponente zu validieren, so dass der Roboter Fehlfunktionen erkennen und reagieren kann.

Schließlich wird eine Darstellung des Roboters und seiner Umgebung benötigt, in der die meisten der auszuführenden Aktionen und zu erreichenden Ziele vor der Ausführung in der realen Welt simuliert werden können. Das abschließende Kapitel konzentriert sich hauptsächlich auf diesen Teil. Die Simulation integriert die vorhergehenden Kapitel in dem Sinne, dass Sensordaten, das Erfassen und Eingreifen in die Umgebung vor der Ausführung simuliert werden können. Eine solche Simulation muss nicht an Bord laufen, um das Systemdesign und -verhalten zu verbessern und zu optimieren oder für Schulungs- und Entwicklungszwecke. Aber die Simulation on Board ist wichtig, um stabile und dynamische Verhaltensweisen während einer laufenden Mission im Feld zu erzeugen, bei der es keine oder nur sehr geringe Möglichkeiten zur Kommunikation gibt.

Maschinelles Lernen und dynamische Ganzkörpersteuerung für Unterwassermanipulation



José de Gea Fernández, Christian Ott und Bilal Wehbe

Zusammenfassung Autonome Unterwassermanipulation ist heutzutage immer noch eine offene Forschungsaufgabe. Dieses Kapitel beschreibt Ansätze, einige der offenen Herausforderungen zu bewältigen. Auf der einen Seite wird der Einsatz von maschinellem Lernen für die Online-Identifikation und Anpassung der Fahrzeugdynamik (Umgang mit Driftkompensation, Massenänderungen usw.) sowie der Einsatz von high-level kontextbasierten Konfigurationen von Controllern zur Anpassung an Änderungen in der Systemmorphologie, Hardware und/oder Aufgaben. Auf der anderen Seite wird eine robuste Steuerung von Unterwassermanipulatoren auf Basis einer Erweiterung von Ganzkörpersteuerungstechniken angestrebt, die die heterogene Aktuation (Antrieb an der Basis, Aktuatoren an den Armgelenken) sowie die unsichere Unterwasserfahrzeugdynamik berücksichtigt. Das Ergebnis ist ein hochkonfigurierbares System, das sein Verhalten automatisch anpassen kann, um mit Änderungen in der Umgebung, in seiner eigenen Morphologie und/oder in den Aufgabenzielen fertig zu werden. Die Ergebnisse sollen in zwei verschiedenen Szenarien validiert werden: einem Testbed für die Dynamik von schwimmenden Basen, das aus Raumfahrtanwendungen und Luftrobotern beim DLR stammt, und einem Unterwasserbecken beim DFKI.

B. Wehbe
Robotics Innovation Center, DFKI GmbH, Bremen, Deutschland
E-Mail: bilal.wehbe@dfki.de

C. Ott
TU Wien, Wien, Österreich
E-Mail: ott@acin.tuwien.ac.at

J. de Gea Fernández (✉)
Yardstick Robotics GmbH, Yardstick Robotics GmbH, Bremen, Deutschland
E-Mail: Jose.Degea@yardstick-robotics.com

Einführung

Manipulatoren, die auf kommerziellen und Forschungs-Unterwasserfahrzeugen montiert sind, werden überwiegend ferngesteuert. Generell kann man zwei offene Herausforderungen nennen, die den autonomen Betrieb behindern: Auf der einen Seite ist die Unsicherheit und Komplexität in den Modellen (sowohl Fahrzeug- als auch Hydrodynamikmodelle) ein Problem. Diese Herausforderung betrifft auch die Steuerung des Unterwasserfahrzeugs, ist aber besonders kritisch für die Leistung und Steuerung eines Manipulators, der auf einem solchen Unterwasserfahrzeug montiert ist, insbesondere aufgrund der dynamischen Kopplung von Kräften zwischen Manipulator und Fahrzeug (z. B. stören die Bewegung und Kontaktkräfte des Manipulators die Bewegung des Fahrzeugs und umgekehrt). Die zweite Herausforderung ergibt sich aus der Unteraktuierung des Fahrzeugs (normalerweise mit weniger Aktuatoren ausgestattet als Freiheitsgrade, die gesteuert werden sollen). Die Tatsache, dass Unterwasserfahrzeuge unteraktuiert sind, wird besonders auffällig und kritisch, sobald ein Manipulator auf dem Fahrzeug montiert ist, der eine höhere Geschicklichkeit und Präzision erfordert. Diese Herausforderung hat zwei Auswirkungen: Erstens macht die Unmöglichkeit, beliebige Trajektorien zur Erreichung eines gewünschten Punktes im Raum zu erzeugen, komplexere Trajektorien und nichtlineare Steuerungstechniken notwendig und zweitens erfordert die Verwendung von schlecht performenden „langsamen“ Antrieben im Vergleich zu den „schnelleren“ Aktuatoren, die im Manipulator verwendet werden, eine robuste Steuerungsarchitektur, die mit diesem heterogenen Aktuierungssystem umgehen kann.

Derzeit sind ferngesteuerte Manipulatoren Standardausrüstung für die meisten ROVs, während im Gegensatz dazu die autonome Manipulation immer noch eine Forschungsherausforderung ist und nur sehr wenige Beispiele für die neuesten verfügbar sind (ein solches Beispiel ist die Arbeit in [1]). Im Prinzip ähneln die Bewegungsgleichungen von Unterwassermanipulatoren den Gleichungen von festen Manipulatoren. Es gibt jedoch einige entscheidende Unterschiede, wie die Unsicherheit in der Modellkenntnis (hauptsächlich aufgrund der schlechten Kenntnis über die hydrodynamischen Effekte), die Komplexität des mathematischen Modells, die kinematische Redundanz des Systems (Fahrzeug plus Arm), die Schwierigkeit, das Fahrzeug im Schwebeflug zu steuern (hauptsächlich aufgrund der schlechten Antriebsleistung) und die dynamische Kopplung zwischen dem Fahrzeug und dem Manipulator.

Die Steuerung von freibeweglichen Manipulationsstrukturen war seit den 1980er-Jahren ein Schwerpunkt der Forschung, insbesondere auf dem Gebiet der Weltraumrobotik, was zu wichtigen Ergebnissen in hierarchischen Steuerungsarchitekturen führte. Im Hinblick auf den Unterwasserbereich wurden erste Arbeiten in den 1990er-Jahren zur Steuerung eines Manipulators [2] und zum Problem der Koordination zwischen Fahrzeug- und Armsteuerung für die Teleoperation [3] durchgeführt. Einer der ersten erfolgreichen Versuche

zur autonomen Unterwassermanipulation wurde im Rahmen des SAUVIM-Projekts (Semi Autonomous Underwater Vehicle for Intervention Mission, University of Hawaii) ebenfalls Ende der 1990er-Jahre unternommen [4]. Seit den ersten Arbeiten war ein Schlüsselaspekt die Ausnutzung der Redundanz durch eine Art von Aufgabenprioritätsrahmen, und dies ist auch der Hauptfokus der jüngsten Arbeit in [1]. Hier wird ein Steuerungsrahmen vorgestellt, um ein vielseitiges Intervention Autonomous Underwater Vehicle (I-AUV) mit einem 7-DOF-Manipulatorarm innerhalb des TRIDENT EU FP7 zu entwickeln. Insbesondere konzentriert sich die Arbeit auf die Ausnutzung des hochredundanten Systems für ein geschicktes Greifen von Objekten. Eine Übersicht über die entwickelten Steuerungsarchitekturen für Unterwasserroboter bis Ende der 1990er-Jahre findet sich in [5].

In den letzten Jahren sind ganzheitliche Ansätze zur Steuerung von Robotersystemen aufgetaucht, die als „Ganzkörpersteuerung“ (whole-body control) bekannt sind, insbesondere für komplexe und hochredundante Systeme, die aus einer mobilen Plattform (entweder Räder oder Beine) und einem Manipulationssystem bestehen. Diese Ganzkörpersteuerungsframeworks kümmern sich um mehrere und gleichzeitige Steuerungsziele (Haltungskontrolle, Manipulation, Gehen usw.). Da die Ganzkörpersteuerung Echtzeit-Feedback verwendet, sind Roboter, die diese Ansätze verwenden, anpassungsfähiger und können unmittelbar auf unerwartete sensorische Feedbacksignale reagieren, indem sie zur Laufzeit für die optimale Nutzung aller verfügbaren Roboterfreiheitsgrade sorgen. Die Ursprünge der Ganzkörperbewegungserzeugung finden sich in der Erzeugung von Gehbewegungen bei humanoiden Robotern, während versucht wird, das Gleichgewicht des Systems zu gewährleisten.

In [6] wurde der Begriff „Ganzkörpersteuerung“ zum ersten Mal verwendet, um auf einen schwebenden, aufgabenorientierten dynamischen Steuerungs- und Priorisierungsrahmen zu verweisen, der es einem humanoiden Roboter ermöglicht, gleichzeitige Echtzeit-Steuerungsziele zu erfüllen. Die Priorisierung und Koordination mehrerer Controller wird durch eine Hierarchie erreicht, die Konflikte behandelt und denjenigen mit der höchsten Priorität auswählt. Sobald die Manipulation ins Spiel kommt und folglich der Kontakt mit der Umgebung gewünscht ist und nicht als Störung behandelt wird, müssen komplexe Robotersysteme mit gleichzeitigen Mehrkontaktkräften umgehen, beispielsweise die Füße oder die mobile Basis mit dem Boden, Manipulator oder Manipulatoren mit den manipulierten Objekten und zeitgleich bestehen unter anderem Aufgaben, das Gleichgewicht zu halten oder eine optimale Haltung beizubehalten. Dies erfordert effiziente und Online-Steuerungsstrategien auf der Grundlage von Echtzeit-Feedback, die eine optimale Nutzung der Redundanz solcher Robotersysteme ermöglichen. Dies ist nicht nur für Humanoide relevant, sondern auch in Anwendungen, in denen wir hochredundante Systeme haben, zum Beispiel Dual-Arm-Robotersysteme, die mit gleichzeitigen Aufgaben umgehen müssen [7]. Angesichts der Natur eines freischwebenden Systems wie zum Beispiel

eines AUV mit einem Manipulator scheint es geeignet, die Konzepte der Ganzkörpersteuerung für den Unterwasserbereich zu verwenden, insbesondere wenn Manipulationsaktionen (und damit Kontaktkräfte) ins Spiel kommen. Es gibt jedoch Herausforderungen, die in diesem neuen Bereich zu bewältigen sind, wie die heterogene Natur der Aktuierung, die automatische Rekonfiguration auf der Grundlage des aktuellen Kontexts oder der Aufgaben und der Umgang mit den zuvor erwähnten dynamischen Effekten.

Die nächsten Abschnitte werden einige Details der Methoden liefern, die verwendet werden sollen, um diesen Herausforderungen zu begegnen.

Methoden

Maschinelles Lernen für Kontextanpassung und automatische Rekonfiguration von Ganzkörpersteuerungsaufgaben

Wie bereits erwähnt, ergibt sich eine der Herausforderungen bei der Unterwassermanipulation aus der komplexen und nichtlinearen Wechselwirkung zwischen dem Körper des Manipulators und der umgebenden Flüssigkeit. Nichtlinearitäten in der Dynamik entstehen natürlich aufgrund mehrerer hydrodynamischer Effekte wie Zusatzmasse, Dämpfung und Auftriebseffekt, Auftrieb durch das archimedische Prinzip sowie externe Störungen [8]. Eine genaue Schätzung der hydrodynamischen Parameter ist aufgrund von Variationen in den Umgebungsparametern wie Temperatur, Wasserdichte und Salzgehalt [9] nahezu unmöglich. Klassische Modellierungstechniken der Hydrodynamik solcher Unterwasserfahrzeuge leiden unter Ungenauigkeiten aufgrund der Vereinfachung der mathematischen Gleichungen, das heißt der Annahme geometrischer Symmetrien des Körpers und der Vernachlässigung der Effekte von höheren Nichtlinearitäten. In dieser Hinsicht erscheint maschinelles Lernen als eine vielversprechende Technik zum Erlernen komplexer nichtlinearer Modelle, die ihre Eingaben und Ausgaben bereitstellen, und kann daher nicht modellierte Aspekte der Hydrodynamik des Fahrzeugs berücksichtigen [10]. Im Falle einer freischwebenden Manipulation, wie bei einem AUV, ist es von größter Bedeutung, hochpräzise Manipulationsaktionen durchführen zu können. Dieser Prozess wird noch komplexer, wenn der Manipulator Objekte mit unterschiedlichen Formen und Größen handhaben muss, was alle vorprogrammierten hydrodynamischen Gleichungen obsolet macht. Daher können zwei Herausforderungen gesehen werden, wobei die erste darin besteht, ein Modell zu entwickeln, das Vorhersagen verbunden mit geschätzten Unsicherheiten dieser Vorhersagen liefert, die

für Navigationszwecke verwendet werden können. Die zweite Herausforderung ergibt sich, wenn sich die Dynamik des Roboters ändert (zum Beispiel wenn ein anderes Gewicht getragen wird oder Teile des Roboterkörpers geändert wurden). Hier kommt das Online-Lernen ins Spiel, um das Dynamikmodell anzupassen, indem die Dynamik in Echtzeit aus dem Datenstrom gelernt wird, der aus der Sensorsuite des Roboters extrahiert wird. Folglich besteht die erste Aufgabe darin, eine Softwarebibliothek mit maschinellen Lernverfahren zu entwickeln, um die dynamischen Bewegungsmodelle des Fahrzeug-Arm-Systems experimentell zu identifizieren und diese Modelle entsprechend mit verschiedenen Manipulationsaufgaben anzupassen, sowie diese Modelle in das Ganzkörpersteuerungsframework zu integrieren. In dieser Hinsicht hat das DFKI Online-Modellidentifikationstechniken auf der Grundlage von maschinellem Lernen zur Identifikation von Bewegungsmodellen von Unterwasserfahrzeugen (in diesem Fall ohne Manipulator) verwendet [11, 12, 13]. Weitergehend gibt es Erfahrungen in der experimentellen Identifikation von Roboterdynamiken mit klassischen Techniken und maschinellen Lernansätzen [14], oder mit datengetriebenen Methoden zur Dynamikidentifikation [15]. Diese Methoden könnten verwendet werden, um die Informationen aus den Simulationsmodellen mit experimentellen Daten zu ergänzen.

Abb. 1 zeigt die Konzepte hinter diesen Entwicklungen. Oben die Herausforderungen: die Umweltstörungen und die Laständerungen oder die gewünschte Hardware-Rekonfiguration für einem modularen, vielseitigen Unterwasser-manipulator. Das angestrebte Ziel wäre ein dauerhafter Betrieb, d. h. eine langfristige Autonomie durch genaue und adaptive Dynamikschätzung. Schließlich basiert die Methodik auf der Verwendung von maschinellen Lernverfahren zur Identifikation der Systemdynamik durch Verwendung von experimentellen Daten und Online-Lernen, um mit sich ändernden Dynamiken umzugehen.

Schließlich ist eines der Hauptprobleme von Ganzkörper-Controllern, dass ihre Konfiguration für jedes System bzw. jede Aufgabe normalerweise mühsam von Hand durchgeführt werden muss. Deswegen ist die Entwicklung von automatischen Strategien zur Konfiguration der Parameter der Ganzkörper-Controller auf der Grundlage von abstrakten Kontext- und Aufgabeninformationen unter Verwendung von maschinellen Lernverfahren eine Schlüsselanforderung für ihren praktischen Einsatz. Darüber hinaus müssen die erforderlichen Controller auch automatisch ausgewählt und konfiguriert werden, entsprechend der Hardware-module, die für ein spezifisches System ausgewählt wurden. Im Gegenzug kann die Konfigurationsinformation als Vorwissen für die Modellierung und Anpassung der Systemdynamik verwendet werden. Das Ergebnis ist ein System, das sowohl sein Verhalten anhand von Kontextinformationen anpassen als auch die Morphologie des Softwaresteuernetzwerks anhand von Informationen über die Hardware ändern kann.

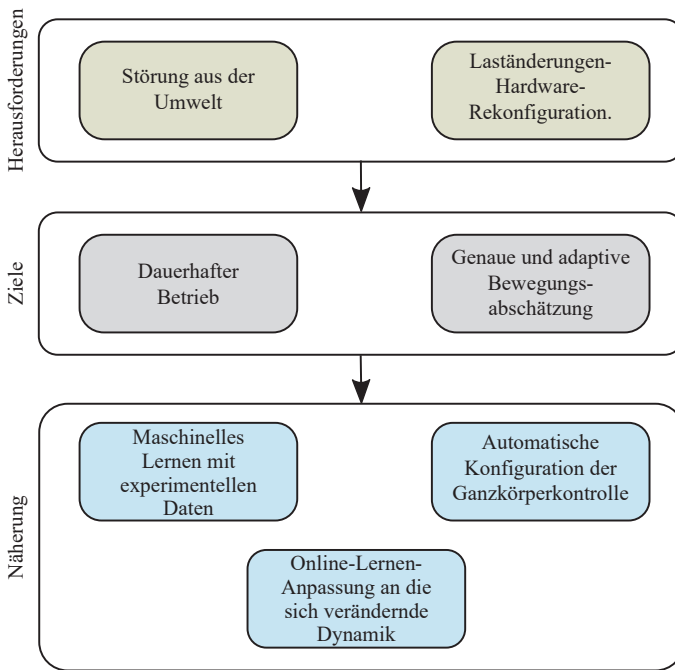


Abb. 1 Konzeptionelle Idee der Herausforderungen, Ziele und des verfolgten Ansatzes zur Identifizierung der Systemdynamik des Ganzkörpersystems mit maschinellen Lerntechniken

Erweiterung der Ganzkörpersteuerung für unteraktuierte und heterogene Systeme

Der Einsatz von Unterwasserrobotern mit bewegter Basis und Gelenkarmen erfordert die Kombination von Mobilität und Manipulationsfähigkeit. Daher wurden für diese Klasse von Systemen Ganzkörpersteuerungsansätze vorgeschlagen, die die Integration mehrerer Steuerungsziele mit unterschiedlichen Prioritäten ermöglichen [9]. Im Kontext der physischen Interaktion wurde in [16] ein hierarchisches Compliance-Steuerungs framework für feststehende Basis-manipulatoren unter Verwendung von Passivitätsargumenten vorgeschlagen. Die Kombination solcher Compliance-Controller mit einer positions-/geschwindigkeitsgesteuerten mobilen Basis wurde in [17] in Betracht gezogen. Darüber hinaus wurde das gleiche Framework auch auf die Basisdynamik eines Beinroboters angewendet, jedoch unter der Annahme, dass die verfügbaren Kontakte eine ordnungsgemäße Steuerung der Kontaktkräfte ermöglichen [18]. Um ähnliche Steuerungsansätze auf Unterwassermanipulatoren anzuwenden, können wir eine strukturelle Ähnlichkeit zwischen verschiedenen Robotersystemen mit

schwebender Basisdynamik nutzen. Wenn man die wesentliche Dynamik der starren Körper von Manipulatoren im Weltraum [19], auf Beinen [20] und in der Luft [21] vergleicht, kann man eine gemeinsame dynamische Struktur beobachten, wenn die schwebende Basisdynamik in Kombination mit verschiedenen Kontaktbedingungen und verschiedenen Aktuatoreigenschaften genutzt wird. Im Kontext von Unterwassermanipulatoren spielen insbesondere die Unterwasserdynamik des Fahrzeugs und das möglicherweise unteraktuierte Steuersystem des Fahrzeugs wichtige Rollen. Für das Controller-Design muss besonderes Augenmerk auf die Robustheit des Controllers in Bezug auf Unsicherheiten in der Unterwasserdynamik gelegt werden. Die theoretische Robustheitsanalyse kann auf dem Konzept der Eingabe-Zustands-Stabilität basieren und kann die Verwendung einer Systemformulierung nutzen, in der die Modellunsicherheit als Störung der nominell gesteuerten Dynamik betrachtet wird. Die Redundanz der vollständigen kinematischen Kette ermöglicht es, verschiedene Aufgabenvariablen einschließlich Fahrzeugposition und Impulsvariablen mit unterschiedlichen Prioritäten in der Steuerungshierarchie zu berücksichtigen. Tatsächlich hat die Verwendung der Gesamtimpulsvariablen des Systems anstelle der Fahrzeugposition und -orientierung kürzlich zu effizienten Controllern im Kontext der Raumrobotik geführt [19] und es ist sehr wahrscheinlich, dass ähnliche Eigenschaften auch in Unterwassersystemen genutzt werden können. Darüber hinaus wird eine der grundlegenden Herausforderungen die Frage sein, wie man mit der dynamischen Wechselwirkung zwischen den (erforderlichen) Kontaktkräften für die Manipulation und der möglicherweise unteraktuierten Dynamik der Basis umgehen kann.

Auf der Grundlage eines allgemeinen hierarchischen Frameworks für die Steuerung von unteraktuierten Unterwassermanipulatoren besteht die nächste Herausforderung in der Erweiterung dieses Frameworks hin zu realistischeren Aktuatormodellen und Steuerungsarchitekturen, die in Unterwassersystemen auftreten. Die Antriebe des Unterwasserfahrzeugs haben relativ langsame Dynamiken und Stellraten im Vergleich zu modernen Roboter-Manipulatoren. Darüber hinaus muss auch die verteilte Datenverarbeitung für die Basis und den Manipulator berücksichtigt werden. Daher muss man letztendlich mit einer heterogenen Steuerungsarchitektur umgehen, in der verschiedene Subsysteme und Sensoren mit unterschiedlichen Stellraten betrieben werden. Das Time-Domain-Passivity-Konzept (TDPC) stellt einen leistungsfähigen Rahmen für solche heterogenen Steuerungsarchitekturen dar. Das endgültige Ziel ist eine generische Controller-Design-Methodik, die die Auswirkungen von Zeitverzögerungen, Abtastung und Aktuatordynamik auf die Gesamtleistung isolieren kann. Als erster Schritt in Richtung dieses Ziels kann das TDPC zusätzliche korrigierende Steuerkomponenten erzeugen, um die Robustheit der gesamten Ganzkörper-Controller gegenüber diesen Modellunvollkommenheiten zu verbessern.

Bewertung

Die entwickelten Steuerungsstrategien sollen in zwei verschiedenen Testumgebungen getestet und bewertet werden. Auf der einen Seite werden die Kernentwicklungen der Ganzkörpersteuerung zunächst in einer bestehenden Simulationsinfrastruktur für schwebende Basisdynamiken für Raumfahrtanwendungen und fliegende Roboter am DLR validiert (siehe Abb. 2 (rechts)). Parallel dazu wird die Ganzkörper-Systemdynamik im Unterwasserbecken am DFKI validiert (siehe Abb. 2 (links)). In einem späteren Stadium werden die endgültigen Entwicklungen auch im Unterwasserbecken am DFKI validiert, unter Verwendung der am DFKI verfügbaren Unterwassermanipulatoren.

Das Lernen der Modelle erfordert oft ausreichend reiche Daten, die den größten Teil des Zustandsraums des Modells abdecken müssen, da es nahezu unmöglich ist, den gesamten Raum abzudecken [22]. Daher ist das Erwerben großer und reicher Datensätze ein wesentlicher Schritt für das Erlernen genauer Modelle. Zu diesem Zweck werden umfangreiche Identifikationsexperimente in der maritimen Testeinrichtung am DFKI durchgeführt, wo eine zusätzliche Anregung des Systems erforderlich wäre. Zum Beispiel würde dem Roboter befohlen, zufällige periodische Trajektorien zu durchlaufen. Mehrere Methoden, die zur Erzeugung solcher Trajektorien verwendet werden können, werden in [23] ausführlicher diskutiert. Um eine gute Generalisierung der Modelle zu gewährleisten, müssen separate Experimente durchgeführt werden, um die Leistung des Modells zu testen. Validierungsexperimente würden typischerweise darin bestehen, dem Roboter zu befehlen, zufällige Punkt-zu-Punkt-Trajektorien auszuführen, und danach die Modellvorhersage mit den gemessenen Daten zu überprüfen. Diese Methodik wurde mit zwei AUVs (ohne Manipulator) am DFKI getestet, wo Vergleiche zwischen verschiedenen maschinellen Lernmethoden und klassischen physikbasierten Methoden vorgestellt wurden [10, 13].



Abb. 2 Links: Becken für Tests von Unterwasserfahrzeugen am DFKI; rechts: Infrastruktur zur Simulation der Dynamik von schwebenden Basen für Raumfahrtanwendungen und fliegende Roboter am DLR

Für den Online-Lernansatz müssen Datenströme erfasst sowie inkrementell und in Echtzeit verarbeitet werden. In solchen Situationen sind zusätzliche Methoden zum Hinzufügen und Vergessen von Datensätzen erforderlich, um mit dem kontinuierlichen Datenfluss umzugehen. Da der Roboter physisch mit seiner Umgebung interagieren wird, muss er unbekannte oder unvorhergesehene Situationen berücksichtigen, auf die er stoßen könnte. Daher sind experimentelle Versuche erforderlich, die zeitabhängige Dynamiken beinhalten. Es können mehrere experimentelle Szenarien entworfen werden, in denen vom Roboter verlangt wird, Aufgaben auszuführen, die zuvor nicht berücksichtigt wurden, wie zum Beispiel die Interaktion mit verschiedenen Objekten unbekannter Massen oder das Befolgen einer bestimmten Trajektorie, während er mit verschiedenen Nutzlasten ausgestattet ist, usw. Solche Experimente sind notwendig, um die Fähigkeit des Online-Lernens zu testen und zu validieren, sich kontinuierlich an neue Situationen anzupassen. Neben der Vorhersagegenauigkeit der gelernten Modelle sind zwei weitere Aspekte zu testen: (1) die Geschwindigkeit der Anpassung und (2) die Fähigkeit des Modells, zwischen zuvor gelernten Kontexten zu wechseln oder zu entscheiden, ob ein neues Modell gelernt werden muss. Ein Konzeptframework für das Online-Lernen von AUV-Dynamiken wurde in [12] vorgestellt, in dem wir Methoden zum Hinzufügen und Vergessen von Datensätzen sowie eine Methode zur Ablehnung von Ausreißern bereitstellen. Das Framework wurde an experimentellen Daten von einem AUV mit einer Änderung in seiner mechanischen Konstruktion validiert.

Darüber hinaus können einige Ansätze verwendet werden, um die Gesamtleistung des Online-Lernens zu verbessern. Eine Idee ist die Kombination von Lernen mit Expertenwissen, das als Vorinformation für die Lernmethode verwendet werden kann [24]. Ein anderer Ansatz ist die Erhöhung der Konvergenzgeschwindigkeit des Online-Lernens durch eine geeignete Auswahl der Datensätze, dieser Ansatz wird normalerweise als *aktives Lernen* bezeichnet [25, 26].

Der Roboter-Hardware-in-the-Loop-Simulator Abb. 2 (rechts) wurde in der Vergangenheit zur Bewertung verschiedener schwebender Basissysteme einschließlich freischwebender Weltraummanipulatoren und Manipulatoren auf der Basis von Hubschraubern angewendet. Die Anwendung dieses Systems auf die Entwicklung und Bewertung von Steuerungsansätzen für die Unterwasser-manipulation erfordert die Implementierung einer repräsentativen Annäherung an die Unterwassereffekte in der Fahrzeugdynamik. Einer der Vorteile dieses Systems ist die Tatsache, dass verschiedene Situationen für die Fahrzeugdynamik (d. h. verschiedene Unterwassereffekte in z. B. stationärer oder bewegter Flüssigkeit) mit geringem Aufwand emuliert werden können. Außerdem ermöglicht es, die Auswirkungen der eigenen Dynamik des Roboters und die Auswirkungen der Umgebung, in der der Roboter agiert, zu trennen. Die an diesem System durchgeführten Tests konzentrieren sich auf die Verwendung von Impulsvariablen für die Ganzkörpersteuerung unter verschiedenen emulierten Unterwasserbedingungen. Diese Tests sollen erste Erkenntnisse liefern, bevor Outdoor-Feldtests in einer realen Unterwasserumgebung durchgeführt werden.

Literatur

1. Simetti E, Casalino G, Torelli S, Sperindé A, Turetta A, Floating underwater manipulation: developed control methodology and experimental validation within the trident project. *J Field Robot* 31(3):364–385. <https://doi.org/10.1002/rob.21497>
2. Yoerger DR, Schempf H, Dipietro DM, Design and performance evaluation of an actively compliant underwater manipulator for full-ocean depth. *J Robot Syst* 8(3):371–392. <https://doi.org/10.1002/rob.4620080306>
3. Schempf H, Yoerger DR (1992) Coordinated vehicle/manipulation design and control issues for underwater telemanipulation. *IFAC Proc* 25(3):259–267 (1992). IFAC workshop on artificial intelligence control and advanced technology in marine automation (CAMS '92), Genova, Italy, April 8–10
4. Yuh J, Choi SK, Ikehara C, Kim GH, McMurty G, Ghasemi-Nejhad M, Sarkar N, Sugihara K (1998) Design of a semi-autonomous underwater vehicle for intervention missions (sauvim). In: *Proceedings of 1998 international symposium on underwater technology*, pp 63–68. <https://doi.org/10.1109/UT.1998.670059>
5. Yuh J (2000) Design and control of autonomous underwater robots: a survey. *Auton Robot* 8(1):7–24. <https://doi.org/10.1023/A:1008984701078>
6. Sentis L (2007) Synthesis and control of whole-body behaviors in humanoid systems. Ph.D. thesis, Stanford, USA
7. de Gea Fernández J, Mronga D, Günther M, Knobloch T, Wirkus M, Schröer M, Trampler M, Stiene S, Kirchner E, Bargsten V, Bänziger T, Teiwes J, Krüger T, Kirchner F (2017) Multimodal sensor-based whole-body control for human-robot collaboration in industrial settings. *Robot Auton Syst* 94(Supplement C):102–119. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2017.04.007>
8. Fossen TI (2002) *Marine control systems: guidance, navigation and control of ships, rigs and underwater vehicles*. Publisher: Springer. ISBN: 82-92356-00-2
9. Antonelli G (2006) *Underwater robots: motion and force control of vehicle-manipulator systems*. Springer tracts in advanced robotics, Bd 2
10. Wehbe B, Hidebrandt M, Kirchner F (2017) Experimental evaluation of various machine learning regression methods for model identification of autonomous underwater vehicles. In: *Proceedings of 2017 international conference on robotics and automation (ICRA)*. IEEE international conference on robotics and automation (ICRA-17), pp 4885–4890. IEEE Robotics and Automation Society, IEEE
11. Hanff H, Kloss P, Wehbe B, Kampmann P, Kroffke S, Sander A, Firvida MB, von Einem M, Bode JF, Kirchner F (2017) Auvx—a novel miniaturized autonomous underwater vehicle. In: *OCEANS 2017—Aberdeen*, S 1–10. <https://doi.org/10.1109/OCEANSE.2017.8084946>
12. Wehbe B, Fabisch A, Krell MM (2017) Online model identification for underwater vehicles through incremental support vector regression. In: *2017 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems (IROS)*, S 4173–4180. <https://doi.org/10.1109/IROS.2017.8206278>
13. Wehbe B, Krell MM (2017) Learning coupled dynamic models of underwater vehicles using support vector regression. In: *OCEANS 2017—Aberdeen*, S 1–7. <https://doi.org/10.1109/OCEANSE.2017.8084596>
14. Bargsten V, de Gea Fernández J, Kassahun Y (2016) Experimental robot inverse dynamics identification using classical and machine learning techniques. In: *Proceedings of ISR 2016: 47st international symposium on robotics*, S 1–6
15. Yu B, de Gea Fernández J, Kassahun Y, Bargsten V (2017) Learning the elasticity of a series-elastic actuator for accurate torque control. In: Benferhat S, Tabia K, Ali M (eds) *advances in artificial intelligence: from theory to practice: 30th international conference on industrial engineering and other applications of applied intelligent systems, IEA/AIE 2017*,

- Arras, France, June 27–30, 2017, Proceedings, Part I, S 543–552. Springer International Publishing
16. Ott C, Dietrich A, Albu-Schäffer A (2015) Prioritized multi-task compliance control of redundant manipulators. *Automatica* 53:416–423
 17. Dietrich A, Bussmann K, Petit F, Kotyczka P, Ott C, Lohmann B, Albu-Schäffer A (2015) Whole-body impedance control of wheeled mobile manipulators: stability analysis and experiments on the humanoid robot rollin' justin. *Auton Robots*
 18. Henze B, Dietrich A, Ott C (2016) An approach to combine balancing and multi-objective manipulation for legged humanoid robots. *IEEE Robot Autom Lett* 1(2):700–707
 19. Giordano AM, Garofalo G, Stefano MD, Ott C, Albu-Schaeffer A (2016) Dynamics and control of a free-floating space robot in presence of nonzero linear and angular momenta. In: *Proceedings of IEEE annual conference on decision and control (CDC)*, S 322–327
 20. Garofalo G, Henze B, Engelsberger J, Ott C (2015) On the inertially decoupled structure of the floating base robot dynamics. In: *Proceedings of 8th vienna international conference on mathematical modelling (MATHMOD)*, S 322–327
 21. Kim M, Kondak K, Ott C (2018) A stabilizing controller for regulation of uav with manipulator. *IEEE Robot Autom Lett*
 22. Nguyen-Tuong D, Peters J (2011) Model learning for robot control: a survey. *Cognit Process* 12(4):319–340
 23. Swevers J, Verdonck W, Schutter JD (2007) Dynamic model identification for industrial robots. *IEEE Control Syst Mag* 27(5):58–71. <https://doi.org/10.1109/MCS.2007.904659>
 24. Nguyen-Tuong D, Peters J (2010) Using model knowledge for learning inverse dynamics. In: *2010 IEEE international conference on robotics and automation*, S 2677–2682. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2010.5509858>
 25. Daniel C, Kroemer O, Viering M, Metz J, Peters J (2015) Active reward learning with a novel acquisition function. *Auton Robots* 39(3):389–405
 26. Martinez-Cantin R, Lopes M, Montesano L (2010) Body schema acquisition through active learning. In: *2010 IEEE international conference on robotics and automation*, S 1860–1866. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2010.5509406>

Adaptive Steuerung für Unterwasser-Greifsysteme



Peter Kampmann, Christof Büskens, Shengdi Wang, Dirk Wübben und Armin Dekorsy

Zusammenfassung Das Greifen von Objekten unter Wasser ist auch heute noch eine der größten Herausforderungen beim Betrieb von Robotersystemen, sei es ferngesteuert oder autonom. Derzeit werden die meisten Manipulationsaufgaben unter Wasser mit ferngesteuerten Fahrzeugen (ROVs) durchgeführt, die alle industriellen Wartungs- und Inspektionsaufgaben übernehmen, bei denen ein Eingriff erforderlich ist. Die Manipulation mit autonomen Unterwasserfahrzeugen (AUVs) ist noch ein Forschungsthema, da sie die Steuerung einer beweglichen Basis und die Wechselwirkung der Kräfte in der anspruchsvollsten Konfiguration beinhaltet. Die hier vorgestellten Arbeiten und die beabsichtigte weitere Forschung konzentrieren sich auf die Steuerung und Signalverarbeitung des Endeffektors selbst während der autonomen mobilen Manipulation.

P. Kampmann (✉)
ROSEN Creation Center GmbH, Bremen, Deutschland
E-Mail: pkampmann@rosen-group.com

C. Büskens
Center for Technomathematics, Universität Bremen, Bremen, Deutschland
E-Mail: bueskens@math.uni-bremen.de

S. Wang · D. Wübben · A. Dekorsy
Department of Communications Engineering, Universität Bremen, Bremen, Deutschland
E-Mail: wang@ant.uni-bremen.de

D. Wübben
E-Mail: wuebben@ant.uni-bremen.de

A. Dekorsy
E-Mail: dekorsy@ant.uni-bremen.de

Grundlagen

Die Anforderungen an die Forschung im Bereich der adaptiven Steuerung für Unterwassergreifer, die in höchstem Maße eine algorithmische Herausforderung darstellt, basieren auf mechanischen und elektrischen Grundlagen. Nämlich die Verfügbarkeit von fingerfertigen kinematischen Strukturen sowie einer geeigneten Sensorsuite. Der Stand der Entwicklung bezüglich der Anwendung unter Wasser wird in den folgenden Abschnitten vorgestellt.

Greifersysteme

Die Grundlage für fortgeschrittene Greiffähigkeiten sind geeignete Manipulatoren, die ein kraft- oder formschlüssiges Greifen zusammen mit einem Satz von Sensoren ermöglichen, die die Überwachung der autonomen Manipulationsaufgabe ermöglichen. Für die Anwendung unter Wasser haben die herausfordernden Umweltbedingungen die Entwicklung solcher Endeffektoren lange Zeit eingeschränkt. Umweltbedingungen wie Umgebungsdruck, Salzwasser und der direkte Kontakt mit Wasser haben die Anwendungsmöglichkeiten konventioneller Lösungen, wie sie für Anwendungen an Land verfügbar sind, eingeschränkt. Deshalb kann ein vollständiger Überblick über den Stand der Technik von Unterwassergreifsystemen gegeben werden. Da Greifsysteme mit taktilem Feedback für die autonome Manipulation von größtem Interesse sind, liegt der Fokus auf Greifern, die diese Technologie besitzen.

Die ersten Versuche zur mehrfingerigen Unterwassermanipulation werden in [1] berichtet. Während des AMADEUS-Projekts wurde ein dreifingeriger Greifer entwickelt, der Dehnungsmessstreifen zur Messung von Kräften sowie Sensoren aus Polyvinylidenfluorid (PVDF) zur Detektion von Rutschen umfasste.

Das Aktuationsprinzip wurde mit drei Balgstrukturen in jedem Finger entworfen, um die Fingerelemente zu biegen. Es wird angegeben, dass die Positionssteuerung auf Pose-Schätzungen basieren musste, die aus dem Druck innerhalb der Balgstrukturen abgeleitet wurden.

Mit Hilfe von Hydraulik für die Aktuation wurde ein dynamisches Verhalten mit einer Betriebsfrequenz von 10 Hz erreicht. Der beabsichtigte Einsatz des AMADEUS-Greifers erfolgt im Teleoperationsmodus in Kombination mit Assistenzfunktionen und der Erzeugung eines Modells auf Basis der von den integrierten Sensoren beobachteten taktilen Empfindungen.

Die HEU Hand II der Harbin Engineering University wurde als Werkzeug für industrielle Tiefseemanipulatoren konzipiert. Sie wird in der Arbeit von [2] beschrieben. Die Morphologie wurde gewählt, um auf einem dreifingerigen Design mit jeweils zwei Gelenken zu basieren. Ein Satz von Dehnungsmessstreifensensoren wurde in die Fingerspitze integriert, um die Erfassung von

Kontaktkräften in Kombination mit der Beobachtung des vom Gleichstrommotor erzeugten Drehmoments zu ermöglichen. Als Steuerschema wurde die Impedanzsteuerung implementiert. Die Autoren stellen fest, dass dieser Ansatz zusätzliche Herausforderungen mit sich bringt, wenn er auf Unterwasserszenarien angewendet wird, da die hydrodynamischen Terme wie Zusatzmasse, Widerstand und Auftrieb nicht genau bekannt sind. Deshalb haben die Autoren eine positionsbasierte neuronale Netzwerk-Impedanzsteuerung angewendet, um mit der Unsicherheit im Robotermodell umzugehen.

Ein dreifingeriger, seilgetriebener Manipulator für den Einsatz im TRIDENT-Projekt wird in [3] vorgestellt. Der Greifer wurde in Kombination mit einem elektrischen Unterwassermanipulator auf dem autonomen Unterwasserfahrzeug (AUV) Girona 500 eingesetzt. Er verfügt über Kontaktsensorelemente in der Fingerspitze, die nach einem optischen Messprinzip arbeiten. Geschwindigkeits- und Positionssteuerung sind auf den Motorsteuerungen implementiert, die für die Aktuation des Greifers verwendet wurden. Diese Steuerungen werden von einer Steuereinheit angesteuert, die das Arm- und Greifersystem des AUV mit einer Frequenz von 100 Hz koordiniert.

Ein weiterer dreifingeriger Greifer mit Fokus auf multimodalem taktilen Sensorfeedback wurde während des SeeGrip-Projekts entwickelt [4]. Er soll als Ersatzwerkzeug für industrielle Tiefseemanipulatoren verwendet werden. Die Morphologie verfügt über zwei gegenüberliegende Daumen sowie zwei Glieder an jedem Finger. Absolute Winkelencoder ermöglichen die Implementierung der Positionssteuerung. Die Aktuation basiert auf Sub-Miniatur-Servoventilen, die mit 50 bar und Frequenzen von 3 kHz arbeiten (Abb. 1).

Betrachtet man den vorgestellten Stand der Technik, so kann man zu dem Schluss kommen, dass die meisten Roboter-Greifer für Unterwasseranwendungen entwickelt wurden, um Telemanipulationsaufgaben in Verbindung mit ROVs zu ermöglichen. Autonomes Greifen basiert auf der Fähigkeit, auf externe Reize zu reagieren, die von möglichst vielen Modalitäten ausgehen. Im Gegensatz zu Anwendungen an Land müssen sowohl die Hydrodynamik als auch die Dämpfungsparameter sowohl vom Greifer als auch von den gehandhabten Objekten berücksichtigt werden.

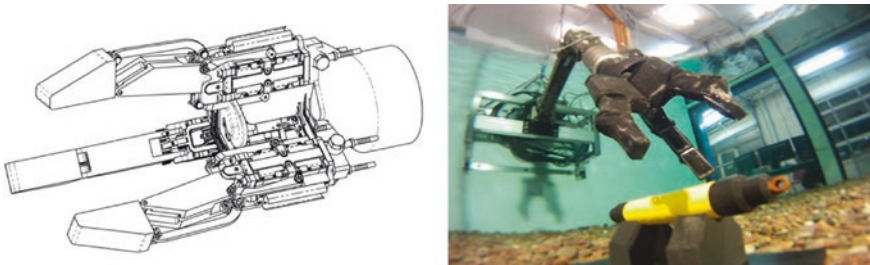


Abb. 1 Morphologie und Feldversuche des SeeGrip-Greifers [5]

Tastsensoren

In diesem Kapitel werden kurz Designüberlegungen bezüglich Sensoren diskutiert, die mit Wasser und wechselndem Umgebungsdruck in Kontakt kommen.

Die Messung der Pose des Greifers ist entscheidend für Pre-Grasp-Positionen und zur Unterstützung der geometrischen Formerkennung von Objekten im Greifer. Klassische Ansätze wie Encoder-Scheiben sind für diese Aufgabe nicht geeignet, da sie entweder Druckgehäuse benötigen oder bei direktem Eintauchen in das Umgebungswasser nur eingeschränkt zuverlässig sind. Da magnetische Felder nicht durch Wasser gedämpft werden, sind Sensoren, die auf dem Hall-Effekt basieren, gut geeignet und haben sich als geeignet für die Messung von Winkelpositionen unter Wasser erwiesen [6].

Weitere frühe Forschungen basieren auf drucktoleranten Kraftsensoren. Im Interesse der Qualität des Sensorfeedbacks ist ein Sensor wünschenswert, der unabhängig von der Wassersäule arbeiten kann und nicht durch den Kontakt mit Wasser beschädigt wird.

Um absolute Kräfte zu messen, hat sich das Messprinzip von Dehnungsmessstreifensensoren als ziemlich zuverlässig erwiesen. Da diese Sensoren in MEMS-Technologie verfügbar sind und in Wheatstone-Brückenschaltungen angeordnet sind.

Lösungen für nichtlineare optimale Steuerung

Nichtlineare Optimierung ist ein Schlüsselement für viele Anwendungen in Industrie und Wissenschaft. Die allgemeine Frage in diesem Zusammenhang ist, wie die freien Variablen eines Modells gewählt werden müssen, um eine definierte Zielfunktion zu minimieren, während bestimmte Einschränkungen eingehalten werden. Das nichtlineare Optimierungsproblem ist wie folgt definiert: Sei $z \in \mathbb{R}^n$ der Optimierungsvektor (z. B. Steuerparameter des Greifers). Weiterhin sei $F: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ die Zielfunktion und $g: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^{l_i}$, $h: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^{l_e}$ allgemeine nichtlineare Einschränkungsfunktionen. Dann wird

$$\min_z F(z)$$

$$\text{u. d. NB } g_i(z) \leq 0, i = 1, \dots, l_i$$

$$h_j(z) = 0, j = 1, \dots, l_e$$

als nichtlineare Programmierung (NLP) bezeichnet. Im Allgemeinen gibt es mehrere verschiedene Algorithmen zur Lösung solcher Probleme. Alle von ihnen sind eine Art Spezialisierung der Newton-Methode. Der Solver WORHP („We

Optimize Really Huge Problems“) wurde speziell für großskalige, spärliche nicht-lineare Optimierungsprobleme entwickelt und ist der bevorzugte NLP-Solver der Europäischen Weltraumorganisation (ESA). WORHP verwendet entweder eine spärliche sequentielle quadratische Programmiermethode (SQP) mit Innenpunkt-methode für das quadratische Teilproblem oder eine Innenpunkt-methode auf der nichtlinearen Ebene. Das Software-Design legte den Schwerpunkt auf hohe Robustheit und anwendungsorientiertes Design [7].

Prinzipien für verteilte Berechnung

Das Konzept der verteilten Berechnung stammt aus verteilten Systemen im Bereich der Informatik. Ein verteiltes System besteht aus verschiedenen vernetzten Computern, die die Fähigkeit haben, miteinander über Nachrichtenübertragung zu kommunizieren, um ihre Aktionen zu koordinieren [8] und schließlich ein gemeinsames Ziel zu erreichen. Verteilte Berechnung ist eine Methode, in der Regel ein Algorithmus, um ein allgemeines globales Problem auf verteilte Weise zu lösen. Das Hauptzielproblem wird in viele Teilprobleme unterteilt und jedes von ihnen wird von einer Komponente, d. h. einem Computer oder mehreren, eines verteilten Systems gelöst.

In vielen Literaturquellen, wie z. B. in [9], zeigt die verteilte Berechnung über ein verteiltes System ihre Vorteile im Vergleich zur zentralisierten Berechnung, bei der alle Informationen in einem Rechenzentrum verarbeitet werden müssen. Ein bedeutender Vorteil ist die inhärente Fehlertoleranz, was bedeutet, dass das Vorhandensein von Fehlern den Fortbestand des gesamten Systems nicht beeinflusst. Dies erhöht die Robustheit des gesamten Systems. Die Vermeidung von Überlastung ist auch ein beachtlicher Vorteil, wenn das Netzwerk der Komponenten groß ist oder eine massive Menge an Daten verarbeitet werden muss. Die Verteilung der Rechenaufgaben des globalen Problems auf verschiedene Computer macht die Berechnung effizient.

Um einen ordnungsgemäß verteilten Berechnungsalgorithmus zu entwerfen, wollen wir eine relativ genaue Lösung des globalen Problems verfolgen und gleichzeitig die Berechnung effizient halten. Darüber hinaus sollten auch einige andere Anforderungen berücksichtigt werden, wie z. B. geringer Kommunikationsaufwand, parallele Verarbeitung, akzeptable Latenz, Synchronisation, Skalierbarkeit usw.

Taktile Erkundung

Die taktile Erkundung von Objekten ist noch immer unzureichend erforscht. Die Gründe dafür sind vermutlich der fehlende Bedarf dafür in den meisten

Anwendungen an Land und die Einschränkungen in Bezug auf Geschicklichkeit und taktile Unterstützung für Anwendungen unter Wasser.

Für die Anwendung unter Wasser wird diese Technologie sehr wichtig, da oft eingeschränkte Sicht zu Situationen führt, bei denen autonome und sogar manuelle Manipulation nicht möglich ist.

Der Stand der Technik in diesem Bereich ist sehr begrenzt in Bezug auf Anwendungen unter Wasser. In der Arbeit von [10] wird ein Ansatz zur Erkennung und Lokalisierung von bekannten Objekten in sechs Freiheitsgraden vorgestellt. Dank der hohen räumlichen und Kraftauflösung zusammen mit der Greiferkinematik war eine Darstellung von in Kontakt befindlichen Objekten mit dichten Punktwolken möglich. Dies ermöglichte den Einsatz von modernen Punktwolken-Matching-Techniken zusammen mit iterativen Closest-Point(ICP)-Strategien. In Verbindung mit einem Batch-RANSAC-Algorithmus wurde dieser Ansatz verwendet, um Hypothesen bezüglich der erkundeten Objekte in Bezug auf die Datenbankabgleichung zu entwickeln. Die Autoren konstatieren, dass der Ansatz auf ein einziges Sensorelement des für die Ansätze verwendeten Greifersystems beschränkt war und daher drastisch optimiert werden kann (Abb. 2).

Unter Berücksichtigung der Erkundungsstrategien des Menschen, die in [11] untersucht wurden, wurde das Konturfolgen in [5] als eine effiziente Erkundungsmethode für unbekannte Objekte bewertet. Dieser Ansatz verwendet das erhaltene taktile Bild als Indikation, wohin der Endeffektor bewegt werden soll. Einfache Pfadplanung über das taktile Bild wurde verwendet, um den Manipulatorarm auf Basis der erhaltenen Informationen über eine s-förmige Geometrie zu orientieren und zu bewegen. Um die Rekonstruktion von Konturen komplexer Objekte zu erreichen, ist eine Online-Verarbeitung von Daten notwendig, um Informationen auf Basis der bereits erhaltenen Struktur von Objekten zu generieren, um die nächsten Erkundungsbewegungen abzuleiten. Diese Aufgabe ist rechenintensiv, da sie Pfadplanung, Musterabgleich, Datenfusion sowie mehrfingerige Aktuationssteuerung erfordert.

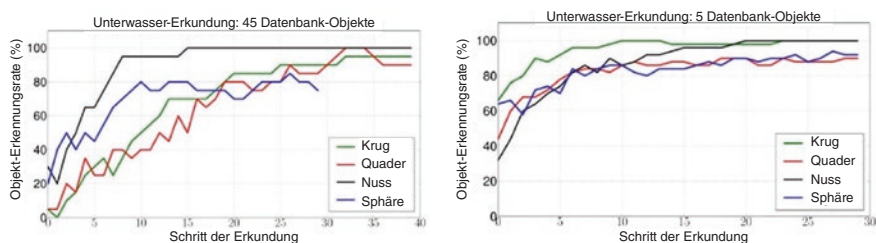


Abb. 2 Erkennungsraten von Objekten mit dem in [10] vorgestellten Ansatz zur Objekterkundung

Adaptive Steuerung in der Unterwassermanipulation

Die taktile Erkundung unter Wasser ist eine hochgradig nichtlineare Aufgabe aufgrund der komplexen physikalischen Phänomene und gegenseitigen Einflüsse. Um hochentwickelte numerische Optimierungssoftware zu verwenden, ist ein grundlegendes Verständnis aller Einflüsse und ein mathematisches Modell erforderlich. Im Allgemeinen verwenden diese Modelle Vereinfachungen, um die Komplexität zu reduzieren, während Modellparameter verwendet werden, um das Modell an beobachtete Messungen anzupassen. Die erste Aufgabe besteht darin, die Parameter des nichtlinearen Modells so zu bestimmen, dass das Modell den beobachteten Messungen entspricht (Parameteridentifikation). Eine automatische und effiziente Parameteridentifikation erfordert mathematische nichtlineare Optimierungsmethoden, wie die NLP-Formulierung aus dem vorherigen Abschnitt. Nur wenn es eine gute Beschreibung aller physikalischen Einflüsse gibt, kann man mathematische Steueralgorithmen verwenden, um einen Greifer unter Wasser auf optimale Weise zu steuern (z. B. zeit- oder energieoptimal). Optimale Steuerungsprobleme können als unendlichdimensionale Optimierungsprobleme verstanden werden, da die Zustände und die Steuerungen für jeden Zeitpunkt optimal sein müssen [12]. Bei der Verwendung von direkten Methoden gibt es zwei Hauptansätze, um diese unendlichdimensionalen Optimierungsprobleme in endlichdimensionale zu transformieren, entweder ergeben sich kleine und dichte Problemen oder große und spärliche Problemen. Besonders für hochgradig nichtlineare Anwendungen ist der zweite Ansatz aufgrund der numerischen Robustheit durch die Nichtlinearitäten innerhalb der Modellauswertungen und -simulationen vielversprechender. Durch die Lösung des nichtlinearen optimalen Steuerungsproblems für den Greifer erhält man die optimale Trajektorie und die zugehörigen optimalen Steuerungen. In einem letzten Schritt muss der Steueralgorithmus die Steuerungen in Echtzeit an natürliche Störungen anpassen. Um diese Aufgabe zu erfüllen, ist eine robuste und genaue Messung aller Systemzustände notwendig.

Umgang mit massiven Daten: Verteilte Sensorverarbeitung

Wie im vorherigen Abschnitt erwähnt, ist die verteilte Verarbeitung eine robuste und effiziente Methode zur Bewältigung massiver Daten aufgrund der Vermeidung von Überlastung und des Single-Point-of-Failure-Problems der zentralisierten Verarbeitung. Ähnlich ist die verteilte Signalverarbeitung innerhalb von Sensornetzwerken vorteilhaft für das betrachtete Unterwassergreifsystem, bei dem verschiedene Sensoren auf einem robotischen Greifer eingesetzt werden, um miteinander in Bezug stehende Daten zu erfassen, wie z. B. Position, Geschwindigkeit, Winkel, Druck, Temperatur usw. Jeder einzelne Sensor im System ist nicht in der Lage, auf alle Beobachtungen zuzugreifen, aufgrund von unterschiedlichen

Modalitäten und sensorischen Fähigkeiten. Daher muss er mit benachbarten Knoten durch den Austausch von Informationen zusammenarbeiten, um die globale Lösung auf verteilte Weise zu erhalten. Wir können die Aufgabe auch als verteilte Sensorfusion bezeichnen.

Eine Möglichkeit, eine verteilte Lösung zu erreichen, besteht darin, eine netzwerkweite Zielfunktion in eine Summe von Teilzielen zu zerlegen, typischerweise mit zusätzlichen Einschränkungen, die sicherstellen, dass lokale Lösungen, die von jedem Agenten erhalten werden, zur gemeinsamen netzwerkweiten Lösung konvergieren. Eine spezielle Klasse solcher Algorithmen wird als konsensbasierte Algorithmen bezeichnet [13–15]. Zum Beispiel kann konsensbasierte Least-Squares-Optimierung in [16] gefunden werden. Einige andere Möglichkeiten für verteilte Verarbeitung über Sensornetzwerke wie inkrementalbasierte [17] diffusionsbasierte [18], gossip-basierte [19] und graphenbasierte [20] Methoden können auch in dieser Anwendung mit unterschiedlichen praktischen Anforderungen weiter untersucht werden, um die Vorteile von ihnen zu unterscheiden.

In Steuersystemen können die Sensordaten auf irgendeine Weise mit dem Zustand des gesamten Systems in einer mathematischen Weise in Beziehung stehen. In einigen Fällen ist der Zustand eine verborgene Variable und es sind nur Kenntnisse über den dynamischen Prozess und die entsprechende Beobachtung verfügbar. Für solche Szenarien können modellbasierte Zustandsschätzmethoden wie der Kalman-Filter angewendet werden. Angepasst an diese Anwendung kann die weitere Untersuchung zur robusten Gestaltung von verteilten Zustandsschätzalgorithmen, z. B. unsere vorherige Arbeit [21], über Sensornetzwerke als Forschungsaufgabe in Bezug auf die oben genannten verteilten Verarbeitungsstrategien betrachtet werden.

Schlussfolgerungen

In den letzten Jahren haben Robotersysteme beeindruckende Fähigkeiten in verschiedenen Disziplinen demonstriert. Aber die meisten dieser Fähigkeiten werden isoliert präsentiert und leiden unter begrenzten Verarbeitungskapazitäten oder Sensordaten, wenn diese für eine vielseitige Lösung kombiniert werden sollen. Um diese Fähigkeiten in realen Anwendungen anzuwenden, sind Robustheit und damit Zuverlässigkeit in den zugewiesenen Aufgaben sowie ein effizienter Betrieb entscheidende Eigenschaften für die Akzeptanz.

Unserer Meinung nach kann dieses Ziel nur erreicht werden, indem man sich der Herausforderung stellt, Fähigkeiten im Bereich der Sensorik, Verarbeitung und Reaktion zu integrieren. Wir schlagen daher eine hochgradig verteilte Sensor- und Rechenarchitektur für Roboter vor, die multimodale Sensormodalitäten verarbeitet, um Unsicherheiten im Sensorfeedback aufgrund ihrer Messprinzipien zu bewältigen. Kurze Reaktionszeiten, ermöglicht durch die Parallelisierung der verteilten Verarbeitungsaufgabe sowie die Berechnung von Steuerausgängen

auf Basis nichtlinearer Lösungen, werden fortgeschrittene Manipulations- und Erkundungsaufgaben ermöglichen. Wir schlagen vor, diese Annahme zu demonstrieren, indem wir eine robuste taktile Erkundung durch die Kombination der verschiedenen Fachgebiete, die in diesem Kapitel vorgestellt wurden, realisieren.

Wir glauben, dass, wenn wir in unserer Aufgabe erfolgreich sind, ein solcher hochintegrierter robotischer Endeffektor den Weg für robuste und hochreaktive Robotersysteme auch an Land ebnen wird, die erforderlich sind, wenn wir die Akzeptanz von Robotern als Arbeitspartner des Menschen erreichen wollen.

Literatur

1. Lane DM, Davies J, Casalino G, Bartolini G, Cannata G, Veruggio G ... others (1997) AMADEUS: advanced manipulation for deep underwater sampling. *Robot Autom Mag IEEE* 4(4):34–45. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=637804
2. Meng Q, Wang H, Li P, Wang L, He Z (2006) Dexterous Underwater Robot Hand: HEU Hand II. In: 2006 international conference on mechatronics and automation, S 1477–1482. IEEE. <http://doi.org/10.1109/ICMA.2006.257847>
3. Bemfica JR, Melchiorri C, Moriello L, Palli G, Scarcia U (2014) A three-fingered cable-driven gripper for underwater applications. *IEEE Int Conf Robot Autom (ICRA)* 2014:2469–2474. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2014.6907203>
4. Kampmann P, Kirchner F (2014) Towards a fine manipulation system with tactile feedback for deep-sea environments. *Robot Auton Syst.* <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921889014002188>
5. Kampmann P (2016) Development of a multi-modal tactile force sensing system for deep-sea applications, PhD thesis. University of Bremen. <https://elib.suub.uni-bremen.de/peid=D00105232>
6. Kampmann P, Lemburg J, Hanff H, Kirchner F (2012) Hybrid pressure-tolerant electronics. In: *Proceedings of the Oceans 2012 MTS/IEEE hampton roads conference & exhibition. OCEANS MTS/IEEE Conference (OCEANS-2012)*, October 14–19, Hampton Roads, Virginia, USA, S 1–5. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6404828
7. Büskens C, Wassel D (2012) The ESA NLP Solver WORHP. In: *Modeling and optimization in space engineering*, S 85–110
8. George Coulouris, Jean Dollimore, T. K. & G. B. (2011). *Distributed systems concepts and design* (5. Aufl.). Addison-Wesley, Boston
9. Kshemkalyani AD, MS (2011) *Distributed computing: principles, algorithms, and systems*. Cambridge University Press
10. Aggarwal A, Kampmann P, Lemburg J, Kirchner F (2015) Haptic object recognition in underwater and deep-sea environments. *J Field Robot* 32(1):167–185
11. Lederman S, Browne RA (1988) The physiology and psychophysics of touch. *NATO ASI Series, F43(Sensors and Sensory System for Advanced Robots)*, 71–91. <http://psycserver.psyc.queensu.ca/lederman/054.pdf>
12. Knauer M, Büskens C (2012) From WORHP to TransWORHP. In: *Proceedings of the 5th international conference on astrodynamics tools and techniques*
13. Nocedal J, Wright S (2006) *Numerical optimization*. Springer, New York. <https://www.springer.com/us/book/9780387303031>
14. Schizas ID, Giannakis GB, Roulmliotis SI, Ribeiro A (2008) Consensus in ad hoc WSNs with noisy links—Part II: distributed estimation and smoothing of random signals. *IEEE Trans Signal Process* 56(4):1650–1666

15. Pereira SS (2012) Distributed consensus algorithms for wireless sensor networks. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain
16. Paul H, Fliege J, Dekorsy A (2013) In-network-processing: distributed consensus-based linear estimation. *IEEE Commun Lett* 17(1):59–62
17. Lopes CG, Sayed AH (2007) Incremental adaptive strategies over distributed networks. *IEEE Trans Signal Process* 55(8):4064–4077
18. Chen J, Sayed AH (2012) Diffusion adaptation strategies for distributed optimization and learning over networks. *IEEE Trans Signal Process* 60(8):4289–4305
19. Dimakis AG, Kar S, Moura JMF, Rabbat MG, Scaglione A (2010) Gossip algorithms for distributed signal processing. *Proc IEEE* 98(11):1847–1864
20. Cetin M, Chen L, Fisher JW, Ihler AT, Moses R, Wainwright MJ, Willsky AS (2006) Distributed fusion in sensor networks. *IEEE Signal Process Mag* 23(4):42–55
21. Wang S, Paul H, Dekorsy A (2018) Distributed optimal consensus-based Kalman filtering and its relation to MAP estimation. In: *IEEE international conference on acoustics, speech and signal processing (ICASSP)*

Herausforderungen bei der Unterwasser-Visuellen Navigation und SLAM



Kevin Köser und Udo Frese

Zusammenfassung Dieses Kapitel behandelt die visuelle Navigation von autonomen Unterwasserfahrzeugen (AUVs) mit und ohne gegebene Karte, wobei Letzteres als Simultane Lokalisierung und Kartierung (SLAM) bezeichnet wird. Wir fassen die Herausforderungen und Möglichkeiten in Unterwasserumgebungen zusammen, die die visuelle Navigation von der Landnavigation unterscheiden, und geben auch einen kurzen Überblick über den aktuellen Stand der Technik in diesem Bereich. Dann argumentieren wir als Positionspapier, warum viele dieser Herausforderungen durch eine angemessene Modellierung von Unsicherheiten in der SLAM-Darstellung bewältigt werden könnten. Dies würde insbesondere dem SLAM-Algorithmus ermöglichen, die Mehrdeutigkeit zwischen „Ich sehe das gleiche Merkmal wieder“, „Ich sehe ein anderes, aber ähnlich aussehendes Merkmal“ und „Die Umgebung hat sich verändert und das Merkmal hat sich bewegt“ gründlich zu behandeln.

Einführung

Unterwasseroperationen, die von Tauchern (in flachen Gewässern) oder ferngesteuerten Maschinen durchgeführt werden, erfordern qualifizierte Experten und blockieren in der Regel Personal oder ganze Schiffe während langer Missionen, was wiederholte Missionen zur Überwachung, Intervention oder zu weit entfernten Offshore-Standorten beeinträchtigt und eine massive parallele Erkundung oder Kartierung erschwert. Autonome Unterwasserfahrzeuge (AUVs) könnten

K. Köser (✉)

Christian-Albrechts-Universität zu Kiel und GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel, Kiel, Deutschland
E-Mail: kk@informatik.uni-kiel.de; kkoeser@geomar.de

U. Frese (✉)

Universität Bremen, Bremen, Deutschland
E-Mail: ufrese@informatik.uni-bremen.de

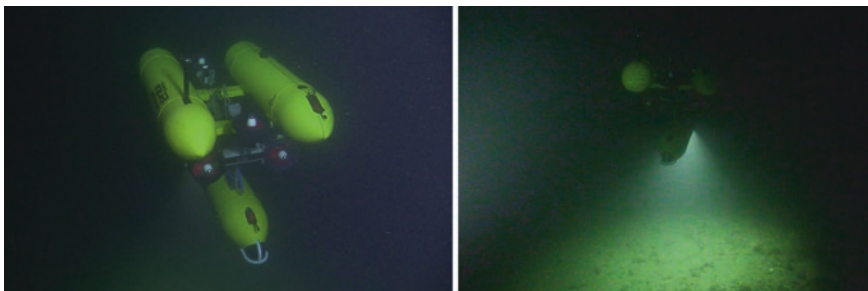


Abb. 1 GEOMARs AUV Anton in Betrieb in 100 m Wassertiefe am Tisler Riff, Norwegen. Um den Meeresboden visuell zu kartieren (rechtes Bild), muss das AUV wegen schlechter Sicht und der begrenzten Energie für die Beleuchtung nahe am Boden bleiben. (Fotos: JAGO-Team GEOMAR)

eine Lösung für diese Probleme sein, da sie ohne menschliches Eingreifen arbeiten. Sie erfordern jedoch eine zuverlässige automatische Lokalisierung und Navigation, was unter Wasser eine Herausforderung darstellt. Während auf dem Land maschinenvisuell gesteuerte autonome Autos immer ausgereifter werden, wurde dieses Wissen noch nicht auf Roboter in den Ozeanen übertragen und bisher nutzen AUVs (siehe z. B. Abb. 1) visuelle Informationen zur Lokalisierung nicht auf die gleiche Weise wie ihre Gegenstücke an Land. In diesem Beitrag diskutieren wir die wichtigsten Herausforderungen und Besonderheiten für die Unterwassersicht, Lokalisierung und SLAM und formulieren, was unserer Meinung nach ein Schritt in Richtung besserer Unterwassernavigation sein könnte.

Überblick über die Unterwasserlokalisierung

Aufgrund des Fehlens von Unterwasser-GPS ist die Lokalisierung im Ozean viel herausfordernder als an Land. Gängige Ansätze zur Bestimmung der Position eines untergetauchten Geräts basieren auf akustischen Signalen, wie der Ultra-Short-Baseline-Lokalisierung (USBL) oder der Long-Baseline-Lokalisierung (LBL) [27]. Ein USBL-Gerät, z. B. auf einem Oberflächenschiff montiert, verwendet vier Hydrophone, die in sehr kurzen Abständen zueinander platziert sind und misst die Laufzeitdifferenz eines vom untergetauchten Roboter ausgesendeten akustischen Signals. Unter Berücksichtigung der Schallgeschwindigkeit im Wasser kann dann die relative Position des Roboters trianguliert und durch Ausnutzung der GPS-Position und Orientierung des Schiffes in absolute Koordinaten umgewandelt werden. LBL basiert auf dem gleichen Prinzip, verwendet jedoch mehrere Transponder, die an deutlich unterschiedlichen Standorten installiert sind, um den Roboter zu triangulieren. Sowohl USBL als auch LBL leiden unter Mehrwegausbreitung, Echos, Brechung an Wasserschichten, Sichtverstopfung in

komplexem Gelände sowie Rauschen und Nachhall. Je nach Szenario führt dies zu hohen Varianzen der Positionsschätzungen und mehr oder weniger häufigen Ausreißern, wobei USBL jedoch stärker betroffen ist als LBL.

Unterwasserroboter in Bodennähe verwenden in der Regel auch ein Dopplergeschwindigkeitsprotokoll (DVL), das die Dopplerverschiebung eines am Boden reflektierten ausgesendeten Signals erfasst, um eine Geschwindigkeitsschätzung zu erhalten. Diese Information kann mit den zuvor genannten Lokalisierungsschätzungen kombiniert oder in Dead-Reckoning-Ansätzen verwendet werden, wenn keine direkten Positionsaktualisierungen erfasst werden. Da die Anforderungen und Kosten für AUV-Druckgehäuse, Propeller und Energie mit der Tauchtiefe schnell steigen, sind industrielle und wissenschaftliche AUVs in der Regel auch mit Hochleistungsbeschleunigungsmessern, Inertialsensoren oder Gyros ausgestattet, entsprechend dem Preis des Gesamtsystems, die (indirekt) hochwertige Orientierungsinformationen liefern. Weitere Details zu verfügbaren Sensoren für die Lokalisierung werden in [13] diskutiert, während [16] einen aktuellen Überblick über die Unterwassernavigation im Allgemeinen gibt. Insgesamt kann die relative Position und Orientierung unter Wasser recht zuverlässig ermittelt werden, aber die absolute Position ist nach wie vor ein herausforderndes Thema, insbesondere in tieferen Gewässern. Dies erschwert Überwachungskampagnen, die an einen zuvor besuchten Ort zurückkehren müssen, oder auch Serviceeinsätze an Standorten, die nicht speziell mit Transpondern ausgestattet und präzise für den LBL-Einsatz kalibriert wurden.

Visuelle Lokalisierung könnte potenziell helfen, aber die Unterwasser-Computer-Vision leidet unter mehreren Einschränkungen, die im nächsten Abschnitt zusammengefasst werden.

Herausforderungen und Stand der Technik in der Unterwassersicht

Bei der Aufnahme von Fotos unter Wasser beeinflussen verschiedene Phänomene das Bild: Licht wird absorbiert und gestreut, wenn es sich im Wasser ausbreitet. Diese wellenlängenabhängige Dämpfung sowie Streulicht oder schwebende Partikel beeinträchtigen die Standard-Visionstechnologie und begrenzen die effektive Sicht auf wenige Meter. Wenn eine bestimmte Szene aus verschiedenen Perspektiven fotografiert wird, zeigen die Fotos unterschiedliche Farben und Helligkeiten, abhängig von der Entfernung. Beispiele für diese Effekte sind in Abb. 2 zu sehen. Diese Probleme werden noch gravierender, wenn die Lichtquelle am Roboter montiert ist, d. h., wenn sie sich bewegt und die Beleuchtung sich ständig ändert.

Mobley [20] bietet einen hervorragenden Überblick über die physikalische Unterwasserlichtausbreitung auf Partikelebene, auch in Bezug auf die Abhängigkeit der Parameter von der Zusammensetzung des Wassers (Salzgehalt, Druck, Partikel, ...). McGlamery [18] und Jaffe [10] schlugen handhabbare Bildmodelle der Unterwasserlichtausbreitung in Bezug auf Dämpfung und Streuung vor.

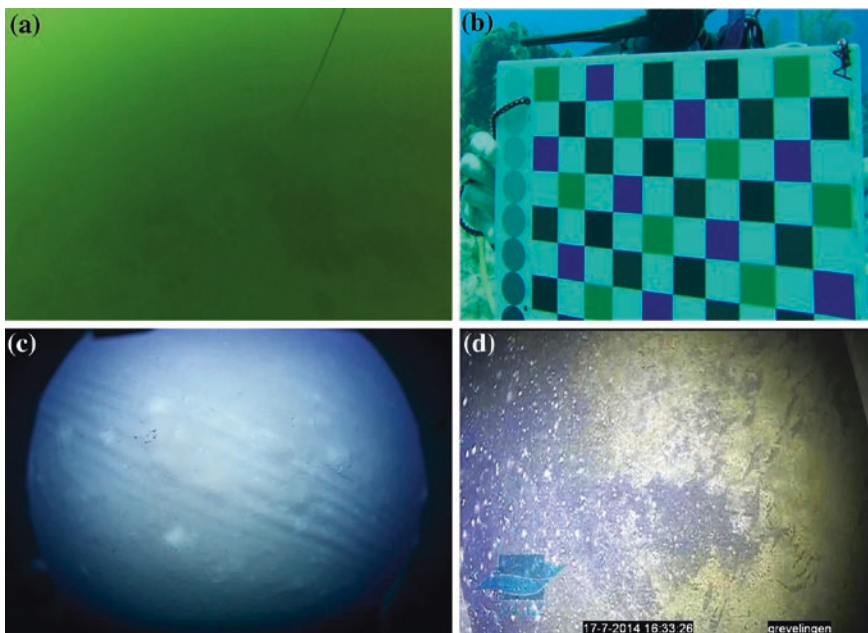


Abb. 2 Beispielbilder, die die Herausforderungen der Computer Vision veranschaulichen: **a** Ein fast vollständig grünes Bild der Ostsee zeigt starke Streuung und begrenzte Sicht, **b** ein RGB-Schachbrett in 10 m Wassertiefe, bei dem rote Quadrate fast schwarz erscheinen, da der rote Teil des Sonnenlichts auf seinem Weg durch das Wasser weitgehend absorbiert wurde, **c** ein Bild zeigt eine ungleichmäßige Beleuchtung des Meeresbodens mit Blitz fotografiert und **d** schwebende Partikel im Vordergrund, die den Meeresboden verdecken

Neben diesen photometrischen Effekten, die die Pixel-Farbe beeinflussen, erzeugen die Notwendigkeit von wasserdichten und druckbeständigen Gehäusen um Kameras auch geometrische Effekte auf den Bildaufnahmeprozess. Wenn eine Kamera hinter einem dicken Glasfenster eines Druckgehäuses trocken gehalten wird, durchlaufen Lichtstrahlen von einem Objekt durch das Wasser und werden an der Wasser-Glas-Grenzfläche gebrochen und erneut an der Glas-Luft-Grenzfläche, wenn sie in das Innere des Gehäuses eintreten. Besonders bei Tiefseegehäusen kann das Glas mehrere Zentimeter dick sein und eine deutlich größere optische Dichte (z. B. Saphir) aufweisen als Luft oder Wasser. Brechungen folgen dem Snell'schen Gesetz und hängen vom Einfallswinkel und den Brechungsindizes der Materialien ab und verkomplizieren die Bildmodelle erheblich. Frühe Ansätze für 3D-optische Unterwassermessungen schlugen vor, dass ein großer Teil der Brechung durch 2D-radiale Verzerrung ausgeglichen werden könnte [9], was eine praktische Annäherung an bestimmte Szenarien ist [29], aber im Allgemeinen sind Brechungseffekte abstandsabhängig [14]. Auch Treibitz et al. [28] demonstrierten die Ungültigkeit des Lochkameramodells für flache Ports und Agrawal et al. [1] zeigten, dass solche Systeme tatsächlich axiale Kameras sind,

also welche, die nicht nur einen einzelnen Sichtpunkt haben. Später haben Jordt et al. [12] physikalisch inspirierte Unterwasser-Modelle der Brechung mittels Structure from Motion verwendet.

Frühe Arbeiten zur Verwendung von Bildern für visuelle Unterwasser-(Re-)Navigation beinhalten die Arbeit von Aguirre et al. [2]. Frühe visuelle Kartierungsansätze wurden von Vincent et al. [30] und Pizarro et al. [24] vorgeschlagen. Singh et al. [26] haben vorgeschlagen, wie man die Unterwasserbildsituation verbessern kann und in den letzten zehn Jahren haben viele Arbeiten die 3D-Rekonstruktion und Kartierung mit Hilfe von unter Wasser aufgenommenen Bilddatensätzen verbessert [5, 6, 11, 21, 25, 31]. Aktuelle Systeme berücksichtigen auch physikalisch motivierte Nachbearbeitung von Unterwasserlichtausbreitungsproblemen [4] und demonstrieren die Standorterkennung auf rein visuellen Datensätzen, die unter Wasser aufgenommen wurden [17] oder für die 3D-Unterwasser-Punktwolkenregistrierung [23].

Nach dem Kenntnisstand der Autoren wurde – im Gegensatz zu roboter-gesteuerten Missionen an Land – bislang kein Live-Visual-SLAM durchgeführt, um einen Roboter im Ozean zu steuern. Es gibt eine bemerkenswerte Arbeit im DEPTHX-Projekt [7], das das Zacatón-Cenote-System autonom mit Hilfe von sonarbasierendem SLAM erkundet hat, aber dies beinhaltet keine Computer Vision und ist insgesamt eine Ausnahme. Eine mögliche Erklärung dafür könnte sein, dass das Risiko, einen Roboter im Ozean aufgrund einer falschen Lokalisierung oder einer falschen Selbsteinschätzung in Bezug auf die Positionsunsicherheit zu verlieren, einfach zu hoch ist.

Diese kritische Selbsteinschätzung und tatsächliche Fehlererkennung (siehe z. B. [3]) ist ein herausforderndes Thema, das viel weniger Aufmerksamkeit erhalten hat als das (manchmal übermäßig selbstsichere) Optimieren der tatsächlichen Schätzung. Wie wichtig dies für eine tatsächliche Mission ist, kann man z. B. an dem komplexen System von Backup-Strategien sehen, das im DEPTHX-Projekt eingesetzt wurde [7, Abschn. 4.1]. Andere interessante Ideen im Umgang mit Unsicherheit wurden von Milford und Wyeth [19] und kürzlich auch von Pfingsthorn et al. [22] vorgeschlagen, wie in den nächsten Abschnitten über SLAM-Konzepte diskutiert wird.

Allgemeine SLAM-Phänomene und ihre Beziehung zum Unterwasserbereich

Hier überprüfen wir die wichtigsten SLAM-Phänomene, die aus der relativen Natur der Beobachtungen resultieren, insbesondere Fehlerakkumulation, die sogenannte „Gewissheit der Beziehungen trotz Unsicherheit der Positionen“ und Schleifenschließung [8] mit ihren speziellen Auswirkungen auf den Unterwasser-SLAM.

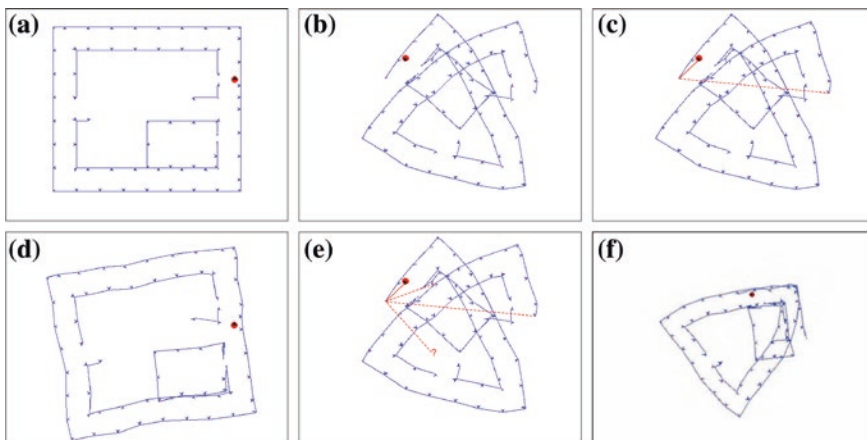


Abb. 3 Die allgemeinen SLAM-Phänomene der Fehlerakkumulation, Schleifenschließung und unsicheren Datenzuordnung. Die Illustration ist angepasst von [8] und zeigt ein Indoor-Beispiel, aber die Phänomene sind universell und haben ihre speziellen Implikationen im Unterwasser-SLAM. Eine Animation, die die Unsicherheitsstruktur vor und nach der Schleifenschließung zeigt, kann unter <http://www.informatik.uni-bremen.de/agebv/en/SlamDiscussion> gefunden werden. Siehe Text für Erklärung

Fehlerakkumulation

Im Beispiel in Abb. 3 durchläuft ein Roboter eine Schleife in einer Umgebung (Abb. 3a). Während seiner Fahrt erstellt er eine Karte, im Wesentlichen durch Verkettung räumlicher Beziehungen zwischen lokal beobachteten Merkmalen und aus der Odometrie. Dies führt zu einer Fehlerakkumulation, da jeder Link dieser Kette zum Fehler beiträgt (Abb. 3b). Während im terrestrischen Outdoor-SLAM GPS dieses Akkumulationsproblem löst, ist die Unterwasserodometrie, d. h. das Doppler-Geschwindigkeitsprotokoll (DVL) und das Gyrometer, relativ präzise, während im Vergleich zur Situation an Land absolute Informationen, meist aus akustischen Systemen, schwer zu erhalten und/oder ungenau sind. Daher ist das Phänomen der Fehlerakkumulation im Unterwasser-SLAM sehr relevant. Bemerkenswerte Ausnahmen sind die vertikale Richtung, wo durch Messung des Wasserdrucks absolute Tiefe verfügbar ist und die Ausrichtung, die absolut aus der Gravitation beobachtbar ist.

Gewissheit der Beziehungen trotz Unsicherheit der Positionen

Die Fehlerakkumulation führt zu einem weiteren Phänomen, das in der geschätzten Karte sichtbar ist (Abb. 3b). Ein lokaler Bereich wird in der Regel ziemlich präzise kartiert, weil seine Unsicherheit nur von den in diesem Bereich gemachten Beobachtungen beeinflusst wird, während seine globale Position (und Orientierung) durch den angesammelten Fehler viel unsicherer ist. Dies wurde von einem von uns als „Gewissheit der Beziehungen trotz Unsicherheit der Positionen“ bezeichnet [8]. Es erfordert, dass der SLAM-Algorithmus die Unsicherheit durch mehr als nur eine absolute Zahl darstellt, sondern durch etwas, das die Korrelation zwischen Merkmalen darstellen kann, z. B. eine Kovarianzmatrix, ein Graph von Beziehungen oder lokale Teil-Karten.

Kümmerle et al. [15] greifen diese Beobachtung in ihrem Artikel „On measuring the accuracy of SLAM algorithms“ auf und schlagen vor, dass die Bewertung in SLAM nicht auf absoluten Positionen oder Posen basieren sollte, sondern stattdessen auf Posen-Beziehungen, die für die Anwendung, die das Datenset motiviert, relevant sind und für die das Datenset Ground-Truth liefern sollte. Wir möchten betonen, dass durch die Angabe von Ground-Truth für einige Beziehungen und für andere nicht, das Datenset eine Priorität definiert. z. B. ein Datenset mit Ground-Truth-Beziehungen zur Startpose bevorzugt die Reduzierung der Fehlerakkumulation, ein Datenset mit Beziehungen bei Schleifenschließungen bevorzugt die Erkennung und Handhabung von Schleifenschließungen, während ein Datenset mit Beziehungen zwischen mittleren entfernten Posen die Genauigkeit von lokalen Karten bevorzugt.

Als konkretes Beispiel stellen Sie sich ein AUV vor, das eine Unterwasseranlage wartet. Am Ende muss es sich mit cm-Genauigkeit relativ zur Anlage lokalisieren. Es wird seine Position auf der Erde nicht mit der gleichen Genauigkeit kennen, aber das ist auch nicht nötig. Allerdings wird es auf dem Weg dorthin von einer genau bekannten GPS-Position an der Oberfläche starten, die nur grob bekannt ist relativ zur Anlage. Es wird dann relativ zu verschiedenen Merkmalen entlang seiner Reise lokalisieren, so dass die absolute Position schlechter wird, aber die Position relativ zur Anlage besser. Dieses Beispiel zeigt, dass es in SLAM wichtig ist, „Gewissheit der Beziehungen“ darzustellen.

Schleifenschließung

Betrachtet man wieder Abb. 3, kehrt der Roboter zu seiner Anfangsposition zurück, beobachtet ein Merkmal und *identifiziert es erneut* als dasselbe zuvor beobachtete Merkmal (Abb. 3c). Aufgrund des angesammelten Fehlers ist dies nicht mit der aktuellen Kartenschätzung kompatibel, die korrigiert werden muss (Abb. 3d). Diese Korrektur ist nicht etwas, das explizit programmiert

werden muss, sondern kommt automatisch aus der korrekten Behandlung von Beobachtungen und ihrer Unsicherheit, z. B. durch Schätzung der kleinsten Quadrate unter Verwendung der Information, dass ein Merkmal erneut beobachtet wird.

Die Schleifenschließung führt zu einer großen Verbesserung in der Karte (Abb. 3d). Diese Verbesserung tendiert dazu, größer zu sein, wenn das Merkmal für eine längere Zeit nicht gesehen wurde. Deshalb haben z. B. die häufig verwendeten Rasenmähermuster überlappende Streifen, so dass Schleifen zwischen benachbarten Streifen geschlossen werden.

Position: Modellierung der Unsicherheit in ihren vielfältigen Formen

Die Schleifenschließung hängt von der korrekten Wiedererkennung ab. Im Unterwasser-SLAM ist dies besonders schwierig, weil die Umgebung oft repetitiv ist, es unzuverlässige Merkmale wie bewegende Pflanzen oder Fische gibt, Lichtverhältnisse die Merkmalsübereinstimmung behindern und für ältere Karten kann sich die Umgebung verändert haben.

In vielen SLAM-Algorithmen ruiniert eine falsche Datenzuordnungsentscheidung die Karte vollständig, weil sie zwei verschiedene Punkte auf der Karte dazu zwingt, dasselbe zu sein. Dies kann man sich vorstellen wie eine Papierkarte, bei der diese beiden Punkte zusammengeklebt werden.

Abbildung 3e zeigt diese Situation: Ein beobachtetes Merkmal könnte entweder das Merkmal vom Anfang sein, was zur Abb. 3d Karte führt, oder ein anderes bekanntes Merkmal, was zur Karte in Abb. 3f führt, oder ein völlig neues Merkmal ohne Schleifenschließung (Abb. 3e).

Angesichts dieser Herausforderung möchten wir vorschlagen, die Unsicherheit in der Datenzuordnung auch probabilistisch zu modellieren, so dass sie nie endgültig entschieden wird, sondern revidiert werden kann, wenn gegenteilige Beweise auftauchen.

Wenn man annimmt, dass die Datenzuordnung zufällig ist und jede der drei genannten Optionen eine bestimmte Wahrscheinlichkeit hat, ist das Ergebnis eine Mischverteilung, wobei jede Datenzuordnungsoption zu einer Mischkomponente führt [22]. Diese Verteilung ist eine interessante und schwierig zu handhabende Kombination aus diskreter (Datenzuordnung) und kontinuierlicher (Rauschen) Unsicherheit.

In der Praxis kommt sogar eine weitere Interpretation auf. Die Umgebung könnte sich verändert haben und das Merkmal bewegt haben. Während diese Möglichkeit universell ist, ist die konkrete Form der (un-)möglichen Umweltveränderungen sehr umweltabhängig. In Innenräumen [19] sind die meisten Veränderungen auf bewegliche Objekte zurückzuführen, d. h. Möbel oder

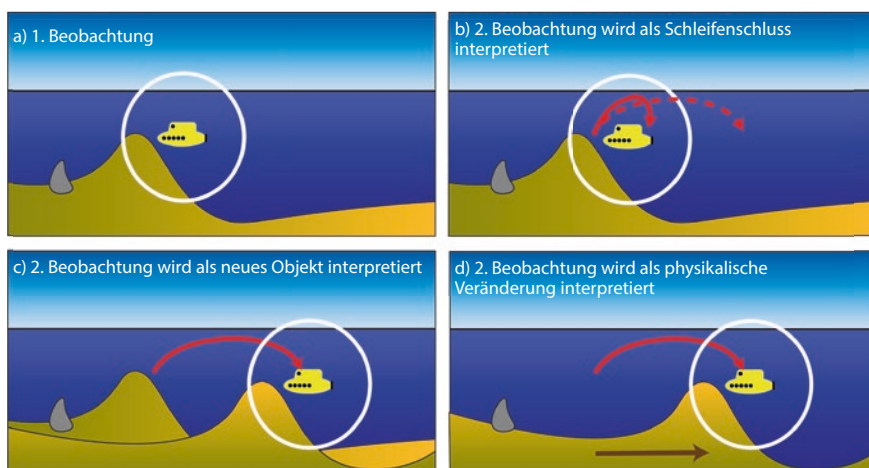


Abb. 4 Illustrationen der verschiedenen Interpretationen einer Beobachtung. **a** Das AUV beobachtet zunächst ein lokales Merkmal (weißer Kreis). **b–d** Dann macht es eine längere Reise, bei der Fehler auftreten und beobachtet ein ähnliches Merkmal. Es gibt drei verschiedene Interpretationen: **b** Dies ist das gleiche Merkmal wie zuvor gesehen, **c** dies ist ein neues ähnlich aussehendes Merkmal oder **d** das Merkmal hat sich aufgrund von Umweltveränderungen bewegt. Diese diskrete Unsicherheit führt zu einer multimodalen Verteilung von nachträglichen Karten

Menschen. Umweltveränderungen unter Wasser können subtiler und kontinuierlicher sein, z. B. treibender Sand. Solche Umweltveränderungen können auch von besonderem wissenschaftlichem Interesse für eine Ozeanwissenschaftsmission sein, so dass sie wichtig sind zu modellieren und von reiner Fehlerakkumulation zu unterscheiden.

Wir möchten, dass ein SLAM-Algorithmus entscheidet (aber nie endgültig), ob etwas ein bekanntes Merkmal, ein neues Merkmal oder eine Veränderung in der Umgebung ist, wie in Abb. 4 dargestellt. Dies erfordert nicht nur die Darstellung der Verteilung über verschiedene Möglichkeiten, ihre Wahrscheinlichkeiten, die resultierenden Karten und ihre Unsicherheiten, sondern auch ein treues Modell davon, welche Art von Veränderungen möglich oder wahrscheinlich sind.

Position: Ein anderes Bewertungsschema für bessere Zuverlässigkeit

Es gibt eine weitere wichtige Herausforderung, bei der die Modellierung von Unsicherheit unerlässlich wird, nämlich die Herausforderung der Zuverlässigkeit. Alle in Abschnitt „[Herausforderungen und Stand der Technik in der Unterwasser-sicht](#)“ vorgestellten SLAM-Systeme wurden auf aufgezeichneten Datensätzen

ausgeführt. Die einzigen Missionen, von denen wir wissen, bei denen visuelles SLAM tatsächlich das AUV steuerte, sind in kontrollierten Testumgebungen oder Wettbewerben wie SAUC-E.¹

Visuelles SLAM ist eine brüchige Technologie, die aus vielen der oben genannten Gründe versagen kann. Die Verwendung dieser Technologie zur Steuerung birgt ein großes Risiko für das Scheitern der Mission oder sogar den Verlust des AUV. Andererseits ermöglicht die visuelle Navigation Szenarien, in denen akustische Sensoren nicht ausreichen, wie zum Beispiel in komplexem Gelände.

Daher ist es unerlässlich, dass das SLAM-System über seinen eigenen Status berichtet. Während viele SLAM-Backends tatsächlich Unsicherheitsinformationen liefern, z. B. eine Kovarianzmatrix für das EKF, basieren diese auf vielen Annahmen, unter anderem korrekter Datenzuordnung, konservativen Messrauschparametern, Unabhängigkeit zwischen Messungen und angemessener Linearisierung. Sie sind also nur korrekt, wenn „alles gut läuft“ und nicht zuverlässig in problematischen Fällen. Sehr wenige, z. B. [3], erkennen Fehler. Im Gegenteil, übermäßig selbstsichere Kovarianzgrenzen sind eine Hauptquelle für SLAM-Ausfälle, weil in einem solchen Fall korrekte Messungen vom SLAM-Algorithmus nicht mehr akzeptiert werden, weil sie unplausibel erscheinen.

Darüber hinaus geht die aktuelle Evaluierungsmethodik dieses Problem nicht an. In der Regel misst die Evaluierung den mittleren oder endgültigen absoluten Positionsfehler und zählt, welche Datensätze divergieren. Sie berücksichtigt nicht die Unsicherheitsausgabe des SLAM-Systems.

Stattdessen schlagen wir vor, dass ein SLAM-System immer wissen sollte, wie sicher es eine räumliche Beziehung zwischen zwei Umgebungsmerkmalen oder Roboterpositionen kennt und diese Information dem übergeordneten Missionsplanungs- und Steuerungsmodul zur Verfügung stellen sollte.

Für die Bewertung sollte der „Leistungswert“ nicht der tatsächliche Fehler in einer Beziehung [15] sein, sondern die vom System geschätzte Fehlergrenze muss berücksichtigt werden. Der Grund dafür ist, dass die Missionskontrolle nur auf die Grenze und nicht auf den tatsächlichen Fehler vertrauen kann, weil dieser unbekannt ist. Wenn der tatsächliche Fehler die angegebene Grenze überschreitet (im Falle von Kovarianzinformationen in einem statistischen Sinne), sollte dies als ein viel schwerwiegenderer Fehler des SLAM-Systems angesehen werden, als die Divergenz in einem Datensatz, die heutzutage als Maß genommen wird.

Wir glauben, dass ein solches Bewertungsschema zu Algorithmen führen würde, die Grenzen liefern und ihre Grenzen einhalten und insbesondere versuchen, konservative Grenzen zu liefern, auch wenn sie nicht vollständig wie erwartet funktionieren.

¹ <http://sauc-europe.org/>.

Schlussfolgerung

In diesem Beitrag haben wir allgemeine Probleme der Unterwassernavigation diskutiert und wie visuelle Informationen dabei helfen könnten. Da selbst heutzutage Unterwasser-SLAM im Ozean typischerweise nur offline Daten zu bedienen wagt, haben wir die Hauptprobleme diskutiert, die die Computer Vision in den Ozeanen viel herausfordernder machen als an Land. Unserer Meinung nach ist insbesondere der Umgang mit Unsicherheit ein kritisches Problem, und nachdem wir die Grundprinzipien von SLAM in Bezug auf Unsicherheit beschrieben haben, haben wir Vorschläge formuliert, wie eine andere Behandlung von Unsicherheit dazu beitragen könnte, die visuelle Unterwasser-SLAM zu verbessern. Die Ideen müssen als frühe Konzepte gesehen werden, die noch bewiesen werden müssen.

Literatur

1. Agrawal A, Ramalingam S, Taguchi Y, Chari V (2012) A theory of multi-layer flat refractive geometry. In: CVPR
2. Aguirre F, Boucher JM, Jacq JJ (1990) Underwater navigation by video sequence analysis. In: Proceedings of 10th international conference on pattern recognition, Bd. 2, S 537–539. <https://doi.org/10.1109/ICPR.1990.119424>
3. Alsayed Z, Bresson G, Verroust-Blondet A, Nashashibi F (2017) Failure detection for laser-based SLAM in urban and peri-urban environments. In: 20th international conference on intelligent transportation systems (ITSC), S 1–7
4. Bryson M, Johnson-Roberson M, Pizarro O, Williams SB (2016) True color correction of autonomous underwater vehicle imagery. *J Field Robot* 33(6):853–874
5. Campos R, Garcia R, Alliez P, Yvinec M (2015) A surface reconstruction method for in-detail underwater 3d optical mapping. *Int J Robot Res* 34(1):64–89
6. Drap P (2012) Underwater photogrammetry for archaeology. In: Da Silva DC (ed) Special applications of photogrammetry, chap 6, IntechOpen, Rijeka. <https://doi.org/10.5772/33999>
7. Fairfield N, Kantor G, Jonak D, Wettergreen D (2008) DEPTHX autonomy software: design and field results. Tech Rep CMU-RI-TR-08-09, Carnegie Mellon University
8. Frese U (2006) A discussion of simultaneous localization and mapping. *Autonom Robots* 20(1):25–42. (22 citations)
9. Harvey ES, Shortis MR (1998) Calibration stability of an underwater stereo-video system: implications for measurement accuracy and precision. *Mar Technol Soc J* 32:3–17
10. Jaffe JS (1990) Computer modeling and the design of optimal underwater imaging systems. *IEEE J Ocean Eng* 15(2):101–111. <https://doi.org/10.1109/48.50695>
11. Johnson-Roberson M, Pizarro O, Williams SB, Mahon I (2010) Generation and visualization of large-scale three-dimensional reconstructions from underwater robotic surveys. *J Field Robot* 27(1):21–51
12. Jordt A, Köser K, Koch R (2016) Refractive 3d reconstruction on underwater images. *Methods Oceanogr* 15:90–113. <https://doi.org/10.1016/j.mio.2016.03.001>. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211122015300086>. Computer Vision in Oceanography
13. Kinsey JC, Eustice RM (2006) A survey of underwater vehicle navigation: recent advances and new challenges. In: IFAC conference of Manoeuvring and control of marine craft
14. Kotowski, R (1988) Phototriangulation in multi-media photogrammetry. In: Int'l archives of Photogrammetry and remote sensing, XXVII

15. Kümmerle R, Steder B, Dornhege C, Ruhnke M, Grisetti G, Stachniss C, Kleiner A (2009) On measuring the accuracy of SLAM algorithms. *Auton Robot* 27(4):387
16. Leonard JJ, Bahr A (2016) Autonomous underwater vehicle navigation. In: Springer handbook of ocean engineering, Chap 14, Springer S 341–358
17. Li J, Eustice RM, Johnson-Roberson M (2015) Underwater robot visual place recognition in the presence of dramatic appearance change. In: OCEANS 2015—MTS/IEEE Washington, S 1–6 <https://doi.org/10.23919/OCEANS.2015.7404369>
18. McGlamery BL (1975) Computer analysis and simulation of underwater camera system performance. Tech rep, Visibility Laboratory, Scripps Institution of Oceanography, University of California in San Diego
19. Milford M, Wyeth G (2010) Persistent navigation and mapping using a biologically inspired SLAM system. *Int J Robot Res* 29(9):1131–1153. <https://doi.org/10.1177/0278364909340592>
20. Mobley CD (1994) Light and water: radiative transfer in natural waters. Academic Press
21. Nicosevici T, Gracias N, Negahdaripour S, Garcia R (2009) Efficient three-dimensional scene modeling and mosaicing. *J Field Robot* 26(10):759–788. <https://doi.org/10.1002/rob.20305>. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/rob.20305>
22. Pfingsthorn M, Birk A (2016) Generalized graph SLAM: solving local and global ambiguities through multimodal and hyperedge constraints. *Int J Robot Res* 35(6):601–630
23. Pfingsthorn M, Birk A, Buelow H (2012) Uncertainty estimation for a 6-DoF spectral registration method as basis for sonar-based underwater 3D SLAM. In: IEEE international conference on robotics and automation (ICRA) S 3049–3054
24. Pizarro O, Eustice R, Singh H (2004) Large area 3d reconstructions from underwater surveys. In: MTS/IEEE OCEANS conference and exhibition, S 678–687, Citeseer
25. Sedlazeck A, Köser K, Koch R (2009) 3D reconstruction based on underwater video from ROV kiel 6000 considering underwater imaging conditions. In: proceedings of OCEANS 2009-EUROPE, S 1–10 <https://doi.org/10.1109/OCEANSE.2009.5278305>
26. Singh H, Roman C, Pizarro O, Eustice R, Can A (2007) Towards high-resolution imaging from underwater vehicles. *Int J Robot Res* 26(1):55–74. <https://doi.org/10.1177/0278364907074473>
27. Steinke DM, Buckham BJ (2005) A Kalman filter for the navigation of remotely operated vehicles. In: Proceedings of OCEANS 2005 MTS/IEEE, Bd 1, S 581–588 <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2005.1639817>
28. Treibitz T, Schechner Y, Kunz C, Singh H (2012) Flat refractive geometry. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell* 34(1):51–65. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2011.105>
29. Łuczyński T, Pfingsthorn M, Birk A (2017) The pinax-model for accurate and efficient refraction correction of underwater cameras in flat-pane housings. *Ocean Eng* 133:9–22. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.01.029>. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801817300434>
30. Vincent AG, Pessel N, Borgetto M, Jouffroy J, Opderbecke J, Rigaud V (2003) Real-time geo-referenced video mosaicking with the matisse system. In: Oceans 2003, Celebrating the Past...Teaming Toward the Future (IEEE Cat No.03CH37492), Bd 4, S 2319–2324 <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2003.178271>
31. Williams SB, Pizarro OR, Jakuba MV, Johnson CR, Barrett NS, Babcock RC, Kendrick GA, Steinberg PD, Heyward AJ, Doherty PJ et al (2012) Monitoring of benthic reference sites: using an autonomous underwater vehicle. *IEEE Robot Autom Mag* 19(1):73–84

Multimodale Unterwasser-Sensorik für Umweltkartierung und Fahrzeugnavigation



Peter Kampmann, Ralf Bachmayer, Daniel Büscher und Wolfram Burgard

Zusammenfassung Die autonome Navigation unter Wasser, bei der a priori Informationen über die Umgebung spärlich sind und sich ändernde Umgebungsbedingungen die Wahrnehmung erschweren, erfordert robuste Sensoreigenschaften sowie fortgeschrittene Signalverarbeitungsstrategien. Multimodalität in der Sensorik sowie der Datenverarbeitung wird als Ansatz zur Stärkung der Robustheit der Entscheidungsfindung für autonome Unterwasserroboter betrachtet. Dieses Kapitel fasst die aktuellen Entwicklungen in der Sensortechnologie zusammen und eröffnet neue Forschungsfragen hinsichtlich der Sensorik und Signalverarbeitung unter Verwendung von maschinellem Lernen.

Motivation

Autonome Systeme leiten viele ihrer Fähigkeiten aus sensorischen Eingaben ab, die es ihnen ermöglichen, die aktuelle Umweltsituation sowie ihren internen Zustand zu beurteilen. Ohne angemessene und zuverlässige Eingaben können

P. Kampmann (✉)
ROSEN Creation Center GmbH, Bremen, Deutschland
E-Mail: pkampmann@rosen-group.com

R. Bachmayer
MARUM – Center for Marine Environmental Sciences, Universität Bremen,
Bremen, Deutschland
E-Mail: rbachmayer@marum.de

D. Büscher
Technical Faculty, Autonomous Intelligent Systems, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg,
Freiburg, Deutschland
E-Mail: buescher@informatik.uni-freiburg.de

W. Burgard
Computer Science, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Freiburg, Deutschland
E-Mail: burgard@informatik.uni-freiburg.de

Entscheidungen, die auf Sensorinformationen basieren, zu fatalen Entscheidungen für ein autonomes System führen. Diese Beobachtung gilt für jedes robotische System; sei es ein autonomes Auto, ein humanoider Roboter oder ein Unterwasserroboter. Aufgrund der Bedeutung der Umwelteinflüsse müssen Sensoren sorgfältig in Bezug auf das erwartete Spektrum der Umgebungsbedingungen ausgewählt werden, unter denen das System zuverlässig arbeiten soll. Optische Sensoren, einschließlich Kameras und LIDAR, sind die am häufigsten verwendeten Sensoren in autonomen Systemen. Ihre relative Benutzerfreundlichkeit, geringe Kosten und ihr breites Anwendungsspektrum, einschließlich flexibler Nutzung von künstlichem und natürlichem Licht, machen sie zum Kern der meisten terrestrischen und luftgestützten Robotersysteme. Der Unterwasserbereich stellt eine besondere Herausforderung für optische Systeme dar und begrenzt ihren Einsatz aufgrund der hohen Absorptionsraten im sichtbaren Lichtbereich des elektromagnetischen Spektrums und der Anwesenheit von Trübung.

Während einige der Grenzen für optische Sensoren, wie Kameras, bewertet und berücksichtigt werden können, sind andere, wie hohe Trübungsniveaus, schwieriger und manchmal unmöglich mit optischen Systemen zu überwinden. Um die Zuverlässigkeit der Sensorik zu erhöhen, müssen weitere Modalitäten, wie Akustik, integriert und deren Ausgabe muss abgestimmt werden. Dieser Ansatz ermöglicht es, herauszufinden, ob ein Sensor derzeit aufgrund von Umweltbedingungen, die sein Messprinzip beeinflussen, nicht ordnungsgemäß funktioniert, und verbessert zudem die Messqualität.

Die Idee, verschiedene Messprinzipien zu kombinieren, um eine Eigenschaft der Umwelt oder einen internen Zustand eines autonomen Systems zu beurteilen, wird als multimodale Sensorik bezeichnet. Mit neuen Anwendungen für AUVs, die eine Navigation in beengten Umgebungen sowie Interaktionsfähigkeiten erfordern, wird die multimodale Sensorik in diesem Bereich immer wichtiger. Die folgenden Abschnitte behandeln die Anforderungen an die multimodale Sensorik in der Unterwasserumgebung für die Kartierung und sichere Navigation eines Unterwasserroboters.

Entwicklungstendenzen für autonome Unterwassersysteme

Eines der Hauptanwendungsszenarien für autonome Unterwasserroboter ist die Kartierung von Bereichen des Meeresbodens oder der Wassersäule [17]. Die Ausgabedaten werden für die Erforschung unserer Ozeane, die Installation von Unterwasserproduktionsanlagen oder bei Such- und Rettungsmissionen verwendet. Während dieser Vermessungsoperationen arbeiten die Fahrzeuge in sicherer Entfernung vom Meeresboden, um Hindernisse zu vermeiden, die eine Abweichung vom vorgegebenen Pfad erfordern würden. Die für die Navigation verwendeten

Sensoren sind Inertialsensoren wie faseroptische Kreisel (FOG), Doppler-Geschwindigkeitslogs (DVL), die die Geschwindigkeit über dem Boden oder in der Wassersäule messen, und sonarbasierte Systeme zur Positionsbestimmung innerhalb eines Satzes von akustischen Wandlern (LBS oder USBL).

Operationen in beengten Umgebungen nahe dem Meeresboden werden immer noch hauptsächlich mit ferngesteuerten Fahrzeugen (ROVs) durchgeführt, die von einem Versorgungsschiff auf Meereshöhe von Bedienern betrieben werden, um das Fahrzeug zu steuern und Manipulationsaufgaben durchzuführen.

Kostensenkungen und technologische Fortschritte haben zur Entwicklung von Konzepten für autonome Unterwasserfahrzeuge geführt, die permanent unter Wasser bleiben. Dieses neue Konzept erfordert Unterwasser-Dockingstationen in der Nähe des Einsatzgebiets für autonome Unterwasserroboter, an denen die Systeme Daten austauschen und aufladen können. Ein Schiff, das ständig im Einsatzgebiet ist, ist somit nicht mehr erforderlich, was zu Kosteneinsparungen führt und gleichzeitig die Betriebsintensität erhöht. Aufgaben, die von solchen Unterwasser-residenten autonomen Robotern durchgeführt werden sollen, sind der Betrieb innerhalb von Unterwasserproduktionsanlagen, um beispielsweise den Zustand von Ankerleinen, kathodischen Schutzvorrichtungen zu messen oder mit Steuerpaneelen zu interagieren, die an Anlagenstrukturen montiert sind, um Ventile, Pumpen und weitere Geräte auf oder in der Nähe des Meeresbodens zu steuern.

Umweltbedingungen für unterwasserresidente Fahrzeuge

Der wesentliche Unterschied zwischen Operationen mit unterwasserresidenten Fahrzeugen und Fahrzeugen, die von einem Unterstützungsschiff aus betrieben werden, besteht in der Anforderung, in eine Dockingstation zu fahren oder sich mit ihr zu verbinden. Da das Andocken auch das Aufladen des Fahrzeugs ermöglicht, ist dieser Prozess entscheidend für den sicheren Betrieb des Fahrzeugs. Derzeit laufen mehrere Forschungsaktivitäten in Richtung unterwasserresidente AUVs [1, 11, 15]. Die meisten der entwickelten AUVs verwenden Kameras in Kombination mit visuellen Markern (siehe Abb. 1) oder mit künstlichen Lichtquellen [9] oder eine Kombination aus Kameras und USBL zum Andocken.

Je nach Standort des Einsatzgebiets müssen wechselnde Strömungen [12] oder eingeschränkte Sichtverhältnisse berücksichtigt werden, was eine hohe Manövrierfähigkeit sowie robuste Sensorik zur Erkennung der Docking-Schnittstelle erfordert. Da die Sichtverhältnisse potenziell wechseln, sind weitere Sensorik-modalitäten für diese Aufgabe unerlässlich. Die Abb. 1 und 2 zeigen das Andockverfahren für ein autonomes Unterwasserfahrzeug unter Laborbedingungen.

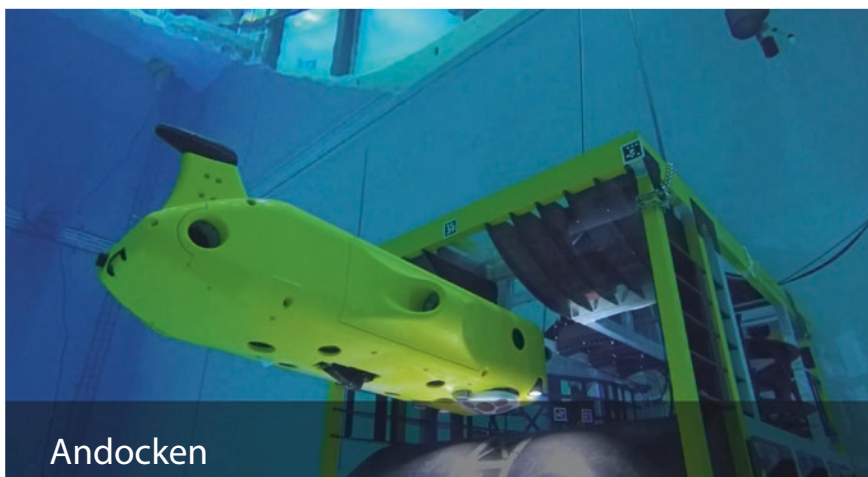


Abb. 1 Das unterwasserresidente AUV Flatfish während des Andockens in einer Laborumgebung

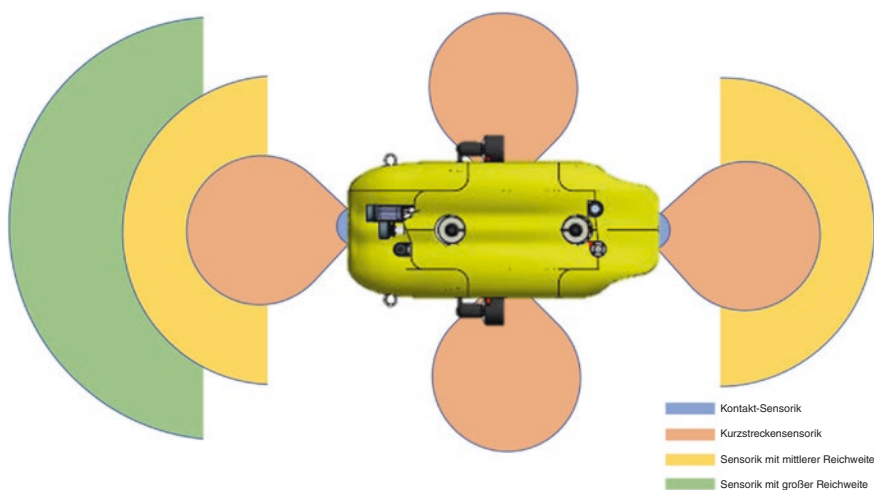


Abb. 2 Multimodale Umweltsensorik für langfristige autonome Missionen

Stand der Technik in der Sensortechnologie

Bei der Suche nach weiteren Messprinzipien abseits von optischen Sensoren wird am häufigsten auf Schall basierende Sensorik verwendet. Schallwellen breiten sich im Wasser etwa 5-mal schneller aus als in der Luft und können, abhängig von der Frequenz, für kurze Entfernungsmessungen (>1 MHz) sowie für extrem lange

Entfernungen, die die Ozeanbecken abdecken (<300 Hz), verwendet werden. Leider können, wie beim Sehsinn, Umweltbedingungen wie unübersichtliche Umgebung [6] oder sich ändernde Eigenschaften des Wassers in der Wassersäule die Sensorleistung beeinflussen.

Andere Modalitäten wie magnetische, induktive und kapazitive Sensorik haben jedoch großes Potenzial für kurze und unter idealen Bedingungen mittlere Entfernungsmessungen gezeigt.

Die Arbeiten in Boyer et al. [2] schlagen ein passives elektrisches Sensorelement auf dem AUV in Kombination mit aktiven elektrischen Markern an Strukturen für die Kurzstreckennavigation vor. Die Autoren schlagen ein Dockingstation-Konzept vor, bei dem die elektrischen Felder durch die Verwendung von isolierenden Wänden in Richtung einer einzelnen Sender-Elektrode geformt werden, die am Docking-Stecker angebracht ist. Ein AUV, das mit passiven Sensorelektroden ausgestattet ist, soll so gesteuert werden, dass es den Linien des ausgesendeten elektrischen Feldes folgt. Simulationen von inhomogenen Suspensionen zeigen, dass die angewendeten Steuergesetze für das Andocken auf der Grundlage dieser Sensorikmodalität immer noch erfolgreich funktionieren. Die vorgeschlagene Lösung wurde in Testbecken mit kleinen AUV-Systemen bewertet. Nachteile dieses Ansatzes sind die Empfindlichkeit gegenüber Strukturen, die selbst ein elektrisches Feld aussenden, das sich in der Nähe des Dockingbereichs befindet. Inhomogene Partikelkonzentrationen in der Wassersäule beeinflussen auch die Messungen. Daten über die Reichweite dieser Lösung sowie die Lokalisierungspräzision wurden nicht bereitgestellt.

Die Autoren in Xiang et al. [18] präsentieren ein Setup von Magnetfeldsensoren zur Verfolgung von Unterseekabeln mit einem AUV, das mit zwei triaxialen passiven Magnetometern ausgestattet ist. Für die Anwendung in der Kabelverfolgung erfordert dieses Setup die Erzeugung von Niederfrequenz-Stromsignalen in dem Kabel, das verfolgt werden soll.

Die Arbeiten in Zhou et al. [19] demonstrieren den Einsatz von mechanischen Scanning-Sonaren zur Kartierung der Unterseite eines Eisbergs im Atlantik. Die Autoren verwenden einen Slocum-Gleiter [14], der mit einem geeigneten Sonar ausgestattet ist, ihr Kartierungsansatz wird in Simulationen und in realen Experimenten in der Nähe von Neufundland einer Leistungsanalyse unterzogen. Die Unterseite des Eisbergs wurde aus einer Entfernung von 40 m untersucht. Die erhaltenen Daten wurden als Eingabe für einen Profilverfolgungs-Controller verwendet, der es dem Fahrzeug ermöglichte, den untersuchten Eisberg sicher zu umfahren, ohne zu kollidieren.

Ein interessanter Ansatz zur Verbesserung der Wahrnehmungsqualität der Umwelt durch Sensor-Datenfusion wird in Kragh und Underwood [8] vorgestellt. Die Autoren wenden semantische Segmentierung auf Sensorikmodalitäten wie Kamera und Lidar an, um Hindernisse in einem landwirtschaftlichen Anwendungsszenario zu erkennen. Durch die Verwendung ihres Ansatzes, der räumliche, multimodale sowie zeitliche Verbindungen beinhaltet, konnten sie die Klassifizierungsfähigkeiten sowie die Durchfahrbarkeitsinformationen für ein autonomes Bodenfahrzeug verbessern.

Abgesehen von der Sensortechnologie selbst und den Online-Sensor-Fusion-Fähigkeiten ist die spärliche Information, die von Unterwasserrobotern im Ozean verfügbar ist, eine entscheidende Bedingung für die Anwendung von Machine-Learning-Algorithmen. Es ist daher logisch, die algorithmischen Optionen zu erforschen, die die spärlichen Informationen aus Sensordaten nutzen, um Erwartungen für bestimmte Situationen zu erzeugen oder mit Transfer- sowie Generalisierungsansätzen zu arbeiten.

Die Autoren in Rao et al. [13] stellen eine Architektur von Machine-Learning-Algorithmen vor, um eine Beziehung zwischen Kameradaten von einem autonomen Unterwasserfahrzeug und aus der Ferne erfassten Bathymetrieinformationen auf der Grundlage von akustischen Daten zu erzeugen. Ein anfänglicher Algorithmus wird verwendet, um Merkmale unabhängig für jede Modalität zu lernen, ein nachfolgendes Gated-Modell erhöht die Klassifikationsgenauigkeit weiter und kann verwendet werden, um die visuellen Merkmale vorherzusagen, die rein auf der Grundlage der akustischen Informationen erwartet werden können.

Ein weiterer Ansatz konzentriert sich auf das Problem, dass einige Sensoren unter bestimmten Bedingungen (z. B. Beleuchtung, schwebende Partikel) fehleranfälliger sind oder stärker von Sensorrauschen aufgrund sich ändernder Bedingungen betroffen sind als andere, was in unserer vorherigen Arbeit [10] behandelt wird. Im Kontext der Objekterkennung haben wir einen neuen Ansatz vorgeschlagen, der in der Lage ist, die Vorhersagen verschiedener Sensormodalitäten auf eine Online-Weise zu gewichten. Eine spezifische Architektur eines tiefen CNN (engl.: Convolutional Neural Networks) wurde entwickelt, die ein Late-Fusion-Schema verwendet. Drei verschiedene CNNs wurden für die Aufgabe der Objekterkennung unter Verwendung von RGB-, Tiefen- und optischen Flussdaten trainiert. Die extrahierten Merkmale dieser drei Experten wurden dann verwendet, um eine Mischung aus tiefen Experten (MoDE) zu trainieren. Die MoDE wird durch ein Gating-Netzwerk repräsentiert, das lernt, wie die Ausgabe der Experten angesichts der extrahierten hochrangigen Merkmale gewichtet werden soll. Es wurde gezeigt, dass das Netzwerk sich an spontane Änderungen der Lichtverhältnisse anpassen kann, d. h. in dunklen Umgebungen gewichtet das Gating-Netzwerk die Vorhersage, die aus den Tiefendaten erhalten wurde, stärker als die Vorhersage aus den RGB-Daten.

Angestrebte Entwicklungsansätze

Geeignete Sensoren sowie Modelle für Online-Entscheidungsfindung auf einer deliberativen kognitiven Ebene für einen autonomen Roboter sind Schlüsselemente für zukünftige Robotersysteme. Um dieses Ziel zu erreichen, werden wir an verschiedenen Ansätzen arbeiten, um die erforderlichen Sensorikmodalitäten für die erfolgreiche Durchführung einer Aufgabe zu identifizieren, sowie verschiedene Ansätze zur Bewältigung von Unsicherheiten bei der Entscheidungsfindung auf der Grundlage fehlerhafter Sensordaten und spärlicher A-priori-Informationen.

Eine Schwierigkeit, die sich aus der weit verbreiteten Verwendung von tiefen neuronalen Netzwerken ergibt, ist, dass sie bekanntermaßen unvorhersehbare und unsichere Vorhersagen liefern, wenn sie mit neuen Eingaben konfrontiert werden (Richter und Roy 2017). Da wir bestrebt sind, sichere und zuverlässige autonome Agenten zu schaffen, ist man an der Sicherheit der Entscheidung des Netzwerks interessiert. Daher wäre es vorteilhaft, die Ergebnisse aus einem Deep-Learning-Framework auf probabilistische Weise zu interpretieren. In unserer vorherigen Arbeit zur Sensorfusion [10] haben wir gezeigt, dass ein neuronales Netzwerk trainiert werden kann, um mehrere Modalitäten entsprechend ihrer Zuverlässigkeit zu gewichten. Dieser Ansatz liefert jedoch nur die wahrscheinlichste Kombination von Sensoren und gibt keine Angaben über die Wahrscheinlichkeitsverteilung und insbesondere über die Unsicherheit des Ergebnisses.

In weiteren Entwicklungen planen wir, eine Methodik einzusetzen, die in (Gal und Ghahramani 2015) eingeführt wurde und eine probabilistische Interpretation der Sicherheit des Netzwerks über die einzelnen Informationskanäle liefert. Solche neuronalen Netzwerke, die Unsicherheit berücksichtigen, sind als Bayes'sche neuronale Netzwerke bekannt. Gal und Ghahramani zeigen eine theoretische Beziehung zwischen Dropout und approximativer Inferenz in Gauß'schen Prozessen. In (Kendall und Cipolla 2016) wird jedoch gezeigt, dass die Verwendung einer Dropout-Schicht nach jeder faltenden Schicht die Leistung des CNN zu stark beeinträchtigt, da die Regularisierung der Ergebnisse zu stark ist. Laut ihnen reicht es aus, die Dropout-Schichten nach jeder Schicht hinzuzufügen, die zufällig initialisiert wird. Bei der Testzeit wird die Inferenz durchschnittlich aus stochastischen Proben aus dem Dropout-Netzwerk durchgeführt. Dies stellt eine rechnerische Herausforderung dar, die wir in diesem Projekt z. B. durch Sampling nur der späten Schichten des Netzwerks planen anzugehen. Daher haben wir vor, das in [10] vorgestellte Sensor-Fusion-Framework zu erweitern, um nicht nur die endgültige Klassifikation der CNNs zu erhalten, sondern auch die Sicherheit über die Entscheidung des Netzwerks.

Eine weitere Forschungsrichtung, die für die Sensor-Datenfusion im Unterwasser-Anwendungsszenario einen genaueren Blick wert ist, ist die Verwendung von Domänenwissen wie bekannten physikalischen Gesetzen, um den Bedarf an gelabeltem Training in Machine-Learning-Algorithmen zu reduzieren [16]. Dieser Ansatz reduziert den Suchraum für Machine-Learning-Algorithmen und hat das Potenzial, robustes Feedback zu erzeugen.

Sensor-Datenmanagement [3] ist eine Disziplin, bei der Sensorikmodalitäten auf der Grundlage ihrer Kosten für ihre Verwendung sowie ihrer Anwendbarkeit auf die aktuelle Situation als Eingaben für die Sensor-Datenfusion ausgewählt werden. Während dieser Ansatz meist für verschiedene Parameter von Sensoren verwendet wird, wurden auch Ansätze untersucht, bei denen multimodale Sensoren behandelt wurden [7]. In vielen Fällen werden diese Ideen in stationären Systemen verwendet, im Kontext der multimodalen Sensorik für Unterwasserrobotik sind diese Ansätze eine interessante Grundlage für die Anpassung an autonome mobile Roboter.

Schlussfolgerungen

Akustische und optische Sensoren sind die dominierenden Sensorikmodalitäten für die Navigation von autonomen Unterwasserfahrzeugen. Mit dem Betreten von engen Räumen und Strukturen sowie neuen Anwendungskonzepten wie Unterwasserstationen müssen weitere Sensorikmodalitäten hinsichtlich zuverlässiger und sicherer Operationen in kritischen Umgebungen bewertet werden.

Mehrere Forschungsaktivitäten wurden vorgestellt und diskutiert, die andere Messprinzipien als die zuvor genannten verwenden. Es ist offensichtlich, dass alle diese Prinzipien ihre Nachteile in bestimmten Arten von Umweltsituationen haben, was es umso wichtiger macht, ein multimodales Sensorsystem zu realisieren, das die Beurteilung der Funktionalität bestimmter Messansätze einschließt. Ein weiterer Vorteil eines multimodalen Setups ist die potenzielle Steigerung der Genauigkeit oder Robustheit, die aus der Kombination der Sensorinformationen resultiert [5].

Die Handhabung dieser Ansätze erfordert anständiges Domänenwissen und die Auswahl geeigneter Sensor-Fusion-Ansätze abhängig von der aktuellen Missionssituation. Lösungen aus anderen Anwendungsbereichen mit ähnlichen Herausforderungen müssen untersucht werden. Vielversprechende Ansätze basieren auf faltenden neuronalen Netzwerken [4].

Weitere Aufgaben sind die quantitative Bewertung der verfügbaren und vorgestellten Technologie hinsichtlich ihrer Fähigkeit, ein Objekt präzise zu lokalisieren, in Bezug auf die Entfernung von Sender und Empfängern. Die vorgestellten Forschungsarbeiten präsentieren meist die Machbarkeit der Technologie selbst, aber es fehlen die tatsächlichen Entfernungs- und Präzisionsleistungsmaße.

Zusätzliche Arbeit ist zu leisten bei der Bewertung weiterer Messprinzipien. Durch das Studium der Dämpfungskurven von Licht, Schall oder elektromagnetischen Wellen sind mehrere Frequenzbereiche einen genaueren Blick wert hinsichtlich der Anwendbarkeit neuer Sensortechnologien. Das Ziel muss sein, in der Lage zu sein, geeignete Sensorausrüstung für zuverlässige langfristige autonome unterwasserresidente AUVs sowohl für verschiedene Bereiche der Sensorik als auch für die Beurteilung des Vertrauens in die jeweiligen Sensortechnologien zu identifizieren (vergleiche Abb. 2).

Literatur

1. Albiez J, Joyeux S, Gaudig C, Hilljegerdes J, Kroffke S, Schoo C, Arnold S, Mimoso G, Alcantara P, Saback R, Britto J, Kirchnery, F (2015) FlatFish—a compact subsea-resident inspection AUV. In: OCEANS 2015–MTS/IEEE Washington, (October), S 1–8. <https://doi.org/10.23919/OCEANS.2015.7404442>
2. Boyer F, Lebastard V, Chevallereau C, Mintchev S, Stefanini C (2017) Underwater navigation based on passive electric sense : new perspectives for underwater docking. To cite this version : HAL Id : hal-01201695

3. Hero AO, Cochran D (2011) Sensor management: past, present, and future. *IEEE Sens J* 11(12):3064–3075. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2011.2167964>
4. Jing L, Wang T, Zhao M, Wang P (2017) An adaptive multi-sensor data fusion method based on deep convolutional neural networks for fault diagnosis of planetary gearbox. *Sensors* 17(2), Switzerland. <https://doi.org/10.3390/s17020414>
5. Kampmann P (2016) Development of a multi-modal tactile force sensing system for deep-sea applications (University of Bremen). <https://elib.suub.uni-bremen.de/peid=D00105232>
6. Knight WC, Pridham RG, Kay SM (1981) Digital signal processing for sonar. *Proc IEEE* 69(11):1451–1506. <https://doi.org/10.1109/PROC.1981.12186>
7. Kolba MP, Collins LM (2006) Information-theoretic sensor management for multimodal sensing. *Int Geosci Remote Sens Symp (IGARSS)* 90291(1):3935–3938. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2006.1009>
8. Kragh M, Underwood J (2019) Multimodal obstacle detection in unstructured environments with conditional random fields. *J Field Robot* (August 2018). <https://doi.org/10.1002/rob.21866>
9. Krupinski S, Maurelli F, Grenon G, Petillot Y (2008) Investigation of autonomous docking strategies for robotic operation on intervention panels. In: *OCEANS 2008*, (May 2014), 2002–2005. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2008.5151995>
10. Mees O, Eitel A, Burgard W (2016) Choosing smartly: adaptive multimodal fusion for object detection in changing environments. In *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Daejeon, (October), S 151–156. <https://doi.org/10.1109/IROS.2016.7759048>
11. Palomeras N, Ridao P, Ribas D, Vallicrosa G (2014) Autonomous I-AUV docking for fixed-base manipulation. *IFAC Proc Vol (IFAC-PapersOnline)* 19:12160–12165. <https://doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.01878>
12. Park JY, Jun BH, Lee PM, Oh JH, Lim YK (2010) Underwater docking approach of an under-actuated AUV in the presence of constant ocean current. *IFAC Proc Vol (IFAC-PapersOnline)* 43. <https://doi.org/10.3182/20100915-3-DE-3008.00065>
13. Rao D, Deuge M De, Vatani NN, Williams SB, Pizarro O (2017) Multimodal learning and inference from visual and remotely sensed data. *Int J Robot Res* 36(1):24–43. <https://doi.org/10.1177/0278364916679892>
14. Schofield O, Kohut J, Aragon D, Creed L, Graver J, Haldeman C, Kerfoot J, Roarty H, Jones C, Webb D, Glenn S (2007) Slocum gliders: robust and ready. *J Field Robot* 24(6):473–485. <https://doi.org/10.1002/rob.20200>
15. Siesjö J (2013) Sabertooth a Seafloor Resident Hybrid AUV/ ROV System for Long Term Deployment in Deep Water and Hostile. *Underw Interv Conf* 1(13):1–13. http://auvac.org/uploads/publication_pdf/SabertoothAUVUUST2013.pdf
16. Stewart R, Ermon S (2016) Label-free supervision of neural networks with physics and domain knowledge, 1(1)
17. Wynn RB, Huvenne VAI, Le Bas TP, Murton BJ, Connelly DP, Bett BJ, Ruhl HA, Morris KJ, Peakall J, Parsons DR, Hunt JE (2014) Autonomous underwater vehicles (AUVs): their past, present and future contributions to the advancement of marine geoscience. *Mar Geol* 352:451–468. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2014.03.012>
18. Xiang X, Yu C, Niu Z, Zhang Q (2016) Subsea cable tracking by autonomous underwater vehicle with magnetic sensing guidance. *Sensors (Switzerland)* 16(8):1–22. <https://doi.org/10.3390/s16081335>
19. Zhou M, Deyoung B, Bachmayer R (2016) Towards autonomous underwater iceberg profiling using a mechanical scanning sonar on a underwater slocum glider. In: *AUV 2016*, (November). <https://doi.org/10.1109/AUV.2016.7778656>

Auf dem Weg zu einem Simulations-Framework für Unterwasser-Interventionen



Matthias Teschner und Gabriel Zachmann

Zusammenfassung In dem Kapitel werden Aspekte der potenziellen Nutzung von Computational Fluid Dynamics (CFD) im Kontext der Unterwasserrobotik diskutiert. Obwohl CFD ein interdisziplinäres Forschungsgebiet ist, behandelt das Kapitel ausschließlich die Rolle der Informatikforschung mit Schwerpunkt auf CFD. Daher werden beispielhafte Beiträge der von den Autoren geleiteten Informatikforschungsguppen diskutiert. Die industrielle Anwendbarkeit früherer Forschungen wird kurz dargestellt. Schließlich werden Herausforderungen und offene Forschungsfragen zu einem Simulationsrahmen für die Analyse und Schulung von Unterwassereingriffen skizziert. Potenzielle Anwendungsszenarien für CFD-Simulationen im Bereich der Unterwasserrobotik werden im gesamten Kapitel skizziert.

Die Nützlichkeit der Computational Fluid Dynamics

CFD wird weit verbreitet eingesetzt, um Entwicklungsprozesse von beispielsweise Luft- und Raumfahrt- oder Automobilsystemen zu unterstützen und zu beschleunigen. Eine Schlüsselanwendung ist die Reduzierung des Designraums eines Systems in einem frühen Entwicklungsstadium, um den Bedarf an zeitaufwändigen und teuren Experimenten zu reduzieren. In einem nachfolgenden Entwicklungsstadium wird CFD als ergänzendes Werkzeug verwendet. Während reale Experimente durchgeführt werden, um Designparameter zu optimieren, wird CFD verwendet, um Setups zu bewerten, die beispielsweise zu komplex oder zu gefährlich für reale Experimente

M. Teschner (✉)

Computer Science Department, Universität Freiburg, Breisgau, Deutschland

E-Mail: teschner@informatik.uni-freiburg.de

G. Zachmann

Computer Science Department, Universität Bremen, Bremen, Deutschland

E-Mail: zach@informatik.uni-bremen.de

wären. Schließlich kann CFD in späten Entwicklungsstadien dazu beitragen, die Auswirkungen von inkrementellen Änderungen an einem bestehenden System zu bewerten (siehe z. B. [18]).

Informatikforschung für CFD

CFD ist ein interdisziplinäres Forschungsgebiet, das Beiträge aus der Strömungsmechanik, der numerischen Analyse und der Informatik (CS) kombiniert. Insbesondere trägt die CS-Forschung zu Hochleistungsimplementierungen von numerischen Schemata für verschiedene Rechnerarchitekturen bei. Dies umfasst hauptsächlich Parallelisierung, Vektorisierung und Lastausgleich für Hardwareumgebungen mit SMP/MPI/GPU-Architekturen. Weitere Beispiele für Beiträge sind Software-Engineering, Code-Verifikation, Vor- und Nachbearbeitung, insbesondere das Vernetzen von geometrisch komplexen Grenzen und die Visualisierung von großen Datensätzen.

Ein prominenter CFD-Ansatz mit vielfältigen CS-Beiträgen ist die Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) [12, 19]. In einer SPH-Übersicht von 2012 nannte Monaghan fünf wichtige Herausforderungen, von denen zwei mit Numerik und Modellierung zusammenhängen, d. h. Rauschen und Turbulenz, während drei von der CS-Forschung profitieren können, nämlich Leistung, adaptive Auflösung und Grenzbehandlung für Mehrphasenflüssigkeiten in 3D. Heute ermöglicht eine Kombination von CS-Lösungen mit moderner Nachbarschaftssuche [15], einer vielseitigen Grenzbehandlung für geometrisch komplexe Grenzen [4], und einem matrix-freien Poisson-Löser [16] die Simulation von 3D inkompressiblen SPH-Szenarien mit komplexen Grenzgeometrien, die aus bis zu $5,0 \cdot 10^8$ Stichproben auf einem einzelnen PC bestehen [10]. Adaptive Auflösungen wurden diskutiert, z. B. in [14, 26] und die 3D-Grenzbehandlung mit Mehrphasenflüssigkeiten wurde in [4] gezeigt.

Obwohl die CS-Forschung eine Vielzahl von Aspekten anspricht, die für CFD-Lösungen relevant sind, ist die Verknüpfung von CFD- und CS-Forschung noch nicht optimal, was anscheinend teilweise auf kulturelle Unterschiede zurückzuführen ist. Gutachter in CFD und CS bewerten unterschiedliche Kriterien, was sich in unterschiedlichen Ansätzen zur Veröffentlichung von Publikationen widerspiegelt. Aus CS-Sicht ist die Verbesserung der Verbindung von CS mit CFD und auch mit experimenteller Evaluation ein Schlüsselaspekt für erfolgreiche Forschung und Entwicklung hin zu einem Simulationsframework für Unterwasserinterventionsanalyse und -training.

Eigene Beiträge

Wir diskutieren kurz frühere Beiträge und einige verwandte Forschungen im Bereich der SPH-Flüssigkeiten. Diese Ansätze bilden die Grundlage für die Herausforderungen hin zu einem Simulationsframework für Unterwasserinterventionsanalyse

und -training, die im Abschnitt „[Hin zu einem Simulationsframework für Unterwasserintervention](#)“ skizziert werden.

Nachbarschaftssuche wird allgemein als ein wesentlicher Leistungsengpass in Lagrange'schen CFD-Konzepten betrachtet. Nachbarn, d. h. benachbarte Stichproben, die in den Berechnungen benötigt werden, ändern sich im Laufe der Zeit und müssen gespeichert werden, wenn iterative Drucklöser verwendet werden, z. B. für inkompressible SPH. Verlet-Listen [25] sind ein sehr beliebtes Konzept zur Suche von Nachbarn. Trotz der Tatsache, dass das Konzept vor mehr als fünfzig Jahren vorgeschlagen wurde, wird es immer noch in aktuellen CFD-Implementierungen berücksichtigt, z. B. [5]. Ein großes Problem der Verlet-Listen ist jedoch der Speicherverbrauch von sekundären Datenstrukturen, die erstellt werden, um die häufigen Aktualisierungen der Nachbarlisten zu beschleunigen. Um dieses Problem zu mildern, wurden verschiedene Alternativen auf der Basis von sortierten Listen und Hashtabellen mit reduzierten Speicheranforderungen vorgeschlagen und analysiert, z. B. [15]. Diese Varianten der Nachbarschaftssuche ermöglichen die Verarbeitung großer Mengen von SPH-Stichproben auf einem einzelnen PC und Szenarien mit bis zu 500 Mio. Stichproben wurden berechnet [10].

Ein zweiter Leistungsengpass in inkompressibler SPH ist die **Druckberechnung**, die die Lösung einer diskretisierten Form der Druck-Poisson-Gleichung (PPE, aus dem engl. „Pressure Poisson Equation“), d. h. eines linearen Systems, erfordert. Standard-PPE-Löser arbeiten typischerweise mit speichereffizienten Darstellungen der dünn besetzten Matrix, die den Laplace-Operator kodiert. Für große Mengen von Stichproben ist jedoch der Speicherverbrauch prohibitiv groß. Auch MPI-Implementierungen von PPE-Lösern, die dünn besetzte Matrixdarstellungen verwenden, können herausfordernd sein. Um diese Probleme zu mildern, wurden matrixfreie PPE-Implementierungen vorgeschlagen, z. B. [6, 16]. Je nach Löser erfordern diese Implementierungen keine explizite Kenntnis von Matrixelementen. Höchstens die Diagonalelemente müssen für Jacobi-artige Löser bekannt sein. Dünn besetzte Matrixdarstellungen sind nicht erforderlich und nur sehr wenige zusätzliche Werte werden pro Fluidstichprobe in PPE-Löserimplementierungen gespeichert. MPI-Implementierungen sind unkompliziert, während bereits große Stichprobenzahlen auf einzelnen PCs verarbeitet werden können. Das oben erwähnte Szenario mit 500 Mio. Stichproben [10] zeigt eine inkompressible SPH-Simulation, bei der die PPE auf matrixfreie Weise gelöst wurde [16]. In einer Nachfolgearbeit [6] beinhaltet die PPE auch Grenzstichproben, d. h. die PPE berechnet nicht nur den Druck für Fluidstichproben, sondern auch für Grenzstichproben. Dies vermeidet approximative Methoden wie Druckspiegelung [4] oder Druckextrapolation [1, 7] an Grenzstichproben.

Grenzbehandlung ist eines der wichtigsten Themen für die Simulationsqualität, das durch verschiedene CS-Beiträge angesprochen wird. Zum Beispiel zeigt [4], dass die typischerweise verwendete mehrschichtige Grenzdarstellung mit Stichproben einheitlicher Größe durch eine Schicht mit Stichproben unterschiedlicher Größe ersetzt werden kann. Dies vereinfacht die Grenzabtastrung erheblich, d. h. die typischerweise aufwändige Vorverarbeitung von Grenzgeometrien.

Darüber hinaus können beliebige Grenzgeometrien jeder Dimension behandelt werden. Sogar sich überschneidende Grenzen, die sich während einer Simulation relativ zueinander bewegen, können behandelt werden. Ein prominentes Beispiel wäre die Bewegung von Scheibenwischern auf einer Windschutzscheibe. Eine weitere interessante Idee wurde in [6] vorgeschlagen, wo der Grenzdruck sehr effizient durch einen matrixfreien PPE-Löser berechnet wird. Ein alternatives Konzept ist die Kombination eines SPH-Fluidlösers mit Moving Least Squares (MLS) Grenzbehandlung [7]. SPH ist effizienter als MLS für das Innere eines Fluids, aber MLS kann genauer sein als SPH an Grenzen mit Abtastdefiziten.

Kurzwelliges Rauschen ist ein typisches SPH-Problem, das die Simulationsqualität negativ beeinflusst. Zwei Konzepte, die dieses Problem angehen, sind Kernel-Korrektur, z. B. [8], und Partikelverschiebung, z. B. [20, 24, 27]. Eine alternative Strategie ist die Kombination von zwei PPE-Lösern [9]. Ein PPE-Löser verwendet die vorhergesagte Geschwindigkeitsdivergenz als Quellterm. Dieser Löser berechnet das Geschwindigkeitsfeld. Der zweite PPE-Löser verwendet die vorhergesagte Dichteabweichung als Quellterm. Dieser zweite Löser beeinflusst nicht das zuvor berechnete Geschwindigkeitsfeld, sondern berechnet aktualisierte Stichprobenpositionen, um den Volumendrift zu vermeiden, der auftreten würde, wenn nur der Geschwindigkeitsdivergenz-Löser verwendet würde. Der zweite Löser realisiert eine Partikelverschiebung, d. h. eine Neuabtastung des Geschwindigkeitsfeldes, das im ersten PPE-Lösen berechnet wurde. Der zweite PPE-Löser ist hoch effizient mit einer sehr niedrigen benutzerdefinierten Iterationszahl, typischerweise eins bis zwei. Im Gegensatz zu alternativen Partikelverschiebungsmethoden ist kein benutzerdefinierter Skalierungsparameter erforderlich.

Zusätzlich zu den oben diskutierten Hauptthemen trägt die CS auch zur **Schnittstellenrekonstruktion** bei, z. B. [2] und **Rendering**, z. B. [3]. Neue effiziente SPH-Löser für verschiedene Materialien wurden vorgeschlagen, z. B. für **granulare Materialien** [17], **hochviskose Flüssigkeiten** [22, 23], **elastische Festkörper** [21] und **starre Körper** [13]. Es wurden vereinheitlichte SPH-Löser vorgeschlagen, die interagierende Flüssigkeiten, hochviskose Flüssigkeiten, elastische und starre Festkörper behandeln. Die Effizienz von Lösungen für hochviskose Flüssigkeiten und elastische Festkörper wurde durch neuartige implizite Formulierungen verbessert [21, 22]. Starke Fluid-Festkörper-Interaktion und eine neuartige starre-starre Kopplung auf der Basis von SPH wurden in [13] vorgeschlagen.

Industrielle Relevanz

Die kombinierten CFD- und CS-Bemühungen der vergangenen Jahre haben zu neuen Lösungen geführt, die seit 2015 von FIFTY2 Technology, einem Spin-off der Universität Freiburg, vermarktet werden. FIFTY2 entwickelt und verkauft PreonLab [11], ein Framework für Lagrange'sche Flüssigkeitssimulationen auf

der Basis von SPH mit besonderem Schwerpunkt auf Genauigkeit, Effizienz, Benutzerfreundlichkeit und Zuverlässigkeit. PreonLab ist vollständig parallelisiert und läuft auf Desktop-PCs und Hochleistungsclustern. Die Vorverarbeitungszeit ist minimal, da keine Grenzvernetzung erforderlich ist. Verschiedene Nachverarbeitungsmöglichkeiten von simulierten Ergebnissen wurden zusammen mit leistungsstarken und effizienten Visualisierungen realisiert. Die Simulationsqualität von PreonLab wurde mit Standard-Testfällen, z. B. dem Marin-Dammbruch-Szenario, und mit zahlreichen anderen Szenarien von externen Partnern bewertet. Günstige Anwendungsbereiche sind Freiflächenströmungen mit komplexen und schnell bewegenden Grenzgeometrien, z. B. Fahrzeuge in Wasserpassagen, die Vorhersage des Regenwasserablaufs für ein Fahrzeug mit beweglichen Wischern oder das Design von Getrieben mit optimierter Schmierung.

Die Visualisierungs- und Nachverarbeitungsfähigkeiten von PreonLab stellen hochrelevante Werkzeuge für zukünftige CFD- und CS-Forschung hin zu einem Simulationsframework für Unterwasserinterventionsanalyse und -training dar. Zum Beispiel zeigen die Abb. 1, 2, 3 und 4 PreonLab-Screenshots mit ver-

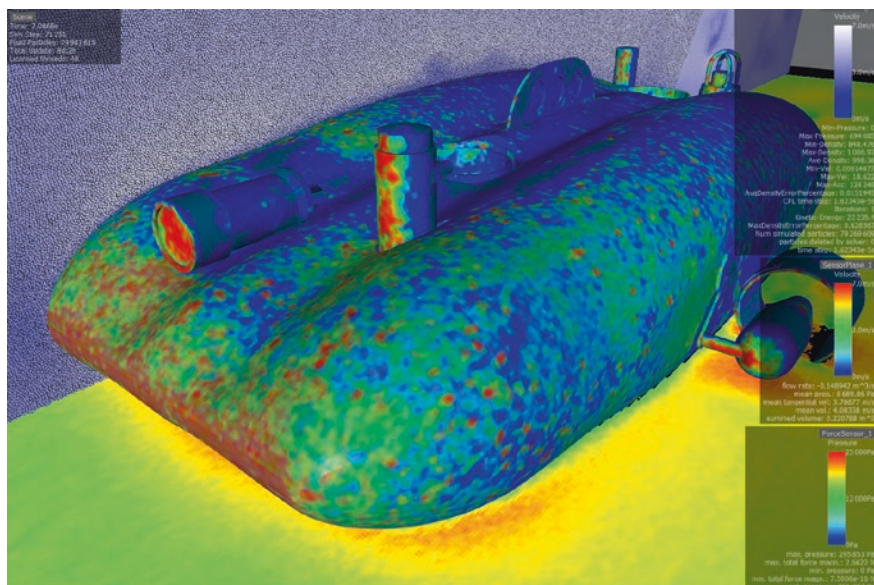


Abb. 1 Das Bild veranschaulicht die Vielseitigkeit und den Nutzen eines Fluid-Simulationsrahmens. Ein Unterwasserroboter (zur Verfügung gestellt von Marc Hildebrand, DFKI Bremen) wird in einen Fluidstrom gesetzt. Der Fluidstrom wird mit inkompressiblen SPH [16] simuliert. Die Grenzbehandlung folgt dem Konzept der Druckspiegelung und abgetasteten Grenzen mit nicht einheitlichen Abtastgrößen [4]. Die Nachbearbeitung, d. h. Sensoren, und Visualisierungen werden mit FIFTY2s PreonLab [11] realisiert. Farben auf der Roboter-Oberfläche kodieren den Druck, Farben in der Ebene unter dem Roboter zeigen Geschwindigkeiten des umgebenden Fluidstroms an und die bläuliche Struktur im Hintergrund zeigt einen abgeschnittenen Teil der Fluidstichproben. Die Farbe einer Fluidstichprobe kodiert ihre Geschwindigkeit.

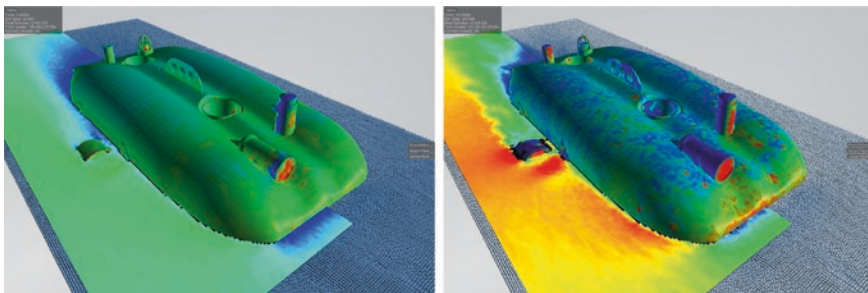


Abb. 2 Diese beiden Bilder zeigen das gleiche Robotermodell in Strömungen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten unter Verwendung der gleichen Simulations- und Visualisierungstechniken wie in Abb. 1. Die Färbung entspricht ebenfalls Abb. 1. Der Roboter ist vollständig von Wasser umgeben. Nur Fluidstichproben unterhalb des Roboters werden visualisiert.

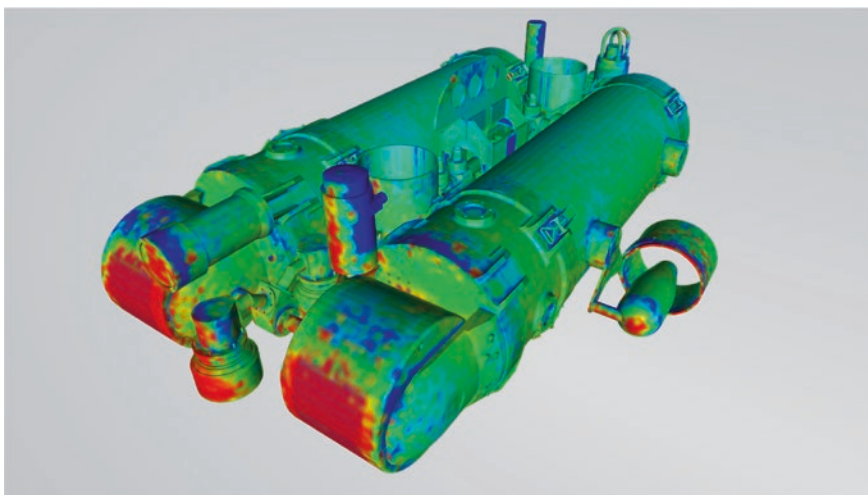


Abb. 3 Dieses Bild zeigt den Druck auf der Oberfläche eines anderen Robotermodells (zur Verfügung gestellt von Marc Hildebrand, DFKI Bremen) in einem Unterwasserszenario, das sich vorwärts bewegt. Druck- und Geschwindigkeitsfeld können analysiert werden, um die Form des Roboters zu optimieren. Auch die Prozesse des Untertauchens, Auftauchens, Beschleunigens und Verzögerens könnten simuliert werden, um die Funktionalität des Roboters zu optimieren. Die gleiche Simulations- und Visualisierungsumgebung wie für Abb. 1 wurde verwendet.

schiedenen Visualisierungen von Simulationsergebnissen. Umgekehrt könnten Lösungen für die in Abschnitt „[Hin zu einem Simulationsframework für Unterwasserintervention](#)“ skizzierten Forschungsherausforderungen für weitere Entwicklungen von FIFTY2s PreonLab von Interesse sein.

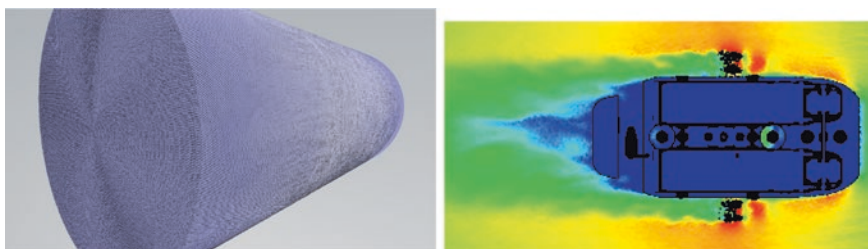


Abb. 4 Diese beiden Bilder veranschaulichen eine gesamte Stichprobe des Simulationsbereichs (links) und ein beispielhaftes Geschwindigkeitsfeld um einen Roboter (rechts). Es wurde die gleiche Simulations- und Visualisierungsumgebung wie in Abb. 1 verwendet.

Hin zu einem Simulationsframework für Unterwasserintervention

Kontext: Das Design eines autonomen Unterwasserfahrzeugs (AUV) ist das Ergebnis eines langen Designprozesses, der darauf abzielt, ein Optimum in Bezug auf verschiedene Optimierungsziele zu finden. Viele dieser Ziele können formalisiert werden, z. B. effektiver Schub im Verhältnis zur Rotorgeschwindigkeit oder freier Raum, der von einem Greifer zum Betrieb benötigt wird. Oft können solche Ziele jedoch nur durch Experimente, entweder real oder simuliert, bewertet werden.

Reale Experimente mit Unterwasserrobotern sind teuer und von begrenzter Flexibilität. Die Menge der experimentellen Szenarien ist eingeschränkt und die Analysen der Experimente sind eher schwierig, da die Datenverfügbarkeit durch Sensorbeschränkungen bestimmt wird. Schließlich sind Fortschritte in der Entwicklung des AUV in der Regel gering, da potenzielle Änderungen einen zeitaufwändigen und teuren Umbau eines Prototyps erfordern.

Simulationen können verwendet werden, um die Probleme realer Experimente zu mildern. Verschiedene Szenarien können flexibel getestet werden und beliebige virtuelle Sensortypen, Formen und Positionen können realisiert werden. Potenzielle Änderungen am AUV können durch einfache Anpassung des virtuellen Modells realisiert werden, wie in den Abb. 1, 2, 3 und 4 illustriert.

Simulationen können dazu beitragen, das Design von AUVs effizienter zu gestalten. Eine Möglichkeit dazu ist die Bereitstellung von Designer-Tools und einer Tool-Kette, mit der man schnell Optimierungsziele bewerten kann. Eine andere Möglichkeit wäre die Bereitstellung von Tools, die den Designparameter-Raum automatisch erkunden. Das Ergebnis wäre ein machbarer Teilraum für das Design oder eine Anzahl spezifischer Designs.

Offene Forschungsfragen: Wir beschreiben mögliche Forschungsrichtungen in der CS, um den Stand der Technik in Simulationen von AUVs voranzutreiben und letztendlich Werkzeuge für die effiziente Optimierung von AUV-Designs bereitzustellen. Dies beinhaltet Lagrange'sche Flüssigkeitssimulation, Bereichsanfragen,

Kollisionserkennung, Näherungsberechnungen zwischen artikulierten Objekten und semi-automatische Systemdesignoptimierung mit speziellem Fokus auf Unterwasserrobotik.

In Bezug auf Flüssigkeitssimulationen könnten verschiedene Aspekte untersucht werden: Leistung, Fluid-Struktur-Interaktion einschließlich verformbarer Festkörper, starke Kopplung, adaptive räumliche Fluidabtastung, interagierende SPH-Festkörper mit Einschränkungen oder die Untersuchung von SPH-Alternativen, z. B. MLS. Abhängig von den jeweiligen Anwendungsszenarien könnten weitere Simulationskomponenten in Betracht gezogen werden.

Im Kontext von Bereichsanfragen, die für eine effiziente Nachbarschaftssuche in Lagrange'schen Flüssigkeitssimulationen von hoher Relevanz sind, könnten verschiedene neuartige Aspekte untersucht werden. Zum Beispiel könnten hybride Datenstrukturen untersucht werden, die Raumunterteilung und Bounding-Volume-Hierarchien kombinieren. Während aktuelle Nachbarschaftssuchmethoden für Flüssigkeiten typischerweise auf Raumunterteilung basieren, könnte es sinnvoll sein, Bounding-Volume-Hierarchien für bewegliche starre Grenzen zu verwenden und beide Konzepte zu kombinieren. Ein weiterer neuartiger Aspekt könnte die Kompression sein. Nachbarlisten sind vergleichsweise teuer zu speichern und für große Simulationen macht es sicherlich Sinn, speichereffiziente Nachbardarstellungen zu untersuchen.

In Bezug auf Kollisionserkennung und Näherungsberechnungen könnten neuartige Beschleunigungsdatenstrukturen untersucht werden, die die Implementierung solcher geometrischen Algorithmen auf der GPU ermöglichen. Dies wird Simulationen der Physik von starren Körpern in Echtzeit und schneller als in Echtzeit ermöglichen und für atomistische Simulationen an der Schnittstelle von Flüssigkeiten und starren Körpern. Durch die Verwendung von inneren Kugelpackungen für starre Körper werden wir in der Lage sein, eine starke Kopplung zwischen Flüssigkeiten und den in ihnen eingetauchten starren Körpern abzuleiten.

Während das Simulationsframework hauptsächlich für die Analyse von AUVs vorgesehen wäre, könnte es auch für Schulungszwecke verwendet werden. Daher könnte die Einbindung des Fluidlösers in eine Virtual-Reality-Umgebung untersucht werden. Ein solches VR-Simulationssystem würde es Forschern ermöglichen, neue AUV-Designs oder neue Designs von Teilsystemen wie einem Greifer zu untersuchen, die über reguläre Simulationssysteme hinaus Einblicke bieten können, aufgrund des viel höheren Grades an Immersion.

Schlussfolgerung

Im Kapitel wurden ausgewählte Aspekte der Beziehung zwischen CS und CFD diskutiert. Die Bedeutung von CS-Beiträgen zum Bereich der CFD wurde im Allgemeinen motiviert, begleitet von der Beschreibung spezifischer CS-Lösungen, die kürzlich dazu beigetragen haben, den Stand der Technik in der Fluidsimulation voranzutreiben. Mögliche Richtungen für zukünftige CS-Forschung wurden für CFD-Lösungen im speziellen Bereich der AUVs skizziert.

Literatur

1. Adami S, Hu X, Adams NA (2012) A generalized wall boundary condition for Smoothed Particle Hydrodynamics. *J Comput Phys* 231(21):7057–7075
2. Akinci G, Ihmsen M, Akinci N, Teschner M (2012) Parallel surface reconstruction for particle-based fluids. *Comput Graph Forum* 31(6):1797–1809
3. Akinci N, Dippel A, Akinci G, Teschner M (2013) Screen space foam rendering. *J WSCG*, 195–204
4. Akinci N, Ihmsen M, Akinci G, Solenthaler B, Teschner M (2012) Versatile rigid-fluid coupling for incompressible SPH. *ACM Trans Graph (TOG)* 31(4):62
5. Altomare C, Viccione G, Tagliafierro B, Bovolin V, Domínguez JM, Crespo AJC (2018) Free-surface flow simulations with Smoothed Particle Hydrodynamics method using high-performance computing. In: *Computational fluid dynamics-basic instruments and applications in science*. InTech, S 73–100
6. Band S, Gissler C, Ihmsen M, Cornelis J, Peer A, Teschner M (2018) Pressure boundaries for implicit incompressible SPH. *ACM Trans Graph (TOG)* 37(2):14
7. Band S, Gissler C, Peer A, Teschner M (2018) MLS pressure boundaries for divergence-free and viscous SPH fluids. *Comput Graph* 76:37–46
8. Bonet J, Lok TS (1999) Variational and momentum preservation aspects of Smooth Particle Hydrodynamic formulations. *Comput Methods Appl Mech Eng* 180(1–2):97–115
9. Cornelis J, Bender J, Gissler C, Ihmsen M, Teschner M (2018) An optimized source term formulation for incompressible SPH. *Vis Comput*, 1–11
10. FIFTY2 Technology: Terrain 2-Up to 500 million particles with PreonLab (FIFTY2). <https://www.youtube.com/watch?v=4y-VBLzA9Mw>
11. FIFTY2 Technology: PreonLab (2018). www.fifty2.eu
12. Gingold R, Monaghan J (1977) Smoothed Particle Hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars. *Mon Not R Astron Soc* 181:375–398
13. Gissler C, Peer A, Band S, Teschner M (2018) Interlinked SPH pressure solvers for strong fluid-rigid coupling. *ACM Trans Graph (TOG)*, 1–14
14. Horvath CJ, Solenthaler B (2013) Mass preserving multi-scale SPH. *Pixar Tech Memo* (13-04)
15. Ihmsen M, Akinci N, Becker M, Teschner M (2011) A parallel SPH implementation on multi-core CPUs. *Comput Graph Forum* 30(1):99–112
16. Ihmsen M, Cornelis J, Solenthaler B, Horvath C, Teschner M (2014) Implicit incompressible SPH. *IEEE Trans Vis Comput Graph* 20(3):426–435
17. Ihmsen M, Wahl A, Teschner M (2012) High-resolution simulation of granular material with SPH. In: *VRIPHYS*, S 53–60
18. Kraft EM (2010) After 40 years why hasn't the computer replaced the wind tunnel? Technical report, Arnold Engineering Development Center
19. Lucy L (1977) A numerical approach to the testing of the fission hypothesis. *Astron J* 82:1013–1024
20. Nestor R, Basa M, Quinlan N (2008) Moving boundary problems in the finite volume particle method. In: *SPHERIC*, S 118–123
21. Peer A, Gissler C, Band S, Teschner M (2018) An implicit SPH formulation for incompressible linearly elastic solids. *Comput Graph Forum* 37(6):135–148
22. Peer A, Ihmsen M, Cornelis J, Teschner M (2015) An implicit viscosity formulation for SPH fluids. *ACM Trans Graph (TOG)* 34(4):114:1–114:10
23. Peer A, Teschner M (2017) Prescribed velocity gradients for highly viscous SPH fluids with vorticity diffusion. *IEEE Trans Vis Comput Graph* 23(12):2656–2662
24. Skillen A, Lind S, Stansby PK, Rogers BD (2013) Incompressible Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) with reduced temporal noise and generalised fickian smoothing applied to body-water slam and efficient wave-body interaction. *Comput Methods Appl Mech Eng* 265:163–173

25. Verlet L (1967) Computer “experiments” on classical fluids. i. thermodynamical properties of lennard-jones molecules. *Phys Rev* 159(1):98
26. Winchenbach R, Hochstetter H, Kolb A (2017) Infinite continuous adaptivity for incompressible SPH. *ACM Trans Graph (TOG)* 36(4):102
27. Xu R, Stansby P, Laurence D (2009) Accuracy and stability in incompressible SPH (ISPH) based on the projection method and a new approach. *J Comput Phys* 228(18):6703–6725

Teil IV

Autonomie und Missionsplanung

In den vorherigen Kapiteln haben wir auf grundlegende Systemanforderungen sowie auf Interventionseigenschaften hingewiesen, um eine neue Generation von Unterwasserfahrzeugsystemen zu entwickeln, die in der Lage sind, langfristig autonom zu navigieren. Da offene Gewässer aufgrund schlechter Kommunikation, begrenzter und gefährlicher Umgebung eine große Herausforderung darstellen, müssen diese Systeme als modulare Systeme mit hohem Mobilitäts- und Anpassungsgrad konzipiert werden.

Dieser Teil konzentriert sich auf die Integration dieser neuen, in den vorherigen Kapiteln postulierten, intelligenten Systeme in reale Szenarien wie Höhlenforschung oder Inspektion und Wartung von Unterwasseranlagen.

Kap. 14 konzentriert sich auf das Thema der Navigation autonomer Unterwasserroboter in engen Bereichen, was ein besonderes Problem im Bereich der Unterwasserrobotik darstellt. Es skizziert die Herausforderungen, die spezielle Ansätze zur Vor-Selbstlokalisierung und Umgebungskartenerstellung erfordern. Wie diese Fragen angegangen und Lösungen gefunden werden können, wird in diesem Abschnitt beschrieben.

Da Unterwassersysteme mit begrenzten Kommunikationsmöglichkeiten arbeiten müssen, müssen Methoden entwickelt werden, um die Korrektheit ihres Betriebs unter allen Umständen, auch in unvorhersehbaren Situationen, zu gewährleisten. In Bezug auf diese Fragen überprüft Kap. 15 Möglichkeiten der Systemmodellierung und Verifizierung sowohl der Hardware als auch der Software von Unterwasserrobotersystemen und reflektiert weiter, wie zertifizierende Algorithmen entworfen werden können.

Schließlich diskutiert das letzte Kapitel neue Arten von Schnittstellen, bei denen Teams von Robotern und menschlichen Ermittlern kooperative Aufgabenplanung und Koordination zwischen dem menschlichen Bediener und dem Roboterteam durchführen. Besonders in Bereichen, in denen Menschen nur bedingt handeln können oder überhaupt eingeschränkt sind, ist die Kombination von Mensch und Roboter von enormem Vorteil. Bei dieser Gelegenheit werden hohe Fähigkeiten für dynamische und komplexe Aktivitäten, die von Robotersystemen durchgeführt werden, mit der Fähigkeit des Menschen vereint, mit

Mehrdeutigkeiten oder falschen Daten umzugehen. Die Autoren präsentieren ein interaktives strategisches Missionsmanagementsystem für Unterwassererkundungen, das es Robotersystemen ermöglicht, ihre Situationen und Herausforderungen auf schnelle und intuitive Weise unter menschlicher externer Kontrolle zu analysieren.

Auf dieser Grundlage werden bestehende intelligente Systeme in Interaktion mit Menschen qualitativ erweitert und so eine Verbesserung und Erweiterung ihrer Arbeit in Unterwasserszenarien ermöglicht.

Neue Richtungen für die Navigation autonomer Unterwasserfahrzeuge in beengten Räumen



Udo Frese, Daniel Büscher und Wolfram Burgard

Zusammenfassung Dieses Positionspapier präsentiert erste Gedanken darüber, wie einige Techniken aus der allgemeinen Robotik zur Navigation autonomer Unterwasserfahrzeuge (AUV) in engen Räumen beitragen können, indem sie insbesondere die räumlichen Grenzen ausnutzen und Informationen berücksichtigen, die in offenen Gewässern nicht verfügbar sind. Es gibt natürliche enge Räume, z. B. Höhlen, sowie künstliche, z. B. Dreibeine von Offshore-Windturbinen oder Unterwasser-Öl- und Gasanlagen, die diese Anwendung interessant machen. Wir argumentieren, dass das übliche Wahrnehmungssystem von AUV mit nach vorne gerichteter Kamera und/oder Sonar Defizite bei der Messung von Strukturen in der unmittelbaren Umgebung des AUV aufweist. Diese Umgebung ist jedoch besonders wichtig in engen Räumen, wo das AUV nicht als „Punkt im Raum“ gesehen werden kann, sondern seine physische Ausdehnung berücksichtigt werden muss. Entfernte Umgebungsmerkmale, die in den Fernsensoren beobachtet werden, können kartiert werden, aber später, wenn das AUV näher kommt und die Fernsensoren sie nicht mehr beobachten können, sind sie möglicherweise nicht direkt für die Lokalisierung mit diesen Sensoren nutzbar. Wir sehen jedoch immer noch die Möglichkeit, sie zu nutzen und darüber hinaus neue Merkmale auf andere Weise zu erzeugen. Wie dies erreicht werden kann, ist die zentrale Idee, die wir hier vermitteln möchten.

U. Frese (✉)
Universität Bremen, Bremen, Deutschland
E-Mail: ufrese@informatik.uni-bremen.de

D. Büscher (✉) · W. Burgard
Autonomous Intelligent Systems, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg,
Freiburg, Deutschland
E-Mail: buescher@informatik.uni-freiburg.de

W. Burgard
E-Mail: burgard@informatik.uni-freiburg.de

Einführung

Die Seefahrt wird normalerweise mit offenem Wasser in Verbindung gebracht. Von den alten Polynesiern, die Wayfinding, Sterne und Vögel zur Navigation im Pazifik nutzten [20], über die Erfindung von Sextant und Chronometer im 18. Jahrhundert bis hin zum Global Positioning System (GPS) in der modernen Zeit bestand die Hauptaufgabe darin, die eigene Position im weiten Raum eines offenen Ozeans zu finden.

Im Gegensatz dazu gibt es wichtige Unterwasserumgebungen, deren Herausforderung darin besteht, dass sie klein und begrenzt sind. Beispiele sind Höhlen, die von besonderem wissenschaftlichem Interesse sind, und Fundamente von Windkraftanlagen, Unterwasser-Öl- und Gasanlagen oder sogar große Rohre (Abb. 1), die wirtschaftlich relevant sind. In allen Fällen macht ihre begrenzte Natur sie gefährlich für Taucher, aber auch schwierig zu navigieren für AUVs. Es gibt einen großen Schritt von der Oberflächennavigation zum speziellen Problem der begrenzten Navigation. Selbst die Teleoperation ist schwierig, weil die Versorgungsleitung sich verheddern kann.

Dieses Problem hat uns dazu motiviert zu untersuchen, welche Techniken aus der allgemeinen Robotik den spezifischen begrenzten Charakter der Umgebung ausnutzen könnten, um die Lokalisierung, Kartierung und letztendlich die Navigation zu erleichtern.



Abb. 1 Beispiel für eine Mission in einer begrenzten Unterwasserumgebung. Das AUV Dagon wird in den Kühlwasserschacht eines Kraftwerks abgesenkt [14]. (Bild mit freundlicher Genehmigung von Marc Hildebrandt, DFKI)

Das Kapitel beginnt mit verwandten Arbeiten, diskutiert dann die Wahrnehmungssituation für ein AUV in begrenzten Räumen. Es präsentiert dann die Hauptideen zur Nutzung von Ego-Freespace-Informationen, die Informationen, die aus einem IMU während des sanften Kontakts mit der Umgebung gewonnen werden, die Informationen, die durch das Greifen eines statischen Teils der Umgebung bereitgestellt werden, und schließlich zur Nutzung aktiver Wahrnehmung für die autonome Erkundung als Ausblick.

Stand der Technik

Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) ist seit zwei Jahrzehnten ein aktives Forschungsgebiet mit dem Ergebnis [5], dass heute funktionierende Algorithmen und Implementierungen verfügbar sind und z. B. für autonomes Fahren, UAV-Navigation oder sogar Qualitätskontrolle im Bauwesen verwendet werden [16]. Diese basieren meist auf RGB [9, 22] oder RGBD-Bildern [33] und arbeiten entweder auf extrahierten Schlüsselpunkten [21] oder dicht im gesamten Bild [22]. Die bekannteste Methode ist graphenbasiert, wobei die Knoten Punkten oder Posen entsprechen, die geschätzt werden sollen, und die Kanten Messungen über die benachbarten Knoten ausdrücken, die als weiche Einschränkung formuliert sind. Ein Optimierungsalgorithmus, z. B. in Bibliotheken wie g2o [18], SLoM [12] oder ceres [1] ermittelt die wahrscheinlichsten Werte für die Knoten anhand der Informationen in den Kanten durch Minimierung der kleinsten Quadrate.

Im Unterwasserbereich wurden mehrere Anwendungen von visuellem SLAM veröffentlicht [4, 6, 15, 23, 25, 26, 34], jedoch meist als Nachbearbeitung und nicht in der Steuerschleife des AUV. Dies liegt daran, dass der Unterwasserbereich hinsichtlich Sichtbarkeit und Merkmalen schwierig ist und daher das Risiko eines Fehlfunktionierens hoch ist. Das DEPTHX-Projekt [7] liefert ein außergewöhnliches Beispiel für ein AUV, das außerhalb des Labors oder kontrollierter Wettbewerbe autonom arbeitet und SLAM zur Lokalisierung verwendet. Das System erkundete, kartierte und beprobte das Zacatón-Cenote-System in einer Reihe von manuell spezifizierten und autonom ausgeführten Missionen. Das SLAM-Subsystem verwendet IMU und DVL für die Tote-Winkel-Navigation und drei Ringe von Sonaren (keine Kamera) zur Wahrnehmung der Umgebung. Der SLAM-Algorithmus ist ein Rao-Blackwell-isierter Partikelfilter mit einer 3D-Octomap pro Partikel und einem cleveren Lazy-Copying-Schema, um die notwendige Leistung zu erreichen.

Die meisten SLAM-Algorithmen betrachten den Roboter als punktähnlichen Sensor. Ausnahmen sind [13, 28], wo die Interaktion des Roboterkörpers mit der Umgebung in SLAM genutzt wird und [8] wo ein Roboter mit Tasthaaren taktilen SLAM durchführt. Beide nutzen die Tatsache, dass der vom Roboter besetzte Raum leer sein muss.

Wahrnehmungssituation

Eine aktuelle Übersicht über die Sensoren und Navigationsalgorithmen, die für die offene (Unter-)Wasser-Navigation zur Verfügung stehen, wird von [19] gegeben. Eine leicht zugängliche Übersicht findet sich in [24].

Unsere Überlegungen hier beziehen sich speziell auf ein AUV mit nach vorne gerichteten Sensoren, z. B. Kameras oder Sonar, wie man es wahrscheinlich für Missionen in begrenzten Räumen bevorzugen würde.

Sensoren für die Tote-Winkel-Navigation

Sensoren für die Tote-Winkel-Navigation haben zwei Eigenschaften: Erstens messen sie eine Größe bezüglich des *internen* Zustands des AUV, ohne sich auf etwas Externes zu beziehen. Zweitens messen sie die *Änderung* der betreffenden Größe, nicht die absolute Größe selbst. Diese Änderungen müssen addiert (bzw. integriert) werden, was zu einem wachsenden kumulierten Fehler führt, der als *Drift* bezeichnet wird.

AUVs sind normalerweise mit einem leistungsfähigen „Odometrie“-Paket ausgestattet. Faseroptische Gyrometer, die die Drehgeschwindigkeit messen, sammeln einen Fehler von einigen Grad pro Stunde [10], so dass die Orientierung für kurze Missionen ziemlich gut bekannt ist. Zusammen mit Beschleunigungsmessern, die sowohl die tatsächliche als auch die gravitative Beschleunigung messen und somit einen Bezugspunkt für „unten“ liefern, driftet die Neigung und Rollbewegung nicht mehr. Das Gleiche gilt für die Gierung, die aus der Erdrotationsachse gewonnen wird, wenn entweder ein North Seek Gyro oder geeignete Fusionsalgorithmen verwendet werden.

In Bezug auf die Translation haben AUVs normalerweise ein sogenanntes Doppler Velocity Log (DVL), das den aktuelle Geschwindigkeitsvektor relativ zum Boden misst, indem es die Dopplerverschiebung von akustischen Echos vom Boden in verschiedenen Richtungen auswertet. Streng genommen bezieht sich dieser Sensor auf etwas Externes, nämlich den Boden, aber er ist gut als Geschwindigkeitssensor konzeptualisiert, d. h. das translatorische Äquivalent zum Gyrometer.

In normalen Situationen sind diese sehr präzise, z. B. 0,12 % wie von [29] berichtet, jedoch in schwierigen (z. B. begrenzten) Umgebungen hält die Annahme, dass diese Echos von flachem Boden kommen, nicht mehr stand, was die Leistung erheblich verschlechtert [7, Abb. 5.5]. Kurze Lücken können von Beschleunigungsmessern überbrückt werden. Ein kleiner Richtungsfehler von $\theta = 0,1^\circ$ führt jedoch nach $t = 5$ Minuten, in denen man sich auf die Beschleunigungsmesser verlassen hat, zu einem Positionsfehler von $\frac{1}{2} \sin(\theta) g t^2 \approx 785$ m. Beschleunigungsmesser können also kurze Lücken überbrücken, können aber nicht für die Langzeitlokalisierung verwendet werden.

Nach vorne gerichtete Sensoren

Wenn ein solches Fahrzeug durch einen begrenzten Raum fährt, registriert es trotz aller Einschränkungen seine Umgebung vor sich bis in einige Entfernung (Abb. 2, links), was unserer Meinung nach normalerweise ausreichend ist, um die Umgebung zu kartieren.

Die schwierige Situation entsteht, wenn das AUV nahe an etwas ist, entweder während der Navigation oder um tatsächlich zu manipulieren (Abb. 2, oben/Mitte). In einer solchen Situation sind alle SLAM-Algorithmen durch begrenzte Räume herausgefordert, da der Sensor oft nicht genug Informationen liefert, um sich zuverlässig zu lokalisieren, wenn er nahe an einem Hindernis ist. Dies liegt daran, dass das Sichtfeld des Sensors normalerweise konisch ist und in absoluten Zahlen nahe am Roboter kleiner ist als weit entfernt.

Darüber hinaus haben die meisten Sonare eine Mindestdistanz. Kameras haben aus Fokusgründen und weil die Beleuchtung des AUVs oft entweder eine Überbelichtung verursacht oder durch sehr nahe Objekte blockiert wird, effektiv auch eine.

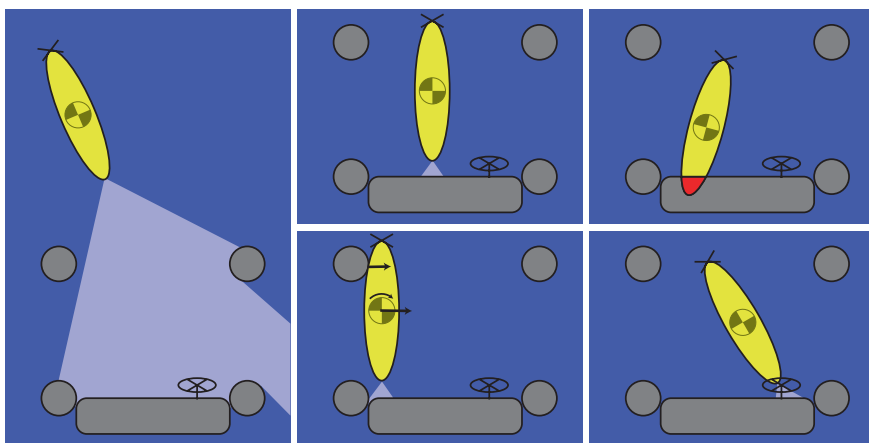


Abb. 2 Interessante Wahrnehmungsphänomene, die bei einem AUV in begrenzten Räumen auftreten. **Links:** Wenn ein AUV mit nach vorne gerichteten Sensoren sich annähert, können seine Sensoren das Objekt gut wahrnehmen. Der von diesen Sensoren abgedeckte Bereich ist hell und der nicht abgedeckte Bereich dunkelblau. **Oben/Mitte:** In der Nähe eines Objekts liefern nach vorne gerichtete Sensoren nicht viel Information. **Oben/rechts:** Das AUV kann keine Position einnehmen, in der es sich mit der Umgebung überschneidet. **Unten/Mitte:** Wenn das AUV (sanft) die Umgebung berührt, kann die Position des Kontakts aus der Änderung der (Winkel-)Geschwindigkeit abgeleitet werden, die aus dem IMU ersichtlich ist. Dies liefert wichtige Informationen für die Lokalisierung. **Unten/rechts:** Ein häufiges Problem bei der AUV-Manipulation ist, dass das AUV um z. B. einen Griff herum schwenkt, anstatt den Griff zu bedienen. Dies kann aus den IMU-Daten beobachtet werden und mit ziemlich präzisen Gyrometern für eine bessere Positionsschätzung ohne externe Referenz verwendet werden.

Da ein AUV frei schwebt und Beschleunigungsmesser diese Lücke nur für einige Sekunden überbrücken können, geht die Position verloren. Auch das Doppler Velocity Log, das eine präzise Odometrie beim Überfahren des Bodens ist, ist hier nicht zuverlässig, weil seine Wahrnehmung auf der Annahme eines flachen Bodens basiert und die meisten DVLs Mindestabstandsbeschränkungen haben.

Da in einer solchen Situation die Sicht nach vorne blockiert ist, ist die unmittelbare Umgebung des Roboters unserer Meinung nach eine vielversprechende Informationsquelle. Im Abschnitt „**Vorgeschlagene Informationsquellen bei blockierten Sensoren, die nach vorne schauen**“ werden wir aufzeigen, wie dies ausgenutzt werden kann, ohne Sensoren über den gesamten Rumpf des AUVs zu montieren.

Andere Sensoren für die Navigation

Um das Bild zu vervollständigen: Die Tiefe kann absolut durch einen Umgebungsdrucksensor gemessen werden, so dass im Gegensatz zu terrestrischen Anwendungen die Z-Achse unter Wasser kein Problem darstellt. In offenen Gewässern werden AUVs routinemäßig lokalisiert, indem sie akustische Signale von Sendern auf speziellen Bojen verwenden. Diese werden als Long-, Short- oder Ultra-Short-Baseline-Systeme bezeichnet; abhängig von der Entfernung zwischen den Bojen. Diese Techniken funktionieren nicht in begrenzten Räumen, weil die akustische Sichtlinie blockiert ist und bestenfalls eine Startposition liefern können, wenn man ein begrenztes Gebiet betritt.

Vorgeschlagene Informationsquellen mit blockierten vorausschauenden Sensoren

Im Folgenden schlagen wir vor, drei Arten von Informationen in einer Situation wie Abb. 2 oben/Mitte dargestellt zu nutzen, die ausschließlich auf der physischen Ausdehnung des Roboters und Messungen aus dem IMU basieren.

Vom Körper des Roboters erhaltene Informationen

Die erste Information ist, dass das AUV nicht in einer Pose sein kann, in der es mit bekannten Hindernissen auf der Karte überlappen würde. Die Karte könnte a priori verfügbar sein oder sie wird erstellt, während die aktuelle Position angenähert wird (Abb. 2, links). In jedem Fall kann ein Teil der Karte um die aktuelle AUV-Pose als verfügbar betrachtet werden, so dass diese „Ego-Freespace-Information“,

d. h. die Einschränkung, dass das AUV und Hindernisse auf der Karte nicht überlappen, für die Lokalisierung genutzt werden kann (Abb. 2, oben/rechts).

Diese Information wurde im Kontext der Fußgänger-Innenraumlokalisierung verwendet und ist überraschend leistungsfähig: [35] berichtet, dass IMU-basierte Fußgänger-Odometrie, wenn sie mit der Information, dass Menschen nicht durch Wände laufen können, kombiniert wird, ausreicht, um in einem bekannten Gebäude 95 % der Zeit auf $<0,7$ m zu lokalisieren. Ähnliche Ergebnisse wurden von [31] erzielt.

Diese Information verhindert nicht die Entstehung kleiner Drifts in der Posen-Schätzung, denn im Beispiel von Abb. 2, oben/Mitte definiert die Ego-Freespace-Information nicht wo, sondern verhindert nur Hypothesen, die „aus diesem Bereich entkommen“, solange das AUV zwischen der Wand und den vier Pfosten ist. Dennoch ist dies wertvolle Information genug, z. B. für ein sicheres Backup-Manöver und einen zweiten Versuch.

Vom Kontakt mit der Umgebung erhaltene Informationen

Die Schlüsselidee hier ist die Beobachtung, dass ein Kontakt mit der Umgebung sowohl die Geschwindigkeit als auch die Winkelgeschwindigkeit des AUV ändert und aus dem Verhältnis und dem Vorzeichen dieser Änderungen der Kontaktpunkt auf dem Rumpf bestimmt werden kann, ähnlich wie in unserer vorherigen Arbeit zu diesem Thema [17]. Dies kann als positive Information verwendet werden, dass das AUV eine Pose haben muss, bei der dieser Punkt auf dem Rumpf die Umgebung berührt (Abb. 2, unten/Mitte).

Diese Kontaktinformation ist in gewisser Weise komplementär zur Ego-Freespace-Information, denn die Ego-Freespace-Information schließt Hypothesen aus, bei denen es einen Kontakt geben sollte, der aber nicht beobachtet wurde, und die Kontaktinformation schließt Hypothesen ohne Kontakt aus, wenn einer beobachtet wurde.

Ableitung

Um die obige Behauptung zu sehen, beobachten wir, dass ein Kontakt mit einer Kraft f auf das AUV an einem Punkt p wirkt und aus den Gleichungen der Dynamik für frei schwebende Objekte erhalten wir

$$\dot{v} = m^{-1}f, \quad (1)$$

$$\dot{\omega} = I^{-1}(p \times f), \quad (2)$$

wo v und ω Geschwindigkeit und Winkelgeschwindigkeit sind, m ist die Masse des AUV und I seine Trägheitsmatrix, beide einschließlich der hinzugefügten Masse

aus der umgebenden Flüssigkeit. Es ist nützlich, (1) und (2) über die Dauer des Kontakts $[t_0 \dots t_1]$ (die natürlich bestimmt werden muss) zu integrieren:

$$\delta v = v(t_1) - v(t_0) = m^{-1} \int_{t=t_0}^{t_1} f(t) dt \quad (3)$$

$$\delta \omega = \omega(t_1) - \omega(t_0) \approx I^{-1} \left(p \times \int_{t=t_0}^{t_1} f(t) dt \right), \quad (4)$$

wo das \approx ist, weil sowohl p als auch I während der Kontaktperiode sich geringfügig ändern können. $\int_{t=t_0}^{t_1} f(t) dt$ ist der durch den Kontakt erzeugte Impuls und unbekannt, aber sowohl δv als auch $\delta \omega$ können aus dem IMU erhalten werden, indem der Beschleunigungsmesser integriert und der Unterschied des Gyrometers genommen wird. So haben wir

$$m^{-1} I \delta \omega = p \times \delta v. \quad (5)$$

Wenn die linke Seite von (5) orthogonal zu δv ist, beschreibt (5) eine Linie der Richtung δv im 3D-Raum. Diese Linie schneidet den Rumpf zweimal, unter der Annahme eines konvexen Rumpfes, wobei nur dieser Schnittpunkt möglich ist, an dem δv in das AUV zeigt, weil eine Kontaktkraft nur drücken, nicht ziehen kann.

Diese Argumentationslinie ist im Wesentlichen ähnlich dem Ansatz von Haidacher [11], um den Kontaktpunkt eines Roboterfingers aus Kraft-Drehmoment-Sensorablesungen zu schätzen, denn für ein frei schwebendes Fahrzeug entsprechen Kraft bzw. Drehmoment und Beschleunigung bzw. Winkelbeschleunigung.

Gültigkeit

Dieser Ansatz wirft mehrere Fragen auf: Ist das Signal vom Kontakt in den IMU-Lesungen klar genug, so dass ein Kontakt erkannt und segmentiert werden kann, um δv und $\delta \omega$ zu erhalten? Wie genau wird die Schätzung der Kontaktposition sein? Könnte die Kontaktkraft die Umgebung oder das AUV beschädigen?

Um diese Fragen zumindest vorläufig zu beantworten, haben wir eine kleine Simulationsstudie durchgeführt, die in Abb. 3 gezeigt wird. Das Ergebnis ist, dass der Ansatz machbar erscheint, aber nur für sehr kleine Geschwindigkeiten (0,05 m/s). Mit vernünftigen Parametern (einschließlich eines mit Gummi beschichteten Rumpfes, der eine Eindringtiefe von 1,5 mm zulässt) entstehen Kontaktkräfte von etwa 100 N und Beschleunigungen von 0,6 m/s², die das AUV nicht beschädigen sollten. Andererseits sind solche Beschleunigungen sowie $\delta \omega = 5^\circ/s$ deutlich mehr als Rauschen oder andere Störungen und sollten erkennbar sein, insbesondere da sie als Spitze mit nur etwa 0,1 s Dauer auftreten.

Für z. B. Felsen oder von Menschen geschaffene Stahlstrukturen scheinen 100 N nicht zu gefährlich zu sein. Natürlich gibt es Umgebungen, z. B. Korallenriffe, die einen Kontakt verbieten. Aber selbst dann scheint die Fähigkeit, Kontakte zu erkennen und zu bewerten, hilfreich zu sein, um kleine Unfälle zu erkennen und zu beheben, bevor sie zu großen Unfällen werden.

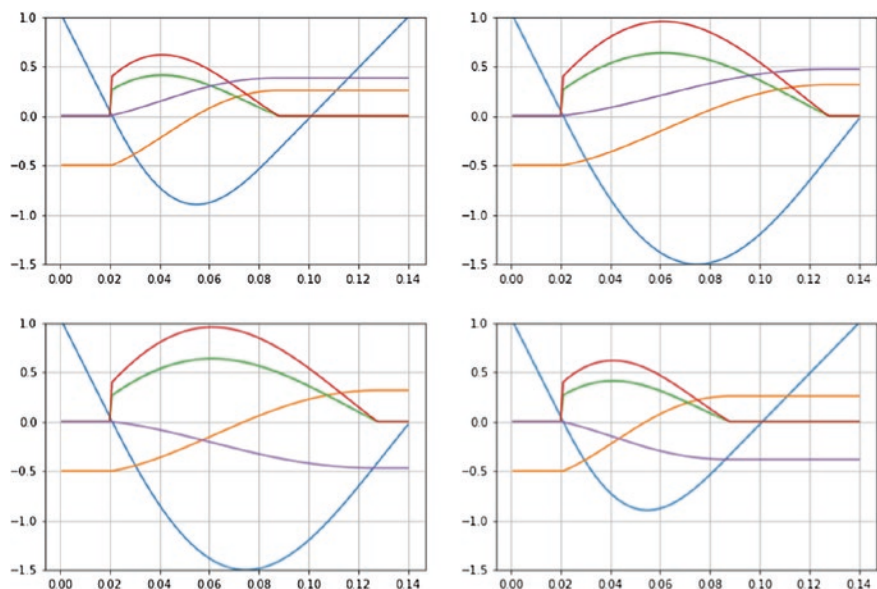


Abb. 3 Simulierter Kontakt zwischen einem AUV und der Umgebung an verschiedenen Positionen des Rumpfes (vorne 0,85 m, vorne/Mitte 0,425 m, hinten/Mitte -0,425 m, hinten -0,85 m von oben/links nach unten/rechts). Die 2D-Simulation basiert auf einem $0,3 \text{ m} \times 1,7 \text{ m}$ Zylinder mit 25 % zusätzlicher Masse und Trägheit, der seitwärts in negative Richtung bewegt wird und einen Kontakt mit 60 N/mm Elastizität und 800 Ns/m Dämpfung hat (z. B. ein gummi-beschichteter Rumpf). Die Kurven zeigen die Entfernung zum Kontakt (blau, mm, negativ bedeutet Eindringen), Geschwindigkeit v (orange, dm/s), Beschleunigung a (grün, m/s²), Winkelgeschwindigkeit ω (magenta, $\times 10^\circ/\text{s}$) und Kontaktkraft F (rot, $\times 100$ N) über die Zeit (s). Es ist zu sehen, dass sich der vordere und hintere Kontakt nur im Vorzeichen von ω unterscheiden. Eine positive Bewegung würde dazu führen, dass die Vorzeichen von sowohl a als auch ω umgekehrt werden. Im einfachen Modell setzt im Moment des Kontakts (0,02 s) die Dämpfungskraft des Gummirumpfes ein. Dies führt zur Diskontinuität in a und F .

Lokalisierung während der Manipulation

Die dritte Informationsquelle betrifft die spezielle Situation, in der das AUV etwas manipuliert (Abb. 2 unten/rechts). In solchen Situationen passiert es häufig, dass das AUV versucht, z. B. einen Griff zu drehen, aber in der Tat um den Griff herum schwenkt. Wenn dann die Lokalisierung verloren geht, z. B. weil ein Objekt sehr nahe an den vorausschauenden Sensoren ist, gerät die Situation außer Kontrolle.

Die Idee ist, wenn das System weiß, dass ein bestimmter Punkt relativ zum AUV (hier der Greifer) an einer festen Weltposition bleibt, weil er etwas gegriffen hat, kann die Position des AUV aus seiner Orientierung abgeleitet werden, die präzise von den Gyrometern verfügbar ist, und so ein starker Drift der Akzelerometer-Integration vermieden werden.

Eine solche Situation kann auf modellbasierter Weise mit einem Interacting Multiple Model Filter [3, §11.6.6] erkannt werden, bei dem ein Modus frei

schwebend (einschließlich Schub) ist und das andere um einen Punkt schwenkt, der bezüglich Welt und Roboter (oder alternativ Manipulator) fix ist. Der Filter würde ständig versuchen, die festeste Position zu schätzen, die am besten mit den IMU-Daten kompatibel ist, und beurteilen, ob sie kompatibel genug ist. Da Manipulationsbewegungen eher schnell sind, glauben wir, dass eine solche Situation des Schwenkens um einen Greifpunkt aus den IMU-Daten positiv identifiziert werden kann und dann, sobald sie identifiziert ist, weitere Drifts vermieden werden können.

Wasserstrom-Mapping

Eine besondere Herausforderung in begrenzten Unterwasserumgebungen sind Wasserströmungen. Während diese in offenem Wasser typischerweise über längere Skalen homogen sind, können Strömungen in begrenzten Umgebungen drastisch variieren und sogar turbulente Effekte können in Anwesenheit spezifischer statischer Umgebungsgeometrien auftreten. Unser Ziel ist es, die Wasserströmungen in der Umgebung des AUVs genau zu messen und eine vollständige Strömungskarte zu erstellen, die für eine verbesserte Fahrzeugsteuerung und sichere Wegplanung eingesetzt werden kann. Wir beabsichtigen, die Wasserströmungen hauptsächlich durch Vergleich der erwarteten AUV-Bewegung, unter Berücksichtigung der ausgegebenen Motorbefehle, mit der beobachteten Bewegung zu messen, die vom Ortungssystem gemessen wird. Dies kann ergänzt werden durch die Verwendung des DVL als Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP), der die Doppler-Verschiebung in akustischen Reflexionen von Partikeln in der Wasserströmung misst und somit ein Profil der Wassergeschwindigkeit entlang des DVL-Strahls ermöglicht.

Dieser Ansatz ist gut etabliert für die Strömungskartierung in offenen Gewässern und es gibt kommerzielle Produkte, z. B. [36]. Solche bestehenden Ansätze betrachten das AUV als punktförmiges Objekt und leiten die Wasserströmungen aus der 3D-linearen Geschwindigkeit ab. Dies ist eine gute Annäherung in offenen Gewässern aufgrund der homogenen Strömungen. In begrenzten Umgebungen kann jedoch die Ausdehnung des AUV nicht vernachlässigt werden, da die Strömungsableitung entlang des Rumpfes signifikant größer als null sein könnte. Daher beabsichtigen wir, die volle 6D-Geschwindigkeit, einschließlich der Winkelgeschwindigkeiten, zu verwenden, um differentielle Strömungsmessungen in Bezug auf den AUV-Rumpf zu erwerben.

Mit diesem Ansatz können die Wasserströmungen entlang des Pfades des AUV gemessen werden. Um ihre Verwendung in der Wegplanung zu ermöglichen, müssen wir sie jedoch auf den gesamten freien Raum, der kartiert wurde, extrapolieren. Hier planen wir einen zweistufigen Ansatz: Zuerst werden wir die von Band et al. entwickelte Simulation [2] erweitern, um Strömungskarten zu erstellen, wobei unsere Messungen als Einschränkungen einbezogen werden.

Zweitens werden wir auf den Simulationsergebnissen aufbauen, um ein tiefes neuronales Netzwerk als Strömungsschätzer zu trainieren. Obwohl wir erwarten, dass die Simulation genaue Schätzungen der Wasserströmungen auch für komplexe Umgebungsgeometrien liefert, ist dieser Ansatz aufgrund von Rechenbeschränkungen nicht in Echtzeit auf dem AUV ausführbar. Dies motiviert den Lernansatz, der voraussichtlich näherungsweise Ergebnisse liefert, jedoch mit geringeren Rechenanforderungen. Diese Schätzung geht in die Richtung unserer bisherigen Arbeiten zu diesem Thema mit nicht-stationären Gauß-Prozessen [27].

Autonome Erkundung

Eine kritische Fähigkeit eines AUV zur Navigation in begrenzten Umgebungen ist die autonome Erkundung, da selbst eine Kommunikation mit geringer Bandbreite mit einem Kontrollzentrum für längere Zeiträume blockiert sein kann. Unser Ziel ist es, alle Informationen, die mit den oben genannten Ansätzen gesammelt werden, in eine zuverlässige Erkundungsstrategie zu integrieren. Insbesondere glauben wir, dass es von Vorteil sein wird, absichtliche Kontakte mit der Umgebung zu nutzen, um die Sensorinformationen für unsichere Standorte während des SLAM-Prozesses zu ergänzen.

Eine herausfordernde Aufgabe dabei wird die Optimierung dieser absichtlichen Kontakte sein. Hier muss man die Zeit und Energie, die für den Kontakt benötigt wird, gegen den Informationsgewinn und zusätzlich gegen alternative explorative Manöver für die Kartierung mit den anderen Sensormodalitäten abwägen. Wir planen, auf unseren bisherigen Arbeiten in diesem Bereich aufzubauen [32], in denen wir eine optimale Strategie zur Auswahl von Landmarken entwickelt haben.

Darüber hinaus werden wir Sicherheitsaspekte des Erkundungsprozesses berücksichtigen, insbesondere die sichere Rückkehr des Fahrzeugs. Hier werden die Unsicherheit im Kartierungsprozess sowie die gesammelten Informationen über Wasserströmungen die Grundlage für die Bestimmung von Punkten für das Zurückverfolgen und den Rückkehrpunkt während der Mission bilden, und erweitern unsere bisherige Arbeit in der autonomen Robotererkundung [30].

Schlussfolgerung

In diesem Positionspapier haben wir verschiedene Ideen für die Unterwasserlokalisierung in begrenzten Räumen vorgeschlagen: Ego-Freespace, d. h. das AUV kann sich nicht in einer Pose befinden, in der es mit Hindernissen überlappen würde; Kontaktinformationen, bei denen der Kontaktpunkt aus IMU-Daten berechnet wird; modellbasierte Bewegungsinformationen im Falle einer Manipulation; die Schätzung von Wasserstromkarten und die aktive Erkundung

unter Verwendung der oben gesammelten Informationen. Wir glauben, dass das Ergebnis dieser Ideen vorteilhaft sein wird, um herausfordernde Aufgaben in begrenzten Unterwassermissionen zu bewältigen.

Literatur

1. Agarwal S, Mierle K et al Ceres solver. <http://ceres-solver.org>. Accessed 6/2018
2. Band S, Gissler C, Ihmsen M, Cornelis J, Peer A, Teschner M (2018) Pressure boundaries for implicit incompressible SPH. *ACM Trans Graph (TOG)* 37(2):14
3. Bar-Shalom Y, Li X, Kirubarajan T (2001) Estimation with applications to tracking and navigation. Wiley
4. Bryson M, Johnson-Roberson M, Pizarro O, Williams SB (2016) True color correction of autonomous underwater vehicle imagery. *J Field Robot* 33(6):853–874
5. Cadena C, Carlone L, Carrillo H, Latif Y, Scaramuzza D, Neira J, Reid I, Leonard JJ (2016) Past, present, and future of simultaneous localization and mapping: toward the robust-perception age. *IEEE Trans Robot* 32(6):1309–1332
6. Campos R, Garcia R, Alliez P, Yvinec M (2015) A surface reconstruction method for in-detail underwater 3d optical mapping. *Int J Robot Res* 34(1):64–89
7. Fairfield N, Kantor G, Jonak D, Wettergreen D (2008) DEPTHX autonomy software: Design and field results. Technical Report CMU-RI-TR-08-09, Carnegie Mellon University
8. Fox C, Evans M, Pearson M, Prescott T (2012) Tactile slam with a biomimetic whiskered robot. In: 2012 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA). IEEE, S 4925–4930
9. Fuentes-Pacheco J, Ruiz-Ascencio J, Rendón-Mancha JM (2015) Visual simultaneous localization and mapping: a survey. *Artif Intell Rev* 43(1):55–81
10. Goodall C, Carmichael S, Scannell B (2013) The battle between MEMS and fogs for precision guidance. Technical report MS-2432, Analog Devices, Inc. <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/tech-articles/The-Battle-Between-MEMS-and-FOGs-for-Precision-Guidance-MS-2432.pdf>
11. Haidacher S, Hirzinger G (2003) Estimating finger contact location and object pose from contact measurements in 3d grasping. In: IEEE international conference on robotics and automation. Proceedings, ICRA'03, vol 2. IEEE, S 1805–1810
12. Hertzberg C, Wagner R, Frese U, Schröder L (2013) Integrating generic sensor fusion algorithms with sound state representations through encapsulation of manifolds. *Inf Fusion* 14(1):57–77
13. Hidalgo-Carrio J, Babu A, Kirchner F (2014) Static forces weighted Jacobian motion models for improved Odometry. In: 2014 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems (IROS 2014). IEEE, S 169–175
14. Hildebrandt M, Gaudig C, Christensen L, Natarajan S, Paranhos P, Albiez J (2012) Two years of experiments with the AUV Dagon-a versatile vehicle for high precision visual mapping and algorithm evaluation. In: Proceedings of the 2012 IEEE/OES autonomous underwater vehicles (AUV), Southampton, UK, S 24–27
15. Johnson-Roberson M, Pizarro O, Williams SB, Mahon I (2010) Generation and visualization of large-scale three-dimensional reconstructions from underwater robotic surveys. *J Field Robot* 27(1):21–51
16. Kalyan TS, Zadeh PA, Staub-French S, Froese TM (2016) Construction quality assessment using 3d as-built models generated with project tango. *Procedia Eng* 145:1416–1423

17. Kollmitz M, Büscher D, Schubert T, Burgard W (2018) Whole-body sensory concept for compliant mobile robots. In: Proceedings of the IEEE international conference on robotics & automation (ICRA), Brisbane, Australia. <http://ais.informatik.uni-freiburg.de/publications/papers/kollmitz18icra.pdf>
18. Kümmerle R, Grisetti G, Strasdat H, Konolige K, Burgard W (2011) G²o: a general framework for graph optimization. In: 2011 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA). IEEE, S 3607–3613
19. Leonard JJ, Bahr A (2016) Autonomous underwater vehicle navigation. In: Springer handbook of ocean engineering (Chapter 14). Springer, S 341–358
20. Lewis D (1994) We, the navigators: the ancient art of landfinding in the Pacific. University of Hawaii Press
21. Mur-Artal R, Montiel JMM, Tardos JD (2015) ORB-SLAM: a versatile and accurate monocular slam system. IEEE Trans Robot 31(5):1147–1163
22. Newcombe RA, Lovegrove SJ, Davison AJ (2011) DTAM: dense tracking and mapping in real-time. In: 2011 IEEE international conference on computer vision (ICCV). IEEE, S 2320–2327
23. Nicosevici T, Gracias N, Negahdaripour S, Garcia R (2009) Efficient three-dimensional scene modeling and mosaicing. J Field Robot 26(10):759–788
24. Nortek group: New to subsea navigation? <https://www.nortekgroup.com/insight/nortek-wiki/new-to-subsea-navigation>. Accessed 12 Oct 2018
25. Pfingsthorn M, Birk A, Buelow H (2012) Uncertainty estimation for a 6-DoF spectral registration method as basis for sonar-based underwater 3d SLAM. In: 2012 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA). IEEE, S 3049–3054
26. Pizarro O, Eustice R, Singh H (2004) Large area 3d reconstructions from underwater surveys. In: MTS/IEEE OCEANS conference and exhibition. Citeseer, S 678–687
27. Plagemann C, Kersting K, Burgard W (2008) Nonstationary Gaussian process regression using point estimates of local smoothness. In: Proceedings of the European conference on machine learning (ECML), Antwerp, Belgium. <http://ais.informatik.uni-freiburg.de/publications/papers/plagemann08ecml.pdf>
28. Schwendner J, Joyeux S, Kirchner F (2014) Using embodied data for localization and mapping. J Field Robot 31(2):263–295
29. Sonardyne: Syrinx-doppler velocity log specifications. Technical report (2017). <https://www.sonardyne.com/product/syrinx-doppler-velocity-log/>
30. Stachniss C, Grisetti G, Burgard W (2005) Information gain-based exploration using rao-blackwellized particle filters. In: Robotics: science and systems, vol 2, S 65–72
31. Stolpmann A (2016) Innenraumfußgängererfolgung mit inertialsensoren und gebäudeplänen. Master's thesis, Universität Bremen. www.uni-bremen.de
32. Strasdat H, Stachniss C, Burgard W (2009) Which landmark is useful? learning selection policies for navigation in unknown environments. In: Proceedings of the IEEE international conference on robotics & automation (ICRA), Kobe, Japan. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2009.5152207>
33. Whelan T, Salas-Moreno RF, Glocker B, Davison AJ, Leutenegger S (2016) Elasticfusion: real-time dense slam and light source estimation. Int J Robot Res 35(14):1697–1716
34. Williams SB, Pizarro OR, Jakuba MV, Johnson CR, Barrett NS, Babcock RC, Kendrick GA, Steinberg PD, Heyward AJ, Doherty PJ et al (2012) Monitoring of benthic reference sites: using an autonomous underwater vehicle. IEEE Robot Autom Mag 19(1):73–84
35. Woodman O, Harle R (2008) Pedestrian localisation for indoor environments. In: Proceedings of the 10th international conference on ubiquitous computing. ACM, S 114–123
36. YSI: i3XO EcoMapper AUV. <https://www.ysi.com/ecomapper>. Accessed 14 Oct 2018

Verifizierung für autonome Unterwassersysteme



Christoph Lüth, Nicole Megow, Rolf Drechsler und Udo Frese

Zusammenfassung Da Unterwassersysteme oft autonom und über längere Zeiträume außerhalb der unmittelbaren Reichweite arbeiten, ist die Korrektheit sowohl der Software als auch der Hardware, die diese Systeme bilden, von großer Bedeutung. In diesem Beitrag überprüfen wir bestehende Techniken zur Sicherstellung der Korrektheit von Hardware und Software mit *formalen Methoden* und bewerten ihre Anwendbarkeit auf Unterwasserrobotik. Wir identifizieren mehrere vielversprechende Bereiche: Systemmodellierung, Programmverifikation und Algorithmusdesign für garantierte Effizienz und Korrektheit (zertifizierende Algorithmen).

Einführung

Unterwassersysteme arbeiten mit begrenztem Internetzugang, schlechter Kommunikation und außerhalb der unmittelbaren Reichweite, meist in einer sehr gefährlichen und widrigen Umgebung. Wenn etwas schiefgeht, wird es schwer sein, es von außen zu reparieren, daher müssen wir sicherstellen, dass das System unter allen Umständen korrekt funktioniert.

C. Lüth (✉) · R. Drechsler · U. Frese
DFKI GmbH und Universität Bremen, Bremen, Deutschland
E-Mail: christoph.lueth@dfki.de

R. Drechsler
E-Mail: rolf.drechsler@dfki.de

U. Frese
E-Mail: ufrese@informatik.uni-bremen.de

N. Megow
University of Bremen, Bremen, Deutschland
E-Mail: nicole.megow@uni-bremen.de

Es gibt eine reiche Werkzeugpalette von Methoden, die zur Erreichung dieses Ziels eingesetzt werden können. Viele dieser Methoden basieren auf mathematischen Vorstellungen von Korrektheit und Beweis (bezeichnet als *formale Methoden*), und wir werden ihre Anwendbarkeit auf Robotik und Unterwasserrobotik im Folgenden überprüfen.

Zunächst müssen wir den Begriff „unter allen Umständen korrekt arbeiten“ genauer definieren. Dies könnte bedeuten, dass wir spezifizieren, wie sich der Unterwasserroboter verhält und was er tut; zum Beispiel könnten wir festlegen, dass der Roboter niemals eine bestimmte Geschwindigkeitsgrenze überschreitet oder niemals auf ein Hindernis trifft. Die Sicherstellung, dass der Roboter (und die Implementierung der Robotersteuerungssoftware) diese Eigenschaften erfüllt, wird als *Verifikation* bezeichnet. Um in der Lage zu sein, zu überprüfen, dass ein System korrekt funktioniert, müssen wir in der Lage sein, die Eigenschaften unseres Systems formal zu formulieren. Dies erfordert eine formale Beschreibung des Systems, seiner Umgebung und wie das System sich verhalten sollte. Diese formale Beschreibung wird als *Modell* bezeichnet und ist die Grundlage für die formale Verifikation.

In diesem Kapitel überprüfen wir zunächst die Grundlagen der Systemmodellierung und Verifikation sowohl von Hardware als auch von Software und betrachten dann, wie man Algorithmen entwerfen kann, die verifiziert werden können. Als Fallstudie zur Verifikation in der Robotik berichten wir über frühere Arbeiten an einem Steuerungsalgorithmus für autonome Roboter. Die Schlussfolgerungen diskutieren weitere Anwendungen.

Modellierung des Systems

Die Verifikation beginnt mit einem formalen Modell des Systems, das das korrekte (gewünschte) Verhalten unabhängig von der tatsächlichen Implementierung beschreibt. Wir können entweder Code aus diesem Modell generieren und ein System erhalten, das von Design her korrekt ist, oder wir können das System implementieren und das korrekte Verhalten danach überprüfen.

Zur Modellierung des Systems wurde eine Vielzahl von Modellierungssprachen entwickelt. Die meisten von ihnen sind – wenn nicht syntaktisch, dann konzeptionell – unter der Unified Modelling Language (UML) zusammengefasst. Ein Profil von UML namens SysML ist besonders auf die Systementwicklung zugeschnitten und daher in diesem Kontext sehr geeignet, daher werden wir es im Folgenden betrachten.

SysML ermöglicht es, die Struktur und das Verhalten des Systems mit acht verschiedenen Arten von Diagrammen zu beschreiben. Wichtig ist, dass SysML das gesamte *System* und nicht nur den Softwareaspekt beschreibt. Für ein autonomes Unterwasserfahrzeug (AUV) könnte die Struktur beispielsweise darin bestehen, dass wir zwei Kameras für die Bilderkennung, einen Motor für den Antrieb, ein Ruder für Manöver und den Hauptcontroller haben. Diese Zerlegung kann durch

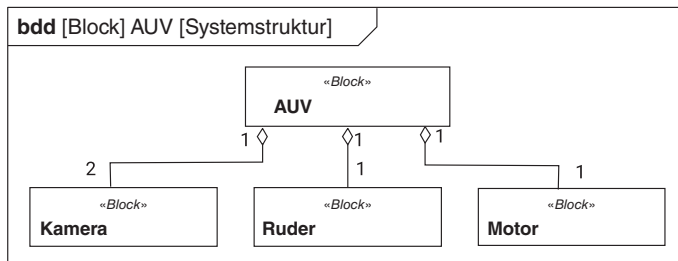


Abb. 1 Systemarchitektur eines autonomen Unterwasserfahrzeugs

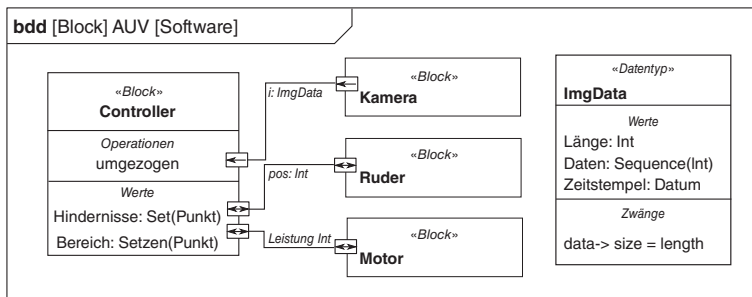


Abb. 2 Struktur des Hauptcontrollers für das AUV

ein Blockdefinitionsdiagramm (BDD; das wichtigste Strukturdiagramm in SysML, vergleichbar mit dem Klassendiagramm in UML) wie in Abb. 1 beschrieben werden. Wir können fortfahren und die Struktur der Software des Hauptcontrollers (Abb. 2) beschreiben: Sie bietet eine Operation *move()* zur Erzeugung der Lenkbefehle und ist mit den Kameras, dem Ruder und dem Motor verbunden. Die Verbindung wird durch SysML-Ports modelliert, die durch ein Bussystem (USB, Can-Bus) oder eine direkte (serielle) Verbindung implementiert werden können; das Diagramm spezifiziert das nicht, es spezifiziert nur die ausgetauschten Informationen und die Richtung: Die Kamera sendet Blöcke von *ImgData*, und Ruder und Motor senden und empfangen die Ruderposition und das Motorleistungsniveau. Die Struktur der *ImgData* wird weiter spezifiziert: Es handelt sich um einen Block mit einem Längenfeld, einer Sequenz von Rohbilddaten genau dieser Länge und einem Zeitstempel.

Die auf diese Weise beschriebene Struktur ist größtenteils statisch. Um Eigenschaften ihres dynamischen Verhaltens zu spezifizieren, verwenden wir die Object Constraint Language (OCL). OCL ermöglicht es uns, *Invarianten* und *Vor- und Nachbedingungen* zu formulieren, die die Operationen erfüllen müssen. Um unser laufendes Beispiel aufzugreifen, wollen wir spezifizieren, dass das AUV niemals auf Hindernisse trifft. Der Controller hat zwei Attribute, *obstacles* und *area*, beide enthalten Mengen von Punkten, die die erkannten Hindernisse und den Bereich im Raum darstellen, der derzeit vom AUV abgedeckt wird. (Wie diese berechnet werden, ist nicht spezifiziert.) In OCL wird die Sicherheitsinvariante so formuliert:

Kontext Controller

inv safe : self . obstacles->for All (o | not self . area-> contains(o))

Sie besagt, dass kein Hindernispunkt in diesem Bereich liegt. Wir könnten dies auch folgendermaßen formulieren, indem wir angeben, dass die beiden Mengen sich nicht überschneiden:

Kontext Controller

inv safe: area→intersection(obstacles)→isEmpty()

Diese Invariante würde eine Beweispflicht für die Implementierung aller Methoden des Controllers mit sich bringen, dass die Invariante erhalten bleibt; und das würde bedeuten, dass das AUV niemals auf erkannte Hindernisse trifft.

Um das dynamische Verhalten im Detail zu spezifizieren, können wir Aktivitätsdiagramme oder Zustandsmaschinendiagramme verwenden. Aktivitätsdiagramme sind Flussdiagramme, erweitert mit Elementen zur Modellierung von parallelen und verteilten Systemen. Zustandsmaschinendiagramme (in der UML als Zustandsdiagramme bezeichnet) sind eine Notation zur Beschreibung hierarchischer Zustandsmaschinen. Beide Diagramme haben den Vorteil, dass wir ihnen eine formale Semantik geben können und so Eigenschaften auf dieser Ebene nachweisen können (z. B. Abwesenheit von Deadlocks) und dass wir Code aus ihnen generieren können, der automatisch die auf der abstrakteren Ebene des Diagramms nachgewiesenen Eigenschaften erfüllt. Dies kann jedoch eine recht umständliche Art sein, komplexere Algorithmen zu beschreiben.

Wir haben die Struktur und das dynamische Verhalten des Systems beschrieben. Nun stellt sich die Frage, wie wir es sowohl auf der Hardware- als auch auf der Softwareebene verifizieren können.

Hardware-Verifikation

Der Hauptunterschied zwischen der Verifikation von Hardware und Software besteht darin, dass Hardware nach der Produktion nicht mehr geändert werden kann, daher muss sie vor der Produktion verifiziert werden. Daher besteht in der Hardwareindustrie ein weit größeres Interesse an der Verifikation als in der Softwareindustrie, und es stehen entsprechend mehr und ausgereifere Werkzeuge zur Verfügung.

Der Nachweis der Korrektheit von Hardwarekomponenten ist ein etabliertes Gebiet der Informatik, bei dem viele Methoden eingesetzt werden, um zu beweisen, dass ein System wie beabsichtigt funktioniert. Diese Methoden zur elektronischen Designautomatisierung (EDA) können in drei Kategorien unterteilt werden.

Bei der *Simulation* (siehe z. B. [13]) werden die Eingänge des Systems explizit zugewiesen und durch ein Modell des Systems propagiert. Danach werden die Ausgänge mit den erwarteten Werten verglichen. Diese Technik ist sehr ausgereift und wird von allen großen EDA-Unternehmen gut unterstützt. Die Simulation ist einfach anzuwenden und eine sehr intuitive Methode mit geringer Rechenkomplexität. Eine erschöpfende Anwendung von Eingabemustern ist jedoch praktisch nicht durchführbar und daher kann mit der Simulation für aktuelle Systeme keine ausreichende Abdeckung erreicht werden. Folglich wird die Simulation in der Regel nur angewendet, um spezifische Szenarien abzudecken, die als besonders kritisch angesehen werden.

Die *Emulation* (siehe z. B. [11]) realisiert die Simulation direkt in einer prototypischen Implementierung des gewünschten Chips und nutzt dabei die Rechenleistung der Hardware. EDA-Tool-Anbieter bieten auch in diesem Bereich gute Unterstützung. Die Emulation kann angewendet werden, sobald eine prototypische Implementierung der Systemfunktionalität z. B. auf einer dedizierten Hardware (wie einem Prozessor) oder einem programmierbaren Hardwaregerät verfügbar ist. Obwohl dies eine Beschleunigung um mehrere Größenordnungen ermöglicht, hat eine erschöpfende Emulation das gleiche Problem wie bei der Simulation, d. h. eine 100 %ige Abdeckung kann in der Regel nicht mit dieser Methode erreicht werden.

Schließlich betrachtet die *formale Verifikation* (siehe z. B. [12]) das Problem mathematisch, indem sie sowohl die Spezifikation als auch den Schaltkreis als logische Formel modelliert und beweist, dass ein Chip korrekt ist, indem sie ausgefeilte Lösungssoftware und Beweismethoden verwendet. Dies garantiert 100 % funktionale Korrektheit, aber die Skalierbarkeit bleibt ein Problem; die formale Verifikation kann heute nur auf eher kleine Schaltkreise und Systeme angewendet werden.

Alle Verifikationsmethoden leiden unter der Komplexität des Problems, so dass entweder die Funktionalität des Systems nicht vollständig verifiziert wird, oder die Verifikation viel Aufwand erfordert. Für Standardkomponenten (wie Mikrocontroller) sind verifizierte Versionen verfügbar (zertifiziert für den Einsatz bis zu einem bestimmten Sicherheitsintegritätsniveau), aber für in kleinen Mengen produzierte oder kundenspezifische Hardware wie FPGAs ist dies nicht der Fall.

Hier weist eine jüngste eigene Arbeit auf das Paradigma der Selbstverifikation hin, bei dem ein System seine eigene Funktionalität im Feld nach der Bereitstellung überprüft. Dies ermöglicht der Verifikation mehr Zeit und insbesondere mehr Informationen, da sie den Betriebskontext berücksichtigen kann. Erste Ergebnisse deuten darauf hin, dass auf diese Weise Systeme, die bisher nicht verifizierbar waren, nun als korrekt nachgewiesen werden können [16, 24].

Programmverifikation

Der Nachweis der Korrektheit von Programmen geht auf Alan Turing zurück, wobei die bahnbrechenden Arbeiten von Hoare und Floyd das Feld begründeten. Ursprünglich wurde die Korrektheit von Programmen als *Hoare-Triple* $\{P\} c \{Q\}$ spezifiziert, wobei P und Q Zustandsprädikate und c das Programm sind. Neuere Ansätze bevorzugen eine einheitliche Vorstellung, bei der wir ein Prädikat über zwei Zustände haben, von denen einer der Zustand vor und der andere der Zustand nach dem Lauf des Programms c ist. Um zu überprüfen, dass ein Programm diese Korrektheitsbedingungen erfüllt, können wir entweder die Berechnung des Programms symbolisch beschreiben (Vorwärtsdenken) oder Regeln anwenden, die die Korrektheitsbedingung auf eine Tautologie reduzieren (Rückwärtsdenken). Sowohl das Vorwärts- als auch das Rückwärtsdenken erfordern, dass die Schleifen manuell mit *Invarianten* annotiert werden; sie reduzieren ein Programm, das mit Korrektheitsbedingungen und Invarianten annotiert ist, auf eine Menge von zustandsfreien Aussagen, die als *Verifikationsbedingungen* bezeichnet werden und die bewiesen werden müssen, um zu zeigen, dass das Programm korrekt ist.

Verifikationsbedingungen sind größtenteils trivial und leicht zu beweisen, daher wurden in jüngster Zeit automatisierte Beweistechniken (einschließlich vollautomatischer Beweiser und interaktiver Theorembeweiser) zur Programmverifikation eingesetzt, um die großen und größtenteils technischen Beweise zu bewältigen. Diese Ansätze annotieren den Quellcode:

```
/* @
erfordert \ gültig ( out ) && \ array ( ps , ps_len )
stellt sicher \ forall int i ; 0 < i < ps_len =*
out->x < ps[ i ].x &&
( out->x = ps[ i ].x =* out->y ≤ ps [ i ] . y )
weist out->x , out->y zu
*/
void select_min_xy( Punkt *ps , int ps_len , Punkt *out ) ;
```

Die Annotation spezifiziert das Verhalten der Funktion `select_min_xy` als Vertrag: Die Vorbedingung verlangt, dass `out` ein gültiger Zeiger ist (d. h. auf einen Ort zeigt, von dem ein Punkt gelesen werden kann) und dass `ps` ein Array der Länge `ps_len` ist (d. h. `ps + i` ist ein gültiger Zeiger für $i = 0, \dots, n - 1$); und die Nachbedingung stellt sicher, dass die x -Komponente des in `out` zurückgegebenen Punktes kleiner oder gleich allen x -Komponenten der Punkte in `ps` ist und dass seine y -Komponente kleiner ist als die y -Komponente eines beliebigen dieser Punkte in `ps`, bei denen die x -Komponente gleich ist; geometrisch spezifiziert dies, dass `out` der linke unterste Punkt in `ps` ist.¹ Die Spezifikation gibt

¹In der oben genannten Form fehlt allerdings die Anforderung, dass `out` tatsächlich einer der Punkte in `ps` ist.

auch an, dass sie nur die x- und y-Komponenten von `out` modifiziert (zuweist); dies wird als Rahmenbedingung bezeichnet (und ist in C wichtig, weil wir sonst nicht sicher sein können, dass die Funktion nicht andere Teile des globalen Zustands ändert).

Tools wie Frama-C/Why3, VCC/Boogie oder das SAMS-Tool [17] reduzieren solche Annotationen auf Verifikationsbedingungen, die dann mit automatischen oder interaktiven Theorembeweisern entlastet werden. Erfolgsgeschichten dieses Ansatzes beinhalten die Verifikation eines Hypervisors, eines C-Compilers [15] oder eines Betriebssystemkernels [10]. In einer jüngsten eigenen Arbeit haben wir einen Steuerungsalgorithmus für einen autonomen Roboter formal verifiziert, den wir im Abschn. „[Eine Fallstudie zur Verifikation von Robotik-Algorithmen](#)“ im Detail betrachten.

Algorithmen entwerfen

In der Praxis können die in dem vorherigen Abschnitt überprüften Programmbestätigungstechniken mittelgroße Programme bewältigen. Aber in einem typischen AUV benötigen wir möglicherweise komplexe Algorithmen in einer sicherheitskritischen Funktion; z. B. für die Routenplanung müssen wir garantieren, dass das AUV immer in der Lage ist, zu seiner Ladestation zurückzukehren und nicht antriebslos auf See (oder unter Wasser) treibt. Die meisten solcher relevanten Probleme sind rechnerisch *unlösbar*, das heißt, wir können nicht erwarten, effizient optimale Lösungen zu finden (in polynomialer Laufzeit), wenn $P \neq NP$, was eine weit verbreitete Annahme in der Komplexitätstheorie ist. Da Effizienz bei Unterwasseranwendungen mit stark begrenzten Rechenressourcen entscheidend ist, müssen wir auf suboptimale Lösungen mit mathematischen Garantien, im engsten Sinne Worst-Case-Garantien, über die Lösungsqualität zurückgreifen.

Solche Algorithmen können ziemlich ausgefeilt sein und daher nicht leicht zugänglich für formale Überprüfung. Ohne sie gibt es keine *Garantie*, dass sie in allen Fällen die richtige Lösung liefern; Algorithmusdesign bietet eine Lösungsmethode als Blackbox ohne Garantie, dass eine Lösung korrekt ist. Um die Komplexität des Verifizierungsproblems zu reduzieren, benötigen wir eine Trennung der Aufgaben. Es ist sehr komplex (und erfordert überpolynomiale Zeit), nach einer Lösung zu suchen, aber es gibt effiziente (polynomiale) Methoden, um die Richtigkeit einer gegebenen Lösung zu überprüfen. Um komplexe Algorithmen zu verifizieren, machen wir Folgendes: Anstatt die Suche nach einer Lösung zu verifizieren, überprüfen wir die gefundene Lösung und verifizieren das Überprüfungsverfahren (das weniger komplex ist als die Suche und daher einfacher zu implementieren und zu verifizieren). Dies stellt eine zusätzliche Aufgabe für Algorithmusdesigner dar, da sie nicht nur einen Algorithmus zur Suche nach einer Lösung entwerfen müssen, sondern auch einen Weg, um die Richtigkeit der Lösung zu überprüfen. Diese Algorithmen werden *zertifizierende Algorithmen* genannt.

Algorithmen mit harten Worst-Case-Garantien

Worst-Case-Garantien sind das strengste Maß für die Leistung eines Algorithmus. Hier fragen wir nach der maximalen relativen Abweichung der Lösung eines Algorithmus von einer optimalen Lösung über alle (möglicherweise unendlich viele) machbaren Eingabeinstanzen. In einem AUV scheint eine solche starke Leistungsanforderung entscheidend zu sein, um die Funktion zu garantieren.

Das Forschungsgebiet der *effizienten* und *Approximationsalgorithmen* bietet leistungsstarke und effiziente Methoden mit harten Worst-Case-Garantien für verschiedene Probleme, die für Unterwassersysteme relevant sind, wie Scheduling, Matching, Ressourcenmanagement sowie Routing und Exploration. Wir haben zur Entwicklung solcher Algorithmen auch im Kontext unsicherer Eingabeparameter beigetragen, z. B. Online- und stochastisches Scheduling [7, 8, 21], periodisches und Echtzeit-Scheduling [5, 6] und Routing- und Exploration-Algorithmen [19, 20].

In den letzten zwei Jahrzehnten wurde das Energie- und Temperaturmanagement zu einer wichtigen Designbeschränkung für moderne Rechenggeräte. Dies motivierte insbesondere Forschungen zur Geschwindigkeitsskalierung (oder Frequenz-/Spannungsskalierung) als Haupttechnik für das Energiemanagement. Die Forschungsrichtung zur Planung mit dynamischer Geschwindigkeitskalierung wurde von Yao et al. [28] eingeleitet und Arbeiten zur Planung mit harten Fristbeschränkungen mit dem Ziel der Minimierung des Energieverbrauchs folgten, siehe [1, 9] für einen Überblick. Aber auch andere Planungsziele wie die Minimierung der maximalen Last oder der durchschnittlichen Auftragsabschlusszeiten wurden unter dem Aspekt der Energie untersucht [3, 22].

Zertifizierende Algorithmen

Ein *zertifizierender Algorithmus* ist ein Algorithmus, der mit jeder Ausgabe ein Zertifikat oder einen Nachweis erzeugt, dass die jeweilige Ausgabe korrekt ist; siehe [2] für eine Einführung. Durch die Inspektion (Überprüfung) des Nachweises kann der Benutzer überprüfen, ob die Ausgabe korrekt ist, oder die Ausgabe als fehlerhaft ablehnen. Das Überprüfungsverfahren sollte um Größenordnungen einfacher sein als der Algorithmus, der den Nachweis produziert, und ist daher viel besser für Verifizierungstechniken geeignet.

Mathematisch gesehen, besteht die zertifizierende Algorithmusversion dieses Algorithmus – bei gegebenem Algorithmus, der eine Funktion $f : X \rightarrow Y$ berechnet – aus einer Funktion $f_c : X \rightarrow Y \times W$, zusammen mit einer Überprüfungsfunktion $c : X \times Y \times W \rightarrow \text{Bool}$, so dass f_c das gleiche Ergebnis wie f berechnet, und die Überprüfungsfunktion wahr ist, wenn das Ergebnis korrekt ist, d. h. wenn $f_c(x) = (y, w)$ und $c(x, y, w)$, dann $f(x) = y$.

Der Benutzer ist nicht mehr auf das Programm als Blackbox angewiesen, sondern kann überprüfen, ob die Lösung korrekt ist. Zertifizierende Algorithmen

wurden von Blum und Kannan [4] vorgeschlagen. Mehr als 100 zertifizierende Algorithmen sind bekannt (siehe die Übersicht [18]) und viele Lehrbuchalgorithmen wurden implementiert, z. B. in LEDA, einer Bibliothek von effizienten Datentypen und Algorithmen [14].

Beispiel: Suche nach geometrischen Ebenen

Als Beispiel aus der Robotikanwendung betrachten wir das Problem, den Boden in den Messungen eines 3D-Lidar-Sensors zu finden. Wir können dieses Problem mathematisch umformulieren: gegeben eine Menge $M \subseteq \mathbb{R}^3$ von Punkten (die Messungen des Lidar-Sensors), finden Sie eine Ebene $\theta(\mathbf{n}, d)$ gegeben durch einen Normalvektor \mathbf{n} und einen Abstand $d \in \mathbb{R}$ zum Ursprung, so dass mindestens ρ Punkte einen Abstand von weniger als δ von dieser Ebene haben:

$$\#\{P \mid P \in M, |\mathbf{n} \cdot P - d| \leq \delta\} \geq \rho \quad (1)$$

Wobei $\#X$ die Kardinalität der Menge X ist. Das Problem besteht darin, dass wir die Ebene und die Teilmenge der Messpunkte, die potenziell zu dieser Ebene gehören, gleichzeitig bestimmen müssen. Ein gängiger Ansatz für Probleme wie dieses sind Erwartungsmaximierungsalgorithmen: Wir beginnen mit einer ersten Schätzung und iterieren zwei Verfeinerungsschritte, die bestimmen, welche Punkte zur aktuellen Vermutung für eine Ebene gehören (d. h., welche Punkte einen Abstand von weniger als δ zur Ebene haben), und welche Ebene die Anzahl der Punkte maximiert, die zu ihr gehören. Der Algorithmus basiert auf einem probabilistischen Modell, bei dem die gemessenen Punkte normal um die tatsächliche Ebene (die der EM-Algorithmus bestimmt) verteilt sind; die Argumentation, dass er eine Ebene produziert, die (1) erfüllt, verwendet ziemlich ausgefeiltes stochastisches Argumentieren [27].

Im Gegensatz dazu ist Gleichung (1) für eine Menge von Punkten leicht zu überprüfen, wenn eine Ebene (\mathbf{n}, d) gegeben ist – wir gehen einfach durch die Punkte P in M und berechnen den Abstand $\mathbf{n} \cdot P$. Dies ist unser Überprüfungsverfahren, und der Nachweis wird durch die Ebene gegeben.

Eine Fallstudie zur Überprüfung von Robotik-Algorithmen

Als Fallstudie betrachten wir unsere eigene frühere Arbeit am SAMS-Projekt [26] (Sicherheitskomponente für autonome mobile Systeme). Das Projekt hat die C-Implementierung eines Kollisionsvermeidungsalgorithmus für ein autonomes Bodenfahrzeug mit dem interaktiven Theorembeweiser *Isabelle* in höherer Logik formal verifiziert [23]. Auf der Grundlage dieses Beweises wurde die Implementierung von TÜV-Süd nach EN 61508-SIL 3 zertifiziert.

Abb. 3 zeigt die Sicherheitsfunktionalität, die der Algorithmus bietet. Er nimmt als Eingabe die Geschwindigkeit v und die Winkelgeschwindigkeit ω des Fahrzeugs, angegeben mit Unsicherheit als Intervall $[v_{\min} \dots v_{\max}]$ und $[\omega_{\min} \dots \omega_{\max}]$. Die Ausgabe ist die Sicherheitszone (grün) als ein Array von Abständen in



Abb. 3 Der SAMS-Demonstrator fährt eine Rechtskurve und die kollisionsfreie Sicherheitszone dieser Bewegung. Wenn es ein Hindernis in der Sicherheitszone gäbe, würde das AGV (Autonomous Ground Vehicle) stoppen. Die Eingabe für den Algorithmus ist die Geschwindigkeit und Winkelgeschwindigkeit (gelber Pfeil), angegeben mit Unsicherheit durch Intervalle. Die Ausgabe ist die Sicherheitszone (grün) als Array von Abständen in verschiedene Richtungen relativ zum Fahrzeug. Grafiken von [26]

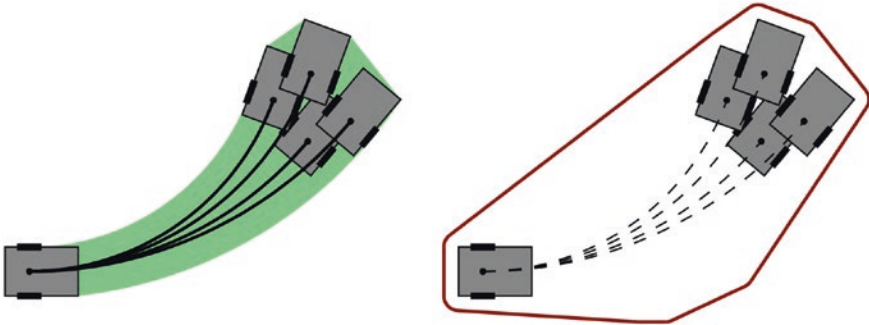


Abb. 4 Zentraler Schritt des SAMS-Algorithmus [26]: Die Sicherheitszone muss alle Punkte des Fahrzeugs zu jedem Zeitpunkt (während des Bremsens) für jede Geschwindigkeit v und Winkelgeschwindigkeit ω im Eingabeintervall $[v_{\min} \dots v_{\max}]$ und $[\omega_{\min} \dots \omega_{\max}]$ abdecken. Für diese Vereinigung (grün) wird ein begrenzendes Polygon (rot) berechnet als die konvexe Hülle der vier Extremfälle $(v_{\min}, \omega_{\min})$, $(v_{\min}, \omega_{\max})$, $(v_{\max}, \omega_{\min})$, $(v_{\max}, \omega_{\max})$ (grau) und Hinzufügen eines Puffers, der die Nichtlinearitäten in den Kreisbewegungsgleichungen begrenzt

verschiedenen Richtungen relativ zum Fahrzeug. Dieses Array kann direkt mit den Lidar-Distanzsensor-Lesungen verglichen werden, wobei das Fahrzeug gestoppt wird, wenn der Abstand unter dem liegt, der die Sicherheitszone repräsentiert. Abb. 4 zeigt den zentralen Schritt der Berechnung.

Wir haben formal bewiesen, dass folgende Sicherheitsaussage gilt: Wenn das Fahrzeug eine wahre Geschwindigkeit v und Winkelgeschwindigkeit ω innerhalb der entsprechenden Eingabeintervalle hat und es im nächsten Zyklus zu bremsen beginnt, wird sein gesamter Körper innerhalb der berechneten Sicherheitszone bleiben. Dies bedeutet wiederum, dass das Fahrzeug weiterfahren kann, wenn die Sicherheitszone frei ist. Die Sicherheitsaussage basiert natürlich auf physikalischen Annahmen über das Bremsverhalten des Fahrzeugs.

Begegnung mit Herausforderungen

Der Beweis enthält eine Reihe von Herausforderungen, die wir innerhalb von Robotik-Software für typisch halten:

- *Pointer-Aliasing*: Wie viele imperative Programmiersprachen, erlaubt C, dass verschiedene Namen auf denselben Speicherort verweisen. Daher ist es nicht trivial zu folgern, dass nach einer Zuweisung alles andere unverändert bleibt. Ein großer Teil des Beweises bezüglich der Implementierung war das Ableiten dieser Art von Rahmenbedingungen.
- *Unsicherheit*: Gemessene Größen sind immer unsicher, was berücksichtigt werden muss; im SAMS-Beispiel als Intervalle möglicher Werte.
- *Geometrie und Physik*: Robotik-Algorithmen behandeln oft geometrische oder physikalische Fragen und deren Korrektheit zu beweisen erfordert wesentliche Domänensätze. Zum Beispiel war für SAMS eine Theorie von konvexen Mengen und von starren Körpertransformationen erforderlich.
- *Domänensätze*: Oft reduzieren sich geometrische und physikalische Überlegungen auf abgeleitete Domänensätze. Das Beweisen dieser in einem Theorembeweiser kann sehr mühsam sein; selbst für Berechnungen, die für einen menschlichen Ingenieur einfach aussehen. Ein Beispiel für SAMS ist eine Formel, die eine Grenze für den Abstand zwischen der konvexen Hülle der vier extremen (v, ω) in Abb. 4 und der wahren gekrümmten Menge, die aus allen (v, ω) entsteht. Im Wesentlichen handelt es sich um eine Grenze für den Unterschied zwischen einer nichtlinearen Funktion und einem Liniensegment, das zwei Punkte auf der Funktion verbindet.

Um diesen Herausforderungen zu begegnen, haben wir den interaktiven Theorembeweiser *Isabelle* verwendet, bei dem der Benutzer Beweisskripte schreiben muss, die Sequenzen von Beweistaktiken anwenden. Die Entwicklung dieser Skripte dauerte 30 Personenmonate, was erheblich ist. Allerdings wurde viel Zeit für die eher mühsamen Abschnitte benötigt, insbesondere in Bezug auf Pointer-Aliasing und Formeln. Dies könnte in Zukunft durch die Entwicklung spezialisierter Beweistaktiken für diese Aufgabe verbessert werden. Wir sollten jedoch darauf hinweisen, dass der Hauptgrund für diese Herausforderungen darin besteht, dass dieser formale Ansatz keine Abkürzungen zulässt; jeder einzelne Fall und jede Annahme müssen berücksichtigt werden. Dieses hohe Detailniveau führt zu mehr Arbeit, aber auch zu einem weit höheren Vertrauen in die Ergebnisse.

Weitere Herausforderungen

Obwohl der gewählte Algorithmus ein realistisches, nicht triviales Beispiel ist, enthält typische Robotik-Software mehrere Herausforderungen, die dort nicht aufgetreten sind:

- *Endliche Präzision:* `int` und `float` wurden zu \mathbb{Z} und \mathbb{R} abstrahiert, so dass der Beweis den Überlauf und die Gleitkommaarithmetik, zwei besonders schwierige Herausforderungen, nicht abdeckt. Während Überläufe größtenteils automatisch mit abstrakter Interpretation behandelt werden können, ist die Gleitkommaarithmetik tückischer.
- *Größe:* Mit 2804 Codezeilen ist der Algorithmus klein für Robotik-Standards.
- *Lernen:* Uns ist nicht bekannt, dass es Ansätze gibt, wie man Algorithmen, die auf maschinellem Lernen oder neuronalen Netzen basieren, formal verifizieren kann.
- *Nicht formalisierbare Aufgaben:* Es gibt viele Aufgaben in der Robotik, die *eo ipso* nicht formalisierbar sind. Das wichtigste Beispiel ist die Objekterkennung in Bildern, bei der die Hauptaufgabe darin besteht, dass wir nicht mathematisch definieren können, wie ein gegebenes Objekt im Bild erscheinen wird.

Schlussfolgerung: Verifikation in der Unterwasserrobotik

Ausgangspunkt unserer Überlegungen war, dass Verifikation und harte Garantien für die Unterwasserrobotik von entscheidender Bedeutung sind. Glücklicherweise stehen uns, wie wir oben gezeigt haben, viele Methoden und Werkzeuge zur Verfügung, die uns bei unseren Bemühungen zu unterstützen.

Aber die Verifikation kann nie die ganze Geschichte sein – wir müssen auch sicherstellen, dass die Spezifikation selbst korrekt und angemessen ist. Dieses Problem wird als *Validierung* bezeichnet und ergänzt die Verifikation. Wie haben wir zum Beispiel mögliche Hindernisse spezifiziert? Es muss eine Mindestgröße für ein Hindernis geben, sonst könnte jedes winzige Stück Seegras ein unüberwindbares Hindernis darstellen. Darüber hinaus muss die Spezifikation von Hindernissen die Sensoren ergänzen, die zur Erkennung verwendet werden. Lidar-Sensoren messen zum Beispiel Punktwolken. Wenn wir Hindernisse einfach als Punktwolke spezifizieren, dann ist es einfach, die Erkennung mit einem Lidar-Scanner zu implementieren, aber die Spezifikation einer Mindesthindernisgröße ist nicht trivial.

Daher schreiben typische Prozessmodelle für die Entwicklung sicherheitskritischer Systeme einen strukturierten Prozess vor, der mit einer Liste von Sicherheitsanforderungen beginnt, die auf Spezifikationen auf Modulebene und Funktionsebene heruntergebrochen werden, bevor sie implementiert werden, und ergänzt durch einen V&V-Prozess (Verifikation und Validierung) auf allen Ebenen [25]. Es gibt viele etablierte Entwicklungsprozesse für sicherheitskritische

Systeme, insbesondere die DO-178B-Norm für Luftfahrtsysteme, die auch im Weltraumsektor verwendet wird. Wenn wir die Analogie von Unterwasser zu Weltraum ernst nehmen, sollten wir untersuchen, inwieweit wir diesen Entwicklungsprozess im Bereich der Softwareentwicklung für Unterwassersysteme anwenden wollen, wobei wir im Hinterkopf behalten müssen, dass die Anwendung dieses Entwicklungsmodells Zeit und Kosten in die Höhe treiben wird.

Allgemeiner gesagt verwendet Robotik-Software oft Heuristiken, probabilistische oder subsymbolische Techniken, die schwer zu verifizieren sind, oder manchmal sogar schwer zu spezifizieren sind (z. B. Bilderkennung). Daher müssen wir unsere „Sweet Spots“ auswählen, die sich für eine formale Spezifikation und Verifikation eignen, und unser System so gestalten, dass – idealerweise – diese verifizierbaren Subsysteme einen betriebsfähigen Teil des Systems bilden. Zum Beispiel können wir den Controller unseres AUV so gestalten, dass wir eine untere Steuerungsschicht haben, die garantiert, dass kein Lenkbefehl dazu führt, dass der Roboter in ein Hindernis fährt, was wir formal verifizieren; und zusätzlich gibt es eine obere Schicht, die die Hindernisvermeidung in Form von Lenkbefehlen implementiert, die an die untere Steuerungsschicht weitergegeben werden, die wir dann nicht verifizieren müssen, da – wenn sie Befehle erzeugt, die dazu führen würden, dass der Roboter in ein Hindernis fährt – die untere Steuerungsschicht sie blockieren wird. Eng verbunden mit dieser Frage, das System in einer verifizierbaren Weise zu gestalten, ist die Frage, Algorithmen in einer verifizierbaren Weise zu gestalten, d. h. effiziente Algorithmen mit harten Garantien zu entwerfen und Algorithmen für den Robotik-Bereich zu zertifizieren.

Insgesamt sind wir zuversichtlich, dass die Verifikation eine wichtige Rolle bei der Entwicklung sicherer und zuverlässiger Unterwasser-Robotersysteme spielen kann und wird.

Literatur

1. Albers S (2010) Energy-efficient algorithms. *Commun ACM* 53(5):86–96
2. Alkassar E, Bohme S, Mehlhorn K, Schweitzer P (2011) An introduction to certifying algorithms. *IT-Inf Technol* 53:287–293
3. Bampis E, Kononov AV, Letsios D, Lucarelli G, Sviridenko M (2018) Energy-efficient scheduling and routing via randomized rounding. *J Sched* 21(1):35–51
4. Blum M, Kannan S (1995) Designing programs that check their work. *J ACM* 42(1):269–291
5. Bonifaci V, Chan H-L, Marchetti-Spaccamela A, Megow N (2012) Algorithms and complexity for periodic real-time scheduling. *ACM Trans Algorithms* 9:601–619
6. Bonifaci V, Marchetti-Spaccamela A, Megow N, Wiese A (2013) Polynomial-time exact schedulability tests for harmonic real-time tasks. In: *Proceedings of RTSS*. IEEE, S 236–245
7. Chen L, Megow N, Rischke R, Stougie L (2015) Stochastic and robust scheduling in the cloud. In: *Proceedings of APPROX, LIPIcs*, vol 40. Schloss Dagstuhl-Leibniz-Zentrum fuer Informatik, S 175–186
8. Chen L, Megow N, Schewior K (2018) An $\mathcal{O}(\log \uparrow)$ -competitive algorithm for online machine minimization. *SIAM J Comput* 47(6):2057–2077

9. Irani S, Pruhs K (2005) Algorithmic problems in power management. *SIGACT News* 36(2):63–76
10. Klein G (2010) The L4. Verified project: next steps. In: *Proceedings of the third international conference on verified software: theories, tools, experiments, VSTTE'10*. Springer, Berlin, S 86–96
11. Koczor A, Matoga L, Penkala P, Pawlak A (2016) Verification approach based on emulation technology. In: *International symposium on design and diagnostics of electronic circuits & systems (DDECS)*, S 169–174
12. Kühne U, Beyer S, Bormann J, Barstow J (2010) Automated formal verification of processors based on architectural models. *Form Methods Comput Aided Des* 9:129–136
13. Le HM, Große D, Herdt V, Drechsler R (2013) Verifying System C using an intermediate verification language and symbolic simulation. In: *Design automation conference*, S 116
14. LEDA (Library of Efficient Data Types and Algorithms). www.algorithmic-solutions.com
15. Leroy X (2009) Formal verification of a realistic compiler. *Commun ACM* 52(7):107–115
16. Lüth C, Ring M, Drechsler R (2017) Towards a methodology for self-verification. In: Khatri S (Hrsg) *6th International conference on reliability, infocom technologies and optimization (ICRITO 2017)*
17. Lüth C, Walter D (2009) Certifiable specification and verification of C programs. In: *FM 2009: Formal methods, Lecture notes in computer science*, vol 5350. Springer, S 419–434
18. McConnell RM, Mehlhorn K, Näher S, Schweitzer P (2011) Certifying algorithms. *Comput Sci Rev* 5(2):119–161
19. Megow N, Mehlhorn K, Schweitzer P (2012) Online graph exploration: new results on old and new algorithms. *Theor Comput Sci* 463:62–72
20. Megow N, Skutella M, Verschae J, Wiese A (2016) The power of recourse for online MST and TSP. *SIAM J Comput* 45:859–880
21. Megow N, Uetz M, Vredeveld T (2006) Models and algorithms for stochastic online scheduling. *Math Oper Res* 31(3):513–525
22. Megow N, Verschae J (2018) Dual techniques for scheduling on a machine with varying speed. *SIAM J Discret Math* 32:1541–1571
23. Nipkow T, Paulson LC, Wenzel M (2002) Isabelle/HOL: a proof assistant for higher-order logic, vol 2283. *Lecture notes in computer science*. Springer
24. Ring M, Bornebusch F, Lüth C, Wille R, Drechsler R (2019) Better late than never: verification of embedded systems after deployment. In: *Design, automation and test in Europe*. Florence, Italy. IEEE
25. Smith D, Simpson K (2004) *Functional safety*, 2. Aufl. Elsevier
26. Täubig H, Frese U, Hertzberg C, Lüth C, Mohr S, Vorobev E, Walter D (2012) Guaranteeing functional safety: design for provability and computer-aided verification. *Auton Robot* 32:303–331
27. Thrun S, Martin C, Liu Y, Hahnel D, Emery-Montemerlo R, Chakrabarti D, Burgard W (2004) A real-time expectation-maximization algorithm for acquiring multiplanar maps of indoor environments with mobile robots. *IEEE Trans Robot Autom* 20(3):433–443
28. Yao FF, Demers AJ, Shenker S (1995) A scheduling model for reduced CPU energy. In: *Proceedings of the 36th annual symposium on foundations of computer science (FOCS 1995)*, S 374–382

Ein interaktives strategisches Missionsmanagementsystem für intuitive Mensch-Roboter-Kooperation



Elsa Andrea Kirchner, Hagen Langer und Michael Beetz

Zusammenfassung Um die kooperative Aufgabenplanung und Koordination zwischen dem menschlichen Bediener und Roboterteams zu ermöglichen, werden neue Arten von Schnittstellen benötigt. Wir präsentieren ein interaktives strategisches Missionsmanagementsystem (ISMMS) für Unterwassererkundungen, die von gemischten Teams aus Robotern und menschlichen Ermittlern durchgeführt werden, das eine kooperative Aufgabenplanung und Koordination zwischen dem menschlichen Bediener und Roboterteams ermöglicht. Die Hauptziele des ISMMS sind es, Roboter in die Lage zu versetzen, dem Menschen ihre Absichten, Probleme und Situation schnell und auf intuitive Weise zu „erklären“, eine reibungslose Schnittstelle zwischen autonomem Verhalten und menschlicher Kontrolle zu ermöglichen, intelligente Schnittstellen zur obligatorischen externen Kontrolle bereitzustellen und eine adaptive Aufgabenteilung zu ermöglichen, wobei die intuitive Nutzung und Interaktion anhand von verhaltensbezogenen und physiologischen menschlichen Daten optimiert wird.

Einführung

Autonome Systeme, die mit externen Sensoren zusammenarbeiten, um ein Netzwerk aus verteilten Sensoren, Berechnungen, Steuerungen und Maschinen aufzubauen, werden als cyber-physische Systeme (CPS) [1] definiert. Sie zeigen

E. A. Kirchner (✉)

Robotics Innovation Center, DFKI GmbH und Universität Duisburg-Essen,
Bremen und Duisburg-Essen, Deutschland

E-Mail: elsa.kirchner@dfki.de

H. Langer · M. Beetz

Institute for Artificial Intelligence, Universität Bremen, Bremen, Deutschland

E-Mail: hlanger@uni-bremen.de

M. Beetz

E-Mail: beetz@cs.uni-bremen.de

hohe Fähigkeiten für dynamische und komplexe Aktivitäten auf und übertreffen oft den Menschen – insbesondere in feindlichen Umgebungen oder wenn die menschliche Wahrnehmung und Handlungsfähigkeit eingeschränkt ist (z. B. unter Wasser). Menschen können jedoch besser mit Mehrdeutigkeiten, unvollständigen Modellen und falschen Daten umgehen als autonome Systeme [1]. Die Kombination der Fähigkeiten von autonomen, hoch agilen Systemen und Menschen mit herausragender Intelligenz und insgesamt höherer Flexibilität zu einer verteilten oder hybriden Einheit zwischen Menschen und Technologie [2, 3] erfordert die Entwicklung intuitiver bidirektionaler Schnittstellen [4], die eine natürliche Aufgabenunterstützung, Mechanismen zur Erzielung von Transparenz über das Verhalten der Teammitglieder und gemeinsame Glaubenszustände unterstützen. Diese Entwicklung von Schnittstellen, die auf eine Gruppe oder Gruppen von AUVs sowie auf Roboter angewendet werden können, die in der Lage sind, über den Meeresboden zu laufen, um langfristige Aufgaben unter Wasser zu erledigen (z. B. Überwachung und Untersuchung benthischer oder epi-benthischer Organismen auf dem Meeresboden oder das Manövrieren in den Wassersäulen oder nahe der Wasseroberfläche), erfordert neue Lösungen und eröffnet ein breites Feld von Forschungsfragen und Herausforderungen.

Ein wichtiges Ziel für die Schnittstelle zwischen Mensch und Roboter besteht darin, dem menschlichen Bediener einen schnellen und leicht verständlichen Überblick über die Situation der Umgebung sowie der robotischen Systeme zu geben, um eine intuitive Interaktion zu ermöglichen. Die Roboter müssen „kognitiv“ im Sinne von Brachmans Anforderung sein, dass sie „wissen, was sie tun“. Darüber hinaus muss insbesondere in Situationen, in denen ein Eingreifen eines Bedieners die autonome Leistung verschlechtern könnte, eine Rückmeldung vom robotischen System an den Menschen verfügbar gemacht werden. Dies ist von großer Bedeutung, da ein menschliches Eingreifen ein gewisses Risiko birgt, die erfolgreiche Ausführung eines Missionsplans zu behindern. Daher sollte eine Schnittstelle dem Menschen Rückmeldungen über mögliche Konsequenzen einer menschlichen Intervention geben. Darüber hinaus ist eine Rückmeldung besonders relevant in Fällen, in denen ein robotisches System möglicherweise Hilfe vom Bediener benötigt. Um einen reichhaltigen, aber auch verständlichen Informationsfluss zu ermöglichen, sollten Schnittstellen 4D-Modelle der Umgebung auf der Grundlage realer Sensordaten verwenden; einschließlich Änderungen in den Häufigkeiten und Größen-Frequenzverteilungen der Organismen in den überwachten Wassermassen und Lebensräumen. Virtuelle realitätsbasierte Schnittstellen sind hier von großer Bedeutung, da sie den Benutzer in die Situation eintauchen lassen und bei Kombination mit Simulation sogar Einblicke in die Situation bei schlechten Sensordaten, d. h. schlechter Sichtbarkeit, ermöglichen [5, 6]. In Kombination mit geeigneten Interaktionswerkzeugen wird die Mensch-Maschine-Interaktion nicht nur intuitiv, sondern führt auch zu einer reduzierten Anzahl von Interaktionsfehlern [7]. Gleichzeitig sollten diese Schnittstellen dem Experten ermöglichen, bei Bedarf einzugreifen oder sogar die Kontrolle leicht zu übernehmen.

Bei der Entwicklung komplexer multimodaler Schnittstellen, die eine solche intensive Interaktion ermöglichen, muss sichergestellt werden, dass eine kognitive Überlastung des Bedieners verhindert wird [4]. Dies ist wesentlich, um die Fähigkeiten der robotischen Systeme vollständig auszunutzen, also beständig und vorhersehbar zu agieren, sowie die herausragenden Fähigkeiten des Menschen, mit Mehrdeutigkeiten, unvollständigen Modellen und falschen Daten umzugehen [1]. Obwohl es leicht nachvollziehbar ist, dass eine kognitive Überlastung vermieden werden muss, ist es nicht einfach, eine kognitive Überlastung des Menschen zu messen, da intensive Forschungen bereits sehr früh darauf hindeuten, dass mehrere Ressourcen das menschliche Gehirn in die Lage versetzen einerseits die Arbeitslast sehr effizient zu bewältigen und zu verteilen, während andererseits spezifische Aufgaben (z. B. der gleichen Modalität) die verfügbaren Ressourcen schnell erschöpfen können [8, 9].

Während das gewonnene Wissen bei der Gestaltung von Schnittstellen berücksichtigt werden muss, muss betont werden, dass die Anpassung von Schnittstellen von großer Bedeutung ist, um mit Veränderungen in der mentalen oder kognitiven Belastung oder Aufmerksamkeit des Benutzers umzugehen. Für eine Online-Anpassung muss jedoch eine Online-Messung identifiziert werden. Hier sind psychophysiologische Daten eine gute Wahl, da sie einen ständigen Einblick in den menschlichen Zustand ermöglichen, ohne dass der Benutzer diesen aktiv ausdrücken muss, und die Daten sogar dazu verwendet werden können, das Fehlen von offensichtlichem Verhalten zu erfassen [10]. Insbesondere die Gehirnaktivität, die in andere menschliche oder Systemdaten und den Kontext der Interaktion eingebettet ist, wie sie durch eingebettetes Brain Reading implementiert wurde [11], bietet einen Ansatz, der sofort anwendbar ist, um ein Fenster in den menschlichen Geist auf der Grundlage von Gehirnaktivität zu öffnen [12]. Daher kann die Aktivität des Gehirns (aufgezeichnet durch das Elektroenzephalogramm (EEG)) verwendet werden, um Interaktionsschnittstellen offline sowie online zu verbessern [4].

Neben der beschriebenen Unterstützung durch adaptive VR-Tools kann eine Schnittstelle die Missionsplanung nur dann unterstützen, wenn sie eng mit einem Wissensrepräsentations- und Reasoning-System verknüpft ist. Eine solche Wissensbasis wird Ziele wie die Spezifikation des Gesamtziels einer Unterwassermission und ihrer Teilaufgaben unterstützen, z. B. die Auswahl geeigneter Ausrüstung (grundlegende AUV-Typen, ihre missionspezifische Konfiguration und Parametereinstellungen), die Priorisierung von Zielen, die Verteilung von Teilaufgaben auf die Teammitglieder und die Fehlerbehandlung. Aufgrund der verbundenen Wissensbasis kann das System die Missionsplanung unterstützen, indem es z. B. Konsistenzprüfungen bereitstellt. Wenn jedoch eine menschliche Intervention eine Anpassung des Missionsplans erfordert, muss eine solche Schnittstelle an den Kontext und Veränderungen in einer laufenden Langzeitmission anpassbar sein. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass zur Entwicklung einer Schnittstelle für interaktives strategisches Missionsmanagement, adaptive Online-Missionsplanung, Strategien für Problem- und Fehlerbehandlung, prototypische Interaktionsmuster für Mensch-Roboter-Teams, leichtgewichtige Simulation und intelligente Mensch-Roboter-Schnittstellen erforderlich sind, um verschiedene Autonomiegrade optimal zu unterstützen.

Wissensrepräsentation und Reasoning für Langzeit-Unterwassermissionen

Die natürliche Aufgabenfähigkeit und die Fähigkeit, „zu wissen, was sie tun“, wird durch ein neuartiges Framework für Wissensrepräsentation und Reasoning (KRR) ermöglicht, das autonomen Unterwasserrobotern ermöglicht, die Rollen von Wissenschaftsassistenten (Tauchern) in langfristigen Wissenschaftsmissionen in der Meeresbiologie zu übernehmen. Das KRR-Framework muss in der Lage sein, Roboter und ihre Fähigkeiten, Unterwasserökosysteme einschließlich Tiere und Pflanzen, Forschungsmissionen und Lehrbuch- und Forschungswissen aus der Meereswissenschaft darzustellen; einschließlich Daten aus Abb. 1 Forschungsdienstleistungen, wie Pangaea. Die Durchführung von Meereswissenschaftsmissionen stellt eine einzigartige Kombination von Herausforderungen für die KRR-Fähigkeiten autonomer robotischer Agenten dar:

- Darstellung und Reasoning über die langfristige Entwicklung von Unterwasserökosystemen, einschließlich Verhaltensweisen und Populationen durch Tiere.
- Einbindung von abstraktem und meereswissenschaftlichem Expertenwissen in die Wahrnehmungs-Reaktions-Schleife von Unterwasserrobotern.
- Übersetzung von Beobachtungen in maschinenverständliche raumzeitliche Modelle von Unterwasserökosystemen.
- Ableitung von Forschungshypothesen aus räumlich-zeitlichen Modellen von Unterwasserökosystemen und Vorschlag von Beobachtungsaufgaben zur Sammlung von Beweisen für deren Untersuchung.
- Kenntnisreiches Management und autonome langfristige Durchführung von Unterwasserforschungsmissionen.

Das KRR-Framework wird auf detaillierten, maschinenverständlichen digitalen Replikationen des beobachteten Ökosystems aufgebaut, die wir als digitale Zwillingwissensbasen (DTKBs) [13] bezeichnen. Man kann sich eine DTKB als eine (foto-)realistische Animation des Ökosystems vorstellen, in der jede animierte Pflanze, jedes Tier und jede Region einen symbolischen Namen hat, der mit ontologischem und Hintergrundwissen aus einer symbolischen Enzyklopädie der Meereswissenschaft kombiniert ist. Das enzyklopädische Wissen, das Lehrbuchwissen sowie die relevanten Forschungsdaten werden von Meereswissenschaftlern bereitgestellt und konzeptionell strukturiert, die auch die Erstellung realistischer Animationen von Ökosystemen unterstützen werden. Eine zweite Forschungs-herausforderung wird darin bestehen, bestehende Forschungsdatenquellen als semantische Web-Wissensbasen zu modellieren, um die Arbeit mit diesen Datendienstleistungen mit Hilfe symbolischer Reasoning- und maschineller Lernmethoden zu automatisieren [14].

Das KRR-Framework wird auf dem Wissensrepräsentations- und Reasoning-System KNOWROB basieren [15]. KNOWROB ist nach unserem besten Wissen das am weitesten verbreitete Wissenssystem für robotische Agenten. Neue Erweiterungen des Frameworks umfassen eine rationale Rekonstruktion namens KNOWROB2 und Erweiterungen zur spielmaschinenfähigen Wissensrepräsentation und



Abb. 1 openEASE ist ein webbasierter Wissensdienst, der Roboter- und menschliche Aktivitätsdaten bereitstellt. Es enthält semantisch annotierte Rohdaten, bietet eine leistungsfähige Abfragesprache und Inferenzmaschine sowie Visualisierungstools

Reasoning [13]. Erste explorative Forschungsaktivitäten zur Fähigkeit, natürliche Außenumgebungen darzustellen und Informationen aus Geoinformationssystemen in die Wissensrepräsentation von Robotern zu integrieren, wurden im Rahmen des Sherpa-Projekts durchgeführt, in dem gemischte Mensch-Roboter-Teams die Suche nach Lawinenopfern untersuchte [3]. Die Anforderungen an Robustheit und Flexibilität der zugrunde liegenden Wissensbasis im Sherpa-Projekt waren ähnlich wie in dem hier angenommenen Szenario der Langzeit-Unterwassermission, einschließlich der Fähigkeit, in unbekannten Umgebungen zu agieren und extrem schwierige Umstände für die Wahrnehmungsroutinen der Roboter zu bewältigen. Ähnlich wie im alpinen Rettungsszenario von Sherpa muss die Wissensbasis komplexe Interaktionen zwischen heterogenen Teammitgliedern mit unterschiedlichen Fähigkeiten und Missionsrollen unterstützen. Eine begrenzte Kommunikation während der Mission aufgrund von Zeit- und Bandbreitenbeschränkungen ist eine weitere Parallele der beiden Szenarien.

Das KRR-Framework wird auch auf openEASE basieren [14], einem offenen webbasierten Wissensdienst, der auf KnowRob basiert (siehe Abb. 1). openEASE wird insbesondere dazu beitragen, die Wissensbasis mit einer logikbasierten Abfragesprache zu nutzen. Es bietet eine Vielzahl von Visualisierungen des Inhalts der KB, einschließlich 3D-Visualisierungen von Robotern, ihren Umgebungen, den von ihnen durchgeführten Trajektorien sowie Intervalllogikschichten zur Darstellung zeitlicher Beziehungen zwischen verschiedenen Ereignissen. Darüber hinaus verfügt openEASE über Standardvisualisierungen für abstraktere statistische Muster in den Daten und Schnittstellen zum Importieren und Exportieren von Wissen von/zu anderen KBs. openEASE wird auch als Schnittstelle zwischen den Wissensbasen der Roboter und dem menschlichen Bediener dienen, und es unterstützt auch den direkten Wissensaustausch zwischen Robotern [16].

Intuitive VR-basierte Schnittstellen, optimiert durch eingebettetes Brain Reading

Obwohl Menschen sehr agil in ihrer Interaktion und Entscheidungsfindung sind, ist bekannt, dass sie in ihrer Arbeitsgedächtniskapazität begrenzt sind [17] und dass sie sehr begrenzt in der Verteilung ihrer Aufmerksamkeit sind, was oft zu Aufmerksamkeitsstunnen führt [18] und zu einer Einschränkung des Situationsbewusstseins. Daher ist es vernünftig anzunehmen, dass eine komplexe und hochvariable Darstellung der Umgebung des Roboters, die durch das KRR-Framework präsentiert wird, Stress bei einem menschlichen Bediener hervorrufen kann. Stressoren können Angst, Zeitdruck, mentaler Arbeitsfluss oder Informationsüberflutung sein, die alle die menschliche Entscheidungsfindung beeinträchtigen werden. Aus diesen Gründen werden wir eine Schnittstelle weiterentwickeln, die folgende Eigenschaften hat:

- Transparenz, d. h. sie ermöglicht dem Menschen einen einfachen und aussagekräftigen Einblick in komplexe Interaktionen zwischen Systemparametern und Umweltveränderungen,
- Flexibilität bezüglich vom Benutzer gesteuerten schnellen Zieländerungen, abhängig von den Umwelt- und Systembeschränkungen,
- Anpassungsfähigkeit an den mentalen oder emotionalen Zustand des Menschen,
- und sie bietet dem Menschen leicht verständliches Feedback über mögliche Konsequenzen einer menschlichen Intervention.

Während genaue Informationen und Situationsbewusstsein für den Missionserfolg von größter Bedeutung sind, muss die Präsentation komplexer dynamischer Informationen, die vom KRR an den Bediener des Systems gesammelt werden, so gestaltet sein, dass sie seine Entscheidungsprozesse und sein Situationsbewusstsein leitet und unterstützt und die Transparenz fördert, ohne kognitive Überlastung zu verursachen. Um dies zu erreichen, müssen bestimmte Designparameter berücksichtigt werden, die hochrangige Problemlösungsaktivitäten unterstützen und das Situationsbewusstsein verbessern [19–21], während sie auch Zugang zu Low-Level-Features oder niedrigeren Abstraktionsebenen ermöglichen [1]. Letzteres kann relevant sein, wenn es eine Diskrepanz zwischen den internen Modellen des Bedieners und den externen Darstellungen gibt.

Diese erhöhte Verfügbarkeit von Informationen bringt einige Herausforderungen mit sich. Um eine Informationsüberflutung zu vermeiden, die bei der Steuerung eines komplexen Systems oder einer Gruppe von Systemen – die eine Vielzahl von Informationen unterschiedlicher Attraktivität zusammen mit Informationen über die ausgeführte Aufgabe oder Mission liefern – nahezu endlos sein kann, müssen Strategien entwickelt werden, um in der Fülle der Informationen Relevanzen zu ermitteln und anzuzeigen. Verschiedene Ansätze können implementiert werden, um eine kognitive Überlastung zu vermeiden, wie z. B. Filterung, Cueing-Strategien [22] oder Alarmierung, sowie Feedback-Strategien [1]. Darüber hinaus kann die virtuelle Realität (VR) vom Bediener

genutzt werden, um eine tiefe Kohäsion zwischen dem Bediener und dem (oder den) ferngesteuerten System(en) und in einer komplexen Arbeitsumgebung zu schaffen, indem sie die Immersion und das Gefühl vor Ort zu sein erhöht.

VR kann dazu beitragen, die Wahrnehmung, das Verständnis und die Vorhersage eines Systems durch den Bediener zu verbessern, indem sie die vom System gesammelten Daten sowie die umgebenden Sensoren integriert und sie dem Bediener auf sinnvolle Weise präsentiert. Sie könnte am besten dazu geeignet sein, als Echtzeitbild der Umgebung, des Systemzustands, der Pläne oder aktuellen Aufgaben zu dienen, und kann – wie gefordert – sowohl einen detaillierten als auch einen hochrangigen Einblick in die Situation vor Ort bieten. VR kann als Medium zwischen menschlicher Kognition und Systemautomatisierung und -steuerung fungieren, um mit komplexen Daten zu interagieren, die normalerweise den Verstand des Benutzers überfordern, um die Relevanz von Aktionen hervorzuheben, um Interaktionsanforderungen zu stellen und um dem Menschen leicht verständliches Feedback über mögliche Konsequenzen einer menschlichen Intervention zu geben (unterstützt durch die Planungsdomäne).

Um das ISMMS hinsichtlich des mentalen Zustands des Benutzers zu optimieren, ist dies nur teilweise durch die oben genannten und durch die Anwendung von Modellen auf das menschliche kognitive System möglich, die selten sind und schwer in Spezifikationen für die VR-basierte Schnittstelle übersetzt werden können. Vielmehr sollte ein experimenteller Ansatz gewählt werden, der Stressoren misst, um Schwachstellen der Schnittstelle zu identifizieren. Menschliche Verhaltensmuster wie Kopfhaltung [23], Blickrichtung [24] oder Gesichtsausdruck [25] können identifiziert werden, die mit mentalen Zuständen korreliert sind [26], um beispielsweise Ermüdungsgrade [27], Stress, Langeweile, Frustration, Interesse oder Verwirrung [28] mit Hilfe von maschinellen Lernmethoden [29, 30] zu bestimmen. Ergebnisse der Forschung zu Verhaltensdaten weisen darauf hin, dass multimodale Ansätze die Nutzung einzelner Modalitäten übertreffen, während detaillierte Analysen, die diese Erkenntnis untermauern, noch selten sind [1].

Neben offenen Verhaltensdaten ist die Gehirnaktivität eine gute Quelle, um Einblicke in den menschlichen Zustand zu gewinnen. Die Bewertung des kognitiven Zustands eines Probanden wurde in mehreren Arbeiten analysiert. Beispielsweise wurde nachgewiesen, dass das menschliche Elektroenzephalogramm (EEG) die mentale Arbeitsbelastung widerspiegeln kann [31]. Verschiedene Veränderungen im EEG-Muster können beobachtet werden, die Veränderungen im mentalen Zustand widerspiegeln. Wenn die Arbeitsbelastung erhöht wird (z. B. durch Multitasking), wird das ereignisbezogene Potenzial (ERP) P300 in der Amplitude verringert [32]. Veränderungen aufgrund von Veränderungen der Arbeitsbelastungsstufen werden auch im EEG-Frequenzband beobachtet, z. B. wird Alpha verringert und Theta erhöht in den meisten Studien, wenn die mentale Arbeitsbelastung erhöht wird [33]. Andere Studien haben Veränderungen in der Alpha-, Beta- und Theta-Aktivität in Bezug auf

die Ermüdung des Benutzers gezeigt (z. B. Zunahme der Alpha- und Theta-Leistung bei zunehmender mentaler Ermüdung) [34]. Darüber hinaus kann der Stresslevel eines Bedieners aus der EEG-Aktivität bewertet werden [35, 36]. Sogar emotionale Zustände konnten nachgewiesen werden, die auf der Grundlage von EEG-Signalen detektierbar sind [37–39].

Während offene Verhaltensmaßnahmen leichter zu erfassen sind, bieten verdeckte physiologische Daten (wie das EEG) einen ständigen Zugang zum menschlichen Zustand, der für die Anpassung einer Schnittstelle für eine optimale Mensch-Maschine-Zusammenarbeit von größter Bedeutung ist. Beispielsweise bietet der kognitive Zustand zusätzliche Informationen, die für die Anpassung oder Steuerung von Schnittstellen, Maschinen oder Computerprogrammen von Vorteil sein können. Nicht nur aus diesem Grund, sondern um den Kontext der Interaktion besser zu verstehen und zu beschreiben, ist es sinnvoll, verdeckte und offene Daten zu kombinieren, um einen tieferen Einblick in den menschlichen Geist zu gewinnen und ihn oder sie unter bestimmten Situationen besser zu unterstützen. Aus diesem Grund wurde das eingebettete Brain Reading (eBR) entwickelt [11], das Online-Vorhersagen über den menschlichen mentalen Zustand (siehe Abb. 2) oder über bevorstehende Absichten [40] ermöglicht. Wir möchten eBR anwenden, um nicht nur das zu entwickelnde ISMMS hinsichtlich seiner Transparenz zu optimieren und unnötige kognitive oder emotionale Belastungen des Benutzers zu vermeiden, sondern auch um online zu bewerten, welche Aufgaben für den Menschen sehr anspruchsvoll sind und wie zum einen der Mensch besser durch das interagierende System unterstützt werden kann [41] und wie zum anderen ihm diese Situationen bewusst gemacht werden können, um falsche Entscheidungen aufgrund von Stressoren zu vermeiden.

Zusätzlich sollten fehlerbezogene Potenziale (ErrPs) als implizites menschliches Feedback verwendet werden, um das Verhalten von Robotern auf der Grundlage von Lernansätzen (z. B. Verstärkungslernen) zu verbessern [42]. Tatsächlich sind ErrPs als menschliches Feedback sehr wertvoll im robotischen Lernen. Insbesondere in komplexen Aufgabensituationen ist es nicht immer einfach, die gesamte Situation des Roboters (Verhalten und Umgebung) zu beschreiben und alle möglichen unerwarteten Situationen im Voraus zu berücksichtigen. Daher ist es schwierig oder unmöglich, Belohnungsfunktionen im Verstärkungslernen in solchen komplexen Aufgabensituationen zu spezifizieren. ErrPs werden jedoch intrinsisch im menschlichen Gehirn hervorgerufen und erfordern keine explizite Bewertung einer Situation. In einer kürzlich durchgeführten Studie wurde die Online-Nutzung von ErrPs in realen robotischen Anwendungen erfolgreich bei der gestenbasierten Robotersteuerung gezeigt, bei der ein echter Roboter nicht nur Gesten, sondern auch seine Verhaltensstrategie (Kontrollpolitik) lernt, d. h. eine Zuordnung zwischen Gesten und Aktionen in Echtzeit auf der Grundlage von intrinsisch hervorgerufenem menschlichem Feedback (ErrP) beim Verstärkungslernen [43].

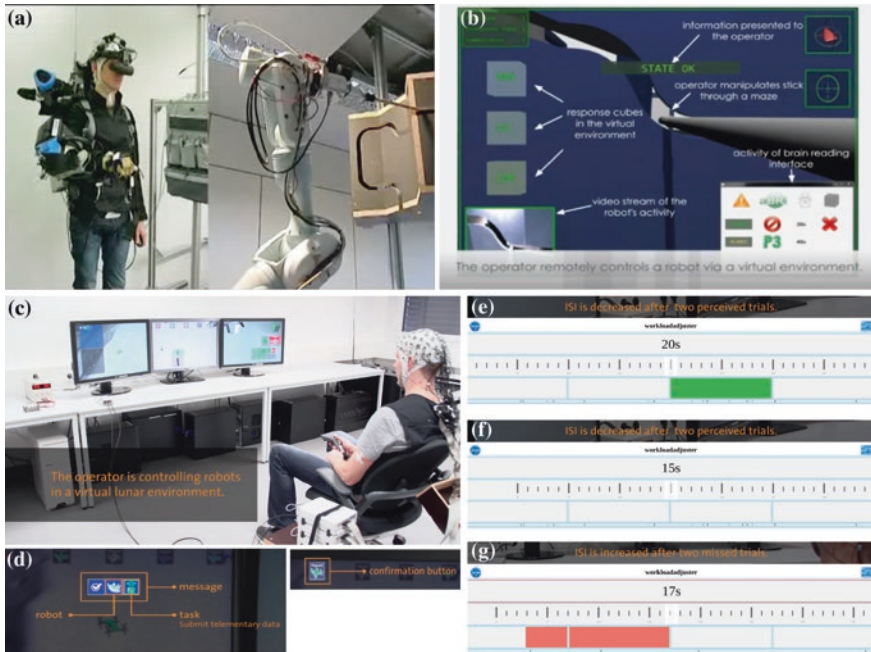


Abb. 2 Zwei Beispiele für VR-basierte Schnittstellen, die online von eBR angepasst werden: **a** Echte Fernsteuerung eines Roboterarms unterstützt durch **b** VR-Umgebung, die dem Benutzer 3D-Informationen liefert, ermöglicht das Umschalten zwischen Robotersteuerung und Reaktionen auf Warnungen oder andere Informationen, während eBR Rückschlüsse auf die Aufgabenbeteiligung zieht und ob der Bediener auf Warnungen reagieren wird, wenn sie erkannt wurden; oder nicht, falls sie nicht erkannt wurden. Im Falle, dass eBR den Schluss zieht, dass der Bediener Warnungen erkannt hat, wurde die zulässige Reaktionszeit verlängert. **c** VR-basierte Schnittstelle für die Fernsteuerung eines Multi-Roboter-Teams. **d** Informationen werden in einer symbolischen Art und Weise präsentiert, die leicht zu erkennen ist. Durch die Reaktion auf die bildliche Darstellung des Roboters überprüft die Schnittstelle das korrekte Verständnis der Aufgabe und bringt den ausgewählten Roboter direkt auf den zentralen Bildschirm in den Fokus des Bedieners. **e** Die Zeit zwischen Warnungen (Inter-Stimulus-Intervall (ISI)) wird verringert, wenn **(f)** eBR eine hohe Aufgabenbeteiligung des Bedieners ableitet. **g** Die Zeit zwischen Warnungen wird erhöht, falls eBR eine reduzierte Aufgabenbeteiligung ableitet

Schlussfolgerung

Kognition- und KI-gesteuerte Robotersteuerung zusammen mit intuitiven bidirektionalen Schnittstellen werden vielversprechende Ansätze für die Realisierung kompetenter Missionsverwaltung von Mensch-Roboter-Teams bei Tiefseemissionen sein. In diesem Kapitel schlagen wir vor, das Wissensrepräsentations- und Schlussfolgerungsframework KnowRob als Grundlage für die Implementierung von Robotersteuersystemen zu verwenden, „die wissen, was sie tun“, und Roboter, die auf natürliche Weise aufgabenfähig

sind. Dieses Wissensrepräsentations- und Schlussfolgerungsframework wird mit modernster Schnittstellentechnologie kombiniert, die auf die Anforderungen der jeweiligen Aufgabe oder Mission sowie den Zustand des Bedieners abgestimmt ist, der durch eBR abgeleitet wird. Es überträgt Informationen an den Bediener mittels VR-Techniken in verschiedenen Detailstufen auf eine intuitive und leicht verständliche Weise – abhängig von den Aufgaben oder Anforderungen des Bedieners. Die Kombination von beidem ermöglicht es dem Bediener, jederzeit leicht zu verstehen, was die Roboter tun – unterstützt durch das KnowRob-Framework und visualisiert durch die VR-Umgebung. Dies intensiviert die Zusammenarbeit zwischen dem Menschen und den Robotersystemen und unterstützt die Kontrollteilung. Letzteres wird auch durch aktives Feedback an den Menschen über das vorhergesagte Ergebnis menschlicher Eingriffe unterstützt und ermöglicht es dem Menschen, den Eingriff aufgrund der kommunizierten möglichen Auswirkungen zu überdenken. Daher kann das ISMMS nicht nur als eine intuitive und hochwirksame Schnittstelle für die Robotersteuerung betrachtet werden, sondern es erleichtert auch die tiefe Zusammenarbeit zwischen Mensch und Maschine.

Literatur

1. Song H, Rawat DB, Jeschke S, Brecher C (2016) *Cyber-physical systems: foundations, principles and applications*, reprint. Academic Press, Cambridge
2. Rammert W (2009) *Hybride Handlungsträgerschaft: Ein Soziotechnisches Modell verteilten Handelns, in Intelligente Objekte*. Springer, Berlin, S 23–33
3. Marconi L, Melchiorri C, Beetz M, Pangercic D, Siegwart R, Leutenegger S, Carloni R, Stramigioli S, Bruyninckx H, Doherty P, Kleiner A, Lippiello V, Finzi A, Siciliano B, Sala S, Tomatis N (2012) The SHERPA project: smart collaboration between humans and ground-aerial robots for improving rescuing activities in alpine environments. In: IEEE international symposium on safety, security, and rescue robotics (SSRR)
4. Kirchner EA, Kim S-K, Tabie M, Wöhrle H, Maurus M, Kirchner F (2016) An intelligent man-machine interface – multi-robot control adapted for task engagement based on single-trial detectability of p300. *Front Human Neurosc* 10:291. ISSN 1662-5161. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00291>. 229, 235, 244, 246
5. Sonsalla R, Cordes F, Christensen L, Roehr TM, Stark T, Planthaber S, Maurus M, Mallwitz M, Kirchner EA (2017) Field testing of a cooperative multi-robot sample return mission in mars analogue environment. In: *Proceedings of the 14th symposium on advanced space technologies in robotics and automation (ASTRA)*
6. Planthaber S, Maurus M, Bongardt B, Mallwitz M, Vaca Benitez LM, Christensen L, Cordes F, Sonsalla R, Stark T, Roehr T (2017) Controlling a semi-autonomous robot team from a virtual environment. In: *proceedings of the companion of the 2017 ACM/IEEE international conference on human-robot interaction (HRI '17)*. ACM, New York, NY, USA, 417–417. <https://doi.org/10.1145/3029798.3036647>
7. Straube S, Rohn M, Roemmermann M, Bergatt C, Jordan M, Kirchner EA (2011) On the closure of perceptual gaps in man-machine interaction: virtual immersion, psychophysics and electrophysiology. *Perception*, 40 ECV Abstract Supplement:177. 241
8. Wickens CD (1984) Processing resources in attention. In: Parasuraman R, Davies D (Hrsg) *Varieties of attention*, Academic Press, S 63–101

9. Wickens CD (1992) Engineering psychology and human performance (2nd. Aufl.), New York: HarperCollins
10. Gerson AD, Parra LC, Sajda P (2006) Cortically coupled computer vision for rapid image search. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng.* 14(2):174–179
11. Kirchner EA, Kim S-K, Straube S, Seeland A, Wöhrle H, Krell MM, Tabie M, Fahle M (2013) On the applicability of brain reading for predictive human-machine interfaces in robotics. *PLoS ONE, Pub Lib Sci*, 8(12):e81732
12. Coles M (1989) Modern mind-brain reading: psychophysiology, physiology, and cognition. *Psychophysiology* 26(3):251–269
13. Beetz M, Beßler D, Haidu A, Bozcuoglu AK, Bartels G (2018) KnowRob 2.0 – a 2nd generation knowledge processing framework for cognition-enabled robotic agents. In: International conference on robotics and automation (ICRA)
14. Tenorth M, Winkler J, Beßler D, Beetz M (2015) Open-EASE – a cloud-based knowledge service for autonomous learning, KI – Künstliche Intelligenz
15. Tenorth M, Beetz M (2013) KnowRob – a knowledge processing infrastructure for cognition-enabled robots. *Int J Robot Res* 32(5):566–590
16. Bozcuoglu AK, Kazhoyan G, Furuta Y, Stelter S, Beetz M, Okada K, Inaba M (2018) The exchange of knowledge using cloud robotics. *Robot Autom Lett* 3(2):1072–1079
17. Baddeley AD (1986) Working memory. Clarendon Press
18. Endsley MR (2013) Situation awareness. *Oxf Handb Cogn Eng*
19. Woods DD (1991) Representation aiding: a ten year retrospective, *S* 1173–1176
20. Jamieson GA (2007) Ecological interface design for petrochemical process control: an empirical assessment. *IEEE Trans Syst Man Cybern Part Syst Hum* 37(6): 906–920
21. Burns CM et al (2008) Evaluation of ecological interface design for nuclear process control: situation awareness effects. *Hum Factors* 50(4):663–679
22. St John M, Smallman HS, Manes DI, Feher BA, Morrison JG (2005) Heuristic automation for decluttering tactical displays. *Hum Factors* 47(3):509–525
23. Murphy-Chutorian E, Trivedi MM (2009) Head pose estimation in computer vision: a survey. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell* 31(4):607–626
24. Hansen DW, Qiang J (2010) In the eye of the beholder: a survey of models for eyes and gaze. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell* 32(3):478–500
25. la Torre FD, Cohn JF (2011) Facial expression analysis. *Visual analysis of humans*. Springer, London, S 377–409
26. Dinges DF, Mallis MM, Maislin G, Iv P, JW (1998) Evaluation of Techniques for Ocular Measurement as an Index of Fatigue and the Basis for Alertness Management
27. Dong Y, Hu Z, Uchimura K, Murayama N (2011) Driver inattention monitoring system for intelligent vehicles: a review. *IEEE Trans Intell Transp Syst* 12(2):596–614
28. Banda N, Robinson P (2011) Multimodal affect recognition in intelligent tutoring systems. *Affect Comput Intell Interact*, 200–207
29. Whitehill J et al (2011) Towards an optimal affect-sensitive instructional system of cognitive skills 2011:20–25
30. Kim Y, Lee H, Provost EM (2013) Deep learning for robust feature generation in audio-visual emotion recognition, *S* 3687–3691
31. Borghini G, Astolfi L, Vecchiato G, Mattia D, Babiloni F (2014) Measuring neurophysiological signals in aircraft pilots and car drivers for the assessment of mental workload, fatigue and drowsiness. *Neurosci Biobehav Rev.* 44:58–75
32. Scharinger C, Soutschek A, Schubert T, Gerjets P (2017) Comparison of the working memory load in n-back and working memory span tasks by means of EEG frequency band power and P300 amplitude. *Front Human Neurosc* 11:6
33. Dasari D, Shou G, Ding L (2017) ICA-derived EEG correlates to mental fatigue, effort, and workload in a realistically simulated air traffic control task. 11, 297

34. Wascher E, Rasch B, Sanger J, Hoffmann S, Schneider D, Rinkenauer G, Heuer H, Gutberlet I (2014) Frontal theta activity reflects distinct aspects of mental fatigue. *Biol Psychol* 96:57–65
35. Pomer-Escher AG, Pinheiro de Souza MD, Bastos Filho TF (2014) Methodology for analysis of stress level based on asymmetry patterns of alpha rhythms in EEG signals. In: *Biosignals and Biorobotics Conference: Biosignals and Robotics for Better and Safer Living (BRC)*, 5th ISSNIP-IEEE, S 1–5
36. Fan M, Tootooni MS, Sivasubramony RS, Miskovic V, Rao PK, Chou C-A (2016) Acute stress detection using recurrence quantification analysis of electroencephalogram (EEG) Signals. Springer, Cham, S 252–261
37. Garcia Molina G, Tsoneva T, Nijholt A (2009) Emotional brain-computer interfaces. In: *International conference on affective computing and intelligent interaction*, S 138–146
38. Hamid NH, Sulaiman N, Aris SAM, Murat ZH, Taib MN (2010) Evaluation of human stress using EEG power spectrum. In: *6th International colloquium on signal processing and its applications (CSPA)*, S 1–4
39. Aftanas LI, Varlamov AA, Pavlov SS, Makhnev VP, Reva NV (2001) Affective picture processing: event related synchronization within individually defined human theta band is modulated by valence dimension. *Neurosci Lett* 303:115–118
40. Kirchner EA, Drechsler R (2013) A formal model for embedded brain reading. *Ind Robot: Int J* 40(6):530–540. <https://doi.org/10.1108/IR-01-2013-318>. 233, 234, 238, 242, 243, 254
41. Folgheraiter M, Jordan M, Straube S, Seeland A, Kim SK, Kirchner EA (2012) Measuring the improvement of the interaction comfort of a wearable exoskeleton. *Int J Soc Robot* 4(3):285–302. <https://doi.org/10.1007/s12369-012-0147-x>. 234, 235, 238, 240, 263
42. Iturrate I, Montesano L, Minguez J (2010) Robot reinforcement learning using EEG-based reward signals. In: *IEEE international conference of on robotics and automation (ICRA)*, S 4181–4184
43. Kim SK, Kirchner EA, Stefes A, Kirchner F (2017) Intrinsic interactive reinforcement learning – using error-related potentials for real world human-robot interaction. *Sci Reports* 7:17562