

Universität Rostock



Traditio et Innovatio

Institut für Automatisierungstechnik

Beitrag zur Regelung getauchter Mehrkörpersysteme

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

der Fakultät für Informatik und Elektrotechnik

der Universität Rostock

vorgelegt von:

Sven Lack, geb. am 13.06.1993 in Schwerin
aus Rostock

Rostock, 29. April 2025

Kurzfassung

Die Nutzung der Weltmeere, insbesondere unterhalb der Meeresoberfläche, schreitet immer weiter voran und erfordert die Entwicklung und den Einsatz von effizienten, innovativen und auf die individuellen Problemstellungen zugeschnittenen Technologien. In diesem Kontext stellen unbemannte Tauchroboter eine Schlüsseltechnologie dar, die für ein breites Spektrum maritimer Aufgaben eingesetzt werden kann. Neben visuellen Inspektionen steht seit jeher auch die Realisierung von Manipulationsaufgaben im Fokus der Forschung und Entwicklung. Manipulationsaufgaben im submarinen Umfeld stellen hohe Anforderungen an die Manövrierfähigkeit, Wiederholgenauigkeit und Präzision der mit Roboterarmen (auch Manipulatoren genannt) ausgestatteten Unterwasserfahrzeuge. Zusätzlich zu den zeitlich variablen, teils extremen Umweltbedingungen, den limitierten Kommunikations- und Sensorsystemen, stellen Koppeleffekte, im Sinne wechselseitiger Beeinflussungen zwischen Manipulator und Trägerfahrzeug, eine zentrale Herausforderung für den Einsatz dieser Verbundsysteme dar. Insbesondere bei neuartigen, kleinen Fahrzeugen, bei denen die Masse des Manipulators einen signifikanten Anteil der Gesamtmasse ausmacht, treten diese Koppeleffekte deutlich verstärkt in den Vordergrund und können nicht, wie bei großen Fahrzeugen üblich, vernachlässigt werden. Ziel dieser Arbeit ist es daher, ein Fahrzeugführungssystem zu entwickeln, das explizit Koppeleffekte berücksichtigt.

Ausgangspunkt für die Entwicklung des Fahrzeugführungssystems ist die Analyse einer möglichen Manipulationsmission für ein miniaturisiertes Verbundsystem und die Ableitung der dafür notwendigen Anforderungen an die Teilsysteme Führung, Navigation und Regelung. Als Ergebnis der Analyse wird ein auf das jeweilige Verbundsystem abgestimmter, modellbasierter Ansatz vorgeschlagen. Kern des verfolgten Ansatzes ist ein detailliertes Modell des Verbundsystems, welches über eine sukzessive Erweiterung der allgemeinen, kinematischen und kinetischen Bewegungsgleichungen um hydrostatische und hydrodynamische Effekte sowie eine anschließende Synthese der Teilmodelle gewonnen wird. Neben der Verwendung des Modells für Simulationen, wird dieses auch für die Prädiktion und Kompensation der Koppeleffekte im Rahmen einer Vorsteuerung im Regelungssystem eingesetzt. Die Basis des Regelungssystems bildet eine kaskadierte, Quaternion-basierte Trajektorienfolgeregelung, wobei die erforderlichen Trajektorien zur Laufzeit im Führungssystem missionsspezifisch generiert werden. Durch die Entwicklung eines gestaffelten Verfahrens zur Trajektoriengenerierung wird eine Bahnplanung im erdfesten Bezugssystem und eine anschließende Formung des Geschwindigkeitsprofils für die Bahn unter Ausnutzung der Vorteile der Quaternion-Lagebeschreibung ermöglicht. Ergänzt wird das Führungssystem durch eine Ablaufsteuerung und eine Greifstrategie, die anhand einer beispielhaft gewählten Manipulationsoperation entwickelt wurde.

Das entwickelte Fahrzeugführungssystem, bestehend aus Führungs-, Navigations- und Regelungssystem, wurde für ein miniaturisiertes Verbundsystem aus Unterwasserfahrzeug und Manipulator methodisch sowie praktisch umgesetzt. Die Validierung des Fahrzeugführungssystems erfolgte sowohl in einer Simulationsumgebung als auch am realen Fahrzeug unter kontrollierten Laborbedingungen. Im Rahmen der Experimente wurde eine vollständig automatisierte Greifoperation erfolgreich durchgeführt und das Zusammenspiel von Führung, Navigation und Regelung sowie die effektive Kompensation der dynamischen Koppeleffekte nachgewiesen.

Abstract

The utilization of the world's oceans, especially below the sea surface, is gaining in importance and requires the development and usage of efficient, innovative technologies tailored to individual problems. In this context, unmanned diving robots are a key technology that can be used for a wide range of maritime tasks. Beyond visual inspection, the execution of underwater manipulation tasks has long been an important topic in the research and development of these vehicles. Manipulation tasks in the submarine environment require high levels of maneuverability, repeatability and precision from underwater vehicles equipped with robotic arms, also known as manipulators. In addition to the time-varying, sometimes extreme environmental conditions and the limitations in communication and sensor systems, coupling effects, referring to the mutual influences between manipulator and carrier vehicle, represent a central challenge for the use of these multibody systems. Especially in the case of new, small multibody systems, where the mass of the manipulator is a significant part of the total mass, these coupling effects become much more prominent and cannot be neglected. Therefore, the goal of this work is to develop a vehicle guidance, navigation, and control system (GNC) that explicitly takes coupling effects into account.

The basis for the development of the GNC system is the analysis of a potential manipulation mission for a miniaturized multibody system and the derivation of the necessary requirements for the subsystems. The result of the analysis is a model-based approach customized to the respective multibody system. The core of the approach are detailed models of the elements of the multibody system, which are obtained by successively extending the general kinematic and kinetic equations of motion to include hydrostatic and hydrodynamic effects and merging the submodels. The model is used for simulations and also as part of a feedforward control path for the prediction and compensation of coupling effects in the control system. The foundation of the control system is a cascaded, quaternion-based trajectory tracking controller. The required trajectories are generated mission-specifically at runtime in the guidance system. The development of a stepwise method for trajectory generation enables path planning in the earth-fixed reference system and allows the subsequent shaping of the velocity profile along the path using the advantages of the quaternion based orientation description. The guidance system is completed by a finite state machine and a grasping strategy which was developed based on an exemplary manipulation operation.

The developed GNC system was methodically and practically implemented for a miniaturized multibody system consisting of an underwater vehicle and a manipulator. The system was validated both in simulation and on the real vehicle under controlled laboratory conditions. A fully automated grasping operation was successfully carried out and the interaction of the guidance, navigation, and control subsystems as well as the effective compensation of the dynamic coupling effects was demonstrated.