

DISS. ETH NO. 29959

Modular Navigation and Autonomy for Aerial Robots

A thesis submitted to attain the degree of

DOCTOR OF SCIENCES

(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

MICHAEL PANTIC

MSc ETH in Robotics, Systems and Control

born on July 26, 1988

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Roland Siegwart

Prof. Dr. Fabio Ramos

2024

Abstract

A wealth of novel use cases and applications were made possible with the advent of rotary-wing micro aerial vehicles (MAVs). Typical examples include aerial delivery, photogrammetry, inspection, and monitoring. The low hardware cost and general availability sparked an explosion in adoption not only in industry but also in the interest of the scientific community. A large body of research on flight control, state estimation, perception, navigation, and planning for these agile and cost-effective vehicles has been published. However, the standard quadrotor is limited in its physical interaction capabilities, as the under-actuated nature constrains the force and torque envelope. To overcome these limitations, a novel type of aerial robot has been developed - the omnidirectional micro aerial vehicle (OMAV). By adding thrust-vectoring capabilities, the OMAV is able to counter and exert forces and torques in all directions. These aerial robots enable novel use cases that need aerial-physical interaction, such as contact-based inspection, painting, drilling, milling, or general manipulation.

Physical interaction entails a distinctively different set of requirements concerning control, state estimation, and navigation, compared to the free-flight nature of traditional MAV. One major difference is the discrete nature of physical contact - ensuring safety by applying conservative simplifications in navigation and mapping to stay away from obstacles is not effective. Similarly, control algorithms need to take into account different sources of disturbances. An aerial robot is subject to desired disturbances from physical interaction as well as undesired and unknown disturbances from the airflow regime close to structure. The combination of two essential flight modes, the safe free-space flight in potentially challenging environments, and the precise and accurate physical interaction, is especially difficult to accommodate in classical, monolithic, and fixed-resolution mapping and navigation systems.

In this doctoral dissertation, we address many of the frontiers preventing the real-world use of aerial robots. In the first work, we extend the classical control methodology with a perception-in-the-loop system that uses geometrical information of the robot's surroundings to disentangle interaction forces from disturbances. This lays the foundation for stable and safe physical interaction, by allowing the robot to react fiercely against disturbances while staying compliant to the object it interacts with. Drawing from the experiences of a wealth of real-world tests in large, difficult, and diverse indoor and outdoor environments such as glaciers, deserts, and construction sites, we motivate and contribute a novel modular navigation architecture tailored to aerial robots. We explore the idea of a polyolithic navigation system, that uses many individually and parallelly executable and testable beha-

viors. Each of these behaviors may rely on a different sensing or estimation process. By combining many such behavior policies, the system is able to actively choose, blend, and employ different strategies for different flight modes or environments. The set of available strategies can then be adopted based on the available sensing modalities and estimation quality, drastically increasing the system’s robustness and adaptability. As part of this thesis, we contribute many policy building blocks for collision avoidance, surface following, servoing, and interaction. In different publications, we show how a massively parallel set of purely reactive policies compares favorably to state-of-the-art navigation algorithms in terms of navigation capability, but at vastly lower computational cost and without the need for a complete map. We demonstrate this on a variety of representations, such as volumetric maps on graphics processing units (GPUs), hierarchical multi-resolution representations on central processing unit (CPU), and in a data-driven, Neural Radiance Field (NeRF)-based approach. Additionally, we show how the manifold-like structure of surface meshes embedded in 3D space enables high-accuracy surface traversal at minuscule computation cost. In an extensive study, we apply a polyolithic navigation system in a construction environment. In this study, we show how an aerial robot can navigate and interact robustly and accurately without a globally consistent map in a purely reactive fashion.

Finally, we contribute a large number of improvements to the hardware and low-level architecture of aerial robots. These improvements are specifically tailored to interface with a polyolithic navigation system and future data-driven architectures. Additionally, we present a novel concept that enables OMAVs to fly as a fixed-wing vehicle - without needing any additional actuators in comparison to the pre-existing aerial robot. This allows the robot to fly large distances and retain its manipulation capabilities - a combination that enables many practical applications in remote locations.

Overall, this thesis advances the state-of-the-art in navigation, hardware, control, and conceptualization of aerial robots. Albeit demonstrated and designed for aerial robots, the scientific work on navigation presented in this thesis also applies to walking, driving, and swimming robots. Our contributions are another important step towards robots that perform work and difficult tasks in locations inaccessible to humans.

Zusammenfassung

Mit dem Aufkommen von Mikro-Luftfahrzeugen (MAV) wurde eine Fülle neuartiger Anwendungsfälle und Applikationen möglich. Typische Beispiele sind die Lieferung aus der Luft, Photogrammetrie, Inspektion und Überwachung. Die niedrigen Hardwarekosten und die allgemeine Verfügbarkeit führten zu einer explosionsartigen Verbreitung in der Industrie. Zeitgleich wurde das wissenschaftliche Interesse stetig grösser. Es wurden zahlreiche Forschungsarbeiten über Flugsteuerung, Zustandsschätzung, Wahrnehmung, Navigation und Planung für diese wendigen und kostengünstigen Luftfahrzeuge veröffentlicht. Der Standard-Quadrocopter ist jedoch in seinen physikalischen Interaktionsmöglichkeiten eingeschränkt, da die Kraft- und Drehmomentausübung durch die Koppelung von Orientierung und Beschleunigung begrenzt ist. Um diese Einschränkungen zu überwinden, wurde eine neue Art von Flugroboter entwickelt - die omnidirektionellen MAV (OMAV). Durch Schubvektorsteuerung ist das OMAV in der Lage, Kräften und Drehmomenten aus allen Richtungen entgegenzuwirken und diese auch beliebig auszuüben. Diese Flugroboter ermöglichen völlig neue Anwendungsfälle, wie z. B. kontaktbasierte Inspektion, Malen, Bohren, Fräsen und allgemeine Manipulation.

Die physikalische Interaktion stellt viel höhere Anforderungen an die Steuerung, Zustandsschätzung und Navigation. Ein wesentlicher Unterschied ist die diskrete Natur des physischen Kontakts - die Gewährleistung der Sicherheit einzig durch konservative Vereinfachungen bei der Navigation und Kartierung zur Vermeidung von Hindernissen ist nicht effektiv. Ebenso müssen die Steuerungsalgorithmen verschiedene Störungsquellen berücksichtigen. Ein Flugroboter ist sowohl erwünschten Störungen durch physische Interaktion als auch unerwünschten und unbekanntenen Störungen durch Turbulenzen in der Nähe von Strukturen ausgesetzt. Die Kombination von zwei wesentlichen Flugmodi, dem sicheren Flug im freien Raum und dem präzisen und genauen physischen Interagieren, ist in klassischen, monolithischen Kartierungs- und Navigationssystemen besonders schwierig zu bewerkstelligen.

In dieser Dissertation befassen wir uns mit einem grossen Teil der Schwierigkeiten die den Einsatz von Flugrobotern in der Praxis verhindern. In der ersten Arbeit erweitern wir die klassische Steuerungsmethodik um ein Wahrnehmungssystem, das geometrische Informationen über die Umgebung des Roboters nutzt, um Interaktionskräfte von Störungen zu trennen. Damit wird die Grundlage für eine stabile und sichere physikalische Interaktion gelegt, da der Roboter auf Störungen heftig reagieren kann, während er gleichzeitig dem Objekt, mit dem er interagiert, nachgibt. Ausgehend von einer Vielzahl von Praxistests in großen, schwierigen und vielfältigen Innen- und Aussenumgebungen wie Gletschern, Wüsten und Baustellen erarbeiten wir eine neuartige modulare Navigationsarchitektur, die auf

Flugroboter zugeschnitten ist. Wir erforschen die Idee eines polyolithischen Navigationssystems, das viele individuell ausführbare und testbare Verhaltensweisen verwendet, die jeweils auf unterschiedlichen Wahrnehmungs- oder Zustandsschätzverfahren beruhen können. Durch die Kombination vieler solcher Verhaltensweisen ist das System in der Lage, aktiv verschiedene Strategien für unterschiedliche Flugmodi oder Umgebungen auszuwählen, zu kombinieren und einzusetzen. Die Verfügbarkeit einer Reihe unterschiedlicher Strategien, die auf der Grundlage der verfügbaren Wahrnehmungs- und Zustandsschätzungsqualität ausgewählt werden können, erhöht die Robustheit und allgemeine Anpassungsfähigkeit erheblich.

Wir präsentieren zahlreiche Algorithmen für Kollisionsvermeidung, Oberflächenabtastung, Servoing und Interaktion. In verschiedenen Veröffentlichungen zeigen wir, wie ein grosses, paralleles Set rein reaktiver Policies in Bezug auf die Navigationsfähigkeit mit den modernsten Navigationsalgorithmen mithalten kann, jedoch zu wesentlich geringeren Rechenkosten und ohne die Notwendigkeit einer vollständigen Karte. Wir demonstrieren dies an einer Vielzahl von Kartendarstellungen, wie z. B. volumetrischen Karten auf Grafikkarten, hierarchischen Multi-Auflösungskarten, und in einem gelernten NeRF-basierten Ansatz. Darüber hinaus zeigen wir, wie die mannigfaltigkeitsähnliche Struktur von 3D Meshes für die hochpräzise Oberflächentraversierung bei minimalen Rechenkosten genutzt werden kann. In einer grösseren Studie wenden wir ein polyolithisches Navigationssystem in einer Baustellenumgebung an, wo wir zeigen, wie ein Flugroboter ohne eine global konsistente Karte auf rein reaktive Weise robust und genau navigieren und interagieren kann.

Zusätzlich entwickelten wir zahlreiche Verbesserungen der Hardware und der Low-Level-Architektur von Flugrobotern. Diese Verbesserungen sind gezielt auf polyolithische Navigationssysteme und zukünftige, gelernte Architekturen zugeschnitten. Darüber hinaus stellen wir ein neuartiges Konzept vor, das es dem OMAV ermöglicht, als Starrflügler zu fliegen - ohne zusätzliche Aktuatoren gegenüber dem bereits existierenden Flugroboter zu benötigen. Dadurch kann der Roboter über grosse Entfernungen fliegen und seine Manipulationsfähigkeiten beibehalten - eine Kombination, die viele praktische Anwendungen an abgelegenen Orten ermöglicht.

Insgesamt bringt diese Arbeit den Stand der Technik in den Bereichen Navigation, Hardware, Steuerung und Konzeptualisierung von Flugrobotern voran. Unsere Beiträge sind ein weiterer wichtiger Schritt auf dem Weg zu Flugrobotern, die Arbeiten und schwierige Aufgaben an für Menschen unzugänglichen Orten erledigen.