

DISS. ETH NO. 21711

# Advanced Closed Loop Visual Navigation for Micro Aerial Vehicles

A thesis submitted to attain the degree of  
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH  
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

**Markus Wilhelm Achtelik**

Diplom-Ingenieur Univ.  
Technische Universität München, Germany

Born September 7<sup>th</sup>, 1983 in Munich  
Citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Roland Siegwart, ETH Zürich

Prof. Nicholas Roy, Massachusetts Institute of Technology (MIT)

2014

# Abstract

Autonomous Micro Aerial Vehicles (MAVs), in particular small multi-rotor MAVs, have gained large popularity in the research community over the past couple of years. Due to their size, inherent safety and agility, MAVs are not only great research platforms, but have great potential in tomorrow's civil and industrial tasks such as: search and rescue, surveillance and inspection.

The control of MAVs during autonomous flights relies on the knowledge of variables, such as the position, velocity and orientation of the vehicle. However, these cannot be measured directly or drift-free by inertial sensors typically used onboard the MAVs, necessitating an additional position reference. While GPS is a popular choice for outdoor applications like aerial photography, it suffers from accuracy issues in cluttered environments, while it is entirely unavailable in indoor missions. Another popular choice in estimating the pose of a MAV with respect to its surroundings, is the use of laser-range finders, with many successful approaches existing in literature.

The wealth of information captured, their low weight and high frame-rate make cameras a very attractive choice to feature the onboard sensor suite of a MAV. With this rationale, this dissertation focuses on enabling autonomous flights with MAVs in previously unknown indoor and outdoor areas, solely using an onboard camera as the only exteroceptive sensor. As vision cues alone are not enough to ensure robust flight performance, fusing cues from an Inertial Measurement Unit (IMU), available on every MAV, is key in enabling autonomous flights using solely onboard sensors. The complementary nature of visual and inertial data renders this setup a very powerful sensor combination, albeit posing challenges in their synchronization, calibration and more generally, their fusion within the estimation process. With the minimal and generic sensor setup of a single camera and an IMU on board a MAV, this dissertation investigates methods in the areas of *control*, *state estimation*, and finally *path-planning*, to form a novel, comprehensive framework for autonomous MAV navigation.

For *control* of MAVs, we study the necessary dynamics and differential flatness of multi-rotor systems. We discuss potential abstractions in order to employ position- and trajectory controllers, once designed, on different types of multi-rotor platforms. Based on our investigation, we present a control approach based on dynamic inversion, which skips the commonly used attitude control loop and significantly reduces the mathematical operations necessary, rendering the approach well-suited for constrained onboard hardware.

For successful control of the MAV, accurate *state estimation* is key. We present a versatile framework, using an Extended Kalman Filter (EKF) to fuse visual information with inertial measurements from the onboard sensor suite. The challenges in design and formulation of this framework, both from the integration and the algorithmic point of view are great: not only are sensor calibration states essential for consistent state estimation throughout an entire mission, but also handling of delays and different rates of the sensors' measurements are vital. Moreover, as a consequence of using a monocular camera, arbitrarily scaled position-measurements have to be specifically handled. We present our findings on how to improve visual localization approaches, and formulate measurements from additional sensors, to allow a more generic formulation of our state estimation framework. Furthermore, we extend the EKF framework towards relative state estimation between two dynamically moving vehicles, each equipped with an IMU. With all computation running onboard the MAV, localization and dynamic maneuvers in unknown environments are shown to be possible solely with feeds from a monocular camera and an IMU—without any external references or known landmarks.

The state estimation framework incorporates states whose observability is only maintained as long as the MAV undergoes certain excitation. We present a path-planning method, accounting for both the dynamics of the MAV, and the state estimation framework at hand. We demonstrate our autonomous MAV navigation framework in action with paths being planned, such that the vehicle remains in an observable mode, while circumnavigating areas where localization becomes too uncertain.

The combination of the approaches presented in this dissertation forms a MAV navigation system, allowing autonomous trajectory generation and following in real scenarios, while offering various interfaces and a modular design for further research. This work brings MAVs a step closer to autonomous operations in real-life scenarios, where they can have a great impact.

**Keywords:** Micro Aerial Vehicles, Inversion Based Control, Multi-Sensor Fusion, Self-Calibration, Visual-Inertial Navigation, Collaborative State Estimation, Trajectory Planning, Motion and Uncertainty Aware Path Planning

# Kurzfassung

Autonome Mikro-Helikopter (MAVs), insbesondere kleine Multi-Rotor Helikopter, erreichten in den vergangenen Jahren zunehmende Beliebtheit in der Forschung. Aufgrund ihrer Größe, ihrer Sicherheit und Agilität eignen sich MAVs nicht nur sehr gut als Forschungsplattformen, sondern haben großes Potential für zukünftige zivile wie auch industrielle Anwendungen wie beispielsweise Bergung und Rettung, oder Inspektionsaufgaben.

Für die Regelung von MAVs während autonomen Flügen werden Größen wie Position, Geschwindigkeit und Orientierung benötigt. Diese sind jedoch nicht problemlos und driftfrei mittels der typischerweise an Bord von MAVs verfügbaren Inertialsensorik messbar, weshalb zusätzliche Positionsmessungen benötigt werden. Für Anwendungen im Freien, wie z.B. für Luftbildaufnahmen, sind GPS Sensoren eine gängige Wahl, jedoch verschlechtert sich die Auflösung in bebauten Gebieten, bis hin zur Unbrauchbarkeit innerhalb von Gebäuden. Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung der Position eines Mikro-Helikopters relativ zur Umgebung sind Laser-Abstandssensoren, mit Hilfe derer bereits erfolgreiche Ansätze in der Literatur zu finden sind.

Aufgrund ihres geringen Gewichts, der hohen Messrate und den umfangreichen Informationen, die auf einmal aufgenommen werden können, eignen sich Kameras sehr gut als Sensoren an Bord eines MAVs. Diese Dissertation zeigt daher Methoden, die autonome Flüge mit MAVs nur mit Hilfe von Kamera(s) im Freien sowie innerhalb von Gebäuden ermöglichen. Visuelle Informationen alleine sind jedoch noch nicht genug, daher werden vielmehr Daten von Inertialsensorik, die an jedem MAV vorhanden sind, mit visuellen Informationen fusioniert. Die komplementären Eigenschaften der Daten von Inertialsensoren und von Kameras ergeben eine leistungsstarke Kombination von Sensoren, mit Hilfe derer autonome und robuste Flüge ausschließlich mit on-Board Sensorik erst möglich werden. Auf Basis dieser minimalen Sensorkonfiguration beschäftigen wir uns in dieser Dissertation mit Methoden in den Gebieten *Regelung*, *Zustandsschätzung* sowie *Wegplanung*.

Für die *Regelung* von Multi-Rotor Systemen studieren wir zunächst das dynamische Verhalten, sowie die differentielle Flachheit dieser Systeme. Wir diskutieren mögliche Abstraktionen, sodass Positions- bzw. Trajektorienregler an verschiedenen Multi-Rotor Systemen wie z.B. an Quadroptern oder an Hexakoptern zum Einsatz kommen können. Schließlich zeigen wir einen Regelungsansatz basierend auf dynamischer Inversion, welcher es erlaubt die sonst typische Lageregelung zu überspringen.

Zur erfolgreichen Regelung von MAVs wird eine zuverlässige und genaue *Zustandsschätzung* benötigt. Daher präsentieren wir in dieser Arbeit einen universell einsetzbaren Ansatz, der mit Hilfe eines Erweiterten Kalman Filters (EKF) die Daten der Sensoren an Bord fusioniert. Dies stellt jedoch große Herausforderungen dar, sowohl von algorithmischer Seite, als auch von Seiten der Integration: Sensor-Kalibrierungszustände müssen geschätzt werden und Verzögerungen von Sensordaten sowie deren unterschiedliche Messraten müssen beachtet und kompensiert werden. Darüber hinaus müssen beliebig skalierte Positionsmessungen ausgeglichen werden, die sich aus dem Ansatz der Positionsbestimmung mit nur einer Kamera ergeben. Als Erweiterung zeigen wir einen Ansatz zur relativen Zustandsschätzung zwischen zwei sich dynamisch bewegenden MAVs, die jeweils mit Inertialsensorik ausgestattet sind. Alle Berechnungen, inklusive Bildverarbeitung, finden an Bord statt, womit wir zeigen dass nur mit Hilfe dieser minimalen Sensorkonfiguration dynamische Flüge in unbekanntem Gelände und ohne externe Positionsmessungen möglich sind.

Der Zustandsschätzer beinhaltet Zustände, deren Beobachtbarkeit nur gegeben ist, solange der Helikopter in Bewegung ist. Daher wurde eine Methode zur *Wegplanung* entwickelt, die optimale Pfade nicht nur im Sinne des kürzesten Weges plant, sondern auch so, dass ausreichend Anregung unter Berücksichtigung der Flugdynamik gegeben ist, um die Beobachtbarkeit aller Systemzustände zu gewährleisten. Darüber hinaus werden nur Pfade geplant, die das Überfliegen von Gebieten vermeiden, in welchen (visuelle) Lokalisierung zu unsicher wird.

All diese Ansätze ergeben zusammen ein MAV Flugnavigationssystem, dass es ermöglicht autonome Aufgaben mit MAVs in unbekanntem Gelände und ohne Abhängigkeit von GPS durchzuführen. Darüber hinaus ermöglicht das modulare Design einfache Erweiterbarkeit für zukünftige Forschungsaufgaben. Mit diesen Ergebnissen bringt diese Arbeit MAVs einen wichtigen Schritt weiter zu autonomen Manövern in echten Einsätzen.

**Schlüsselworte:** Multikopter, Quadroptersystem, Hexakopter, Positions- und Trajektorien Regelung, Multi-Sensor Datenfusion, Zustandsschätzung, Visuell-Inertiale Navigation, Trajektorienplanung, Wegplanung