

DISS. ETH NO. 18847

# **Design and dynamic modeling of autonomous coaxial micro helicopters**

A dissertation submitted to

**ETH ZÜRICH**

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

**Christian BERMES**

Diplom-Ingenieur Technische Kybernetik  
Universität Stuttgart, Deutschland

Master of Science Engineering Science and Mechanics  
Georgia Institute of Technology, USA

Born November 7th, 1980 in Soltau  
Citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Roland Siegwart  
Prof. Dr. Kenzo Nonami

March 2010

# Abstract

This thesis deals with the design, the dynamic modeling and the simulation of autonomous coaxial micro helicopters. The helicopter prototypes and modeling results that are presented are part of the project muFly, a European framework research project aiming at the design of an autonomous micro helicopter that is comparable to a small bird in size and mass.

The first goal of this work is to introduce two prototype designs for the muFly helicopter. The first prototype is designed in a modular way, to allow for fast sensor and actuator exchange and easy testing in different configurations. This modularity, however, has to be paid by quite high a total mass, which prevents from integration of the full set of sensors required for autonomous flight. The second prototype is designed in a highly integrated fashion to reduce the total mass and integrate the complete sensor set for autonomous flight, including the  $x$ - $y$ -position sensor consisting of laser diodes and an omnidirectional camera. The key to achieve the reduced mass is the dual use of electronics as structure, which leads to a mass saving of approximately 17%, while the sensor payload is increased.

The second goal of this work is to lay a more theoretical foundation for future coaxial micro helicopter designs, in particular focus are their ability to stabilize passively in roll and pitch, and their steering principles. Therefore, a modular dynamic model is developed, which incorporates the active and passive flapping characteristics of a hingeless rotor system, two optional steering principles, which are swash plate steering and steering by displacing the center of mass of the helicopter, and a stabilizer bar simulation module, which is also validated experimentally. Simulation results show the advantages of the coaxial rotor system in terms of a stronger disturbance rejection and a lower degree of total cross coupling. Moreover, swash plate steering is identified as the better steering option for coaxial micro helicopters, both in terms of output amplitude and energy consumption. Also the limitations of the stabilizer bar in terms of passive roll and pitch stabilization are shown. Finally, the dynamic model is used for a design parameter study of the most

relevant system design parameters. It aims at passive roll and pitch stabilization of the helicopter without a stabilizer bar. Simulation results show that passive stabilization can be achieved, and that the key parameter to passive stabilization is the rotor blade hinge offset, while blade flapping inertia and the distance between the rotors and the center of mass of the helicopter play a less important role.

**Key words:** Autonomous micro aerial vehicle, Coaxial helicopter, Dynamic simulation, Stabilizer bar, System design, System integration

# Kurzfassung

Diese Arbeit behandelt den Prototypenentwurf, die dynamische Modellierung und die Simulation von autonomen koaxialen Mikrohelikoptern. Die gezeigten Prototypen und Ergebnisse sind Teil des Projektes muFly, einem europäischen Rahmenprojekt mit dem Ziel, einen autonomen Mikrohelikopter zu bauen, der in seiner Grösse und seinem Gewicht vergleichbar ist mit einem kleinen Vogel.

Ein Ziel dieser Arbeit ist die Einführung von zwei Prototypen des muFly-Helikopters. Der erste Prototyp ist als modulare Testplattform konzipiert, was den einfachen Austausch von Sensoren und Aktuatoren und Tests in unterschiedlichen Konfigurationen erlaubt. Der Nachteil dieser Modularität ist ein hohes Gesamtgewicht, so dass nicht alle für volle Autonomie notwendigen Sensoren integriert werden können. Der zweite Prototyp ist im Gegensatz dazu stark integriert, was zu einer Reduzierung der Gesamtmasse bei gleichzeitiger Mitnahme aller für autonomen Flug notwendigen Sensoren, insbesondere des aus Laserdioden und Omnidirektionalkamera bestehenden  $x$ - $y$ -Positionssensors, führt. Die reduzierte Masse und der hohe Integrationsgrad werden durch duale Verwendung der Bordelektronik als Strukturelemente erreicht, so dass bei erhöhter Sensornutzlast die Gesamtmasse um etwa 17% reduziert wird.

Ein weiteres Ziel dieser Arbeit ist es, eine stärker an der Helikoptertheorie orientierte Grundlage für zukünftige koaxiale Entwürfe zu schaffen. Von besonderem Interesse sind dabei die passive Roll- und Nickstabilität und die Auswahl eines geeigneten Steuerprinzips. Dazu wird ein modulares Modell für die dynamische Simulation eingeführt, welches die aktiv und passiv erregten Anteile der Schlagbewegung der Rotorblätter, zwei optionale Steuermechanismen in Form von Taumelscheibe und Massenschwerpunktverlagerung, sowie ein Modul für die Stabilisatorstange beinhaltet. Das simulierte Verhalten der Stabilisatorstange wird dabei auch experimentell validiert. Die Simulationsergebnisse zeigen die Vorteile des koaxialen Rotorsystems durch stärkere Robustheit gegenüber Störungen und einen geringeren Grad an Quer-

kopplung der summierten longitudinalen und lateralen Schlagwinkel. Darüber hinaus kann durch quantitative Ergebnisse die Taumelscheibe als das bessere Steuerprinzip identifiziert werden, und die Grenzen der Stabilisatorstange für die passive Roll- und Nickstabilität aufgezeigt werden.

Schliesslich wird das dynamische Simulationsmodell für eine Studie der für die passive Roll- und Nickstabilität wichtigsten Entwurfsparameter genutzt. Ziel ist dabei, passive Stabilität ohne Stabilisatorstange zu erreichen. Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass passive Stabilisierung durch richtige Auswahl von Entwurfsparametern erreicht werden kann, und dass der wichtigste Parameter dabei der Schlagelenksabstand ist, während die Massenträgheit des Blattes und die Distanz zwischen den Rotoren und dem Helikoptermassenschwerpunkt eine untergeordnete Rolle spielen.

**Stichworte:** Autonomer Mikrohelikopter, Koaxialhelikopter, Dynamische Simulation, Stabilisatorstange, Systementwurf, Systemintegration