

DISS. ETH. NO. 21083

**Modeling and Design of Unmanned Rotorcraft  
Systems for Contact Based Inspection**

A dissertation submitted to

ETH ZÜRICH

for the degree of

Doctor of Science

presented by

**Christoph HÜRZELER**

Dipl. Masch.-Ing. ETH,

ETH Zürich,

Switzerland

Born May 2<sup>nd</sup>, 1980 in Thun

Citizen of Switzerland

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Roland Y. Siegwart, ETH Zürich

Prof. Dr. Lorenzo Marconi, University of Bologna

Zürich 2013

# Abstract

In this dissertation the particular problems involved in designing unmanned coaxial rotor helicopters suitable for contact based inspection tasks are investigated. As established in the introductory section of this work, the facility maintenance industry is calling for a new class of robotic rotorcraft systems capable of more than mere visual inspections. The next generation of aerial inspection robots is expected to safely dock to and interact with vertical surfaces in order to apply contact based inspection tools to critical structures in various industrial facilities. The development of a robotic rotorcraft with such capabilities poses great challenges in regard of both theoretical and practical aspects. From the design of the basic flight mechanism, over the integration of the flight sensing and processing electronics to the final implementation of the required autonomous flight behaviors using suitable control architectures, all facets of aerial robotics must be mastered. This is generally not possible based on mere engineering intuition and hence accurate simulation models guiding the design process are indispensable. The dedicated objective of this dissertation is the realization of such simulation tools.

With this context established, a research prototype based on a coaxial rotor concept is presented. In the scope of this thesis, this prototype predominantly serves as a baseline system, based on which the simulation models developed herein may be validated and related to a real world system. Before the specific characteristics of the coaxial rotor configuration in free-flight as well as constrained in contact with vertical surfaces may be investigated, the principle flight physics of coaxial rotor helicopters must be understood and modeled in detail. Consequently, a physical, yet simple, analytical flight dynamics model accounting for the typical configuration of model size coaxial rotor helicopters is developed and described. This physical free-flight model is subsequently extended to incorporate the fundamental changes in a rotorcraft's flight dynamics due to the unilateral constraint forces established when

docking to a vertical surface. The resulting theoretical framework is assembled in digital form using a symbolic computation software package.

Based on this digital model database, flight simulators are developed subsequently. In order to parameterize these simulators, a parameter estimation methodology is presented which guarantees both model accuracy in the sense of matching the flight behavior of a real system *and* maintaining the physicality of all subsystems. Through an extensive evaluation process using flight data from the aforementioned coaxial rotor prototype, the presented models and the estimated flight parameters are validated.

Finally, the flight characteristics of typical robotic coaxial rotorcraft are investigated in more detail using the theoretical background developed in the preceding chapters. The role of mechanical rotorcraft stabilization aids found on most model size helicopter configurations is discussed and the principle rules defining rotorcraft systems in contact with vertical surfaces are laid out.

**Key words:** helicopter, rotorcraft system, flight dynamics, coaxial rotor, aerial inspection, aerial manipulation, docking, Bell–Hiller flybar, resonance

# Kurzfassung

Diese Dissertation beschäftigt sich mit der Entwicklung von unbemannten Koaxialrotor Helikoptern für kontaktbasierte Inspektionsanwendungen. Bereits heute werden verschiedenste Ansprüche der Service- und Wartungsindustrie mit autonomen Flugsystemen abgedeckt. Diese Flugroboter sind jedoch immer noch auf reine visuelle Inspektionen beschränkt. In Zukunft sollen Flugsysteme realisiert werden, welche die Fähigkeit besitzen in sicheren Kontakt mit vertikalen Oberflächen zu treten und somit auch den Einsatz von kontaktbasierten Inspektionssensoren zu ermöglichen. Die Entwicklung autonomer Flugroboter gilt jedoch generell als anspruchsvoll da eine Vielfalt von technischen Problemen sowohl praktischer wie auch theoretischer Natur gemeistert werden müssen. Dies verlangt im Allgemeinen nach Simulationsmodellen, welche die Dynamik solcher Helikopter exakt erfasst. Das erklärte Ziel dieser Arbeit ist die Umsetzung entsprechender Simulationswerkzeuge um die weitere Entwicklung in diesem Forschungsbereich zu unterstützen.

In diesem Zusammenhang wird in einem ersten Schritt ein Koaxialrotor Flugsystem vorgestellt, welches spezifisch für eine detaillierte Untersuchung der eben beschriebenen Aufgabenstellung entwickelt wurde. Innerhalb dieser Dissertation dient dieses Flugsystem hauptsächlich als Validierungsgrundlage, mittels welcher die Genauigkeit der hier umgesetzten Modellbildung sichergestellt werden kann. Bevor die spezifischen Eigenschaften solcher Flugroboter sowohl in freiem Flug sowie in Kontakt mit der entsprechenden Umgebung genauer untersucht werden können, müssen die physikalischen Grundlagen der Koaxialrotor Helikopter-Konfiguration erläutert werden. In einem weiteren Schritt werden deshalb exakte, jedoch vergleichsweise einfache, analytische Helikoptermodelle vorgestellt. Um auch den Einfluss unilateraler Kräfte auf Grund von Oberflächenkontakten erfassen zu können, werden diese Flugmodelle im weiteren Verlauf entsprechend erweitert.

Im Anschluss darauf werden an Hand dieser Modelle Flug-Simulatoren imple-

mentiert, welche eine Voraussage des Flugverhaltens der modellierten Plattform ermöglichen. Diesbezüglich ist eine sinnvolle Parametrisierung natürlich unabdingbar. Entsprechend wird ein Parameterschätzungsverfahren vorgestellt, welches eine akkurate Abbildung des Flugverhaltens der beschriebenen Helikopter Plattform realisiert und *gleichzeitig* ein korrektes und physikalisches Erfassen aller Subsysteme erlaubt.

Abschliessend werden verschiedene Aspekte typischer, unbemannter Koaxial Helikopter im Detail analysiert. Einerseits wird die Funktionalität mechanischer Rotor-Stabilisierungshilfen diskutiert und andererseits wird das Flugverhalten autonomer Helikopter in Kontakt mit vertikalen Oberflächen genauer evaluiert.

**Stichworte:** Helikopter, Flugdynamik, Koaxialrotor, Flugbasierte Inspektion, Kollisionsdynamik, Kontaktdynamik, Bell–Hiller Flybar, Resonanz