

Diss. ETH No. 16586

# Guidance and Control for Aerobatic Maneuvers of an Unmanned Airplane

A dissertation submitted to the  
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
ZURICH

for the degree of  
Doctor of Technical Sciences

presented by  
Markus Reinhard Möckli  
Dipl. Masch.-Ing. ETH  
born July 23, 1977  
citizen of Schlatt, TG

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. H.P. Geering, examiner  
Prof. Dr. T. Rösgen, co-examiner  
Dr. J. Wildi, co-examiner

2006

---

## Abstract

The primary objective of this research is to make flight control capable of governing an unmanned airplane to fly aerobatic maneuvers. An appropriate flight-controller test bench is developed which allows flying aerobatics even with the additional payload of the avionic system. The integrated instrumentation permits tracking of fast aerobatic maneuvers.

A nonlinear model is developed that on the one hand is able to show the most important aspects of the behavior of the airplane and on the other hand is simple enough to allow the pertinent parameters to be identified using flight data. The detailed identification chain is shown, which leads from the initial database of the airplane to the complete parameter set.

A consistent description for basic aerobatic maneuvers using spline curves is presented. The reference trajectories are generated synthetically based on measurement data from manually piloted aerobatic maneuvers.

For the design of the path-tracking and airspeed-tracking controllers a slow-timescale approximation is used. Feedback linearization is applied to control the path deviation and the airspeed. In the fast timescale a gain-scheduling  $H_\infty$  controller is used to track the reference commanded by the slow-timescale controller.

The guidance and control system is validated by flight tests. The autopilot showed autonomous flight of the following maneuvers: Looping, Aileron Roll, Four-Point Aileron Roll, Knife-Edge Flight, Half Cuban Eight, Half-Inverted Cuban Eight, Half Vertical Aileron Roll, and Half Negative Looping. Finally, an autonomously flown aerobatic program of over two minutes' duration including all of the above maneuvers is presented.

For a short summary of the thesis the reader may refer to the documentation video on the UAV-group's home page: [www.uav.ethz.ch](http://www.uav.ethz.ch)

---

## Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit ist es, einen Autopiloten zu entwickeln, welcher in der Lage ist, vollautomatisch Kunstflugfiguren mit einem Flächenflugzeug zu fliegen. Dazu wurde zunächst ein passendes Flug-Regler-Testflugzeug aufgebaut, welches auch mit der Last der Avionik noch kunstflugtauglich ist. Die Instrumentierung des Flugzeuges erlaubt auch das Erfassen schneller Kunstflugmanöver.

Es wurde ein nichtlineares Modell des Flugzeuges entwickelt, welches einerseits das für Kunstflug wesentliche Verhalten wiedergibt und andererseits genügend einfach gehalten ist, sodass eine Identifikation mittels Flugmessdaten möglich ist. Der detaillierte Ablauf der Identifikation, ausgehend von den zu Beginn verfügbaren Daten bis zum kompletten Parametersatz, wird gezeigt.

Eine einheitliche Beschreibung für einfache Kunstflugmanöver basierend auf Splines wird vorgestellt. Die Referenztrajektorien werden künstlich erzeugt basierend auf Messdaten von manuell geflogenen Kunstflug-Manövern.

Die Auslegung der Bahnregler und des Anströmgeschwindigkeitsreglers basiert auf einer Vereinfachung des Modells für die langsamen Vorgänge. Für die Regelung der Bahnabweichung und der Anströmgeschwindigkeit wird Feedback-Linearisierung angewendet. Im schnellen Regelkreis werden gain-scheduling  $H_\infty$ -Regler verwendet, um der Führungsgrösse vom langsamen Regelkreis zu folgen.

Das Flugführungs- und Regelungssystem wird mittels Flugtests validiert. Der Autopilot hat vollautomatisch die folgenden Manöver geflogen: Looping, Rolle, 4-Punkt Rolle, Messerflug, halbe Kubanacht, halbe umgekehrte Kubanacht, halbe vertikale Rolle und halber negativer Looping. Zum Schluss wird ein Kunstflugprogramm von über zwei Minuten Dauer gezeigt, welches alle erwähnten Manöver beinhaltet.

Eine kurze Zusammenfassung in Form eines Dokumentationsvideos ist ersichtlich auf der Homepage der UAV-Gruppe: [www.uav.ethz.ch](http://www.uav.ethz.ch)