

Fortschrittsberichte des Instituts für Flugmechanik und
Flugregelung

Band 1

Alexander Joos

**Real-Time Predictive Motion Planning
for Fixed-Wing Aerial Vehicles**

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Aachen 2014

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2014

Copyright Shaker Verlag 2014

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-2846-1

ISSN 2199-3483

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen

Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Abstract

In this work, a motion planner for small fixed-wing unmanned aerial vehicles (UAVs) is presented. The planner is designed for motion in three dimensions (3d) and six degrees of freedom (6DoF) with constraints and obstacles. It is set up with Nonlinear Model Predictive Control (NMPC) and is especially developed for high-frequent onboard execution in real-time. Furthermore, a new implementation method of an NMPC on a Field Programmable Gate Array (FPGA) is established. The idea is to utilize FPGAs for parallel numerical model prediction in hardware. This new implementation method and a suited NMPC setup allow for efficient implementation of the NMPC planning algorithm on a relatively small onboard computer with a FPGA module with low power consumption. Finally, this enables the application of the motion planner to a small unmanned fixed-wing UAV in flight.

First, an efficient setup of the NMPC motion planner is described. The associated optimization problem is solved with numerical time-domain simulations with a set of predefined candidate control options. In order to evaluate these control options, the nonlinear 3d kinematics is used as a prediction model in combination with actions motivated from flight mechanics. Due to the control structure, the planning problem can be solved even with a low number of candidate control options. Furthermore, the computational effort is reduced by exploiting the results of a nonlinear controllability analysis.

Next, the applicability of NMPC with finite prediction horizon is studied in the context of this work with a stability analysis without stability constraints or terminal penalty terms. The objective here is to find a prediction horizon with a low computational load that still ensures closed loop stability for the system.

A new method for the implementation of NMPC on FPGAs is introduced. In this method, hardware logic elements of a FPGA are used for parallel numerical timedomain simulations. Candidate control options can thus be evaluated with low and guaranteed computation time. Through this method and an integrated consideration of the required hardware logic elements, available computation time, and numerical precision, NMPC can be executed efficiently in real-time on FPGA modules, which are especially suitable for small fixed-wing UAVs with stringent mass limitations.

The setup of the NMPC planner together with the suited implementation method finally enables the high-frequent execution of the NMPC planner (computation time approx. 5.1ms) on a low-power onboard computer. Flight tests with a small fixed-wing UAV and hardware-in-the-loop real-time tests verify the NMPC setup and the FPGA implementation method in scenarios with attitude constraints, obstacles, and even in the presence of wind.

Kurzfassung

In dieser Arbeit wird ein Bewegungsplaner für kleine unbemannte Flächenflugzeuge in drei Dimensionen (3d) und sechs Freiheitsgraden (6DoF) mit Beschränkungen und Hindernissen vorgestellt. Der Planer basiert auf nichtlinearer Modell-prädiktiver Regelung (NMPC) und wurde speziell dahin gehend entwickelt, an Bord hochfrequent in Echtzeit gerechnet werden zu können. Dazu wird eine neue Implementierungsmethode für NMPC auf Field Programmable Gate Arrays (FPGAs) eingeführt. Diese Methode gründet auf der Idee, FPGAs zur effizienten parallelen Lösung numerischer Zeitbereichssimulationen direkt in Hardware Logik Bausteinen zu verwenden. Dadurch wird eine Implementierung des NMPC-Planungsalgorithmus auf einem Bordrechner mit FPGA Modul mit relativ geringem Leistungsbedarf umsetzbar. Letztendlich ermöglicht dies die Flugdemonstration des präsentierten Planers und der vorgeschlagenen Implementierungsmethode mit einem kleinen unbemannten Flächenflugzeug.

Zunächst wird eine effiziente Formulierung für den Bewegungsplaner beschrieben. Das NMPC-Optimierungsproblem wird durch numerische Zeitbereichs-Simulationen mit vordefinierten Stellgrößen-Kandidaten gelöst. Um diese Kandidaten auszuwerten wird die nichtlineare 3d Kinematik als Prädiktionsmodell zusammen mit flugmechanisch motivierten Maßnahmen verwendet. Es wird gezeigt, dass das Bewegungsplanungsproblem aufgrund der Reglerstruktur selbst mit einer geringen Zahl an Kandidaten gelöst werden kann. Weiter wird der Rechenaufwand mit Hilfe der Ergebnisse einer nichtlinearen Steuerbarkeitsanalyse reduziert.

Danach wird die prinzipielle Anwendbarkeit des NMPC mit finitem Prädiktionshorizont anhand einer Stabilitätsbetrachtung diskutiert. Dazu werden keine zusätzlichen Stabilitätsbeschränkungen und Endkostenterme verwendet. Auch hier ist der Hauptaspekt wieder, dass eine Konfiguration gefunden wird, die möglichst wenig Rechenaufwand benötigt, und dennoch für das vorliegende System Stabilität garantiert.

Darauf folgt die Vorstellung einer neuen Methode zur Implementierung von NMPC auf FPGAs. In dieser Methode werden Hardware Logik Bausteine des FPGA für parallele Zeitbereichssimulationen verwendet. Dadurch können Stellgrößen-Kandidaten mit geringer und garantierter Rechenzeit ausgewertet werden. Durch eine integrierte Betrachtung der benötigten Hardware Logik Elemente, der verfügbaren Rechenzeit und der numerischen Genauigkeit ermöglicht diese Implementierungsmethode eine Ausführung des NMPC in Echtzeit auf FPGA Modulen, die für Flächenflugzeuge mit strengen Massenbeschränkungen geeignet sind.

Die Formulierung des NMPC Planers erlaubt zusammen mit der FPGA Implementierungsmethode letztendlich eine hochfrequente Ausführung des Planers (Rechenzeit ca. 5.1ms) auf einem kleinen Bordrechner. Testflüge mit einem kleinen unbemannten Flächenflugzeug und Echtzeit-Simulationen bestätigen die NMPC Formulierung und Implementierungsmethode in Szenarien mit Lagebeschränkungen, Hindernissen und selbst mit Störungen durch Wind.