

$$\dot{x} = f(x, u), \quad x(0) = x_0$$

$$y = g(x, u)$$

$$sX(s) = (A - N)X(s) + U(s)$$

$$Y(s) = CX(s) + DU(s)$$

$$\dot{\Phi}(t, t_0) = A(t)\Phi(t, t_0)$$

# Echtzeitfähige Bewegungsplanung mit Hindernisvermeidung für unbemannte, senkrecht startende Luft- und Raumfahrzeuge

Dipl.- Ing. Christoph Seiferth



$$\dot{v} = \frac{1}{m} (R_A + R_F) + T_{fg} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{pmatrix} - (\tilde{\omega} + \tilde{\omega}_E) \cdot v$$

$$x^T P x < 0$$



$$\beta_{nc} \equiv \frac{1}{N} \sum_{n=-1}^N \beta_m \cos n\psi_n$$

```
for(i=0; i<=N-1; i++)
    if(xD[1+i] >= sat_val) {comp
    if(xD[1+N+i] >= sat_val)
    if(xD[1+2*N+i] >= sat_val)
    if(xD[1+4*N+i] >= sat_val)
```



Universität Stuttgart  
Institut für Flugmechanik und Flugregelung

Fortschrittsberichte

$$\|y\|_{rms}^2 \leq \sup_{\omega \in \mathbb{R}} |G(j\omega)|^2 \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_{uu}(\omega) d\omega$$

Fortschrittsberichte des Instituts für Flugmechanik und  
Flugregelung

Band 12

**Christoph Seiferth**

**Echtzeitfähige Bewegungsplanung mit  
Hindernisvermeidung für unbemannte, senkrecht  
startende Luft- und Raumfahrzeuge**

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag  
Düren 2021

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2021

Copyright Shaker Verlag 2021

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8253-1

ISSN 2199-3483

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Kurzfassung

Der automatische Betrieb kleiner unbemannter Luftfahrzeuge, birgt aufgrund deren Größe eine erhebliche Herausforderung: Die dafür bereitzustellenden Autonomiefunktionen sind wegen ihrer Komplexität meist anspruchsvoll in der für ihre Ausführung benötigten Rechenhardware, da für echte Autonomie ohne externe Infrastruktur alle Entscheidungen an Bord getroffen werden müssen. Diese Rechenhardware kann angesichts des eingeschränkten Bauraums und der stark begrenzten Zuladung solcher Luftfahrzeuge trotz der Miniaturisierung und Leistungssteigerung in den letzten Jahren nur vergleichsweise einfach sein.

Eine wichtige Komponente der angesprochenen Autonomiefunktionen ist die Bahnplanung, mit der sich die vorliegende Arbeit befasst. Diese Funktion behandelt das Problem der Suche und Optimierung einer Bewegungstrajektorie des Luftfahrzeuges unter Berücksichtigung von Randbedingungen wie z. B. das Vermeiden von Hindernissen, Einhalten von maximalen Flugeschwindigkeiten oder auch die Beschränkung der Lage des Luftfahrzeugs.

Nach einer eingehenden Einführung der angesprochenen Thematik und der Vorstellung üblicher Lösungsansätze bei der Lösung von Bahnplanungsproblemen und der Optimalsteuerung stellt diese Abhandlung zunächst einen Ansatz zur prädiktiven Bahnplanung auf Basis der nichtlinearen modellprädiktiven Regelung mit Beschränkungen in Zuständen und Steuergrößen vor, der besonders für die echtzeitfähige Implementierung auf kleiner und kompakter Rechnerhardware geeignet ist. Dies wird einerseits durch die geschickte Wahl eines geeigneten Prädiktionsmodells möglich und andererseits durch die Art und Weise der Lösung des zugrundeliegenden Optimalsteuerungsproblems. Durch grobe Diskretisierung und Quantisierung der Steuergrößen wird eine Parallelisierung der notwendigen Berechnungsschritte ermöglicht.

Der darauffolgende Abschnitt der Arbeit beschäftigt sich dann auf Basis einer modernen Stabilitätstheorie mit der Fragestellung der Wahl der Länge des sogenannten Prädiktionshorizontes, dem bei der modellprädiktiven Regelung eine Schlüsselrolle in der Beurteilung der Stabilität des geschlossenen Regelkreises zukommt.

Im anschließenden Teil wird die echtzeitfähige Implementierung des vorgestellten Bahnplaners auf einem kleinen eingebetteten System vorgestellt, das mit Unterstüt-

## *Kurzfassung*

zung eines Field Programmable Gate Arrays (FPGA) die zur Hindernisvermeidung benötigte Abstandsberechnung zu Hindernispunkten realisiert und beschleunigt. Freiluft-Flugversuche mit simulierten Hindernissen sowie Echtzeittests in einer Hardware-in-the-Loop (HiL) Testumgebung in einer simulierten, anspruchsvollen Umgebung mit vielen Hindernissen belegen sowohl die Echtzeitfähigkeit der vorgeschlagenen Architektur und deren Implementierung als auch deren Effektivität hinsichtlich der Einhaltung der verlangten Zustands- und Steuerverlaufsbeschränkungen.

Abschließend wird mit einer integrierten Implementierung auf einem Tablet-Computer mit Grafikkartenunterstützung eine Weiterentwicklung der oben angesprochenen Bahnplanungsarchitektur vorgestellt, deren Echtzeitfähigkeit statistisch mit Hilfe von Laufzeitmessungen verifiziert wird.