Automatische Spurlaufregelung für Hubschrauber mit aktiven Hinterkantenklappen

Von der Fakultät Luft- und Raumfahrttechnik und Geodäsie
der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Frank A. King

aus Aalen

Hauptberichter:	Prof. Dr.-Ing Walter Fichter
Mitberichter:	Prof. Dr.-Ing. Peter Vörsmann
Tag der mündlichen Prüfung:	26. Juni 2015

Institut für Flugmechanik und Flugregelung
Universität Stuttgart
2015

Fortschrittsberichte des Instituts für Flugmechanik und Flugregelung

Band 5

Frank A. King

Automatische Spurlaufregelung für Hubschrauber mit aktiven Hinterkantenklappen

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Aachen 2015

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., 2015

Copyright Shaker Verlag 2015
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4018-0
ISSN 2199-3483

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

„Nature does not offer her problems ready formulated. They must be dug up by pick and shovel, and he who will not soil his hands will never see them.“

John Lighton Synge (1897 - 1995)

Inhaltsverzeichnis

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis **vii**

Kurzfassung **xi**

Abstract **xiii**

1 Einleitung **1**

1.1 Motivation zur aktiven Spurlaufregelung 1

1.2 Minderung niederfrequenter Vibration — Überblick theoretischer Methoden 4

1.3 Forschungsfragestellung 6

1.4 Forschungsbeiträge 8

1.5 Aufbau der Arbeit 11

2 Transfermatrizenbasiertes Übertragungsmodell und Wirkrichtungsanalyse **13**

2.1 Modellierungsansatz mittels Transfermatrizen 13

2.1.1 Allgemeines Transfermatrizenmodell der Vibration 16

2.1.2 Modellgleichungen bei idealem Rotorsystem 17

2.1.3 Übertragungsmodell realer Rotorsysteme 18

2.2 Analyse der Übertragungspfade des allgemeinen Rotorsystems 19

2.2.1 Wirkrichtungen der Ansteuerung beim idealen Rotorsystem . . 20

2.2.2 Übertragungseigenschaften des realen Rotorsystems 23

2.3 Reduzierbarkeit der Vibration durch konstante Steuersignale 27

2.4 Identifikationsprozess zur Bestimmung der Modellparameter 28

3 Regelungskonzept zur automatischen Spurlaufeinstellung **31**

3.1 Konzeptanalyse transfermatrizenbasierter Regelung 32

3.1.1 Grundlegender Regelalgorithmus 32

3.1.2 Einschränkungen bezogen auf die Spurlaufregelung 33

3.2 Allgemeines Design der Spurlaufregelung 36
3.2.1 Erweiterter Zustandsautomat 36
3.2.2 Multiratendarstellung des Reglers 39
3.2.3 Integraler Regleranteil 39
3.2.4 Signalparameterschätzung 43
3.2.5 Konzeptionelle Zwischenbewertung des Algorithmus 45
3.3 Applikationsdesign für das reale Trägersystem 47
3.3.1 Effiziente Neuparametrierung mittels analytischer Singulärwertzerlegung 48
3.3.2 Modenreduktion 51
3.3.3 Stellgrößenlimitierung unter Optimalitätsgesichtspunkten . . . 55

4 Stabilität und garantierte Reduktionsgüte bei ungestörter Signalparameterschätzung 63
4.1 Ersatzbeschreibung des geschlossenen Regelkreises 64
4.2 Stabilitätsverhalten im Entwurfsfall 65
4.3 Störübertragung bei beliebigem Rang der Reglermatrix 66
4.3.1 Matrixexponentialreihe und stationäres Übertragungsverhalten 67
4.3.2 Reihenlösung auf Basis der Kalman-Darstellung 68
4.3.3 Bestimmung der Kalman-Darstellung 70
4.4 Stationäre Reduktionsgüte bei aktiver Spurlaufregelung 71
4.4.1 Reduzierbarkeitszerlegung der Störung 71
4.4.2 Störfilteransatz bei additiver Ausgangsdarstellung 72
4.4.3 Abschätzung der stationären Reduktionsgüte 73
4.4.4 Ergebnisse der Reduktionsanalyse für das reale Trägersystem . 74
4.5 Robustheit der Vibrationsreduktion bei gestörtem Klappensystem . . 75
4.5.1 Normabschätzung bei verfälschtem Stellsignal 76
4.5.2 Ergebnisse der Robustheitsuntersuchung zum stationären Reduktionsniveau bei Klappenstörung 77

5 Stabilitätsverhalten unter expliziter Einbeziehung der Signalverarbeitung 79
5.1 Regelkreis mit erweitertem Stör- und Streckenmodell 81
5.2 Transformationsmethode zur Untersuchung des Multiratensystems . . 82
5.2.1 Anforderungen an die Komponenten des Regelkreises 82
5.2.2 Zweiratenstruktur der Signalparameterschätzung 83
5.2.3 Kopplung Signalparameterschätzung zu integralem Reglerteil . 84

5.2.4 Geschlossene Darstellung bei optimaler Abtastung 84
5.2.5 Geschlossene Darstellung bei allgemeiner Abtastung 87
5.3 DFT-basierte Signalparameterschätzung als periodisches Zustandsraummodell 93
5.3.1 DFT-Filter für eine Raumachse 94
5.3.2 Gesamtdarstellung der Signalverarbeitungsroutine 95
5.4 Effiziente Berechnung enthaltener Summationslösungen 96
5.5 Stabilität des zeitperiodischen Multiratensystems der Spurlaufregelung 99
5.5.1 Allgemeines Stabilitätskriterium 99
5.5.2 Stabilitätsnachweis der eingesetzten Regelung auf dem Trägersystem 99

6 Ergebnisse der Flugexperimente 103
6.1 Wirkungsanalyse und Modellidentifikation 104
6.1.1 Sensitivität einzelner Frequenzanteile auf Klappenausschläge . 104
6.1.2 Modellstruktur- und Symmetrievalidierung 106
6.2 Flugtest im Designfall der Regelung 108
6.2.1 Optimalitätsabschätzung mittels Extraktion der Nullraumanteile 108
6.2.2 Reine 1/rev-Regelung 110
6.2.3 Spurlaufregelung unter Einbeziehung höherharmonischer Frequenzanteile 113
6.2.4 Wirkung der Spurlaufregelung auf den Passagierkomfort 114
6.3 Flugtest im Off-Design-Fall der Regelung 116

7 Fazit der Arbeit und Ausblick 119
7.1 Schlussfolgerung 119
7.2 Resultierende Anschlussthemen 121

A Regelung mittels Streichung schwacher Wirkrichtungen 125

B Symmetrierter Entwurf beim Vierblattrotor 127

C Symbolische Singulärwertzerlegung für ausgewählte Blattzahlen 129

Abbildungsverzeichnis 133

Literaturverzeichnis 137

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

Regelmäßig im Rahmen der vorliegenden Arbeit wiederkehrende Symbole und Abkürzungen können der nachfolgenden Übersicht entnommen werden. Nicht berücksichtigt sind dabei jene Symbole, welche nur vereinzelt Verwendung finden.

Mathematische Symbole — Kleinbuchstaben

$a_{i,j/rev}$	Beschleunigungsamplitude in Achsrichtung i mit Frequenz j/rev
$\mathfrak{a}^*$, $\mathfrak{b}^*$	Spalten der Matrix $\mathcal{A}^*$, $\mathcal{B}^*$ aus der Singulärwertzerlegung
$d = (d_i)$	Störeingang des Transfermatrixmodells in Sinus-Kosinus-Zerlegung
f_f	Abtastfrequenz des schnellen Subsystems der Regelung
f_s	Abtastfrequenz des langsamen Subsystems der Regelung
$2 \cdot \tilde{n}$	Anzahl zyklischer Stellrichtungen
$u = (u_i)$	Ansteuervektor des Klappensystems
u_g	Maximal zulässiger Betrag der Komponenten des Stellvektors u
$u_R = (u_{R,i})$	Reglerausgang
$\tilde{u}_{0/d/kc/ks}$	Basisrichtungen der Ansteuerung in Multiblattkoordinaten
$\bar{u}_{0/d/kc/ks}$	Normierte Basisvektoren der Multiblattkoordinaten
$w = (w_i)$	Ausgangsvektor der Signalparameterschätzung
$x_R = (x_{R,i})$	Zustandsvektor des integralen Reglers in physikalischen Koordinaten
$x_R^c = (x_{R,i}^c)$	Zustandsvektor des integralen Reglers in reduzierten Koordinaten
$y = (y_i)$	Modellausgang in Sinus-Kosinus-Zerlegung
$\tilde{\alpha}$	Rang der Reglermatrix R
$\hat{\alpha}$	Höchste von der Regelung zurückgeführte Harmonische
γ	Skalare Rückführverstärkung des Regelsystems
δ	Gesamtlänge eines Regelungszyklus ($\delta = N_R + \tilde{N}_R$)
σ_i^*	Singulärwerte der Transfermatrix T^*

— Großbuchstaben

$\mathcal{A}_j^i$	Rotationsmatrix zur Frequenz i/rev, Blatt $j-1$
$\mathcal{A}^*$, $\mathcal{B}^*$	Matrizen der Singulärwertzerlegung $\mathcal{A}^* \cdot \mathcal{S}^* \cdot (\mathcal{B}^*)^T$ zur Matrix T^*
E_n	Einheitsmatrix der Dimension $n \times n$
G_R	Integraler Regleranteil
$J_{i/rev}$	Vibrationsindex zur Frequenz i/rev
N_b	Anzahl der Rotorblätter des Hauptrotors
N_{DFT}	Anzahl auszuwertender Messdatenpunkte im DFT-Algorithmus
N_R	Länge des Messintervalls zur Signalparameterschätzung
$\tilde{N}_R$	Länge des Messintervalls zur Optimalkorrektur der Klappenstellung
R	Rückführmatrix des Regelsystems
$\mathcal{S}^*$	Matrix der Singulärwertzerlegung $\mathcal{A}^* \cdot \mathcal{S}^* \cdot (\mathcal{B}^*)^T$ zur Matrix T^*
$T = (t_{i,j})$	Transfermatrix des Übertragungsmodells
$\hat{T} = (\hat{t}_{i,j})$	Identifizierte Transfermatrix aus Flugdaten
$T^{id} = (t_{i,j}^{id})$	Transfermatrix des idealen Rotors
$T^{sym} = (t_{i,j}^{sym})$	Symmetrierte Transfermatrix
T_f	Abtastintervalllänge des schnellen Subsystems der Regelung
T_s	Abtastintervalllänge des langsamen Subsystems der Regelung
T_Ω	Umdrehungsdauer des Hauptrotors
$\mathcal{T}$	Transformationsmatrix auf Kalman-Form der Zustandsgleichungen
$W = (w_{i,j})$	Gewichtungsmatrix im Reglerdesign
Ω	Rotationsfrequenz des Hauptrotors

Systemdarstellungen

(A, B, C, D)	Lineares System in zeitdiskreter Zustandsraumdarstellung mit Dynamik- (A), Eingangs- (B), Ausgangs- (C) sowie Durchgriffsmatrix (D)
$(\tilde{A}, \tilde{B}, \tilde{C}, \tilde{D})$	Zustandsraumdarstellung des Systems (A, B, C, D) nach Transformation auf die verallgemeinerte Kalman-Form
$(A, B, C, D)^c$	Lineares System in zeitkontinuierlicher Zustandsraumdarstellung mit Dynamik- (A), Eingangs- (B), Ausgangs- (C) sowie Durchgriffsmatrix (D)

Operatoren

$(.)^+$	Moore-Penrose-Pseudoinverse einer Matrix
$\lfloor . \rfloor$	Gauß-Klammer/Ganzteileroperator
$\|.\|_2$	Euklidische Vektornorm
$\|.\|_\infty$	Tschebyschew-Norm/Maximumsnorm
$< . , . >$	Euklidisches Skalarprodukt
$\bar{\rho}(.)$	Spektralradius einer Matrix
$\mathcal{L}(.)$	Liftingoperator im Zeitbereich
$blkdiag(A_1, A_2, \ldots)$	Blockdiagonalmatrix aufgebaut aus den Matrizen A_i
$diag(\alpha_1, \alpha_2, \ldots)$	Diagonalmatrix mit Diagonalelementen $\alpha_i \in \mathbb{R}$
$span(a_1, a_2, \ldots)$	Lineare Hülle der Vektoren a_i

Spezielle Indizes

$(.)_{i/rev}$	Teilmodellgröße zur Frequenz i/rev
$(.)_{(i,j)}$	Teilmodellgröße zum Frequenzintervall i/rev bis j/rev

Abkürzungen

DFT	Diskrete Fourier-Transformation
HHC	Higher Harmonic Control
IAS	Indicated Airspeed
IBC	Individual Blade Control/Einzelblattansteuerung
TEF	Trailing Edge Flap/Hinterkantenklappe

Kurzfassung

Infolge der Auftriebserzeugung mit Hilfe drehender Rotorblätter besitzen Hubschrauber prinzipbedingt ein erhöhtes Vibrationsniveau im Vergleich zu Flächenflugzeugen. Mit Blick auf Materialbelastung sowie Passagierkomfort befinden sich daher Maßnahmen zu dessen Minderung seit Jahrzehnten im Fokus der technischen Entwicklung. Das Potential der eingesetzten, passiven Reduktionstechniken zur Verbesserung der Unwuchtcharakteristik des Hauptrotors erweist sich dabei, Stand heute, als überwiegend ausgeschöpft. Einer weiteren Minderung der unwuchterregten Vibration steht insbesondere die Abhängigkeit der Optimaleinstellung passiver Maßnahmen vom Flugzustand entgegen, so dass stets ein Kompromiss über den gesamten Flugzustandsbereich, verbunden mit einer imperfekten Vibrationsabsenkung, eingegangen werden muss. Aktuelle Technologien zur Einzelblattansteuerung im Flug besitzen das Potential zur Überwindung dieser zentralen Einschränkung passiver Techniken. Parallel zur Hardwareentwicklung stellt dabei der Entwurf des Regelungssystems zur adaptiven Optimalreduktion der unwuchterregten Vibration des Rotors den zweiten, unverzichtbaren Baustein dar. Dieser zentralen Forschungsaufgabe widmet sich die vorliegende Arbeit für Hubschraubersysteme mit aktivem Klappenrotor aus dem Blickwinkel der Regelungstheorie sowie experimentellen Flugerprobung.

Charakteristisch bei Trägersystemen mit aktivem Klappenrotor ist das Auftreten dominierender Übertragungspfade zwischen quasi-statischer Klappeneinsteuerung und induzierter Vibration, welche zwingend im Reglerdesign zu berücksichtigen sind. Deren Existenz folgt unmittelbar aus der durchgeführten, mathematischen Analyse der Übertragungseigenschaften des Rotorsystems unter Einbeziehung periodischer Effekte. Auf dieser Grundlage kann eine detaillierte Untersuchung der Regelungsalgorithmen verwandter Problemstellungen erfolgen. Es zeigt sich, dass eine Anwendung dieser Methoden auf die vorliegende Aufgabe eine ungenügende Regelgüte, unter anderem in Form erhöhter Störverstärkung sowie Vibrationszunahme in nicht geregelten Frequenzbereichen, zur Folge hat. Der entwickelte Algorithmus zur aktiven Spurlaufregelung in Multiratendarstellung überwindet die abgeleiteten Einschränkungen auf der Basis einer

Zwangssymmetrierung des Entwurfsmodells, kombiniert mit einer erweiterten Automatenstruktur. Zur technischen Realisierung auf realen Trägersystemen sind zudem wesentliche Applikationsfragestellungen auf theoretischer Basis zu beantworten. Eine zentrale Rolle nimmt dabei die entwickelte, analytische Singulärwertzerlegung des Entwurfsmodells ein. Neben der effizienten Reparametrierung auf limitierter Bordhardware mittels symbolischer Pseudoinvertierung lässt sich darauf aufbauend ein Algorithmus zur Stellgrößenbeschränkung unter Einhaltung von Optimalitätsanforderungen ableiten. Bei ungestörter Bestimmung der Signalparameter des Vibrationsverlaufs im Regelalgorithmus besitzt das vorgestellte Regelungssystem eine garantierte Reduktionsgüte gegenüber Abweichungen im Entwurfsmodell. Den entscheidenden Beitrag zur geschlossenen, theoretischen Untersuchung für beliebigen Rang des Entwurfsmodells bildet hierbei die hergeleitete Reihenlösung in Kalman-Form, kombiniert mit geeigneten Analysefiltern. Diese Herangehensweise erlaubt zudem den erstmaligen Nachweis robuster Regelgüte gegenüber statischen Störungen des Klappensystems, einschließlich Klappenausfall.

Eine imperfekte Abtastung bei der Schätzung der Vibrationsanteile führt bei HHC-basierten Regelungsalgorithmen im Frequenzbereich zu periodischen Störanregungen der Reglerzustände, deren Berücksichtigung in der Systemanalyse allgemein wenig Beachtung zukommt. Die Stabilitätseigenschaften des resultierenden, zeitperiodischen Multiratensystems lassen sich mit Hilfe des eingeführten, mehrstufigen Transformationsverfahrens unter Umgehung der expliziten Zeitperiodizität sowie Multiratenstruktur untersuchen. Der entworfene Gesamtalgorithmus zur Spurlaufregelung erweist sich als robust stabil gegenüber imperfekter Abtastung der Eingangssignale. Die bereitgestellte Analysemethodik bietet, über die Stabilitätsbetrachtung hinaus, die theoretische Basis zu einer weitergehenden Systemuntersuchung transfermatrizenbasierter Regler unter expliziter Berücksichtigung der enthaltenen Signalverarbeitungsalgorithmen mittels Standardmethoden der linearen Systemtheorie.

Flugversuchsergebnisse aus Erprobungskampagnen mit verschiedenen Trägersystemen weisen die Fähigkeit des vorgestellten, aktiven Spurlaufreglers zur weitreichenden Reduktion der unwuchtinduzierten Vibration nach. Verglichen mit rein passiven Methoden führt der Einsatz des entwickelten Regelungssystems in Verbindung mit einem aktiven Klappenrotor zu einer Absenkung des Vibrationsniveaus in der Hubschrauberzelle und damit zu einem weiter gesteigerten Passagierkomfort.

Abstract

Compared to fixed wing aircrafts, helicopters show an increased overall vibration level due to the lift generation by rotating blades. With regard to material stress as well as passenger comfort, reduction methods have been studied intensively during the last decades. By now, widespread passive balancing techniques for helicopter main rotor systems, such as optimal weight balancing or trim tab adjustment, lack further potential to improve the rotor characteristics. These methods are particularly limited by the fact that the optimal parametrization depends on the flight-state. Hence, the choice of adjustment parameters is always a trade-off over the whole flight envelope — which results by principle in an imperfect vibration reduction. To overcome this fundamental limitation, emerging individual blade control concepts, e.g. active trailing edge flaps (TEFs) or pitch link actuators, show great potential in the past years. Beside the hardware, the control system plays a key role for the further development of adaptive in-flight vibration reduction systems. Therefore, the design and analysis of a new in-flight tracking control system from a control theoretical as well as an applicational perspective is in the focus of this thesis for active TEF rotors.

Dominating transfer paths from admissible input directions to the induced vibration components in the cabin are characteristic for active TEF rotor systems. This fact is proven within the mathematical system analysis, including periodic effects, carried out in this work. Based on the derived system insight, engineering solutions for related control tasks can be evaluated in detail. A direct adaption of these algorithms to the actual in-flight tracking problem would result in an inadequate performance of the vibration control system, i.e. a considerable disturbance amplification or vibration shift to uncontrolled frequency ranges. The proposed active in-flight tracking control algorithm, realized in multibalde coordinates, overcomes these limitations based on a new symmetrization concept for the calculation of a suitable controller design model and an extention of the hybrid controller structure. With regard to the implementation on full-scale experimental helicopter systems, different issues arising from the applicational side have to be solved in theory first. The key role in this process plays

the symbolically derived singular value decomposition of the design model and the weighted controller matrix. Beside a strategy for the efficient re-parametrization of the controller, including a numerically advantageous calculation of the Moore-Penrose pseudoinverse on limited on-board hardware, a new algorithm accounting for actuator saturation under optimality constraints had to be found.

In the case of undisturbed signal parameter estimation by the signal processing algorithm included in the control system, model-based mathematical bounds for the guaranteed vibration reduction level are formulated in the present thesis. To enable a general performance analysis method which is independent of the mathematical rank of the transfer matrix the derived series solution uses the Kalman decomposition of the state vector together with a pre-filter approach. Based on the proposed analysis strategy, robustness with regard to vibration reduction performance in the case of actuator failure can be demonstrated for the first time.

For every HHC-based control algorithm in frequency domain formulation an imperfect sampling of the vibration measurement in the signal processing subsystem leads to undesired, periodic inputs to the dynamic controller states. Their effect on closed-loop stability as well as controller performance has been neglected commonly. In order to check for stability of the periodic, multirate control loop (including the multirate parameter estimation subsystem) a two-stage transformation method is proposed. The main result of the performed study reads as follows: The designed in-flight tracking controller is robustly stable with regard to imperfect sampling of the vibration input signal. Furthermore, the presented transformation method provides the basis for a more detailed system analysis of transfer matrix based control algorithms including the signal processing subsystem by use of standard techniques from linear system theory.

Flight-test results from various testing campaigns with different helicopter systems verify the capability of the developed control system to minimize tracking error induced vibrations. Compared to passive rotor smoothing, the combination of the presented in-flight tracking controller together with an active TEF rotor system leads to a further reduction of the overall vibration level in the helicopter cabin and thereby to an additional increase of passenger comfort.