

Reihe 8

Mess-,
Steuerungs- und
Regelungstechnik

Nr. 1250

Dipl.-Ing. Jan Strubel,
Darmstadt

Synchronisierung agenten- basierter dynamischer Systeme mittels struktur- beschränkter Regelungen

Berichte aus dem

Institut für
Automatisierungstechnik
und Mechatronik
der TU Darmstadt



Synchronisierung agentenbasierter dynamischer Systeme mittels strukturbeschränkter Regelungen

Vom Fachbereich
Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Jan Strubel

geboren am 20. Januar 1984 in Worms

Referent: Prof. Dr.-Ing. Ulrich Konigorski

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Uwe Klingauf

Tag der Einreichung: 19. Oktober 2015

Tag der mündlichen Prüfung: 20. Januar 2016



D 17

Darmstädter Dissertationen

Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 8

Mess-, Steuerungs-
und Regelungstechnik

Dipl.-Ing. Jan Strubel,
Darmstadt

Nr. 1250

Synchronisierung agenten- basierter dynamischer Systeme mittels struktur- beschränkter Regelungen

Berichte aus dem

Institut für
Automatisierungstechnik
und Mechatronik
der TU Darmstadt



Strubel, Jan

Synchronisierung agentenbasierter dynamischer Systeme mittels strukturbeschränkter Regelungen

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 8 Nr. 1250. Düsseldorf: VDI Verlag 2016.

180 Seiten, 22 Bilder, 6 Tabellen.

ISBN 978-3-18-525008-8, ISSN 0178-9546,

€ 67,00/VDI-Mitgliederpreis € 60,30.

Für die Dokumentation: Agentenbasierte Systeme – Multi-Agenten Systeme (MAS) – Heterogene Systeme – Synchronisierung – Synchronisierung mittels Relativinformation – Entwurf von Ausgangsrückführungen – Entkopplung – Verkopplung – Strukturbeschränkung – Parametrische Eigenstrukturvorgabe

Autonome und nicht physikalisch gekoppelte dynamische Systeme, die über ein Netzwerk miteinander kommunizieren, sind in der regelungstechnischen Literatur als agentenbasierte Systeme beziehungsweise Multi-Agenten Systeme bekannt. Die vorliegende Arbeit behandelt die Synchronisierung dieser Systemklasse auf Grundlage strukturbeschränkter Regelungen. Ausgehend von parametrischen und teilparametrischen Methoden zum Entwurf von Ausgangsrückführungen lassen sich die verteilten Regler der Agenten basierend auf unterlagerten Entkopplungs- und Verkopplungsregelungen herleiten. Zudem wird ein dezentrales Regelungsverfahren entwickelt, welches die Synchronisierung des Gesamtsystems ausschließlich basierend auf Relativinformation ermöglicht. Ein adaptives Regelungsverfahren ermöglicht darüber hinaus die Synchronisierung einer speziellen Systemklasse nichtlinearer Agenten. Alle Methoden werden abschließend an Entwurfsbeispielen dargestellt und bewertet.

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie

(German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at

<http://dnb.ddb.de>.

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2016

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-9546

ISBN 978-3-18-525008-8

Vorwort

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Entwurf strukturbeschränkter Regelungen zur Synchronisierung agentenbasierter dynamischer Systeme. Sie entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Regelungstechnik und Mechatronik der Technischen Universität Darmstadt.

Ich möchte dieses Vorwort nutzen, um allen zu danken, die zum Gelingen der vorliegenden Arbeit beigetragen haben. Im besonderen Maße gilt mein Dank meinem Doktorvater und Fachgebietsleiter Prof. Dr.-Ing. Ulrich Konigorski, der mir die Promotion ermöglichte und mir alle Freiheiten bei der Ausrichtung meines Themas einräumte. In stets sehr guter Erinnerung werden mir die zahlreichen und intensiven fachlichen Diskussionen bleiben, die in entscheidendem Maße die Ergebnisse dieser Arbeit ermöglicht haben. Außerdem danke ich Prof. Dr.-Ing. Uwe Klingauf für die freundliche Übernahme des Korreferats, die hilfreichen Anmerkungen zu meiner Arbeit und die stets angenehme Zusammenarbeit während meiner Tätigkeit als Koordinator des Studienbereichs Mechatronik der Technischen Universität Darmstadt.

Gleich zu Beginn meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter habe ich die ausgezeichnete Atmosphäre am Fachgebiet schätzen gelernt. Dies ist nicht zuletzt auf die vorbildliche Unterstützung und Organisation des Sekretariats zurückzuführen, weshalb mein besonderer Dank in diesem Zusammenhang Brigitte Hoppe und Corina Fischer gilt. An dieser Stelle danke ich allen Kollegen für die schöne Zeit am Institut, den fachlichen Austausch und die angenehme Zusammenarbeit. Hervorheben möchte ich an dieser Stelle meine ehemaligen Kollegen Dr.-Ing. Daniel Labisch, Lukas Stein und Andreas Horn, mit denen ich nicht nur ausgezeichnete fachliche Diskussionen führte, sondern denen ich auch zukünftig freundschaftlich verbunden bleiben werde.

Nicht zuletzt gilt mein besonderer Dank meiner Familie. Meinen Eltern und Großeltern, auf deren Unterstützung ich jederzeit zählen kann, meiner Tante und meinem Onkel in Oregon, die mit Begeisterung meinen wissenschaftlichen Werdegang verfolgten sowie unterstützen und natürlich meiner Frau Melanie für ihre liebevolle Art, ihr Verständnis sowie ihren Rückhalt insbesondere während des herausfordernden Schreibprozesses der Arbeit.

Darmstadt, im Januar 2016

Jan Strubel

Dr.-Ing. Karl-Josef Junglas (Kalle) – in stillem Gedenken gewidmet

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	III
Symbole und Abkürzungen	VIII
Kurzfassung	XII
1 Einführung	1
1.1 Einleitung	1
1.2 Literaturübersicht	3
1.2.1 Lineare homogene Multi-Agenten Systeme	4
1.2.2 Lineare heterogene Multi-Agenten Systeme	6
1.2.3 Nichtlineare Multi-Agenten Systeme	8
1.3 Struktur der Arbeit	9
2 Agentenbasierte dynamische Systeme	11
2.1 Präzisierung des Agentenbegriffs	11
2.2 Graphentheoretische Grundlagen	12
2.3 Agenten und Multi-Agenten Systeme	15
2.3.1 Homogene Agenten und Multi-Agenten Systeme	15
2.3.2 Heterogene Agenten und Multi-Agenten Systeme	18
2.3.3 Synchronisierung	21
2.4 Problemstellung und Beiträge der Arbeit	22
3 Entwurf strukturbeschränkter Rückführungen	23
3.1 Parametrisches Entwurfsverfahren für statische Ausgangsrückführungen	23
3.1.1 Vorgabe von Eigenwerten und Rechtseigenvektoren	25
3.1.2 Vorgabe von Eigenwerten und Linkseigenvektoren	27
3.1.3 Berechnung der Rückführmatrix	29
3.1.4 Dynamische Ausgangsrückführung	32
3.1.5 Vorgabe komplexer und mehrfacher Eigenwerte	33
3.2 Beeinflussung des Stör- und Führungsverhaltens	36
3.2.1 Robuste Eigenwertvorgabe	36
3.2.2 Entwurf einer Entkopplungsregelung	45
3.2.3 Entwurf einer Verkopplungsregelung	50
3.3 Teilparametrisches Entwurfsverfahren	55
3.3.1 Vorgabe von Eigenwertbereichen	56
3.3.2 Lösung unbeschränkter Min-Max Optimierungsprobleme	58
3.3.3 Robuste Entkopplungsregelung	60
3.4 Entwurfsbeispiel	63
3.5 Kurzzusammenfassung	65

4	Synchronisierung basierend auf Absolut- und Relativinformation	66
4.1	Synchronisierung homogener Agenten	67
4.1.1	Vorüberlegungen und Synchronisierungsbedingungen	67
4.1.2	Synchronisierung durch LQR-Entwurf	69
4.1.3	Synchronisierung durch Vorgabe von Eigenwertbereichen	71
4.2	Synchronisierung heterogener Agenten	74
4.2.1	Vorüberlegungen zur Synchronisierung heterogener Agenten	74
4.2.2	Synchronisierung durch Entkopplung	76
4.2.3	Synchronisierung durch Verkopplung	83
4.2.4	Abschließende Bemerkungen zur synchronen Zeitlösung	88
4.3	Synchronisierung nichtlinearer Agenten mit Vektorrelativgrad eins	90
4.3.1	Vorüberlegungen zur betrachteten Systemklasse	90
4.3.2	Passivitätsbasierte Synchronisierung	92
4.3.3	Struktur des adaptiven Reglers	94
4.3.4	Ausgangssynchronisierung	97
4.4	Entwurfsbeispiel	100
4.5	Kurzzusammenfassung	102
5	Synchronisierung ausschließlich basierend auf Relativinformation	103
5.1	Vorüberlegungen zur Regelungsstruktur	104
5.2	Synchronisierungsbedingungen	106
5.3	Konstruktive Bestimmung der Reglerparameter	112
5.4	Hinzunahme weiterer Gütekriterien	114
5.5	Entwurfsbeispiel	116
5.6	Kurzzusammenfassung	118
6	Entwurfsbeispiele	120
6.1	Entkopplungsregelung einer xy-Positioniereinheit	120
6.2	Entkopplungs- und Verkopplungsbasierte Synchronisierung von Helikoptern	128
6.3	Dezentrale Synchronisierung einer autonomen Fahrzeugkolonne	136
7	Zusammenfassung der Arbeit	142
A	Beweise	144
A.1	Beweis von Satz 3.9	144
A.2	Beweis von Satz 3.14	147
B	Mathematischer Anhang	148
B.1	Lineare Gleichungssysteme	148
B.2	Matrix Analysis	148
B.3	Kronecker Produkt	149
B.4	Rechnen mit Differentialen	150
C	Eigenschaften linearer Zustandssysteme	153

Symbole und Abkürzungen

Vektoren, Matrizen, Eigenwerte, Skalare

A ,	Systemmatrix
\tilde{A} , \tilde{A}	Systemmatrix in neuen Koordinaten
A_d ,	Systemmatrix eines dynamischen Reglers
A_K	$:= A + BKC$
A_{SNF}	Systemmatrix in Steuerungsnormalform
$A_{\mathcal{G}}$	Adjazenzmatrix eines Graphen \mathcal{G}
B	Eingangsmatrix
\tilde{B} , \tilde{B}	Eingangsmatrix in neuen Koordinaten
B_d ,	Eingangsmatrix eines dynamischen Reglers
b_{SNF}	Eingangsmatrix in Steuerungsnormalform
C	Ausgangsmatrix
\tilde{C} , \tilde{C}	Ausgangsmatrix in neuen Koordinaten
C_d ,	Ausgangsmatrix eines dynamischen Reglers
c_{SNF}^T	Ausgangsmatrix in Steuerungsnormalform
C_v	Ausgangsmatrix der Verkopplungsbedingungen
C_w	Ausgangsmatrix der Führungsgrößen
\mathcal{C}	Steuerbarkeitsmatrix nach Kalman, vgl. (C.2)
D	Durchgriffsmatrix
D_d	Durchgriffsmatrix eines dynamischen Reglers
D_{in}	Gradmatrix eines Graphen \mathcal{G}
e_i	Koordinateneinheitsvektor
$\mathcal{E}_{\mathcal{G}}$	Kanten eines Graphes \mathcal{G}
$f(\cdot)$	Vektorfeld
F	Vorfiltermatrix
$g_i(\cdot)$	Eingangsvektorfeld
\mathcal{G}	Graph
$G(\lambda)$	Übertragungsmatrix an der Stelle λ
$h(\cdot)$	Ausgangsabbildung
I	Einheitsmatrix
I_n	Einheitsmatrix der Dimension n
J	Matrix in Jordan Normalform
$J_{(\cdot)}$	Gütefunktion
K	Ausgangsrückführmatrix
$K_{(\cdot)}$	Kommutierungsmatrix, vgl. Abschnitt B.2
$L_{\mathcal{G}}$	Laplace Matrix eines Graphen \mathcal{G}
M_{wi}	Aufteilung der Nullraumbasis gemäß (3.9)
M_{vi}	Aufteilung der Nullraumbasis gemäß (3.4)

N_{wi}	Aufteilung der Nullraumbasis gemäß (3.9)
N_{vi}	Aufteilung der Nullraumbasis gemäß (3.4)
$P_R(\lambda)$	Rosenbrock'sche Systemmatrix
p_{vi} bzw. p_{wi}	Steuer- bzw. Messmodus
q_{vi} bzw. q_{wi}	Parametervektor zu Rechts- bzw. Linkseigenvektoren
Q_r bzw. Q_s	Matrix der r Steuermoden bzw. s Messmoden
R	Zustandsrückführmatrix
S_{Bi}	Vgl. (3.3)
S_{Ci}	Vgl. (3.8)
t_0	Anfangszeitpunkt
T_{\perp}	Matrix mit orthogonalen Spaltenvektoren
T_v	Ausgangsgrößentransformation zur Verkopplung
u	Vektor der Eingangsgrößen
v_i	Rechtseigenvektor
v	Kommunizierte Variable
V	Rechtseigenvektormatrix
\mathcal{V}_G	Knoten eines Graphs \mathcal{G}
V_r	Rechtseigenvektormatrix der ersten r Rechtseigenvektoren
w_i	Linkseigenvektor
w	Führungsgröße
W	Linkseigenvektormatrix
x	Zustandsvektor
x_d	Zustandsvektor eines dynamischen Reglers
y	Vektor der Ausgangsgrößen
y_s	Ausgang zur synchronen Zeitlösung
y_v	Verkopplungsausgang
y_w	Vektor der Führungsgrößen
δ	Differenzordnung
δ_v	Dimension des größten invarianten Unterraums im Kern von C_v
ξ	Optimierungsvariablen
ζ	Parameter
Π, Γ	Lösung der Matrixgleichung (4.22)
λ_i	Eigenwert
Λ	Diagonalmatrix, Elemente sind die Eigenwerte λ_i
1_N	Eins-Vektor der Dimension N

Indizes

e	erweitertes System
i, j, k, l	Zählindizes
K	Ausgangsrückführung
R	Zustandsrückführung
re	reelle Darstellung
S	Synchronisierung

Dimensionen

m	Anzahl der Eingangsgrößen
n	Anzahl der Zustandsvariablen
n_d	Ordnung eines dynamischen Reglers
N	Anzahl der Agenten in einem Multi-Agenten System
p	Anzahl der Ausgangsgrößen

Funktionen, Operatoren

$\text{bild}(\cdot)$	Bild einer linearen Abbildung
$d(\cdot)$	Differential
$\text{diag}(\cdot)$	(Block-)diagonalmatrix
$\text{dim}(\cdot)$	Dimension
$\text{Im}(\cdot)$	Imaginärteil einer komplexen Zahl/Matrix
$\text{kern}(\cdot)$	Kern einer linearen Abbildung
$L_{(\cdot)}(\cdot)$	Lie-Ableitung
$\max(\cdot)$	Maximumsfunktion
$\min(\cdot)$	Minimumsfunktion
$\text{rang}(\cdot)$	Rang einer Matrix
$\text{Re}(\cdot)$	Realteil einer komplexen Zahl/Matrix
$\text{sign}(\cdot)$	Signumfunktion
$\text{span}(\cdot)$	Raum, der von Vektoren aufgespannt wird
$\text{spur}(\cdot)$	Spur-Operator
$\text{vec}(\cdot)$	Vektorisierungsoperator, vgl. (B.4)
$\kappa(\cdot)$	$:= \ \cdot\ \ \cdot\ ^{-1}$, Konditionszahl einer Matrix
$\kappa_F(\cdot)$	Konditionszahl einer Matrix bezüglich der Frobeniusnorm
$\sigma(\cdot)$	Spektrum, Menge der Eigenwerte einer Matrix
\tilde{P}_N	Blockdiagonalmatrix $:= \text{diag}(P_1, \dots, P_N)$
$\dot{(\cdot)}$	Zeitableitung
$(\cdot)^{-1}$	Inverse Matrix
$(\cdot)^+$	Pseudoinverse einer Matrix

$(\cdot)^T$	Transponiert
$(\cdot)^{-T}$	$:= \left((\cdot)^{-1}\right)^T$, inverse und transponierte Matrix
$(\cdot)^*$	Transponiert, konjugiert komplex
$(\cdot)^H$	Hermesch
$(\cdot) \otimes (\cdot)$	Kronecker Produkt
$\nabla(\cdot)$	Gradient
$\nabla^2(\cdot)$	Hesse-Matrix
$\underline{\sigma}(\cdot)$ bzw. $\overline{\sigma}(\cdot)$	Kleinster bzw. größter Singulärwert einer Matrix
$\ \cdot\ $	Norm eines Vektors und einer Matrix, bei Matrizen wird die Spektralnorm angenommen, d.h. es ist $\ A\ = \overline{\sigma}(A)$
$\ \cdot\ _F$	$:= \sqrt{\text{spur}((\cdot)^T(\cdot))}$, Frobeniusnorm

Räume, Mengen

\mathbb{C}	Komplexe Zahlen
\mathcal{D}_n	Selbst-konjugierte Menge mit $ \mathcal{D}_n = n$, vgl. (3.17)
\mathbb{R}	Reelle Zahlen
\mathcal{M}	Mannigfaltigkeit
\mathbb{N}	Natürliche Zahlen
$\underline{q}, \underline{q}_n$	Indexmengen, $\underline{q} := \{1, \dots, q\}$ bzw. $\underline{q}_n := \{1, \dots, n\}$
\mathcal{V}	Untermannigfaltigkeit
\mathcal{S}	Synchronisierbarer Unterraum
\mathbb{S}_n	n -dimensionale Einheitskugel
\emptyset	Leere Menge

Abkürzungen

EKR	Entkopplungsregelung
Ge	Gerade
Hy	Hyperbel
Kr	Kreis
LMI	<i>engl.</i> linear matrix inequality
LQR	<i>engl.</i> linear quadratic regulator
MAS	Multi-Agenten System
MGEA	<i>engl.</i> minimum gain eigenstructure assignment
REEA	<i>engl.</i> robust exact eigenstructure assignment
SNF	Steuerungsnormalform
TCP	<i>engl.</i> tool center point
VKR	Verkopplungsregelung

Kurzfassung

Synchronisierung ist der Wertherkunft nach der Prozess, Vorgänge in zeitliche Übereinkunft zu bringen. In vielen technischen Anwendungen ist dies ein zentraler Aspekt, um den störungsfreien Betrieb zu gewährleisten. Beispielhaft sei hier die Frequenzregelung des elektrischen Energienetzes genannt, die insbesondere dann von Bedeutung ist, wenn nach Stromausfällen einzelne Netzsegmente wieder miteinander verschaltet und dabei synchronisiert werden müssen.

Neben dieser technischen Anwendung eines Synchronisierungsvorgangs wurde in der regelungstechnischen Literatur in den vergangenen Jahren verstärkt die Synchronisierung von agentenbasierten dynamischen Systemen beziehungsweise Multi-Agenten Systemen untersucht. Hierbei handelt es sich zunächst um autonome und nicht physikalisch gekoppelte dynamische Systeme, die die Fähigkeit besitzen, über ein Netzwerk miteinander zu kommunizieren. Die aus dem Netzwerk empfangene Information wird von den lokalen Reglern der Teilsysteme verarbeitet, mit dem Ziel, asymptotisch Übereinkunft in den Zuständen oder – je nach Aufgabenstellung – lediglich in Teilzuständen der Agenten zu erreichen. Erwähnenswert ist dabei die Tatsache, dass es ausreichend ist, lediglich relative Information zur Synchronisierung zu kommunizieren. Die messtechnische Erfassung des absoluten Zustandes oder Ausgangs des einzelnen Agenten muss somit nicht notwendigerweise vorausgesetzt werden.

In der vorliegenden Arbeit erfolgt daher die Weiterentwicklung bestehender und die Entwicklung neuer Ansätze, um strukturbeschränkte Regelungen für agentenbasierte dynamische Systeme zu entwerfen, wobei alle betrachteten Methoden die eingangs erwähnte Synchronisierung des geregelten Multi-Agenten Systems zum Ziel haben. Ausgangspunkt der Methoden in dieser Arbeit stellt zunächst die Systemanalyse der betrachteten Systemklassen dar, woraus sich notwendige Bedingungen für die Synchronisierung der entsprechenden Systemklassen ableiten und interpretieren lassen.

Als Entwurfsmethodik in dieser Arbeit werden fast durchgängig parametrische beziehungsweise teilparametrische Ansätze genutzt. Darüber hinaus wird konsequent von einer konstanten beziehungsweise dynamischen Ausgangsregelung der Agenten ausgegangen, was eine der Strukturbeschränkungen der Regelung darstellt. In diesem Zusammenhang entstehen – losgelöst vom Kernthema der Arbeit – Weiterentwicklungen von Methoden zur robusten Eigenstrukturvorgabe sowie Methoden zum Entwurf von Ent- und Verkopplungsregelungen.

Hinsichtlich der Synchronisierung agentenbasierter Systeme erfolgt in dieser Arbeit eine Unterscheidung der Ansätze bezüglich der Messgrößen der Agenten. Zunächst wird der Fall diskutiert, dass jeder Agent neben der Relativinformation zusätzlich Absolutinformation messtechnisch erfassen kann. Dies ermöglicht durch unterlagerte Regelkreise die Agenten zu homogenisieren, was basierend auf den parametrischen Ansätzen mittels Ent- und Verkopplungsregelung erfolgt. Die Homogenisierung gestattet dann Standardverfahren zur Synchronisierung identischer Agenten anzuwenden. Darüber hinaus gelingt es, diese Idee ebenfalls auf eine spezielle Systemklasse nichtlinearer Agenten zu übertragen, was auf ein adaptives Regelgesetz zur Synchronisierung führt.

Wie eingangs erwähnt, muss die Verfügbarkeit von Absolutinformation zur Synchronisierung nicht vorausgesetzt werden. Auch für diesen Fall wird in der vorliegenden Arbeit ein Regelgesetz zur Synchronisierung agentenbasierter dynamischer Systeme angegeben. Der Entwurf der synchronisierenden Regelung lässt sich dabei in ein dezentrales Stabilisierungsproblem und damit in ein strukturbeschränktes Regelungsproblem übersetzen, welches sich durch numerische Optimierung lösen lässt.

Alle Methoden werden an Entwurfsbeispielen am Ende der Arbeit dargestellt und bewertet. Die Leistungsfähigkeit der Methoden zur Synchronisierung werden an Simulationsbeispielen verdeutlicht. Die weiterentwickelte Methode zum parametrischen Entwurf von Ausgangsreglern wird darüber hinaus in der Simulation und an einem Laboraufbau einer xy-Positioniereinheit am Beispiel einer Entkopplungsregelung anschaulich dargestellt.

