

George H. Holling

**Abschätzung von
Bahnfehlern in
Robotersystemen**

Fortschritte der Robotik

Herausgegeben von Walter Ameling

- Band 1: Hermann Henrichfreise
Aktive Schwingungsdämpfung an einem elastischen Knickarmroboter
- Band 2: Winfried Rehr (Hrsg.)
Automatisierung mit Industrierobotern
- Band 3: Peter Rojek
Bahnführung eines Industrieroboters mit Multiprozessorsystem
- Band 4: Jürgen Olomski
Bahnplanung und Bahnführung von Industrierobotern
- Band 5: George H. Holling
Abschätzung von Bahnfehlern in Robotersystemen
- Band 6: Nikolaus Schneider
Kantenhervorhebung und Kantenverfolgung in der industriellen Bildverarbeitung

Exposés oder Manuskripte zur Beratung erbeten unter der Adresse:
Prof. Dr.-Ing. Walter Ameling, Rogowski-Institut für Elektrotechnik
der RWTH Aachen, Schinkelstr. 2, 51 Aachen oder an den Verlag
Vieweg, Postfach 5829, 6200 Wiesbaden.

George H. Holling

Abschätzung von Bahnfehlern in Robotersystemen



Autor:

Dr.-Ing. *George H. Holling* promovierte an der RWTH Aachen und ist auf seinem Fachgebiet in den USA tätig.

Der Verlag Vieweg ist ein Unternehmen der Verlagsgruppe Bertelsmann International.

Alle Rechte vorbehalten

© Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig 1990



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Umschlaggestaltung: Wolfgang Nieger, Wiesbaden

ISBN 978-3-528-06359-7

ISBN 978-3-322-88809-9 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-322-88809-9

Herrn Prof. Dr.-Ing. Walter Ameling danke ich recht herzlich für die von ihm gewährte Unterstützung, für die Zusammenarbeit mit seinem Institut und für die Übernahme des Referates.

Mein Dank gilt auch Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans Dieter Lücke für die Übernahme des Korreferates und das Interesse, das er der Arbeit entgegenbrachte.

Ich bedanke mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Jensch für die Unterstützung meiner Arbeit und für seine vielfache Hilfe und Anregungen, die wesentlich zum Erfolg beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr.-Ing. Lothar Krings für zahlreiche Diskussionen und besonders für seine aktive Mithilfe bei der Umwandlung des Konzeptes in die endgültige Druckform.

Dank schulde ich auch Herrn Prof. Dr.-Ing. O. Lange für die Anregungen, aus denen diese Arbeit hervorging, und für vielfache Diskussionen und Vorschläge zur Verbesserung des Konzeptes.

Herrn Dipl.-Ing. Klaus Kleinekorte danke ich für seine umfangreiche persönliche Unterstützung, viele Diskussionen und Anregungen und dafür, daß er mir während meiner vielen Aufenthalte in Deutschland ständig Unterkunft gewährte und mich bei ihm zuhause fühlen ließ.

Mein Dank gilt auch den vielen Mitarbeitern des Rogowski-Institutes, ohne deren Unterstützung das Gelingen dieser Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Am meisten jedoch bedanke ich mich bei meiner Frau Heide und meinem Sohn Michael dafür, daß sie meine Pläne zur Promotion stets voll unterstützt haben und die oft monatelange Trennung während meiner Aufenthalte in Deutschland ohne Widerspruch erduldeten.

George H. Holling

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1 | Einführung in die Problemstellung und Überblick | 1 |
| 1.1 | Die Aufgabenstellung | 1 |
| 1.2 | Einführung in die Problemstellung | 3 |
| 1.3 | Überblick der Vorgehensweise | 7 |
| 2 | Einleitende Begriffe | 11 |
| 2.1 | Mathematische Grundbegriffe und Definition der Konventionen für Formelzeichen | 11 |
| 2.2 | Definition des Fehlerbegriffes | 15 |
| 2.2.1 | Definition der Fehlerschranke | 18 |
| 2.2.2 | Definition des Operators zur Fehleranalyse | 19 |
| 2.3 | Definition des Systemfehlers | 23 |
| 2.3.1 | Mathematische Beschreibung von Fehlerquellen in Modellen von Robotersystemen | 25 |
| 2.4 | Beschreibung des Fehlermodells | 27 |
| 3 | Skalare Betragsabschätzungen in Robotersystemen | 29 |
| 3.1 | Betragschrankenabschätzung mittels deterministischer Verfahren | 30 |
| 3.1.1 | Bestimmung der Betragsschranke im Zeitbereich | 30 |
| 3.1.2 | Bestimmung der Betragsschranke im transformierten Bereich | 32 |
| 3.1.3 | Deterministische Betragsschrankenbestimmung eines kameragesteuerten Robotergreifarms | 33 |
| 3.1.3.1 | Beispiel der Lösung im Zeitbereich | 36 |
| 3.1.3.2 | Beispiel der Lösung im transformierten Bereich | 38 |
| 3.1.3.3 | Vergleich der deterministischen Lösungsverfahren | 40 |

| | | |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.2 | Statistische Betragsschrankenabschätzung | 41 |
| 3.2.1 | Die Eigenschaften der Mellin-Transformation | 42 |
| 3.2.2 | Statistische Betragsschrankenberechnung | 44 |
| 3.2.3 | Abschätzung der statistischen Betragsschranke | 45 |
| 3.2.3.1 | Vertrauensintervall der statistischen Betragsschranke | 47 |
| 3.2.3.1.1 | Statistische Betragsabschätzung beliebig verteilter Größen | 48 |
| 3.2.3.1.2 | Statistische Betragsabschätzung von deterministischen Größen | 49 |
| 3.2.4 | Arithmetische Operationen von Zufallsvariablen | 52 |
| 3.2.4.1 | Die Addition von Zufallsvariablen | 52 |
| 3.2.4.2 | Die Multiplikation von Zufallsvariablen | 54 |
| 3.2.5 | Statistische Betragsschrankenbestimmung eines kameragesteuerten Robotergreifarmes | 57 |
| 3.3 | Modellsimulation zur Betragsschrankenbestimmung | 61 |
| 3.3.1 | Das Gradientenverfahren nach Bryson und Kelly | 64 |
| 3.3.1.1 | Beschreibung des Optimierungsalgorithmus | 64 |
| 4 | Statistische Wertebereichsabschätzung von vektorwertigen Variablen | 69 |
| 4.1 | Wertebereichsabschätzung mittels Vektor- und Matrixnorm | 69 |
| 4.2 | Wertebereichsabschätzung mittels statistischer Methoden | 71 |
| 4.2.1 | Die Wertebereichsabschätzung bei der Addition von Vektoren und Matrizen | 73 |
| 4.2.2 | Die Wertebereichsabschätzung bei der Multiplikation von Vektoren und Matrizen | 75 |
| 4.2.3 | Abschätzung des Wertebereiches einer Matrixpotenz | 79 |

| | | |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.3 | Berücksichtigung der Autokorrelation bei der statistischen Betragsabschätzung | 83 |
| 4.3.1 | Autokorrelationskoeffizient der Matrixmultiplikation | 84 |
| 4.3.2 | Vergleich der Ergebnisse | 86 |
| 4.4 | Die Definition der statistischen Matrixnorm | 88 |
| 4.4.1 | Berücksichtigung der Autokorrelation bei der Definition der statistischen Matrixnorm | 91 |
| 5 | Fehlerschrankenbestimmung des Roboterverhaltens | 93 |
| 5.1 | Modelltransformation des kameragesteuerten Roboters | 93 |
| 5.1.1 | Die Modelltransformation des Steuerungsmechanismus | 95 |
| 5.1.1.1 | Die Modelltransformation des Optimierungsalgorithmus | 95 |
| 5.1.1.1.1 | Die Optimierung mittels der zeitdiskreten Matrix-Ricatti-Lösung | 96 |
| 5.1.1.1.2 | Fehlerschrankenmodell des Optimierungsalgorithmus | 101 |
| 5.1.1.2 | Die Modelltransformation der Regelstrecke | 112 |
| 5.1.2 | Interpolationsfehler von mehrachsigen Robotern | 115 |
| 5.1.2.1 | Quadratische Fehlerapproximation für kleine Winkeländerungen | 120 |
| 5.1.2.2 | Statistischer Lösungsansatz für lineare Bewegungsverläufe | 122 |
| 5.1.3 | Die Modelltransformation des Kamera-Sensorsystems | 125 |
| 5.1.4 | Die Modelltransformation der Werkstücklagebestimmung | 128 |
| 6 | Zusammenfassung und Ausblick | 137 |
| | Liste der verwendeten Symbole und Abkürzungen | 141 |