

# Anwendungsspezifische Auswahl und Optimierung von seriellen Roboterstrukturen am Beispiel eines Dentalroboters

Vom Promotionsausschuß der  
Technischen Universität Hamburg-Harburg  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor-Ingenieur  
genehmigte Dissertation

von  
Dipl.-Ing. Arne Schacht

aus Bad Oldesloe

2007

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Klaus Rall  
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Uwe Weltin  
Tag der mündlichen Prüfung: 30.06.2006

Schriftenreihe des Arbeitsbereichs  
Werkzeugmaschinen und Automatisierungstechnik  
der Technischen Universität Hamburg-Harburg

Band 17

**Arne Schacht**

**Anwendungsspezifische Auswahl und Optimierung  
von seriellen Roboterstrukturen am Beispiel eines  
Dentalroboters**

Shaker Verlag  
Aachen 2007

**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.: Hamburg-Harburg, Techn. Univ., Diss., 2006

Copyright Shaker Verlag 2007

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-6184-9

ISSN 1438-8529

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

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

## **Vorwort**

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Arbeitsbereich Werkzeugmaschinen und Automatisierungstechnik der Technischen Universität Hamburg-Harburg.

Dem Leiter des Arbeitsbereiches, Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Rall, danke ich für die Betreuung der Arbeit. Herrn Prof. Dr.-Ing. Uwe Weltin danke ich für die Übernahme des Zweitgutachtens.

Bedanken möchte ich mich bei den Kollegen am Arbeitsbereich, insbesondere bei Herrn Dr.-Ing. habil. Jörg Wollnack, der unter anderem einen Entwurf dieser Arbeit durchgesehen hat.

Mein besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mir meine Ausbildung ermöglicht haben, sowie meiner Familie und Freunden, die durch ihre Unterstützung einen erheblichen Anteil an der Arbeit haben.



# Inhaltsverzeichnis

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1      | Einführung . . . . .  | 1         |
| 1.2      | Zielsetzung . . . . .   | 2         |
| <b>2</b> | <b>Stand der Technik und Vorgehen</b>                               | <b>5</b>  |
| 2.1      | Kenngößen für Industrieroboter . . . . .                            | 6         |
| 2.2      | Anforderungen an Roboter . . . . .                                  | 8         |
| 2.3      | Analyse und Synthese von Roboterstrukturen . . . . .                | 9         |
| 2.3.1    | Möglichkeiten der Analyse von Roboterstrukturen . . . . .           | 10        |
| 2.3.2    | Modifikation bekannter Roboterstrukturen . . . . .                  | 15        |
| 2.3.3    | Modifikation natürlicher Systeme . . . . .                          | 17        |
| 2.3.4    | Generierung neuer Roboterstrukturen . . . . .                       | 18        |
| 2.4      | Grenzen vorhandener Methoden . . . . .                              | 18        |
| 2.5      | Vorgehen . . . . .  | 20        |
| <b>3</b> | <b>Modellierung von Roboterstrukturen</b>                           | <b>23</b> |
| 3.1      | Anforderungen an einen Dentalroboter . . . . .                      | 23        |
| 3.1.1    | Manuelle Zahnpräparation . . . . .                                  | 24        |
| 3.1.2    | Anforderungen an die Roboterstruktur eines Dentalroboters . . . . . | 26        |
| 3.2      | Modellierung eines Roboters . . . . .                               | 29        |
| 3.2.1    | Kinematische Struktur von Robotern . . . . .                        | 33        |
| 3.2.2    | Art und Anordnung der Gelenke . . . . .                             | 34        |
| 3.2.3    | Haupt- und Handachsen . . . . .                                     | 34        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 3.3      | Transformationsverfahren zur Strukturbeschreibung . . . . . | 35        |
| 3.3.1    | Strukturparameter . . . . .                                 | 35        |
| 3.3.2    | Transformationsverfahren . . . . .                          | 37        |
| 3.3.3    | Relative Strukturzeugung . . . . .                          | 41        |
| 3.3.4    | Absolute Strukturzeugung . . . . .                          | 42        |
| <b>4</b> | <b>Auswahlmethoden für Roboterstrukturen</b> . . . . .      | <b>45</b> |
| 4.1      | Analyse des zu optimierenden Systems . . . . .              | 46        |
| 4.2      | Auswahlmethode für Roboterstrukturen . . . . .              | 48        |
| 4.2.1    | Anzahl auszuwertender Roboterstrukturen . . . . .           | 48        |
| 4.3      | Evolutionstrategie für Roboterstrukturen . . . . .          | 49        |
| 4.3.1    | Individuen - Populationen - Generationen . . . . .          | 50        |
| 4.3.2    | Genetische Operationen . . . . .                            | 51        |
| 4.3.3    | Sensitivitätsanalyse . . . . .                              | 53        |
| <b>5</b> | <b>Optimierungskriterien</b> . . . . .                      | <b>57</b> |
| 5.1      | Bildung von Kennzahlen . . . . .                            | 58        |
| 5.2      | Bestimmung der Werte der Zielfunktion . . . . .             | 59        |
| 5.3      | Algorithmische Erzeugung der Jacobimatrix . . . . .         | 59        |
| 5.4      | Arbeitsraum . . . . .                                       | 62        |
| 5.4.1    | Volumen des Arbeitsraumes . . . . .                         | 66        |
| 5.4.2    | Form des Arbeitsraumes . . . . .                            | 68        |
| 5.4.3    | Mehrdeutigkeiten im Arbeitsraum . . . . .                   | 69        |
| 5.5      | Manipulierbarkeit . . . . .                                 | 70        |
| 5.5.1    | Manipulierbarkeitsmaß . . . . .                             | 76        |
| 5.5.2    | Isotropie der Manipulierbarkeit . . . . .                   | 77        |
| 5.6      | Dynamik . . . . .   | 78        |
| 5.6.1    | Kinetische Energie . . . . .                                | 80        |
| 5.6.2    | Verallgemeinerter Trägheitsellipsoid . . . . .              | 82        |
| 5.6.3    | Einfluss nicht linearer Kräfte . . . . .                    | 83        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 5.6.4    | Beschleunigungsfähigkeit . . . . .   | 83         |
| 5.7      | Genauigkeit . . . . .  | 84         |
| 5.7.1    | Fehlerübertragungsverhalten . . . . .  | 84         |
| 5.7.2    | Steifigkeit . . . . .  | 87         |
| 5.8      | Redundante Roboterstrukturen . . . . .   | 92         |
| 5.9      | Entkoppelte Roboterachsen . . . . .  | 94         |
| 5.10     | Normierung und Gewichtung . . . . .  | 94         |
| 5.10.1   | Normierung der Kennzahlen . . . . .  | 95         |
| 5.10.2   | Gewichtung der Optimierungskriterien . . . . .                                     | 96         |
| 5.11     | Optimierungsprogramm „Robkinopt“ . . . . .   | 96         |
| <b>6</b> | <b>Ergebnisse der Optimierung</b>  | <b>101</b> |
| 6.1      | Untersuchung von R <sup>5</sup> - und TR <sup>4</sup> -Roboterstrukturen . . . . . | 102        |
| 6.1.1    | Ergebnisse der Auswahlmethode . . . . .  | 102        |
| 6.1.2    | Ergebnisse der Evolutionsstrategie . . . . .                                       | 108        |
| 6.2      | Evolutionsstrategie für große Suchräume . . . . .                                  | 110        |
| 6.3      | Auswahl der besten Roboterstruktur . . . . .                                       | 112        |
| 6.4      | Ausführung des Dentalrobotersystems . . . . .                                      | 114        |
| 6.4.1    | Konstruktion des Dentalroboters . . . . .  | 115        |
| 6.4.2    | Steuerung des Dentalroboters . . . . .   | 117        |
| <b>7</b> | <b>Zusammenfassung</b>   | <b>121</b> |
| <b>8</b> | <b>Anhang</b>  | <b>123</b> |
| 8.1      | Abkürzungen und Verzeichnis der Symbole . . . . .                                  | 123        |
| 8.1.1    | Begriffsdefinitionen nach EN ISO 8373:1996 . . . . .                               | 123        |
| 8.1.2    | Abkürzungen . . . . .  | 125        |
| 8.1.3    | Variablen und Parameter . . . . .  | 125        |
| 8.2      | Matrizen zur Normalisierung der Jacobimatrix . . . . .                             | 129        |
| 8.3      | Gewichtungstabellen der Eigenschaften . . . . .                                    | 130        |

|                             |   |            |
|-----------------------------|---|------------|
| 8.4                         | Konstruktionszeichnung der Dentalroboterhauptachsen . . . . . | 132        |
| 8.5                         | Parameter der besten Dentalroboterstruktur . . . . .          | 133        |
| 8.6                         | Versuchsstand für Dentaloperationen in vitro . . . . .        | 133        |
| <b>Literaturverzeichnis</b> |   | <b>135</b> |