Störungskompensation und Optimierung des elektromagnetischen Trackings in der computerunterstützten Chirurgie

Von der Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Robert Benjamin Elfring

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Radermacher
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Wilfried Mokwa

Tag der mündlichen Prüfung: 25. Juni 2012

Aachener Beiträge zur Medizintechnik 13
Herausgeber:
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. med. Steffen Leonhardt
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Radermacher
Univ.-Prof. Dr. med. Dipl.-Ing. Thomas Schmitz-Rode

Robert Elfring

Störungskompensation und Optimierung des elektromagnetischen Trackings in der computerunterstützten Chirurgie

Ein Beitrag aus dem Lehrstuhl für Medizintechnik der RWTH Aachen (Direktor: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Radermacher).

Shaker Verlag
Aachen 2012

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.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2012)

Copyright Shaker Verlag 2012
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-1205-7
ISSN 1866-5349

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

Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Medizintechnik im Helmholtz-Institut für Biomedizinische Technik der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen.
Bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Radermacher, Direktor des Lehrstuhls für Medizintechnik, möchte ich mich für die Möglichkeit der Promotion, die Unterstützung während der Erstellung der Dissertation und die vielen hilfreichen Diskussionen bedanken. Allen meinen Kollegen am Helmholtz-Institut gilt mein großer Dank für die sehr gute und freundschaftliche Zusammenarbeit. Besonders hervorheben möchte ich hier Dr.-Ing. Aleksandra Popovic, Dipl.-Ing. Peter Belei, Dr.-Ing. Bastian Ibach, Dipl.-Ing.(FH) Frauke Schmidt, MSc., Dipl.-Inform. Julia Benzko, Dipl.-Ing. Sabine Jeromin und Dipl.-Ing. (FH) Arne Jansen, MSc. Auch den viele Studentinnen und Studenten, die mich bei meiner Arbeit am Lehrstuhl unterstützt haben möchte ich danken, ganz besonders Dipl.-Ing. Johannes Jansing, Simon Weinand und Frederick Pothof.
Die Arbeit im interdisziplinären Gebiet der Medizintechnik ist ohne klinische Unterstützung nicht möglich. Besonders erwähnen möchte ich für gute Zusammenarbeit mit Dr. med. Philipp Bruners, Dr. med. Tobias Penzkofer und Dr. med. Michael Czaplik.
Mein ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern Regina und Raymund Elfring, die mich stets in allem untersützt haben.
Ein Teil der Arbeiten entstand im Rahmen der Projekte *OrthoMIT - Minimalinvasive Orthopädische Therapie* (Gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen der Initiative SOMIT - Schonendes Operieren mit Innovativer Technik, Förderkennzeichen BMBF 01EQ0402 und 16SV2019.) *SensoPaL - Sensorintegrierte Patientenliege* (Gefördert durch die Europäische Union und das Land Nordrhein-Westfalen im Rahmen des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung.).

Zusammenfassung

Erkrankungen des Stütz- und Bewegungsapparates stellen eine der zentralen Herausforderungen für das Gesundheitswesen dar. In der operativen Therapie dieser Erkrankungen werden zunehmend chirurgische Navigationssysteme genutzt, welche den Operateur bei Planung und Umsetzung der Eingriffe unterstützen. Von zentraler Bedeutung sind hierbei Technologien zur präzisen und zuverlässigen Lokalisierung und Lageverfolgung von Patient und Instrumenten, das sogenannte Tracking. Elektromagnetische Lokalisierungsverfahren haben aufgrund der sehr kleinen Sensoren und der Unabhängigkeit von einer freien Sichtlinie wichtige Vorteile, denen jedoch technologiebedingte Schwierigkeiten in der Umsetzung gegenüberstehen: insbesondere führen Metalle in der Nähe des Messbereichs oft zu Messfehlern oder gar Ausfällen.

Die vorliegende Arbeit zeigt Wege zu einem zuverlässigen und genauen Einsatz elektromagnetischen Trackings in der interventionellen und chirurgischen Navigation auf. Zur Beurteilung der Anwendbarkeit des EM-Trackings für eine Applikation wurden zunächst technische und anwendungsorientierte Kriterien erarbeitet. Für ein besseres Verständnis der Störanfälligkeit sowie zur Quantifizierung des Einflusses metallischer Störkörper wurden Simulationen und experimentelle Voruntersuchungen durchgeführt. Eine Methode für die Analyse und Optimierung von Anwendungen wurde vorgestellt und an zwei Applikationen beispielhaft durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass in der untersuchten Anwendung der navigierten Knieendoprothetik durch geschickte Anordnung der Sensoren und Einhaltung von Verfahrensvorschriften alle auftretenden Störungen in einem akzeptablen Bereich gehalten werden können. Für die betrachtete Anwendung der navigierten Kyphoplastie ist eine ausreichende Optimierung hingegen nur durch Einsatz einer speziellen metallfreien Liege möglich.

Ergänzend zu den Optimierungen der Anwendung wurde ein Verfahren zur rechnerischen Korrektur von Störungen vorgestellt, welches erstmals auch dynamische Störungen berücksichtigt und sich so für den Einsatz im sich ständig ändernden chirurgischen Umfeld eignet. Auf Basis von Messungen der gestörten Positionsermittlung an mehreren bekannten Referenzpositionen wird ein Korrekturwert für die Sensorposition berechnet und angewendet. Die Evaluierung konnte zeigen, dass eine Reduktion des Positions- und Orientierungmessfehlers um bis zu zwei Drittel erreicht werden kann. Aufgrund des notwendigen sequentiellen Auslesens der Referenzpositionen können jedoch nur Störungen berücksichtigt werden, welche sich langsam ändern.

Die Arbeit konnte zeigen, dass durch Anwendungsoptimierung und aktive dynamische Störungskompensation ein genaues und zuverlässiges elektromagnetisches Tracking für viele Applikationen möglich ist.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis ix

Tabellenverzeichnis xi

1. Einleitung 1

2. Hintergrund und Motivation 3
2.1. Computerunterstützte Interventionen 3
2.2. Tracking – Positions- und Orientierungsverfolgung im Raum 7
2.2.1. Der Begriff der Genauigkeit 7
2.2.2. Lokalisierungs- und Trackingtechnologien 9
2.3. Stand der Technik des elektromagnetischen Trackings 17
2.3.1. Physikalisch-technische Grundlagen 17
2.3.2. Funktionsweise des EM-Trackings 20
2.3.3. Anwendungen des EM-Trackings 23
2.3.4. Störeffekte des EM-Trackings 26
2.3.5. Untersuchungen zur Störanfälligkeit beim EM-Tracking 29
2.3.6. Störungsdetektion und -kompensation 31
2.3.7. Biologischer Einfluss elektromagnetischer Felder 34
2.4. Offene Fragen und Motivation 34

3. Voruntersuchungen 37
3.1. Kriterien und technische Faktoren für die Anwendung elektromagnetischen Trackings 37
3.2. Simulation elektromagnetischer Felder 40
3.3. Experimentelle Voruntersuchungen 43
3.3.1. Trackingfehler in einer OP-Umgebung 43
3.3.2. Trackingfehler durch typische OP-Werkzeuge 46
3.3.3. Orientierungsabhängigkeit des Trackingfehlers 48
3.3.4. Wechselwirkung mit elektrophysiologischer Messtechnik 49

4. Applikationsanalyse und -optimierung 53
4.1. Methodik der Applikationsmodellierung 53
4.2. Applikationsauswahl 56
4.3. EM-Tracking in der Pinpoint-Wirbelsäulenchirurgie 58
4.3.1. Die Pinpoint-Wirbelsäulenchirurgie 58

4.3.2. Applikationsanalyse der Pinpoint-Wirbelsäulenchirurgie 61
4.4. EM-Tracking in der Totalen Knieendoprothetik 70
4.4.1. Die Totale Knieendoprothetik 70
4.4.2. Applikationsanalyse der Totalen Knieendoprothetik 74
4.5. Fazit der Applikationsanalyse 88

5. Konzept einer Störungskompensation 89
5.1. Technische Eingriffe zur Störungsreduktion 89
5.2. Konzeption der Störungskompensation 92
5.3. Algorithmen 96
5.3.1. Positionskorrektur 96
5.3.2. Orientierungskorrektur 99
5.4. Kompensationsvorrichtung 101
5.5. Ermittlung der Referenzpositionen 101
5.5.1. Überblick der Referenzpositionsermittlung 101
5.5.2. Mechanisch starre Verbindung 102
5.5.3. Registrierung 103
5.5.4. Zusätzliches Tracking 104
5.5.5. Genauigkeitsanalyse 105

6. Implementierung und Evaluierung der Störungskompensation 109
6.1. Anwendungsszenarien 109
6.1.1. Störungskompensation in der Pinpoint-Wirbelsäulenchirurgie . 109
6.1.2. Störungskompensation in der Knieendoprothetik 111
6.2. Implementierung einer Störungskompensation 113
6.2.1. Hardwareaufbau 113
6.2.2. Multiplexer zur Erhöhung der Sensorzahl 114
6.2.3. Softwareimplementierung 115
6.3. Evaluierung der Komponenten 116
6.3.1. Evaluierung des CoilMUX 116
6.3.2. Evaluierung der Interpolationsalgorithmen 118
6.4. Evaluierung der Gesamtanwendung 120
6.4.1. Genauigkeit der Positionskorrektur 120
6.4.2. Genauigkeit der Orientierungskorrektur 121
6.4.3. Dynamik der Korrektur 123
6.5. Applikationsnahe Evaluierung der Störungskompensation 125

7. Diskussion und Ausblick 129
7.1. Diskussion 129
7.2. Ausblick 133
7.3. Fazit 135

Literaturverzeichnis 137

A. Anhang **xiii**
A.1. Translation und Rotation im dreidimensionalen Raum xiii
A.1.1. Translation xiii
A.1.2. Rotation xiii
A.1.3. Euler-Winkel xiii
A.1.4. Quaternionen xv
A.1.5. Rotationsmatrizen xvi
A.2. Mathematische Beschreibung des magnetischen Feldes xvi

Abbildungsverzeichnis

2.1. Phaseneinteilung CAS . . . 3
2.2. Beispiel Pedikelschraubenimplantation . . . 6
2.3. Begriffsbestimmungen zur Genauigkeit . . . 8
2.4. Optisches Tracking. . . . 12
2.5. Optischer Rigid Body . . . 13
2.6. Prinzip des EM-Trackings . . . 21
2.7. Das Trackingsystem Aurora . . . 22
2.8. Störungen durch Wirbelströme bei Pulsed-DC-Anregung . . . 27
2.9. Verbiegung der Feldlinien in Ferromagnetika. . . . 28
2.10. Abstandsabhängigkeit des Trackingfehlers . . . 29

3.1. Simulation von Störquellen: Aufbau . . . 42
3.2. Simulation von Störeffekten: Ergebnisse . . . 42
3.3. OP-Umgebung: Hybrider Pointer . . . 44
3.4. OP-Umgebung: Versuchsaufbau . . . 45
3.5. Störeinfluss von Gegenständen: Untersuchte Gegenstände . . . 46
3.6. Störeinfluss von Gegenständen: Aufbau . . . 47
3.7. Störeinfluss von Gegenständen: Ergebnisse . . . 48
3.8. Orientierungsabhängigkeit: Aufbau . . . 49
3.9. Orientierungsabhängigkeit: Ergebnisse . . . 50
3.10. Einfluss des EMT auf ein EKG – Aufbau . . . 51
3.11. Einfluss des EMT auf ein EKG – Ergebnisse . . . 51

4.1. Ereignisgesteuerte Prozessketten . . . 55
4.2. Schema Kyphoplastie . . . 59
4.3. Intraoperativer Aufbau Kyphoplastie . . . 60
4.4. Kyphoplastienadel. . . . 62
4.5. Ablauf Kyphoplasty (EPK) . . . 65
4.6. Systemmodell WS-Chirugie . . . 67
4.7. Ablaufplan Kyphoplastie . . . 68
4.8. Registrierungsplattte . . . 69
4.9. Kyphoplastie unter CT-Verwendung . . . 70
4.10. Das Kniegelenk . . . 71
4.11. Die Knieendoprothese . . . 72
4.12. TKA-Operation . . . 73
4.13. TKA-Operation navigiert . . . 74

4.14. Schnittblöcke TKA 75
4.15. Ablauf TKA (EPK) - Optisch 77
4.16. EMT-Tools für TKA 80
4.17. TKA-Aufbau 81
4.18. Ablauf TKA (EPK) - EMT 83
4.19. Ablaufplan TKA 85

5.1. Übertragungsmodell 90
5.2. Prinzip der Störungskompensation 92
5.3. Ablauf der Störungskompensation 93
5.4. Ablauf einer orientierungsabhängigen Positionskorrektur. 95
5.5. Referenzsensorenpositionierung durch mechanische Verbindung. 103
5.6. Referenzsensorenpositionierung durch Registrierung. 104

6.1. Anwendungsszenario der Störungskompensation (WS) 110
6.2. Anwendungsszenario der Störungskompensation (TKA) 112
6.3. Implementierung der compETE-Vorrichtung. 114
6.4. CoilMUX 115
6.5. Beispielanwendung Wirbelsäulenchirugie 117
6.6. Evaluierung der Interpolationsalgorithmen: Aufbau 119
6.7. Evaluierung der Interpolationsalgorithmen: Ergebnisse 120
6.8. Evaluation Positionskorrektur: Aufbau 122
6.9. Evaluierung der Orientierungskorrektur: Ergebnisse 123
6.10. Evaluation: Dynamik 124
6.11. Applikationsevaluierung WS: Aufbau OP-Tisch 126
6.12. Applikationsevaluierung WS: Aufbau CT-Liege 127
6.13. Applikationsevaluierung WS: Ergebnisse 127

7.1. Integration in eine SOA-basierte OP-Umgebung 134
7.2. Anwendungsszenario Kathetereingriffe 135
7.3. Anwendungsszenario Wirbelsäule mit SensoPaL 136

A.1. Rotationsdarstellung Roll Pitch Yaw xiv

Tabellenverzeichnis

2.1. Typische Eigenschaften von Trackingverfahren. 16
2.2. Magnetische Eigenschaften von Materialien 18
2.3. Vergleich verschiedener Magnetfeldsensoren 20
2.4. Überblick über elektromagnetische Tracking- und Navigationssysteme . 24

3.1. Simulation von Störeffekten: Ergebnisse 43
3.2. Simulation von Störeffekten: Ergebnisse 2 43

4.1. Ablauf Kyphoplastie 66
4.2. Ablauf TKA mit opt. Tracking 78
4.3. Ablauf TKA mit EM-Tracking 84

5.1. Genauigkeitsanalyse - Tracking 106
5.2. Genauigkeitsanalyse - Registrierung 107
5.3. Methoden zur Referenzpositionsermittlung. 107

6.1. Ergebnisse Gesamtevaluation 121
6.2. Applikationsevaluierung WS: Ergebnisse 125