

Markerfreie Kalibrierung von Röntgenbildern für computerunterstützte Operationssysteme am Beispiel der Revision von Hüftendoprothesen

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

vorgelegt von

Diplom-Ingenieur Matías de la Fuente Klein

aus

Düsseldorf

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Radermacher
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Günter Rau

Tag der mündlichen Prüfung: 28. Februar 2008

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. med. Steffen Leonhardt

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Radermacher

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. med. Dipl.-Ing. Thomas Schmitz-Rode

Matías de la Fuente Klein

**Markerfreie Kalibrierung von
Röntgenbildern für computerunterstützte
Operationssysteme am Beispiel
der Revision von Hüftendoprothesen**

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

RWTHAACHEN
UNIVERSITY

Shaker Verlag
Aachen 2008

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.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2008

Copyright Shaker Verlag 2008

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-7307-1

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

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Helmholtz-Institut für Biomedizinische Technik der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Radermacher, Direktor des Lehrstuhls für Medizintechnik im Helmholtz-Institut der RWTH Aachen, für die stets engagierte Unterstützung sowie die vielfältigen kritischen und zugleich motivierenden Diskussionen während der Betreuung der Arbeit. Ebenso danke ich Herrn Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Günter Rau als ehemaligem Direktor des Helmholtz-Institutes für Biomedizinische Technik für die Übernahme des Korreferats sowie für seine stete Unterstützung.

Weiterhin danken möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Erik Schkommodau, der mich schon während der persönlichen Betreuung meiner Diplomarbeit und unserer gemeinsamen Zeit am Helmholtz-Institut in zahlreichen anregenden Diskussionen stets inspirierte.

Außerdem danke ich allen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl für Medizintechnik der RWTH Aachen sowie allen beteiligten Studierenden für die wertvolle Unterstützung meiner Arbeit und besonders für die schöne gemeinsame Zeit. Insbesondere hervorheben möchte ich hier Dipl.-Ing. Peter Belei, Dipl.-Ing. Peter Lutz, Dipl.-Ing. Stefan Heger, Dipl.-Ing. Pierre Bast, Dr.-Ing. Aleksandra Popovic sowie Dr.-Ing. Wolfgang Lauer.

Teile der Arbeit wurden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Projektes MINARO gefördert, wofür ich mich ebenso bedanken möchte, wie für die stets gute Zusammenarbeit mit Dr.-Ing. Frank Portheine der SurgiTAIX AG sowie mit den Projektpartnern der Orthopädischen Klinik der RWTH Aachen.

Zuletzt gilt mein Dank in ganz besonderer und herzlicher Weise meiner Frau Annekathrin und meinen Kindern Julia Marie, Maximilian und Lilli Sophie, die besonders in der Endphase dieser Arbeit häufig auf mich verzichten mussten und mir dennoch immer wieder Mut zugesprochen haben.

Meiner Frau und
meinen Kindern
gewidmet

Zusammenfassung

Im Rahmen der computerunterstützten orthopädischen Chirurgie hat sich die fluoroskopische Navigation in den letzten Jahren als ein Verfahren der klinischen Routine etabliert. Am Beispiel der Entwicklung eines Systems für die computerunterstützte Revision von Hüftendoprothesen werden jedoch Problemstellungen aufgezeigt, die bislang nur unzureichend gelöst sind.

Für eine computerunterstützte Entfernung des femoralen Knochenzementes auf der Basis intraoperativ aufgenommener Röntgenbilder ist es notwendig, die in den Röntgenbildern vorhandenen Verzerrungen zu kompensieren. Bislang bekannte Verfahren der Röntgenbildkalibrierung verwenden hierzu entweder einen in jeder Aufnahme sichtbaren Kalibrierkörper bekannter Geometrie, oder es wird nach einer präoperativ erfolgten Vorabkalibrierung intraoperativ eine winkelabhängige Interpolation durchgeführt.

In dieser Arbeit wird ein neuartiger Ansatz zur markerfreien Kalibrierung von Röntgenbildern vorgestellt, welcher basierend auf einer messtechnischen Erfassung der Ursache der Verzerrung, dem Magnetfeld in Umgebung des Röntgenbildverstärkers, und einer modellbasierten Beschreibung die vorhandene Verzerrung nachbildet und so eine Kompensation ermöglicht. Hierzu werden zwei unterschiedliche Ansätze vorgestellt, die insbesondere auf den Daten eines oder mehrerer Magnetfeldsensoren basieren. Während das physikalische Modell die Ablenkung der Elektronen im Röntgenbildverstärker abhängig vom Magnetfeld nachbildet, basiert das mathematische Modell rein auf einer polynomialen Beschreibung der Verzerrung.

Die messtechnische Evaluierung der erreichbaren Genauigkeit zeigte, dass sich beide Ansätze nur geringfügig unterscheiden. Während eine Kalibrierung basierend auf dem mathematischen Modell einen leicht höheren maximalen Restfehler aufweist als das physikalische Modell (math.: 1.3008 Pixel, phys.: 1.1589 Pixel), liegt der mittlere RMS-Fehler des mathematischen Modells mit 0.304 Pixel deutlich unter dem des physikalischen Modells mit 0.356 Pixel. Zur Abschätzung der Auswirkung dieses Fehlers auf fluoroskopische Navigationssysteme wurde im Rahmen einer Fehleranalyse eine mathematische Beschreibung hergeleitet, mit welcher sich die Auswirkung des verbleibenden Kalibrierfehlers auf einen resultierenden räumlichen Fehler zu 0.66 mm (RMS: 0.24 mm) bestimmen ließ.

Das Verfahren wurde im Rahmen der Entwicklung eines computerunterstützten Navigations- und Robotersystems zur fluoroskopiebasierten Entfernung des femoralen Knochenzementes implementiert. Eine Darstellung des entwickelten Systems sowie erste vorklinische Evaluierungen bezüglich einer fluoroskopischen dreidimensionalen Rekonstruktion des Knochenzementes schließen die Arbeit ab.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Hintergrund und Motivation	3
2.1. Medizinischer Hintergrund	3
2.2. Technischer Hintergrund	8
2.2.1. Computerunterstützte Operationssysteme	8
2.2.2. Fluoroskopische Navigationssysteme	14
2.2.3. Mögliche Fehlerursachen intraoperativer Röntgenbilderstellung	17
2.2.4. Methoden der Röntgenbildkalibrierung	21
2.3. Offene Problemstellungen	33
3. Konzept einer markerfreien Röntgenbildkalibrierung	39
3.1. Zielsetzungen	39
3.2. Voruntersuchungen	39
3.2.1. Einfluss der Durchbiegung des C-Bogens auf die Röntgenprojektion	39
3.2.2. Einfluss von Magnetfeldern auf die Röntgenbildverzerrung	40
3.3. Konzept der markerlosen Röntgenbildkalibrierung	42
4. Markerfreie Kalibrierung von Röntgenbildern	47
4.1. Physikalisches Modell zur Röntgenbildentzerrung	48
4.1.1. Verteilung der magnetischen Flussdichte in einem abgeschirmten Bildverstärker	48
4.1.2. Elektrostatisches Modell eines Röntgenbildverstärkers	51
4.1.3. Radialverzerrung am Eingangsleuchtschirm	56
4.1.4. Numerische Simulation	57
4.1.5. Modellkalibrierung	58
4.1.6. Röntgenbildentzerrung	60
4.2. Mathematisches Modell zur Röntgenbildentzerrung	62
4.2.1. Zweistufige globale Modellierung	62
4.2.2. Zweistufige pixelweise Modellierung	64
4.2.3. Röntgenbildentzerrung	66
4.3. Markerfreie Kalibrierung der Röntgenprojektion	67
4.3.1. Bestimmung der Projektionsparameter	67
4.3.2. Polynomiale Modellierung	71

5. Evaluierung der Genauigkeit	73
5.1. Material und Methoden	73
5.2. Genauigkeit der Eingangswerte	76
5.3. Röntgenbildentzerrung	79
5.3.1. Physikalisches Modell	79
5.3.2. Mathematisches Modell	87
5.3.3. Statistischer Vergleich beider Modelle	87
5.4. Röntgenprojektionskalibrierung	90
5.5. Auswirkung des Restfehlers auf die medizinische Applikation	92
5.5.1. Modellierung der Fehlerauswirkung durch Bildverzerrungen	92
5.5.2. Modellierung der Fehlerauswirkung durch Projektionsfehler	95
5.5.3. Sensitivitätsanalyse	98
6. Integration in ein computerunterstütztes Operationssystem	107
6.1. Konzept	107
6.2. Akquisition kalibrierter Röntgenbilder	108
6.3. Dreidimensionale Segmentierung und Rekonstruktion des Knochen- zementes	110
6.4. Navigierte, optional robotische Entfernung des Knochenzementes	111
6.5. Vorklinische Evaluierung	113
7. Diskussion und Ausblick	117
Literaturverzeichnis	123
Anhang	141
A. Mehrdimensionale polynomiale Interpolation	141
B. Software-Integration der Röntgenbildkalibrierung	145
C. Statistische Fehlerbeschreibung	147
D. Begriffe und Abkürzungen	148