

Intraoperative Struktur- und Geometrieerfassung mittels A-Mode Ultraschall 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

Diplom-Ingenieur Stefan Heger

aus

Eschweiler

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

Tag der mündlichen Prüfung: 20. Oktober 2008

Aachener Beiträge zur Medizintechnik

3

Herausgeber:

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

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

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

Stefan Heger

Intraoperative Struktur- und Geometrieerfassung mittels A-Mode Ultraschall in der computerunterstützten Chirurgie

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

RWTHAACHEN
UNIVERSITY

Shaker Verlag
Aachen 2009

D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 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.: RWTH Aachen University, Diss., 2008

Copyright Shaker Verlag 2009

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-7867-0

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 am Helmholtz-Institut der RWTH Aachen für seine engagierte Unterstützung und stete Bereitschaft für kritische und ebenso motivierende Diskussionen während der Betreuung dieser Arbeit. Ebenso möchte ich dem ehemaligen Direktor des Helmholtz-Institutes für Biomedizinische Technik, Herrn Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Günter Rau, für die Übernahme des Koreferats sowie für seine stete Unterstützung, seine Gesprächsbereitschaft und seine Anregungen danken.

Ebenfalls danken möchte ich allen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl für Medizintechnik der RWTH Aachen sowie allen beteiligten Studierenden für die wertvolle Unterstützung und die angenehme Atmosphäre während meiner Zeit am Lehrstuhl.

Teile dieser Arbeit wurden vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) sowie von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen der Projekte orthoMIT und CRANIO sowie durch START-Projekte des Universitätsklinikums der RWTH Aachen gefördert, wofür ich mich bedanken möchte. Ebenfalls gilt mein Dank Dr.-Ing. Frank Portheine von der SurgiTAIX AG für die gute Zusammenarbeit.

Danken möchte ich auch den Projektpartnern der orthopädischen Klinik der RWTH Aachen und der Neurochirurgie der Universitätsklinik Bochum-Langendreer, insbesondere aber Prof. Dr. med. Kirsten Schmieder und Dr. med. Martin Engelhardt für die medizinische Unterstützung bei der Durchführung erster klinischer Untersuchungen zur Ultraschallregistrierung am Schädel.

Schließlich gilt mein Dank in ganz besonderer und herzlicher Weise meiner Familie, allen voran meinen lieben Eltern, die mich während der gesamten Arbeit in jeder Hinsicht unterstützt und mir immer wieder Mut zugesprochen haben.

*Meiner lieben Familie
gewidmet*

Zusammenfassung

Ein häufiges Problem der computerunterstützten Chirurgie ist die Struktur- und Geometrieerfassung biologischer Gewebe sowie in den Körper eingebrachter Materialien. Zu diesem Zweck eingesetzte bildgebende Systeme erfordern meist eine aufwändige Segmentierung der gewünschten Strukturen im Bild. Zudem sind solche Systeme entsprechend der geforderten Bildqualität oftmals sehr kostenintensiv.

Eine weitaus preisgünstigere Möglichkeit zur intraoperativen Strukturerrfassung bietet der Einsatz von A-Mode Ultraschall. Diagnostischer Ultraschall erfreut sich hoher Akzeptanz, verursacht keine Gewebeschädigung und ist in Echtzeit verfügbar. Die Verwendung von A-Mode Ultraschall wird in dieser Arbeit exemplarisch an zwei Problemstellungen der computerunterstützten Chirurgie untersucht und evaluiert.

Zur CT-basierten Referenzierung eines präoperativen Planungsmodells mit dem Patientensitus wird A-Mode Ultraschall zur Digitalisierung von Knochenoberflächenpunkten am Schädel eingesetzt. Eine besondere Herausforderung stellt die Lösung des Optimierungsproblems bei nur wenigen vorhandenen Abtastwerten sowie die Ausrichtung der Sonde relativ zur Knochenoberfläche dar. Hierzu werden zufallsbasierte Optimierungsstrategien entwickelt und Zusatzwissen anhand CT-Daten, Ultraschallsignal- und Lageinformationen der Sonde berücksichtigt, um den intraoperativen Zeitaufwand zu reduzieren ohne die geforderte Genauigkeit einzuschränken. Die verwendeten Strategien bewiesen in einer vorklinischen Studie, dass bei einer mittleren Referenzierungsgenauigkeit von 1,3mm die intraoperativ erforderliche Referenzierungszeit von 15min auf durchschnittlich 113s reduziert werden kann.

Das zweite Anwendungsbeispiel betrifft die intraoperative Geometrieerfassung des Knochenzementmantels vor dem Hintergrund navigiert oder robotisch durchgeführter Eingriffe in der Hüftrevisionsendoprothetik mittels eines ultraschallbasierten intraluminalen Ansatzes. Da sich die Genauigkeit der Geometrieerfassung als von der Sondausrichtung abhängig erweist, wird eine lageinvariante Schätzung der optimalen Sondausrichtung durch Auswerten einer initialen Abtastung mittels eines statistischen sowie eines modellbasierten Ansatzes durchgeführt. Die automatische Sondenführung erfolgt robotisch unterstützt und in Abhängigkeit der gewählten Abtaststrategie durch Implementierung von jeweils zwei, drei oder vier Freiheitsgraden. Die messtechnische Evaluierung am Humanpräparat demonstriert erfolgreich, dass die medizinisch geforderte Genauigkeit der Zementgeometrieerfassung durch Abtastung mittels intraluminalen A-Mode Ultraschalls erreicht werden kann. Die beste Sondenvorpositionierung wird dabei mit dem modellbasierten Ansatz erzielt. Eine Einbeziehung von wenigstens drei Freiheitsgraden erweist sich bezüglich der Genauigkeit als vorteilhaft.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Fragestellung	3
1.3	Inhalte der Arbeit	4
2	Hintergrund und Stand der Technik	5
2.1	Computerunterstützte Chirurgie	5
2.2	Bildgebende Verfahren	6
2.3	Intraoperative Lage- und Positionssensorik	8
2.4	Medizinische Problemstellung	9
2.4.1	Referenzierung und Registrierung auf Basis von CT-Daten	9
2.4.2	Vermessung des Zementmantels bei Hüftrevisionseingriffen	15
3	Lösungsansatz und Zielsetzung	21
3.1	Ultraschall zur Strukturerrfassung	21
3.1.1	Ultraschallsysteme mit kontinuierlicher Anregung	22
3.1.2	Impuls-Echo Ultraschallsysteme	23
3.1.3	Transmissions-Ultraschallsysteme	26
3.2	Gegenüberstellung der Verfahren	27
3.3	Zielsetzung	29
4	Eigenschaften von A-Mode Ultraschall	31
4.1	Physikalische Grundlagen	31
4.1.1	Erzeugung von Ultraschall	31
4.1.2	Schallfeldcharakteristik	32
4.1.3	Grenzflächen zwischen Medien	34
4.1.4	Auflösungsvermögen	35
4.2	Messfehler und Artefakte	36
4.2.1	Lokale Variation der Ausbreitungsgeschwindigkeit	36
4.2.2	Signalverzerrungen	36
4.2.3	Schräger Schalleinfall an Grenzflächen	38
5	CT-basierte Registrierung und Referenzierung am Schädel	43
5.1	Referenzierungsalgorithmen	44
5.1.1	Punkt-zu-Punkt Registrierung	44
5.1.2	Flächenbasierte Algorithmen	45

5.1.3	Robuste ICP-Varianten	47
5.1.4	Zufallsbasierte Auswahl von Untermengen	47
5.1.5	k-d Suchbäume	49
5.2	Systemkalibrierung	49
5.2.1	Geometrische Kalibrierung	50
5.2.2	Kalibrierung mit C-Bildern	51
5.3	Sondenausrichtung relativ zur Knochenoberfläche	52
5.3.1	CT-basierte Abschätzung der Ausrichtung	55
5.3.2	Signalbasierte Abschätzung der Ausrichtung	56
5.3.3	Lageinformation	57
5.4	Integration	58
5.4.1	Wahl des Schallwandlers	58
5.4.2	Messsystem	59
5.5	Evaluierung	60
5.5.1	Vergleich der Kalibrierungsmethoden	60
5.5.2	Registrierungen am Schädelmodell	61
5.5.3	Untersuchungen am Humanpräparat	64
6	Erfassung der Zementgeometrie in der Revisionshüftendoprothetik	69
6.1	Voruntersuchungen	69
6.1.1	Prothesengeometrie	69
6.1.2	Zementgeometrie und typische Zementdicken	72
6.1.3	Einfluss des Knochenzementes	72
6.1.4	Eigenschaften der Zement-Knochen-Grenzfläche	80
6.2	Messsystem	81
6.2.1	Kommerzielle intraluminale Ultraschallsysteme	81
6.2.2	Auslegung des Sondensystems	82
6.2.3	Messaufbau	84
6.2.4	Koordinatenberechnung	84
6.3	Strategien zur Geometrieerfassung	85
6.3.1	Einfluss von Lage und Position der Messsonde	85
6.3.2	Anforderungen an die Sondenausrichtung	87
6.3.3	Lageinvariante Bestimmung der Abtastparameter	89
6.4	Detektion der Grenzfläche Wasser-Zement	91
6.4.1	Topologische Signalkarte	92
6.4.2	Merkmalsextraktion	93
6.4.3	Klassifikator	99
6.5	Interpolation und 3-D Rekonstruktion	104
6.6	Evaluierung	106
6.6.1	Material	106
6.6.2	Segmentierung der Grenzschicht Wasser-Zement	107
6.6.3	Bestimmung der Sondenposition	109
6.6.4	Genauigkeit der Geometrievermessung	112

7 Diskussion und Ausblick	119
7.1 Referenzierung und Registrierung auf Basis von CT-Daten	120
7.2 Vermessung des Zementmantels bei Hüftrevisionseingriffen	120
7.3 Ausblick	121
Literaturverzeichnis	125
Anhang	151
A Bestimmung von Ausbreitungsgeschwindigkeiten	151
B Auswertung zur automatischen Sondenpositionierung	152
C Messfehler an der Grenzschicht Knochen-Zement	154
D Support Vector Machine	156
E Begriffe und Abkürzungen	159