

Registrierung verschiedener Knochenstrukturen in Ultraschall- und CT-Daten anhand von prä- und intraoperativen Patientendatensätzen

Susanne Winter¹, Bernhard Brendel², Ioannis Pechlivanis³, Kirsten Schmieder³

¹Institut für Neuroinformatik, Ruhr-Universität Bochum, 44780 Bochum,

²Lehrstuhl für Hochfrequenztechnik, Ruhr-Universität Bochum, 44780 Bochum,

³Neurochirurgische Universitätsklinik, Ruhr-Universität Bochum, 44892 Bochum,
Kompetenzzentrum Medizintechnik Ruhr (KMR) Bochum

Email: Susanne.Winter@neuroinformatik.rub.de

Zusammenfassung. Die Registrierung präoperativer CT/MR-Daten mit dem Koordinatensystem des Operationssaales ist ein zentrales Problem in der bildgestützten, navigierten Chirurgie. Um intraoperativ die Belastung von Personal und Patienten durch Röntgenstrahlung zu vermindern, dient bei unserem Ansatz der dreidimensionale Ultraschall als intraoperative Bildgebungsmodalität. Unser Registrierungsalgorithmus soll neurochirurgische, orthopädische oder unfallchirurgische Eingriffe an der Wirbelsäule oder den großen Gelenken unterstützen.

Gegenstand der Untersuchungen in diesem Beitrag ist die Evaluierung unseres Registrierungsalgorithmus anhand von Ultraschalldatensätzen von Knie und Schulter, die ausserhalb des Operationssaales aufgenommen wurden, sowie intraoperativ erhobenen Ultraschalldaten der Lendenwirbelsäule.

1 Einleitung

Der Trend zur Minimalisierung chirurgischer Eingriffe erfordert Techniken zur Verbesserung der räumlichen Orientierung im Operationsgebiet. Hier bietet die bildgestützte Navigation dem Chirurgen die Möglichkeit anhand von präoperativen CT/MR-Datensätzen die Position seiner Instrumente auch in Bereichen zu verfolgen, die der direkten Sicht nicht zugänglich sind. Voraussetzung für eine zuverlässige Navigation ist eine exakte Registrierung der präoperativen Bilddaten mit dem Koordinatensystem des Operationssaales. Landmarkenbasierte Verfahren haben den Nachteil großer Ungenauigkeiten, wenn die Landmarken zu weit vom operativen Zielgebiet entfernt liegen, oder die manuelle Definition anatomischer Landmarken in den präoperativen Datensätzen nicht präzise möglich ist. Bildbasierte Registrierungsalgorithmen umgehen diese Probleme, allerdings sind die Kosten für Systeme mit intraoperativer CT- oder MR-Bildgebung enorm. Die Nutzung von Ultraschall zur intraoperativen Bildgebung hingegen hat den Vorteil niedrigerer Kosten und geringeren Platzbedarfs. Außerdem sind Ultraschallsysteme bei Freihandführung des Schallkopfes einfacher und flexibler einsetzbar.

Obwohl die Abbildungseigenschaften des Ultraschalls bezüglich Knochenstrukturen nicht optimal sind und nur ein geringer Teil der Knochenoberfläche abgebildet wird, steigt aufgrund der genannten Vorteile des Ultraschalls das Interesse an einer Nutzung zur intraoperativen Unterstützung von Eingriffen an Knochenstrukturen.

Die bisher in der Literatur beschriebenen Ansätze zur Registrierung von Knochenstrukturen in Ultraschalldaten und CT/MR-Daten basieren auf Oberflächen-Oberflächen-Registrierung, wozu die Knochenoberfläche in beiden Modalitäten segmentiert werden muss [1–4]. Eine Segmentierung der Knochenoberfläche in Ultraschalldaten ist bislang allerdings nicht zuverlässig für unterschiedliche anatomische Regionen möglich. Der von uns entwickelte Ansatz basiert auf einer Oberflächen-Volumen-Registrierung, bei der die Knochenoberfläche nur in den präoperativen CT-Daten segmentiert wird und die Ultraschalldaten als Grauwert-Volumendatensatz belassen werden [5, 6].

Ziel unserer Arbeit ist es die Ultraschallregistrierung intraoperativ sowohl an der Lendenwirbelsäule, als auch bei Eingriffen an den großen Gelenken (Knie, Hüfte, Schulter) einzusetzen. Unser Ansatz wurde zunächst für Wirbelsäulenapplikationen entwickelt, und es konnte bereits gezeigt werden, dass hier eine zuverlässige, präzise Registrierung möglich ist [7]. Außerdem wurde eine hohe Genauigkeit des Gesamtsystems am Phantom gemessen und die Anwendbarkeit für Knie und Schulter visuell bestätigt [8].

In diesem Beitrag wird unser Ansatz zur Ultraschallregistrierung anhand von Ultraschalldatensätzen des Knies und der Schulter, sowie intraoperativ gewonnenen Ultraschalldaten der Lendenwirbelsäule systematisch evaluiert. Es kann gezeigt werden, dass die Methode auf verschiedene anatomische Regionen übertragbar ist und dass sie mit intraoperativ gewonnenen Daten ebenfalls zuverlässig funktioniert.

2 Material und Methoden

Die Ultraschalldatensätze wurden mit einem Siemens Sonoline Omnia akquiriert. Die 3D-Rekonstruktion der Ultraschalldatensätze von Schulter und Knie wurden mit einem magnetischen Positioniersystem und einem Software Add-On von 3D Echotech durchgeführt. Die intraoperativ erhobenen Ultraschallvolumendaten wurden mit einem optischen Stereokamerasystem und einer eigenen 3D-Rekonstruktion erzeugt. Zusätzlich wurden in den intraoperativen Daten die Knochenoberflächen mit einem adaptiven Tiefenausgleich verstärkt. Die CT-Datensätze wurden als Spiral-CT aufgenommen. Alle Datensätze wurden in Datensätze mit isotroper Auflösung bei einer Voxelgröße von 0,5 mm x 0,5 mm x 0,5 mm umgewandelt.

Zur Registrierung wurde eine rigide Oberflächen-Volumen-Registrierung verwendet, bei der das Optimierungskriterium der Grauwertsumme der projizierten Oberflächenpunkte entsprach. Als Optimierungsmethode wurde die Covarianzmatrix Adaptations Evolutions-Strategie (CMA-ES) genutzt. Im Bereich des

Tabelle 1. Registrierrate (RR) in Prozent, mittlere Zahl der notwendigen Fitnessberechnungen (ZF) und mittlere Rechenzeiten (RZ) in Sekunden, jeweils für die Daten von Schienbein, Oberarmknochen und Lendenwirbel ohne und mit systematischer Reduktion der Oberflächenpunkte (Pkt) mit den Faktoren (RF) 4 und 8.

Daten	RF	Pkt	RR	ZF	RZ
Schienbein	1	10639	100,0	8023	32,0
Schienbein	4	2660	100,0	8036	8,2
Schienbein	8	1330	100,0	8104	4,2
Oberarmknochen	1	4023	100,0	6217	10,6
Oberarmknochen	4	1006	99,6	6266	2,8
Oberarmknochen	8	503	90,3	6263	1,5
Lendenwirbel	1	5519	100,0	6239	15,4
Lendenwirbel	4	1380	93,6	5241	3,3
Lendenwirbel	8	690	90,9	5215	1,7

Knies wurde die Knochenoberfläche des Schienbeins zur Registrierung verwendet, im Bereich der Schulter die des Oberarmknochens.

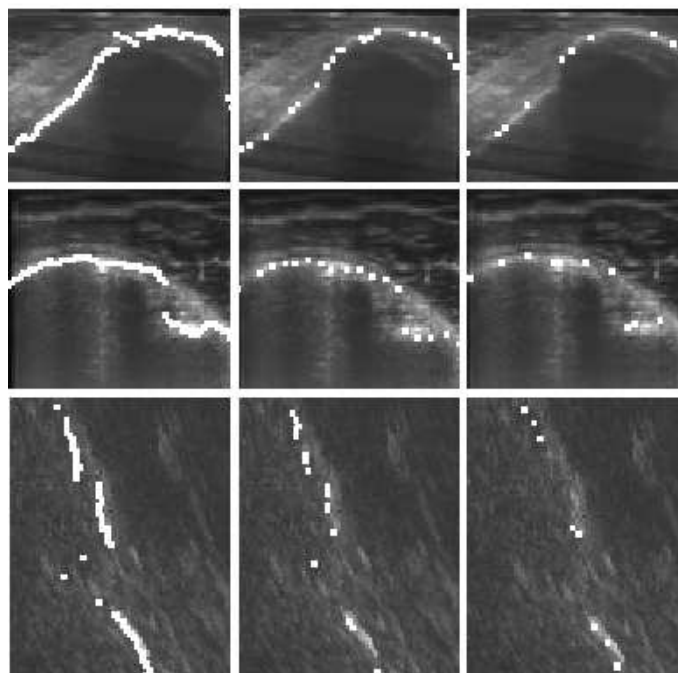
Die Oberflächenpunkte wurden mittels Schwellwert (200 Hounsfield Units) aus den CT-Daten, unter Berücksichtigung der Schalleinfallrichtung, bestimmt. Die so gewonnenen Oberflächenpunkte wurden zusätzlich systematisch um Faktor 4 und Faktor 8 reduziert.

Zur Evaluierung wurde für jeden Datensatz zunächst das Optimum bestimmt, indem mittels 50facher lokaler Optimierung derjenige Parametersatz ermittelt wurde, der im Sinne der Optimierung den besten Wert lieferte. Durch visuelle Kontrolle wurde die Plausibilität dieser Lösung bestätigt. Ausgehend von 1000 verschiedenen Startpositionen wurde jeweils 1000 mal registriert. Die Startpositionen verteilten sich auf mittlere Distanzen zum Optimum zwischen 0 und 15 mm, wobei Verschiebung und Rotation gleichzeitig variiert wurde. Diese Startabweichungen können bei grober Vorregistrierung als intraoperativ realistisch angesehen werden. Als korrekt registriert wurden die Versuche gewertet, deren Abstand zum Optimum geringer als 1 mm war.

3 Ergebnisse

Von den 1000 Registrierungsversuchen mit den Daten des Knies konnten 100 % korrekt registriert werden (siehe Tab. 1). Dies galt sowohl für die Versuche mit der kompletten Oberflächenpunktmenge, als auch bei systematischer Ausdünnung. Die Daten der Schulter konnten bei vollständiger Oberfläche ebenfalls zu 100 % korrekt registriert werden, bei Reduktion der Oberflächenpunkte gelang dies nur noch zu 99,6 % bzw. zu 90,3 %. Die Registrierung der intraoperativ erhobenen Ultraschalldaten eines Lendenwirbels war bei Nutzung der kompletten, für den Ultraschall sichtbaren Oberfläche, auch zu 100 % möglich. Die Registrierung anhand von weniger Punkten führte zu geringeren Registrierraten von 93,6 % und 90,9 %.

Abb. 1. Darstellung der Knochenoberflächenpunkte nach Registrierung; oben Schienbein, Mitte Oberarmknochen, unten Lendenwirbel; links alle Oberflächenpunkte, in der Mitte Reduktion mit Faktor 4, rechts Reduktion mit Faktor 8.



Die Zahl der für die Registrierung benötigten Rechenschritte lag für den Lendenwirbeln bei ca. 5200 bis 6200, für den Unterschenkelknochen bei etwas über 8000. Die absoluten Rechenzeiten sind direkt abhängig von der Zahl der verwendeten Oberflächenpunkte und den benötigten Rechenschritten. Zur Registrierung eines Wirbels mit kompletter Oberfläche wurden etwa 15 s benötigt. Das Schienbein konnte mit einer mittleren Rechenzeit von 4,2 s zuverlässig registriert werden. Der mittlere Abstand aller korrekten Registrierungen zu ihrem jeweiligen Optimum lag bei 0,07 mm.

In Abb. 1 sind die Knochenoberflächenpunkte nach Registrierung in die Ultraschalldaten eingeblendet. Dabei zeigen die Bilder links die Registrierung mit kompletter Oberfläche, die Bilder in der Mitte und rechts die Registrierung mit reduzierter Knochenoberfläche.

4 Diskussion

Es konnte gezeigt werden, dass die Ultraschallregistrierung sowohl intraoperativ an der Lendenwirbelsäule als auch in anderen Anwendungsgebieten mit hoher Präzision und hoher Registrierrate möglich war.

Die Rechenzeiten der Registrierung sind abhängig von der Zahl der verwendeten Oberflächenpunkte. Die Versuche mit systematischer Reduzierung der Oberflächenpunktmenge haben gezeigt, dass bei den Daten des Knies auch bei Reduktion um Faktor 8 noch eine 100%ige Registrierung der Daten möglich war. Bei den anderen Datensätzen hingegen hat die Zuverlässigkeit der Registrierung abgenommen.

Voraussetzung für eine erfolgreiche Registrierung ist allerdings eine gute Bestimmung der Knochenoberfläche im CT, die in den Ultraschalldaten abgebildet wird. Für die Versuche an Knie und Schulter war der im Ultraschall abgebildete Ausschnitt vor Bestimmung der Knochenoberfläche im CT bekannt und die Oberfläche wurde abhängig davon extrahiert.

Bisher existieren noch keine Ultraschallaufnahmeprotokolle für die großen Gelenke, die eine geeignete Auswahl des vom Ultraschall abgebildeten Bereichs und damit die automatische Bestimmung der geeigneten Knochenoberfläche zulassen. Daher wird eine intraoperative Registrierung noch nicht mit so hoher Zuverlässigkeit möglich sein wie dies für die präoperativen Daten gezeigt werden konnte. Für die Registrierung der Lendensäule hingegen wurde die Vorgehensweise bei der Ultraschall-Datenaufnahme so genau festgelegt, dass die Bestimmung der Knochenoberflächenpunkte ohne Kenntnis der eigentlichen Daten möglich war und eine zuverlässige Registrierung der intraoperativ erhobenen Daten durchgeführt werden konnte.

Diese Arbeit ist im Rahmen des Kompetenzzentrum Medizintechnik Ruhr (KMR) Bochum entstanden und wird gefördert vom BMBF (Az. 13N8079).

Literaturverzeichnis

1. Tonetti, J., Carrat, L., Blendea, S., et al.: Clinical results of percutaneous pelvic surgery. computer assisted surgery using ultrasound compared to standard fluoroscopy. *Comput Aided Surg* **6** (2001) 204–211
2. Ioppolo, J., Kowal, J., Nolte, L.P.: Ultrasonic registration techniques. In: *Procs CAOS*. (2002) 295
3. Muratore, D., Russ, J., Dawant, B., Galloway, R.: Three-dimensional image registration of phantom vertebrae for image-guided surgery: A preliminary study. *Comput Aided Surg* **7** (2002) 342–352
4. Amin, D., Kanade, T., DiGioia, A., Jaramaz, B.: Ultrasound registration of bone surface for surgical navigation. *Comput Aided Surg* **8** (2003) 1–16
5. Brendel, B., Winter, S., Rick, A., et al.: Registration of 3D CT- and ultrasound-datasets of the spine using bone structures. *Comput Aided Surg* **7** (2002) 146–155
6. Winter, S., Brendel, B., Rick, A., et al.: Registration of bone surfaces, extracted from CT-datasets, with 3D-ultrasound. *Biomed Tech* **47** (2002) 57–60
7. Winter, S., Brendel, B., Igel, C.: Registrierung von Knochen in 3D-Ultraschall- und CT-Daten: Vergleich verschiedener Optimierungsverfahren. In: *Procs BVM*. (2005) 345–349
8. Brendel, B., Winter, S., Ermert, H.: In vivo Evaluierung und in vitro Genauigkeitsmessung für einen Algorithmus zur Registrierung von Ultraschall- und CT-Datensätzen. In: *Procs BVM*. (2005) 340–344