

Eine flexible Registrierungsumgebung für die Neurochirurgie

Ralf O. Floca¹, Urs Eisenmann¹, Roland Metzner², Christian Rainer Wirtz²
und Hartmut Dickhaus¹

¹Institut für Medizinische Informatik, Universität Heidelberg /
Fachhochschule Heilbronn, 69120 Heidelberg / 74081 Heilbronn
²Neurochirurgische Klinik, Universität Heidelberg, 69120 Heidelberg
Email: rfloca@stud.fh-heilbronn.de

Zusammenfassung. Die Entwicklung einer flexiblen Registrierungsumgebung für die Neurochirurgie und die bildgebenden Neurowissenschaften ist auf Grund der verschiedenen verwendeten Modalitäten und differenzierter Problemstellungen wünschenswert. Die Registrierungsumgebung soll einfach erweiterbar sein und eine Unterstützung bei der Suche nach geeigneten Parametersätzen für einzelne Matchingverfahren bieten. Außerdem sollen die für eine Problemstellung geeigneten Parameter in einer intuitiven Oberfläche für gleichartige Matchingaufgaben in der klinischen Routine zur Verfügung gestellt werden.

1 Einleitung

Registrierungsverfahren spielen in den bildgebenden Neurowissenschaften und der Neurochirurgie eine wichtige Rolle. Während der Operationsplanungsphase werden fallabhängig Informationsquellen verschiedenster Modalität wie z.B. MRT (Magnetresonanztomographie) und CT (Computertomographie) eingesetzt, deren Registrierung hilft, eine adäquate Operationsstrategie zu entwerfen.

Zur intraoperativen Unterstützung des Chirurgen werden häufig Neuronavigationssysteme eingesetzt. Eines der Hauptprobleme hierbei ist, dass sich die Lage von Gehirnstrukturen durch die Trepanation und die anschließende Resektion verändert. Dieser als Brain Shift bezeichnete Effekt kann es bei größeren Eingriffen notwendig machen, das Navigationssystem mittels intraoperativer Bildgebung neu zu referenzieren. Durch eine Registrierung von prä- und intraoperativen Bilddaten können die präoperativ gewonnenen Planungsdaten der aktuellen OP-Situation angepasst werden. Auch für die postoperative Verlaufskontrolle ist eine effiziente Registrierung notwendig.

Die verschiedenen Einsatzmöglichkeiten ergeben unterschiedliche Anforderungen an Geschwindigkeit, Robustheit und Genauigkeit der Registrierungsverfahren. Deshalb ist es wünschenswert eine flexible Registrierungsumgebung zu schaffen, die auf die Erfordernisse neurochirurgischer Problemstellungen zugeschnitten ist.

2 Stand der Forschung

Während rigide Matcher schon seit längerem als Standardwerkzeug in der klinischen Routine eingesetzt werden, ist das Gebiet der nicht rigiden Matchingansätze, die z.B. auf Konzepten wie FEM [1] oder Dämonen [2] basieren, in ständiger Weiterentwicklung begriffen. Ein Hauptproblem der nicht rigiden Ansätze stellt die hohe Komplexität der Algorithmen dar, was auf aktuellen Einzelplatzrechnern zu Laufzeiten bis zu mehreren Stunden führen kann. Für die intraoperative Anwendung in der Neurochirurgie sind derart hohe Rechenzeiten nicht tolerabel. Die notwendige Reduktion der Bearbeitungszeit kann durch den Einsatz massiv paralleler Systeme [3] oder sinnvolle Einschränkungen des Suchraums erreicht werden.

3 Wesentliche Fortschritte durch den Beitrag

Ein wichtiger Aspekt bei Registrierungsalgorithmen ist die optimale Auswahl der Parametersätze. Da die Anzahl und Semantik der verwendeten Parameter je nach Ansatz variiert, gibt es keine allgemein gültige Strategie für deren Ermittlung. Deshalb ist die strukturierte Evaluierung eines Registrierungsverfahrens mit allen sinnvollen Parameterkombinationen wichtig, um die Genauigkeit, den Zeitaufwand und die Robustheit zu optimieren. An dieser Stelle setzt unser Konzept an. In unserem System ist es möglich, verschiedene Parametersätze oder -bereiche zu definieren, die an Hand beliebiger Bildpaare automatisiert getestet werden. Aus den, im Registrierungsprozess, erstellten Statistiken und Registrierungsprotokollen können Datenverläufe extrahiert werden, die einer anschaulichen Betrachtung dienen. Die für die jeweiligen Fragestellungen gewonnenen optimalen Parameter werden dem Benutzer über eine intuitive Anwenderschnittstelle zur Verfügung gestellt.

Wir nutzen die freie Bibliothek itk (Insight Segmentation and Registration Toolkit) als Basis der Entwicklung. Dadurch steht bereits ein großer Vorrat an Registrierungswerkzeugen zur Verfügung, der aufgrund der Weiterentwicklung von itk in Zukunft noch zunehmen wird. Des weiteren ist es durch die flexible Systemarchitektur möglich, zur Laufzeit neue Matchingverfahren in die Umgebung zu integrieren und ohne großen Aufwand nutzbar zu machen.

4 Methoden

Die Matchingumgebung umfaßt verschiedene Grauwert-basierte Verfahren. Diese wurden gewählt da sie in der Regel, deutlich weniger Nutzerinteraktion erfordern als andere Ansätze, was für die Akzeptanz in der Klinik sehr wichtig ist.

Bei vielen Ansätzen ist die Verfügbarkeit einer flexiblen rigiden Registrierung sehr wichtig, weil sie häufig den vorverarbeitenden Schritt für weitergehende Verfahren bildet oder es Fragestellungen gibt, die hinreichend mit einer schnellen rigiden Registrierung beantwortet werden können. Aus diesem Grund wurden

Abb. 1. Qualitativer Verlauf von MI Mattes und MI Viola. Aufgetragen gegen Iterationszahl

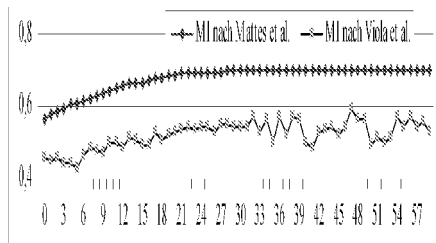
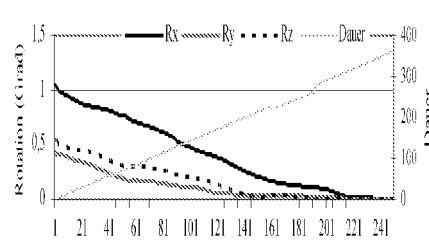


Abb. 2. Gemittelte Abweichung der Rotationswinkel gegenüber dem Endwert der Registrierung. Aufgetragen gegen Iterationszahl



im Kontext der rigiden Registrierung diverse Metriken (Differenz-Metrik, Korrelationsmetrik, Mutual Information (MI) nach Viola und Wells (MI Viola), MI nach Mattes et al. [4] (MI Mattes) betrachtet. Bei den Optimierern wurden zwei Varianten des Gradientenabstiegs, sowie der Downhill-Simplex nach Nelder und Mead, untersucht. In allen Fällen wurde eine mehrstufige Registrierung durchgeführt, bei der ein Bild über mehrere Auflösungsstufen hinweg gematcht wird (coarse to fine).

Es wurde ein einheitliches Transformationsmodell gewählt, welches Translation und Rotation, um einen wählbaren Punkt, erlaubt. Eine Skalierung musste nicht berücksichtigt werden, da die vorliegenden DICOM-Bilder, Informationen über die Voxelgrößen enthalten; wodurch eine automatische Skalierung im Vorfeld erfolgt.

Die Genauigkeit der Verfahren wurde gegenüber 50 synthetischen, zufällig generierten, künstlichen Deformationen und 18 prä-/interoperativen DICOM-Bildpaaren (100-135 Schichten, Auflösung 256x256 Pixel) geprüft. Als Grundlage für die qualitative Bewertung der Registrierung der prä-/interoperativen Bildpaare dienten gemittelte Schätzwerte der Parameter. Grundlage der Mittelung waren alle Testergebnisse, bei denen ein Betrachter keine Fehlregistrierung mehr erkannte. Diese Schätzwerte hatten eine Standardabweichung von $0,42^\circ$ (Rotation) bzw. 0,26 mm (Translation) und eine Standardfehler des Mittelwertes von $0,12^\circ$ bzw. 0,07 mm.

Für eine realitätsnahe Registrierung im intraoperativen Bereich sind nicht rigide Ansätze besser geeignet, da sie realistische Effekte, wie Brain Shift, besser abbilden können. Um dies näher zu betrachten wurde ein Deformationsmodell genutzt, das auf der finiten Elementsimulation (FEM) basiert. Als Vorstufe der nicht rigiden Registrierung wird eine rigide Registrierung durchgeführt.

Die Notwendigkeit einer sinnvollen Transformationsinitialisierung bestätigte sich auch in unseren Untersuchungen. Deshalb wurden bei der Konzeption der Registrierungsumgebung verschiedene Ansätze für die Initialisierung berücksichtigt. Diese reichen von der Möglichkeit der expliziten Einstellung jedes Transformationsparameters bis hin zur Schätzung der Parameter über definierbare

Tabelle 1. Ergebnisse für ausgewählte Registrierungseinstellungen (geschätzte Fehler, Dauer). C: Zentrum der Rotation (in mm); R: Rotation (in Grad); T: Translation (in mm). SD: Standardabweichung; SEM: Standardfehler des Mittelwertes.

Registrierung	C_{SD}	C_{SEM}	T_{SD}	T_{SEM}	R_{SD}	R_{SEM}	Dauer
Var. 1 (Echtdate)	0,221	0,064	0,174	0,05	0,316	0,091	184 sec
Var. 1 (synth.)	0,321	0,042	0,354	0,045	0,009	0,001	56 sec
Var. 2 (Echtdate)	0,332	0,089	0,241	0,064	0,431	0,115	71 sec
Var. 2 (synth.)	0,383	0,055	0,401	0,057	0,058	0,009	53 sec

Referenzpunktpaare und Bildmerkmale (z.B. „Massenzentrum“ der Grauwerte). Ebenso ist eine Kombination dieser Initialisierungsansätze möglich.

5 Ergebnisse

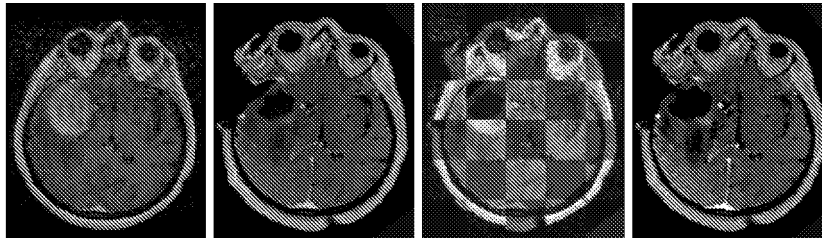
itk wurde von uns durch eine Abstraktionsschicht gekapselt, die eine einheitliche Konfiguration und Erweiterbarkeit des Systems realisiert. Die Abstraktion wird durch ein Controllerkonzept möglich. Hierbei besitzt jede eigenständige algorithmische Komponente der Registrierung einen Controller, der die Anwendungsgebiete, Vorgaben und Einstellungsmöglichkeiten der Komponente definiert.

Zur Betrachtung der rigiden Ansätze wurden für alle relevanten Kombinationen aus Metrik und Optimierer exemplarische Konfigurationen erstellt. Nach Auswahl aller zu verwendenden Bildpaare und Festlegung der gewünschten Ausgaben und Statistiken kann die Testserie im Batchbetrieb automatisiert abgearbeitet werden.

Bei der Betrachtung der erzeugten Ausgaben konnten folgende Feststellungen gemacht werden. Die in itk enthaltenen Differenz- und Korrelationsmetriken stellten sich als zu rechenintensiv heraus. Grund dafür ist vor allem die Einbeziehung aller Voxel des Bildvolumens in die Metrikberechnung. Die MI Viola, zeigte ein deutlich besseres Laufzeitverhalten, was maßgeblich darin begründet ist, dass diese Metrik nur auf eine Stichprobe der Bildpunkte zurückgreifen muss. Jedoch ist der Verlauf der Metrik unruhig (siehe Abb. 1), wodurch der Einsatz einiger Optimierer erschwert und die Robustheit gemindert wird. Als besserer Kompromiss erwies sich die MI Mattes [4]. Der Verlauf ist wesentlich ruhiger (siehe Abb. 1). Das Laufzeitverhalten konnte durch eine geeignete Stichprobengröße optimiert werden. Diese Metrik wurde mit einem Gradientenabstiegs-Optimierer verknüpft.

Zur Optimierung der Parameter wurden verschiedene Schrittgrößen des Optimierers und Stichprobenumfänge der Metrik getestet. Die Laufzeit betrug im Mittel 184 sec. Durch Betrachtung der automatisch generierten Statistiken und der Verlaufgraphen lässt sich weiteres Potential zur Zeitersparnis erkennen, indem die maximale Iterationszahl gesenkt wird, da die Parameterentwicklung im Endbereich über viele Schritte stabil bzw. die Abweichung auf einem akzeptablen Niveau bleibt (Abb. 2). So erhöhte die Limitierung auf 150 Registrierungsschritte den Fehler der Z-Rotation um bis zu $0,03^\circ$, dafür sank die

Abb. 3. Registrierungsergebnisse (1. präoperativ; 2. interoperativ nach rigider Registrierung; 3. Schachbrett-Überlagerung (1,2); 4. FEM als Weiterführung der rigiden Registrierung)



Registrierungsdauer um 149 sec (41%). Als Beispiel für bisher gefundene Registrierungseinstellungen sind 2 Varianten in Tabelle 1 aufgeführt, sowie ein mit Variante 1 gematchtes Bildpaar abgebildet (Abb.3).

Die Evaluierung nicht rigider Verfahren dauert zur Zeit noch an und bedarf weitergehender Optimierung, da die Laufzeiten noch über 30 min liegen. Während der Brain Shift bei entsprechend segmentierten Bildern recht gut erfasst wird, zeigt die Erfassung der Resektionshöhle noch Probleme.

6 Diskussion

Die vorgestellte Matchingumgebung enthält eine Vielzahl von Registrierungsverfahren, die derzeit für diverse Anwendungsszenarien in der Neurochirurgie evaluiert werden. Auf Grund des großen Funktionsumfangs eignet sich Itk gut für die Implementierung, auch wenn das Laufzeitverhalten zum Teil noch unbefriedigend ist.

Im Rahmen der postoperativen Verlaufskontrolle erwiesen sich die rigiden Ansätze als ausreichend. Für die intraoperative Anwendung ist der Einsatz nicht rigider Ansätze nötig, da sie den Brain Shift ausreichend berücksichtigen können. Trotz der Reduktion des Suchraumes und der Definition von Landmarken sind die Matchingzeiten von über 30 Minuten noch zu hoch. Hierauf soll sich die nächste Projektphase konzentrieren.

Literaturverzeichnis

1. Bro-Nielsen M.: Finite element modeling in medical VR. *Journal of the IEEE* 86(3): 490–503, 1998.
2. Thirion J.-P.: Image matching as a diffusion process: an analogy with maxwell's demons. *Medical Image Analysis*, 2(3): 243–260, 1998.
3. Warfield S. K., Ferrant M., Gallez X. et al.: Real-Time Biomechanical Simulation of Volumetric Brain Deformation for Image Guided Neurosurgery. *Proceeding of the IEEE/ACM SC2000 Conference*: 23–39, 2000.
4. Mattes D., Haynor D.R., Vesselle H. et al.: Non-rigid multimodality image registration. *Medical Imaging 2001: Image Processing*: 1609–1620, 2001.