



Technische Universität München

Fakultät für Mathematik

Diplomarbeit

Mathematische Aspekte der nichtlinearen intensitätsbasierten Bildregistrierung

Eingereicht von: Franziska B. M. Bayer

Abgabetermin: 30. März 2007

Aufgabensteller: Dr. Martin Daumer (SLCMSR)
Prof. Dr. Karl-Heinz Hoffmann (TU München)

Betreuer: Prof. Dr. Karl-Heinz Hoffmann
Dr. Christian Lederer (SLCMSR)

1 Einleitung

Der klinische Alltag hat sich in den letzten Jahrhunderten durch technische Weiterentwicklungen stark verändert. Eines der Verfahren, das die moderne Medizin sehr nachhaltig prägte, war die Entwicklung von bildgebenden Verfahren. Mit diesen besteht die Möglichkeit, nichtinvasiv Strukturen im Inneren des Körpers sichtbar zu machen. Damit sind dem Arzt nicht nur die Symptome zugänglich, sondern es sind direkt die Ursachen für ein Krankheitsbild sichtbar, was für die Untersuchung und die Erforschung der betreffenden Krankheit eine große Rolle spielt.

Einen großen Durchbruch erhoffte man sich auch bei dem Einsatz von bildgebenden Verfahren zur Untersuchung und Erforschung von Multipler Sklerose (MS). Multiple Sklerose ist eine entzündliche Erkrankung des Zentralen Nervensystems, bei der bis heute die Auslöser unbekannt sind. Da der Verlauf und die Symptome sehr stark variieren, kann man kaum Aussagen über die weitere Entwicklung des Krankheitsbildes bei einem Patienten treffen. Mit Hilfe der Magnetresonanztomographie, die sich besonders für die Untersuchung von Weichgeweben eignet, lassen sich die Entzündungsherde im Gehirn, die sogenannten Läsionen, sichtbar machen.

Untersuchungen ergaben aber, dass die von den Ärzten aus den Bildern extrahierten Informationen nicht für die Prognose des Krankheitsverlaufs geeignet sind. Eine Hauptursache hierfür ist die große Inter- und Intraobservervariabilität. Untersuchen verschiedene Experten eine Aufnahme, so erhält man sehr unterschiedliche Bewertungen. Selbst bei einer Person fällt die Beurteilung nicht gleich aus, wenn das Bild zu mehreren verschiedenen Zeitpunkten ausgewertet wird. Wegen des großen Arbeitsaufwandes und den großen Datenmengen ist eine Auswertung von Hand auch vom Gesichtspunkt der Praktikabilität im Klinikbetrieb nicht möglich.

Deshalb ist es wichtig, standardisierte, vollautomatische Bildverarbeitungs- und Auswertungsalgorithmen zu schaffen. Um dieses Ziel zu erreichen, wurde 2006 eine internationale Kooperation zwischen verschiedenen Forschungsgruppen ins Leben gerufen. Beteiligt sind Dr. Morrissey und Herr Prima von IRISA, Dr. Wolinsky und Dr. Narayana von der University of Texas. Die Plattform für das Projekt stellt das Sylvia Lawry Centre for Multiple Sclerosis Research. Dieses Forschungszentrum wurde 2001 gegründet, um mit innovativen statistischen Methoden und modernster Informationstechnologie den Prozess der Ursachenforschung bei MS und die Entwicklung neuer Medikamente und Therapien zu beschleunigen. Grundlage dafür bildet die umfassendste MS-Datenbank der Welt.

Ein wichtiger und grundlegender Verarbeitungsschritt für die automatische Auswertung von Magnetresonanztomographieaufnahmen ist die Bildregistrierung. Aufgabe der Bildregistrierung ist es, eine Transformation zu finden, die das zu transformierende Bild auf ein Referenzbild abbildet. Damit erhält man eine Zuordnung zwischen den Pixeln im einen und denen im anderen Bild und damit auch eine Zuordnung der Bildinhalte. Nur aufeinander registrierte

Bilder können automatisch verglichen werden, und nur so können Anomalien im Einzelfall erkannt werden. Auch die statistische Auswertung von MRI-Datenbanken macht nur Sinn, wenn man von registrierten Bildern ausgeht.

Ein weiterer Schritt, der für die automatische Analyse von Bilddaten notwendig ist, ist die Interpretation der Grauwertbilder. Um die in dem Bild enthaltene Information automatisch extrahieren zu können, müssen den Grauwerten im Bild einzelne Gewebetypen zugeordnet werden. Dies geschieht in der Segmentierung. Als Vorwissen gehen dabei Tissue Maps ein, die die Wahrscheinlichkeit angeben, an einem Ort im Gehirn ein bestimmtes Gewebe anzutreffen. Dabei wird zwischen grauer Materie, weißer Materie und der Gehirnflüssigkeit, dem Cerebro-Spinal Fluid (CSF) unterschieden. Um das Potential dieses Vorwissens optimal zu nutzen, müssen die Tissue Maps auf die Anatomie der Patienten angepasst werden. Das führt zum Problem der Registrierung von Tissue Maps.

Vor diesem Hintergrund entstand in Zusammenarbeit mit dem Sylvia Lawry Centre for Multiple Sklerosis Research, Professor Hoffmann von der Technischen Universität München und Dr. Narayana von der University of Houston diese Diplomarbeit. Im Rahmen dieser Arbeit sollen zum einen Verfahren zur nichtlinearen Registrierung von Bildern vorgestellt werden, und zum anderen wird ein Verfahren zur Registrierung von Tissue Maps entwickelt.

Das zweite Kapitel gibt einen Überblick über verschiedene bildgebende Verfahren, wobei speziell auf die Magnetresonanztomographie eingegangen wird. Diese spielt, wie oben bereits erwähnt, eine besondere Rolle im Bezug auf die Untersuchung von Multipler Sklerose. Es werden die verschiedenen Registrierungsmethoden kurz vorgestellt. Die einfachste Art ist die lineare Registrierung. Dabei werden durch Translation, Rotation und Skalierung die Bilder auf Deckung gebracht. Für viele Problemstellungen ist diese Art der Registrierung nicht mehr ausreichend, um eine hinreichende Zuordnung der einzelnen Punkte zu erhalten. Speziell wenn es sich um weiches Gewebe handelt oder verschiedene Patientenbilder aufeinander abgebildet werden, ist es notwendig, mehr Freiheitsgrade in der Transformation zuzulassen. Um dies zu realisieren, geht man zur nichtlinearen Registrierung über. Im Gegensatz zur linearen Registrierung, bei der man aus Translation, Rotation und Skalierung sechs Freiheitsgrade zur Verfügung hat, entspricht bei der nichtlinearen Registrierung die Anzahl der Variablen dem d -fachen der Pixelzahl, wobei d die Raumdimension bezeichnet. Die nichtlineare Registrierung steht im Mittelpunkt dieser Arbeit.

Den Einstieg zum dritten Kapitel bildet ein allgemeines Bildmodell. Schwerpunkt dieses Kapitels ist die mathematische Modellierung der Registrierung. Es werden verschiedene Ähnlichkeitsmaße vorgestellt, die die Güte der Transformation durch Vergleich des transformierten Bildes und des Referenzbildes bewerten. Da bei dem Registrierungsproblem allein durch den Vergleich der Grauwerte nicht sichergestellt werden kann, dass es sich um eine sinnvolle und der intuitiven Vorstellung entsprechende Verschiebung der Grauwerte handelt, werden zusätzliche Anforderungen an das Verschiebungsfeld gestellt. Diese bilden den Regularisierungsterm.

Das so entstandene Optimierungsproblem, das die Unterschiede zwischen dem transformierten und dem Referenzbild minimieren soll, wird in Kapitel 4 mit Hilfe der Variationsrechnung in ein System nichtlinearer partieller Differentialgleichungen überführt.

In Kapitel 5 wird mit Hilfe des Banach'schen Fixpunktsatzes der Beweis der Existenz und Eindeutigkeit der Lösung der partiellen Differentialgleichung erbracht. Dies lässt sich aber nur bei einem stark regularisierten Problem zeigen. Unter schwächeren Annahmen kann mit Hilfe des Fixpunktsatzes von Schauder die Existenz einer Lösung nachgewiesen werden. Praktisch lässt sich aber die Konvergenz gegen das globale Optimum durch Multiskalenansätze, wie sie in Kapitel 8 vorgestellt werden, weitgehend sicherstellen.

Das sechste Kapitel beschäftigt sich mit der Entwicklung von Registrierungsverfahren, die speziell auf das Problem der Registrierung von Tissue Maps angepasst wurden. Ein Set von Tissue Maps gibt neben dem Gewebetyp, was der Grauwertinformation eines normalen Bildes entspricht, auch die Wahrscheinlichkeit an, mit der dieses Gewebe an einem Ort auftritt. Auch für diesen Fall wurde die entsprechende partielle Differentialgleichung hergeleitet und die Existenz und Eindeutigkeit der Lösung nachgewiesen.

Im siebten Kapitel stehen die Eigenschaften des Verschiebungsfeldes im Zentrum. Die Verschiebung ist eine surjektive Abbildung. Damit ist sichergestellt, dass keine Löcher im Bild auftreten können, die die Registrierung unbrauchbar machen. Des Weiteren wird der Zusammenhang zwischen der Regularisierung des Verschiebungsfeldes und der allgemeinen Tikhonov-Regularisierung hergestellt.

Nach der theoretischen Herleitung des Problems beschreibt das achte Kapitel die numerische Lösung. Die partielle Differentialgleichung wird mit Hilfe von Finiten Differenzen diskretisiert. Dies führt auf eine Fixpunktgleichung, die mit dem Gradientenverfahren oder einem Newton-artigen Verfahren gelöst werden kann. Um einen hinreichend guten Startwert zur Verfügung zu haben und große Verschiebungen realisieren zu können, wird ein Multiskalenansatz vorgestellt. Dazu wird das optimale Verschiebungsfeld in einem entsprechenden Bild mit kleiner Pixelzahl berechnet und dieses Verschiebungsfeld als Startvektor für die Registrierung eines Bildes mit höherer Auflösung benutzt. Zum Ende dieses Kapitels werden einige Beispiele kurz vorgestellt.

Die Arbeit endet mit dem neunten Kapitel, in dem eine Zusammenfassung und ein kurzer Ausblick gegeben werden. Die Implementierung wurde im Rahmen dieser Arbeit auf den zweidimensionalen Fall beschränkt. Das Vorgehen lässt sich aber analog auf den dreidimensionalen Fall erweitern. Der Matlab-Quellcode ist auf einer CD beigelegt.