Ein digitaler Gehirnatlas
Evaluation mit funktioneller MRT

K.A. Ganser[1], H. Dickhaus[1], A. Staubert[2], R. Metzner[3],
C.R. Wirtz[2], M.M. Bonsanto[2], V.M. Tronnier[2], S. Kunze[2]

[1]Institut für Medizinische Informatik,
Universität Heidelberg, Fachhochschule Heilbronn
Max-Planck-Straße 39, 74081 Heilbronn
[2]Neurochirurgische Klinik der Universität Heidelberg
[3]Abteilung Radiologische Diagnostik und Therapie, DKFZ Heidelberg
{ganser,dickhaus}@fh-heilbronn.de

Zusammenfassung. Aufgrund der hohen Genauigkeitsanforderungen bei neurochirurgischen Eingriffen ist eine Operationsplanung unerläßlich. Ein Hilfsmittel in der Planungsphase sind Gehirnatlanten, die die Interpretation der präoperativen dreidimensionalen Bilddatensätze der Patienten unterstützen. Um die unbequeme Handhabung von in Buchform vorliegenden Atlanten zu verbessern, haben wir eine digitale Version des etablierten Stereotaxieatlas' von Talairach und Tournoux entwickelt, die gegenüber dem gedruckten Original eine Reihe von Vorzügen aufweist. Z.B. kann das computerisierte Atlassystem kann mit funktionellen MR-Aufnahmen gematcht werden. Anhand dieser Eigenschaft soll die Atlasgenauigkeit im Cortexbereich, speziell am motorischen Gyrus praecentralis, evaluiert werden.

Schlüsselwörter: Gehirnatlas, Atlasmatching, fMRT

1 Einleitung

Neurochirurgische Eingriffe müssen sorgfältig und mit hoher Genauigkeit geplant werden, um einen möglichst schonenden Zugang zu Läsionen zu gewährleisten. Moderne bildgebende Verfahren, insbesondere die Magnetresonanztomographie, unterstützen den Arzt bei der Aufgabe, wichtige Strukturen im Gehirn zu erkennen und im Operationsplan zu berücksichtigen. Allerdings zeichnen sich viele Teile der Gehirnanatomie auch in gutem Bildmaterial oft nur schlecht oder auch gar nicht ab. Um unter diesen Umständen die Orientierung in den Patientenbildern zu verbessern, ziehen Neurochirurgen zur Operationsplanung häufig Gehirnatlanten hinzu. Diese sind üblicherweise nur als gedrucktes Buch verfügbar, wodurch die Anwendung auf Patientendaten mühsam wird und fehlerträchtig sein kann. Die dreidimensionale Vorstellungskraft des Chirurgen ist dabei in höchstem Maße gefordert. Es wäre deshalb von großem Nutzen, die Informationen aus Atlasbüchern während des Planungsvorgangs schnell und präzise auf 3D-MR-Aufnahmen von Patienten übertragen zu können.

2 Der digitale Gehirnatlas

Die Forderung der Neurochirurgen nach einem leicht zu handhabenden Gehirnatlas war der Anlaß, ein computergestützes System zu entwickeln, das es ermöglicht, Darstellungen und Wissen aus einem Atlas auf MR-Bildmaterial abzubilden und dem planenden Arzt in einer integrierten Ansicht aufzubereiten. Unsere Wahl fiel auf den etablierten Stereotaxieatlas von Talairach und Tournoux [1].

2.1 3D-Rekonstruktion

Der gedruckte Talairach-Atlas besteht aus drei orthogonalen Schnittbildstapeln durch ein Gehirn mit Schichtabständen von bis zu 5 mm. Da bei der Operationsplanung jedoch stets auch dreidimensionale Zusammenhänge berücksichtigt werden müssen, haben wir die Strukturen des Atlas', z.B. Kerngebiete und Faserbahnen, aus den zweidimensionalen Schnitten dreidimensional rekonstruiert.

Nachdem die Schnittbilder hochauflösend gescannt und manuell segmentiert und gelabelt wurden, haben wir die räumliche Auflösung senkrecht zur Schnittbildebene durch Interpolation zusätzlicher Schichten wie folgt erhöht: Ist ein Objekt in zwei benachbarten Atlasschnitten enthalten, wird mit einer Tetraederisierung die triangulierte Mantelfläche ermittelt, die die Objektkonturen in beiden Schichten verbindet. Schneidet man diese Mantelfläche auf Höhe des halben Schichtabstands, so erhält man die interpolierte Objektkontur zwischen den Originalschichten.

Die originalen und die interpolierten Schichten bilden übereinandergestapelt ein binäres Voxelvolumen, in dem der Grauwert die Zugehörigkeit eines Voxels zu einem Atlasobjekt oder dem Hintergrund markiert. Die Objekte haben aufgrund der Voxeldiskretisierung eine terrassenartige Oberfläche. Durch eine Glättung mit einem räumlichen Gauß'schen Tiefpaßfilter erzeugen wir ein Grauwertvolumen, aus dem wir mit dem Marching-Cubes-Algorithmus eine glatte, triangulierte Oberfläche der Objekte extrahieren können.

In [2] erläutern wir das beschriebene Verfahren genauer und zeigen Beispielbilder zur Rekonstruktionsqualität.

2.2 Matching des Atlas’ mit MR-Aufnahmen

Der Talairach-Atlas ist in einem proportionalen Koordinatensystem, dem sog. *Proportional Grid*, aufgezeichnet, das sich stückweise linear an individuelle Hirngeometrien anpassen kann. Es ist definiert auf der vorderen und hinteren Commissur (CA und CP) sowie den Abmessungen des Gehirns in alle drei Raumrichtungen.

Unser Atlassystem kann mit MR-Bildern von Patienten gemäß dem Proportional Grid gematcht werden. Der Patientendatensatz wird in drei orthogonalen Schnitten dargestellt, und in diese Szene wird das Proportional Grid als Gittermodell eingeblendet. Der anwendende Arzt bewegt das Gitter solange im Raum durch Translation, Rotation und Verändern der Proportionen, bis die Gitterpunkte mit den entsprechenden Landmarken im Gehirn (CA, CP, maximale Ausdehnung) übereinstimmen. Der MR-Datensatz wird dann rigid in das Koordinatensystem des Atlas' transformiert, und der Atlas wird stückweise affin auf die Abmessungen des vorliegenden Gehirns abgebildet. Der Matchingvorgang wird durch ein bequemes Benutzerinterface unterstützt.

2.3 Darstellung der Atlasinhalte im MR-Datensatz

Nach erfolgtem Matching stellt unser System mehrere Möglichkeiten zur Verfügung, die Informationen aus dem Atlas zusammen mit den Patientendaten darzustellen. In eine 3D-Ansicht, die sich aus frei plazierbaren sagittalen, coronalen und transversalen Schnitten des MR-Datenvolumens aufbaut, können die dreidimensional rekonstruierten Atlasobjekte als Oberflächenmodell eingeblendet werden. Werden die Objekte von den MR-Ebenen geschnitten, kann die Schnittkontur in die Grauwertfläche eingezeichnet werden. Eine weitere Möglichkeit ist, die gescannten Hirnkarten aus dem gedruckten Buch an die jeweilige räumliche Position in die Szene transparent einzufügen. Die genannten Darstellungsoptionen sind alle gleichzeitig verfügbar (Abb. 1).

3 Vergleich des Atlas mit funktionellem MR

Im vergangenen Jahrzehnt wurde die funktionelle Magnetresonanztomographie (fMRT) als Modalität etabliert, mit der Hirnregionen, die an bestimmten cerebralen Aktivierungen beteiligt sind, lokalisiert werden können. Das Verfahren macht sich die unterschiedlichen magnetischen Eigenschaften von sauerstoffhaltigem und sauerstofffreiem Hämoglobin zunutze, die einen sog. "*blood oxygenation level dependent*" (BOLD) Kontrast erzeugen. Durch gezielte Stimulation bzw. durch definierte cerebrale Leistungen können die jeweils verantwortlichen sensorischen bzw. motorischen Hirnregionen abgegrenzt werden.

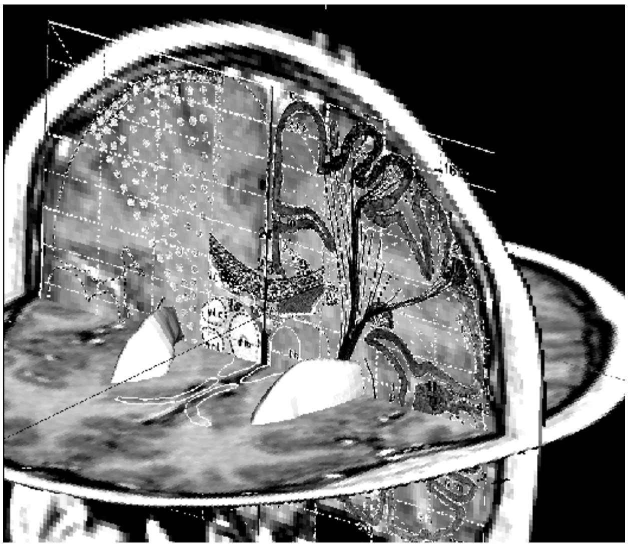

Abbildung 1. Der digitalisierte Atlas wurde mit einem MR-Datensatz gematcht; Das Putamen ist als 3D-Oberflächenmodell, die Seitenventrikel und ein Thalamischer Kern als Schnittkontur eingeblendet. Zusätzlich ist eine coronale Hirnkarte transparent der Szene überlagert.

Im Atlas von Talairach und Tournoux ist die histologische Cortexeinteilung nach Brodmann eingezeichnet. Für einige der Brodmann-Areae ist in der Literatur eine Funktion belegt, so z.B. für den primären Motorcortex, der auf Area 4 anzusiedeln ist [1]. Wir haben funktionelle MR-Aufnahmen mit einer durch Fingertapping erreichten Aktivierung des primären Motorcortex [3] mit unserem Atlassystem gematcht und die Übereinstimmung der Lokalisation des Gyrus präcentralis, auf dem sich dorsal die Area 4 befindet, im fMRT-Bild und im Atlas anhand von elf Patienten untersucht.

3.1 Methodik des Vergleichs

In die gematchten fMRT-Datensätze wurden die transversalen Hirnkarten des Talairachatlas' eingeblendet. In den Atlaskarten *1_2*, *2*, *2_3*, *3* und *3_4* wurde an sechs definierten Stellen die sagittale Distanz des eingezeichneten Motorcortex zum dorsalen Rand des aktivierten Gyrus praecentralis ausgemessen (Abb. 2). Zudem wurde die Möglichkeit, anhand des Atlas' den Sulcus centralis zu identifizieren, mit dem Schlüssel "1" (sehr gute Übereinstimmung Atlas/Patient), "2" (Sulcus kann trotz Abweichungen in Form und Lage gut identifiziert werden), und "3" (Übereinstimmung der Lage und/oder der Form ist schlecht) bewertet (Abb. 3).

3.2 Ergebnisse

Für alle elf Fälle wurden die beschriebenen Abstände gemessen. Wir haben die quadratischen Mittelwerte der Abstände für alle fünf Atlaskarten sowie für alle sechs Meßstellen berechnet und dabei Werte zwischen 4,0 mm und 6,1 mm erhalten. Erwartungsgemäß waren die quadratischen Mittelwerte der distalen Meßstellen leicht größer als die der proximalen. Von 189 erhobenen Abstandswerten waren lediglich 8 (4%) größer als 10 mm. Um Trends, die einen etwaigen systematischen Fehler aufzeigen, aufzufinden, haben wir außerdem die arithmetischen Mittelwerte der Abstände in den fünf Karten sowie den sechs Meßstellen berechnet. Es ergab sich, daß hier alle Kartenmittelwerte negativ waren, d.h., der Atlas befand sich gegenüber den MR-Bildern mit durchschnittlich –1 mm leicht zu weit dorsal. Der Befund, daß die zwei

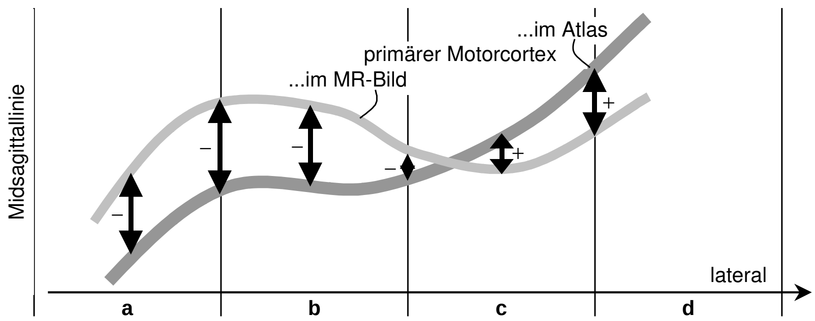

Abbildung 2. Schematische Darstellung einer transversalen Schnittebene, in der die Überlagerung der Motorcortices aus dem gematchten Atlas und aus den fMRT-Daten skizziert ist. Die Buchstaben a bis d entsprechen den lateralen Koordinaten im Proportional Grid. Die sechs mit Doppelpfeilen gekennzeichneten Abstände wurden ausgewertet, sofern der Gyrus praecentralis an der jeweiligen lateralen Koordinate vorlag.

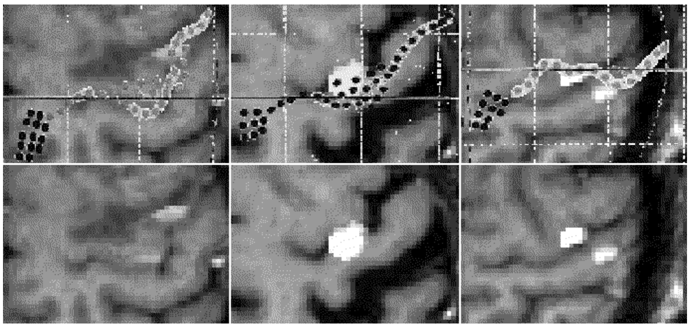

Abbildung 3. Beispiele zur Bewertung der Übereinstimmung des Sulcus centralis zwischen Atlas und Patienten. Links: "**1**", Mitte: "**2**", rechts: "**3**" (siehe Beschreibung im Text). Obere Reihe: transversale MR-Schichten mit überlagertem Motorcortex aus dem Atlas (Punkte); untere Reihe: nur MR-Schichten. Die hellen Bereiche im MR sind aktivierte Zentren der fMRT.

oberen Schichten mit Differenzen von –1,3 mm bzw. –3,1 mm stärker betroffen waren als die übrigen drei (< –0,5 mm) läßt auf ein systematisches Problem beim Matching schließen: Eine ungenaue Identifikation der beiden Commissuren kann eine Rotation um die laterale Achse verursachen, die sich in einer derartigen Verschiebung äußert. Alle Meßpunktmittelwerte streuten ohne Trend um den Wert 0, so daß die Abweichungen als nicht systematisch, sondern lediglich in der unterschiedlichen Anatomie begründet betrachtet werden können.

Die Bewertung der Übereinstimmung des Sulcus centralis ergab, daß in 37 von 51 Schichten (73%) eine gute oder sehr gute Übereinstimmung bestand. In 14 Schichten (27%) wurde die Übereinstimmung als schlecht beurteilt (in 4 Fällen war der Sulcus im MR-Bild durch Tumoren bzw. überlagerte fMRT-Aktivierungen nicht erkennbar).

4 Zusammenfassung und Ausblick

Das Atlassystem ist mit Abweichungen unter 6 mm und mehrheitlich guter Übereinstimmung zwischen Atlas und Patientendaten ein Werkzeug, das auch im Cortexbereich im allgemeinen zufriedenstellend arbeitet. Um das Matching, das aufgrund des einfachen, stückweise affinen Modells nicht in jedem Fall optimale Ergebnisse erzielte, weiter zu verbessern, arbeiten wir an einer vollständig elastischen Modellierung unseres rekonstruierten Atlas'.

5 Literatur

1. Talairach J, Tournoux P: Co-Planar Stereotaxic Atlas of the Human Brain. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 1. Auflage 1988.
2. Dickhaus H, Ganser KA, Staubert A, et al.: Three Dimensional Reconstruction of the Stereotactic Atlas of Talairach and Tournoux for Neurosurgical Planning. Eingereicht für IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, 1999.
3. Schad LR, Wenz F, Knopp MV, et al.: Functional 2D and 3D magnetic resonance imaging of motor cortex stimulation at high spatial resolution using standard 1.5T imager. Magnetic Resonance Imaging 12: 9-15, 1994.