

# Prospektive Kompensation von Kopfbewegungen mit den Gradienten des MR-Tomographen

Christian Dold und Evelyn Firlle

Fraunhofer Institut für Graphische Datenverarbeitung,  
Abteilung Cognitive Computing and Medical Imaging,  
Fraunhoferstraße 5, 64283 Darmstadt  
Email: Christian.dold@igd.fraunhofer.de

**Zusammenfassung.** Enorm wichtig bei der Aufnahme des Kopfes ist die Eliminierung von Artefakten hervorgerufen durch Bewegungen. Einige Navigator Techniken wurden publiziert, um diese Bewegungsartefakte zu eliminieren. Diese verlängern jedoch die Untersuchungszeit, welche notwendig ist, um die Bewegungsinformation zu detektieren und stören die Erregerfrequenzen in ihrem zeitlichen Ablauf bzw. stören den Steady State der magnetischen Anregung. Eine Möglichkeit dies zu umgehen, ist die externe Messung der Bewegung mit einem optischen Trackingsystem. Entsprechend der Bewegungsänderung werden die Gradienten des MRT nachgeführt und somit sämtliche Bewegungsartefakte kompensiert. Eine „Volume to Volume“ Korrektur als auch eine „Slice to Slice“ Korrektur ist möglich. Erste Ergebnisse mit Phantomen und Personen werden näher erläutert.

## 1 Einleitung

Die Eliminierung von Artefakten, hervorgerufen durch Kopfbewegungen, ist entscheidend bei der Kernspintomographie (MRI) des Kopfes und der funktionellen Kernspintomographie (fMRI). Die Korrekturmethode muss sehr zuverlässig sein und darf die Leistung des MRI Tomographen nicht negativ beeinflussen. Bei der Volumenbasierten Korrektur, wie sie momentan in der klinischen Routine eingesetzt wird, ist die Genauigkeit auf etwa 1-3mm begrenzt. Dies ist für eine funktionelle MRI Untersuchung nicht ausreichend. Korrekturalgorithmen, die z.B. in der Software SPM verwendet werden, sind keine ideale Lösung aufgrund der Zeit, die sie in Anspruch nehmen. Komplexe hochaufgelöste Aufnahmen, bei denen die anfallenden Datenmengen sehr groß ist, verdeutlichen dies. Eine Detektion der Kopfbewegung mit einer Genauigkeit um  $100\mu m$  in allen drei Dimensionen bei etwa 10 Aufnahmen pro Sekunde ist notwendig, um eine zuverlässige Korrektur auf Schichtebene (Echo Planar Imaging) vornehmen zu können. Dies kann mit einem Kernspintomographen nur schwer erreicht werden ohne die Leistung des Scanners, die zur schnellen Datenakquisition notwendig ist, zu beeinträchtigen. Die Untersuchung sollte zudem reproduzierbar sein und kurz unterbrochen werden können (z.B. Husten, Niesen des Patienten). Eine ständige Aufnahme der

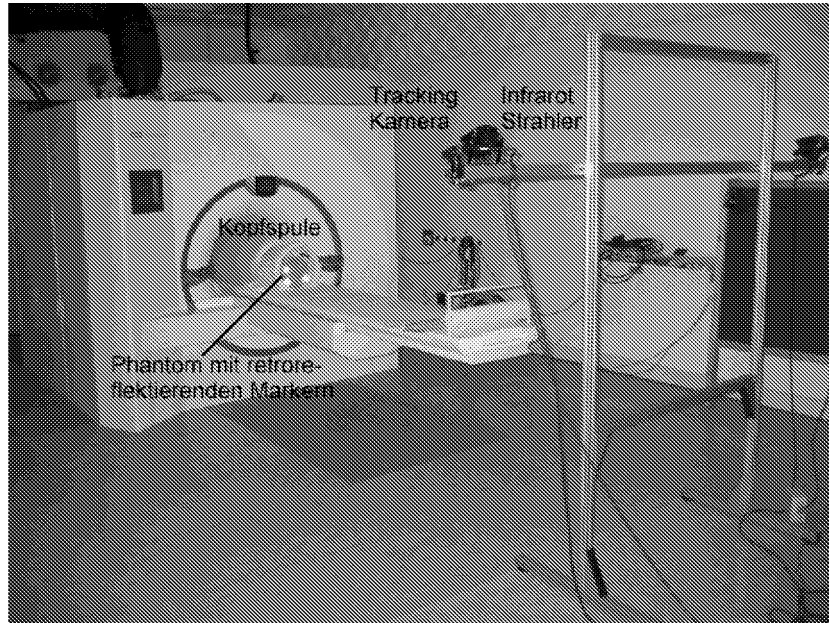
Kopfbewegung ist notwendig, um jede einzelne Schicht zur ersten Schicht ausrichten und korrigieren zu können bzw. bei 3D Sequenzen sogar eine „K-Line to K-Line“ Korrektur vorzunehmen. Diese Ausrichtung muss in das zu untersuchende Zeitfenster passen. Ferner sollte es möglich sein, vorhandene Kernspintomographen zu einem günstigen Preis mit dieser Technik aufzurüsten. Vor allem ältere Menschen, Kinder oder Epilepsie Erkrankte, die meist den Kopf während der Aufnahme bewegen, sollten untersucht werden können.

### 1.1 Bekannte Methoden zur Detektion der Kopfbewegung

Um Kopfbewegungen zu detektieren bzw. die daraus entstandenen Artefakte zu minimieren, gibt es verschiedene Ansätze. So wurden bereits orbitale Navigatoren (ONAV) für den Kopfbereich entwickelt, um in Echtzeit Bewegungen zu erfassen. Mit drei kurzen Gradientenechos kann eine komplette Positionsbestimmung durchgeführt werden [1]. Ihre Stärke liegt in der einfachen Anwendung (Softwareupdate), aber die Auswertung ist in aller Regel nur im zweidimensionalen Fall gültig, da Teile des Messobjektes das Messvolumen verlassen und sich die Fouriertransformierte in Betrag und Phase ändert (Nicht-Lokalität)[4]. Es wurde an Algorithmen gearbeitet, um im k-Raum lineare und Fourier-Interpolationen basierend auf dem Fourier-Shift-Theorem durchzuführen. Diese Algorithmen führten zu verschiedenen Software-Tools [2]. SPM99 zeigt hier im Vergleich der Genauigkeit und Performance die besten Ergebnisse. Zu den modernsten Verfahren gehört heute auch das Kreuzentropieverfahren [3]. Es zeichnet sich jedoch ab, dass diese retrospektiven Korrekturen im k-Raum (Ortsfrequenzraum bei MR) nur bei kleinen Bewegungen vernünftige Ergebnisse liefern und in der klinischen Routine in kein Zeitschema passen. Somit lösten orbitale Navigatoren die Problematik nicht ausreichend da sie die Akquisitionszeit bedingt verlängerten und die Genauigkeit von der Auflösung der benutzten Sequenz abhängt. Bewegungsartefakte werden in fMRI meist nur von Volumen zu Volumen korrigiert. Auch werden mehrere Interpolationsverfahren publiziert [7], alle jedoch mit dem Nachteil eines sehr hohen Rechenaufwandes. Externe Bewegungsdetektion wie, sie auch bei der Positronen Emissions Tomography eingesetzt wird [5], könnte hier eine Lösung darstellen. Mögliche Szenarien werden genauer in [6] beschrieben.

## 2 Verwendete Methoden

Vorgestellt wird eine Bewegungskorrektur die zur vollständigen Kompensation der Bewegungsartefakte führt indem die einzelnen Schichten (bzw. k-Linien) zueinander ausgerichtet werden. Mit einem stereoskopischen Trackingsystem wird die Kopfbewegung mit retroreflektierenden Markern im Infrarotbereich kontinuierlich gemessen. Die Marker sind über ein Mundstück direkt mit dem Kopf verbunden. Bis zu 20 mal pro Sekunde kann die Software des Trackingsystems eine Bewegungsinformation berechnen und an den Kernspintomographen liefern. Für diese Datenübertragung wird das TCP/IP-Protokoll verwendet. Die 6 DOF

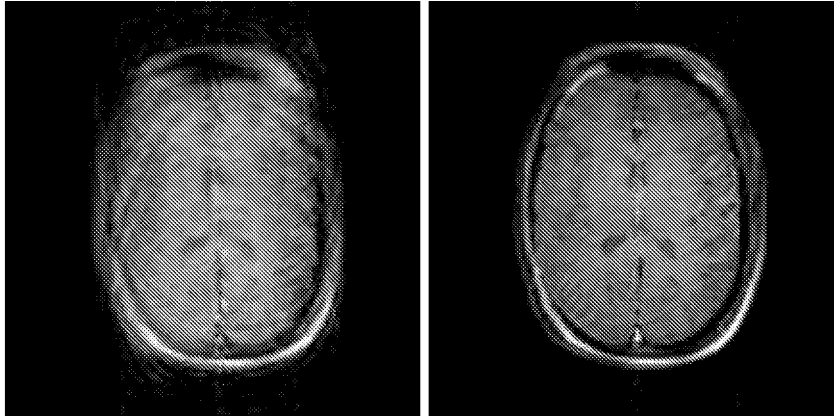
**Abb. 1.** Aufbau des Tracking Systems

(6 degrees of freedom) werden in einem „log file“ gespeichert. Der Bildrekonstruktionsrechner holt sich nun zum aktuellen Zeitpunkt die richtige Position des Objektes ab. Zuvor wurde eine Transformationsmatrix bestimmt um den Ursprung des Koordinatensystem des MR-Tomographen und des Trackingsystems in Deckung zu bringen. Das Koordinatensystem des MR-Tomographen kann anhand der getrackten Daten unter Anpassung der Gradienten nun direkt nachgeführt werden.

### 3 Ergebnisse

Bei ersten Messungen wurde die Kompatibilität der beiden Systeme nachgewiesen. Tests mit einem Phantom zeigten vielversprechende Ergebnisse. Bei einer translatorischen Bewegung während der Akquisition konnte das Koordinatensystem des MRI Tomographen durch Änderung der Gradienten nachgeführt werden und es traten keine Artefakte durch die Bewegung auf. In einer weiteren Messung wurde bei großen Kopfbewegungen korrigierte und unkorrigierte Aufnahmen gegenüber gestellt. Die Amplitude der Bewegungen ist in Abb.3 für jeden Freiheitsgrad zu sehen. Signifikante Verbesserungen der Bildqualität wurden erreicht. Es wurde eine deutliche Zeiteinsparung bei der Datenakquisition erreicht, da auf MRI-Navigatoren gänzlich verzichtet werden konnte. Das zeitaufwendige Regriding, wie bei retrospektiven Korrekturverfahren notwendig,

**Abb. 2.** Spin-Echo Aufnahmen mit starker Kopfbewegung. Links ist die Bewegungskorrektur ausgeschaltet, rechts eingeschaltet. Dementsprechend sind links starke Bewegungsartefakte sichtbar. Eine deutliche Bildverbesserung wurde durch das Nachführen der Gradienten im rechten Bild erreicht. Die verbleibenden Störungen entstehen durch die Zeitverzögerung der aktuellen Implementierung.

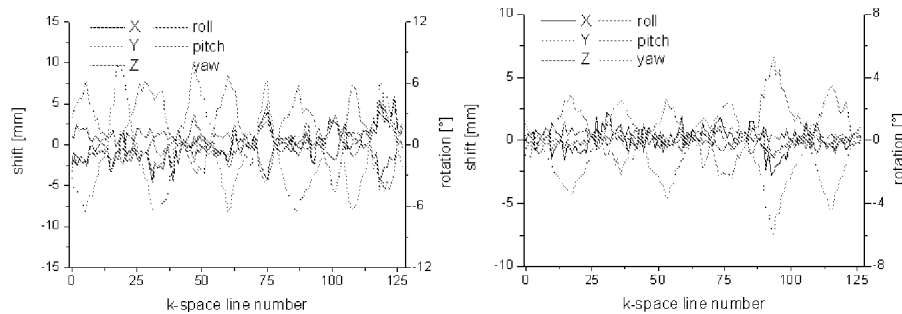


entfällt nun völlig. Eine deutlich bessere Qualität ist nach einer weiteren Verbesserung der Implementierung der Bewegungsdaten zu erwarten, da momentan eine Zeitverzögerung von etwa 30ms durch den Bildrekonstruktionsrechner entsteht.

## 4 Diskussion

Ein völlig neuer Ansatz der Bewegungskorrektur für Kernspintomographie wurde vorgestellt. Durch die steigende Magnetfeldstärke wird die Kompensation von Bewegungsartefakten noch wichtiger aber auch schwieriger, da die Empfindlichkeit des kompletten Systems ansteigt. Durch die hohe Genauigkeit und die schnelle Ermittlung der 6 DOF von bis zu 20 mal pro Sekunde könnten unkooperative Patienten mit Kopfbewegungen untersucht werden. Die vorgestellte Methode ermöglicht eine neue Dimension der Präzision ( $\approx 100\mu m$ ) und Geschwindigkeit beim Ermitteln der 6 DOF, sowie bald die Verfügbarkeit einer prospektiven Bewegungskorrektur ohne Beeinflussung der Performance auf einem Seriengerät. Dies kann die Tür zur breiten Anwendung der fMRI im Patientenbereich öffnen. Die Epilepsie-Chirurgie, die Schizophreniediagnostik sowie die ZNS-Pharmakologie sind hier zu nennen. Eine Volumen zu Volumen als auch eine Schicht zu Schicht Korrektur wurde bereits realisiert. Eine direkte Kompensation der Kopfbewegungen und sämtlicher Bewegungsartefakte waren das Resultat. Neuere, sogenannte 3D-Sequenzen, funktionieren ebenfalls mit dieser Technik. Durch die zeitliche Einsparung bei der Datenakquisition im Vergleich zu ONAV wird es deutlich einfacher ein „Steady State“ bei der Datenakquisition

**Abb. 3.** Zu sehen sind die übergebenen Bewegungsparameter, welche vom Tracking System gemessen wurden. Links die Parameter zum unkorrigierten, rechts zum korrigierten Bild von Abb.2. Die Bewegungsamplituden reichen von 8 mm in Translation und 16 Grad in Rotation.



zu realisieren. Die prospektive Bewegungskorrektur der Daten, Unabhängigkeit vom Fourier-Theorem beim Ermitteln der 6 DOF, Möglichkeit der Validierung bei der Entwicklung neuer ONAV, sowie die Möglichkeit der Registrierung der Datensätze sind die signifikanten Vorteile dieser Methode.

## 5 Danksagung

Die Forschungsarbeit ist Teil des IST (Information Society Technologies) Programms und wird von der EU unter dem Namen **MRI-MARCB** gefördert.

## Literaturverzeichnis

1. H.A.Ward et al.: Prospective Multiaxial Motion Correction for fMRI. Magn Reson Med 43:459–469, 2000.
2. Babak A. Ardekani et al: A quantitative comparison of motion detection algorithms in fMRI. Magn Reson Imag 19: 959–963, 2001.
3. B.Kim et al.: Motion Correction in fMRI via Registration of Individual Slices Into an Anatomical Volume. Magn Reson Med 41:964–972, 1999.
4. Stefan Thesen: Retrospektive und prospektive Verfahren zur bildbasierten Korrektur von Patientenkopfbewegungen bei neurofunktioneller Magnetresonanztomographie in Echtzeit. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2001.
5. Roger R. Fulton et al.: Correction for Head Movements in Positron Emission Tomography Using an Optical Motion-Tracking System. IEEE Trans Nucl Sci 49, 2002.
6. Christian Dold, Evelyn Firl: Aufnahme von Kopfbewegungen in Echtzeit zur Korrektur von Bewegungsartefakten bei fMRI. Proc zu BVM Workshop, 2003.
7. Tong R; Cox RW Rotation of NMR images using the 2D chirp-z transform. Magn Reson Med 1999 Feb;41(2):253–6