



Doctoral Thesis

Spatiotemporal magnetic field monitoring for magnetic resonance systems

Author(s):

Barnet, Christoph

Publication Date:

2008

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005788903> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH no. 17910

**SPATIOTEMPORAL
MAGNETIC FIELD MONITORING
FOR MAGNETIC RESONANCE SYSTEMS**

A dissertation submitted to the

SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY, ZURICH

for the degree of

DOCTOR OF SCIENCES

presented by

CHRISTOPH BARMET

Dipl. Phys. ETH Zurich

born on October 7th, 1977

citizen of Emmen and Eschenbach (LU), Switzerland

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Klaas P. Prüssmann, ETH and University of Zurich, Switzerland

Prof. Dr. Richard Bowtell, The University of Nottingham, UK

Zurich 2008

Summary

In magnetic resonance imaging (MRI), fast imaging sequences enjoy increasing popularity. Such sequences rely on demanding gradient schemes and long readout sections, such as echo planar imaging (EPI) and spiral scanning. Although gradient hardware and calibration have greatly advanced over the past decades, the prescribed dynamic field evolution during such demanding scans is often not perfectly implemented. This hampers many advanced MRI methods, causing image artifacts and data misinterpretation.

The subject thesis explores a novel strategy of addressing this problem. It deviates from conventional approaches in that it does not aim to further improve hardware components and thus to produce dynamic fields with ever higher fidelity. Instead it is proposed to tolerate a certain degree of hardware imperfection and rather to monitor the effective spatiotemporal field evolution during each individual scan. Knowledge of the exact field evolution is then incorporated at the image reconstruction stage.

Implementing this concept requires magnetic field sensors that measure the field evolution with sufficient accuracy and temporal resolution, and which can be operated in a strong baseline magnetic field. Due to its superior sensitivity and tolerance to background fields, nuclear magnetic resonance (NMR) itself was chosen as the sensing mechanism. The design of NMR probes for the described task poses two fundamental challenges. Firstly, signals with sufficient signal-to-noise ratio (SNR) must be obtained from a very small sample on the order of 300 nl. Secondly, the lifetime of these signals must be very long, on the order of 100 ms, to permit the monitoring of long MRI readouts. Consequently

Summary

the magnetization of the NMR sample inside the probe must remain coherent for 100 ms, which in turn imposes stringent requirements on the homogeneity of the static magnetic induction inside the sample. This necessity translates into demanding criteria for the materials and geometry of the probe. In particular, the magnetic susceptibility of certain parts of the probehead must be controlled with great accuracy.

To this end a novel method was developed for measuring the magnetic susceptibility of solid, liquid and gaseous samples. The method relies on MRI and measures susceptibility with a precision of 5 parts per billion (ppb) and an accuracy of 10 ppb (SI units). Measurements performed with this method were used to tune the susceptibility of probehead materials and to achieve highly accurate susceptibility matching of material interfaces. Combined with high-sensitivity receive electronics, this approach yielded NMR probes with suitably high signal and lifetime performance.

With an array of such probes the magnetic field can be measured in a finite set of positions in the bore of an MR system. For using this information in image reconstruction it was necessary to translate these local measurements into a global field model. An analysis of the various magnetic field contributions during an MR scan confirmed that this is possible. In a basic implementation four NMR probes are placed around the imaging object, yielding a first-order spherical-harmonic model of the magnetic field. This model encompasses the temporal dynamics of one homogeneous and three linear spatial field components at a temporal resolution in the microsecond range. The expansion to larger probe arrays and higher-order field models is straightforward.

A first generation of field probes was based on a receive-only design, requiring NMR excitation by an external radiofrequency (RF) transmitter. Using such probes, a series of challenging MRI experiments with EPI and spiral readouts were successfully monitored, enabling robust image reconstruction.

One limitation of the receive-only approach is RF interference between the monitoring and the imaging experiment. RF pulses used to excite MR in the imaging object can perturb the nuclear magnetization in the field probes and vice versa. Furthermore the first-generation NMR probes were prone to signal contamination from large, nearby imaging objects. These issues are especially limiting for in-vivo imaging, which requires maximum flexibility of the experimental design.

In a second generation of field probes this problem was solved by mutually isolating the imaging and monitoring experiments with respect to RF fields. This was achieved by equipping the NMR probes with a thin copper shield that blocks RF fields while being essentially transparent to the lower-frequency fields that are to be monitored. NMR in the shielded probes is excited through a separate RF transmit chain and switching electronics for operation in a transmit/receive mode. To demonstrate the benefits of the advanced setup a variety of in-vivo EPI scans were performed, with image reconstruction based on concurrent field monitoring. These experiments proved the monitoring concept by yielding in-vivo images free of artifacts. In particular the results are free of so-called ghosting, which is typical of EPI with dynamic field imperfections.

Based on the results of this work it is concluded that the complex spatiotemporal evolution of the magnetic field during MRI can indeed be monitored with sufficient sensitivity and speed. It has been demonstrated that imperfections of the field evolution are significantly less critical when they are accurately known and can thus be addressed upon image reconstruction. The described monitoring technology therefore has the potential to facilitate advanced MRI methodology in various ways. It is expected to render established scanning schemes more robust and to enable the use of even more complex magnetic field choreographies. More robust image reconstruction and greater

Summary

geometrical fidelity are also expected to facilitate the fusion of MRI data acquired with different scanning methods. This promise is of particular interest for techniques that require spatial maps of some physical parameter for calibration. Parallel MRI with receiver arrays is an example, requiring RF sensitivity maps of the receiver elements. Correction for static field inhomogeneity also relies on calibration maps, namely of the baseline resonance frequency. Both of these approaches are especially important at high baseline fields, indicating that field monitoring may prove to be an enabling technology for the emerging area of ultra-high-field MRI in humans.

Finally, greater tolerance to field imperfections may help to reduce the complexity and cost of MR hardware engineering and calibration. For example, limitations of gradient systems could potentially be addressed by real-time feedback of monitoring results to the gradient controllers. Combined with monitoring-based image reconstruction, such an approach may enable the use of less complex and expensive gradient coils and amplifiers than are required today.

Zusammenfassung

In der Magnetresonanztomographie (MRT) erfreuen sich schnelle Bildgebungs-Sequenzen wachsender Beliebtheit. Solche Sequenzen beruhen auf anspruchsvollen Gradienten-Abfolgen und langen Auslesezeiten, wie etwa in EPI und Spiral Akquisitionen. Obwohl die Gradientenhardware über die letzten Jahrzehnte grosse Fortschritte erlebte, folgen die dynamischen Felder häufig nicht exakt der vorgeschriebenen Evolution. Dies führt zu Bildartefakten und zur Fehlinterpretation von Daten, so dass die Anwendung vieler fortgeschrittener MRT Methoden eingeschränkt wird.

In der vorliegenden Arbeit wird diesem Problem mit einer neue Strategie begegnet. Anders als konventionelle Lösungsversuche zielt sie nicht auf eine weitere Verbesserung der Hardwarekomponenten ab, welche dynamische Felder mit noch grösserer Genauigkeit generieren. Stattdessen duldet sie Mängel in der Gradientenhardware bis zu einem gewissen Grad, aber überwacht dafür die tatsächliche raumzeitliche Entwicklung der Felder während jeder Akquisition. Das Wissen über die exakte Entwicklung des Feldes kann dann in der Bildrekonstruktion verwertet werden.

Um dieses Konzept umsetzen zu können, werden Magnetfeldsensoren benötigt, welche die Feldentwicklung mit genügender Genauigkeit und zeitlicher Auflösung detektieren. Gleichzeitig müssen sie in einem starken Magnetfeld betrieben werden können. Aufgrund ihrer ausgezeichneten Sensitivität und Verträglichkeit starker Magnetfelder wurde die Nukleare Magnetresonanz (NMR) selbst als Feldmessmethode gewählt. Zwei fundamentale Herausforderungen stellen sich an das Design von NMR

Probenköpfen für die beschriebene Aufgabe. Die erste Schwierigkeit besteht darin, aus einem kleinen Sample – von typischerweise 300 nl Volumen – Signal mit genügendem Signal zu Rausch Verhältnis zu gewinnen. Zweitens muss die Lebensdauer des Signals etwa 100 ms betragen, um lange MRT-Auslesezüge beobachten zu können. Deshalb muss die Magnetisierung im NMR Sample über 100 ms kohärent bleiben, was höchste Ansprüche an die Homogenität des Magnetfeldes in der Probe stellt. Daraus ergeben sich strenge Anforderungen an die Materialien und die Geometrie der Probenköpfe. Im Speziellen muss die magnetische Suszeptibilität gewisser Bauteile des Probenkopfes mit hoher Genauigkeit kontrolliert werden.

Zu diesem Zweck wurde eine Methode zur Messung der magnetischen Suszeptibilität von Festkörpern, Flüssigkeiten und Gasen entwickelt. Diese Methode beruht auf der Magnetresonanztomographie und misst die Suszeptibilität mit einer Präzision von 5 Milliardsteln (ppb) und einer Akkuratessse von 10 ppb (SI Einheiten). Zum Abstimmen der Suszeptibilität von verschiedenen Probenkopfmaterialien und zur genauen Suszeptibilitätsanpassung an Materialgrenzen wurden Messungen mit dieser Methode durchgeführt. Zusammen mit sehr sensibler Empfangselektronik ergeben sich so Probenköpfe mit geeigneter Signalstärke und Lebensdauer.

Mit der Anordnung mehrerer solcher NMR-Probenköpfe an unterschiedlichen Positionen kann das Magnetfeld im Magnetresonanztomographen dynamisch gemessen werden. Um diese Information in der Bildrekonstruktion verwenden zu können, müssen diese lokalen Messungen in ein globales Feldmodell übersetzt werden. Die Analyse der verschiedenen Magnetfeldbeiträge während einer MR-Messung bestätigt, dass dies möglich ist. In einer elementaren Anwendung werden vier Probenköpfe um das Objekt platziert, was den Fit eines sphärisch harmonischen Modells erster Ordnung ermöglicht. Dieses enthält die zeitliche Dynamik einer homogenen und dreier

linearer räumlicher Feldkomponenten in einer Mikrosekunden-Zeitauflösung. Die Messung der raumzeitlichen Feldentwicklung mittels NMR-Proben soll *Monitoring* genannt werden. Das Konzept kann einfach auf mehr Proben und Modelle höherer Ordnung erweitert werden.

Feldproben der ersten Generation basierten auf einem reinen Empfangsspulen-Design, was eine NMR Anregung durch einen externen Radiofrequenz (RF) Sender erfordert. Mit solchen Proben konnte erfolgreich eine Reihe anspruchsvoller Monitoring-Experimente mit EPI und Spiral Auslesezügen durchgeführt werden, was eine stabile Bildrekonstruktion ermöglichte. Eine Einschränkung des reinen Empfangsspulen-Ansatzes ist die RF-Interferenz zwischen Monitoring- und Bildgebungsexperiment. Radiofrequenzpulse zur Anregung des Objektes können die nukleare Magnetisierung in den Feldproben stören und umgekehrt. Zudem sind solche Probenköpfe anfällig auf Signalkontamination seitens grosser Objekte in der Nähe der Probe. Dieser Sachverhalt ist speziell für die in-vivo Bildgebung limitierend, die einen flexiblen experimentellen Aufbau erfordert.

In einer zweiten Generation von Feldproben wurde dieses Problem gelöst, indem Bildgebungs- und Monitoring-Experiment gegenseitig isoliert wurden. Erreicht wurde dies durch eine dünne Kupferbeschichtung der Probenköpfe, welche RF-Felder blockiert. Für Felder tiefer Frequenz hingegen, welche beobachtet werden sollen, ist die Beschichtung im Wesentlichen transparent. Die abgeschirmten Proben werden über eine separate RF-Sendekette angeregt, während die Schaltelektronik zwischen Sende- und Empfangsmodus umstellt. Um die Vorzüge dieses erweiterten Aufbaus zu demonstrieren, wurde eine Reihe von in-vivo EPI-Scans durchgeführt. Die anschliessende Bildrekonstruktion stützte sich auf die simultan akquirierte Feldevolution ab. Artefaktfreie in-vivo Bilder bestätigten das Monitoringkonzept; die Bilder waren

insbesondere frei von sogenannten ‚Ghosting‘ Bildartefakten, welche typisch sind für EPI mit dynamischen Feldstörungen.

Aufgrund der Resultate dieser Arbeit kommen wir zum Schluss, dass der komplexe raumzeitliche Verlauf des Magnetfeldes während eines MR-Scans tatsächlich mit genügender Sensitivität und zeitlicher Auflösung beobachtet werden kann. Es wurde gezeigt, dass Störungen im Feldverlauf signifikant weniger kritisch sind, wenn sie genau bekannt sind und in der Bildrekonstruktion berücksichtigt werden. Die beschriebene Monitoring-technologie hat demnach das Potential, fortgeschrittene MRT-Methoden in verschiedener Weise zu unterstützen. Es ist zu erwarten, dass sie etablierte Aufnahme-Techniken stabiler macht und die Verwendung komplexerer Magnetfeldchoreographien ermöglicht. Robustere Bildrekonstruktion und verbesserte geometrische Konsistenz werden voraussichtlich die Fusion von MRT-Daten erleichtern, welche mit verschiedenen Akquisitions-Strategien aufgenommen wurden. Dies ist von besonderem Interesse für Rekonstruktionstechniken, die zur Kalibrierung die Karte einer physikalischen Grösse benötigen. Die RF Sensitivitäts-Karten der Empfangselemente eines Spulenarrays beispielsweise gehen in die parallele Bildgebung ein. Auch die Korrektur von statischen Feldinhomogenitäten beruht auf einer Kalibrationskarte, nämlich der lokalen, statischen Magnetfeldinhomogenitäten. Diese beiden Ansätze sind speziell wichtig bei hohen Magnetfeldstärken, was darauf hindeutet, dass Monitoring eine technologische Voraussetzung sein wird für das aufkommende Gebiet der Ultrahochfeld MRT am Menschen.

Die erhöhte Toleranz gegenüber Feldstörungen wird es schliesslich erlauben, die Komplexität und die Kosten der Entwicklung und Konstruktion von MR Hardware zu reduzieren. Beispielsweise kann den Ungenauigkeiten des Gradientensystems mit einem Echtzeitfeedback der Monitoringmessung an die Gradientensteuerung begegnet werden. Kombiniert mit monitoring-basierter

Bildrekonstruktion ermöglicht dieser Ansatz wohl die Verwendung einfacherer und günstigerer Gradientenspulen und Gradientenverstärker als sie heute benötigt werden.