

Diss ETH no 17339

# **Accelerating Imaging of Organ Function by Reduced Encoding Magnetic Resonance**

A dissertation submitted to the  
**SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH**  
for the degree of Doctor of Sciences ETH Zürich

presented by **Urs Gamper**, Dipl. Phys. ETH  
born May 9<sup>th</sup>, 1976  
citizen of Winterthur ZH, Switzerland

Zürich 2007      accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. Peter Bösiger, examiner  
Prof. Dr. Gábor Székely, co-examiner  
PD. Dr. Sebastian Kozerke, co-examiner

## Summary

Introduced in the seventies, Magnetic Resonance Imaging (MRI) has experienced a major progress during the past decades. Advances in hardware technology as well as the development of new encoding strategies and reconstruction algorithms permit the acquisition of anatomical images with exquisite details along with the assessment of additional functional parameters.

Among the range of MRI techniques available to map functional parameters Diffusion Tensor Imaging (DTI) has received considerable attention. With DTI the directional properties of water self-diffusion can be assessed. The local properties of diffusion are affected by the orientation of muscle fibers or nerve bundles inducing a preferential direction in the embedding tissue. To this end, measurement of the diffusion tensor allows insights into the structure of the underlying tissue.

Imaging of dynamic objects presents another area of intense research. In dynamic MRI an image volume is repetitively acquired within a short time demanding very efficient data sampling to achieve sufficient spatiotemporal resolution of the object of interest. Dynamic MRI is particularly promising for applications in which periodic or transient signal changes occur as for example in studies of organ motion or blood supply.

Despite the ever increasing performance of MRI, the underlying sequential encoding mechanism remains a fundamental drawback. With the advent of parallel imaging techniques, this problem has partially been addressed. Nevertheless, electrodynamic considerations reveal that imaging speed cannot be increased beyond a factor of three to four for typical 2D imaging experiments. This is particularly obstructive in dynamic imaging, where short acquisition times are crucial to avoid image artifacts due to the motion of the object under investigation. Besides object motion compromising image quality, images of static tissue may also suffer from long sampling durations which amplify image artifacts due to magnetic field inhomogeneities induced by the object inside the main magnetic field. A reduction of the acquisition time is therefore an essential prerequisite to facilitate a number of applications in function encoded MRI.

The aim of the present thesis was to develop MRI methods with reduced acquisition times by reduced encoding schemes. Tailored methods are proposed to address both imaging of static and dynamic objects enabling the assessment of myofiber arrangement in the heart, which is considered fundamental in particular in view of newer treatment approaches for infarcted areas using stem cells or the quantification of liver motion, providing practical estimates for radiation treatment planning.

When imaging static objects, shortening of the acquisition time can be achieved by a reduction of the field-of-view. This method achieves suppression of signal components originating from outside the region-of-interest (ROI) using a dedicated sequence of

radiofrequency pulses. This results in a significant reduction of the total acquisition time since only signal components from tissue inside the ROI have to be spatially encoded. In cardiac imaging, for example, acceleration factors up to five can be achieved without compromising image quality and resolution. Such high reduction factors are implicitly required to enable function encoded MRI like DTI in the beating heart or the spinal cord, where strong magnetic field distortions prohibit long acquisition times. The relatively long duration of such a sequence of radiofrequency pulses does, however, exclude the implementation of these methods for dynamic MRI.

Dynamic MRI requires short acquisition times to allow for imaging with sufficient spatiotemporal sampling of moving structures. The strict requirements regarding acquisition times can be mitigated if the underlying motion is periodic or quasiperiodic and a suitable indication of each individual motion state within the cycle can be derived. An example is cardiac motion, where data acquisition for a single image can be distributed over several cycles of motion. Each individual cycle is identified and gated using a predefined event in the electrocardiogram simultaneously recorded during the measurement.

To adopt the gating principle used in cardiac imaging to respiratory motion, a dedicated MRI sequence was developed which allows extracting gating events based on the image data itself. Using this gating strategy detailed information about respiratory motion induced displacements and distortions in the liver and the lung could be obtained.

When imaging moving objects dynamic portions are typically restricted to certain parts of the image. This implies a high redundancy in the data as static parts of the image are re-acquired in every time frame. Recent video compression techniques exploit this redundancy to convert movies to a more compact data format. However, the adaptation of these methods to the data acquisition process in MRI has so far been restrained by the fact that the dynamics of the object are a priori unknown and therefore redundant data points could not systematically be omitted. Recent research in the area of image recovery from sparse data has, however, indicated that given certain conditions only very little or even no prior knowledge about the object is required for successful image reconstruction. In this thesis this framework was adapted to dynamic MRI to achieve more than six-fold reduction of the acquisition time in flow encoded MRI.

In summary, a set of methods has been proposed allowing significant reductions in acquisition time for DTI and dynamic MRI applications with enhanced image quality. The methods proposed have enabled insights into the microstructure of the heart and spine as well as into the dynamics of liver excursion and deformation. The field of image reconstruction from sparse data without prior knowledge enjoys considerable attentions and will impact a wide range of dynamic imaging applications.

## Zusammenfassung

Seit ihrer Einführung in den siebziger Jahren erfuhr die Magnetresonanzbildgebung (MR Bildgebung) eine enorme Weiterentwicklung. Die technischen Fortschritte der Hardware sowie die Entwicklung neuer Datenaufnahmestrategien und Rekonstruktionsalgorithmen erlauben immer detailreichere anatomische Abbildungen sowie die zusätzliche Bestimmung funktioneller Parameter.

Unter den verschiedenen verfügbaren MR Techniken zur Abbildung funktionaler Parameter ist die Diffusions-Tensor-Bildgebung (engl. Diffusion Tensor Imaging, DTI) von besonderer Bedeutung. Mit DTI kann die Richtungsabhängigkeit der Wasser-Selbstdiffusion untersucht werden. Die lokalen Eigenschaften der Diffusion werden von der Orientierung der Muskel- oder Nervenfaserbündel beeinflusst, welche im umgebenden Gewebe eine Vorzugsrichtung induzieren. Demzufolge kann aus einem gemessenen Diffusionstensor auf die Struktur des zugrunde liegenden Gewebes geschlossen werden.

Bildgebung von dynamischen Objekten bildet ein weiteres Gebiet intensiver Forschung. In der dynamischen MR Bildgebung wird ein Volumen in kurzer zeitlicher Abfolge wiederholt abgebildet was sehr effiziente Methoden zur Datenaufnahme verlangt um genügend hohe zeitliche und örtliche Auflösungen zu erreichen. Dynamische MR Bildgebung wird vor allem bei Anwendungen mit periodischen oder transienten Signalverläufen eingesetzt, beispielsweise in Studien der Organbewegung oder der Blutversorgung.

Trotz der sich ständig verbessernden Leistungsfähigkeit der MR Bildgebung ist die Datenaufnahmerate aufgrund der sequentiellen Informationskodierung noch immer relativ niedrig. Mit der Verfügbarkeit von parallelen Bildgebungstechniken konnte dieser Nachteil teilweise aufgehoben werden. Eine elektrodynamische Betrachtung zeigt jedoch, dass eine Beschleunigung der Aufnahme um mehr als Faktor 3 bis 4 in typischen 2D Experimenten nicht möglich ist. Dies ist insbesondere in der dynamischen Bildgebung hinderlich, welche auf eine kurze Aufnahmezeit angewiesen ist um Bildartefakte aufgrund der Bewegung des zu untersuchenden Objekts zu vermeiden. Aber auch bei statischem Gewebe können durch Unregelmäßigkeiten des Magnetfeldes, welche durch das Objekt induziert werden, Bildstörungen entstehen, welche durch die lange Aufnahmezeit verstärkt werden. Eine Reduktion der Aufnahmezeit ist somit essentiell um bestimmten Anwendungen in der funktionskodierten Bildgebung überhaupt erst zu ermöglichen.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit bestand in der Entwicklung von Methoden zur Reduktion der Aufnahmezeit durch verringerte Informationskodierung. Diese wurden den jeweiligen Anforderungen der dynamischen und der statischen Bildgebung angepasst und erlauben somit eine Untersuchung der Muskelfaserstruktur des Herzens, welche als fundamental in Hinblick auf neuere Behandlungsmethoden für Infarktzone mit Stammzellen angesehen wird oder die

Quantifizierung der Leberbewegung, welche eine Anpassung der Sicherheitsbereiche in der Radiotherapieplanung ermöglicht.

Für statische Aufnahmen kann eine Reduktion der Aufnahmezeit durch eine Verkleinerung des Bildausschnitts erreicht werden. Dabei werden Signalanteile, welche ausserhalb des zu untersuchenden Gebietes (engl. Region of Interest, ROI) liegen, durch eine bestimmte Abfolge von Radiofrequenzpulsen unterdrückt. Dadurch müssen nur die Daten innerhalb der ROI ortskodiert werden, wodurch die Aufnahmezeit erheblich verkürzt werden kann. In der Herzbildgebung beispielsweise werden so Beschleunigungsfaktoren bis zu Faktor fünf erreicht, ohne Einschränkung der Bildqualität oder Verringerung der Auflösung. Erst diese signifikante Verkürzung der Aufnahmezeit ermöglicht eine funktionskodierte Bildgebung wie DTI am schlagenden Herzen oder in der Wirbelsäule, wo starke Feldgradienten eine längere Aufnahmezeit verunmöglichen. Die vergleichsweise lange Dauer dieser Sättigungspulse verhindert jedoch den Einsatz solcher Verfahren in der dynamischen Bildgebung.

In der dynamischen Bildgebung muss die Aufnahmezeit genügend kurz sein, um die Bewegung mit ausreichend hoher Bildrate abtasten zu können. Diese strengen Anforderungen an die Aufnahmezeit können jedoch reduziert werden falls die Bewegung quasiperiodisch ist und ein zusätzliches Signal aufgenommen werden kann, welches den momentanen Zustand innerhalb des Bewegungszyklus beschreibt. Ein Beispiel ist die Herzbewegung, bei welcher die Aufnahme der einzelnen Bilder so auf mehrere Zyklen aufgeteilt werden kann. Mit Hilfe eines Elektrokardiogramms können hier die einzelnen Bewegungszyklen identifiziert und die verschiedenen Bewegungszustände zugeordnet werden.

Um dieses Prinzip, welches hauptsächlich in der Herzbildgebung verwendet wird auch auf die Atembewegung anwenden zu können, wurde eine spezielle MR Sequenz entwickelt aus welcher ein solches Steuersignal direkt aus den Bilddaten abgeleitet werden konnte. Dies erlaubte eine detaillierte Analyse der Atembewegung von grossen Organen wie der Leber oder der Lunge.

Bei bewegten Objekten beschränkt sich die Dynamik häufig auf einen bestimmten Teil des Bildes. Dies führt zu einer hohen Redundanz in den Daten, da die statischen Bildanteile für jeden Zeitschritt wiederholt aufgenommen werden. Moderne Videokompressionsverfahren nutzen diese Tatsache, um Filme in einem kompakteren Format zu speichern. Die Anwendung solcher Prinzipien bei der Datenaufnahme scheiterte bisher jedoch daran, dass die Dynamik des Objekts a priori nicht bekannt ist und deshalb nicht gezielt redundante Datenpunkte weggelassen werden können. Neueste Forschungsergebnisse auf dem Gebiet der Bildrekonstruktion von kompressiblen Datensätzen zeigten jedoch, dass unter gewissen Voraussetzungen nur sehr wenig oder gar kein Vorwissen über das Objekt benötigt wird um eine fehlerfreie Rekonstruktion zu gewährleisten. In dieser Dissertation wurde diese Theorie für die Verwendung in der dynamischen Bildgebung angepasst um eine mehr als 6-fache Reduktion der Aufnahmezeit von flusskodierten Messungen zu erreichen.

Die hier vorgestellten Methoden erlauben eine signifikante Reduktion der Aufnahmezeit und Verbesserung der Bildqualität mit DTI und der dynamischen Bildgebung. Dadurch konnten Einblicke in die Mikrostruktur des Herzens und der Wirbelsäule gewonnen sowie die Dynamik der Leberdeformation erfasst werden. Das Gebiet der Bildrekonstruktion von kompressiblen Datensätzen ohne Vorwissen findet momentan grosse Beachtung und wird eine Vielzahl von Applikationen der dynamischen Bildgebung beeinflussen.