ETH zürich

ETH Library

Tracking and correction of motion in high-field MRI of the brain

Doctoral Thesis

Author(s):
Aranovitch, Alexander

Publication date:
2019

Permanent link:
https://doi.org/https://doi.org/10.3929/ethz-b-000404189

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. 26270

Tracking and correction of motion in high-field MRI of the brain

A thesis submitted to attain the degree of

DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH

(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

Alexander Aranovitch

(M.Sc. TU München)

born on September 16th, 1989

citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Klaas P. Prüssmann

Prof. Dr. Klaus Scheffler

2019

Summary

Magnetic Resonance Imaging (MRI) is an established technique for brain imaging that permits the non-invasive visualization of structures with a variety of contrasts. However, the long acquisition times of MR images increase the susceptibility to rigid-body head motion of the subject. Therefore, head motion is a major confounding factor in the clinical setting where subjects with difficulties to cooperate are regularly scanned, such as children or the elderly and also neurological patients. As a consequence, the diagnostic value is limited, scans need to be repeated and, in severe cases, useful MRI is not possible. Head motion also impedes research applications, particularly those relying on high-resolution imaging as even healthy and cooperative subjects exhibit subtle, involuntary head motion, especially during extended scan durations associated with high-resolution imaging.

To address these issues, a number of motion correction techniques have been developed. Retrospective correction methods seek to correct for motion corrupted data in a processing step, whereas prospective correction methods implement a control loop that adjusts the scan geometry during scan execution based on head tracking data. Prospective motion correction (PMC) is a general strategy to account for occurring rigid-body translation and rotation of the head during MR scans. Specific implementations differ by the way head tracking data is obtained during the scan. To date, the best tracking performance is obtained using dedicated markers attached to the subject's head. The two main categories of marker-based tracking are optical methods that

perform marker tracking with in-bore cameras and methods that localize nuclear magnetic resonance (NMR) markers using the gradient fields of the scanner. Optical methods are capable of motion detection independently of the MR sequence, which is highly convenient. However, they demand a line-of-sight between the camera and the markers which is a limiting factor for head imaging, particularly in the high-field regime where dense receiver arrays tend to obstruct visual access. NMR markers naturally overcome this limitation since they are localized using gradient fields which permeate the receiver array. Their major drawback is the interference with the MR sequence, which typically implies dedicated tracking modules interleaved with the sequence and generally increases the sequence duration. High-frequency sinusoidal gradients superimposed onto the sequence can be used to overcome the issue of sequence prolongation. However, this approach still poses an obstacle to routine use since it still requires sequence manipulation and extensive calibration of gradient dynamics.

A key goal of the present thesis is to overcome the previous limitations of motion detection with NMR markers and drive it towards versatile PMC for routine clinical and research settings.

The approach pursued to overcome the need for sequence alteration is to harvest position information from the gradient dynamics natively present in MRI sequences. To this end, the free induction decays (FIDs) of NMR markers are collected across multiple snippets distributed over one or more TR of the sequence. Joint evaluation of the marker phase time courses extracted from their FIDs results in a well-posed problem for marker localization if sufficiently diverse waveforms are observed on the three axes. This approach was validated for the case of 2D and 3D

gradient recalled echo sequences and demonstrated with phantom and in vivo measurements at 7T. It was found that the suggested approach successfully overcomes the need for sequence alteration and achieves a high tracking precision (~10 µm). The high-resolution sequence along with a finely structured phantom allowed to study also subtle effects of PMC, such as a minute decrease in effective resolution as a consequence of finite tracking precision. In vivo scans were performed with and without instructed motion and very good image quality was obtained for the motion corrected scans even when local tissue displacement amounted to a few millimeters, e.g. in the frontal lobe region.

The second effort to enhance the utility of motion detection with NMR markers is to remove the need for sequence calibration. The position of an NMR marker can be calculated given the knowledge of the gradient fields the marker was exposed to during the acquired FIDs. Changing the sequence parameters will generally affect the gradient waveforms and therefore requires re-calibration. Obviating the calibration step is achieved by adding a set of stationary markers at known positions in the laboratory frame. This set of markers serves to determine the field evolution which allows to calculate the position of head-mounted markers in the laboratory frame. The tracking performance of this approach was evaluated in terms of accuracy and precision and compared to currently employed calibration-based tracking approaches. This method not only significantly enhances the utility of NMR marker tracking by eliminating the calibration step, but the results also testify to an improved tracking performance. It eliminated systematic tracking errors caused by thermal system drift and field variations induced by

varying gradients during scan execution. A tracking precision between 5 and 30 µm is reported. The high sensitivity of field measurement also captures field noise to some degree, which further improves the tracking precision. In vivo PMC with long high-resolution scans was finally carried out to demonstrate the feasibility of motion detection with NMR markers without any sequence calibration.

The present thesis further focusses on the development, validation and demonstration of imaging methodology for the special case of high-resolution T2* weighted imaging at high field. T2* based scans offer rich contrast and are increasingly being used in neuro MRI for the detection and characterization of a range of medical conditions, such as microbleeds or neurodegenerative diseases. Apart from motion problems, such scans suffer from field fluctuations in the imaging volume induced by breathing and shoulder or limb motion, but also as a consequence of hardware imperfections. The issue of field perturbation has been addressed previously using real-time field control that aims at stabilizing the field at a reference baseline by actuating up to third-order shims based on field measurements from an array of NMR sensors around the imaging volume.

Enhancing high-resolution T2* weighted scans was pursued in this thesis by developing simultaneous prospective motion correction and real-time field control, both based on NMR sensors. This approach combined the advantages of prospective correction mechanisms, which include a thorough correction of field and motion artefacts as well as the high sensing bandwidth and precision of NMR sensors needed to adequately sample head motion and breathing induced field dynamics. This work was carried out in two steps. First, the method for joint

operation of these two correction loops was developed and characterized. It was important to consider that the two control loops both manipulate the magnetic fields in the scanner bore and at the same time derive their inputs from these fields. Therefore, a strategy was devised to minimize potential crosstalk between these two approaches that particularly relied on avoiding DC signals for marker localization and optimizing the timing of input measurements for the two loops. The stability of the proposed system was analyzed using controlled inputs and pure noise on either loop to inspect the influence on the respective other loop. Motion detection was virtually unaffected by shim actuation and the impact of rotated gradient waveforms on the field measurements was minute for common rotation angles. For larger angles, moderate field deviations were observed but no backpropagation into motion parameters occurred. Therefore, no compromises in the individual performances of the loops were detected. Phantom and in vivo measurements were performed to study the impact of each correction loop on image quality and to fully assess the impact of dual correction. Moreover, in vivo scenarios with increased field perturbations and motion were studied to demonstrate the ability of dual control to achieve good image quality in particularly challenging scenarios. Consistently improved image quality was observed and the dual correction accounted for complementary effects of field fluctuations and head motion. High image quality was also obtained in the scenarios with increased perturbations.

In a second step, the ability of the suggested dual correction approach to control for head motion and field fluctuations, being two of the most prominent physiological confounds, was utilized for the exploration of

T2* weighted scans with highest image resolution (0.25 x 0.25 x 1 mm^3) and a scan duration of one hour. 2D scans were acquired in all orientations and covered cortical regions, the subcortical brain as well as the brainstem. Depiction of caudal regions with T2* contrast is generally more challenging due to an increased exposure to field fluctuations as a consequence of closer proximity to the sources of perturbation. Dual control resulted in a high image quality of the performed scans. The obtained dataset was examined with respect to the visualization of anatomical details using anatomical atlases. A large variety of anatomical structures was identified including small brain nuclei and tracts, such as the medial longitudinal fasciculus or substructure of the red nucleus as well as subtle features in white and grey matter areas, e.g. the direct visualization of the microstructure of the corpus callosum and observation of distinct laminar contrast variation in cortical grey matter.

Altogether, this thesis contributes to the advancement of motion detection with NMR markers which facilitates their practical use for motion correction in neuro MRI. Also, a method is developed and validated which simultaneously accounts for field perturbations and head motion, rendering high-resolution T2* weighted scans more robust and yielding very promising results in such scans at ultra-high field. The proposed methods help leveraging the potential of high-field MRI.

Zusammenfassung

Die Magnetresonanztomographie (MRT) ist eine etablierte Methode zur nicht-invasiven Schnittbildgebung des Gehirns mit vielen verschiedenen Kontrasten. Allerdings ist diese Methode aufgrund der langen Bildakquisitionsdauer anfällig für Kopfbewegungen des Patienten oder Probanden. Daher gehört die Kopfbewegung zu den entscheidenden Störfaktoren im klinischen Bereich, wo Patienten mit eingeschränkter Kooperationsfähigkeit regelmäßig untersucht werden, wie zum Beispiel Kinder, ältere Menschen oder Menschen mit neurologischen Erkrankungen. Kopfbewegung während des Scans führt zu einer verminderten diagnostischen Qualität des Bildes, zur Wiederholung von Scans und in besonders schwerwiegenden Fällen ist eine sinnvolle MRT-Untersuchung unmöglich. Außerdem spielt die Kopfbewegung auch in fortgeschrittenen Forschungsanwendungen eine Rolle, insbesondere dann, wenn hochauflösende Scans gemacht werden. Denn auch gesunde Probanden mit voller Kooperationsbereitschaft können kleine, unwillkürliche Kopfbewegung während der besonders langen Bildakquisitionsdauer hochaufgelöster Scans nicht vermeiden.

Um diesem Problem zu begegnen, sind verschiedene Methoden zur Bewegungskorrektur entwickelt worden. Retrospektive Korrekturen bedienen sich der Datenverarbeitung, um Bewegungsartefakte zu beseitigen, während prospektive Methoden einen Regelkreis benutzen, um Laufzeitparameter einer MRT-Aufnahme in Echtzeit basierend auf Kopf-Tracking anzupassen. Prospektive Bewegungskorrektur versteht sich als allgemeine Strategie, um auftretende Starrkörperbewegung des

Kopfes in Form von Translation und Rotation zu berücksichtigen. Das beste Kopf-Tracking wird erreicht, indem am Kopf angebrachte Marker getrackt werden. Zu den Hauptkategorien solcher Methoden gehören einerseits optische Verfahren, welche in der Röhre des MRT-Gerätes zu installierende Kameras verwenden, um Marker zu verfolgen und andererseits Verfahren, die auf Kernspinresonanz basierende Sensoren („NMR-Marker“) verwenden, die mithilfe der magnetischen Gradientenfelder des MRT-Gerätes lokalisiert werden. Optische Methoden funktionieren unabhängig von der ausgeführten Bildgebungssequenz, was sehr praktisch ist. Allerdings benötigen sie eine freie Sichtlinie von der Kamera zu den jeweiligen Markern, was bei MRT des Kopfes ein Problem sein kann, besonders wenn die Sichtlinie durch dichte Kopfspulen unterbrochen wird, wie sie häufig im Hochfeldregime eingesetzt werden. NMR-Marker haben dieses Problem nicht, da die Gradientenfelder, die zur Positionsbestimmung verwendet werden, die Kopfspule ungehindert durchdringen. Dass die Bildgebungssequenz zum Zwecke des Trackings angepasst werden muss, ist der große Nachteil dieser Methoden. Typischerweise werden dafür spezielle Module zwischengeschaltet, was die Scandauer verlängert. Dieses Problem wird durch hochfrequente sinusförmige Gradientensignale, welche der Sequenz überlagert werden, gelöst, jedoch stellen sie für die praktische Verwendung ein Problem dar, da Eingriffe in die Sequenz weiterhin nötig sind und sie außerdem einer ausführlichen Kalibration bedürfen.

Ein wesentliches Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Limitationen der Bewegungsdetektion basierend auf NMR-Markern zu beseitigen und

somit deren Eignung zur prospektiven Bewegungskorrektur in der klinischen und wissenschaftlichen Routine zu fördern.

Um Sequenzmodifikationen zum Zwecke des Trackings zu vermeiden, werden dynamische Gradientensignale verwendet, die intrinsisch in MRT-Sequenzen vorhanden sind. Dafür werden die Daten der NMR-Marker über mehrere Schnipsel hinweg verarbeitet, die innerhalb einer oder mehrerer Repetitionszeiten der Sequenz aufgenommen werden. Wenn die Schnipsel während hinreichend verschiedener Gradientendynamik aufgenommen werden, so ergeben sie ein mathematisch wohlgestelltes Problem zur Berechnung der Markerpositionen. Dieser Ansatz wurde mit 2D und 3D Gradientenecho-Scans im Phantom und in-vivo bei 7T demonstriert. Die Ergebnisse zeigten, dass eine äußerst hohe Trackingpräzision (~ 10 µm) auch ohne Sequenzänderungen möglich ist. Ein fein strukturiertes Phantom erlaubte zusammen mit der hochaufgelösten Sequenz auch subtile Effekte von prospektiver Bewegungskorrektur zu untersuchen, wie z.B. eine kleine Verminderung der effektiven Auflösung als Konsequenz endlicher Trackingpräzision. In-vivo ergaben die korrigierten Scans eine verbesserte Bildqualität, sowohl mit als auch ohne instruierter Bewegung. Dies war auch dann der Fall, wenn sich Gewebe lokal um mehrere Millimeter verschoben hat, wie etwa im Frontallappen.

Der zweite Ansatz um Bewegungsdetektion mit NMR-Markern in die praktische Anwendung zu bringen beschäftigte sich mit der Vermeidung der Kalibration zwecks Markertracking. Die Position eines NMR-Markers wird berechnet, wenn bekannt ist, unter welchen Feldern dessen Signal aufgenommen wurde. Änderung der Sequenzparameter führt im Allgemeinen zu einer Änderung der Felder und benötigt daher eine

erneute Kalibration. Indem eine zweite Gruppe von NMR-Markern stationär im Laborbezugssystem platziert wird, kann der Kalibrationsschritt vermieden werden. Dabei werden diese stationären Marker benutzt, um die Felddynamik in Echtzeit zu berechnen, sodass die am Kopf angebrachten Marker lokalisiert werden können. Dieser Ansatz wurde im Hinblick auf Akkuratesse und Präzision des Trackings untersucht und mit kalibrationsbasierten Ansätzen verglichen. Diese Methode erhöht nicht nur die praktische Anwendbarkeit von Markertracking, sondern die Ergebnisse zeigen auch eine klare Verbesserung der Trackingqualität. Systematische Trackingfehler wurden beseitigt, die bei Kalibrationsansätzen aufgrund einer Variation der ausgespielten Gradienten auftraten, wie sie z.B. als Konsequenz der Phasenkodierung oder thermischer Instabilität entstehen. Eine Präzision von 5 bis 30 µm wurde erzielt. Die Experimente deuten darauf hin, dass auch Feldrauschen mithilfe der hohen Sensitivität der Feldmessungen teilweise eingefangen wurde, was die Trackingpräzision leicht verbessert. Die praktische Umsetzbarkeit des vorgeschlagenen Ansatzes wurde in-vivo mithilfe langer hochaufgelöster Scans demonstriert.

Die vorliegende Arbeit fokussiert sich ferner auf die Entwicklung, Validierung und Demonstration einer Methode für hochauflösende T2* gewichtete Bildgebung bei hohen Feldstärken. T2* basierte Scans bieten einen reichen Kontrast und werden zunehmend für MRI des Kopfes zur Detektion und Charakterisierung von z.B. Mikroblutungen oder neurodegenerativen Erkrankungen verwendet. Neben Bewegungsproblemen sind solche Scans auch gegenüber Feldstörungen empfindlich, die aufgrund magnetischer Suszeptibilität

durch Atmung oder Bewegung der Extremitäten entstehen und daher besonders bei hohen Feldstärken relevant sind. Auch Eigenschaften der Hardware können Feldstörungen verursachen. Die Stabilisierung des Feldes im Kopfbereich wurde durch eine kürzlich entwickelte Methode erreicht, die auf Basis von NMR basierten Feldmessungen das Shimsystem steuert, um Feldstörungen im Kopfbereich auszugleichen.

In dieser Arbeit wurde simultane Feld- und Bewegungskorrektur basierend auf NMR-Sensoren entwickelt, um die Bildgebung mit hochauflösenden T2* Scans zu verbessern. Dieser Ansatz vereint die Vorteile einer umfassenden prospektiven Korrektur sowie der hohen Bandbreite und Präzision NMR basierter Messtechnik, die benötigt wird, um Kopfbewegung und durch Atmung verursachte Feldänderungen angemessen zu erfassen. Diese Arbeit wurde in zwei Schritten durchgeführt. Zunächst stand die Entwicklung und Charakterisierung dieses Systems mit zwei Regelkreisen im Vordergrund. Dabei musste beachtet werden, dass beide Regelkreise die Felder im MR-System manipulieren und dabei ihren Input aus eben diesen Feldern beziehen. Daher wurde eine Strategie entwickelt, um potenzielle Einflüsse der Regelkreise aufeinander zu minimieren, welche insbesondere auf der Vermeidung von DC Signalanteilen zur Markerlokalisierung sowie einem optimierten Timing der jeweiligen Inputmessungen beruhte. Die Stabilität des Systems wurde mithilfe kontrollierter Aktuation in beiden Regelkreisen untersucht. Diese Untersuchung ergab, dass Bewegungsdetektion unabhängig von Feldänderungen durch das Shimsystem ist und dass die Rotation der Gradientenfelder auf die Inputmessungen des Regelkreises zur Feldkorrektur für typische Winkel keine Einflüsse hat. Für größere Rotationswinkel wurde ein geringer

Einfluss gemessen, der sich jedoch nicht in die Bewegungsdetektion fortgepflanzt hat und somit der Regelkreis stabil blieb. Die Kombination der beiden Methoden ergab keine Einbußen in der Leistung der einzelnen Methoden. Phantom und in-vivo Messungen wurden durchgeführt, um die Wirkung der Korrekturmechanismen und der dualen Korrektur zu evaluieren. In-vivo wurden auch Szenarien mit erhöhter Bewegung und Feldstörung betrachtet. In allen Szenarien wurden gute Bildergebnisse erzielt und belegten, dass Bewegungs- und Feldkorrektur für komplementäre Effekte korrigieren.

In einem zweiten Schritt wurde das Potenzial dieser dualen Korrektur zum Ausgleich von Bewegungs- und Feldstörungen genutzt, um höchstaufgelöste (0.25 x 0.25 x 1 mm^3) T2* gewichtete Scans mit einer Messdauer von einer Stunde durchzuführen. 2D Scans wurden in allen Orientierungen aufgenommen und deckten kortikale und subkortikale Regionen ab sowie den Hirnstamm. Dabei ist die Abbildung tieferer Hirnregionen mit T2* Kontrast allgemein schwieriger, da dort die Feldänderungen durch Atmung aufgrund der größeren Nähe zum Brustkorb besonders stark sind. Mithilfe der dualen Korrektur wurde eine gute Bildqualität erreicht und anschließend wurden anatomische Strukturen auf den Bildern identifiziert. Viele kleine Nuclei und Trakte wurden dabei identifiziert, wie z.B. der Fasciculus longitudinalis medialis oder die Substruktur des Nucleus ruber. Auch in der weißen und grauen Substanz wurden interessante Strukturen abgebildet, zum Beispiel die Faserstruktur des Corpus callosum oder eine laminare Kontrastmodulation in der kortikalen grauen Materie.

Zusammenfassend hat die vorliegende Arbeit zur Weiterentwicklung von Bewegungsdetektion mit NMR-Markern beigetragen, was deren Einsatz

für Bewegungskorrektur in der MRT des Kopfes in die praktische Anwendbarkeit rückt. Außerdem wurde eine Methode entwickelt und validiert, die gleichzeitig Kopfbewegung und Feldstörungen korrigiert, was die Robustheit von hochaufgelösten T2* gewichteten Scans erhöht und vielversprechende Ergebnisse im Hochfeld liefert. Die entwickelten Methoden helfen das Potenzial der Hochfeld-MRT umzusetzen.