



Doctoral Thesis

Advanced motion correction and image reconstruction for cardiac magnetic resonance

Author(s):

Schmidt, Johannes F.M.

Publication Date:

2013

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010182976> →

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. 21612

Advanced Motion Correction and Image Reconstruction for Cardiac Magnetic Resonance

A thesis submitted to attain the degree of
DOKTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

JOHANNES FRIEDER MATTHIAS SCHMIDT

Diplom-Physiker, Ludwig-Maximilians-Universität München
born on 22.11.1982
citizen of Germany

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Sebastian Kozerke, examiner
Prof. Dr. Klaas Prüssmann, co-examiner
Prof. Dr. Jim Wild, co-examiner

2013

Abstract

Cardiovascular magnetic resonance is a noninvasive imaging tool that provides high-resolution anatomical and functional images without exposure to ionizing radiation. The unique ability to manipulate contrast and encode functional information into the imaging signal allows for a broad range of clinical application to assess morphological and hemodynamic disorders. With coronary artery disease being the leading cause of death in Western societies, the diagnosis of stenosis in coronary arteries and their hemodynamic relevance play an important role in therapeutic decisions. Long scan duration and artifacts from physiological motion, however, are still major obstacles for the transition into clinical practice.

In the present thesis, new technical developments are presented for scan acceleration and artifact removal in whole-heart coronary magnetic resonance angiography, three-dimensional first-pass myocardial perfusion and cine imaging.

In the first study, a retrospective motion correction scheme is proposed for whole-heart coronary scans with interleaved acquisition of motion information. A 3D nonrigid motion model is derived from 2D motion scouts acquired interleaved with the coronary scan without imposing a scan time penalty. Image reconstruction and motion correction were performed simultaneously by inversion of a forward model describing the transformation from the motion-free image to corrupted k-space data. In a study with ten healthy volunteers, the retrospective nonrigid correction scheme allowed for respiratory gate-free acquisition and hence a reduction in scan time by a factor of two compared to the conventional respiratory gating and acquisition at end-expiration.

Three-dimensional first-pass perfusion imaging is often impaired by respiratory motion artifacts. An iterative k-t principal component analysis reconstruction with nonrigid correction of frame-to-frame respiratory motion is proposed in the second part. Motion information was extracted using shape-constrained image registration of the composite of

training and k-t undersampled data. The validity of the approach was tested for 10-fold k-t undersampling using simulation data and in-vivo measurements.

The third study presents a novel reconstruction technique employing nonlinear transform domains for image reconstruction of undersampled k-space data. The nonlinear mapping from the image domain into a high-dimensional feature space is performed implicitly by kernel principal component analysis. Thereby, corrupted data are projected onto the main principal components in the dot product feature space. The principal components are derived from the surrounding of image blocks. Image reconstruction is performed iteratively with interleaved steps for nonlinear projection and gradient updates to ensure consistency with acquired k-space data. The algorithm was evaluated using undersampled simulation data and in vivo two-dimensional cine and three-dimensional whole-heart coronary data and allows for higher acceleration factors compared to standard compressed sensing reconstruction.

In conclusion, the presented methodological improvements described in this thesis allow for scan time efficient compensation of respiratory motion artifacts in relevant cardiovascular imaging applications including 3D coronary and first-pass myocardial perfusion imaging. Dedicated image reconstruction algorithms have been proposed to push further scan acceleration by exploiting data correlations in both linear and nonlinear transform domain.

Zusammenfassung

Die kardiovaskuläre Magnetresonanztomographie ist ein nichtinvasives Bildgebungsverfahren, das hochaufgelöste anatomische und funktionale Bilder liefert, ohne ionisierende Strahlung zu verwenden. Die einzigartige Möglichkeit der Kontrastmanipulation und der Enkodierung funktionaler Informationen in das Bildgebungssignal schafft die Voraussetzung für eine breite Palette klinischer Anwendungen, um morphologische und hämodynamische Funktionsstörungen zu beurteilen. Koronare Herzerkrankungen zählen zu den häufigsten Todesursachen in der westlichen Welt. Entsprechend spielt die Diagnostik von Stenosen in Koronararterien und deren hämodynamische Relevanz eine wichtige Rolle in therapeutischen Entscheidungen. Lange Aufnahmezeiten und Artefakte durch physiologische Bewegung sind jedoch immer noch ein grosser Hinderungsgrund für die Übernahme neuer Aufnahmetechniken in die klinische Praxis.

In der vorliegenden Arbeit werden neue technische Entwicklungen zur beschleunigten Aufnahme und Unterdrückung von Bildartefakten für die koronare Magnetresonanztomographie, die dreidimensionale myokardiale Perfusionsbildgebung und für die zeitlich aufgelöste Bildgebung der Herzbewegung vorgestellt.

In der ersten Studie wird eine Methode zur retrospektiven Bewegungskorrektur bei Ganzherzaufnahmen, wie sie zur Darstellung der Herzkranzgefässe benötigt werden, vorgestellt. Hierbei wird durch eine verschachtelte Aufnahme von 2D Bewegungsinformation ein elastisches 3D Bewegungsmodell zur Bewegungskorrektur erstellt, ohne dabei die Messzeit zu erhöhen. Die Bildrekonstruktion und die Bewegungskorrektur wurden simultan durch die Inversion einer Vorwärtsgleichung durchgeführt, die die Transformation vom bewegungsfreien Bild zu den deformierten k-Raumdaten beschreibt. In einer Studie mit zehn gesunden Probanden ermöglichte das Verfahren eine uneingeschränkte Aufnahme während der Atembewegung und damit eine

Reduktion der Messzeit um den Faktor zwei, verglichen mit konventionellen Aufnahmen im ausgeatmeten Zustand.

In der beschleunigten, dreidimensionalen kontrastmittelverstärkten k-t PCA Perfusionsbildgebung können atmungsbedingte Artefakte die Bildqualität stark stören. Um dieses Problem zu lösen, wird im zweiten Teil der Arbeit eine iterative Rekonstruktionsmethode mit nichttrigider Korrektur der Atembewegung vorgestellt. Die notwendige Bewegungsinformation wird mithilfe einer auf Formen eingeschränkten Bildregistrierung gewonnen. Die Qualität dieses Ansatzes wird anhand von Simulationen und in-vivo Daten für zehnfach beschleunigte Aufnahmen gezeigt.

Die dritte Studie stellt eine neue Bildrekonstruktionsmethode für unterabgetastete Daten unter Verwendung von nichtlinearen Transformationsdomänen vor. Eine nichtlineare Abbildung aus dem Bildraum in einen hochdimensionalen Merkmalsraum wird implizit durch eine Kernel Hauptkomponentenanalyse (kernel PCA) durchgeführt. Dabei werden die unterabgetasteten Daten auf die ersten Hauptkomponenten im Skalarprodukt-Merkmalsraum projiziert, die aus der Umgebung von Bildblöcken hergeleitet werden. Die Bildrekonstruktion wird iterativ durchgeführt mit verschachtelten Schritten für nichtlineare Projektionen und Gradientenaktualisierung, welche die Konsistenz mit den aufgenommenen k-Raum-Daten gewährleisten. Der Algorithmus wurde anhand von simulierten und in-vivo Herzaufnahmen evaluiert. Es konnte gezeigt werden, dass mit dieser Methode höhere Beschleunigungsfaktoren verglichen mit einer Compressed-Sensing-Rekonstruktion möglich sind.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die methodischen Verbesserungen, die in dieser Dissertation beschrieben sind, eine erfolgreiche Korrektur von Bewegungsartefakten für 3D Aufnahmen des gesamten Herzens ermöglichen. Darüber hinaus wurden neue Bildrekonstruktionsalgorithmen entwickelt, die neben linearen auch nichtlineare Korrelationen für beschleunigte Bildaufnahmeverfahren ausnutzen.