

Accelerated Magnetic Resonance Myocardial Perfusion Imaging

Doctoral Thesis

Author(s):

Vitanis, Viton

Publication date:

2011

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-006354782>

Rights / license:

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

Diss. ETH No. 19218

Accelerated Magnetic Resonance Myocardial Perfusion Imaging

A thesis submitted for the degree of

DOCTOR OF SCIENCES

to the

ETH ZURICH

presented by

Viton Vitanis

Dipl. Eng. Aristotle University of Thessaloniki

born February 15, 1982

citizen of Greece

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Peter Boesiger, examiner

Prof. Dr. Sebastian Kozerke, co-examiner

Prof. Dr. René Botnar, co-examiner

Zurich, 2010

ABSTRACT

Ischemic heart disease refers to a discrepancy between oxygen demand and supply which is most often caused by insufficient blood flow to parts of the myocardium. This reduced blood flow is the precursor to acute myocardial infarction (heart attack) and cardiac arrest leading to sudden death. Considering that cardiovascular diseases account for approximately 4.3 million deaths in Europe each year, half of which are coronary disease related, there is a consensus that early diagnosis of ischemia is of great importance.

A method to detect ischemia using Magnetic Resonance Imaging (MRI) is based on the assessment of the first passage of paramagnetic contrast material through the myocardium. Despite having several advantages over methods utilized on other imaging modalities, such as catheter-based angiography or radionuclide imaging, first-pass myocardial perfusion MRI presents a number of challenges. The most important among those is the relatively long duration of the imaging process, related to the fact that MR images are acquired in the Fourier domain, also referred to as k -space. Considering that perfusion imaging requires both high spatial and high temporal resolution as well as large coverage of the heart, one can infer that the acquisition speed is a crucial factor for obtaining diagnostically reliable perfusion information.

In this thesis the application of novel parallel imaging methods to accelerate first-pass perfusion MRI is proposed. Those methods, based on undersampling the k -space over time, reconstruct images of high quality by exploiting the spatial encoding capabilities of receiver coil arrays along with spatiotemporal correlations that are present in dynamic image series of natural objects.

The first reconstruction method proposed here is a modification of k - t SENSE, which aims at increasing acquisition speed ($8\times$ undersampling) without compromising image quality. In k - t SENSE, MR data acquisition performed in parallel by multiple coils is accelerated by sparsely sampling the k -space over time (k - t space). The resulting aliasing is resolved in the reciprocal x - f space by drawing signal distribution information from a low-resolution training data set. A drawback of the method is the temporal filtering observed with increasing acceleration factors. The acquisition of a higher resolution training data set could alleviate this issue, at the expense, however, of acquisition time. The new technique is based on applying parallel imaging on the training data in order to increase their spatial resolution, while keeping the same number of acquired training profiles. Employing two-dimensional (2D) multi-slice imaging at a net acceleration of 5.8 (k - t factor=8, training profiles=11) accurate representations of dynamic signal-intensities were achieved. The efficacy of this approach as well as limitations due to noise amplification were first investigated in computer simulations. A study comprising 20 patients demonstrated further the clinical performance of the technique.

The second reconstruction method, motivated by the necessity for larger myocardial coverage and built upon the k - t Principle Component Analysis (PCA) framework, was designed to accelerate imaging even further ($10\times$ undersampling). k - t PCA is an extension of k - t SENSE and is based on a transformation of the training data from the x - f domain to a coefficient x - pc domain, obtained after applying PCA. The advantage of this technique lies in its efficiency in reconstructing non-periodic dynamic signals. This work proposes a compartment-based k - t PCA reconstruction approach that addresses important issues in perfusion imaging, namely temporal filtering and signal contamination in the septal wall. Those issues are introduced due to partial-volume effects in the low-resolution training data. Using prior knowledge related to the temporal evolution of the contrast bolus passage through different cardiac compartments, voxels that exhibit non-physiological

signal evolution over time are excluded from the calculation of the Principle Components of the training data. This scheme was shown to be more robust than previous methods against temporal filtering and signal contamination and rendered three-dimensional (3D) myocardial perfusion imaging feasible under hyperemic conditions and at high resolution ($2.3 \times 2.3 \text{ mm}^2$).

Finally, it was investigated whether perfusion quantification methods could successfully be employed in conjunction with spatiotemporal reconstruction methods, such as the ones mentioned above. Widespread adoption of perfusion quantification in a clinical setting has been hampered by the complexity of its application: The nonlinear relationship between signal intensity and contrast agent concentration, signal saturation, regional variations in the B_1 and B_0 fields, breathing motion and registration have rendered quantification highly involved and limited its application to relatively low-resolution 2D image series. The effects of spatiotemporal acceleration on perfusion quantification were investigated, its limitations were delineated and finally its feasibility when a particular reconstruction procedure is employed was demonstrated.

In conclusion, the present dissertation promotes the application of accelerated parallel imaging to assess myocardial perfusion. To this end, it is demonstrated that the development and utilization of image reconstruction methods that permit faster acquisitions in 2D and 3D could enhance the diagnostic ability of MRI and consequently contribute to its establishment in the clinics as a reliable modality to assess ischemic heart disease.

ZUSAMMENFASSUNG

Die ischämische Herzkrankheit beruht auf dem Missverhältnis zwischen Sauerstoffbedarf und Sauerstoffangebot, welches oft auf einen verminderten Blutfluss durch Teile des Myokards zurückzuführen ist. Dieser reduzierte Blutfluss ist eine Vorstufe des akuten Myokardinfarktes und des Herzstillstands, welcher einen akuten Herztod zur Folge haben kann. Jährlich sterben in Europa 4.5 Millionen Menschen an kardiovaskulären Erkrankungen, wobei die Hälfte der Fälle aufgrund koronarer Herzerkrankungen zu verzeichnen ist. Deshalb ist die frühzeitige Diagnose einer Ischämie von grosser Bedeutung.

Ein Verfahren zur Ischämiedetektion mittels Magnetresonanz-tomographie (MRT) basiert auf der Bestimmung des "first-pass" eines paramagnetischen Kontrastmittels durch das Myokard. Ungeachtet der zahlreichen Vorteile gegenüber anderen bildgebenden Modalitäten, stellt die first-pass Myokardperfusion-MRT eine Reihe von Herausforderungen. Insbesondere gilt die relativ lange Akquisitionsdauer als problematisch, da diese intrinsisch mit dem MRT-Verfahren verbunden ist, welches Bilder in der Fourier-Domäne, auch k -Raum genannt, kodiert. Zieht man in Betracht, dass die Perfusionsbildgebung sowohl eine hohe örtliche und zeitliche Auflösung als auch eine grosse räumliche Abdeckung erfordert, wird klar, dass die

Akquisitionsgeschwindigkeit ein entscheidender Faktor ist, um Bilder mit hoher diagnostischen Relevanz aufzunehmen.

In der vorliegenden Dissertation werden neue Methoden zur Beschleunigung der first-pass Perfusions-MRT mittels paralleler Bildgebung beschrieben. Diese Verfahren beruhen auf der Unterabtastung des k -Raums über die Zeit und erlauben die Rekonstruktion von Bildern mit hoher Qualität, indem sie das örtliche Kodierpotenzial von Spulenelementen und die in der Bildgebung von natürlichen Objekten bestehenden örtlichen und zeitlichen Korrelationen verwerten.

Die erste hier vorgeschlagene Rekonstruktionsmethode erweitert das k - t SENSE Prinzip und erlaubt eine erhöhte Akquisitionsgeschwindigkeit ($8\times$ Unterabtastung) ohne die Bildqualität zu beeinträchtigen. In k - t SENSE wird die mittels mehrerer Spulen parallel durchgeführte Datenaufnahme durch Unterabtastung des k -Raums über die Zeit (k - t Raum) beschleunigt. Die resultierenden Signalfaltungen werden im reziproken x - f Raum durch die Verwendung zusätzlicher Informationen, welche durch einen niedrig aufgelösten Datensatz gewonnen werden, korrigiert. Ein Nachteil der Methode besteht in der Dämpfung hochfrequenter zeitlicher Signalanteile – ein Effekt, der mit grösseren Unterabtastfaktoren verstärkt wird. Die Aufnahme eines höher aufgelösten Trainingsdatensatzes kann dieses Problem reduzieren, jedoch wird dadurch auch die Messzeit verlängert. Das in dieser Dissertation vorgeschlagene Verfahren beruht auf der Anwendung der parallelen Bildgebung auf den Trainingsdaten. Entsprechend kann damit eine erhöhte räumliche Auflösung erzielt werden, ohne dabei die Anzahl der akquirierten Trainingsprofile zu ändern. Es konnte gezeigt werden, dass das Verfahren die Aufnahme zweidimensionaler (2D) Mehrschichtbilder mit einer Netto-Beschleunigung von 5.8 (k - t factor=8, Trainingsprofile=11) mit hoher Detailtreue der dynamischen Signalanteile ermöglicht. Anhand von Computersimulation wurden die Wirksamkeit dieser Methode sowie Einschränkungen durch Rauschverstärkung untersucht. In einer klinischen Studie in 20 Patienten konnte gezeigt werden, dass die neu entwickelte Methode eine hervorragende diagnostische Qualität liefert.

Eine weitere im Rahmen dieser Dissertation entwickelte Methode erlaubt die dreidimensionale Darstellung der Herzens. Diese auf der k - t Principal Component Analysis (PCA) Technik beruhende Methode erlaubt eine

bisher unerreichte Beschleunigung der Datenaufnahme ($10\times$ Unterabtastung). k - t PCA ist eine Erweiterung von k - t SENSE und verwendet eine Transformation der Trainingsdaten aus der x - f Darstellung in einen Koeffizientenraum, welche als x - pc Raum bezeichnet wird. Dieser Koeffizientenraum wird durch eine Hauptkomponentenanalyse (englisch: Principal Component Analysis, PCA) berechnet. Dieses Verfahren kann insbesondere nicht periodische dynamische Signale sehr effizient kodieren. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Methode erweitert, indem räumliche Kompartimente definiert wurden. Diese reduzieren Signalkontaminationen als Folge von Teilvolumeneffekten vor allem in Bereichen des Septums des Herzens, welche sich als problematisch in der beschleunigten Perfusionsbildgebung herausgestellt haben. Unter Verwendung von Vorwissen, bezogen auf die zeitliche Entwicklung des Kontrastmittelbolus in verschiedenen Bereichen des Myokards, konnten nicht physiologische Signalanteile von der Berechnung der Hauptkomponenten der Trainingsdaten ausgeschlossen werden. Es wurde gezeigt, dass dieses Schema zeitliche Filterung und Signalkontaminierung signifikant reduziert und damit die dreidimensionale Perfusionsbildgebung des Myokards unter hyperaemischen Bedingungen und mit hoher örtlicher Auflösung ($2.3\times 2.3\text{ mm}^2$) ermöglicht.

In einem dritten Schwerpunkt wurde in dieser Dissertation untersucht, ob Methoden zur Quantifizierung der Perfusion in Verbindung mit einer beschleunigten Datenaufnahme, welche auf örtlicher und zeitlicher Unterabtastung basiert, Verwendung finden können. Quantifizierungsmethoden für die Perfusionsbestimmung sind sehr komplex und haben daher bisher keine Verwendung in der klinischen Diagnostik gefunden. Folgende Faktoren spielen in diesem Zusammenhang eine Rolle: das nichtlineare Verhältnis zwischen Signalintensität und Kontrastmittelkonzentration, Signalsättigung, räumliche Variationen der B_1 und B_0 Felder, Atembewegung, sowie die Bilderregistrierung. Entsprechend wurden Quantifizierungsmethoden bisher nur auf relativ niedrig aufgelösten 2D Bildern angewendet. In dieser Arbeit wurden die Effekte der beschleunigten Bildgebung auf die Quantifizierung der Perfusion untersucht, Limitationen bestimmt und schließlich die praktische Anwendung erprobt.