



Doctoral Thesis

Accelerated magnetic resonance velocity encoding for the assessment of hemodynamics

Author(s):

Knobloch, Verena

Publication Date:

2013

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-009987395> →

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. 21271

Accelerated Magnetic Resonance Velocity Encoding for the Assessment of Hemodynamics

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

Verena Knobloch

Dipl.-Ing., TU Darmstadt

born May, 21st 1983

citizen of Germany

accepted on the recommendation of

examiner: Prof. Dr. Sebastian Kozerke

co-examiner: Prof. Dr. Wolfgang Kinzelbach

co-examiner: Prof. Dr. Peter Boesiger

2013

Abstract

Alterations of the hemodynamic status of the cardiovascular system are connected to a variety of pathologies. For example, in certain pathological conditions, laminar blood flow may convert into turbulent flow which is associated with decreased blood transport efficiency and energy loss resulting in higher workload for the heart.

Phase-contrast magnetic resonance imaging (PC-MRI) is a non-invasive method for blood velocity mapping. Four-dimensional (4D) blood flow quantification, the temporally resolved acquisition of velocity vector fields in a three-dimensional volume, offers detailed insights into blood flow pattern. Visualization using pathlines may be used to show trajectories of virtual blood particles. However, long acquisition times associated with 4D PC-MRI still limit the clinical application of the method. Additionally, the accuracy is often limited due to a fixed velocity encoding range resulting in low velocity-to-noise ratios in slow-flow regimes.

In the present thesis, advances of PC-MRI are presented to reduce scan times and increase the sensitivity of the method over a wide range of velocities.

Scan time reduction in dynamic imaging is achieved by skipping the acquisition of k-space lines on a sheared grid over time which is referred to

as k-t domain undersampling. Image reconstruction from the reduced set of information is based on principal components in the sparse x-principal component domain and is termed k-t PCA. In 4D blood flow mapping, at least four velocity encoded images have to be acquired forming an additional dimension for increasing sparsity. In the first part of this thesis it is demonstrated that sparsity in k-t PCA can be increased by employing complex difference transformation in 4D PC-MRI. The method was used to acquire 4D blood flow pattern in the carotid bifurcation. As the method proved to be accurate compared to fully sampled acquisitions, high-resolution velocity vector fields at an isotropic resolution of 0.8 mm could be acquired in a clinically feasible scan time of 6 min revealing detailed information about in vivo flow conditions.

Accelerated image acquisition offers the possibility of obtaining images with different velocity encoding ranges in order to address the limitation of reduced accuracy at low velocities. For combining the different velocity encoded acquisitions, a Bayesian parameter estimation approach has been proposed that allows concurrent velocity and turbulence mapping. In the second part of this work, the method is validated against particle tracking velocimetry. Velocity vector fields and fluctuating velocities were acquired using Bayesian multipoint MR velocity encoding and particle tracking velocimetry in a realistic aortic arch phantom under pulsatile flow conditions. The results of both methods show good agreement for velocity and turbulent kinetic energy mapping.

Intracranial pulsation is caused by arterial blood pulsation in the cranial cavities which results in displacement of cerebrospinal fluid (CSF) and

venous blood. Monitoring of CSF and blood pulsation is essential for the non-invasive estimation of brain tissue properties such as compliance. The velocity of CSF in the spinal canal is one order of magnitude lower compared to arterial blood velocities in adjacent arteries. So far, the acquisition with PC-MRI has been limited to two separate experiments, one with the velocity range optimized to arterial blood velocities and a second one with the encoding velocity range optimized to CSF velocities. In the third part of this work, Bayesian multipoint velocity encoding is presented to map blood and CSF velocities simultaneously. The method holds particular potential for mapping venous blood velocities given their large inter-subject variation.

In conclusion, the methods and findings presented in this thesis constitute a significant step forward in assessing blood velocities and turbulent kinetic energy in clinically reasonable scan time. Additionally, a setup for investigating the cerebral venous drainage system has been proposed for advancing the understanding of intracranial pulsation and its role in pathologies such as dementia, multiple sclerosis or normal pressure hydrocephalus.

Zusammenfassung

Veränderungen der Hämodynamik des kardiovaskulären Systems stehen mit einer Reihe von Erkrankungen in Verbindung. Pathologische Abweichungen können unter anderem dazu führen, dass laminare Blutflussströmungen turbulent werden. Dadurch verringert sich die Transporteffizienz des Blutes und die Arbeitsbelastung des Herzens nimmt zu.

Die Phasen-Kontrast-Magnetresonanzbildgebung (PC-MRI) ist eine nicht-invasive Methode zur Messung von Blutgeschwindigkeiten. Mittels vierdimensionaler (4D) PC-MRI Techniken können zeitlich aufgelöste Aufnahmen von Geschwindigkeitsvektorfeldern in einem dreidimensionalen Volumen erhoben und damit Blutflussmuster rekonstruiert werden. Unter anderem kann die Strombahnvisualisierung verwendet werden, um Bewegungsbahnen von virtuellen Blutpartikeln darzustellen. Die klinische Anwendung der 4D PC-MRI Methode ist jedoch durch ihre lange Messzeit beschränkt. Zudem ist die Messgenauigkeit durch das zugrunde liegende Kodierprinzip begrenzt. Insbesondere ist das Geschwindigkeit-zu-Rausch Verhältnis bei langsamen Fliessgeschwindigkeiten gering, wodurch Messdaten des venösen Blutes oder des Liquor cerebros spinalis ungenau sind.

In der vorliegenden Arbeit werden methodische Weiterentwicklungen präsentiert, die es ermöglichen, die Messzeit des PC-MRI Verfahrens zu redu-

zieren und gleichzeitig die Sensitivität und Genauigkeit insbesondere für kleine Geschwindigkeiten zu steigern.

Eine Messzeitverkürzung wird in der dynamischen Bildgebung durch eine reduzierte Ortskodierung erreicht, indem Datenpunkte im Ortsfrequenz-Zeit-Raum - auch k - t Raum - entlang eines gescherten Gitters abgetastet werden. Für die Bildrekonstruktion der unterabgetasteten Daten werden Hauptkomponenten analysiert und mittels der k - t PCA Methode berechnet. Da in 4D Flussmessungen mindestens vier in der Geschwindigkeit unterschiedlich kodierte Datensätze benötigt werden, ergibt sich eine weitere Datendimension, deren Eigenschaften in der Bildrekonstruktion ausgenutzt werden können. Im ersten Teil dieser Doktorarbeit wird gezeigt, dass die Daten von 4D Flussmessungen durch komplexe Differenztransformation entlang der Geschwindigkeitskodierdimension vereinfacht werden können. Es wird gezeigt, dass diese Methode eine genaue Abbildung von Blutflussmustern in der Karotidenbifurkation erlaubt. Darüber hinaus ermöglicht das Verfahren die Aufnahme hochaufgelöster Geschwindigkeitsvektorfelder mit einer isotropen Auflösung von 0.8 mm in einer für den klinischen Einsatz akzeptablen Scannzeit von 6 Minuten. Damit können detaillierte Informationen zu Flussverhältnissen gewonnen werden.

Die beschleunigte Bilderfassung ermöglicht durch die Messzeitverkürzung auch die Aufnahme von mehreren Datensätzen mit unterschiedlicher Geschwindigkeitskodierung. Dadurch kann das Problem der reduzierten Präzision bei niedrigen Geschwindigkeiten angegangen werden. Um die Daten mit unterschiedlicher Geschwindigkeitskodierung zu kombinieren, wurde ein auf dem Bayestheorem basierender Ansatz zur Parameterabschätzung

vorgeschlagen. Dadurch wird ebenfalls eine simultane Bestimmung von Geschwindigkeiten und Turbulenzparametern ermöglicht. Im zweiten Teil der vorliegenden Arbeit wird diese Methode gegen Geschwindigkeitsmessungen mittels optischem Partikeltracking validiert, welche als Referenzmethode fungiert. Die mittels PC-MRI bestimmten Geschwindigkeitsvektorfelder und fluktuierende Geschwindigkeiten zeigen eine gute Übereinstimmung mit Daten, die mit der Partikeltrackinggeschwindigkeitsmessung in einem realistischen Aortenphantom unter pulsatilen Flussbedingungen gemessen wurden.

Intrakraniale Gewebepulsion wird durch arterielle Pulsation in kranialen Kavitäten hervorgerufen. Entsprechend sind Gewebeverschiebungen durch zeitliche Veränderungen des Flusses des venösen Blutes und des Liquor cerebrospinalis (CSF) bedingt. Eine Überwachung von CSF und Blutpulsation ist erforderlich, um Gehirngewebeeigenschaften wie die elastische Nachgiebigkeit nicht-invasiv bestimmen zu können. Geschwindigkeiten des CSF im Spinalkanal sind um eine Größenordnung niedriger als Blutgeschwindigkeiten in benachbarten Arterien. Dadurch waren bisher Aufnahmen nur in zwei separaten Messungen möglich. In einer Messung wurde die Geschwindigkeitskodierung für arteriellen Blutfluss optimiert, während in der zweiten eine optimale Geschwindigkeitskodierung für die CSF Messung gewählt wurde. Im dritten Teil dieser Arbeit wird das Bayes-MR-Geschwindigkeitskodierverfahren verwendet, um CSF und Blutgeschwindigkeiten gleichzeitig zu erfassen. Insbesondere wird gezeigt, dass die Methode Potential hat, venöse Blutgeschwindigkeiten mit hinreichend hoher

Genauigkeit zu messen, um Varianzen zwischen Individuen nachweisen zu können.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die hier vorgestellten Methoden und Resultate einen wichtigen Beitrag für eine genauere Aufnahme von Blutgeschwindigkeiten und Parametern des turbulenten Flusses in klinisch praktikabler Messzeit ermöglichen. Darüber hinaus können mit Hilfe der Methodik venöse Abflüssen des Gehirns zeitlich aufgelöst und im Detail untersucht werden, welche das Verständnis von intrakranialer Pulsation erweitern, insbesondere im Zusammenhang mit Pathologien wie zum Beispiel Demenz, Multiple Sklerose und Normaldruckhydrozephalus.