



Doctoral Thesis

Data Assimilation in Computational Hemodynamics

Author(s):

Koltukluoglu, Taha Sabri

Publication Date:

2019

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-b-000333691> →

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. 25841

Data Assimilation in Computational Hemodynamics

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

presented by

TAHA SABRİ KOLTUKLUOĞLU

Dipl.-Inf. Univ., Technische Universität München

born on 12.07.1984

citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Ralf Hiptmair, examiner

Prof. Dr. Patrick Jenny, co-examiner

Prof. Dr. Cristóbal Bertoglio, co-examiner

2019

Abstract

Analysis of hemodynamics shows great potential to provide indications for the risk of cardiac malformations and is essential for diagnostic purposes in clinical applications. Although medical imaging techniques such as phase-contrast magnetic resonance imaging (also known as 4D flow MRI) deliver useful information about the flow patterns in the lumen of large arteries, they cannot provide sufficient information at near-wall regions especially due to the noise in the observed signals, coarse resolution and partial volume effects.

As an alternative providing noise-free solution, computational fluid dynamics (CFD) has been established as a valuable tool for the detailed characterization of volumetric blood flow and its effects on the arterial wall. However, CFD requires awareness of boundary conditions and initial flow, which is usually not known beforehand. Besides, the flow is heavily influenced by the dynamic nature of the heart beat, which results in unsteady and periodic flow phenomena. This work aims to combine the superiority of CFD with the advantages of 4D flow MRI by introducing a novel approach for variational data assimilation and at the same time taking into account the dynamic nature of the heart beat.

Phase-contrast MRI is utilized for the prescription of the initial flow and boundary conditions. Due to the noisy nature of these observations, the velocity components are controlled at the boundaries through a mathematical optimization of flow patterns at the inlets. The adjustment is supported by the more reliable flow measurements in the middle of the lumen, where a least-squares flow-matching is considered. The norm of the control and the control surface gradient are augmented by Tikhonov regularization terms, which result (along with the flow-matching term) in the final objective function.

The minimization is performed under the constraint that the Navier-Stokes equations are satisfied. In addition, the time-periodic heart beat is captured by a set of harmonically balanced equations. The latter is achieved by a temporal discretization using a Fourier-spectral collocation approach, where the collocation points are aligned with 4D flow MRI measurements. Compared to the raw measurements, the proposed approach significantly improves the reconstructed flow field at the aortic root, which is one of the most important clinically relevant locations where flow disturbances can easily lead to pathological modifications of the arterial wall. Thus the new method has a great potential for revealing clinically relevant hemodynamic phenomena.

Zusammenfassung

Die Untersuchung der Hämodynamik könnte wichtige Hinweise über das Risiko des Entstehens von Herzfehlbildungen liefern. Gleichzeitig spielt es für diagnostische Zwecke eine wesentliche Rolle in klinischen Anwendungen. Medizinische Bildgebungstechniken wie die Phasenkontrast-Kernspintomographie (auch bekannt als 4D-Fluss-MRI) liefern nützliche Informationen über die Flussmuster im Lumen der Hauptschlagader. Aufgrund des Rauschens der beobachteten Signale, der groben Auflösung und der Teilvolumeneffekte, können die Bildgebungsverfahren jedoch keine ausreichende Informationen in wandnahen Bereichen bereitstellen.

Als Alternative für eine geräuschfreie Lösung hat sich die numerische Strömungsmechanik (englisch Computational Fluid Dynamics, CFD) als eine wertvolle Technik etabliert, die für die detaillierte Charakterisierung des volumetrischen Blutflusses und seiner Auswirkungen auf die Arterienwand eine wichtige Rolle spielt. Jedoch erfordert CFD das Wissen über die Randbedingungen und des anfänglichen Volumenstroms, die in den meisten Fällen nicht vorhanden sind. Desweiteren wird der Fluss stark durch die dynamische Natur des Herzschlags beeinflusst, was zu instationären und periodischen Flussphänomenen führt. Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, die Überlegenheit von CFD mit den Vorteilen der 4D-Fluss-MRT zu kombinieren, indem ein neuer Ansatz für die Anpassung von Variationsdaten vorgestellt und gleichzeitig die dynamische Natur des Herzschlags berücksichtigt wird.

Die Phasenkontrast-Kernspintomographie Bilder werden verwendet um die Anfangsströmung und die Randbedingungen vorzuschreiben. Aufgrund dessen, dass diese Beobachtungen verrauscht sind, werden die Geschwindigkeitskomponenten an den Einlässen so angepasst, dass die Strömungsmuster gesteuert und mathematisch optimiert werden. Die Assimilierung wird durch zuverlässigere Flussmessungen in der Mitte des Lumens unterstützt, wobei eine Flussanpassung unter der Berücksichtigung der kleinsten Quadrate angestrebt wird. Die Norm der Kontrolle und der Kontrolloberflächengradient werden durch Tikhonov-Regularisierungsterme ergänzt, welche (zusammen mit dem Flussanpassungsterm) die endgültige Zielfunktion liefern.

Die Minimierung wird unter der Nebenbedingung durchgeführt, dass die Navier-Stokes-Gleichungen erfüllt sind. Zusätzlich wird der zeitlich-periodische Herzschlag von einer Reihe harmonisch ausgeglichener Gleichungen erfasst. Letzteres wird durch eine zeitliche Diskretisierung unter Verwendung eines Fourier-Spektral-Kollokationsansatzes erreicht, bei dem die Kollokationspunkte mit 4D-Fluss-MRI-Messungen registriert sind. Verglichen mit den Rohmessungen, wird durch den vorgeschlagenen Ansatz eine erhebliche Verbesserung des rekonstruierten Flussfeldes an der Aortenwurzel erreicht. Dies ist einer der wichtigsten klinisch

relevanten Stellen, an denen Flusstörungen leicht zu pathologischen Veränderungen der Arterienwand führen können. Somit bietet die neue Methode ein mächtiges Potenzial, um klinisch relevante hämodynamische Phänomene aufzudecken.