



Doctoral Thesis

Enhancing medical images with high quality blood flow information

Author(s):

Puckridge McGregor, Robert Hugh

Publication Date:

2010

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-006166961> →

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. 18994

Enhancing Medical Images with High Quality Blood Flow Information

A dissertation submitted to
ETH ZURICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by
ROBERT HUGH PUCKRIDGE M^cGREGOR
Dipl. Ing. Masch. ETH
born January 31st, 1980
citizen of Switzerland

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Gábor Székely, examiner
Dr. Dominik Szczerba, co-examiner
Dr. M.D. Marc Thiriet, co-examiner

2010

Abstract

Cardiovascular diseases such as atherosclerosis and aneurysms are the leading cause of mortality in developed countries. Their pathogenesis and development are complex and multifactorial, depending on a variety of biochemical and biomechanical factors and are still not completely understood. Local haemodynamics are increasingly recognised as a key component to the disease initiation process and yet there is a lack of efficient tools for imaging such processes in-vivo, leading to a gap in diagnostic capabilities and limited research possibilities. The traditional way of obtaining detailed patient-specific flow information is to use computational fluid dynamics based on geometries and boundary conditions acquired via medical imaging modalities. However, this approach has several major drawbacks: most importantly it requires long runtimes, making it impractical in the clinical environment and it also uses only very little of the available measurement data. The objective of this thesis is to investigate the enhancement of medical images with high-quality blood flow information and to propose a novel, clinically applicable approach.

The contributions of this thesis are severalfold. Preliminary work concentrates on several aspects of computational blood flow simulations, with the objective of improving their application to patient-specific blood flow modelling. An efficient surface mesh generation algorithm is proposed, which significantly increases the quality of surface representations as generated from medical imaging volumes. Much attention is focussed on flow simulation tools and novel implementations of a finite volume and a finite element solver are introduced and compared one to another, providing insights into design decisions for patient-specific biomedical flow simulations. A further contribution is a fluid structure interaction simulation which studies the difference in biomechanical forces exerted on a healthy and an aneurysmal abdominal aortic bifurcation. In this

context, the existence of a snowball effect is demonstrated, whereby the pathological worsening factors are shown to be self-encouraging, leading to an exponential behaviour of aneurysm development. Research is further concentrated on creating an original flow measurement enhancement method, using a database of precomputed simulations and principal component analysis to interpolate a patient-specific flow field based on a sparse velocity measurement such as might be acquired using PC-MRI. Initial tests using a synthetic $2D$ example set of flow fields are presented, and these are shown to produce encouraging results. A full $3D$ evaluation is also performed, using a large, representative database of synthetic geometries and the method is shown to provide secondary flow quantity estimations closely matching the ground truth. In order to further test the method on patient-specific $3D$ datasets, a dedicated mesh generation algorithm and a coordinate mapping procedure are proposed, which enable the future building of large databases of corresponding flow simulation data.

Zusammenfassung

Herz-Kreislauf-Erkrankungen wie Arteriosklerose und Aneurysmen gehören zu den führenden Todesursachen in entwickelten Ländern. Ihre Entstehung und Entwicklung sind komplex und abhängig von einer Vielzahl von biochemischen und biomechanischen Faktoren und sind noch nicht vollständig verstanden. Die wichtige Rolle der lokalen hämodynamischen Bedingungen bei der Entstehung solcher Krankheiten wird zunehmend anerkannt. Dennoch gibt es weiterhin einen Mangel an effizienten Werkzeugen um solche Vorgänge im lebenden Organismus zu messen. Dies führt zu einer Lücke in den diagnostischen Fähigkeiten und beschränkt die Forschungsmöglichkeiten. Der traditionelle Weg um detaillierte Patientenspezifische Flussinformationen zu erhalten, ist die Durchführung von numerischen Blutfluss-Simulationen mit Geometrien und Randbedingungen, die mittels medizinischer Bildgebungsgeräte bestimmt werden. Dieser Ansatz hat jedoch zwei entscheidende Nachteile: erstens sind die Laufzeiten sehr lang, was im klinischen Umfeld nicht praktikabel ist und zweitens wird nur sehr wenig von der vorhandenen Information in den Messdaten verwendet. Ziel dieser Dissertation ist es daher Möglichkeiten zur Verbesserung von medizinischen Bildgebungsmodalitäten mit hochqualitativen Blutflussinformationen zu untersuchen und einen neuen, klinisch anwendbaren Ansatz vorzuschlagen.

Die Beiträge dieser Arbeit sind vielfach. Vorarbeiten konzentrieren sich auf verschiedene Aspekte von numerischen Blutfluss-Simulationen, mit dem Ziel ihre Anwendbarkeit für die Patientenspezifische Flussmodellierung zu verbessern. In diesem Zusammenhang stellen wir einen Algorithmus vor, der die Erzeugung von Oberflächengittern anhand von medizinischen Bilddaten deutlich verbessert. Viel Arbeit wird in numerische Methoden für Flusssimulation investiert und neuartige Implementierungen eines Finite Volumen und eines Finite Elemente Verfahrens werden vorgestellt und miteinander verglichen um einen Ein-

blick in Design-Entscheidungen für Patienten-spezifische biomedizinische Strömungssimulationen anzubieten. Ein weiterer Beitrag dieser Arbeit ist die Durchführung einer Fluid-Struktur-Interaktions-Simulation, um den Unterschied in den biomechanischen Kräften zu schätzen, welche auf eine gesunde und eine pathologische (mit Aneurysma) abdominale Aortabifurkation wirken. Dabei wird die Existenz eines Schneeball-Effektes nachgewiesen, wobei die Verschlechterung der pathologischen Faktoren sich als selbstverstärkend erweisen, was zu einem exponentiellen Verhalten bei der Entwicklung von Aneurysmen führt. Unsere Forschung konzentriert sich schliesslich auf eine neuartige Methode zur Anreicherung von Blutflussmessungen, welche mit Hilfe einer Datenbank von vorher durchgeführten Fluss-Simulationen das hoch-aufgelöste Patienten-spezifische Strömungsfeld rekonstruieren kann. Die Methode basiert auf der Hauptkomponentenanalyse und verwendet spärliche, veräuschte Geschwindigkeitsmessungen, zum Beispiel von einem PC-MRI Bildvolumen. Erste Experimente mit einer synthetisch erzeugten Datenbank von $2D$ Strömungsfeldern werden vorgestellt und es wird gezeigt, dass diese zu erfreulichen Ergebnissen führen. Eine vollständige Auswertung mit $3D$ Strömungsfeldern wird unter Verwendung einer grossen, repräsentativen Datenbank von synthetischen Geometrien durchgeführt und es wird gezeigt, dass die Methode sekundäre Stromvariablen präzise vorausberechnen könnte. Um die Methode weiter auf Patientenspezifischen Datensätzen testen zu können wird eine Methode beschrieben um Tetraedergitter zu erzeugen und eine Abbildung zwischen verschiedenen Patientengeometrien zu berechnen, welche den Aufbau von grossen Datenbanken von korrespondierenden Flussimulation ermöglichen.