



Title	Computational Modeling and Technique Assessment on Phase Contrast Magnetic Resonance Imaging
Author(s)	Cavalcante Alves, Ellen
Citation	大阪大学, 2025, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/103157
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

Abstract of Thesis

Name (Ellen Cavalcante Alves)	
Title	Computational Modeling and Technique Assessment on Phase Contrast Magnetic Resonance Imaging (位相コントラストMRIの計算モデリングと計測評価に関する研究)
<p>4D Flow Magnetic Resonance Imaging (MRI) is an imaging modality based on the phase contrast (PC) MRI that allows the mapping of three-dimensional time-sensitive (3D + time = 4D) motion within a patient. Based on a powerful magnetic field, 4D Flow MRI has the potential to provide valuable insight into complex internal flows, not obtainable by other techniques, which in turn opens way to new medical discoveries (Markl et al., 2016). Still largely confined to research applications, mainly due to its long imaging and post-processing durations (Bissell et al., 2023), a growth in scientific output was seen from 2003 to 2022, aiming towards improvement to clinical applicability (Ma et al., 2024).</p> <p>Among the many challenges associated with the improvement of 4D Flow MRI, a common factor is the large number of parameters and lack of knowledge on how each affects the resulting image. In this context, physics-based computational simulations provide a unique advantage over in vivo experiments, that is the controlled introduction of error sources, and parameter management (Bissell et al., 2023; Bittoun et al., 1984; Jurczuk et al., 2013). Therefore, the following document contains an evaluation of certain aspects associated with the development of a 4D Flow MRI computer-based simulation environment.</p> <p>Firstly, the algorithm used to solve the Bloch equation, which describes the physical principle behind MRI, was elaborated. In previous studies, Lagrangian-based simulation environments were developed (Petersson et al., 2010; Puiseux et al., 2021; Weine et al., 2024), but due to the loss of accuracy because of flow-induced magnetization dispersion, Eulerian-based simulations show potential for higher accuracy at lower computational cost (Otani et al., 2025). Investigating the use of flexible unstructured meshes, the Discontinuous Galerkin Method (DGM) was implemented, exhibiting errors below 1% for a plate Poiseuille flow and below 6% in a more complex backstep flow.</p> <p>Secondly, the choice of unstructured mesh was reevaluated in the context of MRI signal capture and reconstruction. During this process, the signal generated throughout the domain adopts to a high frequency distribution. For the case of unstructured triangular or tetrahedral elements, this process creates significant error that makes quality image reconstruction impossible (Sevilla et al., 2016). To avoid excessive element refinement, the designed alternative consists in the conversion of data to a regular grid. This allowed the captured signal to closely resemble the Discrete Fourier Transform (DFT), thus assisting in the reconstruction.</p> <p>Lastly, addressing 4D Flow MRI long acquisition times, the concept of Compressed Sensing (CS) and its applicability to the velocity data was investigated. Originally designed for standard MRI and the reconstruction of morphological information from only partially sampled data (Lustig et al., 2007), due to the continuous characteristic of the velocity distribution, by sampling less than 10% of the complete data, images with more than 90% accuracy were obtained.</p>	

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (Ellen Cavalcante Alves)		
論文審査担当者	(職)	氏 名
	主査 教授	和田 成生
	副査 教授	出口 真次
	副査 教授	大城 理
	副査 准教授	大谷 智仁

論文審査の結果の要旨

位相コントラスト磁気共鳴画像法 (PC-MRI) は、核磁気共鳴現象を利用し、流体の運動によって生じるMR信号の位相シフトに基づいて、血液など生体内の流体速度を非侵襲的に計測する方法である。近年では、周期的な流れに対して空間3次元および時間方向を含む速度ベクトルの計測も可能となっており、これは4D Flow MRIと呼ばれる。4D Flow MRIは、心臓や脳などにおける複雑な血流動態を把握し、循環器疾患との関連を解明する検査法として期待されている。しかし、MRI計測では空間情報を得るために定められたパルスシーケンスに従ってMR信号のサンプリングと空間エンコードを繰り返す必要があり、計測に時間を要する。さらに、流体運動を対象とするPC-MRIでは、移流効果に起因する誤差が生じるという問題がある。この特性を明らかにした上でパルスシーケンスの適切なパラメータを設定し、MR信号が本来含む流れの情報を正確に抽出するためには、生体内流れ場に対して計測原理に基づきMR信号を再現できるシミュレータの開発が不可欠である。加えて、PC-MRIや4D Flow MRIを臨床で活用していくためには、計測時間の短縮が重要な課題となる。

本博士論文では、まず、MRIシミュレータの基盤となる計算モデルの構築と数値解析手法の検討を行った。支配方程式であるブロックホ方程式をオイラー座標系で数値的に安定して解くために、非構造格子を用いた不連続ガラーキン有限要素法を採用し、複雑な血管形状にも柔軟に対応可能な解析プラットフォームを構築した。次に、PC-MRI画像再構成における圧縮センシングの影響を検討した。臨床現場では撮像時間短縮のためにMR信号のサンプリングデータ削減が不可欠であり、その再構成に圧縮センシングが利用される。本論文では、サンプリングデータ削減の程度が再構成された速度分布に及ぼす影響を評価できる数値シミュレータを実装し、大動脈血流場を例にその有効性を示した。

以上のように、PC-MRIの計測原理における物理過程およびデータ処理の両面を解析可能とする基盤的プラットフォームを構築した点は生体工学研究として高く評価でき、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認められる。