

## 審査の結果の要旨

氏名 伏見 幹史

生体組織の物性定数は、病変の有無や進行度を反映するバイオマーカーの役割を果たす。例えば、電気特性（導電率・誘電率）は乳癌の検出に、機械特性（弾性率・粘性率）は肝硬変や動脈瘤の進行度判定に、磁気特性（磁化率）は多発性硬化症やAlzheimer病の診断に用いることができる。本論文は、「Electromagnetic and Mechanical Properties Reconstruction of Biological Tissues Using MRI（MRIを用いた生体組織の電磁気および機械特性再構成）」と題し、生体の三次元的な物性定数分布を、in vivoで画像化する手法を開発したものであり、全6章から構成されている。

第1章「Introduction」では、物性定数を非侵襲かつ高解像度に画像化する技術として、MRI計測に基づく方法に注目し、従来の再構成手法を、局所的/大域的、反復的/直接的の2つの性質から分類している。その上で、本研究の目的は、第一に、ノイズに頑健で初期値に依存することのない、大域的かつ直接的な物性定数再構成手法を確立すること、第二に、電気特性と磁気特性を同時に再構成する手法を導出し有効性を検証すること、以上2点であることを述べている。

第2章「Conductivity and Permittivity Mapping from the B1 Magnetic Field Measurement」では、Magnetic Resonance Image (MRI)で計測した高周波磁場の振幅・位相から導電率・誘電率を再構成するElectrical Properties Tomography (EPT)および、高周波磁場の位相のみから導電率を再構成するQuantitative Conductivity Mapping (QCM)に対する大域的・直接的三次元再構成法を導出している。まず、両者が「計測磁場とそれに応じて定まる双対電場との間のインピーダンス推定逆問題」として定式化できることを示している。その上で、双対場の発散が計測場で与えられる発散拘束型の問題であることに注目し、Helmholtz分解を介してインピーダンスに対する線形な積分方程式を導出し、電気特性を再構成する大域的かつ直接的な手法を提示している。提案手法の有効性を人体の脳を再現した解剖モデルを含む数値シミュレーション、およびファントム実験を通して検証し、従来手法と比較して高精度でノイズに頑健で反復計算の不要な手法であることを示している。

第3章「Shear Modulus and Viscosity Mapping from the Displacement Field Measurement」では、人体に振動を与え、MRIで観測した変位分布から、剛性率・粘性率を推定するMagnetic Resonance Elastography (MRE)に対する大域的・直接的三次元再構成法を導出している。この問題についても、まず「計測変位場と双対量としての応力場との間のインピーダンス推定逆問題」として定式化できることを示している。その上で、テンソル場としての応力のHelmholtz分解を介して、第2章と同様にして機械特性に関する線形積分方程式を導出している。

第4章「Electrical Properties Tomography Based on Integral Equations Derived from the Dbar Equation」では、第2章で提案したEPT再構成手法の課題点である、関心領域境界上での電気特性値を与える必要性を解消する手法を提案している。二次元問題において、Dirichlet境界条件の代わりに複素微分境界条件として与えることで、電気特性の境界値が不要になることを示している。

第5章「Simultaneous Conductivity and Susceptibility Mapping Using Multiecho Gradient Echo Acquisition」では、電気特性を再構成するQCMと、磁気特性を再構成するQuantitative Susceptibility Mapping (QSM)を統合する枠組みを提案している。単一の撮像データから、QCMおよびQSMに必要な高周波磁場位相および静磁場を分離推定する際、複素データを用いて撮像信号のモデル式の非線形性を正しく考慮することで最尤推定を行う手法を導出している。その上で、第2章で開発したQCM再構成手法を用い、かつ、MRI形態画像データを正則化に利用することを提案している。健全な被験者と脳腫瘍を持つ被験者それぞれのin vivoデータに適用し、磁化率と導電率で一貫した構造を持つ画像が得られること、一方で電気特性と磁気特性での差から、同じ腫瘍でも物理的性質が異なることを提示可能であることを示している。

第6章「Conclusion」では、本研究で得られた成果と意義をまとめている。

以上要するに、本論文は、生体組織の電気特性、機械特性、磁気特性の三次元分布をin vivoで画像化する問題に対し、未知の物性定数に対する線形な積分方程式を導出することで、大域的かつ直接的な解法を提示し、数値シミュレーション、ファントム実験、in vivoデータを用いた解析により有効性を検証したものである。異なる問題を共通の枠組みで定式化し統一的な解法を導いた本論文は、物性定数画像化に対する強固な基礎を与え、かつ複数の異なる手法の統合を容易にするものであり、システム情報学に対する貢献は大きい。よって本論文は博士（情報理工学）の学位請求論文として合格と認められる。