

審査の結果の要旨

論文題目 圧縮センシングを用いた心筋組織3次元膜電位分布の高速光学計測手法

氏名 原田 匠

本論文では心臓の拍動が変動する心疾患である不整脈の詳細な医学的現象解明を目指し、心筋組織に流れる電氣的興奮伝播を3次元計測可能とする新たな光学計測手法について検討している。不整脈の原因は心臓に流れる電気信号の乱れによるものであるが、その電気信号の伝播は非常に速い現象であるために従来の3次元光学計測手法では計測が困難であり計測速度の増加が課題としてあった。以上の課題を考慮して、本論文では心筋組織の3次元興奮伝播現象を計測可能とする高速計測システムの開発を目的として並列計測システムの提案と実証、更なる高速化のためにデータ圧縮理論を取り入れた新たな計測システムの提案とシミュレーションによる評価、光学系構築による原理証明実験を行っている。

第一章では心臓電気生理分野における興奮伝播の3次元計測の必要性、そして既存の3次元イメージング手法について述べ、先行研究における課題を明らかにしている。求められるイメージング手法の要求仕様について触れ、本研究の目的を述べている。

第二章では計測速度の増加を目的として並列計測システムを提案・検討している。従来手法の膜電位計測モデルについて説明した後に、ハードウェア上での課題について指摘している。それに対して並列化をハードウェアによって実現するシステムを提案し、その再構成プロセスについて述べている。最後に原理証明のために光学系の構築を行い、ファントムによる計測実験を行っている。計測速度については従来に比べて10倍程度の増加が実現可能であることを示している。しかしながら興奮様態を計測する上で計測速度の面で十分とは言えないことを議論し、計測速度の限界について考察している。

その課題を踏まえて第三章ではハードウェア的な改良のみではなく、ソフトウェア的な側面を考慮し、必要な計測回数を減らして再構成フレームレートを増加させる新たな手法を提案している。圧縮センシング理論について近年のアプリケーションに触れながら、蛍光トモグラフィで求められる光学系について議論している。次に計測理論モデルを構築し、圧縮センシングの理論が蛍光トモグラフィに適用可能であることを示した。最後に再構成プロセスで必要となる変換手法の選択について計測対象の構造から考察し、変換手法の選択方針について議論している。

第四章では蛍光体を対象としてシミュレーションによって提案手法の基本性能について検討している。再構成の精度評価によって提案手法の再構成の特性を明らかにし、

精度改善で必要となる補正手法を新たに提案した。そして先行研究の補正手法と対比させ有用性について議論している。次に励起光の照射点数を変化させた時の再構成精度評価を行い、照射点密度と再構成可能深さについて考察している。最後に離れた蛍光体を分離して判別する解像度について検討し、深さに応じた解像度について検討・考察している。

第五章では膜電位分布を対象としたシミュレーション実験によって提案手法の膜電位計測における有用性について述べている。膜電位分布におけるスパース性を評価し、最もスパースとなる変換手法について明らかにした。そして再構成評価では計測回数の増加に応じて誤差が減少する点、計測対象の構造に依存して最適な照射点密度が変化する点、提案手法が従来手法と比較してノイズに対するロバスト性を有することについて検討している。最後に再構成に必要な計測回数について考察し、再構成フレームレートの限界と再構成可能深さについて明らかにしている。

第六章では提案手法の多波長への拡張可能性について議論している。ここではこれまで検討してきた提案手法の核であるパターン照明と圧縮センシングの組み合わせによって多波長計測への拡張可能性を議論し、新たに多波長計測手法を提案している。2波長計測シミュレーションによって励起光照射点密度と各波長の画像のずれであるピクセルシフトとの関係性について考察し、必要となるピクセルシフトについて明らかとした。さらに3波長へと拡張し、2波長での議論が有効であることを示すことでさらなる波長増加の可能性について議論し、多波長計測の基礎的検討として有用性を示している。

第七章ではファントム実験による提案手法の原理証明を行っている。静止した蛍光体を対象として計測を行い、シミュレーションで議論した結果と同様の結果が得られ実際の光学系における誤差要因について検討しながら議論している。さらに移動対象についても計測実験を行い、膜電位を対象とした時に考えられるモーションブラーの影響について考察している。

第八章は結論となり、本研究全体の考察と残されている課題を述べた上で将来の展望を述べている。

本研究は新たにハードウェア及びソフトウェアの両面から高速化を目指した計測システムを提案し、シミュレーション実験で示された計測回数の削減をファントム実験においても実証した。従来手法に比べ数百倍速い再構成フレームレートを実現する3次元高速計測システムによって心筋組織の膜電位の計測が期待でき、さらには脳機能、血中成分の血流計測といった分野にも応用できる計測システムであると考えられる。この成果によって新たな医学的知見を得られることが予想され、臨床現場での医学的貢献も将来的に期待できるものである。

以上のように本論文の成果は、心臓電気生理学研究あるいは生体蛍光計測分野の新たな計測手法の実現に寄与し、バイオエンジニアリングの進歩に貢献する。よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。