

審査の結果の要旨

氏名 蔣 嶺

本論文は、脳をはじめとする軟組織の移動量や変形量を計測してトラッキングする非剛体レジストレーション手法について、手法の提案、実装ならびに性能評価を行い、成果をまとめたものである。レジストレーションの精度は、外科手術を支援するための手術ナビゲーションシステムにおいて、ナビゲーション全体の精度を決める最も重要な因子のひとつである。現在までに提案されているレジストレーション手法は、変形の目印となるマーカを臓器に埋没させるなどして固定しマーカの移動量に基づいて変形量を求める手法、**Open MRI** など術中にボリューム画像を撮影しそれらの変化に基づいて変形量を求める手法、ならびに光学式形状計測により対象の表面形状を測定し形状の変化に基づいて変形量を求める手法に大別される。マーカを固定する手法は、侵襲をとまなうため適用を避けることが好ましい。**Open MRI** による術中画像撮影は、ボリューム画像撮影に3-10分程度の時間を要するためリアルタイム性に乏しく、現時点で実用的でない。これらに対して、光学式形状計測に基づく手法は、非接触かつ非侵襲であり、リアルタイムに計測できる。しかしながら、従来提案されている光学式形状計測に基づく手法は、滑らかな表面をもつ物体の計測で誤差を生じやすかった。また、計測対象が剛体であるとの仮定に基づく手法がほとんどであることから脳などの非剛体変形に対応できず、計測対象となる臓器は限られていた。本論文では、光学式形状計測で得られる物体の形状に加えて、物体のテクスチャも同時に計測し、それらの情報を効果的に利用することで滑らかな表面形状をもつ臓器の非剛体変形に対応したトラッキング手法ならびにシステムを提案する。

第一章は序論であり、脳神経外科手術の概要を説明し、また従来提案されている脳神経外科手術用ナビゲーションシステムについて説明している。さらに、脳神経外科手術中に生じる脳の変形を説明し、それに起因する課題を整理している。

第二章では、提案するシステム全体の構成、脳表の形状とテクスチャの計測手法、ならびにシステムのパラメータ校正手法を説明している。脳表形状は、緑色レーザー光照射で脳表に描いたパターンを高速度カメラで捉えるステレオ法で計測する。**Phase shift** 法に基づくパターン照射と形状計算を提案し、脳表を構成する組織の違いによるレーザー光の反射率変化を補正して正確な形状計測を実現している。

第三章では、計測した脳表の形状とテクスチャの情報から、脳表の移動量ならびに変形量を推定する手法を説明している。脳表において血管などの線状構造を安定したテクスチャ

チャとみて、Frangi filter に基づく線状構造テクスチャの強調処理を行い、テクスチャトラッキングの安定化を図っている。さらに、変形前後の形状の整合性、テクスチャの整合性、変形の空間的滑らかさ、ならびに脳の剛性を考慮した拘束条件を定義し、それらの重み付き二乗和の最小化による移動量ならびに変形量の推定手法を提案している。

第四章では、第三章までに述べた、脳表の形状とテクスチャの計測手法、ならびにそれらからの脳表の移動量と変形量の推定手法に関する実験を述べている。形状計測実験では、計測デバイスー計測対象物体の距離を 250 mm から 400 mm まで変化させ、計測誤差が 0.3 mm から 0.6 mm まで変化したことを確認している。また、シミュレーション実験により、計測対象の形状曲率やテクスチャ周波数などが、変形量推定に与える影響を確かめている。また、各拘束条件の重みについて、その妥当性を検討している。さらには、豚の摘出脳の伸展および圧縮に対する実験を行い、変形量推定誤差を確認している。伸展および圧縮の変形に対して、代表的な従来法である Non-rigid ICP 法の誤差がそれぞれ 1.8 mm および 2.0 mm であったのに対して、提案手法の誤差はそれぞれ 0.8 mm および 0.9 mm であった。これらにより、提案手法の有効性を確認している。

第五章では、本論文の総合考察を述べている。第二章から第四章の研究の理論および成果について述べ、本論文において提案した手法の効果、その適応範囲および将来展望について述べている。

第六章では、本論文を章ごとに振り返り、全体の総括を行っている。

以上をまとめると、本論文は、脳神経外科手術用ナビゲーションにおける脳の非剛体トラッキングにおいて、形状とテクスチャを同時計測する手法の確立と計測デバイスの実装、移動量と変形量を推定する手法の提案ならびにソフトウェアプログラムの実装を行っている。ファントムならびに豚の摘出脳を用いた実験を行い、形状計測と変形トラッキングの誤差がそれぞれ 0.6 mm 以下および 1.0 mm 以下であったことを確認し、提案手法ならびに提案システムの脳神経外科手術への適用可能性を示している。これらの成果より、本研究はバイオエンジニアリング分野に貢献していると判断できる。

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。