

## 審査の結果の要旨

氏名 道家 健仁

本論文は、外科手術の基本手技である術具の直線刺入を対象とし、手術ナビゲーションの機能ならびに安全性の向上を目的として、レーザ光を用いた術具誘導ならびにその誤差評価の二つについて、手法の提案、実装ならびに評価を行い、成果をまとめたものである。Augmented reality 技術は実空間と計算機内情報の幾何学的対応付けを容易にするため、手術ナビゲーションにおいても導入が進められている。従来提案されている手法の多くは、CCD カメラ等で撮影した術野の実写映像に術具刺入位置などの誘導情報を重畳表示したのか、あるいは映像プロジェクタで術野臓器表面に誘導情報を投影したものである。従来において、これらのシステムで呈示される情報は 2 次元であって、術具直線刺入の誘導に 5 自由度の情報が必要であることを考えると、より多自由度かつ直観的な呈示手法の確立が望まれる。開発したシステムは、レーザ光を用いて 5 自由度の誘導情報を術野に直接呈示する。骨折整復術への適用を想定した実験を行い、手法の有効性を確認した。また、開発したシステムを含む一部の手術ナビゲーションシステムで発生する誤差は、従来提案されている FLE、FRE ならびに TRE では表現しきれないことに着目し、誤差解析手法について研究した。手術ナビゲーションシステムを始めとした医療機器の多くは、患者への適用過程に外科医が介在する。手術ナビゲーションでは、特に術具誘導時において外科医の介在の寄与が大きくなる傾向にある。FDA を始めとした機関でもヒューマンファクタに注目し、これを考慮した医療機器開発・審査ガイドラインなどを整理しているが、関係する論文を含め、手術ナビゲーションの誘導誤差解析に有効な手法が具体的に示されているとは言い難い。本論文は、一つあるいは複数の 2 次元平面上において点、線あるいはそれらの組合せによる指標で術具の位置姿勢誤差を呈示する手術ナビゲーションを対象とし、誘導誤差の解析手法を提案した。まず、手術ナビゲーションで呈示される術具誘導情報を整理し、それを介して、術具誘導誤差をヒトの視覚的誤差弁別能とシステム内での誤差伝播のそれぞれに分離して解析した。提案手法で推定した誤差は実測誤差に近い傾向を示し、今まで解明されていなかった誤差の振舞いを解析できる可能性を示した。

第一章は序論であり、手術ナビゲーションにおいて従来提案されている情報呈示法の課題を説明している。特に、近年積極的に研究されている augmented reality ならびに projection mapping などの空間融合表示技術を用いた手術ナビゲーションを紹介し、空間融合表示技術を用いた手術ナビゲーションシステムの課題を整理している。

第二章では、提案する手術ナビゲーション手法である stereographic line projection を説

明し、また提案手法を実装したシステムについて説明している。術具の直線刺入は外科手術における基本手技のひとつであり、5自由度の誘導が望まれる。提案手法は、ステレオに配置された2つのレーザ照射デバイスからレーザ光を照射し、体表における刺入位置(2自由度)、刺入方向(2自由度)、ならびに刺入深度(1自由度)の5自由度の情報を術野に直接呈示した。特に、刺入深度の誘導に関して、2つの手法を提案し、検討した。皮膚表面など体内への刺入点における位置姿勢誘導については1 mm、1 deg、腫瘍など体内深部の目標点における位置誘導については2 mm以下の誤差で誘導したことを示し、提案手法の有効性について検討している。

第三章では、手術ナビゲーション、特に、術具誘導時の誤差に対する解析手法を提案している。手術ナビゲーションシステムが呈示する術具誘導情報の種類を整理し、それを介して、誤差をヒトの視覚的誤差弁別能とシステム内での誤差伝播の二つに分離して解析した。理論解析と実験により、位置計測デバイスならびに誘導情報呈示デバイスの誤差、それらの幾何学的配置ならびに視覚的誤差弁別能の個人差が、術具誘導誤差に与える影響を解析した。提案手法で推定した誘導誤差は、実測した誘導誤差に近い傾向を示した。

第四章では、第三章で述べた術具誘導誤差推定の応用として、手術ナビゲーションにおいて逐次的に術具誘導誤差を推定し、術者に呈示する機能を提案している。患部、各計測装置、ならびに誘導情報呈示装置の幾何配置と、術者の視覚的誤差弁別能を考慮した術具誘導誤差の推定値を呈示した。また、位置計測誤差やレジストレーション誤差などの各処理における個別の誤差に対して、術具誘導誤差全体に対する寄与率を算出し、呈示した。

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、術具直線刺入の支援を目的とし、レーザ光により5自由度の術具誘導情報を術野に直接呈示する手術ナビゲーション手法を提案した。骨折整復における創外固定ピン刺入術を対象とした手術ナビゲーションシステムを構築し、性能を確認した。また、誘導誤差を、ヒトの視覚的誤差弁別能とシステム内の誤差伝播に分離して解析する手法を提案し、その有効性を確認した。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。