

審査の結果の要旨

氏名 金 洪浩

本論文は、近年臨床応用が進み、その発展が期待されている低侵襲手術用のマスタースレーブマニピュレータ型手術支援ロボットにおける、操作する外科医の手の動きと手術ロボットの動作の対応性を与える、ハンドアイコーディネーションの実現手法に関する新たな手法を提案している。従来の手術支援ロボットシステムでは、手術マニピュレータと視野を与える内視鏡の相対位置関係を、これらを接続する機械式アームの姿勢から定める、手術マニピュレータと内視鏡に位置計測マーカを非接触3次元位置姿勢計測装置で計測し求めるといった手法が使われていた。しかし、これらの方法はより小型で設置自由度に優れた手術ロボットシステムや、今後発展が望まれる単孔式手術での使用が想定される軟性内視鏡に搭載される柔軟な構造を有する手術マニピュレータ等におけるハンドアイコーディネーション実現手法として使用できない。本論文では手術環境の特徴を活用した両眼立体視内視鏡による3次元位置姿勢計測による術具周り回転以外の5自由度の推定と、手術ロボットの運動学情報を活用したフィルタリング処理の組み合わせにより、内視鏡画像という比較的画質の悪い環境の下でも、安定して手術マニピュレータの内視鏡に対する相対的な3次元位勢推定を可能とする手法を提案している。

本論文は8章から構成される。第1章では低侵襲手術におけるマスタースレーブ型手術支援ロボットの現状と今後の発展の方向性について議論し、ハンドアイコーディネーションの必要性とその実現手法の現状を分析している。また関連研究の文献調査から、安定な操作を可能とするために許容される操作者の手の座標系とロボットの動作座標系の姿勢の誤差の大きさを分析している。その上で、現在使用されている課題を解決するための関連技術を概観し、本論文の目的を述べている。第2章では本論文で提案する手法の概要を説明している。第3章では内視鏡画像処理による視野内の手術器具を2次元でトラッキングし手術ナビゲーションで通常使用される3次元位置計測装置を用いずに、術野画像に心外膜電位計測結果を重畳する手法を提案し、実験にてその性能を確認することで、内視鏡画像計測により従来の3次元位置姿勢計測装置による計測を

代替できることを示した。また手法の課題を論じている。第4章では、両眼立体視色内視鏡画像処理による3次元位置計測により、手術ロボットのエンドイフェクタの3次元位置を計測する手法を提案している。ハンドアイコーディネーションの構成作業中、安全確保のため手術ロボットは術野から離れており、内視鏡と対象臓器との中間にあるものとし、さらに手術ロボットと内視鏡、術野の手術中での一般的な位置関係を考慮して、エンドイフェクタに対応する視差を与える画像上の位置の探索条件を限定することで、安定して手術ロボットエンドイフェクタの軸回りの自由度以外の5自由度の位置姿勢を安定して推定する手法を提案している。市販の両眼立体視内視鏡を用いた実験により、提案手法で位置精度 $0.75\text{mm} \pm 0.84\text{mm}$ (S.D.)、角度誤差 3.1 度(RMS)で推定可能であることを示した。第5章では操作者によるスレーブマニピュレータの動作と、エンドイフェクタの3次元位置計測を繰り返し行う過程で、マニピュレータの順運動学から予想される位置と画像計測結果の誤差解析から、手術ロボット座標系の原点位置をカルマンフィルタにより逐次修正し、内視鏡座標系と手術ロボット座標系の統合を図る手法を提案している。実際の内視鏡画像処理の誤差を考慮したシミュレーションによりカルマンフィルタのパラメタを調整した後、シミュレーションにより提案手法が報告されている既存の手術支援ロボットの運動誤差存在下でも角度精度 3.4 度、位置精度 0.4mm 程度で推定できることを示している。第6章では市販の3次元位置姿勢入力装置と6自由度の小型産業用ロボットから構成される1腕のマスタースレーブマニピュレータシステムと市販の両眼立体視内視鏡からなる模擬実験系で、内視鏡とロボットに搭載した内視鏡の鉗子部を模擬したエンドイフェクタの相対位置関係を、文献的に報告されている内視鏡手術における内視鏡と鉗子の標準的な空間配置範囲に設置し、提案手法の評価実験を実施している。術野には肝臓ファントムモデルを使用し、臓器表面での強い反射や、鉗子先端の血液付着の模擬、暗い内視鏡照明の下など、外乱をいくつか想定し提案手法の安定性を評価している。なお実験検討の中で見出された課題を解決するために両眼立体視内視鏡による3次元位置姿勢計測の安定性を向上のためのアルゴリズムの改良を実施している。実験にてエンドイフェクタを内視鏡視野内で内視鏡に対して手前方向に 10mm 以上移動させながら、画像計測を実施し校正を行い、角度誤差 1.1 度以下で座標統合が可能であることを確認している。また内視鏡手術にける照度の下限と言われる 3000lux の照明下でも提案手法が適用可能であることを確認している。最後に被験者5名による、ハンドアイコーディネーションが崩れた状態での操作精度と本手法ならびに対照としてエンドイフェクタ先端の3点を指定した画像計測による姿勢計測による座標統合後の座標統合精度、作業性の向上を縫合操作の一部を構成する針刺入点への針移動を模擬した動作を行わせ、その動作

精度、動作速度を比較している。提案手法は対象手法と比較して処理精度の高い座標統合が可能であった。座標統合されていない状態と統合後の状態では操作性に有意な差が見られ、また提案手法は対象手法と比較して有意な操作精度と操作時間の観点から評価した操作性の有意な向上が見られた。第7章で研究全体についての総括的な考察を行い、残された課題を指摘し、第8章で結論を述べている。

本論文は、スレーブマニピュレータと内視鏡のセッティングを行った後簡単な操作でハンドアイコーディネーションのための座標統合を実現する手法に基礎を与えるものであり、精密工学の応用分野である手術支援ロボット技術の進歩に寄与する成果を与えていると判断される。

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。