

審査の結果の要旨

氏名 ヤン リャンジン

本論文は胎児外科治療のひとつである双体間輸血症候群に対するレーザ治療を支援するための内視鏡画像ナビゲーションシステムに関する研究を取り扱っている。双体間輸血症候群に対するレーザ治療は、胎盤上の2子の血管が吻合している部位を内視鏡により同定しレーザにより焼灼する、低侵襲にて治療が可能な手法である。しかしながら、狭視野の内視鏡では吻合血管の同定に熟練を要し、内視鏡画像によるナビゲーション手法の開発が求められている。本論文は、超音波画像により胎盤の三次元モデルの構築と内視鏡とのレジストレーションを行い、作成した胎盤モデル上に内視鏡画像を張り合わせることにより、内視鏡のトラッキングおよび広範囲の内視鏡画像を得る技術を構築している。特に、これまでナビゲーションシステムに用いられてきた三次元位置センサを用いることなく、通常の臨床で用いられる三次元超音波画像と内視鏡画像のみを用いて上記技術を実現している。

第1章では双体間輸血症候群に対するレーザ治療の概要と、それに対するナビゲーションシステムの必要性について述べている。また本論文ではナビゲーションシステムのうち、重要な構成要素である内視鏡画像三次元マッピングシステムを対象とし、関連研究の問題点として外部の三次元位置センサが用いられていることを指摘し、本論文の目的を述べている。

第2章では、関連する技術として、内視鏡下胎児外科治療の工学的支援技術、超音波画像誘導ナビゲーションシステム、ビジョンベーストラッキング技術、画像の張り合わせ技術についての先行研究について調査を行い、技術的課題について論じている。

第3章では内視鏡三次元画像マッピングシステムの構成を明確にするために、医学的課題と技術的課題について整理し、ナビゲーションに必要な三次元位置情報の取得と広域の内視鏡画像の取得を行うため、開発するシステムが超音波画像による位置決め、画像張り合わせ技術、ビジョンベーストラッキング、テクスチャマッピングという4つの技術構成とすることを述べている。また、必要な要求仕様として、超音波画像による位置決め誤差 2mm 以下、内視鏡マッピ

ング誤差 3mm 以下と設定している。

第4章では、第3章により決定した構成要素を開発する上での課題と具体的な手法を提案している。超音波画像による位置決めにおいては **Iterative PCA** を用いることにより胎児外科において特徴的な内視鏡先端部でのアーチファクトによる誤差の影響を軽減するアルゴリズムを提案した。画像張り合わせ技術においては、特に特徴点検出が困難な胎盤画像に対して、特徴点の分布によるエラー検出法を提案することにより安定した特徴点検出を提案している。ビジョンベーストラッキングにおいては、三次元超音波モデル上に対応する内視鏡画像上の特徴点を配置することにより、従来用いられていた外部のトラッキングセンサを用いることなく、内視鏡位置計測を実現している。

第5章では、第4章で提案した要素技術を統合して、内視鏡画像三次元マッピングシステムを構築している。具体的には、画像張り合わせのみによる手法、超音波画像のみによる手法、ビジョンベーストラッキングのみによる手法、上記3手法を組み合わせる統合手法の4手法を開発し、各システムの特徴について論じている。

第6章では開発したシステムの評価を行っている。まずは要素技術評価として画像張り合わせの対応可能範囲をシミュレーションにより評価・考察している。次に、第5章で提案した各マッピングシステムにより、胎盤ファントムによる誤差評価を行った。その結果、血管分岐部等の特徴点間の距離誤差が、画像張り合わせのみによる手法では 80 フレーム後に **RMS 誤差 3.0mm**、超音波画像のみによる手法では 20 フレーム後に **RMS 誤差 1.3mm**、ビジョンベーストラッキングのみによる手法では 20 フレーム後に **RMS 誤差 1.6mm**、統合手法では 20 フレーム後に **RMS 誤差 1.1mm** となり、各手法とも高精度な位置決めが可能であり、かつ統合手法により位置決め精度が向上する可能性を示した。

第7章では本研究全体に対する考察と、臨床応用可能へ展開するために残された課題を議論し、第8章で結論を述べている。

以上の研究成果は、胎児外科治療において有用となる内視鏡ナビゲーションシステムをより簡便に実現するための要素技術を提案している。特に、これまで手術ナビゲーションシステムで必須とされていた外部の位置センサを用いず、手術中に用いられる医療機器のみで内視鏡と超音波画像の座標系統合および内視鏡位置トラッキングを実現し、狭視野の内視鏡画像から広範囲の内視鏡マップを術者に提供しており、臨床的に有用なシステム実現への基礎的な知見を与えている。

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。