

報告番号	※甲	第	号
------	----	---	---

主 論 文 の 要 旨

論文題目 内視鏡手術コンピュータ支援システムにおけるナビゲーションの精度向上と解剖学的名称表示に関する研究
氏 名 蔣 振剛

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、内視鏡手術ナビゲーションシステムの精度向上と解剖学的名称表示に関して述べたものである。

内視鏡手術は、低侵襲手術として、組織損傷の軽減だけでなく、入院期間短縮、術後疼痛軽減、術後回復の早期化、合併症発生率の低下、手術痕減少など多くの利点がある。内視鏡手術は、従来の開腹手術と異なり、体表に開けられた小さな穴または自然開口部(鼻、口等)を通じて体内に挿入された内視鏡により撮影された体内の様子をモニターに映し出す。術者はモニターを見ながら手術操作を行う。しかしながら、内視鏡画像の視点と術者の視点位置は一致しておらず、内視鏡の向きと術者の視線や操作線が異なるため、術者にとって難しい手術方法の1つであるといえる。さらに、体内に挿入された内視鏡先端に固定されたカメラは、視野が限定されるため、視野内の臓器構造や術野周囲の組織情報の把握が非常に困難である。そのため、手術の成否が術者の経験に大きく依存し、手術ミスが発生する可能性が大きい。そこで、術者の負担を軽減し、内視鏡手術の安全性と有効性を向上させることが可能な内視鏡手術コンピュータ支援システムの開発が望まれている。本論文では、内視鏡手術ナビゲーションシステムの精度と性能の向上を目標として、磁気式位置センサシステム(ElectroMagnetic Tracking system; EMT)を利用したナビゲーションシステムの精度向上と、ナビゲーションシステムにおける解剖学的名称表示について述べる。本論文は、6章から構成される。

第1章では、内視鏡手術の歴史と内視鏡手術の問題点、および本研究の目的と位置づけについて述べる。内視鏡手術は、低侵襲手術の1つとして多くの利点があるものの、間接視下、遠位操作、操作空間の狭さなどの問題がある。これは術者やカメラ助手の負担を増加させ、予期しない臓器損傷が発生する可能性がある。その

ため、様々な内視鏡手術コンピュータ支援システムが提案されている。しかし、これらのシステムでは、軟性内視鏡手術への適用性や臨床利用において問題がある。そこで、第1章ではこれらの問題について論じ、解決すべき問題点を明確にするとともに、関連する従来研究について述べる。

第2章では、EMTセンサを用いた軟性神経内視鏡手術ナビゲーションシステムの実装手法と臨床評価について述べる。術者の負担を軽減し、かつ手術の安全性と有効性を向上するため、EMTセンサを用いた軟性神経内視鏡手術ナビゲーションシステムの実装法を提案する。ここでは、臨床の場で利用可能なEMTセンサと内視鏡カメラ間の座標系の対応付け手法を提案し、構築された軟性神経内視鏡手術ナビゲーションシステムを実験室ならびに臨床の場において評価する。

実験室における評価実験の結果、キャリブレーションチャートの特徴点の計測が不要であり、EMTセンサと内視鏡カメラ間の座標系の対応付け行列の推定が可能であった。位置推定の平均誤差は4mm、姿勢の平均誤差は7°であり、キャリブレーションチャートの特徴点の計測を利用する従来手法の精度とほぼ同等であった。また、実際の手術室における実験の結果、推定したカメラ位置・姿勢を利用した仮想内視鏡画像をナビゲーション情報として生成し、術者に提示することが可能であった。現在主流である2次元画像のナビゲーションとは異なり、連続的かつ直感的に位置情報を把握することが可能であることが知られた。

第3章では、EMTセンサの6自由度出力の誤差の補正手法について述べる。EMTセンサでは、軟性内視鏡先端位置の追跡が可能であるが、EMTセンサは周囲の金属や電気機器などによる磁場歪みにより計測精度が低くなるという問題がある。光磁気ハイブリッド方式による磁気式3次元位置センサの簡便迅速な磁場歪み補正手法が提案されているが、EMTセンサを用いて軟性内視鏡手術を誘導する場合には、センサの姿勢情報も欠くことができない。本研究は、軟性内視鏡手術ナビゲーションシステムにおいて、内視鏡カメラや術具の追跡精度の向上を目指し、EMTセンサの6自由度出力誤差を、新たに考案した測定ツールを用いて補正する手法を提案する。提案手法では、光学式位置センサシステム(Optical Tracking system; OT)の出力をEMTセンサ出力の真値として利用し、EMTセンサ出力の誤差を評価する。補正精度を向上させるため、OTセンサとEMTセンサ出力の空間的・時間的な同期をとりながら、2つのセンサ出力の誤差を評価する補正手法を提案する。

OpenMRI手術室におけるEMTセンサの6自由度出力誤差の補正実験から、新たに考案した測定ツールを用いることでOTセンサとEMTセンサの計測データを同一の位置・姿勢で取得でき、6自由度のEMTセンサの出力誤差の評価が可能となった。EMTセンサ出力誤差の補正精度は平均3mm以下であり、従来の3次元位

置センサの補正手法と比較してほぼ同一であった。さらに、提案手法では測定ツールの移動速度が精度に与える影響を軽減することが可能であった。

また一般的に、軟性神経内視鏡手術においては、患者頭部の移動に起因する画像 - EMT センサ座標系間の対応付け誤差を補正するため、追加の EMT センサを動的な参照系 (Dynamic Reference Frame; DRF) として患者頭部に固定する。DRF 用 EMT センサにより患者頭部の移動を追跡し、画像 - EMT センサ座標系間対応関係を更新する。しかしながら、DRF 用 EMT センサに計測誤差が発生した場合、位置追跡用 EMT センサの計測誤差は DRF により拡大される。ここでは、頭部に第二の補助 DRF 用 EMT センサを固定することで、姿勢の平均値を推定し、DRF の安定性を改善する。実験結果から、提案手法は、位置追跡用 EMT センサの計測誤差を単一の DRF 用 EMT センサを利用する場合と比べて 20% 程度軽減することが可能であることが分かった。

第4章では、エピポーラ幾何を用いた仮想内視鏡視軸と実内視鏡視軸回転誤差の補正について述べる。EMT センサを用いた軟性神経内視鏡手術ナビゲーションで利用される EMT センサは、非常に細い円柱状のコイルであり、常に一定の回転位置で固定することは難しい。また、術中に不意に回転する場合もある。この回転軸のずれは実内視鏡画像と仮想内視鏡画像の視軸を軸とする回転方向のずれとして現れる。本研究では、実内視鏡カメラにおけるエピポーラ幾何と仮想内視鏡におけるエピポーラ幾何の関係を利用して、高速かつ簡便にセンサ軸周りの回転誤差を補正可能な手法を提案する。提案手法では、キャリブレーションチャートといった付加的な情報を利用するのではなく、軟性神経内視鏡手術ナビゲーションシステムにより直接取得されている情報のみを利用することで、術中に回転誤差の補正が可能となる。頭蓋骨ファントムを使用した実験では、センサ軸周り回転誤差を平均 $8^{\circ} \pm 10^{\circ}$ 程度に補正可能であった。

第5章では、ボリュームレンダリング画像上への血管名表示手法について述べる。手術ナビゲーション情報を提示するため、これまで、可視化後の2次元画像上に解剖学的構造物の名称(解剖ラベル)を重畳表示する手法が提案されている。しかしながら、表示される解剖ラベルは2次元画像上に直接描画されるため、表示対象の3次元形状に即した表示ができない。本研究では、ボリュームレンダリング法により得られる可視化画像における臓器の前後関係を考慮して、解剖ラベルを融合表示する手法を提案する。提案手法では、医用画像から血管の解剖学的構造を認識理解することで、血管名とその表示位置を決定し、血管名が融合表示された可視化画像をサーフェスレンダリングとボリュームレンダリングを組み合わせて生成する。また、解剖ラベルの常に視点を向くようにする、脂肪などに血管が埋もれているよ

うな場合でも解剖ラベルが視認しやすいように繰り返し表示する，などの工夫を施す。

実験の結果から，生成された可視化画像は，解剖ラベルの評価基準である A) 可読性，B) 接近性及び C) 表現性の 3 つを満たすことが知られた。さらに，提案手法により可視化された画像では，血管名を正確に対象血管領域に表示できるだけでなく，ボリュームレンダリング法で可視化された画像の利点を持ち，血管位置の深さ情報や，透明情報なども正しく表現されることが確認できた。

最後に，第 6 章で，本論文のむすびとして，まとめおよび内視鏡手術ナビゲーションシステムに関する今後の課題，手術ナビゲーションの将来と今後の展望について述べる。