博士論文(要約)

Stereographic line projectionによる
5自由度術具誘導とその誤差評価に関する研究

道家 健仁

論文題目　Stereographic line projectionによる5自由度術具誘導と
その誤差評価に関する研究

氏　　名　道家　健仁

直線術具穿刺は整形外科手術の基本であり，その手術ナビゲーションの性能向上が切望されている．近年，センサの性能向上やレジストレーション手法の高精度化にともない，術具誘導時誤差の誤差全体に与える割合が大きくなっており，誘導誤差の性能向上に対する期待がますます高まっている．本論文では，手術ナビゲーションの性能向上を目的とし，誘導手法の改良と，誤差解析による誘導誤差要因の解析を行い，それらを総合的に考察する．

Augmented reality（AR）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もの [1)]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 [2)]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．それに対し，レーザ光をステレオで照射することで 3 次元的に情報を術野に直接呈示する stereographic line projection を用いた手術ナビゲーションとしてレーザナビゲーションシステム [3)]の開発がされてきたが, 術具の位置および姿勢の 4 自由度の誘導が行われており，奥行きの誘導は行われていなかった．また，特にこのような AR 技術を用いた手術ナビゲーションシステムにおいて，従来提案されている，FLE，FRE ならびに TRE といった誤差解析手法 [4)]は，手術の計測誤差や計画誤差を対象としており，手術ナビゲーションにおける誘導の誤差を表現しきれない．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．そこで本論文では，レーザナビゲーションの術具直線刺入の誘導において奥行き誘導方法の提案および実装，また，その誘導誤差の誤差解析方法の提案を行い，検討した．

レーザナビゲーションシステム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，術野で直接術具の誘導を行う．誘導時，位置姿勢の誘導を行った後，奥行きの誘導を行うが，奥行きの誘導においてシングルレーザおよびデュアルレーザによる 2 つの手法を提案した．デュアルレーザによる奥行き誘導は，術野空間に奥行き誘導の指標となる直線に 2 つの平面レーザを照射することで，術具表面に特定の幾何形状を呈示し，術者に 3 次元的な奥行き位置の誘導を行う，シングルレーザによる奥行き誘導よりも安定した誘導が可能となることを理論解析で示し，その誘導誤差の検討をした．

X 線環境下における術具位置姿勢誘導実験を行った結果，誘導誤差は 0.29±0.88 mm，0.46±0.65 deg であり，計画誤差を含めた総合誤差は，1.57±1.13 mm，1.39±1.31 deg であった．体内深部の目標点における奥行き誘導について，シングルレーザによる奥行き誤差は, 術具径 6.0 mm において 0.54±0.29 mm, 術具径 17.0 mm において 0.53±0.28 mm であった. デュアルレーザによる奥行き誤差は, 術具径 6.0 mm において 0.40±0.17 mm, 術具径 17.0 mm において 0.49±0.33 mm であった. シングルレーザならびにデュアルレーザにおける誤差において，レーザの照射角度に対する傾向は見られなかった．奥行き誘導時の位置誤差および姿勢誤差における術具位置合わせ実験を行った．結果，位置誤差において，シングルレーザによる誘導は，位置誤差に依存して誘導誤差が増加したのに対し，デュアルレーザによる誘導は, 位置誤差によらずほぼ一定となり, 平均値と標準偏差は 0.34±0.10 mm であった．デュアルレーザによる奥行き誘導は位置誘導時の位置誤差に依存せず，シングルレーザよりも安定した奥行き誘導が可能であった．姿勢誤差において，デュアルレーザによる奥行き誤差は姿勢誤差の増加に伴い増加した．提案システムの姿勢誤差は 2.0 deg 以内であり, その範囲内において奥行き誘導は目標である誤差 2 mm 以内を満たした．術具穿刺実験の結果，奥行き誘導誤差は 0.55 mm となった．X 線環境下での穿刺位置誤差が 1.57 mm であったことを考えると奥行き方向の誤差を含めたレーザナビゲーションシステムの位置誤差は 1.66 mm となる．以上より，本システムは，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，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，大腿骨骨折整復術における直線術具刺入の目標である 2 mm, 2 deg 以下の誤差で 5 自由度術具誘導を行えることが期待できる．

次に，手術ナビゲーションの術具誘導誤差に対する解析手法を提案した．本手法では，手術ナビゲーションシステムが呈示する誤差情報をヒトが受け取る知覚信号として扱い，術者が視覚的に信号を知覚する能力，すなわち視覚的誤差弁別納の指標として視覚の弁別閾を用いた．手術ナビゲーションシステムが呈示する知覚信号に対して誤差を知覚できる確率は，累積分布型の確率曲線で表すことができ，ヒトによって異なる．また，実空間において同一の誤差でも，手術環境の条件によって知覚信号は変化することから，手術ナビゲーションが呈示する知覚信号は，実際の誤差および手術環境条件を考慮して算出する．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．

レーザナビゲーションの術具誘導に用いられる誘導方法が点および線であることから，点，線の相対位置および相対姿勢の弁別閾の計測実験を行った．結果，実測した弁別閾において点の相対位置，線の相対位置および相対姿勢において有意差が認められ，個人差が存在することが示唆された．また，これら弁別閾に関して経時的な変化を確認したところ，これらの弁別閾において経時変化に対する特段の傾向は見られなかった．レーザナビゲーションを用いた術具合わせ実験の結果，弁別閾を用いた提案手法の誤差推定値と実測値の差は小さく，高い相関を示した．弁別閾が小さい，すなわち知覚信号に対して知覚能力が高い被験者は術具誘導誤差も小さくなる傾向が見られた．レーザ交差角の変化に対する術具姿勢誤差において，被験者全体における全体平均の RMS 誤差は 0.23 deg，最大誤差は 0.48 deg であったのに対し，提案手法の RMS 誤差は 0.15 mm，最大誤差は 0.29 mm であった．スリーブ長，スリーブ径およびスリーブ取り付け位置の術具条件の変化に対する術具姿勢誤差では，スリーブ長変化において，全体平均の RMS 誤差 0.19 deg，最大誤差 0.39 deg であったのに対し，提案手法の RMS 誤差 0.15 mm，最大誤差 0.27 mm であり，スリーブ径変化において，全体平均の RMS 誤差 0.19 deg，最大誤差 0.43 deg であったのに対し，提案手法の RMS 誤差 0.11 mm，最大誤差は 0.22 mm であり，スリーブ取り付け位置変化において，全体平均の RMS 誤差 0.23 deg，最大誤差 0.43 deg であったのに対し，提案手法の RMS 誤差 0.12 mm，最大誤差 0.19 mm であった．提案手法は従来行われてきた全被験者の平均誤差よりも術者間の差ならびに変化をよく表した．また，フルオロレジストレーションにおける手術計画時の計画誤差推定実験を行った結果，計画面の輻輳角が 0 deg に近づくほど術具の位置姿勢誤差は大きくなり，90 deg に近づくほど小さくなった．撮影画像に計画を描いた時点では同等の誤差であっても，撮影の条件による誤差の増幅，すなわち誤差伝播における寄与率の違いによって，術具誘導誤差に差が見られた．推定した術具誘導誤差の実測値に対する関数あてはめの残差は十分に小さく，また当てはめた関数は実測値の中央値付近を通った．フルオロレジストレーションのような，2D3D 系のシステムに対しても，誤差推定を行える可能性があることが示された．以上，実験でレーザナビゲーションシステムに用いられる点や線の条件の範囲内における弁別閾において個人差の有無の検証，手術ナビゲーションシステムにおける個人差および，手術環境ごとの推定精度を検証した結果，手術ナビゲーションシステムに用いられる弁別閾に個人差が存在し，手術ナビゲーションシステムにおいて術者の個人差や手術環境の条件ごとに提案手法は精度良く術具誘導誤差を推定することが可能であった．提案する誤差解析手法は，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，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ことで手術ナビゲーションシステムの誘導誤差の振舞いを解析できる可能性を示した．

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た．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．実験の結果より，トラッカの視認状態の悪い場合において，推定したトラッカ計測誤差の寄与率が 55.8%となり，全体の誤差の過半数を占めたが，トラッカの視認状態の良い場合において，推定したトラッカ計測誤差が 44.3%となり，トラッカ計測時の計測条件の変化に対するトラッカ計測誤差の全体に占める寄与率の変化を確認した．誤差の寄与率を呈示することで，システム構成要素毎の誤差の大きさを把握でき，術中に誤差の所在と大きさを確認できる可能性が示された．

以上より，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．骨折整復における直線術具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．

参考文献

1) Rassweiler, Jens J., *et al*., “iPad-assisted percutaneous access to the kidney using marker-based navigation: initial clinical experience,” European urology, Vol.61, No.3, 2012, pp. 628-631.

2) Volonté, Francesco, *et al*., “Augmented Reality and Image Overlay Navigation with OsiriX in Laparoscopic and Robotic Surgery: Not Only a Matter of Fashion.” Journal of Hepato-Biliary-Pancreatic Sciences, Vol.18, No.4 2011, pp. 506-09.

3) Y. Nakajima, T. Dohi, *et al*., “Surgical tool alignment guidance by drawing two cross-sectional laser-beam planes,” IEEE Transaction on Biomedical Engineering, vol. 60, No. 6, 2013, pp. 1467-1476.

4) Fitzpatrick, J. Michael, Jay B. West, and Calvin R. Maurer Jr., “Predicting error in rigid-body point-based registration,” IEEE Transactions on Medical Imaging, Vol.17, No.5, 1998, pp. 694-702.