

[研究助成 (C)]

脳下垂体腺腫の摘出手術のための三次元誘導技術の開発

2227007

研究代表者
(助成金受領者)

埼玉医科大学 大学院医学研究科 博士課程

高 橋 優 太

共同研究者

埼玉医科大学 保健医療学部
臨床工学科

教 授

若 山 俊 隆

[研究の目的]

脳の下面中央に位置する脳下垂体およびその周辺領域に腫瘍が発生した場合、主な治療法として経鼻的内視鏡下手術が選択される。これは、鼻腔からアプローチし、頭蓋底を経由して腫瘍に到達する低侵襲手術であり、頭部を大きく開く必要がないという利点を有する。特に下垂体腺腫をはじめとする頭蓋底腫瘍に対して頻用されており、近年ではその安全性と有効性が広く認知されつつある。しかしながら、これらの腫瘍は時に周囲の重要構造物、すなわち海綿静脈洞や視神経、内頸動脈などと密接に接して浸潤することが多く、腫瘍の全摘出は容易ではない。わずかに腫瘍組織が残存した場合でも再発のリスクが高く、手術の成否は腫瘍の完全切除にかかっているといっても過言ではない。

現在、内視鏡技術の進歩に伴い、手術視野の拡大および術中操作の精緻化が進んでいる。特に三次元(3D)内視鏡の導入により、術者は奥行き感を得ながら手術を行うことが可能となった。しかし、現行の3D内視鏡は主にステレオ視方式に依存しており、その空間認識精度には限界がある。特に微細な解剖構造の識別や深部腫瘍へのアプローチにおいては、術者の経験と勘に頼る場面も多く、手術の安全性や正確性の向上にはさらなる技術革新が求められている。

そこで本研究では、同心円縞パターンの制御技術、内視鏡的三次元形状計測を高精度化する

キャリブレーション技術、三次元内視鏡の誘導システムの開発を目的とする。

[研究の内容、成果]

1 年目：同心円縞パターンの制御

助成1年目はコロナ禍であり、申請者自身が臨床工学技士として総合病院で医療に従事しながらの研究開発であった。

申請者らはこれまでに光ファイバーのスキュー反射によって発生したコーンビームを用いた内視鏡的三次元形状計測手法について研究を進めてきた。しかし、この方法は機械的な走査を必要とするため、高速化に課題があった。そこで光ファイバーへ入射するレーザー光を空間的に制御することで同心円縞パターンを発生し、高速かつ高精度な手術野の三次元形状計測の実現を試みた。

まず光ファイバーを用いた細径の構造光発生装置を構築した。構造光は信号発生器によって周波数と位相を制御できる。構造光を評価するためにスクリーンに投影しCMOSカメラで観察した。このとき位相を90°ごとに変化させると構造光が変化した。位相の異なる4枚の画像を位相シフト法によって解析しアンラッピング処理を施した結果、アンラッピングによって±180°で折りたたまれた位相が滑らかに接続された。今回は平板をサンプルとしたが、試料に段差や凹凸が存在する場合にはその形状の変化から位相分布に変化がみられる。

この結果より同心円縞パターンの制御技術は確立できたが、この時点では十分な計測精度が見込めなかった。そこで本技術の基盤となるコーンビーム投影における内視鏡的三次元形状計測を高精度化するキャリブレーション法を開発することで、同心円縞パターンによる計測精度に生かそうと考えた。

本結果については特許化や論文化が完了していないため詳細は省略した。

2 年目：内視鏡的三次元形状計測を高精度化するキャリブレーション法の開発

申請者らがこれまでに提案しているコーンビーム投影による走査型の三次元内視鏡は、内視鏡内部にあるレンズの収差から計測精度に課題があった。そこで距離 z に対するコーンビームの変化を 3 次関数でフィッティングして関数化し、精度の向上を図った。本キャリブレーションは、申請している三次元誘導技術の精度向上に繋がるものである。

図 1 に形状計測できる三次元内視鏡の実験装置を示す。三次元内視鏡の先端に搭載された光ファイバーから平板に対してコーンビームが投影される。三次元内視鏡を z 方向に走査しながら光セクション面を CCD カメラで取得すると、図 2(a) のように距離によって同心円パターンが変化する。本来距離 z に対してコーンビームは線形的に変化するはずだが、レンズ系の収差の影響で曲線を描く。試料板の距離 z と半径 ρ の関係は、角度 θ によって図 2(b) のような曲線を描くため、3 次関数で近似した。一方、3 次関数の係数 $a(\theta) \sim d(\theta)$ は図 2(c) に示すように変化するので、6 次関数で近似した。

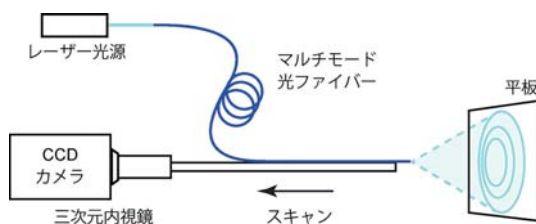


図1 形状計測できる三次元内視鏡の実験系

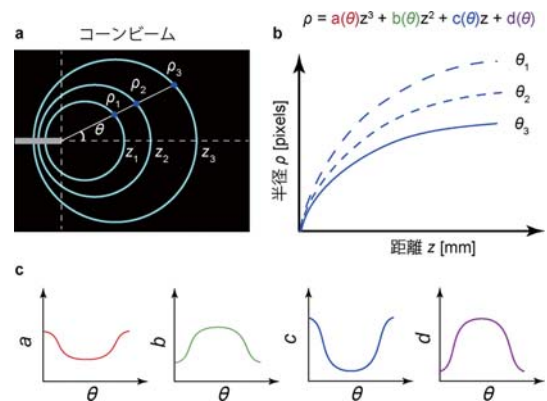


図2 (a) 平板に投影されたコーンビームの距離 z に対する同心円パターンの変化。(b) 距離 z に対するコーンビームの半径 ρ の変化を 3 次関数でフィッティングする。(c) 3 次関数の係数 $a(\theta) \sim d(\theta)$ は角度 θ に対してさらに 6 次関数でフィッティングされる。

これらの関数化によって、撮像した光セクション画像から角度 θ 毎に半径 ρ を算出し、解の公式を解くことで距離 z を決定することができる。さらに三次元形状計測の結果に残る設定値とのわずかな差を補正するために、角度 θ 毎に距離 z の設定値に対する実測値の関係も 6 次関数で近似した。6 次関数の係数 $a(\theta) \sim g(\theta)$ のルックアップテーブルを作成して形状計測の数値を補正した。

図 3(a) に精度検定のための平板の三次元形状計測結果を示す。全体的に緑色のマップになっており、ばらつきが小さいことがわかる。赤波線で示したエリアはキャリブレーション前の有効計測範囲であり、キャリブレーションによって計測範囲が拡大した。また、図 3(b) に距離 z に対する点群のばらつきのヒストグラムを示す。距離 z に対する正確度は 0.02 mm、精

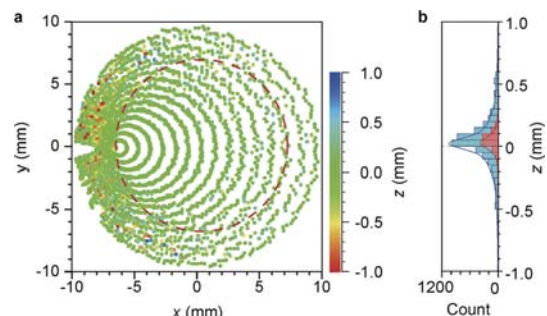


図3 (a) 平板を用いた精度検定の結果。カラーバーは距離 z に対するばらつきを示している。(b) 距離 z に対するばらつきのヒストグラム。

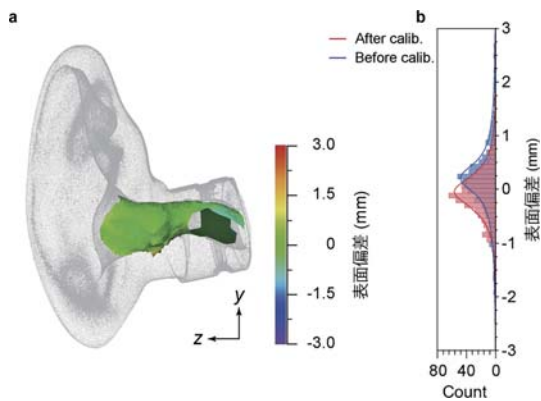


図4 (a) 医療応用としての外耳道の形状計測結果。グレーで示しているのはマイクロフォーカスX線CTデータ。またカラーマップは提案手法での計測結果であり、表面偏差をカラーで示している。(b) 表面偏差のヒストグラム。

度は ± 0.06 mm であった。この結果は、申請者らの先行研究と比較して 88% 改善されており、キャリブレーションによる精度の向上が実証された。

次に、臨床応用の一例として外耳道サンプルの形状計測を行い、本手法の妥当性を評価した。本手法による外耳道の形状計測は、危険性のある印象材を用いたオーダーメイド補聴器の型取りに代わるものである。図4(a)には申請者らの外耳道の測定結果を、X線CTで測定したデータとマッチングした結果を示す。ここでカラーマップは表面偏差を示している。図4(b)に示す表面偏差のヒストグラムのピークは、キャリブレーション前後でそれぞれ 0.2 mm と -0.05 mm であり、キャリブレーションによって正確度が向上した。さらに、ヒストグラムの 3σ における精度は、キャリブレーション前後でそれぞれ ± 1.64 mm と ± 1.17 mm であり、キャリブレーションによって精度は 28.7% 向上した。

助成2年目には、コーンビーム投影による形状計測が可能な三次元内視鏡のキャリブレーションを実証した。今後、本手法を同心円縞パターンによる三次元内視鏡に適用することで、高速かつ高精度な手術野の三次元形状計測が可能になると考えられる。

本成果については、2023年3月の精密工学

会春季大会にてベストプレゼンテーション賞を受賞した。また、2024年4月に米国の Applied optics 誌に掲載された。

3年目：三次元内視鏡の誘導システムの開発、および SpO_2 マッピングの基礎実験

2年目に開発した内視鏡的三次元形状計測を高精度化するキャリブレーション法によって、高精度な三次元形状計測が実証された。この手法を用いて脳下垂体腺腫の摘出手術のための三次元誘導技術を構築することを考えると、内視鏡の三次元姿勢計測が必要不可欠であった。そのため申請時の予定には含まれていなかったが、三次元姿勢計測技術の開発に注力した。三次元姿勢計測を行うために、ステレオカメラシステムを構築した。キャリブレーションボードにはドットパターンを使用し、実空間座標と計測座標とを変換行列を用いて補正するアルゴリズムを構築した。図5(a)～(d)には、距離 $z=400, 500, 600, 700$ mm にキャリブレーションボードが設置されたときの、計測されたドットパターンの距離に対する実空間座標からのばらつきを示す。カラーバーは ± 50 mm でばらつきを示しており、現状では内視鏡を誘導できるだけの精度は担保できていない。しかしながら、現状

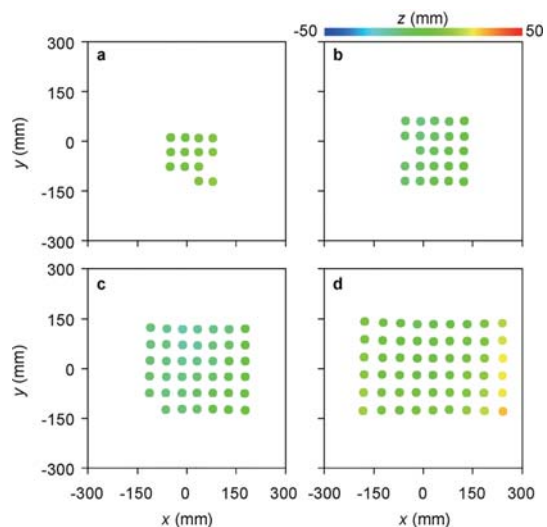


図5 (a)～(d) 距離 $z=400, 500, 600, 700$ mm のときの、計測されたドットパターンの距離に対する実空間座標からのばらつきを示す。

の精度で内視鏡の姿勢誘導のデモンストレーションを試みた。図6にはステレオカメラシステムによって撮影された3点マーカーのステレオペア画像を示す。これらの画像を解析することで、図7(a)～(d)に示すように実空間上でのマーカーの姿勢を取得することができている。今後、高精度に姿勢を推定可能なアルゴリズム

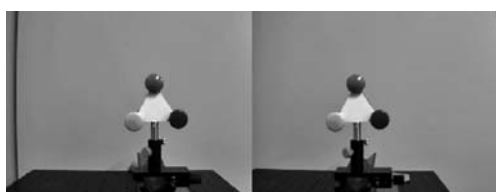


図6 ステレオカメラシステムによって撮影されたマーカーのペア画像

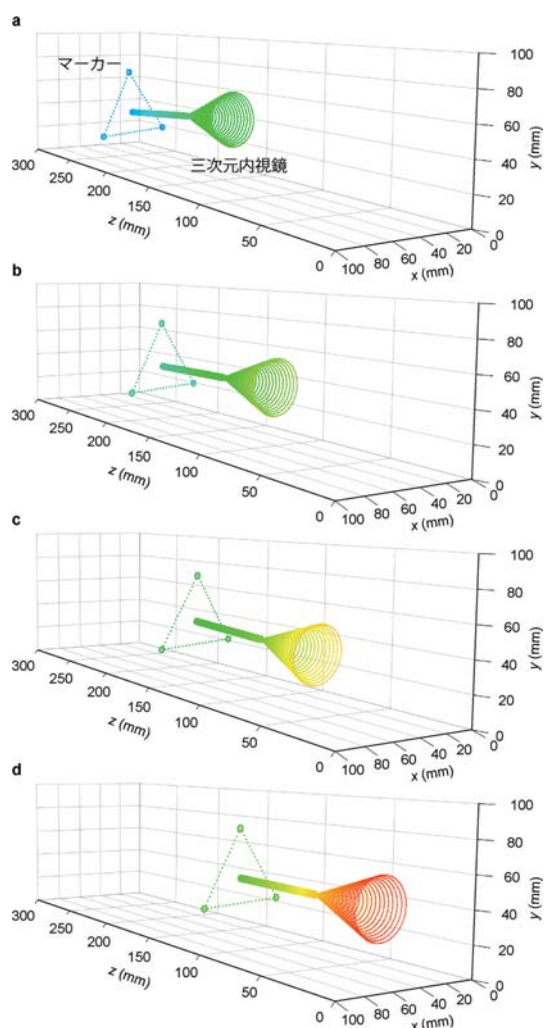


図7 解析によって得られた内視鏡誘導のデモンストレーション。(a)～(d)はそれぞれ $z=250, 200, 150, 100$ mmのときに計測された3点マーカーの位置座標。

の開発を目指す。

また、生体組織の SpO_2 マッピングについては、申請当初の予定からは遅れをとっているが異なる2波長のレーザー光源を使用することで、同時に2色の同心円縞パターンを制御することに成功している。こちらも特許と論文化前のため詳細は省略した。今後、適正な波長のレーザー光源を導入しながら SpO_2 マッピングを達成し、三次元内視鏡による形状計測との同時検出を行っていく。

まとめ・今後の研究の方向

本研究では、鏡視下脳下垂体手術支援を目的とした三次元誘導技術の実現を目指し、光ファイバーによる同心円縞パターン制御、キャリブレーション手法の開発、三次元誘導システムの構築を段階的に実施した。特に、内視鏡内部のレンズ収差を補正するキャリブレーション手法が順調に進行したため注力した結果、論文化にも成功した。加えて、構築したステレオカメラシステムによる三次元姿勢計測、および2波長のレーザー光源を使用した2色の同心円縞パターンの同時投影も試行した。これらの進行度合いはまだ途中段階であり、今後、三次元内視鏡による SpO_2 と形状計測の同時検出を達成し、同心円縞パターン制御、キャリブレーション手法、三次元誘導システムと統合することで、脳下垂体腺腫の摘出手術のための三次元誘導技術の開発を目指していく。

[謝 辞]

研究を遂行する上で埼玉医科大学大学院医学研究科の若山俊隆教授には多大なるご指導・ご鞭撻をいただいたので感謝申し上げます。また、本研究の中でも三次元内視鏡は、埼玉医科大学保健医療学部臨床工学科4年生の中井川剛氏にご協力いただいた。ステレオカメラによる姿勢誘導においては、東京工科大学医療保健学部臨床工学科の由居駿一氏にもご協力をいただいた。本研究は、COVID-19の感染拡大防止の緊急事態宣言下において、総合病院で臨床工学技士として臨床に従事する申請者にとって通常通りの研究時間を確保

することが不可能であったにもかかわらず、共同研究者の皆様の精力的な協力があって達成された。最後に本研究を支援して下さった立石科学技術振興財団には深く感謝いたします。

[成果の発表, 論文等]

○論文

- [1] **Yuta Takahashi**, Takeshi Higashiguchi, and Toshitaka Wakayama, "Calibration for endoscopic 3D shape measurement with cone beam projection," Applied Optics 63, 3058-3068 (2024).

○学会発表

- [2] **高橋優太**, 中沢優斗, 東口武史, 若山俊隆, 「コーンビーム投影による三次元内視鏡のキャリブレーション」, 精密工学会春季大会 (2023 年, 東京).
[3] **高橋優太**, 中沢優斗, 東口武史, 若山俊隆, 「コーンビーム投影による三次元内視鏡」, OPJ2023 (2023 年, 札幌).

○受賞

高橋優太, 中沢優斗, 東口武史, 若山俊隆, 「コーンビーム投影による三次元内視鏡のキャリブレーション」, 精密工学会春季大会ベストプレゼンテーション賞 (2023 年, 東京).