

令和 元 年 9 月 30 日現在

機関番号：24701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K10418

研究課題名 (和文) 脊椎内視鏡手術のための次世代ナビゲーションシステムの開発

研究課題名 (英文) Development of the next-generation microendoscopic spine surgery navigation system

研究代表者

中尾 慎一 (Nakao, Shin-ichi)

和歌山県立医科大学・医学部・博士研究員

研究者番号：90405431

交付決定額 (研究期間全体) : (直接経費) 3,600,000 円

研究成果の概要 (和文) : 仮想内視鏡を利用した次世代脊椎内視鏡手術ナビゲーションシステムの開発をおこなった。既存のナビゲーションシステムを利用し、MEDシステムの内視鏡の位置情報を我々の開発した内視鏡手術シミュレーターに転送し、仮想内視鏡画像を作成した。さらに高速回転ドリルの位置情報を内視鏡手術シミュレーター内の仮想ドリルと連動させ、腰椎模型を使った手術において、リアルタイムで仮想内視鏡画像上での骨切除が進行することが確認できた。Dice Similarity Coefficientを用いた画像の一致率87%から95%で良好であった。そのため実際の手術でも常に仮想内視鏡での骨切除を確認しながら手術することができる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

脊椎後方内視鏡手術は患者への侵襲が小さい反面、小さい術野と斜視鏡独特の視野から術中のオリエンテーションの把握が困難となる場合がある。今回開発した仮想内視鏡ナビゲーションでは、内視鏡および処置具の位置情報を既存のナビゲーションシステムから内視鏡手術シミュレーターに転送することで、仮想内視鏡においても、実際の手術と同時進行していくものである。そのためリアルタイムに骨切除の進行具合を確認することが可能であり、熟練医でなくても計画どおりに手術を行うことができる。

研究成果の概要 (英文) : The next-generation microendoscopic spine surgery navigation system using a virtual endoscopy image was developed. Using existing navigation system StealthStation S7 (Medtronic Navigation, Louisville, CO, USA), our endoscopic surgery simulator Plissimo 2000 (KONICA MINOLTA JAPAN, Inc. Tokyo, Japan) got positional information of the endoscope of the MED system and created virtual endoscopy image. As a result, we confirmed that the drill on the virtual endoscopy synchronized with the real drill in the surgery using lumbar spine model (SAWBONES). The rate of concordance between the virtual image and real image using Dice Similarity Coefficient was 87% to 95%. Therefore we can check the progress of osteotomy in a real surgery by the virtual endoscopic navigation.

研究分野：整形外科

キーワード：ナビゲーションシステム 脊椎内視鏡 シミュレーター 画像支援システム

様 式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

脊椎疾患に対する低侵襲手術として内視鏡下除圧術が広く行われている。脊椎後方内視鏡手術は患者への侵襲が小さく術後早期に社会復帰ができるという利点がある反面、その極端に小さい術野から、術中のオリエンテーションを把握するのが困難であるという問題がある。そのため術野における解剖学的位置の理解度は、術者の知識差・経験差によって異なることが予想され、特に経験の少ない医師の合併症の頻度が高くなっていると考えられる。1980年代から導入されたコンピュータナビゲーションシステムは整形外科において、脊椎手術、人工関節置換術、骨折手術で普及がすすんでいる。手術ナビゲーションシステムは実際の術野の位置情報を座標化し、これを術前に得られた三次元画像に反映させることで、術中の位置確認を行うものである。これにより三次元的なオリエンテーションを把握しながら手術が進行でき、安全で的確な手術操作が可能となる。脊椎分野においては、手術野からは直視できない椎弓根や椎骨動脈の走る横突起などの重要な構造物をモニター上で確認することができるため、おもに難易度の高い部分のスクリーンの挿入などに使用されている。しかしながら狭窄症に対する除圧におけるナビゲーションシステムの有効性を示す報告はなく、斜視鏡、魚眼レンズという術野の特殊性からも未熟練医でも手術を行える内視鏡に特化したナビゲーションシステムの意義があると考えられた。

2. 研究の目的

我々は、脊椎ナビゲーションシステムから内視鏡カメラ、処置具の位置情報を我々が開発した手術シミュレーターにリアルタイムに送ることで、内視鏡手術の術野画面とシミュレーターの仮想内視鏡画面を同時に表示することを考えた。それにより、解剖学的な位置確認ができると同時に、手術の進行とともに仮想内視鏡でも骨切除がすすんでいくことで骨切除量を確認しながら手術を進めることができるようになる。本研究の目的は仮想内視鏡ナビゲーションの開発をおこない、その有効性を検討することであった。

3. 研究の方法

①脊椎内視鏡手術シミュレーターの画像再現性の確認

アクリル樹脂でできた直方体を対象として、上面にチェッカーフラッグ模様を刻み、ナビゲーション用のCTを撮影した。ナビゲーションシステム（StealthStation®S7®, Medtronic）を利用し、内視鏡スコープの位置情報をシミュレーターに転送し、実際のスコープとシミュレーター内の仮想スコープを同期させた（図1）。そして実際にチェッカーフラッグ模様を撮影した内視鏡画像と仮想内視鏡画像の一致率を測定した。

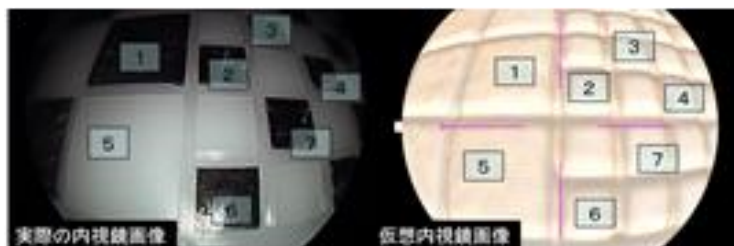


図1 実際の内視鏡下でのチェッカーフラッグと仮想内視鏡のチェッカーフラッグ

②術中支援システムとしてのシミュレーターの応用

ナビゲーションシステムから得られたドリル先の位置情報をシミュレーターに転送し、仮想ドリルと同期することで、リアルタイムに骨切除イメージを表示することを試みた。バーチャル空間でのリアルタイム骨切除イメージが、実際の内視鏡手術の骨切除を再現できているかを検討した。CT撮影を行った腰仙椎模型のデータをナビゲーションシステムに取り込み、CTベースのナビゲーションを構築した。次にhigh speed drill（MidasRex, Medtronic）と内視鏡スコープに赤外線反射マーカを装着し、内視鏡スコープとドリルの位置情報をシミュレーターに転送し、シミュレーター内の仮想スコープと仮想ドリルに同期させ、実際の模型での骨切除が、シミュレーター上で仮想内視鏡上の骨切除にリアルタイムに反映するように設定した。椎弓切除時には、同椎骨の棘突起にリファレンスフレームを装着し、内視鏡下で模型の椎弓切除を行った（図2）。

③MED シミュレーターの PED（経皮内視鏡脊椎手術）への応用

MED スコープ（METRx® MED® System Endoscope 4.0mm）と PED スコープ（Richard Wolf, Endoscope, 3.1mm Working Channel, 25°）に 4K カメラヘッド（4K Synergy UHD4™ C-Mount Camera Head）を装着し 4K モニターに画像を表示した。スコープはそれぞれ 1 ブロックが 1x1cm のチェッカーフラッグ画像をターゲットとし、距離 2cm, 3cm で、それぞれ静止画を記録した。測定項目は、面積、画像の歪み率とした（図3）。

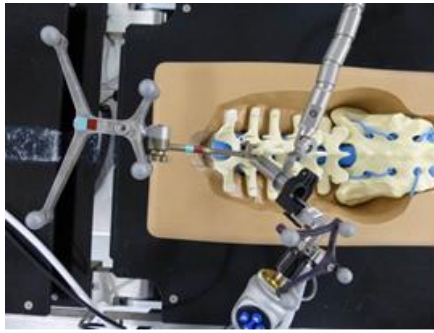


図 2 模型切削の様子

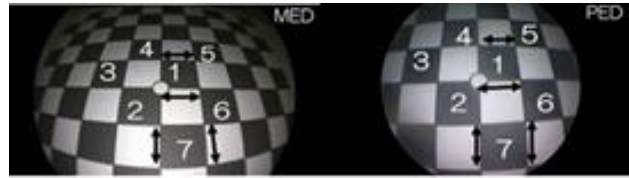


図 3 MED 内視鏡と PED 内視鏡の視野 歪みの設定

4. 研究成果

①脊椎内視鏡手術シミュレーターの画像再現性の確認

また画像の一致率は Dice Similarity Coefficient (DSC) で評価した。DSC は画像の類似度を示し、 $2x|A \cap B| / (|A| + |B|)$ の式で表され、完全一致で「1」となる。平均の DSC 値は 0.74-0.86 であり、周辺部分での値はやや低かったが、手術操作を行う範囲においては、ほぼ一致していた。通常内視鏡画像は、斜視鏡、魚眼レンズ、等距離射影の効果が合わさって作られており、広い視野の画像が独特の歪みをもって作られている。したがって内視鏡シミュレーター (図 4) は、その歪みを再現できていなければならないが、我々のシミュレーターは内視鏡画像を再現できていた。

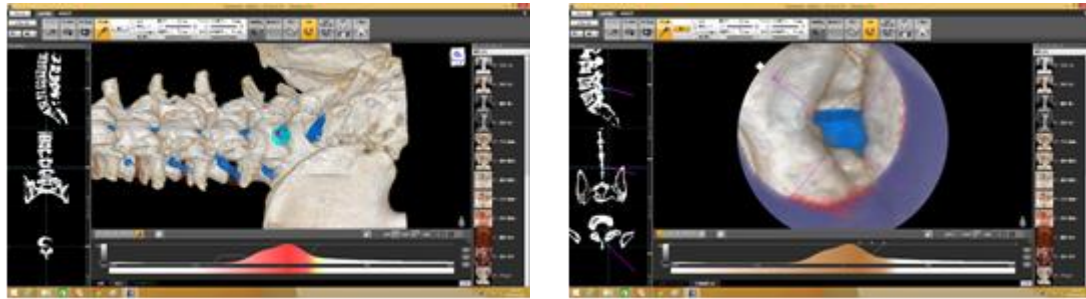


図 4 吾々のシミュレーター 内視鏡モード (右) で骨の切削もできる。

②術中支援システムとしてのシミュレーターの応用

仮想内視鏡での骨切除後 3D 像と実際の切除後模型の 3DCT の比較では、ほぼ実際の骨切除を再現できており、DSC の平均値は 0.9 以上であった。また実験中も内視鏡画像と仮想内視鏡画像は、一致していると思われた (図 5, 6)。



図 5 切除後模型 左は仮想内視鏡のもの

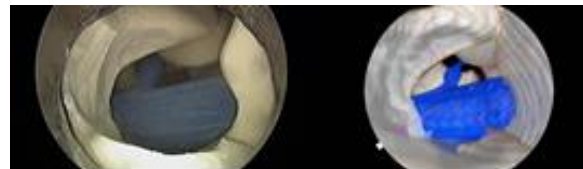


図 6 実際の模型を切除した内視鏡画像 (左) 仮想内視鏡の画像 (右) ほぼ一致した解剖学的特徴がみられる。

シミュレーターの切削モードでは、コンピュータ上で高速に骨切除を再現しなければならないため、出来上がった 3D 像を内視鏡風に歪ませるのではなく、内視鏡情報で変換した独特のポリウムレンダリング法を採用している。さらにシミュレーターではドリルの直径を設定し、画面左の CT スライスを確認しながら骨切除を行うことができる。このシミュレーターを使った仮想内視鏡ナビゲーションでは、実際の手術では靱帯組織に覆われて神経を確認できない状態でも、

適切な骨切除範囲を確認しつつ手術を進行することができる（図 7）。



図 7 実際の内視鏡画像 右はドリルを同期した仮想内視鏡画像

③MED シミュレーターの PED（経皮内視鏡脊椎手術）への応用

PED の視野は MED の視野よりも狭く、MED 視野の半分以下の視野であった（図 8）。画像の歪み率については画像の中心部分での歪み率に差はなかったが、周辺になるほど PED で歪み率が大きかった。PED は 7mm の皮膚切開を行い、経皮的に進入し内視鏡のポータルから処置具を挿入し手術を行うものであり、内視鏡を補助的に用いて円筒レトラクター内で手術を行う MED と比べ、より視野が小さくオリエンテーションの把握が困難である（図 9）。そのためシミュレーター、ナビゲーションの有効性は高いと考えられる。シミュレーターでは、視野角を調整できるため PED 手術への応用が可能であり、前述の仮想内視鏡ナビゲーションを使用できる可能性があると考えられた。



図 8 photoshop で歪みを補正した PED 画像を重畳した MED 画像
視野的には半分程度になっている。

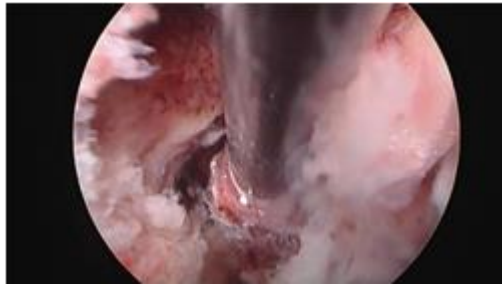


図 9 実際の PED 内視鏡の画像

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 2 件）

1. 中尾慎一、吉田宗人. 医工連携による新たな整形外科治療 内視鏡下脊柱管狭窄症手術の術前・術中支援システム. 関節外科. 2017;36;P40-47
2. 中尾慎一、吉田宗人. MED（内視鏡下脊椎手術）シミュレーターの PED（経皮内視鏡脊椎手術）への応用. 日本コンピュータ外科学会雑誌. 2018;20;P280-281

〔学会発表〕（計 9 件）

1. Shin-ichi Nakao, Munehito Yoshida et al. A study of the reproducibility of intraoperative image in microendoscopic-spine-surgery simulator. Orthopaedic Research Society (ORS) 2016 Annual Meeting. March 5-8, 2016, Orlando, Florida, U.S.A.
2. 中尾慎一、木岡雅彦、吉田宗人ほか: 内視鏡手術シミュレーターとナビゲーションシステムを利用した術中リアルタイム骨切除イメージ作成のための基礎研究. 第 30 回日本整形外科学会基礎学術集会, 2015.10.22-23 富山市

3. 中尾慎一、吉田宗人ほか：仮想内視鏡ナビゲーション上での骨切除再現性の検討. 第 10 回日本 CAOS 研究会, 2016.3.24-25 愛知県犬山市
4. 中尾慎一、吉田宗人ほか：脊椎内視鏡手術シミュレーターの画像再現性の検討. 第 45 回日本脊椎脊髄病学会学術集会, 2016.4.14-16 千葉市
5. 中尾慎一、吉田宗人ほか：仮想内視鏡ナビゲーション上での骨切除再現性の検討. 第 45 回日本脊椎脊髄病学会学術集会, 2016.4.14-16 千葉市
6. 中尾慎一、吉田宗人ほか：ナビゲーションを利用した内視鏡手術シミュレーター内の骨切除再現性の検討. 第 126 回中部日本整形外科災害外科学会・学術集会, 2016.4.8-9 静岡県浜松市
7. 中尾慎一、吉田宗人ほか：MED スコープと PED スコープの視野の比較. 第 12 回日本 CAOS 研究会, 2018.3.22-23 大阪市
8. 中尾慎一、吉田宗人ほか：MED スコープと PED スコープの視野特性についての比較検討. 第 130 回中部日本整形外科災害外科学会, 2018.4.20-21 松山市
9. 中尾慎一、吉田宗人ほか：MED（内視鏡下脊椎手術）シミュレーターの PED（経皮内視鏡脊椎手術）への応用. 第 27 回日本コンピュータ外科学会, 2018.11.9-11 奈良市

〔図書〕（計 1 件）

1. 中尾慎一. 19 章 術前シミュレータの開発と臨床応用. 脊椎内視鏡下手術. 吉田宗人編. 医学書院, 東京, pp200-5, 2017

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者 なし

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：竹村知晃

ローマ字氏名：Tomoaki Takemura

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。