

平成 30 年 6 月 22 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K10784

研究課題名(和文) 拡張現実技術を融合した死角のない新しい側頭骨頭蓋底内視鏡手術支援システムの開発

研究課題名(英文) Development of a new image-guided surgical system combining endoscopic surgery and augmented reality technology

研究代表者

小宗 徳孝 (Noritaka, Komune)

九州大学・大学病院・助教

研究者番号：80529884

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：側頭骨手術には複雑な微小外科解剖の理解が必要である。この解剖学的特徴のため死角のない必要十分な術野の展開には困難が伴う。内視鏡や拡張現実(Augmented reality; AR)技術は代表的な手術支援技術であり、これらを組み合わせた新しい内視鏡下側頭骨手術法を確立することで、死角のない側頭骨頭蓋底内視鏡手術支援システムを構築することが可能であると考えられた。我々は今回の研究において、術野への情報量重方法を工夫することで、目的のシステムを構築した。

研究成果の概要(英文)：The lateral skull base surgery is still challenging due to the anatomical complexity of the temporal bone. Endoscopy and augmented reality are technologies to make surgery safe. Endoscopy enable surgeons perform surgery reducing blind zones. Augmented reality is a projection of computer-generated virtual coponents to the surgeon's real surroundings. The use of augmented reality makes it possible to offer a variety of information, which includes the surgical anatomy intraoperatively. Combination of the endoscopic surgery and augmented reality technology can generate a new surgical system, which enable surgeons do procedure without any blind zone. We generated a new surgical system combining the endoscopic surgery and augmented reality technology.

研究分野：耳鼻咽喉・頭頸部外科

キーワード：拡張現実 側頭骨手術 内視鏡手術 ナビゲーション

1. 研究開始当初の背景

側頭骨周囲は真珠腫、髄膜腫や神経鞘腫といった腫瘍の好発部位であり、外科的切除が主に行われてきた。しかし、近年の医療技術の発達により放射線治療で加療される症例が増え、術者が経験できる症例数は減少しているのが現状である。側頭骨は、蝸牛、三半規管、顔面神経、内頸動脈、内耳道、頸静脈球などといった極めて重要な構造物を骨内に有する(図1A)。術者には少ない症例数の中で正確な解剖学的構造の理解と精密な手術技術を習得し、手術を実践する事が要求される。内視鏡手術、ナビゲーション技術および拡張現実(AR)技術は新たな手術支援技術として注目されている。

内視鏡は胸腹部に限らず頭蓋内(神経内視鏡)や副鼻腔手術(頭蓋底手術を含む)そして耳科領域に用いられており、手術によっては標準術式として使用されている。中耳および副鼻腔手術には内視鏡を用いた手術手技が広く認知されてきており、その有用性が報告されている。¹しかし、内視鏡を用いた手術支援システムの側頭骨頭蓋底手術への応用は未だに発展途上である。我々は、死体頭部を用いて内視鏡の側頭骨頭蓋底手術への応用について検討し、側頭骨頭蓋底手術においても良好な視野を確保しながら到達できることを明らかにしている(図1B-C)。

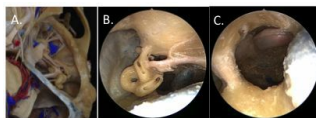


図1)
A. 側頭骨内の重要構造物(中頭蓋底側から観察)
B. 内視鏡下Infralabyrinthine approach
C. 内視鏡による錐体尖の観察

近年、側頭骨頭蓋底手術への内視鏡の応用が複数報告されており、今後は内視鏡下側頭骨頭蓋底手術の開発・発展が期待されている。²ARとは、現実環境の中に、デジタル情報を重ねあわせ融合する技術である。AR技術を用いて手術顕微鏡画面や内視鏡画面に解剖学的構造物や病変を投影するためには、高精度のナビゲーションシステムが必要不可欠である。AR技術の手術への導入は、術者の術野から得られる情報を飛躍的に増やし、手術の正確性や安全性を高めるものとして発展してきている。解剖学的構造が複雑な領域において、AR技術による手術支援は非常に有用であると考えられ開発が行われている。^{3,4}

AR技術を用いた内視鏡下側頭骨頭蓋底手術法は術中に視線を術野から離すことなく、解剖学的構造物の情報を得ることができる点、また、顕微鏡下手術と比較し狭い空間でも良好な視野が得られる点が特色であると考えられる。内視鏡とAR技術を側頭骨頭蓋底手術に応用することで経験症例数が減少した現在でも、安全・確実な手術を遂行できる一助となると考えられる。本技術の確立は手術の安全性と成績向上のみならず、手術シミュ

レーションや手術教育にも応用できる、非常に有益なシステムであると考えられる。本研究では、拡張現実技術を融合した死角のない新しい側頭骨頭蓋底内視鏡手術支援システムの開発をおこなうことを目的とした。

2. 研究の目的

本研究の最終目標は、ナビゲーション下内視鏡手術技術とAR、マッピング技術を融合することで、死角のない安全で精度な手術支援システムを新規構築することである。その目標達成のために、以下の4点を目標として設定した。

- 耳科内視鏡へ装着可能なリファレンスフレームの開発
- AR技術のナビゲーション下側頭骨内視鏡手術支援システムへの装用
- AR技術を装用した側頭骨内視鏡システムの精度の解析とその向上
- 側頭骨内構造物をマッピングし術者へその情報伝達する技術の工夫・開発

3. 研究の方法

当研究施設では、九州大学大学院 医学研究院 先端医療医学講座 災害・救急医学分野の協力を得て、新しい側頭骨ナビゲーション用のレジストレーション法を開発し報告しており、⁴ その後も継続的に新しいナビゲーション技術の開発に取り組んでいる(図2)。

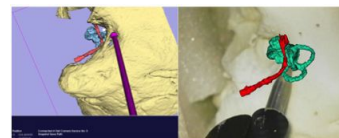


図2)
光学顕微鏡を用いたAR装用ナビゲーションの開発例
左:ナビゲーション画面
右:術野View
(図は研究分担者より提供)

この技術を応用して、予備実験として、内視鏡モニター画面にAR技術を用いて、側頭骨内の重要臓器の3次元モデルを投影することで、実際の手術での問題点や、精度などをはじめに検討することとした。また、今回の手術支援システムを作成する上で、耳科用内視鏡でも利用できる新しいreference frameの開発作成は必須と考えられたため、同時に研究を進めることとした。その後、構築したシステムの検証結果を元に、その精度の改善を行っていく。また、構築したシステムにマッピング技術を利用した術者へのデジタル情報伝達システムを組み込んでいくこととした。

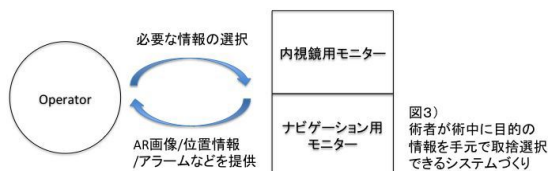
耳科内視鏡に装着可能なreference frameの開発:

ナビゲーションシステムでは、レジストレーション(ナビゲーション画像と実際の患者との位置をあわせること)法が、その精度を大きく左右する。また、位置合わせのためのreference frameは、時に手術中の手術操作

の妨げになる場合がある。そのため、手術方法にあわせた、reference frame の装着が重要であり、当然 reference frame の位置は、レジストレーションのしやすさにも影響する。そのため、本研究では、耳用内視鏡へも装着できる、手術操作の妨げにならない reference frame の開発を行う。この reference frame には、後述する、種々のデジタル情報を術者が手元で内視鏡画像およびナビゲーション画像から目を離さずに取捨選択できる機能を付加出来るように設計する。次に、実際の CT データから側頭骨モデルを作成し、上述した reference frame を用いた側頭骨内視鏡用ナビゲーションシステムの精度を検討する。作成した側頭骨モデル内の様々な深度の部位に測定用マーカーを埋め込み、registration を行った後に Target registration error と Fiducial registration error を測定する予定である。

Augmented reality 技術の応用:

ナビゲーション用ソフトウェアである 3D slicer, 内視鏡とその reference frame(前述), 3次元光学式位置計測システムである Polaris (Northern Digital Inc., Waterloo, Canada) でナビゲーションシステム構築した後、Augmented reality 技術をシステムに装用する。内視鏡の術野映像をナビゲーションシステムに送り、次に Polaris を用いて内視鏡による位置映像をナビゲーションに伝える。その後、位置情報に合わせた3次元デジタル画像を内視鏡術野映像にね合わせる。最後にその複合映像を内視鏡操作画面に映し出す。現時点の AR 技術の手術応用においての問題点は、手術野に重なるデジタル映像の視認性と、解剖学的構造物と重層された 3D デジタル映像との誤差である。精度の向上に関しては、側頭骨模型を用いて精度を検証しながら、reference frame の改良やソフトウェア上での調整を行い対応する。重層デジタル映像の視認性の向上に対しては術野への投影方法を検討して対応する予定である。例えば、infralabyrinthine approach で錐体尖部への到達する際には、重要構造物を露出するよりも避けて行く必要がある。そのため、内視鏡では術野で骨内に重要構造物を含まないマージンが分かることが重要である。そのため、術野へ必要な情報を術者が手元で取捨選択できる用に工夫する。



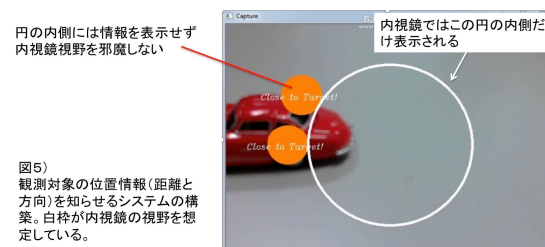
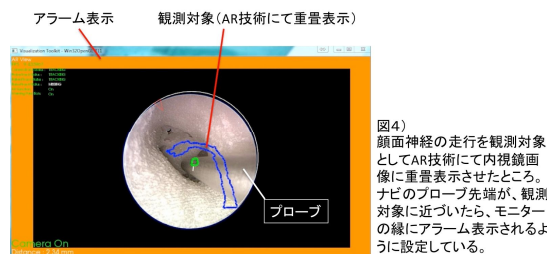
4. 研究成果

当施設では、これまで、光学顕微鏡を用いた AR 装用ナビゲーションモデルを予備実験

として構築していた。まず、この技術を応用して、内視鏡を用いた AR 装用ナビゲーションシステムの構築を目指した。側頭骨頭蓋底手術では、側頭骨内に存在する重要臓器の損傷が問題となる。特に、顔面神経、半規管、蝸牛、内耳道、内頸動脈、S 状静脈洞・頸静脈球などである。それらの構造物を術前 CT の DICOM データより抽出して(セグメンテーションを行い、必要な解剖学的構造物を選択する) 3D モデルを構築する。そのデータを内視鏡画面に重畳表示することを試み、結果、以下の2つの問題点が明らかになった。

1. 狭い内視鏡のモニター画面に、多くの情報を一度に表示されると、術操作の妨げになり、手術支援を適切に行えないこと
2. AR にて重畳する解剖学的情報と、実際の解剖学的位置の誤差が非常に大きいこと

まずは、1. を解決するため、観測対象を絞り込み更に、観測対象のアウトラインのみ表示することで解決できないか試みた(図4)。しかし、それでも重畳された情報が、狭い内視鏡視野のなかでは非常に術操作の妨げになる可能性が高かった。そのため、必要なときにだけ観測対象の位置(方向と距離)を内視鏡モニターに情報として表示して、観測対象へ近づくと警戒音でも術者へ情報を発する事ができるシステムを構築した。さらに、医師の要望があったときのみ観測対象を重畳表示できるようにした(図4のように)。このシステムでは、比較的視野を邪魔せずに、観測対象の位置情報を術者が取得できると考えられた。(図5)



位置情報の表示は、距離と方向を表示させることとして、内視鏡視野の妨げとならないように、内視鏡画面の外側の余白に表示することとした。また、位置表示の色を区別することで、観測対象が内視鏡視野内に含まれるか、内視鏡視野外にあるかが確認できる様に工夫した。また、位置表示を、内視鏡視野枠の任意の場所に表示することで、観測対象の視野内外での位置を直感的に把握できるよ

うにした（例えば、オレンジの三角が全周性に表示されたら観測対象物は視野の中央に存在、また青三角が2時の方向に表示されたら、視野外2時の方向に観測対象物が存在する、など）（図6）

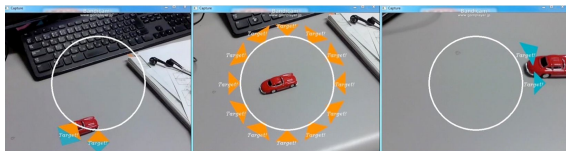


図6) 位置表示の工夫
オレンジ: 対象が円の内側にある(内視鏡画面内の指し示す方向にある)
青: 対象が円の外側にある(内視鏡画面外の指し示す方向にある)

次に、2.の問題解決のためには、基本となるナビゲーション自体の精度向上が必要と考えられた。そのためには、レジストレーションの精度向上が必須であり、術野に妨げにならないリファレンスマーカーを用いた、高精度のレジストレーション法を開発する必要があった。そこで、側頭骨頭蓋底手術時に邪魔にならない位置にリファレンスマーカーを付け、また術中にマーカーの位置がズレないようにするために、患者の上顎に合わせたマウスピースを作成し、マウスピースへリファレンスマーカーを取り付けることとした。さらに、マウスピースには、予めFiducial markerを複数個埋め込む工夫をすることで、術前にマウスピースを装着してCT撮影することで、術前にナビのレジストレーションまでが完了する（術前にマウスピースさえあれば患者に装着せずに完了する）ことができるように工夫した。（図7）



図7) レジストレーション用のマウスピース
マウスピースには、複数のFiducial markerが埋め込まれており、マウスピースをつけて術前CT撮影することで、手術前にレジストレーションが完了するメリットがある
右: マウスピース 中央: リファレンスマーカーを装着したところ 左: 患者に装着したところ

このレジストレーション方法を用いて、実際に顕微鏡下でのナビゲーション下手術を左頸静脈孔グロムス腫瘍に対して行った。術中、ナビの精度は想定したよりも非常に正確であり、比較的正確に観測対象物を指し示すことができた（術中の精度測定は未施行）。（図8）そのため、このレジストレーション方法は、ナビの精度を上げるのに非常に有用であることがわかり、当システムを含めて、AR技術を融合した内視鏡手術支援システムづくりを行うこととした。

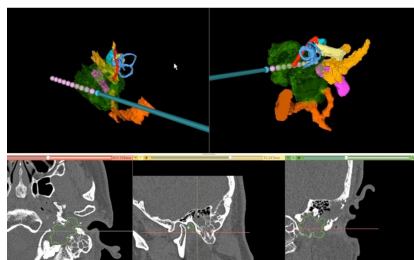


図8)
レジストレーション用のマウスピースを用いて、行った左頸静脈孔グロムス腫瘍の術中ナビゲーション画面。緑色は腫瘍の範囲を表示している。ナビのプロープは比較的正確に位置を表示できた。

今後は、マウスピースを用いてレジストレーションを行うことで精度を向上させたナビゲーションシステムをベースに、AR技術と内視鏡手術支援システムを統合した、新しい手術支援システムの構築を行った上で、精度検証を重ね、精度の高いシステムづくりを行っていく予定である。

また、当システムは、外耳道癌や真珠腫性中耳炎といった側頭骨外科手術への応用が期待される。そのため、代表的な2疾患の特異的な発現蛋白を同定し、術中標識して（標識方法は検討中である）内視鏡視野で確認できるようにすることで、さらに正確な外科的切除が可能となることが期待できる。そのため、予備実験として、外耳道癌患者の検体および、真珠腫の患者検体から抽出した核酸から、マイクロアレイおよび次世代シーケンサーを用いて特異的遺伝子発現や遺伝子変異の検索も同時に試みたが、まだ同定には至っていない。しかし、今後は、特異的な遺伝子発現・変異を同定することで、より正確な外科切除を可能とするシステムを構築していきたい。

現在、AR技術の外科手術への応用は、多くの研究施設で研究され始めている。耳鼻科領域での内視鏡手術へのAR技術の応用は、本研究が本邦ではさきがけであり、非常に耳鼻咽喉科領域への影響は非常に大きいと思われる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 9 件)

1. 小宗徳孝、碓絵馬、中川尚志、松本希、奇形のない人工内耳挿入困難例の術後原因解析. 第18回耳鼻咽喉科手術支援システム・ナビ研究会 2016年10月22日、神奈川県総合医療会館、横浜

2. 小宗徳孝、松本希、吉田崇正、中川尚志、経鼻的内視鏡下側頭骨錐体尖アプローチの微小外科解剖. 第118回日本耳鼻咽喉科学総会・学術講演会、2017年5月17日～20日、広島国際会議場、広島

3. 小宗徳孝、松島健、松尾諭、Sam Safavi-Abbasi、松本希、Albert L. Rhoton Jr., 頸静脈突起の微小外科解剖および画像解析. 第29回日本頭蓋底外科学会、2017年6月15日～16日、ホテルブエナビスタ松本、長野

4. 小宗徳孝、Byunghyun Cho、吉田崇正、松本希、中川尚志、当科で行っている外耳道癌手術におけるナビゲーションシステムの利用. 第19回耳鼻咽喉科手術支援システム・ナビ研究会 2017年10月21日、アクロス福岡、福岡

5. 小宗徳孝、ロートン微小解剖研究室で行った耳鼻咽喉科研究と今後の展望. Memorial meeting for Dr. Albert L. Rhoton、2016年9月29日、ホテル日航福岡、福岡

6. 小宗徳孝、側頭骨・聴覚路の微小解剖. 微小脳神経外科解剖セミナー、2017年1月28日、福岡大学、福岡

7. Noritaka Komune. Anatomy of Endonasal Transpterygoid Approach. Lecture at: 27th North American Skull Base Society (NASBS) pre-meeting course; 2017 March 1st-2nd; New Orleans, Louisiana

8. Noritaka Komune, Satoshi Matsuo, Miki Koichi, Albert L. Rhoton, Jr. Microsurgical anatomy of the jugular process: Cadaveric and Radiological study, 27th NASBS, 2017 March 3-5, New Orleans, Louisiana

9. Noritaka Komune, Satoshi Matsuo, Takashi Nakagawa, MICROSURGICAL ANATOMY OF THE FASCIAE ATTACHING TO THE SKULL BASE, 28th North American Skull Base Society (NASBS), 2018 Feb. 16-18, Coronado, California

〔図書〕(計 0件)

〔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: 無し

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小宗徳孝 (Komune, Noritaka)
九州大学 大学病院 助教
研究者番号: 80529884

(2) 研究分担者

松本希 (Matsumoto, Nozomu)
九州大学 大学病院 講師
研究者番号: 60419596

研究分担者

森恩 (Mori, Megumu)
九州大学・医学研究院 共同研究員
研究者番号: 90448415

(3) 連携研究者

()

研究者番号:

(4) 研究協力者

()

7. 引用文献

1. Bottrill ID, Poe DS. Endoscope-assisted ear surgery. Am J Otol. 1995 Mar;16(2):158-63. PubMed PMID:8572114.

2. Presutti L, Nogueira JF, Alicandri-Ciufelli M, Marchioni D. Beyond the middle ear: endoscopic surgical anatomy and approaches to inner ear and lateral skull base. Otolaryngol Clin North Am. 2013 Apr;46(2):189-200. doi: 10.1016/j.otc.2012.12.001. Review. PubMed PMID: 23566905.

3: Liu WP, Azizian M, Sorger J, Taylor RH, Reilly BK, Cleary K, Preciado D. Cadaveric feasibility study of da Vinci Si-assisted cochlear implant with augmented visual navigation for otologic surgery. JAMA Otolaryngol Head Neck Surg. 2014 Mar;140(3):208-14. PubMed PMID: 24457635.

4. Matsumoto N, Hong J, Hashizume M, Komune S. A minimally invasive registration method using surface template-assisted marker positioning (STAMP) for image-guided otologic surgery. Otolaryngol Head Neck Surg. 2009 Jan;140(1):96-102. PubMed PMID: 19130970.