

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 4 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24592158

研究課題名(和文)実・仮想両空間相互介入型の先進的ナビゲーション技術の開発

研究課題名(英文)Development of advanced and intuitive navigation system with communication between the real and virtual space

研究代表者

藤井 正純(Fujii, Masazumi)

名古屋大学・医学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：10335036

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、より直観的でわかりやすい先進的な手術ナビゲーションの開発を目的として、3Dバーチャル表示による理解しやすいナビゲーションを基軸として、さらに実空間情報と仮想空間情報を相互にやりとりしながら、刻々と変化する術野情報を反映する仮想的リアルタイム表示の実装を試みた。また、術前のシミュレーションからナビゲーションまで同一のプラットフォームを用いたシームレスな3Dバーチャル画像手術支援開発を行った。

研究成果の概要(英文)：In order to develop advanced and intuitive surgical navigation system, we have developed a 3D-virtual navigation system with a novel function, "interactively communication between the real space and the virtual space", providing virtual 3D-surgical field view during surgery in which anatomical information constantly varying as surgery goes. We have also tried to introduce a concept of a new image-guided surgical support platform seamlessly supporting preoperative surgical simulation and intraoperative navigation.

研究分野：脳神経外科学

キーワード：画像誘導手術 3D virtual image navigation simulation

1. 研究開始当初の背景

1980年代に登場した画像誘導手術は、現在まで発展・普及を続けており、近年各種画像診断技術の向上や、術中MRIの手術室への導入が各地で進むなど、画像誘導手術の役割が拡大している。ナビゲーション技術は、画像誘導手術の中核技術であり、近年脳神経外科のみならず多くの分野の手術で導入されている。画像誘導手術の更なる発展は、正確で安全な手術を提供するために極めて重要な役割を果たすと考えられ、現在から近未来の手術での応用の広がりや、さらには今後のロボット手術の発展のなかで重要な基盤となる。

現在のナビゲーションは、いったん手術が開始されると、手術操作によって対象となる解剖学的構造が変化しているにもかかわらず、画像情報が更新されることはない。術中MRIなど術中診断機器の登場によって術中の画像情報を更新することが可能になったが、あくまでも撮像時とその後の手術操作が加わった後の状態とが異なるという意味で、間欠的な情報の提供を行うにすぎず、手術の進行に伴って精度の低下を免れない。「画像誘導手術」は安全に手術を遂行するうえで、その精度の維持が本質的に重要であり、手術操作そのものの情報を画像に常時反映させることが求められる。

2. 研究の目的

本研究では、画像誘導手術のさらなる発展形として、実・仮想両空間相互介入型の先進的ナビゲーションを提案し、この開発を目的とした。すなわち、光学式・磁場式の両者に対応して連続的にトラッキングを行い、手術中に常時収集・集積され術者側に位置情報として提供された手術情報を、ナビゲーター側にフィードバックすることで、リアルタイムに骨組織、腫瘍組織などの切除情報として利用し、術前に撮像された画像に手術によってもたらされた情報を更に加えて、最も現実に即した画像を生成する(Interactive Navigation)。術者へは、3Dバーチャルイメージ等を用いて、より立体的で直観的な画像情報として提供する(3D Virtual Navigation)。さらに術中画像の利用を想定し、術中MRI画質のノイズ除去に関する技術開発を目指した。これは手術室のノイズ環境は通常の診断用MRI撮影室に比べて不利であり、術中MRI画像、特に臨床現場の低磁場装置においては、ノイズによる画質劣化がしばしばみられ、こうした画質劣化は術中MRIに基づく術中診断能に悪影響を与えるだけでなく、術中画像を用いたナビゲーション情報のアップデートにも影響を及ぼすからである。

3. 研究の方法

(1) 実空間 - 仮想空間相互介入型ナビゲーションの開発

頭蓋底腫瘍手術をモデルケースとして想

定して、3Dプリンターによる実体模型を作成し基礎技術開発を行った。これまで我々が開発してきた仮想化内視鏡システム(Virtual Surgiscope)を基にした脳神経外科手術支援システムを用いて、頭蓋底手術の3Dバーチャル画像を用いたシミュレーションおよびナビゲーションの開発を行った。

3Dモデルの出力

画像から抽出した領域を三角形ポリゴンの集合に変換しSTL形式のファイルとして出力した。STLファイルフォーマットは多くの3Dプリンタでサポートされており、作成したSTL形式のファイルを3Dプリンタ(Projet x60 3DSystems)に出力した。3Dバーチャル画像によるシミュレーション時に抽出した重要構造物と骨領域の情報を用いて、頭蓋底部の立体モデルを作成した。

3Dシミュレーション

本システムは医用画像からポリレンダリング法により3Dバーチャル画像を生成することが可能である。この時、腫瘍・血管・神経などの重要な構造物をあらかじめ抽出しておくことで、3Dバーチャル画像上で重要構造物を強調して表示した。さらに、このシステムは簡易的な切除シミュレーション機能を持つ。これらの機能を用いて、術前画像から3Dバーチャル画像を生成し、手術対象を様々な方向から観察するとともに頭蓋底部の骨切りのシミュレーションを行った。

3Dバーチャルナビゲーション(Interactive Navigation)

Virtual Surgiscopeに3次元位置計測装置を組み合わせることで、手術ナビゲーションを行った。また術具の位置情報を用いてナビゲーションの画像を更新するようプログラミングの改変を行った。光学式トラッキングシステムと磁場式トラッキングシステムの両者を用いて行った。

(2) 術中MRI画像のノイズ低減技術の開発

低磁場術中MRIをモデルとしてナビゲーション上で利用する画像のノイズ低減技術開発を行った。unbiased non-local means (UNLM) 3-dimensional filterを用いた画質改善を行い、術中画像中の皮質・灰白質、脳溝、浮腫、腫瘍輪郭等複数の指標を用いて、複数のエキスパートによる画質評価を行った。

4. 研究成果

(1) 実空間 - 仮想空間相互介入型ナビゲーションの開発

3Dシミュレーション

頭蓋底部の悪性脳腫瘍に対して3Dバーチャル画像を用いてシミュレーションを行った。3Dバーチャル画像によるシミュレーションの様子をFig.1に示す。図中の3Dバーチャル画像には腫瘍・動脈・視神経・骨が表示されている。作成した3Dバーチャル画

像を様々な位置や方向から観察するとともに頭蓋底部の骨切りシミュレーションを行った。視差を用いた立体表示は、込み入った解剖構造の把握に有用であった。視点位置を実際の手術を想定して設定し透過画像表示を行なうことで、動脈、神経などの重要構造物と腫瘍との位置関係を把握することが容易になり、安全かつ有効な骨きり線の位置決定が容易になった。また、切除術を仮想空間上でやり直すことも容易に行えるため、試行錯誤を行って術式の改善を行なうことが可能であった(図1)。

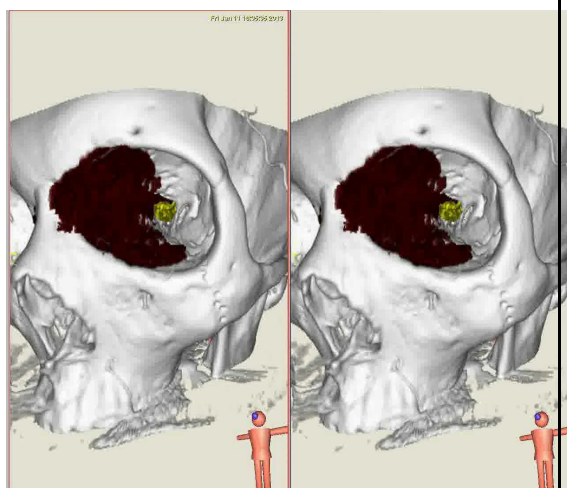


図1 3Dバーチャル画像によるシミュレーション

3Dバーチャルナビゲーション (Interactive Navigation)

3Dナビゲーションは、シミュレーションで行なった骨きりを参考として、実際の術野で上記諸機能(透過画像、視点位置の変更など)を利用しながら骨きりを行なうことが可能であった。術具の先端位置情報を連続的にトラックすることで、これを仮想空間上での骨切り操作として反映させることができた。実体模型上の骨切りに対して、ナビゲーション画像上の3Dモデルにおいても、同一の骨切りが表現されるため、従来のナビゲーションにない「仮想的な術野情報」の提供が可能となった。ナビゲーションの実効精度は1-2ミリであり、この誤差に伴い骨切りが正確に反映されない場合がある点に課題がなおあるが、術者の補助動作を入れることで実用上は大きな問題となることは少ないと判断された。実体模型を用いた手術ナビゲーションの様子を図2および図3に示す。

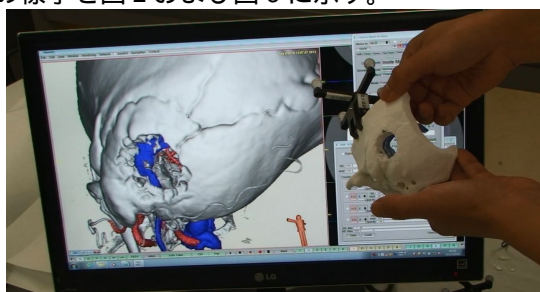


図2 Interactive Navigation (後頭蓋窩)
後頭蓋窩の開頭操作を実体模型上で行ないS状静脈洞を露出したところ。同時にナビゲーション画像上でも骨削除操作が反映されてS状静脈洞が露出している。



図3 Interactive Navigation (前中頭蓋底一塊切除)

前中頭蓋底一塊切除の際の骨きり操作を実体模型上で行なっているところ(右)。同時にナビゲーション画像上でも骨削除操作が反映されている(左)。

(2) 術中MRI画像のノイズ低減技術の開発

本法の使用によりシグナルノイズ比はこれを行なわない場合の二倍と有意な向上がみられ、各種所見の診断能の向上に繋がった。

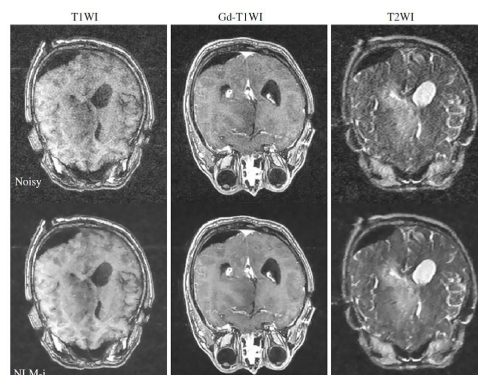


図4 術中画像のノイズ低減

ノイズの大きい術中画像(上段)とノイズ低減を行なった画像(下段)

(3) 研究成果の意義と評価

本システムは、特に難解な頭蓋底手術の骨きり線決定において術前の検討および術中の支援に有用である。今回の研究を通じてコンピュータ上の3Dバーチャルシミュレーションと実体模型を用いたシミュレーションの役割・特徴が明らかになった。すなわち、バーチャルシミュレーションでは、視点位置を自由に設定できることで、様々な角度から検討できること、透過画像を用いて、より深部の構造が確認できること、何度でも試行錯誤が可能であることなど特に手術計画の立案のプロセスで重要な役割を果たすと考えられる。一方、実体模型を用いたシミュレーションでは、実際の手術器具の使用や術者の手の動きなど、さらに実際の手術に即したシミュレーションが可能であり、バーチャルシミュレーションで提案した手術術式の実現可能性の検証にすぐれると考えられる。

さらに、3D バーチャルナビゲーションは、従来の2D表示だけでなく、術野に即した直観的な理解が容易で、様々な視点評価や、透過画像機能により術野の立体的で有機的な把握に役立つ。また、本課題で新たに開発を行なった Interactive navigation 機能では手術の進行に伴って仮想的な3Dイメージを提供することで、実際の術野とほぼ同一のイメージを提供するため、直観的理解が促進される。

こうした特徴から、Virtual Surgiscope は、従来のナビゲーションの概念を超えた、新規の手術支援プラットフォームへの発展が期待される。すなわち従来のナビゲーターが提供する2Dの3断面表示を行なう術中支援だけでなく、術前に3Dバーチャル画像を用いた手術シミュレーションで最適な手術アプローチの検討を行い、さらに同じデータ・セットを用いて3D実体模型でのアプローチの実現可能性を検証し、最終的に術中に3Dナビゲーションによる手術支援を行なう、シームレスな新世代3Dシミュレーション・ナビゲーション手術支援プラットフォームへの発展である。特に難解な手術において、かつ個々に症例に応じたテーラーメイドの手術術式を安全にかつ有効に行なう上で有用な手術支援ツールとなると期待される。

なお本課題の成果は、日本コンピュータ外科学会2013年度講演論文賞最優秀賞を受賞した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計4件)

1. Mizuguchi T, Fujii M, Hayashi Y, Tsuzaka M, Usability of Unbiased Non-Local Means for De-noising in Intraoperative Magnetic Resonance Imaging in Neurosurgery, International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, 9 891-903, 2014 査読あり

2. 藤井正純、前澤聡、林雄一郎、森健策、津坂昌利、若林俊彦、構造を可視化する術中画像支援技術の開発、脳神経外科ジャーナル、23 854-861、2014年 査読あり

3. Mizuguchi T, Fujii M, Hayashi Y, Tsuzaka M, Adapting Non-Local Means of De-noising in Intraoperative Magnetic Resonance Imaging for Brain Tumor Surgery, Radiological Physics and Technology, 7(1)124-132, 2013 査読あり

4. 林雄一郎、藤井正純、藤本保志、梶田泰一、若林俊彦、森健策、頭蓋底手術における3Dバーチャル画像と3Dプリンタにより造形された立体モデルによる手術支援の検討、日本コンピュータ外科学会誌、15 132 - 133、2013年 査読あり

〔学会発表〕(計17件)

1. 藤井正純、前澤聡、林雄一郎、吉田純、若林俊彦、構造を可視化する術中画像支援技術の開発、日本脳神経外科コンgres (招待講演) 2014年5月20~22日、大阪国際会議場(大阪府大阪市)

2. Mizuguchi T, Tsuzaka T, Fujii M, Evaluation of Noisy Intraoperative MR image Quality and Denoising using a Unbiased Non-Local Means Filter, Nagoya-Yonsei University Research Exchange Meetings on Health Science 2013, 3-5 November 2013, Wonju, Korea

3. 水口貴詞、藤井正純、林雄一郎、津坂昌利、若林俊彦、Non-Local Means Filterを用いた脳神経外科画像誘導手術における術中MR画像のノイズ除去、第41回日本放射線技術学会秋季学術大会、2013年10月17~19日、アクロス福岡(福岡県福岡市)

4. 藤井正純、林雄一郎、岩味健一郎、若林俊彦、困難な頭蓋底手術への挑戦 - 3Dバーチャルシミュレーション・3D実体模型シミュレーションそして3Dナビゲーションによる実践 -、日本脳神経外科学会代72回学術総会、2013年10月12~14日、パシフィコ横浜(神奈川県横浜市)

5. Fujii M, Hayashi Y, Iwami K, Wakabayashi T, Image-guided Skull Base Surgery with Advanced 3D Virtual Images, 15th Annual Conference of the Skull Base Surgery Society of India (招待講演), 5-6 October 2013, Chandigarh, India

6. Hayashi Y, Fujii M, Kajita Y, Wakabayashi T, Mori K, Skull Base Surgery Navigation System Based on Updating Preoperative Images Using Positional Information of Surgical Tools, MICCAI2013 workshop on Systems and Architectures for Computer Assisted Interventions, 22-26 September 2013, Nagoya, Japan

7. 水口貴詞、藤井正純、林雄一郎、津坂昌利、若林俊彦、Non-Local Means Filterを用いた脳神経外科画像誘導手術における術中MR画像のノイズ除去、第41回日本磁気共鳴医学会大会、2013年9月19~21日、アクティ徳島(徳島県徳島市)

8. 林雄一郎、藤井正純、藤本保志、梶田泰一、若林俊彦、森健策、頭蓋底手術における3Dバーチャル画像と3Dプリンタにより造形された立体モデルによる手術支援の検討、第22回日本コンピュータ外科学会、2013年9月14~16日、東京大学工学部二号館(東京都文京区)

9. 藤井正純、林雄一郎、岩味健一郎、若林俊彦、脳腫瘍・頭蓋底手術におけるナビゲーションの現在と未来 - 3Dシミュレーションから3Dナビゲーションまで -、第13回術中画像情報学会、2013年7月13日、山形国際ホテル(山形県山形市)

10. 水口貴詞、藤井正純、林雄一郎、津坂

昌利、中村徳人、若林俊彦、Non-Local Means Filter を用いた脳神経外科画像誘導手術における術中 MR 画像のノイズ除去、第 13 回日本術中画像情報学会、2013 年 7 月 13 日、山形国際ホテル（山形県山形市）

1 1 . 藤井正純、林雄一郎、岩味健一郎、若林俊彦、頭蓋底手術におけるナビゲーションの現在と未来 - 3D シミュレーションから 3D ナビゲーションまで - (招待講演)、第 25 回日本頭蓋底外科学会、2013 年 6 月 26~27 日、名古屋東急ホテル（愛知県名古屋市）

1 2 . Mizuguchi T, Tsuzaka T, Fujii M, Evaluation of Noisy Intraoperative MR image Quality and Denoising using a Unbiased Non-Local Means Filter, The 35th annual international conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC2013), 3-7 June 2013, Osaka International Convention Center, Osaka, Japan

1 3 . 藤井正純、林雄一郎、前澤聡、若林俊彦、安全で使いやすい画像誘導手術室の開発 - 中・低磁場および高磁場二つの術中 MRI 手術室の経験から -、第 22 回脳神経外科手術と機器学会、2013 年 4 月 12~13 日、長野県松本文化会館（長野県松本市）

1 4 . 水口貴詞、大久保翔平、津坂昌利、藤井正純、若林俊彦、Non-Local Means filter を用いた術中 MR 画像におけるノイズ低減法の物理的評価、第 69 回日本放射線技術学会総会学術大会、2013 年 4 月 11 日~14 日、パシフィコ横浜（神奈川県横浜市）

1 5 . 林雄一郎、藤井正純、梶田泰一、若林俊彦、森健策、手術ナビゲーションにおける術具位置情報を利用した術前画像の術中更新に関する検討、第 21 回日本コンピュータ外科学会、2012 年 11 月 2~4 日、あわぎんホール（徳島県徳島市）

1 6 . 藤井正純、林雄一郎、伊藤英治、藤本保志、岩味健一郎、森健策、亀井譲、若林俊彦、頭蓋底手術における 3D バーチャル画像の有用性 - シミュレーションからナビゲーションへ -、第 24 回日本頭蓋底外科学会、2012 年 7 月 11~12 日、東京ドームホテル（東京都文京区）

1 7 . 藤井正純、林雄一郎、伊藤英治、藤本保志、岩味健一郎、森健策、亀井譲、若林俊彦、頭蓋底手術における 3D バーチャル画像の有用性 - シミュレーションからナビゲーションへ -、第 12 回術中画像情報学会、2012 年 7 月 7 日、つくば国際会議場（茨城県つくば市）

6 . 研究組織

(1)研究代表者

藤井 正純 (FUJII, Masazumi)
名古屋大学・医学系研究科・助教
研究者番号：10335036

(2)研究分担者

森 健策 (MORI, Kensaku)
名古屋大学・情報連携統括本部・教授
研究者番号：10293664

(3)連携研究者 なし