

機関番号：17102  
研究種目：若手研究（A）  
研究期間：2008～2010  
課題番号：20680029  
研究課題名（和文）直感的インタフェースを有する臨床使用に適した手術ナビゲーションシステムの開発  
研究課題名（英文）Clinically easy-to-use surgical navigation with intuitive user interface  
研究代表者 洪 在成（Jaesung HONG）  
九州大学・先端融合医療レドックスナビ研究拠点・准教授  
研究者番号：70404043

## 研究成果の概要(和文)：

3次元立体画像の提示、カラーを用いた位置合わせ誤差の表示、拡張現実と仮想現実を同時に用いた画像表示を可能にした手術ナビゲーションシステムを開発し、多数の臨床応用を行った。従来の平面的情報表示方式を脱し、対象の3次元位置関係を直感的に表示するとともに、臨床時に必要な精度と位置トラッキングの安定性が確保できる手術ナビゲーションシステムを開発し、その成果を多数の論文で発表した。

## 研究成果の概要(英文)：

Surgical navigation assists in endoscopic surgeries by enabling surgeons to see concealed lesions and surrounding organs. Successful surgical navigation depends on accurate registration between a medical image and a patient. In this study, 3-D intuitive display, color-based accuracy display, augmented and virtual reality navigation techniques were proposed. The efficiency of the described tool in terms of the registration accuracy and time has been confirmed in more than 70 clinical applications. The achievements were also published in several journals and proceedings.

## 交付決定額

(金額単位:円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	8,500,000	2,550,000	11,050,000
2009年度	6,500,000	1,950,000	8,450,000
2010年度	4,100,000	1,230,000	5,330,000
年度			
年度			
総計	19,100,000	5,730,000	24,830,000

研究分野: 医用システム

科研費の分科・細目: 1302

キーワード: 手術ナビゲーション・レジストレーション・内視鏡画像重畳・手術支援

### 1. 研究開始当初の背景

手術ナビゲーションとは、直視では認知できない病変部と術具の位置関係を、virtual 或いは augmented reality の形で提示することによって、病変部への正確なアプローチを実現する最先端の手術支援技術である。術者の感覚、経験、術前画像に頼った従来の手術に比べ、精確で安全な手術が行え、1990 年後半にアメリカを中心に臨床で初めて導入されたこの技術は、現在日本にも普及しつつあり、平成 19 年 9 月 1 日厚生労働省が指定した日本の先進医療の項目にも頭頸部ナビゲーションが設けられている。

しかし、国内外で用いられている手術ナビゲーションシステムは、病変と術具の位置情報の提示方法が直観的でないため、それを理解するまで術者の「慣れ」が必要となる。また、位置あわせ精度が 2-4mm 以上と大きく、術具の安定的位置トラッキングが保障できないため、外科手術全般には普及せず、一部の診療科と症例に局限された使用となっているのが現状である。

### 2. 研究の目的

本研究では臨床側のニーズに充実に応えられる新しい手術ナビゲーションシステムを開発、日本と世界に普及させる。従来の平面的情報表示方式を脱し、対象の3次元位置関係を直感的に表示するとともに、臨床時に必要な精度と位置トラッキングの安定性が確保できる手術ナビゲーションシステムの開発とその応用を目的とする。

### 3. 研究の方法

病変に対する術具の位置を表示するために、医用画像と位置センサの座標系を統一させなければならない。これをレジストレーションと言い、全体ナビゲーションの精度を決めるに重要な作業である。これまで、皮膚にマーカを貼り付けて CT を撮影し、マーカの点を基準にレジストレー

ションを行う paired point 法や、レーザーで皮膚表面の形状をスキャンし、画像と合わせる surface matching などが用いられてきたが、皮膚の変形及び最適化処理時の local minimum 問題などにより、臨床に必要な十分な精度が得られていない。そこで、本研究ではそれぞれの長所を生かしたハイブリッド式レジストレーション法を開発、精度を確保する。

また、従来のナビゲーションは、主に対象の垂直2断面、水平1断面を表示することで、現在の術具の位置を示していたが、この表示は直感的でなく、術者は自分の頭の中で、3次元位置関係を再構成しなければならない。アメリカのハーバード医学部と Brigham and Women's Hospital が共同で開発した 3D Slicer ソフトは、直感的3次元表示が可能だが、このソフトは、FDA の承認を受けていない研究用ソフトであって、処理速度が遅く、臨床使用に十分な安定性が確保できていない。また、操作方法が難しく、エンジニアでなければ、その機能を十分に活用できないため、医師主導の日常的な臨床使用に適していない。本研究では、エンジニアでない医療スタッフが一人で簡単に操作できる直感的インタフェースを有し、臨床使用に支障のない処理速度と動作の安定性が保障される新しい手術ナビゲーションシステムを開発する。

### 4. 研究成果

(1) MRI と超音波を同時に用いた腹部手術用ナビゲーションシステムの開発と臨床応用

腹部は呼吸、拍動の影響を受けやすく、軟性組織の変形が起こるため、手術ナビゲーションの適用が制限される。本研究では MRI と超音波を併用することにより、MRI の高画質及び3次元撮影機能を生かしながら、MRI で不十分なリアルタイム情報を補う腹部用手術ナビゲーションシ

システムを開発した。術前 MR 画像と術中超音波画像の位置合わせを行うために、超音波プローブまたは、穿刺針に光学式位置センサのマーカを取り付ける。また、患者の体表には MRI 用マーカを貼り付ける。その後、現在のプローブまたは針の位置を MR 画像座標に登録するレジストレーションを行う。MR 画像上で、また位置センサによって測定された患者体表のマーカの座標を持って、特異値計算法により、最もレジストレーション誤差 (FRE) が少ない対応関係を自動的に算出する。

提案した方法により、超音波画像と同一な位置と方向の MR 画像が合成・提示され、病変部と針との3次元位置関係が把握できた。ファントムを用いた穿刺実験の精度は約2mm、豚を用いた動物実験では約3mm であった。また、5例の肝臓がんエタノール注入治療に用いられ、その有用性が示された。

#### (2) 3次元リアルタイム動き補正機能を有する耳科ナビゲーションシステム

手術ナビゲーションは、微小な解剖を理解し、精密な動作が要求される耳鼻科領域の手術において早くから導入されてきた。特に耳科手術においては、患者の頭部を圧迫したり、患者の姿勢を変えたりする動作が頻繁にあるが、その結果、最初に行ったレジストレーションがずれてしまうことがある。本研究では、上顎固定式のマーカを用い、位置センサにより患者頭部の動きを検知、追従する。本システムは、3次元画像データを操作することなく、術具の相対的位置を計算し、表示することにより、3次元リアルタイム更新を実現した。

#### (3) 3D Slicer の画像フュージョンを用いた脳外科手術ナビゲーション

近年、脳神経外科手術においてナビゲーションシステムを用いることはごく一般的となってきた。特に頭蓋底病変手術において有用性が高いことは周知の通りである。今回は下垂体腫瘍での経蝶形骨洞的腫瘍摘出術を例にとり、CT と MR 画像のフュージョンの上、手術ナビゲーションを行った。またオープンソースソフト 3D

Slicer と商用のナビゲーションシステムを同時に使用して比較検討を行った。

3D Slicer の画像の方が立体的位置関係を把握することができ、今までの商用ナビゲーションより正確な印象であった。誤差も Fiducial Registration Error が 1.80mm と使用に耐えうるものであった。また CT と MR の自働個体レジストレーションによるフュージョンは 2 回うち 1 回は成功し、一回は手動操作で両画像をフュージョンさせた。自動フュージョンの失敗は MR と CT 画像のずれが大きかったことが原因と考えられる。1 回目の症例では、CT だけでは明瞭な確認が難しい腫瘍と頸動脈を、MR 画像を用いて表示することができ、手術の安全に有用であった。

下垂体腫瘍の手術は以前まで顕微鏡と C-arm を用いて行っていた。神経内視鏡が普及してからは、顕微鏡よりも断然視野が広いこと最近ではほとんどが内視鏡主体の手術となってきた。しかし内視鏡画像は2次元のため、奥行きを把握するにナビゲーションの役割は非常に大きいと考える。

特に 3D slicer では腫瘍と血管の立体像と手術器具先端の位置関係を明確に把握することができた。また、任意の断面を様々な角度から表示することができ、非常に有用であった。

#### (4) マウスピース型レジストレーション用テンプレートを用いた手術ナビゲーション

動き追従用のレファレンスとレジストレーション用のマーカを一体化し、術中のレジストレーション作業を必要としない手術ナビゲーションシステムを開発した。レジストレーション用金属マーカを埋め込んだマウスピースを患者の歯型に合わせて制作する。このマウスピースに患者の動きをトラッキングするためのレファレンスマーカを一体化させる。CT 撮影後、手術開始前にマウスピースを用いてレジストレーションを行う。術中にはマウスピースを装着するだけでナビゲーションを開始できる。本ナビゲーションシステムは、各 1 例ずつの下顎骨、上顎骨に対するインプラント手術に適用し、有用性を検証した。

術中のレジストレーション作業が不要となり、患者の入室後、待ち時間なしで手術ナビゲーション

ンが開始できるが、実際は位置ずれを直すために入室後に再度レジストレーションを行った。しかし所要時間は 10 分以内であった。2 例ともに神経など他の組織への損傷なく安全にインプラントの埋め込みができた。下顎の場合、下顎神経までの安全距離における誤差は術後レントゲン写真との比較で約 0.46mm と推定された。レジストレーション用マーカと動き追従用レファンランスを一体化したマウスピースを用いることで、術前の画像と患者とのレジストレーションが可能であることがわかった。ただしマウスピースの着脱の際、位置の完璧な再現は難しく、誤差の原因となりうることもわかった。

#### (5) 内視鏡画像重畳手術ナビゲーションの精度評価及び臨床応用

低侵襲治療のための内視鏡手術は近年普及しつつある。しかし内視鏡手術は術者の視野が制限されることや術者の動作範囲が制約を受けるなどの問題がある。また2次元モニタを用いて体内の3次元空間を理解し、手術操作を行わなければならないことは、直視下手術に比べ不利なことであり、その環境に慣れるまで術者は多くの経験とトレーニングが必要となる。最近では拡張現実 (Augmented Reality :AR) 技術が導入され、不足しがちな視覚情報を補うことができるようになった。この技術によって臓器内部に位置する腫瘍及び傷つけてはいけない血管などの情報を内視鏡画像に重畳して表示することができる。しかし主に2次元画像を用いる従来のナビゲーションに比べ、カメラキャリブレーションの影響を受けるなどの理由により、十分な精度が得られなかった。そこで、本研究では画像重畳手術ナビゲーションシステムを構築し、多様な条件下で精度を比較検討するとともに、開発したシステムを耳鼻咽喉科の手術に適用し、臨床使用に対する可能性を調査した。

これまでの臨床応用で得られた位置あわせ精度 (FRE、理論値) を下記の表で示す。

**Table 1** Registration error in clinical applications

	Liver tumor ablation	ENT surgery	Tooth implant
FRE (mm)	3.55 ± 1.30	1.28 ± 1.09	0.71 ± 0.48

ENT ear, nose, and throat; FRE fiducial registration error

Mean ± standard deviation

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 9件)

① Sungmin Kim, [Jaesung Hong](#), Sanghyun Joung, Atsushi Yamada, Nozomu Matsumoto, Sun I. Kim, Young Soo Kim, Makoto Hashizume, Dual Surgical Navigation using Augmented and Virtual Environment Techniques, International Journal of Optomechatronics (accepted, 2011)

② Tomikawa M, [Hong J](#), Shiotani S, Tokunaga E, Konishi K, Ieiri S, Tanoue K, Akahoshi T, Maehara Y, Hashizume M, A real-time three-dimensional virtual reality navigation system with open magnetic resonance imaging for breast-conserving surgery, Journal of the American College of Surgeons, 210(6):927-33, 2010

③ [Hong J](#), Hashizume M, An Effective Point-based Registration Tool for Surgical Navigation, Surgical Endoscopy, 24(4):944-948, 2010

④ [Hong J](#), Matsumoto N, Ouchida R, Komune S, Hashizume M, Medical navigation system for otologic surgery based on hybrid registration and virtual intraoperative computed tomography, IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 56(2):426-432, 2009

⑤ 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, Otolaryngology - Head and Neck Surgery, 140(1):96-102, 2009

⑥ Matsumoto N, [Hong J](#), Ono H, Sugiyama H, Hashizume M, Komune S, The Stamp Registration Method for Image-Guided Otologic Surgery, OTO-RHINO-LARYNGOLOGY TOKYO, 51(5):338-342, 2008

⑦ Maeda T, Hong J, Konishi K, Nakatsuji T, Yasunakga T, Yamashita Y, Taketomi A, Kotoh K, Enjoji M, Nakashima H, Tanoue K, Maehara Y, Hashizume M, Tumor ablation therapy of liver cancers with an open magnetic resonance imaging-based navigation system, Surgical Endoscopy, 23(5):1048-53, 2009

⑧ Hong J, Matsumoto N, Ouchida R, Komune S, Hashizume M, 3-D Real-time Navigation System for Ear-Nose-Throat Surgery, IEEJ Sensors and Micromachines, E-128(10):383-388, 2008

⑨ Hong J, Matsumoto N, Komune S, Hashizume M, Application and Prospect of Computer-aided Surgery in Otology, Otology Japan, 18(3):165-169, 2008

[学会発表] (計 7 件)

① Hong J, Tomikawa M, Konishi K, Hashizume M, Open MRI Guided Surgical Navigation for Liver Tumor Ablation Therapy, Proc. of 6th URAI, pp69-70, 2009

② Hong J, Matsumoto N, Komune S, Hashizume, Comparison of Registration Methods for Ear-Nose-Throat Surgical Navigation, Proc. of the 5th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI 2008), pp555-558, 2008

③ Hong J, Matsumoto N, Ouchida R, Komune S, Hashizume, An optimally designed surgical navigation system for otologic surgery, CARS2008, Int J CARS 3(Suppl 1), S251-S252, 2008

④ 洪 在成, 大内田 理一, 橋爪 誠, マウスピース型レジストレーション用テンプレートを用いた手術ナビゲーション, 第 9 回日本脳神経外科術中画像研究会抄録集, pp32, 2009

⑤ 洪 在成, 橋爪 誠, レドックスイメージングを用いた低侵襲治療システムの開発, 第 62 回日本酸化ストレス学会学術集会抄録集 pp41, 2009

⑥ 洪 在成, 大内田 理一, 橋爪 誠, 術中レジストレーションを必要としない歯科インプラント

ナビゲーション, 第 3 回Open MRI研究会抄録集 pp15, 2009

⑦ 洪 在成, 松本 希, 松井 仁, 小宗 静男, 橋爪 誠, 耳科手術ナビゲーションのための高精度無被曝レジストレーション, 日本コンピュータ外科学会誌, vol. 9(3), pp411-412, 2008

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

洪 在成 (Jaesung HONG)

九州大学・先端融合医療レドックスナビ  
研究拠点・准教授

研究者番号: 70404043

### (2)研究分担者

研究者番号:

### (3)連携研究者

研究者番号: