OpenMRI 下脳外科手術におけるナビゲーションシステムの精度 および操作性向上に関する研究

Accuracy Evaluation of Navigation System During Neurosurgery at Open MRI Theater and Improvement of its Maneuverability

長嶋義昭^{a*}, 廣瀬佐智雄^a, 鈴川浩一^b, 苗村潔^c, 高信英明^d

村垣善浩^e, 伊関洋^e, 梅津光生^a, 高倉公朋^e

^a 早稲田大学大学院理工学研究科・生命理工学専攻 ^b インフォコム株式会社

^c 東京工科大学バイオニクス部 ^d 工学院大学工学部機械システム工学科

^e 東京女子医科大学大学院先端生命医科学研究所・先端工学外科学分野

Yoshiaki Nagashima^a, Satio Hirose^a, Kouichi Suzukawa^b, Kiyoshi Naemura^c, Hideaki Takanobu^d,
Yoshihiro Muragaki^e, Hiroshi Iseki^e, Mituo Umezu^a, Kintomo Takakura^e

^a Department Integrative Bioscience and Biomedical Engineering, Waseda University

^b Infocom Co. Ltd cSchool of Bionics, Tokyo University of Technology

^d Department of Mechanical Systems Engineering, Kogakuin University

^e Faculty of Advanced Techno-Surgery, Institute of Advanced Biomedical Engineering & Science, Tokyo
Women's Medical University

Abstract

The reflective ball marker has the combined function of conventional operation marker with function of reflective ball can be recognized by optical position measuring equipment. Then, automatic registration became possible to eliminate artificial operation. Consequently, preparation time was decreases, and accuracy became much improved.

Key words

Reflective ball marker, Automatic registration, Preparation time, accuracy.

1. はじめに

1.1 背景

東京女子医科大学の脳外科手術では、手術室に OpenMRI（日立メディコ製 AIRIS II）を導入したことで術中画像の取得が可能となり、さらにナビゲ-

ーションシステムと併用することで腫瘍摘出率が飛躍的に向上した¹⁾。このナビゲーションシステムは光学式カメラ（NDI 社製ポラリス）が搭載されており、患者頭部に設置したマーカを用いて画像-患者空間のレジストレーションを行なっている。このマーカ位置がレジストレーション後にずれると、ナビゲーションの精度に問題が生じる²⁾³⁾⁴⁾。当初ドーナツ型のマーカ（マルチモダリティマーカ；千代田テクノル）を患者皮膚に貼り付けていたが、術中に皮膚が動いてしまい、マーカ位置のナビゲーション誤差が 3 mm を超える場合はナビゲーションの使用を中断していた。そこでマーカ位置が動かないように、開頭した

* 早稲田大学大学院理工学研究科生命理工学専攻梅津研究室

〒169-8555 新宿区大久保 3-4-1

umezu@waseda.jp

受付 2003 年 12 月 1 日；採択 2004 年 2 月 27 日

領域の骨上に設置できるようなマーカが開発され、現在ではマーカ位置でのナビゲーションシステムの誤差を 1 mm 以下まで目指せるようになった⁵⁾。

現状のレジストレーション方法の操作性および精度に関する問題点として下記が挙げられる。

操作性の問題点：

- ① マーカ画像 (φ5 mm の球) がノイズと間違えやすく、また皮膚と近接した位置に貼り付けた時にマーカと判断しにくく、画像からのマーカ探索が困難な場合がある。
- ② レジストレーション時に、骨に設置した複数個のマーカと画像上マーカとの位置の対応が判断しにくく、マーカの番号付け (マーキング) をやり直す場合がある。
- ③ 画像からのマーカの探索や番号付け、レジストレーション作業に 5 ～ 30 分近くかかることがあり、手術の妨げになる場合がある。

誤差の問題点：

- ① 画像からマーカを探索するときに、正しいマーカ中心位置からずれたところを登録してしまう。
- ② 術者が患者上のマーカをボラリスで認識できるポインタ (Fig. 1) で指すときに、マーカの中心からずれたところを指してしまう。

1.2 研究目的

レジストレーション時の人の操作に起因する操作性および精度に関する問題を軽減させることを目的とする。その方策としてマーキングおよびレジストレーション作業をハードウェア・ソフトウェアによって自動化する機能 (反射球マーカおよび自動レジストレーション) の開発および評価を行なう。

Fig. 1 pointer.

2. 反射球マーカおよび自動レジストレーション機能の構成

2.1 要求仕様

2.1.1 ナビゲーションシステムの構成

東京女子医科大学で使用しているナビゲーションシステムはソフトウェアを実装するためのパーソナルコンピュータ (PC)、撮影画像の表示を行なう表示装置、患者上で術者が示した位置を計測するための光学式位置計測装置 (NDI 社製ボラリス) で構成されている。これらは運搬台に設置し一体化している (Fig. 2)。

また、光学式位置計測装置で位置を計測するために術者が使用するポインタやレジストレーションをするための患者に設置するマーカ (Fig. 3) がシステムの主な構成である。

ポインタには位置計測用反射球 (3 個) が付いており、光学式位置計測装置から発した光が反射して再びカメラが受け取ることによって位置計測用反射球の位置を求めている。

東京女子医科大学の脳腫瘍摘出手術で使用しているマーカは、中に直径 5 mm の球状のゲル状造影剤が封入されており、術野付近の頭蓋骨に設置し MRI

Fig. 2 Navigation system.

撮影 (Fig. 3 破線丸) を行なうと撮影画像にはマークが円形に映る。Fig. 3(a) の丸で囲ったものが球状のマークである。

2.1.2 反射球マーク設計コンセプト

マークとして、以下の条件を満たす必要がある。

- ① 内側に造影剤を入れる球形の空洞を設ける。
- ② 位置計測用反射球の機能として、以下の条件を満たす。
 - a. 直径を位置計測用反射球と同じ 11.04 mm とする
 - b. 外側に反射膜を配置する
 - c. 光学式位置計測装置で使用が可能
- ③ マークの中心位置と反射球の中心位置を使ってレジストレーションを行なうため、反射球マークの中心位置と空洞の中心位置を一致させる。
- ④ 射球マークを患者に設置して MRI 撮影を行なうため、非磁性体の材料を使用する。

2.2 反射球マーク

仕様を満たすよう下記の通り設計した (Fig. 4)。

(1) 反射球マークの樹脂ベース

反射球マークの外形は、反射球と同じ外形とした ($\phi 11.04$ mm の球体)。球形の空洞の大きさは、現在東京女子医科大学のナビゲーション手術で使用されているマークが直径 5.0 mm なので、MRI の撮影画像上でのマーク確認を容易とするため直径 8.0 mm とした。液状造影剤を中に入れるための注入口を設けた。

(2) 反射膜

反射球マークの樹脂ベースのまわりに光学式位置計測装置で認識可能な反射膜を貼り付けた。

(a) The marker installed in the patient head

(b) MRI photography picture

Fig. 3 The marker and photography picture which were installed in the patient head.

2.3 自動レジストレーション

2.3.1 画像からのマーク自動探索

(1) 三次元ラベリング方による領域抽出

画像からマークを自動抽出するために、画像上のマークの画素値から画像の 2 値化によって領域の抽出を行ない、次に三次元ラベリング方により領域のラベル付けを行なうことにしている。

Fig. 4 Structure of reflective ball marker.

(2) 体積・形状による領域のふり分け

次に、三次元ラベリング方により抽出した領域からマーカであると思われるものを、領域の体積や形状によりふり分けている。

i) 体積によるふり分け

体積によるふり分けでは反射球マーカの空洞(直径 8.0 mm)の体積の 0.5 倍から 1.5 倍の範囲に含まれるものをマーカと判断している。

ii) 形状によるふり分け

体積によるふり分けでは細長い領域や平たい領域をマーカとして判断してしまうため、領域の X 軸方向の長さ、Y 軸方向の長さ、Z 軸方向の長さを求め、この長さが反射球マーカの空洞の直径 0.5 倍から 1.5 倍の範囲に含まれるものをマーカと判断している(0.5 ~ 1.5 倍の範囲は、ほぼ毎回探索が成功する値を試行錯誤的に導出した)。

(3) 領域の重心の計算

次にふり分けによりマーカと判断した各領域に対して重心を計算し、その位置をマーカ位置としている。

2.3.2 自動レジストレーション

(1) 患者上のマーカ位置自動探索

マーカに備えた位置計測用反射球の機能を使うことで、位置計測装置から各反射球マーカの中心位置を自動的に取得できるようになっている。

(2) 自動レジストレーション

i) 画像上のマーカ位置と位置計測装置により取得した患者上のマーカ位置を使用して、患者空間から画像空間への写像関数を求めている。患者上のマーカの位置を P_i ($i = 1 \sim$ マーカ数)、画像上のマーカの位置を Q_i ($i = 1 \sim$ マーカ数) としたとき、

$$\sum_i |f(p_i) - Q_i| \quad (|a| \text{ は } a \text{ の長さ})$$

を最小とする関数 f が求めるべき写像関数である。

ii) 誤差計算アルゴリズム

ナビゲーションシステムの誤差として平均誤差・最大誤差を表示している。特にナビゲーションシステムの精度を示すときは最大誤差を使用している。

患者空間から画像空間への写像関数を f 、患者上のマーカの位置を P_i ($i = 1 \sim$ マーカ数)、画像上のマーカの位置を Q_i ($i = 1 \sim$ マーカ数) としたとき、

$$\text{平均誤差} = \sum_i |f(p_i) - Q_i|$$

$$\text{最大誤差} = \max(|f(p_i) - Q_i|)$$

と定義している。

3. ナビゲーションシステムの操作性評価

3.1 反射球マーカおよび自動レジストレーション機能動作確認

3.1.1 方法

健康成人男子 6 名(平均年齢 30 歳)に実験の主旨を口頭および文書で説明した上で了承を得て、それぞれの頭部に反射球マーカを 3 個設置した台座(6.0 × 5.0 × 1.0 cm のアクリル板)を取り付け、MRI 撮影を行なった (Fig. 5)。

それぞれの頭部画像に対して、自動マーカ探索、自動レジストレーション、およびナビゲーションを行なった。

3.1.2 実験結果

自動マーカ探索の実験結果を Table 1 に示す。被験者 A, B, C については 3 個のマーカを自動探索できた。正しく探索できたマーカは Fig. 6 に示すように画像上で円状に映っている。白い破線丸で囲っているものがマーカである。

しかし、被験者 D では 2 個のマーカしか探索できなかった。これは、Fig. 7 に示すように欠けた部分のある撮影像であったためと考えられる。

また被験者 E も 2 個のマーカしか探索できなかった。これは Fig. 8 に示すようにマーカが円状に映っているが、マーカの画素値に近いものがマーカに接しているため、領域抽出のときにマーカの画素値に比較的近いものがマーカと一体となって抽出され、

Table 1 Automatic marker search result.

Subject	The number of markers for which it was searched
A,B,C	3
D,E	2
F	4

Fig. 5 Reflective ball marker installation state.

体積でのふり分けでマーカでないと判断されていた。

被験者 F では脳の一部をマーカとして判断したが (Fig. 9), 自動レジストレーションの際に反射球マーカの位置関係 (本実験では 4, 5, 6 cm の直角三角形) から画像上のマーカを決定しているため, 必要なマーカ探索が成功していれば, レジストレーションに影響は無いと考えられる。本実験ではマーカと判断した 4 つの中から 4, 5, 6 cm の三角形の位置関係にある 3 つのマーカの間でレジストレーションができた。

3.1.3 考察

(1) 反射球マーカの位置計測用反射球機能

レジストレーションにおいて反射球マーカの位置を位置計測装置で求められたため, 反射球マーカは位置計測用マーカとして使用できると考えられる。

(2) 反射球マーカの使用方法の検討

マーカが円状に映らない原因として, 造影剤の量が少ない場合や気泡, ゴミの混入によって造影剤が反射球マーカの球状の空洞全体に注入されていない場合があった。また造影剤の注入を繰り返すうちに, 中に残った少量の造影剤が乾燥し, 固まって中にこびりついてしまう問題が生じた (Fig. 10)。解決策としては, 液状造影剤を毎回注入する構造から, ゲル状造影剤をあらかじめ密封しておく構造に変更することで, 常に同じ形状の撮影像を得られるようにすることを考えている。

3.2 ナビゲーション準備時間の測定

3.2.1 方法

手術マーカと反射球マーカに対してナビゲーション準備時間 (MRI 画像からのマーカ探索+マーキング作業+レジストレーション作業にかかった時間)

Fig. 6 A : The marker for which it has searched.

Fig. 8 E : The marker for which it has not searched.

Fig. 7 D : The marker for which it has not searched.

Fig. 9 F : A brain is judged to be a marker.

を Fig. 11 の状態で測定する。

3.2.2 実験結果および考察

ナビゲーション準備時間の測定結果を Table 2 に示す。手術マーカを使用した場合は 120 秒かかったのに対し、反射球マーカを使用した場合は約 50 秒であった。画像からのマーカ探索および患者上のマーカ位置の検出・レジストレーションを自動的に行なうため、人による作業が減少し操作性向上が図れたと判断できる。

4 ナビゲーションシステムの精度評価

手術マーカと反射球マーカの精度に関する評価を行ない、反射球マーカを用いることでどれだけ精度が向上するか検討する。

4.1 手術マーカと反射球マーカの製作精度

手術マーカおよび反射球マーカの製作方法、材質、製作誤差は下記①、②の通りである。

①手術マーカ（撮影用とレジストレーション用）

製作方法：切削

材質：ポリイアミド

製作誤差：0.2 mm 以内

②反射球マーカ

製作方法：光造形

(a) CT photography state

(b) CT photography picture

Fig. 10 Dirt inside a reflective ball marker.

Table 2 Navigation preparation time measurement result.

maeker	Preparation time (sec)
Conventional marker	120
Reflective ball marker	48

材質：アクリル・エポキシ系樹脂

製作誤差：0.1 mm 以内

マーカ個々の製作精度に関しては、差異がほとんど無く、反射球マーカのほうが若干（およそ 0.1 mm）良い程度だが、手術マーカは撮影用マーカとレジストレーション用マーカの 2 種類（Fig. 12）を作業ごとに付け替えるため、最大で 0.4 mm 近くの誤差が生じる可能性がある。

(a) Photography state

(b) MRI photography images

Fig. 11 A marker installation state and an MRI photography picture.

4.2 MRI 撮影画像の比較 (T1/T2)

手術マーカと反射球マーカの MRI 撮影像を Fig. 13 に示す。手術マーカの中には直径 5 mm の球形のゲル状造影剤が封入されており、反射球マーカの中には液状造影剤が直径 8 mm の球形に満たされるように設計されている。画像のコントラストをそれぞれ調節することで、どちらも設計通りの撮影像が得られている（撮影像の球の直径誤差は、画像解像度約 0.8 mm/1 pixel 以内である）。

4.3 ナビゲーション誤差の比較

4.3.1 方法

同一平面上で 40, 50, 60 mm の三角形となるようにマーカ 3 個を配置し、レジストレーションした時のナビゲーション誤差（マーカ 3 点の画像と実際の位置とのずれの平均値と最大値（2.3.2(2)ii）誤差計算アルゴリズム参照）を 20 回測定する（Fig. 14）。

本実験は、マーカ撮影および画像上のマーカ探索作業（手術マーカは人の操作によって探索、反射球マーカは自動探索機能使用）後、同じ登録条件を用いてレジストレーション作業を 20 回繰り返した。

4.3.2 結果

測定結果（Fig. 15）より、マーカのナビゲーション

[ウェルチの t 検定]

帰無仮説：マーカ間の誤差に有意差は無い

対立仮説：手術マーカは反射球マーカの誤差より大きい

統計量 T , 自由度 f , 有意確立 p , 有意水準 $\alpha=0.05$

平均誤差 ($T=6.7572$, $f=19.0097$, $p=9.3370E-07$),

最大誤差 ($T=8.1635$, $f=19.003$, $p=6.1962E-8$)

どちらも共に有意水準 > 有意確立

よって帰無仮説を棄却し、対立仮説を採択

有意水準 0.05 で、手術マーカのナビゲーション誤差は新反射球より大きいといえる。

ン誤差（20 回平均値）は、手術マーカ：平均値 0.45 mm, 最大値 0.85 mm, 反射球マーカ：平均値 0.24 mm, 最大値 0.39 mm であり、反射球マーカによって精度が向上したといえる（20 回平均で、平均値 0.21 mm, 最大値 0.46 mm 向上した）。

4.3.3 考察

4.3.1 でナビゲーション誤差を 20 回測定したが、反射球マーカは測定値のバラツキがほとんどなかったのに対し、手術マーカは測定値が大きくばらついた（測定値の標準偏差は、反射球マーカ：平均値 0.002 mm, 最大値 0.002 mm, 手術マーカ：平均値 0.14 mm, 最大値 0.251 mm）。測定に用いたマーカおよびマーカ撮影像は同じものを使用したもので、測定値がばらついた要因は測定ごとにポイントをマーカに指し直したことによってポラリスとポイントの位

Fig. 12 Conventional marker.

Fig. 13 Marker MRI photography picture.

(a) Marker position

Fig. 14 Navigation accuracy measurement state.

置関係が変化したと考えられる (Fig. 14(b)). このことから反射球マーカを用いることで、従来のナビゲーションシステムに生じていた人為的な作業（ポインタを指す作業）による誤差を無くすことができ、システムの精度を向上させることが可能と言える。

5. まとめと展望

反射球マーカおよび自動レジストレーション機能を開発したことにより、東京女子医科大学で現在使用している脳外科手術用ナビゲーションシステムのレジストレーションにかかる操作時間を短縮させ、ナビゲーション精度を向上させることが可能となった。またレジストレーションに必要なポインタがいなくなるので、部品点数を減らせること、マーカ探索作業およびレジストレーション作業が自動化されるので、オペレータが初心者でも扱いやすく

Fig. 15 Navigation error measurement result.

なるなどの利点があげられる。また、一度レジストレーションを行なった後にカメラないし患者を動かした場合、従来のマーカでは患者 - 画像座標系の関係が崩れるため再度レジストレーションを行っていたが、反射球マーカならばカメラが常にマーカ位置を取得しているため、移動後のマーカ位置から患者 - 画像座標系の関係を回復し、ナビゲーションを続けることが可能である。

今後は反射球マーカを実用化するためにマーカの製造方法、術野への実装方法について検討を進める。

謝辞： 早稲田大学と東京女子医科大学の連携大学院による研究プロジェクトとして実施された。関係各位に感謝する。マーカの製造には(有)安久工機ならびに Northern Digital inc. にご協力いただいた。

文献

- 1) Iseki H, Muragaki Y, Taira T, Kawamata T, Maruyama T, Naemur K, Namb K, Sugiur M, Hirai N, Hori T, Takakura K. New possibilities for stereotaxis Information-guided, stereotaxis. *Stereotact Funct Neurosurg* 2001; 76: 159-167.
- 2) 余田貞人, 土屋啓. 内視鏡下副鼻腔手術ナビゲーションシステムのための頭部レジストレーション精度の評価. 医用画像工学研究会 JAMIT Frontier1999. 豊橋: 181-186.
- 3) Hauser R, Westermann B, Probst R. A non-invasive patient registration and reference system for interactive localization in intranasal sinus surgery. *Proc Inst Mech Eng[H]* 1997; 211: 327-334.
- 4) Gunkel A R, Freysinger W. Three-dimensional image guided endonasal surgery with a microdebrider. *Laryngoscope* 1997; 107: 834-838.
- 5) 村垣善浩, 橋爪誠. 外科領域に於ける最近の進歩; 術中オープン MRI とリアルタイムナビゲーション. 福岡医学雑誌 2002; 93: 223-230.