

# Preliminary Study on the Clinical Application of Augmented Reality Neuronavigation

井上, 大輔  
九州大学医学系学府医学専攻脳神経外科学分野

<https://doi.org/10.15017/26450>

---

出版情報：九州大学, 2012, 博士（医学）, 課程博士  
バージョン：  
権利関係：(C) Georg Thieme Verlag KG

拡張現実機能を有した脳神経外科ナビゲーションシステムの  
臨床応用に関する予備的研究

Preliminary study on the clinical application of  
augmented reality neuronavigation

九州大学 医学系学府 医学専攻

脳神経外科学分野

井上 大輔

研究指導教員

九州大学大学院医学研究院 災害救急医学分野 橋爪 誠 教授

九州大学大学院医学研究院 脳神経外科学分野 佐々木 富男 教授

## 目次

<b>要旨</b>	3
<b>緒言</b>	4
<b>材料と方法</b>	
1. システム構成	5
2. 模型での検証	5
3. 臨床応用	5-6
<b>結果</b>	
1. 模型での検証	7
2. 臨床応用	7
<b>考察</b>	8-9
<b>謝辞</b>	9
<b>参考文献</b>	10-11
<b>図表</b>	12-17

## 要旨

背景:脳神経外科手術において手術ナビゲーションは一般的なものになっているが、現在のナビゲーションには術前画像と術野を見比べなければならないという欠点がある。近年、この欠点を改善する技術として拡張現実(augmented reality: AR)という技術がある。そこで今回我々は簡便、安価で高解像度を有する Web カメラを用いて AR 表示機能を有した新しい脳神経外科ナビゲーションシステムを開発した。モデルでの検証を行った後、脳腫瘍症例における臨床での有用性を評価し、その実現可能性を検討した。

方法:本システムとして、ナビゲーションシステムには 3D Slicer というオープンソースソフトを使用し、3次元位置計測システムである Polaris、それに Web カメラより構成される。このシステムを用い、モデルを使った検証と実際の脳腫瘍症例における臨床応用を行った。まず、マネキン内に腫瘍と錐体路を模したプラスチックを入れて、thin slice CT を撮影した。この DICOM データを元にレジストレーションを行い、Web カメラで重畳表示させた。続いて、脳腫瘍3例(膠芽腫1例、円蓋部髄膜腫2例)に対して臨床応用を行った。Web カメラは、手持ち型と助手頭部固定型の2種類を準備した。患者は頭部固定器に固定され、それに連結された市販の基準フレームを通常通りに使用した。3D Slicer の画面は、左に術前画像から作成した3次元画像の画面、右に術野に重畳表示させた画面から成り、各症例において執刀前の皮膚切開線計画時、開頭時、硬膜切開後の腫瘍摘出時に適宜、術者に提示した。モデルでの検証および臨床症例ともに位置合わせ誤差(fiducial registration error: FRE)を計測した。重畳誤差は、モデルでは平面上のずれをデジタルノギスで計測し、臨床症例では紙定規を用いて計測した。

結果:モデルでの検証では、FRE は平均 1.02mm であった。Web カメラの動きに追従して腫瘍・錐体路を重畳表示することができ、重畳誤差は 1.71-2.14mm であった。臨床症例では、3例ともに重畳表示することができた。FRE はそれぞれ 1.65, 1.67, 1.79mm であった。対象腫瘍の深さは、執刀開始前に患者側面からの重畳画面で確認した。3例ともに術後に新たな神経学的異常はなく、退院した。症例 2,3 では術野内においた紙定規を用いて計測した平面上における重畳誤差は 2-3mm であった。

結語:簡便で安価な映像装置である Web カメラを用いて、術前画像と術野映像をリアルタイムで同一画面上で把握することができる新しい脳神経外科重畳ナビゲーションシステムを開発した。今後はこの技術を発展させて、手術顕微鏡や神経内視鏡に対して応用できるように研究開発を継続している。

## 緒言

画像誘導下脳神経外科手術いわゆる脳神経外科ナビゲーションシステムは、他の領域に比べて早く1980年代後半から1990年代前半に導入された。現在では多くの脳神経外科手術で一般的であり、必要不可欠な手術支援機器となっている。<sup>1,2</sup> ナビゲーションの方式は赤外線を用いた光学式システムが最も普及している。<sup>3</sup> 光学式を含めたナビゲーションシステムの短所の一つに、術者は解剖学的位置を確認するのに術野とナビゲーション画面を常に見比べなければならず、一旦手術操作を止める必要があるということである。なぜなら、ナビゲーション画面が顕微鏡の鏡筒や神経内視鏡モニターから離れているからである。また、現在のナビゲーション画面は axial, coronal, sagittal の3方向の断面図で表示されるために、その3次元的理解には知識と経験を必要とする。

近年、拡張現実(augmented reality: AR)という画像技術が発展してきており、これらの問題を解決しうる可能性がある。この技術は、現実環境にコンピューター技術を用いて情報を付加提示する技術であり、その有用性が徐々に認識されるようになってきた。これを医療分野に応用すると、AR技術によって実際の術野映像に術前のCTやMRIデータから再構築した3次元画像を重ね合わせて表示することができる。<sup>4,5,6</sup>

これまで脳神経外科領域において、いくつかの研究グループがARナビゲーションの報告をしているが、実際の臨床に応用したものはまだ少ない。<sup>1,7,8,9</sup> Kockroらはリップスティック型カメラを内蔵した特殊な手持ちプローベを提案している。<sup>1</sup> Kingらは骨マーカーとアクリル製マウスピースを応用した方法を報告している。<sup>7</sup> Kawamataらは光学式マーカーを付けたゴーグル型フレームを使用している。<sup>8</sup> Paulらは発光ダイオードによる光学式位置計測器を手術顕微鏡に装着したシステムを提案している。<sup>9</sup> このようにARナビゲーションの臨床例は少なく、しかもこうした高価で特殊な機器を必要とするのが現状である。そこで今回我々は、特別な機器を必要とせず、簡便で安価な市販のWebカメラを用いて行うことができるARナビゲーションシステムを開発した。本研究は、この新しいARナビゲーションシステムの脳神経外科手術における有用性を評価し、その実現可能性を検討するものである。

## 材料と方法

### 1. システム構成 (図1)

Webカメラによる本ナビゲーションシステムは、ソフトウェアプラットフォームとしてオープンソースソフトである3D Slicer (Brigham and Women's Hospital, Boston, Massachusetts, USA)、3次元光学式位置計測システムであるPolaris (Northern Digital Inc., Waterloo, Canada)とWebカメラで構成される。Webカメラには光学式マーカ―を固定しておいた。まず、Webカメラによる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、Webカメラの位置情報をナビゲーションシステムに伝える。最後に、この位置情報に合わせた対象物の3次元画像を術野映像に重ね合わせて表示させるというしくみである。このシステムを用い、模型を使った検証と実際の脳腫瘍症例における臨床応用を行った。

### 2. 模型での検証 (図2A-C)

ヒトの頭部を型どったマネキンの左側頭部に穴を開け、内部に腫瘍と錐体路を模したプラスチックを入れて固定した。マネキンの頭部に8個の皮膚マーカ―を貼り付け、256スライスヘリカルスキャンであるBrilliance iCT (Philips Healthcare, Cleveland OH, USA)で撮影した。これをDigital Imaging and Communications in Medicine (DICOM)形式で保存した。このデータから腫瘍と錐体路のセグメンテーションを行った。次に、200万ピクセルを有するWebカメラ(Qcam Pro 9000 QCAM-200S: Logicool Co., Tokyo, Japan)に光学式マーカ―を固定し、チェスボードを用いてキャリブレーションを行った。最後に、マネキンに基準フレームを取り付けてレジストレーションを行った。術前画像とのずれの平均を計測し、それをレジストレーション誤差 (fiducial registration error: FRE)とした。Webカメラで撮影することによって、マネキンの映像に腫瘍と錐体路を重畳表示させた。重畳誤差は便宜上、平面上での対象物のずれをデジタルノギスで異なる2人が3回ずつ計測した。

### 3. 臨床応用

脳腫瘍の3症例(膠芽腫1例、円蓋部髄膜腫2例)に対して本ナビゲーションシステムを用いて手術を行った。Webカメラによる術野映像の上に術前に作成した3D像を重ねあわせて提示した。術前に各スライスから立体像を作成するセグメンテーションという作業と、カメラの位置を補正するキャリブレーションという作業を必要とした。続いて、術当日には術前画像との位置合わせをするレジストレーションという作業を行った。

#### (1) セグメンテーション

手術前日、患者の頭部に皮膚マーカ―を貼り付けた状態でthin-slice造影MRI T1

強調画像を撮影し、DICOM 形式でデータを得た。1.5T MRI にて 1.2mm の厚さで 200 枚の横断画像を得た。この DICOM 形式データを 3D Slicer に取り込み、腫瘍や血管、頭皮の 3D 像を作成し、Visualization Toolkit (VTK)形式で保存した。また、錐体路を作成するのに 3T MRI で撮影した拡散テンソル画像 diffusion tensor imaging (DTI)を用いた。3D Slicer にあるラベルマップを作成する機能を使い、DTI tractography を描出した。その関心領域には、小脳脚から内包後脚を通る線維を抽出して描出させた。

## (2) Web カメラとそのキャリブレーション

本研究において2つの Web カメラを準備した。一つは 200 万ピクセルを有する Web カメラ (Qcam Pro 9000: Logicool Co.)であり、もう一つは 30 万ピクセルを有する Web カメラ (Qcam Connect: Logicool Co.)である。両者の描画速度は 30 フレーム/秒であった。前者は術中に手で持って使用し(手持ち型、症例 1,3)、後者は助手の頭部に固定して使用した(頭部装着型、症例 2)(図 3)。それぞれのカメラに光学式マーカを取り付けた。カメラキャリブレーションには OpenCV library を用いた。まず、チェスボードを 10 回異なる角度で撮影することにより、カメラ自体の持つ内因性パラメーターを求めた(図 4)。これは Zhang の方法によって求められた。<sup>10</sup> 続いて、カメラの持つ座標系と 3D 世界座標系の関係を表す外因性パラメーターを求めるのに、光学式マーカをつけたチェスボードを使った。

## (3) レジストレーション

本ナビゲーションシステムは、3D Slicer と 3 次元位置計測システムである Polaris と Web カメラによって構成される。光学式マーカをつけた Web カメラを手術室で 3D Slicer と連結させた。Web カメラの位置を特定するために Polaris を用いた。基準フレームは、通常使用している市販のナビシステム StealthStation Treon plus (Medtronic, Coal Creek, Colorado, USA)のものを使用し、新たなフレームは用いなかった。患者を頭部固定器に頭部を固定した後、それに基準フレームを連結した。皮膚マーカとこの基準フレームを用いて位置合わせを行った。<sup>11</sup> 光学式マーカのついたポインターで各皮膚マーカを指し示した。術前画像とのずれの平均である FRE を計測した。

## (4) 重畳ナビゲーション

3D Slicer は 20 インチのモニターに映し出し、左右 2 画面に分けた。左は術前画像から作成した 3 次元画像の画面、右は術野に重畳表示させた画面とした。各症例において、執刀前の皮膚切開予定線の計画時、開頭時、硬膜切開後の腫瘍剥離時に適宜、術者に提示した。対象腫瘍の深さは手術開始前に患者側面にて確認した。重畳誤差は、術野に紙定規を置いてそれとの相対的な長さで計測した。

## 結果

### 1. 模型での検証

皮膚マーカー8個を用いたFREは、10回施行した平均で1.02mmであった。Webカメラを動かすとその動きに追従して、腫瘍・錐体路ともに重畳表示することができた。重畳誤差は平面にて計測し、1.71-2.14mmであった(図5)。

### 2. 臨床応用

3症例ともにWebカメラを用いて重畳表示することができた(図6, 7)。FREは、1.79, 1.67, 1.65mmであった。図6, 7に腫瘍・頭皮・錐体路の重ね合わせ像を示した。症例2,3では重畳誤差は2-3mmであった(図8)。症例1は腫瘍がやや深部にあり、重畳誤差を計測することができなかった。

#### 症例1(図6A)

81歳女性、左同名半盲および左不全麻痺にて発症した右頭頂葉の膠芽腫の症例。腹臥位にて手術を行い、右側から手持ち型Webカメラで撮影を行った。腫瘍と頭皮の輪郭を重畳表示させた。術後、脳梁や摘出腔内側に腫瘍の残存を認めたため、後療法として放射線(全脳全脊髄 計60Gy)+化学療法(テモゾロミド 75mg/m<sup>2</sup> \* 42日間)を施行され、問題なく自宅退院した。

#### 症例2(図6A,B)

53歳女性、両手指のびりびり感で発症した右前頭葉の円蓋部髄膜腫の症例。仰臥位にて手術を行い、左側から手持ち型および助手頭部固定型Webカメラで撮影を行った。同様に、腫瘍と頭皮の輪郭を重畳表示させることができた。術後、腫瘍は全摘出された。

#### 症例3(図7)

64歳女性で乳がん治療中に偶然見つかった左頭頂葉の円蓋部髄膜腫の症例。腫瘍は錐体路に近接していた。手術は仰臥位で左頭頂開頭にて行った。開頭後、腫瘍と錐体路を術野映像の上に重畳表示させた。術中は、光学式マーカーをつけたバイポーラで手術操作を行い、リアルタイムに同時に上および横の異なる2方向からの3次元画像を見ながら、腫瘍の摘出操作を進めた(dual 3D layout 表示)。そして、錐体路に近接していた部分では、3D画面上でバイポーラ先端と錐体路との最短距離を計測して表示した(図6B)。最も錐体路に近接していた内側面において、白質刺激による運動誘発電位で反応が見られた部分をごくわずかに残して、腫瘍はほぼ摘出された。術後、患者は新たな神経脱落症状なく退院した。

## 考察

本論文は、Webカメラという簡便で安価な映像機器を用いた新しいARナビゲーションシステムの脳神経外科手術における臨床応用の報告である。このシステムの主な長所は、オープンソースソフト 3D Slicer と Web カメラから構成されており、多くの施設で簡便に安価に準備することができることである。加えて、3D Slicer には商用ナビゲーションシステムには無いいくつかの特徴がある。大きな特徴として、画像の3次元表示が多彩で立体的な位置関係を直感的に把握することができる点が挙げられる。また、周囲の神経や血管との位置関係を異なる2方向の3次元画像をリアルタイムに同時に確認できる機能(dual 3D layout 表示)や、対象物と手術機器先端との距離をその場で計測できる機能を使って安全に手術操作を進めることが可能である。

3D Slicer に Web カメラを接続することにより、画面上で Web カメラの映像と前もって作成した対象物の立体像を重ね合わせることができた。また、AR ナビゲーションのこれまでの報告とは異なり、腫瘍や血管だけでなく、錐体路も描出させることができた。<sup>1,12</sup> 錐体路の損傷を避けるために、AR 画面に錐体路を描出させることは一つの助けになると思われた。さらに、執刀前に皮膚切開に位置を決める際にも、腫瘍や錐体路を表示させて予定線を決めることができるという利点もあった。

今回、2種類の Web カメラを用いたが、問題点もあった。手持ち型、頭部装着型ともにブレの問題があった。また、手持ち型のカメラは、取り付けた光学式マーカを常に Polaris が認識せねばならないために動かせる範囲が限られていた。頭部装着型カメラも同様に可動制限があり、術野の真上からの映像を撮影するのは難しかった。例えば、これらの問題を改善するために、天井吊り下げ式の高性能ビデオカメラを利用するというのも一つの方法であると考えられる。

3D Slicer は商用ナビゲーションシステムとは異なる2つの特徴を持っている。一つは、3D 画面に関することである。対象物を 3D 空間に非常に直感的に置くことができ、カスタマイズも可能である。また、手術器具先端の位置に合わせて 3D 空間内に任意断面の位置情報を表示することができ、立体像の濃淡・向き・大きさ・位置を自由に変えることができる。もう一つの特徴は、医療用映像装置の映像を重ね合わせる機能に関することである。我々のシステムは Web カメラだけでなく、高度なカメラ位置補正技術を用いることで、光学式マーカをつけた神経内視鏡や手術顕微鏡にも応用することが可能となる。<sup>13</sup> 深部知覚の問題は、3D Slicer の dual 3D layout 表示機能を用いることによって補うことができる。

確かに、BrainLAB 社や Medtronic 社などの商用ナビゲーションシステムでは最近、手術顕微鏡の術者鏡の片眼に2次元画像を入れ込む機能がある。しかし、2次元画像からは立体的な位置関係を把握することが難しい。3D Slicer では術前画像から作成した3次元画像に加えて、カメラ映像の上に重畳された画像を様々な角度で確認す

ることができる(図 5B)。これにより、重畳画像では判断が難しい対象の深さを3次元画像で直感的に把握することが可能である。

重畳誤差を3次元的に正確に評価することは非常に難しく、未だに確立した方法はない。今回我々は、3次元的に重畳誤差を評価するためにいくつかの段階を想定した。まず、重畳されたモデルを異なる角度で測定した。それぞれの角度における誤差から3次元的な誤差を推定する。<sup>14</sup>次に、執刀前に患者の頭皮上で重畳された対象物の位置を確認した。本研究では、事前に作成した頭皮の立体像が実際の患者の頭皮とずれていないことを確かめた。最後に、術野内で対象物の平面における誤差を計測した。今回の結果では、モデルでの検証および臨床応用ともに、FRE が1mm 台であり、重畳誤差が2mm 台という結果であった。通常のナビゲーションに比べてキャリブレーションという作業が加わったことを考えると、想定される範囲の結果であったと考える。

AR ナビゲーションは依然としていくつかの問題がある。1つは、2D 像から腫瘍の深さを正確に判断することが難しいことである。2つ目は、Web カメラの性能を考えると深在性腫瘍にはこのシステムは向かないということである。深い腫瘍になると倍率を上げる必要があるが、その場合に術前のキャリブレーションの作業が非常に煩雑になってしまう。3つ目は、重畳誤差の正確な測定方法が確立していないことである。今回は便宜上、平面にてずれを計測する方法をとった。工学的にも議論のあるところであり、今後の課題である。4つ目は、AR ナビ画面を適切に術者に示さなければならないという点である。できるだけナビ画面は術野に近く、視線が大幅に変わらないように配置する必要がある。また、常に対象物が大きく重畳表示されてしまうと、術者にとっては煩わしく感じてしまうため、手術の進行に応じて重畳する対象やそのタイミングを考慮していかなければならない。

しかしながら、AR ナビゲーションシステムは、脳神経外科手術において有用である可能性を秘めている。今回我々は Web カメラを用いて、術前画像と術野映像をリアルタイムに同一画面上で把握することができる新しい脳神経外科ナビゲーションシステムを開発した。今後、この技術を発展させて、手術顕微鏡や神経内視鏡に対して応用可能な重畳ナビゲーションシステムの開発を継続いきたいと考えている。

## 謝辞

本研究へご協力・ご指導いただきました九州大学病院先端医工学診療部および九州大学大学院医学研究院脳神経外科学の教室員のみなさまに深く感謝致します。

稿を終えるにあたり、この様な研究の機会を与えて頂きましたと共に終始御懇篤なる御指導、御校閲を賜りました九州大学大学院医学研究院災害救急医学分野橋爪誠教授、脳神経外科学分野佐々木富男教授に深甚なる謝意を表します。

## 文献

1. Kockro RA, Tsai YT, Ng I, et al. Dex-ray: augmented reality neurosurgical navigation with a handheld video probe. *Neurosurgery* 2009;65:795–808
2. Grunert P, Darabi K, Espinosa J, et al. Computer-aided navigation in neurosurgery. *Neurosurg Rev* 2004;26:73–99
3. Enchev Y. Neuronavigation: geneology, reality, and prospects. *Neurosurg Focus* 2009;27: E11,1–18
4. Masutani Y, Dohi T, Yamane F, et al. Augmented reality visualization system for intravascular neurosurgery. *Comp Aid Surg* 1998;3:239–247
5. Sielhorst T, Feuerstein M, Navab N. Advanced medical displays: a literature review of augmented reality. *J Disp Technol* 2008;4:451–467
6. Shuhaiber JH. Augmented reality in surgery. *Arch Surg* 2004;139:170–174
7. King AP, Edwards PJ, Maurer CR, et al. A system for microscope-assisted guided interventions. *Stereotact Funct Neurosurg* 1999;72:107–111
8. Kawamata T, Iseki H, Shibasaki T, et al. Endoscopic augmented reality navigation system for endonasal transsphenoidal surgery to treat pituitary tumors: Technical note. *Neurosurgery* 2002;50:1393–1397

9. Paul P, Fleig O, Jannin P. Augmented virtuality based on stereoscopic reconstruction in multimodal image-guided neurosurgery: methods and performance evaluation. *IEEE T Med Imaging* 2005;24:1500–1511
10. Zhang Z. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations. *International Conference on Computer Vision* 1999;1:666–673
11. Hong J, M Hashizume. An effective point-based registration tool for surgical navigation. *Surg Endosc* 2010;24:944–948
12. Lovo EE, Quintana JC, Peubla MC, et al. A novel, inexpensive method of image coregistration for applications in image-guided surgery using augmented reality. *Neurosurgery* 2007;60[ONS suppl2]:ONS366–ONS372
13. Cho B, Oka M, Matsumoto N et al. Augmented reality of surgical microscope for otologic Surgery. *Int J Comput Ass Rad* 2011;6(Suppl 1):S245–246
14. Kim S, Hong J, Joung S et al. Dual surgical navigation using augmented and virtual environment techniques. *Int J Optomechatoroni* 2011;5:155–169

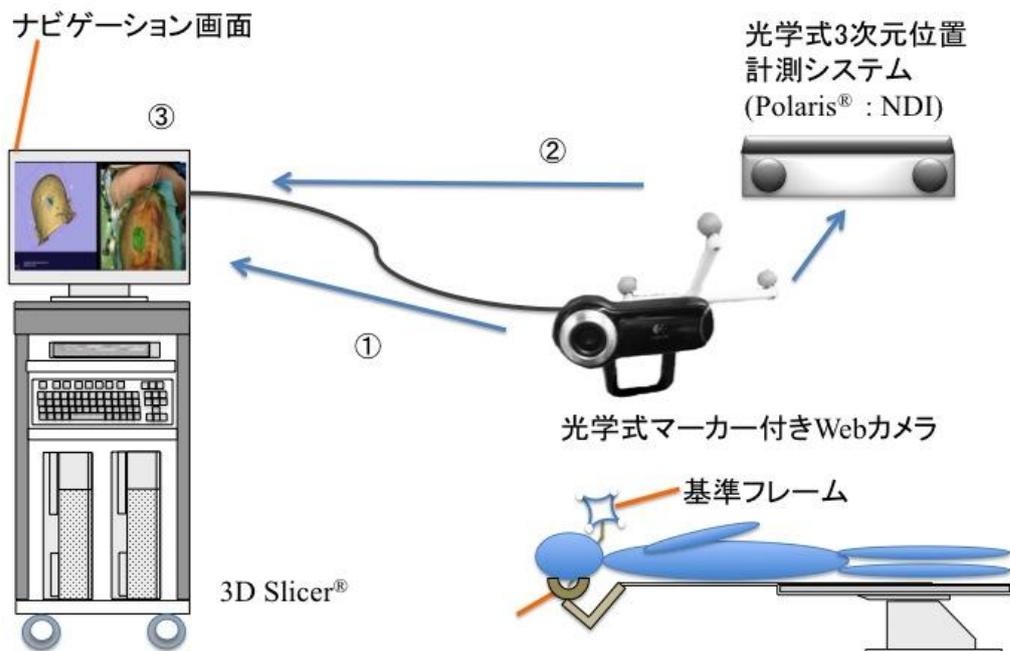


図1 重畳ナビゲーションのシステム構成

まず、Webカメラによる術野映像をナビゲーションシステムに送る(①)。次に、光学式3次元位置計測システムを用いて、光学式マーカーのついたWebカメラの位置情報をナビゲーションシステムに伝える(②)。最後に、この位置情報に合わせた対象物の3次元画像を術野映像に重ね合わせて表示させる(③)。

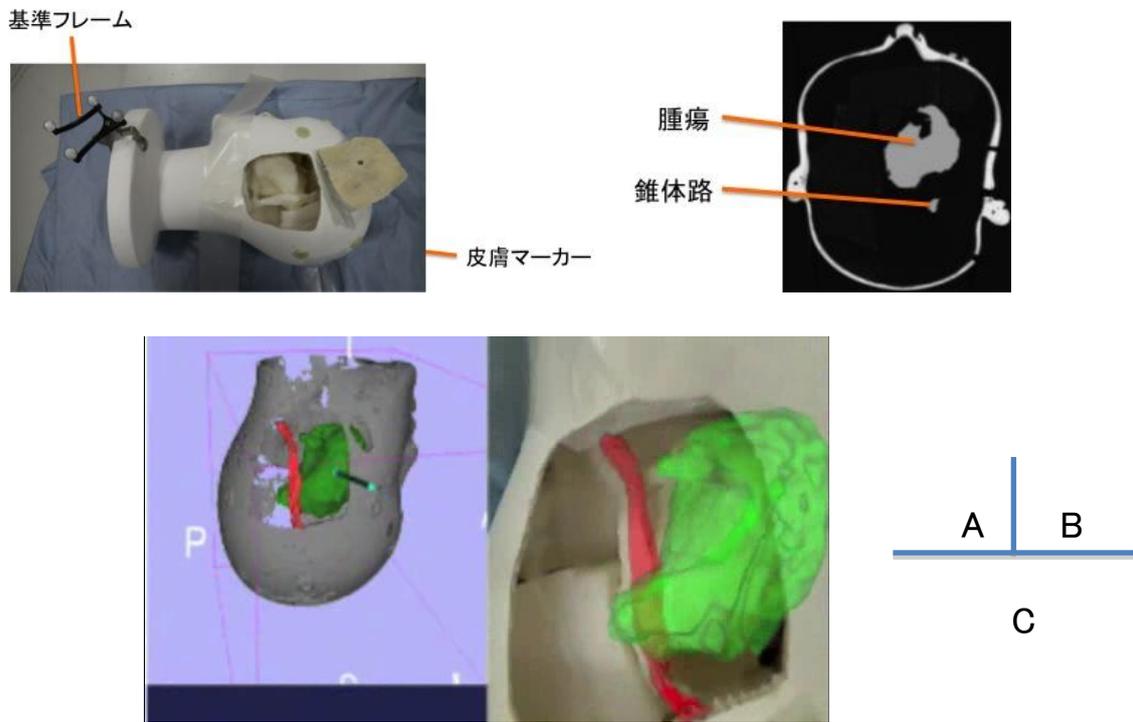


図2 模型を使った Web カメラによる重畳ナビゲーションの検証

- A マネキンに基準フレームを固定したところ
- B マネキン内に腫瘍と錐体路を作成し、皮膚マーカを貼り撮影した CT スライス
- C 左は3次元画像で腫瘍(緑)、錐体路(赤)、Web カメラ(青)を示す  
右は Web カメラ映像上に腫瘍・錐体路を重畳表示しているところ



図3 2種類の Web カメラ

それぞれに光学式マーカを取り付けた。 左:手持ち型 右:頭部装着型

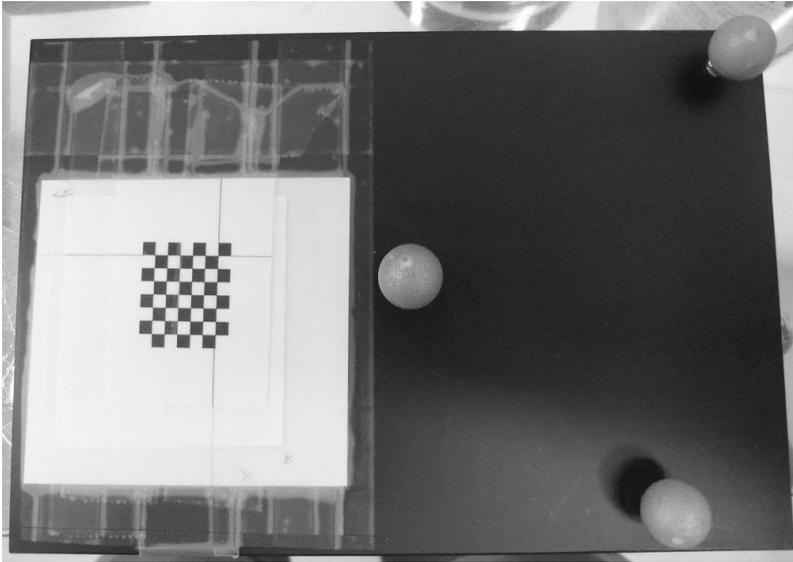


図4 カメラキャリブレーションを行うためのチェスボード  
これを異なる角度から撮影することによって内因性パラメータを求めた。さらに  
マーカーをつけたチェスボードを使って、カメラの持つ座標系と3D 世界座標系と  
の関係を表す外因性パラメータを求めた。

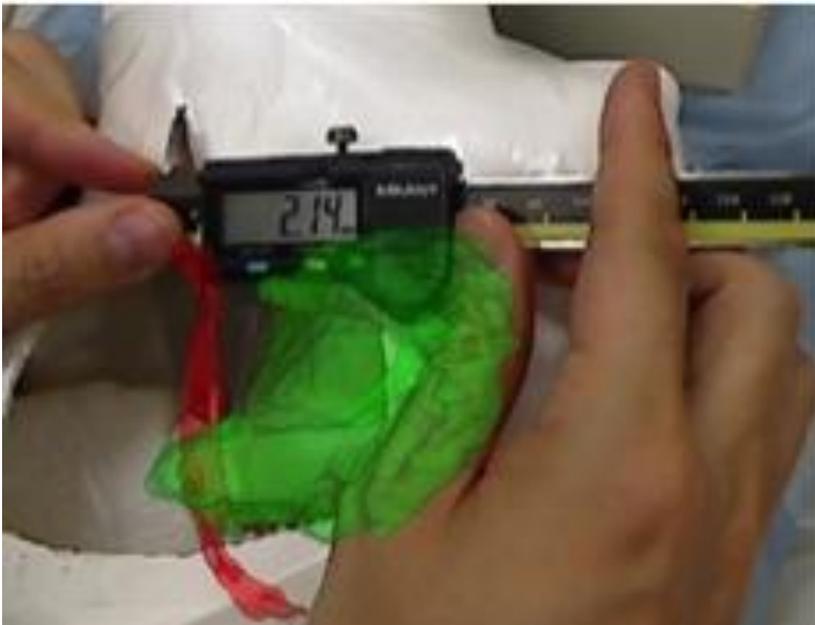
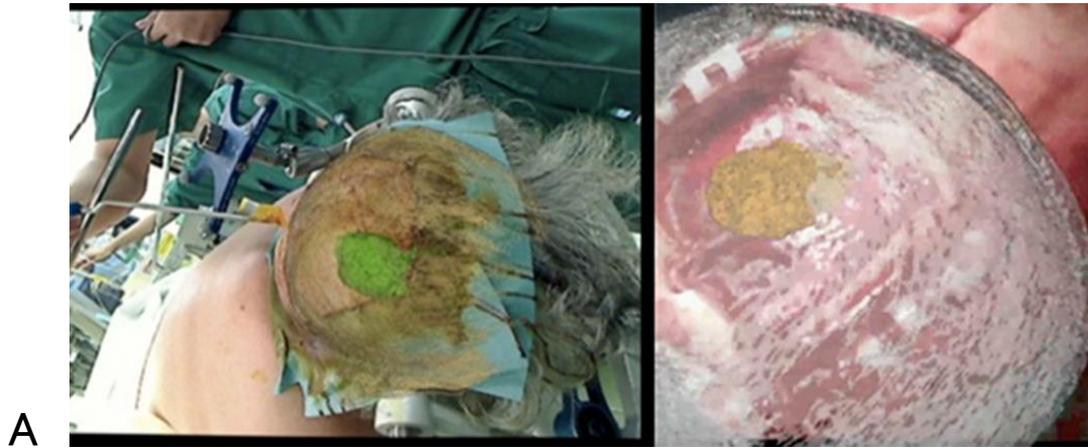


図5 模型での検証において重畳誤差をデジタルノギスで計測しているところ



A



B

図6A 症例1および2における手持ち型 Web カメラを用いた重畳ナビゲーション画面  
 左: 症例1で執刀前に患者頭部に重畳された腫瘍(緑色)と頭皮(黄土色)  
 右: 症例2で開頭後に術野に重畳された腫瘍(オレンジ)と頭皮(白色)  
 図6B 症例2で頭部装着型 Web カメラによる重畳ナビゲーション画面  
 左は3次元画像、右は術野への重畳画面を示す

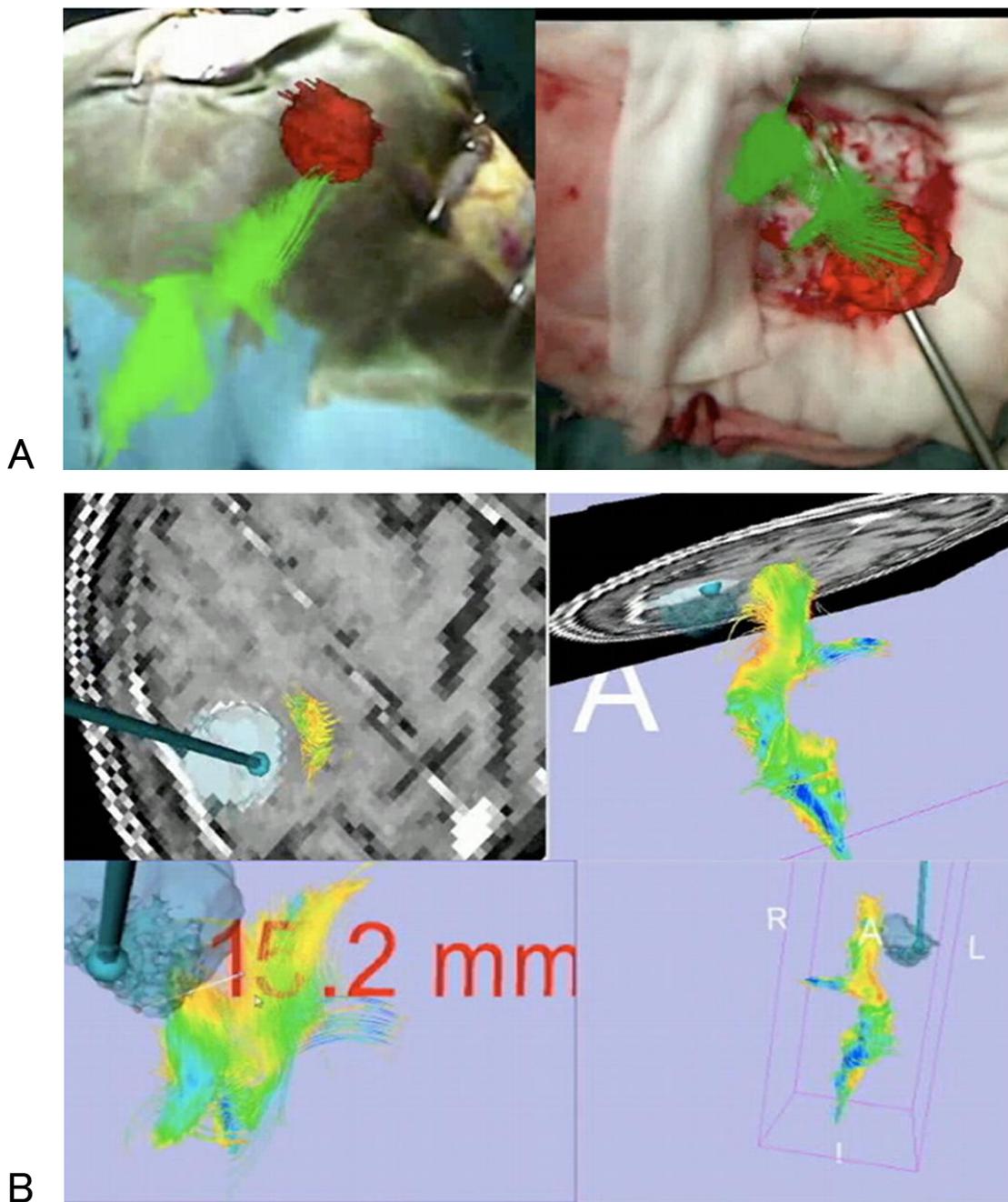


図7A 症例3における手持ち型 Web カメラを用いた重畳ナビゲーション画面  
 執刀前と硬膜切開後に腫瘍(赤色)と錐体路(緑色)を重畳表示させた

図7B 上:症例3での dual 3D layout 表示画面  
 下:バイポーラ先端と錐体路との距離を計測しているところ

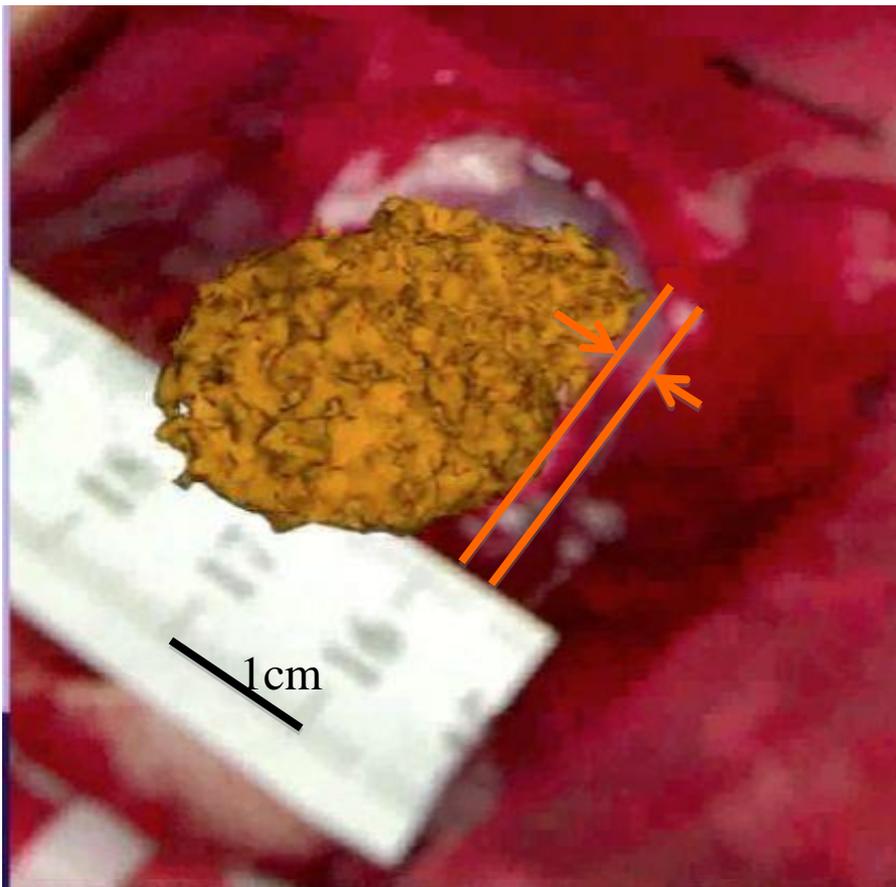


図8 症例2における術野での重畳誤差の計測  
硬膜切開後の実際の腫瘍の輪郭と重畳表示された腫瘍(黄土色)の  
ずれは紙定規を基準として2.42mmであった。