

表 題 脳神経外科における拡張現実

論文の区分 博士課程

著 者 名 佐藤 信

担当指導教員氏名 川合 謙介 教授

所 属 自治医科大学大学院医学研究科  
専攻 地域医療学  
専攻分野 精神神経筋骨格疾患学  
専攻科 脳神経外科学

2021年1月8日申請の学位論文

# I, はじめに

## 1, 拡張現実を用いたニューロナビゲーションとその課題

ニューロナビゲーションは、手術操作を行っている位置を二次元の診断画像上に表示する機器であり、今日の脳神経外科手術において重要な手術支援装置となっている。しかし、ニューロナビゲーションには欠点も指摘されている<sup>1,2,3</sup>。

一つ目は、術者がニューロナビゲーションを使用するとき、術野から目をそらし離れた場所にある表示モニターを見る必要がある点である<sup>1,2,3</sup>。術者や助手が、監視すべき術野から目をそらすことは安全上のリスクであるし<sup>3</sup>、またこの手法だとナビゲーションを参照しながら手術操作を行うことも難しい。

二つ目は、術者は二次元の診断画像によって示される情報を、三次元により構成される実際の術野に、自身の頭の中で変換する必要がある点である<sup>1,2</sup>。既存のナビゲーションによって表示される情報は、二次元の診断画像上に「点」として表示される「現在位置」であり、実際の術野との乖離が大きく直感的な解剖理解が難しい。

この問題を解決するために、近年 Augmented reality (AR) を用いた AR ニューロナビゲーションが脳神経外科手術に導入され、複数の研究においてその有用性が示唆されている<sup>3-8</sup>。これは、タブレット型コンピュータ (タブレット PC) や head mounted display (HMD) などを用いたニューロナビゲーションで、これ

らの機器で術野を観察すると、その上に解剖学的構造物の三次元画像が重畳して表示されるシステムである。我々もタブレット PC を用いた AR ニューロナビゲーションである「Trans-Visible Navigator (TVN)」を開発し報告している<sup>9</sup>。

TVN を含む AR ニューロナビゲーションは、術野情報とナビゲーション情報を同一画面で視認できるため、術野を常に監視可能である。また、ナビゲーション情報は術野と同一の三次元画像によって表示される。このため、AR ニューロナビゲーションは既存のニューロナビゲーションの欠点を解決しうるシステムと考えられる。

しかし、長年にわたる臨床経験を有する既存型のニューロナビゲーションに対し、AR ニューロナビゲーションの開発は比較的近年のことで、臨床経験は未だに乏しい<sup>1,11</sup>。このため AR ニューロナビゲーションが脳神経外科のどの手術に有用かも明らかでなく、多様な症例に AR ナビゲーションを適用することでその有用性を評価する必要があると考えられた。

今回の研究で我々は、TVN を定位脳手術と脳腫瘍手術に適用した。それぞれの術式において TVN の有用性を評価するとともに、臨床応用を通じて AR ニューロナビゲーションの臨床における特性をより明らかにすることが、本研究の目的である。

## 2, 定位脳手術に対する適用

定位脳手術は患者頭部に定位脳フレームを装着することで、頭蓋内の特定部位に対し高精度な穿刺を行う手術手技である。この手術方法自体は確立したものであるが、課題も指摘されている<sup>10,11</sup>。手術に際し術者は、術前の診断画像をもとに決定した穿刺座標を定位脳フレームに入力する。しかし設定した座標や入力の誤りを確認する方法が限られており、安全上の課題と考えられる。

今回我々は定位脳手術に TVN を適用した。AR ナビゲーションは、椎弓根スクリーンの留置や脳室穿刺など、脳神経外科における穿刺手技への有用性が示唆されているが、定位脳手術に対する報告は未だない<sup>2,12,13</sup>。本研究では AR ナビゲーションが定位脳手術の課題に対応し、手術を支援するかを評価した。

## 3, 脳腫瘍手術に対する適用

脳腫瘍手術もまた脳神経外科において重要な手術であり、いくつかの先行研究において AR ナビゲーションが適用され、有用性の評価がなされている<sup>14</sup>。我々も過去の研究において、先行的に 6 例の脳腫瘍手術に対して TVN を適用した<sup>9</sup>。

当初我々は、AR ナビゲーションは有望であり、脳腫瘍手術において TVN は常に有用なものと考えていた<sup>1</sup>。しかし、我々は臨床応用において TVN が有用でない場面に遭遇した。他の研究においても AR ナビゲーションが有効でない状況が

示されている<sup>5</sup>。このため、脳腫瘍手術のどのような手技や手術段階、手術アプローチに対して AR ナビゲーションが手術操作の安全性や正確性を向上させ、手術を支援するかを明らかにする必要があると考えられた。

我々は今回の研究で TVN を 20 例の脳腫瘍手術に対して適用し、この問題を明らかにすることを目指した。

## II, 手法

### 1, Trans-visible Navigator

TVNはタブレットPC (Surface Pro; Microsoft 社) を利用したARニューロナビゲーションである (Fig. 1A)。その詳細な開発過程は過去の論文に報告されているが、以下に概要を示す<sup>9</sup>。

術者ないし助手がタブレットPCを把持し、その背面カメラで術野を撮影すると、タブレットPCの画面上に術野とその上に重畳された三次元画像が表示され、解剖情報を得ることができる (Fig. 1B)。三次元画像は、術前の診断画像 (Computed tomography: CT 及びMagnetic resonance imaging: MRI) からイメージングソフトウェア (Amira; FEI 社) を用いて作成された (Fig. 1C)。作成された三次元画像はobjフォーマットとして出力され、タブレットPCにインストールされたTVNのアプリケーションに登録された。TVNには1症例あたり、最大7個の三次元画像が登録可能である。TVNのアプリケーションはUnity pro (Unity Technologies 社) を用いてプログラミングした。システムを構成するタブレットPCやリファレンスプローベ、患者頭部に装着するクラニアルリファレンスには、光学マーカを装着した。手術室の天井に6台の三次元計測カメラ (Vicon; Oxford 社) を設置し (Fig. 1D)、システム構成機器の三次元位置を光学的に把握した。システム起動後に患者頭部の位置情報を、両耳珠、ナジオン、および事前

に登録した任意の正中 1 点の合計 4 点の解剖学的ランドマークを用いてシステムに登録し、AR ニューロナビゲーションは実行された。

TVN の開発及び臨床応用は自治医科大学附属病院研究倫理委員会の承認を得ており (倫 B14-116)、患者からは研究参加に対するインフォームドコンセントを行い、書面による同意書を取得した。

## 2, 定位脳手術に対する適用

### (対象患者)

2015 年 4 月から 2017 年 3 月までに自治医科大学附属病院で施行した、非連続 5 例の駒井式定位脳フレーム (駒井式) を用いた CT ガイド下定位腫瘍生検手術 (Computed tomography guided stereotactic brain biopsy: CTSTB) に対して TVN を適用した。

### (手術手法と TVN の適用)

まず、術前の CT 及び MRI を元に三次元画像を作成した。すべての症例で皮膚、腫瘍、静脈及び静脈洞の三次元画像を作成し、加えて症例 5 では脳室を作成し、TVN に登録した。手術直前に患者頭部に駒井式を装着し、造影 CT を施行して目標の穿刺座標を決定した。その後手術室に患者が入室すると TVN を起動した。

患者頭部を手術台に固定したのち、患者頭部のレジストレーションを施行して TVN を導入した。

最初に術者が示した穿頭予定部位を、TVN のカメラと穿刺予定軸が同軸となるような位置から観察し、穿刺予定軸上に障害となる構造物がないことを確認して穿頭予定部位の妥当性を検討した (Fig. 2A)。続いて穿頭孔を穿ち、駒井式フレームに穿刺針をセットした (Fig. 2B)。穿刺直前に再度 TVN を導入し、先ほどと同じく穿刺軸と同軸で観察し (Fig. 2C)、穿刺軸上に病変が存在することと、穿刺軸上に障害となる構造物がないことを改めて確認しながら穿刺を施行した (Fig. 2D)。手術終了直後全例で頭部 CT を施行し、穿刺針による組織採取部位が病変内にあることを確認した。

### 3, 脳腫瘍手術に対する適用

#### (有用性評価)

合計 20 例の脳腫瘍手術に対して TVN を適用し、有用性の評価を行った。TVN の使用中にはタブレット型パソコンの画面を常時録画した。脳腫瘍手術における TVN の有用性は、術後術者により評価が良好な順に「very useful」、「useful」、「little useful」、「not useful」の 4 段階で評価された。この評価は TVN を適用することで、TVN を適用しない場合と比較して手術操作の安全性や正確性が向



上したと術者が判断した場合に、より高い評価が与えられた。

TVN が手術に貢献する手術段階を明らかにするために、本研究では脳腫瘍手術を三つの段階に分けた。一つ目の段階は、TVN 起動後から骨弁を外すまでの段階で、この段階では主に開頭野のデザインが行われた。この一つ目の段階を Stage A と定義した (Fig. 3A)。二つ目の段階は硬膜が露出してから硬膜切開を終えるまでの段階で、この段階を Stage B と定義した (Fig. 3B)。三つ目の段階は硬膜内における手術操作の段階であり、この段階を Stage C と定義した。術者の評価は、手術段階ごとに与えられた (Fig3C)。

この研究で評価を行った術者は 7 人おり、全員が脳神経外科専門医だった。平均の脳神経外科経験年数は  $20.1 \pm 10.4$  (mean  $\pm$  standard deviation (SD)) 年であり、中間値は 27 年、最短は 6 年、最長は 31 年だった。

### (対象患者)

臨床応用の最初の 10 例は様々な脳腫瘍に対して TVN を適用することを目的とした。2015 年 4 月から 2016 年 3 月まで自治医科大学附属病院で施行された天幕上の脳腫瘍手術連続 22 例から選択した。このうち 7 例は筆頭著者が手術に参加できず除外し、2 例は我々の以前の論文に掲載されているため除外し、3 例は有用性を評価するための記録 (タブレット型パソコン画面の録画) がなされていない

かったため除外し、残った 10 例を本研究に組み込んだ。前半の 10 症例には浅層の腫瘍と Interhemispheric approach、Transcortical approach、pterional approach、subfrontal approach で手術された深部の腫瘍が含まれた。

前半の 10 例に対する術者の評価は、浅層の腫瘍と Interhemispheric approach、Transcortical approach で手術された深部の腫瘍に対し TVN が有用であることが示唆された。この結果の妥当性をさらに検討するために、対象症例を浅層の腫瘍と Interhemispheric approach、Transcortical approach で手術された深部の腫瘍の症例に限定して追加の 10 例に対して TVN を適用した。この 10 例は 2016 年 4 月から 2017 年 3 月までに自治医科大学附属病院で施行された天幕上脳腫瘍手術 45 例から選択された。

### (手術手法と TVN の適用)

手術前 2 か月以内に撮影した CT、MRI を用いて術前に三次元画像を作成した。すべての症例で腫瘍の三次元画像を作成し、頭部レジストレーションに必要な皮膚の三次元画像も作成した。それ以外の解剖学的構造物は最初の 10 例では著者が任意に作成した。後半の 10 例では術前に我々と術者が術前ディスカッションを行い、術者が必要とする三次元画像や TVN を適用する手術段階について協議したうえで、TVN に登録する三次元画像を選択した。

患者が手術室に入室すると TVN を起動した。患者に全身麻酔が導入された後、患者頭部を手術台に固定し、頭部のレジストレーションを行い、TVN を導入した。TVN の使用中には画面の録画とともに使用した手術段階を記録した。

### **(精度検証)**

一部の症例に対して、TVN の精度検証を行った。精度検証は脳表静脈を TVN に登録し、Stage C で TVN を使用した全 8 症例で行った。術野の脳表静脈と TVN により表示される三次元画像の脳表静脈の代表点 10 点の距離を計測し、誤差を測定した。

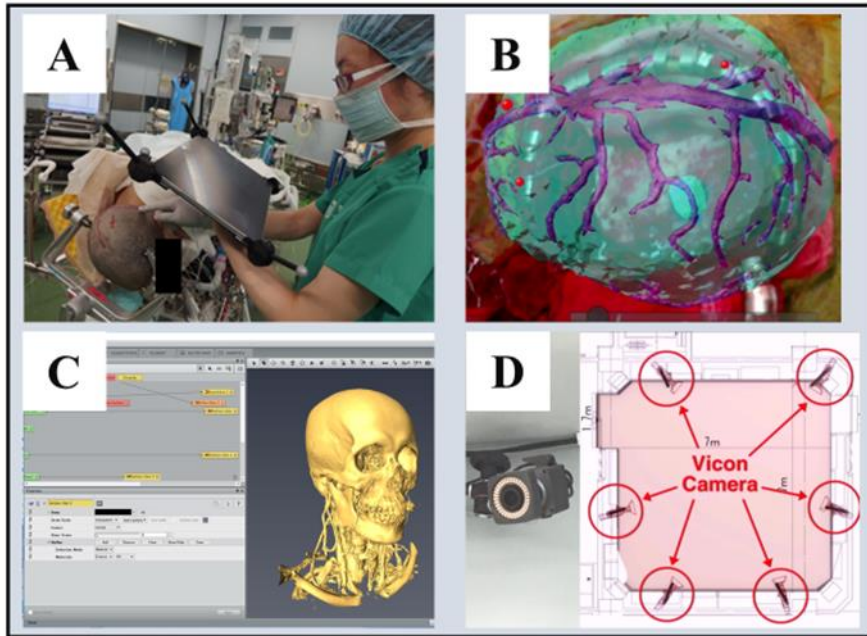


Figure1

本図では Trans-visible Navigator (TVN) の概要を示す。

A : TVN はタブレット PC を利用した AR ニューロナビゲーションである。

B : タブレット PC の背面カメラで術野を撮影すると、術野とその上に重畳された三次元画像を確認できる。

C : 三次元画像は、術前の診断画像からイメージングソフトウェアを用いて作成される。

D : システムを構成する機器には光学マーカーを装着し、手術室の天井に設置した 6 台の三次元計測カメラにより、その三次元位置を光学的に把握した。

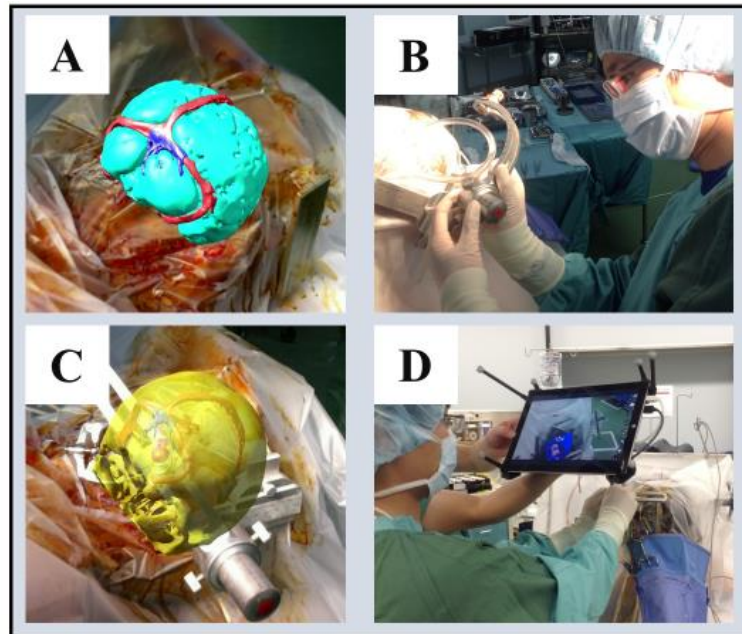


Figure2

本図では Trans-visible Navigator (TVN) により支援された定位脳手術の様子を示す。

A : まず術者が示した穿頭予定部位を、TVN で観察し、穿刺予定軸上に障害となる構造物がないことを確認してその妥当性を検討した。

B : 続いて穿頭孔を穿ち、駒井式フレームに穿刺針をセットした。

C : 穿刺直前に再度 TVN を導入し、穿刺軸上に病変が存在することと、穿刺軸上に障害となる構造物がないことを改めて確認した。

D : TVN を用いることで、術野から目をそらすことなく、自然な姿勢で穿刺が可能だった。

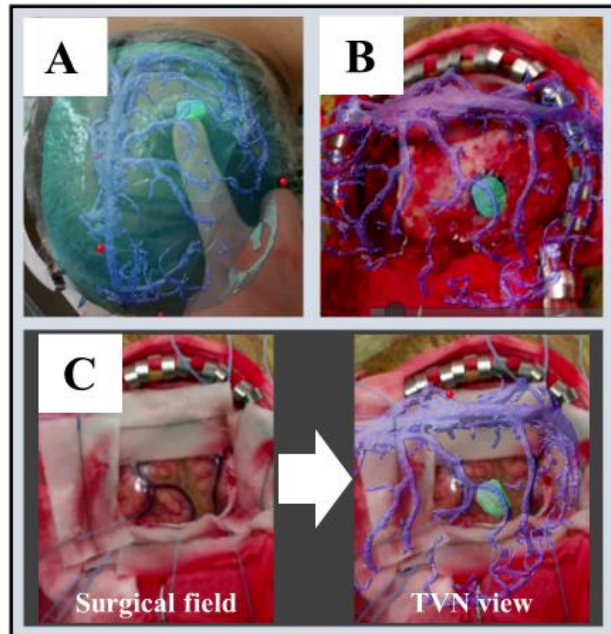


Figure3

本研究では TVN に支援された脳腫瘍手術を 3 つの段階に分割し、それぞれの段階ごとに Trans-visible Navigator (TVN) の有用性を評価した。

A : 一つ目の段階は、TVN 起動後から骨弁を外すまでの段階で、この段階では主に開頭野のデザインが行われた。

B : 二つ目の段階は硬膜が露出してから硬膜切開を終えるまでの段階で、この段階では主に硬膜切開のデザインが行われた。

C : 三つ目の段階は硬膜内における手術操作の段階であり、皮質切開範囲の決定や腫瘍へのアプローチ経路の検討が行われた。

### Ⅲ, 結果

#### 1, 定位脳手術に対する適用

本法を適用した 5 例すべての術後で病変内から組織が採取されたことが確認され、すべての症例で組織病理診断を得ることができた (Table1)。組織病理は、2 例が膠芽腫、2 例が悪性リンパ腫、1 例が退形成性星細胞腫だった。すべての症例で周術期の合併症を認めなかった。

術者は TVN を用いることで重要な構造物を回避して穿刺することができた。症例 1 から症例 4 では、静脈洞と皮質静脈の回避に用いられ、症例 5 ではこれに加えて脳室の回避に用いられ、手技の安全性の改善に寄与した。また、すべての症例で描出された腫瘍は、穿刺座標が誤っていないことの確認に有効で、これも安全性の改善に寄与した。結果として TVN を適用することで、予定する穿刺軸が重要構造物を回避して、その先に腫瘍が存在することがわかりその安全性が確認できるため、術者は安心して穿刺操作ができた。

#### 2, 脳腫瘍手術に対する適用

最初の 10 例では 18 の手術段階で評価され、very useful と評価された段階は 7 段階 (39%)、useful は 2 段階 (11%)、somewhat useful は 2 段階 (11%)、not useful は 7 段階 (39%) だった。手術段階ごとでは、Stage A は 10 段階中

4段階で、Stage Bは3段階中2段階で、Stage Cは5段階中1段階でそれぞれ「very useful」と評価された (Table2)。

TVNの有用性は腫瘍の局在と関連していると考えられた。表層の腫瘍の症例 (症例4、5、9) はいずれも「very useful」と評価された手術段階を有していた。症例4及び症例9は円外部髄膜種で、症例5は傍矢状洞部髄膜種の症例だった。これらの症例の手術においてTVNは、Stage Aで腫瘍と静脈洞を表示することで、静脈洞の位置を把握しつつ腫瘍の位置や大きさに適した開頭野のデザインを援助し、手術操作の正確性を向上したために術者から「very useful」と評価された。

半面「not useful」と評価された手術段階は、すべて深部の腫瘍の症例に対する手術だった。このため、深部の腫瘍に対してTVNは有用と評価されにくいことも明らかになった。しかし、深部の腫瘍の場合でも、Interhemispheric approachの症例 (症例1) と、Transcortical approachの症例 (症例10) は、「very useful」と評価された手術段階を有していた。

症例1でTVNはStage Bで架橋静脈と静脈洞を表示し、硬膜の開放操作の安全性を向上させたため「very useful」と評価された。また症例10でTVNは、まずStage Aで腫瘍を表示してその大きさに適した開頭野の設計を支援し、操作の正確性向上に貢献していた。Stage Bでは症例1と同様に架橋静脈を表示する



ことで硬膜切開の安全性向上を支援し、Stage C では脳表に腫瘍を表示することで、最適な皮質切開の範囲と侵入角度を示すことで手術操作の正確性を向上させたため、いずれの段階でも「very useful」と評価された。

このことから TVN は表層の腫瘍と Interhemispheric approach 及び Transcortical approach によって手術される深部腫瘍に対して有用であることが示唆された。

後半の 10 例では 17 の手術段階で有用性の評価がなされ、very useful と評価された段階は 14 段階 (82%)、useful は 2 段階 (12%)、somewhat useful は 0 段階 (0%)、not useful は 1 段階 (6%) だった。手術段階ごとでは、Stage A は 10 段階中 8 段階で、Stage B は 2 段階中 2 段階で、Stage C は 5 段階中 4 段階でそれぞれ「very useful」と評価された。

後半の 10 例においても TVN は Stage A において開頭野設計の正確性向上を支援し、Stage B において硬膜切開の安全性を向上させ、Stage C において正確な皮質切開や腫瘍へのアプローチ経路の計画を支援した。

結果として前半の 10 例同様に、表層の腫瘍と、Interhemispheric approach 及び Transcortical approach によって手術される深部腫瘍に対する手術操作に貢献し、これらのケースにおける TVN の有用性が改めて確認された。

術者との術前ディスカッションでは、術者から TVN の使用に関する意見の聴

取を行った。症例ごとの具体的な意見は Table2 に示している。ディスカッションでは三次元画像の選択も行われ、結果症例 13 では慢性硬膜下血腫の三次元画像は、症例 19 では冠状縫合を表現した三次元画像が術者の意向により追加された。

精度検証は、8 例の脳表静脈の 80 点で計測され、平均誤差は  $2.31 \pm 2.18$  mm (mean  $\pm$  SD) で中間値は 1.37 mm だった。症例ごとの誤差では症例 7 の  $0.56 \pm 0.32$  mm が最小で、症例 6 の  $6.10 \pm 2.50$  mm が最大だった (Table2, 3)。

TABLE1. Series of CTSTB cases navigated with TVN*						
Patient No.	Tumor location	Diagnosis	Complication	Registered objection	Imaging modalities used for navigation**	
1	rt. frontal lobe	Glioblastoma	none	tumor, vein, venous sinus	MRI, CT	
2	lt. temporal lobe	Glioblastoma	none	tumor, vein, venous sinus	MRI, CT	
3	rt. occipital lobe	Anaplastic astrocytoma	none	tumor, vein, venous sinus	MRI, CT	
4	rt. cerebellar	Malignant lymphoma	none	tumor, vein, venous sinus	MRI, CT	
5	rt. thalamus	Malignant lymphoma	none	tumor, vein, venous sinus, ventricle	MRI, CT	

\*CTSTB, Computed tomography guided stereotactic brain biopsy TVN, Trans-Visible Navigator

\*\*MRI, magnetic resonance imaging CT, computed tomography

Table 1

Table 2. Series for the first part of the study and surgeons' evaluation									
Patient no.	Age,y	Diagnosis	Surgical approach	Tumor location	Registered models*	Surgical stage**	Grading	Intended use of the Trans-visible navigator	Navigation accuracy
1	47	High grade glioma	Interhemispheric approach	Right cingulate gyrus	T, A, V	A	Useful	Confirm the planned virtual craniotomy to design the craniotomy	1.2 ± 0.58mm
						B	Very useful	Confirm the bridging vein before the dura incision	
						C	Useful	Confirm the tumor to determine the appropriate angle for interhemispheric entry	
2	67	Tuberculum sellae meningioma	Subfrontal approach	Tuberculum sellae	T, V, SSS, ON	A	Somewhat useful	Confirm the superior sagittal sinus and the bridging vein	2.2 ± 1.80 mm
						B	-	-	
						C	Not useful	Confirm the tumor and optic nerve	
3	76	Spindlecell tumor	Pterional approach	Left sphenoid ridge	T, Bo	A	Not useful	Confirm the tumor location	-
						B	Somewhat useful	Confirm the tumor before dura incision	
						C	-	-	
4	52	Convexity meningioma	Superficial tumor	Right parietal convexity	T, Bo, Br	A	Very useful	Confirm the tumor to design the craniotomy	-
						B	-	-	
						C	-	-	
5	67	Parasagittal meningioma	Superficial tumor	Parasagittal region	T, V, SSS	A	Very useful	Confirm the tumor to design the craniotomy	-
						B	-	-	
						C	-	-	
6	67	Ganglioglioma	Pterional approach	Left temporal lobe	T, V, SSS, Bo, Br	A	Not useful	Confirm the location of the tumor and sylvian vein	6.1 ± 02.50mm
						B	-	-	
						C	Not useful	Confirm the tumor location	
7	36	Sphenoid ridge meningioma	Pterional approach	Left sphenoid ridge	T, V, Br, Bo	A	Not useful	Confirm the location of the tumor and sylvian vein	0.6 ± 0.32mm
						B	-	-	
						C	Not useful	Confirm the tumor and sylvian vein before dissection of the sylvian fissure	
8	35	Pituitary sphenoidale meningioma	Subfrontal approach	Frontal base	T, V, SSS, Bo	A	Not useful	Confirm the superior sagittal sinus and the bridging vein	-
						B	-	-	
						C	-	-	
9	67	Convexity meningioma	Superficial tumor	Right frontal convexity	T, A, V, SSS, Bo	A	Very useful	Confirmed the tumor to design the craniotomy	-
						B	-	-	
						C	-	-	
10	28	Central neurocytoma	Transcortical approach	Right lateral ventricle	T, V, SSS, Bo	A	Very useful	Confirm the tumor to design the craniotomy	3.2 ± 0.68mm
						B	Very useful	Confirm the bridging vein before the dura incision	
						C	Very useful	Confirm the tumor to design the corticotomy	

\*T, brain tumor; A, artery; V, vein; SSS, superior sagittal sinus; ON, optic nerve; Bo, cranial bone; Br, brain

\*\*Stage A, design of skin incision and craniotomy; Stage B, design of dura incision; Stage C, intradural procedure

Table2

Table 3. Series for the second part of the study and surgeons' evaluation										
Patient no.	Age,y	Diagnosis	Surgical approach	Tumor location	Registered models*	Request from surgeons**	Surgical stage**	Grading	Intended use of the Trans-visible navigator	Navigation accuracy
11	51	Fibrillary astrocytoma	Interhemispheric approach	Left cingulate gyrus	T, A, V, SSS Bo, Br	Visualization of the bridging vein	A B C	Useful - -	Confirm the bridging vein to determine the posterior edge of the skin incision line - -	-
12	67	Metastatic brain tumor	Transcortical approach	Left parietal lobe	T, V, SSS, Bo, TS	Visualization of the tumor and transverse sinus in Stage A	A B C	Very useful - Very useful	Confirm the tumor and transverse sinus to design a safe craniotomy - Confirm the margin line of the tumor and design the corticotomy	0.7 ± 0.27 mm
13	79	Convexity meningioma	Superficial tumor	Left parietal convexity	T, V, SSS, Bo Br, CSDH	Visualization of CSDH in stage A	A B C	Very useful - -	Confirm the tumor and chronic subdural hematoma to design the craniotomy - -	-
14	82	Metastatic brain tumor	Transcortical approach	Right temporal lobe	T, V, Br, Bo	Visualization of the tumor in Stage A	A B C	Very useful - Very useful	Confirm the tumor to design the craniotomy - Confirm the margin line of the tumor and design the corticotomy	-
15	8	Anaplastic ependymoma	Transcortical approach	Left temporal lobe	T, Bo	Visualization of the tumor in stage C	A B C	Not useful - Very useful	Confirm the tumor before skin incision - Identify the tumor under the thick arachnoid membrane	-
16	70	High grade glioma	Transcortical approach	Right frontal lobe	T, V, Br, SSS	Visualization of the tumor and SSS in Stage A	A B C	Very useful Very useful Useful	Confirm the tumor to design the craniotomy Confirm the bridging vein before dura incision Confirm the tumor to determine approach angle	3.7 ± 1.26 mm
17	71	Lymphoma	Transcortical approach	Left parietal lobe	T, V, SSS, Bo, Br	Visualization of the small tumor in Stage A and Stage C	A B C	Very useful Very useful Very useful	Confirm the tumor to design the craniotomy Confirm the bridging vein before dura incision Identify small tumor (dia. 15mm) under the brain surface	0.9 ± 0.32 mm
18	54	High grade glioma	Transcortical approach	Right temporal lobe	T, V, Bo, TS	Visualization of the vein of Labbe and sigmoid sinus in Stage A	A B C	Very useful - -	Confirm the tumor, sinus and vein of Labbe to design the craniotomy - -	-
19	74	High grade glioma	Transcortical approach	Right frontal lobe	T, A, V, Bo, SSS	Visualization of the coronal suture in Stage A	A B C	Very useful - -	Confirm the coronal suture to determine the posterior edge of the skin incision line - -	-
20	70	Solitary fibrous tumor	Superficial tumor	Left frontal base	T, V, Bo, SSS	Visualization of the 3 small tumors	A B C	Very useful - -	Confirm the location of multiple and small tumors - -	-

\*T, brain tumor; A, artery; V, vein; SSS, superior sagittal sinus; Bo, cranial bone; Br, brain; TS, transverse sinus; CSDH, chronic subdural hematoma

\*\*Stage A, design of skin incision and craniotomy; Stage B, design of dura incision; Stage C, intradural procedure

Table3

## IV, 考察

### 1, 定位脳手術に対する適用

CTSTB は、比較的シンプルな手術手技で病変に対する正確な穿刺が行うことができ、診断率も良好で 96.7%~98.4%とされる<sup>15,16</sup>。しかし合併症の報告もあり、Kongkham らによる 622 例の CTSTB に対する検討では、症候性頭蓋内出血は 4.8%に発生し、周術期死亡率も 1.3%とされる<sup>15</sup>。入力した座標の正確性が確認できない CTSTB の課題は、これらの合併症に関連している可能性がある。

我々は CTSTB に TVN を用いることで、穿刺軸上の障害物と腫瘍の有無を確認でき、穿刺座標の正確性も確認できた。これにより穿刺軸の安全性が担保され、定位脳フレームの安全上の課題が解決された。結果、全例で病変への穿刺が実現され合併症もなかった。

定位脳フレームに代わる定位脳手術の手法として既存型のニューロナビゲーションを用いたフレームレス法が存在する<sup>17,18,19</sup>。これは、既存型ニューロナビゲーションに穿刺針の針先の位置を登録することで、針先が病変上に存在することを確認する手法である。比較的精度の高い穿刺が可能で、TVN では困難だった穿刺軸のリアルタイムな位置確認も可能だった。しかしこの手法は、術野から目を離して、離れたモニターを確認する必要があり<sup>10</sup>、既存型ナビゲーションの課題をそのまま有している。加えて、術野から目を離れた不自然な姿

勢で穿刺を行う必要がある点も課題である。TVN は術野とナビゲーション情報を同時に取得可能であるため、常に術野の監視が可能で、自然な姿勢での穿刺も可能だった。

## 2, 脳腫瘍切除術に対する適用

今回の研究で我々は、AR ナビゲーションの脳腫瘍手術における有用性のみならず、ナビゲーションが有用な腫瘍の局在や手術段階、手術アプローチも明らかにすることを目指した。この目的を解決するため、今回の研究の最初の段階において、なるべく多くの手術アプローチに TVN を適用することを目指した。加えて術者からの 4 段階の評価による有用性の評価を試みた。結果として、表層の腫瘍と Transcortical approach と Interhemispheric approach によって手術される深部の腫瘍に TVN が有用であることが示された。

Interhemispheric approach に関する他の研究者からの報告はほとんどないが、我々は今回の研究でこのアプローチにも TVN を適用し、その有用性を確認した。このアプローチには、架橋静脈や状矢状静脈洞といった「障害物」を避けて、深部の腫瘍を目指す経路の計画が必要となる。我々は先ほど述べた TVN の定位脳手術に対する適用において、脳表静脈などの「障害物」を避けて、深部の腫瘍にアプローチする経路の計画に TVN が有用であることを示した<sup>18</sup>。我々は

Interhemispheric approach にも同様の手術コンセプトを導入することで、腫瘍への経路の計画を容易にした。

一方、表層の腫瘍と Transcortical approach に対する AR ナビゲーションの適用は、複数の研究者によって試みられ、腫瘍の局在や辺縁を示すことで開頭や皮質切開の正確性向上に資することが知られており、TVN を用いた本研究においても同様の結果を得たといえる<sup>4-6</sup>。

以上から TVN は手術操作に関して、他の AR ナビゲーションに劣らない支援能力を示したが、運用面に関しても実用的な水準にあると考えられた。他の研究者の AR ナビゲーションには、術野から目を離して、専用モニターに視線を移す必要があるシステムも報告されているが<sup>4,5</sup>、タブレット PC を用いる TVN はその必要がなく、自然な姿勢で術野の観察や、マーキングを行うことができた。

タブレット PC と同様の利点を持つ AR ナビゲーションとして HMD が挙げられる<sup>7,8,21</sup>。HMD は術野と三次元画像を同一視野で視認できることに加え、両手を自由に使えるメリットがあるが、ディスプレイが視界を妨げる欠点が指摘されており、装着の違和感と併せて手術中常時着用することは困難である<sup>3,21-23</sup>。今回の研究で術者は、一部の症例で AR ナビゲーションを複数の手術段階で使用することを希望した。しかし HMD は時に重く、機構も複雑であり、複数回の使用のために頻繁に装着を行うことは煩雑である<sup>3,21,23</sup>。TVN は装着が不要で、タブレッ



ト PC を把持するだけで容易にナビゲーションを導入できた。実際、今回の研究では 11 の症例で複数の手術段階に TVN は適用されており、TVN は複数回の使用に対応することも確認された。

今回の研究では、術者と十分な術前ディスカッションを行う重要性も示された。今回の研究における最初の段階では、我々が TVN に登録する三次元画像を選択した。しかし、この方法では術者が望む画像が選択されていないことがあり、有用性を制限した。この問題を解決するために、研究の後半では術者と術前ディスカッションを行った。ディスカッションを行うことで、術者が希望する三次元画像を確実に選択できた。最大 7 個の三次元画像を登録できる TVN の性能は術者の要望に十分応えるために有用だった。

術者たちの評価は、TVN が深部の腫瘍に有用でないことを示した。いくつかの先行研究も AR ナビゲーションに対して同様の欠点を指摘している<sup>4,5</sup>。その理由として、AR ナビゲーションのカメラの倍率機能と光源が無いことにより、深部の術野が有効に撮影できなかったことを挙げている<sup>4,5</sup>。我々の TVN も倍率機能と光源を持たず、同様の欠点を有していた。

顕微鏡を用いた AR ナビゲーションはすでに市販され、高度な倍率機能と光源によりこの問題に対応している<sup>24,25,26</sup>。しかし、今回の研究で TVN が有用性を示したマクロ手技には適さない<sup>3</sup>。TVN も現在は薬事承認を受け市販されており、

相補的な関係にある両者を併用することは有用かもしれない。

本研究は術者からの評価に着目したものであるが、TVN はスタッフ間で共有可能なタブレット端末画面に解剖を表示するため、術者のみならず助手や他のメディカルスタッフの解剖理解にも有用と思われた。手術に携わるスタッフ全体の解剖理解の向上は、手術の安全性向上に資する可能性がある。

また、脳腫瘍手術におけるバーチャルリアリティの教育効果が報告されているが<sup>2</sup>、AR ナビゲーションについても術者や助手の手術理解が深まることで教育的効果があるかもしれない。AR ナビゲーションが術者や助手の手術におけるラーニングカーブに与える影響も今後検討すべき課題である。

### 3, 共通する課題

今回の研究では 2 種類の術式に対して TVN を適用したが、共通した技術的課題が見いだされた。一つ目は追加の準備の必要性である。三次元画像の作成には単純な症例で約 10 分、複雑な症例で 30 分が必要だった。手術室では TVN の起動とレジストレーションに 5 分程度が必要だった。二つ目はブレインシフトであるが、これは既存型ニューロナビゲーションも含め多くのナビゲーションに共通する課題であり、TVN 固有のものではない<sup>3-8, 23, 24</sup>。

臨床転機の改善を示すような研究デザインに出来なかった点も本研究を通し

た課題である。理由として脳腫瘍手術は、患者背景や腫瘍の大きさ、部位、術者の経験年数など臨床転機に関与しうる要素が多く、20例及び5例程度の少ない症例数では、統計学的に統制のとれた患者群を構成することが困難だった点が挙げられる。

#### 4, 今後の展開

この研究は脳腫瘍手術と定位脳手術におけるARナビゲーションの検討であるが、今後は今回検討できなかった術式や手技に対する検討も行いたい。血管手術は今回の研究で扱えなかった分野であるが、本研究で得られた知見から半球間裂アプローチを用いた脳動脈瘤クリッピングには有用と見込まれる。脊椎手術におけるARの報告もあり<sup>12</sup>、レジストレーション手法に関する問題はあるが<sup>28</sup>、脊椎手術に対するARナビゲーションの適用も今後取り組むべき課題である。

また、脳神経外科領域以外では頭頸部外科領域については、レジストレーションやシステムの大幅な改修を行う必要なく展開可能と見込まれるため、今後この分野への適用についても検討を進めたい。

## V, おわりに

我々は、TVN を 25 例の脳神経外科手術に適用した。駒井式を用いた定位脳手術に対する適用では、AR ナビゲーションが定位脳手術において有用であることを示した。また脳腫瘍手術に対する適用では、TVN が表層の腫瘍と、Interhemispheric approach 及び Transcortical approach によって手術される深部腫瘍に有用であることと、術者との術前とのディスカッションの重要性が示された。これらの知見は他の AR ナビゲーションとも共有可能と考えられ、AR ナビゲーションの有効な運用の一助になりうると考える。

## VI, 謝辞

本研究は自治医科大学脳神経外科学講座主任教授の川合謙介先生、自治医科大学客員教授の渡辺英寿先生にご指導を頂きました。厚く御礼申し上げます。また、主論文等の作成にあたりご指導をいただきました、自治医科大学小児脳神経外科教授の五味玲先生、脳神経外科学講座の山口崇先生、中嶋剛先生をはじめ、脳神経外科学講座の先生方に深く感謝申し上げます。

## VII, 参考文献

1. Meola A, Cutolo F, Carbone M, Cagnazzo F, Ferrari M, Ferrari V. Augmented reality in neurosurgery: a systematic review. *Neurosurg Rev.* 2017;40(4):537-548.
2. Cho J, Rahimpour S, Cutler A, Goodwin CR, Lad SP, Codd P. Enhancing Reality: A Systematic Review of Augmented Reality in Neuronavigation and Education. *World Neurosurg.* 2020;139:186-195.
3. Deng W, Li F, Wang M, Song Z. Easy-to-use augmented reality neuronavigation using a wireless tablet PC. *Stereotact Funct Neurosurg.* 2014;92(1):17-24.
4. Inoue D, Cho B, Mori M, et al. Preliminary study on the clinical application of augmented reality neuronavigation. *J Neurol Surgery, Part A Cent Eur Neurosurg.* 2013;74(2):71-76.
5. Kockro RA, Tsai YT, Ng I, et al. DEX-Ray: Augmented reality neurosurgical navigation with a handheld video probe. *Neurosurgery.* 2009;65(4):795-807.
6. Low D, Lee CK, Dip LLT, Ng WH, Ang BT, Ng I. Augmented reality neurosurgical planning and navigation for surgical excision of parasagittal, falcine and convexity meningiomas. *Br J Neurosurg.* 2010;24(1):69-74.
7. Van Doormaal TPC, Van Doormaal JAM, Mensink T. Clinical accuracy of holographic navigation using point-based registration on augmented-reality glasses. *Oper Neurosurg.* 2019;17(6):588-593.

8. Maruyama K, Watanabe E, Kin T, et al. Smart Glasses for Neurosurgical Navigation by Augmented Reality. *Oper Neurosurg*. 2018;15(5):551-556. doi:10.1093/ons/oxz279
9. Watanabe E, Satoh M, Konno T, Hirai M, Yamaguchi T. The Trans-Visible Navigator: A See-Through Neuronavigation System Using Augmented Reality. *World Neurosurg*. 2016;87:399-405. doi:10.1016/j.wneu.2015.11.084
10. Carl B, Bopp M, Gjorgjevski M, Nimsky C. Navigation-Supported Stereotaxy by Applying Intraoperative Computed Tomography. *World Neurosurg*. 2018;118:e584-e592. doi:10.1016/j.wneu.2018.06.246
11. Smith JS, Quiñones-Hinojosa A, Barbaro NM, McDermott MW. Frame-based stereotactic biopsy remains an important diagnostic tool with distinct advantages over frameless stereotactic biopsy. *J Neurooncol*. 2005;73(2):173-179. doi:10.1007/s11060-004-4208-3
12. Elmi-Terander A, Burström G, Nachabe R, et al. Pedicle Screw Placement Using Augmented Reality Surgical Navigation with Intraoperative 3D Imaging: A First In-Human Prospective Cohort Study. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2019;44(7):517-525. doi:10.1097/BRS.0000000000002876
13. Eftekhari B. App-assisted external ventricular drain insertion. *J Neurosurg*. 2016;125(3):754-758. doi:10.3171/2015.6.JNS1588
14. Lee C, Wong GKC. Virtual reality and augmented reality in the management of intracranial tumors: A review. *J Clin Neurosci*. 2019;62(xxxx):14-20. doi:10.1016/j.jocn.2018.12.036

15. Kongkham PN, Knifed E, Tomber MS, Bernstein M. Complications in 622 cases of frame-based stereotactic biopsy, a decreasing procedure. *Can J Neurol Sci.* 2008;35(1):79-84.
16. Can SM, Turkmenoglu ON, Tanik C, et al. Computerized tomography-guided stereotactic biopsy of intracranial lesions: Report of 500 consecutive cases. *Turk Neurosurg.* 2017;27(3):395-400.
17. Woodworth GF, McGirt MJ, Samdani A, Garonzik I, Olivi A, Weingart JD. Frameless image-guided stereotactic brain biopsy procedure: Diagnostic yield, surgical morbidity, and comparison with the frame-based technique. *J Neurosurg.* 2006;104(2):233-237.
18. Dammers R, Haitzma IK, Schouten JW, Kros JM, Avezaat CJJ, Vincent AJPE. Safety and efficacy of frameless and frame-based intracranial biopsy techniques. *Acta Neurochir (Wien).* 2008;150(1):23-29.
19. Dhawan S, He Y, Bartek J, Alattar AA, Chen CC. Comparison of Frame-Based Versus Frameless Intracranial Stereotactic Biopsy: Systematic Review and Meta-Analysis. *World Neurosurg.* 2019;127:607-616.e4.
20. Satoh M, Nakajima T, Yamaguchi T, Watanabe E, Kawai K. Application of augmented reality to stereotactic biopsy. *Neurol Med Chir (Tokyo).* 2019;59(11):444-447.
21. Rahman R, Wood ME, Qian L, Price CL, Johnson AA, Osgood GM. Head-Mounted Display Use in Surgery: A Systematic Review. *Surg Innov.* 2020;27(1):88-100.
22. Rolland JP, Fuchs H. Optical Versus Video See-Through Head-Mounted Displays in Medical

- Visualization. *Presence Teleoperators Virtual Environ.* 2000;9(3):287-309.
23. Moosburner S, Remde C, Tang P, et al. Real world usability analysis of two augmented reality headsets in visceral surgery. *Artif Organs.* 2019;43(7):694-698.
  24. Cabrilo I, Bijlenga P, Schaller K. Augmented reality in the surgery of cerebral aneurysms: A technical report. *Neurosurgery.* 1982;10(2):252-261.
  25. Cabrilo I, Sarrafzadeh A, Bijlenga P, Landis BN, Schaller K. Augmented reality-assisted skull base surgery. *Neurochirurgie.* 2014;60(6):304-306.
  26. Kantelhardt SR, Gutenberg A, Neulen A, et al. Video-assisted navigation for adjustment of image-guidance accuracy to slight brain shift. *Oper Neurosurg.* 2015;11(4):504-511.
  27. Woerdeman PA, Willems PWA, Noordmans HJ, Tulleken CAF, Van Der Sprenkel JWB. Application accuracy in frameless image-guided neurosurgery: A comparison study of three patient-to-image registration methods. *J Neurosurg.* 2007;106(6):1012-1016.