

氏名	佐藤 信
学位の種類	博士 (医学)
学位記番号	甲第 632 号
学位授与年月日	令和 3 年 3 月 15 日
学位授与の要件	自治医科大学学位規定第 4 条第 2 項該当
学位論文名	脳神経外科における拡張現実
論文審査委員	(委員長) 川平 洋 教授 (委員) 西野 宏 教授 西村 智 教授

## 論文内容の要旨

### 1 研究目的

ニューロナビゲーションは、脳神経外科手術において重要な手術支援装置であるが、使用に際して術野から目をそらし、離れた場所にあるモニターを見る必要がある点と、二次元の診断画像によって示された情報を、三次元により構成される実際の術野に術者の頭の中で変換する必要がある点が課題である。

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。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リアルタイムに重畳表示されるシステムである。

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、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ため、AR 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臨床経験は未だに乏しい。このため AR ニューロナビゲーションを多様な症例に適用することで、AR ナビゲーションが有用な術式や手術手技等を明らかに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 研究方法

#### Trans-visible Navigator

TVN は、術者が専用のタブレット PC を把持し、その背面カメラで術野を撮影すると、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るシステムである。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し、システムを構成する機器には、光学マーカーを装着し、三次元計測カメラを用いてそれらの位置を光学的に把握した。

### 定位脳手術に対する適用

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症例に対して TVN を適用した。手術手法としては、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穿頭予定部位の妥当性を検討した。続いて穿頭孔を穿ち、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、穿刺を施行した。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。

### 脳腫瘍手術に対する適用

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。脳腫瘍切除術における TVN の有用性は、術者により評価が良好な順に「very useful」、「useful」、「somewhat useful」、「not useful」の 4 段階で評価された。本研究では脳腫瘍手術を、TVN 起動後から骨弁を外すまでの Stage A と、硬膜が露出してから硬膜切開を終えるまでの Stage B と、硬膜内における手術操作の Stage C の 3 段階に分割し、それぞれの段階で有用性の評価を行った。

前半の 10 例は様々な症例に対して TVN を適用することを目的とし、浅層の腫瘍と 4 つのアプローチ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後半の 10 例に対して TVN を適用した。

TVN に搭載する三次元画像は、最初の 10 例では著者が任意に作成し、後半の 10 例では術者と術前ディスカッションを行い、TVN に登録する三次元画像を選択した。

一部の症例に対して、脳表静脈を用いた精度検証を行った。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。

## 3 研究成果

### 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、合併症も認めなかった。術者は TVN を使用することで、予定する穿刺軸が重要構造を回避して、その先に腫瘍が存在することがわかるため、術者は安心して穿刺操作ができた。

### 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。

TVN の有用性は腫瘍の局在と関連しており、表層の腫瘍の症例はいずれも「very useful」と評価された手術段階を有していた。半面、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 の症例と、Transcortical approach の症例は、「very useful」と評価された手術段階を有していた。

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。表層の腫瘍と、Interhemispheric approach 及び Transcortical approach によって手術

される深部腫瘍によって構成される後半 10 例への良好な評価を通じて、これらのケースにおいて TVN が有用であることが確認された。

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  $\pm$  standard deviation) 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。

## 4 考察

### 定位脳手術に対する適用

術者は TVN を用いることで、穿刺軸が障害物を回避していることを確認でき、手術の安全性が向上した。また穿刺軸上の腫瘍の有無を確認でき、手術の確実性も向上したと考えられた。

定位脳フレームに代わる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。これは、既存型ニューロナビゲーションに穿刺針の針先を登録することで、針先が病変上に存在することを確認する手法である。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る。加えて、術野から目を離し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。

### 脳腫瘍切除術に対する適用

Interhemispheric approach において、TVN は定位脳手術に対する適用と同様に、障害物（主として架橋静脈）を避けて腫瘍へ向かう経路の決定を支援することで、手術の安全性改善に寄与した。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では、開頭野や皮質切開の範囲決定を支援することで、手術の確実性向上に寄与した。

TVN は腫瘍摘出において、運用面からも有用な手術支援といえた。他の AR ナビゲーションには術野から目を離して、専用モニターを参照するシステムもあるが、TVN にはその必要がなく、自然な姿勢で術野の観察ができた。また、HMD の様に着脱の手間もないため、複数回の使用に適する点も TVN の利点だった。

### TVN の課題と今後

今回の研究では、TVN の技術的課題も見いだされた。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である。しかし今回の研究で明らかにしたように、多くの状況において TVN は脳神経外科手術を支援することができた。今後は今回試みることができなかった血管手術や脊椎手術、また頭頸部外科手術に対する適用も検討したい。また、TVN による解剖理解の改善が、術者や助手、医学生への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。

## 5 結論

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。脳腫瘍手術に対する適用では、AR ナビゲーションが表層の腫瘍と、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を示した。

## 論文審査の結果の要旨

本学医論文は脳外科手術(定位脳手術、脳腫瘍手術)における拡張現実 Trans-visible Navigator(TVN)の有効性と限界の検証を目的とした研究である。本研究の結果から、TVN は表層腫瘍の手術、Interhemispheric approach 及び Transcortical approach による深部腫瘍の手術で有用であることを示した。同時に本研究では TVN の技術的課題も指摘しつつ、今後の展望についても示した。

本研究は TVN を脳外科手術において臨床応用し検証した点に新規性がある。術者視点による主観的評価(「安全性」「確実性」「術者の安心感」など)と、脳表静脈の位置情報の誤差評価による客観的評価を用い、TVN の有効性評価を行った点が従来の研究との相違である。しかしながらエンドポイント設定が術者(ユーザー)評価であるにも関わらず、本研究では術者の主観的評価の詳細な記述が不足していると思われた。質疑応答において、佐藤氏から「手術時間」、「出血量」、「合併症」などのテクニカルスキルによる評価は困難であったと報告があった。全般として本研究においては、エンドポイントである「有用性」を Open Question 形式で明確化し、結果を理解し易くすることが望ましい。結論として、脳外科手術における TVN の拡張性、発展性を示すことが可能となり、将来への継続的研究につながると考えられる。

## 最終試験の結果の要旨

最終試験に際しては、論文の内容についてわかり易く適切にプレゼンテーションがなされた。審査委員からの質問にも概ね適切に答え、結果の考察の困難さについても真摯に報告した。「有用性」というエンドポイントの明確にする改訂を求められたが、可能な範囲で適切に対応し、独立した研究者としての資質と能力を示したと考えられる。

以上の観点から修正論文を審査し、佐藤氏は学位に値する学識と研究統括能力が備わっていると審査員全員が判断し、最終試験に合格とした。