

# 脳深部における縫合を可能とする ワイヤ駆動型球体鉗子の提案

電気・化学専攻 医用工学領域 2181241 鈴木 貴也

(主査：和多田 雅哉 教授 副査：京相 雅樹 教授，島谷 祐一 准教授)

## 1. 緒言

開頭手術の処置範囲は、脳表面部と脳深部に分類される。脳深部を対象とした手術は脳表面部の手術と比較して、脳を圧排する必要があるため危険である。そのため、慎重な操作が要求される。従って、脳深部を対象とした手術は、術者と患者共に負担が大きい手術である。脳深部における低侵襲な手術として、神経内視鏡手術が存在する。神経内視鏡手術は頭頂部を 40[mm]程度切開し、軟性内視鏡を挿入して脳深部の腫瘍を切除する手術である。切開創が小さいため、患者への負担が少ない。また、神経内視鏡手術はモノポーラを使用した止血操作のみ可能である。しかし、血管の熱損傷の恐れがある。また、脳外科手術において縫合操作は、血腫による感染症や大量出血による二次被害を防ぐ重要な作業である。そのため、脳深部における縫合を可能とする脳外科用手術ロボットの開発が必要であると考えた<sup>[1]</sup>。

## 2. 提案する脳外科用手術ロボット鉗子

### 2.1 目標とする脳外科手術の概要

本研究では、脳深部手術における脳深部の腫瘍切除と血管の縫合結紮の動作を行うことが可能な鉗子を目指す。低侵襲な脳深部手術の手術領域である直径 20~30[mm]、深さ 100~120[mm]に対して鉗子 2 本と内視鏡 1 本の挿入可能で鉗子 1 本での縫合、鉗子 2 本での結紮を目標とした脳外科用手術ロボット鉗子を提案する。深部狭小では器具の挿入可能な領域が細長い円柱状をしているため鉗子の姿勢に制限がある。また、縫合結紮のような複雑な操作にも対応可能な低侵襲かつ縫合可能な可動範囲や操作を有する脳外科用手術ロボット鉗子を提案する。

### 2.2 脳深部での縫合操作の有用性

縫合操作とは手術における切開創を縫合針によって縫い合わせる操作である。縫合操作の重要性として、感染症や大量出血による二次被害を防ぎ、血管の正常構造の温存が可能である。脳深部手術の縫合用の湾曲針は円弧形状をしているため、針の円弧にそった回転操作を行いながら刺入すると抵抗なく対象組織に刺入することが可能である。鉗子先端が屈曲した状態での先端軸周りの回転自由度を備えることで脳組織の損傷や手術遅延の危険性が減り、深部狭小でも針の刺入動作が可能となる。

### 2.3 提案するロボット鉗子の要求条件

先行研究の脳外科用手術ロボット鉗子は自由度の不足が挙げられていた<sup>[2]</sup>。手術領域が深部狭小であるため視野が鉗子先端部の屈曲角度に依存する。本研究で提案する鉗子の要求動作を以下に示す。

- ・内視鏡の視野の影響を受けない自由度を有する
- ・深部狭小で縫合結紮や人間の手首のような繊細な操作が可能
- ・屈曲した状態で鉗子先端部の回転が可能

上記を満たすことで深部狭小で縫合結紮可能であると考える。図1に縫合の動作イメージを示す。

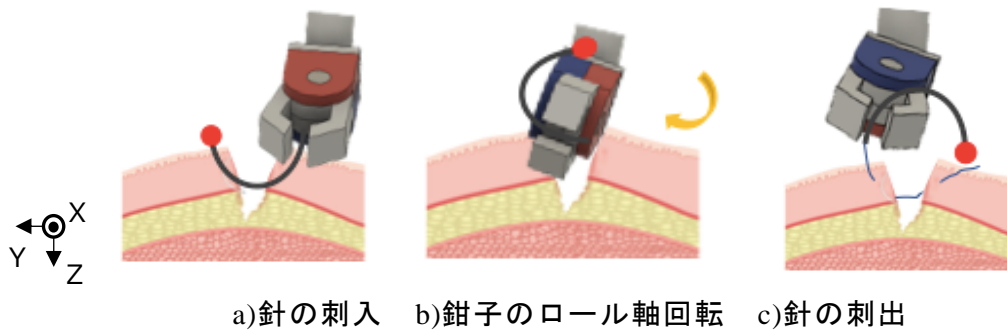


図1 縫合の動作イメージ

図1に示すように、鉗子先端部の屈曲した状態での回転動作することで縫合を目指す。それによって、狭小深部における鉗子1本での縫合操作、鉗子2本での結紮操作が可能であると考える。

### 3. 手術領域による縫合結紮に必要な動作の検証

#### 3.1 手術領域による鉗子操作の確認

##### 3.1.1 手術領域における鉗子操作の目的

先行研究の脳外科手術ロボットは、可動範囲において手術領域底面端部以外での操作が困難である<sup>[2]</sup>。加えて、鉗子一本のみを使用して実験を行っていたため、先行研究の実験結果のみで縫合可能であると判断するのは不十分である。先行研究では判断が困難であった鉗子二本での可動範囲を検証ため、本実験を行う。

##### 3.1.2 手術領域で使用する器具の設定条件

本模擬実験では、腹腔鏡手術用鉗子や内視鏡，手術領域を使用した。模擬実験で使用する手術領域は約1.43倍に拡大した。手術領域は先行研究と同様に円柱で模擬実験を行う。表1に模擬実験の設定数値，図2に模擬実験の配置を示す。

表1 模擬実験の設定数値

項目	設定数値
手術領域(直径)	30[mm]
手術領域(深さ)	143[mm]
シャフト径	5.00[mm]
鉗子の自由度	2(把持, 回転)
鉗子の本数	2本

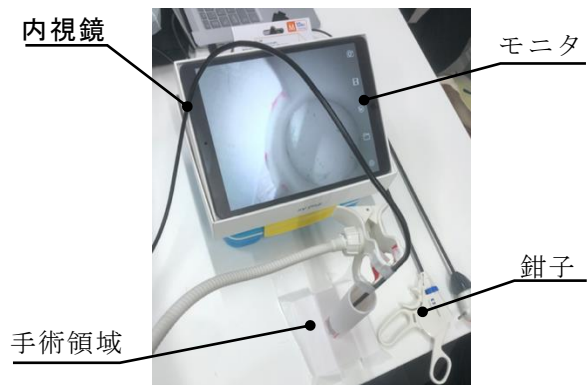


図2 模擬実験の配置

図2のように、操作空間を手前，モニタを奥に配置し，モニタのみを確認して操作を行う。

### 3.1.3 鉗子操作の確認における操作手順

模擬実験では、縦約 40[mm]×横約 15[mm]の布を腫瘍と仮定する。布に赤い線を引き、横に二等分した後に円柱から摘出する操作を 5 回行う。また、手術領域内で屈曲自由度がない場合の縫合結紮を 5 回行った。切断した布の切断面、操作時の視点から考察を行い、可動範囲と必要動作の検討を行う。

### 3.1.4 手術領域における鉗子操作の結果考察

模擬実験では、把持動作と切断動作は可能であった。しかし、縫合結紮動作は不可能であった。図 3 に内視鏡の視点を示す。鉗子先端部の確認が不可能だからである。内視鏡の映像では奥行きを捉えることが困難であるため、鉗子先端部の位置や切断距離が不明である。図 3 に内視鏡の視点を示す。

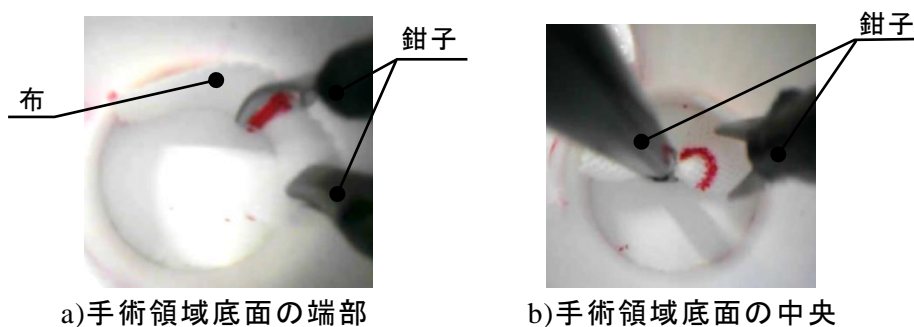


図 3 切断時の内視鏡の視点

図 3 のように、鉗子先端部の確認が困難である。内視鏡の映像では奥行きを捉えることが困難であるため、鉗子先端部の位置や切断距離が不明である。手術領域底面で操作が可能である。理由として、駆動部が人間の腕であるため、可動範囲が広く干渉がなかったと考えられる。模擬実験は手術領域底面中央の操作、駆動部の干渉において、先行研究よりも優れている。しかし、奥行きの確認は不可能である。よって、手術領域における可動範囲の改善と縫合に必要な操作の検討が必要である。

## 3.2 縫合操作における鉗子先端部の操作確認

### 3.2.1 縫合操作における鉗子先端部の操作の目的

3.1 の実験では、可動範囲の確認を行ったが手術領域内での縫合結紮操作が不可能であった。そのため、縫合結紮の際の鉗子先端部の角度から鉗子の自由度の決定、必要動作の再検討を行う。

### 3.2.2 鉗子先端部の操作確認の手順

縫合結紮の経験がある被験者に腹腔鏡手術鉗子を使用して、練習用人工皮膚に縫合と結紮の 2 つの操作を 3 回実行させた。正面と側面にカメラを設置し、鉗子 1 本での縫合と鉗子 2 本での結紮や縫合結紮時の縫合針の持ち替え回数から鉗子先端部の自由度が縫合結紮に必要な自由度を有しているか再検討を行う。

### 3.2.3 縫合結紮操作の結果考察

縫合結紮ともに可能であった。図 4 に縫合操作の流れ、図 5 に結紮操作の流れを示す。

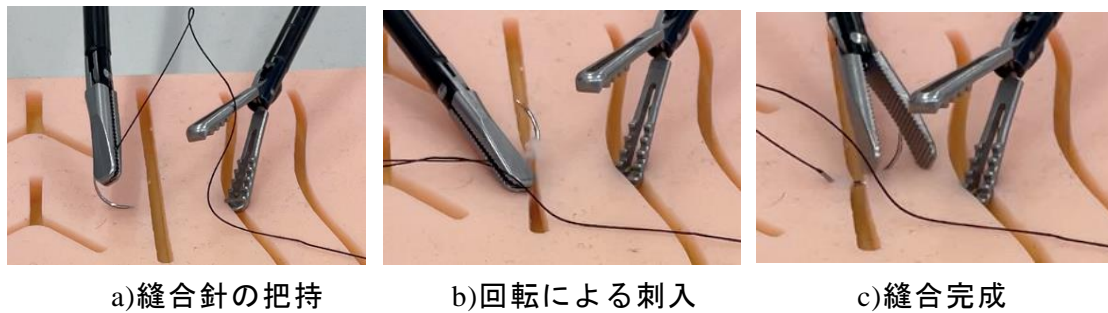
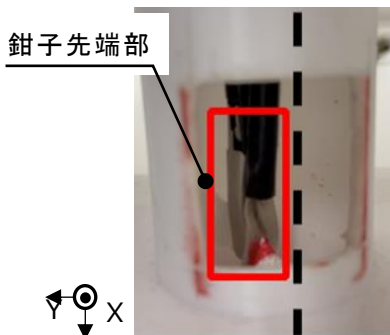


図 4 縫合操作の流れ

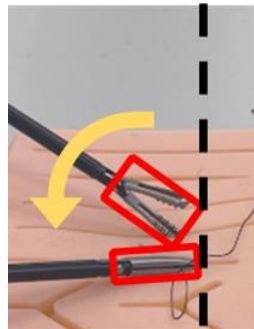
図 4 に示すように、鉗子先端部の回転のみで縫合が可能であるため、脳深部の手術領域では 90[deg] 屈曲しながら、-180~180[deg] の鉗子先端部が回転を有することで鉗子 1 本での縫合が可能であると考えられる。同様の自由度を有し鉗子 2 本で行うことで結紮可能である。

### 3.3 手術領域による縫合結紮に必要な動作の決定

3.1 では縫合操作が不可能であったが、3.2 では縫合結紮操作が可能であった。理由として、鉗子先端部の屈曲角度が上げられる。図 5 に手術領域の有無による鉗子先端部を示す。図 6 に提案する鉗子を示す。

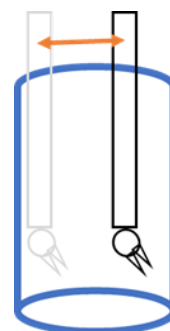


a) 手術領域あり

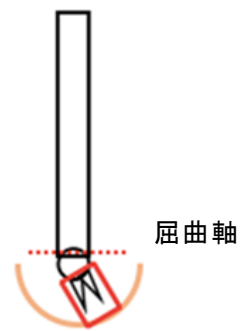


b) 手術領域なし

図 5 手術領域の有無による鉗子先端



a) 鉗子の駆動



b) 可動範囲

図 6 提案する鉗子

図 5 のように、手術領域がない場合の鉗子先端部の角度を手術領域内で可能にすることで縫合結紮操作が可能になると考える。先行研究では鉗子先端部に屈曲、回転、把持の 3 自由度を付加していた。しかし、手術領域底面の中央では駆動部同士の干渉により操作が不可能であった。そのため、手術領域底面で操作可能な鉗子が必要である。本研究では、手術領域に対して手術器具をかぶせるように挿入することを提案するため鉗子の平行移動が必要である。図 6a) のように鉗子が平行移動する。そのため、鉗子先端部に任意の角度を容易にとれる機構が必要である。図 6b) に示すように、鉗子先端部に自由度を集中させることで屈曲軸と把持部を短く、深部狭小でも繊細な操作が可能な鉗子を提案する。

#### 4. 提案するワイヤ駆動型球体鉗子の設計

本研究ではピッチ,ヨー,ロールと把持の4自由度の球体鉗子を提案する。3.1, 3.2の実験結果と先行研究の値から目標数値を設定した。表2に目標数値, 図7に提案する鉗子を示す<sup>[2][3]</sup>。

表2 目標数値

項目	目標値
シャフト径	$\phi 3.5$ [mm]
把持部の長さ	1.2[mm]
ピッチ	-180~180[deg]
ヨー	-80~80[deg]
ロール	-80~80[deg]
把持	0~40[deg]
把持力	5[N]
位置決め精度	0.01
分解能	0.01

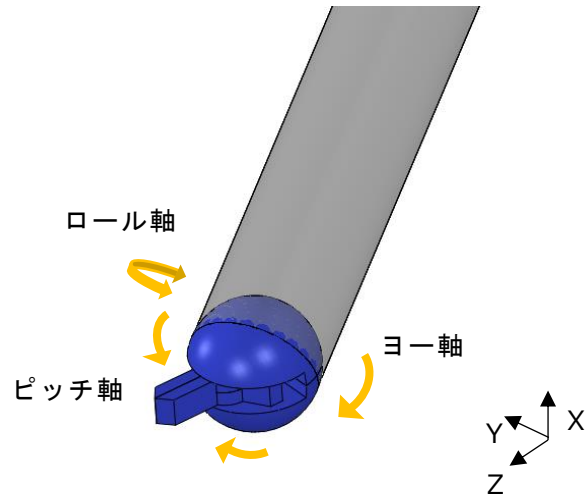


図7 提案する鉗子

表2に示すように, 鉗子先端部に自由度を付加することで人間の手首のような繊細な操作が可能になり, 深部狭小でも縫合結紮における要求動作を満たすと考える。

先行研究では鉗子先端部に屈曲, 回転, 把持の3自由度を付加していた。しかし, 手術領域底面の中央では駆動部同士の干渉により操作が不可能であった。そのため, 手術領域底面で関節が同軸で3自由度有する鉗子を提案する。球体鉗子の特徴として, 鉗子先端部を球体にすることで自由度を集中させ, 深部狭小でも小回りが効き繊細な操作が可能である。また, ピッチ, ヨー, ロールが同時でも別でも動く屈曲した状態での回転が可能であることや内視鏡の視野への影響が少ないことが考えられる。

##### 4.1 球体鉗子の駆動方法の決定

本研究ではワイヤ駆動型球体鉗子を提案する。図8にワイヤ球体外部配置を示す。図9に簡易拡大モデルを示す。

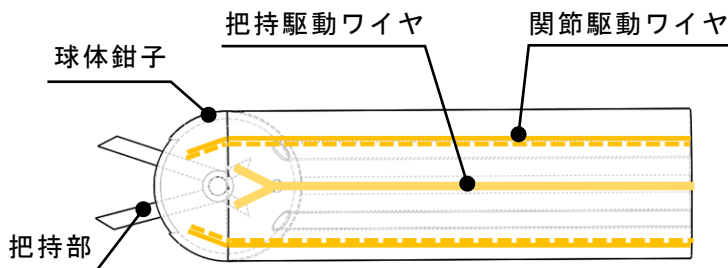


図8 ワイヤ球体外部配置

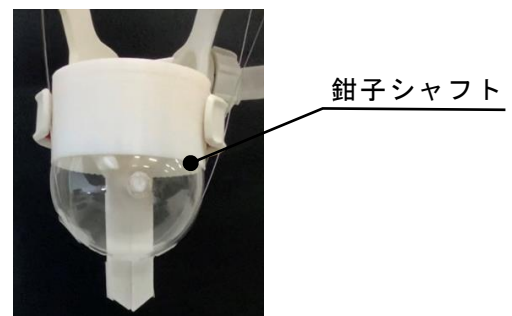


図9 簡易拡大モデル

図 8 に示すように、可動範囲拡大のため球体鉗子の外部にワイヤを 45[deg], 135[deg], 225[deg], 315[deg] の 4 カ所にワイヤを配置した。4 つの関節駆動ワイヤのうち指定のワイヤ 2 本牽引することでピッチ軸，ヨー軸での回転が可能である。また，ワイヤ 1 本の牽引の場合ピッチ軸とヨー軸が同時に動作可能である。ロール軸は関節駆動ワイヤを固定した状態で鉗子シャフトを回転させることで可能である。把持は把持ワイヤを牽引することで可能である。提案するワイヤ駆動型球体鉗子は関節駆動ワイヤと把持駆動ワイヤは干渉しない機構である。そのため，深部狭小でも縫合操作が可能であると考えられる。図 9 に示すように，提案したワイヤ駆動型球体鉗子が動作可能か確認するため簡易拡大モデルを作成し検証を行った。球体鉗子は鉗子シャフト装着時でもピッチ軸とヨー軸ともに動作可能であった。また，縫合に必要なピッチ軸の屈曲した状態でのヨー軸の屈曲が可能である。しかし，ワイヤの設置位置や牽引力のかかり方の考慮が必要である。

#### 4.2 球体鉗子のワイヤ駆動における問題点

簡易拡大モデルの作成を行い，関節駆動及び把持駆動のシミュレーションを行った。問題点として，球体鉗子と鉗子シャフトの機械的合致が不可能，把持部のワイヤ牽引時に関節駆動部の干渉があげられる。図 10 に球体鉗子と鉗子シャフトの合致，図 11 の把持ワイヤの干渉を示す。

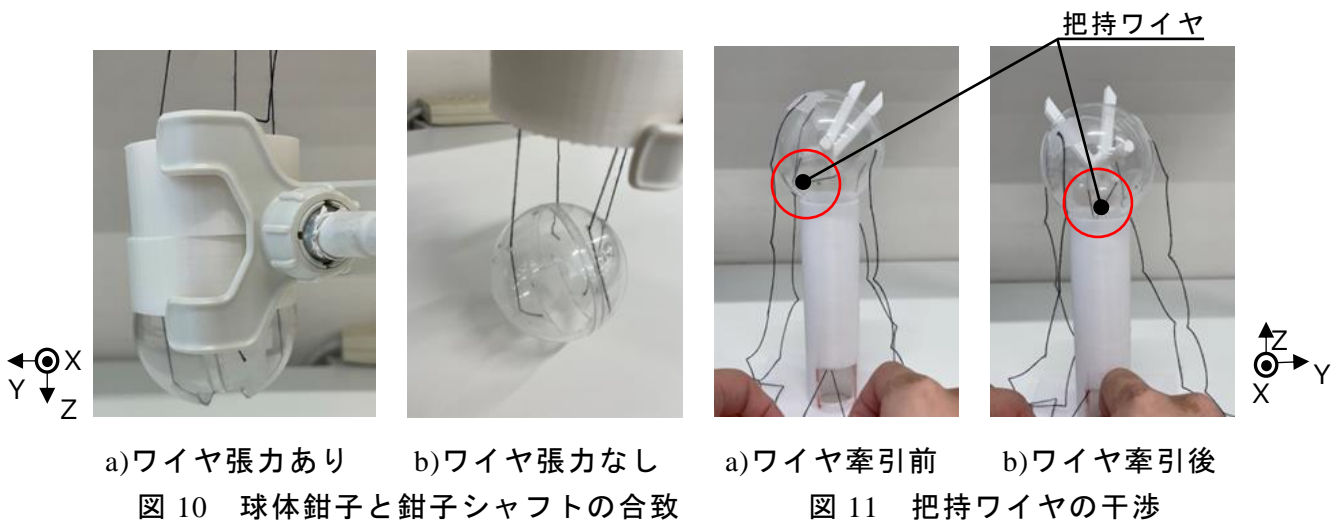


図 10 に示すように，ワイヤ張力がある場合は球体鉗子と鉗子シャフトが合致する。しかし，ワイヤ張力がない場合は球体鉗子が落ちる。球体鉗子使用時は常にワイヤに張力がかかっている。球体鉗子はワイヤの牽引によって任意の角度をとるため機械的な合致が不可能である。しかし，脳深部での接触による球体鉗子のずれやワイヤの張力がなくなった場合のリスクが大きい。そのため，機械的な合致をせず，維持する必要があるため球体鉗子と鉗子シャフトをシリコン製のカバーで固定することで合致しつつ，可動範囲の確保を目指す。もう 1 つの問題点として，関節駆動ワイヤと把持駆動ワイヤの干渉があげられる。図 11a) に示すように，球体鉗子を右に屈曲した際，把持ワイヤが左下にある。しかし，図 11b) に示すようにワイヤ牽引時，屈曲していた球体鉗子は元の位置に戻り把持ワイヤの位置は下にある。鉗子シャフト装着時も

関節駆動ワイヤと把持ワイヤが干渉し、任意の角度での把持操作が不可能であった。そのため、ワイヤ同士が干渉しない干渉しても影響を与えない駆動の提案が必要である。把持操作を行うとき関節駆動ワイヤを固定することによって関節駆動の干渉を軽減することで操作可能である。

## 5. ワイヤ駆動型球体鉗子関節駆動シミュレーションの評価

### 5.1 ワイヤ駆動型球体鉗子における縫合に必要な自由度の評価

#### 5.1.1 ワイヤ駆動型球体鉗子における自由度評価の目的

本研究で提案したワイヤ駆動型球体鉗子が脳深部における縫合針の刺入が可能であるか、屈曲した状態での回転操作が可能であるか不明である。そのため、脳深部における縫合に必要な自由度を有しているか動作検証を行う

#### 5.1.2 ワイヤ駆動型球体鉗子における自由度評価の方法

簡易拡大モデルの正面と側面にカメラをおき、縫合に必要な自由度有しているか縫合針が針山に刺入可能か検証を行う。縫合の操作手順として、縫合針の把持、ピッチ軸の回転、ピッチ軸を屈曲した状態でのヨー軸の回転、針山への刺入の順で行う。今回の実験では、提案するワイヤ駆動型球体鉗子が縫合に必要な自由度有しているか評価を行うため、縫合針はあらかじめ把持した状態から行う。

#### 5.1.3 ワイヤ駆動型球体鉗子における自由度評価の結果考察

図 12 に縫合操作の結果を示す。

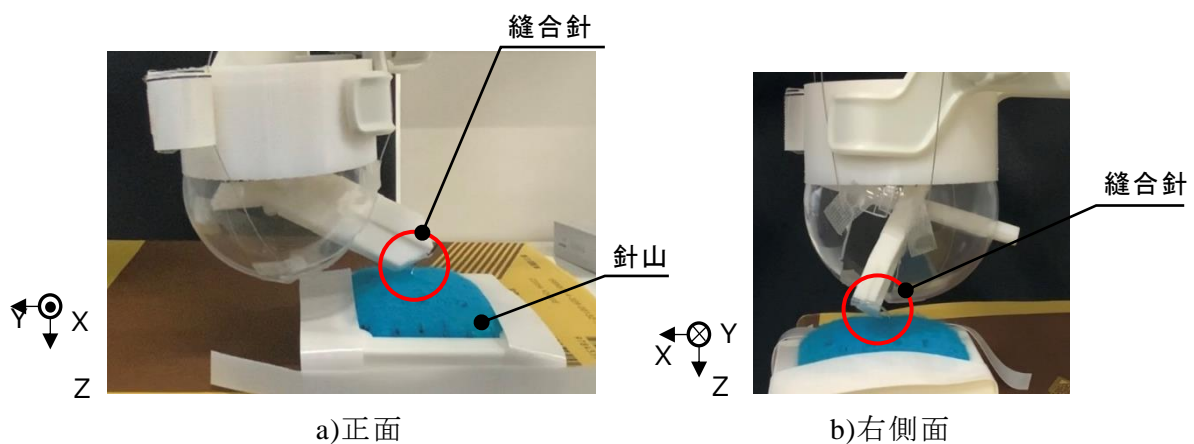


図 12 縫合操作の結果

図 12 に示すように、縫合針の刺入に成功した。理由として、ピッチ軸の回転、ピッチ軸が屈曲した状態でのヨー軸の回転が可能であったためである。このことから、縫合に必要な自由度を有している。ワイヤの配置位置やワイヤ牽引方法を再検討することでスムーズな鉗子操作が可能であると考えられる。

### 5.2 ワイヤ駆動型球体鉗子における縫合に必要な可動範囲の評価

#### 5.2.1 ワイヤ駆動型球体鉗子における可動範囲評価の目的

4 章では提案したワイヤ駆動型球体鉗子が動作可能か駆動シミュレーションを行った。しかし、動作は可能であったが目標数値の可動範囲を有しているか不明であった。そのため、目標数値の可動範囲を有しているか評価を行う。

### 5.2.2 ワイヤ駆動型球体鉗子における可動範囲評価の方法

簡易拡大モデルの正面にカメラをおき、ピッチ軸、ヨー軸の回転を10回ずつ行い、撮影をする。最大屈曲時に撮影した画像から基準点と最大屈曲点をプロットし、算出された最大屈曲角度から目標数値を満たしているか評価を行った。今回の実験では、アプリを使用して最大屈曲角度を算出するが、プロット時に人の手が関与するため精度が曖昧である。そのため、小数点以下は切り捨て評価を行う。

### 5.2.3 ワイヤ駆動型球体鉗子における可動範囲評価の結果考察

結果として、ピッチ軸は10回すべて目標数値80[deg]を満たしていた。しかし、ヨー軸は10回すべて目標数値80[deg]を満たしていなかった。原因として、作成した簡易拡大モデルは球体カプセルに鉗子把持部の穴を空けている。その穴と鉗子把持部の隙間と鉗子把持部の厚さがあげられる。簡易拡大モデルにおいて把持部の厚さとワイヤ接着面の高さが5.2[mm]以下の場合、ワイヤ駆動型鉗子は目標数値である80[deg]をみたす。鉗子把持部の厚さ球体カプセルの穴の寸法を再検討することで目標数値をみたすと考えられる。

## 6. おわりに

本研究は、脳深部の腫瘍切除や脳深部の血管縫合を可能とする低侵襲な手術を目標とする。そのため、脳深部で鉗子1本での縫合、鉗子2本での結紮を可能とする脳外科用手術ロボット鉗子の提案をした。手術領域による鉗子操作の確認の実験から手術領域における内視鏡視野の確認、縫合結紮操作に必要な鉗子先端部の自由度の検証を行った。以上の結果から、同軸で3自由度を有する球体鉗子を提案した。目標数値の可動範囲を有しているか拡大鉗子モデルを作成し、駆動シミュレーションから評価を行った。結果として、縫合針の刺入は成功した。また、ピッチ軸の目標数値は満たしていた。しかし、ヨー軸は満たしていなかった。鉗子把持部の厚さ球体カプセルの穴の寸法を再検討することでヨー軸の目標数値をみたすと考えられる。

今後の展望として、脳外科手術ロボットは狭小深部における繊細な操作が困難であることから研究開発が進んでいない分野である。しかし、従来とは違う鉗子の形状変形や駆動方法で用いることで可能になっていくと考えられる。

## 参考文献

- [1] 伊達 勲ほか，“神経内視鏡治療スタート&スタンダード”，メジカルビュー社，2019年1月10日，pp.14-27
- [2] 忽滑谷 浩史ほか，“多自由度鉗子を搭載した深部脳外科小型手術支援システムの開発”Proceedings of the 2016 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, 2016年7月，pp1-4
- [3] 大久保 拓郎ほか，“深部狭所での操作を対象とした脳神経外科手術用多自由度ロボット鉗子の開発”，Proceedings of the 2014 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, toyama, japan, May25-29, 2014