

## 腹腔鏡手術用マスタスレーブ型5指ハンドロボットの開発と 没入感に関する研究

Development of a master-slave five finger robot hand for laparoscopic surgery to  
improve operator's sense of immersion

2041022



研究代表者

九州大学  
先端医療イノベーションセンター

助教 中 橋 龍

### 【研究の目的】

近年の外科手術は患者の負担の少ない低侵襲な術式が主流となってきており、体表を大きく切り開き内臓を露出させて行う開腹手術に代わって、体表に数か所設けた小さな穴から、細長いカメラと手術器具（鉗子）を挿入して行う腹腔鏡手術が主流になっている。この術式は患者にとってはQOLの増加というメリットがあるが、術者にとっては高度な鉗子操作の習得が要求され、負担が大きい。鉗子は一般的に操作部のつまみを開閉すると、エンドエフェクタの2本の爪が開閉して物を掴めるようになっている。この系で人間から見た入出力における信号伝達は、鉗子→カメラ・モニター→目→脳→手→操作部→鉗子、となっており、脳は鉗子と操縦桿の空間的な対応付け、および手から操作部への動作軸変換を行っている。術者は訓練により、これらの動作変換を意識せずに行えるよう、脳に覚えこませているものと考えられる。本研究では、人間側の出力インターフェースである手と、操作対象である鉗子が同一形状であることが、最も直感的なマスタスレーブ系となるのではないかという仮説に基づき、これを検証するため、操作部としてグローブ型センサ、鉗子として人の手にできるだけ近い形状と自由度をもつ腹腔鏡手術用ロボットハンドを開発する。腹

腔鏡手術において体表に設ける穴にはトロッカーと呼ばれるパイプが設置され、この一般的な最大内径が12mmである。従って、開発するロボットハンドは断面12mm径の円に収まるサイズを目標とする。人の手の形状・動作に似せることが目的であるため、5本指を備え、各指最低3自由度、計15自由度とする。これまで多くのロボットハンドの先行研究があるが、その多くが人の手と同じ大きさである。ミニチュアロボットハンドの研究はいくつか存在するが1指あたりせいぜい1自由度が限界であった。本研究では、独自のワイヤ駆動方法と精密な加工により、1指あたり多自由度をもつ世界最小のロボットハンドを実現する。

### 【研究の内容、成果】

図1に開発したスレーブロボットの外観、図2にマスタの外観を示す。



図1 開発したスレーブロボット

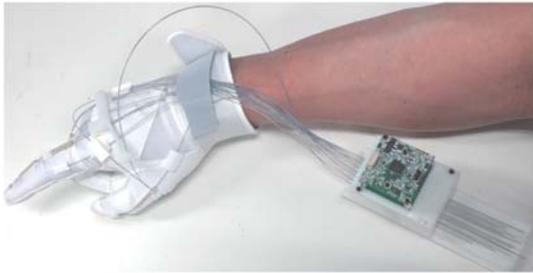


図2 開発したマスタ

## 1. スレーブロボットの開発

術中に発生し得る最も複雑な作業の一つである糸結びが出来る程度の自由度配置を目標とした。解剖学的には片手の中に30自由度程度が存在するが、これを全部模倣するのは困難であるため、最低限の自由度として、各指の先端を3次元空間内で任意の位置に位置決め可能な自由度である各指能動3自由度、計15自由度を持たせることとした。図3に自由度配置を示す。拇指はCM関節のx軸周り（内転）とz軸周りに1自由度ずつ、IP関節とMP関節を従動とし各1自由度配置し、計4自由度、能動3自由度とした。示指～小指の4本は、MP関節にてy, z軸の屈曲が可能なヒンジを設け能動2自由度、PIP, DIP関節は従動とし各1自由度配置し、同じく計4自由度、能動3自由度とした。

アクチュエータは遠位に配置せざるを得ないこと、指の径が2-3mmと微小であるため複雑な機構を搭載できないことから、ワイヤ駆動とし、関節に用いるヒンジは円弧状の凹凸を積み

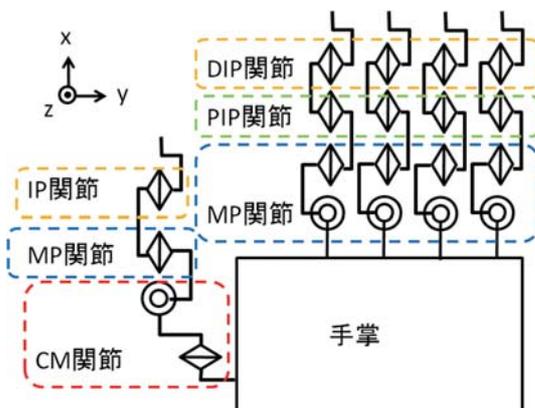


図3 スレーブの自由度配置

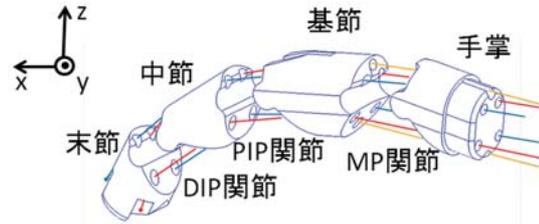


図4 スレーブ示指のCAD図

重ねる形状とした。このようにすることにより、ワイヤのテンションにより、回転中心にピンを設けなくともヒンジが構成できる。図4に示指を例に機構の詳細を示す。説明のため各リンクを離して図示してある。MP関節は凹面をさらにz軸周りの円弧状とすることで、y, z軸の2自由度を持っている。同色のワイヤは一对の拮抗駆動をなす。赤・青の2組のワイヤによりPIP, DIP関節の曲げとMP関節のz軸周りの2自由度を駆動し、橙のワイヤによりMP関節のy軸周りの1自由度を駆動する。なお、拇指の内転機構1軸のみピンでヒンジを構成し、ワイヤは手掌の表裏に設けた穴を経由させた。先端2自由度のワイヤ牽引力が内転用ヒンジにかからないよう、コイルチューブで内転用ヒンジとモータユニットを接続している。

素材は切削加工の容易な樹脂とし、PEEKを用いた。ワイヤは細径柔軟でかつ伸び（弾性）が少なく、さらに摩擦が小さい必要がある。金属ロープは伸びが少ない一方、指の屈曲半径になじまない。そこで釣り糸等に使用される高強度の合成繊維を用いた。

以上の設計手法により、12mmの円筒に収まるサイズの全20自由度、能動15自由度のロボットハンドの試作に成功した。モータを含めた全体の外観を図5に示す。

## 2. マスタの開発

手指の動作を多自由度で計測する装置はデータグローブと呼ばれ、複数市販されている。従来のデータグローブには、屈曲すると側面より光が漏れる光ファイバを各関節に配置して光量の減少を計測するもの、屈曲により抵抗値の変

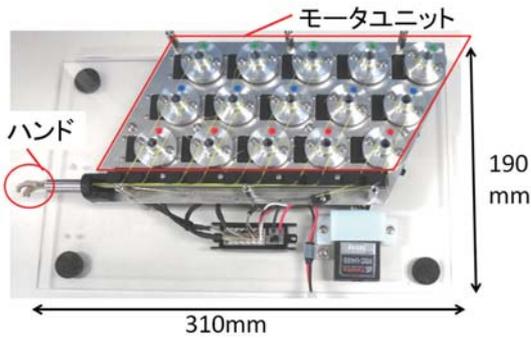


図5 スレープ全体外観

化する導電ゴムを用いるものなどがあるが、本研究に必要な1指あたり多自由度のセンシングが可能なのは非常に高価である。また導電ゴムでは例えば指を屈曲させているのか逸らせているのかは判別できない。2眼カメラにより手の立体画像を取得する安価な手指用のモーションキャプチャが市販されているが、指が掌に隠れてカメラで見えないときは計測ができない。そこで、本研究に必要な各指3自由度、計15自由度をもつ高精度、低コストのデータグローブを新たに開発した。

基本原理は、市販の手袋（野球の皮製バッティンググローブを採用した）を用い、指の各リンク間にワイヤとチューブを張り、関節の屈曲によるワイヤのチューブに対する変位を計測するものである。図6に例として示指の構成を示した。ワイヤ2（赤）は末節に断端が固定され、中節、基節に固定されたガイド用のパイプ（橙）を通る。ワイヤ1（青）の断端は基節に固定される。これらワイヤはそれぞれ手掌の甲に固定された柔軟チューブ（橙）に入り、柔軟チューブの反対端から突出する。この突出の変位を計測することで、関節の角度が求まる。ワ

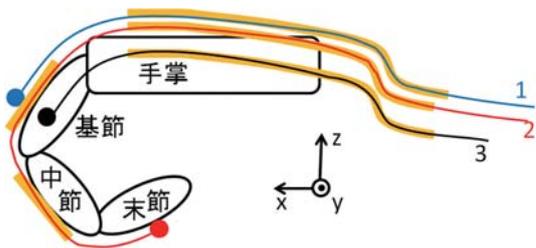


図6 マスタの機構概念図

イヤ2の変位はDIP, PIP, MP関節の3つの合計角度に依存する。ワイヤ1はMP関節の角度のみに依存するため、MPの角度が求まり、ワイヤ2の変位からワイヤ1の変位を減じることで、DIP, PIP関節の合計角を分離できる。ワイヤ3（黒）は基節の側面に固定される。MP関節のz軸周りの角度はワイヤ1, 3の変位の差から求まり、この差は同関節のy軸周りの角度に寄らず一定である。中指、薬指、小指のワイヤ配置は人差し指に同様である。拇指は内転の動きを計測するために手掌から拇指方向に梁を伸ばし、柔軟チューブ断端を固定している。拇指の3軸のワイヤは、互いに干渉の最も小さくなる配置とした。

ワイヤにはNi-Ti合金（超弾性と呼ばれるもの）線を用いた。糸やロープの場合、基端（手首側）で牽引が必要となるが、Ni-Ti剛金線は適度な剛性を持っており、座屈せずにチューブからの引き出し・押し戻しが可能であった。柔軟チューブには摩擦の少ないPTFEを用いた。

ワイヤ15本の変位の計測方法には、プーリ式のエンコーダや直線状の可変抵抗などが考えられるが、摩擦抵抗を極力排除すること、コストを抑えることを要求仕様とし、カメラでまとめて計測することとした。柔軟チューブから出たワイヤの両端をチューブで拘束し、ワイヤの1点に色を付けることで、15本の直線上を点が移動する画像（図7）が得られ、これをカメラで撮影することによりワイヤの変位が得られる。この利点は、ワイヤの本数が増えてもコストが変わらないことである。カメラの仕様は60 fps,

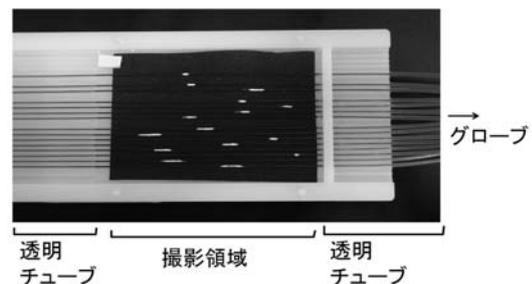


図7 カメラで撮像するワイヤ断端

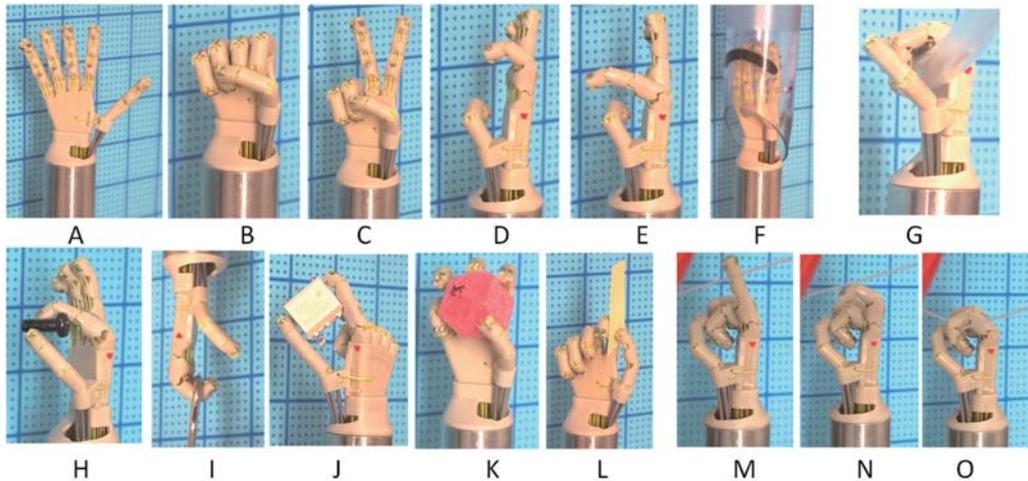


図8 ジェスチャおよび把持実験：A～C ジャンケンジェスチャ，D～E MP 関節と PIP+DIP 関節を独立して動作させている様子，F 内径 12 mm の円筒に挿入している様子，G～L Schlesinger の把持 6 形態を実現している様子，M～O 指の背後にある糸を引っ掛けて手繰り寄せる動作

魚眼レンズ，取り込み画像サイズ 640x480 である。画像処理はひずみ補正，2 値化の後，ワイヤ毎の ROI 内でマーカの右端を検出する。ワイヤ 1 本あたり 10 ピクセル幅を割り当てている。画像の取込みによるレイテンシ，画像処理のフレームレート等の時間遅れの合計は 190 ms であった。マスタのコストの殆どはカメラのコストであり，安価で高精度の多自由度データグローブが実現した。

### 3. 性能評価

本マスタ，スレーブを用いた各ジェスチャおよび把持実験の様子を図 8 に示した。図中 G～L はハンドの評価でしばしば用いられる Schlesinger の把持 6 形態の全て（順に Cylindrical grasp, Tip, Hook, Palmar, Spherical grasp, Lateral）を実現している様子である。外科結紮の動作には手掌を動かさずに指だけで糸を引っ掛ける動作が頻繁に現れるが，M～O はそのデモの様子である。

### [今後の研究の方向，課題]

1 指あたり多自由度をもつ世界最小のロボットハンドが実現し，加えて低コストで多自由度のグローブ型センサが実現した。

今後引き続き，腕（最低 6 自由度の手首・肘・肩関節）を開発し，本ハンドと統合したい。合わせて腕用のマスタを開発し，2 本の手と 3D カメラを備えたシステムを最終形として想定している。両手を用いたタスクが可能になった後に，人の手に似せた本マスタスレーブ系による操作没頭感への影響を調べ，新たな知見を得ることを期待する。手術器具としてのアプリケーションは，例えば別々の指に電気メス，糸切りはさみ，持針用指先等の機能を割り当てること，ミニチュアの鉗子等を体内に持ち込むこと，センサを付加し触診などを試みることで，様々な発展研究が考えられる。