研究紹介

腹腔鏡手術用
ミニチュアロボットハンドの開発

九州大学
先端医療オープンイノベーションセンター
中楯龍

背景・目的

現状の
手術ロボット

**究極の直感的な
マスタスレーブ系は
人の手と同じ形状**

腹腔鏡手術は、体表に5～10mm程度の穴を数か所設け、そこからカメラと手術器具（鉗子）を挿入して行う手術である。患者にとっては傷創が少なくQOLが高いメリットがあるが、カメラを見ながら体外の手元部と逆に動く鉗子での作業となるため、この鉗子操作が非常に難しい。この操作を直感的に行うことが出来るようにした手術ロボットが実用化されており、患者体内にある鉗子先端を操作者が手でつまんでいるような直感的な操作が可能である。

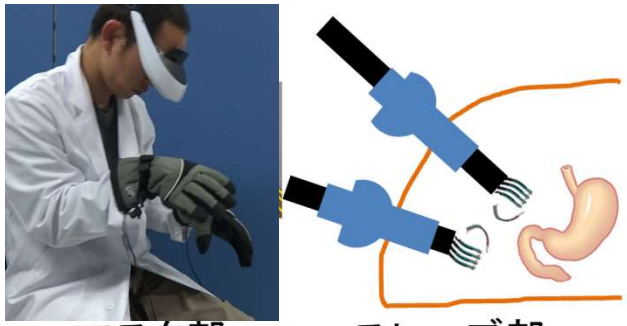
しかし、既存の手術ロボットの「手」はピンセットのような2本の爪からできており、人の手のような複雑な作業、例えば糸結びを行うには、特別な方法を知らなければできない。

「究極的に直感的な」手術ロボットとは何かを検討した結果、直感的な操作の究極型は、自分の手の動きをそのまま体内で再現するマスタスレーブ型ロボットハンドであろうと考えた。

本研究では、究極的に直感的な腹腔鏡手術用ロボットとして、体内に挿入して手術が可能な極小の5本指のマスタスレーブ式ロボットハンドを開発する。

あたかも腹腔内に両手を突っ込んで手術しているかのように感じられる手術ロボット

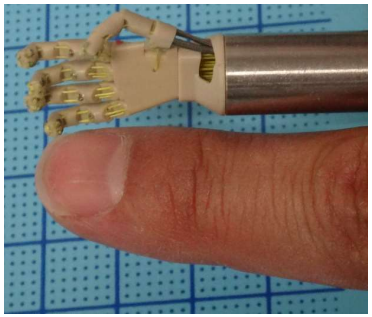
・5本指・腕を持ち、φ12mmに収まるロボットハンドx2
・3D内視鏡
・グローブ型のマスタを備えた手術ロボット



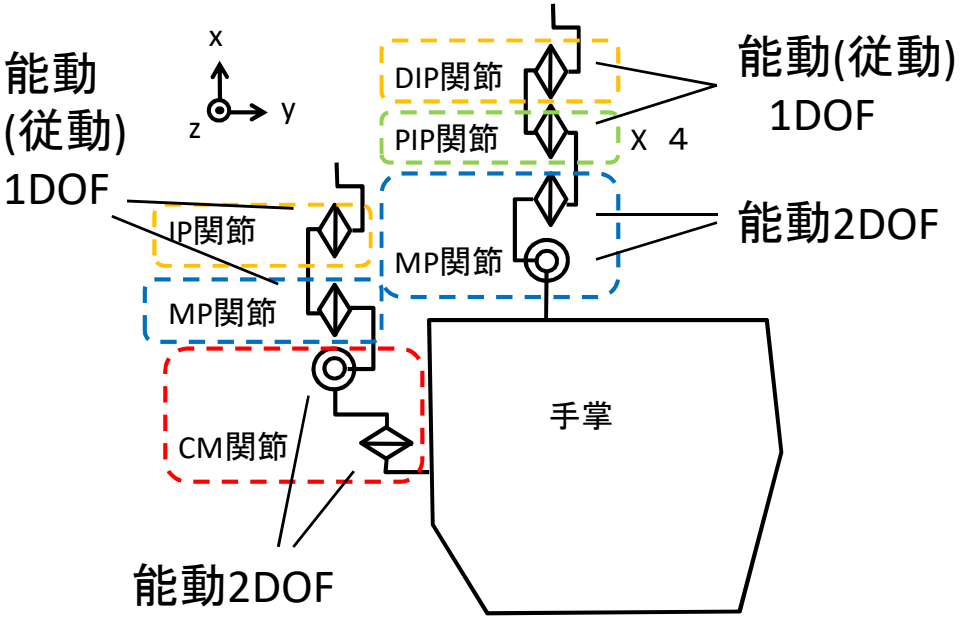
本研究の目的:
究極的に直感的な操作を
体内で実現

マスタスレーブの入力＝手を、
そのままロボットにする
✔操縦桿不要
✔説明書不要
✔開腹手術の環境を体内で再現

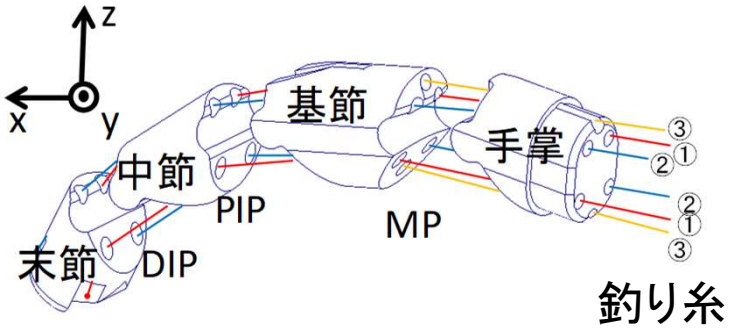
手指部の開発



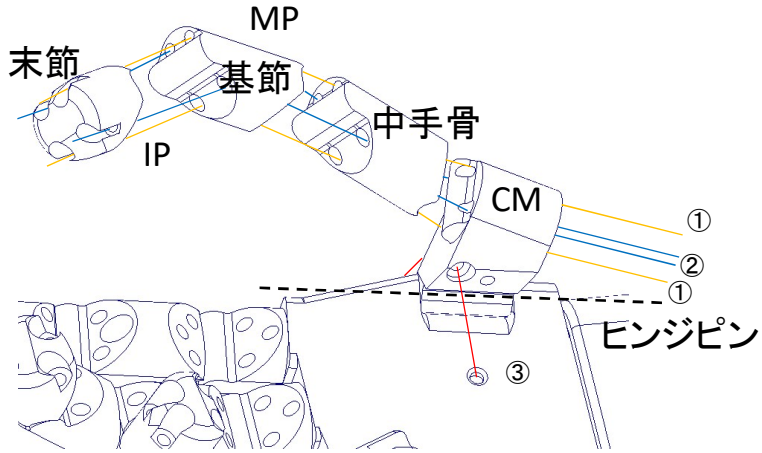
自由度構成



4指の機構

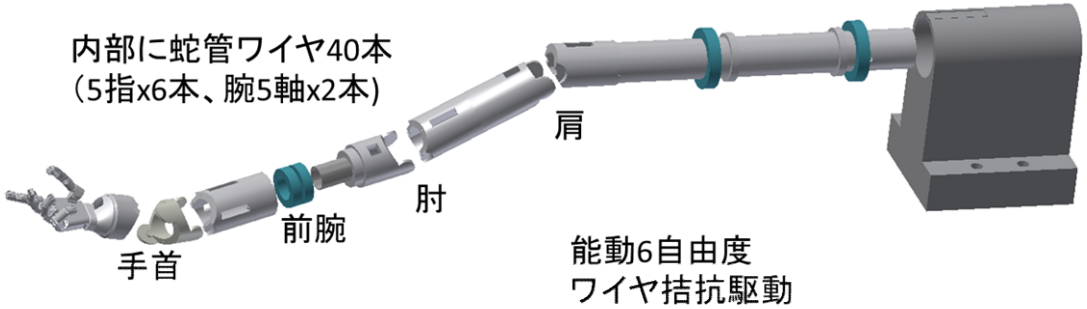


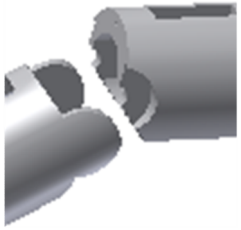
拇指の機構



・指先を任意の位置に移動可能な最低限の自由度
・ヒンジを凹凸で構成、スタッキング方式
・MP関節は凹凸で2軸のヒンジを構成
　→小型化が可能となった

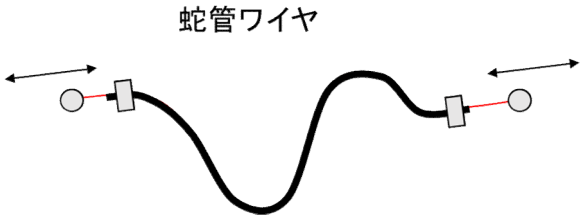
腕部の開発





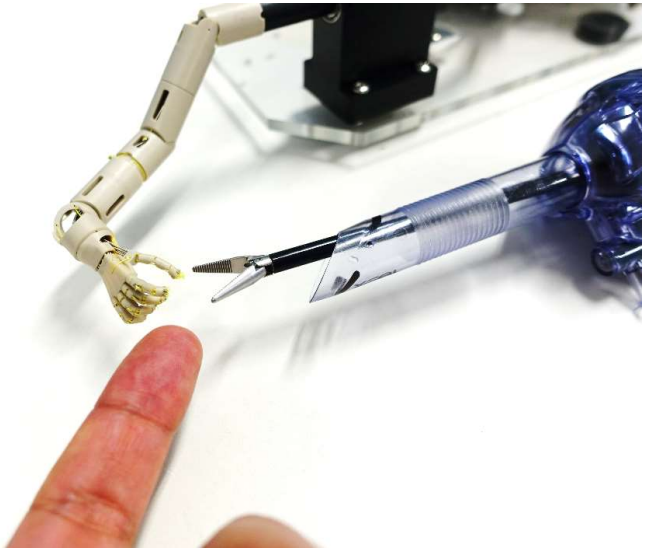
指と同じく、凹凸の
スタッキングで関
節を構成

腕部の自由度は手掌を任意の位置姿勢に移動可能な6自由度とした。指部と同じく関節には凹凸積み上げ式のヒンジを用い，1関節あたり2本のワイヤで拮抗駆動を構成した。

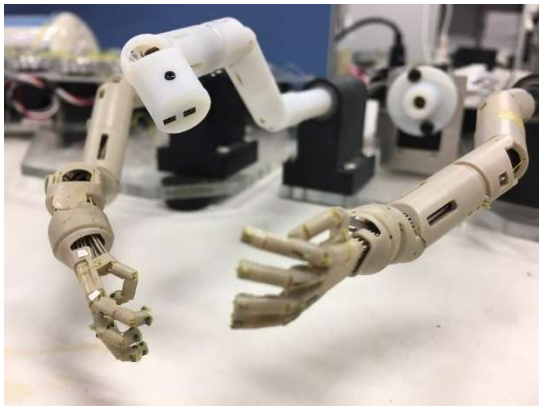


15自由度の指部の駆動にワイヤ30本を用いており，これらは腕の中を経由してモータに接続される。腕が曲がるため，ワイヤ経路長が曲げに対し不変となる蛇管ワイヤ方式を採用した。シースにはコイルチューブを使用した。

指駆動用のワイヤ30本に加え，腕の基端関節以外の動作に10本のワイヤを用いるため，計40組のワイヤ・コイルチューブが腕の内部を通っている。手首の曲げによりこれらコイルチューブが腕内を移動するため，腕の内部に適度なクリアランスが必要であり，外径11mmとなった。



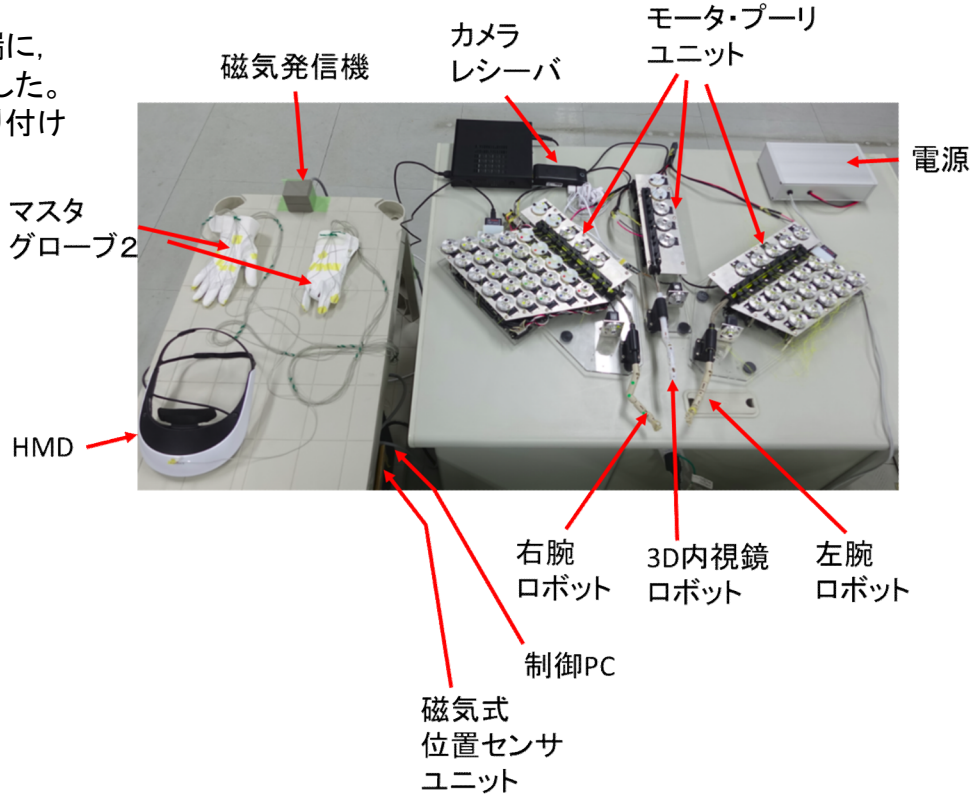
システム全体の開発



1．全体構成
マスタとしてセンサグローブ、3Dヘッドマウントディスプレイ、スレーブとして右腕ロボット、左腕ロボット、3D内視鏡ロボットの3体を配置した。

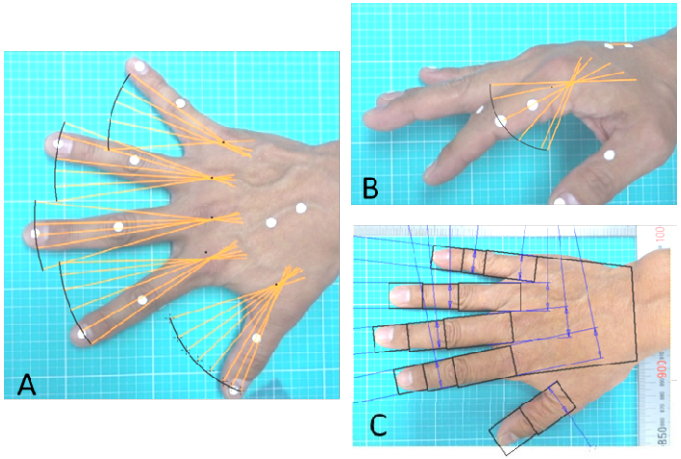
2．マスタ
操作用のマスタグローブには高サンプリングレートの磁気式位置センサを用いた。手袋の指先に各1、甲に1個のセンサを配置し、甲のセンサで検出する位置を腕の制御入力とし、甲と指先の相対位置を指の制御入力とした。各指先位置から手のリンクモデルの逆運動学計算により関節角度を算出した。

3．3D内視鏡ロボット
腕部と同じ直径11mmの6自由度シリアルリンクロボットの先端に，高フレームレート，低レイテンシの小型CMOSカメラを2個配置した。カメラ画像は3Dヘッドマウントディスプレイに表示し，それに取り付けた磁気式位置センサにより内視鏡ロボットの操作入力とした。

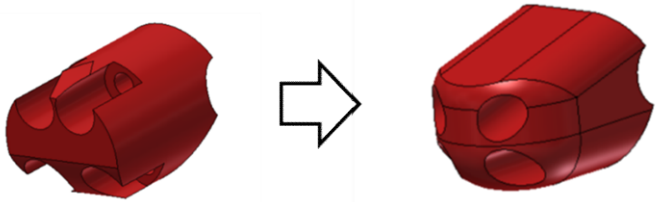


把持能力の向上

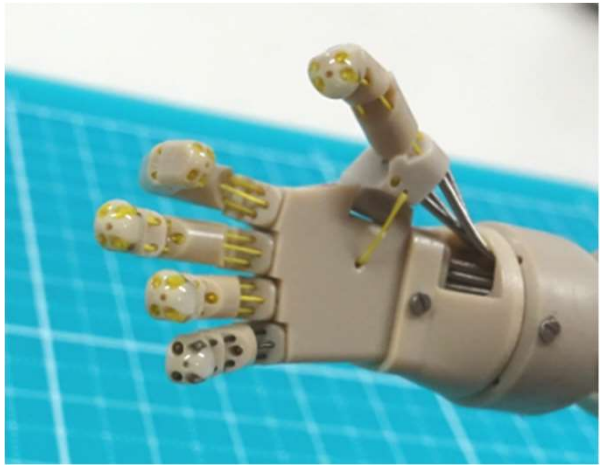
初号機は機構的な制約を優先して設計されたため、人の手の解剖をあまり考慮していかった。このため、人の手の詳細な計測に基づくロボットハンドの再設計を行った。サンプルを自分の手とし、外形状寸法、関節位置を特定した。外形状は写真よりCAD上で主用断面の寸法を直接測定した。これに基づき、掌のサイズ、各関節間の距離などに反映し、2号機を作成した。



初号機の円柱状の指では2本の指先が点接触してしまい、針糸のような細かな物体の把持ができない。人の指先は平坦な部分があり、親指と他の指でのつまみ動作の時に指先は面接触するため、針糸を把持できるものと考えられる。このため、下記の改良を行った。
・指先を扁平なデザインに変更
・皮膚に相当する弾性体のカバーを指先に実装



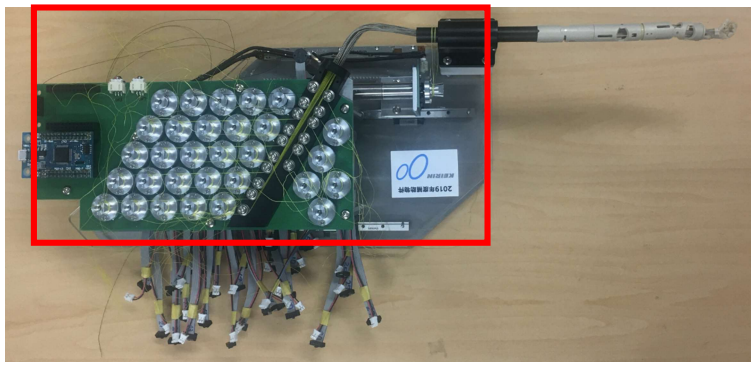
弾性体のカバーは1. ゴム被覆を成型し被せる、2. 熱収縮チューブで被覆、3. ゴム接着剤の塗布、の3通りを試験し、最終的にゴム接着剤の塗布とした。



駆動部の改良

手術が可能になるためには単に手を縮尺したロボットを作るだけではなく、究極まで操作性の向上が必要である。このために必要な応答性について改良する。
初号機に用いられていた安価なラジコンサーボを工業用モータに置き換える。ラジコンサーボは高ギヤ比のため時間応答性が劣り、ポテンショメータを採用しているため位置決め精度が劣る。さらに将来、医療機器として実用化の際に安全性の担保されていないラジコンサーボを用いることができないため、いずれかの段階で工業用モータに換装する必要がある。
また、モータ数が多いため、これを動かす回路であるモータドライバも巨大になってしまう。そこでモータドライバユニットをなるべく小型になるように開発する。

必要なワイヤ牽引力の検討の結果、マクソンモータ社DCX12L、ギヤ比16:1を採用した。
プーリ形状も小型化し、占有面積を約半分の48%に縮小できた。
モータドライバは内製した。モータ数が多いため、制御のための通信手段およびケーブルの肥大化が問題であった。サーボ1つにマイコン1個を割り当ててローカルの位置制御を組み、通信手段をノイズに強いRS485とし、同一の信号線を全てのサーボで共有、ID付きの指令プロトコルを組んだ。

改良前　393x253mm

改良後　315x150mm