

# 腹腔鏡外科手術用鉗子とそのハンドに関する研究

## Laparoscope Surgery. Forceps and Robotic Hand Manipulation

○ 東脇 正明(東電大), 大西 謙吾(東電大), 斎藤 之男

○ Masaaki Towaki, Kengo Ohnishi, Yukio Saito, Tokyo Denki University

Keywords: laparoscopic surgery, forceps, robotic hand, manipulation

### 1. 背景・目的

近年、開腹手術と比較し患者の負担が軽い腹腔鏡を用いた手術が多く行われている。腹腔鏡手術は、腹壁に 5~10mm の小孔を 3,4 個設け、鉗子や内視鏡などを腹壁の小孔から挿入し、外部モニタに映し出された術野の 2 次元の映像と鉗子を通して感じる反力をもとに執刀医が患部を確認、処置を行うものである<sup>[1]</sup>。2 次元の映像下で鉗子などを操作し、処置をおこなうには鉗子操作自体の技能が求められる上、カメラ位置との関係から手技の手順などの組み立てが必要であり、医師には道具の操作に関する基本的な訓練や、術前のシミュレーションが重要である。

これらトレーニング・シミュレーションシステムの研究を始め、対象とする臓器等毎のニーズに対応した手術支援用ロボットシステム研究も数多く報告されている。前者のシステムにおいては、ロボットシステムとして再現可能な術中環境(生体の応答)が限られるため、使用感に関する改善、これら機器を横断的に評価する方法も求められている。また、後者の研究は、道具としての鉗子・内視鏡のロボットシステム化に焦点が置かれた研究であり、生体内で使用する機器としての質を確保するには十分な実用化の過程を要する。

これに対し、本研究では生体内で用いる鉗子は既に医療器具として承認されたものを使用し、操作者である人間をロボットにより置き換えることを狙ったシステムの構築を目指す。感染などのリスクで医師と患者が同一空間内にいることが困難な状況でのロボットの使用を想定する。臨床用の医療器具を使えるロボットの開発を通し、医療器具の実用環境下に近い条件での使用評価、また、医療手技そのものの手の巧緻性を定量的(力学的・制御モデルによる)評価などにつながるロボットシステムの開発を目指す。まず、手始めに、腹腔鏡手術用鉗子が把持可能なロボットハンドの実機を設計、製作し、その操作能力の評価実験を行ったので報告する。

### 2. 双腕手術支援ロボット [2,3]

手術支援ロボットアームの右腕試作機を Fig.1 に示す。ロボットアームは、平均的な成人男性の腕の寸法と同じ大きさで人間の腕の関節配置に似せて設計、製作した。アームは、軽量コンパクトであることを目標とし、動力源と可動部を分離できるバイラテラルサーボアクチュエータを用いた構造とした。アームは上腕部には二関節筋を模倣した二関節筋型バイラテラルサーボシステムを、前腕部・手首部にはロータリ型バイラテラルサーボシステムを配置し、計 6 自由度の構成とした。Table1 に各部位の寸法と重量、Table2 に関節可動域を示す。

二関節筋型油圧バイラテラルサーボシステムは生物特有の拮抗する一・二関節筋協調運動機能を模倣し、スレーブシリンダ両端にピストンロッドをそれぞれ備え二関節を一つのアクチュエータで駆動する。シリンダ両端につながるチュービングに電磁弁を備え、これらを切り替え操作することで作動油の流路を制御し、動作するピストンロッドを一本のみと二本同時の切り替えを行う。二関節型油圧バイラテラルサ

ーボシステムをロボットアームの上腕に配置し肩と肘の屈曲進展運動の動作を行う。

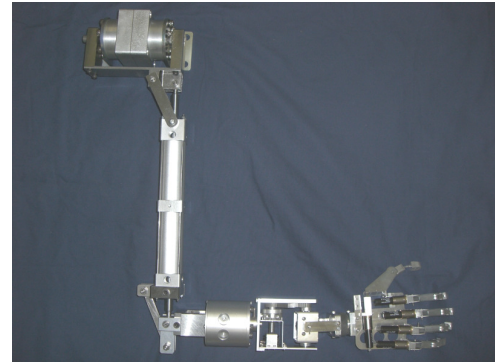


Fig.1. Robotic Arm and Hand

Table 1. Specification of the Robotic Arm

Unit	Size [mm]	Weight [g]
Shoulder	126	960
Elbow	384	900
Forearm	133	910
Wrist	98	700
Hand	147	130
Total	888	3600

Table 2. Moveable Range o specification

Joints	Movable Range	$\theta$ [deg]
Shoulder	Flexion/Extension	-90/90
	Abduction/Adduction	-40/83
Elbow	Flexion/Extension	0/90
Forearm	Pronation/Supination	-90/90
Wrist	Palmar/Dorso Flexion	-90/60
	Radial/Ulnar Flexion	-10/30

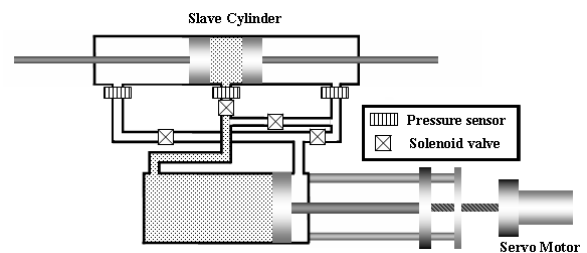


Fig.2 Bi-Articular HBSA

### 3. ロボットハンド

#### 3.1. 概要

本研究ではまずロボットハンドによる鉗子を含めた手術器具の把持能力を確保することを目的とし、人間の手に合わ

せて作成された手術器具を握るために人間の手の形状を模倣したハンドを設計、試作した。人間の手の骨格構造と指節の寸法比などを参考にし、部品作成を容易化するため、寸法の近い指は共通部品を用いるものとした。

人間の手は、前腕と掌内の筋の配置により 21 自由度を有する。本研究で設計するロボットハンドでは必要なアクチュエータは手に内在することを旨とし 5 自由度の構造とした。アクチュエータの実装空間、重量、配線の制約により DC モータを各指一つとし、指節間関節の駆動にはリンク機構を用いることとした。対象物の接触を感知し、把持力の制御のため、指腹部に接触覚センサを設ける。ロボットハンドの外観図を Fig.3、仕様を Table 3 に示す。

### 3.2. 拇指対立運動

対象物を指腹部間もしくは指腹部と掌間で拘束するためには、拇指と他指の対向が必要である。拇指の対立運動を行うために差動歯車機構を設け、ウォームホイールで回転駆動させ、拇指対立運動を行う。拇指が物体に接触すると、差動歯車機構により、リンク機構を利用して拇指の指節間関節が屈曲伸展に切り替わる。これにより一つの DC モータで拇指の動きを可能とした。Fig.4 に拇指の運動を示す。

### 3.3. 他指の屈曲・伸展運動

人間の他指は屈曲・伸展が 3 自由度あるものの実装可能なアクチュエータ数の制約から、DC モータを一つのみとする。DIP 関節は伸展位から 20[deg]の屈曲位の固定関節とし、PIP 関節は、MP 関節のリンク機構により屈曲・伸展する。MP 関節の屈曲・伸展運動はウォームホイールによりモータの回転軸方向を直角に変え、各指長軸とモータの回転軸を平行とすることで手の甲にモータを並べる構造とした(Fig.5 参照)。MP 関節と PIP 関節は、各々90[deg]屈曲可能である。

### 3.4. アーチ構造

人間の掌は、第 4.5CM 関節の可動性から陥凹アーチ構造を有し、小指と拇指の対向が可能となる。本ハンドで、掌部の中指と環指の間で、小指側が 10[deg]の掌側に傾き、また指先間隔が伸展位には広がり、屈曲時に狭まる形で各指を配置することでアーチ構造を模倣した。

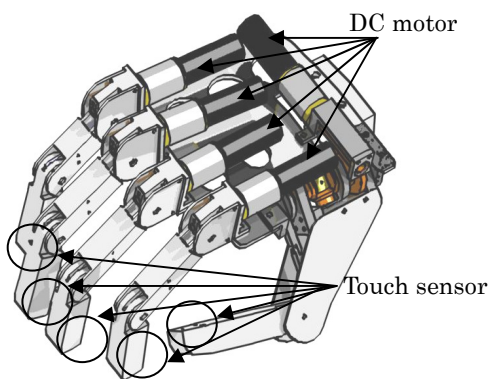
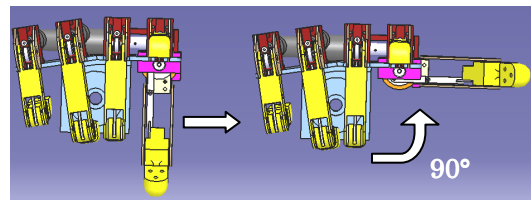


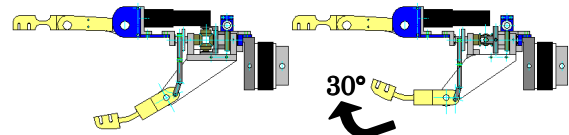
Fig.3. Robotic hand

Table 3. Specifications of robotic hand

Length (mm)	147
Width(mm)	77
Weight (g)	280
Actuator	DC motor
Main material	Mezo-20



a) Opponens Pollicis Movements



b) Flexion and extension  
Fig.4. The movement of the thumb

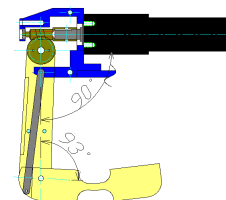


Fig.5. Linkage of Finger

### 4. 操作能力評価用鉗子

前述のロボットハンドは設計時に鉗子のグリップを把持できることを幾何学的には確認したものの、力学的にグリップの操作を行うことが可能であるかは確認できていない。そこで、Fig.6 に示すグリップ操作時のグリップ部の回転変位をポテンショメータの直動変位で、グリップにかかる把持力をグリップに取り付けたばねのばね定数とグリップの回転変位の関係として、計測、算出する評価用鉗子を製作した。この鉗子を用いて人間の鉗子グリップとロボットハンドの操作能力と比較することで、ロボットハンドの検証を行うことを目的とする。Table 4 に仕様を示す。

評価用鉗子の製作にあたり次に注意して設計を行った。

- 臨床用の把持鉗子の寸法、形状に基本近いこととする。ただし、センサ類の取り付け部、ならびにグリップ形状については、材料をアルミ主体とした切削加工とするなどの事由により、被験者とロボットがともに握れることと、組み立て、強度上許容可能なことを優先し、変更。
- 鉗子の先端部で物を挟むことができること。今回は把持鉗子の先端部の形状、構造を模する。

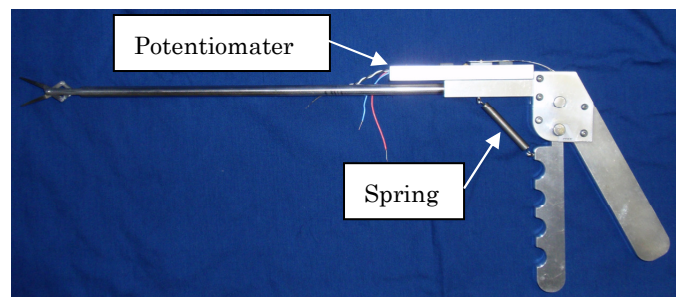


Fig.6. Forceps model

Table 4. Specifications of Evaluation forceps

Length (mm)	470
Weight (g)	290
Max open degree of the Tip (deg)	45
Max open degree of the Grip (deg)	30
Type	Pincher

## 5. 評価用鉗子を用いた操作実験

評価用鉗子を用いてロボットハンドと被験者 1 名による鉗子による把持動作の操作時のグリップの操作角度変位と把持力を測定, 比較することとした. 得られるデータをもとにハンドの操作能力の評価を行い, ロボットハンドのメカニズムの設計変更, 知的把持に必要な制御系の構築へとつなげることを目的とする.

鉗子に取り付けたポテンショメータ(栄通信, CFL200)により鉗子グリップの絶対位置(角度)を電位差として測定器(日置, メモリハイコーダ, 8860)で記録する. また, ばね定数  $0.249[\text{N}/\text{mm}]$  の引張ばねをグリップ上部に取り付け, グリップ部の角度変位がグリップに直角に加わる力(総把持力)を計算にて導く.

実験は, まずロボットハンドに鉗子グリップを握らせ, それを観察していた被験者に, ロボットの動作を模倣するように把持させることとした. この際の, 角度変位と把持力の時系列データをまず比較する. なお, ロボットハンドによる他指の屈曲動作には, マイコンにより制御するモータドライバにて, 一定電圧を他指のモータドライバに指が停止するまで加えて停止することとした. 被験者は, ロボットハンドの動きと動作時間を参考に, 同じ操作を指 4 本にてグリップを握るものとして再現することを試みた. この実験時の環境を Fig.7 に, 測定したデータの一例を Fig. 8 に示す.

このデータから, 被験者の鉗子グリップの握りは, ロボットに合わせゆっくりとした動作であったが, 時間に対し一定の変化率で角度を変位させていることが確認できる. 途中揺らぎがあるものの, 把持力はばねの反力が角度変位に依存する非線形な関係となっている. これに対し, 他指 4 指による単純な ON/OFF 制御によるロボットハンドの握りでは, 握り始めの変位が小さく, 途中から変化率が大きくなるものの,  $16^\circ$  付近で飽和(停止)し, 鉗子が完全に閉じる位置までグリップを回転できないことが確認できた. また把持力の算出値からは, 人間の把持力より小さい値で停止していることから, モータの出力不足, グリップに当たる指の位置の不良(リンク機構による指先軌跡の不具合), 4 指の動作パターンが単純な ON/OFF 制御であり, グリップが握られ変位するのにあった指の動作パターンが作成できていないなどの可能性が推測される. これらの結果は, シミュレーションで簡単にモデルかできるものばかりではないので, 今後も実験を重ね, 改良方針を決めることとする.

## 6. まとめ

隔離環境下での使用を想定した腹腔鏡手術支援ロボット用の軽量アームと人間形ハンドを設計試作し, ハンドを中心にその特徴について示した. また, 腹腔鏡用把持鉗子を模した評価用鉗子を製作しグリップの握りに関してロボットハンドと被験者 1 名のデータから, ロボットハンドの設計, 制御上の問題点について考察した.

今後も鉗子を中心にヒトの手術道具の操作能力を計測し, これを模倣できる 5 指ロボットハンドの開発につなげていく. これにより, 単なる把持能力を有するロボットハンドだけでなく, 道具の操作が可能なロボットハンドのメカニズムと制御手法について検討し, 人間環境に共存可能なサービスロボットの技術向上につなげる.

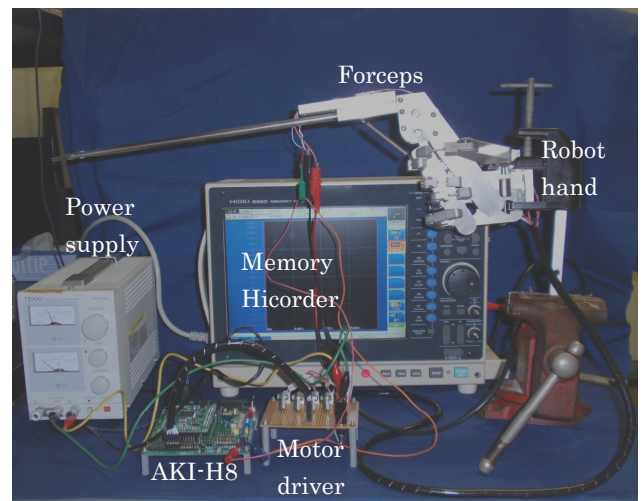
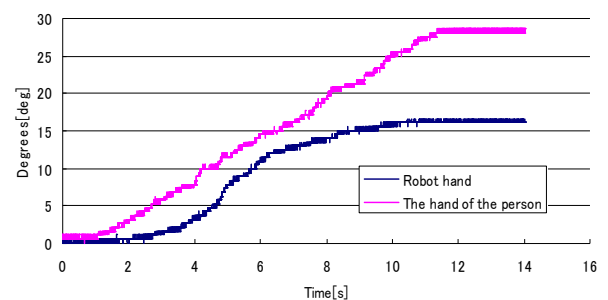
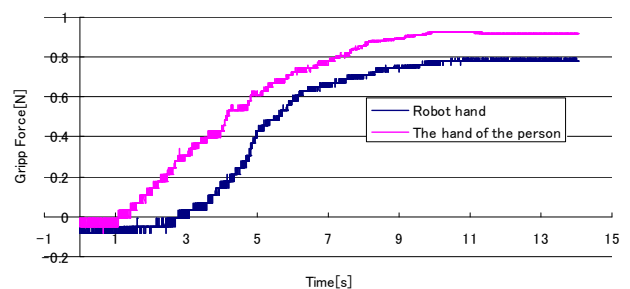


Fig.7 Experimental setup for the robotic hand grip



a. Degrees and Time



b. Grip Force and Time

Fig.8 The comparison of forceps manipulation data operated by the robotic hand and human subject.

## 参考文献

- 1) 東野正幸監修; 消化器外科①基礎編, 株式会社ベクトル・コア, 2009
- 2) 坂井俊哉, 斎藤之男, 梅村敦史; 腹腔鏡手術トレーニングシステム及び手術支援ロボットへの応用, 日本 IFToMM 会議第 13 回シンポジウム前刷集, pp107-112, 2007
- 3) 坂井俊哉, 斎藤之男; 双腕型腹腔鏡外科手術支援ロボットの研究, 東京電機大学大学院修士論文, 2008, pp73-79