

# 内視鏡把持ロボットのためのモーションセンサを用いた 非接触型操縦インタフェースの提案

宮崎良兼\*, 菅野貴皓\*\*, 遠藤玄\*\*, 川嶋健嗣\*\*

## Proposal of a Non-Contact Type Interface Using a Motion Sensor For Endoscopic Robot

Ryoken MIYAZAKI\*, Takahiro KANNO\*\*, Gen ENDO\*\*, Kenji KAWASHIMA\*\*

In recent years, the number of endoscopic surgeries is increasing. One of the problems in endoscopic surgery is the disturbance of endoscopic image due to the jiggling of the scopist's hand. Robotic endoscope holders have been developed to solve this problem. In this work, a user interface is developed to improve the operability of a robotic holder system while keeping surgeons and assistants clean. A non-contact type interface using a hand-tracking device is proposed so that the operator can intuitively command the robot without touching anything. Experimental comparison with other endoscopic manipulation method is conducted to confirm the effectiveness of the proposed system.

**Key Words:** Pneumatic system, Endoscopic surgery, Surgical robot, User interface, Motion sensor

### 1. 緒 言

内視鏡外科手術では、スコピストが内視鏡を把持する必要があるため、手ブレによって映像が乱れる、患者の周辺に人が密集する等の問題点がある。これを解決するために、Computer Motion 社<sup>1)</sup>は、ロボットに内視鏡を把持させることで手ブレを防ぐことを提案した。しかし、内視鏡を操作する際に、不潔部であるコントローラを持つ必要があり、衛生面に課題が残る。只野ら<sup>2)</sup>は手術者が装着するヘッドマウントディスプレイにジャイロセンサを取り付けることで、手術者の頭の動きに合わせて内視鏡を操作するシステムを提案した。問題点を解決していることに加えて、手術者が内視鏡を操作できるため、スコピストが不要になるという面では優れている。しかし、手術者の体にセンサを付ける必要があることや、フットペダルを使用することから手術者の作業が増えてしまう。

先に挙げた関連研究から、ロボットによって内視鏡を把持する手法は有効であるものの操作性の面で課題が残る。そこで本研究では、内視鏡システムにおいて操作者の清潔性を確保し、かつ直感的に操作できることを目的に、モーションセンサを用いた非接触型インタフェースを提案する。本提案システムはマスタスレーブシステムであり、2章・3章でそれぞれスレーブとマスタのシステムについて述べ、4章で評価実験の結果を示す。

\* 東京医科歯科大学大学院医歯学総合研究科

\*\* 東京医科歯科大学 生体材料研究所

(所在地：東京都千代田区神田駿河台 2-3-10)

### 2. スレーブ：内視鏡把持ロボット

スレーブには Fig.1 に示すような著者らの研究室で開発されている内視鏡把持ロボットを用いる。このロボットは、内視鏡操作に必要な Up/Down, Right/Left, Zoom In/Out, Roll の 4 自由度を有している。また、空圧制御であるため滑らかな動作が可能である。本システムではマスタから送信された目標速度を積分し、内視鏡先端の目標位置を導出する。これを把持アームの逆運動学演算によって各関節変位の目標値に変換し、逆動力学のフィードフォワード補償を加えた PD 制御によって各関節が発生すべき目標トルクを計算する。目標トルクを空気圧アクチュエータ変位から関節変位までのヤコビアンを用いて、空気圧アクチュエータの目標駆動力に変換する。さらに、目標駆動力を目標圧力に変換し、空気圧センサの値との誤差をフィードバックし、PID 制御則によってサーボバルブを操作することで目標駆動力を実現する。

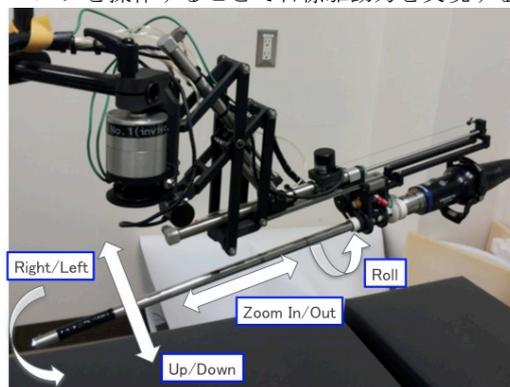


Fig.1 Endoscopic robot

### 3. マスタ：モーションセンサ

#### 3.1 モーションセンサ

センサに Leap Motion [3] を使用し、取得した右手の座標情報を用いて、スレーブを制御する。このセンサはセンサ中心部を原点 O とした検出範囲内の手の各関節の XYZ 座標を得られる。また、滅菌シートで覆った場合でもセンシングが可能であることを著者らは実験的に確認しており、衛生管理が必要な手術室でも利用可能である。

#### 3.2 右手との連動

Fig.2 はスレーブの 4 自由度動作および Pause と対応する右手の動作である。取得したデータに対して 10 フレーム(約 0.083 秒)分の単純移動平均を求めることで平滑化する。誤作動が生じるのを回避するため、回転動作の後に、前後動作をおこなうなど動作が変わる場合には、20 フレーム(約 0.167 秒)分を読み捨てる。スレーブへは UDP を用いて目標速度を送信する。

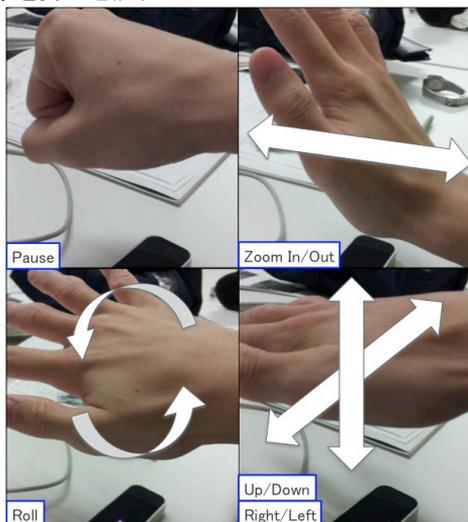


Fig.2 Motion of the right hand for a robot operation

Pause は、手を握った場合とし、各動作の目標速度を 0 とする。

Roll は、手を左右に傾かせた場合とする。判定条件は、掌のなす Roll 角  $\Phi$  が閾値を超えていて、かつ親指先端 Y 座標と小指先端 Y 座標の差が 4mm 以上とし、Roll 角の正負に合わせた一定の速度値を目標速度とする。

Zoom In/Out は、手を傾けた状態での手の Z 軸方向の動作とする。判定条件は、掌のなす Pitch 角  $\theta$  が閾値を超えていて、かつ中指先端 Y 座標と手首 Y 座標の差が、中指先端と中指第 3 関節の距離より大きい場合とする。このときの手首 Z 座標の変位から求めた移動距離を時間で微分したものを目標速度とする。

Up/Down および Right/Left は、手の Y 軸・X 軸方向の動作とする。他の動作がおこなわれていない場合に動作させ、掌中心 XY 座標の変位から求めた移動距離を時間で微分したものを目標速度とする。

### 4. 評価実験

#### 4.1 実験方法

被験者はディスプレイに映された内視鏡の映像を頼りに、視界を遮ったドライボックス内の目標を番号順に探す。このときの所要時間を、手で内視鏡を操作した場合、頭に装着したジャイロセンサで操作した場合、本提案システムで操作した場合で比較する。本実験では直感性を評価するために十分なトレーニングをおこなわない。

#### 4.2 実験結果

Fig.3 は被験者 A-E の 5 名による評価実験の結果である。縦軸が所要時間を、横軸に被験者ごとの結果を示す。衛生面を考慮しなければ、手で内視鏡を直接操作するのが最も操作性が良いのは自明である。また、個人差はあるものの、本提案システムとジャイロセンサを比べた場合では同程度の結果を得ることができた。この結果はセンサに触れずに非接触で内視鏡把持ロボットを操作する手法としては、有効であると考えられる。

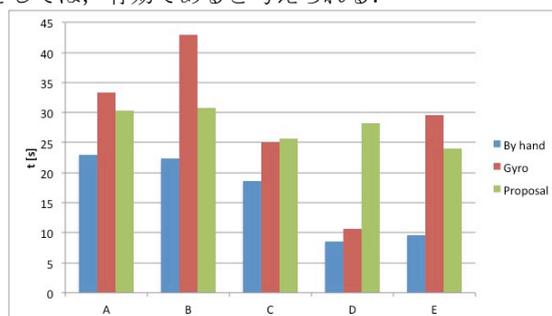


Fig.3 Experimental results

### 5. 結 言

本論文では、内視鏡外科手術における内視鏡把持ロボットの問題点を解決するため、衛生面と操作の直感性に優れるモーションセンサを利用した操作を提案し、評価実験をおこなった。時間的に優位な結果を得ることができなかったものの、ジャイロセンサを用いた場合と同程度の結果を得られたことから、本提案が有効であると結論付けた。今後の課題として、トレーニングを行った被験者による実験、操作性向上のために情報を視覚的に提示することやスレーブの可動範囲の拡大があげられる。

### 参 考 文 献

- 1) Sackier JM, Wang W.: Robotically assisted laparoscopic surgery; From concept to development, Surgical Endoscopy, 8, p.63-66 (1994)
- 2) 只野耕太郎, 川嶋健嗣, 田中直文, 小嶋一幸: 空気圧駆動ロボットアームとヘッドマウントディスプレイを用いた立体内視鏡操作システム, 日本医工学治療学会, Vol.24, No.3, p.177-184 (2012)
- 3) <https://developer.leapmotion.com>

# 手術支援ロボットの体内4自由度鉗子マニピュレータ

菅野貴皓\*, 川嶋健嗣\*

## A 4-DOF Forceps Manipulator for Surgical Robot System

Takahiro KANNO\*, Kenji KAWASHIMA\*

A novel forceps manipulator for the surgical robot system IBIS is developed. The developed forceps has a 4-DOF mechanism inside the abdominal cavity so that pivoting motion around the entry point is reduced, avoiding the interference with other manipulators, surgeons, or assistants. The 4-DOF motion is realized using two flexible joints which are driven by push-pull wire of Ni-Ti hyper-elastic alloy, which make the mechanism of the forceps simple and thus low-cost and reliable. Since the wire of the forceps are driven by compact pneumatic cylinders, the manipulator is lightweight and achieves high power-to-weight ratio. Since it is difficult to derive the inverse kinematics of the flexible 4-DOF forceps, a velocity-based control law without the calculation of inverse kinematics is proposed. The experimental results show that the proposed methods achieves the good position tracking performance.

**Key Words** : Surgical robot, Forceps manipulator, Flexible mechanism

### 1. はじめに

内視鏡手術は、患者の皮膚に10mm程度の穴を開けてそこから内視鏡や鉗子などのツールを挿入して行う外科手術であり、手術後の回復が早いという利点がある。しかしながら、鉗子の操作が難しく視野も狭いため高度な技能が必要とされている。

本研究室では、手術支援ロボットIBISの開発を行っている<sup>1)</sup>。IBISは空気圧駆動を採用することで、電動モータを用いたda Vinci<sup>2)</sup>などの既存の手術ロボットと比べて大幅な小型化に成功している。また、空気圧を圧力センサで計測することで、臓器と接触したときの力や縫合糸を引っ張る力を検出し、医師に力覚フィードバックをすることが可能となっている。

多くの手術ロボットは、Fig. 1(a)のように体外に4自由度、体内に2自由度というリンク機構を採用しているが、体外の駆動部が医師や他のロボットに衝突するといった課題を抱えている。一方で、Fig. 1(b)のような体内4自由度を有する鉗子を用いれば、体外のロボットの動作を抑えてこれらの課題を解決することが可能である。本研究では、柔軟関節を用いた体内4自由度鉗子を開発し、鉗子先端の位置を制御する手法を検討した。

### 2. 体内4自由度鉗子

試作した4自由度鉗子は、Fig. 2に示すように2個の柔軟関節からなっている。各々の柔軟関節は $\beta$

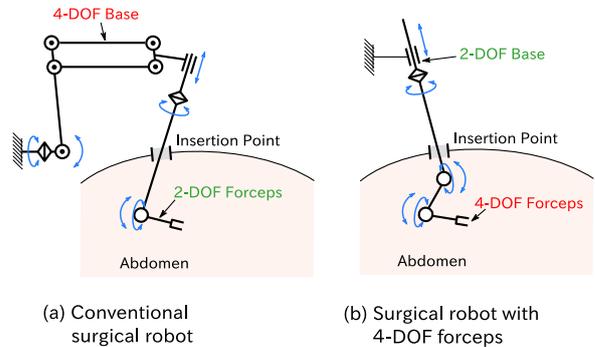


Fig. 1 Concept of 4-DOF forceps manipulator

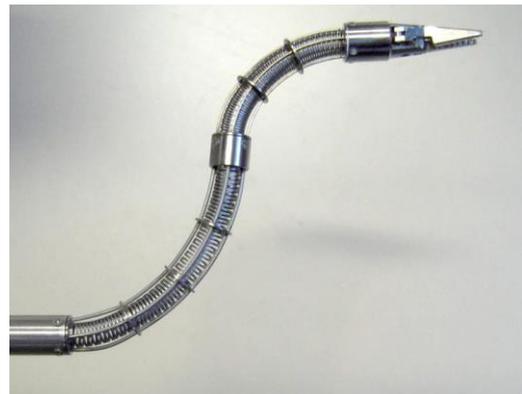


Fig. 2 Prototype of the forceps manipulator

チタンのパイプにスリットを入れたものである。隣り合うスリット同士の角度が90度となるように加工されているため、2方向に曲げることが可能である。この柔軟関節を2個直列に並べることによって合計4自由度の動作を実現している。試作した $\beta$ チタンパイプは、屈曲が容易なだけでなく、縫合作業などで手首を回すのに十分なねじり剛性を確保して

\* 東京医科歯科大学生体材料工学研究所  
(〒101-0062 東京都千代田区神田駿河台 2-3-10)  
(E-mail: kanno.bmc@tmd.ac.jp)  
\* Tokyo Medical and Dental University

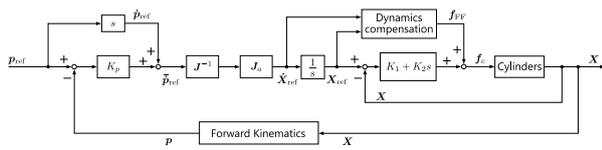


Fig. 3 Velocity-based position controller

いる。

関節の長さは、第1関節が 50 mm、第2関節が 30 mm となっており、100 mm×100 mm×100 mm 程度の可動範囲を実現している。また、鉗子マニピュレータの直径は 8 mm である。挿入方向の並進と手首の回転については、体外の駆動部によって駆動する。

鉗子先端のグリップ部には小型の空気圧シリンダが内蔵されており、パイプの中心を通る空気圧チューブから送られてきた空気によってシリンダを押しこめてグリップを閉じる機構になっている。従来の鉗子ではワイヤなどを用いて開閉を行っていたため、鉗子の屈曲によって開閉用のワイヤが動いてしまい、屈曲動作と開閉動作の干渉が発生していたが、本研究の鉗子では屈曲動作と開閉動作を完全に分離することができる。

従来の2自由度鉗子では、1個の柔軟関節を4本のワイヤを使用して屈曲させていたが、4自由度鉗子を駆動するには合計8本のワイヤが必要となる。本研究で開発した鉗子では、第1関節および第2関節をそれぞれ4本の Ni-Ti パイプと4本の Ni-Ti ワイヤによって駆動する。第2関節を駆動するワイヤが第1関節を駆動するパイプの中を通る同軸構造とすることによって、シンプルな機構を実現している。

また、βチタンパイプの外側数カ所にワイヤと同程度の径の穴が空いたディスクを溶接してワイヤガイドとしている。

### 3. 4自由度鉗子の位置制御

手術ロボットにおいては、ロボットに医師の手と同じ動きをさせるために鉗子先端の位置を制御する必要がある。従来、IBISの鉗子マニピュレータにおいては、鉗子先端の目標位置から逆運動学計算を行って空気圧シリンダの目標位置を求めてから、求めた目標位置にシリンダの実際の位置が追従するようなフィードバック制御を行っている。

しかしながら、本研究の4自由度鉗子は逆運動学の解を解析的に求めることが困難であり、従来とは異なる制御則を必要とする。本研究では、手先位置からシリンダ位置を求めることができないものの、手先速度とシリンダ速度の関係を表すヤコビ行列が容易に求まる点に着目し、速度ベースの制御系を構築した (Fig. 3)。まず、マスタから送信された目標

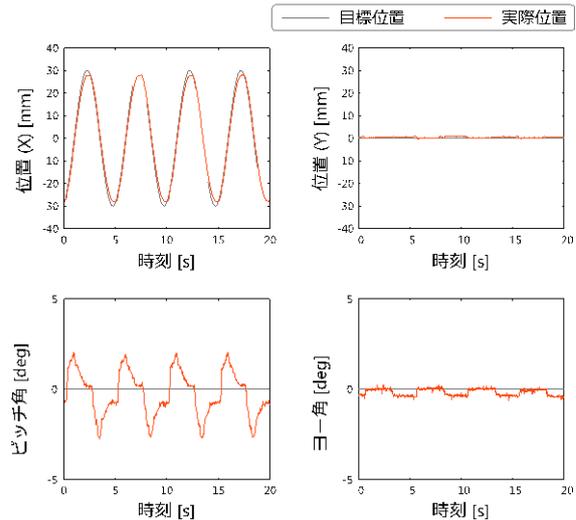


Fig. 4 Experimental results

位置の情報を微分して目標速度を求め、それにヤコビ行列を掛けることでシリンダの目標速度を求める。次に、このシリンダ目標速度を積分してシリンダの目標位置を計算し、シリンダ位置制御を行う。また、速度ベースで制御を行うと速度の積分計算の誤差によって位置がずれるため、目標位置と実際位置の誤差をフィードバックして目標速度を補正している。

提案した制御系を実装して先端の位置を1方向に動かす実験を行った結果を Fig. 4 に示す。数十ミリ秒の追従遅れが見られるものの良好な制御性能を達成している。ただし、鉗子先端で円軌道を描くといった複雑な動作については追従性が不十分であり、制御系の改良が必要である。

### 4. まとめ

本研究では、手術支援ロボットのための体内4自由度鉗子を開発した。βチタンの柔軟関節を2個結合することで、各関節2自由度、合計4自由度の屈曲が可能な鉗子を試作した。関節の駆動には超弾性ワイヤと超弾性パイプを用いることでシンプルな機構を実現した。また、鉗子先端の位置を制御するために、逆運動学を解く必要のない速度ベースの制御系を提案した。

### 参考文献

- 1) Tadano, K., Kawashima, K.: Development of a Master-Slave System with Force-Sensing Abilities using Pneumatic Actuators for Laparoscopic Surgery, *Advanced Robotics*, **1763-1783**, 24/12 (2010)
- 2) Guthart, G. S., Salisbury Jr, J. K.: The Intuitive Tele-Surgery System: Overview and Application, *IEEE International Conference of Robotics and Automation*, **618-621**, (2000)