

# 三脚プラットフォーム型能動鉗子機構の開発

千代田真吾 (東大) 岡田昌史 (東大) 中村仁彦 (東大)

## Development of the Tripodal Platform Active Forceps

\*Shingo CHIYODA (Univ. of Tokyo), Masafumi OKADA (Univ. of Tokyo),  
Yoshihiko NAKAMURA (Univ. of Tokyo)

**Abstract**— To make the endoscopic surgery more precise, computer-enhanced surgical robot systems has been introduced. Though wire driven forceps is often used for medical robots for endoscopic surgery, wire driving has less advantage in terms of rigidity, durability and response. In this paper, we propose Tripodal Platform to make active forceps more rigid and more durable. This mechanism realizes 2 DOFs of bending and a 1 DOF of rotation around the axis of the forceps. We designed a whole part as small and lightly as possible, and keep it clean on the assumption that it is used in the practical operation.

**Key Words:** Medical robotics, Active forceps, High stiffness, Parallel mechanism

### 1. はじめに

近年、医学工学双方の発達及び相互技術交流の結果として、他の分野に比べ工学技術の導入が難しいと言われていた外科手術分野にも最先端工学技術による支援体制が進みつつあり、内視鏡や医療用ロボットなどを用いて、患者の身体的負担を軽減する低侵襲手術が発展している。

低侵襲手術は患者の身体的負担が少ないので、とりわけ高齢者等の回復力の脆弱な患者にとって効果的な手術法である。また、入院期間の短縮や医療費削減の面からも有効である。なかでも内視鏡下手術は腹腔・胸腔に限らず多様な部位に適用でき、侵襲が小さく、胸部等深い部位での視野の確保、術中時間の短縮、また術後の疼痛が少ないなど、患者の QOL (Quality of Life) の面からも発展・普及が期待されている。しかし、内視鏡下手術は術中の視野が狭いこと、器具の発達が遅れていること、術者に高度な技術を要求すること等から十分普及するには至っていない。

この課題に対して、近年、外科手術支援システムとして手術ロボットが開発され、すでに臨床応用されている<sup>1)2)</sup>。これらの手術ロボットでは主にワイヤ駆動の能動鉗子が用いられているが、ワイヤ駆動では鉗子先端に多自由度の駆動力を伝達することが容易であるものの、高い剛性が実現しにくく耐久性が悪いといった欠点がある。本研究では能動鉗子先端の駆動機構として三脚プラットフォームを提案し、鉗子先端部の高い剛性・耐久性を実現することを目的とする。また、複数の鉗子を同時に使えるよう、駆動部を含めたシステム全体を小さく設計する。

### 2. 設計仕様

開発する能動鉗子の仕様を以下のように定める。

**高剛性多自由度化** 従来能動鉗子は先端部の駆動機構としてワイヤを用いているが、剛性、耐久性の点で臓器手術等の力を必要とする作業には不向きであった。そこで力の必要な作業が可能ないように鉗子先端部が高い剛性を有する構造にする。また鉗子先端部が屈曲 2 自

由度、軸周りの回転 1 自由度の合計 3 自由度を腹腔内で実現できる構造にする。

**小型化** 内視鏡下手術では通常複数の鉗子を同時に用いるが、手術ロボットでこれを実現しようとすると腹腔壁に多くの機構部品が配置されることになり、外科医が手術部位にアプローチする際に大きな妨げとなる。そこでシステム全体を小型化し、手術空間においてロボットができるだけ外科医の動作の妨げにならないようにする。

**清潔性** 手術支援ロボットで大きな問題となる点が装置からの感染症である。ロボットはモータ等の熱、浸水に弱い機械部品を含み、関節の多い複雑な構造をしているため滅菌することは難しい。そこで生体に接触するため清潔性を確保しなければならない鉗子部と、モータ等を含む滅菌不可能な駆動部を脱着可能な構造にする。

### 3. 能動鉗子の開発

#### 3.1 先端部機構

鉗子先端部は高剛性を有する駆動方式としてリンク駆動を採用し、これを実現するための機構として三脚プラットフォームを考案した。Fig.1 に三脚プラットフォーム

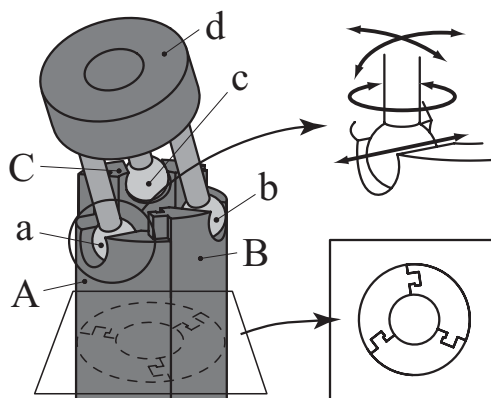


Fig.1 Jigsaw Block Slide and 4 DOF Pair

ムの概要を示す．鉗子軸は3分割した円筒を鉤型の直動関節で束ねた構造(ジグソーブロックスライド<sup>3)</sup>)となっている．この3分割されたリンクA, B, Cの先端には中心から外側に向かって円柱形の滑り軸受けがあり, 軸受け上のボールジョイントa, b, cは各々回転3自由度と並進1自由度の計4自由度を有している．このボールジョイントから延びる3本の柱がエンドプレートdに固定されるパラレルメカニズムとなっている．リンクA, B, Cのうちリンク1つを固定し, 残りの2つを独立に摺動させることにより, 先端の屈曲2自由度を実現することができる．

この構造では可動部分がボールジョイントa, b, cからエンドプレートdまでを一体化した部分とリンクA, B, Cの計4つであり, 可動部品点数が少ないということが大きな特徴として挙げられる．これにより, より高い剛性を実現することができる．鉗子先端の動作の様子を Fig.2 に示す．



Fig.2 Motion of the Tripodal Platform

### 3.2 全体の構造

本能動鉗子では Fig.3 のように鉗子部と駆動部を容易に分離できるようにした．これにより術部に触れる先端部は常に清潔性を保つことが可能である．また手術の際には数種類の鉗子部を用意し適宜交換することにより, 作業に応じて異なる形状の鉗子を使用することができる．以下, 構造の概要を説明する．

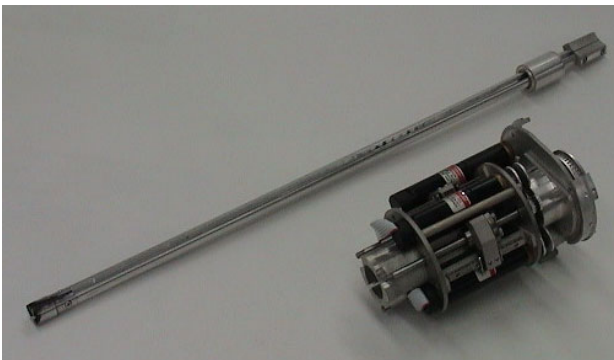


Fig.3 Separation of a Forceps Part and a Driving Part

#### 3.2.1 鉗子部

鉗子径はできるだけ細くすることが望まれるが, 先端部機構が三脚プラットフォームという特殊な構造上, その剛性を確保するためにはある程度の径が必要である．そこで剛性を有する範囲で, かつできるだけ細い径にすることを考慮して直径10[mm]に設定した．長

さは腹腔内に150[mm]程度入ることを想定し, 駆動部から約300[mm]に設定した．鉗子軸は3分割されており, 先端部ではジグソーブロックスライドを支持している．根元部では Fig.4 のリンクB, C 及び D に接合しており, D を駆動部に固定し, B, C を摺動させることにより先端の屈曲2自由度を実現する．リンクA は摺動させることにより鉗子把持部を開閉させるためのリンクである．

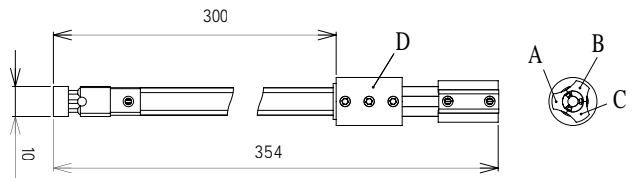


Fig.4 Forceps Part

#### 3.2.2 駆動部

駆動部はリンクの摺動用に2つ, 鉗子把持部の開閉用に1つ, 全体の回転用に1つの合計4つのモータを搭載している．リンクの摺動と鉗子把持部の開閉には3組のDCサーボモータとボールスクリュの直動機構を用いた．リンクの摺動機構は出力2.5[W]のDCサーボモータと減速比4.1:1の減速器, ピッチ1[mm]のボールスクリュにより構成した．平行に配置した3組のモータによって回転させることで, 鉗子軸周りの回転としている．これらの機構部品を密集させて配置することにより駆動部の大きさは約50[mm]×66[mm]×105[mm]という小型化を実現した．また, 手術の際には後述する手術器具の位置決めロボットに保持させることを想定して, 主な構造部品の材質にマグネシウムを用いることにより軽量化を図った．Fig.5 に設計した駆動部の外形を示す．

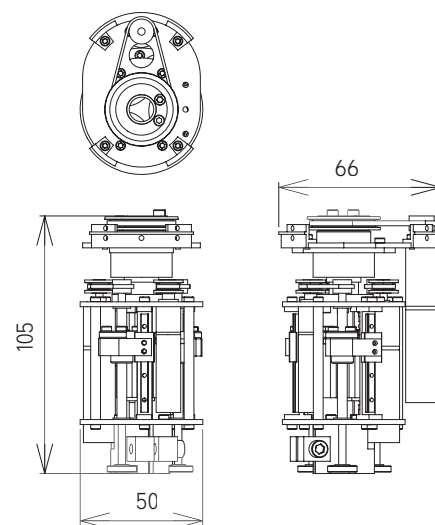


Fig.5 Driving Part

### 3.2.3 脱着部

実際の手術は治療状況や患部の状態に応じて様々な術具を交換しながら治療を行う。それゆえに能動鉗子においても鉗子部と駆動部の脱着は容易にかつ迅速に行うことができる必要がある。本能動鉗子ではそのような要求を実現するために、Fig.6のように装着の際には1) 駆動部の下から鉗子部を挿入し、2) 鉗子軸周りに60[deg]回転させ、3) 鉗子部の固定リンクと駆動部をネジで固定するという簡単な手順で容易に装着できる構造となっている。また、鉗子部は機械部品を含まないため手術前に滅菌することが可能であり、患部に触れる鉗子先端部は清潔な状態で使用することができる。駆動部にもカバーをつけることにより清潔性の確保を図っている。Fig.7に駆動部に鉗子部とカバーを取り付けた状態を示す。

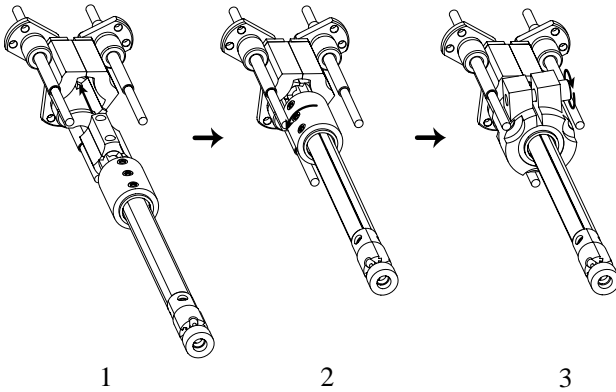


Fig.6 Installing a Forceps Part to a Driving Part



Fig.7 Active Forceps with Cover

## 4. 三脚プラットフォームの運動学問題

### 4.1 運動学計算

鉗子軸周りの回転角 $\phi$ 、屈曲角 $\theta$ の2つのパラメータを指令値として入力した場合の2本のリンクの摺動量 $h_1, h_2$ を求める逆運動学問題を考える。Fig.8のように鉗子の固定リンクに対応した基準座標系を $\{A\}$ 、鉗子のエンドエフェクタの位置姿勢に対応した移動座標系を $\{B\}$ とし、 $\{A\}$ から $\{B\}$ への変換を考える。座標系 $\{A\}, \{B\}$ の原点はそれぞれ3つのボールジョイント

の中心から成る正三角形の中心に固定されている。X軸は固定リンク上のボールジョイントの中心一致し、Z軸は3つのボールジョイントの中心を通る平面の法線方向と一致している。座標系 $\{A\}$ に対する座標系 $\{B\}$ は $\phi, \theta$ を用いて次のように表すことができる。

$${}^A_B T = \begin{bmatrix} c^2\phi c\theta + s^2\phi & -\frac{1}{2}s2\phi(1-c\theta) & c\phi s\theta \\ -\frac{1}{2}s2\phi(1-c\theta) & s^2\phi c\theta + c^2\phi & s\phi s\theta \\ -c\phi s\theta & -s\phi s\theta & c\theta \\ 0 & 0 & 0 \\ & \frac{1}{2}dc2\phi(1-c\theta) & \\ & \frac{1}{2}ds2\phi(1-c\theta) & \\ & dc\phi s\theta & \\ & & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

ただし $d$ は正三角形の重心から各頂点までの距離であり、 $c\phi$ は $\cos\phi$ 、 $s\phi$ は $\sin\phi$ などを表している。エンドエフェクタの鉗子軸周りの回転角は $\phi$ 、屈曲角は $\theta$ であり、これらと2本のリンクの摺動量 $h_1, h_2$ の関係は以下ようになる。

$$h_1 = -\sqrt{3}dsin(\phi - 60^\circ)sin\theta \quad (2)$$

$$h_2 = \sqrt{3}dsin(\phi + 60^\circ)sin\theta \quad (3)$$

また、以上の2式より以下のように順運動学を求めることができる。

$$\phi = \tan^{-1} \left( -\frac{\sqrt{3}h_1 - h_2}{h_1 - h_2} \right) \quad (4)$$

$$\theta = \sin^{-1} \left( \frac{2}{3} \frac{\sqrt{h_1^2 - h_1h_2 + h_2^2}}{d} \right) \quad (5)$$

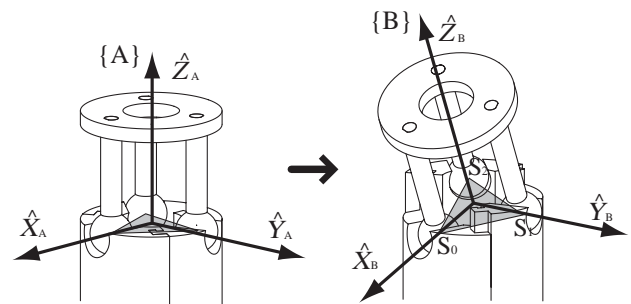


Fig.8 Coordinate

### 4.2 可動範囲

鉗子先端部の各リンクの寸法をFig.9のように設定し、リンク間の干渉を考慮してエンドエフェクタの可動範囲についてシミュレーションにて検証した。Fig.10は設計した鉗子先端部と同じ値( $R=0.6$ [mm],  $r=1.5$ [mm],  $\alpha=20$ [deg])を用いたときの計算結果であり、鉗子軸周りの回転角 $\phi$ に対する最大屈曲角 $\theta$ を表している。この結果より鉗子軸周りの全ての方向に対して屈曲角 $45 \sim 50$ [deg]を実現していることが分かる。

## 5. 小型スレーブロボットシステム

前節で設計した能動鉗子を、手術器具の位置決めロボットとして開発された能動トロカール<sup>4)</sup>に保持させ



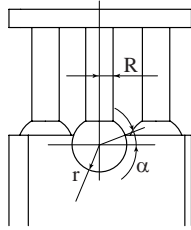


Fig.9 Parameters of the Endeffector

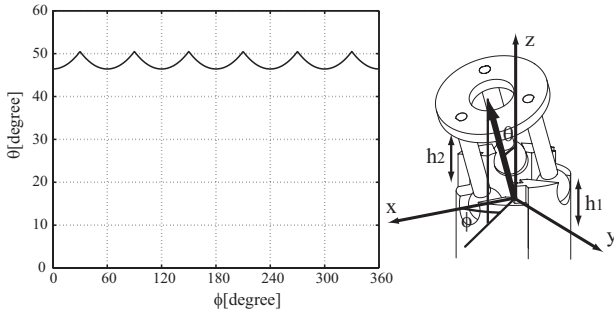


Fig.10 Maximum Bending Angle ( $R=0.6[\text{mm}]$ ,  
 $r=1.5[\text{mm}]$ ,  $\alpha=20[\text{deg}]$ )



Fig.11 Slave Robot

ることにより Fig.11 のような小型スレーブロボットを構築する．能動トコカルは手術器具先端の位置 3 自由度を決定する機構であり，能動鉗子の先端の姿勢 3 自由度を決定する機構と併せて腹腔内で鉗子先端の位置・姿勢 6 自由度を自由に決定することが可能である．スレーブロボットを術部上に配置するアームとしては，ポイントセッターを用いる．ポイントセッターは圧縮空気により駆動するパッシブな機構を持つ多関節アームで，Fig.12 のように腹壁上の任意の位置姿勢に複数のスレーブロボットを設置することができ，さまざまな手術手法に応用できるものとする．

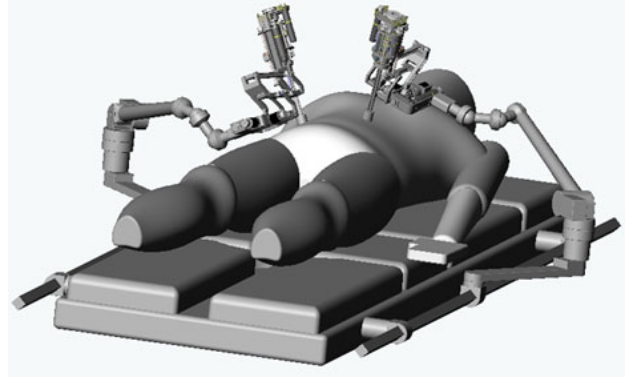


Fig.12 Slave Robot with Patient

## 6. おわりに

本稿では能動鉗子を高剛性多自由度化するために駆動方式としてリンク機構を用い，ジグソーブロックスライドを利用した三脚プラットフォームを考案した．三脚プラットフォーム型能動鉗子は屈曲 2 自由度，鉗子軸周りの回転 1 自由度の計 3 自由度を鉗子先端部で実現する．駆動部を含むシステム全体の小型化，軽量化を図り，また実際の手術における使用を想定して清潔性の確保に関しても考慮して設計を行った．今後は能動鉗子を含むマスタスレーブ手術システムを構築し，in vivo 実験等で医療の現場への適用を進めていきたい．

なお，本研究は，

- NEDO 医学・工学連携型研究事業「循環器系疾患に対する予後診断を含む低侵襲診断治療システムに関する基盤研究」(代表：高本眞一)
- 未来開拓推進事業「外科領域を中心とするロボティクスシステムの開発」「手術ロボティクスシステム開発プロジェクト」(代表：佐久間一郎)

のご支援を受けました．深く感謝致します．

## 参考文献

- 1) Guthart G.S., and J.K. Salisbury, "The Intuitive Telesurgery System: Overview and Application," Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Francisco CA, April 2000.
- 2) Reichenspurner H, Damiano RJ, Mack M, Boehm DH, Gulbins H, Detter C, et al. "Use of the voice-controlled and computer assisted surgical system ZEUS for endoscopic coronary artery bypass grafting," J Thorac Cardiovasc Surg, Vol.118, No.1, 1999.
- 3) 渡部 耕一, 岡田 昌史, 中村 仁彦, "リンク駆動型高剛性多自由度能動鉗子の開発", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'01 講演論文集, 2P1-D10, 2001.
- 4) 小林 祐樹, 岡田 昌史, 中村 仁彦, "手術室環境を占有しない小型スレーブロボット", 第 19 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.757-758, 2001.