

三脚プラットフォーム型能動鉗子を用いた マスタ・スレーブ小型手術ロボットシステムの開発

Development of Master-Slave Small Surgical Robot System Using Active Forceps with Tripod Platform

千代田 真吾 (東大) 岡田 昌史 (東大) 中村 仁彦 (東大)

Shingo CHIYODA, Masafumi OKADA and Yoshihiko NAKAMURA
University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo

Abstract: To make the endoscopic surgery more precise, computer-enhanced surgical robot systems has been introduced. In this paper, we develop Active Forceps with Tripod Platform, which realizes 4 DOFs by link driven mechanism. Using this forceps, we develop master-slave surgical robot system, which occupies less amount of space of operation room than current robot systems.

Keywords : Surgical robot system, Active forceps, Master-slave system

1 はじめに

内視鏡下外科手術における術者の負担を軽減するために、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 [1][2]。これらのロボットで用いるために開発されている能動鉗子の多くはワイヤ駆動で、急激な力の変化に弱く耐久性が悪いといった欠点があり、臓器摘出手術など力の必要な作業には不向きといえる。本研究では能動鉗子の駆動方式としてリンク駆動を採用し上記の問題を解消し、ジグソーブロックスライド [3] を応用した三脚プラットフォーム型能動鉗子を開発する。さらに、これを用いたマスタ・スレーブ式小型手術ロボットシステムを構築する。

2 三脚プラットフォーム型能動鉗子

2.1 概要

Fig.1 左に開発した三脚プラットフォーム型能動鉗子の概観を示す。駆動部に4つのDCモータを搭載しており、鉗子先端の姿勢3自由度および把持部の開閉1自由度の計4自由度をリンク機構によって駆動する。主な構造部材にマグネシウムを用い、それらを密集させて配置することにより重量500[g]、駆動部寸法50[mm]×66[mm]×110[mm]という軽量化、小型化を実現した。鉗子部にガス漏出防止機構を設けることで気腹式による内視鏡下手術への適用が可能である。また、Fig.1 右のように鉗子部、結合部、駆動部の3つの部分に分離できるようにすることで、患部に触れる鉗子部は清潔性を保つことができる。

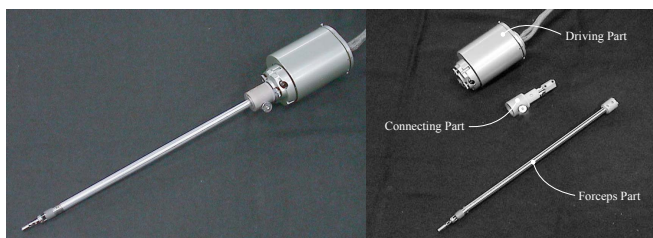


Fig. 1: Active Forceps with Tripodal Platform

2.2 三脚プラットフォームの機構

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.2に三脚プラットフォームの概要を示す。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）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を固定し、リンクB, Cを摺動させることにより、先端の屈曲2自由度を実現することができる。

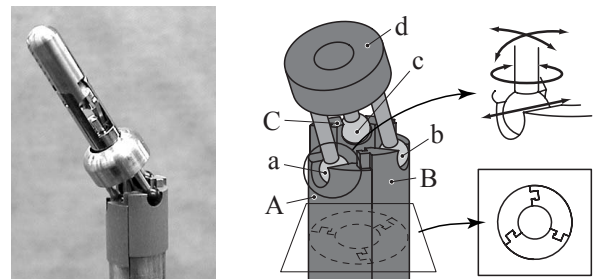


Fig. 2: Mechanism of Tripodal Platform

2.3 三脚プラットフォームの運動学

プラットフォームの姿勢がX-Y-Zオイラー角 γ, β, α で与えられたときの、2本のスライドリンクの変位 h_1, h_2 および鉗子軸周りの回転角 θ_3 以下ようになる。

$$h_1 = -\frac{3}{2}dr_{31} + \frac{\sqrt{3}}{2}dr_{32} \quad (1)$$

$$h_2 = -\frac{3}{2}dr_{31} - \frac{\sqrt{3}}{2}dr_{32} \quad (2)$$

$$\theta_3 = \tan^{-1} \left(\frac{r_{21} - r_{12}}{r_{11} + r_{22}} \right) \quad (3)$$

ただし、

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (4)$$

は γ, β, α より求められるプラットフォームの姿勢変換行列, d はボールジョイント a, b, c が成す正三角形の重心から各ボールジョイントまでの距離である.

リンク間の干渉を考慮してプラットフォームの可動範囲を求めると Fig.3 のようになる. Fig.3 は鉗子軸周りの回転角 ϕ に対する最大屈曲角 θ を表している. この結果より全方向に対して屈曲角 $45 \sim 50[\text{deg}]$ を実現していることが分かる.

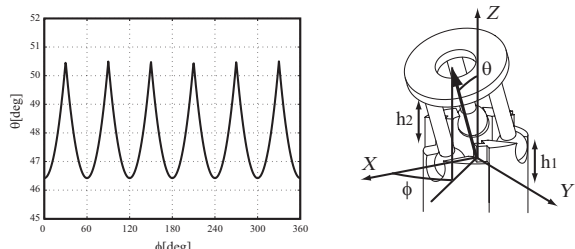


Fig. 3: Movable Range of Tripodal Platform

3 小型手術ロボットシステム

三脚プラットフォーム型能動鉗子を用いた, マスタ・スレーブ式小型手術ロボットシステムを構築する. Fig.4 はシステム概念図である. 術者はモニタ上の内視鏡画像を見ながらマスタデバイス (PHANToM DESKTOP, SensAble Technologies Inc.) によってスレーブロボットを操作する. 三脚プラットフォーム型能動鉗子を能動トロカール [4] に搭載したものをスレーブロボットとして用い, 鉗子先端部の位置・姿勢 6 自由度と把持部の開閉 1 自由度の計 7 自由度を腹腔内で実現する. スレーブロボットおよび内視鏡は開閉式吊り下げ器 [5] に固定されたポイントセッター (三鷹光器) に取り付けて上方から吊り下げることによって, 手術台周辺の空間を確保し, 術者が円滑に作業を行えるようにする.

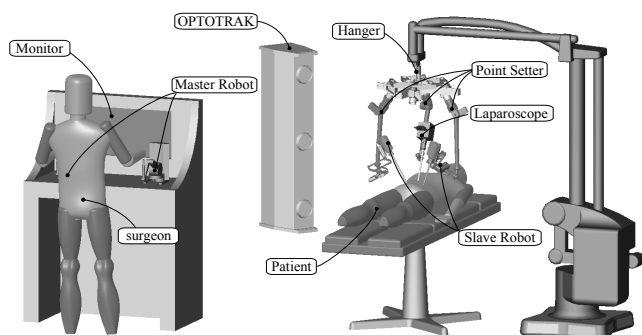


Fig. 4: Overview of Surgical Robot System

4 in vivo 実験での検証

上記のシステムについて, 豚を用いた in vivo 実験を行った. マスタ・スレーブ操作による能動鉗子の応答を Fig.5 に示す. Fig.5 左は目標値および動作量, 右はその偏差を表しており, 良好な応答性を示している. また,

システムのセッティングに関してはロボットと内視鏡を全て一台の吊り下げ器から吊るすことで, 各々を手術台の横に取り付ける手間がなくなり, 迅速に手術台まで移動させることができた.

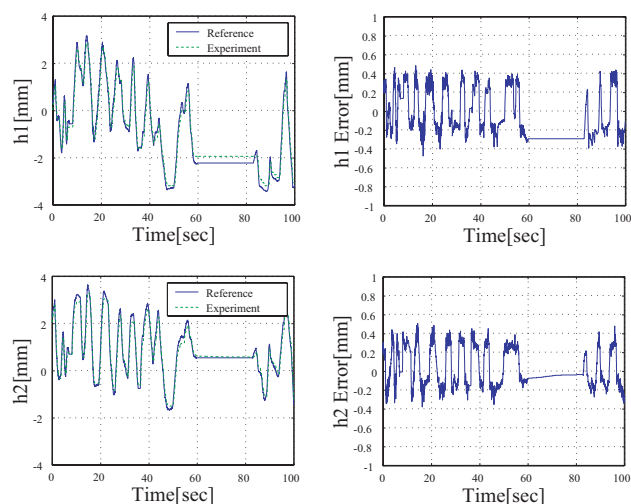


Fig. 5: Experimental Result of Master-Slave Control

5 結論

本研究による成果は以下のとおりである.

1. 内視鏡下手術で用いる能動鉗子の先端部機構として高剛性, 高耐久性を有する三脚プラットフォームを考案し, これを用いた三脚プラットフォーム型能動鉗子を開発した.
2. 三脚プラットフォーム型能動鉗子を用いたマスタ・スレーブ式小型手術ロボットシステムを構築し, その操作性, 有用性を *in vivo* 実験にて検証した.

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 (ICRA2000), 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] Yuki Kobayashi, Shingo Chiyoda, Kouichi Watabe, Masafumi Okada, Yoshihiko Nakamura, "Small Occupancy Robotic Mechanisms for Endoscopic Surgery", Proc. of International Conference on Medical Computing and Computer Assisted Intervention (MICCAI2002), pp.75-82, 2002.
- [5] 村井 昭彦, 岡田 昌史, 中村 仁彦, "パッシブポジションと小型能動機構からなる外科手術ロボットシステム", 第 20 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2L16, 2002.