

能動鉗子のための粗動・細動ハイブリッドポジションナの開発

山本江 (東京大学) 岡田昌史 (東京大学) 中村仁彦 (東京大学)

Development of Coarse/Fine Hybrid Positioner for Active Forceps

*Kou YAMAMOTO (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. In surgical robot system containing active forceps, positionig of active forceps requires coarse motion to insert active forceps into the abdominal cavity and fine motion to adjust the end of active forceps. In this paper, we develop a coarse/fine hybrid positioner mechanism and use it as positioning mechanism for surgical robots.

Key Words: Surgical robot system, Active forceps, Coarse/fine positioner

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手術支援ロボットが開発され、Intuitive Surgical社の da Vinci¹⁾ や Computer Motion社の ZEUS²⁾ 等すでに臨床応用されているものもある。小林らは、能動鉗子を用いたマスタスレーブ型小型手術ロボットシステムを開発した³⁾。このシステムは手術空間を占有しないことを目的とし、能動鉗子、マニピュレータを小型化し、駆動系を含めて腹壁近くに配置するシステムとなっている。これらは多自由度ポジションナによって支持され、手術に適した位置と姿勢で固定される。これらの手術支援ロボットの位置決めをするポジションナに注目すると、安全性の観点から、パッシブポジションナの使用が適している。村井は閉リンク機構を用いた開閉式吊り下げ器 (Fig. 1) を開発し、その下にパッシブポジションナとしてポイントセッター (三鷹光器) を使用して能動鉗子を搭載したスレーブロボットと内視鏡を配置することで、手術空間の小占有性の実現と同時に能動鉗子の高精度かつ安全な位置決めを可能にした⁴⁾。吊り下げ器には電磁ブレーキがとりつけられ、このブレーキを解除することで動かす。また、ポイントセッターは4つの球面ジョイントを持つ多関節アームで、静止時は機械的にロックされ、位置決めを行う際には圧縮空気の注入によりロックがはずされフリーになる。これらのパッシブな機構により、ロボットの位置決めを自由に行い、機械的ロックによって固定することが迅速なセッティング、安全性といった観点から必要であろう。

手術時のロボットのセッティングにおいて、鉗子をトロカールを通して体腔内に挿入する際、組織を傷つけないよう注意しながら Fig. 2 のようにトロカール中心軸方向に鉗子を挿入しなければならない。この動きには鉗子を術部に正確に近づけること、内視鏡を適確に術部に向けること、鉗子や内視鏡の挿入のための大きな動きを迅速に行うことが要求される。しかし、ポイントセッターを使って鉗子を挿入する場合、可動範囲の狭さ、自由度の制約、鉗子軸方向に生じる振れから挿入時に臓器を傷つける可能性があること、細かな

位置決めが容易でないことといった問題点を有している。このことから、能動鉗子のためのトロカール中心軸方向1自由度の位置決め機構が必要であろう。さらに、操作性に注目した場合、鉗子挿入の際は大きく動き、腹腔内では鉗子先端の微調整ができる機構が適している。したがって、このような能動鉗子のための1自由度位置決め機構としては粗動・細動の切り替えが簡単に出来ることが望ましい。本研究では、アクチュエータを用いずに粗動・細動の切り替えが可能なハイブリッドポジションナを開発し、それを用いて能動鉗子の位置決めをすることで手術時の初期配置における時間の短縮と安全性の向上を目指す。

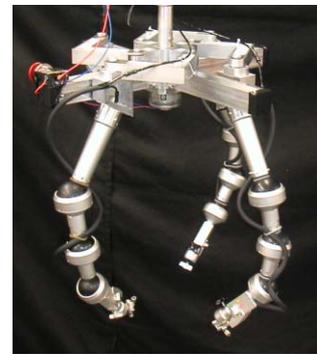


Fig.1 Hanger mechanism and pointsetter

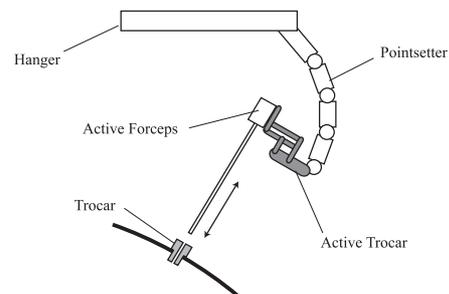


Fig.2 Diredction to insert active forceps

2. ハイブリッドポジションナの開発

2.1 粗動・細動の原理

一般の粗動・細動位置決め機構は、粗動機構と細動機構を合わせた複合型位置決め機構であり、粗動機構の剛性は高く、細動機構は小型のため剛性は低い。位置決め機構の剛性は、その機械要素の中の最も剛性の低いものに依存するため、粗動・細動機構の剛性は細動機構の剛性に依存することになる⁵⁾。このことから、高い剛性を得るためには1つの機構で粗動・細動が可能であることが望ましい。また、粗動機構・細動機構の各操作部が離れていたり、粗動から細動への切り替えの際、粗動機構にスイッチ等によりブレーキをかけてから細動機構を操作しなければならない、といったような機構が多く、粗動・細動の切り替えが煩雑なものとなっている。本研究では、1つの機構で操作方法を変えることにより粗動・細動の自動的な切り替えが可能な機構を考える。これによりシステムの小型化と簡略化を達成し、手術ロボットの迅速なセッティングを容易にする。

ハイブリッドポジションナ機構の原理を Fig. 3 に示す。Fig. 3 において、ボールねじ 1 は両軸端を固定し回転を拘束する。ボールねじ 2 およびボールねじ 3 の軸端にはプーリを取り付けて回転トルクを伝える。ナット 1 と 2 の間を渡す部品をブリッジと呼ぶこととする。ブリッジはリニアガイドにより常に水平を保つ。ボールねじ 1 と 2 の側を入力側、ボールねじ 3 の側を出力側と呼ぶこととする。入力側でボールねじ 2 ねじ軸を回転させるとその回転がボールねじ 3 に伝わりナット 3 がねじ軸方向に動く。Fig. 3 のように出力側のナット 3 に能動鉗子を取り付けることにより能動鉗子(および能動トロカール)の位置決めをする。

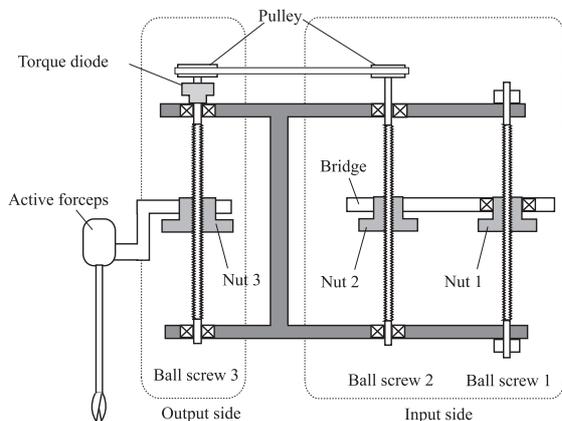


Fig.3 Model of hybrid positioner

以下のように、ボールねじ 2 の回転を操作することで粗動・細動を切り替える。

- 粗動：Fig. 4 のようにブリッジを上下させることで直線運動を回転運動に変換しボールねじ 2 を高速回転させる。これに伴いボールねじ 3 も高速回転し、出力側ナット 3 の粗動位置決めをする。
- 細動：Fig. 5 のようにナット 1 を回転させることでボールねじ 2 を回転させることができる。この

場合、入力側においてボールねじ 2 を直接回転させることと変わらないため、プーリは低速で回転し、出力側ナット 3 の細動位置決めをする。

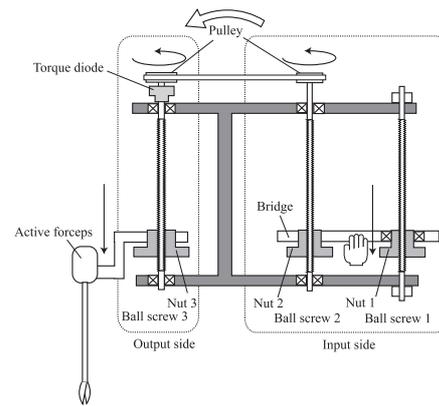


Fig.4 Coarse positioning

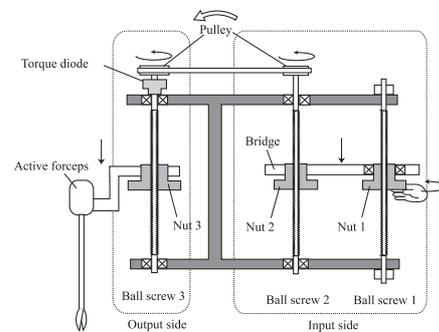


Fig.5 Fine positioning

この機構の特徴として以下の点が挙げられる。

- 従来の機構が粗動と細動を 2 つの機構で実現していたのに対し、この機構は 1 つの機構で入力方法を変える形式で実現している。そのため、機構の剛性はボールねじ 3 のみに依存するものとなっている。
- 粗動と細動の切り替えは、1 つの部品を回転させる方法の変化で実現される。そのため、切り替え操作は容易なものとなっている。
- ブレーキ機能(本研究では機械的拘束によるロック)をつける場合、ボールねじ 3 または 2 の回転を拘束すればよい。そのため、その機構は簡単なものとなる。このブレーキ機能に関しては後述する。

このモデルでは出力側から入力側へも回転が伝わるため、入力側を操作しない時、鉗子の自重によりボールねじ 3 が回転してしまい鉗子が降下する可能性がある。これを防ぐために次節ではロックがかかるような機構にすることを考える。

2.2 機械的拘束によるロック機能

この機構にロックをかけるためには、前述のようにボールねじ 3 または 2 を拘束すればよい。一方、ロボットの迅速なセッティングのためには、ロックの on / off を他のスイッチで施すことは望ましくない。そこで、機

機械的な拘束が自動的に施される機構を導入する。これを、ボールねじ 2 の回転をボールねじ 3 には伝えるが、ボールねじ 3 の回転をボールねじ 2 には伝えない機構で実現する。一般に、バックドライブ性の極めて小さい回転伝達機構としてウォームギアが知られている。しかし、この機構は剛性が小さく、破損しやすいこと、大きな減速比を生み出してしまうことから望ましくない。そこで、本研究では機械的拘束によるロック機能にトルクダイオード (NTN, Fig. 6)⁶⁾ を使用する。トルクダイオードは NTN 社製の逆入力遮断クラッチ



Fig.6 Torque diode (NTN)

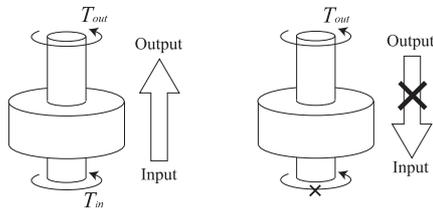


Fig.7 Function of torque diode

であり、Fig. 7 に示すように回転力を入力軸から出力軸へ伝えるが、逆からの入力は遮断するという機能を有する。逆方向からの回転力遮断によって 2 種類のタイプがある。

- 出力軸がロックし、入力軸を回転させない (ロック型)
- 出力軸が空転し、入力軸を回転させない (フリー型)

本研究ではロック型トルクダイオードを使用する。Fig. 3 のようにトルクダイオードの出力軸にボールねじ 3 を取り付けることにより、出力側から入力側へのトルクの伝達を遮断する。市販のトルクダイオードでは入力時のロストトルクが大きかったため、小ロストトルクのトルクダイオードを製作し使用した。

2.3 ハイブリッドポジショナ的设计

設計・製作したハイブリッドポジショナを Fig. 8 に、Fig. 3 との対応を Fig. 9 に示す。Fig. 8, Fig. 9 のように、ボールねじ 1, 2 のある入力側と、ボールねじ 3 のある出力側が裏表となるような構造にして機構全体をコンパクトなものとした。トルクダイオードが入力軸が穴形状をしているためボールねじ 2 側に取り付けた。軽量・高剛性を実現するために主要な部品にはジュラルミンを用いた。ボールねじはリード 1[mm] の転造ボールねじ MTF0601-3.7 (THK) を使用した。能動鉗子が腹腔内に 150[mm] 程度入ることを考慮しボールねじのねじ部寸法は 200[mm] とした。全体はボールねじからナットをはずすことなく組み立てが出来る構

造とした。試作機の重量は 1.2[kg] である。能動鉗子の重量が 500[g]、能動トロカールが 630[g]、合わせてスレーブロボットの重量は 1.13[kg] であり、ポイントセッターの保持可能重量が 5[kg] であることからポイントセッターで保持可能である。

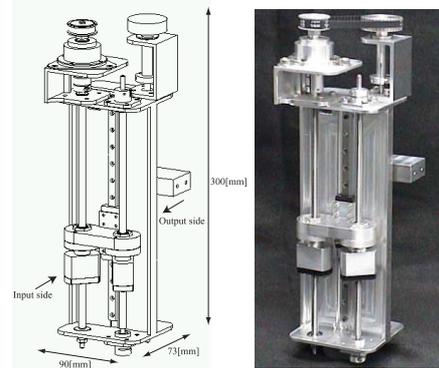


Fig.8 Prototype of hybrid positioner

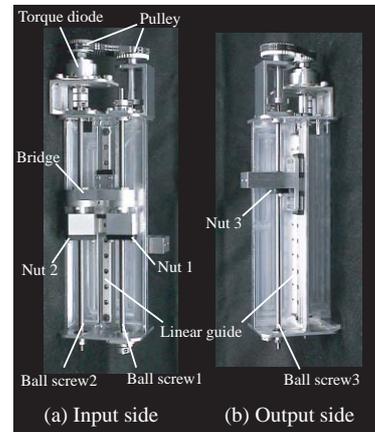


Fig.9 Parts of hybrid positioner

2.4 小型手術ロボットシステムへの応用

製作したハイブリッドポジショナを Fig. 10 のようにポイントセッターとスレーブロボットとの間に搭載し手術時の能動鉗子の位置決めを使用する。手術時における使用法としては、まずポイントセッターをフリーにして鉗子をトロカールに差し込んだ後、ポイントセッターをロックする。これ以降の調節は、ポイントセッターは使わずハイブリッドポジショナを用いて行う。ハイブリッドポジショナの粗動により鉗子を腹腔内に挿入する。その後、細動により鉗子先端の微細な初期位置設定を行う。スレーブロボット操作終了後、鉗子を引き抜く際には、粗動により鉗子を腹腔内から引き抜く。

3. ハイブリッドポジショナの動作検証

製作したハイブリッドポジショナを搭載した小型手術ロボットシステムを実際に手術室に持ち込み豚の胸部に対する in vivo 実験を行った。実験の様子を Fig.

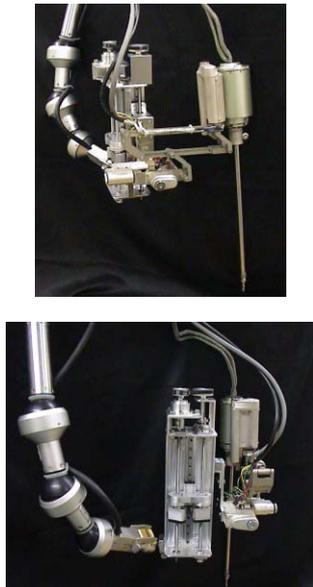


Fig.10 Hybrid positioner with pointsetter and slave robot

11 に示す．鉗子先端と内視鏡が正対した状態 (Fig. 11 左下) でハイブリッドポジショナを使い鉗子の位置決めを行った．心臓付近ではハイブリッドポジショナの細動位置決めにより鉗子先端の微調整を行った．ハイブリッドポジショナを操作している様子を Fig. 11 右に、心臓付近の様子を Fig. 12 に示す．Fig. 12 において、鉗子先端部が写真上辺から心臓に置かれたマーカに向かって徐々に近づいていることが確認できる．

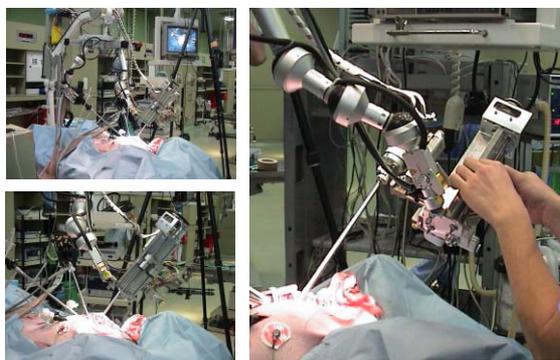


Fig.11 in vivo experiment scene

手術中においてハイブリッドポジショナは操作の邪魔にはならず、スレーブロボットのキャリブレーションも通常通り可能であった．また、スレーブロボット操作中もハイブリッドポジショナは位置決めを保つことができ、ハイブリッドポジショナが有用であることが確認された．

4. おわりに

本研究で得られた成果は次の通りである．

1. 粗動・細動を独立した機構により実現するのではなく、1つの機構で入力方式により粗動・細動を切

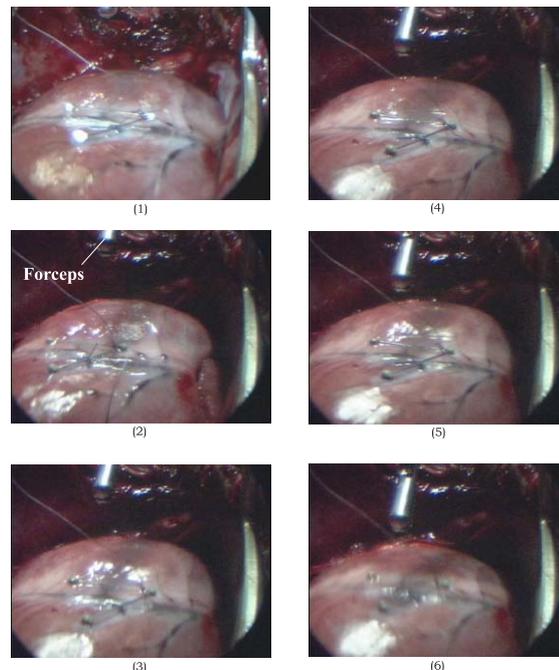


Fig.12 Fine positioning of active forceps

り替えることのできるハイブリッドポジショナの機構を提案し、トルクダイオードを使用してパッシブな安全性を実現した．

2. in vivo 実験によりハイブリッドポジショナの有効性を確認した．

今回開発したハイブリッドポジショナは医療用ロボットのみならず、粗動と細動を必要とするシステムに対して剛性・操作性という面で優れている．この機構を実用的なものに改良し、迅速なセッティングと精密な位置決めを容易に達成させることで、他の医療機械、福祉工学の分野、光学分野における測定器への大きな貢献が期待される．

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, 2000
- 2) Bob Kiaii et al. "Robot-Assisted Computer Enhanced Closed-Chest Coronary Surgery: Preliminary Experience Using a Harmonic Scalpel and Zeus". The Heart Surgery Forum, Vol.200,.
- 3) 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.
- 4) 村井 昭彦, 岡田昌史, 中村 仁彦 "パッシブポジショナ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, pp.2L16, 2002.
- 5) 井澤 寛, "精密位置決め技術 - その設計テクニック -", 工業調査会, 1989.
- 6) 公開特許広報 (A), 特許公開 2003-343601, "逆入力遮断クラッチ"