

空気圧サーボを用いた腹腔鏡手術支援ロボットシステム

只野 耕太郎*

* 東京工業大学精密工学研究所 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259
 * Tokyo Institute of Technology, Nagatsuta-cho 4259, Midori-ku, Yokohama, Japan
 * E-mail: tadano@pi.titech.ac.jp

キーワード：腹腔鏡手術 (laparoscopic surgery), ロボット (robot), 空気圧サーボシステム (pneumatic servo system),
 J-L 0009/15/5409-0655 © 2015 SICE

1. まえがき

腹腔鏡手術は従来の開腹手術に比べ、傷が小さくて済み入院期間も短縮できることから患者への負担が少なく、適用範囲、実施数ともに年々増加している¹⁾。しかし、鉗子などの器具が腹壁に拘束され、対象物へ自由な角度でアプローチできないことなどから術者には高度な技術が求められる。

このような背景から、先端に手首関節を有する鉗子マニピュレータの研究開発が盛んに行われている。中でも da Vinci に代表されるマスタ・スレーブ型の手術支援ロボットシステムでは、スレーブ側の鉗子マニピュレータの先端がマスタデバイスによって入力された術者の手の動きに連動するため直感的な操作が可能である。

現状のロボット手術では術者へのフィードバックは内視鏡画像からの視覚情報のみとなっているが、より直感的で安全な作業のために力覚の提示が望まれている。多くの手術ロボットシステムでは、精密な位置決めを実現するため、アクチュエータとして電動モータに高減速比の減速機を組み合わせたものが用いられており、そのバックドライバビリティの低さから、鉗子先端の力を検出するには力センサを取り付ける必要がある。しかし、小型化、滅菌、較正、コスト、電気メスなどからのノイズなど実用面を考慮すると鉗子先端への力センサの取り付けは望ましくない。一方で、ダイレクトドライブモータや低減速比のギヤドモータを用いる場合、力センサを用いずに外力推定、力制御が可能である。しかし、十分な駆動トルクを得るためには、モータが比較的大型になり、軽量化、小型化の妨げとなる。

著者らは、スレーブ側に空気圧駆動を採用することで力センサなしに圧力値から外力を検出可能な腹腔鏡手術用ロボットシステムの開発を行ってきた²⁾。空気圧アクチュエータは質量対出力比が高く減速機なしに比較的大きな力を発生できるため、小型軽量を維持しながら十分な駆動トルクとバックドライバビリティを両立することができる。したがって、力センサなしに圧力情報からの外力検出やコンプライアンス制御が可能である。本稿では上記に関するこれまでの開発事例について紹介する。

2. 開発した手術支援ロボットシステムの概要

図1に開発したマスタスレーブシステムの概略を示す。片腕は把持を含む7自由度を有しており、双腕での操作が可能である。患者と離れた位置に設置されるマスタ側は特に滅菌やサイズに関する制約がないことから、一般的な電動駆動の力覚提示装置を用いている。

スレーブ側のマニピュレータは、図2に示すように腹腔内に進入し作業を行う2自由度の鉗子マニピュレータと、これを腹腔外で保持駆動する4自由度のロボットアームから構成される。空気圧アクチュエータの採用により

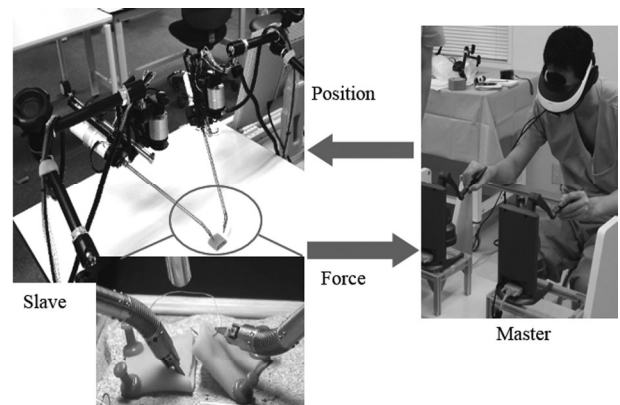


図1 開発したマスタスレーブシステム

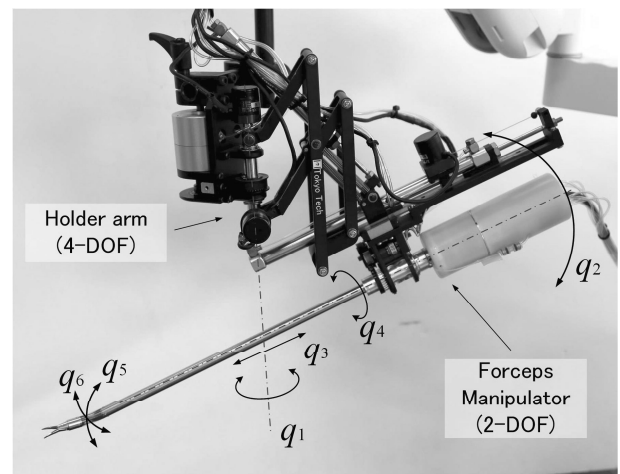


図2 開発した空気圧駆動マニピュレータ

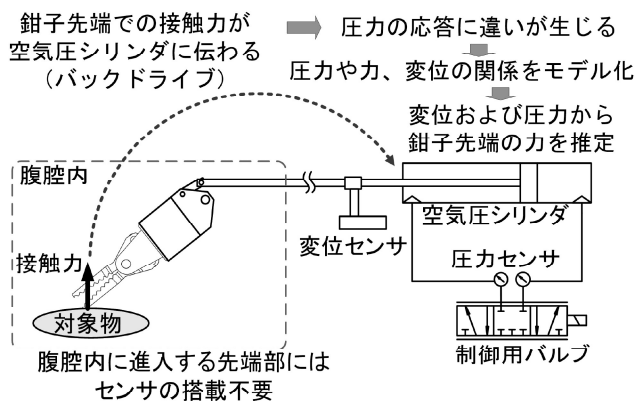


図3 空気圧駆動による外力推定の概念

減速機を不要としバックドライバビリティを高めることで、外力の検出を実現している。すなわち、図3に示すように、出力側である鉗子先端での接触力が入力側の空気圧アクチュエータに伝わり、その際の圧力の応答に違いが生じることを利用し外力を推定する。この圧力や力、変位の関係をモデル化することによって、体外の駆動部に配置した空気圧アクチュエータの変位、圧力から、鉗子先端の力を推定する。これは一種の外乱オブザーバであり、推定した外力は操作者へ反力として提示することができる。

3. 鉗子マニピュレータ

腹腔内に進入する鉗子部は、把持動作の自由度のほかに、挿入孔による拘束によって失われた2自由度を復元するために、手首に相当する少なくとも2自由度の関節を有することが求められる。著者らは関節の主構造として切削加工型の高性能スプリングを採用し、その内部に超弾性合金による補強を施すことによって、構成部品を減らしかつ屈曲方向にのみ柔軟な関節機構を実現した³⁾。図4に本機構を用いて試作した屈曲2自由度の鉗子マニピュレータを示す。本切削スプリングは、弾性変形によって屈曲する単純な柔軟構造であり、部品点数を大幅に削減できるほかに、特異姿勢がないことや内部の空間を広く使えるといった利点がある。また、曲げ方向において柔軟な屈曲特性を有しながら、非常に高いねじり剛性を有しており、縫合作業などで重要となる先端をひねる動作において安定にトルクを伝達することができる。屈曲動作は、スプリングの外殻に4本のワイヤを通し、それぞれ一つの空気圧シリンダによってワイヤを引くことで実現している。各自由度は、図5のように2つの空気圧シリンダの拮抗駆動により制御される。図5の拮抗駆動系を90度ずらして2組配置することで、合計4本の空気圧シリンダで2自由度の動作が実現される。先端に作用する外力は、各空気圧シリンダの駆動力からワイヤ張力を求め、切削スプリングの弾性力や摩擦力などを差し引くことで計算することができる。

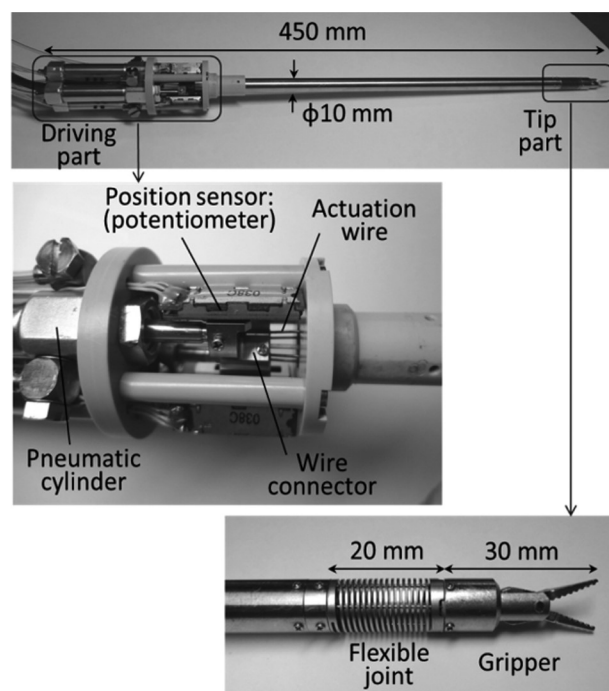


図4 鉗子マニピュレータ

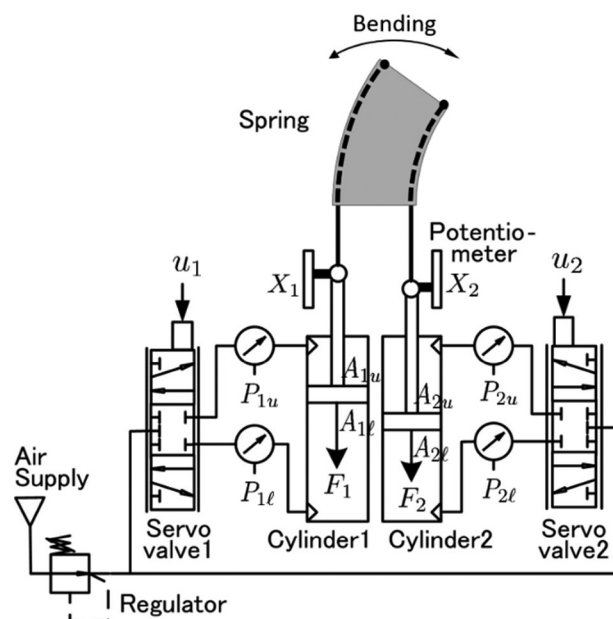


図5 空気圧シリンダによる拮抗駆動系

4. 保持アーム

上記の鉗子マニピュレータや内視鏡は患者の上方で図6に示すロボットアームによって保持される。本アームは挿入ポートの位置を中心とする回転3自由度および内視鏡挿入方向の並進1自由度の計4自由度を有しており、すべての自由度を空気圧アクチュエータによって駆動している。空気圧駆動の採用によってアーム本体のコンパクト化と軽量化を実現している。各空気圧アクチュエータの駆動力は鉗子部と同様に圧力センサとサーボ弁を用

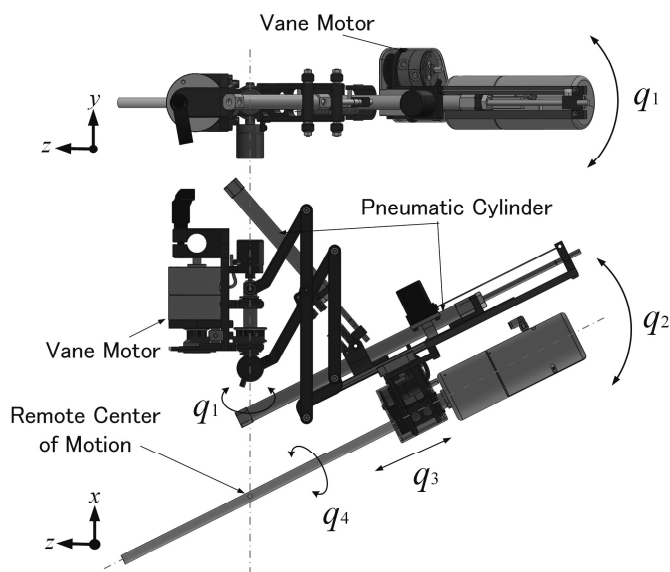


図6 保持アームの構造

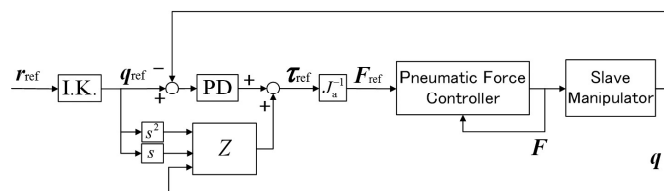


図7 スレーブマニピュレータの制御系

いて制御される。空気圧駆動を採用することで発熱のなさや受動的な柔らかさ、供給圧力の制限による最大発生力の調整、緊急排気による脱力など、空気圧駆動ならではの安全性に寄与するメカニカルな特性を有している。

5. 制御系

開発したマニピュレータの制御系の概略を図7に示す。マスタ側から与えられた位置や姿勢の目標値 r_{ref} を逆運動学演算 (I.K.) により各関節変位の目標値 q_{ref} に変換し、PD 制御則によるフィードバック制御と機構の逆動力学モデル Z によるフィードフォワード制御の組み合わせによって、各関節が発生すべきトルク τ_{ref} を計算する。さらに、これを空気圧アクチュエータの駆動力目標値 F_{ref} に変換し、図8に示すように、圧力センサから求めた駆動力をフィードバックしたPID 制御によってサーボ弁へ指令電圧 u を与える。サーボ弁は5ポートのスプール型のものを用いており入力電圧によって開度を連続かつ高速に調整できる。

6. 実験結果

はじめに、鉗子マニピュレータの位置決め分解能を調べる実験を行った結果を図9に示す。図に示すように、関節の左右の屈曲角度 θ の目標値を 30° から 35° まで、1 秒ごとに 1° 刻みで変化させて位置制御を行った。この

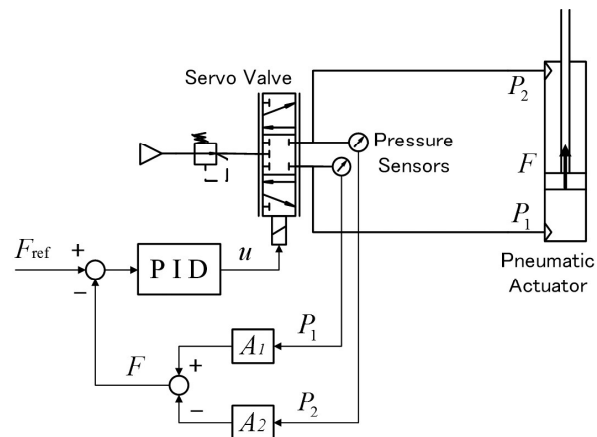


図8 空気圧シリンダの駆動力制御

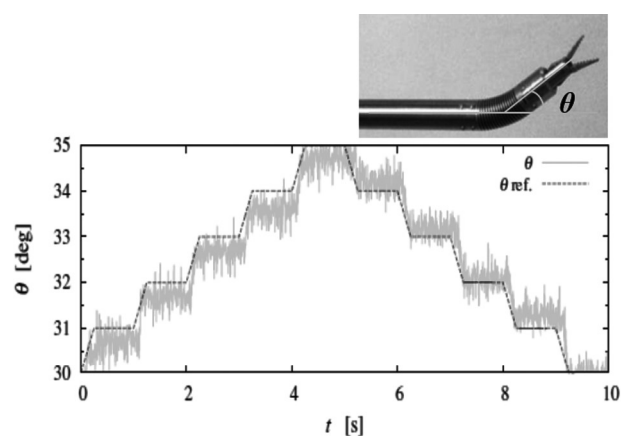


図9 位置決め分解能の評価実験結果

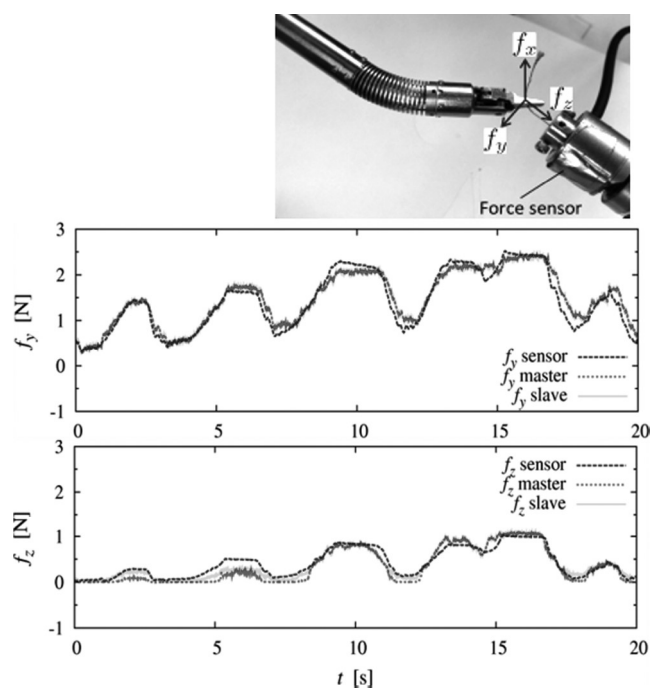


図10 外力推定実験結果

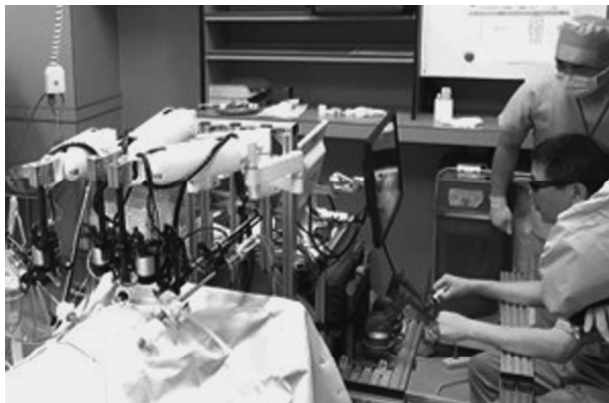


図 11 動物実験のようす

目標値入力に対し、関節角度の計測値はおおむね 1° 刻みで確実に応答しており、本実験における柔軟関節の位置決め分解能は 1° 以下とわかる。この角度は先端位置としては 0.1 mm 以下の分解能に相当する。

つぎに、外力推定の評価実験の結果を図 10 に示す。図右上に示すように固定された評価用力センサにワイヤをくくりつけ、これをスレーブ側鉗子先端で把持し引っ張る動作を行った。図のグラフは、このときの力の応答結果を示したものである。力センサで測定した値 f_{sensor} と推定した外力 f_{slave} がよく一致していることがわかる。その力がマスタ側に反力 f_{master} として提示されており、提案実装した外力推定方法が有効であることが確認できる。

以上の手術支援ロボットシステムは、図 11 に示すような動物実験を外科医の協力を得ながら定期的の実施し、実用化に向け改良を重ねている。

7. おわりに

本稿では、著者らが開発している力覚フィードバック機能を有するマスタスレーブ型の手術支援ロボットシステムについて紹介した。本システムは、スレーブ側に空気圧駆動を採用し、鉗子先端部に力センサなどを搭載することなく外力を推定できることを特徴としており、実用化を目指して開発を進めている。

(2015 年 5 月 26 日受付)

参 考 文 献

- 1) 日本内視鏡外科学会誌, **15**-5 (2010)
- 2) Kotaro Tadano and Kenji Kawashima: Development of a Master Slave System with Force-Sensing Abilities Using Pneumatic Actuators for Laparo-scopic Surgery, *Advanced Robotics*, **24**-12, 1763/1783 (2010)
- 3) 原口大輔, 只野耕太郎, 川嶋健嗣: 柔軟関節を用いた空気圧駆動鉗子マニピュレータの開発 (先端屈曲機構の簡略化と外力推定), 日本フルードパワーシステム学会論文集, **43**-3, 62/69 (2012)

[著 者 紹 介]

ただの こうたろう 只野 耕太郎 君 (正会員)



2007 年東京工業大学大学院総合理工学研究科博士後期課程修了。同大学精密工学研究所研究員、助教を経て、13 年同准教授、現在に至る。手術支援ロボット、空気圧制御の研究に従事。日本フルードパワーシステム学会、日本機械学会などの会員。博士 (工学)。