

連携記事

空気圧駆動を用いた手術支援ロボットシステム

Surgical Robot Systems using Pneumatic Drive

只野耕太郎

Kotaro Tadano

東京工業大学 科学技術創成研究院
未来産業技術研究所 准教授

リバーフィールド(株) 執行役員 CTO

1 はじめに

従来の開腹手術に比べ患者への負担が少ない腹腔鏡手術は適用範囲、実施数ともに年々増加している¹⁾。同手術ではロボットの導入が進んでおり、市販されている米国製の手術支援ロボットは、術者がマスタデバイスを操作すると体内に挿入されたスレーブ側の多自由度鉗子（鉗子マニピュレータ）が同期して動くものであり、術者の手がそのまま体内にあるような直感的な操作が可能である。本手術支援ロボットは、現在までに世界で4000台以上、国内の病院において約300台が導入されている。このような医療ロボットの市場は今後さらに拡大していくことが見込まれている。

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できるコンパクト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⁾。また、その過程において、空気圧駆動ロボットアームとジャイロスコプを用いた内視鏡操作システムを上記システムの派生として開発した³⁾。本稿では手術ロボットの開発事例としてこれらのシステムを紹介する。

2 力覚提示機能を有するロボットシステム

2.1 コンセプトと全体概要

現状のロボット手術では内視鏡からの視覚情報を頼りに手技を行っているが、より正確で安全な作業のために、手術中に生じる反力の力覚提示が望まれている。これまで研究開発さ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高減速比の減速機付き電動モータが用いられている。そのため、ロボットの先端に力が加わっても、減速機の摩擦力に埋もれてしまい、モータではその力を正確に検出することが難しい。このよう

なバックドライバビリティの低いロボットにおいて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の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、モータが大型になり、マニピュレータの軽量化、小型化が困難となる。

我々が採用している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。

すなわち、図1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

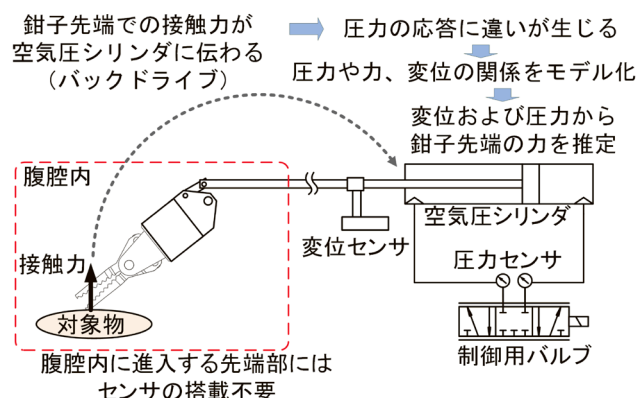


図1 空気圧駆動による外力推定の概念

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し、操作者に反力として提示する方法を実装している。

上記コンセプトを基に試作したマスタスレーブ型の手術ロボットシステムを図2に示す。マスタ、スレーブ両側とも片腕に6つの独立した関節（6自由度）を有しており、任意の位置、姿勢に先端を操作可能である。操作者が両手で左右のマスタデバイスを操作すると、その動きに追従してスレーブ側の左右の鉗子が動くよう制御される。スレーブ側で推定された反力情報はマスタ側にフィードバックされ、マスタアームのアクチュエータの制御によって、その力が再現される。

2.2 開発した空気圧駆動手術マニピュレータ

図3に試作したスレーブ側のマニピュレータを示す。本マニピュレータは、2自由度の手首関節を有し腹腔内で作業を行う鉗子マニピュレータと、これを腹腔外上方で保持駆動する4自由度のロボットアームから構成され、両者は着脱でき

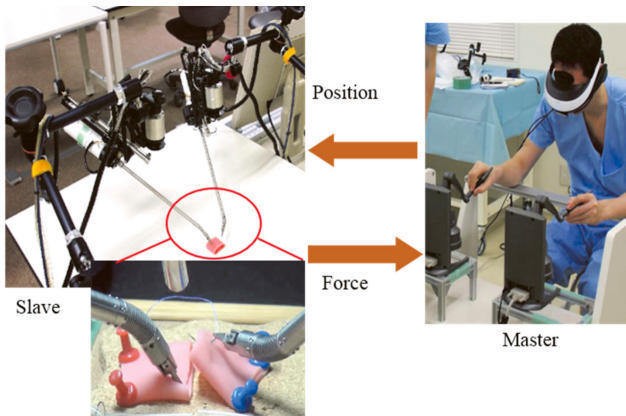


図2 開発した手術支援ロボット

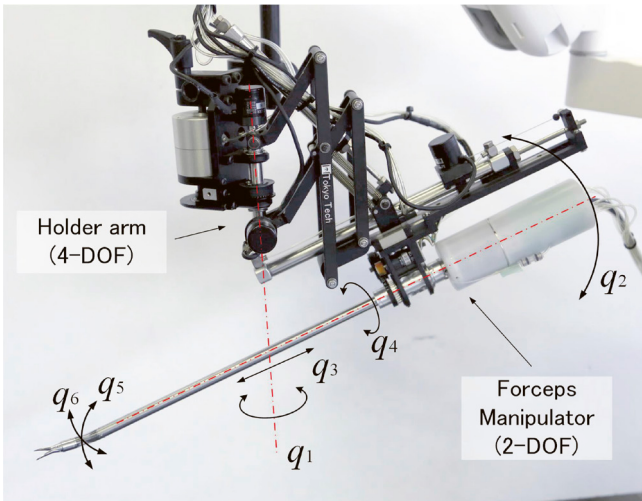


図3 空気圧駆動手術マニピュレータ

る構造となっている。

上記鉗子マニピュレータの詳細を図4に示す。本試作機では、先端手首関節の構造として切削加工型の高性能スプリングを採用している⁴⁾。本切削スプリングは、弾性変形によって屈曲する柔軟構造であるため、剛体リンク機構に比べ構造が単純で、内側のスペースを広く使えるという利点があり、小型化・多自由度化に適した構造である。また、本構造は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。

一般に手術器具は事前に洗浄、滅菌される必要があり、その材質には生体適合性だけでなく耐腐食性が求められるため、ステンレス合金やチタン合金が利用される。本試作機では、柔軟関節を含む先端部分において、比較的切削加工しやすいSUS303が用いられている。

上記の屈曲動作は、スプリングの外殻に4本のステンレスワイヤを通し、それぞれ一つの空気圧シリンダによって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。各空気圧シリンダの変位と内部圧力はそれぞれポテンショメータと圧力センサにより計測し制御系にフィードバックされる。各空気圧シリンダには、開度が入力電圧によって連続かつ高速に調整できる空気

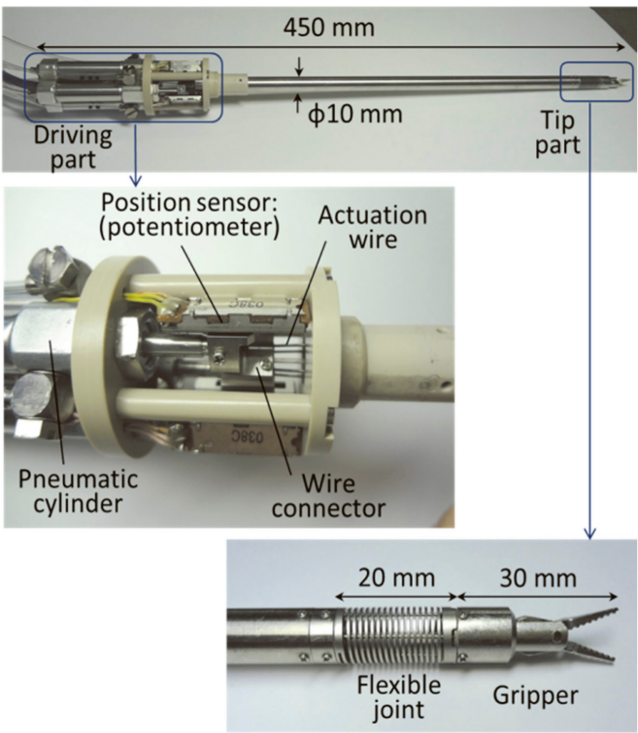


図4 柔軟関節構造を用いた鉗子マニピュレータ

圧サーボ弁が一つずつ接続されており、空気圧シリンダを出入りする空気の流れる方向およびその量をマスタからの指令値および上記フィードバック信号に基づいて操作する。

先端に作用する外力は、2.1で述べたように各空気圧シリンダの駆動力からワイヤの張力を求め、切削スプリングの弾性力や摩擦などを考慮した力学モデルによって計算することができる。

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。基準姿勢で

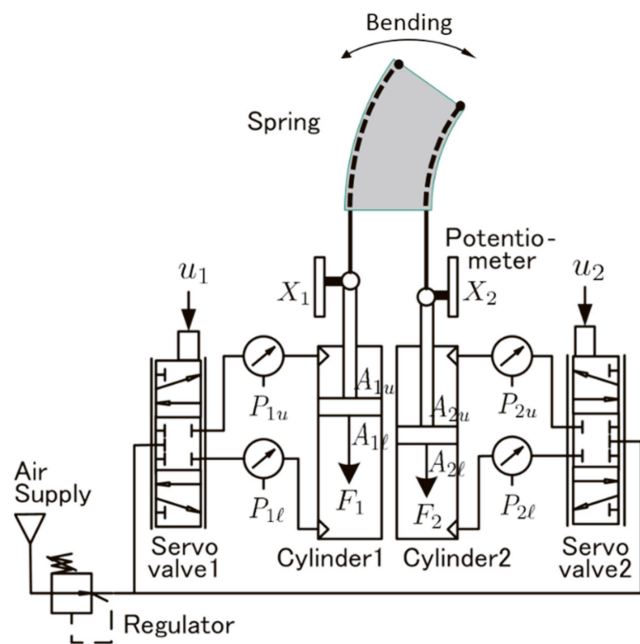


図5 空気圧シリンダによる拮抗駆動系

250mm×200mm×80mmの直方体に収まる程度の大きさとなっており、アーム本体の重量は0.98kgとコンパクト化と軽量化を実現している。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自由度を有している。挿入ポート周りの回転には、平行リンクを用いたRCM (Remote Center of Motion) 機構を採用している。本ロボットアームにおいても全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。

2.3 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7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。この目標値入力に対し、関節角度の計測値は概ね 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° 以下と分かる。この角度は先端位置としては0.1mm以下の分解能に相当する。

次に、外力推定の評価実験の結果を図8に示す。図中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。図中下段のグラフは、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分かる。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9に示すような動物実験を外科医の協力の下に定期的実施し改良を重ねてきた。2014年には本システムを実用化すべく大学発ベンチャーを起業し、大学と連携しながら製品開発を進めている。

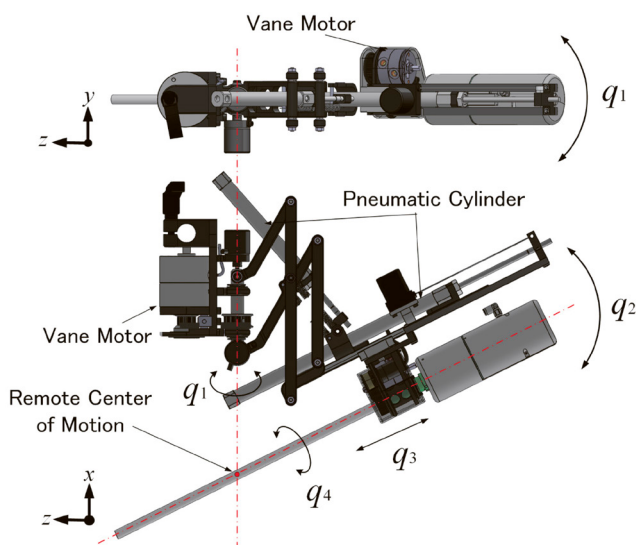


図6 保持アームの構造

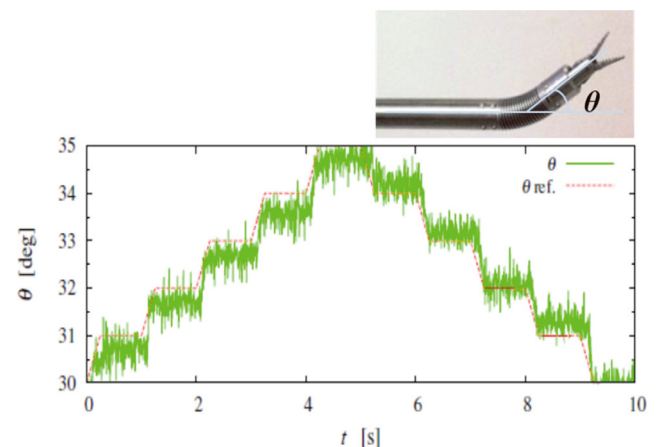


図7 位置決め分解能の評価実験結果

3 内視鏡操作システム

3.1 システムのコンセプトと概要

腹腔鏡手術においては内視鏡画像を頼りに作業を行うため、高精細で臨場感の高いビジョンの提供が極めて重要となる。近年では、内視鏡のハイビジョン化に加え、3D化が進んでおり複数の製品が市販化されている。一方で従来の腹腔鏡手術では、内視鏡はカメラ助手であるスコピストが保持し、執刀医の口頭指示の下、視野を操作している。したがって、スコピストに手術内容の十分な理解と熟練が求められるだけでなく、手術チームとしての円滑な意志の疎通が課題となる。また、腕の疲労などにより手ぶれ等が生じ視野が安定しないことも問題となる。

内視鏡を保持するスコープホルダーについては、既に製品化されているものがいくつか存在していたが、採用されてい

る音声やスイッチなどによる操作は直感性が十分でなく、術者は視野変更の際に意識を手術手技からカメラ操作に切り替える必要があった。

提案するシステムでは、図10のように内視鏡はスコピストの代わりにロボットアームに保持させ、術者の指令によって動作させる。本システムでは図5に示した鉗子保持マニピュレータを内視鏡保持に採用している。他の既存のカメラホルダーが電動あるのに対し、空気圧駆動を採用することで受動的な柔らかさや静音性を有しており、内視鏡の回転までを含んだ合計4自由度を有していながら小型軽量である。

内視鏡保持アームの操作は、図11のようにジャイロスコープにより頭の動作を検知し、これに連動して上下、左右、前後、回転方向に追従させることで実現する。頭部運動による指令値は、術者の足下に配置されているフットスイッチを押下している間のみ有効となる。したがって、保持アームにより視野の移動を行わない間は、スイッチから足を外すことで自由に頭部を動かすことができる。

3.2 実用化

本システムは開発開始当初から実用化を意識しており、実証実験として図12のようにプタを用いたin-vivo環境において複数の外科医による胃切除などを実施してきた。実験では、セッティングの際にトロッカーとアームの一部が接触しやすいことや電気メスによるノイズの混入などの問題がある

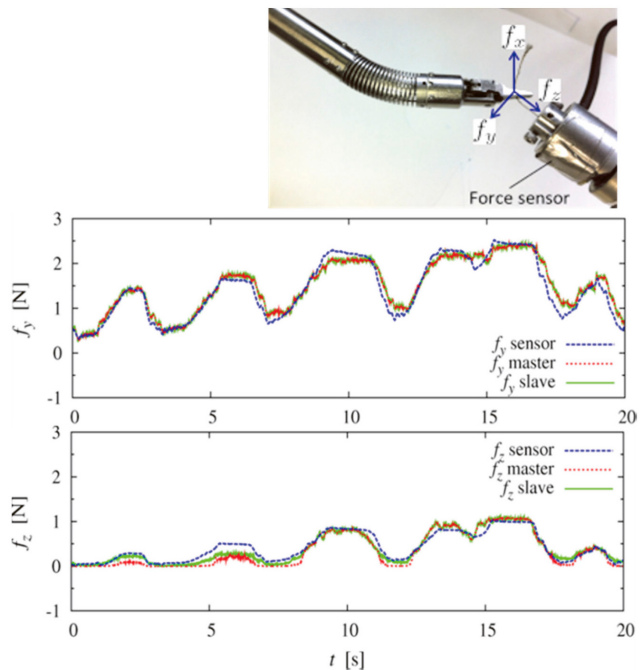


図8 鉗子マニピュレータ先端での外力推定実験結果

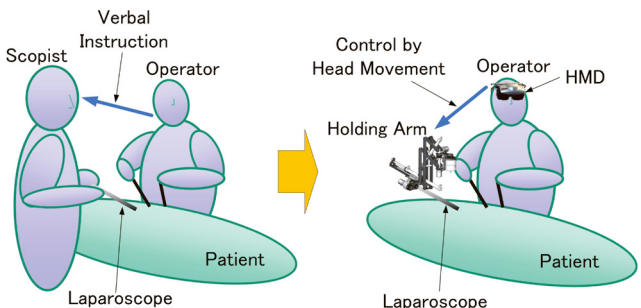


図10 動物実験の様子



図9 動物実験の様子

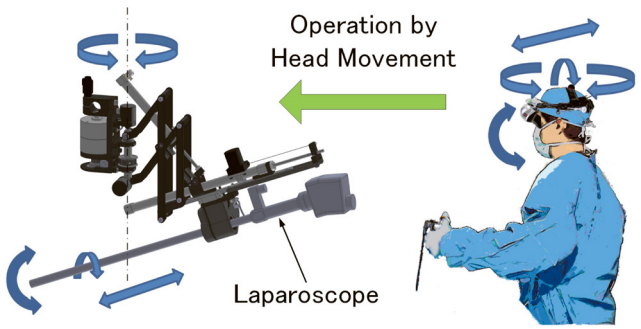


図11 頭部運動による視野の操作

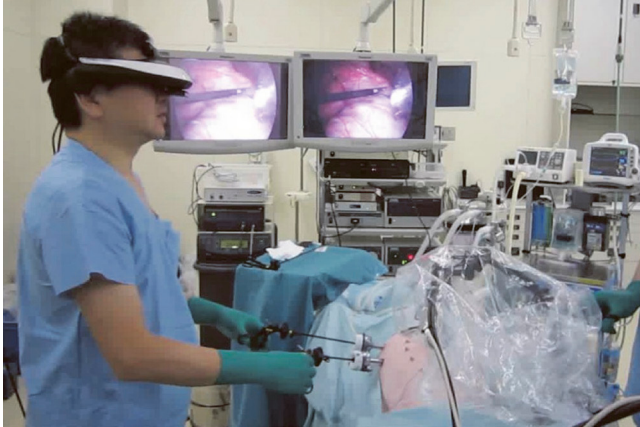


図12 内視鏡操作システムの動物実験の様子



図13 製品化した内視鏡操作システム

ことが分かり、実験の度に改善を重ねてきた。

本システムはその後2014年に起業した大学発ベンチャーに開発を引き継ぎ、図13に示す製品として2015年8月に発売した。製品版では、医療機器としてリスクマネジメントや各種安全試験を経る必要があり、研究試作機に比べ保守的な仕様、設計となったが、空気圧駆動による柔らかく滑らかな動作や術者の頭部運動による直感的な操作などの基本機能は引き継がれている。本システムは医療機器としてクラスIに分類されること、比較的規模が小さくシンプルなシステムであること、研究の段階から *invivo* 実験など実践的な環境でテスト、改良を繰り返してきたこともあり、起業から1年ほどで発売に至ることができた。これまで、医師の少ない地方病院を中心に複数の医療施設に導入されており、手振れの少ない安定な視野の確保と滑らかな視野移動に好評を得ている。

4 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およ

び空気圧駆動保持アームを用いた内視鏡操作システムを紹介した。これらのシステムは、空気圧駆動の採用によって、軽量コンパクトな構造で、力センサ等を搭載することなく、外力推定や柔軟な動作が可能であるなどの特徴を有している。

参考文献

- 1) 日本内視鏡外科学会雑誌, 21 (2016) 6, 655.
- 2) K.Tadano and K.Kawashima : Advanced Robotics, 24 (2010) 12, 1763.
- 3) K.Tadano and K.Kawashima : The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery, 11 (2015) 3, 331.
- 4) 原口大輔, 只野耕太郎, 川嶋健嗣 : 日本フルードパワーシステム学会論文集, 43 (2012) 3, 62.

(2019年4月8日受付)