

## 解 説

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\*  
(関節構造および理論モデルの改善による性能向上)

原口 大輔\*\*

\*平成 26 年 6 月 21 日原稿受付

\*\*東京工業大学精密工学研究所, 〒226-8503 横浜市緑区長津田町 4259

## 1. はじめに

このたび、当研究論文が光栄にも学術論文賞を授与され、昨年に引き続いて高いご評価をいただいたことに感謝申し上げます。当研究の成果については学会論文集中第 1 報<sup>1)</sup>および第 2 報<sup>2)</sup>を報告しているが、ここでは研究成果の概要を述べるとともに、第 2 報においてマニピュレータの性能向上に寄与した改良点について解説する。

近年、低侵襲ロボット手術のための小型・多自由度マニピュレータが盛んに開発されている<sup>3)</sup>。これらの多くは、鉗子などの器具先端に剛体リンクを用いた屈曲関節を採用しているが、一般に構造が複雑で部品点数も多く、整備性の悪化や製造コストの増大といった問題を生じている<sup>4)</sup>。これに対し弾性体や連続体を用いた柔軟関節は、シャフト、ベアリング、プーリといった部品が必要なく、小型化・多自由度化に適した簡易な構造である<sup>5)6)</sup>。そこで筆者らは、内視鏡手術マニピュレータのための簡易な柔軟関節構造を提案し、空気圧駆動による多自由度鉗子マニピュレータを開発した<sup>1)2)</sup>。またロボット手術においては、操作者への力覚提示が重要な技術である<sup>7)</sup>が、システムのコンパクト化や滅菌・洗浄などの観点から力センサの搭載は望ましくない。筆者らは、開発した柔軟関節を有する鉗子マニピュレータに対して、空気圧駆動の高いバックドライバビリティを利用した外力推定法を構築し、その有効性を実験により確認した。

## 2. 鉗子マニピュレータの設計

開発した鉗子マニピュレータの外観および柔軟関節の構造を図 1 に示す。駆動部に 4 本の空気圧シリンダおよびロッド位置計測のためのポテンショメータを搭載し、ワイヤを介して先端部の柔軟関節を駆動する。柔軟関節は、外殻のスプリングに 4 本のワイヤを通した構造となっており、拮抗駆動によって 2 自由度の屈曲が可能である。ここで外殻構造として用いたスプリング部材は、一般的な巻きばねと異なり、切削加工によって取付部やワイヤ通し穴などを含めて一体成型されている。これにより機構の部品点数を大幅に削減すると同時に、マニピュレータに必要な関節の剛性を確保することができる。ただし駆動ワイヤの張力によってスプリング全体が圧縮してしまうと、屈曲可動域が確保できなくなることから、ニッケルチタン超弾性合金線材の背骨構造を中心部に補強し、圧縮に対する剛性を付加している。また、先端部には空気圧グリップ<sup>8)</sup>を採用しているため、関節の屈曲とグリップの把持動作とが互いに干渉することはない。なお、本鉗子マニピュレータは只野ら<sup>7)</sup>の開発した 4 自由度保持ロボットに搭載して操作できる仕様となっている。

ここで、第 1 報<sup>1)</sup>と第 2 報<sup>2)</sup>において用いた関節スプリングの形状の違いを図 2 に示す。第 1 報ではスプリングの内径を大きく開けていたため、内部の超弾性合金線材（背骨構造）が圧縮力を受けて単独で座屈し、制御性を悪化させる原因となっていた。そこで第 2 報においてはスプリング内径を超弾性合金線材の外径（φ0.75mm）まで絞り込み、背骨が単独座屈しないようスプリングが周囲からしっかりとサポートできる構造とした。これにより位置制御性および外力推定性能を大幅に向上させることができた。

図 3 は、鉗子マニピュレータの空気圧駆動系の模式図である。各シリンダをそれぞれ 1 個の 5 ポート形サーボ弁により制御するシステムである。シリンダの差圧駆動力を計測するための圧力センサをバルブ側に配置することで、マニピュレータの設計をコンパクトにすることができる。柔軟関節の屈曲制御においては、各駆動ワイヤの張力が常に一定値以上となるようシリンダ駆動力を制御することによって、柔軟関節のサー

が剛性および機構のバックドライバビリティを維持している。また、図 4 は位置制御系および外力推定器における柔軟関節の運動学モデルの概念図である。柔軟関節は背骨構造により中心長さが常に一定で、円弧状に屈曲するものとして運動学を導出した。

### 3. 柔軟関節の空気圧駆動による外力推定

本鉗子マニピュレータは空気圧駆動のため、先端の柔軟関節は高いバックドライバビリティを有する。この特性を利用して、鉗子先端に作用する外力を推定することができる。図 5 は鉗子マニピュレータの外力推定器（外乱オブザーバ）のブロック線図である。位置制御系により発揮された柔軟関節の駆動トルクと、関節角度および速度情報から計算される逆動力学モデル（マニピュレータの内部ダイナミクス）との差をとることで、関節トルクの外力成分が得られる。ここで逆動力学モデルは、空気圧シリンダの粘性摩擦力、機構の摺動摩擦力、柔軟関節の弾性力により構成したものである。得られた関節トルクの外力成分から、図 4 に示す柔軟関節モデルのヤコビ行列を用いて鉗子先端の外力を求めることができる。

つぎに図 6（左）の写真のように鉗子先端と力センサを糸で連結し、柔軟関節を駆動させて外力推定実験を行った。第 1 報<sup>1)</sup>では柔軟関節をリンク機構に近似したモデルのみを使用したため、直線姿勢のみの限定的な検証にとどまっていた。今回の第 2 報<sup>2)</sup>では関節構造の改良により連続体モデルを適用可能となったことで、柔軟関節の任意の屈曲姿勢における外力推定が可能となった。図 6（右）のグラフは、左写真中の矢印のようにマニピュレータを運動させたときの、外力推定値と力センサの計測値を比較したものである。この結果より、柔軟関節の屈曲 2 自由度における外力推定の有効性を確認した。

### 4. おわりに

本稿では、鉗子マニピュレータに適した簡易な柔軟屈曲関節構造、および柔軟関節の空気圧駆動による外力推定について概要を述べた。筆者らは現在、実際の手術手技に即した柔軟関節の性能検証や、柔軟部材の耐久性評価などを実施中であり、力覚提示機能を有する手術マニピュレータとして実用化を推進している。

### 参考文献

- 1) 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, Vol.43, No.3, (2012), p.62-69.
- 2) 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(関節構造および理論モデルの改善による性能向上), 日本フルードパワーシステム学会論文集, Vol.44, No.6, (2013), p.118-125.
- 3) Thielmann, S. et al.: MICA - A new generation of versatile instruments in robotic surgery, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, (2010), p. 871 –878.
- 4) Bok, H. M., Ho, J. Y.: Prototype Design of Robotic Surgical Instrument for Minimally Invasive Robot Surgery, Computer Aided Surgery, Vol. 3 of Proceedings in Information and Communications Technology, (2012), p. 20–28.
- 5) Arata, J., Saito, Y., Fujimoto, H.: Outer shell type 2 DOF bending manipulator using spring-link mechanism for medical applications, IEEE International Conference on Robotics and Automation, (2010), p. 1041 –1046.
- 6) Yoon, H. S. et al.: Active bending endoscope robot system for navigation through sinus area, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, (2011), p. 967 –972.
- 7) Tholey, G., Desai, J. P., Castellanos, A. E.: Force Feedback Plays a Significant Role in Minimally Invasive Surgery: Results and Analysis, Annals of Surgery, Vol. 241, No. 1, (2005), p. 102–109.
- 8) Tadano, K., Kawashima, K., Kojima, K., Tanaka, N.: Development of a Pneumatic Surgical Manipulator IBIS IV, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 22, No. 2, (2010), p. 179–188.

## 著者紹介



はらぐち だいすけ  
原口 大輔君

1980年9月24日生まれ。

2003年 防衛大学校情報工学科卒業。同年、防衛省航空自衛隊に入隊。

2013年 東京工業大学大学院総合理工学研究科博士課程修了。同年、東京工業大学精密工学研究所特任助教、現在に至る。空気圧の精密計測制御技術を用いた手術ロボットの研究に従事。博士（工学）。

E-mail: haraguchi.d.aa@m.titech.ac.jp

URL: <http://www.k-k.pi.titech.ac.jp/>

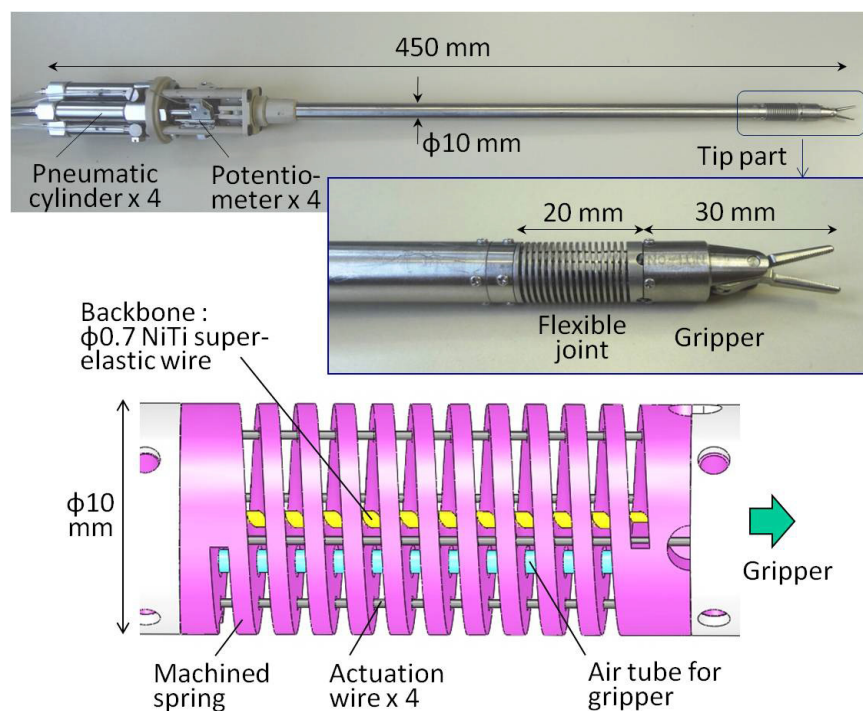


図1 柔軟関節を有する鉗子マニピュレータ

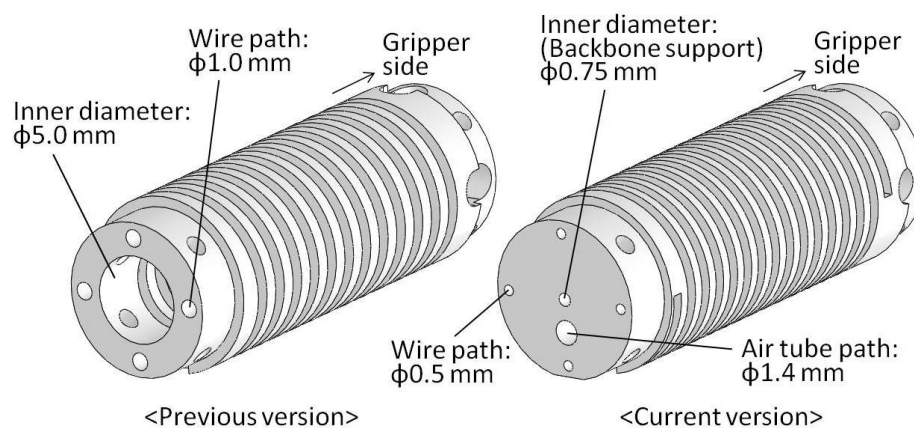


図2 新旧バージョンにおける関節スプリングの形状

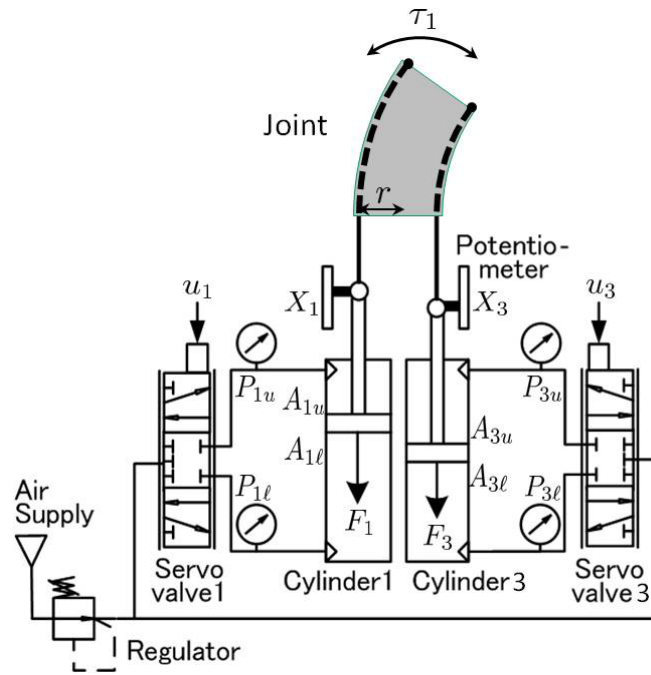


図 3 空気圧駆動システムの構成

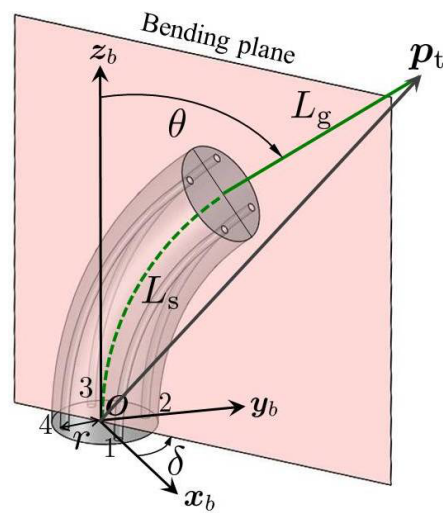


図 4 柔軟関節の屈曲モデル

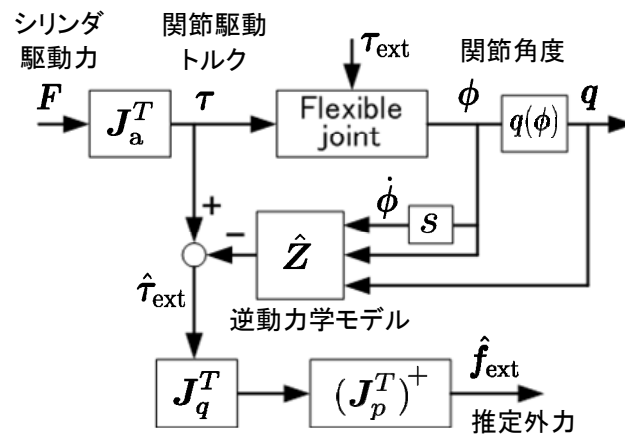


図5 外力推定器のブロック線図

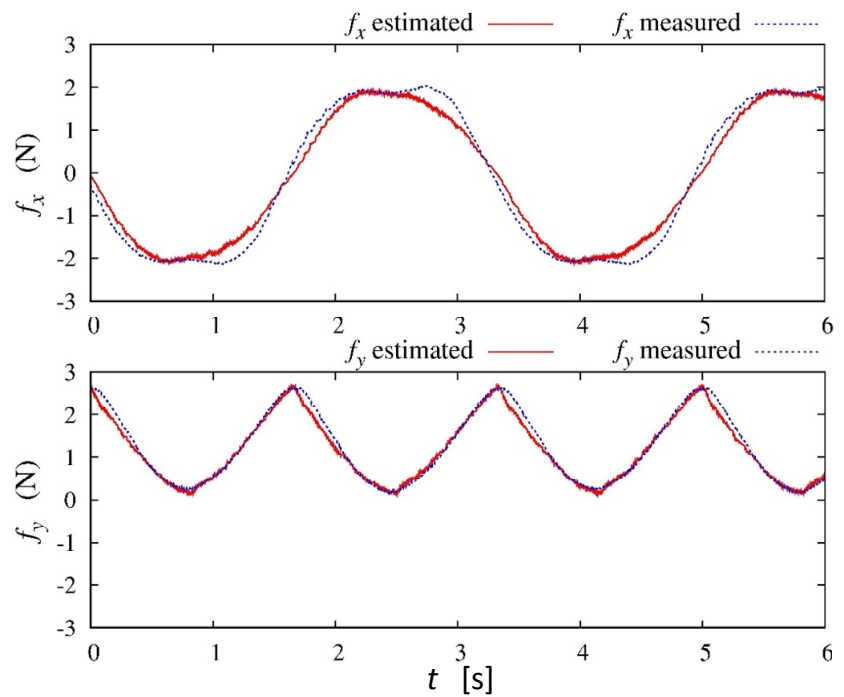
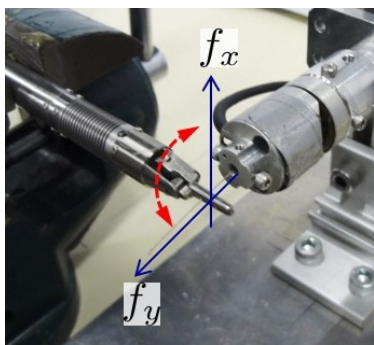


図6 2自由度外力推定の結果