

遠隔内視鏡手術用触覚鉗子のための腱駆動機構の開発

矢代大祐*

Development of Tendon-Driven Mechanism for Haptic Forceps for Remote Endoscopic Surgery

Daisuke Yashiro*

Although minimally invasive endoscopic surgeries have been attracted attentions, the quality of a surgery depends on surgeon's skill. The reason comes from the fact that an endoscope has narrow viewing angle and surgical tools in patient body have low-degree-of-freedom. One of the approaches to solve the issue is utilization of a surgical robot such as da Vinci. Since downsizing of an end-effector is required for surgery robots, a tendon-driven joint is effective. However conventional tendon-driven joints for surgery robots do not achieve force control. This research therefore develops a force control system using a tendon-driven joint with one-degree-of-freedom which consists of an ultrasonic motor, two linear springs, a wire, and a pulley block to downsize the whole system. In addition, a force control system using a tendon-driven joint with two-degrees-of-freedom is also developed. The validity is verified by experiments.

1. はじめに

近年、遠隔操作の実用化事例として da Vinci Surgical System (米 Intuitive Surgical 社)が注目されている。da Vinci は低侵襲性内視鏡手術用ロボットであり、日本国内においても 2012 年に前立腺ガンの手術において保険が使えるようになるなど広く普及しつつある。しかしながら、da Vinci は操作対象からの反作用力を術者が知覚できないため、人が直接操作しているかのような繊細な動作が難しい。この問題に対して、力覚フィードバック機能を持つマスタ・スレーブ型遠隔操作ロボット(以下、バイラテラル制御系と呼ぶ)の研究がおこなわれているが(1)、鉗子先端部の外径の小型化が難しいために、内視鏡手術用ロボットへの適用には至っていない。

そこで著者らは、把持部と 4 自由度の能動関節を有し、かつ力制御が可能な小型触覚鉗子の開発を進めている。関節にアクチュエータを用いると大型化し、低侵襲性を満たせない。そこで、関節に糸をとりつけアクチュエータで糸を引っ張ることで関節を駆動する腱駆動機構を用いることでアクチュエータを関節から離して配置することができ、術具先端の多自由度化と小型化が達成できる。本研究では小型触覚鉗子のための要素技術を開発したので以下に紹介する。

2. 線形バネと超音波モータからなる腱駆動機構

一般的に力制御を実現するためには出力トルクを制御できるアクチュエータが必要であるが、線形アクチュエータは推

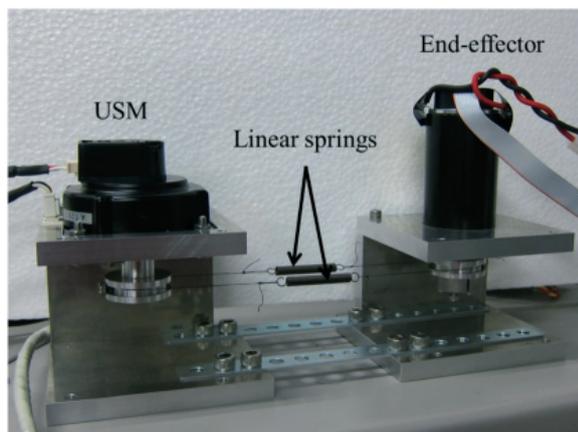


図 1. 線形バネと超音波モータからなる腱駆動機構

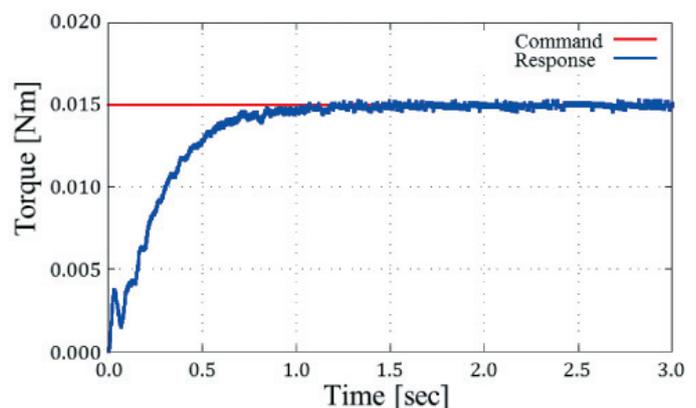


図 2. トルク制御の実験結果

力重量比が低い。推力重量比が高いアクチュエータとしては圧電モータや誘電エラストマなどがあるが、非線形性が強い
ため直接的に力制御することは難しい。そこで非線形アクチュエータを用いた間接力制御手法が研究されてきた。間接力
制御とはアクチュエータと環境の間に線形バネを配置しバネの変位をアクチュエータで制御することにより力制御する
手法である。ただ、このばねを含む制御系は二慣性系となるため共振周波数が低く不安定化しやすい。

そこで本研究では、非線形アクチュエータ、線形バネ、エンドエフェクタからなる腱駆動機構のための共振比制御器を
提案した(2)。具体的には非線形アクチュエータである超音波モータ(USM)、線形バネ、プーリ、ワイヤからなる腱駆動
機構に対してトルク制御器を設計した。実験機を図1に示す。環境とエンドエフェクタは電磁モータのトルク制御により
模擬し、任意の環境剛性を設定できるものとした。線形バネがエンドエフェクタとUSMの間に配置されている。図2に
実験結果を示す。指令値に対して優れた追従性を示している。

3. 腱駆動型回転2自由度関節

本研究では、エンドエフェクタの小型軽量化のため1関節に回転2自由度を有する腱駆動機構(腱駆動型回転2自由
度関節)を制御対象とした。2自由度関節は1つのプーリに4つの糸をつなぎアクチュエータで引っ張る構造を持つ。こ
れまでに腱駆動型回転2自由度関節の応用例として、2自由度関節を複数組み合わせで作ったシリアルマニピュレータ
を位置制御した例や、4つのリニアモータで2自由度関節を駆動して力制御をおこなった例があるが、両者とも機構の
動力学を考慮せずに制御器を設計しているため高速あるいは精密な力制御ができない。

そこで、本研究では2つの回転モータと2つの定荷重バネを用いた腱駆動型回転2自由度関節を制御対象とし、機構
の動力学を考慮した力制御器を設計した(3)。接触環境には発泡スチロールのブロックを使用した。指令値は、 $t=10.0s$
でY軸周りのトルク指令値を $-0.30Nm$ から $-0.35Nm$ に変更した。また、Z軸周りのトルク指令値は常に $0Nm$ とした。Y軸
とZ軸周りのトルク応答をそれぞれ図4と図5に示す。Y軸周りの指令値の変化がZ軸周りの応答値に影響する現象(軸
間干渉)が確認できるが、補償をおこなうことで軸間干渉が低減されている。

4. おわりに

非線形性が強いが推力重量比が高いアクチュエータと線形バネを併用することで、小型・高推力・広制御帯域を両立す
る力制御系を開発した。また、腱駆動型2自由度関節の力制御をおこなった。1関節が2自由度を有しているために単位
体積当たりの自由度が多く、近接するプーリが直交しておりワイヤ同士が経路を共有しないためにワイヤ同士の摩擦によ
る干渉も少ない。今後の課題としては、腱駆動型2自由度関節を超音波モータで制御すること・腱駆動型2自由度関節を
2層構造にした5自由度触覚鉗子を開発すること・マスタに5自由度ロボットを、スレーブに触覚鉗子を用いたバイラテ
ラル制御系を構築すること、などが挙げられる。

REFERENCES

- (1) W. Motooka, D. Yashiro et. al., "Development of 16-DOF telesurgical forceps master/slave robot with haptics", Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, pp. 2081-2086, Nov., 2010.
- (2) T. Aoyama, D. Yashiro et. al., "Torque Control Using Resonance Ratio Control for Tendon-Driven Mechanism Including USM and Linear Spring", Proceedings of 2nd IEEE international workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization, Mar., 2016.
- (3) 門脇, 矢代, 他, "動力学を考慮した腱駆動型回転2自由度関節の力制御", 電気電子情報関係学会東海支部連合大会, Sep., 2015.

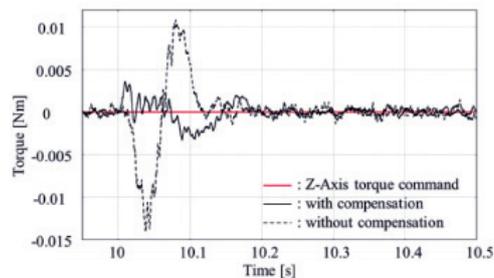
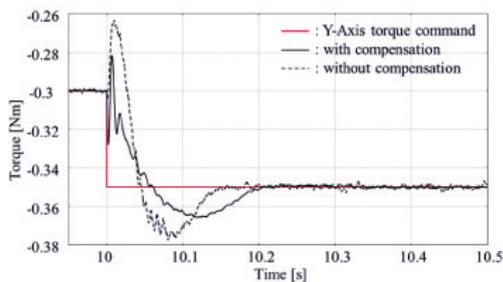
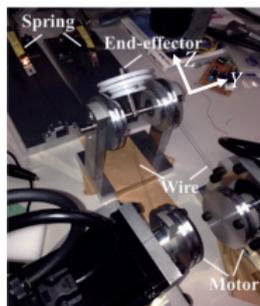


図 3. 腱駆動型2自由度関節

図 4. Y軸周りのトルク制御の実験結果

図 5. Z軸周りのトルク制御の実験結果