

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K21940

研究課題名（和文）弦振動を利用した多自由度鉗子の力センシング

研究課題名（英文）Force sensing based on string vibration for multi degree-of-freedom forceps

研究代表者

小俣 透（Omata, Toru）

東京工業大学・工学院・教授

研究者番号：10262312

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、弦振動によりワイヤ張力を計測することにより、手術ロボット屈曲鉗子の力センシングという難問に挑戦した。提案する方法はワイヤ駆動屈曲鉗子に適用可能であり、回転する突起部によりワイヤを弾いて弦振動させ、ワイヤの振動周波数から張力を推定し、さらに鉗子に加わる外力を推定する。張力計測が可能な試験装置を製作し、計測精度を検証した。また、3自由度屈曲鉗子を開発し、接触力の計測精度を検証した。実用性に関して、ワイヤと突起部の物理的な接触により両者に摩耗が生じる。1回の手術で100万回加振すると仮定し、100万回加振による摩耗を測定したところ、摩耗は十分に少なく実用性に問題ないことを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

腹腔鏡手術などに使われる手術ロボット屈曲鉗子に力センシング機能を付与することが安全で高度な手術の実施のために望まれている。しかし、小型化が難しいこと、著しく過酷な体内環境での使用に耐えられる必要があり、さらに、洗浄滅菌可能であること、頑健であること、低コストであることが要求されるため極めて難しく、依然として未完成である。これまでのほとんどの方法では、力を歪に変換する起歪体を用いているが、壊れやすく高価になることが大きな欠点である。本研究の学術的意義は、起歪体を用いないユニークな方法を提案したことであり、社会的意義は、手術ロボット屈曲鉗子の力センシングという難問の一解決法を示したことである。

研究成果の概要（英文）：This study challenged the difficult problem of force sensing of surgical robotic forceps by measuring the cable tensions by string vibration. The proposed method is applicable to cable driven forceps. It induces vibration of the drive cables with a rotating protrusion; estimates the cable tension from the vibration frequency, and then estimates the external force applied to the forceps. An experimental device was developed and a satisfactory accuracy of the tension measurement was verified. The study also developed three degree-of-freedom forceps and verified the accuracy of the contact force measurement. The physical contact between the cable and protrusion caused wear of them. The amount of wear was measured after the cable was plucked one million times assuming one million plucks during one operation. The result showed that the wear was minimal and not problematic for practical use.

研究分野：機械工学

キーワード：知能機械 手術ロボット

### 1. 研究開始当初の背景

腹腔鏡手術などに使われる手術ロボット屈曲鉗子の力センシングは極めて難しく、依然として未完成である。難しい理由はつぎの通りである。(1) 現在主流となる鉗子の断面径は 8 mm や 5 mm であり、鉗子先端に装着するためには小型化が必要である。さらに、鉗子関節を駆動するワイヤと幾何的にも力学的にも干渉する。(2) 体内の環境は著しく過酷であり、血液などの液体がかかり、電気メスを使用すれば電磁ノイズが発生する。(3) 10 回使用することが標準となっており、そのためには洗浄滅菌が可能でなければならない。また頑健性も必要である。(4) コストが見合ったものでなければならない。

現在唯一実用化されている方法は、空気圧アクチュエータの駆動圧力から間接的に力を推定する方法であるが、力の作用点から遠いところで計測するので、途中の摩擦の影響を受ける。屈曲関節の駆動にはワイヤ駆動が一般的であり、その構造を利用することが自然である。そこで本研究では、弦振動によりワイヤ張力を計測することにより、手術ロボットの力センシングという難問に挑戦する。これまでのほとんどの方法では、力を歪に変換する起歪体を用いているが、壊れやすく高価になることが大きな欠点である。本方式の利点はそのような起歪体を用いないことである。

### 2. 研究の目的

弦振動によるワイヤ張力計測を行うことができる手術ロボット屈曲鉗子を開発すること、精度を検証すること、実用性を検証することが本研究の目的である。実用性に関しては、ワイヤを突起部により弾いて振動させるため、物理的な接触によりワイヤと突起部に摩擦が生じる。これが実用性に問題ないかを検証する必要がある。これらを検証するための装置を開発するとともに、外径 8mm と 5mm のワイヤ駆動 3 自由度鉗子（グリップの自由度を含む）を開発し、鉗子先端に加わる外力を推定する。

### 3. 研究の方法

図 1 に原理図を示す。簡単のため 1 関節しか描いていないが、多関節に適用可能である。ワイヤ  $i$  の張力を  $T_i$  とすると、2 本のワイヤの張力差  $T_1 - T_2$  により関節を駆動する。体内での計測は著しく難しいことを考え、体外に加振部を設ける。振動端点間のワイヤの長さを  $L$ 、線密度を  $\rho$  とすると、弦振動の周波数は

$$f_i = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T_i}{\rho}} \quad (1)$$

と表せる。よって、振動周波数を計測することにより、張力を推定することができる。さらに張力から静力学モデルを用いて鉗子先端に作用する外力を推定することができる。図 1 の例では、外力は  $F = (T_1 - T_2)r/l$  で計算される。ここで、 $l$  を関節軸から接触点までの距離、 $r$  を関節の半径とする。

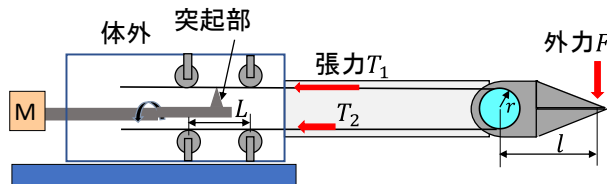


図 1 弦振動による力センシングの原理図

図 2 は本方式を検証するために開発した装置であり、(a) に全体の写真、(b) に加振部の拡大写真を示す。ワイヤの片側にフォースゲージ、もう片側に、張力を与えるためのモータが繋がっている。弾くことによる摩擦を低減するためにワイヤにはナイロンコーティングワイヤを使用した（径 0.45 mm、径 0.36 mm のステンレスワイヤにコーティング、大阪コートロープ）。ナイロンは縫合糸などに使われ生体適合性がある。



図 2 ワイヤ加振試験装置：(a)全体写真，(b)加振部

図 3 のように、突起部付きロッドを回転することにより、突起部がワイヤを徐々に持ち上げ、

最高点で開放することにより弾く。  $\Delta h$  をワイヤの持ち上げ量とする。 (a) のように  $\Delta h$  が小さい場合、発生する振動が小さく、ノイズに紛れやすいという問題が生じる。一方、(b) のように  $\Delta h$  が大きい場合、ワイヤを持ち上げる際に過剰な張力がかかり、接触箇所で大きな摩擦力が生じ、場合によっては弾くことができないという問題が生じる。そこで適正な  $\Delta h$  の大きさを調べた。

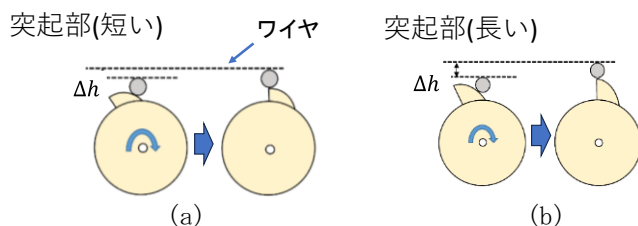


図3 ワイヤの加振方法：(a)  $\Delta h$  が小さい場合、(b)  $\Delta h$  が大きい場合

ワイヤ加振の時間間隔を 100 ms とした。本研究の力フィードバックの目的は、操作者に力を提示することであり、力フィードバック制御系を構成することではなく、バーチャルリアリティでもないため、100 ms 間隔の力計測でも十分に短いと考えられる。振動の計測には、マイクロフォンによる音声信号計測と、フォトインタラプタによる計測の2つを試みた。計測した信号の周波数成分をFFTを用いて解析し、最大のスペクトル値を持つ周波数を振動周波数とした。

摩耗に関しては、1回の手術で最長5時間使用すると仮定すると、突起部はワイヤを約100万回加振すると見積もることができる(3自由度鉗子に適用する場合、駆動ワイヤは6本になるので、各ワイヤは16.6万回加振される)。そこで、100万回加振する際に生じる摩耗量を調べた。

#### 4. 研究成果

異なる長さの突起部を作製し、適正な  $\Delta h$  を調べた。例として、649  $\mu\text{m}$ 、815  $\mu\text{m}$  の突起部で弾いた場合に、15 N の張力における振動信号の周波数解析のグラフをそれぞれ図4 (a) と (b) に示す。この例では、振動信号をマイクロフォンを用いて計測した。縦軸はパワースペクトル値、横軸は周波数 [Hz] である。815  $\mu\text{m}$  の突起部のグラフは振動周波数のピークが目立っている。一方、649  $\mu\text{m}$  の突起部のグラフはノイズに紛れてしまっている。マイクロフォンを用いた場合には、 $\Delta h$  が 815  $\mu\text{m}$  から約 300  $\mu\text{m}$  大きい範囲が計測に適していることが分かった。

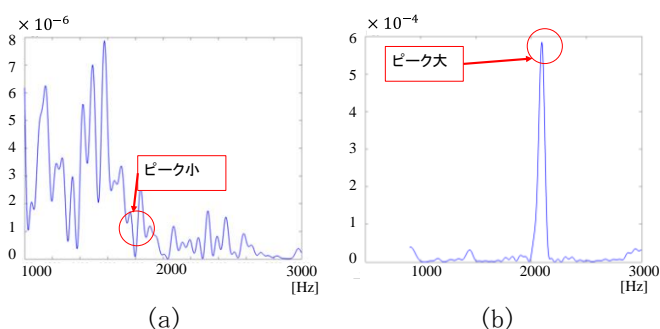


図4 振動のパワースペクトルの例：(a)  $\Delta h = 649 \mu\text{m}$  の場合、(b)  $\Delta h = 815 \mu\text{m}$  の場合

図5に100万回の加振前後のワイヤ表面の写真を示す。赤枠部分が突起部と接触し、加振後のナイロンコーティング表面に傷が見られたものの、著しい摩耗やワイヤを構成する素線が切断されている様子は確認されなかった。また、音声計測は正常に行なわれ、それに影響を与えるような変化は生じなかった。図6に加振前後の突起部 (Polyoxymethylene 製) の写真を示す。突起部の大きさは、1950  $\mu\text{m}$  から 1936  $\mu\text{m}$  と約 20  $\mu\text{m}$  摩耗が見られた。しかしこの摩耗量は 300  $\mu\text{m}$  を大きく下回っており、100万回の条件は達成可能であることが検証できた。

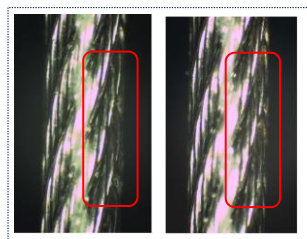


図5 100万回加振前(左)と後(右)のワイヤ表面

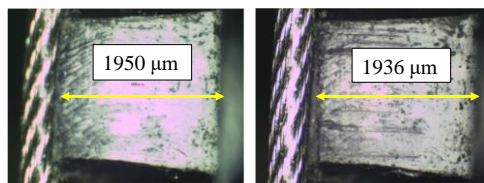


図6 100万回加振前(左)と後(右)の突起部

実際には(1)式の関係は厳密には成立しないので、張力と振動周波数の関係をキャリブレーションにより求める必要がある。図7は張力と振動周波数の例である。横軸の張力はフォースゲー

ジにより測定した。この関係を用いて、振動周波数から張力を推定し、フォースゲージで直接測定した張力と比較することにより、精度を検証したところ、平均誤差は0.16 Nという結果を得た。

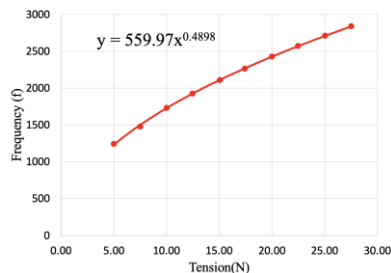


図7 張力と振動周波数のキャリブレーション

振動計測にマイクフォンに代わりフォトインタラプタを使用した場合には、SN比を大幅に向上させることができた。その結果、持ち上げ量はより低くても振動計測ができること、摩耗量はさらに低減できることが分かった。

図8は回転関節による外径8 mmの3自由度鉗子であり、図9は柔軟関節による外径5 mmの3自由度鉗子である。外径5 mmのような細径の鉗子には、構造の簡単化のために回転関節よりも柔軟関節が適している。図10は図9の3自由度鉗子を用いて接触力の精度検証を行った例であり、横軸はフォースゲージで直接測定した接触力、縦軸は振動周波数から推定した接触力である。ピッチ軸方向の接触力では最大誤差0.18 N、平均誤差0.092 N、ヨー軸方向の接触力では最大誤差0.13 N、平均誤差0.084 Nという結果であった。いずれも比較的小さな誤差で収まっていることが確認できた。

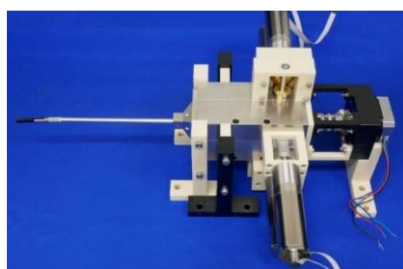


(a)



(b)

図8 回転関節による外径8 mm 3自由度鉗子：(a)全体写真、(b)加振部

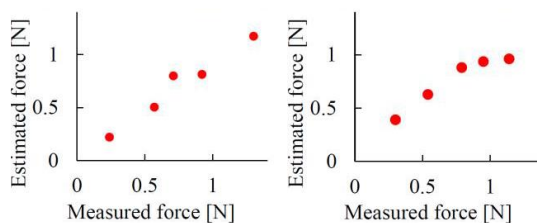


(a)



(b)

図9 柔軟関節による外径5 mm 3自由度鉗子：(a)全体写真、(b)柔軟関節



(a)

(b)

図10 接触力の精度検証：(a)ピッチ方向の接触力、(b)ヨー方向の接触力

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 近藤健太郎, 梅澤陽希, 原口大輔, 周東博, 小俣透
2. 発表標題 弦振動を利用した径 5 mm 柔軟関節鉗子の力センシング
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 近藤健太郎, 小俣透
2. 発表標題 弦振動を利用した手術鉗子の力センシング - 鉗子パイプ内での信号計測 -
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松尾洋平, 近藤健太郎, 小俣透
2. 発表標題 弦振動を利用した力覚センシング機能を有する屈曲鉗子
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松尾洋平, 小俣透
2. 発表標題 弦振動を利用した屈曲鉗子の力覚センシング 複数本のワイヤ張力の計測
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門講演会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 近藤健太郎, 小俣透
2. 発表標題 弦振動を利用した手術鉗子の力センシング 鉗子パイプ内での信号計測
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門講演会2021
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 松尾洋平, 近藤健太郎, 小俣透
2. 発表標題 弦振動を利用した力覚センシング機能を有する屈曲鉗子
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門講演会2021
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 松尾洋平, 小俣透
2. 発表標題 弦振動を利用した屈曲鉗子の力覚センシング：固定端の実現方法
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門講演会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松尾洋平, 小俣透
2. 発表標題 弦振動を利用した屈曲鉗子の力覚センシング：複数本のワイヤ張力の計測
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門講演会2020
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 ワイヤ駆動マニピュレータ装置	発明者 松尾洋平、小俣透	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021-093402	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

東京工業大学STARサーチ <a href="https://search.star.titech.ac.jp/titech-ss/search.act">https://search.star.titech.ac.jp/titech-ss/search.act</a> ・大学見本市2023～イノベーション・ジャパンに出展：「手術ロボットなどのワイヤ駆動ロボットのカセンシン」 2023年8月24日、25日 ・医工連携 新技術説明会で発表：「弦振動によるワイヤ駆動手術ロボットのカセンシング」 2023年12月14
---

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------