

[研究助成 (A)]

柔軟超音波モータを用いた内視鏡ロボットの開発

Development of a Endoscope Robot using Flexible Ultrasonic Motor

2201024



研究代表者

豊橋技術科学大学 工学部

准教授

真 下 智 昭

[研究の目的]

消化器系のがんなどの疾病を早期に発見するために、内視鏡検査が行われている。効率良く検査を行うため、または見落としを減らすために、内視鏡検査のロボット化が期待されている。そのようなロボットでは、能動的に胃や腸の中を曲がりながら進み、がんを見つけることができるような動きを実現できることが期待される(図1)。ソフトウェアでは、がんの発見・診断技術はAI化が急速にすすんでいるが、ロボットのハードウェアの開発はまだ十分ではない。特に湾曲の大きい大腸内を安全に移動する技術は難しい(まれに、穿孔事故などが起こることもある)。本研究では、柔軟性を有するアクチュエータの技術を新しく提案し、内視鏡検査の自動化に貢献することが目的である。

内視鏡検査の自動化には、体内に無理な力をかけないように、やわらかくても十分な駆動力を発生できるソフトアクチュエータの開発が不

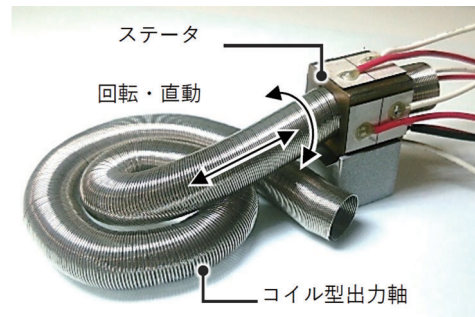


図2 柔軟超音波モータの試作機

可欠である。これまでに著者らは、柔軟の高い「フレキシブル超音波モータ」の開発を行ってきた(図2)。このモータは、固体のステータと、柔らかいコイルからなるシンプルなモータである。ステータの圧電素子に電圧を印加すると、超音波振動がコイルに伝わり、回転または直動を選択的に発生できる。柔軟性はコイルの設計で決められる。このモータの特長は、エネルギー密度が高いことであり、小型化したときでも、ある程度の実用的な出力が見込める。

本研究の柔軟超音波モータは、申請者らが新しく提案したモータであり、ソフトアクチュエータとしては、世界で初めて超音波振動を原理に用いたものである。ステータおよびコイルは、単純な構造で製作が簡単であり、回転と直動を生み出すことができ、サイズの割に大きなトルク・スラスト力を発揮することができる。すなわち、小型化したとしても、ある程度の推力を発生できることが見込める。原理的に、他

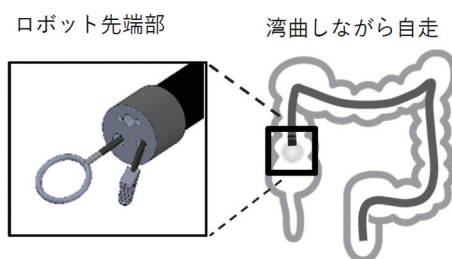


図1 大腸内視鏡ロボットの応用例

の圧電アクチュエータと同様、優れた位置決め精度を有することも特長である。

〔研究の内容、成果〕

1. ツインコイル型フレキシブル超音波モータの開発

フレキシブル超音波モータは、図2のように、四面に圧電素子を貼り付けたステータと、長く柔らかいコイルスプリングでできたスライダで構成される超音波モータである。ステータの圧電素子に交流電圧を印加すると、コイルスプリングが直動方向に駆動する。回転も発生できるが今回は使用していない。スライダの速度は、印加周波数や電圧などの値によって調整できる。本研究では、2個のフレキシブル超音波モータを並べて設置することで、隣り合う2本のコイルスプリングが直進および屈曲可能なツインコイル型フレキシブル超音波モータの開発を行った。図3は、その試作機である。2個のステータはハウジング部に収められている。2本のコイルの先端は連結されており、この先端部をエンドエフェクタとする。この2本のコイルが同時に同じ方向に同じ速度で動けば、先端部は直進し、2本のコイルの動きに差があれば、コイルは屈曲する。コイルは、印加周波数を変数とすることで速度制御を行う。

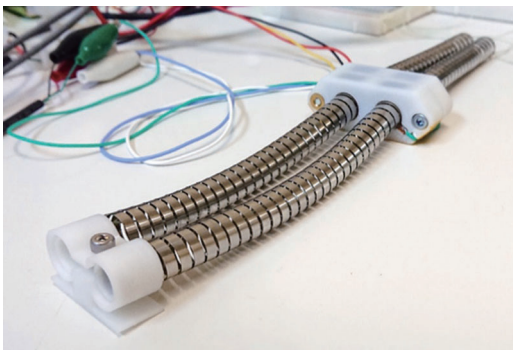


図3 ツインコイル型フレキシ超音波モータ

2. 抵抗式変位センサの開発

ツインコイル型フレキシブル超音波モータにセンシング機能を内在するのは容易ではない。なぜなら、購入して取り付けられるようなものが存在しないからである。そこで、フレキシブル超音波モータのセンシング手法として、新たに、コイル式変位センサを提案した。図4はその概略図であり、フレキシブル超音波モータのコイルスプリングとステータを可変抵抗とみなすことで位置を取得する。コイルスプリング両端に電圧を加えると、ステータとコイルスプリングの一端の間には、電圧降下が生じる。コイルが動くと、この電圧降下に変化が生じるため、コイルの変位が推定できる。この手法の利点は、新たな機械部品をモータに追加することなくコイル位置をセンシング可能な点である。このセンサを用いてフレキシブル超音波モータのフィードバック制御を行うため、このセンサの特性調査を行った。

その結果、計測される電圧と位置は線形性を有しており、分解能は、0.13 mm の AD 変換器を用いて電圧を検出した際の不偏標準偏差は 1.6 mm, 信頼度 99% でサンプルサイズ 10 の時の統計学的誤差は 1.6 mm であった。コイルスプリングの伸展、屈曲による有意な電圧変化は観察されることなく、外力に対して安定した特性を示した。圧縮のみ有意な電圧変化が見られたが、これはコイルスプリング同士が接触することにより電気抵抗値が大きく変化したことが理由である。

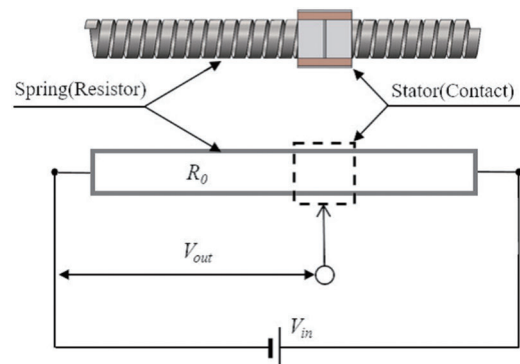


図4 ツインコイル型フレキシ超音波モータ

試作したツインコイル型フレキシブル超音波モータと、可変抵抗型コイル変位センサを用いて、フィードバック制御を行う。実験では、目標軌道として、直径 25 mm の円を与える。エンドエフェクタが、円軌道に沿って、1 周約 11.5 秒で 4 周動くように指令を与える。目標値は、連続体ロボットのモデル化で最もよく使用される一定曲率モデルに従うと仮定して算出した値を使用した。目標値への追従はコイル式変位センサの平均値を利用して P 制御を行った。

実験中のフィードバック制御の様子を、カメラで撮影し、画像処理により位置を算出する。図 5 は、エンドエフェクタの軌跡（目標値への追従）の実験結果である。コイルの送り出し量は、別に測定しており、一定曲率モデルによれば、円軌道を描くはずである。しかしながら、結果はエンドエフェクタ位置が円軌道にならず、楕円軌道となっていることがわかる。これはエンドエフェクタと地面との摩擦によってスプリングが計算通りに変形をしなかったためと考えられる。エンドエフェクタ位置の繰り返し精度は高いため、摩擦を考慮した目標位置を設定することにより高精度な制御が可能になると考えられる。

コイルスプリングの直進運動および屈曲運動による有意な電圧変化は見られなかったが、圧縮のみ有意な電圧変化が見られた。これはコイ

ルスプリング同士が接触することにより電気抵抗値が大きく変化したからだと考えられる。位置の繰り返し精度は高いものの、エンドエフェクタと地面との摩擦の影響が無視できない挙動を示した。

3. コイルのインダクタンスを用いた力覚センサの開発

医療用として使用する場合、誤ってアクチュエータが大きな力を発生しないように、その力の大きさをモニタリングできることが重要である。そこで、フレキシブル超音波モータのコイルスプリングの電気的特性に注目し、力覚センサを新たに考案した。フレキシブル超音波モータのスライダとして用いているコイルスプリングは、コイルとしてのインダクタンスを有する。コイルの長さ方向からある力がかかる場合を考えると、コイルスプリングは弾性変形で伸縮する。このときに、コイルのピッチに変化が生じ、その結果、コイルのインダクタンスが変化する。このインダクタンスの変化を測定することでかかった力の推定できる。こちらの力センサも、余分な機械部品を付け足すことなく、力の大きさをセンシングできるのが利点である。本提案手法について、試作を行い、実験で、その手法の有効性を調査する。

測定方法の概要図を図 6 に示す。インダクタ

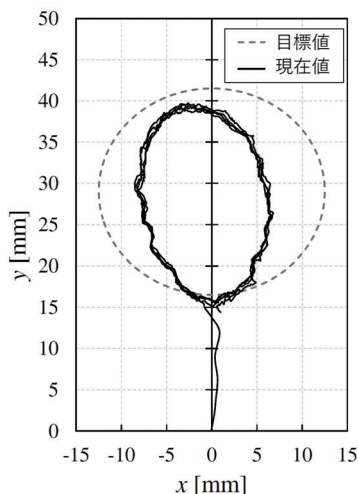


図5 ツインコイル型超音波モータのFB制御

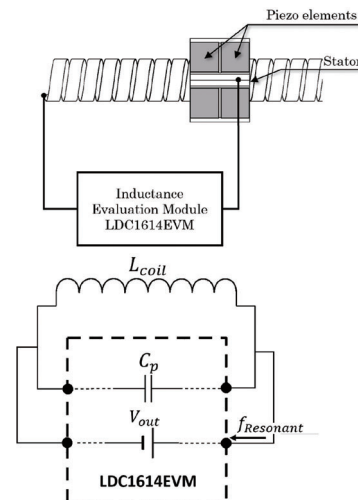


図6 インダクタンス式力覚センサの概略図

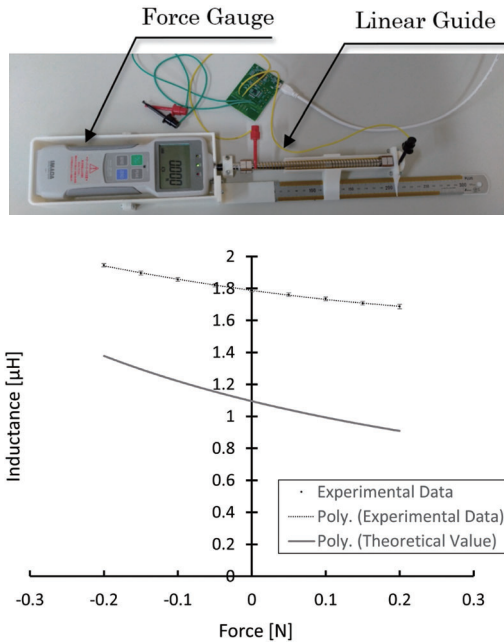


図7 インダクタンス式力覚センサ実験結果

ンスの測定には、LDC 評価モジュール (LDC 1614EVM, TEXAS INSTRUMENTS 社) を用いた。LDC1614EVM は、モジュール内部のキャパシタと測定対象であるインダクタが成す LC 並列回路の共振周波数を測定することができる。測定中におけるキャパシタンスの値を一定とすれば、共振周波数の変化からインダクタンスを計算することが可能である。

図7上は、評価を行うための実験装置の様子である。フレキシブル超音波モータのステータにコイルスプリングが挿入されており、コイルスプリングの端部が、フォースゲージに取り付けられている。コイルスプリングが縮んだときまたは伸びたときに、発生した力を測定できるようになっている。

フレキシブル超音波モータのコイルスプリングを有限長ソレノイドとみなし、インダクタンスの近似値を見積もることができるか調査する。有限長ソレノイドでは、両端の巻線の状態や、磁性体の両端の磁荷により、ソレノイドの長さ方向以外の成分が影響するため、計算が複雑になる。

本研究で扱うコイルスプリングでは、コイル半径よりも、ソレノイドの長さが十分に大きく、

この点は計算に適しているが、コイルの断面形状が、円ではなく長方形であるなどを考慮して、補正值として長岡係数を用い、インダクタンスの値を推定することとした。

図7下は、外力に対するインダクタンスの変化の、解析結果と実験結果である。実験では、ステータを固定する治具を用いて、コイルスプリングに 0.05 N ずつ外力を加え、コイルスプリングを圧縮・引張し、フォースゲージによって読み取った外力に対するインダクタンス値の変化を記録した。なお、コイルスプリングは 0.3 N より大きな力で圧縮するとコイル線が接触し、インダクタンスの適切な測定ができないため、最大の外力を圧縮と引張それぞれ 0.3 N とした。計算結果と実験結果には差があるものの、解析と実験は類似の傾向を示していることがわかる。外力に対するセンサの出力値は、反比例であり、95% 信頼区間における誤差は ± 0.026 N であった。測定範囲に占める誤差の割合は大きいと考えられるものの、外部に機械部品を取り付けることなく、非常に簡単な構造で力を検出することは可能であることを実験で示した。

次に、開発したインダクタンス式力覚センサを用いてフレキシブル超音波モータの Bang-Bang 制御を行った。このとき、インダクタンスの値をモータシステムにフィードバックしている。図8は、目標値として、0.15 N を与えたときの、フレキシブル超音波モータが発生する力の挙動である。コイルスプリングの柔軟性によって挙動は振動的であるものの、力の目標

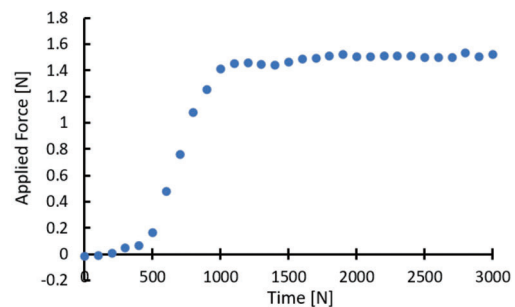


図8 フレキシブル超音波モータが発生する力の過渡応答

値に到達し、運動を静止できている。

[今後の研究の方向, 課題]

本研究では、ツインコイル型フレキシブル超音波モータを用いて、変位センサと力センサの開発を行った。いずれもフレキシブル超音波モータに機械部品を追加することなくセンシングを可能にした。今後の課題は、センシングの精度と分解能をさらに上げることである。位置検出に関してはコイルの抵抗値に依存するため、コーティングなどでコイルの抵抗値を上げることで、性能の向上に取り組む。力センサの性能を上げるには、コイルのピッチなどを設計する必要があるが、このことはモータの性能に

も影響するため、モータ性能と、力センサの性能をあわせて最適設計する必要がある。制御の観点からは、いくつかの制御方法を実装し、それぞれの特性を調査することで、最適な制御方法を見つける。また、開発したセンシングを適宜搭載して、3個以上のフレキシブル超音波モータを用いた連続体ロボットの開発し、応用を見据えた実験検証を行っていきたいと考えている。

[成果発表, 論文など]

- [1] 佐藤悠之輔, 金田礼人, 真下智昭, セルフセンシングフレキシブル超音波モータ, ロボティクス・メカトロニクス講演会, オンライン, 2020年.