

フレキシブルアクチュエータを用いた高精度力覚伝達に関する研究 A Study for Transmission of High Precision Force Sensation with Flexible Actuator

80716135 小林辰也 (Tatsuya Kobayashi) Supervisor 大西公平 (Kouhei Ohnishi)

1 序論

触覚情報のうちの一つ、力覚情報の伝達はマスタ、スレーブロボットを用いたバイラテラル制御により達成される。これまでバイラテラル制御の研究で用いられたアクチュエータは、作用力を発生させるモータ部と、実際に環境に接し作用力を加えるエンドエフェクタ部が構造的に固定されており、その間の力の損失は限りなくゼロに近かった。そのため、応答の精度は非常に高くなるが、その分エンドエフェクタ部は重く、大きいものとなっていた。実用に際してエンドエフェクタ部がそのように重く大きいものになってしまうと、人が操作する際には操りづらく、また環境に接する際にはその対象に被害を及ぼす危険性が大きくなってしまふ。そのため、エンドエフェクタ部はモータ部と隔離し、小形軽量化することが望ましい。特に、手術用鉗子ロボットなどエンドエフェクタ部の多自由度化を必要とする際にはこの問題は深刻となり、解決が望まれる。ロボットマニピュレーションにおいてモータ駆動部とエンドエフェクタ部を隔離するためにワイヤを用いることがある。しかしワイヤを介してマスタを操作すると、その柔軟性からワイヤ部において力が損失し、十分に動作を伝えることができない。特に直動方向の動作については、引き動作は伝えられても押し動作はワイヤがたわんでしまうため伝えることは不可能である。

そこで、インナワイヤとアウトチューブの組み合わせにより柔軟性を保ちつつ、構造的に堅くすることで動作の伝達性を高めた“スラストワイヤ”が開発された。スラストワイヤは遠隔地からカメラのシャッターを操作するレリーズと同様の機構を持つ。ワイヤと同様の柔軟性を持つためモータ駆動部に対してエンドエフェクタ部を自由に配置することができ、またその構造から押し引きの両動作について伝達が可能である。リニアモータとスラストワイヤを組み合わせたシステムは“フレキシブルアクチュエータ”と名づけられている。このフレキシブルアクチュエータはバイラテラル制御を組み込んだ多自由度ロボットハンドへの応用が期待されており、これを用いてエンドエフェクタの多自由度化と軽量化を実現したロボットも試作されている。

本論文ではまず、実験によりスラストワイヤの力伝達特性を検証する。また、フレキシブルアクチュエータを用いたバイラテラルシステムにおいて生じる誤差の補償法を提案し、その有効性を実験により示す。

2 フレキシブルアクチュエータ

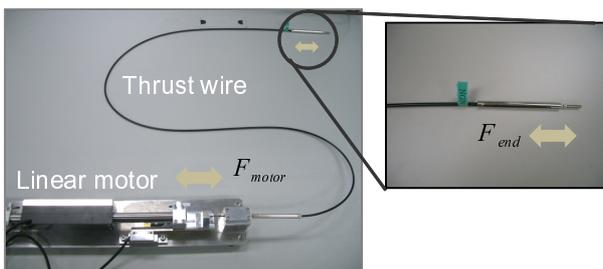


図 1: フレキシブルアクチュエータ

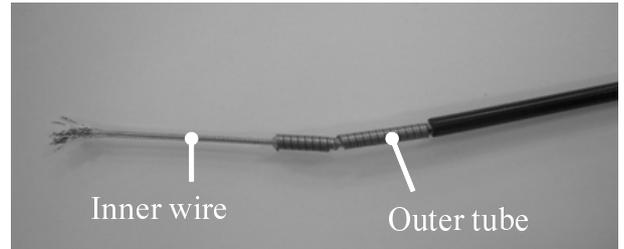


図 2: スラストワイヤの構造

フレキシブルアクチュエータはスラストワイヤとリニアモータから成るシステムである。概要図を図 1 に示した。スラストワイヤはインナワイヤとアウトチューブから成り、この構造によってモータに対するエンドエフェクタの柔軟な配置と、力覚伝達を可能とする。図 2 はスラストワイヤを分解し、内部の構造を示したものである。インナワイヤには 19 本のステンレスワイヤを撚ったもの、またアウトチューブにはステンレスコイルを用いている。摩擦を抑えるために内部はポリプロピレンでコーティングされている。

フレキシブルアクチュエータを用いることで、ロボット先端部にモータを配置する必要がなくなるため軽量化を達成できるほか、先端の動作を計算する際に多自由度リンクマニピュレータのように複雑なヤコビ行列を解く必要がなくなるというメリットもある。

3 スラストワイヤの力伝達特性の検証

スラストワイヤはモータの駆動力を離れたエンドエフェクタへ伝えることができる。しかし、インナワイヤのばね性、インナワイヤとアウトチューブ間での摩擦、また構造的にスラストワイヤがもつ“あそび”のため、スラストワイヤへの入力と、エンドエフェクタの応答の間で誤差が生じてしまう。そこで、スラストワイヤの力伝達特性を調べるために、図 3 の装置を用いて検証実験を行った。図 4 はそれぞれモータからの出力（ステップ、ランプ、正弦波）に対して、スラストワイヤ先端に伝わった力を測定し、グラフにまとめたものである。姿勢による影響を見るため、実験は 0 度、90 度、180 度と姿勢を変えてそれぞれ行われた。スラストワイヤは専用のジグによってそれぞれの姿勢に固定されている。実験結果より、スラストワイヤを用いることで生じる誤差は非線形であることがうかがえる。誤差の大小はスラストワイヤの長さ、設置に際してのスラストワイヤの曲率、インナワイヤとアウトチューブ間のギャップ長等、様々な要因によって変化する。

4 フレキシブルアクチュエータを用いたバイラテラルシステムの高精度位置決め法

スラストワイヤを用いることで生じる誤差を、スラストワイヤ内の外乱が原因と考える。フレキシブルアクチュエータをバ

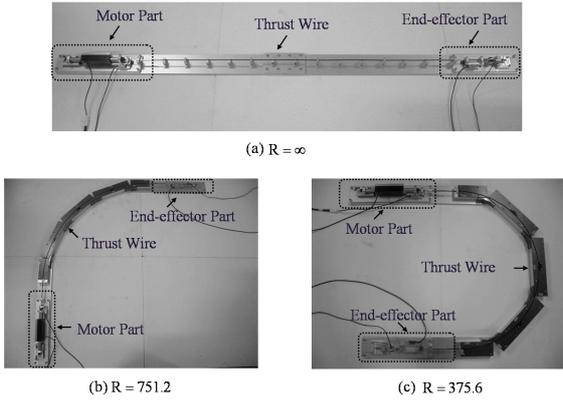


図 3: 検証機

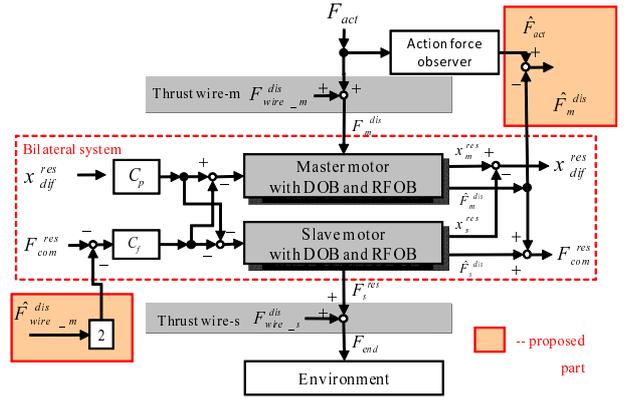


図 5: スラストワイヤ内の外乱補償のための提案手法

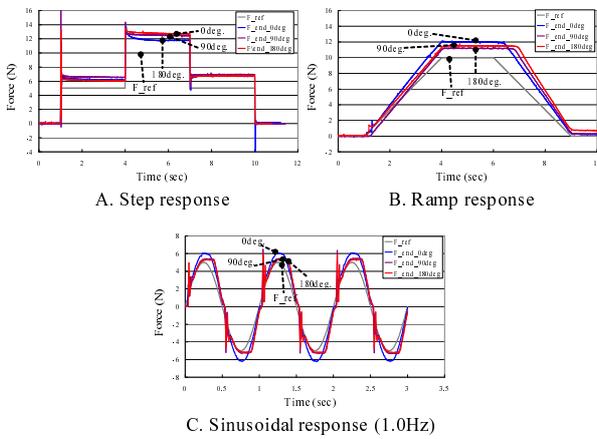


図 4: スラストワイヤの力伝達特性

トワイヤを 180 度に曲げた姿勢での実験結果を示す。従来のバイラテラル制御を用いた場合には操作力とエンドエフェクタの応答に誤差が大きく生じている。一方提案手法では誤差は補償され、正確な力伝達が達成されている。

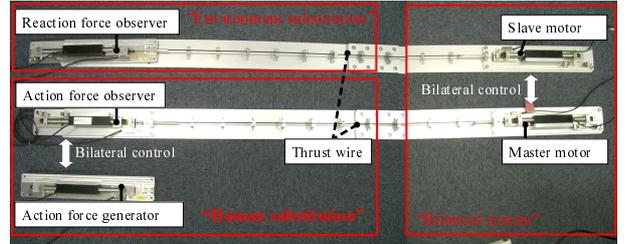


図 6: 実験装置

イラテラルシステムに用いると、(1) のようにマスタ側とスレーブ側それぞれのスラストワイヤ内で外乱が生じ、誤差は非常に大きくなってしまふ。

$$F_{end} = F_{act} - F_{wire_m}^{dis} - F_{wire_s}^{dis} \quad (1)$$

提案手法では、(2) によりマスタ側で推定した外乱を力参照値に 2 倍して加えることで、(3) のようにスラストワイヤ 2 本分の外乱を補償する。ここで、同姿勢で同じスラストワイヤを用いた場合にスラストワイヤ内で生じる外乱は等しいとみなしている。これにより、操作力 F_{act} を正確に接触環境へ伝えることができる。

$$\hat{F}_{wire_m}^{dis} = \hat{F}_{act} - \hat{F}_m^{dis} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} F_{end} &= F_{act} - F_{wire_m}^{dis} - F_{wire_s}^{dis} + 2(\hat{F}_{act} - \hat{F}_m^{dis}) \\ &= F_{act} - F_{wire_m}^{dis} - F_{wire_s}^{dis} + 2\hat{F}_{wire_m}^{dis} \\ &= F_{act} \end{aligned} \quad (3)$$

提案手法のブロック線図を図 5 に示す。

提案手法の有効性を示すために実験を行った。図 6 は実験装置を示す。本実験では人間の操作力を推定するために“Human substitution”に従来法の 4ch-バイラテラルシステムを実装した 2 台のリニアモータを用いた。環境からエンドエフェクタへの反力は“Environment substitution”において位置制御をかけて動かないようにしたリニアモータを用いることで仮想的な環境を実現し、反力推定オブザーバにより推定した。図 7 はスラス

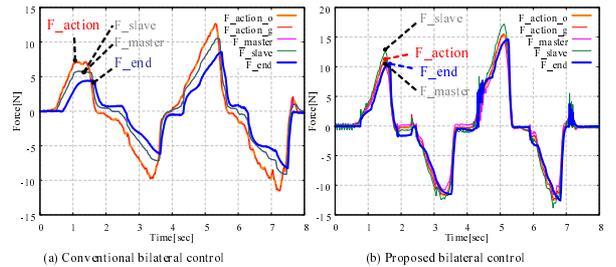


図 7: 実験結果 (180 度)

5 結論

フレキシブルアクチュエータを用いたバイラテラル制御において、マスタ側でスラストワイヤによる外乱を推定することで全体としての誤差を補償する手法を提案し、実験によりその有効性を示した。本提案手法によって、フレキシブルアクチュエータを用いた際にもスラストワイヤ内の外乱の影響を受けることなく、操作力を正確に環境へと伝えることができる。本提案手法はエンドエフェクタの軽量化が必要とされる多自由度遠隔操作手術ロボットなどへの応用が期待される。