

把持物体加工情報の抽出と再現に向けた 対向型パラレルリンクハンドの開発

芝浦工業大学 システム理工学部 機械制御システム学科

桑原 央明

1. はじめに

日本では少子高齢化の影響により、陶芸やガラス細工などの職人技術を担う後継者不足が深刻化している。これらの工芸技術は、長年の経験と直感に基づく繊細な手作業が求められるが、技術の継承が困難となっている。中でも「面接触動作」と呼ばれる、掌全体で対象を包み込むような操作は、力を分散させ安定した作業を可能とするため、職人技の中核をなす。一方で、人間の触覚は指先と比べて掌では空間分解能が低く、その特性を理解した上で模倣することが必要である。

こうした背景から、人の力覚や操作感覚を他者や遠隔地に伝える手段として、遠隔操作ロボットが注目されている。従来の遠隔操作ロボットは医療用鉗子などを対象とし、点接触による繊細な作業を得意としていたが、面接触を伴う動作の再現や伝達には限界があった。このため、点接触に特化した設計では伝統工芸のような面接触動作を必要とする作業には適応しきれず、新たな技術の開発が求められている。

本研究は、これらの課題を踏まえ、面接触動作に対応可能な遠隔操作ロボットシステムの構築を目的とする。3自由度の垂直直動型パラレルリンク機構¹⁾を用いたリーダー・フォロワ型のロボットを開発し、掌を模した剛体アーチ状のエンドエフェクタによって面接触動作の再現を目指す。

2. 提案する遠隔操作ロボット

面接触動作の推定と伝達を可能にする遠隔操作ロボットシステムの構成およびその運動学的解析を説明する。図1に、開発した遠隔操作ロボットシステムを示す。

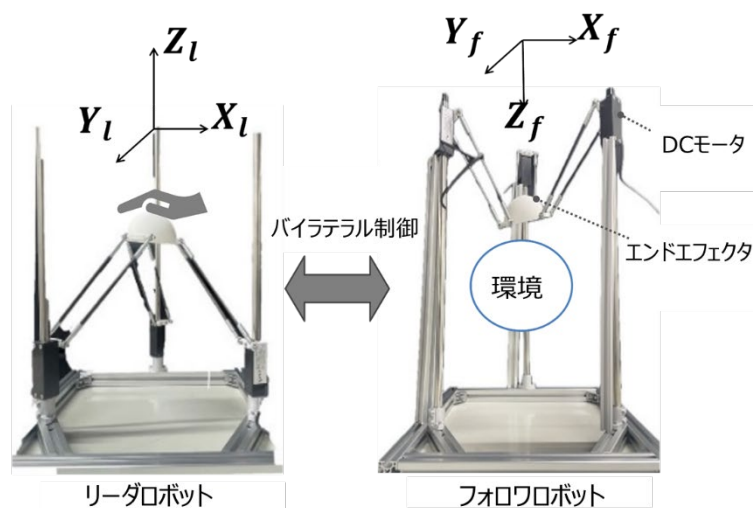


図1. 開発した遠隔操作ロボットシステムの構成

本システムは、3 自由度の垂直直動型パラレルリンク機構²⁾をそれぞれ搭載したリーダロボットとフォロワロボットから構成される。リーダロボットは操作者の操作を入力する側であり、フォロワロボットはその操作を模倣して実行する出力側である。各ロボットには、等間隔に 3 台配置されたリニアモータが取り付け、高い対称性と構造剛性を備える構成となっている。特にエンドエフェクタの形状に着目しており、人の掌を模倣したアーチ状の剛体を採用することで、面接触動作の再現性を高めている。従来の点接触型のエンドエフェクタでは再現困難であった、掌全体で物体に接触して保持・操作するような動作を、力学的に安定かつ柔軟に行えるよう設計されている。構造面では、シリアルリンク機構と比較して剛性と精度に優れるパラレルリンク機構を採用している。パラレルリンクは、複数のアクチュエータが同時に力を分担して駆動するため、高精度な位置制御や力制御に適しており、面接触動作のような繊細な操作において有効である。一方で、その複雑な構造により運動学解析が困難であり、設計・制御において工学的な配慮が求められる。

本研究では、逆運動学と順運動学の両方に関する定式化を行っている。逆運動学では、エンドエフェクタの位置ベクトルから各アクチュエータの制御量を導出しており、位置関係の幾何学的制約をもとに二次方程式を解く形で得られる。一方、順運動学は非線形方程式系を含むため、解析的に一意解を得ることが難しい。そこで、ニュートン・ラブソン法と呼ばれる反復近似手法を用いて、エンドエフェクタの位置を数値的に導出している。初期値の選定が収束性に大きく影響するため、運動学モデルの精度やボールジョイントなどの実装精度を踏まえた設計が行われている。さらに、微小運動学に基づきヤコビ行列を導出し、エンドエフェクタの微小な位置変化とアクチュエータの伸縮量との関係を線形近似によって表現している。このヤコビ行列は、ロボットの動作解析や制御器設計において重要な役割を果たす。

提案する遠隔操作ロボットでは高精度な位置制御と力制御を両立させるため、外乱オブザーバ (DOB)³⁾と反力推定オブザーバ (RFOB)⁴⁾を活用して構築されている。開発した遠隔操作ロボットには各軸に 1 自由度のリニアモータが搭載され、運動方程式はモータ質量、駆動力、外乱などに基づいて定式化される。駆動力は電流と推力定数の積として与えられ、負荷力には重力や粘性摩擦、環境からの反力が含まれる。DOB は、外乱や不確かさをリアルタイムで推定・補償し、システム応答の安定化と位置制御の精度向上を図るものである。推定値はローパスフィルタによりノイズを除去してから制御系へフィードバックされ、外部環境に影響されにくい安定動作を実現する。一方、RFOB は、力センサを用いることなく環境反力を推定する手法であり、センサのコストや設置上の課題を回避しつつ、高精度な力推定を可能にする。これにより、実装性と精度を両立した力制御が実現される。位置制御には PD 制御器を用い、指令値に対する誤差に応じて加速度指令を生成することで、目標位置への迅速かつ安定した収束を実現している。また、力制御では、推定された反力と目標力の差から加速度指令を生成し、接触動作において繊細な力加減を保つ制御を行う。両者を併用することで、非接触から接触に移行するような動的環境でも、滑らかで安定した操作が可能となっている。

さらに、リーダ・フォロワ間に図 2 に示すバイラテラル制御を導入することで、位置情報と力情報を双方向に伝達できる構成とした。これにより、操作者の手の動きがフォロワに正確に反映されるとともに、対象物に触れた際の反力もリーダに返され、あたかも直接触れているかのような操作感が得られる。位置誤差の最小化と、作用反作用の成立（リーダとフォロワの力の和がゼロ）を同時に達成することで、遠隔操作における触覚再現性を高めている。

る。これらの制御はすべて DOB と RFOB に基づくモデルに統合され、ロバストかつ高性能な遠隔操作を可能にしている。

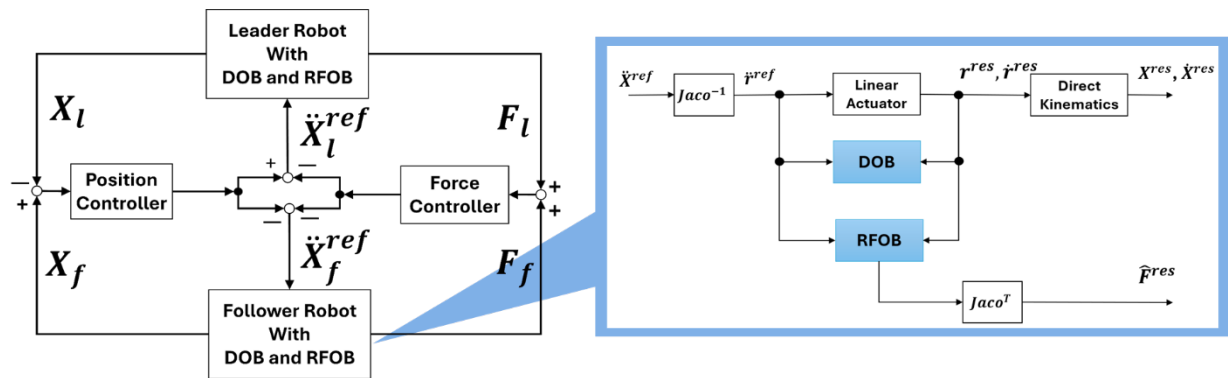


図 2. 制御系

3. シミュレーションによる設計妥当性の確認

構築したロボットシステムおよび制御手法の妥当性を検証するために、複数のシミュレーションを実施した。検証内容は大きく分けて、運動学解析、位置制御、力制御、位置と力のハイブリッド制御の 4 つである。

(1) 運動学解析

エンドエフェクタへの位置指令に対して、逆運動学から各アクチュエータの制御量を計算し、それを順運動学により再構成した位置と比較することで、解析精度を確認した。その結果、 $X \cdot Y \cdot Z$ 各軸での位置応答は指令と良好に一致し、モデルの正当性を確認した。また、図 3 に示すように、構造的な干渉を避けながら各軸における動作範囲が確保されていることから設計の妥当性を示している。

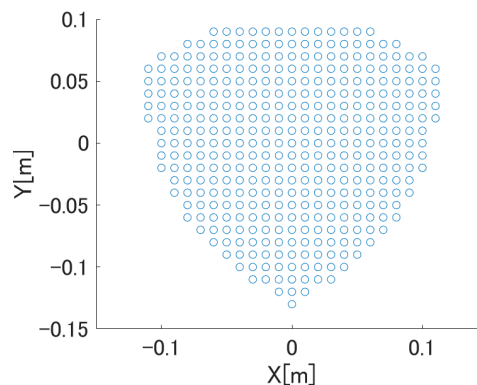
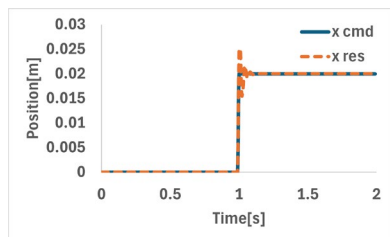


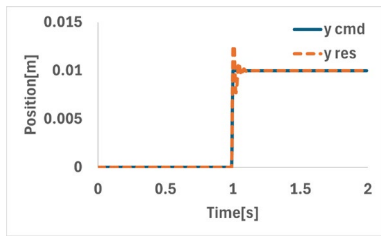
図 3. 動作範囲

(2) 位置制御の検証

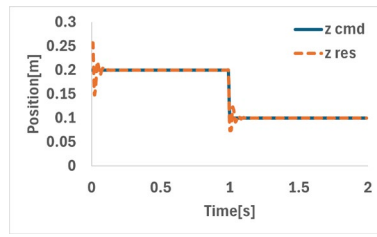
各軸に対してステップ指令を与え、PD 制御および外乱オブザーバを用いた制御性能を評価した。図 4 に結果を示す。初期応答ではわずかな振動が見られたが、時間とともに収束し、目標位置への安定した到達が確認された。これにより、制御系が十分な追従性と安定性を備えていることが示された。



(a) X 軸



(b) Y 軸



(c) Z 軸

図 4．位置制御検証結果

(3) 力制御の検証

エンドエフェクタへの外乱として環境反力を与え、それに対する反力推定オブザーバの応答を検証した。図 5 に結果を示す。推定された反力は外力の変化に追従し、安定した一次遅れ応答を示したことから、力センサを使用しない構成でも有効な力制御が可能であることが実証された。推定精度と応答性のバランスが取れており、接触作業への応用にも耐え得る性能が確認された。

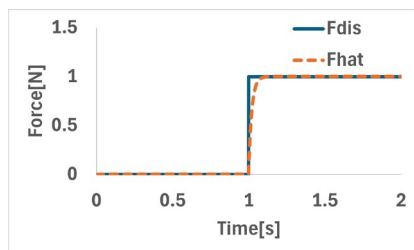
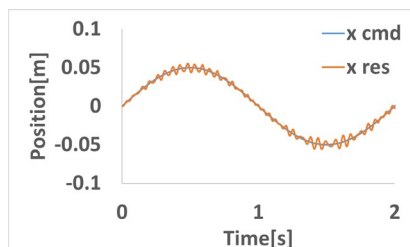


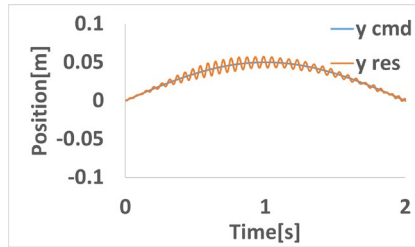
図 5．力制御検証結果

(4) 位置制御と力制御を統合したハイブリッド制御の検証

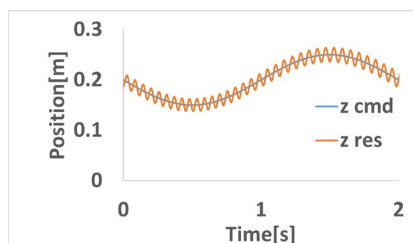
エンドエフェクタの位置には正弦波状の指令を与え、Z 軸方向には外力を付加して力制御も並行して行った。図 6 に結果を示す。位置応答には一部振動が見られたものの、全体的には指令に従った軌道を維持しており、力応答も一定の位相差を保ちながら安定していた。ただし、位置と力の制御が互いに干渉する場面も確認され、今後の改良点として制御ゲインの調整や制御モード切替の導入が挙げられる。



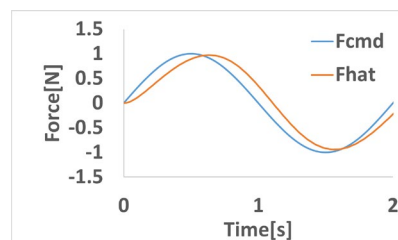
(a) X 位置



(b) Y 位置



(c) Z 位置



(d) Z 方向の力

図 6. ハイブリッド制御検証

これら一連のシミュレーションにより、提案した制御手法が面接触を含む繊細な操作に対して有効に機能することが確認された。特に、外乱補償と反力推定を組み込んだ構成は、力センサを用いずに安定かつリアルな力制御を実現できる点で実装性にも優れ、今後の応用展開において大きな利点を持つ。

4. 実験による制御性能の確認

提案するパラレルリンク型遠隔操作ロボットの制御手法の有効性を、実機による検証を通じて確認する。実験の様子を図 7 に示す。実験は自由運動時における位置制御性能の評価と、柔らかい物体との接触を含む環境下での力制御性能の検証を行った。各実験においては、外乱オブザーバ (DOB) および反力推定オブザーバ (RFOB) の有効性や、制御ゲインの影響、推定精度、振動特性など多角的な視点から解析を行った。

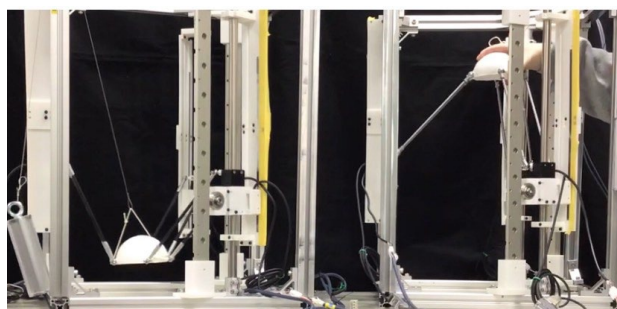
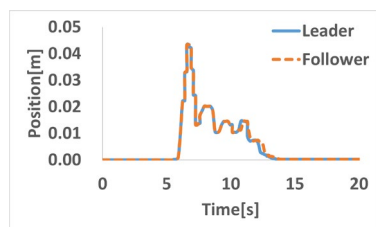


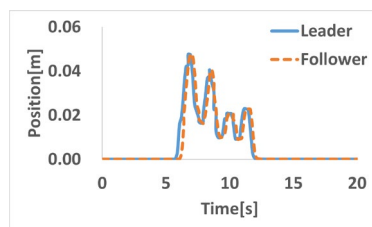
図 7. 実験の様子

(1) 自由運動の実験

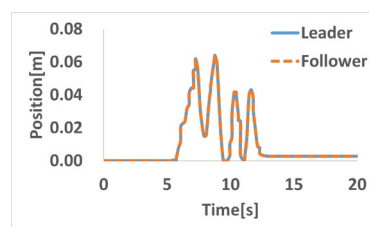
ロボットが外部との接触がない状態で、目標位置への追従性能を評価した。具体的には、各軸に対してステップ状の位置指令を与え、エンドエフェクタの応答を観測した。このとき、DOB のカットオフ周波数を複数設定し、ロボットの応答性および安定性の変化を比較検証した。カットオフ周波数が低すぎる場合、外乱補償が不十分となり、目標値への到達に遅れが見られた。一方で、カットオフ周波数を高く設定しすぎると、エンコーダの量子化誤差などに起因する高周波ノイズが増幅され、位置応答に振動が生じやすくなった。最適な周波数設定では、図 8 に示すように、初期応答の過渡振動を抑制しつつ、短時間で指令値に収束する滑らかな挙動が得られた。これにより、DOB がロボット制御のロバスト性向上に寄与していることが実験的に確認された。



(a) モータ 1



(b) モータ 2

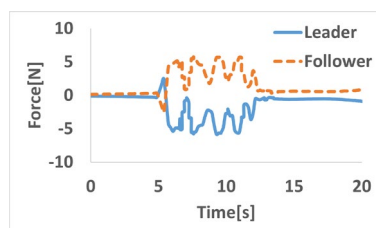


(c) モータ 3

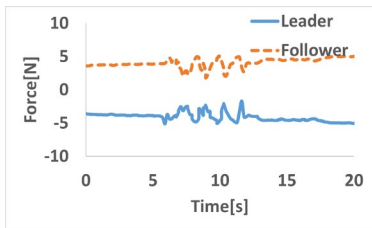
図 8．位置応答

(2) 接触実験

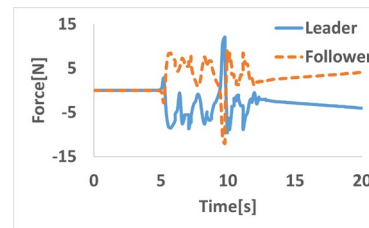
エンドエフェクタが柔らかいスポンジ状の物体と接触する条件下で、反力推定オブザーバの推定性能と制御安定性を評価した。リニアモータに生じた接触力を RF0B により推定し、その推定値と実際の物体の変形挙動の整合性を観察した。図 9 に実験結果を示す。接触直後の力変化に対して RF0B が素早く追従しており、力センサなしでも接触の有無や力の大小を十分に再現できることが確認された。また、接触中の微小な力変動に対しても応答が安定しており、制御系が柔軟な対象に対しても過敏に反応しすぎない特性を持っていることがわかった。



(a) モータ 1



(b) モータ 2

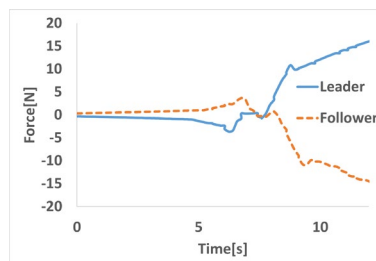


(c) モータ 3

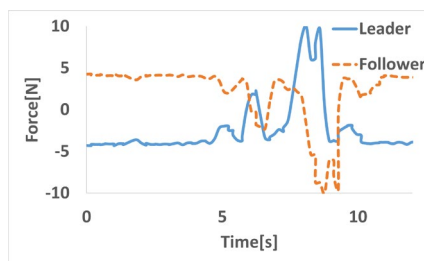
図 9．力応答

(3) 位置制御と力制御を組み合わせたハイブリッド制御

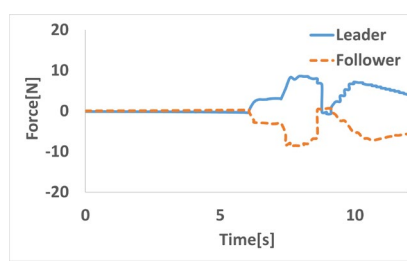
位置指令に従ってエンドエフェクタを動かしつつ、接触時には所定の反力を維持するよう制御を行った。図 10 に実験結果を示す。非接触時は位置指令通りの滑らかな動作が得られ、接触時には反力が安定的に制御されていた。しかし一方で、位置制御と力制御の指令が干渉するタイミングでは、わずかな振動や応答の遅れが生じる場面も見られた。これは、各制御ループの優先度やゲイン設計が十分に分離されていないことに起因する可能性があり、今後の改善点として、重み付け制御や切替制御の導入が求められる。



(a) モータ 1



(b) モータ 2



(c) モータ 3

図 10．物体接触力

以上の実験を通じて、提案システムが実機環境下においても高い位置精度と力制御性能を有することが確認された。外乱補償による安定化効果、反力推定の応答性、そして複数制御系の同時実行における干渉の発生とその対応策といった多面的な知見が得られたことは、今後の制御系高度化に向けた有益な成果である。特に、力センサを用いない構成でありながら実用的なレベルの接触制御が可能である点は、低コスト・高耐久の遠隔操作ロボットの構築において大きな利点である。

9. まとめ

本研究では、面接触動作の推定・伝達を目的としたパラレルリンク型遠隔操作ロボットを開発し、外乱補償と反力推定を活用した制御系を設計・実装した。シミュレーションおよび実験を通じて、位置と力の同時制御に対する有効性と実装性を確認し、力センサを用いずとも実用的な力制御が可能であることを実証した。

今後は、エンドエフェクタ構造の柔軟化、制御モードの自動切替、機械学習を用いた適応制御などを取り入れ、より高度な面接触作業や複雑な環境への対応を目指す。提案システムは、職人技術の継承や遠隔作業支援といった実社会への応用可能性を持つ基盤技術として、大きな発展が期待される。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、公益財団法人天野工業技術研究所から多大なご支援を頂きました。ここに記して謝意を示します。

参考文献

- 1) 立矢宏, “パラレルメカニズム”, pp. 12-45, 2019, 森北出版.
- 2) 増田峰知, 藤原基芳, 新井健生, “垂直直動型パラレルメカニズムの運動学解析と試作”, 日本機械学会論文集(C 編), Vol. 65, No. 638, 1999, pp. 4076-4083. .
- 3) 大西公平, “外乱オブザーバによるロバスト・モーションコントロール”, 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 4, 1993, pp. 486-493.
- 4) 村上俊之, 中村亮, 郁方銘, 大西公平, “反作用力推定オブザーバに基づいた多自由度ロボットの力センサレスコンプライアンス制御”, 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 5, pp. 765-768, 1993.