

[研究助成 (A)]

力覚情報に基づく把持加工動作のスキルトランスファ技術の開発

2251013

研究代表者
(助成金受領者)芝浦工業大学 システム理工学部
機械制御システム学科

准教授 桑 原 央 明

[研究の目的]

少子高齢化の進展に伴い、製造業、医療・福祉、保守点検などの現場では、熟練技能者の減少と技能継承の困難化が深刻な課題となっている。特に、ガラス細工、研磨、仕上げ加工、手術支援動作などに代表される精密作業では、作業者が対象物や工具を把持し、対象との接触状態を微細な力覚情報として感じ取りながら、把持姿勢や押し付け方向を連続的に調整している。このような作業では、単に手先の位置や軌道を再現するだけでは十分ではなく、接触時に生じる反作用力、力の作用方向、作用点、振動、加工抵抗などを総合的に判断する必要がある。そのため、熟練者の経験や感覚に依存する部分が大きく、技能を客観的に記述し、学習者や機械システムへ伝達することは容易ではない。

本研究では、このような精密作業における人間の動作を「把持加工動作」と捉え、力覚情報に基づいてそのメカニズムを明らかにするとともに、その知見を応用した動作教示システムを開発することを目的とする。ここでいう把持加工動作とは、人間が対象物またはエンドエフェクタを把持し、加工対象に接触させながら、手先に伝わる力覚情報をもとに把持姿勢や接触状態を調整する一連の動作を指す。把持加工動作では、作業者は視覚的に対象物の位置や姿勢を確認するだけでなく、手先に返ってくる微細な反力や振動を感じ取り、それに応じて押し付け力、傾き、送り方向などを瞬時に変化させてい

る。このような動作は、言語化や数式化が難しい暗黙知として熟練者の中に蓄積されており、従来の教育や技能伝承では、経験的な指導や反復練習に頼らざるを得なかった。

具体的には、人間の操作力と加工対象からの反作用力を分離して取得する実験基盤を構築し、取得した力覚情報と把持姿勢の時系列データに基づいて、次の把持姿勢変化を予測する動作生成モデルを構築する。接触を伴う精密作業では、手先軌道だけでなく、押し付け力や接触方向が加工結果に大きく影響する。

そのため、本研究では、把持加工動作を力覚情報との関係から記述し、人間が暗黙的に行っている姿勢調整のメカニズムを数理的に表現することを目指す。これにより、熟練者がどのような力を感じ、どのように姿勢を修正しているかをデータに基づいて表現し、従来は経験的に伝えられてきた技能を、機械システムが利用可能な形式知へ変換する。

さらに、得られた動作生成モデルを動作教示システムへ応用する。モデルにより算出された理想的な把持姿勢を、画像処理や拡張現実インターフェースを用いて操作者に提示することで、操作者は現在の動作と理想的な動作との差異を視覚的に理解しながら、把持加工動作を習得できる。

以上より、本研究は、力覚情報に基づく把持加工動作のメカニズムを解明し、熟練技能の形式知化とスキルトランスファを実現するための基盤技術を構築するものである。最終的には、

人間の巧みな感覚と機械の再現性・拡張性を結びつけ、人間と機械が相互に補完しながら精密作業を行う新たな協調システムの実現を目指す。

[研究の内容, 成果]

本研究では、「実験基盤の構築」、「動作生成モデルの構築」および「動作教示システムの開発」を行った。まず、人間の操作力と加工対象からの反作用力を分離して取得するための実験基盤を構築し、次に取得した力覚情報と把持姿勢の時系列データを用いて、人間の姿勢調整を予測する動作生成モデルを構築した。さらに、このモデルの出力を用いて操作者に理想的な把持姿勢を提示する動作教示システムを開発した。

1. 実験基盤の構築

把持加工動作のメカニズムを明らかにするためには、作業中に人間が受ける力覚情報を高精度に取得する必要がある。

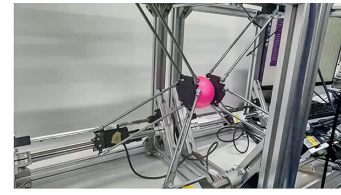
しかし、人間が対象物を把持しながら加工を行う場合、人間が対象に加える作用力と、加工対象から返ってくる反作用力が同時に発生する。そのため、通常の力計測では、操作者の操作力と対象物からの反作用力を分離して取得することが難しい。

そこで本研究では、人間の手と加工対象の間に遠隔操作ロボット型インターフェースを挿入し、バイラテラル制御を用いて作用力と反作用力を分離して取得する実験基盤を構築した。構築した実験基盤を図1に示す。人間が操作する外向型ロボットをリーダ、加工対象と接触する内向型ロボットをフォロワとして配置し、両者をバイラテラル制御器により接続した。操作者がリーダロボットを操作すると、その動作がフォロワロボットへ伝達される。一方で、フォロワロボットが加工対象から受ける反作用力は、リーダロボットを介して操作者へ提示される。

外向型ロボットをリーダ、内向型ロボットをフォロワとして接続し、操作者の操作力と加工



リーダロボット



フォロワロボット

図1 実験基盤

対象からの反作用力を分離して取得する実験基盤を示す。

本実験基盤の特徴は、エンドエフェクタに作用する反作用力について、その大きさだけでなく、作用点および方向性を推定可能な構成とした点である。把持加工動作では、力の大きさに加えて、力がどの位置に、どの方向から作用しているかが、把持姿勢の調整に大きく関与する。そこで、ロボットの位置・姿勢情報、エンドエフェクタの幾何学的関係、および推定された力覚情報を組み合わせることで、反作用力の作用点と反作用力ベクトルを導出できる構成とした。

この実験基盤により、把持加工動作中に生じる力覚情報を取得し、後述する動作生成モデルの構築に用いるためのデータ取得環境を整備した。

2. 制御系設計と力覚情報取得の安定化

実験基盤を用いて信頼性の高い力覚データを取得するためには、制御系の安定性と応答性を両立させる必要がある。把持加工動作では、操作者、ロボット、加工対象が接触を介して相互作用するため、制御系が不安定である場合には、振動や共振が発生し、取得される力覚情報の信頼性が低下する。

そこで、外乱オブザーバおよび反力推定オブザーバを用いた位置・力ハイブリッド制御系の設計指針を整理した。

特に、各オブザーバのゲイン設定が制御系の安定性および応答特性に与える影響を解析し、把持加工動作のような面接触を伴う作業においても、共振を抑制しながら力覚情報を取得でき

る条件を検討した。この検討により、実験基盤において安定した位置応答と力応答を得るための制御条件を整理した。特に、オブザーバゲインを高く設定すると応答性は向上する一方で、ノイズ増幅や共振励起の可能性が高まるため、応答性と安定性のバランスを考慮した設計が重要であることを確認した。これにより、後続の把持加工動作実験において、安定した力覚情報を取得するための基盤を整えた。

3. 把持加工動作実験と時系列データの取得

構築した実験基盤を用いて、研磨作業を模擬した把持加工動作実験を実施した。実験では、操作者がリーダロボットのエンドエフェクタを把持し、フォロワロボットを介して加工対象に接触する動作を行った。これにより、実際の把持加工に近い状況を再現し、作業中に発生する反作用力と把持姿勢の関係を取得した。

図2に把持加工動作実験の様子を示す。実験では、リーダロボットおよびフォロワロボットの位置応答、力応答、把持姿勢、反作用力情報を時系列データとして取得した。図3には、リーダ・フォロワ間の位置応答および力応答を示す。

実験結果より、リーダとフォロワの位置応答が対応し、力応答においても作用・反作用の関係が確認された。これにより、構築した実験基盤が、把持加工動作中の力覚情報を取得するために有効であることを確認した。また、操作者が加工対象からの反作用力や加振を感じながら操作できることを確認し、力覚情報を伴う把持加工動作を再現できる実験環境を構築できた。

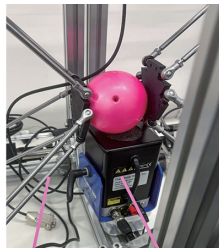


図2 把持加工動作実験の様子

4. 反作用力の作用点および反作用力ベクトルの導出

把持加工動作を力覚情報に基づいてモデル化するためには、操作者が受ける力覚情報を、動作生成モデルに入力可能な形で定量化する必要がある。そこで、実験により取得したロボットの位置・姿勢情報および力覚情報を用いて、反作用力の作用点と反作用力ベクトルを導出するアルゴリズムを開発した。

図4に反作用力の作用点および反作用力ベクトルを示す。図4では、エンドエフェクタの位置・姿勢に対して、加工対象から作用する反作用力の作用点と方向を矢印で示している。これにより、把持加工中に操作者が受ける力覚情報を、単なる力の大きさではなく、空間的な方向性を持つ情報として表現した。また、把持加工動作実験結果を用いて推定した反作用力の作用点および反作用力ベクトルを図5に示す。

図5は、ロボットの位置・姿勢情報および力覚情報から、加工対象からエンドエフェクタへ作用する反作用力の作用点と方向を推定した結果を示す。

把持加工動作では、手先位置や姿勢の変化は、

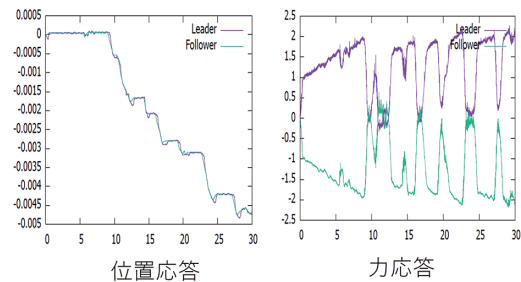


図3 把持加工動作実験結果

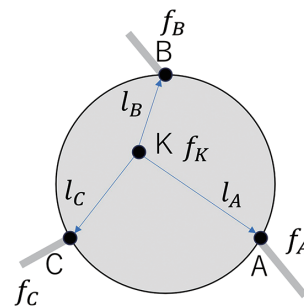


図4 反作用力の作用点および反作用力ベクトル

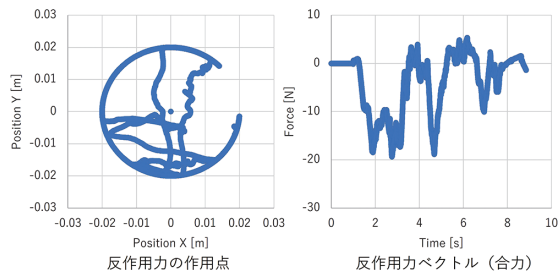


図5 把持加工動作時の反作用力の作用点および反作用力ベクトル

反作用力を受けた結果として生じる場合が多い。したがって、動作そのものを記述するだけでなく、その動作を生じさせる力覚情報を定量化することが重要である。また、反作用力の作用点を推定することで、対象物に対してどのような回転効果が生じるかを考慮できる。これにより、力の大きさだけでは説明できない把持姿勢変化を、反作用力ベクトルと作用点の関係から記述できるようになった。

本アルゴリズムにより、把持加工中に人間が受ける力覚情報を、動作生成モデルの入力として利用可能な形に変換した。これは、熟練者が感覚的に行っている姿勢調整をデータとして扱うための重要な処理であり、力覚情報に基づくスキルトランスファ技術の基盤となる成果である。

5. 動作生成モデルの構築

取得した反作用力ベクトルと把持姿勢の時系列データを用いて、次時刻における把持姿勢の変化を予測する動作生成モデルを構築した。モデルの入力には、人間が受ける力覚情報としての反作用力ベクトルと、リーダロボットの先端座標を用いた。出力には、次のステップにおけるフォロワロボットの位置または把持姿勢の変化量を設定した。これにより、現在の力覚状態と把持姿勢から、操作者が次にどのような姿勢調整を行うかを予測する構成とした。

図6に動作生成モデルの構成を示す。

図6では、反作用力ベクトルおよび現在の把持姿勢を入力し、次時刻の把持姿勢変化または



図6 動作生成モデルの構成

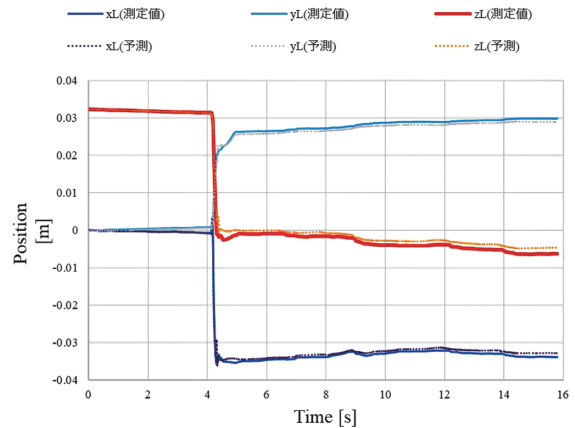


図7 動作生成モデルによる予測結果

フォロワロボットの位置を出力するモデル構成を示す。

また、動作生成モデルによる予測結果を図7に示す。

学習に用いていない評価用データに対して、モデルが予測した結果と実測値を比較した結果を示す。

評価用データに対する予測結果より、構築したモデルは、把持加工動作中に生じる姿勢変化の傾向を一定程度再現できることを確認した。これにより、人間が把持加工中に暗黙的に行っている、力覚情報に基づく姿勢調整の傾向を数理モデルとして表現できる可能性を示した。

この成果は、技能伝承の観点から重要である。熟練者は、接触時に生じるわずかな反力の変化を感じ取り、それに応じて把持対象の姿勢を調整している。しかし、その判断は経験的・感覚的であり、言語化が難しい。本研究で構築した動作生成モデルは、反作用力ベクトルと把持姿勢の関係をデータに基づいて学習することで、熟練者の暗黙的な姿勢調整を機械システムが利用可能な形で表現するものである。

また、本モデルは、単に過去の手先軌道を再

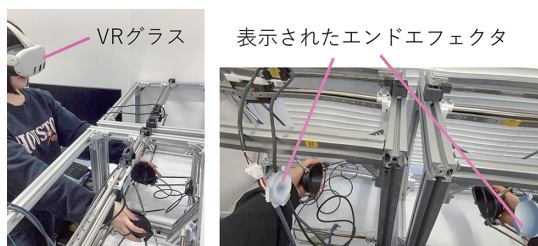


図8 動作教示システムの構成と理想把持姿勢の提示例

現するものではなく、現在の力覚情報を入力として次の動作を予測する点に特徴がある。このため、加工抵抗や接触点が変わった場合にも、力覚情報に応じた姿勢調整を提示できる動作教示システムへ発展させることができる。

6. 動作教示システムの開発

構築した動作生成モデルを用いて、操作者に理想的な把持姿勢を提示する動作教示システムを開発した。本システムでは、実験基盤から取得した力覚情報と把持姿勢を動作生成モデルに入力し、モデルが出力した次の望ましい把持姿勢を画像処理アルゴリズムにより可視化する。さらに、拡張現実インターフェースと統合することで、操作者が現在の姿勢と理想姿勢との差異を視覚的に確認できる構成とした。

動作教示システムの構成および画像処理アルゴリズムによる提示例を図8に示す。図8では、実験基盤で取得した力覚情報と把持姿勢を動作生成モデルへ入力し、算出された理想的な把持

姿勢を画像処理アルゴリズムおよび拡張現実インターフェースを介して操作者へ提示する流れを示す。また、現在の把持姿勢と、動作生成モデルが出力した理想的な把持姿勢を重畳表示する例をあわせて示す。

この提示により、操作者は現在の動作と目標とする動作の差異を視覚的に理解し、把持姿勢を修正しながら動作を習得できる。

このように、力覚情報の取得、動作生成モデルによる姿勢予測、画像処理および拡張現実インターフェースによる提示を統合することで、力覚情報に基づく把持加工動作の教示システムを開発した。これにより、熟練者の暗黙的な姿勢調整をデータに基づいて表現し、操作者に提示するための基盤を構築した。

[成果の発表、論文など]

1. 2025 年度精密工学会秋季大会学術講演会、「根軌跡法に基づくパラレルリンク型ロボットの位置・力ハイブリッド制御の設計法」, 楠鈴香, 桑原央明, 2025 年 9 月 18 日
2. 令和 7 年電気学会全国大会, 「面接触動作情報を推定・伝達するパラレルリンク型遠隔操作ロボット」, 楠鈴香, 桑原央明, 2025 年 3 月 19 日
3. The 32nd IEEE International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (2026 年 11 月中国開催) に投稿予定

最後に、本研究のご支援を頂きました公益財団法人立石科学技術振興財団に深く感謝の意を申し上げます。