

[研究助成 (A)]

優しく触れるロボットのための連続的接触遷移制御の理論究明

Investigation of continuous contact transition control for robots touching environments softly

2201003



研究代表者

立命館大学 理工学部
ロボティクス学科

助教 有田 輝

[研究の目的]

人間の身近で協働するロボットの実現のために、ロボット全身に実装可能なセンサを用いて接触に至った瞬間から接触力を制御可能な手法を開発する。

[研究の内容, 成果]

1. 基本となる制御手法

ロボットと物体が接触状態と非接触状態を遷移し、かつ接触時の接触力を制御する必要がある場合、非接触時には位置制御、接触時には力制御へ切り替える手法がよく用いられる。接触力を制御可能になるのは力制御への切り替え後であり、これは接触の瞬間以後であるため、接触の瞬間の接触力は制御できない。

これに対し接触の前後で一貫して力制御を実行可能にするため、光学式反射型センサの出力を反力のように解釈し、投光量の調整によってその反力の大きさを制御する手法を開発した。例えば、最終的に加えたい接触力と上記の反力の和をアクチュエータの駆動力として制御すると、投光量が0でない場合には物体と一定の距離を保つように動作し、投光量が0に近づくにつれて接近した後、最後には接触する。投光量が0になるとアクチュエータの駆動力は所望の接触力のみから決まるため、従来の力制御と同様の状態に帰着する。このような制御を以降で

は「接触遷移制御」と呼称する。

接触遷移制御の実現可能性を確認するため、図1に示す1自由度ロボットアームと光学式反射型センサを製作した。図1中の1-DoF NSPSがセンサである。本センサは内部のアナログ回路を用いて複数の受光素子の出力分布の重心位置と総量を演算することで、高速応答性、省配線性に優れている。アナログ演算回路の構成から Net-Structured Proximity Sensor: NSPS と呼ばれている。図1のセンサを内蔵したアームと、計測用の力センサを図2のように配置して実験を行った。

結果を図3に示す。図3の左上がLEDの目標電流値であり、これによって投光量を制御した。なお、図2の状態を関節角度が0 degの状態とした。

図3より、投光量の減少に伴って関節角度が減少し、図2の接触状態へ至ったことを確認で

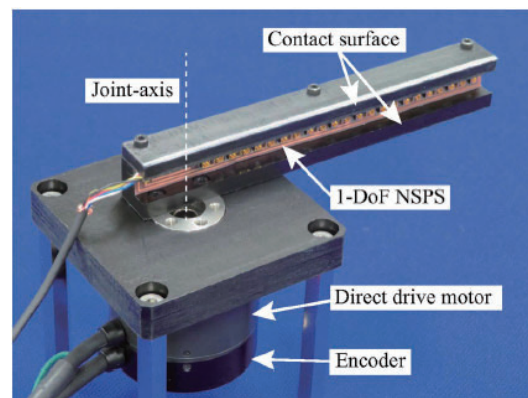


図1 1自由度アームとセンサ

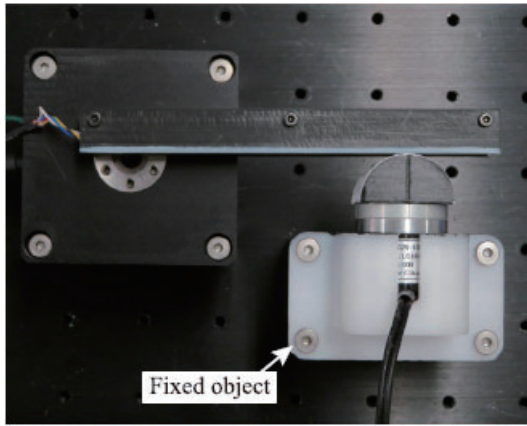


図2 アームと対象物（力センサ）の配置

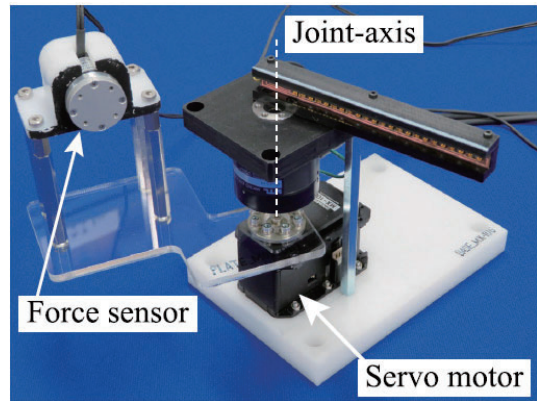


図4 対象物を動かす実験装置

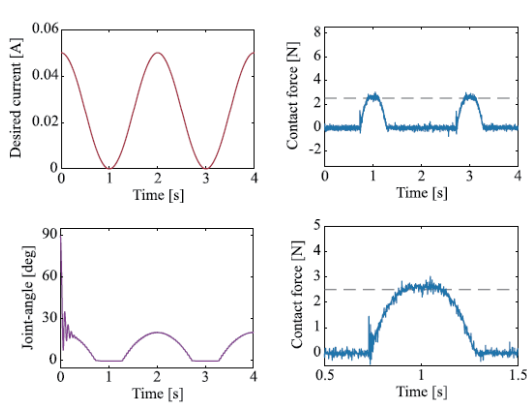


図3 投光量の調整によって接触と非接触の遷移を制御可能か確認する実験の結果

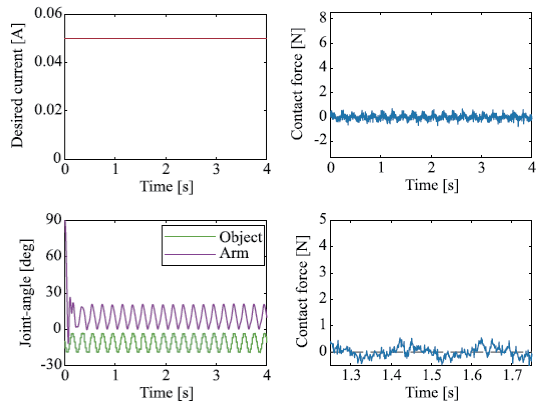


図5 動く対象物に対する実験結果（投光量の変化なし）

きる。また、投光量が0になる時に接触力が所望の値（図3中右列の点線）となったことも確認できる。

静止した対象物に対して接触遷移制御が実現できることを確認したため、次に運動中の対象物に対する実験を行った。実験には図4に示す装置を用いた。計測用のコントローラとは独立して動くマイクロコントローラでサーボモータを制御し、対象物に往復運動をさせた。

実験の結果を図5と図6に示す。図5には投光量を一定とし、対象物とセンサの距離が一定に保たれることを確認した際の結果を示す。図6では一定周期で投光量を0まで減少させ、接触遷移を実行した際の結果を示す。

図5の左下を見ると、対象物を動かすサーボモータの回転角度と、センサ出力を用いて制御されるアームの回転角度が常に一定の差を維持

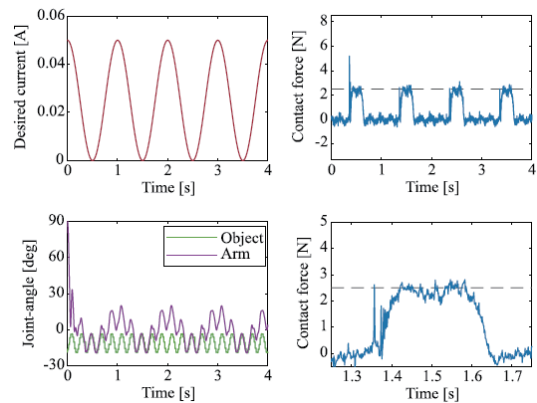


図6 動く対象物に対する実験結果（一定周期で投光量を変化）

して運動したことが分かる。また、図5右列に示す力センサの出力からは接触が起きなかったことを確認できる。以上より、本制御手法は投光量を一定に保つことによって運動中の対象物への衝突を防ぐことも可能であることを確認できた。

図6を見ると、投光量が0になる時刻で対象物とアームの回転角度が一致し、接触力が発生したことが分かる。また、その時の接触力は図6の右列に点線で示した目標接触力と一致したことを確認できる。以上より、運動中の物体に対しても接触遷移制御を実行できることを確認できた。

2. 投光量が0でないときの接触力の制御と対象物の位置変化への対応

投光量が0となるときに所望の接触力を加えられることが分かったので、次に投光量が0でないとき、つまり投光量を0にするまでの遷移中の接触力の推移を制御可能か調べた。本研究では、対象物の反射特性が既知であれば上記を実現できることを確認した。今回の検証では、反射特性を既知とするために事前実験を行った。事前実験では、投光量を変化させながらアームのある位置で接した対象物に対する反応量を取得し、これらの関係を示す近似式を求めた。使用するセンサは複数の受光素子の出力分布の総反応量だけでなく、その重心位置も演算して出力する。この重心位置出力と上記の近似式を利用することで、対象物の位置が変化しても所望の接触力となる投光量を求めることができる。

以上を実機実験により確認した。対象物の位置を変化させるために図7の実験装置を用いた。対象物の位置を固定したまま、目標接触力を変

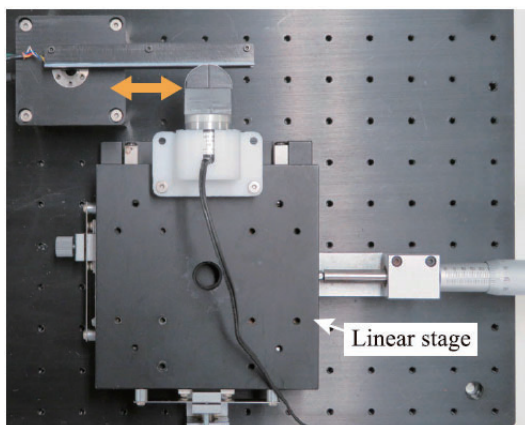
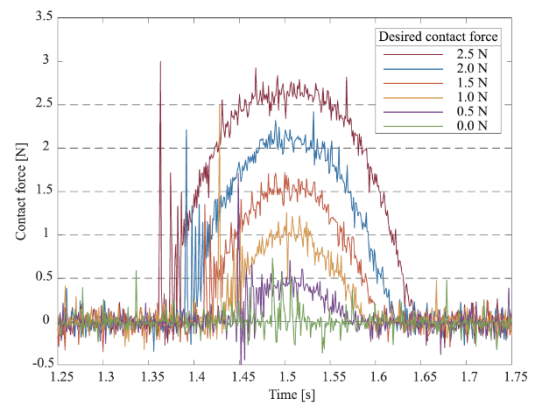
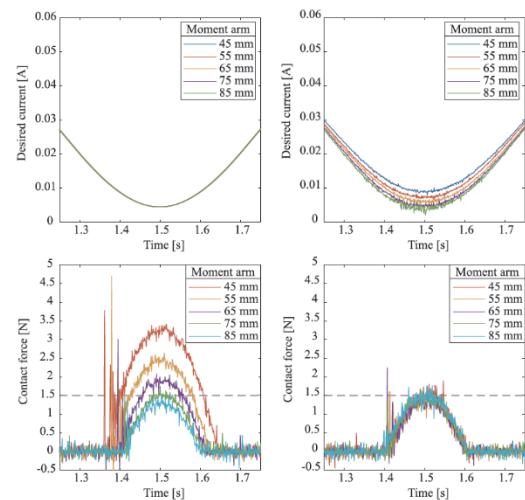


図7 対象物の位置を変化させる実験装置



(対象物の位置：関節軸から75 mm)

図8 目標接触力を変化させた結果



(左列：調整の制御なし、右列：調整の制御あり)

図9 対象物の位置を変化させた結果

化させた時の結果を図8に、目標接触力を一定にしたまま、対象物の位置を変化させた際の結果を図9に示す。

図8より、目標接触力の変化に伴って最小値を変化させた投光量によって、接触力を制御できたことを確認できる。

図9には比較のために接触力を調整する制御を無効化した際の結果を並べた。この結果より、接触力を調整する制御によって対象物の位置変化、つまりモーメントアームの変化による影響を打ち消し、所望の接触力を加えられたことを確認できる。

3. ロボットのリンク全体を被覆するセンサの開発

以上で開発した制御手法をロボット全身に拡張するために必要なセンサを開発した。開発したセンサの外観を図 10 に示す。

本センサは円柱状であり、リンクの側面を 360 度にわたって被覆することができる。また、上述の制御に関する実験で用いたセンサと同様に光学式反射型センサであり、内部にアナログ演算回路を有している。従来のアナログ演算回路では円柱状に構成した受光素子の出力分布から円柱座標系における重心位置と総反応量を演算することができなかつたため、今回は新しいアナログ演算回路を考案して実装した。

ロボットへの実装は 3D プリントを用いて造形した外殻を介すことにした。ロボットのリンク外形は円柱に近い形状であることが多いが、細かい凹凸があり、そのままではセンサを貼り付けられないため、外殻が必要と判断した。

本センサに関する詳細は本資料作成時点で未発表であるため、割愛させていただく。

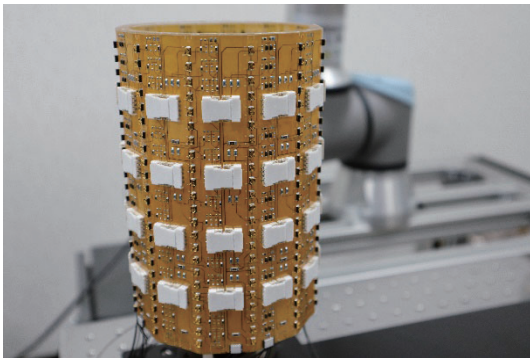


図 10 リンク全周を被覆可能なセンサ

4. 成果のまとめ

項目 1 では接触遷移制御の実現可能性を静的な対象物と動的な対象物の双方で検証し、確認した。次に項目 2 では接触遷移中の接触力を制

御する方法を考案し、この有効性を確認した。最後に接触遷移制御をロボット全身に拡張するためのセンサとして、円柱型のセンサ開発を行った。

項目 1 と 2 によって本研究テーマの目的である接触の前後で連続して接触力を制御する手法の開発を達成し、項目 3 によってその適用範囲を広げた。

[今後の研究の方向, 課題]

今後は開発した制御手法の適用範囲をより広げることを目指す。具体的には、項目 2 で考案した手法を適用可能な条件を緩めるために、対象物の反射特性を接触前に推定する手法の検討に取り組む。また、センサの被覆範囲を広げることにも課題となる。項目 3 で開発したセンサによって被覆範囲は大きく増加したが、まだ関節部のような形状が複雑な部位を被覆できないため、さらに新しいセンサの開発が必要である。

もう一つの方向性として、本制御手法とセンサの実用性の検討を考えている。開発した制御とセンサによってロボットは所望のタイミングに所望の力で接触できるはずである。この機能は人と協働するロボットに有用だと考えているが、この有用性を検証するためには実際の利用場面における妥当性や課題などを調べる必要がある。

[成果の発表, 論文等]

- [1] Hikaru Arita and Yosuke Suzuki, Contact transition control by adjusting emitting energy of proximity sensor, *Advanced Robotics*, VOL. 35, NO. 2, pp. 93-107, 2021.
- [2] 他 1 件投稿予定