

## 論文内容の要旨

氏名 嶋田 直樹

近年、産業用ロボットの工業的有用性は、益々存在感を増している。生産現場における生産力と高い製品品質の維持、また作業者の労働環境改善を図る目的から工場の自動化が盛んに行われ、数多くの生産機械が現場で用いられている。中でも、垂直多関節型を代表とする産業用ロボットはその汎用性の高さから、高速で正確な位置決め性能の向上とともに幅広い用途での利用を可能としてきた。将来的には、医療や介護といった分野での利用も期待されている。

しかし、接触を伴う作業への適用は依然として一般的ではない。その理由として、接触動作に適した力センサの低コスト化が不十分なこと、接触時に生じる衝撃力と環境の弾性特性に対する安定なモーション制御を実現する、有効な解決策が確立されていないためである。

本論文では接触動作に着目した産業用ロボットのモーション制御について、高性能な接触動作と、作業空間での接触する環境の保護を両立する手法について検討する。現在までのロボットの研究では、接触する以前と以後の制御方法は完全に分けて検討されていた。剛性の高い位置制御系や速度制御系は外力に対するロバスト性を重要視される一方で、接触動作に用いる力制御は外力に対して柔軟な動作を要求されるためである。本論文の提案法では、接触前と接触後を一連のモーション制御とし、接触検知から衝撃を生じる接触過程、そして安定した力制御による接触動作を、力センサを用いずに安定かつ速やかに実現することを目的としている。

本論文で提案する新しい要素技術として、摩擦変動に強いジャーク信号と動的閾値を用いた接触検知法、衝撃力に対する動力学ブレーキと積分器初期値更新によるスムーズな接触モーション制御、ロボットのモーションに連動する衝撃力を抑制する動的閾値の3つを、ロボット関節の軸ねじれ振動を考慮した外乱オブザーバを用いた力センサレス外力推定をベースとして構成されている。

まず、第一章では研究背景と本研究が解決しようとする課題、そして本論文の技術的な位置づけについて説明する。

第二章では、まずロボットと環境の接触運動について関節と環境の弾性特性を考慮した物理的な解析と考察を行い、ロボットと環境の接触モデルを構築した。次に、ロボットの軸ねじれ振動を考慮した外乱オブザーバを用いた外力推定について述べ、推定外力を用いたモーション制御系を構築することにより、力センサを用いることなく接触運動が可能であることを示した。さらに、ロボットの柔軟な接触運動を実現するモーション制御系として、仮想インピーダンス制御、加速度コントローラを用いた力制御系、また加速度コントローラを用いたPD力制御系から得られた速度制御ベースI-P力制御系についてそれぞれ比較している。これらの検討を通して、力センサレスI-P力制御系をベースとした接触モーション制御の実現のため、衝撃力による影響の低減

に特化したモーション制御法、推定誤差を含む推定外力による高感度で誤検知の少ない接触検知法の確立が重要であることを示す。

三章では、推定外力の時間微分である外力ジャーク信号と、慣性の影響で生じる外力ジャーク信号の推定誤差に着目した動的閾値を用いた力センサレス接触検知の手法を提案する。接触検知に外力ジャーク信号の動的に変化する閾値を用いることで、摩擦変動の影響を受けにくく、高加減速のモーションに対しても適切な閾値を自動的に決めることができ、誤検知によるロボットの不要な停止を回避することができる。

四章では、ロボットが環境に接触した際に生じる衝撃力を低減する運動エネルギーに基づくトルク制御によるブレーキ、速度制御ベース I-P カコントローラと衝撃力の力積を相殺する積分器の初期値更新によるスムーズな接触のモーション制御を提案する。提案法を用いることによって、接触後に生じる衝撃力を低減し、力制御による安定した接触運動に短時間で移行する。

五章では、ロボットと環境が接触する際に生じる衝撃力をリミットする動的な加速度閾値を提案し、ロボットの先端加速度をリアルタイムに制限することでロボットが環境と接触した場合でも想定する衝撃力を超えないモーション制御を実現する。運動エネルギーとロボットの先端速度から、ロボットの進行方向に対する仮想的な等価質量を新たに定義することで、衝撃力をリミットする先端加速度の閾値を定義する。この閾値を用いたモーション制御によって、接触時に想定した衝撃力を超えないモーションを実現することができる。

本論文で提案したモーション制御法を用いることによって、従来の非接触状態と接触状態を完全に分離して検討されてきた接触モーションの手法では解決が困難な、接触の瞬間に生じる衝撃力の低減、力センサレスでのスムーズな接触動作を可能にした。

本論文は、任意の作業環境の剛性や外力に対して、安定かつ速やかな接触制御と力制御を構成して高性能なロボットモーションを実現するので、工学的かつ工業的に意義のあるものである。