

氏名	かな おか かつ や 金 岡 克 弥
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学位記番号	工 博 第 2193 号
学位授与の日付	平成 14 年 9 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	工 学 研 究 科 機 械 工 学 専 攻
学位論文題目	Dynamics Analysis and Trajectory Control of Flexible Manipulators (フレキシブルマニピュレータの動力学解析と軌道制御)

論文調査委員 (主 査)  
教授 吉川恒夫 教授 土屋和雄 教授 足立紀彦

### 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、多自由度フレキシブルマニピュレータについて、

- (1)高精度な手先軌道制御を簡便に実現する軌道制御則の開発
- (2)柔軟梁の特性をとらえた動力学解析
- (3)漸近安定性の保証

を目的として、研究を行った成果をまとめたものである。論文は、序論と結論を含め6章からなっている。

第1章は序論であり、フレキシブルマニピュレータ研究の概要と意義について紹介し、手先軌道制御と動力学解析について、これまでの研究の問題点をまとめている。この問題点を解決するために、本論文の目的を明示し、提案する手法の概要について述べている。

第2章では、フレキシブルマニピュレータの複雑な動特性を必要とすることなく、各軸PID制御の高度化と柔軟マクロ／剛体マイクロシステムの利用によって、フレキシブルマニピュレータの高精度な手先軌道制御を簡便に実現する手法について提案している、すなわち、システムの動特性は一切未知であることを前提として、マクロ部としてのフレキシブルマニピュレータについて、運動学に基づく準静的補償制御則、準静的制振制御則を導出し、さらに剛体マイクロ部の構造的特性を利用した準静的補償制御則、準静的アクティブマスダンパ方式制御則を導出した。また、これらの制御則の適切な切り換えについても考察し、その効果を実験的に確認している。

第3章では、フレキシブルマニピュレータの動力学モデルを構築するため、動力学モデルの状態量を、視覚センサによって計測した運動の時系列情報から直接推定する手法を提案している。また、推定された状態量を含む、運動の時系列センサ情報から、フレキシブルマニピュレータの動力学モデルの全てのパラメータを同時に同定することが可能な手法を提案している。同定の際の最適化の評価規範として、「駆動トルク最小化規範」と「状態量誤差最小化規範」を提案し、実験データに基づいてこれら二つの規範の比較検討を行い、その効果を確認している。

第4章では、Euler-Bernoulli 梁や Timoshenko 梁では表現されない、「柔軟梁はその長さ方向に伸縮しない」という特性を適切に表現する動力学モデルとして「非伸縮柔軟梁」を導入している。非伸縮柔軟梁モデルに基づいて解析を行なうことで、フレキシブルビームでは、根元の駆動力は一方向のみ手先加速度として伝達されることを数値的に確認している。また、平面二自由度フレキシブルマニピュレータの手先加速度操作性について、柔軟リンクにオフセットなしに回転関節が取り付けられているフレキシブルマニピュレータでは関節駆動力は手先加速度に直接影響を及ぼさないが、剛体フランジを柔軟リンク根元に付加した場合、関節駆動力と手先加速度間に一自由度の線形関係が存在することを数値計算と実験によって確認している。これは、フレキシブルマニピュレータにおける厳密な手先軌道制御、インピーダンス制御の実現可能性についての重要な示唆を与える結果である。

第5章では、第1章で提案したような、簡便な手先軌道制御則をフレキシブルマニピュレータに適用する場合、その安定

性は必ずしも保証されないことから、受動性の概念に基づいて、任意の環境における任意のロボットマニピュレータ制御系の漸近安定性を保証することが可能なシステム構成を提案している。提案手法を実際にフレキシブルマニピュレータに適用して、その効果を数値計算と実験によって確認している。

第6章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。

### 論文審査の結果の要旨

本論文は、多自由度フレキシブルマニピュレータの簡便かつ高精度な軌道制御を実現し、またフレキシブルマニピュレータの動特性の本質を考察するために、(1)柔軟マクロ／剛体マイクロシステムを利用した手先軌道制御手法、(2)状態推定と動力学パラメータ同定手法の開発、(3)手先加速度に関する動特性解析、(4)漸近安定性を保証するシステム構成手法、についての研究をまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. フレキシブルマニピュレータの複雑な動特性を必要とすることなく、各軸 PID 制御の高度化と柔軟マクロ／剛体マイクロシステムの利用によって、フレキシブルマニピュレータの高精度な手先軌道制御を簡便に実現する手法について提案し、その効果を実験的に確認している。
2. フレキシブルマニピュレータの動力学モデルを構築するため、動力学モデルの状態量を、視覚センサによって計測した運動の時系列情報から直接推定する手法を提案している。また、推定された状態量を含む、運動の時系列センサ情報から、フレキシブルマニピュレータの動力学モデルの全てのパラメータを同時に同定することが可能な手法を提案し、その効果を数値計算と実験によって確認している。
3. Euler-Bernoulli 梁や Timoshenko 梁と比較して、フレキシブルマニピュレータの挙動をより正確に表現する「非伸縮柔軟梁」モデルを導入し、非伸縮柔軟梁モデルに基づいて解析を行なうことで、フレキシブルビームでは、根元の駆動力は一方向のみ手先加速度として伝達されることを数値的に確認している。また、平面二自由度フレキシブルマニピュレータの手先加速度操作性について、柔軟リンクにオフセットなしに回転関節が取り付けられているフレキシブルマニピュレータでは関節駆動力は手先加速度に直接の影響を及ぼさないが、剛体フランジを柔軟リンク根元に付加した場合、関節駆動力と手先加速度間に一自由度の線形関係が存在することを数値計算と実験によって明らかにしている。
4. 本論文で目標とするような、簡便な手先軌道制御則をフレキシブルマニピュレータに適用する場合、その安定性は必ずしも保証されない。そこで、受動性の概念に基づいて、任意の環境における任意のロボットマニピュレータ制御系の漸近安定性を保証することが可能なシステム構成を提案し、その効果を数値計算と実験によって確認している。

以上のように本論文は、多自由度フレキシブルマニピュレータの軌道制御手法の開発と動力学解析に関して基礎的かつ重要な知見を提供するものであり、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成14年7月23日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。