

氏 名	ほん け こう いち 本 家 浩 一
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	論 工 博 第 3371 号
学位授与の日付	平 成 10 年 9 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 2 項 該 当
学 位 論 文 題 目	産業用ロボットの運動と振動の制御・シミュレーションに関する研究

(主査)

論文調査委員 教授 松 久 寛 教授 垣 野 義 昭 教授 杉 江 俊 治

論 文 内 容 の 要 旨

産業用ロボットの需要の増大・適用分野の拡大と共に、多機能化・高速化・高精度化・軽量化等、要求される性能・スペックはますます厳しくなっている。ところが、産業用ロボットは、通常片持ちはり構造をとり、また駆動系に減速機などの弾性要素を有するため、非常に振動しやすい構造物であり、これの運動と振動の制御問題の検討はますますその重要性が高まるものと思われる。

このような背景のもと、本論文は産業ロボットの運動と振動の制御問題について、ロボットを振動しながら運動する柔軟構造物としてとらえ、運動性能に優れかつ振動の少ない制御手法の研究を、さらにこのような柔軟構造物の運動と振動をフレキシブルマルチボディシステムとしてとらえ、そのシミュレーション技術の研究を、実用性をふまえて実施した成果についてまとめたものである。

第1章緒論では、産業用ロボットにおけるダイナミクスに関する問題を明確にするとともに、運動と振動の制御の重要性について論じている。また本研究の位置付けを明確にし、その目的と概要について示している。

第2章では、弾性ロボットアームのセミクローズドサーボ系の動特性について考察した。産業用ロボットの最も簡単なモデルであるモータとアームが弾性要素で結合された1リンクロボットがモータの位置・速度のフィードバックのみを受けるセミクローズド位置PD制御を受ける場合を想定し、これの振動特性と制御ゲインとの関係について数値実験的に検討した。この結果、モータとアームの慣性比により、2重複素極もしくは3重実極を持つようにゲイン設定すれば、好ましい応答性・低振動性が得られることがわかった。さらにこの結果をふまえ、このような極配置となる最適PDゲインの設定式を解析的に導いた。また、慣性比が1:4の場合に最も優れた動特性が得られることがわかり、この慣性比を得るためのいくつかの方法について、入力に対する応答性と外乱に対する応答性を解析的に比較した。この結果、手法・ゲイン等が異なったとき、入力に対する応答性は同じ結果が得られるが、外乱に対する定常偏差については差が生じることを示した。

第3章では、弾性振動を考慮した外乱オブザーバを用いた、弾性ロボットの運動と振動の制御手法に関する研究を行った。まず、柔軟な関節を持つロボットマニピュレータに対して、計算トルク法と弾性振動を考慮した外乱オブザーバを併用する制御手法について論じた。次に1リンクロボットモデルのシミュレーションにより弾性振動を考慮した外乱オブザーバの性能について従来の外乱オブザーバとの比較・検討を行い、本研究で提案する手法では、制振性を損なうことなく外乱相殺が可能であり、従来の外乱オブザーバに対して制振性能面で優れた特性を有することを示した。また、実際の産業用ロボットに、実験的に、計算トルク法と弾性振動を考慮した外乱オブザーバを併用して適用したところ、優れた軌跡精度が得られることを確認した。さらに、この制御手法に共振比制御の概念を取り入れ、外乱推定値+弾性歪み推定値をフィードバックする制御則を導き、非常に良好な応答性・制振性が得られ、また外乱・モデル化誤差に対するロバスト性にも優れていることを示した。

第4章ではロボットアームのトルクむらに起因する共振現象の制振制御に関する研究を行った。最初に、機構系の減衰能

が非常に小さい場合に、モータ状態量の線形フィードバック制御では、この振動が低減することは非常に困難であることを示した。これに対して、このトルクリップルを相殺する補正信号をモータのトルク指令値にフィードフォワードする、トルクリップルバランス制御を提案した。また、このフィードフォワード用の補正信号導出に、ロータ振動の単面修正理論を応用した合理的な方法を考案した。さらにこの手法について、1自由度ロボットアーム実験機を用いた検討を行い、その効果、有用性を実証した。

第5章では柔軟ロボットの大変位運動解析手法に関する研究を行った。柔軟ロボットを、フレキシブルマルチボディシステムとしてとらえ、有限要素法に基づく動的シミュレーション手法について提案し、これの解析理論について示した。最初に有限回転の取り扱い方法及び大変位解析理論の基本概念について述べ、これを応用した、大変位1要素、大変位2節点要素、大変位多節点要素についての定式化を行った。また、大変位運動を考慮した低次元化手法を提案し、これの理論を構築した。理論展開の結果、本低次元化手法では、従来の微小変形を仮定した低次元化手法と比較すると、回転速度の2次成分に関する補正項が生じることがわかった。さらに、これらの要素を用いたいくつかの解析を実施し、その妥当性について論じた。

第6章では、第5章で提案したフレキシブルマルチボディシステムの動的シミュレーション手法を産業用ロボットの動作シミュレーションに応用した例について示した。最初に、制御系のダイナミクスを、構造系のダイナミクスに連成させる手法について説明した。次に、シリアルリンクロボットやパラレルリンクロボットを例に、制御系と弾性ロボットとの連成シミュレーションを実施し、本手法の有効性を確認すると共に、機構系の動特性と制御の動特性を連成問題としてとらえる必要性を示した。また閉ループ機構を有するような場合でも、問題なく解析できることを確認した。併せて、実験値との比較も行い、シミュレーション結果と実験値が良く一致することを示した。さらに、制御手法の検討や構造系剛性のロボットの精度に及ぼす影響の検討等をこのシミュレーション手法を用いて行い、その有効性について示した。

第7章は総括で、本研究で得られた成果を総括している。

論文審査の結果の要旨

本研究は、産業用ロボットの高精度化を目的に、この運動と振動の制御手法、及びシミュレーション技術についての研究成果をまとめたもので、得られた主な成果は以下のとおりである。

(1) 弾性ロボットアームのセミクローズドサーボ系に対して、位置PD制御を行う場合の動特性について考察し、この最適制御ゲインを解析的に求めた。また、慣性比により限界性能に差があることを示し、慣性比が1:4の場合に最も優れた動特性が得られることを示し、この慣性比を得るためのいくつかの方法について検討した。

(2) 弾性振動を考慮した外乱オブザーバによる制御手法について提案し、その性能について検討し、従来の外乱オブザーバと比較して制振性に優れていることを明らかにした。また、これに共振比制御の概念を応用したフィードバック則を導き、制振性やロバスト性に優れていることを示した。また、実際の産業用ロボットに本制御手法を適用し、実験的に優れた軌跡精度が得られることを示した。

(3) トルクむらを受ける弾性ロボットの共振問題について、ロータ不つりあいの単面修正理論を応用したトルクむら相殺制御則を提案し、実験的に優れた振動低減効果が得られることを示した。

(4) 大変位運動を行う柔軟ロボットを、フレキシブルマルチボディシステムとしてとらえ、有限要素法に基づく動的シミュレーション手法について提案し、有限回転運動の取り扱い、幾何剛性の定式化、大変位運動を考慮した低次元化手法等の解析理論を導いた。また、これらの手法の妥当性の検討や、産業用ロボットのシミュレーションに応用した例を紹介し、その有効性を示した。

以上要するに、本論文は産業用ロボットの高精度化を目的に、柔軟ロボットの運動と振動の制御及びこれのシミュレーションに関する実用的な手法を提案したもので、学術上、實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10年8月10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。