

審査の結果の要旨

氏 名 黄 守 仁

本論文は、「Dynamic Compensation Using High-speed Visual Feedback Based on Relative Coordinate (相対座標における高速視覚フィードバックに基づくダイナミックコンペンセーション)」と題し、英文で6章により構成されている。

従来のロボット制御では、機械的なバックラッシュや高速運動時の非線形ダイナミクス等に起因して、繰り返し動作以外ではロボットの高速かつ高精度マニピュレーションの実現は極めて難しい課題とされてきた。これらの誤差要因は、原理的に再現性が高いことから、繰り返し動作（プレイバック動作）に対しては、回避可能であったが、センサフィードバック制御のように繰り返し動作とならない場合には、これらの誤差要因がそのまま制御性能に影響し、繰り返し動作に比べて高い精度での動作の実現は困難であった。本論文では、この問題を解決するため、従来のロボット構成方法とは違って、高速かつ高精度なアクチュエータを手先に備え、高速ビジョンを用いた相対座標系に基づくフィードバック制御方法を提案し、実験システムによりその有効性を実証している。

第1章は「Introduction」であり、従来の産業用ロボットの構成方法並びに制御方法の現状をまとめるとともに、バックラッシュや非線形ダイナミクスの補償方法の現状と課題をまとめている。また、本論文で導入する高速ビジョン並びに高速ビジュアルフィードバックに関して、研究の現状と課題をまとめている。その上で、本論文の目的を述べ、本論文の構成を示している。

第2章は「The concept of dynamic compensation」と題し、本論文で提案するダイナミックコンペンセーションの概念を述べるとともに、その理論的基盤を述べている。さらに、基本的な要素技術である高速ビジュアルフィードバック並びにリアルタイムシステムの概要を述べた上で、基本的な動作として、point-to-pointの移動並びに正弦波振動の除去に対して、その動作特性を実験的に示すことにより、提案する方法の有効性を示している。また、提案した方法の様々な応用可能性を論じている。

第3章は「Improved algorithms based on relative coordinate high-speed visual feedback」と題し、従来のimage based visual servoの方法を概観し、その問題点を指摘するとともに、実際の動作を分析した上で、従来の方法とは違った簡略化した制御方法を提案し、その原理並びにシミュレーション結果と実装方法を述べている。この方法では、画像に含まれるエラー情報を高速ビジョンで抽出・処理することにより、高い周波数帯域まで包含したエラー情報が直接得られるため、その情報に基づき手先に取り付けた高速かつ

高精度のアクチュエータを制御し、結果として大域的収束性が確保された制御を実現する点に特徴がある。また、実装上の工夫として、プリコンペンセーションを導入したPD制御についてもその意義と効果を述べている。

第4章は「1D positioning: dynamic super picking」と題し、第3章で提案したダイナミックコンペンセーション手法の有効性を実証するため、1自由度の実験システムを設計・製作し、実証実験を行っている。このシステムでは、単純化された制御モデルやロボット本体と手先アクチュエータの協調アルゴリズムを新たに提案し、一次元高速ダイナミックピッキング実験として、未知の軌道を高速に運動する微小な飛翔体の捕捉実験を行っている。その結果、高速ビジュアルフィードバックや手先アクチュエータの時空間ダイナミクスが本体のロボットアームのダイナミクスをカバーすることにより、ランダムな位置から自由落下する小さいターゲットに対して高精度（許容範囲は $\pm 1.5\text{mm}$ ）かつロバスト（成功率は90%以上）なピッキングタスクを実現した。

第5章は「3D position and attitude regulation: peg-and-hole alignment」と題し、提案した方法を用いたもう一つの応用として、三次元位置と姿勢両方が未知の状態での高速ペグ・アンド・ホールアラインメント動作について述べている。位置調整と姿勢調整が独立ではなく、また、高速モーション時のロボットアームに非線形ダイナミクスが存在することから、ペグ・アンド・ホールアラインメント動作の高速化は難しいと考えられてきた。本論文では、ダイナミックコンペンセーションに基づいて、単眼と二眼の二つの方法によるペグ・アンド・ホールアラインメントを試している。ここでは、三自由度で軽量の高速アクティブペグを導入し、ビジュアル・コンプライアンス法を用いて、位置アラインメントと姿勢アラインメントを分離し、ペグ・アンド・ホールアラインメント動作を高速かつロバストに実現している。実際のシステムを用いた実験では、ランダムに設定されたホール（位置と姿勢両方未知）に対し、平均0.7秒でアラインメントを実現した。ペグの挿入成功率は85%（位置の許容範囲は $\pm 2\text{mm}$ の場合）を達成している。

第6章は「Conclusions」であり、本論文の成果をまとめるとともに、関連技術の将来の方向性を論じている。

以上要するに、本論文は、従来の産業用ロボットにおいて、高速ビジョンと手先に取り付けた高速アクチュエータを用いた制御方法を提案することにより、高速で正確な制御が可能となり、結果として、従来、繰り返し動作以外では困難とされてきた高速高精度な動作の実現方法を提案し、実際にいくつかのタスクに対してその有効性を実験的に示したものである。具体的に、ペグ・アンド・ホールアラインメント動作に対して、力センサ等を用いた従来法とは違い、カメラだけを用いて動作速度と柔軟性を実現するとともに、従来の方法とは違い、モーション分離と相対座標系高速ビジュアルフィードバックにより、より簡単で、柔軟性の高い制御方法を提案している。これらの方法は、三次元空間の絶対位置情報を必要としない制御方法であるから、カメラの設置位置と姿勢は柔軟になり、キャリブレーションの負担も少なく、システムを設計しやすいという特徴

がある。このことから、本研究に提案されたダイナミックコンペンセーション手法は汎用性があり、実現もしやすく、産業への応用に期待される。すなわち、本論文の成果は、今後の産業用ロボットの制御性能を飛躍的に向上させ、様々な応用を可能とするものであり、関連する分野の発展に貢献するとともに、情報理工学における創造的実践の観点からの価値が認められる。

よって本論文は博士（情報理工学）の学位請求論文として合格と認められる。