

審 査 の 結 果 の 要 旨

氏 名 李 堯 希

本論文は、「Image-Based and Position-Based Visual Servo for Automated Vehicles and Robots: Integrated Design of Control, Sensing, and Estimation (自律車両とロボットの為の画像ベースと位置ベースのビジュアルサーボ：制御・センシング・推定器の統合的な設計)」と題し、古くから研究がなされている画像を用いたフィードバック系において、近年進展が目覚ましい画像のセンシングアルゴリズムとそれを用いた各フィードバックの制御器と推定器の設計手法について取り扱ったものである。英語で記述された全9章により構成されている。

第1章では、近年のカメラを用いた自律制御を取り巻く状況について研究背景が述べられている。画像認識や特徴量抽出技術の進展により、カメラを用いたロボットの自律制御は今後ますます進んでいくと予想される。従って、それらを用いた制御手法や画像処理手法を取捨選択する設計指針は今後ますます重要になっていくと述べられている。本論文では、画像を用いた代表的な制御手法であるビジュアルサーボについて取り扱っており、第2-4章においては、2次元の画像情報をフィードバックするイメージベースの手法、第5-8章においては3次元再構成に基づく位置ベースの設計手法について議論されている。

第2章においては、画像の変位をロボットのフィードバック制御に用いるにあたって、高精度かつ検出判定性に優れた2次元フーリエ変換に基づく画像内変位推定手法とそのチューニング指針が提案されている。提案手法は従来の特徴点ベースの変位推定と比較して、パターンの曖昧な画像に強く、検出の成否を判定できることから意図せぬ動作を回避できることが期待されると述べられている。

第3章においては、第2章で開発したアルゴリズムを利用して得られる画像の変位の情報を用いてイメージベースのビジュアルサーボを設計し、実験にて実証がなされた。画像の特徴量に適切な座標変換を施すことによってイメージヤコビアンを時不変にすることができ、これによりイメージベースのビジュアルサーボにてフィードフォワード制御が実現できた。ロボットハンドに取り付けたカメラの動画を元に他のロボットへと動作を教示するという新たなアプリケーションの可能性が示された。

第4章では、第3章でのビジュアルトラッキングにおいて必要な画像変位の指令値を動画から精度良く求める手法について検討を行っている。指令値となる画像の変位を第2章の手法を用いて抽出する際、動画内の全てのフレーム間の対応の情報を元に尤もらしい指令値を計算する手法について述べられた。距離行列という行列を介することで疎行列などを用いた通常の重み付き最小二乗法よりも計算効率がよく、また生成された変位を用いることで精度の良いパノラマ画像を作成することも可能である。

第5章からは位置ベースの手法について述べられている。位置ベースでは認識と制御を分離

できるため、画像を用いた制御においてボトルネックとなる距離の曖昧性の克服手法について論が展開された。第5章では室内でのロボット車両の位置制御に必要となる位置情報の計算法として高所に設置したカメラとマーカに基づいて検証が行われた。粗動と微動を分けることにより追従性能と精度を両立したマーカトラッキング手法と車両ロボットに取り付けられたマーカの対床高度が不変なことを利用した位置推定により、単眼のカメラで約3mの距離から数mm単位の精度で位置を推定できることが示され、応用上価値のある結果が得られたとされた。

第6章では、ステレオカメラを用いた距離推定手法に関して述べられている。視差の対応が取れない近距離領域などにおいて単眼で得られる画像のテクスチャ情報を元にした相対的なスケーリング情報を組み合わせて位置ベースのビジュアルサーボにおいて精度を左右する距離をロボストに推定する手法が提案された。センサフュージョンで一般的に用いられる拡張カルマンフィルタの代わりに極配置を用いたスイッチングオブザーバを提案することでネックとなっていた推定の応答性の改善が報告された。

第7章では、第6章で推定した距離情報を元に実際に相対距離を制御する手法に適用する際のセンシングと状態推定器の設計手法の評価について考察を行った。例として自動運転の一つのフェーズである **Adaptive Cruise Control** の問題が挙げられており、車車間の距離制御の応答性を高めた高ゲインのケースでは極配置に基づくセンサフュージョンが有用であることが示された。

第8章では、センサや画像処理アルゴリズムによって発生する観測ノイズがどのように状態推定値や状態フィードバックを施した状態量、最終的な出力へと影響するかについてリアプノフ方程式を用いて理論計算する手法が示された。これにより、センサノイズとサンプリングが決まっている際の制御システムにおいて、定常状態での誤差が少なくなるような推定器の設計が可能になる。また、制御器と推定器を固定することで、事前にシミュレーションにて設計した系において誤差の大きさと処理時間のトレードオフから適切な画像処理アルゴリズムを選択する手法を明らかにした。

最後に、第9章では本論文を振り返り、提案手法の位置付けを行い、それぞれの関連性が述べられている。

以上これを要するに、本論文は産業ロボットから自律移動ロボットにわたる様々なシステムに適用可能なビジュアルサーボにおいて、位相相関を元に構成した時不変ヤコビアンを用いたビジュアルトラッキング制御法や、それに基づく高精度な動作推定法、ノイズと収束速度を考慮しつつスケール量と視差を統合したセンシング法等を提案することにより、制御・センシング・推定器を統合的に設計する革新的な枠組みの構築を行ったものであり、制御工学、電気工学、ロボット工学、画像工学への貢献が少なくない。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。