

審査の結果の要旨

論文提出者 妹尾 拓

本論文は「スウィング動作に対する高速ダイナミックマニピュレーションの研究」と題し、7章より構成されている。本論文は、運動速度と反応速度の高速化を追求した高速ロボットシステムを構築し、スウィング動作を軸とした3種類のダイナミックマニピュレーションを実現した成果が示されている。

第1章は「序論」であり、従来のロボットマニピュレーションの課題を整理し、その問題点を指摘したうえで、高速ロボットシステムの有用性を述べている。また、ダイナミックなマニピュレーションにおける高速化の意味を定義している。

第2章は「高速マニピュレーションシステム」と題し、高速に運動している対象物体に対して瞬間的に反応するマニピュレーションが可能なロボットシステムについて述べている。このロボットシステムは、手先最高速度6m/sのロボットアーム、0.1秒で180度開閉可能な多指ハンド、フレームレート1kHzの時間分解能を有したアクティブビジョン、多数の入出力ポートを備えたリアルタイム制御システムから構成されている。運動系のみならず認識系も高速化するという設計指針のもと、画像処理まで含めた視覚システムの処理速度を機械制御に必要なサーボレートと同等の1kHzまで引き上げることで、認識・運動能力を十分に発揮することを可能にしている。

第3章は「波動伝播に基づく高速スウィング動作」と題し、高速動作を実現するためのスウィング動作に関するモデルを提案し、シミュレーションにより検証を行っている。人間のスウィング時に観測される運動を参考にして、キネティックチェーンという平面的な運動連鎖と3次元的な多軸回転運動の慣性力伝播という（近似的に）直交する2つの運動を組み合わせた運動方程式を導出している。構築したモデルから、体幹から手先へ向けた力の伝播に大きく影響する要素を基底関数という表現で抽出し、それをタイミングよく重ね合わせることで手先速度の高速化を可能にしている。シミュレーションにより、体幹で発生したトルクが手先へ伝播していく効率的な高速スウィング動作を実現できることが示されている。

第4章は「ハイブリッド軌道生成に基づくバッティング動作」と題し、スウィング動作と同時に高速センサフィードバックによる追従動作を導入するための手法を論じている。手先速度に対する関節速度の影響やリンクごとの慣性負荷に依存する動きやすさを考慮することにより、スウィング動作と追従動作を直交分解して制御するハイブリッド軌道生成アルゴリズムを提案している。対象物体の軌道パターンに対するマニピュレータの運動を解析し、高速にスウィングしている最中の対象物体の軌道変化に対するマニピュレータの追従範囲や、時間遅れで生じた制御誤差に対する許容時間などを導出し、タスクを遂行するのに十分な補償ができることを明らかにしている。さらに、この方法

に基づく実験を行い、人間が任意に投げたボールをマニピュレータが打ち返すバッティング動作を実現している。

第5章は「衝突動作に基づく打ち分け動作」と題し、衝突動作を導入したスウィングマニピュレーションの手法を論じている。衝突現象をマクロに表現したニュートンの反発係数に基づく3次元剛体衝突モデルに基づき、摩擦による滑りの影響を小さくしたうえで、打撃後の対象物の軌道方向を制御すると同時に並進速度を大きくするための動作戦略を提案している。衝突時におけるマニピュレータの姿勢変化や速度変化に対する打撃制御への影響を解析し、対象物体の運動変化に対して視覚フィードバックにより打撃制御可能な範囲を十分に大きくできることを明らかにしている。さらに、この方法に基づく実験を行い、第4章で行ったバッティング動作を拡張した形式で、人間が投げたボールを指定された目標位置へ打ち返す打ち分け動作を実現している。

第6章は「多指ハンド制御によるスローイング動作」と題し、アームによる高速スウィングと同時に多指ハンドによる動作を付加したマニピュレーションを行っている。ハンドと対象物体の接触モデルから接触力の時間変化および指上での転がり距離を解析し、その結果を利用して把持状態からリリース状態へ効果的に遷移するリリース制御の手法を提案している。リリースのタイミングと方向の制御がそれぞれ対象物の並進加速度と並進速度に大きく影響することを考慮し、アームの高速スウィング動作によって出現する慣性力を利用することで、リリースのタイミング制御に遅れが生じても投球方向をロバストに保つような特徴を有している。この方法を用いた実験では、アームが高速にスウィングした状態で目標地点へ向けて多指ハンドでボールを制御するスローイング動作を実現している。

第7章は結論であり、本研究の成果がまとめられている。

以上要するに、本論文は、高速ダイナミックマニピュレーションにおいて、新たな設計思想に基づく制御手法を提案し、実際にその手法を用いたロボットシステムを構築し、いくつかの実験によって、その有効性を実証したものである。これにより、ロボットシステムの高速動作の可能性が、となる。特に、従来にない高速動作の実現は、ロボットの可能性を飛躍的に高め、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、システム情報学の進歩に対して寄与することが大であると認められる。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。