

論文の内容の要旨

論文題目 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

氏名 妹尾 拓

マニピュレーションはロボットの最も基礎的で重要な技能である。しかしコンピュータによるマニピュレータ制御の研究が50年以上経過した現在でも、人間と同等の運動能力を有した操りが実現されているとは言い難い。その一例として、従来のロボットは動作速度が遅いため人間のスポーツ時に見られるようなダイナミックな運動が困難であることが挙げられる。一般的に速い運動の制御ほど不安定かつ困難であることから、そもそも高速動作をマニピュレーションに適用することはほとんどおこなわれていなかった。そこで本研究では、高速化に主眼をおいたロボットシステム設計およびマニピュレーション方法を提案すると共に、スウィング動作に分類される「打つ」「打ち分ける」「投げる」というダイナミックマニピュレーションの実現を高速ハンドアームシステムによって試みた。

はじめに、運動系・感覚系の関係に着目し、高速性を追求したロボットシステムを構築した。高速マニピュレーションではロボットと対象物体とのあいだに生じる相互作用の不確実性が大きくなるため、ロボットシステムには運動部分のみならず認識部分の能力の高速化も要求される。一方、既存のロボットシステムはセンサの処理レートが非常に遅いといえる。たとえば視覚センサとして一般的に用いられているCCDはその処理速度が30Hzであり、ロボットアームの制御に必要なサーボレートが1kHz程度であることを考えると、センサ処理の遅れがボトルネックとなって運動能力を十分に引き出せていなかった。そこで本章では、画像取得および画像処理まで含めて1kHzで実行可能な視覚システムを導入することで、機械系のサーボ制御と同じサイクルタイムでセンサフィードバックをおこなった。これに加えて、運動系に関しても速度性能の優れたアームとハンドを導入している。特に多指ハンドに関しては、アームに搭載することを想定した軽量かつコンパクトな本体からは想像できないほどの高速な運動が可能となっている。このように機械システムの速度限界を追求するアプローチにより運動速度と反応速度を共に高速化していくことで、対象物体の運動の予測に基づく従来のロボット制御とは異なっており、高速に運動している物体に対してロボット自身も瞬間的に反応しながらマニピュレーションが可能なシステムを構築した。

次に、本研究で対象とするダイナミックマニピュレーションに共通のスウィング動作について解析した。動作速度の高速化に関する一般的なアプローチとして、動作全般に

関するトルク時系列軌道を最適化計算により求める方法があるが、この方法は内部のダイナミクスを陽に扱っていないために高速な運動を生み出している本質的な要素を理解しづらい。そこで本章では人間のスウィング動作で観測される運動を参考にして効率的な高速スウィング動作を実現するために、キネティックチェーンという平面的な運動連鎖と多軸回転運動の3次元的な慣性力伝播の2つの運動を直交に組み合わせた軌道モデルを提案した。そして高速動作を生成する要因を基底関数という表現で抽出し、関節角度レベルで腕の運動を記述することを可能にした。また、基底関数を波動と見なしたときの重ね合わせや位相遷移について考察して、モデルの妥当性を確認した。このスウィング動作に対して以下のキーテクノロジーを統合することで、3つの高速ダイナミックマニピュレーションを実現した。

1つ目は、高速センサフィードバックを導入することにより、手先の速度を高速化する動作と対象物体の運動をリアルタイムに追従する動作から構成されるハイブリッド軌道生成アルゴリズムを提案した。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、2つの動作を直交に分解して各自由度へ分散させて制御することで高速かつ滑らかな腕の運動を目指した。実験では人間がランダム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タスクを実現した。また動力学解析をおこない、高速にスウィング動作しているマニピュレータが対象物体の変動に対して十分追従可能であることや、時間遅れによる制御誤差が生じた場合でも追従動作によりそれを補償できることを確認した。

続いて2つ目は、高速運動の極限的な接触状態である打撃制御を導入したマニピュレーションをおこなった。ここでは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のもと、摩擦による滑りの影響を小さくしたうえで打撃制御可能な範囲を大きくする戦略として、並進速度・回転姿勢直交型のマニピュレータの運動計画を提案した。また、衝突時の腕の姿勢変化や速度変化に対する打球制御への影響をシミュレーションすることで、対象物体の軌道変動に対しても打撃制御が有効であることを確認した。この実験でも前述のバッティング動作と同様に高速視覚フィードバックを用いることで、人間が投げたボールをマニピュレータが目標の打球到達地点へ打ち返す打ち分け動作を実現した。

最後に3つ目として、多指ハンドによる対象物体のコントロールを導入することで、速さだけでなく器用さも追求したマニピュレーションの実現を目指した。ここでは指先リンクの運動が与える並進速度や並進加速度への影響を考慮すること、および腕の高速スウィング動作によって出現する指先での慣性力を巧みに利用することで、接触状態から非接触状態への状態遷移の制御をロバストにおこなう方法を提案した。また、ボール

のリリースタイミングや接触力の時間変化を解析することで、本戦略の妥当性を確認した。実験では、高速にスウィングしながらマニピュレータが目標地点へ向かってボールを投げるスローイング動作を実現した。