

高速駆動柔軟ロボットアームの状態推定と 振動制御に関する研究

学位論文内容の要旨

近年、工業応用分野にとどまらず、様々な場面にロボットが進出し、一般の人々にもロボットが身近になりつつある。産業用ロボットの構造としてはアーム型のものが一般的である。これらでは、各関節間の動力学的な干渉や非線形性を無視して、各関節を単純な1入力1出力系として扱い、目標軌道に追従させる方法が取られている。しかしながら、ロボットの動作が高速化すると動力学的な干渉や非線形性の影響が大きくなり無視することができなくなる。また、動力学的な干渉や非線形性を積極的に利用する研究も行われている。このようなロボットは自由度よりもアクチュエータの数が少ない劣駆動マニピュレータと呼ばれ、ロボットに存在する非線形性や関節間に生じる動力学的な干渉を利用することで非駆動関節を駆動する。

軽量、低エネルギー消費という観点から、ロボットマニピュレータの課題の一つは軽量化である。弾性による振動の発生を避け、高精度の位置決めを行うために、各リンクや関節の摺動部は頑健な構造がとられる。このためロボット本体の重量が増加し、可搬重量は非常に小さい。アームを軽量化するためには剛性を犠牲にする必要があり、ロボットマニピュレータは柔軟マニピュレータとならざるを得ない。この場合、リンクの振動や静的変形が無視できず、剛体マニピュレータと比べて位置決めの精度を低下させてしまう。柔軟マニピュレータの振動制御に関する研究は多いが、高速動作する柔軟マニピュレータに関する研究は少ない。柔軟リンクの振動を抑制するためには、振動の状態量を推定し状態フィードバックが行われる場合が多い。状態フィードバックを行うためにはすべての状態量を知る必要があるが、すべての状態量を検出することは多くの場合困難である。そこで制御対象の出力から状態推定を行うことが必要となる。高速動作するロボットアームでは、低速で動作する場合と比べて、非線形性や関節間に生じる動力学的な干渉の影響が大きくなる。非線形性や干渉の影響を補償する機能を持たない状態推定器(オブザーバ)の推定精度は低下するため、推定された状態量をフィードバックしても、期待する制御性能は得られない。正確な状態推定を行うためには、不確かさや外乱を積極的に推定器に加え、実際のモデルの挙動との差異を小さくする必要がある。そのため状態推定がロバストであるためにはオブザーバに未知の外乱や不確かさを再現するための機能を組み込む必要がある。

本研究では、ゴルフスイングロボットを一種の柔軟リンクを有する高速動作柔軟アームと考え、状態フィードバックによってダウンスイング後の制動時に生じる衝撃や振動を抑制した。スイングロボットのモデルには、手首関節を非駆動関節とし、スイング動作を行うためにゴルフクラブの弾性とアーム型ロボットが有する非線形性および動力学的な干渉を利用するというゴルフスイングロボットモデルを採用

した。このモデルでは、クラブのスイング時において、非駆動関節の駆動力として、非線形性や動力学的な干渉を利用する。そのため、制御対象を線形化する手法を用いることができないという特徴を持ち、一般的なオブザーバを用いた状態の推定は困難となる。ここでは、応答が高速という意味ではなく、アームの回転角速度が大きいという意味でアームを高速に駆動することになり、遠心力やコリオリ力等に起因する非線形性が低周波数領域において大きくなると考えることができる。そこで、特に低周波数領域における状態推定の性能を改善するために、オブザーバを、実システムの出力を目標値とする1型サーボ系として構成した。安定性を考慮した結果、このオブザーバは推定誤差に対する積分器をシステムに組み込んだ形となった。実験およびシミュレーションを行い、このようなオブザーバを用いることによって、より正確な推定値を得ることができ、柔軟リンクの振動を抑制できることを示した。さらに、ボールをインパクトした場合についての検討も行っている。ボールをインパクトした場合、柔軟リンク先端への入力インパルス入力状の入力となり、高次モードを励振する。この場合スピルオーバーを起こす可能性があるが、このオブザーバは、センサ出力に対するローパスフィルタの性質を持ち、スピルオーバーを抑制しているものと考えられる。

本論文は全5章で構成されている。以下に各章の概要を示す。

第1章では、従来の研究と本研究の位置づけならびに意義さらに各章の概要について述べた。

第2章では対象とする問題の数学モデルを導出した。ゴルフスイングロボットを一種の柔軟リンクを有する高速動作柔軟アームと考え、ゴルフロボットの詳細な数学モデルを構築した。ゴルフクラブをオイラー-ベルヌーイはりとしてモデル化し、固有振動モードを用いて運動方程式を展開することにより状態方程式を導出した。ここでは、クラブヘッドの重心がシャフトの軸上に存在しないために生ずる、曲げとねじれの連成を考慮している。

第3章では制御系について述べた。正確に状態推定を行うと同時に、制御対象に入力された外乱を推定する状態推定器について述べ、簡単なモデルを用いて状態推定および外乱推定の精度に関する考察を行った。さらに、ゴルフロボットについて、テイクバック動作、ダウンスイング終了後の制動動作のための制御器を構築した。これらは状態推定器によって得られた状態量を状態フィードバックすることで実現し、柔軟リンク(ゴルフクラブ)の振動を抑制する。

第4章では、はじめに実験装置の構成を示した。次に実験モード解析により柔軟リンク(ゴルフクラブ)の固有振動数および固有振動モードを求め、柔軟リンクのヤング率等のパラメータを同定した。第3章で設計した制御系を適用し、ゴルフスイングロボットのシミュレーションおよび実験を行った。シミュレーションにより、同一次元オブザーバと比較して、本研究で導入した状態推定器がパラメータ変動に対してもよりロバストであることを示した。さらに高速動作中においても正確な状態量の推定値が得られることを確認した。また、スイング動作を評価する評価関数を導入し、ボールを確実にインパクトするために最適なフィードフォワードトルク計画を調べた。最後に実験により外乱状態オブザーバを用いた振動制御の有効性を示した。

第5章は結論であり、本研究を通じて得られた成果を取りまとめた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 小 林 幸 徳

副 査 教 授 佐々木 一 彰

副 査 教 授 鍵和田 忠 男

副 査 教 授 成 田 吉 弘

学 位 論 文 題 名

高速駆動柔軟ロボットアームの状態推定と

振動制御に関する研究

アーム型ロボットは、産業用ロボットとして広く用いられている。これらでは、弾性による振動の発生を避け、高精度の位置決めを行うために、各リンクや関節の摺動部は頑健な構造がとられる。一方、低コスト、低エネルギー消費という観点から、ロボットアームの課題の一つは軽量化である。アームを軽量化すると剛性が低下し、ロボットアームは柔軟な構造となる。この場合、アームの振動や変形が無視できず、剛体アームと比べて位置決めの精度が低下する。また、アーム型ロボットの動作が高速化すると、動力的な干渉や非線形性の影響が大きくなる。状態フィードバックによって柔軟アームの振動を抑制するためには、すべての状態量を知る必要があるが、すべての状態量を検出することは多くの場合困難である。そこで制御対象の出力から状態推定を行うことが必要となる。高速動作するロボットアームの状態推定に、動力的な干渉や非線形性の影響を補償する機能を持たない状態推定器（オブザーバ）を用いた場合、その推定精度は不十分であり、期待する制御性能は得られない。正確な状態推定を行うためには、オブザーバに未知の外乱や不確かさを再現するための機能を持たせる必要がある。

本論文では、柔軟リンクを有する高速動作柔軟ロボットアームであるゴルフスイングロボットの状態フィードバック制御において、動力的な干渉や非線形性の影響を補償する機能を有するオブザーバを提案している。本研究で用いるスイングロボットでは、手首関節を非駆動関節とし、スイング動作を行うためにゴルフクラブの弾性とアーム型ロボットが有する非線形性および動力的な干渉を利用している。そのため、制御対象を線形化する手法を用いることができず、一般的なオブザーバを用いた状態推定は困難となる。ここでは、応答が高速という意味ではなく、アームの回転角速度が大きいという意味でアームを高速に駆動することになり、遠心力やコリオリ力等に起因する非線形性が低周波数領域において大きくなる。そこで、特に低周波数領域における状態推定の性能を改善するために、オブザーバを実システムの出力を目標値とする1型サーボ系として構成している。その結果、このオブザーバは推定誤差に対する

積分器をシステムに組み込んだ形となっている。本論文では、実験およびシミュレーションを行い、提案するオブザーバを用いることによって、正確な状態推定値を得ることができ、柔軟アームの振動抑制において有用であること示している。さらに、ボールをインパクトした場合についての検討も行っている。ボールをインパクトした場合、ゴルフクラブ先端への入力はいんパルス状となり、高次モードを励振する。この場合スピルオーバーを起こす可能性があるが、このオブザーバは、センサ出力に対するローパスフィルタの性質を持ち、スピルオーバーの抑制にも寄与している。

本論文は以下の全5章で構成されている。

第1章では、従来の研究と本研究の位置づけならびに意義について述べている。

第2章では対象とするゴルフロボットの詳細な数学モデルを構築し、固有振動モードを用いて運動方程式を級数展開することにより状態方程式を導出している。ここでは、クラブヘッドの重心がシャフトの軸上に存在しないために生ずる、曲げとねじれの連成を考慮している。

第3章では制御系について述べている。正確に状態推定を行うと同時に、制御対象に入力された外乱を推定する機能を有する状態推定器について述べ、簡単なモデルを用いて状態推定および外乱推定の精度に関する考察を行っている。そして、ゴルフロボットについて、テイクバック動作とダウンスイング終了後の制動動作のための制御器を、状態推定器によって得られた状態量を状態フィードバックすることで実現している。

第4章ではシミュレーションと実験の比較ならびに考察を行っている。シミュレーションにより、同一次元オブザーバと比較して、本研究で導入した状態推定器がパラメータ変動に対してもロバストであることを示し、さらに高速動作中においても正確な状態量の推定値が得られることを確認している。そして、ゴルフロボットを用いた実験により提案する状態推定器の有効性を確認するとともに、シミュレーションとの比較・考察によってその特性を明らかにしている。

第5章は結論であり、本研究を通じて得られた成果を取りまとめている。

これを要するに、著者は、高速駆動柔軟ロボットアームの振動制御において、動力学的な干渉や非線形性の影響を補償する機能を有する状態推定器を提案し、その有用性に関して有益な知見を得たものであり、機械工学および制御工学の進歩に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。