

論文内容の要旨 Abstract of Dissertation

氏名Name 矢吹 明紀

ものづくりの現場において導入される分野の拡張に伴い、産業用ロボットの高速化と軽量化が進み、1次共振モードに加えて2次共振モードの克服が制御性能の向上に必須となってきている。特に、用途拡大により外乱トルクに対する2次共振モードの振動は新しい課題となっている。

2次共振モードを考慮したモデルとして従来用いられる3慣性は軸ねじれの位置や外乱トルクについて明確なシステムを対象としていた。産業用ロボットの減速機の場合、複数存在する軸ねじれによる2次共振モードをもつ際は従来の3慣性モデルとして扱われ、軸ねじれ位置および外乱トルクに対する解析が不十分であった。そのため、2次共振モードをもつ際の振動抑制を実現する際に、力制御における環境反力に対する高速化の実現が難しく、位置・速度制御においては、外乱トルク応答に対する振動抑制が重要となる。そのため、2次共振モードを有するシステムに対し広帯域かつ振動抑制を実現するには目標値応答と外乱トルク応答の両方に対するモデル化および2次共振モードを考慮した制御系の構築を行う必要がある。

本論文では、2次共振モードをもつ産業用ロボットの関節軸に対し、軸ねじれ位置について減速機の構造、モータトルクおよび外乱トルクの伝達特性についてより解析を行い、ハンマ試験を用いた物理的な解析により制御モデルを構築する。従来の3慣性モデルではねじれ剛性は直列接続されたモデルであったため、モデルに対する各トルクの伝搬経路はそれぞれ1つであった。減速機の構造では、モータと接続する入力ギアとアームと接続する中継ギアの間にて従来の支配的なねじれ剛性が存在し、ロボットの姿勢や動作条件により、アームと中継ギア間にて新たなねじれ剛性の影響が顕著となることが構造解析より確認される。これにより、減速機においてモータトルクの伝搬経路は1つであるのに対し、外乱トルクの伝搬経路はアームから直接中継ギアに伝達する経路とねじれ剛性を介して伝達する経路の2つが存在することが確認される。したがって、従来の3慣性モデルでは外乱トルク入力において二つの共振周波数をもつ特性に対し、減速機における3慣性モデルでは外乱トルク入力において2つの伝搬経路をもつため、二つの共振周波数に加えて反共振周波数をもつ特性であるとされた。この反共振周波数は、ハンマ試験による外乱トルク特性の解析結果より反共振周波数の存在が確認され、従来の3慣性モデルでは存在しない、新しい外乱トルク伝達項の存在が実機実験により立証された。新しい外乱トルク伝達項を考慮した提案する3慣性モデルにより、サーボ剛性が低い力制御とサーボ剛性が高い速度制御の両方に対する振動抑制制御系を広帯域に実現する。加えて、従来の産業用ロボットの1次共振モードだけの制振制御系を用いた際の2次共振モードに対する抑圧を実現する共振抑圧外乱オブザーバを用いた新しい電流制御を提案する。提案する3慣性モデルおよ

び振動抑制手法を用いることにより、2次共振モードをもつ産業用ロボットの高性能化を実現する。

第1章では、産業用ロボットにおける研究背景と動機および目的について説明する。

第2章では、産業用ロボットの関節軸における減速機の構造と軸ねじれ位置について解析を行い、モータトルクおよび外乱トルクの伝搬経路および外乱トルク入力における反共振周波数をもつ特性を構造解析より示す。この反共振周波数について、ハンマ試験によるインパルス状の外乱トルクの入力時における外乱特性に対する解析より物理的に立証し、外乱トルクの伝搬経路が二つ存在することが実機実験により実証された。この特性は遊星歯車装置および波動歯車装置、別社製の産業用ロボットにおいて同様に確認し、産業用ロボットの関節軸における共通して発生する現象であることを実証した。そのため新しい負荷トルク伝達項を考慮した3慣性系モデルは、今後軽量化かつ高速化を目指す産業用ロボットの位置・速度制御に加えて接触対象からの負荷反力に対する力制御における振動抑制を実現するのに重要であることを示す。

第3章では、新しい3慣性系モデルに基づく産業用ロボットの振動抑制について検討を行う。振動抑制については状態フィードバックを用いることとし、サーボ剛性が低い力制御とサーボ剛性が高い速度制御の両方に対する振動抑制制御系の広帯域化を実現する。特に力制御においては、接触対象である環境に対する環境反力に対する動特性を考慮したモデル化が重要となる。そのため、3慣性系において新しい負荷トルク伝達項を考慮することにより、精密な環境反力を含めたプラントシステムをモデル化でき、モデル化した3慣性系の整合性の検証および振動抑制に対する有効性を実機実験により立証した。

第4章では、従来の1次共振モードに着目した2慣性系モデルに基づく制御系を用いた際の2次共振モードによる振動が問題に対し、振動抑制を実現する新しい電流制御系を提案する。2慣性系に基づく制御系を用いた際に対象としていない2次共振モードにより残留振動が発生する問題があるため、2慣性系にて着目していない2次共振モードの振動抑制ループをもつ電圧外乱オブザーバを用いた電流制御系を設計する。これにより、電流制御系にて2次共振モードの抑圧、外側の位置・速度制御系にて1次共振モードの抑圧を実現し、提案する制御系の有用性を実機実験により立証した。

最後に、第5章にて2次共振モードを有する産業用ロボットにおいて外乱特性に着目した3慣性系の振動抑制の観点から、本論文での成果および今後の課題について言及する。本論文にて検討・提案した手法を用いることにより、2次共振モードをもつ産業用ロボットに対する振動抑制を実現でき、産業用ロボットの更なる高性能化を図ることが可能になる。

本論文は、2次共振モードを有する産業用ロボットの関節軸モデルに対し、目標値特性に加えて外乱トルク特性について明確にモデル化を行い、新しい外乱トルク伝達項について学術的に明らかにし、2次共振モードに対する外乱特性を考慮した振動抑制について独自性を有する。