

論文の内容の要旨

論文題目 General Framework and Industrial Application of
Two-Inertia System Control with Effective Use of Load-Side Information
(負荷側情報を有効に用いた2慣性系の制御の一般的枠組とその産業応用)

氏 名 山田 翔太

本論文で扱う制御対象は、工作機械のボールねじ駆動ステージや精密位置決めステージ、産業用ロボット、福祉ロボット、電気自動車、HDD、圧延機等、多岐に亘る。これらの制御対象では、メカトロニクス制御技術が発展し制御系の応答速度が飛躍的に向上したため、機械系の共振を励起してしまい、制御性能が劣化する問題が発生している。工作機械のステージにおいてはボールねじ部やナットの変形、ロボットや自動車においてはベルトやギアといった駆動伝達機構の変形、HDDにおいてはヘッド部の変形、圧延機においてはモータとロール間の軸のねじれが、共振の主要因となる。従来、これらの制御対象は、駆動側、伝達部、負荷側の3要素から構成される2慣性系にモデリングされ、30年以上に亘り研究が盛んになされてきた。

2慣性系が30年以上に亘り盛んに研究されてきた理由は、その汎用性によるところが大きい。また、複数の共振モードを持つシステムにおいても主に1次共振モードが制御帯域を制限するため、2慣性系にモデリングして扱うことが多い。本論文で提案される全ての制御手法は、1次の共振特性を表現できる2慣性系モデルを対象としたものであるため、産業界で使用されている様々な制御対象に適用可能である。

また、ロボティクスの発展に伴い、人間と同じ生産ラインで協調して働ける産業用ロボット（協働ロボット）が要求され始め、福祉の分野では高齢者や障害者の方々を介護することのできる介護ロボットが求められ始めている。このような人間と同じ環境の動作を求められるロボットには、人に危害を加えないような人間親和型モーションコントロールが求められる。したがって現在産業界では、人間親和型モーションコントロールを可能にする力の制御が求められている。

従来、工作機械や産業用ロボット、福祉ロボット等の分野では、駆動側エンコーダを

用いて駆動側情報をフィードバックするセミクロズド制御が一般に行なわれていた。しかしセミクロズド制御では、低剛性な伝達機構部の軸ねじれにより、最終位置決めをする負荷側における制御精度が劣化してしまう。更にギアやボールねじ等の伝達機構は低剛性であるだけでなく、バックラッシュ等の非線形要素を含むため、負荷側の制御精度が劣化してしまう。そこで、精度向上のため、駆動側だけでなく負荷側にもエンコーダを用いてフィードバックするフルクロズド制御の採用が増加してきている。

産業界における急速なエンコーダの高分解能化及び低コスト化が、フルクロズド制御の採用を増加させている。産業用ロボットのロータリーエンコーダとして、24 bit といった高分解能エンコーダが用いられるようになっており、コストに関しても、100万パルスエンコーダが10年前の100分の1程度の価格になっている。そのため、精密位置決め分野だけでなく、様々な分野で高分解能エンコーダが用いられるようになってきた。更にエンコーダの耐環境性が向上しているため、自動車分野等の現在レゾルバが用いられている分野でも、今後エンコーダの適用が進むと考えられる。高分解能エンコーダの普及に伴い、今後加速度やジャークといった高次状態量を有効に活用する制御則が求められていくと考えられる。

要求精度の向上及び高分解能エンコーダの低コスト化という2つの産業界の流れから、負荷側に高分解能エンコーダを持つ装置が増加している。しかし、このような産業界の流れがあるにも関わらず、負荷側高分解能エンコーダ情報を有効に用いた制御則の研究が十分にされているとは言い難い。そこで本論文では、負荷側高分解能エンコーダ情報を有効に用いた制御法を提案する。主たる2慣性系の被制御量である負荷側位置、加速度だけでなく、近年の力制御への要求も鑑みて、軸トルクや負荷側外力の制御・推定に関して、負荷側情報を有効に使用した制御法を提案し、その有効性をシミュレーションや実験によって示している。

第1章、第2章においては、それぞれ研究背景や実験機に関して述べられる。実験機として、精密位置決めステージ、モータベンチ、産業用ロボットモジュール、インホイールモータ駆動式電気自動車の4つが用いられるが、すべて2慣性系としてモデリングし、2慣性系の制御手法を適用する。

第3章においては、負荷側位置制御に関して、制振制御、バックラッシュ補償、制御器設計の簡単化という3つの観点から行われた研究が詳細に述べられる。制振制御と制御設計の簡単化に関する研究においては、駆動側エンコーダと負荷側エンコーダを双方用いる制御法と比べて同等の性能を高分解能負荷側エンコーダのみで実現するという、2慣性系の制御の従来の常識を覆す学術的に画期的な研究である。バックラッシュ補償に関

しては、バックラッシに起因する衝突緩和に取り組み、従来の衝突緩和法では位置応答のオーバーシュートが大きくなり、制御性能と衝突緩和量に関してトレードオフがあったが、物理現象への詳細な考察から生まれた適切な切替え条件を持つ制御器の適用により、トレードオフの緩和を実現する。

第4章では、負荷側加速度制御に関して述べられる。自動車は、車体側（ばね上）と車輪側（ばね下）がサスペンションという柔軟な伝達部によって繋がれた2慣性系と捉えることができる。駆動源であるモータがばね下に収められるインホイールモータ車両では、ばね下が駆動側、ばね上が負荷側となる。乗り心地及び運動性能の改善のため、負荷側である車体の前後振動を抑制する前後加速度制御を提案する。前後振動は、広く研究されている上下方向の振動に対して周波数帯が高く、高帯域制御が可能なインホイールモータ車両でないとその抑制は難しく、まだ研究は多くない。本研究では、正確な周波数特性測定によって可能になった、更に高域に存在するインホイールモータユニット内の減速機に起因する回転方向のモードまでも考慮した制御法を提案し、実際のインホイールモータ車両において、その有効性が示される。

第5章では、軸トルク制御に関して述べられる。市場への協働ロボットの登場により、力制御への注目が急速に高まっており、力制御への高性能化が求められる。負荷側位置決め精度向上のために産業界で用いられ始めている負荷側エンコーダが、力制御においても有効に利用できることを示す。負荷側情報の利用により、ギア等に内在するバックラッシを陽に補償することが可能になり、精密な軸トルク制御が実現される。

第6章では、軸ねじれ角制御に関して述べられる。負荷側情報を有効に活用した軸ねじれ角の精密な制御によって、バックドライバビリティの改善が可能になる。バックドライバビリティとは、負荷側から力を加えたときにどれくらい軽く感じるかという指標であり、協働ロボット等における人間とのインタラクティブな動作に不可欠なものである。提案制御法は、従来2慣性系の制御において性能劣化の原因として広く知られているバックラッシをあえて積極的に用いることで、バックドライバビリティの改善を図る斬新な手法である。また、制御対象が人間等の環境と接触するシチュエーションを考慮し、負荷側エンコーダの有無が人間親和型モーションコントロールという観点で、どれくらいの性能差をもたらすのかをシミュレーション及び実験によって定量的に評価している。

第7章では、負荷側外力推定に関して述べられる。人間と同じ環境で働くことを要求される協働ロボットや、工作機械、自動車等は、系に外部から加わる力をモニタリングする必要性や、モニタリングにより性能が向上する可能性がある。負荷側情報を有効に

活用することで、従来の推定手法に比べて、2慣性系のプラントパラメータのモデル化誤差及び測定誤差に対してロバストな推定が可能になる。更に、パラメータやセンサノイズの分布を正規分布と仮定したときには、推定された外力の分散が理論的に最小となる設計法を提案し、その有効性をシミュレーションと実験によって示す。

最後に、結論が第8章で述べられる。

今後、要求精度の向上及び高分解能エンコーダの低コスト化というこの2つの産業界の流れは加速し、負荷側におけるエンコーダの利用はますます広がっていくと予想され、負荷側のエンコーダ情報が得られる系における新たな制御法が強く求められている。本論文で提案される全ての制御法は、この産業界からの要請に応えるものであり、今後その重要性が高まるものである。