

## 審査の結果の要旨

氏名 山田 翔太

本論文は、「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)」と題し、古くから研究がなされている2慣性系の制御において、近年その利用が可能になってきた負荷側センサの情報を有効に活用した制御技術を統括的に取り扱ったものである。英語で記述された全8章により構成されている。

第1章では、近年の産業界の流れを含む研究背景が述べられている。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つの産業界の流れが加速していることから、負荷側におけるエンコーダの利用は益々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ることが述べられている。

第2章においては、実験機に関して述べられている。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つが用いられており、全て2慣性系としてモデリングされ、2慣性系の制御手法が適用されている。

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、制御器設計の単純化という3つの観点から行われた研究が詳細に述べられている。制振制御と制御設計の単純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、バックラッシュに起因する衝突緩和に取り組んでいる。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が実現されている。

第4章では、負荷側加速度制御に関して述べられている。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。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、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モードも考慮した制御法を提案し、実験車両においてその有効性が示されている。

第5章では、軸トルク制御に関して述べられている。生産ラインで人と共に働く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、力制御の高性能化が強く求められている。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が示されている。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ュ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ている。

第6章では、軸ねじれ角制御に関して述べられている。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ュを敢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想定し、負荷側エンコーダの有無がどれくらいの性能差をもたらすか、シミュレーション及び実験によって定量的に評価されている。

第7章では、負荷側外力推定に関して述べられている。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、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確率分布として扱うことで、推定された外力の分散が理論的に最小となる設計法が提案されており、その有効性がシミュレーションと実験によって示されている。

最後に、第8章では本論文を振り返り、提案手法の位置付けを行い、それぞれの関連性が述べられている。

以上これを要するに、本論文は協働ロボットから自動車に亘る、様々なメカトロニクスシステムを表現可能な汎用性を持つ2慣性系における、制御すべき量に対して制御法を提案し、実験検証することで、負荷側情報を有効に活用した2慣性系の制御の一般的枠組を確立したといえ、その汎用性を兼ね備えた有用性から、大学研究に留まらず産業界の発展に大きく寄与するものであり、制御工学、電気工学、振動工学、ロボット工学、自動車工学への貢献が少なくない。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。