

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：56203

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14770

研究課題名（和文）高生産性と安全性を両立したフレキシブル生産システムのための人協働ロボットの開発

研究課題名（英文）Development of Cooperative Robot Considering Both Safety and Productivity for Flexible Production System

研究代表者

吉岡 崇 (Yoshioka, Takashi)

香川高等専門学校・電気情報工学科・講師

研究者番号：40824412

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、高生産性と高安全性を両立した人-ロボット協調生産システムの実現を目指した、安全性の高い力覚制御アルゴリズムを確立することを目的として検討を行った。具体的には、減速機構に弾性を有する産業用ロボットの力覚制御における動特性解明、あらゆる接触対象に対し高い安定性を有する力覚制御アルゴリズムの確立、力覚制御アルゴリズムの多軸拡張による人-ロボット協調生産システムの実現、以上3つの項目について検討を行った。

提案する力覚制御系を用いることで、対象との安定した接触を実現できることを実機検証により確認した。本研究課題で得られた成果はおよび国内学会口頭発表を通じて社会への還元を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題では、センシング技術や知能化技術を応用した「人-ロボット協調生産システム」に基づく協働ロボットの力覚制御法について検討を行った。提案法を用いることで、接触対象の剛性に依らず安定な力覚制御系を構築することが可能となる。これにより、ロボットアームと接触対象の接触安定性が改善され、安全性の高い人-ロボット協調生産システムを実現することが可能となる。本研究課題で得られた成果は、協働ロボットの適用範囲を拡大し、人-ロボット協調生産システムの本格的な普及に寄与することが期待できる。

研究成果の概要（英文）： In this research project, we conducted an investigation with the aim of establishing a highly safe force control algorithm to realize a human-robot collaborative production system that achieves high productivity and safety. Specifically, we examined the following three items: 1) clarification of the dynamic characteristics in force control of industrial robots with elastic gear mechanisms, 2) establishment of a force control algorithm with high stability for all contact objects, and 3) realization of a human-robot collaborative production system through multi-axis extension of the force control algorithm.

Through practical verification, we confirmed that the proposed force control system enables stable contact with the environmental object. The achievements obtained in this research project were disseminated to the scientific community through academic presentations and contributed to society.

研究分野：制御工学

キーワード：モーションコントロール 協働ロボット 人-ロボット協調 力覚制御

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、産業界では生産現場の改革を目的として、Industry 4.0 に対する取り組みが盛んに推し進められている。その取り組みの一つとして、センシング技術や知能化技術を応用した「人協働ロボット」が注目されている。人協働ロボット（図1）は人の柔軟性とロボットの動作精度それぞれの特長を併せ持つことから、ニーズ多様化に伴って増加してきた混流生産方式やセル生産方式などのフレキシブルな生産システムに適した産業用ロボットの形態である。その一方で、人協働ロボットを用いた場合は人とロボットが極めて近い環境で作業を行うため、ロボットには安全性の高い力覚制御が必須とされている。

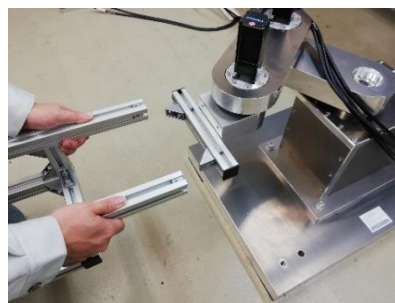


図1 人協働ロボットと作業者による組立作業のイメージ

(2) 安全性の高い力覚制御を実現するためには、力覚制御時のバックドライバビリティ向上やロボット関節軸の二慣性構造に起因する振動の抑制が必須となる。振動抑制を図るためダンピング制御がしばしば用いられるが、ダンピング制御はバックドライバビリティの低下を招きやすい。一方、結城が提案した共振比制御は、任意の共振比を設定することで振動抑制を図ることができ、バックドライバビリティ低下につながるダンピング制御などを必要としない。そのため、共振比制御はバックドライバビリティと振動抑制を両立する手法として広く応用されている。

共振比制御においては、共振比と呼ばれるパラメータの設計が応答性や安定性を左右する。そのため、位置制御および力覚制御にとって最適な共振比が様々な研究者によって報告されてきた。研究代表者は、科学研究費補助金研究活動スタート支援の採択を受けており、本研究課題の中で接触対象を含む二慣性系の数式モデルの動特性解析を行い二慣性系における力覚制御系における最適共振比を明らかにした。しかしながら、接触対象の剛性が高い場合、共振比を大きめの値（おおむね共振比  $H = 2$  以上）に設定すると共振比制御に含まれる外乱オブザーバの推定遅れによって制御系が不安定になり最適共振比が達成できないことが判明している。これはすなわち、接触対象によっては人協働ロボットの安全性が損なわれることを意味する。

### 2. 研究の目的

(1) そこで、本研究課題では外乱オブザーバの推定帯域と接触対象の剛性の定量的な関係を明らかにする。研究代表者の先行研究により、両者の定性的な関係はある程度判明しており、接触対象の剛性が高い場合は広帯域の外乱オブザーバが必要になることが分かっている。一般的に外乱オブザーバの帯域は検出ノイズによって制約を受けるが、広帯域外乱オブザーバを用いることでこの問題を解決する。これによって、剛性の高い接触対象においても最適共振比を満足する力覚制御系を実現する。

(2) 本研究課題は、高生産性と高安全性を両立した人協働ロボットのための、安全性の高い力覚制御アルゴリズムを確立することを目的とする。

①力覚制御系設計における接触対象の剛性とオブザーバ推定帯域の定量的な関係の解明

・接触対象の剛性とオブザーバ推定帯域に対する制御系設計指針の定式化

②様々な接触対象に対し高応答性と高安定性を有する力覚制御アルゴリズムの確立

・広帯域外乱オブザーバに基づく力覚制御アルゴリズムの開発

③垂直多関節ロボットを用いた人協働ロボットシステムの実機検証

・人協働ロボットとしての運用に適したテストケースの検討

・力覚制御アルゴリズムを6軸垂直多関節ロボットに実装し有効性を実証

本研究課題の学術的な独自性は、接触対象の剛性に起因する共振比制御の安定性を陽に考慮している点である。共振比制御を用いた力覚制御系についてはこれまでに多数の報告がなされているが、接触対象の剛性が高い場合に共振比制御が不安定になる問題は研究代表者の知る限りこれまでに報告されていない。

### 3. 研究の方法

(1) 本研究課題のロードマップを表1に示す。本研究課題は、①様々な接触対象に対する力覚制御系の安定性解析と、②様々な接触対象に対し安定に振る舞う力覚制御アルゴリズムの確立、③垂直多関節ロボットを用いた人協働ロボットシステムの実機検証の三段階からなる。

(2) 令和2年度はロボットアームおよび接触対象のモデリング、および制御系の安定性解析を通じた設計指針の定式化を行った。最初に、香川高専が保有しているロボットアーム プロトタイプのモデリングおよび物理パラメータ同定を実施した。同時に、人協働ロボットにおいて想定しうる接触対象を選定した上で、選定した接触対象の物理パラメータ同定を実施した。プロトタイプおよび接触対象のモデリング・物理パラメータ同定が完了し次第、解析用ソフトウェアを用い

て力覚制御系の核となる共振比制御の計算機シミュレーションを実施した。さらに、共振比制御に対する安定性解析を実施し、接触対象の剛性と共振比制御帯域の定量的な関係の定式化を行った。

(3) 令和3年度は力覚制御アルゴリズムの確立を行った。令和2年度に実施した安定性解析により定式化された制御系設計指針、および研究代表者が先行研究にて提案した広帯域外乱オブザーバを用いて力覚制御系を構築した。さらに、令和4年度は人協働ロボットシステムの実機検証を実施した。まず、構築した力覚制御系について解析用ソフトウェアを用いて応答性やロバスト安定性を十分に検証した上で、ロボットアーム プロトタイプを用いた実機実験に移行し有効性の検証を行った。

表1 本研究課題のロードマップ

	令和二年度				令和三年度				令和四年度			
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
プロトタイプモデリング												
適切な接触対象の選定												
接触対象のモデリング												
接触対象剛性と制御帯域の関係定式化												
力覚制御アルゴリズムの構築												
プロトタイプによる実機検証												
研究成果のまとめ												

#### 4. 研究成果

(1) 研究課題の有効性は、香川高専が保有する3-DOF ロボットアーム プロトタイプを用いて検証した。図2は加速度情報を用いた広帯域外乱オブザーバのブロック線図を示しており、二慣性系の状態推定機構、加速度検出器、およびカルマンフィルタからなる外乱推定機構であることが確認できる。この外乱推定機構および接触対象を考慮した力覚制御系を制御用PC上に実装し、力覚制御系の実機検証を行った。

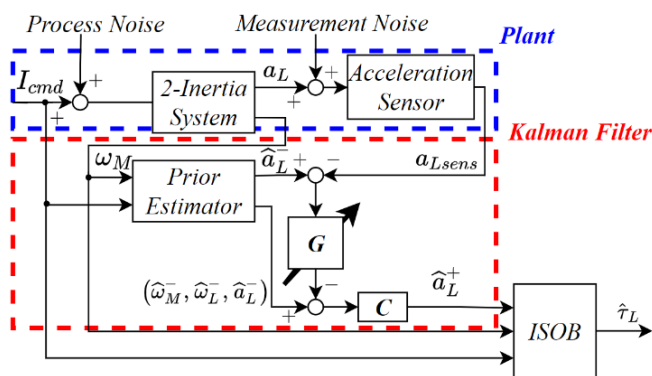


図2 加速度情報を用いた広帯域外乱オブザーバの構成

(2) 力覚制御系の実験結果を図3に示す。図3左はロボットアーム先端における力およびモーメントを表している。実験結果より、指令通りに先端の力応答が追従していることが確認できる。また、図3右はこのときの各関節軸のトルク指令および応答を示している。先端力が各軸のトルク指令として適切に分配されているほか、各軸のトルク応答も指令値に追従していることが確認できる。以上の結果より、本研究課題に基づく広帯域外乱オブザーバおよび力覚制御系を用いることで、人協働ロボットに適した安全性の高い制御が実現できていることを実験により確認した。

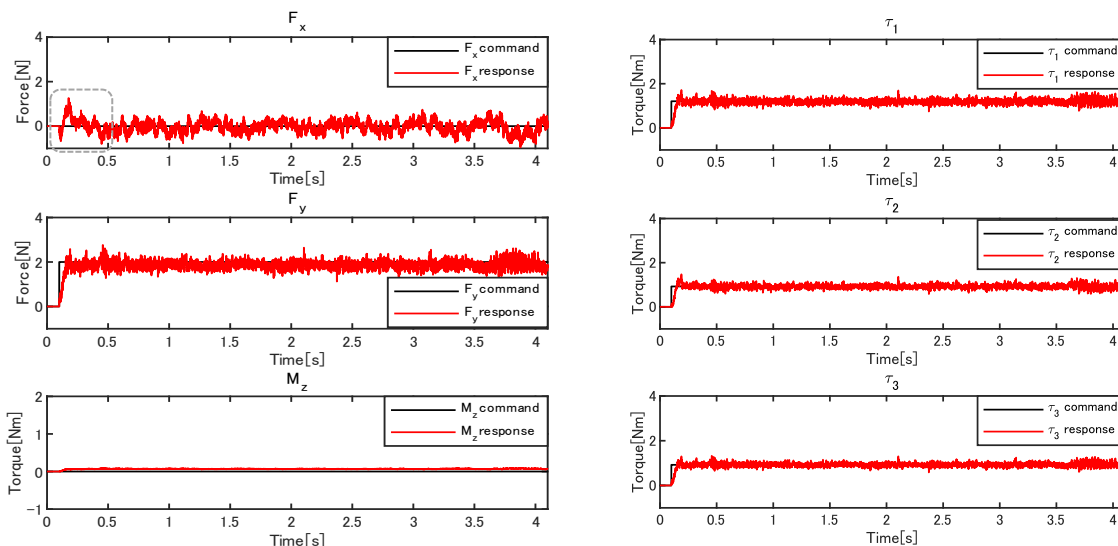


図3 接触対象を考慮した力覚制御系の実験結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 久米 駿弥, 漆原 史朗, 吉岡 崇
2. 発表標題 LSTMを用いた熟練技能データの圧縮方法の検証
3. 学会等名 令和3年度電気関係学会四国支部連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大塚 樹, 吉岡 崇
2. 発表標題 加速度情報を用いた瞬時状態オブザーバにおけるカルマンフィルタの一構成法
3. 学会等名 第15回高専パワエレフォーラム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 久米 駿弥, 漆原 史朗, 吉岡 崇
2. 発表標題 熟練技能の永久保存を目指したLSTMによるデータ圧縮方法の検証
3. 学会等名 第15回高専パワエレフォーラム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川柳 悦士, 吉岡 崇, 漆原 史朗
2. 発表標題 多関節ロボットの減速機剛性を考慮した力制御系設計およびロボット先端の整定時間に関する考察
3. 学会等名 第15回高専パワエレフォーラム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 久米 駿弥, 漆原 史朗, 吉岡 崇
2. 発表標題 素材厚み情報を付加したLSTMによる熟練技能獲得の検証
3. 学会等名 2022年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川柳 悦士, 吉岡 崇, 漆原 史朗
2. 発表標題 ロボット先端応答を考慮した多関節ロボットのPID力制御法
3. 学会等名 2022年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大塚 樹, 吉岡 崇, 漆原 史朗
2. 発表標題 加速度情報を用いた統合型瞬時状態オブザーバにおける実機検証
3. 学会等名 2022年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 久米 駿弥, 漆原 史朗, 吉岡 崇
2. 発表標題 LSTMを用いたへら絞り技能再現システムの加工対象の厚みに対する汎化性能評価
3. 学会等名 令和5年電気学会全国大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	漆原 史朗  (Urushihara Shiro)		
研究協力者	大石 潔  (Ohishi Kiyoshi)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------