

令和 2 年 6 月 30 日現在

機関番号：56203

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2018～2019

課題番号：18H05910・19K21082

研究課題名(和文) スマートファクトリーを実現させる人-ロボット協調生産システムの設計

研究課題名(英文) Design of Human-machine Cooperative Manufacturing System for Smart Factory

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・助教

研究者番号：40824412

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、工場作業者にとって安全性の高い人-ロボット協調生産システムを実現することを目的として、最適共振比に基づく力覚制御アルゴリズムについて検討を行った。この研究目的を達成するため、産業用ロボットの関節構造を踏襲した実機検証用ロボットアームの製作、および最適共振比に基づくロボットアームの力覚制御系の実機実装、提案する力覚制御系の実機検証を実施した。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査読なし国際会議におけるポスター発表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、工場作業者にとって安全性の高い人-ロボット協調生産システムを実現するための産業用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、一般的な産業用ロボットのように関節軸の弾性が無視できない場合でも、接触対象の弾性と関節軸の弾性の間で生じる共振現象を抑制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、接触対象に依らず安定に動作することが可能な人-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。このことから、本研究課題で得られた成果を応用することにより、人-ロボット協調生産システムの適用範囲の拡大が期待できる。

研究成果の概要(英文)： In this research project, in order to enhance the safety for factory worker, the investigator developed a human-machine cooperative mass-production system. To achieve the purpose of this research, the investigator mainly performed following 3 activities. At first, the investigator developed a mini model of robot manipulator, which is based on actual industrial robot. Secondly the proposed force control system of robot manipulator based on the optimal resonance ratio was implemented. Thirdly the investigator conducted an experimental verification of proposed force control system using the mini model of robot manipulator.

The experimental results show that the proposed force control system can enable the stable contact with the target. The achievement of this research project were feedback to society by a poster presentation of international conference and an oral presentation of domestic conference.

研究分野：制御工学

キーワード：モーションコントロール 産業用ロボット 人-ロボット協調 力制御

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 - ロボット協調生産システム」が注目されている。人 - ロボット協調生産システム(図1)は人の柔軟性とロボットの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少量多品種生産の生産性向上には必要不可欠な技術として期待されている。その一方で、人 - ロボット協調生産システムにおいては、人とロボットが極めて近い環境で作業を行うことから、ロボットには安全性の高い力覚制御が求められている。

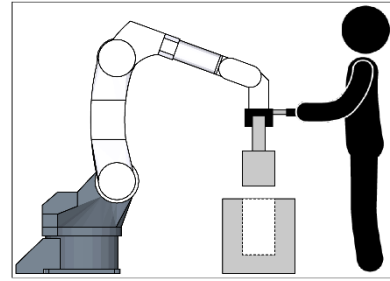


図1 人 - ロボット協調生産システム概念図

(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。振動抑制のための一手法としてはダンピング制御が広く用いられているが、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ことが知られている。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研究されてきた。位置制御については最適共振比が明らかにされたものの、力覚制御における最適共振比はこれまで十分な検討がなされていなかった。力覚制御においては、位置制御の場合と異なり二慣性系だけでなく接触対象も制御対象の一部となる。そのため、二慣性系の力覚制御における最適共振比を導き出すには二慣性系だけでなく接触対象も含めた制御対象の解析が必要不可欠である。

2. 研究の目的

(1) 上記研究背景で述べたように、ロボットには安全性の高い力覚制御系を実現することを目的として、本研究課題では力覚制御系の最適設計法について検討を行う。具体的には、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の最適共振比を解明する。そして、この最適共振比に基づく共振比制御を用いることで、あらゆる接触対象に対して安定に振る舞う力覚制御アルゴリズムを実現する。さらに、この力覚制御アルゴリズムを多関節ロボットに適用し、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す。

(2) 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する。下記に示す3つの具体的課題の解決を図る。

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

- ・二慣性系および接触対象からなる制御対象の数式モデル解析により最適共振比を解明

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

- ・接触対象を考慮した最適共振比に基づく力覚制御アルゴリズムの開発

- ・非線形摩擦補償による力覚制御アルゴリズムの高性能化

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

- ・多軸動作時の動力学トルクを考慮した力覚制御アルゴリズムの開発

- ・アルゴリズムを多関節ロボットに実装し人 - ロボット協調生産システムの有効性を実証

本研究課題の学術的な特色は、接触対象の影響を陽に考慮して力覚制御系の設計を行っている点である。これまでに二慣性系の力覚制御系の設計手法は数多く報告されているが、接触対象の数学モデルを陽に考慮した上で、力覚制御において最適な制御系の設計指針を示した例はこれまで報告されていない。

3. 研究の方法

(1) 上記で述べたように、本研究課題は ロボットアーム製作とモデル化、力覚制御アルゴリズムの確立、人 - ロボット協調生産システムの実現の三段階からなる。これらの課題達成にあたり、図2に示す平成30年度～平成31年度の2か年計画で研究課題を実施する。

(2) 平成30年度はロボットアームのモデル化と力覚制御アルゴリズムの確立を実施する。まず、最も単純な構成であるロボットアームの単関節モデルに対して理論解析および検証を実施する。まず、一般的な産業用ロボットの関節構造を踏襲したロボットアームを設計・製作する。また、ロボットの周波数特性や摩擦特性を測定し物理パラメータを同定した。さらに、ロボットの数学

モデルの導出を行い制御対象のモデル化を完了させる。次に、力覚制御アルゴリズムの確立に必要な最適共振比を解明するため、ロボットと接触対象の接触モデルの理論解析を行った。この解析結果を踏まえた上で、最適共振比に基づく力覚制御アルゴリズムを設計し、計算機シミュレーションにて理論検証を行う。

(3) 平成 31 年度は、前年度で予算計画上未完成であったロボットアーム実験装置をまず完成させる必要がある。さらに、ロボット本体の製作と併せて評価用力覚センサの導入も行う。ロボットアームが完成した段階で力覚制御アルゴリズムを演算用 PC に実装し、ロボットの単軸動作によって実機評価を行う。実機評価では、力覚制御系の応答性や、様々な接触対象に対するロバスト性の検証を行う。また、一定の力覚制御性能を有することが確認できた場合は、非接触状態から接触状態に切り替えたときの接触過程を含む力覚制御系の評価も併せて行うこととする。

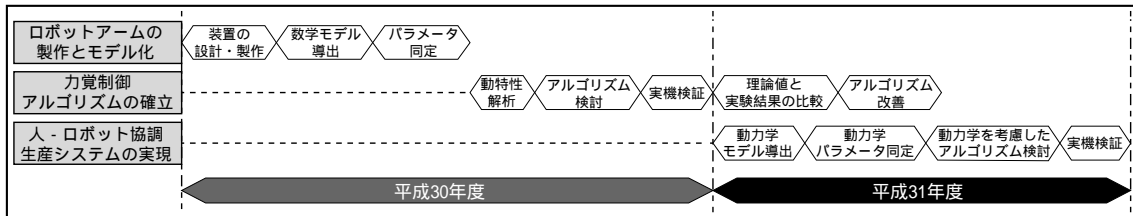


図 2 研究課題のロードマップ

4. 研究成果

(1) 本研究課題の検証のため作製したロボットアームの概観を図 3 に示す。XY 平面上での動作検証を目的として、3 自由度を有するロボットアームとして設計している。また、先端には力覚センサを取り付けられおり、力覚センサからのフィードバック信号も用いて力覚制御を行っている。各関節軸に取り付けられたサーボモータは制御用 PC と接続されており、制御用 PC はロータリーエンコーダの位置情報を受け取り、フィードバック制御則に基づいて演算したトルク指令を出力することでフィードバック制御を行う。

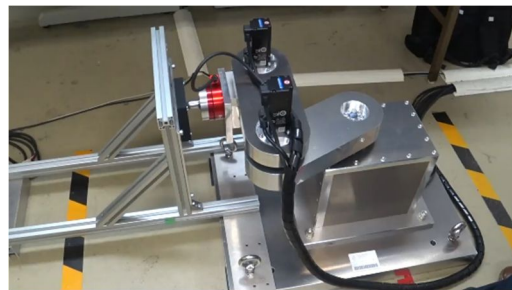


図 3 作製したロボットアームの概観

(2) 提案する力覚制御系を上記で述べたロボットアーム実験装置に実装し力覚制御性能の評価を行った。本実験では、接触対象としてパラメータ同定により既知のばね定数を有する硬質ゴムを使用している。図 4 に示す力覚制御の実験結果より、提案する制御系が良好な力覚制御性能を有していることが確認できる。また、シミュレーション結果(青線)と実験結果(緑線)はよく一致しており、実験装置のモデリングも適切に行われていることが確認された。

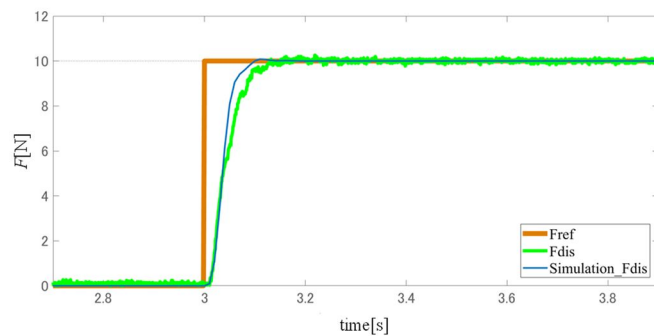


図 4 力覚制御系の制御性能評価

(3) さらに、様々な接触対象に対する安定性を評価するため、スモールゲイン定理に基づいてロバスト安定解析を行った。ロバスト安定性の解析結果を図 5 に示す。解析結果より、ノミナル値(赤点線)を中心としてノミナル値から変動が $\pm 50\%$ 程度変動すると不安定となることが確認できる。また、ロバスト安定条件を満足する領域の比率はノミナル値の絶対的な大きさにはほとんど依存せず、 $\pm 50\%$ ほぼ一定となることが確認されている。すなわち、ばね定数のノミナル値を大きめの値で設計することで、安定動作が可能な接触対象のばね定数範囲を拡大できることを確認した。

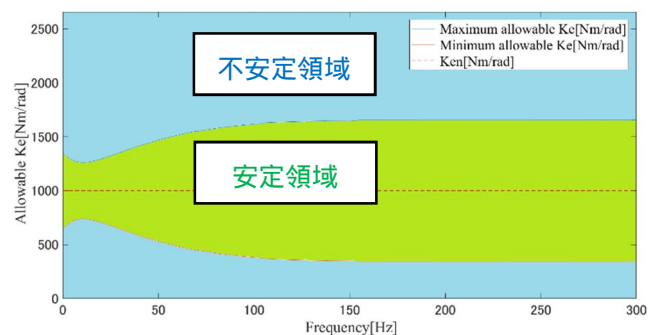


図 5 接触対象の弾性のばらつきに対するロバスト安定性の解析結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 廣本 宗優, 赤坂 圭介, 吉岡 崇, 漆原 史朗
2. 発表標題 協働ロボットにおける振動抑制を考慮した力覚制御法のロバスト性解析
3. 学会等名 令和元年度電気関係学会四国支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Munemasa Hiromoto, Keisuke Akasaka, Takashi Yoshioka, Shiro Urushihara, Yusuke Kawai and Kiyoshi Ohishi
2. 発表標題 Robustness Analysis of Force Control System Considering Vibration Suppression for Co-operative Robot
3. 学会等名 4th STI-Gigaku 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019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)		