

令和元年9月2日現在

機関番号：56203

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06434

研究課題名(和文) 広帯域センサレス力制御ロボットによる熟練者技能の触覚力覚クラウドシステムの開発

研究課題名(英文) Development of the reproduction system of the expert skill with the sensorless force control and the data storage cloud system

研究代表者

漆原 史朗 (Urushihara, Shiro)

香川高等専門学校・電気情報工学科・准教授

研究者番号：90311092

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：熟練技能を再現する動作対象として押しつけ動作に着目し、力覚データの獲得と圧縮手法の提案及びその検証を行った。力センサから獲得したデータを用いて短時間フーリエ変換(STFT)による解析を行った。その結果、人間が意図していない動作データを除去し、可変サンプリングによるデータ量の圧縮を行った。圧縮データは元データの一定周波数以上の周波数特性を損なわず、データ量を約25分の1になった。高精度力制御系構築を目的として、ACサーボモータ駆動ボールねじシステムを対象とした広帯域高次反力オブザーバを設計した。実機実験より、トルク指令信号の単ステップ入力時では、高精度かつ高速な推定が可能であると確認できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

自動化技術とロボット制御技術の向上により、機械部品の製造の自動化が進んでいる。精密部品の最終的な仕上げには熟練技能者の卓越した技術が必要不可欠となる。少子高齢化の進行により熟練技能の消滅が懸念されており、永久的な熟練技能再現手法の確立が望まれている。

本研究テーマでは、ヘラ絞り等の熟練技能を想定し、一次元の押し付け動作を行った際の反力をセンサレスで推定する手法を提案した。センサレス力推定で問題となる非線形摩擦の影響を低減する高次反力オブザーバの設計を行い、実機実験よりセンサレス反力推定への有用性を検証した。さらには、クラウドシステムの負荷軽減のために、熟練者データの圧縮手法についても検討した。

研究成果の概要(英文)： Focusing on the pressing motion as an operation target that reproduces the skill, We propose a compression method of haptic data from the force sensor. The haptic data is analyzed using the short time Fourier transform (STFT). Based on the analysis results, the frequency band of 1 Hz or more is eliminated from the expert data. As a result, variable sampling enables data volume compression. The amount of compressed data is reduced to about 1/25 of the amount of data without losing the intrinsic frequency characteristics of the original data.

On the other hand, in order to construct a high precision force control system, a broadband high-order reaction force observer for an AC servomotor-driven ball screw system was designed. From the actual machine experiments, it has been confirmed that high accuracy and speed estimation is possible at single step input of the torque command signal.

研究分野：電気電子工学

キーワード：センサレス力覚制御 力覚フィードバック 高次反力オブザーバ

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

金型や精密ギアなどの機械部品の仕上げ行程には、工作技術やロボット技術が進歩した現在でもなお、熟練技能者の長年にわたる経験や繊細な力の感覚を頼りに製造されている。また、熟練技能者の減少や精密部品需要の増加に対応して、熟練技能の自動化対応が望まれている。一方、力の加減を再現する力制御系に対する力センサの利用は、歪みゲージの取り付けやチューニングなどによりロボットの高コスト化を引き起きている。周波数帯域の制限を受けない力センサレスでの力制御系構築が求められているが、摩擦などの非線形性の影響により力センサレスでの制御系設計は難しいものとなっている。そこで本研究では、広帯域高次反力オブザーバを用いたセンサレス力制御系を実装し、ネットワーク経由で熟練者技能を再現するデータ処理と管理を行うクラウドシステムを導入した次世代の低コストで小型軽量の産業用ロボットシステムを開発する。

2. 研究の目的

本研究のアプローチとして、これまで培ってきた高調波重畳（ティザ信号入力）手法による高次外乱オブザーバを用いた力覚推定器による反力推定結果を踏まえて更なる広帯域な力覚推定アルゴリズムを確立する。図2は、一般的なACサーボモータのモータ速度に対する摩擦特性の実測値と非線形摩擦モデル（正規化した逆回転時の最大静止摩擦トルク）を示す。このようにモータの各関節部には非線形摩擦の推定反力に与える影響が大きく、環境接触時の環境からの反力のみを正確に推定することが困難となる。そこで、図3に示すような非線形摩擦モデルを用いた摩擦補償を講じる。そこでまず、本研究の第一目的として、機台振動を含めた周波数特性や非線形摩擦特性から対象とするロボットアームの詳細モデルを明らかにし、摩擦特性とパラメータ変動を考慮した広帯域なセンシングを実現する。さらに、熟練者技能のクラウドシステムの構築を目的として必要最小限のデータにより熟練技能を再現するデータ最適化の処理方法を確立することを第二の目的とする。また、サーボ系とセンサレス力覚制御系の組み合わせたハイブリッド制御系を構築し、研磨工程を想定した押しつけ動作に適用してシステムの有用性を検証することを第三の目的とする。これらの目的を達することができれば、熟練者技能を再現できるセンサレス力覚フィードバック制御を搭載した次世代の産業用ロボットの実現が可能となる。

3. 研究の方法

研究代表者は平成27年度までに、科学研究費補助金基盤研究C(一般)の採択を受けて、「超薄膜生成を目指した先端射出圧高速フィードバック制御搭載電動射出成形機の開発」について研究を行っている。この研究テーマでは、射出成形機独自の特性となる樹脂の熱可塑性を考慮した物理モデルを推定器内部に取り込み、機械的な静止摩擦を補償する独自のセンシング技術を開発している。また、これまでハーモニックギアを用いたリンク機構を持つ産業用ロボットを対象とし、負荷側にセンサを持たない多慣性共振系制御システムの設計法に従事してきた。これらの研究成果をベースに、非線形特性の詳細モデリングとセンシング周波数帯域を広げ、センサレス力制御系を搭載した産業用ロボットによる熟練者技能を再現できるクラウドシステム開発を行う。以下の計画・方法により本研究を3年で完遂する。

初年度の平成28年度において、対象する産業用ロボットの各軸の数学モデルと非線形摩擦特性の詳細モデリングを行う。これらの情報や解析結果に基づいて、エンドエフェクタの接触反力に対して広帯域なセンシング技術を考案する。まずは単軸のセンサレス力制御システムを構築し、実機実験に基づいて制御システムの良否を検証する。次に、シミュレーション解析から作業空間をxyz座標系に拡張したときのセンサレス力覚フィードバックの適用範囲や問題点を検証する。一方、熟練者技能の再現を図るために熟練者の工作物への道具の当て方や力加減をデータベース化への準備を行う。熟練者の道具の位置や力加減のデータを収集するには道具に力センサや位置を計測する必要がある。これらのハードウェア構成やデータ収集システムを構築した。

2年目となる平成29年度には、前年度シミュレーション解析により問題点等を改良した作業空間をxyz座標系に拡張しセンサレス力覚フィードバック制御系を試作システムに実装し、実機実験にて提案するセンサレス力制御系の検証を行う。さらに、研磨工程を想定した押しつけ動作に対して力および位置の指令データとして解析を行い、それらのデータ量を最小かつ最適化を図るデータ補間アルゴリズムを考案する。さらに、熟練機能最小データから元データへの逆再生の可否を検証する。これらの技術を融合した熟練技能の再現する力制御システムを改めて再設計し、試作システムへの搭載を行い評価する。さらに、部品の研磨作業を目的とする位置制御とセンサレス力制御とのハイブリッド制御系設計を行う。この際、実機への搭載の前段階としてシミュレーション解析により、制御精度の検証を行った。

最終年度の平成30年度においては、サーバ内にデータベースとして熟練技能の触覚力覚データをストレージするクラウドシステムを構築する。さらに、クラウドシステムから産業用ロボットに再現データの転送し実機実験を行う。これらの実測結果に基づいた検証を行い、提案手法の有用性を明らかにした。

4. 研究成果

本テーマの成果について、以下の2項目に分けて報告する。

(1) 短時間フーリエ変換を用いた熟練技能データの圧縮手法

図1に示す取得した力覚データに対して短時間フーリエ変換(STFT)を用いてデータ処理し、周波数特性を解析した。STFT後の結果を図2、0~50Hz帯を拡大したものを図3に示す。図2より、赤矢印で示している60, 180, 300Hzにはほぼ一定のゲインが現れていることから、電源周波数成分である、商用電源の基本波および第3, 5高調波成分によるノイズが取得した力覚データに含まれていることが分かった。また、電源周波数成分以外の50Hz以上の周波数成分はほとんど0~10dBであることから、人間の動作に関わる成分は見られない。図4より、STFT後の結果において2~4, 4~6, 6~8s間に現れている60dB以上の成分の山が、図2の同範囲の時間応答に対応していることが確認できる。

以上から、ノイズの原因となる電源周波数成分を除去し、押し付け動作の速い時間応答のデータを細かく残す必要がある。

分析結果より分かったノイズとなる電源周波数成分を完全に除去するため、遮断周波数50HzとしたFIRローパスフィルタを設計し、ノイズ除去を図った。除去結果を図5に示す。結果から、ノイズ成分が完全に除去できており、人間の持つ触覚である400Hz以下の周波数帯域を確保できていることを確認した。

熟練技能データとして関連深い成分は細かく、そうでない成分は荒くサンプリングすることで、測定点の圧縮を図った。本研究では、熟練技能に関連深い成分のサンプリングタイムを基準(10ms)として、重要度の高い閾値順にサンプリングタイムを増やしながら設定した。今回の押し付け動作の速い応答における周波数応答は、3~10Hz帯付近にしか60dB以上の成分が見られなかったことから、閾値は表1のように設定した。図3の結果から閾値より、力覚データをサンプリングする時間範囲及びその範囲におけるサンプリング時間を可変に設定した。可変サンプリングした時間応答結果をSTFT処理した結果を図4に示す。

これらの結果から、圧縮前後のデータの時間応答でも、繊細な動きの周波数成分が残せていることが分かった。本手法により、データ量を約1/25まで圧縮することができた。

(2) 広帯域高次反力オブザーバの実装と推定結果

本研究では、研磨作業やヘラ絞り等の“押し付け力”が加工精度に深く関わる熟練技能に着目する。押し付け動作は一次元の力制御系となるので、一般的な直線変換機構であるボールねじ機構を用いたシステムを構築した。押し付け力を再現するACサーボモータ駆動ボールねじシステムを図5に示す。図中の K_t [Nm/A]はトルク係数、 K_θ [rad/m]は直線系変換ゲインである。設計オブザーバは、反力トルクの推定値 $\hat{\tau}_r$ [Nm]を既知の指令電流 I_m [A]と角度 θ_m [rad]から近似微分器を用いて得た角速度 $\dot{\theta}_m$ [rad/s]より算出する。さらに、モータに発生する非線形摩擦の影響低減のため、ディザ信号を重畳する方法を用いた。

また、本研究ではディザ信号の影響を除去するため、高次外乱オブザーバを構築している。

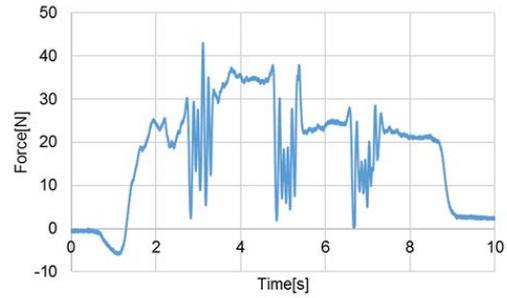


図1 力覚データ

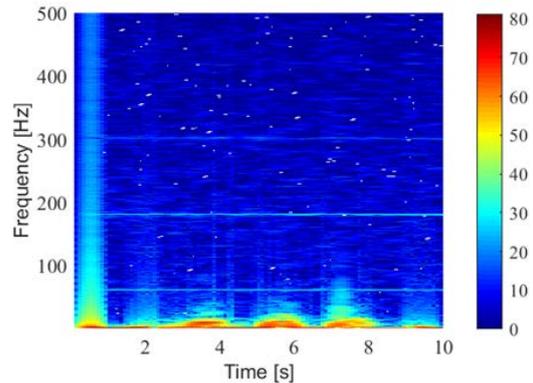


図2 力覚データのSTFT結果

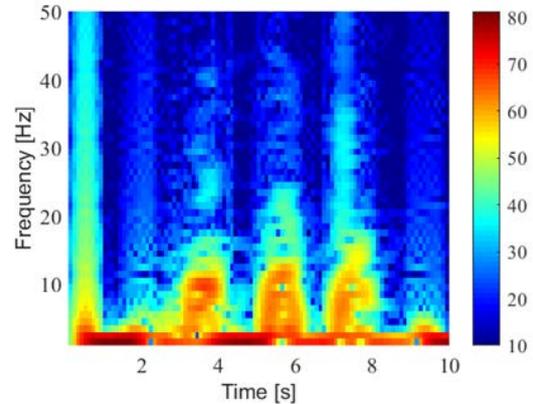


図3 STFT結果(0~50Hz 拡大)

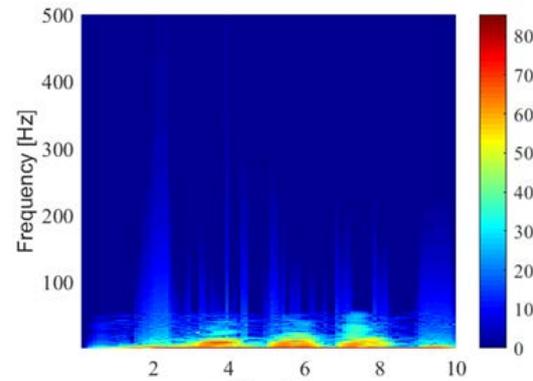


図4 ノイズ除去後のSTFT結果

図 6 に環境に対して、ステップ入力 $i_m = 0.30A$ で押し付け動作を行った際の実験結果を示す。極は $P=50\pi$ rad/s を選び、ディザ信号として振幅 $0.25A$ 、角周波数 350π rad/s の正弦波を重畳している。また、環境として、厚さ $44mm$ の硬化ゴムを用いている。実験結果より、定常状態における力センサによる測定平均値 (\bar{F}) = $90.00N$ に対して、設計オブザーバによる推定平均値 $\hat{F}_r = 88.00N$ 、相対誤差 $e_r = 2.22\%$ であった。さらに測定値に対して $0.12s$ 程度で追従していることも確認できる。また、異なる動作点での、ディザ信号を重畳した場合としなかった場合の測定

値、推定値を図 7 に示す。ディザ信号を重畳した場合、ほぼ制御対象は線形特性として取り扱うことができる。

また、熟練技能は段階的な押し付け動作になると予想されるので、トルク指令電流 I_m を $0.25A$ 、 $0.45A$ 、 $0.35A$ と階段状に変化させた。実機に基づく実験結果を図 8 に示す。実験結果より、力を加えた場合では単ステップと同等の結果が得られているが、力を抜いた場合では推定値と測定値との間に大きな差異が認められた。本研究では、設計した力推定オブザーバと測定用力センサを実験機に搭載し、環境への押し付け実験を行った。実験結果より、トルク指令信号の単ステップ入力時では、設計オブザ

ーバを用いて高精度かつ高速な推定が可能であると確認できた。しかしながら、階段状ステップ入力では、力を抜いた際の精度に課題が残った。

今後は、設計オブザーバを用いたフィードバック力制御系を構築し、実際の研磨作業等を再現した場合の成果物から設計オブザーバが熟練技能再現に有用か検討する必要がある。

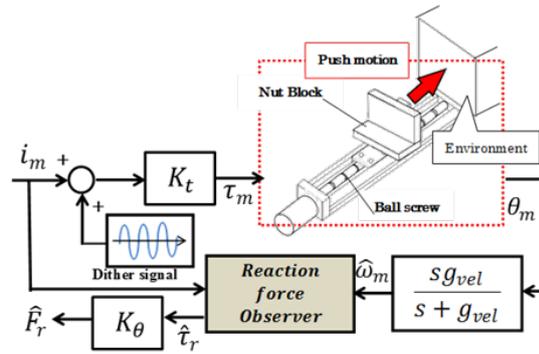


図 5 AC サーボモータ駆動ボールねじシステム

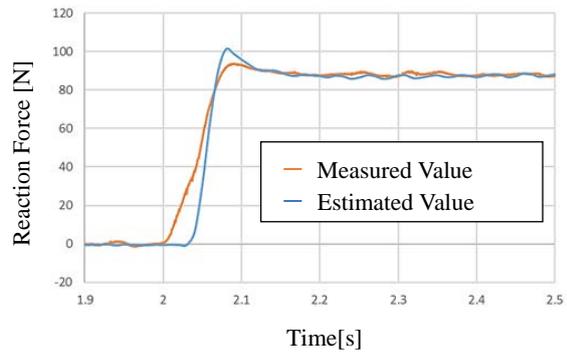


図 6 トルク指令電流対測定値および推定値

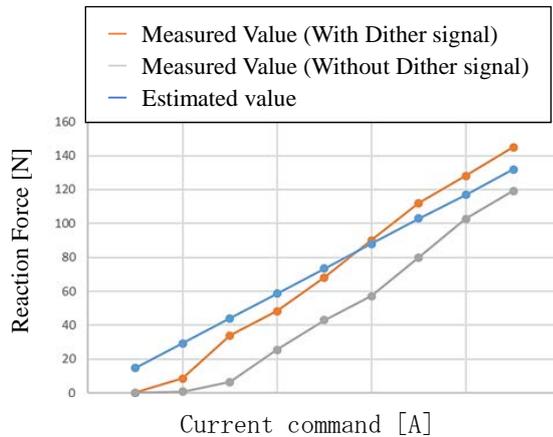


図 7 トルク指令電流対測定値および推定値

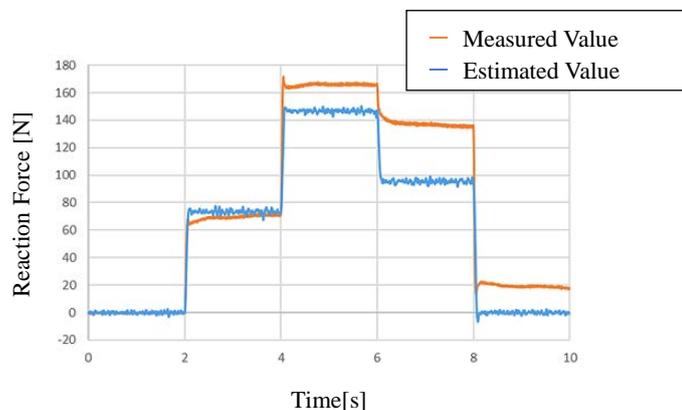


図 8 階段状ステップ入力に対する推定結果

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① 中條あかね, 漆原史朗, 大石潔, 横倉勇希:「熟練技能再現を目的とした広帯域高次反力オブザーバの構築法」, 電気学会論文誌 C, Vol.138 No.5 pp.591-592, 2018年5月 [letter]

[学会発表] (計4件)

- ② 児島 昂, 漆原史朗:「推定負荷情報を用いた2自由度位置決めシステムの応答特性」, 電気学会産業応用部門大会, Y-8, 2016年9月
- ③ 中條あかね, 漆原史朗, 大石潔:「熟練技能再現を目的とした広帯域高次反力オブザーバの構築法」, 電気学会産業応用部門大会, Y-79, 2017年8月
- ④ 中條あかね, 漆原史朗, 大石潔, 横倉勇希:「熟練技能再現を目的とした広帯域高次反力オブザーバの構築法」, 電気学会論文誌 C, Vol.138 No.5 pp.591-592, 2018年5月
- ⑤ 中條あかね, 漆原史朗, 吉岡崇, 大石潔, 横倉勇希:「熟練技能再現を目的とした広帯域高次反力オブザーバの実装と推定結果」, 平成30年電気学会産業応用部門大会, Y-90, 2018年8月

6. 研究組織

(1) 研究代表者

漆原 史朗 (URUSHIHARA SHIRO)

香川高等専門学校・電気情報工学科・准教授

研究者番号: 90311092

(2) 研究分担者

大石 潔 (OHISHI KIYOSHI)

長岡技術科学大学・工学部・教授

研究者番号: 40185187

(3) 連携研究者

宮崎 敏昌 (MIYAZAKI TOSHIMASA)

長岡技術科学大学・工学部・准教授

研究者番号: 90321413