

平成 30 年 6 月 24 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03959

研究課題名(和文) 零スチフネス制御構造とセンサレス力制御による安全で俊敏に仕事をするソフトロボット

研究課題名(英文) Safety and quick soft industrial robot having zero stiffness control structure and sensorless force control

研究代表者

大石 潔(OHISHI, KIYOSHI)

長岡技術科学大学・工学研究科・教授

研究者番号：40185187

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,500,000円

研究成果の概要(和文)：安全で俊敏に仕事をするロボットは、スチフネスが零の状態でも高速モーション制御を行うソフトロボットである。この理想のソフトロボットを実現するには、全作業空間をスチフネスが零の状態でも高速モーション制御をする必要がある。ロボット関節軸側への力(トルク)センサの装着は、関節構造とコストの両面で難しいため、センサレス力制御が望まれる。また、零スチフネス制御構造の力制御系には、ロボット軸側の広帯域加速度制御系の実装が必須となる。そこで、ロボット関節はギア等の振動と非線形摩擦を持つために、関節軸にセンサを装着しない広帯域加速度制御での力制御を実現した。これより、安全で俊敏に仕事をするソフトロボットの実現した。

研究成果の概要(英文)：Safety and quick soft industrial robot has the zero stiffness control structure and the rapid motion control structure. For the purpose of the realization of desired soft robot, all working space must be regulated by both the zero stiffness control and the rapid motion control. As the joint of industrial robot often cannot have the force or torque sensor, the soft industrial robot should have the sensorless force control structure. Moreover, the force control with zero stiffness control structure is required to have the wideband acceleration control for robot joint. Therefore, this research project has completed the wideband acceleration control based sensorless force control for safety and quick soft industrial robot, which considers the nonlinear friction influence. As the results, the safety and quick soft industrial robot has been achieved.

研究分野：電気機器、モーションコントロール

キーワード：モーションコントロール 制御工学 ロボティクス

### 1. 研究開始当初の背景

位置制御はスチフネスすなわちサーボ剛性が無限大であり、力制御はスチフネスが無限小である。零スチフネスのロボット、いわゆるソフトロボットは、人間や作業環境に接触した場合に過大な力を与えない。零スチフネス制御構造の広帯域力制御は安全な高速モーション制御を可能にするので、安全で俊敏に仕事をするソフトロボットが実現できる。ロボット関節軸側への力(トルク)センサの装着は関節構造とコストの両面で難しいため、センサレス力制御が理想である。しかしながら、従来のロボットは、関節軸の振動と非線形摩擦などの制約のため、関節軸側にセンサを装着しない広帯域加速度制御(零スチフネス制御構造)での力制御は困難である。この困難を突破して、ロボット本体構造を変えずにそのまま、安全で俊敏に仕事をするソフトロボットを実現するには、スチフネスが零の状態での高速モーション制御を行う必要がある。

ソフトロボットを実現するには、全作業空間をスチフネスが零の状態での高速モーション制御をする必要がある。ロボット関節軸側への力(トルク)センサの装着は、関節構造とコストの両面で難しいため、センサレス力制御が望まれる。また、零スチフネス制御構造の力制御系には、広帯域加速度制御系の実装が必要となる。しかしながら、ロボット関節はギア等の振動と非線形摩擦を持つために、関節軸にセンサを装着しない広帯域加速度制御での力制御を実現した例は未だない。

### 2. 研究の目的

本研究では、関節軸側の加速度制御を実現するために、カルマンフィルタと摩擦フリー状態オブザーバにより、広帯域な関節軸加速度推定に基づく加速度制御系を開発する。次に、振動と摩擦とノイズの影響を受けない反力推定オブザーバによる広帯域なセンサレス力制御系を開発する。そして、ロボット本体構造を変えずにモータ軸のセンサ情報だけで、安全で俊敏に仕事をするソフトロボットを実現する。

### 3. 研究の方法

本研究課題は、3年間で研究を完遂する。研究代表者大石(長岡技術科学大学)は研究の統括を行うとともに、本研究課題の主題である「安全で俊敏に仕事をするソフトロボット」の研究グループを構成し、理論構築、数値的解析、実機検証、性能評価までを、連携研究者大西(慶應義塾大学)とで進める。このグループでは、広帯域関節軸加速度制御系を摩擦フリーオブザーバの結合系・加速度制御器・外乱オブザーバの3つ制御器によって実現する。そして、ロボット本体構造をそのままで零スチフネス制御構造にし、安全で

俊敏に仕事をするソフトロボットを実現する要素技術とその実装法を確立する。

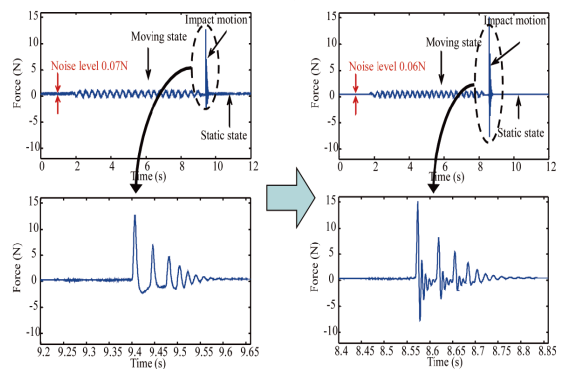
研究分担者和田(長岡技術科学大学)は、大学院生2名と共に、「広帯域力覚センシング」の研究グループを構成し、非線形摩擦補償と、共振振動とセンサノイズの影響を受けないカルマンフィルタと摩擦フリーオブザーバを構成し、実験的に確立する。そして、ロボットが受ける力の広帯域力覚センシング法を実現する。

研究分担者の宮崎(長岡技術科学大学)と横倉(長岡技術科学大学)は大学院生2名と共に、「広帯域電流制御による力制御」の研究グループを構成し、メカの共振振動の影響を受けない広帯域電流制御系を理論的に解明して開発する。

以上のように、3グループはそれぞれの役割を果たし、互いに連携して、最も難解な課題の「ロボットのモータ軸情報のみでロボット関節軸側の加速度と反力を広帯域に制御すること」を解決する。そして、この広帯域センサレス力制御系で制御された「安全で俊敏に仕事をするソフトロボット」を完成する。

### 4. 研究成果

本研究課題で提案する静止摩擦と動摩擦を補償した力センサレス力制御系をロボット先端軸に対して行い、図1に示すように、俊敏で安定した良好な結果を得た。静止摩擦を不感にするディザ(高調波)信号を電流指令に重畳して、摩擦とメカ振動に影響されない摩擦フリー反力オブザーバでセンサレス力制御を実現している。



位置センサによる速度情報を用いた外乱オブザーバの力推定結果(帯域1kHz)      カルマンフィルタによる速度情報を用いた外乱オブザーバの力推定結果(帯域10kHz)

図1. 静止摩擦と動摩擦を補償した力センサレス力制御系の比較実験

ロボット関節軸のモデル化を行い、モータ情報だけで、機械共振と摩擦の影響を受けないで関節軸加速度推定を行うために、図2と図3に示す「共分散カルマンフィルタ」を、図4の様に「摩擦フリー状態オブザーバとの結合系」で構成する。さらに、関節軸を駆動するサーボモータのマイナーループには外乱オブザーバによる加速度制御系を広帯域に構成する。

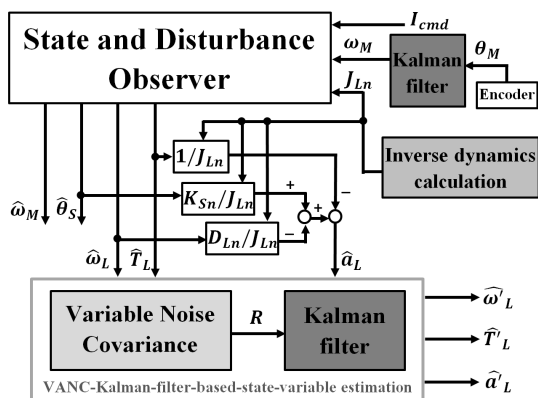


図2 共分散拡張カルマンフィルタによる状態推定

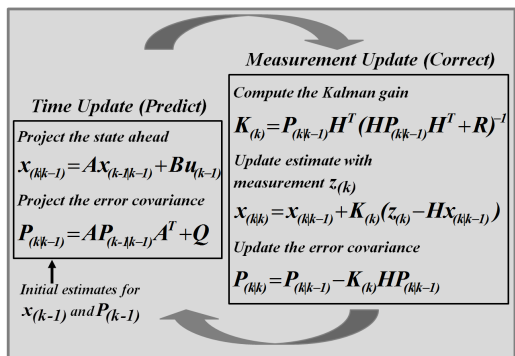


図3 共分散拡張カルマンフィルタのアルゴリズム

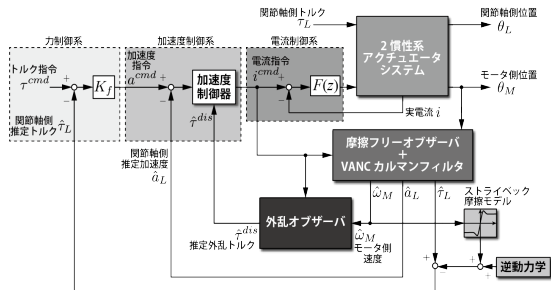


図4 加速度制御系ベースの負荷側ねじりトルク制御系によるロボット関節駆動システム

図4のロボット関節駆動システムを図5の様に6軸垂直産業用ロボットの基本3軸に搭載して、本研究課題のソフトロボットの有効性を検証する。

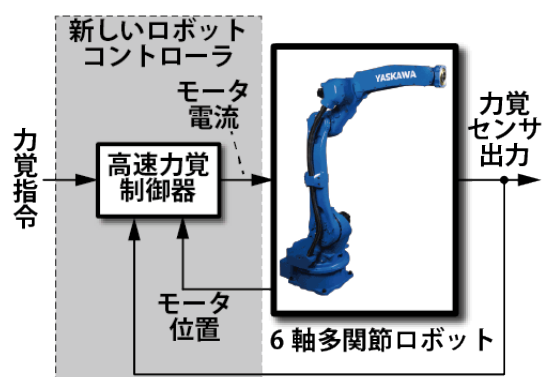


図5 本研究課題の実験構成の全体図

まず、本研究課題で提案する共分散拡張(VANC)カルマンフィルタの加速度推定の実

験を行い、図6にその実験結果を取得する。実験結果より、力行動作の際、加速度センサと提案法の結合系の推定値は一致した。また、関節側に負荷トルクを加えた瞬間、提案法はノイズと振動を抑制して、数値解析とほぼ同じ波形で、加速度とトルクを良好に推定した。

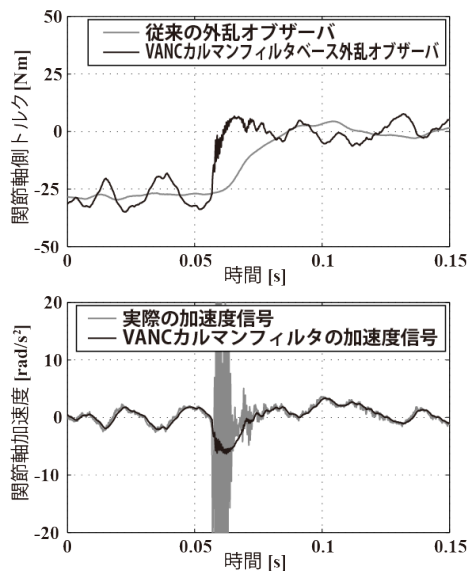


図6 共分散拡張カルマンフィルタの有効性確認実験結果

最後に図7に負荷側にセンサを持たないロボットのセンサレス力制御系を図4の構成を実装して力制御の実験を行った。実験結果より所望の力制御応答を実現することが立証された。モータ側の外乱オブザーバによる加速度制御系は1000rad/secの広帯域を実現している。これにより、負荷側に力センサなどの追加のセンサを用いなくても関節軸の力を広帯域に、すなわち、俊敏に制御できることを立証した。この制御系をロボットの全関節に配置することで、安全なロボットを構成できることが確認できた。

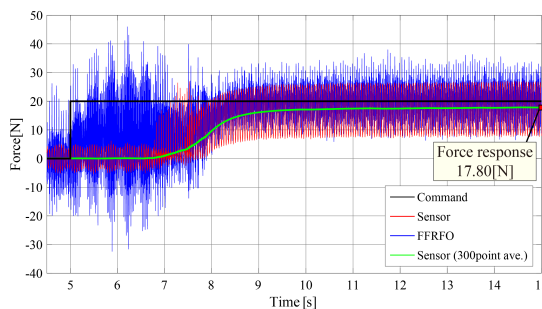


図7 負荷側にセンサを持たないロボットのセンサレス力制御の力応答の実験結果

### 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7件)

- 1) T. Yoshioka, A. Yabuki, Y. Yokokura, K. Ohishi, T. Miyazaki, T. T. Phuong : "Stable Force Control of Industrial Robot Based on Spring Ratio and Instantaneous State Observer", IEEJ Journal of Industry

- Applications, Vol.5, No.2, pp.132-140 (2016)
- 2) Y. Hirano, T. Yoshioka, K. Ohishi, T. Miyazaki, Y. Yokokura, M. Sato : "Vibration Suppression Control Method for Trochoidal Reduction Gears under Load Conditions", IEEJ Journal of Industry Applications, Vol.5, No.3, pp. 267-275 (2016)
  - 3) Y. Asai, Y. Yokokura, K. Ohishi : "Fine Force Reproduction of Environmental Haptic Sensations Based on Momentum Control", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 63, No. 7, pp. 4304-4313 (2016)
  - 4) Y. Yokokura, Y. Asai, K. Ohishi : "Mechanical Admittance Realization Control Based on Feedforward Compensation for Fine Realization of Impedance", IEEJ Journal of Industry Applications, Vol.5, No.6, pp.439-440 (2016)
  - 5) Y. Seki, K. Ohishi, Y. Yokokura, T. Sano, Y. Ide, D. Kuraishi, A. Takahashi: "Robust Positioning Control Using  $\alpha$ - $\beta$  Stationary Frame Current Controller and Disturbance Torque Hybrid Observer", IEEJ Journal of Industry Applications, Vol.6, No.2, pp.73-82 (2017)
  - 6) Y. Asai, Y. Yokokura, K. Ohishi: "Mechanical Admittance Realization Control Based on Feedforward Compensation for Fine Realization of Impedance", IEEJ Journal of Industry Applications, Vol.6, No.2, pp.83-90 (2017)
  - 7) H. Nakamura, Toshimasa Miyazaki, Yuki Yokokura, Naoki Kamiya, Kiyoshi Ohishi, Atsuo Tsukamoto: "Fine Force Sensorless Force Control Based on Notch-Type Friction-free Disturbance Observers," IEEJ J. Ind. Appl., Vol. 7, No. 2, pp. 117-126 (2018).

〔学会発表〕(計 0 件)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等なし。

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

大石 潔 (OHISHI KIYOSHI)

長岡技術科学大学・工学部・教授

研究者番号：40185187

### (2) 研究分担者

和田 安弘 (WADA YASUHIRO)

長岡技術科学大学・工学部・教授

研究者番号：70293248

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

横倉 勇希 (YOKOKURA YUKI)

長岡技術科学大学・工学部・助教

研究者番号：70622364

### (3) 連携研究者

大西 公平 (OHNISHI KOUHEI)

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号：80137984