

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03938

研究課題名(和文) 大推力動力伝達機構の逆可動化制御を可能にするスライディングモードフィルタ理論

研究課題名(英文) Sliding Mode Filtering Theory for Backdrivabilizing Control of Large-Force Transmission Mechanisms

研究代表者

菊植 亮 (Kikuuwe, Ryo)

広島大学・工学研究科・教授

研究者番号：90362326

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)：本研究課題においては、大出力の減速機付き駆動装置を逆可動化し、外力に対して柔軟に反応する位置制御および力制御を実現するための各種要素技術の開発と理論研究を行った。得られた成果のうち主なものは下記のとおりである。(1)新しい摩擦補償制御手法を確立した。これにより、弾性のある駆動機構においても効果的な摩擦補償を行うことが可能になった。(2)スライディングモード理論にもとづいたノイズ低減フィルタの数値的性質を明らかにし、位置制御と力制御における有用性を明らかにした。(3)モーターが飽和する場合にも安全に動作する新しい力制御手法を提案した。

研究成果の概要(英文)：This research project was devoted to the technological development and theoretical studies for realizing "backdrivabilization" of high-ratio geared actuators and position and force control based on it. Main pieces of the obtained results are as follows: (1) a new friction compensation technique that realizes effective friction compensation even with elastic transmission mechanisms, (2) numerical analysis on the sliding-mode noise reduction filters that we proposed earlier and the clarification of their efficacy in their applications to position and force control, and (3) a new torque-bounded admittance controller with which the robot works safely even when the actuator torque is saturated due to external forces.

研究分野：機械力学・制御

キーワード：微分包含式 摩擦 逆可動性 スライディングモード フィルタ

## 1. 研究開始当初の背景

ロボットにはさまざまな減速機構が用いられているが、それによってロボットが外力によって動かしくくなるという問題、すなわち、逆可動性 (backdrivability) が失われるという問題がある。これは主に機構内の摩擦によるものである。また、出力軸の小さな運動が入力軸の大きな回転運動に対応するため、出力軸換算での実効慣性が大きくなることも原因である。このことは、低コストなロボットで、力の制御が必要な各種接触作業を実現する上で大きな障害となる。特に大推力を必要とする土木・建築用途の重作業ロボットにおいては、減速比の大きい動力伝達機構が必要であるため、逆可動性と大推力との両立は重要な課題である。

## 2. 研究の目的

本研究課題においては、大出力の減速機付き駆動装置を逆可動化し、外力に対して柔軟に反応する位置制御および力制御を実現するための各種要素技術開発と理論的研究を行った。出発点として用いたコア技術は、研究代表者が近年考案した位置制御則 (プロクシベースト・スライディングモード制御) とノイズ除去フィルタ (放物線型スライディングモード・フィルタ) であった。研究期間中においては、弾性と摩擦を含む大出力の動力機構を逆可動化したうえで、安全で高精度な位置制御と力制御を実現する制御技術の確立を目指した。これらの技術のベースとなっている非平滑システム理論を洗練することを目指した。

## 3. 研究の方法

本研究では理論的考察と実験的研究を同時並行して行った。理論的研究においては、数式処理ソフトウェアを用いながら机上での考察を行った。実験的検証においては、C言語および数値計算ソフトウェアによるシミュレーションと、各種メカトロニクス装置を用いた実験を行った。

実験装置としては、タイミングベルトとボールねじ駆動機構からなる1自由度の実験装置を設計・製作した (図1)。この実験装置はアクチュエータとボールねじ機構の間に弾性ベルトが存在し、かつ、ボールねじ駆動部には摩擦がある機構である。この構造は、機構設計上の様々な制約の下で、比較的小型のモーターで大きな力を発生するために適した機構である。しかし、摩擦や弾性などため、従来の力制御手法の適用は困難である。他の減速機構と同様、逆可動性が低いという性質がある。

この実験装置に加えて、研究代表者が以前から保有していた小型産業用ロボットアーム2基も用いた。

## 4. 研究成果

本研究課題において、下記の成果を得た。

(1) 新しい摩擦補償制御手法を確立した。摩擦の力学モデルをそのまま摩擦補償に用いる従来のアプローチでは、制御器内と制御器内のモデルが同時に静止摩擦状態に陥るという問題がある。この問題を発見した上で、その問題を迂回するための新しい手法を考案し、詳細な実験と調査を重ねて対外発表と論文出版を行った。また、静止摩擦時のディザードと組み合わせることによって、弾性のある駆動機構においても効果的な摩擦補償を行うことが可能になった。

(2) 上記の摩擦補償制御則に類似の考え方にもとづいて、ロボットのための外力推定法を考案した。これについては国際会議で発表を行った。また、これを用いて力センサを用いないアドミッタンス制御を実現した。

(3) 以前に考案したロボット関節のためのシステマティックな摩擦力同定手法について、詳細な文献調査と追加の実験・考察を行ったうえで論文を出版した。この同定手法で用いたパラメータは上記の摩擦補償手法で用いることができる。また、摩擦力パラメータを1ストロークの動作で同定する手法を考案し、国内の学会で発表した。さらに、一往復の運動時に慣性係数 (質量) を同時に同定する手法も考案した。

(4) 研究代表者らが以前に提案した4つのスライディングモードノイズ低減フィルタについて、その数学的性質を明らかにするた

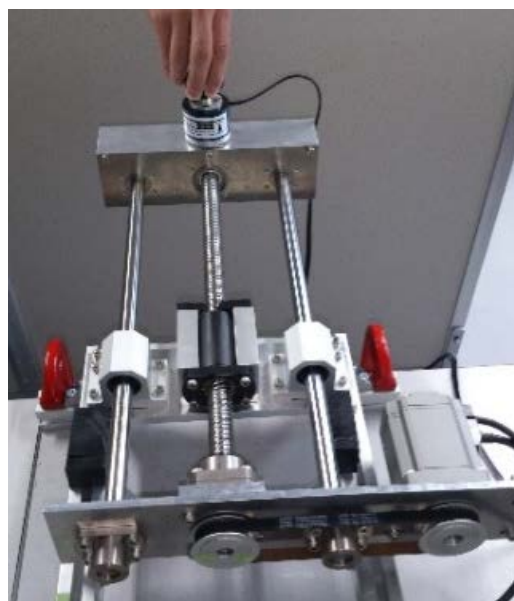


図1: 摩擦補償・外力推定技術の開発に用いたベルト・ボールネジ実験装置。

めの理論研究を行った。4つのフィルタのうち3つについては重要な着想が得られ、安定性の証明の原型ができた。

また、これらの性質について様々な数値実験を行い、結果を整理して論文を出版した。さらに、このスライディングモード・フィルタを用いてPDD2(比例・微分・二階微分)型の位置制御実験を行い、このフィルタの有用性を明確にした。さらに、アドミッタンス制御に適用した場合に安定性が向上する効果についても追加の考察を行った。

これに加えて、新しいスライディングモード微分器を提案し、国内の学術講演会で発表した。これは古典的なスライディングモードオブザーバと同じ形式を持つが、用いられている関数の傾きが収束の速さに重要な役割を担うことに着目し、改良を施した。また、後退オイラー法で実装することによって、チャタリングを抑制することができた。

(5) トルクに制限を設けた新しいアドミッタンス制御法を考案した。この制御則は、力センサ以外の部位への外力にも安全で滑らかな応答を示す。この手法は、大出力駆動機構において、力センサを用いる制御と用いない制御を安全に共存させるために有用であると考えられる。これについて特許出願を行い、論文投稿を行った。またそれを拡張し、六軸ロボットに適用することに成功した。また、ドリフトを防ぐためにクーロン摩擦特性などを付与する方法も考案した。さらに、摩擦補償と統合することで、力センサ外力と力センサ以外への外力の両方に鋭敏に反応する有用な制御則を構築できた。(図2)

(6) 本研究課題の理論的基盤になっている非平滑な制御則である「プロクシベースト・スライディングモード制御」(PSMC)につい



図2: トルク飽和時にも安全に動作する新しい力制御則。力センサへの接触力と、力センサ外への接触力の両方に安全に応答する。

て、新しいアプローチから安定性解析を行い、論文を出版した。ここで考案した安定性解析の手法は、スライディングモード・フィルタやスライディングモード・オブザーバにも適用できる可能性がある。また、成果(5)のアドミッタンス制御則の安定性解析にも応用できる可能性がある。

(7) 「プロクシベースト・スライディングモード制御」(PSMC)について、ノイズと外乱に対する応答特性を明らかにした。この制御則は、スライディングモードを維持したまま弾性的な変位を示すことを数値例によって示した。この成果については国際会議で発表予定であり、学術論文として投稿準備中である。

(8) アクチュエータの出力とその時間変化率に制限があるシステムの制御について、スライディングモード制御を拡張した制御手法を提案した。論文が採録決定済みであり、国際会議での発表も行った。通常のサーボモータとは異なる構造のアクチュエータで駆動される装置へ適用できる可能性がある。

## 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6件)

- ① Nehal Baiomy and Ryo Kikuuwe: “An Amplitude- and Rate-Saturated Controller for Linear Plants,” Asian Journal of Control に採録決定, 査読有. doi:10.1002/asjc.1851
- ② Myo Thant Sin Aung, Zhan Shi and Ryo Kikuuwe: “A New Parabolic Sliding Mode Filter Augmented by a Linear Low-Pass Filter and Its Application to Position Control,” Transactions of ASME: Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol.140, No.4, Article 041005, 2018, 査読有. doi:10.1115/1.4037732
- ③ Ryo Kikuuwe: “Some Stability Proofs on Proxy-Based Sliding Mode Control,” IMA Journal of Mathematical Control and Information, doi:10.1093/imamci/dnx030, 2017, 査読有.
- ④ Myo Thant Sin Aung and Ryo Kikuuwe: “Stability Enhancement of Admittance Control with Acceleration Feedback and Friction Compensation,” Mechatronics, Vol.45, pp.110-118, August 2017, 査読有. doi:10.1016/j.mechatronics.2017.06.011
- ⑤ Masayoshi Iwatani and Ryo Kikuuwe: “Some Improvements in Elastoplastic

Friction Compensator,” SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol. 10, No. 3, pp. 141-148, May 2017, 査読有.

doi:10.9746/jmsi.10.141

- ⑥ Masayoshi Iwatani and Ryo Kikuuwe: “An Identification Procedure for Rate-Dependency of Friction in Robotic Joints with Limited Motion Ranges,” Mechatronics, Vol. 36, pp. 36-44, June 2016, 査読有.  
doi:10.1016/j.mechatronics.2016.04.002

[学会発表] (計 11 件)

- ① Ryo Kikuuwe: “Anti-Noise and Anti-Disturbance Properties of Differential-Algebraic Relaxation Applied to a Set-Valued Controller,” to be presented at the 15th International Workshop on Variable Structure Systems and Sliding Mode Control (VSS18), 2018 年 07 月発表予定 (Graz, Austria), 査読有.
- ② 谷口亮祐, 菊植亮: “高剛性環境接触時におけるトルク制限アドミッタンス制御ロボットの挙動改善のための接触実験”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2018, 2018 年 06 月発表予定, 査読無.
- ③ Nehal Baiomy and Ryo Kikuuwe: “An LMI-based Parameter Selection Procedure for an Amplitude- and Rate-Saturated Controller,” Proceedings of the 2018 SICE International Symposium on Control Systems, FR12-4, March 2018 (Tokyo, Japan), 査読有.
- ④ Ryo Kikuuwe: “Torque-Bounded Admittance Control”, 日本ロボット学会学術講演会講演論文集, 2G2-03, 2017 年 9 月, 査読無.
- ⑤ 西野彰真, 菊植亮: “オフライン加速度推定によるワンストローク摩擦同定手法”, 日本ロボット学会学術講演会講演論文集, 2K1-04, 2017 年 9 月, 査読無.
- ⑥ Soe Lin Paing, Myo Thant Sin Aung and Ryo Kikuuwe: “Adaptive Gain Parabolic Sliding Mode Filter Augmented with Vibration Observer,” Proceedings of the 1st IEEE Conference on Control Technology and Applications, pp. 602-607, August 2017 (Hawaii, USA), 査読有.
- ⑦ Gyuhoo Byun and Ryo Kikuuwe: “An Improved Sliding Mode Differentiator”, 第 4 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム予稿集, 1B2-1, 2017 年 3 月, 査読無.
- ⑧ Masayoshi Iwatani and Ryo Kikuuwe: “An Elastoplastic Friction Force

Estimator and Its Application to External Force Estimation And Force Sensorless Admittance Control,” Proceedings of 2016 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII2016), pp. 45-50, December 2016 (Sapporo, Japan), 査読有.

- ⑨ Masayoshi Iwatani and Ryo Kikuuwe: “An External Force Estimator Using Elastoplastic Friction Model With Improved Static Friction Behavior,” Proceedings of 14th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV2016), Tu42.6, 2016 (Phuket, Thailand), 査読有.
- ⑩ Masayoshi Iwatani and Ryo Kikuuwe: “An Elastoplastic Friction Compensator with Improved Static Friction Behavior,” Proceedings of SICE Annual Conference 2016 (SICE2016), pp. 1091-1097, September 2016 (Tsukuba, Japan), 査読有.
- ⑪ 岩谷正義, 菊植亮: “弾性を含む駆動関節のための摩擦補償制御”, 日本機械学会 2016 年度年次大会講演論文集, G1000602, 2016 年 9 月, 査読無.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

- ① 名称: 力制御装置, 力制御方法及び力制御プログラム  
発明者: 菊植亮  
権利者: 国立大学法人九州大学  
種類: 特許出願  
番号: 2017-136283  
出願年月日: 2017/07/12  
国内外の別: 国内

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://home.hiroshima-u.ac.jp/kikuuwe/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

菊植 亮 (KIKUWE RYO)

広島大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 90362326

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4)研究協力者

なし