

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 27 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360098

研究課題名(和文) 全身操縦型パワー拡大ロボットを可能にする各種力制御の微分包含式ベースト実装理論

研究課題名(英文) Differential-Inclusion-Based Implementation of Force Control Schemes for Realizing Whole-Body Maneuverable Power-Magnifying Robots

研究代表者

菊植 亮 (Kikuwe, Ryo)

九州大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：90362326

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,800,000円

研究成果の概要(和文)：力を制御量あるいは操作量とする制御系設計理論はアカデミアにおいては古典的であり、数々の有用な手法を予言する。しかしこれらの手法は、ハードウェアの不完全性(機構弾性、摩擦、無駄時間、ノイズ、トルク飽和など)に敏感であり、実装上の様々な問題を生む。本研究では、不連続な微分方程式(微分包含式)にもとづく新しい制御・推定理論群と、これまでアカデミアで蓄積されてきた力制御の理論的研究を融合することによって、現実のハードウェアの限界に対して頑健な力制御の新しい実装理論群の確立を目指した。特に、大出力な操縦型ロボットの実現を長期的目標に設定した上で、そのための各種要素技術の開発を網羅的に行った。

研究成果の概要(英文)：It has been a classical approach to treat the force as the controlled variables and the manipulated variables in the field of control engineering studies in academia. Techniques developed based on such an approach, however, are sensitive to hardware imperfections such as compliance, friction, dead time, noise, and torque saturation. This project aimed to combine a new family of control/estimation theories based on discontinuous differential equations (differential inclusions) and classical studies of force control in the academia to construct a new family of force control techniques that are robust against the restrictions of real hardware. In particular, setting the realization of heavy-duty manual control robots as a long-term goal, this project has developed a variety of elemental technology for control, signal processing and mechanism design.

研究分野：ロボティクス

キーワード：マスタスレーブシステム 微分包含式 力制御

1. 研究開始当初の背景

力を制御量あるいは操作量とする制御系設計理論はアカデミアにおいては古典的であり、数々の有用でエレガントな手法を予言する。しかしこれらの手法は、ハードウェアの不完全性（機構弾性、摩擦、無駄時間、ノイズ、トルク飽和など）に敏感であり、実装上の様々な問題を生む。特に、人間がバイラテラル・マスタスレーブ方式で自在に操縦し、不整地環境で重作業を遂行する大型ロボットの実現を考えたとき、この問題は顕著になる。

2. 研究の目的

本研究では、不連続な微分方程式（微分包含式）にもとづく新しい制御・推定理論群と、これまでアカデミアで蓄積されてきた力制御の理論的研究を融合することによって、現実のハードウェアの限界に対して頑健な力制御の新しい実装理論群の確立を目指した。

3. 研究の方法

本研究は、大出力な操縦型ロボット（マスタスレーブシステム）の実現を長期的目標に設定した上で、そのための各種要素技術の開発を網羅的に行った。ここで開発された要素技術は、操縦型ロボットだけでなく、産業用のさまざまな応用先への適用が期待できる。

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。

4. 研究成果

下記の成果を得た。

(1) 常微分方程式ベースの摩擦モデル

摩擦は複雑な現象であり、Stribeck 効果、滑り前状態における非局所記憶のあるヒステリシス、Frictional Lag などのさまざまな特性が、過去の実験的研究において示されている。本研究では、これらの特性を表現する単純な微分方程式を提案した。この微分方程式において、適切なパラメータ値を代入して数値計算することによって、過去の実験的研究によって示された実験データとよく似た特性が計算機上で再現できる。摩擦を含む機械システムのシミュレーションや制御に有用であると期待できる。

この成果については、トライボロジー分野の論文誌に論文 1 編を掲載済みである。

(2) 歯車減速器の摩擦補償方法

歯車減速機の摩擦をキャンセルする制御

の手法を 2 つ提案した。これらの 2 つは、特性の異なる 2 つのタイプの減速器に適用するためのものである。1 つはすべり前弾性変位が比較的大きい減速器に適したものであり、ヒステリシスを考慮した新しい摩擦モデルにもとづいている。もう一つはすべり前変位が比較的小さい減速器に適用できるものであり、静止摩擦状態においても外力に反応しやすくなるように、振動的なトルク信号（ディザ）を用いている。

力順送型マスタスレーブシステムにおいてこれらの技術は、スレープロボットの関節摩擦をキャンセルして効果的な力制御を実現するために有効であると考えられる。また、力順送型マスタスレーブ制御に限らず、力制御全般との組み合わせが可能である。これらの成果については、論文 2 編が出版済みである。



図 1：摩擦補償制御の実験装置。摩擦のある歯車減速機付きの駆動関節から、摩擦力を打ち消すトルクを発生することによって、小さい外力で関節を動かすことができるようになっている。

(3) ノイズ除去フィルタ「PSMF」の改良

研究代表者らは以前、スライディングモード理論にもとづく新しいノイズ除去フィルタ「PSMF (Parabolic Sliding Mode Filter)」を考案した。これは、同等のノイズ除去性能を持つ従来のフィルタと比較して、位相遅れが小さいという特性を持つ。このフィルタの周波数応答特性および時間応答特性を詳細な数値実験により明らかにした。また、パラメータの設計指針を明らかにした。

また PSMF を改良して、オプティカルエンコーダの信号に適した「AW-PSMF」や、異なるゲイン・位相特性を持つ「M-PSMF」なども提案した。さらに、線形ローパスフィルタと組み合わせることによって、信号のひずみを抑制する手法も提案した。

(4) アドミッタンス制御の下位制御則に適した位置制御則

力制御の一種であるアドミッタンス制御という制御則は、「位置制御ベース力制御」とも呼ばれ、内側に位置制御のループを持つ。この位置制御則を改良し、トルク飽和が発生した場合でも急加速や不連続なトルクを生じずに、安定したアドミッタンス制御を継続

できるような内部位置制御則を提案した。

この新しい制御則もスライディングモード理論にもとづくものである。この制御則を6軸のロボットマニピュレータに実装し、詳細な実験を行った。また、詳細な文献調査と実験を行い、学術論文を完成した。なお、この制御則は、力順送型バイラテラル制御のマスター側に適用することができる。

(5) 力順送型マスタスレーブシステムの安定化技術

6軸マニピュレータ2基を用いて実験環境を構築し、上述のスライディングモード・ノイズ除去フィルタと新しい位置制御則を実装した力順送型バイラテラル制御を実装した。そこで、力センサの測定値の微分量の効果的な利用によって、システム全体を安定化できるということを示した。詳細な実験によってこの手法の効果を明らかにするとともに、詳細な文献調査を行い、既存技術との関係と優位性を明確にした。



図2: 力順送型マスタスレーブシステム。左側のロボットに操作者が力を加え、その力が増幅されて右側のロボットから出力される。

(6) 力順送型マスタスレーブシステムの制御系・機構設計指針の明確化

力順送型マスタスレーブシステムの制御則と機構について、理論的な考察を進めた。特にマスタロボットの特異姿勢の取扱い、および、人間の感覚運動系の周波数特性に着目したノイズ除去フィルタの適用方法について考察し、特許出願を行った。

(7) 大出力の腕部マスタスレーブ実験装置の開発

脚部マスタスレーブ実験装置を設計・製作した。特に、研究分担者が以前考案した不整地歩行のための足部機構を具現化した。

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)

Ryo Kikuuwe, Katsuya Kanaoka, Tomohiro Kumon and Motoji Yamamoto: "Phase-Lead

Stabilization of Force-Projecting Master-Slave Systems with a New Sliding Mode Filter," IEEE Transactions on Control Systems Technology に採録決定 Myo Thant Sin Aung, Ryo Kikuuwe and Motoji Yamamoto: "Friction Compensation of Geared Actuators with High Presliding Stiffness," Transactions of ASME: Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol.137, No.1, Article 011007, January 2015.

Ryo Kikuuwe: "A Sliding-Mode-Like Position Controller for Admittance Control with Bounded Actuator Force," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol.19, No.5, pp.1489-1500, October 2014.

Shanghai Jin, Ryo Kikuuwe and Motoji Yamamoto: "Improving Velocity Feedback for Position Control by Using a Discrete-Time Sliding Mode Filtering with Adaptive Windowing," Advanced Robotics, Vol.28, No.14, pp.943-953, July 2014.

Xiaogang Xiong, Ryo Kikuuwe and Motoji Yamamoto: "A Multistate Friction Model Described by Continuous Differential Equations," Tribology Letters, Vol.51, No.3, pp.513-523, September 2013.

Shanghai Jin, Ryo Kikuuwe and Motoji Yamamoto: "Parameter Selection Guidelines for a Parabolic Sliding Mode Filter Based on Frequency and Time Domain Characteristics," Journal of Control Science and Engineering, Vol.2012, Article 923679, December 2012.

Shanghai Jin, Ryo Kikuuwe and Motoji Yamamoto: "Real-Time Quadratic Sliding Mode Filter for Removing Noise," Advanced Robotics, Vol.26, No.8-9, pp.877-896, July 2012.

[学会発表](計16件)

Myo Thant Sin Aung and Ryo Kikuuwe: "Acceleration Feedback and Friction Compensation for Improving Positioning Performance in Systems with Friction," the 2015 American Control Conference (ACC), 2015年7月発表予定。

Masayoshi Iwatani and Ryo Kikuuwe: "An Identification Procedure for Rate-Dependent Friction Laws of Robotic Manipulator with Limited Motion Range," the 10th Asian Control Conference (ASCC), 2015年6月発表予定。

Myo Thant Sin Aung and Ryo Kikuuwe:

“ Acceleration Feedback and Friction Compensation for Improving the Stability of Admittance Control, ” the 10th Asian Control Conference (ASCC), 2015年6月発表予定 .

岩谷正義, 菊植亮: “ 動作範囲が限られたロボットマニピュレータの関節の速度依存摩擦力の同定手法 ”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2015講演論文集, 2015年5月 .

Myo Thant Sin Aung, Zhan Shi and Ryo Kikuuwe: “ A New Noise-Reduction Filter with Sliding Mode and Low-Pass Filtering, ” In Proceedings of the 2014 IEEE Conference on Control Applications (CCA), pp.1029-1034, October 2014 (Antibes/Nice, France). Zhan Shi, Ryo Kikuuwe and Motoji Yamamoto : “ Frequency Response Characteristics of Parabolic Sliding Mode Filters ”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014 講演論文集, 1P1-P05, 2014年5月 .

Xiaogang Xiong, Ryo Kikuuwe and Motoji Yamamoto: “ Backward-Euler Discretization of Second-Order Sliding Mode Control And Super-Twisting Observer For Accurate Position Control, ” In Proceedings of the 2013 ASME Dynamic Systems and Control Conference (DSCC 2013), Paper No. DSCC2013-3872, October 2013 (Palo Alto, California, USA).

Myo Thant Sin Aung, Ryo Kikuuwe, Motoji Yamamoto: “ A Method for Compensation of Friction in Geared Actuators ”, 日本ロボット学会学術講演会講演論文集, 2S1-6, 2013年9月 .

岩谷正義, 菊植亮, 山本元司: “ 粘弾塑性要素の並列結合にもとづく摩擦モデルを用いた波動歯車減速機の摩擦補償 ”, 日本ロボット学会学術講演会講演論文集, 2I1-4, 2013年9月 .

公文知裕, 菊植亮, 金岡克弥, 山本元司: “ 非線形フィルタと位相進みによるパワー増幅マスタスレーブ制御の振動抑制 ”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013 講演論文集, 2P1-K08, 2013年5月 .

Shanghai Jin, Ryo Kikuuwe and Motoji Yamamoto: “ Discrete-time Velocity Estimator Based on Sliding Mode and Adaptive Windowing, ” Proceedings of the 2012 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII 2012), pp.835-841, December 2012 (Fukuoka, Japan).

Xiaogang Xiong, Ryo Kikuuwe and Motoji Yamamoto: “ A Differential-Algebraic Multistate Friction Model, ” In

Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots (Proceedings of SIMPAR2012). Lecture Notes in Computer Science, vol. 7628, Itsuki Noda, Noriaki Ando, Davide Brugali and James J. Kuffner (Eds.), Springer, pp.77-88, 2012.

Xiaogang Xiong, Ryo Kikuuwe and Motoji Yamamoto: “ A Differential-Algebraic Contact Model with Nonlinear Compliance, ” In Proceedings of the 2012 ASME Dynamic Systems and Control Conference (DSCC/MOVIC 2012), pp. 377-383, October 2012 (Fort Lauderdale, Florida, USA)

熊小剛, 菊植亮, 山本元司: “ 常微分方程式で表す摩擦と接触 ”, 日本ロボット学会学術講演会講演論文集, 4K2-6, 2012年9月 .

公文知裕, 菊植亮, 山本元司: “ 2次曲線スライディングモードフィルタと力測定値の微分値の利用によるアドミッタンス制御の接触安定性の改善 ”, 日本ロボット学会学術講演会講演論文集, 4G2-3, 2012年9月 .

Shanghai Jin, Ryo Kikuuwe and Motoji Yamamoto : “ An Adaptive Windowing Parabolic Sliding Mode Filter for Improving Velocity Feedback for Position Control ”, 日本ロボット学会学術講演会講演論文集, 2F1-3, 2012年9月 .

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計4件)

名称: アドミッタンス制御を用いた力制御装置及び位置制御装置

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: 2013-28989

出願年月日: 2013/02/18

国内外の別: 国内

名称: マスタスレーブシステム

発明者: 金岡克弥, 菊植亮, 公文知裕

権利者: 学校法人立命館

種類: 特許出願

番号: 2013-169669

出願年月日: 2013/08/19

国内外の別: 国内

名称: マスタスレーブシステム

発明者: 金岡克弥, 菊植亮

権利者: 学校法人立命館

種類: 特許出願

番号: 2013-230820

出願年月日: 2013/11/07

国内外の別: 国内

名称: マスタスレーブシステム

発明者：金岡克弥
権利者：学校法人立命館
種類：特許出願
番号：2014-093322
出願年月日：2014/04/30
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://rk.mech.kyushu-u.ac.jp/~kikuuwe/>

<http://www.mmse.jp/lab/index.html>

6．研究組織

(1)研究代表者

菊植 亮（KIKUUWE RYO）

九州大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：96362326

(2)研究分担者

金岡 克弥（KANAOKA KATSUYA）

立命館大学・総合科学技術研究機構・チェ
アプロフェッサー

研究者番号：90360247

(3)連携研究者

なし