

令和 6 年 5 月 3 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04122

研究課題名（和文）産業用ロボット機器を対人親和化するための位置指令型スライディングモード制御理論

研究課題名（英文）Position-Commanding Sliding Mode Control Theory for Industrial Robotic Devices with Enhanced Affinity to Humans

研究代表者

菊植 亮（Kikuuwe, Ryo）

広島大学・先進理工系科学研究科（工）・教授

研究者番号：90362326

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、従来のスライディングモード制御を拡張した考え方にもとづき、制御ループ内で物理量に制限を設けて制御ループを安定化するための数学的な基盤が得られた。そして、この手法をロボットの力制御則の構築に適用し、無駄時間を含む商用の位置・速度指令型のロボットにおいて、安定した接触力制御を実現できた。またこれに付随して、位置指令型の天井クレーンシステムを安定化する手法や、多くの位置指令型ロボットが持つ歯車減速機付き駆動関節をモデル化する手法も新たに得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題では、制御ループ内で物理量に制限を設けて制御ループを安定化するための数学的な基盤が得られた。ここで得られた制御技術は、時間遅れのある位置指令型のロボティクス・メカトロニクス機器全般で安全な挙動や安全な接触力制御を実現するための基礎技術になると期待できる。特に、位置・速度・加速度・躍度に対して整合性を失わないように明示的に上限を設ける手法は、制御機器の安全性や安定性の向上に大きく寄与すると考えられる。

研究成果の概要（英文）：This research project has established a mathematical foundation for stabilizing control loops by imposing constraints on physical quantities within the loop, building upon an extended concept of conventional sliding mode control. This approach has been applied to robot force control, enabling stable contact-force control with a commercial position/velocity-commanded robot that involves deadtime. In addition, the project has developed a control technique for stabilizing position-commanded overhead crane systems and developed a modeling scheme for frictional gear reducers, which are used for many position-commanded industrial robots.

研究分野：ロボット制御工学

キーワード：産業用ロボット 協働ロボット 微分包含式 力制御 位置制御

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

今日の産業用ロボットの多くは専用のサーボアンプで制御されている。これらは技術的にもコスト的にも成熟しているが、上位計算機からの位置指令にもとづいて動作するタイプ(位置指令型)である。一般に産業用位置サーボ機器は内部の制御則が未知(非公開)であり、センサ信号にも時間遅れがある。そのため、外界との接触力を調整する用途、特に、人間中心環境(人とロボットが協働する現場や介護・福祉現場など)への利用が不向きである。外界接触に対応するインピーダンス制御などの技術の多くはトルク指令型であり、位置指令型サーボアンプには実装しにくい。ロボットメーカーにとって、トルク指令入力を一般ユーザに開放することは安全性と機密性の観点からリスクが大きく、トルク指令型制御則を利用しにくい状況は今後も続くと考えられる。そのため本研究では、位置指令型サーボ機器に適用でき、各種メカトロニクス機器を安全化する制御技術の実現を目指した。

### 2. 研究の目的

研究代表者は過去10年以上、人間中心環境で用いるロボットへの応用を目指して、ある特殊なクラスのスライディングモード制御技術の研究を行ってきた。これらの技術はトルク制限という本質安全性のもとで、動特性を明示的に設計できるという利点がある。しかしこれらはトルク指令型の制御技術であるため、産業用ロボットへは実装できないのが実情である。そのため本研究では、産業用位置制御デバイスへの実装を前提として、トルク指令型の制御技術群を改変した「位置指令型スライディングモード制御」の基盤理論体系と実用技術群の創出を目的とした。

### 3. 研究の方法

本研究では主に、位置・速度指令型の6自由度商用協働ロボット(Universal Robots社製UR3e)をテストベッドとして研究開発を行った。このロボットを図1に示す。このロボットは専用コントローラに対してユーザプログラムからの位置指令と速度指令を受け付けることができ、また、位置とモータ電流の測定値および「電流指令値」をユーザプログラムへフィードバックする機能を持つ。この専用コントローラの応答特性や制御アルゴリズムは開示されていないため、直接的に高サンプリングレートの力制御は難しい。また、動作中に外力を加えると即座に非常停止する特性を持つ。これらは多くの商用ロボットに共通する仕様である。実験においては、図1(a)のように人がロボットに直接を加える状況と、図1(b)のように固い環境(固定された物体)にロボットが接触する状況で、ロボットが安定して力制御を続行できるような制御技術を構築することを目標とした。

研究代表者がこれまで行ってきたスライディングモード制御の研究は、制御対象が従うべき微分包含式を机上で組み上げて、それに従うように制御器内の状態量を時間発展させるアルゴリズムを後退オイラー法で構築するというアプローチであった。制御系設計の出発点となる微分包含式は、各種物理量の上下限や実現すべき動特性をその中に組み込むことができる。これまではトルクを出力するものを取り扱ってきたが、本研究課題では、位置指令値を出力とすることを前提として、微分包含式の組み立て方を見直した。

また、本研究で得られた速度と加速度に制限を付ける数値計算手法は、トロリーが位置制御される天井クレーンの制振制御にも応用できるという着想に至った。そのため、研究代表者が保

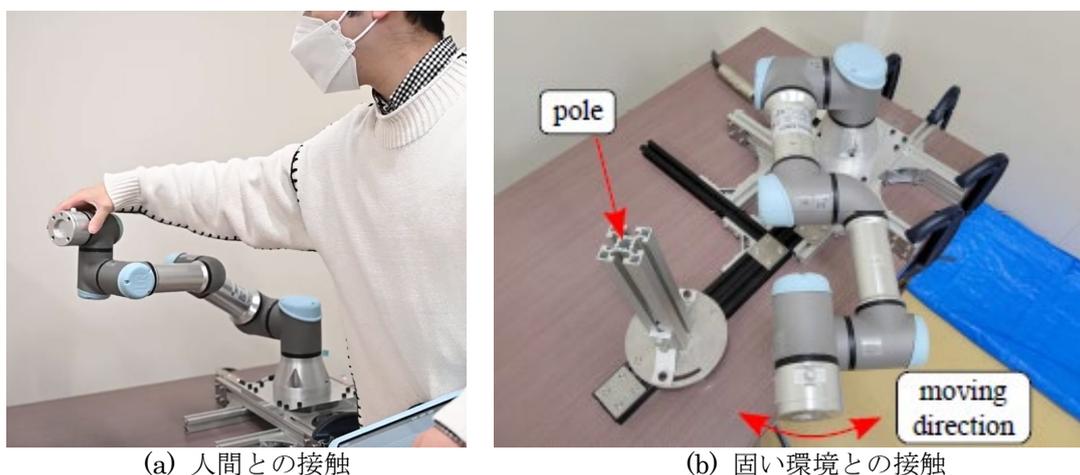


図1: UR3ロボット

有する位置制御型クレーン実験装置をテストベッドとした研究開発も行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) 時間遅れのある系でのアドミッタンス制御：躍度制限による安定化

位置指令型のロボットでの力制御を行うためには、アドミッタンス制御という手法がよく用いられる。これは、制御器内に質量を持つ仮想物体を想定し、センサなどで測定された力情報を入力としてその仮想物体の運動をシミュレートし、その仮想物体の位置をロボットへ指令するというものである。この手法は、ロボットの内部に時間遅れがある場合に不安定化するという欠点を持つ。実際に図1のUR3ロボットへこの手法を実装すると、環境との接触時に容易に不安定化した。

この問題を解決するために、ロボットへの位置指令に速度・加速度・躍度のリミッタを設ける手法を考案した。この手法において、仮想物体の動特性を表す運動方程式は微分包含式で表され、慣性項、粘性項などに加えて、法錐 (normal cone) と呼ばれる集合値関数を用いた項を持つ。これらの項によって、指令速度・指令加速度・指令躍度 (それぞれ指令位置の1階, 2階, 3階微分) が図2(b)に示す領域内に留まるような動特性が記述される。この微分包含式は後退オイラー法により離散化され、アルゴリズムとして実装される。図2(b)では速度・加速度・躍度のそれぞれが制限されているが、離散化により、最終的には躍度を制限したアルゴリズムに帰着される。この手法によって、環境接触時の不安定化が抑制されることが実験により確認できた。接触時に、位置指令値の高次微分量の持続的振動を除去することはできないが、その振動の振幅はロボットに物理的な振動が生じないレベルに抑えることができた。

図2(b)のような躍度・加速度制限に効果があると見出すためには試行錯誤が必要であった。躍度制限値を大きく、加速度制限値を小さくすると、高周波振動が生じた。一方で躍度制限値を小さく、加速度制限値を大きくすると、低周波で大きい振幅の振動が生じた。図2(b)のように、指令加速度が大きいときには指令躍度の上限を小さくするように躍度制限のロジックを設計した結果、低周波の振動と高周波の振動の両方が抑制されることが分かった。これらの結果は、論文誌 *Journal of Robotics and Mechatronics* において出版済みである。

##### (2) 躍度制限による安定化効果の理論的説明

成果(1)においては、指令値の微分値に制限を設けることによって振動を低減できることが示された。この現象の原因を、記述関数法に基づいたアプローチをよって考察した。成果(1)の制御器は非線形かつ非平滑であるが、その記述関数を定義することは可能である。その数学的性質に対する考察により、本来不安定なアドミッタンス制御器に加速度・躍度のリミッタを付加することによって、発散が防止されてリミットサイクルが発生することが理論的に導かれた。この解析手法は、上述の *Journal of Robotics and Mechatronics* での出版済み論文に記載されている。なお、この記述関数法を用いたアプローチは、リミットサイクルの振幅や周波数を予測する手法として発展可能であると考えられる。

##### (3) 躍度制限の多次元拡張

成果(1)の制御器は一次元の制御器であり、これを各軸に適用することにより、多自由度ロボットでも安定した力制御が可能になる。しかし、この制御器が全軸に搭載されたロボットの手先に力を加えると、動きやすい関節が大きく動き、ロボットの動く方法は加えた力の方向とは必ずしも一致しない。この振る舞いは、特にティーチングなどの用途において不都合である。この問題への対応として、2023年度に、成果(1)の手法を拡張した新たな手法を構築し、2023年

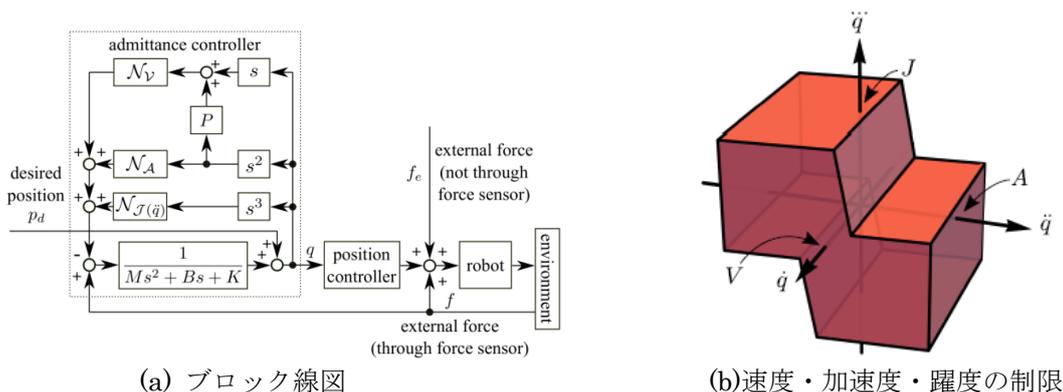


図2：躍度制限を設けたアドミッタンス制御

の日本ロボット学会学術講演会で発表した。

この新手法は、関節空間において躍度・速度・加速度の制限を施した上で、作業空間で仮想物体の運動方程式を実時間で積分するというものである。なお、安全性の担保のために、作業空間においては並進速度制限のみを施している。仮想物体の位置・姿勢は逆運動学 (IK) で関節角度指令に変換されるが、速度・加速度・躍度制限が施された後の値は順運動学 (FK) で作業座標系に再度変換され、仮想物体の位置・姿勢が修正される。本手法によって、時間遅れのある 6 自由度ロボットにおいて作業座標系での安定した力制御 (アドミッタンス制御) が可能になった。

(4) 位置制御方式のクレーンシステムの制御

微分包含式を用いて速度や加速度の制限を施すアプローチは、位置制御方式の天井クレーンシステム、特に、人間の操作者がリアルタイムで指令を出すタイプのクレーンシステムにも利用できる。これを確かめるために、図 4 のような小型のクレーン実験装置を用いて研究を行い、新しい制御則を提案した。

新しい制御則は一連の連立微分包含式で表現され、速度・加速度を制限する法錘の項と、非リプシッツな関数を用いた不完全積分器を含む。この連立微分包含式は後退オイラー法で離散化され、制御則のアルゴリズムが導出される。この手法を用いることで、人間がジョイスティックなどの安価な操作機器から位置指令を自由に与えて操作可能でありながら、吊り荷の揺れを素早く減衰させるクレーンシステムを実現できる。この制御則について、図 4 の実験装置を用いた実験と安定性解析を行った。この成果は論文誌 IEEE Access において出版済みである。

(5) 歯車減速機の運動方程式の導出

位置指令型メカトロニクス機器の多くは高減速比の歯車減速機によって駆動される。歯車減速機のそれ特有の挙動は、制御システム全体の挙動に大きな影響を及ぼす。歯車減速機の摩擦の大きさは減速機の出力軸と入力軸に加わる負荷に依存し、それを数学的に簡潔に表現するモデルがこれまで存在しなかった。本課題では、歯車減速機の運動方程式を微分代数包含式として表現する新たな表現を提案した。この成果は論文誌 Mechanism and Machine Theory に掲載されている。これは将来的に、位置指令型メカトロニクス機器のシミュレーションや動特性解析に応用可能であると考えられる。

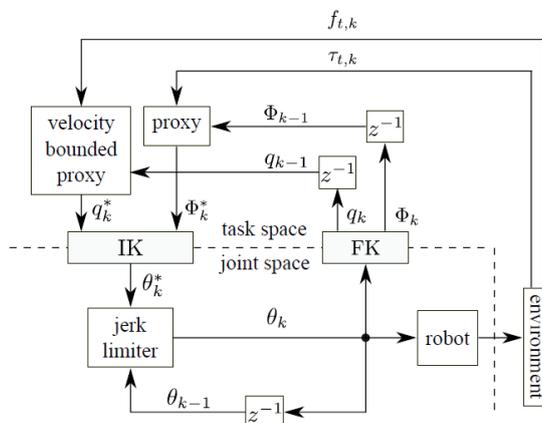


図 3 : 作業空間でのアドミッタンス制御のブロック線図.



(a) 全体構成 (b) トロリー部

図 4 : 位置指令型クレーンの室内実験装置.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Mae Ryusei, Kikuuwe Ryo	4. 巻 36
2. 論文標題 An admittance controller with a jerk limiter for position-controlled robots	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 483 ~ 493
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/jrm.2024.p0483	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kikuuwe Ryo	4. 巻 179
2. 論文標題 Dynamics modeling of gear transmissions with asymmetric load-dependent friction	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Mechanism and Machine Theory	6. 最初と最後の頁 105116 ~ 105116
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.mechmachtheory.2022.105116	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nishimoto Ryo, Kikuuwe Ryo	4. 巻 11
2. 論文標題 Position-commanding anti-sway controller for 2-D overhead cranes under velocity and acceleration constraints	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 35069 ~ 35079
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2023.3265586	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Ryo Nishimoto and Ryo Kikuuwe
2. 発表標題 Position-commanding anti-sway controller for human-operated overhead cranes
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 前龍生, 菊植亮
2. 発表標題 遅れがある速度指令型ロボットにおけるアドミッタンス制御の不安定化抑制手法
3. 学会等名 日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 西本瞭, 菊植亮
2. 発表標題 速度と加速度の制約下で操作者からの指令位置に追従する天井クレーンの制振制御則
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 前龍生, 菊植亮
2. 発表標題 躍度制限によるアドミッタンス制御の不安定化抑制手法の多次元拡張
3. 学会等名 日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Youtubeチャンネル <a href="https://www.youtube.com/user/kikuuwe">https://www.youtube.com/user/kikuuwe</a> Youtubeチャンネル <a href="https://www.youtube.com/user/kikuuwe">https://www.youtube.com/user/kikuuwe</a> Physical interaction with Universal Robots UR3e <a href="https://www.youtube.com/watch?v=7nK16cIWmto">https://www.youtube.com/watch?v=7nK16cIWmto</a>
--

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
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------