

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月15日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22760321

研究課題名（和文） 微分代数包含式近似に基づくスライディングモード制御の新実装理論

研究課題名（英文） New Implementation Theories of Sliding Mode Control Based on Differential-Algebraic Inclusion Approximation

研究代表者

菊植 亮（KIKUUE RYO）

九州大学・工学研究院・准教授

研究者番号：96362326

研究成果の概要（和文）：

「微分包含式」と呼ばれるある種の微分方程式は数学的に特異な性質を持つが、実用的な工学技術としての利用が難しかった。本研究課題では、微分包含式の新しい近似方法「微分代数包含式近似」にもとづき、微分包含式の特異性を温存しながらそれを工学的に応用する研究を行った。その成果として、制御性能と安全性を両立するロボット制御技術、センサ信号のノイズを効率的に除去する信号処理技術など、いくつかの技術を確立した。

研究成果の概要（英文）：

Differential inclusions, which constitute a certain class of differential equations, have mathematically unique characteristics, but its application to engineering techniques has been problematic. This research project aimed to utilize differential inclusions in engineering applications without losing their inherent characteristics based on a “differential-algebraic inclusion approximation,” which is a new approximation technique for differential inclusions. The obtained results include robot control techniques that achieve good control performance and safety and filtering techniques that efficiently remove noise from sensor signals.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：制御理論，ロボット，微分包含式，スライディングモード，フィルタ，力制御，位置制御，摩擦

1. 研究開始当初の背景

スライディングモード制御（SMC）の分野において、微分包含式（不連続的な微分方程式）の理論的性質が研究されている。また、クーロン摩擦や剛体接触を含む力学系の運

動方程式も微分包含式で表されるということが知られている。一方で、微分包含式を実際にデジタル制御やデジタル計算に用いた場合には、チャタリング（数値解や制御対象の振動）などの実用上無視できない問題が生じることも知られている。それらの問題を防

ぐための手法はいくつか考案されてきたが、それらは微分包含式が理論上持つ特異な性質を損なうものであった。

研究代表者は 2005 年ごろ、クーロン摩擦のシミュレーションのために、微分包含式を他の微分方程式と連立させて、「微分代数包含式」の形に近似し、ソフトウェアに実装するという手法を考案した。また、この手法を発展して、ロボットのための新しい位置制御手法も提案した。これらの手法は、微分包含式が本来持つ、不連続性に起因する特異性を失わない近似にもとづいており、現実のデジタル計算機やデジタル制御系と高い親和性を持つということが徐々に明らかになってきていた。

2. 研究の目的

本研究課題では「微分代数包含式近似」を数学的視点から精査して一般化し、それを実用的な工学技術として発展させることを目的とした。特に、ロボット工学の分野で応用できる制御技術と計算技術の確立を目指した。

3. 研究の方法

本研究では理論的研究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。一方で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。主要な実験装置としては、すでに保有していた 6 軸ロボットアームを利用した。

4. 研究成果

(1) ロボットの手先の位置と姿勢の同時制御のための新しい手法を考案した。この制御

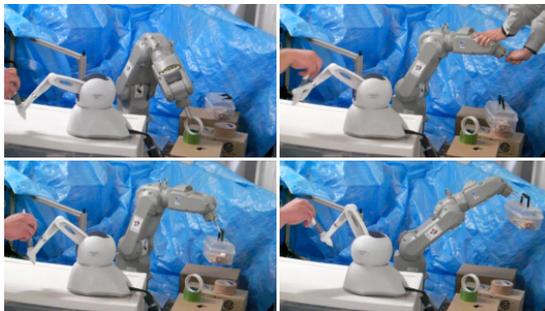


図 1：6 軸ロボットアームにおける位置・姿勢の同時制御。左側の白い小型ロボットによって、灰色の 6 軸ロボットアームを遠隔操作している。正確な追従性能が実現できており、また、マニピュレータ側に人が力を加えても危険な動作をしない。

手法は研究代表者が以前提案した位置制御手法を拡張したものであり、ロボットのモータのトルクが飽和した際にも、振動やオーバーシュートなどの危険な挙動を生じずに、なめらかに目標位置と目標姿勢に収束することができる。

効果を確認するために、この制御則を 6 軸ロボットアームに実装し、図 1 のようなテレオペレーション（遠隔操作）システムを構築した。良好な操作性と安全性を両立できることが示された。この成果については 2011 年 5 月に学会会議において発表した。

(2) ロボットが対象物に加える力を制御するアドミッタンス制御の安定性を向上させる手法を提案した。アドミッタンス制御は、力センサ測定値の外側フィードバックループと、位置を制御する内側フィードバックループから構成される制御則である。従来手法ではかたい物体に接触した際に不安定になりやすく、それを防ぐためには応答特性が鈍重になるようにパラメータを設定するしかなかった。

本研究においては、アドミッタンス制御の内側の位置制御ループに、微分代数包含近似を用いた位置制御則を用いる手法を提案した。これによって、速応性を高く保ったままでも安定性が失われにくい制御が実現できた。また、トルクが飽和する状況においても安定性は失われなかった。ここでは、図 2 のように、手先に力センサを装着したロボットを実験装置として用いた。この成果は 2011 年 9 月に学会会議において発表した。

(3) SMC の理論を信号処理に応用して、各種センサ信号のノイズを効率よく除去する信号処理アルゴリズム（スライディングモードフィルタ）を提案した。これは図 3 のように、



図 2：6 軸ロボットアームを用いた提案手法によるアドミッタンス制御。ロボットは、手先の接触力を 3[N] に保つように制御されており、実験者がロボットの手先を棒で軽く押している。ロボットの関節には手先換算で 10[N] 程度の摩擦があるが、提案手法によって、安定した接触と高い速応性が実現できている。ロボットは人が加える力に従って安全に動作している。

フィルタの状態変数が放物線型のスライディング面に引き付けられるように挙動するフィルタである。従来の類似手法ではチャタリング（出力の数値的振動）やオーバーシュートなどの問題があったが、後退差分法にもとづく新しい実装法によって、これらの問題を除去できた。この成果は2012年7月頃に学術論文として出版予定である。

(4) 上述の放物線型スライディングモードフィルタの時間応答特性と周波数応答特性を網羅的な数値シミュレーションで調査し、パラメータ設定の指針を明確にした。また、このフィルタの線形ローパスフィルタに対する利点を、古典制御理論でよく用いられるボード線図を用いて説明することができた。

ここで分かったことは、このフィルタの周波数特性をボード線図に表すと、2次の線形ローパスフィルタと似た形状のゲイン線図が得られるということである。ただし、このフィルタの高周波領域における位相遅れは最大100度程度であり、180度の遅れを生じる線形ローパスフィルタよりも位相遅れが小さいということを示すことができた。この成果については学術論文として投稿済みであり、現在、査読中である。

(5) 上述の放物線型スライディングモードフィルタを、位置制御系における微分（速度）フィードバックに用いた際の有効性を実験的に示した。位置制御系において振動の減衰を実現するためには速度フィードバックが必要であるが、位置センサの微分により得られる速度信号にはノイズが含まれるため、ノイズを除去するためのフィルタが必要である。この問題は特に、位置センサの分解能が低く、位置制御系の駆動部の摩擦が小さい場合に顕著になる。放物線型スライディングモードフィルタによって、この問題が改善できることが示された。本結果は2011年10月の国際会議において発表済みである。

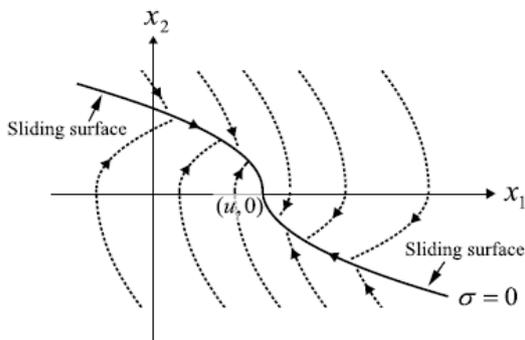


図3: 放物線型スライディングモードフィルタの概略図。フィルタの状態空間内で、入力値 u に応じてスライディング面が移動し、それに引き付けられるように状態 (x_1, x_2) が時間変化する。フィルタの出力値は x_1 である。

(6) 摩擦や接触を含む力学系のための新しいシミュレーション手法を確立した。摩擦や接触を含む力学系の運動方程式は微分包含式で表現できる。それを数値積分（シミュレーション）するためには、通常、後退オイラー法に類似の手法をもとづいて運動方程式を離散化し、さらに、ステップ時間ごとに複雑な連立方程式を解く必要があった。

新手法は、微分包含式で表される運動方程式を、あるシステムチックな手順によって常微分方程式に変換するというものである。この手法は、微分包含式は微分代数包含式で近似することができ、さらにそれが常微分方程式と代数的に等価であるという点に着眼して得られたものである。常微分方程式に変換することによって、ルンゲ・クッタ法などの一般的に用いられている各種数値積分法を用いることができるようになり、シミュレーション分野において摩擦や接触の取り扱いが飛躍的に簡略化できると期待できる。この成果は学術論文として投稿済みであり、現在、査読中である。

(7) 波動歯車減速機のヒステリシスを含む摩擦現象の力学モデルを構築した。波動歯車減速機は多くの産業用ロボットの関節に用いられているが、特殊な弾性部材から成るため、その力学的性質は非常に複雑である。本研究においては波動歯車減速機に最大静止摩擦トルク以下のトルクを加えた際の角度の変化の挙動に、従来研究の摩擦モデルでは考慮されていなかった特徴があることに着眼した。この着眼点にもとづき、新しい力学モデルを構築した。新しい力学モデルによって、ロボットの関節摩擦をより正確に補償する制御が実現できると期待できる。さらにこれは、より安全で正確なロボット制御の実現につながると考えられる。この成果については2012年5月の学術会議において発表予定である。

(8) PID位置制御された剛体リンク系の安定性に関する種々の性質を数学的に証明することに成功した。PID位置制御は、位置制御のためのSMCを微分代数包含式近似を用いて実装するために重要な構成要素である。これによって、微分代数包含式近似を施したSMCを、位置制御器として用いることの妥当性を、理論的に裏付けることができた。

証明できた性質は、準大域的強受動性、準大域的漸近安定性、準大域的入力状態安定性、および、準大域的一様終局有界性の4つである。これらの証明は、ひとつの新しいリアプノフ関数にもとづき行った。この成果は、ロボットのPID制御におけるゲイン設定のためにも応用可能であると期待できる。この成果は学術論文として採録が決定している。

5. 主な発表論文等
(研究代表者に下線)

[雑誌論文] (計2件)

- ① Shanhai Jin, Ryo Kikuuwe and Motoji Yamamoto: “A Realtime Quadratic Sliding Mode Filter for Removing Noise,” Advanced Robotics, 掲載予定 (査読有).
- ② Ryo Kikuuwe: “Alternative Proofs of Four Stability Properties of Rigid Link Manipulators under PID Position Control,” Robotica, 掲載予定 (査読有). DOI:10.1017/S0263574712000136

[学会発表] (計7件)

- ① 岩谷正義, 菊植亮, 山本元司: “波動歯車減速機の摩擦モデルの構築”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 岡山市, 2012年5月29日発表予定.
- ② Shanhai Jin, Ryo Kikuuwe and Motoji Yamamoto: “Improved Velocity Feedback for Position Control by Using a Quadratic Sliding Mode Filter,” International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2011), 韓国・京畿道, 2011年10月27日発表.
- ③ 菊植亮, 水谷孝樹: “アドミッタンス制御の内部位置制御におけるプロクシベースト・スライディングモード制御の有効性”, 日本ロボット学会学術講演会, 東京都, 2011年9月8日発表.
- ④ Shanhai Jin, Ryo Kikuuwe and Motoji Yamamoto: “A Realtime Quadratic Sliding Mode Filter for Removing Noise,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 岡山市, 2011年5月27日発表.
- ⑤ 菊植亮, 那波修, 小淵拓海, 山本元司: “トルク飽和後に指数収束する多リンク機構のための手先位置・姿勢制御”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 岡山市, 2011年5月27日発表.
- ⑥ Ryo Kikuuwe: “Semiglobally Strictly Passive Two-Port Network Representation of Rigid Link Manipulator Under PID Trajectory-Tracking Control,” IEEE Conference on Decision and Control, 米国・アトランタ, 2010年12月15日発表.
- ⑦ 菊植亮: “PID軌道追従制御下の剛体リンク機構の準大域的強受動性,” 日本ロボット学会学術講演会, 名古屋市, 2010年9月22日発表.

[その他]
ホームページ等
<http://rk.mech.kyushu-u.ac.jp/>

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
菊植 亮 (KIKUWE 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
なし
- (3) 連携研究者
なし