

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 30 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360185

研究課題名(和文)一般化半凹関数に基づく非線形制御工学の確立

研究課題名(英文)Nonlinear control theory based on generalized semiconcave functions

研究代表者

中村 文一(Nakamura, Hisakazu)

東京理科大学・理工学部・講師

研究者番号：70362837

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,300,000円、(間接経費) 4,590,000円

研究成果の概要(和文)： 分解微分を利用した局所半凹制御Lyapunov関数を使ったフィードバック制御則設計法を提案した。また、入力制約がある場合にも適用可能であることを示した。また、局所半凹制御Lyapunov関数を使ったJur djevic-Quinn型制御則においてはかならずCaratheodory解が存在することを明らかにした。

最小射影法における特異点消去現象を解析し、特異点配置法を提案した。動的拡大を行ったシステムに対する制御 Lyapunov関数を最小射影することにより、もとのシステムに対する静的な制御Lyapunov関数及び静的なフィードバック制御則を設計する手法を提案した。

研究成果の概要(英文)： We proposed feed back controller design method by using disassembled differential . Moreover, we confirmed that our proposed method is available for input constrained control systems.

We proved that Jurdjevic-Quinn type controllers permit local Caratheodory solutions of closed-loop system s.

We analyzed desingularization phenomena on our proposed minimum projection method, and proposed a singular point assignment method for nonsmooth control Lyapunov function design. Moreover, we proposed static control Lyapunov function and static controller design methods based on dynamic extention and the minimum projection method.

研究分野：制御工学

科研費の分科・細目：制御理論

キーワード：非線形制御 ロボット制御 ハイブリッド制御 位相幾何学 代数幾何学

1. 研究開始当初の背景

半凹関数は複数の微分可能関数の最小値により構成される、微分不可能集合が尾根になる関数である。「最小を取る」という単純な操作が、長年非線形制御理論において微分可能関数が抱えてきた多くの問題を一掃した。また、半凹制御 Lyapunov 関数から制御則が簡単に設計できることも発展への追い風となっている。

申請者は、世界初の半凹制御 Lyapunov 関数を構造的に設計する手法である「最小射影法」を開発した。最小射影法は、特殊な空間上の制御問題の解決のために開発され、剛体の大域制御、複雑な空間における車両の障害物回避制御など期待以上の研究成果を得ている。また、今後の発展が期待されている制御融合(Control Blending)では「複数の関数の最小を取る」操作が中心的な役割を果たす。このように、申請者の想像を越えて最小射影法が制御工学において果たす役割は大きいことが明らかとなってきている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、以下の3点である。

半凹関数に基づく制御理論の構築

半凹関数を使った制御系設計法の整備
提案法の実機実験による検証

3. 研究の方法

主に位相幾何学的な手法により理論を構築する。また、制御法の検証のため各種実験装置を開発し、実機実験により提案法の有効性を確認する。

4. 研究成果

分解微分を利用した局所半凹制御 Lyapunov 関数を使ったフィードバック制御則設計法を提案した。提案法により従来の方
法と比較して大幅に計算が簡略化出来ることを示した。また、入力制約がある場合にも適用可能であることを示した。

制御 Lyapunov 関数を使った制御則として Sontag 型と Jurdjevic-Quinn 型が2大制御則として知られている。また、微分不可能制御 Lyapunov 関数を使った制御系設計において、Caratheodory 解が存在しない場合があり大きな問題であった。この問題に対し、局所半凹制御 Lyapunov 関数を使った Jurdjevic-Quinn 型制御則においてはかならず Caratheodory 解が存在することを明らかにした。

最小射影法における特異点消去現象を解析し、特異点配置法を提案した。また、これにより局所制御 Lyapunov 関数の合成による大域的制御 Lyapunov 関数設計法を与えた。

VTOL 飛行機の安定化制御問題のように、動的拡大を行うことにより制御系設計が簡単になる問題も多い。動的拡大を行ったシステムに対する制御 Lyapunov 関数を最小射影することにより、もとのシステムに対する静的

な制御 Lyapunov 関数及び静的なフィードバック制御則を設計する手法を提案した。

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3件)

1. Hisakazu Nakamura, Takayuki Tsuzuki, Yoshiro Fukui, Nami Nakamura: Asymptotic stabilization with locally semiconcave control Lyapunov functions on general manifolds, Systems & Control Letters, 査読有, DOI: 10.1016/j.sysconle.2013.06.015, vol. 62, no. 10, pp. 902-909, 2013.
2. Hisakazu Nakamura, Nami Nakamura: Multilayer minimum projection method with singular point assignment for nonsmooth control Lyapunov function design, Asian Journal of Control, 査読有, DOI: 10.1002/asjc.548, vol. 15, no. 2, pp. 340-349, 2013.
3. 的場 俊亮, 中村 奈美, 中村 文一, 秋場 英之: 1リンク機械システムに対する有限時間整定制御, 計測自動制御学会論文集, 査読有, vol. 48, no. 2, pp. 109-116, 2012.

[学会発表](計59件)

1. Yasuyuki Sato, Hisakazu Nakamura: Discontinuous control of nonlinear systems with convex input constraint via locally semiconcave control Lyapunov functions, 19th IFAC World Congress, ケープタウン, 2014, 発表決定.
2. Kenta Hoshino, Yuh Yamashita, Yuki Nishimura, Daisuke Tsubakino: Stability and stabilization of homogeneous stochastic systems, 52nd IEEE Conference on Decision and Control, フィレンツェ, 2013年12月10日.
3. Frederic Mazenc, Hiroshi Ito, Pierdomenico Pepe: Construction of Lyapunov functionals for coupled differential and continuous time difference equations, 52nd IEEE Conference on Decision and Control, フィレンツェ, 2013年12月11日.
4. Momoko Yoshida, Yuh Yamashita: Simultaneous Estimation of Vehicle Sideslip Angle and Tire-Road Friction Coefficient, SICE Annual Conference 2013, 名古屋, 2013年9月16日.
5. Hisakazu Nakamura: Homogeneous integral finite-time control and its application to robot control, SICE Annual Conference 2013, 名古屋, 2013年9月17日.

6. Yuuta Kinoshita, Hisakazu Nakamura: Speed control of ultrasonic motors using finite-time PI controller and Levant's exact differentiator, SICE Annual Conference 2013, 名古屋, 2013年9月17日.
7. Shunsuke Kimura, Hisakazu Nakamura, Yuh Yamashita: Control of two-wheeled mobile robot via homogeneous semiconcave control Lyapunov function, 9th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems, トウールーズ, 2013年9月4日.
8. Hisakazu Nakamura, Nami Nakamura: Positive definiteness of generalized homogeneous functions, 9th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems, トウールーズ, 2013年9月5日.
9. Kenta Hoshino, Yuki Nishimura, Yuh Yamashita, Daisuke Tsubakino: Constructive design method of stochastic continuous feedback laws for stabilization of deterministic nonlinear systems, 2013 American Control Conference, pp. 6439-6444, ワシントン D.C., 2013年6月19日.
10. Hisakazu Nakamura, Naoki Nishida, Nami Nakamura: High precision control of robot manipulators via finite-time P-PI control, 51st IEEE Conference on Decision and Control, マウイ, 2012年12月10日.
11. Hiroshi Ito, Zhong-Ping Jiang, Sergey Dashkovskiy Björn S. Rüffer: A cyclic small-gain condition and an equivalent matrix-like criterion for iISS networks, 51st IEEE Conference on Decision and Control, マウイ, 2012年12月12日.
12. Hisakazu Nakamura, Yasuhiro Fujii, Nami Nakamura: Settling time design for nonlinear finite-time control systems, 51st IEEE Conference on Decision and Control, マウイ, 2012年12月12日.
13. Hideyuki Akiba, Hisakazu Nakamura: Global control Lyapunov function design based on decision by Q-learning, 20th Mediterranean Conference on Control and Automation, パルセロナ, 2012年7月6日.
14. Keisuke Hirota, Hisakazu Nakamura, Hitoshi Katayama, Nonlinear control of magnetic levitation system with finite-time P-PI control, 20th Mediterranean Conference on Control and Automation, パルセロナ, 2012年7月6日.
15. Hisakazu Nakamura, Nami Nakamura, Hitoshi Katayama: Adaptive locally homogeneous control of input affine nonlinear systems and its application to magnetic levitation system, 20th Mediterranean Conference on Control and Automation, パルセロナ, 2012年7月4日.
16. Hiroshi Ito, Connecting several stability criteria for iISS networks and their application to a network computing model, 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference, オランダ, 2011年12月14日.
17. Takahiro Yamazaki, Yuh Yamashita, Hisakazu Nakamura: Static nonsmooth control Lyapunov function design via dynamic extension, 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference, オランダ, 2011年12月15日.
18. Shunsuke Matoba, Nami Nakamura, Hisakazu Nakamura, Hirokazu Nishitani: Robust finite-time control of robot manipulators, 18th IFAC World Congress, ミラノ, 2011年9月1日.
19. 久我 創紀, 中村 文一, 山下 裕: 最小射影法を使ったPVTOL飛行システムに対する静的状態フィードバック制御, 第1回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 調布, 2014年3月5日.
20. 佐藤 康之, 中村 文一: 局所半凹適応制御 Lyapunov 関数を用いた非線形適応制御系設計, 第1回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 調布, 2014年3月5日.
21. 松本 諒, 木村 駿介, 中村 文一: 半凹制御 Lyapunov 関数を用いた積分バックステップング法による漸近安定化制御, 第1回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 調布, 2014年3月5日.
22. 蛭間 慧伍, 松尾 祐太, 木村 駿介, 中村 文一: 同次有限時間整定 PID 制御法における整定時間設計法, 第1回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 調布, 2014年3月5日.
23. 青木 成憲, 中村 文一: 動的な銅損最小化を考慮した埋込型永久磁石同期電動機に対する適応制御, 第1回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 調布, 2014年3月5日.
24. 坂井 雄飛, 兼久 龍太郎, 中村 文一: 同次有限時間整定 PID 制御を用いたロボットマニピュレータの位置決め制御, 第1回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 調布, 2014年3月6日.
25. 黒瀬 雄太, 兼久 龍太郎, 中村 文一: 有限時間整定 P-PI 制御を用いた冗長自由度を持つロボットマニピュレータの手先位置制御, 第1回計測自動制御学会制

- 御部門マルチシンポジウム, 調布, 2014年3月6日.
26. 兼久 龍太郎, 中村 文一: 有限時間整定 P-PI 制御によるマニピュレータの手先位置精度の調査, 第 1 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 調布, 2014年3月6日.
 27. 野中 涼, 山下 裕: ヒステリシス付き入力切換による同次スライディングモード制御, 第 1 回制御部門マルチシンポジウム, 調布, 2014年3月7日.
 28. 中村 文一, 西村 悠樹: 局所半凹確率制御 Lyapunov 関数を使った非線形システムの確率安定化, 第 1 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 調布, 2014年3月7日.
 29. 野村 和也, 山下 裕, 椿野 大輔: 動的補償を用いた非線形近似最適レギュレータ, 第 56 回自動制御連合講演会, 2013年11月16日.
 30. 藤本 大悟, 青木 成憲, 中村 文一: 有限時間整定 PI-PI 制御による埋込磁石同期電動機の角速度制御, 第 56 回自動制御連合講演会, 2013年11月17日.
 31. 中林 拓也, 青木 成憲, 中村 典隆, 中村 文一: IPMSM の動的な銅損最小化を考慮した非線形制御法の実機実験による検証, 第 56 回自動制御連合講演会, 2013年11月17日.
 32. 畑山 誉, 中村 文一: 最小射影法による剛体姿勢の適応制御, 第 56 回自動制御連合講演会, 2013年11月17日.
 33. 久我 創紀, 中村 文一: 最小射影法を使った PVTOL 飛行システムに対する制御リアプノフ関数設計, 第 56 回自動制御連合講演会, 2013年11月17日.
 34. 佐藤 康之, 中村 文一, 木村 駿介: 局所半凹制御 Lyapunov 関数による凸入力制約を考慮した非線形制御系設計, 第 56 回自動制御連合講演会, 2013年11月17日.
 35. 中村 文一, 畑山 誉: Jurdjevic-Quinn 制御則は半凹制御 Lyapunov 関数のエッジを滑らない, 第 56 回自動制御連合講演会, 2013年11月17日.
 36. 木村 駿介, 中村 文一: 同次半凹制御 Lyapunov 関数を用いた 2 輪移動型ロボットの制御: 実機試験による検証, 計測自動制御学会第 13 回制御部門大会, 福岡, 2013年3月6日.
 37. 中村 文一: 層の理論と最小射影法, 計測自動制御学会第 13 回制御部門大会, 2013年3月6日.
 38. 秋場 英之, 中村 文一: 未知空間のマッピングを含む学習結果を反映させた制御 Lyapunov 関数設計, 計測自動制御学会第 13 回制御部門大会, 2013年3月7日.
 39. 中村 典隆, 中村 文一: 動的な銅損最小化を考慮した突極型永久磁石同期モータの非線形制御, 計測自動制御学会第 13 回制御部門大会, 2013年3月7日.
 40. 中村 文一, 渡部 一樹: 最適有限時間整定制御問題の可解性について, 第 55 回自動制御連合講演会, 2012年11月17日.
 41. 木村 駿介, 中村 文一: 同次半凹制御 Lyapunov 関数を用いた 2 輪車両型移動ロボットの制御, 第 41 回制御理論シンポジウム, 2012年9月18日.
 42. 中村 文一: 最小射影法の必要条件に関して, 第 41 回制御理論シンポジウム, 葉山, 2012年9月18日.
 43. 秋場 英之, 中村 文一: 複数のゴールを持つ未知の格子状迷路における制御 Lyapunov 関数設計, 第 41 回制御理論シンポジウム, 2012年9月19日.
 44. 福井 善朗, 中村 文一: 時変な多様体上で定義されたシステムに対する状態フィードバック制御則の設計, 第 41 回制御理論シンポジウム, 2012年9月20日.
 45. 畑山 誉, 中村 文一: 多層最小射影法を用いた 4 回転翼空中ロボットの姿勢安定化, 日本ロボット学会第 30 回記念学術講演会, 2012年9月17日.
 46. 福井 善朗, 中村 文一, 動的障害物回避問題に対する大域的制御, 第 17 回ロボティクスシンポジウム, 萩, 2012年3月14日.
 47. 秋場 英之, 中村 文一: Q-learning を用いた空間探索による大域的 Lyapunov 関数設計, 計測自動制御学会第 12 回制御部門大会, 第 12 回制御部門大会, 奈良, 2012年3月14日.
 48. 西田 直貴, 的場 俊亮, 中村 文一, 中村 奈美: 同次 P-PI 制御によるロボットマニピュレータの高精度制御, 第 12 回制御部門大会, 奈良, 2012年3月14日.
 49. 吉池 克弥, 中村 文一: 同次有限時間整定 PID 制御を用いた 1 リンク機械システムの制御, 第 12 回制御部門大会, 奈良, 2012年3月14日.
 50. 廣田 啓輔, 中村 文一, 片山 仁志: 磁気浮上系に対する連続時間非線形有限時間整定 P-PI 制御, 第 12 回制御部門大会, 奈良, 2012年3月15日.
 51. 藤井 裕大, 中村 文一: 連続時間非線形有限時間整定制御則に対する整定時間設計法, 第 12 回制御部門大会, 奈良, 2012年3月15日.
 52. 鈴木 克則, 中村 文一: 連続時間非線形有限時間整定 PI 制御の指数パラメータチューニング, 第 12 回制御部門大会, 奈良, 2012年3月16日.
 53. 大澤 修一, 中村 文一, 西谷 紘一: 永久磁石同期モータの高効率非線形制御, 第 12 回制御部門大会, 奈良, 2012年3月16日.
 54. 廣田 啓輔, 中村 文一, 片山 仁志: LQI

- 制御による連続時間非線形有限時間整定 P-PI 制御則設計, 第 44 回計測自動制御学会北海道支部学術講演会, pp. 14-15, 2012 年 3 月 5 日.
55. 石田 卓也, 中村 文一: 4 回転翼ヘリコプタのゲインスケジューリング制御, 第 44 回計測自動制御学会北海道支部学術講演会, pp. 4-5, 2012 年 3 月 5 日.
56. 福井 善朗, 中村 文一, 池田 和司: 非有界な範囲を動く動的障害物の大域回避制御, 第 44 回計測自動制御学会北海道支部学術講演会, 2012 年 3 月 6 日.
57. 中村 文一, 都築 卓有規: 局所半凹実用制御 Lyapunov 関数を使った多様体上の S 安定化制御, 第 40 回制御理論シンポジウム, 大阪, 2011 年 9 月 26 日.
58. 福井 善朗, 中村 文一, 最小射影法を用いた動的単一障害物の大域的回避制御, 第 40 回制御理論シンポジウム, 大阪, 2011 年 9 月 28 日.
59. 西田 直貴, 的場 俊亮, 中村 文一, 中村 奈美, 同次 P-PI 制御によるロボットマニピュレータの高精度制御, 第 55 回システム制御情報学会研究発表講演会, 大阪, 2011 年 5 月 9 日.

〔その他〕

ホームページ

<http://ctrlwww.ee.noda.tus.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中村 文一 (NAKAMURA, Hisakazu)
東京理科大学・理工学部・講師
研究者番号: 70362837

(2) 研究分担者

山下 裕 (YAMASHITA, Yuh)
北海道大学・大学院情報科学研究科・教授
研究者番号: 90210426

伊藤 博 (ITO, Hiroshi)
九州工業大学・大学院情報工学研究院・准教授
研究者番号: 70274561

(3) 連携研究者

榎本 隆二 (ENOMOTO, Ryuji)
鳥羽商船高等専門学校・制御情報工学科・教授
研究者番号: 90203645

福井 善朗 (FUKUI, Yoshiro)
立命館大学・情報理工学部・研究員
研究者番号: 30710652