

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 9 月 6 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04022

研究課題名(和文)トポロジーに基づく意志決定を考慮した制御理論の構築

研究課題名(英文)Development of topological control theory for decision making

研究代表者

中村 文一 (Nakamura, Hisakazu)

東京理科大学・理工学部電気電子情報工学科・准教授

研究者番号：70362837

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、トポロジー：位相幾何学という観点から制御問題を眺めることにより、意志決定と制御を統合するフレームワークの構築を目指した。本研究の主要成果として、最小射影法を用いた自標状態を動的に決定する制御フレームワーク、最小射影法とは異なる概念に基づいた制御リヤプノフ関数設計法である極小接続法、制御バリア関数を用いて人間に意思決定と安全制御を統合する新たな手法の開発に成功した。これらにより、制御リヤプノフ関数・制御バリア関数を用いた意思決定と制御の統合が有用であることを明らかにできた。

研究成果の概要(英文)：This research aims to design a framework of combining decision and control from the view point of topology. The major achievements are as follows. Development of a control strategy that dynamically identifies the desired state by the minimum projection method, development of the local minimum connection method for static control Lyapunov function design, and development of a human safety assist control strategy by using control barrier functions. By the preceding achievements, this research elucidates that a control Lyapunov function and a control barrier function are effective for the combination of decision and control.

研究分野：制御工学

キーワード：制御理論 非線形制御理論 トポロジー リヤプノフ関数 制御バリア関数 意思決定 局所半凹関数

1. 研究開始当初の背景

制御工学の権威ある学会である IEEE Conference on Decision and Control の名称に見られるように、意志決定を考慮した制御理論の構築は学術分野として長年の大きな課題である。

障害物を回避するとき、左右どちらから回避しようか悩んだことはないだろうか。物を手でつかもうとするとき、下から握ろうか上から握ろうか悩んだ経験はないだろうか。2つの問題は一見同じように意志決定と制御が融合した問題のように思えるが、トポロジー：位相幾何学の観点から考えると異なる問題である。障害物回避問題は、制御系が定義された配位空間のトポロジーがユークリッド空間と異なる多様体である配位空間の位相問題であるのに対し、物体把持問題は目標状態が代数多様体(variety)であるという、目標状態の位相問題と考えることができる。

配位空間の位相問題は Brockett の解説論文にも示されている古くから知られた問題である。この問題に対し、研究代表者らは最小射影法と名付けた制御 Lyapunov 関数設計法および、安定化制御則設計を提案してきた。一方、後者の代数多様体を目標状態集合とする制御問題に対して、制御 Lyapunov 関数の存在性が示されているが、制御系設計問題に対して体系的な議論はなされていない。

研究代表者らは、3次元球面が姿勢角空間である $SO(3)$ の二重被覆になることを利用して最小射影法を利用した剛体の姿勢制御法を提案し、これは単一の目標姿勢を実現する3次元球面上の目標状態が2点存在する、すなわち2点からなる代数多様体を目標状態とする制御法と解釈することができる。これより、2つのトポロジーの問題は相互に関連している問題であると共に、最小射影法は目標状態が代数多様体である制御問題に対して広汎に利用できるのではないかとこの着想を得た。

2. 研究の目的

本研究の目的は、トポロジー：位相幾何学という観点から制御問題を眺めることにより、意志決定と制御を統合するフレームワークの構築を目指すものである。

3. 研究の方法

本研究は大きく基礎理論、制御系設計、実機実験に分けて実施する。

基礎理論研究で研究全体を主導し、制御系設計研究・実機実験により基礎理論に関する研究成果の正当性を明らかにする。

理論的研究では主に位相幾何学、代数幾何学、不可微分関数解析分野の数学的ツールを使い、制御 Lyapunov 関数(CLF)、最小射影法、入力状態安定性理論を融合・発展させ、意志決定を考慮した制御理論を構築する。実験研究では埋め込み永久磁石同期モータ、ロボットアーム、車両型移動ロボットおよび剛体姿

勢制御用実験装置を使い理論的研究成果の実機検証を行う。

4. 研究成果

本研究の目的のひとつである目標状態集合への安定化問題に対し、目標状態集合がコンパクト集合である場合において研究代表者らが開発した最小射影法を利用することにより目標状態集合上においてすべて値が0となる、局所半凹制御リヤプノフ関数の設計法を開発した。

また、ロボットアームの手先位置決め制御問題に対して開発した設計法を適用し、適応制御則と組み合わせることにより現在の姿勢によってロボットアームの目標姿勢を動的に意思決定する新たなフィードバック制御則を開発し、コンピュータシミュレーションおよび実機実験により提案法の有効性を確認した。

上記の研究成果では、ロボットアームの持つ機械的自由度は目標手先位置を指定する自由度と同じであることを要求した。そこで、冗長自由度を持つロボットアームに対して、消去イデアルと最小射影法を用いた新たな局所半凹制御リヤプノフ関数の設計法を開発し、コンピュータシミュレーションにより有効性を確認した。本研究成果は、冗長自由度を持つロボットに対するベルンシュタイン問題への一つのアプローチを与えたものであると考えている。

重要な目標状態集合の安定化問題として、経路追従問題がある。目標軌道が時間関数で与えられる軌道追従問題と、制御目標が「円」のように幾何学的な条件で与えられる経路追従問題の間には何らかの関係性があることが予想されるが、これまでに明確にされてこなかった。本研究では、この問題に対して、目標軌道と状態の誤差を漸近安定化するための時変のトラッキング制御リヤプノフ関数を、時間に関して最小を取った関数が経路追従問題に対する局所半凹制御リヤプノフ関数になることを明らかにし、コンピュータシミュレーションにより有効性を示した。

制御系の設計が難しいシステムに対し、仮想状態を状態方程式に追加することにより問題の単純化を図る、動的拡大という制御法が提案されている。この動的拡大を行った拡大システムに対して制御リヤプノフ関数を設計すると、元のシステムに対する時変の制御リヤプノフ関数として解釈することができる。この動的拡大により制御系設計が簡単になるシステムの代表として微分フラットシステムが知られている。本研究では、微分フラットシステムに対し、拡大システムが特定の条件を満たすときには、最小射影法により、時変のなめらかな制御リヤプノフ関数から時不変のなめらかな制御リヤプノフ関数が設計できることを明らかにした。

代表的な微分フラットシステムは自動車のような車輪を持つ移動体である。本研究では、

2輪車両型移動ロボットの経路追従問題に対し、最小射影法を2段階に用いる制御リヤプノフ関数設計法を開発した。すなわち、微分フラットシステムに対する軌道追従問題に対して最小射影法を用いることにより事変の制御リヤプノフ関数を設計し、続いて時間に関して最小を取ることで目的とする経路追従問題に対する制御リヤプノフ関数を設計する手法の開発に成功した。

前記最小射影法では、拡大システムが満たさなければいけない条件が相当に厳しことがわかった。そこで条件を緩和するために、最小射影ではなく、極小値を接続することにより制御リヤプノフ関数を設計する極小接続法を新たに開発した。極小接続法は、少なくとも局所的にはすべての微分フラットシステムに対して有効であることを証明することができた。

最小射影法は、エタール空間上の制御リヤプノフ関数の最小値を元の空間に射影することにより元の空間上の制御リヤプノフ関数を設計する手法であった。一方、極小接続法は、連続関数を接続してひとつの関数を構成する「層」の概念による手法である。本研究ではこの層の概念を利用し、層解法という新たな最適制御に対する解法を開発した。

最小射影法の応用として、埋め込み永久磁石同期電動機に対して複数の局所制御リヤプノフ関数を最小射影法により結合することにより大域制御リヤプノフ関数を得る方法を提案し、実機実験により有効性を確認した。当初提案法は、無限個の最小局所制御リヤプノフ関数が必要であったが、2個の局所制御リヤプノフ関数によって大域的な制御リヤプノフ関数を得る手法に発展することができた。発展させた手法においても、実機実験において特に消費エネルギーの面で良好な結果が得られた。本研究の成果により、埋め込み永久磁石同期電動機に対して、従来法と比較して少ない計算量で大幅にエネルギー損失を低減させることができる可能性を示すことができた。

多様体上の制御リヤプノフ関数の設計手法として、エタールバックステッピング法を開発した。このエタールバックステッピング法の開発の中で、従来微分不可能制御リヤプノフ関数を使った制御系設計を行う際に用いていたサンプルアンドホールド解を、一般化サンプル解に換えて解析し、一般化サンプル解の意味で漸近安定性を保証することに成功した。

自動車のブレーキアシストシステムなど、人間の意志を考慮したシステム的意思決定が近年大きな注目を集めている。これは、制御理論的には様々なノミナル制御入力に対して状態制約の保証を主眼とするアシスト制御と解釈できる。本年度は、システム蘇生変換を行うことによって得られた状態制約のないシステムに対し、大域的リブッツ連続かつ人間の入力がある界になるよう

に制御入力を修正する制御法を提案した。ところが、本手法では、状態制約の近傍において入力がかたくなってしまう、人間がどのように制御入力を与えても状態が変化しないという問題点が発生した。そこで、制御リヤプノフ関数を併用することにより安全性と操作性を両立する制御法を開発した。つづいて本手法を、制御バリア関数の観点から再検討を行った。その結果として従来の制御バリア関数の条件を緩和した、拡張制御バリア関数の概念を得ることに成功した。また、拡張制御バリア関数を用いた安全アシスト制御理論を構築することができた。

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27件)

- [1] Masaki Takase, Hisakazu Nakamura, Soki Kuga, Local minimum connection for static smooth control Lyapunov function, IFAC-PapersOnLine, 査読有, 2018, 印刷中.
- [2] Takuya Hayashi, Hisakazu Nakamura: Control Lyapunov function based fixed-time controller design for double-integrator system, Proceedings of the 2017 11th Asian Control Conference, 査読有, pp. 120-125, 2017, <https://doi.org/10.1109/ASCC.2017.8287153>.
- [3] Yuki Nishimura, Kenta Hoshino: A non-smooth stochastic Lyapunov function and its relationship with viscosity solutions, Proceedings of the 2017 11th Asian Control Conference, 査読有, pp. 699-704, 2017, <https://doi.org/10.1109/ASCC.2017.8287255>.
- [4] Hiroki Shudai, Hisakazu Nakamura, Shunsuke Kimura: Regulation mapping design for control system viability by revived transformation, Proceedings of the 2017 11th Asian Control Conference, 査読有, pp. 2220-2225, 2017, <https://doi.org/10.1109/ASCC.2017.8287520>.
- [5] Yoshiro Fukui, Takahiro Wada: Passive velocity field control with discontinuous desired fields: Non-smooth potential gradient vector field, Proceedings of the 2017 IEEE 56th Annual Conference on Decision and Control, 査読有, pp. 3301-3307, 2017, <https://doi.org/10.1109/CDC.2017.8264144>.
- [6] Takashi Betsuyaku, Yoshiro Fukui: Search control in an unknown environment using shortest path calculation

- n and Lyapunov technique, Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 査読有, pp. 1924-1929, 2017, <https://doi.org/10.1109/ROBIO.2017.8324700>.
- [7] Yutaro Ishikawa, Yasuyuki Satoh, Hisakazu Nakamura: Adaptive control of interior permanent magnet synchronous motor by minimum projection of dynamic copper loss minimization and null stabilization, Proceedings of the 2017 56th SICE Annual Conference, 査読有, pp. 355-360, 2017, <https://doi.org/10.23919/SICE.2017.8105595>.
- [8] Yuta Tsurumoto, Yasuyuki Satoh, Hisakazu Nakamura: Static smooth path-following control Lyapunov function design via minimum projection method, Proceedings of the 2017 56th SICE Annual Conference, 査読有, pp. 214-290, 2017, <https://doi.org/10.23919/SICE.2017.8105519>.
- [9] Hayato Ikeda, Hisakazu Nakamura, Shunsuke Kimura: Control Lyapunov function design for nonholonomic systems on noncontractible manifold via revived transformation, Proceedings of the 2017 IEEE Conference on Control Technology and Applications, pp. 916-921, 2017, <https://doi.org/10.1109/CCTA.2017.8062576>.
- [10] Natsuki Hamano, Hisakazu Nakamura: Global dynamic maximum torque per ampere control of interior permanent magnet synchronous motor by using nonsmooth control Lyapunov function, IFAC-PapersOnLine, 査読有, vol. 50, no. 1, pp. 2657-2664, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.471>.
- [11] Hisakazu Nakamura, Yasuyuki Satoh: Etale backstepping for control Lyapunov function design on manifold, Automatica, 査読有, vol. 83, pp. 100-107, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2017.05.010>.
- [12] Tomohiro Kunimune, Yoshiro Fukui, Takahiro Wada: Passive Velocity Field Control with discontinuous desired velocity fields, 2016 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 査読有, pp. 1165-1172, 2016, <https://doi.org/10.1109/ROBIO.2016.7866483>.
- [13] Wataru Hashimoto, Yuh Yamashita, Koichi Kobayashi, Asymptotic stabilization of nonholonomic four-wheeled vehicle with steering limitation based on Lyapunov function approach, IFAC-PapersOnLine, 査読有, vol. 49, no. 18, pp. 235-240, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.10.169>.
- [14] Soki Kuga, Hisakazu Nakamura, Yasuyuki Satoh: Static Smooth Control Lyapunov Function Design for Differentially Flat Systems, IFAC-PapersOnLine, 査読有, vol. 49, no. 18, pp. 241-246, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.10.170>.
- [15] Yuki Nishimura, Hiroshi Ito: Stochastic stability via Lyapunov functions without differentiability at supposed equilibria, IFAC-PapersOnLine, 査読有, vol. 49, no. 18, pp. 321-326, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.10.185>.
- [16] Hisakazu Nakamura: Global Nonsmooth Control Lyapunov Function Design for Path-Following Problem Via Minimum Projection Method, IFAC-PapersOnLine, 査読有, vol. 49, no. 18, pp. 600-605, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.10.231>.
- [17] 佐藤 康之, 西田 直貴, 中村 文二: 有限時間整定P-PI制御によるロボットマニピュレータの高精度位置決め制御, 計測自動制御学会論文集, 査読有, vol. 52, no. 2, pp. 60-67, 2016, <https://doi.org/10.9746/sicetr.52.60>.
- [18] 鈴木 大基, 山下 裕: 集合値で表される上位制御則に対するバックステップングと入力分配問題への応用, システム制御情報学会論文誌, 査読有, vol. 29, pp. 175-181, 2016, <https://doi.org/10.5687/iscie.29.175>.
- [19] Kohei Kawamura, Hisakazu Nakamura: Position control of four-wheeled mobile vehicle via locally semiconcave control Lyapunov function, Proceedings of the 2015 CACS International Automatic Control Conference, 査読有, pp. 510-515, 2015, <https://doi.org/10.1109/CACS.2015.7378376>.
- [20] Toshiaki Muraki, Naoki Sugito, Yasuyuki Satoh, Hisakazu Nakamura: End-effector orientation control of robot manipulators via finite-time P-PI control, Proceedings of the 2015 CACS International Automatic Control Conference, 査読有, pp. 528-533, 2015, <https://doi.org/10.1109/CACS.2015.7378378>.
- [21] Ryo Matsumoto, Hisakazu Nakamura, Yasuyuki Satoh, Kimura Shunsuke: Position control of two-wheels mobile

- ile robot via semiconcave function backstepping, Proceedings of the 2015 IEEE Multi-conference on Systems and Control, 査読有, pp. 882-887, 2015, <https://doi.org/10.1109/CCA.2015.7320729>.
- [22] Yasuyuki Satoh, Naoki Sugito, Hisakazu Nakamura: Finite-time orientation control of robot manipulators via homogeneous approximation, Proceedings of the 2015 IEEE Multi-conference on Systems and Control, 査読有, pp. 1130-1135, 2015, <https://doi.org/10.1109/CCA.2015.7320764>.
- [23] Natsuki Hamano, Daigo Fujimoto, Yoshinori Aoki, Hisakazu Nakamura: Nonlinear adaptive control of interior permanent magnet synchronous motor with dynamics copper loss minimization, Proceedings of the 2015 IEEE Multi-conference on Systems and Control, 査読有, pp. 1680-1685, 2015, <https://doi.org/10.1109/CCA.2015.7320851>.
- [24] Hisakazu Nakamura: Generalized minimum projection method and its application to two-wheeled mobile robot control, IFAC-PapersOnLine, 査読有, vol. 48, no. 11, pp. 168-173, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.09.178>.
- [25] Soki Kuga, Hisakazu Nakamura, Yasuyuki Satoh, Adaptive control for the PVTOL system via minimum projection method, IFAC-PapersOnLine, 査読有, vol. 48, no. 11, pp. 216-221, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.09.186>.
- [26] Hisakazu Nakamura, Yu Koyama: Minimum Projection Method for Asymptotic Stabilization of Compact Set, IFAC-PapersOnLine, 査読有, vol. 48, no. 11, pp. 1012-1017, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.09.32>.
- [27] Soki Kuga, Hisakazu Nakamura, Yasuyuki Satoh: Static strict control Lyapunov function design for the PVTOL system via Minimum Projection Method, Proceedings of the 10th Asian Control Conference, 査読有, 1570073893, 2015, <https://doi.org/10.1109/ASCC.2015.7244547>.
- [28] Keigo Hiruma, Hisakazu Nakamura, Yasuyuki Satoh: Settling Time Design for Finite-time P-PI Control and Parameter tuning method, Proceedings of the 10th Asian Control Conference, 査読有, 1570073779, 2015, <https://doi.org/10.1109/ASCC.2015.7244543>.
- [学会発表](計34件)
- [1] 中村 文一: 最適制御問題の層解法, 計測自動制御学会第5回制御部門マルチシンポジウム, 2018年3月8日~11日, 東京都市大学世田谷キャンパス(東京都世田谷区).
- [2] 林 拓哉, 中村 文一, 佐藤 康之: 入力アフィン非線形システムに対する制御 Lyapunov 関数を用いた固定時間制御, 計測自動制御学会第5回制御部門マルチシンポジウム, 2018年3月8日~11日, 東京都市大学世田谷キャンパス(東京都世田谷区).
- [3] 中村 文一, 吉永 昂央, 小山 悠, 江藤 隼: 制御バリア関数を用いたヒューマンアシスト制御, 計測自動制御学会第5回制御部門マルチシンポジウム, 2018年3月8日~11日, 東京都市大学世田谷キャンパス(東京都世田谷区).
- [4] 五十嵐 基, 中村 文一: 制御バリア関数を用いた2輪車両型移動ロボットの衝突回避アシスト制御, 計測自動制御学会第5回制御部門マルチシンポジウム, 2018年3月8日~11日, 東京都市大学世田谷キャンパス(東京都世田谷区).
- [5] 高井 麻希, 首代 博貴, 中村 文一: システム蘇生変換を用いた状態制約を有する非線形システムに対する入力修正制御, 第60回自動制御連合講演会, 2017年11月10日~12日, 電気通信大学(東京都調布市).
- [6] 九法 佑, 中村 文一, 久我 創紀: 状態制約を持つPVTOLシステムに対するシステム蘇生変換を用いた制御則設計, 第60回自動制御連合講演会, 2017年11月10日~12日, 電気通信大学(東京都調布市).
- [7] 橋本航, 山下 裕, 小林孝一: CLF 補間を用いた四輪車両系の障害物回避制御, 第60回自動制御連合講演会, 2017年11月10日~12日, 電気通信大学(東京都調布市).
- [8] 田中 彩, 福井 善朗: 不連続な速度場に対する受動速度場追従制御: 周期的軌道追従タスクの場合, 第60回自動制御連合講演会, 2017年11月10日~12日, 電気通信大学(東京都調布市).
- [9] 福井 善朗, 藤城 十郎, 和田 隆広: 有限時間整定PID制御に対する局所漸近安定性解析: 特定ゲインの場合, 第60回自動制御連合講演会, 2017年11月10日~12日, 電気通信大学(東京都調布市).
- [10] 橋本航, 山下 裕, 小林孝一: ヒステリシス機構を用いた4輪車両の漸近安定化, 第61回システム制御情報学会研究発表講演会, 2017年5月23日~25日, 京都テルサ(京都府京都市).
- [11] 別役 昂志, 福井 善朗: 最短経路計

- 算と Lyapunov 関数を用いた未知空間探索制御, 第 61 回システム制御情報学会研究発表講演会, 2017 年 5 月 23 日~25 日, 京都テルサ (京都府京都市).
- [12] 楠野 良樹, 西村 悠樹, 中村 文一, 田中 幹也: 超音波モータのノイズ保証付き有限時間整定制御, 第 61 回システム制御情報学会研究発表講演会, 2017 年 5 月 23 日~25 日, 京都テルサ (京都府京都市).
- [13] 安達 直人, 山下 裕, 小林 孝一: Quad ロータ UAV の大域的 CLF の構築について, 計測自動制御学会第 4 回制御部門マルチシンポジウム, 2017 年 3 月 6 日~9 日, 岡山大学津島キャンパス (岡山県岡山市).
- [14] Hisakazu Nakamura: Non-compact path following control via minimum projection method, SICE Annual Conference 2016, 2016 年 9 月 20 日~23 日, つくば国際会議場 (茨城県つくば市).
- [15] Yu Koyama, Hisakazu Nakamura: Adaptive end-effector position control of robot manipulator via minimum projection method, SICE Annual Conference 2016, 2016 年 9 月 20 日~23 日, つくば国際会議場 (茨城県つくば市).
- [16] Goshi Ikeno, Hisakazu Nakamura: Sector margin invariance by absolute input transformation in optimal control, SICE Annual Conference 2016, 2016 年 9 月 20 日~23 日, つくば国際会議場 (茨城県つくば市).
- [17] Yusuke Shimano, Soki Kuga, Hisakazu Nakamura: Static state feedback control system design for quadrotor or helicopter via minimum projection method, SICE Annual Conference 2016, 2016 年 9 月 20 日~23 日, つくば国際会議場 (茨城県つくば市).
- [18] Takao Yoshinaga, Hisakazu Nakamura: Experimental verification of global feedback control of two wheeled mobile robot by minimum projection method, SICE Annual Conference 2016, 2016 年 9 月 20 日~23 日, つくば国際会議場 (茨城県つくば市).
- [19] 中村 文一, 湯浅 健太郎: 消去イデアールと最小射影法を用いた代数多様体の安定化制御, 第 59 回自動制御連合講演会, 2016 年 11 月 10 日~2016 年 11 月 12 日, 北九州国際会議場 (福岡県北九州市).
- [20] 別役 昂志, 福井 善朗, 和田 隆広: ROS を用いた非標準的な実装構造を持つ移動ロボットシステム, 第 60 回システム制御情報学会研究発表講演会, 論文 ID 111-6, 2016 年 5 月 25 日~27 日, 京都テルサ (京都府京都市).

他 14 件

〔その他〕
ホームページ等
<http://www.rs.tus.ac.jp/~nakamura/>

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・准教授
研究者番号: 70362837

(2) 研究分担者

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

西村 悠樹 (NISHIMURA, Yuki)
鹿児島大学・理工学域工学系・准教授
研究者番号: 20549018

石川 将人 (ISHIKAWA, Masato)
大阪大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 20323826

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

佐藤 康之 (SATO, Yasuyuki)
東京理科大学・工学部・助教
研究者番号: 40738803