

令和 2 年 6 月 12 日現在

機関番号：32660

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K17830

研究課題名（和文）凸最適化の逆問題に基づいた入力・状態拘束系の非線形最適制御

研究課題名（英文）Nonlinear Optimal Control for Constrained Systems based on Inverse problems of Convex Optimization

研究代表者

佐藤 康之（Yasuyuki, Satoh）

東京理科大学・工学部電気工学科・助教

研究者番号：40738803

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：入力・状態拘束を持つ非線形システムに対して、制御リアプノフ関数と凸最適化理論に基づいた安定化制御則の設計法を構築した。また、最適化におけるカルーシュ・クーン・タッカー条件（KKT条件）と最適制御におけるハミルトンヤコビベルマン方程式（HJB方程式）の等価性に着目した理論解析により、この設計法で得られた制御則の連続性と逆最適性、ロバスト性などの性質を明らかにすることに成功した。応用面では、四回転翼型飛行ロボットの姿勢安定化および二輪車両型ロボットの起動追従制御などに提案法を適用し、その有効性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発した制御則設計法により、拘束条件を有するより広いクラスの非線形システムに対しても制御リアプノフ関数を用いて制御則設計を行うことが可能となった。得られた知見は、同種のシステムを対象とする非線形モデル予測制御（NMPC）の評価関数設計においても有用であると考えられる。また、本研究で得られたカルーシュ・クーン・タッカー条件（KKT条件）とハミルトンヤコビベルマン方程式（HJB方程式）のある種の等価性は、複数の制御則を融合させるためのアプローチとして有望であり、さらなる活用が期待される。応用面では、ロボットに代表されるメカトロニクス系の制御への適用が期待できる。

研究成果の概要（英文）：Regarding control of nonlinear systems subject to state and/or input constraints, we constructed a new stabilizing controller design method based on control Lyapunov functions (CLFs) and convex optimization theory. Owing to the equivalence between the Karush-Kuhn-Tucker (KKT) optimality conditions and the Hamilton-Jacobi-Bellman (HJB) equation, we proved some important properties such as continuity, inverse optimality, and robustness of the designed controllers. In terms of applications, we confirmed the effectiveness of the proposed method by attitude stabilization of a quadrotor unmanned aerial vehicle (UAV) and trajectory-tracking of a two-wheeled mobile robot.

研究分野：制御工学

キーワード：非線形システム 最適制御 入力・状態拘束 制御リアプノフ関数 制御バリア関数 凸最適化

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

自動運転車両や無人航空機・スマートグリッドなど、高度な自律制御システムの構築は社会的に重要な課題である。とりわけ、超スマート社会を前提とした、人と自律システムの共生が強く望まれている。この課題に対してシステム制御工学の観点からは、拘束条件を考慮した最適制御による統一的なアプローチに期待が集まっている。すなわち、様々なレベルでの共生を拘束条件もしくは評価関数の一部として反映し、拘束条件下で評価関数を最小化する制御によってシステムの機能を実現するものである。

拘束条件を考慮しながら数理的に複雑な非線形システムの最適制御を実現する方法の一つとして、制御リアプノフ関数(control Lyapunov function: CLF)とよばれるエネルギー関数を持ち、制御則を設計する方法が知られており、とりわけノルム制約型の入力拘束を持つ場合について研究が進められてきた。一方、状態拘束については、入力・状態変換やバリア関数を用いて扱うことは可能であるが、その際の安定性や制御則の最適性については十分に議論されておらず、解決すべき大きな課題となっている。

研究代表者はこれまで、CLFを用いてより一般的な凸入力拘束を有する非線形システムの制御則設計に取り組んできたが、研究を進める中で、最適制御則は凸最適化の逆問題として表現可能ではないか、という知見を得た。これは、最適制御におけるハミルトン-ヤコビ-ベルマン(HJB)方程式と凸最適化におけるカルーシュ-クーン-タッカー(KKT)条件の間に、ある種の等価性が成り立つことを示唆するものである。この知見をさらに発展させることで、拘束条件を考慮しない最適制御問題の評価関数を適切に変化させることで、拘束条件を考慮した最適制御則が可能となり、CLFを用いて拘束条件を考慮した統一的な制御則設計法に繋がるものと期待できる。

2. 研究の目的

前述の背景に基づいて設定した本研究の目的は以下の通りである。

- 1) 制御リアプノフ関数(CLF)と凸最適化に基づいて、入力拘束を有する非線形システムに対する(逆)最適制御則設計法を構築する
- 2) 1)の設計法に入力・状態変換やバリア関数などの状態拘束を扱う方法を組み合わせ、非線形拘束システムに対する統一的な最適制御則設計法への拡張を目指す
- 3) 1)および2)で得られた知見を非線形モデル予測制御(NMPC)における評価関数設計に応用し、少ない計算コストで拘束条件の取り扱いが可能か検討する。
- 4) 提案した制御則設計を現実の制御システムに適用し、数値シミュレーションや実機実験により有効性を検証する。

3. 研究の方法

- 1) 入力拘束を有する非線形システムの逆最適制御：
予備的に得られている、CLFと凸最適化による制御則設計法を拡張し、ある評価関数を最小化する(逆)最適制御則が得られるようにする。そのために、研究背景で述べたHJB方程式とKKT条件の等価性に基づいて、適切な拘束条件を定める。
- 2) 入力・状態拘束を有する非線形システムの逆最適制御：
1)で構築した設計法とバリア関数または入力・状態変換を融合させ、入力・状態拘束の両方を考慮できる設計法に発展させる。
- 3) 非線形モデル予測制御(NMPC)への展開：
1)および2)の制御則設計では、得られた制御則がどのような評価関数を最小化するか(逆最適性)についても検討を行う。この知見と拘束条件を考慮しない場合の評価関数を比較することにより、NMPCにおいて評価関数の変更のみで拘束条件を取り扱うことが可能かどうか検討する。
- 4) 実問題への応用：
ドローンや車両型移動ロボットなどの現実の制御システムに対して上記の制御則設計法を適用し、数値シミュレーションや実験により、その有効性を検証する。

4. 研究成果

- 1) 入力拘束を有する非線形システムの逆最適制御：
入力拘束を考慮しない最適制御則を凸最適化問題の解として表現し(凸最適化の逆問題)、入力拘束を加える事で新たな凸最適化問題を定義した。この新たな凸最適化問題の解として得られる制御則が、ある評価関数を最小化する逆最適制御則であることを理論的に明らかにした。また、この評価関数はシステムの漸近安定化可能領域内でのみ正定となり、領域外では負の値を取りうることも分かった。また、この制御則により保証される安定余裕(セクタ余裕)の大きさ

についても議論し、安定化可能領域の境界に近いほど安定余裕が小さくなることを明らかにした。また、提案した設計法は最適化により複数の制御則を連続的に接続している、と解釈することが可能であり、拘束条件を考慮した制御のみならず、より一般的に制御則を融合させる場合に適用可能であるという知見が得られた。さらに、提案設計法のさらなる拡張として、入力状態安定性や適応制御との融合についても検討を行った。特に、提案設計法と適応制御を組み合わせることで、安定余裕の意味でのロバスト性が向上することを理論的に明らかにした。

2) 入力・状態拘束を有する非線形システムの逆最適制御：

1)の設計法で用いた凸最適化問題に、制御バリア関数(CBF)による拘束条件を融合させることで、入力・状態拘束を考慮した制御則設計法を構築した。この設計法で得られる制御則が連続となる条件について、最適化の感度分析の観点から十分条件を与えた。具体的には、CLFによる拘束条件と CBF による拘束条件が、1次独立制約想定をみたく必要があることが分かった。また、この制御則により最小化される評価関数について、最適性条件である KKT 条件と Hamilton-Jacobi-Bellman(HJB)方程式の等価性を用いて解析を行った。

3) 非線形モデル予測制御(NMPC)への展開：

1)および2)の(逆)最適性に関する解析の結果、拘束条件を考慮した(逆)最適制御則が最小化する評価関数は、最適化問題の拘束条件に対応したラグランジュ乗数を含むため、このラグランジュ乗数を効率的に計算することが重要であるという知見を得た。また、比較的単純な入力・状態拘束の場合であれば、ラグランジュ乗数を解析的に導出することが可能であることも分かった。この知見を活用した新たな NMPC アルゴリズムの構築までには至らなかったが、今後の研究につながる重要な結果を得ることができた。

4) 実問題への応用：

1)の入力拘束を考慮した設計法を四回転翼型飛行ロボットの姿勢安定化制御に適用し、数値シミュレーションにより有効性を検証した。結果として、与えた入力拘束をみたくながら姿勢を安定化できることが確認できた。また、2)の状態拘束を考慮した設計法を二輪車両型ロボットの起動追従制御問題に適用した。結果として、状態拘束として与えた障害物を回避しながら、軌道追従を実現できることをシミュレーションにより確認できた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Yasuyuki Satoh, Hisakazu Nakamura	4. 巻 -
2. 論文標題 Adaptive compensation for stability margin recovery of nonlinear trajectory tracking controllers	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 2019 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA2019)	6. 最初と最後の頁 509/512
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 久我創紀, 中村文一, 佐藤康之	4. 巻 54
2. 論文標題 最小射影法を使った微分フラットシステムに対する静的状態フィードバック制御系設計	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 計測自動制御学会論文集	6. 最初と最後の頁 865/871
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Yasuyuki Satoh, Hisakazu Nakamura	4. 巻 51
2. 論文標題 Generalized sampling solutions for discontinuous stabilization of nonlinear systems	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IFAC-PapersOnLine	6. 最初と最後の頁 192/197
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.07.276	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 Sotaro Katayama, Yasuyuki, Satoh, Masahiro Doi, Toshiyuki Ohtsuka	4. 巻 -
2. 論文標題 Nonlinear Model Predictive Control for Systems with State-Dependent Switches and State Jumps Using a Penalty Function Method	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the 2018 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA)	6. 最初と最後の頁 312/317
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/CCTA.2018.8511448	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 Seiya Nomura, Yasuyuki Satoh, Hisakazu Nakamura, Kiyotaka kato	4. 巻 -
2. 論文標題 Path-following control of rigid body attitude by using minimum projection method	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the 2018 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA)	6. 最初と最後の頁 1591/1596
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/CCTA.2018.8511603	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 Takuya Kikuchi, Ryo Hisamoto, Hiroki Mizutani, Yasuyuki Satoh, Kiyotaka Kato	4. 巻 -
2. 論文標題 Disturbance estimation and disturbance suppression control using intelligent amplifier for multi-Copter	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the SICE Annual Conference 2018	6. 最初と最後の頁 523/528
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.23919/SICE.2018.8492651	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 Anan Tabata, Yasuyuki Satoh, Hisakazu Nakamura, Kiyotaka Kato	4. 巻 -
2. 論文標題 Adaptive fault tolerant control of quadcopter by using minimum projection method	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON2018)	6. 最初と最後の頁 2201/2206
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/IECON.2018.8591587	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 Kota Ohno, Yasuyuki Satoh, Hisakazu Nakamura, Kiyotaka Kato	4. 巻 -
2. 論文標題 Disturbance rejection control of rigid body attitude based on nonsmooth control Lyapunov function	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON2018)	6. 最初と最後の頁 2293/2298
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/IECON.2018.8592731	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 Hisakazu nakamura, Yasuyuki Satoh	4. 巻 -
2. 論文標題 Etale synergistic hybrid control design for asymptotic stabilization on manifold via minimum projection method	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the 2018 IEEE Conference on Decision and Control	6. 最初と最後の頁 2354/2359
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/CDC.2018.8619075	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 Hisakazu Nakamura, Yasuyuki Satoh	4. 巻 83
2. 論文標題 Etale backstepping for control Lyapunov function design on manifold	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Automatica	6. 最初と最後の頁 100 ~ 107
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.automatica.2017.05.010	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 廣田 一貴, 佐藤 康之, 元岡 範純, 浅野 雄太, 亀岡 翔太, 大塚 敏之	4. 巻 31
2. 論文標題 マルチコプタと移動物体の非線形Receding-Horizon微分ゲーム	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 システム制御情報学会論文誌	6. 最初と最後の頁 150 ~ 157
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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17件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 Yasuyuki Satoh, Hisakazu Nakamura
2. 発表標題 On nite time stability of homogeneous P-PI controller for robot manipulator orientation control
3. 学会等名 2018 UKACC 12th International Conference on Control (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Keita Nakano, Itaru Jinbu, Yasuyuki Satoh, Kiyotaka Kato
2. 発表標題 Three-dimensional position-measurement dystem for indoor ying robot that uses ultrasonic harmonic waves
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tetsuro Nakayama, Fumiya Sato, Yasuyuki Satoh, Kiyotaka Kato
2. 発表標題 Direct-data driven control using data conversion method
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐藤康之, 中村文一
2. 発表標題 一般化サンプル解に基づいた入力状態安定性について
3. 学会等名 第5回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 林拓哉, 佐藤康之, 中村文一
2. 発表標題 局所半凹制御リヤプノフ関数を用いた一般化サンプルリング解の有限時間安定性
3. 学会等名 第5回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤康之, 中村文一
2. 発表標題 エタールバックステッピング法の一般化について
3. 学会等名 第61回自動制御連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 久我創紀, 佐藤康之, 中村文一
2. 発表標題 動的にデカップリングされる線形システムに対する 逆最適線形二次制御則
3. 学会等名 第61回自動制御連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中村文一, 佐藤康之
2. 発表標題 多様体上における非線形システム安定化のためのエタールシナジーハイブリッド制御
3. 学会等名 第61回自動制御連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大野孝太, 佐藤康之, 中村文一, 加藤清敬
2. 発表標題 サンプル入力状態安定性に基づく剛体姿勢の外乱抑制制御
3. 学会等名 第4 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田端亜南, 佐藤康之, 中村文一, 加藤清敬
2. 発表標題 アクチュエータ故障時におけるクアッドコプターの非線形適応制御
3. 学会等名 第4 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kai Fukushima, Yasuyuki Satoh, Masahiro Doi, Toshiyuki Ohtsuka
2. 発表標題 Optimization of limb reaching movement for climbing humanoid robots
3. 学会等名 11th Asian Control Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Sotaro Katayama, Yasuyuki Satoh, Masahiro Doi, Toshiyuki Ohtsuka
2. 発表標題 Nonlinear model predictive control for systems with autonomous state jumps using a penalty function method
3. 学会等名 11th Asian Control Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kazuki Hirota, Yasuyuki Satoh, Norizumi Motooka, Yuta Asano, Shota Kameoka, Toshiyuki Ohtsuka
2. 発表標題 Nonlinear receding-horizon differential game between a multi-rotor UAV and a moving object
3. 学会等名 11th Asian Control Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 佐藤康之, 中村文一
2. 発表標題 多様体上の制御システムに対する一般化サンプル解とその漸近安定性について
3. 学会等名 第60 回自動制御連合講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 野村誠也, 佐藤康之, 中村文一, 加藤清敬
2. 発表標題 最小射影法によるSO(3)上の軌道追従制御
3. 学会等名 第60 回自動制御連合講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yutaro Ishikawa, Hisakazu Nakamura, Yasuyuki Satoh
2. 発表標題 Adaptive control of interior permanent magnet synchronous motor by minimum projection of dynamic copper loss minimization and null stabilization
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yuta Tsurumoto, Hisakazu Nakamura, Yasuyuki Satoh
2. 発表標題 Static smooth path-following control Lyapunov function design via minimum projection method
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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