

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 22 日現在

機関番号：34315

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2017

課題番号：26870711

研究課題名(和文)非可縮多様体上の時変システムの大域的制御

研究課題名(英文)Global Controller Design for Time-varying System Defined on Noncontractible Manifolds

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、多様体上で定義された時変/時不変な非線形システムを対象とし、微分不可能な制御Lyapunov関数(CLF)を使った大域的な制御則の設計法について研究した。大域的な局所半凹なCLFの設計法として、時変なシステムを考慮した最小射影法を提案するとともに、多層最小射影法でCLFを設計する際に必要となる、層(多層空間)の設計法も提案した。提案法は移動体による未知空間の探索制御に適用可能であるメリットがある。さらに、研究の副産物として、局所半凹なCLFに対する種々の一般化同士の関係を解析するとともに、本研究で得られた研究成果をロボット制御の一種である受動速度場制御に応用した。

研究成果の概要(英文)：This research considers a controller design problem for nonlinear time-varying/time-invariant systems defined on manifolds. We proposed 1) a design method of a time-varying non-smooth control Lyapunov function(CLF), called the minimum projection method, for time-varying nonlinear systems defined on manifolds, and 2) a design method of a multilayered space which is required by the minimum projection method. Further, we analyzed generalized differentials of a locally semiconcave CLF, and applied the research results to the robot control theory; we proposed an extended passive velocity field control as offshoots of this research.

研究分野：非線形制御

キーワード：時変システム 多様体 制御Lyapunov関数

1. 研究開始当初の背景

我々の身の回りは、非可縮な多様体上で定義された非線形制御システムで溢れている。非可縮な多様体（以下文脈に応じて単に多様体と略す）とはユークリッド空間とは同相でない空間であり、車両ロボットの姿勢角 S^1 、宇宙ロボットの姿勢角 $SO(3)$ などが例に挙げられる。

図1で示す2輪車両による円形障害物の回避問題は、多様体上で定義された非線形システムの好例である。平面内に穴があいているため、この空間はユークリッド平面と同相でなく、したがって、非線形システムが定義される空間は非可縮な多様体である。

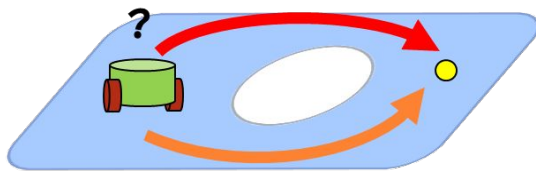


図1：多様体上で定義されたシステムの例。車両が動くことができる平面内に丸い穴が開いている。車両はこの丸い穴から落ちないように目標位置である黄色の点に移動しなければならない。穴の開いた空間とそうでない空間は位相空間論の観点で、空間の構造が全く異なる。

一方で、多様体上で定義された非線形システムの大域的な制御は、以下の理由から意外に難しいことが知られている。

- (1) 静的な連続状態フィードバック制御では、多様体上で定義されたシステムの目標平衡点を大域的漸近安定化できない。
- (2) 時変な連続状態フィードバック制御では、コンパクト空間を底空間に持つファイバー束の全空間上で定義されたシステムの目標平衡点の大域的漸近安定化はできない。

そのため、多様体上で定義されたシステムに対して状態フィードバックを設計する場合、不連続な状態フィードバック制御則を設計することになる。

図1の例でいえば、車両が障害物を回避する場合には右回りで避けるか左回りで避けるかの意思決定がどのような制御を採用するにしても必ず必要となる。この「意思決定を必ず行わなければならない」という事実に対応する部分が状態フィードバック制御則に要求される不連続性に当たる。

これまでの研究では、微分不可能な制御 Lyapunov 関数を設計・利用するアプローチで、不連続な状態フィードバック制御則の設計法を研究・提案してきた。最小射影法、あるいは、多層最小射影法と呼ばれる提案法は、多様体を複数のユークリッド空間のコプロダクトとして再解釈する手法で、トポス理論

の層を利用している(図2)。提案法では、層上で独立に制御 Lyapunov 関数を設計し、各層の制御 Lyapunov 関数値の中から最小値を取ることで、微分不可能な大域的制御 Lyapunov 関数を設計する。

そして、設計した制御 Lyapunov を用いて不連続な大域的状態フィードバック制御則を設計できることをこれまでの研究で示している。例えば、図2右で示した制御 Lyapunov 関数に対し、勾配に沿って移動する制御が提案法にあたり、どの点から移動を開始したとしても、目標位置である左下の区画に移動できることがわかる。

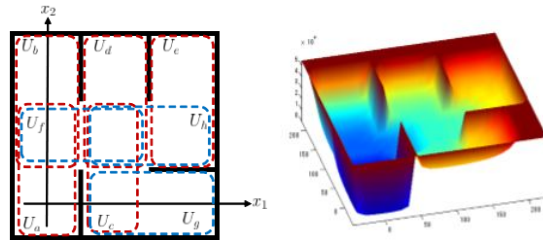


図2：平面空間に対する複数の空間によるコプロダクト(左)と得られた制御 Lyapunov 関数(右)【研究成果,学会発表(10)】より引用。多層最小射影法とは、障害物が配置された空間を複数の(障害物がない)空間が重なり合ってきたものとして再解釈し、それらの空間上で設計した制御 Lyapunov 関数を「射影・最小値をとる」という演算によって結合することで、障害物が配置された空間上の大域的な制御 Lyapunov 関数を得る方法である。

一方で、これまでの研究は2つの課題を抱えており、実用化への課題になっている背景があった。

- 課題1: 理論面の問題: 最小射影法・多層最小射影法は時変なシステム・空間を考慮していない。
- 課題2: 実用化に向けての障害: 層の具体的な構成法が明らかになっていない

2. 研究の目的

本研究では、多層最小射影法を拡張することで、(1)時変なシステムの大域的漸近安定化制御法を開発すること、(2)アプリケーションの開発を通じて提案する時変システムの安定化制御の有効性を示すこと、を目的とした。

3. 研究の方法

それぞれの課題に対して、以下の課題設定を行い、研究を遂行した。

- 課題1: 時変なシステムを考慮した多層最小射影法の開発
 - (1) 多様体上で定義されたシステムへの時変な制御 Lyapunov 関数の定義の検

討

- (2) 時変システムに対する最小射影法の開発

課題2：アプリケーション開発による有効性の検証

- (1) 多層最小射影法における層の具体的な構成法を明らかにする。
(2) 車両の動的障害物回避問題に提案法を適用し、実機実験を行う。

4. 研究成果

- (1) 課題 1: 時変なシステムを考慮した多層最小射影法の開発

多様体上で定義されたシステムへの時変な制御 Lyapunov 関数の定義を提案するとともに、多様体上で定義された時変な非線形システムに対する制御 Lyapunov 関数の設計法を提案した。

提案した時変な制御 Lyapunov 関数は、Z.P.Jiang らが研究している時変な制御 Lyapunov 関数を自然に拡張したものになっており、提案した制御 Lyapunov 関数の設計法はオリジナルの最小射影法を拡張したのになっている。

提案した時変システムに対する時変な制御 Lyapunov 関数の設計法は移動体の動的障害物回避問題や移動体の未知空間探索制御問題などに応用可能であるメリットがある。

- (2) 課題2: アプリケーションの開発

一般的な層の設計法について

多層最小射影法をもって制御 Lyapunov 関数を設計する場合には、多層空間と呼ばれる層を設計する必要がある。

今までの研究ではS1やS0(3)のような比較的単純で、かつ、位相的構造が既知である空間に対してしか層の設計が行われておらず、複雑なコンフィグレーション空間を持つロボットシステムに対する層の設計法は十分に研究されていなかった。

そこで、グラフ理論を用いた層の設計法を提案し、システムが定義される空間に対する開被覆を与えれば、多層最小射影法を使うために必要な条件を満たしている層が設計できることを示した。

提案法により、オフィスの環境地図のような複雑な空間に対しても、手続き的に制御 Lyapunov 関数を設計できるようにした。

複雑な空間上で定義されたシステムに対する制御 Lyapunov 関数の設計法の開発

で提案した層の設計法を応用し、TurtleBot のような室内を走行する自律移動ロボットが作成した環境地図データをコンフィグレーション空間とする移動体に対する制御 Lyapunov 関数の設計法を提案した。

提案法は環境地図データとして与えられるコンフィグレーション空間に対する開被覆の手続き的な設計法、で提案した層の設

計法、多層最小射影法、提案法で設計した制御 Lyapunov 関数を使った大域的な制御則である Rifford-Sontag 則で構成されており、与えた環境地図情報に対する大域的な不連続状態フィードバック制御を設計できるメリットがある。

未知空間の探索制御への応用

で提案した制御を応用し、未知空間内に配置された自律移動ロボットが目標座標に移動できることが理論的に保証されている、未知空間の探索制御を提案した。

提案法は、ロボットがセンサー情報をもとに、時々刻々と環境地図情報を更新することにあわせ、で提案した大域的な不連続状態フィードバック制御則を更新しつづけるものである。

従来の未知空間探索制御では、目標位置への到達の理論的保証が難しい問題点があったが、提案法は解析的に目標位置への到達が理論的に保証されているメリットがある。さらに、提案法は制御 Lyapunov 関数に基づいた状態フィードバックの一種であるため、ロバスト性や逆最適性が理論的に解析できる可能性を持っているメリットもある。

提案法の有用性は、実データに基づいたシミュレーション実験により行った。すなわち、実際に研究室を Turtlebot に走行させて得られた実環境の地図データを用意し、その地図データを用いたシミュレーション実験を行い、確かに未知空間の大域的探索制御が実現できていることを確認した。

図4・図5は実験結果のひとつである。図4左が実際の研究室環境を GridMap として表現した環境情報にあたる。緑で示した点がロボットの初期位置、赤で示した点がロボットの目標位置を意味しており、ロボットは初期状態としては目標位置の座標のみが与えられており、環境内を走行しながら環境地図を時々刻々と更新し続けなければならない。

図4右が提案法により得られる環境情報の開被覆にあたる。開被覆はいくつかの開円盤から構成されており、ロボットが移動可能な領域全体を覆っている。図5左は探索終了時の制御 Lyapunov 関数であり、環境内のそれぞれの位置に対し、「目標位置までどの程度遠いか」という情報を3次元グラフとして表現してある。提案する制御則は、関数の値が小さい方向へ移動し続けることで、目標位置へロボットを誘導するものになっている。図5右は探索終了時にロボットが保持している環境地図である。水色が真の環境情報としてシミュレーション条件としたもの、青色はロボットが保持している障害物情報を意味しており、黒い線はロボットが実際に走行した軌道を意味している。提案法により、ロボットが環境内を探索しながら走行し、初期位置から目標位置まで移動できていることが確認できる。

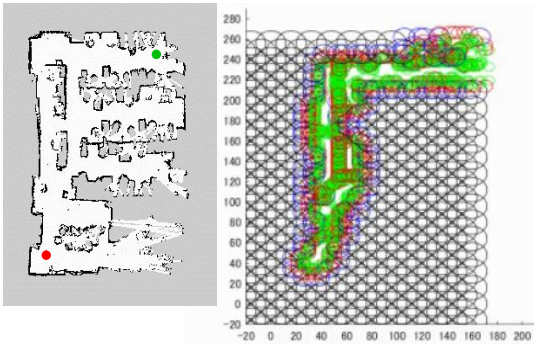


図 4：環境地図（左）ならびに提案法で得られた開被覆（右）

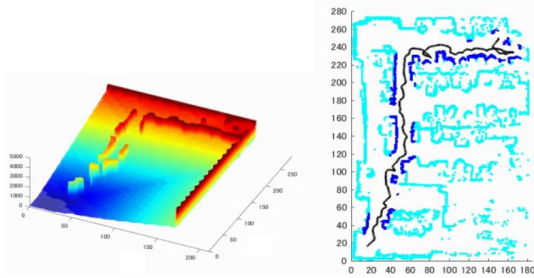


図 5：探索終了時の制御 Lyapunov 関数（左）ならびにえられた軌道（右）

(3) 研究の副産物：非線形解析

本研究で取り扱っている制御 Lyapunov 関数は微分不可能なものであり、特に、局所半凹性と呼ばれる微分不可能性を取り扱っていた。

本研究で得られた成果をロボット制御理論に応用するには、微分不可能関数の一般化微分をいかに簡素に扱うかが重要である。しかし、これまでの非線形解析と呼ばれる分野では種々の一般化微分が提案されており、それらの関係は一部示されているものの、不十分なものであった。

そこで、中村が提案した一般化微分である「局所半凹関数の分解微分」の考え方・定義の精密化に取り組んだ。

本研究では、「局所半凹関数の分解」という考え方を導入し、分解の考え方をを用いて、精密な分解微分の定義を改めて与えた。

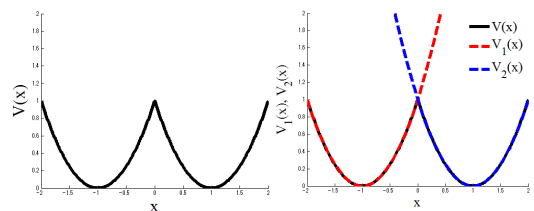


図 6：局所半凹関数とその分解の例

図 6 は局所半凹関数の分解の例である。局所半凹関数とは、誤解を恐れず大胆に言えば、上向きに尖ることを許した連続関数である。局所半凹関数は複数のなめらかな関数の最小として表現できることが知られており、図 6 左図の「上に尖った黒い線」は図 6 右のように、「なめらかな赤い線」と「なめらかな青い線」の最小として表現できる。このような、「尖った関数をなめらかな関数の最小として表現する」ことが局所半凹関数の分解の

考え方であり、本研究ではこの精密な定義とその性質を与えたのである。

与えた分解微分の定義によって線形モジュラスを持つ局所半凹関数に対する一般化微分同士の間係を解析したところ、可到達微分と呼ばれる一般化微分は、極小な分解微分として、フレッシュ微分と呼ばれる一般化微分は極大な分解微分と一致することを示すことができた。

これらの結果は、線形モジュラスを持つ局所半凹関数に対する一般化微分に対する種々の一般化微分同士の間係性を分解微分の枠組みで説明できることを意味している。

この結果を投稿論文としてまとめたところ、計測自動制御学会の論文賞を受賞することができた。

(4) 研究の副産物：ロボット制御理論

受動速度場制御というロボット制御を不連続は目標ベクトル場を取り扱い可能なように拡張することに成功した。

これまでの受動速度場制御は微分可能な目標ベクトル場しか取り扱うことができず、車両の障害物回避や剛体の姿勢角制御への適用が行えなかった問題があった。さらに、従来法は、個別のロボット・目標タスクごとに、個別論として目標速度場を設計する必要がある問題点があった。

そこで、(3)で行った一般化微分の整理作業で見出した「局所半凹関数の分解」という考え方を応用し、目標軌道追従タスクに対する不連続な大域的目標速度場の設計法を提案した。提案法は、フルアクチュエータなロボットシステムの目標軌道追従タスクに対する一般的な大域的目標速度場の設計法になっている。

さらに、従来の受動速度場制御はなめらかな目標速度場しか取り扱えなかったため、これを拡張し、不連続な目標速度場を取り扱い可能な受動速度場制御を開発した。

(5) まとめ

本研究では、(1)時変なシステムを考慮した多層最小射影法の開発を行うとともに、(2)多層最小射影法における層の具体的な構成法を明らかにした。提案した層の構成法を利用した、移動体による未知空間の探索制御法を提案し、提案法の有効性を示すとともに、研究の副産物として、(3)微分不可能関数である局所半凹関数の一般化微分に関する解析的な結果を与え、(4)不連続性を陽に取扱い可能な受動速度場制御への開発という形で、本研究成果の応用を行うことができた。

一方で、研究課題に挙げていた(5)時変な空間の考慮、(6)時変なシステムを考慮した多層最小射影法を動的障害物回避制御に適用して実機実験を行う点は、課題として残った。

以上より、完全ではないものの当初予定していた研究目標を凡そ達成し、その上で、非

線形解析やロボット制御分野において有用ないくつかの知見を本研究による副産物として得ることが出来た。総合的には申請当初の想定よりやや進んだ研究成果が得られたと考えている。

今後は提案した制御則のロバスト性解析や、空間の時変性を解析的に取り扱い可能な制御則の開発を行っていくとともに、実機実験を継続して行っていきたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

- (1) Yoshiro Fukui, Shiro Yano and Tadahiro Taniguchi: Convergence Error Analysis of DSM with Dual-Decomposition for the Smart Grid, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol. 9, No. 3, 1/7, 2016, 査読有。
- (2) 福井 善朗, 中村 文一: 多層最小射影法による局所半凹実用制御 Lyapunov 関数の設計, 計測自動制御学会論文集, Vol. 51, No. 12, 803/813, 2015, doi:10.9746/sicetr.51.803, 査読有。

〔学会発表〕(計 34 件)

- (1) Yoshiro Fukui, Takahiro Wada: Passive Velocity Field Control with Discontinuous Desired Fields: Non-smooth Potential Gradient Vector Field, CDC2017, 56th IEEE Conference on Decision and Control, 2017.
- (2) Takashi Betsuyaku and Yoshiro Fukui: Search control on unknown environment using shortest path calculation and Lyapunov technique, ROBOT2017, The IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2017.
- (3) 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.
- (4) 福井 善朗: 多様体上で定義された時変な大域的制御 Lyapunov 関数の設計, 第 4 回計測自動制御部門マルチシンポジウム(MSCS2017), 2017.
- (5) Yoshiro Fukui, Takahiro Wada: Velocity field control with energy compensation toward therapeutic exercise, CDC2016, 55th IEEE Conference on Decision and Control, Aria Resort & Casino, 2016.
- (6) Tomohiro Kunimune, Yoshiro Fukui, Takahiro Wada: Passive Velocity Field Control with discontinuous desired velocity fields, ROBOT2016, IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2016.
- (7) Yoshiro Fukui: Necessary and sufficient condition for locally

semiconcave practical control Lyapunov functions, NOLCOS 2016, 10th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems, 2016.

- (8) 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(SCI'16), 2016.
- (9) 福井 善朗: 局所半凹実用制御 Lyapunov 関数に対する可到達勾配の計算, 第 2 回計測自動制御部門マルチシンポジウム(MSCS2016), 2016.
- (10) Yoshiro Fukui: Space design for the multilayer minimum projection method in nonsmooth control Lyapunov function design, 2015 International Automatic Control Conference (CACSC 2015), 2015.
- (11) 福井 善朗, 中村 文一: 特異点消去付き多層最小射影法による局所半凹制御 Lyapunov 関数の設計, 第 2 回計測自動制御部門マルチシンポジウム(MSCS2015), 2015.
- (12) Yoshiro Fukui, Takahiro Wada: Tracking Control of Two Holonomic Robots in Formation without Collision, The 2014 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2014.
- (13) Takaaki Shogaki, Takahiro Wada and Yoshiro Fukui: Velocity Field Control with Energy Compensation toward Therapeutic Exercise, The 2014 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2014.
- (14) 飯田 一輝, 福井 善朗: マイクロマウス北陸同好会の活動報告, 第 57 回自動制御連合講演会, 2014.
- (15) 福井 善朗: 立命館大学におけるマイクロマウス競技の普及に関する活動報告, 第 57 回自動制御連合講演会, 2014).
- (16) Yoshiro Fukui: Dynamical Obstacle Avoidance Control via Minimum Projection Method Toward a Compact Set, SICE Annual Conference 2014, 2014.
- (17) 福井 善朗: 厳密な線形化と Rifford-Sontag 型制御による 2 台ロボットの同時トラッキング制御, 第 32 回日本ロボット学会学術講演会(RSJ2014), 2014.

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
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