

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2009

課題番号：19569004

研究課題名（和文） 制御 Lyapunov 関数に基づく非線形制御系設計

研究課題名（英文） Nonlinear controller design based on control Lyapunov functions

研究代表者

中村 奈美（Nakamura Nami）

奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・助教

研究者番号：30452527

研究成果の概要（和文）：

入力が凸空間に制約されている入力アフィン非線形システムに対して、制御 Lyapunov 関数を用いて漸近安定化制御則を開発し、さらに適応制御則に拡張した。また、局所同次な入力アフィン非線形システムに対して、局所同次な制御 Lyapunov 関数を使って局所同次な大域逆最適制御則を開発した。この制御則はセクタ余裕と局所的な収束速度を保証するが、これらの制御性能は座標系の取り方に依存しないことを明らかにした。さらに、局所 LQ 最適な大域逆最適制御則を開発した。

研究成果の概要（英文）：

We have proposed an asymptotically stabilizing controller and an adaptive controller for input affine nonlinear systems with convex input constraints by using given control Lyapunov functions. We have designed a global inverse optimal controller with local homogeneity for locally homogeneous input affine nonlinear systems by using locally homogeneous control Lyapunov functions. The proposed controller guarantees the local convergence rates and sector margins. We have clarified that local convergence rates and sector margins are invariant under coordinate transformations. We have proposed a global inverse optimal controller that is LQ optimal in a small neighborhood of the origin.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,200,000	0	1,200,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	600,000	3,800,000

研究分野：非線形制御理論

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：非線形制御理論、制御 Lyapunov 関数、入力制約、逆最適制御、同次システム、座標変換、収束速度、セクタ余裕

1. 研究開始当初の背景

非線形制御理論において、制御 Lyapunov 関

数を用いた制御系設計法は非常に有用な手法として知られている。この手法はモデリングなどで生じるパラメータ誤差やシステムに印加される外乱に対してロバストな制御系の設計が容易であるというメリットがあり、実際のシステムに対しても良好な制御性能が得られる。制御Lyapunov関数を用いる制御系設計法は、「制御Lyapunov関数の設計」と「制御則の設計」の2つのステップから構成される。制御Lyapunov関数に関する研究は多数あるが、以下のことが未解決であった。

#### (1) 入力制約の形状の問題

申請者はこれまでに、入力がノルム空間に拘束された入力アフィン非線形システムに対して、セクタ余裕を保証する漸近安定化制御則を提案した。しかし、より一般的の多様体制約は考えていなかった。

#### (2) 定常偏差の問題

従来の制御Lyapunov関数に基づく制御則は、原点は平衡点であるという仮定のもとで設計された。しかし、実際のシステムのパラメータは気温や湿度などによって変化するので、原点を平衡点にするために毎回パラメータ同定をする必要があった。

#### (3) 制御系の局所構造の問題

非線形制御系の局所的な制御性能は実用上非常に重要である。しかし、従来の非線形制御理論では、局所的な特性を生かす一般的な制御系設計法は確立していなかった。

## 2. 研究の目的

本研究では、以下の問題を解決することを目的とする。

#### (1) 凸入力制約問題の解決(入力制約の形状問題の緩和)

申請者はノルム型入力制約下での制御Lyapunov関数の最急降下ベクトルを求めるために幾何学的な手法を用いていたが、これはKarush-Kuhn-Tucker条件の特別な場合であることがわかってきており、従来の手法を一般の凸空間に拡張することが可能ではないかと考えている。そこで、凸入力制約下において、制御Lyapunov関数の最急降下入力、漸近安定化制御則、ロバスト制御則をこれまでと同様の手法で構築していく。

#### (2) 適応制御則の設計

従来の制御Lyapunov関数に基づく制御則と適

応制御則を組み合わせることによって、定常偏差にも対応できるロバストな漸近安定化制御則を設計する。

(3) 局所同次な大域逆最適制御則の設計対象とする非線形制御系の線形近似が意味をもたない場合も数多く存在するが、そのようなシステムに対しては同次近似が有力である。本研究では、局所同次な入力アフィン非線形システムに対して局所同次な大域逆最適制御則を設計することによって、セクタ余裕と局所的な収束速度を保証する制御手法を確立する。

#### (4) 線形近似がLQ最適になる非線形制御系設計

線形近似系が所望の性能を持つような非線形制御系設計は非常に重要である。本研究では、厳密線形化システムに対してLQ最適制御則を設計し、Freemanらの手法をもとに最適Lyapunov関数を用いて大域的な非線形制御系設計手法を確立する。

## 3. 研究の方法

入力が凸空間に拘束された入力アフィン非線形システムに対して、制御Lyapunov関数を使って漸近安定化制御則を開発し、さらに適応制御則へ拡張する。また、実験で有効性を確認する。

従来の制御Lyapunov関数に基づく制御則は、大きく分けてSontag型と同次型の二つのタイプがあった。そこで、これらの制御則を統合した一般形の漸近安定化制御則や逆最適制御則を開発する。さらに、局所同次かつ大域的に逆最適な制御則を開発する。また、LQ最適制御則との関連性を調査し、局所LQ最適な大域逆最適制御則を開発する。

## 4. 研究成果

入力がノルム空間に拘束された入力アフィン非線形システムに対して、制御Lyapunov関数を使って逆最適制御則を開発し、国際会議で発表した。

入力がノルム空間に拘束された不連続な入力アフィン非線形システムに対して、制御Lyapunov関数を使って、原点の近傍では逆最適かつ漸近安定化領域を最大化する漸近安定化制御則を開発した。また、ロボットアームに制御則を適用することによって、有効性を確認した。得られた成果は雑誌論文誌で発表した。

入力が凸空間に拘束された入力アフィン非線形システムに対して、制御Lyapunov関数を使って漸近安定化制御則を開発し、さ

らに適応制御則へ拡張した。また、磁気浮上系に適応制御則を適用することによって、有効性を確認した。得られた成果は国際会議で発表した。

入力アフィン同次システムに対して、同次制御 Lyapunov 関数を用いて同次漸近安定化制御則および同次逆最適制御則を開発し、雑誌論文誌で発表した。

従来の制御 Lyapunov 関数に基づく制御則を統合し、一般形の漸近安定化制御則や逆最適制御則を開発した。得られた制御則をさらに改良して、局所同次かつ大域的に逆最適な制御則を開発した。また、シミュレーションによって制御則の有効性を確認した。得られた成果は国内学会および国際会議で発表した。

制御則設計において、座標変換は非常に重要である。従来の研究では、微分同相な座標変換によって二つのシステムが一致するための条件が導出されてきたが、この座標変換のもとで収束速度やセクタ余裕などの制御性能が変化するかどうかは明らかにされていなかった。一方、漸近安定なシステムは原点で微分同相でない座標変換によって指数安定なシステムに変換できることがわかってきた。申請者は、微分同相な座標変換によって、これらの制御性能が変化しないことを明らかにした。得られた成果は国内学会で発表した。また、局所同次な大域逆最適制御則の成果とあわせて雑誌論文誌に投稿し、採録が決定している。

厳密線形化システムに対して LQ 最適制御則を設計し、さらに最適 Lyapunov 関数を用いて漸近安定化領域を大域に広げる手法を提案した。また、磁気浮上系に制御則を適用することによって、有効性を確認した。得られた成果は国内学会および国際会議で発表した。また、雑誌論文誌に投稿中である。

非可縮多様体上に制御 Lyapunov 関数を設計する手法として、多層最小射影法を開発した。得られた成果は国内学会で発表した。

同次システムに対して、同次制御 Lyapunov 関数を用いた制御系設計法を開発した。得られた成果は国際会議で発表した。

## 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 Nami Nakamura, Hisakazu Nakamura, Hirokazu Nishitani: Global inverse optimal control with guaranteed convergence rates of input affine nonlinear systems, IEEE Transactions on Automatic Control, 査読有, 採録決定.

- ② Nami Nakamura, Hisakazu Nakamura, Yuh Yamashita, Hirokazu Nishitani: Homogeneous stabilization for input affine homogeneous systems, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 54, No. 9, 2271-2275, 2009, 査読有.
- ③ 中村 文一, 加藤健一, 中村 奈美, 西谷 紘一: 入力制約を有する不連続な非線形システムに対する制御Lyapunov関数を用いた制御則の設計と制御検証実験, 計測自動制御学会論文集, Vol. 43, No. 6, 506-513, 2007年, 査読有

[学会発表] (計16件)

- ① 中村 奈美, 中村 文一: 座標変換による制御性能の不変性, 第38回制御理論シンポジウム, 153-156, 大阪, 2009年9月14日.
- ② 中村 文一, 福井 善朗, 中村 奈美: 多層最小射影法を用いた非可縮多様体上の制御Lyapunov関数設計, 第38回制御理論シンポジウム, 119-126, 大阪, 2009年9月14日.
- ③ Hisakazu Nakamura, Yasuyuki Satoh, Nami Nakamura, Hitoshi Katayama, Hirokazu Nishitani: Universal control formula for feedback linearizable systems with local LQ performance, European Control Conference 2009, 1155-1160, Budapest, Hungary, August 24, 2009.
- ④ Yasuyuki Satoh, Hisakazu Nakamura, Nami Nakamura, Hitoshi Katayama, Hirokazu Nishitani: Robust adaptive control of nonlinear systems with convex input constraints: case study on the magnetic levitation systems, ICCAS-SICE 2009, 4411-4416, Fukuoka, Japan, August 21, 2009.
- ⑤ 中村 奈美, 中村 文一: 入力アフィンな非線形システムに対する収束速度保証付き大域的逆最適制御則, 第9回制御部門大会, WA1-4, 東広島, 2009年3月4日.
- ⑥ Yasuyuki Satoh, Hisakazu Nakamura, Nami Nakamura, Hitoshi Katayama, Hirokazu Nishitani: Control formula for nonlinear systems subject to convex input constraints using control Lyapunov functions, 47th IEEE Conference on Decision and Control, 2512-2519, Cancun, Mexico, December 10, 2008.
- ⑦ Nami Nakamura, Hisakazu Nakamura: Global inverse optimal controller with guaranteed convergence rate for

- input-affine nonlinear systems, 47th IEEE Conference on Decision and Control, 2505-2511, Cancun, Mexico, December 10, 2008.
- ⑧ 中村 文一, 佐藤 康之, 中村 奈美: フィードバック線形化可能な非線形システムに対する局所LQ性を有する大域的逆最適制御, 第37回制御理論シンポジウム, 387-392, 霧島, 2008年9月19日.
- ⑨ Hisakazu Nakamura, Nami Nakamura, Hirokazu Nishitani: Explicit formulas for ISS stabilization of nonlinear systems subject to bounded inputs and disturbances, 17th IFAC World Congress, 15172-15178, Seoul, Korea, July 11, 2008.
- ⑩ Nami Nakamura, Hisakazu Nakamura: Transformation from real homogeneous systems of degree 1 to complex homogeneous systems of degree (1,0), 17th IFAC World Congress, 503-507, Seoul, Korea, July 7, 2008.
- ⑪ Nami Nakamura, Hisakazu Nakamura, Yuh Yamashita: Homogeneous stabilization for input-affine homogeneous systems, 46th IEEE Conference on Decision and Control, 80-85, New Orleans, USA, December 12, 2007.
- ⑫ Nami Nakamura, Hisakazu Nakamura, Yuh Yamashita, Hirokazu Nishitani: Homogeneous eigenvalue analysis for complex homogeneous systems of degree (1,1), SICE Annual Conference 2007, 1242-1256, Kagawa, Japan, September 19, 2007.
- ⑬ 中村 奈美, 中村 文一: 同次システムの解と楕円関数, 第36回制御理論シンポジウム, 489-492, 札幌, 2007年9月7日.
- ⑭ Hisakazu Nakamura, Nami Nakamura, Hirokazu Nishitani: Stabilization of homogeneous systems using implicit control Lyapunov functions, 7th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems, 561-566, Pretoria, South Africa, August 24, 2007.
- ⑮ Nami Nakamura, Hisakazu Nakamura: Homogeneous eigenvalue analysis for complex homogeneous systems, 7th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems, 415-420, Pretoria, South Africa, August 22, 2007.
- ⑯ Nami Nakamura, Hisakazu Nakamura, Yuh Yamashita, Hirokazu Nishitani: Inverse optimal control for nonlinear systems with input constraints, European Control Conference 2007,

5376-5382, Kos, Greece, July 5, 2007.

[図書] (計 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

○取得状況 (計 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

[その他]

ホームページ等

<http://sclab.naist.jp/Staff/namiff/home-ja.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中村 奈美 (Nakamura Nami)  
奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・助教  
研究者番号: 30452527

### (2) 研究分担者

( )  
研究者番号:

### (3) 連携研究者

( )  
研究者番号: