

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 11 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420434

研究課題名(和文) 非線形サンプル値系に対する受動性に基づくロバストな制御器設計法の開発

研究課題名(英文) Development of Passivity-based Robust Controllers for Nonlinear Sampled-data Systems

研究代表者

片山 仁志 (Katayama, Hitoshi)

静岡大学・工学部・准教授

研究者番号：20268296

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：非線形サンプル値厳密フィードバック系に対し、不可観測なシステムの状態を推定する低次元オブザーバの設計法を構築した。また、設計オブザーバのロバスト性などの特徴の明確化と共に、自然な仮定の下で、非線形サンプル値厳密フィードバック系に対する低次元オブザーバ型出力フィードバック準大域的実用一様安定化制御器の設計法を構築した。サンプル値劣駆動船舶の制御問題への適用から、設計制御器の有効性を確認した。あるクラスの非線形サンプル値厳密フィードバック系に対し、受動性に基づく低次元オブザーバのオブザーバゲインの設計法を提案した。

研究成果の概要(英文)：For nonlinear sampled-data strict-feedback systems, the design of reduced-order observers that estimate unmeasured state of the system is proposed. Their robustness and the design of proposed reduced-order observer-based output feedback semiglobally practically uniformly asymptotic stabilizing controllers is also considered under natural assumptions. The designed observers and controllers are also applied to the control problems of underactuated ships and their efficiency is illustrated by numerical simulations and experimental results. For some class of nonlinear sampled-data strict-feedback systems, the design of observer gains of the proposed reduced-order observers is also discussed by passivity of the sampled-data systems.

研究分野：工学

キーワード：制御システム 非線形サンプル値制御 受動性 低次元オブザーバ

1. 研究開始当初の背景

- (1) 非線形制御理論は連続時間系に対し広く研究されているが、コンピュータ制御の観点を考慮した、より現実的な非線形サンプル値制御系の制御理論はあまり研究されていない。
- (2) 非線形サンプル値系の制御理論の現在までに得られている結果は、安定性、連続時間系の結果のサンプル値系への適用法とより高性能な制御系設計を期待できる近似離散時間モデルに基づく制御系設計の枠組みの構築など、解析的な結果が主である。
- (3) 非線形サンプル値系の近似離散時間モデルに基づく具体的な制御器設計法は、厳密フィードバック型の特別なクラスに対するバックステッピング法だけであり、これ以外の具体的な設計法はほとんど議論されていない。特に実用上有益と考えられる、入力アファインな非線形サンプル値系に対する近似離散時間モデルに基づく具体的な制御器設計法は全く存在しない。
- (4) 非線形サンプル値制御理論を用いた船舶制御の研究結果から、船舶の慣性行列、線形減衰行列のパラメータの不確かさによる制御性能の悪化が見られ、パラメータの不確かさに対する制御器のロバスト性の重要性を明らかになった。
- (5) 非線形連続時間系の制御理論の最近の研究成果として、受動性とそれに基づく制御器設計法が高いロバスト性を有することが明らかとなり、基本研究とその応用研究が盛んに行われている。

2. 研究の目的

- (1) 非線形サンプル値系の近似モデルを含む離散時間系に対し受動性を定義し、離散時間系の大域的一様漸近安定性と一様受動性の関連性を明確化する。
- (2) 一様受動性に基づき、入力アファインな(非線形サンプル値系の近似モデルを含む)離散時間系の大域的一様漸近安定化を達成する制御器設計法を構築する。
- (3) 非線形サンプル値系の近似モデルと離散時間系の受動性に基づき、非線形サンプル値系を準大域的一様実用漸近安定化する制御器設計法を構築する。
- (4) 提案する制御器設計法のロバスト性、収束領域の大きさ、許容可能な最大サンプリング周期などの性質と他の設計法、特にバックステッピング法との比較を実機実験により確認すると共に、理論的な解析も行う。

2. 研究の方法

- (1) 非線形連続時間系の受動性の定義、受動性とシステムの大域的漸近安定性の関連性と入力アファインなシステムの受動性に基づく制御器設計法を再確認する。

- (2) 一般の離散時間系の場合の受動性の定義、受動性とシステムの大域的漸近安定性の関連性と入力アファインな離散時間系の受動性に基づく制御器設計法を再確認する。
- (3) 非線形サンプル値系の近似モデルを含む、サンプリング周期 T に陽に依存する離散時間系のクラスに対し、連続時間系に対し定義された受動性を、任意の T T^* (許容可能な最大サンプリング周期) に対し成立すべき一様受動性に定義を拡張する。新たに拡張した一様受動性と T に陽に依存する離散時間系の大域的一様漸近安定性の関連性を明確化する。また、受動性の定義に現れるストレージ関数と大域的一様漸近安定性を保証するリアプノフ関数の関連も明らかにする。このとき、構成されるリアプノフ関数の T への依存性も明確化する。
- (4) T に陽に依存する入力アファインな離散時間系のクラスに対し、受動性に基づく大域的一様漸近安定化制御器の設計法を構築する。また、非線形サンプル値制御系設計の枠組みにおいて、近似モデルに対し設計された制御器が非線形サンプル値系に対し準大域の実用一様漸近安定化を達成するためには、近似モデルを大域的漸近安定化するだけでは不十分であり、対応するリアプノフ関数の T への依存性も重要になる。このため、ストレージ関数より構成されるリアプノフ関数の性質や T への依存性も明確化する必要がある。
- (5) 非線形サンプル値系の近似モデルの一様受動性に基づき設計した制御器が元の非線形サンプル値系を準大域の実用漸近安定化することを以下の手順で確認する。受動性の定義に現れるストレージ関数を利用して、大域的一様漸近安定性を保証するリアプノフ関数を構築する。設計制御器と で構成したリアプノフ関数が、近似モデルの準大域の実用安定化の組になっていることを示す。あるいは、設計した制御器が任意の T T^* に対し有界となることを保証する。使用する近似モデルが、整合性条件を満たすことを確認する。
- (6) DC サーボモータ実験装置を用いて、設計制御器(あるいは提案設計法)の有効性を以下の手順により確認する。サーボモータと慣性質量間を非線形バネにより接続し、DC サーボモータを非線形サンプル値系としてモデル化し、提案設計法により制御器を設計する。慣性質量の変化に対するロバスト安定性の確認

許容可能な最大サンプリング周期とサンプリング周期と収束領域の関係の確認
連続時間理論により設計された制御器のデジタル実装や近似モデルに対するバックステッピング法による制御器との、の点での比較。

- (7) 設計制御器と他の設計法とのロバスト性や許容可能な最大サンプリング周期に関する理論的な比較を以下の様に行い、提案設計法の有効性を解析する。

受動性に基づく連続時間制御器のデジタル実装との比較

近似モデルに対するバックステッピング法により設計される制御器との比較

4. 研究成果

- (1) 工学的に非常に重要な非線形システムのクラスである厳密フィードバック系に対し、サンプル点観測を用いて直接には観測できないシステムの状態を推定する低次元オブザーバの設計法を構築した。また、設計オブザーバのロバスト性などの特徴の明確化を行うと共に、自然な仮定の下で、非線形サンプル値厳密フィードバック系に対する低次元オブザーバ型出力フィードバック準大域の実用一様安定化制御器の設計法を構築した。また、構築した制御器の有効性をサンプル値劣駆動船舶の直線及び円軌道追従制御問題に適用し、その有効性を確認した。
- (2) 非線形サンプル値系の近似モデルを含む離散時間系に対し受動性を定義し、離散時間系の大域的一様漸近安定性と一様受動性の関連性の明確化、連続時間系の場合との比較、特に、離散時間系特有の問題の困難さを確認した。また、非線形サンプル値系に対する準大域の実用一様漸近安定性と一様受動性の関連性の明確化を行っている。非線形サンプル値厳密フィードバック系に対しては、サンプル値系の近似離散時間モデルに対し一様受動性を達成する状態フィードバック制御則と準大域の実用収束性を達成できるオブザーバを設計できれば、自然な仮定の下で、元のサンプル値系の受動性を達成できるオブザーバ型出力フィードバック制御器を構成できることを示した。
- (3) あるクラスの非線形サンプル値厳密フィードバック系に対し、(一様)受動性に基づく低次元オブザーバのオブザーバゲインの設計法を提案した。また、より一般的な場合への拡張とこれを用いた出力フィードバック制御器の設計法の構築に取り組んでいる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5 件)

- (1) R. Akbar, B. Sumantri, 片山仁志, 佐野 滋 則、内山直樹、Reduced-order observer-based sliding mode control for a quad-rotor helicopter, Journal of Robotics and Mechatronics, 査読有、掲載決定
<https://www.fujipress.jp/jrm/rb/>
- (2) 片山仁志、Observers and output feedback stabilizing controllers for nonlinear strict-feedback systems with sampled observation、International Journal Control, 査読有、Vol. 89, No. 2, 2016, pp. 248-258
DOI:10.1080/00207179.2015.1072281
- (3) 片山仁志、Output feedback stabilizing controllers for nonlinear sampled-data strict-feedback systems, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 査読有、Vol. 4, No. 6, 2015, 417-422
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jcmsi/8/2/8_94/_pdf
- (4) 片山仁志、青木宏高、Straight-line trajectory tracking control for sampled-data underactuated ships, IEEE Transactions on Control Systems Technology, 査読有、Vol. 22, No. 4, 2014, 1638-1645
DOI:10.1109/TCST.2013.2280717
- (5) 片山仁志、Design of output feedback consensus controllers for nonlinear sampled-data multi-agent systems of strict-feedback form, International Journal of Systems Science, 査読有、Vol. 45, No. 9, 2014, 1955-1962
DOI:10.1080/00207721.2012.759302

〔学会発表〕(計 16 件)

- (1) 片山仁志、Design of a state and disturbance observer for nonlinear sampled-data strict-feedback systems with constant disturbance、2016 American Control Conference, 2016年7月7日、Boston (USA)
- (2) 片山仁志、Observers and output feedback consensus controllers for continuous-time strict-feedback multi-agent systems with sampled observation、2016 European Control Conference, 2016年6月30日、Aalborg (Denmark)
- (3) 片山仁志、一定値潮流の影響を受けるサンプル値劣駆動船舶の出力フィードバック直線軌道追従制御、第3回 制御部門マルチシンポジウム、2016年3月7日、南山大学(愛知県・名古屋市)
- (4) 片山仁志、非線形サンプル値厳密フィードバック系の低次元オブザーバと外乱オ

- ブザーバの設計、第 58 回自動制御連合講演会、2015 年 11 月 15 日、神戸大学(兵庫県・神戸市)
- (5) 片山仁志、Design of consensus controllers for multi-rate sampled-data strict-feedback multi-agent systems、4th IFAC Conference on Analysis and Control of Chaotic Systems、2015 年 8 月 27 日、首都大学東京(八王子市・東京都)
- (6) 片山仁志、Reduced-order observers for nonlinear sampled-data strict-feedback systems with control input update delay、2015 European Control Conference、2015 年 7 月 15 日、Linz (Austria)
- (7) 片山仁志、Stabilization of nonlinear sampled-data systems with input update delay、The 10th Asian Control Conference、2015 年 6 月 3 日、Kota Kinabalu (Malaysia)
- (8) 片山仁志、厳密フィードバックマルチエージェント系のマルチレートサンプル値コンセンサス制御、第 59 回システム制御情報学会研究発表講演会(SCI '15)、2015 年 5 月 22 日、中央電気倶楽部(大阪府・大阪市)
- (9) 片山仁志、サンプル点観測を持つ連続時間厳密フィードバックマルチエージェント系の出力フィードバックコンセンサス制御、第 2 回 制御部門マルチシンポジウム、2015 年 3 月 7 日、東京電機大学(東京都)
- (10) 片山仁志、入力遅れを持つ非線形サンプル値厳密フィードバック系の低次元オブザーバの設計、第 57 回自動制御連合講演会、2014 年 11 月 12 日、ホテル天坊(群馬県・伊香保市)
- (11) 片山仁志、サンプル点観測を持つ連続時間厳密フィードバック系のオブザーバと出力フィードバック安定化制御機の設計、電子情報通信学会研究会非線形問題研究会、2014 年 11 月 7 日、燕三条地域産業振興センター(新潟県・三条市)
- (12) 片山仁志、Design of output feedback stabilizing controllers for nonlinear sampled-data strict-feedback systems、SICE Annual Conference Sapporo 2014、2014 年 9 月 12 日、北海道大学(北海道・札幌市)
- (13) 片山仁志、Design of reduced-order observers for a class of nonlinear sampled-data systems、21th International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems (MTNS2014)、2014 年 7 月 7 日、Groningen (The Netherlands)
- (14) 片山仁志、非線形厳密フィードバックサンプル値系の低次元オブザーバの設計とロバスト性解析、第 14 回 制御部門

大会、2014 年 3 月 7 日、電気通信大学(東京都・調布市)

- (15) 片山仁志、Reduced-order observers for nonlinear sampled-data systems with application to marine systems、52nd IEEE Conference on Decision and Control、2013 年 12 月 12 日、Firenze (Italy)
- (16) 片山仁志、Output feedback circular path following control for sampled-data underactuated ships、SICE Annual Conference Nagoya 2013、2013 年 9 月 16 日、名古屋大学(愛知県・名古屋市)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0 件)
取得状況(計 0 件)

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
片山 仁志 (KATAYAMA HITOSHI)
静岡大学・工学部・准教授
研究者番号：20268296
- (2) 研究分担者
なし
- (3) 連携研究者
なし