

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560525

研究課題名(和文) 安定多様体法による非線形最適状態推定器の設計と応用

研究課題名(英文) Nonlinear observer design based on stable manifold theory with applications

研究代表者

坂本 登 (Sakamoto, Noboru)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：00283416

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：これまで一般的な設計手法が存在しなかった非線形システムに対して、安定多様体という概念に基づき体系的な設計論の開発を行った。非線形シルベスター方程式という方程式が重要な役割をすることがわかり、この方程式に対する(近似)解法を二つ提案した。一つは、状態依存線形表現を用いて状態依存線形シルベスター方程式を導き、この解析解を利用する方法である。これは、状態観測器を実装することが容易であるという特徴をもつ。もう一つの手法は、非線形シルベスター方程式を不変多様体理論に基づき厳密に数値計算する方法である。これには実施者がこれまで行った不変多様体計算理論が重要になる。

研究成果の概要(英文)：General approach for designing nonlinear observer does not exist so far. In this research, two approaches are proposed for the nonlinear observer design. The first one employs the state-dependent linear representation and uses the result of obtaining analytic solution for linear Sylvester equations. Observers with this approach have an advantage in actual implementations with its analytic representation.

The other approach tries to solve nonlinear Sylvester equation based on invariant manifold computation. This method uses the result of N. Sakamoto for invariant manifold computation theory.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：状態観測器 シルベスター方程式 不変多様体

1. 研究開始当初の背景

非線形システムに対するオブザーバ設計の一般理論は、現在存在しない。これは非線形制御理論の実用化を妨げる要因のひとつになっている。

2. 研究の目的

不変多様体やシルベスター方程式の理論からより広いクラスに対するオブザーバ設計の理論を構築する。実用化を目指し、計算手法や提供の際の計算量の評価も行う。

3. 研究の方法

本研究では、二つのアプローチをとった。一つは、線形オブザーバとして広く知られているルーエンバーガオブザーバにおいて基本的役割をするシルベスター方程式の近似解を解析的に表現する手法を開発した。もう一つのアプローチは、対象システムとオブザーバシステムの間に変多様体が存在するようオブザーバゲインを設計し、かつその不変多様体自身も計算するという、厳密アプローチである。

4. 研究成果

本研究で開発した二つの手法について成果をまとめる。

(1) 非線形システムを線形行列表現し、シルベスター方程式の解析解法を適用する手法:

線形行列表現は、非常に広い非線形システムに適用可能である。原点周りとは限らず大域的にこの表現は可能であり、これによりオブザーバを構成する基本方程式であるシルベスター方程式が状態依存の行列方程式になる。Duanらはシルベスター方程式の解析解法を開発している。これを線形行列表現された非線形システムに適用することで、大域的な非線形オブザーバを構成することが可能となった。このオブザーバの特徴は、解析的表現されたことによる適用の容易さにある。拡張カルマンフィルタなどでは、各点周りでのヤコビ行列を漸化式的に処理する必要があり、実システムでは十分な処理能力のあるプロセッサが必要になる。本提案手法では、解析表現を組み入れるだけで済むので、実時間での処理は比較的軽くなる。また、線形近似を行っていないため、有効領域は拡張カルマンフィルタより広がることが確認された。ただし、一般論としてこの性質を証明するには至っていない。本研究では、このオブザーバの実システム適用も行った。カオスシステムとしてよく知られたローレンツシステムや、研究実施者である坂本の研究室で作成した回転型倒立振り子システムに対しこのオブザーバを適用し、実験検証を行った。その結果、カルマンフィルタより軽い動作で機能するオブザーバであることや十分な吸引領域をもつことなどが確認できた。また、このオブザーバを外乱オブザーバとして用

いることも可能であることを確認した。

(2) 不変多様体計算によるオブザーバ設計理論:

本研究課題では、非線形シルベスター方程式を全く近似を用いずに解く手法の開発を行った。この研究の過程で、専攻研究であるKazantzisらの条件を格段に緩めることが可能となった。しかし彼らの条件を外すと、不変多様体としては一意性のない、計算という観点からは難しい問題となることもわかってきた。しかし、坂本がハミルトン・ヤコビ方程式の研究で開発した計算理論を拡張することで、この問題もある程度解決することができた。2014年IFAC世界大会で発表するこの成果では、様々な数値例に対して実際にオブザーバを計算し、これまで不可能であった範囲での状態推定が可能となりつつあることを示した。

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 10 件)

G. Nishida and N. Sakamoto, Hamiltonian Representation of Magnetohydrodynamics for Boundary Energy Controls: Topics in Magnetohydrodynamics, Dr. Linjin Zheng (Ed.), InTech, 167-188, 2012
藤本理唯宇, 坂本登, 非線形最適制御による倒立振子の振り上げ安定化, 計測自動制御学会論文集, 第 48 巻 7 号, 423-430, 2012

N. Sakamoto, Case studies on the application of the stable manifold approach for nonlinear optimal control design Automatica, Vol. 49, Issue 2, 568-576, 2013

山岸聡, 坂本登, 佐藤昌之, 非線形最適制御によるPIOを防止する飛行, 制御系設計, 日本航空宇宙学会論文集, 第 61 号 1 巻, 1-8, 2013

梅田大貴, 坂本登, 梅村哲央, 状態及び入力ノルムの制約を満足する非線形最適制御器の設計, 計測自動制御学会論文集, 第 49 巻 3 号, 345-352, 2013

梅村哲央, 坂本登, インバータ電圧のノルム制約を考慮した永久磁石同期モータの非線形最適サーボ系設計, システム制御情報学会論文集, 第 26 巻 7 号, 252-260, 2013

西田豪, 山口恭輔, 坂本登, 大変形を伴う柔軟梁の受動性に基づく境界制御, システム・制御・情報学会論文集, 第 26 巻 7 号, 288-296, 2013

鈴木秀俊, 坂本登, 倒立振り子に対する出力レギュレーション制御実験(中心多様体近似計算法による非線形制御), 日本

機械学会論文集(C編)第79巻803号,
2373-2382, 2013

上野晃司, 坂本登, 鈴木雅康, 小口俊樹,
状態依存シルベスタ方程式を用いた非線
形オブザーバの提案, 計測自動制御学会
論文集, 第50巻3号, 219-226, 2014
梅村哲央, 坂本登, LPVシステムに対す
る最適出力レギュレーションによるロッ
クアップクラッチのスリップ回転速度制
御, 計測自動制御学会論文集, 第50巻3
号, 274-280, 2014

[学会発表](計 26 件)

山岸聡, 藤本理唯宇, 坂本登,
Branislav Rehak, 中心多様体理論と
Kazantzis 状態推定器を用いたパラメ
ータ推定法の検討, 第55回システム制御
情報学会研究発表講演会, 2011年5月19
日, 大阪

R. Fujimoto, N. Sakamoto, The stable
manifold approach for optimal swing up
and stabilization of an inverted
pendulum with input saturation, IFAC
World Congress, 2011年8月31日, ミラ
ノ

N. Sakamoto, R. Fujimoto, S. Yamagishi,
B. Rehak, A new parameter estimation
method via center manifold theory with
application to unknown parameter
estimation in a chaos system, Proc. the
5th International Scientific
Conference on Physics and Control,
2011年9月7日, レオン

H. Umeda, Y. Maeyama, N. Sakamoto, Y.
Umemura, Optimal controller designs
satisfying state constraints The SICE
Annual Conference, 2011年9月15日,
東京

S. Yamagishi, N. Hasegawa, N. Sakamoto,
M. Sato, Nonlinear control of an
aircraft in the presence of microburst
windshear, The SICE Annual Conference,
2011年9月15日, 東京

上野晃司, 山岸聡, 藤本理唯宇, 坂本登,
中心多様体理論を用いたパラメータ推定
法のカオスシステムへの適用, 第54回
自動制御連合講演会, 2011年11月20
日, 豊橋

山岸聡, 湯浅佑斗, 坂本登, 佐藤昌之,
速度飽和によるPIOを防止する非線形最
適制御法の検討, 第48回日本航空宇宙
学会関西・中部支部合同秋期大会, 2011
年11月25日, 神戸

N. Sakamoto, B. Rehak, Iterative
methods to compute center and
center-stable manifolds with
application to the optimal output
regulation problem, 48th IEEE
Conference on Decision and Control,

2011年12月14日,

山岸聡, 坂本登, 佐藤昌之, 線形最適制
御によるを防止する飛行制御則設計, 第
12回計測自動制御学会・制御部門大会,
2012年3月14-16日, 奈良

梅田大貴, 梅村哲央, 坂本登, 線形最適
サーボに基づいた入力ノルム制約を含む
システムの制御系設計, 第12回計測自
動制御学会・制御部門大会, 2012年3
月14-16日, 奈良

山口恭輔, 西田豪, 坂本登, 非線形分布
定数系の安定化制御第12回計測自動制
御学会・制御部門大会, 2012年3月14-16
日, 奈良

K. Yamaguchi, G. Nishida, N. Sakamoto,
Energy estimation in numerical scheme
for nonlinear partial differential
equations, 4th IFAC Workshop on
Lagrangian and Hamiltonian Methods for
Non Linear Control, 2012年8月29日,
ベルティノーロ

山口恭輔, 西田豪, 坂本登, ハミルトニ
アン密度で表現したエネルギーのフィ
ードバックによる柔軟倒立振子の振り上げ
制御, 第55回自動制御連合講演会,
2012年9月17-18日, 京都

上野晃司, 坂本登, 鈴木雅康, 小口俊樹,
非線形オブザーバを用いたパラメータ推
定法によるカオスシステムのパラメータ
推定実験, 第55回自動制御連合講演会,
2012年9月17-18日, 京都

白木大介, 坂本登, 石川和男, 非線形シ
ステムの部分最適制御系設計とコント
ールモーメントジャイロの姿勢制御への
応用, 第13回計測自動制御学会・制御
部門大会, 2013年3月6-8日, 福岡

梅村哲央, 坂本登, LPVシステムに対す
る最適出力レギュレーション問題の適用
によるロックアップクラッチのスリップ
回転速度制御, 第13回計測自動制御学
会・制御部門大会, 2013年3月6-8日, 福
岡

上野晃司, 坂本登, 鈴木雅康, 小口俊樹,
状態依存シルベスタ方程式を用いた非線
形オブザーバの提案, 第13回計測自動
制御学会・制御部門大会, 2013年3月
6-8日, 福岡

石川和男, 佐藤昌之, 坂本登, 成岡優,
MuPAL- の空力特性推定第44期日本航
空宇宙学会年会講演会, 2013年4月18
日, 東京

N. Sakamoto, A recent progress in the
optimal control design under various
constraints, IFAC Conference on
Manufacturing Modelling, Management,
and Control, 2013年6月19日, サンク
トペテルブルク

Y. Umemura, N. Sakamoto, Lock-up slip
control of torque converter by using
optimal output regulation, The SICE

Annual Conference, 2013年9月15日, 名古屋

- ⑳ Y. Umemura, N. Sakamoto, Nonlinear control implementation for PMSM, The SICE Annual Conference, 2013年9月15日, 名古屋
- ㉑ K. Ishikawa, N. Sakamoto, D. Shiraki Design of partial optimal control for a nonlinear system and application to the attitude control of a control moment gyro, The SICE Annual Conference, 2013年9月17日, 名古屋
- ㉒ 山口恭, 坂本登, 回転型柔軟倒立振子の振り上げ制御第56回自動制御連合講演会, 2013年11月16日, 新潟
- ㉓ 菊池芳光, 山岸聡, 坂本登, 佐藤昌之, 非線形最適サーボ系によるPI0抑制制御系の設計, 第51回飛行機シンポジウム, 2013年11月20日, 高松
- ㉔ 石川和男, 坂本登, 佐藤昌之, 成岡優, 空力パラメータ推定における最適入力

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

坂本登 (SAKAMOTO, NOBORU)

名古屋大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 00283416

(2) 分担研究者なし

(3) 連携研究者なし