

平成 22 年 5 月 1 日現在

研究種目： 基盤研究(C)
 研究期間： 2007 ~ 2009
 課題番号： 19560441
 研究課題名(和文) ハミルトン力学が拓く非線形制御理論の新展開
 研究課題名(英文) New approach to nonlinear control theory by Hamiltonian mechanics

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

研究成果の概要(和文)：研究内容：

非線形最適制御，H 無限大制御の適用において解かなければならないハミルトン・ヤコビ方程式に対する新近似解法を提案した．さらに新解法を実行する計算プログラムの開発を行い，数値例題，航空宇宙工学における実問題へのシミュレーションによる検証，磁気浮上系システムに対する実験検証，入力飽和をもつシステムの最適制御系の設計などを行った．

非線形制御理論の実用化を妨げる 40 年来の課題に対して，これまでにない手法により一定の成果を上げることができた．提案理論は計算機での実行に適しており，計算プログラムの開発により，数値例題だけでなく，実験検証まで行ったのは，申請者の知る限り世界初である．

より高性能な制御系を設計するには，非線形性を無視することはできない．本研究により，システムの非線形性を厳密に処理することが可能となり，実験検証では，非線形制御による顕著な性能向上とロバスト性向上を確認した．

研究成果の概要(英文)：In this research we proposed a new approximate solution method to the Hamilton-Jacobi equation, which is one of the most important equations in nonlinear control theory such as optimal control and H-infinity control. We also developed computation programs and applied them to numerous problems. They include numerical problems, aircraft attitude control and control of a magnetic levitation system with experiments. Our results solve the longstanding problem for over 40 years that has been a bottle neck in control theory. The proposed method is suitable for computer implementation and the experimental verification of controllers by the Hamilton-Jacobi equation is, to the best of our knowledge, one of very few important achievements in this field. The concrete problems from engineering are the following. Optimal stabilization problem of an aircraft at high angle-of-attack, magnetic levitation system, systems with input saturation, and systems with input rate saturation related to Pilot-Induced-Oscillation suppression. The proposed algorithm is implemented in computer program in a numerically way and this approach has advantages in application in that non-analytic nonlinearities, such as saturations, can be handled.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2008 年度	900,000	270,000	1,170,000
2009 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

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：非線形制御，ハミルトン・ヤコビ方程式，安定多様体

1. 研究開始当初の背景

長く非線形制御実用化を妨げる要因であったハミルトン・ヤコビ方程式に対し，実用を見据えた解法が望まれていた。

2. 研究の目的

非線形制御を実用化するために不可欠なハミルトン・ヤコビ方程式に対し，実現可能な近似解理論とその計算プログラムを開発する。

3. 研究の方法

ハミルトン力学と安定多様体理論を用いて，逐次近似列を構成し，計算機に取り込みやすい近似理論を開発する。さらにこれを実行する効率的計算プログラムを開発し，実際の工学的システムへの適用を行いながら，理論と計算プログラムの改良を図る。

4. 研究成果

これまでにない手法により一定の成果を上げることができた。提案理論は計算機での実行に適しており，計算プログラムの開発により，数値例題だけでなく，実験検証まで行った研究は，非常に少ない。本研究により，システムの非線形性を厳密に処理することが可能となり，実験検証では，非線形制御による顕著な性能向上とロバスト性向上を確認した。これまで，非線形制御のこのような効用は，予想（期待）されていたものの，実際に確認された例は非常に少なかった。具体的には，以下のような応用例を取り上げ，シミュレーション研究，実験検証を行った。まずはじめに，航空機の大迎角飛行時の姿勢安定化問題を扱った。大迎角領域では，空力の非線形性が非常に強くなり，線形制御では安定化が不可能であることが知られていたが，開発した非線形最適制御の計算理論を適用することで，入力現実的な値をとるにもかかわらず圧倒的に広い安定化領域を作ることが可能になった。

次に，研究室所有の磁気浮上実験装置を用いた最適サーボ系の設計理論の検証を行った。サーボ系の設計は，追従系の設計と安定化の二つに分けられるが，安定化を従来の線形最適制御と本研究のハミルトン・ヤコビ方程式から求めたものとの比較を行った。結果として，本研究の手法によって過渡特性もロ

バスト性も格段に向上することが観察された。特に，ロバスト性の向上は，理論的にも工学的にも重要であり，このような非線形制御による性能向上を確認した研究は，あまり多くないと考えている。その理由は，ハミルトン・ヤコビ方程式を解くことができる研究者がこれまで存在しなかったからであると言ってよいであろう。

研究期間後半は，計算アルゴリズムのさらなる高速化，高効率化を行い，非解析的な非線形性，特に工学上重要な入力飽和をもつシステムを最適に安定化する研究を行った。ハミルトン・ヤコビ方程式を正確に解けるようになったことで，複数の入力が飽和の中で協調的に補い合うような制御系を設計することが可能になった。さらに，航空工学で深刻な問題として認識されているPIO (Pilot-Induced Oscillation) の抑制問題に対しても，提案手法が有効であることも確認できた。

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8件)

- ① M. Suzuki and N. Sakamoto, Controlling Ideal Turbulence in Time-delayed Chua's Circuit: Stabilization and Synchronization, International Journal of Bifurcation and Chaos, 2010, 掲載決定, 査読有
- ② 藤本理唯宇, 鈴木秀俊, 坂本登, 磁気浮上系に対する非線形最適サーボ系の設計, 計測自動制御学会論文集, 45 巻, 388-390, 2009, 査読有
- ③ 鈴木雅康, 坂本登, 理想乱流の制御に関する研究: Time-delayed Chua 回路における定常解の安定化と同期, 計測自動制御学会論文集, 第 45 巻 8 号, 398-405, 2009, 査読有
- ④ 鈴木秀俊, 坂本登, セルゲイ・チェリコフスキ非線形, 出力レギュレーション問題における中心多様体の近似解法, 計測自動制御学会論文集, 45 巻, 2009, 451-458, 査読有
- ⑤ 鈴木雅康, 坂本登, 理想乱流の同期化制御と通信への応用, 電子情報通信学会論

- 文誌 A, J92-A, 2009, 901-908, 査読有
- ⑥ M. Suzuki and N. Sakamoto, A butterfly-shaped localization set for the Lorenz attractor, Physics Letters A, Vol. 372, Issue 15, 2614-2617, 2008, 査読有
- ⑦ N. Sakamoto and A. J. van der Schaft, Analytical approximation methods for the stabilizing solution of the Hamilton-Jacobi equation, IEEE Transaction on Automatic Control, Vol. 53, No. 10, 2335-2350, 2008, 査読有
- ⑧ 坂本登, 安定多様体の近似によるハミルトン・ヤコビ方程式の近似解法, シミュレーション, 第 27 巻 4 号, 221-225, 2008, 査読有

[学会発表] (計 17 件)

- ① 湯浅佑斗, 坂本登, 梅村哲央, 飽和を含むシステムに対する最適制御器の設計, 第 10 回計測自動制御学会制御部門大会, 2010 年 3 月 17 日, 熊本
- ② M. Suzuki and N. Sakamoto, Controlling ideal turbulence and an application to communications, The 48th IEEE Conference on Decision and Control, 2009 年 12 月 16 日, 上海
- ③ 鈴木雅康, 坂本登, 内藤一敏, 理想乱流の制御に関する研究 - Time-delayed Chua 回路の多チャネルスペクトル拡散通信への応用に関する一考察 -, 第 38 回制御理論シンポジウム, 2009 年 9 月 13 日, 大阪
- ④ Y. Yamato, N. Sakamoto and M. Takahama, Attitude stabilization of an aircraft via nonlinear optimal control based on aerodynamic data, ICROS-SICE International Joint Conference, 2009 年 8 月 19 日, 福岡
- ⑤ M. Suzuki, N. Sakamoto and K. Naito, Controlling ideal turbulence: stabilization and synchronization, The 2nd IFAC Conference on Analysis and Control of Chaotic Systems, 2009 年 7 月 6 日, ロンドン
- ⑥ 湯浅佑斗, 坂本登, 入力飽和を含むシステムに対する最適制御器の設計, 第 53 回システム制御情報学会研究発表講演会, 2009 年 5 月 20 日, 神戸
- ⑦ 鈴木雅康, 坂本登, 理想乱流の制御に関する研究: Time-delayed Chua 回路の同期と通信への応用, 第 9 回計測自動制御学会制御部門大会, 2009 年 3 月 17 日, 広島
- ⑧ H. Suzuki, N. Sakamoto and S. Celikovsky, Analytical approximation method for the center manifold in the

- nonlinear output regulation problem, The 47th IEEE Conference on Decision and Control, 2008 年 12 月 10 日, Mexico
- ⑨ 大和裕平, 坂本登, 最適制御による航空機の姿勢安定化, 第 45 回日本航空宇宙学会中部・関西支部合同秋期大会, 2008 年 11 月 25 日, 名古屋
- ⑩ 鈴木秀俊, 坂本登, 藤本理唯宇, 中心多様体の近似解法とその剛体姿勢制御問題への適用, 電子情報通信学会非線形問題研究会, 2008 年 11 月 20 日, 名古屋
- ⑪ 鈴木雅康, 坂本登, 内藤一敏, 理想乱流の制御に関する研究, 第 37 回制御理論シンポジウム, 2008 年 9 月 15 日, 鹿児島
- ⑫ M. Suzuki and N. Sakamoto, Global stabilization of periodic orbits in chaotic systems by using symbolic dynamics, Proc. the 17th IFAC World Congress, 2008 年 7 月 4 日, ソウル (韓国)
- ⑬ 大和裕平, 坂本登, 非線形最適制御による航空機のストール近傍からの脱出, 第 52 回システム制御情報学会研究発表講演会, 2008 年 5 月 17 日, 京都
- ⑭ 鈴木秀俊, 坂本登, 非線形出力レギュレーション問題における中心多様体の近似解法, 第 8 回計測自動制御学会制御部門大会, 2008 年 3 月 10 日, 京都
- ⑮ 内藤一敏, 坂本登, 小口俊樹, 鈴木雅康, 同期状態にあるカオス系の制御, 電子情報通信学会非線形問題研究会, 2007 年 12 月 5 日, 福井
- ⑯ 鈴木雅康, 坂本登, 記号力学系を用いた離散時間カオス系に対する大域的安定化の研究, 第 50 回自動制御連合講演会, 2007 年 11 月 23 日, 横浜
- ⑰ M. Suzuki and N. Sakamoto, A study on global stabilization of a class of discrete-time systems by using symbolic dynamics, The 3rd International IEEE Scientific Conference on Physics and Control, 2007 年 9 月 3 日, Potsdam (Germany)

[図書] (計 1 件)

早川義一, 坂本登, 他, 新インターユニバーシティ システムと制御, オーム社, 2008

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) 研究分担者

山田 克彦 (YAMADA KATSUHIKO)

名古屋大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：30402481

軸屋 一郎 (JIKUYA ICHIRO)
名古屋大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：903459

(3) 連携研究者