

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 30 日現在

機関番号：17701

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22760320

研究課題名（和文） HJB量子化と確率過程量子化の融合に基づく非線形最適制御理論の構築

研究課題名（英文） Construction of nonlinear optimal control theory based on fusion of quantization methods for HJB equations and stochastic processes

研究代表者

西村 悠樹(NISHIMURA YUKI)

鹿児島大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：20549018

研究成果の概要（和文）：

宇宙ロボットのように非線形性の強い制御系を、状態フィードバック（位置や速度などの情報）を用いて安定化するならば不連続性を伴う入力が必要である。また、現代では省エネルギー性も重要である。本課題は、これらを統一的に扱う非線形最適制御問題を解くために、二つの手法（HJB量子化と確率過程量子化）を掛け合わせ、新たな近似解法アルゴリズムを構築した。また、提案手法を超音波モータの位置決め制御に施し、有用性を確認した。

研究成果の概要（英文）：

To stabilize nonlinear control systems such as nonholonomic systems, discontinuous state-feedback control laws should be designed. Furthermore, energy conservation measures are recently required for controlling mechanical and electrical dynamical systems. To solve the problems at one time, this research has proposed a new numerical approximation method for nonlinear optimal regulator problems by combining two quantization methods of Hamilton-Jacobi-Bellman equations and stochastic processes. The industrial value of the proposed method has been confirmed by the experimental researches of controlling ultrasonic motors.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

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、最適制御、確率制御、量子化、リャプノフ安定性

## 1. 研究開始当初の背景

(1) エコロジー社会を目指す為に制御工学が成すべきことの一つは省エネルギーなシステムの運用である。制御理論の観点からこ

の問題を考えると、多くの場合、最適化と安定化を同時に達成することが目的となる。そのような制御則は最適レギュレータと呼ばれる。

(2) 非線形最適レギュレータ問題を解決するには正準方程式の2点境界値問題を解くかHJB方程式を解く必要があるが、Lyapunov安定論の方向から解析を進めるならば後者の方が有利である。しかし、HJB方程式は非線形偏微分方程式なので一般解を得ることが困難である。更に、宇宙ロボットのような非ホロノミックシステムの最適制御問題においては不連続解が許容されなくてはならないため、近似解の構成方法が問題となっている。より具体的には、不連続な静的フィードバックが必要となるケースでは一般的な理論体系は構築されておらず、チェインドシステムなど一部のシステムについて粘性解を用いた手法で近似解が得られている程度である。

(3) 一方、近年提案されたDiracの量子化を用いたHJB方程式の量子化(HJB量子化)では、Planck定数に由来する付加項をHJB方程式に加えている。これにより、本来の最適レギュレータ問題では微分不可能解となるものが解として許容されると考えられる。しかし、同手法を用いた構造的な求解アルゴリズムは得られておらず、その提案が求められている。

## 2. 研究の目的

本研究では、不連続制御則を許容する非線形最適レギュレータ問題の新しい近似解法を得るため、代表者らがこれまでに研究してきた『確率過程量子化を用いたLyapunov関数の近似構築法』を拡張し、HJB量子化に対する近似解法を新たに構築することを目指す。

## 3. 研究の方法

(1) 提案手法はLyapunov方程式に方向付き差分近似と確率過程量子化を施したものである。HJB量子化により得られるSchrödinger方程式は、適当な変換を施すことでLévy過程(確率的な状態遷移を伴う確率過程)或いは確率ハイブリッド系(確率的なモード遷移を伴う確率過程)の支配方程式とみなすことができると考えられる。

(2) そこで本課題では、申請者らの手法をLévy過程或いは確率ハイブリッド系に拡張した上でHJB量子化に適用し、得られた新手法を超音波モータのレギュレータ問題に適用する。

(3) また、その際に問題となってくる確率システムの安定性とはどのようなものであるかについても解析を進め、確定的な最適制

御問題に確率制御的手法を用いる上での注意点を明らかにする。

## 4. 研究成果

(1) 平成22年度では、まず、二つの手法をそのまま組み合わせた場合にどのようなことが言えるのかを示し、HJB方程式の正定解を導く際に理論的に困難な部分があることを指摘するなど、種々の問題点を明らかにした。次に、HJB方程式の不連続解に対応した近似解法を導くべく、確率過程量子化をLevy過程へと拡張する試みをした。また、状態制約下での最適制御問題にも対応した近似解法を導く取っ掛かりとして、HJB量子化手法を指数1のHessenberg型微分代数方程式システムへと拡張する試みをした。更に、確率ハイブリッドシステムが提案手法に使用可能かどうかについて調査を行った。その後、確率過程量子化手法には理論的部分およびアルゴリズム的部分に曖昧な部分があったため、手法を洗練させLyapunov関数の構築がしやすい手法に発展させた。特に、固有関数を適切に重ね合わせるアルゴリズムを開発できたので、最適レギュレータ問題の近似解法への拡張が現実味を帯びてきた。

(2) 平成23年度では、まず、HJB量子化手法の理論的な曖昧さについて検討し、非線形無限時間最適レギュレータへの適用可能性について研究発表を行った。更に、次年度で行う予定の超音波モータを用いた提案手法の実機実験への適用の事前準備として、制御Lyapunov関数に基づく符号の反転しないスライディングモード制御を超音波モータに適用し、その有用性を実機実験により示した。非線形最適レギュレータを導くHJB方程式の正定解は制御Lyapunov関数として考えることができるため、提案手法が完成した際には超音波モータ実機への適用可能性が見込まれる。

(3) 平成24年度は最終年度であるため、提案手法の有用性ならびに妥当性について検討した。まず、提案手法の一部を為す確率安定性について、その確定システムとの違いを明確にした上で、できるだけ確定システムの安定性に近づける方法を模索した。また、収束性をより早く達成するために有限時間安定性の概念も取り入れた。実機実験においては、まず超音波モータの局所モデルを構築し、次いで制御リャプノフ関数をベースとした最適制御を適用し、提案手法の有用性を確認した。

(4) 以上より、提案手法が不連続入力を伴う非線形最適レギュレータ問題の近似解法として有用であることが確かめられた。ただし、学会発表や論文投稿時においても指摘されているように、得られた離散近似解が本来の連続解に収束するための条件に曖昧さが残っており、今後はこれを解決する必要がある。

#### 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. 西村悠樹, 田中幹也, 若佐裕治: 1 次元 Wiener 過程による確定アファインシシステムの概漸近安定化問題, 計測自動制御学会論文集, 査読有, 49-4, 432/439, 2013
2. 西村悠樹, 田中幹也, 若佐裕治, 中村文一: 駆動周波数制御による超音波モータのロバスト角度制御, 日本 AEM 学会誌, 査読有, 20-2, 554/561, 2012
3. 西村悠樹, 田中幹也, 若佐裕治, 山下裕: 無限時間最適レギュレータ問題の近似解を構成する Schrodinger 方程式について, 日本応用数学会論文誌, 査読有, 21-3, 197/209, 2011

[学会発表] (計 14 件)

1. 上原理, 西村悠樹: 非線形確率システムの確率有限時間整定制御, 計測自動制御学会第 13 回制御部門大会, 福岡県福岡市, 2013 年 3 月 6 日
2. 國友貴夫, 西村悠樹: 超音波モータにおける位置決め制御のための非線形モデリング, 計測自動制御学会第 13 回制御部門大会, 福岡県福岡市, 2013 年 3 月 6 日
3. 西村悠樹, 田中幹也, 中村文一: 制御 Lyapunov 関数を用いた超音波モータの非線形ロバスト角度制御, 第 55 回自動制御連合講演会, 京都府京都市, 2012 年 11 月 18 日
4. 西村悠樹: 概生存可能性に基づく確率 1 での漸近安定性, 第 41 回計測自動制御学会制御理論シンポジウム, 神奈川県葉山町, 2012 年 9 月 18 日
5. Y. Nishimura, K. Tanaka, and Y. Wakasa: Almost sure asymptotic stabilizability for deterministic systems with Wiener processes, 20th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED 2012), スペイン

(バルセロナ) 2012 年 7 月 3 日

6. 西村悠樹, 田中幹也, 若佐裕治: 概漸近安定性に基づく確率 Lyapunov 安定論, 第 12 回計測自動制御学会制御部門大会, 奈良県奈良市, 2012 年 3 月 15 日
7. Y. Nishimura, K. Tanaka, Y. Wakasa, and H. Nakamura: Robust Angle Regulation for Ultrasonic Motor using CLF-based Controller, the 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2011), オーストラリア (メルボルン) 2011 年 11 月 8 日
8. 西村悠樹, 田中幹也, 若佐裕治, 山下裕: チェインドシステムに対する大域連続確率安定化制御, 第 40 回計測自動制御学会制御理論シンポジウム, 大阪府大阪市, 2011 年 9 月 28 日
9. Y. Nishimura, K. Tanaka, Y. Wakasa, and Y. Yamashita: Schrodinger equations for constructing infinite time horizon optimal regulators, IFAC World Congress 2011, イタリア (ミラノ) 2011 年 8 月 29 日
10. 西村悠樹, 田中幹也, 若佐裕治, 山下裕: 固有値解析を用いた Lyapunov 関数の構築法, 第 11 回計測自動制御学会制御部門大会, 沖縄県西原町, 2011 年 3 月 17 日
11. 西村悠樹, 田中幹也, 若佐裕治: 指数 1 の Hessenberg 型微分代数方程式系の最適レギュレータ問題に対する HJB 量子化を用いた近似解法, 第 39 回計測自動制御学会制御理論シンポジウム, 大阪府大阪市, 2010 年 9 月 29 日
12. 西村悠樹, 田中幹也, 山下裕: 複合 Poisson 過程を含む確率システムに対する Markov 過程量子化を用いた Lyapunov 関数の構築法, 第 39 回計測自動制御学会制御理論シンポジウム, 大阪府大阪市, 2010 年 9 月 27 日
13. Y. Nishimura, Y. Wakasa, and K. Tanaka: Approximate solution to nonlinear optimal regulator problem using quantum and stochastic theories, 19th International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems (MTNS 2010), ハンガリー (ブダペスト) 2010 年 7 月 8 日
14. 西村悠樹, 若佐裕治, 田中幹也: Markov 過程の量子化を用いた非線形最適レギュレータ問題の近似解法, 第 54 回システム制御情報学会研究発表講演会, 京都府京都市, 2010 年 5 月 20 日

[その他]

ウェブサイト :

[http://www.mech.kagoshima-u.ac.jp/~yuni  
shi/nishimura/works.html](http://www.mech.kagoshima-u.ac.jp/~yuni<br/>shi/nishimura/works.html)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

西村 悠樹 (NISHIMURA YUKI)

鹿児島大学・大学院理工学研究科・准教授  
研究者番号 : 20549018