

平成 21 年 4 月 1 日現在

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2006～2008

課題番号：18760320

研究課題名 (和文) ハイブリッドシステムの確率的最適制御

研究課題名 (英文) Probabilistic optimal control of hybrid systems

研究代表者

東 俊一 (AZUMA SHUN-ICHI)

京都大学・大学院情報学研究科・助教

研究者番号：40420400

研究成果の概要：

本研究課題では、ハイブリッドシステムの最適制御問題を近似的に解くための確率的アルゴリズムの開発を試みた。その結果、一般的なクラスのシステムに対しては、解の精度を「最適値からの差が〇〇%以内」といった形で保証することは、確率的手法を用いたとしても困難であることを示した。そして、システムのクラスを、制御入力だけが離散となる「離散値入力型システム」に限定すれば、常に、少ない計算量で近似解が得られること示し、そのための具体的手法も与えた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,200,000	0	1,200,000
2007年度	1,000,000	0	1,000,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	300,000	3,500,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御理論

キーワード：制御理論, ハイブリッドシステム

## 1. 研究開始当初の背景

ロボット、化学プラント、コンピュータネットワークなどに代表される知能化されたシステムには、多くの場合、物理量といった連続的な状態量に加え、離散的な状態量が含まれる。たとえば、自動変速機が搭載された自動車では、位置や速度が連続的な状態量にあたり、1速/2速/…/5速といったギアの値が離散的な状態量にあたる。

このようなシステムのダイナミクスは、「連続的な状態」および「離散的な状態」という異質な状態変数によって決定されるこ

とからハイブリッドシステムと呼ばれ、21世紀の動的システム論の中核のひとつとして精力的に研究が進められているトピックである。特に、ハイブリッドシステムの最適制御に関する研究は盛んに行われており、多くの優れた理論的成果がこれまでに発表されてきた。

その一方で、ハイブリッドシステムの最適制御問題は、効率的な計算が絶望的なクラスの問題であることが数学的に証明され、このことが実応用への足枷となっていた。それゆえ、つぎの段階の研究として、

- ・効率的に最適制御入力の計算が可能となるシステムのクラスを明らかにすること
- ・一般的なクラスのシステムに対して、実用的な計算量で、近似的な最適制御入力を計算する方法を開発すること

が必要であった。

## 2. 研究の目的

本研究課題では、ハイブリッドシステムの最適制御問題に対する実用的な近似解法として、ランダムサンプリングを利用して準最適制御入力を超高速に計算するための方法論を確立することを目的とした。そして、具体的目標としてつぎの2点を設定した。

- (1) 最適制御入力の確率的計算法の開発：準最適制御入力を超高速に計算する確率的アルゴリズムの開発を行う。この際、「精度の良い制御入力を高速で計算するために必要なランダム変数は何か？そのサンプル数は？」という問いに対し、確率・統計論的視点から解を与える。
- (2) 提案法の解析とその応用：提案アルゴリズムの性能を、近似精度と計算複雑度の観点から解析する。また、実システムへの応用を検討する。

## 3. 研究の方法

ハイブリッドシステムに対する最適制御問題の難しさは、最適化問題に離散変数を含む点にある。したがって、研究目的を達成するためには、問題が有する特殊構造を見つけ出し、それを最大限生かす必要がある。

そこで、初年度は、問題固有の性質を見つけ出すために、問題の難しさの解析を行い、計算複雑度の低い最適制御問題のクラスを明らかにするというアプローチをとることにした。そして、次年度は、これをもとに、実際に確率的アルゴリズムの開発を行い、最終年度では、研究の総括を行う予定であった。

## 4. 研究成果

本研究課題によって得られた理論的成果は以下の通りである。

- (1) 混合論理動的システムモデルで表現されるような一般的なクラスのシステムに対しては、解の精度を「最適値からの差が〇〇%以内」といった形で保証するように解くことは、確率的手法を用いたとしても困難である。このことは、システムのもつダイナミクスの不連続性に起因している。
- (2) ただし、可制御性・可観測性問題のように、Yes/No型の判定問題に対しては、

近似解法として確率的アルゴリズムは有効である。このことは実際に、バイオシステム（緑膿菌）を制御するための薬剤開発問題へ応用し、良好な成果を得ている。

- (3) また、システムのクラスを、制御入力だけが離散となる「離散値入力型システム」に限定すれば、常に、実的に少ない計算量で近似解が得られる。これは、制御器として「非ハイブリッドシステムに対する制御器+動的量子化器」という構造を採用し、その上で、制御器と量子化器を独立に最適化することで実現できる。この際、大きな計算量は必要ない。
- (4) したがって、広いクラスのシステムを一括して扱う解法を開発するのではなく、少ない計算量で準最適解を導出するアルゴリズム（確定的もしくは確率的）が存在するシステムクラスを明らかにすることが、今後取り組むべき課題である。

以上の結果は、ハイブリッドシステムの最適制御問題の解法開発における基礎的な成果となり、今後の展開への足がかりになるものと期待される。

また、上記で示した(3)の実験的成果として、図1～3に示す倒立振り子系、磁気浮上系、シーソー系での検証を行い、実機においても良好に動作することを確認した。加えて、他の分野への応用として画像処理への適用を試みた。その結果、ハーフトーン画像生成（見た目を保存したまま多値画像から2値画像に変換する処理）に、応用が可能であることがわかった。これらの実験成果（動画など）は、webサイト <http://www.robot.kuass.kyoto-u.ac.jp/~sazuma/library.html> にて公開している。

さらに、理論・実験から得られた成果をソフトウェアとしてまとめ、離散値入力型システムの制御系設計を誰でも容易に行なえるようにした。このソフトは、制御・信号処理分野で標準的なCADソフトであるMatlab上で動作するものであり、本研究成果を産業界と結びつける上で重要な役割を演じるものとなっている。

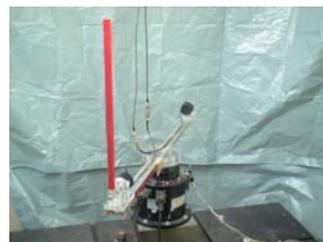


図1 倒立振り子系

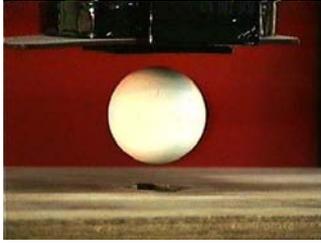


図 2 磁気浮上系

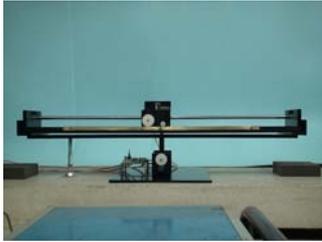


図 3 シーソー系



図 4 ハーフトーン画像（注：2[m]程度離れて見ることを想定して生成している．なお，縮小して掲載しているため，本来の画像とは見た目が若干異なっている．本来の画像は web サイトにて参照されたい）

本節の最後に，本課題で得られた成果のインパクトについて述べておく．

ハイブリッドシステムの最適制御問題に対する確率的解法を導出するという本研究の最大の目的は，否定的な結果となってしましたが，その一方で，それを考察する過程で生まれた「離散値入力型システムの制御」に関しては，大きな成果が得られた．

実際，本成果に対し，計測自動制御学会から論文賞を含む 3 つの賞が授与されている．また，制御工学において最も権威のある 2 つ論文誌 IEEE Transactions on Automatic

Control および Automatica（インパクトファクタはそれぞれ 2.824, 2.083, 2008 年）にレギュラーペーパーとしてそれぞれ論文が 1 編ずつ掲載された．さらに代表者は，2007 年～2009 年の間に 5 件の招待講演（講演時間はいずれも 1 時間以上）を行っている．

以上をまとめると，本課題より得られた研究成果は，国内外で極めて高く評価されているものと考えられる．

## 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 6 件）

- ① 東俊一，森田亮介，南裕樹，杉江俊治：制御のための動的量子化器開発ソフトウェアと実験検証，システム制御情報学会論文誌，Vol. 21, No. 12, pp. 408/416 (2008) 査読有
- ② S. Azuma and T. Sugie: Optimal Dynamic Quantizers for Discrete-Valued Input Control, Automatica, Vol. 44, No. 2, pp. 396/406 (2008) 査読有
- ③ S. Azuma, E. Yanagisawa, and J. Imura: Controllability Analysis of Biosystems Based on Piecewise Affine Systems Approach, IEEE Transactions on Automatic Control & IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, Joint Special Issue on Systems Biology, January, pp. 139/152 (2008) 査読有
- ④ 東，杉江：離散値入力型制御のための最適動的量子化器の安定性，計測自動制御学会論文集，Vol. 43, No. 12, pp. 1136/1143 (2007) 査読有
- ⑤ S. Azuma and J. Imura: Polynomial-time probabilistic observability analysis of sampled-data piecewise affine systems, Systems & Control Letters, Vol. 56, No. 11-12, pp. 685/694 (2007) 査読有
- ⑥ 南裕樹，東俊一，杉江俊治：離散値入力型フィードバック制御における最適動的量子化器，計測自動制御学会論文集，Vol. 43, No. 3, pp. 227/233 (2007) 査読有

〔学会発表〕（計 10 件）

- ① S. Azuma: Stability analysis of quantized feedback systems including optimal dynamic quantizers, 47th IEEE Conference on Decision and Control, Cancun, December 10, 2008

- ② Y. Minami: Optimal dynamic quantizers for 2D systems with discrete-valued input and its application to generation of binary halftone images, 17th IFAC World Congress, Seoul, July 10, 2008
- ③ 佐藤: センサネットワーク型フィードバック制御に関する一考察, 第8回制御部門大会, 京都, 2008年3月5日
- ④ 森田: 最適動的量子化器による倒立振子の離散値入力型制御, 平成19年度計測自動制御学会関西支部若手研究発表会, 大阪, 2008年1月16日
- ⑤ S. Azuma: Probabilistic controllability analysis of bio-systems based on piecewise affine systems approach, システム・情報部門学術講演会 2007, 東京, 2007年11月28日
- ⑥ Y. Minami: Discrete-valued input control of crane systems using optimal dynamic quantizers, SICE Annual Conference 2007, Takamatsu, September 19, 2007
- ⑦ S. Azuma: An optimal dynamic quantization scheme for control with discrete-valued input, 2007 American Control Conference, New York, July 12, 2007
- ⑧ S. Azuma: Linear programming based optimal dynamic quantizer synthesis for discrete-valued input control, 第7回制御部門大会, 調布, 2007年3月6日
- ⑨ 東: 離散値入力型制御における最適動的量子化器-フィードフォワード制御系の場合-, 第35回制御理論シンポジウム, 大阪, 2006年9月19日
- ⑩ 木村: 離散値入力型制御におけるサンプル値 Receding Horizon 量子化器, 第49回自動制御連合講演会, 神戸, 2006年11月25日

[図書] (計0件)

なし

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

なし

○取得状況 (計0件)

なし

[その他]

○受賞

- ① 2008年度計測自動制御学会 学会賞論文賞, 受賞論文: 東, 杉江, 離散値入力型制御のための最適動的量子化器の安定性, 計測自動制御学会論文集, Vol. 43, No. 12, pp. 1136/1143 (2007)
- ② 計測自動制御学会 制御部門 第7回制御部門大会賞, 受賞論文: S. Azuma and T. Sugie, Linear Programming Based Optimal Dynamic Quantizer Synthesis for Discrete-Valued Input Control, 第7回制御部門大会, 64-3-4 (2007)
- ③ 2006年度計測自動制御学会 学術奨励賞, 指導学生 南 裕樹が受賞, 受賞論文: 南, 東, 杉江, 離散値入力型制御における最適動的量子化器-フィードバック制御系の場合-, 第35回制御理論シンポジウム, pp. 153/158 (2006)

○研究代表者のWebサイト

[http://www.robot.kuass.kyoto-u.ac.jp/~sazuma/index\\_j.html](http://www.robot.kuass.kyoto-u.ac.jp/~sazuma/index_j.html) (実験動画などを公開している)

○開発したソフトウェア

(名称) ODQ ツールボックス

(用途) ハイブリッドシステムのひとつのクラスである離散値入力型システムに対し, 従来の制御理論によって設計される制御器とのインターフェースとなる動的量子化器の設計支援

(プラットフォーム) Matlab(R)

(開発) 森田 亮介, 東 俊一, 南 裕樹, 杉江 俊治 (京都大学)

(入手) Webサイト <http://www.robot.kuass.kyoto-u.ac.jp/odq.html> よりダウンロード可能 (無料)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

東 俊一 (AZUMA SHUN-ICHI)

京都大学・大学院情報学研究科・助教

研究者番号: 40420400

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし