

機関番号：13302

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20760278

研究課題名（和文）有限オートマトンの新しいモデルに基づくハイブリッドシステム制御論

研究課題名（英文）Control Theory of Hybrid Systems

Based on a New Model of Finite Automata

研究代表者

小林 孝一 (KOBAYASHI KOICHI)

北陸先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・助教

研究者番号：50452115

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、ハイブリッドシステムの制御における計算の効率化に取り組んだ。成果として、有限オートマトンの安定化に基づくモデル予測制御手法、およびオフライン計算とオンライン計算の両方を用いた精度保証付き近似解法を提案した。また、数値実験により計算の効率化が実現されたことを確認した。さらに応用として、ブーリアンネットワークモデルで表現される遺伝子ネットワークの解析と制御にも取り組んだ。

研究成果の概要（英文）：In this research, fast computation algorithms for hybrid systems control have been addressed. As important results, a stabilizing model predictive control method using stabilization of finite automata, and an approximate algorithm using both offline and online computations have been proposed. In addition, the effectiveness of the proposed methods has been shown by numerical examples. Furthermore, analysis and control of gene regulatory networks has been addressed using Boolean network models.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2008年度 | 1,200,000 | 360,000 | 1,560,000 |
| 2009年度 | 1,000,000 | 300,000 | 1,300,000 |
| 2010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：ハイブリッドシステム、モデル予測制御、遺伝子ネットワーク

1. 研究開始当初の背景

近年、有限オートマトンに代表される離散ダイナミクス、微分／差分方程式に代表される連続ダイナミクスが混在したハイブリッドシステムに関する研究が盛んに行われている。ハイブリッドシステムの解析および制御問題は、一般に0-1変数と連続変数からなる混合整数計画問題に帰着されることが知られている。したがって、実システムに対しては、問題を解くための計算時間が膨大となるため、実用化の妨げとなっている。

計算時間の低減に向けた一つの方法として、0-1変数の次元が低減されるように、ハイブリッドシステムをモデリングすることが挙げられる。この観点から、有限オートマトンの線形状態方程式表現を提案してきた。しかしながら、提案したモデルを用いたハイブリッドシステムの理論的解析は、十分ではなかった。

さらに、ハイブリッドシステムの代表的な制御方法として、モデル予測制御が知られている。モデル予測制御とは、有限時間最適制

御問題を各時刻で解く手法である。しかしながら、モデル予測制御の特徴を考慮した実用的な近似解法が提案されていないのが現状である。

2. 研究の目的

上記の研究背景を踏まえ、本研究では、提案した有限オートマトンの線形状態方程式表現を基礎とし、次の2点に取り組むことを目的とした。

- (1) ハイブリッドシステムの可制御性および可観測性の解析
- (2) ハイブリッドシステムのモデル予測制御

3. 研究の方法

初年度では、有限オートマトンの可制御性および可観測性の解析を行う予定であった。次年度では、ハイブリッドシステムへの拡張を検討し、最終年度では、モデル予測制御の近似解法の検討、および研究の総括を行う予定であった。

4. 研究成果

本研究課題により得られた成果は以下の通りである。

(1) ブーリアンネットワークモデルの可制御性および可観測性の判定

ブーリアンネットワークとは、状態の時間的変化がブール関数で表現されるシステムのクラスである。遺伝子ネットワークの代表的なモデルの一つとして、盛んに研究されている。ブーリアンネットワークは有限オートマトンと等価である。そこで、上記の研究目的(1)の第一歩として、ブーリアンネットワークの可制御性および可観測性について考察した。

可制御性については、システムが可制御であるための十分条件を導出した。さらに、得られた十分条件が多項式時間で判定可能であることを示した。

可観測性については、ハミング距離を用いた判定方法を提案した。

(2) 有限オートマトンの安定化に基づくハイブリッドシステムのモデル予測制御手法の開発

有限オートマトンの線形状態方程式表現の改良を行った上で、有限オートマトンの安定化状態フィードバックゲインのパラメトリゼーションを導出した。

さらに、有限オートマトンの安定化と連続ダイナミクスの安定化を直接的に組み合わせたハイブリッドシステムの安定化手法を提案した。システムを安定化する制御入力は、

有限時間最適制御問題を各時刻で解くことによって得られる。すなわち、モデル予測制御によって、制御入力が導出される。

(3) ハイブリッドシステムのモデル予測制御に対する精度保証付き近似解法の開発

既存のモデル予測制御の計算では、制御中の計算(オンライン計算)、制御前の計算(オフライン計算)いずれかに計算負荷が偏っていた。そこで、適切に負荷を分散させた近似解法を提案した。

さらに、数値実験により、オンライン計算の時間が従来手法の約20倍高速化されることを確認した。

(4) 確率ブーリアンネットワークモデルを用いた遺伝子ネットワークの制御手法の開発

上記(1)の延長として、確率ブーリアンネットワークモデルに対する最適制御問題の解法を提案した。提案手法では、最適制御問題は整数線形計画問題に帰着される。

さらに、数値実験により、従来手法では計算が困難なシステムに対しても、計算が可能となることを示した。

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7件)

- (1) Koichi Kobayashi and Kunihiko Hiraishi: An integer programming approach to optimal control problems in context-sensitive probabilistic Boolean networks, *Automatica*, Vol. 47, No. 6, pp. 1260-1264 (2011) 査読有
- (2) 小林孝一, 平石邦彦: 整数計画法を用いた確率ブーリアンネットワークの最適制御, 計測自動制御学会論文集, Vol. 46, No. 11, pp. 659-665 (2010) 査読有
- (3) Koichi Kobayashi, Jun-ichi Imura, and Kunihiko Hiraishi: Polynomial-Time Algorithm for Controllability Test of a Class of Boolean Biological Networks, *EURASIP Journal on Bioinformatics and Systems Biology*, Vol. 2010, Article ID 210685, 12 pages (2010) 査読有
- (4) Koichi Kobayashi and Kunihiko Hiraishi: MLD-Based Modeling of Hybrid Systems with Parameter Uncertainty, *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, Vol. E92-A, No. 11, pp. 2745-2754 (2009) 査読有
- (5) Koichi Kobayashi, Kunihiko Hiraishi, and Nguyen Van Tang: Approximate

Algorithm for Hybrid Model Predictive Control with Time-Varying Reference, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, Vol. E92-A, No. 8, pp. 2046-2052 (2009) 査読有

- (6) 平石邦彦, 小林孝一, 崔舜星: 有限時間区間に対するハイブリッドシステムの離散抽象化, 計測自動制御学会論文集, Vol. 44, No. 9, pp. 751-759 (2008) 査読有
- (7) Koichi Kobayashi and Kunihiro Hiraishi: Graph-Switching Based Modeling of Mode Transition Constraints for Model Predictive Control of Hybrid Systems, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol. 1, No. 5, pp. 376-382 (2008) 査読有

[学会発表] (計37件)

- (1) 小林孝一, 平石邦彦: 多項式最適化を用いた確率ブーリアンネットワークの最適制御, 計測自動制御学会第11回制御部門大会, 2011/3/16, 沖縄
- (2) 崔舜星, 平石邦彦, 小林孝一: 遷移関係に基づくハイブリッドモデル予測制御の近似事前解法, 電子情報通信学会2011年総合大会講演論文集, 2011/3/15, 東京
- (3) 間藤光一郎, 小林孝一, 平石邦彦: 確率ハイブリッドシステムの確率拘束付き最適制御, 電子情報通信学会2011年総合大会, 2011/3/15, 東京
- (4) Koichi Kobayashi and Kunihiro Hiraishi: Optimal Control of Context-Sensitive Probabilistic Boolean Networks Using Integer Programming, 49th IEEE Conference on Decision and Control, 2010/12/17, Atlanta, USA
- (5) 小林孝一, 平石邦彦: 混合整数計画法を用いたネットワーク化システムの最適制御, 計測自動制御学会第48回離散事象システム研究会, 2010/12/9, 名古屋
- (6) 平石邦彦, 小林孝一: An Approximation Algorithm for Box Abstraction of Transition Systems on Real Vector Fields, 計測自動制御学会第48回離散事象システム研究会, 2010/12/9, 名古屋
- (7) 小林孝一, 平石邦彦: 外部刺激に基づく遺伝子ネットワークの最適制御, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会2010, 2011/11/24, 京都
- (8) Koichi Kobayashi and Kunihiro Hiraishi: MLD-Based Modeling and MPC of Discrete-Time Hybrid Systems with Stochastic Mode Transitions, 19th IEEE Conference on Control Applications, 2010/9/9, Yokohama
- (9) Koichi Kobayashi and Kunihiro Hiraishi: Reachability Analysis of Probabilistic Boolean Networks using Model Checking, SICE Annual Conference 2010, 2010/8/19, Taipei, Taiwan
- (10) 小林孝一, 平石邦彦: 可到達性解析を用いたプッシュダウンシステムの診断について, 計測自動制御学会第47回離散事象システム研究会, 2010/8/3, 金沢
- (11) 崔舜星, 平石邦彦, 小林孝一: ハイブリッドシステムに対する遷移近似双模倣, 計測自動制御学会第47回離散事象システム研究会, 2010/8/3, 金沢
- (12) Koichi Kobayashi and Jun-ichi Imura: Free-Variable Analysis of Finite Automata Representations for Hybrid Systems Control, 19th International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems, 2010/7/5, Budapest, Hungary
- (13) Koichi Kobayashi and Kunihiro Hiraishi: An Integer Programming Approach to Control Problems in Probabilistic Boolean Networks, 2010 American Control Conference, 2010/7/2, Baltimore, USA
- (14) 小林孝一, 平石邦彦: モデル検査を用いた確率ブーリアンネットワークの可到達性解析, 第54回システム制御情報学会研究発表講演会, 2010/5/21, 京都
- (15) 小林孝一, 平石邦彦: 整数計画法を用いた文脈依存確率ブーリアンネットワークの制御, 計測自動制御学会第10回制御部門大会資料, 2010/3/16, 熊本
- (16) 小林孝一, 平石邦彦: 確率ブーリアンネットワークの解析と制御のための計算手法, 第20回バイオ情報学研究会, 2010/3/5, 石川
- (17) 小林孝一, 平石邦彦: 離散確率ハイブリッドシステムのモデル予測制御, 計測自動制御学会第46回離散事象システム研究会, 2009/12/8, 東京
- (18) 平石邦彦, 古今淳也, 小林孝一: ハイブリッドシステムに対する区間法の適用について, 計測自動制御学会第46回離散事象システム研究会, 2009/12/8, 東京
- (19) 小林孝一, 平石邦彦: 整数計画法を用いた確率ブーリアンネットワークの制御, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会2009, 2009/11/24, 横浜
- (20) 小林孝一, 井村順一, 平石邦彦: モデル予測制御における近似解法と離散ダイナミクスモデリング, 第52回自動制御連合講演会, 2009/11/21, 大阪
- (21) 小林孝一, 井村順一: ハイブリッド制御における有限オートマトンモデルの

- 関連性, 計測自動制御学会第 45 回離散事象システム研究会講演論文集, 2009/9/14, 新潟
- (22) 平石邦彦, 小林孝一: ハイブリッドシステムにおける述語抽象化計算の高速化, 計測自動制御学会第 45 回離散事象システム研究会, 2009/9/14, 新潟
- (23) Koichi Kobayashi and Jun-ichi Imura: Stabilization of Deterministic Finite Automata Based on Linear State Equation Representation, European Control Conference 2009, 2009/8/26, Budapest, Hungary
- (24) Koichi Kobayashi, Jun-ichi Imura, and Kunihiko Hiraishi: Stabilizing Model Predictive Control of Hybrid Systems with Discrete Dynamics, ICROS-SICE International Joint Conference 2009, 2009/8/21, Fukuoka
- (25) Koichi Kobayashi and Jun-ichi Imura: Observability Analysis of Boolean Networks with Biological Applications, ICROS-SICE International Joint Conference 2009, 2009/8/21, Fukuoka
- (26) Kunihiko Hiraishi and Koichi Kobayashi: A Faster Approximation Technique for Predicate Abstraction of Hybrid Systems, ICROS-SICE International Joint Conference 2009, 2009/8/19, Fukuoka
- (27) 小林孝一, 井村順一, 平石邦彦: ブーリアンネットワークにおける可制御性判定のための多項式時間アルゴリズム, 電子情報通信学会コンカレント工学研究会, 2009/8/6, 東京
- (28) Koichi Kobayashi and Kunihiko Hiraishi: Analysis and Control of Hybrid Systems with Parameter Uncertainty Based on Interval Methods, 2009 American Control Conference, 2009/6/11, St. Louis, USA
- (29) Koichi Kobayashi, Jun-ichi Imura, and Kunihiko Hiraishi: Polynomial-Time Controllability Analysis of Boolean Networks, 2009 American Control Conference, 2009/6/10, St. Louis, USA
- (30) 小林孝一, 田中秀幸: 和分型状態方程式を用いた連続時間システムの部分空間同定法, 計測自動制御学会第 9 回制御部門大会, 2009/3/5, 広島
- (31) 小林孝一, 井村順一, 平石邦彦: 制御 Lyapunov 関数を用いたハイブリッドシステムの安定化, 計測自動制御学会第 9 回制御部門大会, 2009/3/4, 広島
- (32) 小林孝一, 平石邦彦: ハイブリッドシステムの解析と制御への区間法の適用, 計測自動制御学会第 44 回離散事象システム研究会, 2008/12/19, 宮崎
- (33) 小林孝一, 平石邦彦: 区間法に基づくハイブリッドシステムの解析と制御, 計測自動制御学会第 37 回制御理論シンポジウム, 2008/9/18, 霧島
- (34) Koichi Kobayashi and Kunihiko Hiraishi: Explicit Modeling of Mode Transition Constraints for Model Predictive Control, SICE Annual Conference 2008, 2008/8/20, Chofu
- (35) Koichi Kobayashi, Nguyen Van Tang, and Kunihiko Hiraishi: On-line and Off-line Based Approximation Algorithm for Model Predictive Control of Hybrid Systems, 23rd International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications, 2008/7/9, Shimonoseki
- (36) 小林孝一, 平石邦彦: モード遷移拘束を陽に考慮したハイブリッドシステムのモデリング, 第 52 回システム制御情報学会研究発表講演会講演, 2008/5/17, 京都
- (37) 小林孝一, 井村順一, 平石邦彦: ブーリアンネットワークモデルによる遺伝子発現ネットワークの可制御性解析, 電子情報通信学会第 21 回回路とシステム軽井沢ワークショップ, 2008/4/21, 軽井沢
- [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]
なし
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
小林 孝一 (KOBAYASHI KOICHI)
北陸先端科学技術大学院大学・
情報科学研究科・助教
研究者番号: 50452115
- (2) 研究分担者
なし
- (3) 連携研究者
なし