

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 22 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2015

課題番号：24656262

研究課題名(和文) 離散事象システムの定量的スーパーバイザ制御理論の創成とその工学的応用

研究課題名(英文) Quantitative Supervisory Control of Discrete Event Systems and Its Applications

研究代表者

潮 俊光 (Ushio, Toshimitsu)

大阪大学・基礎工学研究科・教授

研究者番号：30184998

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：状態遷移に対してコストが与えられた重み付きオートマトンでモデル化される離散事象システムに対して、生成可能な振る舞いの中でコストの平均の最悪値が最適になるような最適スーパーバイザの設計法を開発した。望ましい状態の集合が与えられたとき、初期値から望ましい状態への遷移のコストが最適になるような安定化制御器の設計法を、完全観測と部分観測の両方の場合について提案した。さらに、時相論理で記述された制約条件の下での最適制御器の設計法も提案した。

また、近似模倣関係を利用した人間機械系のオートメーションサブライズの検証法、分散システムを安定化する事象駆動制御での事象生起条件について検討した。

研究成果の概要(英文)：We consider discrete event systems modeled by weighted automata where costs are assigned to state transitions. We proposed a design method of an optimal supervisor by which the worst mean pay-off of controlled behaviors of the system is optimized. We proposed a design method of stabilizing controller by which the worst accumulate cost of the controlled behavior from the initial state to a target state is optimized. Moreover, we considered an optimal controller that satisfies a qualitative constraint given by a temporal logic formula.

We also proposed an approximated simulation based detection method of automation surprises observed in human-machine systems modeled by hybrid automata. We derived event triggering conditions by which controlled distributed systems are stabilized.

研究分野：システム理論

キーワード：システム制御 離散事象システム スーパーバイザ制御 最適制御 安定化 オートマトン

1. 研究開始当初の背景

(1) 離散事象システムに対する論理的な制御方法としてスーパーバイザ制御が 1980 年代に提案され、その基礎理論は完成している。スーパーバイザ制御理論の最大の欠点は、スーパーバイザの制御性能を定量的に評価できないことである。これを克服するためのブレークスルーが世界的にも望まれていた。

(2) 計算機科学分野において、システムの定量的な評価の重要性が認識され始めており、重み付きオートマトンを用いた定量言語の研究、重み付きオートマトン上でのゲーム理論などが注目されていた。

(3) 古くから制御問題を制御対象と制御器の間のゲームとみるアプローチがあり、離散事象システムのスーパーバイザ制御に対してもこのようなアプローチを取ることで新しいスーパーバイザの設計法の開発が期待できた。

2. 研究の目的

(1) 状態遷移に重み(コスト)を導入した重み付きオートマトンによってモデル化された定量的離散事象システムを考える。無限の長さのふるまいの平均コストの最悪値を最適化する最適スーパーバイザの設計方法を提案する。

(2) 重み付きオートマトンにおいて目標状態が与えられたときを考える。目標状態へコストの総和の最悪値を最適にしつつ目標状態に安定化させる制御器の設計方法を提案する。

(3) 定量的離散事象システムに対して定性的な制御仕様と定量的な制御仕様の両方が与えられたとき、その両者を満たす最適制御器の設計方法を提案する。

(4) 事象駆動型制御において、システムの安定性を保証するような事象駆動メカニズムの設計方法を提案する。

(5) 時間情報をもったハイブリッドシステムで人間機械系をモデリングし、オートメーションサプライズ検出法を開発する。

3. 研究の方法

(1) 定量的離散事象システムのモデルとして、遷移に対して重み(コスト)を割り当てた重み付きオートマトンを用いる。

(2) 制御性能の定量的な指標として平均利得を考え、制御対象と制御器との 2 人ターンベーストゲームを用いて最適制御器の設計アルゴリズムを導出する。

(3) 離散事象システムの振る舞いに対する

定性的仕様を時相論理式で表し、この論理式を満たす振る舞いを受理するオートマトンを利用して定性的仕様を満たす制御器を求める。

(4) 人間機械系において、操作対象の振る舞いをハイブリッドオートマトンで記述して、インタフェースの情報を基に操作する操作者の操作対象に対する知識をオートマトンで記述して、その間の定量的な差異からオートメーションサプライズの検出を行う。

4. 研究成果

(1) 定量的離散事象システムを重み付きオートマトンでモデル化した。状態の集合、事象の集合、事象の生起による状態遷移を表す遷移関数、各遷移に対して重み(コスト)を割り当てる重み関数、初期状態からなる 5 項目によって重み付きオートマトンを表現した。図 1 に重み付きオートマトンの例を示す。事象は、制御器(スーパーバイザ)によって生起が禁止できる可制御事象とできない不可制御事象からなると仮定した。この重み付きオートマトンによって生成される無限の長さの状態・事象からなる列(システムの振る舞い)に対して、遷移によるコストの平均の最悪値を最適化するという最適スーパーバイザ制御問題を考察した。最適スーパーバイザ制御問題はスーパーバイザと離散事象システムとの 2 人ターンベーストゲームに変換できることを示し、平均利得ゲームの最適戦略から最適スーパーバイザが構成できることを示した。

最適スーパーバイザの中で、生起を禁止する可制御事象の個数をできる限り少なくする最小制限最適スーパーバイザは常に存在するとは限らないことを明らかにした。有限回のゲームでの最適戦略の中で最小制限となるようなスーパーバイザを f-最小制約スーパーバイザと名付け、このようなスーパーバイザの設計アルゴリズムを提案した。

定量的離散事象システムに対する最適スーパーバイザ問題を定式化し、ゲーム理論的アプローチによる最適スーパーバイザの設計法の提案により、スーパーバイザの制御性能を定量的評価することが可能となった。

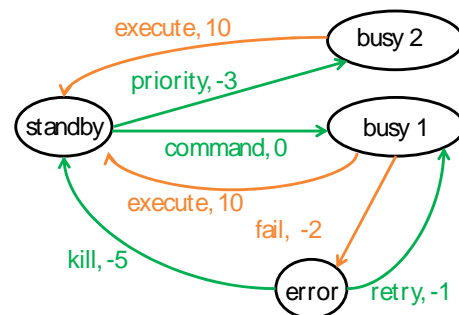


図 1 重み付きオートマトンの例

(2) 重み付きオートマトンでモデル化される離散事象システムにおいて、コストの総和の最悪値を最適化しつつ、目標状態へ有限回で遷移させるような安定化制御器の設計方法を提案した。まず、すべての状態遷移が観測されるが外乱が存在する場合を考えた。外乱とは、その生起が必ずしも保証されない不可制御事象をいう。この場合、外乱しか生起を許容しない場合には、実際には生起できないならばデッドロックとなってしまうため、いずれかの可制御事象の生起を許容しておかなければならない。このような外乱の存在のもとでの安定化制御器の構成方法を提案した。

次に、一部の事象の生起しか観測されず、さらに出力状態しか観測されないときの安定化制御器の構成方法を提案した。一般に、このような場合には、観測される事象と出力から現在の状態を推定する必要があり、制御器の構成アルゴリズムが指数オーダになる。多項式オーダで構成できる離散事象システムの十分条件を明らかにした。この条件を満たすようにセンサを設置すれば、センサコストの削減しつつ制御器も実用的な計算量で求めることができることになり、実用的にも重要な結果である。

(3) 重み付きオートマトンにおいて、原子命題の集合、及び各状態で真となる原子命題の集合を表すラベリング関数を導入した定量的離散事象システムを考えた。システムの定性的振る舞いに関する制御仕様を原子命題上の線形時相論理 (LTL) 式で表した。このLTL式を満たす振る舞いのみが生成されるように高々一つの可制御事象の生起を許容する最適制御器 (ディレクタ) の設計手順を提案した。図2にその手順を示す。

設計手順は以下の通りである。まず、LTL式を充足する振る舞いのみを受容する決定的ラビンオートマトン (DRA) を構成する。DRAと制御対象 (プラント) との合成オートマトンを求める。このオートマトンから制御対象とディレクタとの2人ターンベースゲームオートマトンを構成する。このゲームオートマトンでのディレクタの最適戦略を求める、この最適戦略からディレクタを構成する。

提案した最適ディレクタの設計アルゴリズムを工場の自動搬送車制御に応用し、その有効性を確認した。

移動ロボットのプランニングでは、衝突回避やミッションの遂行のような定性的な制約が多く存在し、そのような制約はLTL式で記述できることが知られている。また、移動時間、移動エネルギーなどのコストの削減も重要である。本手法は、この両方の要求を同時に達成できるプランニングに応用することができ、応用範囲の広い制御手法として期待できる。

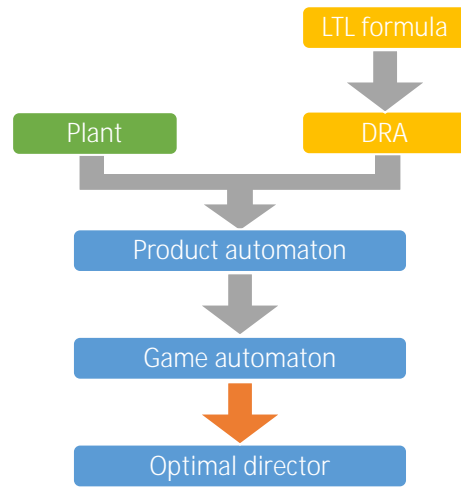
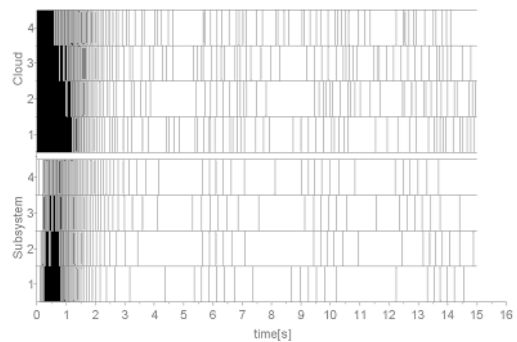
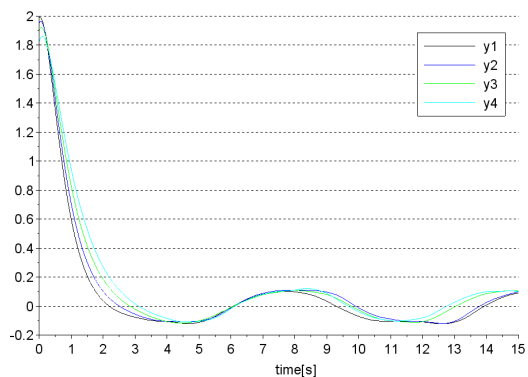


図2 LTL仕様のもとでの最適ディレクタの設計手順

(4) 複数のサブシステムから構成される大規模システムにおいて、各サブシステムの出力をクラウドに送信して、システム全体の状態推定をクラウド上に実装したcloud-assisted 観測器で行う分散事象駆動型制御法を提案した。この制御法を用いるとシステムが入力-状態安定で、ゼノン現象が発生しないことを証明した。図3(a)に、4つのサブシステムからなる大規模システムに対して提案法を行ったときのデータの送信



(a) 事象の生起時刻列



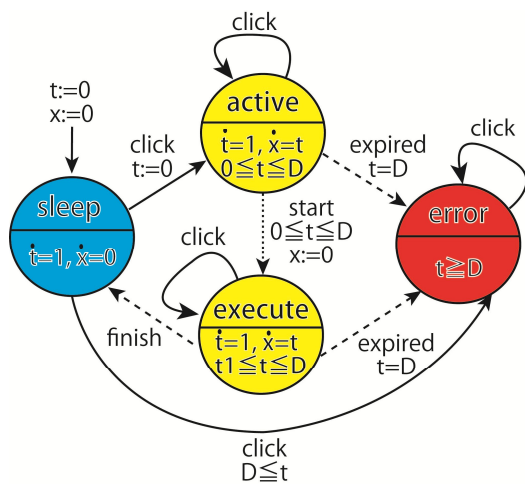
(b) 制御対象の出力の時間応答

図3 事象駆動型制御系の時間応答の例

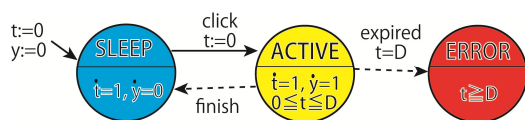
時刻を縦棒で表す。Cloud と書いている部分は cloud から各サブシステムへ推定状態の送信, subsystem と書いている部分は各サブシステムからクラウドへの観測出力の送信を表す。過渡状態ではデータの送信が頻繁に行われているが, 定常状態に達した後は, 送信頻度が減少するとともに送信時刻が分散しており, ネットワーク負荷が軽減できることが分かる。図3 (b)は各サブシステムの出力の時間応答である。推定出力と観測出力の誤差が指定された値より大きくなったときに観測出力を送信するという規則になっているので, その誤差の範囲で振動していることが分かる。

本手法は, 事象が生起したときにデータを送信するので, 送信回数を削減することが可能となり, ネットワーク制御でのネットワーク負荷の削減につながる技術である。

(5) 人間機械系において, 操作対象のモデルとしてハイブリッドオートマトンを用いた。インタフェース表示を見ながら操作を行うときの操作者のモデルを時間オートマトンでモデル化した。図4に操作対象のハイブリッドオートマトンモデルとユーザの操作モデルの例を示す。この二つのオートマトンの間の振る舞いの定量的な差異によって発生するオートメーションサプライズの発生を近似模倣及び近似交替模倣関係を用いて特徴づけした。この特徴を利用してオートメーションサプライズの検出法を提案した。



(a) 操作対象のハイブリッドオートマトンモデル



(b) 操作者の操作モデル

図4 人間機械系のハイブリッドオートマトンモデルの例

オートメーションサプライズの発生は重大な事故につながり, 航空機の墜落事故の原因の一つになっている。本手法により, オートメーションサプライズが発生する状況を事前に予測することができるようになり, より安心な人間機械系の実現に貢献できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

Sasinee Pruekprasert, Toshimitsu Ushio, and Takafumi Kanazawa, Quantitative Supervisory Control Game for Discrete Event Systems, IEEE Transactions on Automatic Control, 査読有, vol. 66, no.11, 2016(掲載予定), DOI: 10.119/TAC.2015.2513901.

Sasinee Pruekprasert and Toshimitsu Ushio, Optimal Stabilizing Controller for the region of Attraction under the Influence of Disturbances, IEICE Transactions on Information and Systems, 査読有, vol. E-99-A, no. 6, 2016(掲載予定).

Sasinee Pruekprasert and Toshimitsu Ushio, Optimal Stabilizing Supervisor of Quantitative Discrete Event Systems under Partial Observation, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Science, 査読有, vol. E-99-A, no. 2, pp. 465-482, 2016. DOI: 10.15887/transfun.E99.A.475

〔学会発表〕(計11件)

広本 将基, 潮 俊光, LTL制約の下でのMDPに対するスーパーバイザの強化学習, 2016年電子情報通信学会総合大会, 2016年3月16日, 九州大学伊都キャンパス(福岡県・福岡市)。

榊原 愛海, Sasinee Pruekprasert, 潮 俊光, LTL制約の下で定量的離散事象システムの最適制御器設計, 2016年電子情報通信学会総合大会, 2016年3月16日, 九州大学伊都キャンパス(福岡県・福岡市)。

榊原 愛海, Sasinee Pruekprasert, 潮 俊光, 重み付きオートマトンに対する線形時相論理制約の下での最適制御, 電子情報通信学会システム数理と応用研究会技術報告書, MSS2015-54, 2016年1月26日, しいのき迎賓館(金沢市・石川県)。

Yoshiki Maeda and Toshimitsu Ushio, SMT-based Scheduling of Distributed Mediator for Web Services Composition, the 4th IEEE Global Conference on Consumer Electronics, 2015年10月28日, グランキューブ大阪(大阪市・大阪府)。

Ami Sakakibara, Sasinee Pruekprasert, and Toshimitsu Ushio, Optimal Directed Control of Discrete Event Systems with

Linear Temporal Logic Constraints, the 20th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, 2015年9月11日, ルクセンブルグ(ルクセンブルグ).

Kohei Fujita and Toshimitsu Ushio, Distributed Event-Triggered Output Feedback Control with Cloud-Assisted Observer, the First IEEE International Conference on Event-Based Control, Communication, and Signal Processing, 2015年6月18日, クラクフ(ポーランド).

石井 大貴, 潮 俊光, 近似模倣を利用した人間機械系に存在するオートメーションサプライズの検出, 電子情報通信学会システム数理と応用研究会技術報告書, MSS2014-73, 2015年1月26日, プランナール三朝(三朝郡・鳥取県).

Daiki Ishii and Toshimitsu Ushio, Formal Framework for Detection of Automation Surprises in Human-machine Systems Modeled by Hybrid Automata, 2014 IEEE 3rd Global Conference on Consumer Electronics, 2014年10月9日, 幕張メッセ(千葉市・千葉県).

Sasinee Pruekprasert and Toshimitsu Ushio, On Computation for Prestabilizing Controllers in Discrete Event Systems, 電子情報通信学会システム数理と応用研究会技術報告書, MSS2013-77, 2014年3月6日, 愛媛大学工学部(松山市・愛媛県).

Sasinee Pruekprasert, Toshimitsu Ushio, and Takafumi Kanazawa, An Application of Game Automaton to Quantitative Supervisory Control, 電子情報通信学会システム数理と応用研究会技術報告書, MSS2012-73, 2013年3月7日, 志賀島休暇村(福岡市・福岡県).

Sasinee Pruekprasert, Toshimitsu Ushio, and Takafumi Kanazawa, A Game Theoretic Approach to Supervisory Control of Quantitative Discrete Event Systems, 4th Workshop on Game for Design, Verification and Synthesis, 2012年9月3日, ニューキャッスル(イギリス).

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

なし.

6. 研究組織

(1)研究代表者

潮 俊光(USHIO, Toshimitsu)

大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授
研究者番号: 30184998

(2)研究分担者

該当なし.

(3)連携研究者

該当なし.