

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年5月17日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K06140

研究課題名(和文) 不確かな環境下で動作する非決定性離散事象システムのスーパーバイザ制御

研究課題名(英文) Supervisory Control of Nondeterministic Discrete Event Systems Operating in Uncertain Environments

研究代表者

高井 重昌 (Takai, Shigemasa)

大阪大学・工学研究科 教授

研究者番号：60243177

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：事象が生起することにより、その離散的な状態が遷移する動的システムは離散事象システムと呼ばれる。本研究では、状態遷移に非決定性が存在するような非決定性離散事象システムとしてモデル化された制御対象に対して、制御仕様が満足されることを保証する、スーパーバイザと呼ばれる制御器を設計する問題について考察した。そして、制御対象と制御仕様に関して、どのような条件のもとで、スーパーバイザが存在するかというスーパーバイザの存在性、存在する場合のスーパーバイザの設計法などに関して、理論的な成果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ロボットは災害現場など厳しい環境のもとで、正確に作業することが要求される。そして、厳しい実環境においては、様々な不確かな要素が存在し、不確かな環境のもとでのロボットの行動計画を立てたり、ロボットの動作を制御する必要がある。近年、多くのシステムにおいて組込み制御系が用いられているが、離散的、事象駆動的な側面に着目することで、それらのシステムを離散事象システムとしてとらえることができる。本研究の成果は、不確かな環境下で動作する離散事象システムの高信頼な制御系設計に関する基礎理論に貢献するものである。

研究成果の概要(英文)：A discrete event system (DES) is a dynamical system whose discrete state evolves in accordance with the occurrence of an event. In this research, we consider a control problem of synthesizing a controller, called a supervisor, that enforces a given specification on the plant modeled as a DES with nondeterministic state transitions. Theoretical results have been obtained on existence conditions of a supervisor with respect to the plant and the specification, effective methods for synthesizing a supervisor, and so on.

研究分野：システム理論

キーワード：システム理論 離散事象システム スーパーバイザ制御 非決定性状態遷移

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

ロボットは災害現場など厳しい環境のもとで、正確に作業することが要求される。そして、厳しい実環境においては、様々な不確かな要素が存在し、不確かな環境のもとでのロボットの行動計画、制御に関する研究が行われている。

事象が非同期、離散的に生起することにより、その状態が遷移する動的システムは離散事象システムと呼ばれる。近年、多くのシステムにおいて組込み制御系が用いられているが、離散的、事象駆動的な側面に着目することで、それらのシステムを離散事象システムとしてとらえ、論理的な振舞いに関する制御問題を離散事象システム理論の枠組みで取り扱うことができる。離散事象システムの制御に関しては、1980年代に Ramadge と Wonham によるスーパーバイザ制御の先駆的な論文が発表されて以来、離散事象システム理論の主要な研究テーマとして、多くの研究が行われてきた。

離散事象システムのスーパーバイザ制御に関する多くの従来研究では、対象システムとその制御仕様は、状態の遷移先が一意に決まる決定性のオートマトンでモデル化されている。そして、スーパーバイザ制御されたシステムで生起可能な事象列の集合である言語が、制御仕様で生起可能な事象列の集合である言語と等しくなる言語等価性が要求されている。しかし、システムが不確かな環境下で動作する場合、システムの状態遷移に非決定性が生じる場合がある。つまり、ある事象に対する状態の遷移先が一意ではなく、環境の状況に応じて複数の遷移先の候補が存在し、そのような状態遷移の非決定性を考慮した制御が必要となる。システムとその制御仕様を、状態遷移に非決定性がある非決定性オートマトンでモデル化した場合、スーパーバイザ制御で従来用いられてきた言語等価性では不十分であり、制御されたシステムと制御仕様に対して、より強い等価性の概念である双模倣等価性が要求される。双模倣性は、計算機科学の分野においてシステム間の等価性を表す概念として提案されたものであり、近年、システム制御の分野でも用いられるようになってきた。

### 2. 研究の目的

非決定性オートマトンでモデル化されたシステムとその制御仕様に対する双模倣制御に関する従来研究として、次の二つの文献があげられる。

[1] C. Zhou, R. Kumar, and S. Jiang: Control of nondeterministic discrete-event systems for bisimulation equivalence, IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 51, no. 5, pp. 754-765, 2006.

[2] K. Kimura and S. Takai: Bisimilarity control of nondeterministic discrete event systems under event and state observations, IEICE Transactions on Information and Systems, vol. E97-D, no. 5, pp. 1140-1148, 2014.

文献[1]では、スーパーバイザは対象システムで生起した事象のみに基づき、制御動作を決定する。しかし、文献[1]のスーパーバイザ制御の枠組みでは、双模倣制御問題の解となるスーパーバイザの存在性を検証し、そのようなスーパーバイザを構成するためには、スーパーバイザの候補となるあるクラスの非決定性オートマトンをしらみつぶしに探索する必要があり、 $X$  と  $Q$  をそれぞれ対象システムと制御仕様の状態集合とすると、その計算量は  $2$  の  $2^{|X| \times |Q|}$  乗のオーダーとなり、計算量の観点から実用上の大きな問題がある。一方、研究代表者の従来研究である文献[2]では、生起した事象だけでなく、現在の状態も観測し、制御動作を決定するようなスーパーバイザについて考察している。そして、スーパーバイザの存在性の検証、およびスーパーバイザの構成が多項式オーダーで行えることを示している。しかし、対象システムの状態が完全に観測できる場合のみ適用可能であるという欠点がある。

研究代表者の従来研究の文献[2]は、双模倣制御における対象システムの状態の情報の有用性を示したものであるが、状態が完全に観測できるという仮定は適用可能なシステムのクラスを制限してしまう。そこで本研究では、事象の観測に基づき対象システムの現在の状態を推定するオブザーバを用いて、生起した事象とオブザーバによる状態の推定値に基づく、スーパーバイザ制御法を新たに提案する。この提案制御法においては、オブザーバが必ずしもシステムの状態を一意には特定できないため、対象システムの状態を完全に知ることはできないが、現在の状態に関する部分的な情報は利用することができる。そして、文献[2]の研究成果を、現在の状態に関する部分的な情報のみが利用可能である場合に拡張することで、対象システムの状態が完全に観測可能という仮定を課すことなく、しかも実用的な計算量でスーパーバイザの存在性の検証、およびスーパーバイザの構成を可能とすることを目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究では、制御対象である離散事象システムとその制御仕様の数学モデルに基づく、システム理論的アプローチを用いる。

非決定性オートマトンでモデル化された対象システムとその制御仕様に対して、生起した事象とオブザーバによる状態の推定値に基づく双模倣制御問題の定式化を行う。対象システムで事象が生起するたびに、オブザーバは対象システムの現在の状態を推定し、スーパーバイザは生起した事象と現在の状態の推定値に基づき、次にその生起を禁止する可制御事象を決定する。このように可制御事象の生起を制限することで、スーパーバイザにより対象システムの振舞いが制限される。このようなスーパーバイザ制御系の概略図を図1に示す。そして、その振舞いが制

限られた対象システムと制御仕様が双模倣となるようなスーパーバイザが双模倣制御問題の解となる。

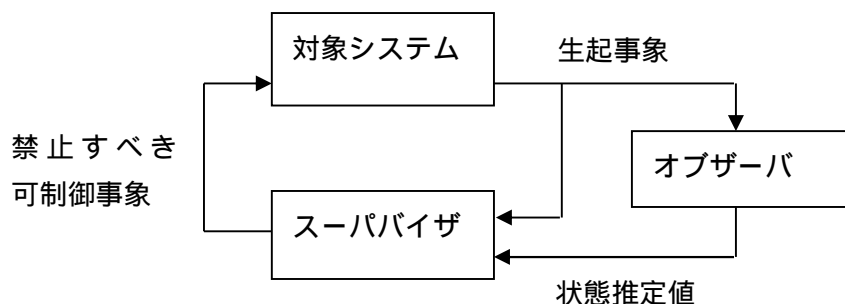


図1 スーパーバイザ制御系の概略図

まず、双模倣制御問題の解となるスーパーバイザが存在するために、制御仕様が満足すべき条件を明らかにする。そして、その条件が成り立つか否かを判定する検証アルゴリズムを開発し、その計算量解析を行う。さらに、スーパーバイザの存在条件が満足される場合において、スーパーバイザをシステムチェックに構成するためのアルゴリズムを開発し、その計算量解析を行う。

双模倣制御問題に対して、その解となるスーパーバイザが存在しない場合には、双模倣等価性の制約を弱める必要があり、仕様を満たさない動作は禁止すべきであるという観点から、制御されたシステムの動作が制御仕様に模倣されることのみを要求することが考えられる。そのような制御問題は模倣制御問題と呼ばれる。そこで、模倣制御問題の解となるスーパーバイザの構成アルゴリズムを開発し、その計算量の評価を行う。離散事象システムの制御においては、一般に、タスクの終了などを表す目標状態への到達可能性を保证するノンブロッキング性が重要である。そこで、このようなノンブロッキング性が保证されるように、模倣制御に関する成果を拡張する。

現実のシステムの多くは、複数のサブシステムから構成されているとみなすことができる。このような場合には、全体システムに対する集中型のスーパーバイザ制御より、各サブシステムにローカルスーパーバイザを構成する分散制御が望ましいと考えられる。分散制御には例えば、集中型に比べ個々のローカルスーパーバイザの構成が容易である、サブシステムの変更に対してローカルスーパーバイザのみを再構成すればよい、といった利点がある。そこで、本研究で得られた双模倣制御、模倣制御に関する成果を分散制御へと拡張する。

ノンブロッキング性を保証するための拡張、および分散制御への拡張において、対象システムの状態の完全な情報が必要となる場合は、状態が観測可能であるという仮定を課したうえで研究を進める。

また、不確かな環境下で動作する離散事象システムの制御系の信頼性を高めるため、システム内での故障事象の生起を検出するための診断機能に関する研究も実施する。

#### 4. 研究成果

不確かな環境下で動作する離散事象システムに対する実用的なスーパーバイザ制御法を確立することを目的に、非決定性離散事象システムのスーパーバイザ制御などに関して、以下の研究成果が得られた。

(1) 状態遷移に非決定性を有するラベル付き遷移システムとしてモデル化された離散事象システムを対象とし、制御されたシステムが与えられた制御仕様と双模倣となることを要求する双模倣制御問題において、ある条件のもとで、対象システムの出力から現在の状態を推定するオブザーバに基づく制御器の設計方法を提案した。そして、その制御器が双模倣制御問題の解となることを証明した。さらに、提案した設計方法の計算量解析を行い、対象システムの状態数に関しては指数オーダーとなるが、制御仕様の状態数に関しては多項式オーダーとなることを示した。本研究では、対象システムの状態が完全に観測可能であるという仮定を必要とせず、この仮定を課している従来研究に比べ、より実用的な制御法であるといえる。双模倣制御問題の解となる制御器が存在するための必要十分条件の導出は今後の研究課題と考えられる。

(2) 複数のサブシステムから構成される非決定性離散事象システムに対して、制御されたシステムが制御仕様に模倣されることを要求する模倣制御問題について考察した。このような複合システムを対象とする場合、全体システムに対して集中型のスーパーバイザを構成するよりも、サブシステム毎にローカルスーパーバイザを構成する分散制御が望ましいと考えられる。そこで、各ローカルスーパーバイザがサブシステムで生起する事象と現在の状態が観測可能であるという仮定のもとで、全体システムに対する最大許容スーパーバイザが分散スーパーバイザとして構成できるための条件を明らかにした。複合システムを対象とした分散制御においては、集中制御と比べ、個々のローカルスーパーバイザを構成するのが容易である、といった利点があり、得られ

た成果は実用上有用であるといえる。

(3) 離散事象システムの制御においては、一般に、タスクの終了などを表す目標状態への到達可能性を保証するノンブロッキング性が重要である。そこで、非決定性離散事象システムに対して、制御されたシステムが制御仕様に模倣され、かつノンブロッキングとなるようなスーパーバイザを構成する問題について考察した。まず、対象システムで生起する事象と現在の状態が観測可能であるという仮定のもとで、そのようなスーパーバイザが存在するための必要十分条件を導出し、その条件の判定方法を提案した。さらに、ノンブロッキングなスーパーバイザの存在条件が成り立つ場合において、スーパーバイザの構成法を開発した。従来の模倣制御に関する研究では、制御されたシステムがノンブロッキングであることは要求されておらず、本研究の結果を用いることで、離散事象システムの制御において重要なノンブロッキング性を保証することが可能となった。

(4) 項目(2)、(3)で述べた、非決定性離散事象システムの模倣制御に関する研究では、対象システムで生起する事象と現在の状態が観測可能であるという仮定が必要とされていた。そこで、ノンブロッキング性を要求しない集中制御の場合において、状態の観測を必要としない、スーパーバイザの構成法を新たに提案した。提案法をノンブロッキングなスーパーバイザが構成できるように拡張することは今後の研究課題と考えられる。

(5) 離散事象システムにおいては、観測される事象の生起情報に非決定性が存在する場合も考えられる。そこで、事象の生起情報が対象システムの状態に依存し、しかも非決定性が存在するような離散事象システムを、非決定性出力関数をもつ Mealy オートマトンによりモデル化し、そのスーパーバイザ制御について考察した。そして、制御仕様を満足するノンブロッキングなスーパーバイザが存在するための十分条件を導出し、その条件の検証方法を提案した。スーパーバイザ制御に関する従来研究の多くは、観測される事象の生起情報は決定的であると仮定しており、この研究成果はそのような仮定を必要としないという意味で、より実用的な成果であるといえる。

(6) 不確かな環境下で動作する離散事象システムの制御系の信頼性を高めるため、システム内の故障事象の生起を検出するための診断機能に関する研究にも取り組んだ。そこで、各ローカル診断器が、他のローカル診断器の判断を推論し、その結果に基づき自身の判断を行うような分散型診断システムにおいて、任意の故障事象の生起をある有限ステップ内で検出するための必要十分条件を明らかにし、その条件の判定方法を提案した。そして、その条件が満足される場合において、各ローカル診断器が、他のローカル診断器の判断を推論し、その結果に基づき自身の判断を下すような分散型診断器の構成法を提案した。

これらの成果は、不確かな環境下で動作する離散事象システムの高信頼な制御系設計に関する基礎理論に貢献するものである。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計10件)

Shigemasa Takai, Ratnesh Kumar, Implementation of inference-based diagnosis: Computing delay bound and ambiguity levels, Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Applications, 査読有, Vol. 28, No. 2, 2018, pp. 315-348

DOI: 10.1007/s10626-017-0253-x

Naoki Kushi, Shigemasa Takai, Synthesis of similarity enforcing supervisors for nondeterministic discrete event systems, IEEE Transactions on Automatic Control, 査読有, Vol. 63, No. 5, 2018, pp. 1457-1464

DOI: 10.1109/TAC.2017.2747408

Hiroki Yamada, Shigemasa Takai, Nonblocking similarity control of nondeterministic discrete event systems under event and state observations, IEICE Transactions on Fundamentals, 査読有, Vol. E101-A, No. 2, 2018, pp. 328-337

DOI: 10.1587/transfun.E101.A.328

Shigemasa Takai, Ratnesh Kumar, A generalized framework for inference-based diagnosis of discrete event systems capturing both disjunctive and conjunctive decision-making, IEEE Transactions on Automatic Control, 査読有, Vol. 62, No. 6, 2017, pp. 2778-2793

DOI: 10.1109/TAC.2016.2624422

Shoichi Yokota, Takashi Yamamoto, Shigemasa Takai, Computation of the delay bounds and synthesis of diagnosers for decentralized diagnosis with conditional decisions, Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Applications, 査読有, Vol. 27, No. 1, 2017, pp. 45-84

DOI: 10.1007/s10626-016-0229-2

Masanori Hoshino, Shigemasa Takai, Decentralized similarity control of composite

nondeterministic discrete event systems with local specifications, IEICE Transactions on Fundamentals, 査読有, Vol. E100-A, No. 2, 2017, pp. 395-405

DOI: 10.1587/transfun.E100.A.395

吉田 翔, 高井重昌, 条件付き判断をもつ分散スーパーバイザの許容性の改善, 電子情報通信学会論文誌分冊A, 査読有, Vol. J99-A, No. 9, 2016, pp. 361-373

[http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=j99-a\\_9\\_361](http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=j99-a_9_361)

Misato Yokotani, Tetsuya Kondo, Shigemasa Takai, Abstraction-based verification and synthesis for prognosis of discrete event systems, Asian Journal of Control, 査読有, Vol. 18, No. 4, 2016, pp. 1279-1288

DOI: 10.1002/asjc.1210

Toshimitsu Ushio, Shigemasa Takai, Nonblocking supervisory control of discrete event systems modeled by Mealy automata with nondeterministic output functions, IEEE Transactions on Automatic Control, 査読有, Vol. 61, No. 3, 2016, pp. 799-804

DOI: 10.1109/TAC.2015.2449051

Nam Tung Vu, Shigemasa Takai, Synthesis of output feedback controllers for bisimilarity control of transition systems, IEICE Transactions on Fundamentals, 査読有, Vol. E99-A, No. 2, 2016, pp. 483-490

DOI: 10.1587/transfun.E99.A.483

#### [学会発表](計18件)

Itsuki Okubo, Shigemasa Takai, Decentralized supervisor synthesis for composite nondeterministic discrete event systems with local specifications, The SICE Annual Conference 2018, 2018

Akihito Wada, Nadda Chawalarat, Shigemasa Takai, Codiagnosability for decentralized diagnosis of discrete event systems subject to permanent sensor failures, The SICE Annual Conference 2018, 2018

Shigemasa Takai, Synthesis of bisimilarity enforcing supervisors for nondeterministic discrete event systems, The 14th International Workshop on Discrete Event Systems, 2018

Hiroki Yamada, Shigemasa Takai, Nonblocking supervisors for similarity control of nondeterministic discrete event systems under event and state observations, The SICE Annual Conference 2017, 2017

Shigemasa Takai, Ratnesh Kumar, A generalized inference-based prognosis framework for discrete event systems, The 20th IFAC World Congress, 2017

Sho Yoshida, Shigemasa Takai, Reliable conditional-coobservability for decentralized supervisory control of discrete event systems with conditional decisions, The 55th IEEE Conference on Decision and Control, 2016

Shigemasa Takai, Ratnesh Kumar, Delay bound of inference-based decentralized diagnosis in discrete event systems, The 13th International Workshop on Discrete Event Systems, 2016

Shigemasa Takai, Ratnesh Kumar, A generalized inference-based diagnosis framework for discrete event systems capturing both disjunctive and conjunctive decision-making, The 54th IEEE Conference on Decision and Control, 2015

Shigemasa Takai, Ratnesh Kumar, Verification of generalized inference diagnosability for decentralized diagnosis of discrete event systems, The 20th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, 2015

Naoki Kushi, Shigemasa Takai, Supervisor synthesis for similarity control of nondeterministic discrete event systems, The 20th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, 2015

#### [その他]

ホームページ等

<http://is.eei.eng.osaka-u.ac.jp/takai/>

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。