

## 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24年3月31日現在

機関番号：32675

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2008～2011

課題番号：20710114

研究課題名（和文）

繰返し実行型離散事象システムに対する頑健なスケジューラ

研究課題名（英文）

Robust scheduler for repetitive discrete event systems

研究代表者

五島 洋行 (GOTO HIROYUKI)

法政大学・理工学部・准教授

研究者番号：00398950

研究成果の概要（和文）：

多入力多出力，先入れ先出し型構造を有する繰返し実行型の離散事象システムに対する頑健なスケジューラを考案した．システムの振る舞いは，Dioid 代数と呼ばれる離散代数系を用いて表現し，実システムに適用する場合の実用性を向上させることに焦点をあてた．主な研究成果は，(1)状態空間表現の拡張により方程式系の記述能力を高めた，(2)状態方程式の効率的な計算方法について検討した，(3)各工程の処理時間にバラツキがある場合への対応方法について検討した，の3点に集約される．

研究成果の概要（英文）：

Our primary focus was on developing robust scheduling frameworks for repetitive discrete event systems with MIMO-FIFO (Multiple-Input, Multiple-Output, First-In, First-Out) structure. The behavior of the target systems was represented using a class of discrete algebra referred to as Dioid algebra. In particular, we have aimed to improve the practicality of this approach for application to practical systems. The main accomplishments are threefold; (1) the descriptive ability of the equations has been improved by extending the state-space representation, (2) for the computation of the state equation, several efficient algorithms and implementations have been proposed, and (3) a method for handling systems with fluctuating processing times has been proposed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
2011年度	0	0	0
年度			
総計	2,800,000	840,000	3,640,000

研究分野：社会システム工学，安全システム

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学，社会システム工学・安全システム

キーワード：離散事象システム，スケジューリング，状態空間表現，頑健性，Dioid 代数，繰返し型

1. 研究開始当初の背景

同一資源を用いて複数のジョブを繰返し

実行する，多入力多出力（MIMO）先入先出（FIFO）型の構造を有する離散事象システ

ムのスケジューリング方法について検討する。

システムの記述には、Dioid 代数系と呼ばれる離散代数系を用いる。この代数系を用いると、複数工程の並列実行、同期、非競合性などの制約関係が、

$$\mathbf{x}(k) = A (*) \mathbf{x}(k-1) (+) B (*) \mathbf{u}(k),$$

$$\mathbf{y}(k) = C (*) \mathbf{x}(k),$$

のように、現代制御理論の状態空間表現に類似した簡潔な線型方程式で記述できる。このため、現在制御理論分野におけるいくつかの主要な研究成果、例えば、内部モデル制御、モデル予測制御、適応制御などのフレームワークを、Dioid 代数系に適用する試みが行われてきた。

しかし既存研究の大半は、一般の代数系での取り扱い方法に極力手を加えずに用いることを基本方針としており、

- (1) 状態空間表現の記述能力が低く、実システムへの適用範囲が限られる
  - (2) 状態方程式の効率的な計算方法やその高速化に関する検討がほとんどなされておらず、大規模システムへの適用や、オンラインでの運用が難しい
  - (3) 各工程の処理時間など、システムパラメータが確率的変動をする場合などの検討が不十分である
- などの問題があった。

## 2. 研究の目的

上記(1)~(3)の背景に対して、本研究ではそれぞれ、

- (1) 既存の状態空間表現を拡張し、より広いクラスのシステムに適用可能にする。特に実在の生産システムや交通システムに適用できるような拡張を意識する
- (2) 状態空間表現の高速な計算方法について、アルゴリズムなどの理論面と、実機での実装面の両面で検討する。ノード数が数十~百程度の実用的な規模のシステムの計算が、オンラインで行える水準を意識する
- (3) 各工程での処理時間の不確実性が高い場合に、全体の処理時間を短縮しつつ、意図した値に近い出力が得られるような方法論を検討する

などを目的として検討をすすめる。

## 3. 研究の方法

上記(1)~(3)に対する具体的な検討方法は、以下のとおりである。

### (1) 状態空間表現の拡張

1. で述べた状態空間表現は、現代制御理論において最も基本的かつ重要な方程式系である。しかしこれを Dioid 代数系に適用する場合、記述可能なシステムは、(a)各工程において同時処理可能な最大ジョブ数が 1, (b) 工程間に留置可能な最大ジョブ数が  $\infty$ , (c)す

べてのジョブは同一の工程群を同一順序で処理される、などの制約があり、適用範囲が限られている。このため本研究では、これらの制限を取り払うか緩和することで、より広いクラスのシステムを扱えるようにするため、システムの構造や特徴量を表現するパラメータ行列を適宜導入しながら、状態空間表現の拡張を行う。

### (2) 計算量の少ないアルゴリズムの考案、並列処理などによる計算時間の短縮

Dioid 代数系の状態空間表現をスケジューリング問題のソルバーとして用いる際のネックの一つは、遷移行列と呼ばれる、事象の伝搬時間を表す表現行列の計算負荷が高いことである。このため、実用的な規模のシステムのスケジューリングをオンラインで行うためには、遷移行列を高速に計算できることが重要であり、本研究では、時間計算量の意味での計算量を削減するアルゴリズム論的なアプローチと、並列化による実時間ベースの計算時間を短縮する実装面でのアプローチの両面で検討する。

### (3) 工程の処理時間の不確実性の考慮

工程が手作業である場合、人やモノの輸送・移動などを伴う場合、あるいは安定運用前の試行錯誤の工程である場合などには、処理時間にバラツキすなわち不確実性を含むことがある。このような場合は確率系システムとして扱うことが通常であるが、状態空間表現で確率的変動を考慮しようとする、工程の同期を行う箇所数だけの確率分布の多重積分を扱わなければならない、実用的なサイズのシステムを取り扱うことが困難である。このため本研究では、確率的変動を細かく追跡することはせず、出力値を参照信号に追従させることを主目標として、制御入力やシステムパラメータを調整する方法を検討する。なお本研究においては、出力値、参照信号、制御入力、システムパラメータは、ジョブの完了時刻、納期、材料の投入時刻、工程での処理時間にそれぞれ対応する。

## 4. 研究成果

上記(1)~(3)に対する主な研究成果は、以下のとおりである。

### (1) 状態空間表現の拡張

① 制御系システムのモデリングの際に用いられるむだ時間系の概念を用いて、1. に記した状態空間表現の拡張を行った。具体的には、工程内で同時に処理可能な最大ジョブ数や、工程間に留置可能な最大ジョブ数を、パラメータ行列を用いて与え、容量やバッファサイズに関する制約条件を柔軟に設定できるように拡張した。また拡張した状態空間表現に対して、仕掛在庫の偏在の検出や、偏在

を防止するスケジューリングを行う方法論を構築した。

② 実在のシステムでは、システムの能力が許す限り最速で処理した方がよい場合と、指定された時間をかけて処理する方が重要な場合とがある。これらの異なるスケジューリングポリシーは、Dioid 代数系を用いる場合には、従来はまったく異なる定式化と取り扱いが行われていた。そこで本研究では、最早または最遅のポリシーと、相対時刻を固定したポリシーの両者をジョブ毎に変えて混在させたり、両者を相互に変換したりする方法論を構築した。これにより、優先度が複数ある複数のジョブを混在させることなども可能になり、より広いクラスの実システムを取り扱うことができる。

(2) 計算量の少ないアルゴリズムの考案、並列処理などによる処理速度の向上

① 状態空間表現中に現れる遷移行列の計算は、工程の実行時間と実行順序を表す重みつき隣接行列の Kleene Star (クリーネ閉包) と呼ばれる行列を計算する部分にある。工程数を  $n$ 、先行制約数を  $m$  とした時に、従来は Kleene Star の計算に  $O(n^4)$  の時間計算量を要しており、これがオンライン運用を行う際のネックになっていた。そこで本研究では、時間計算量を削減するアルゴリズムをいくつか考案し、 $O(n^3)$  または  $O(n*(n+m))$  の時間計算量で計算できるようになった。さらに、実運用の際には、遷移行列の値そのものではなく、状態空間表現中の状態ベクトルの値だけが必要である場合も多い。本研究ではこの点に着目し、Kleene Star を経由せずに直接状態ベクトルを計算する方法を考案し、初回のみ  $O(n^2)$ 、先行制約関係が変わらない限り、以降  $O(n+m)$  の時間計算量で計算できるようになった。

② 時間計算量を削減したアルゴリズムに対して、並列処理機能を有するプロセッサを用いた並列化を行い、実時間ベースで計算時間を短縮する方法を検討した。具体的には、主に映像処理の計算用として、一部のゲーム機や 3D テレビに搭載されている CELL プロセッサ向けの実装と、元来はグラフィクス表示の計算用に開発され、近年は技術計算用にも用いられている GPU(Graphics Processing Unit)ボード向けの実装を行った。CELL プロセッサでは、計算用のプロセッサは各々独立に動作するため、台数効果が顕著な高速化効果が得られた。一方の GPU は、各プロセッサが相互に依存しながら計算が行われるため、台数効果自体は CELL プロセッサに及ばないものの、プロセッサ数が数十～数百程度と多数搭載されているため、システムサイズが大きい場合に高速化効果が顕著であった。

(3) 工程の処理時間の不確実性の考慮

ジョブの処理時間のバラつきを細かく考慮した定式化は行わず、目標出力時刻を守り、かつジョブの合計処理時間を短くするための方法論を検討した。具体的には、CCPM (Critical Chain Project Management) と呼ばれる、マネジメントサイエンス分野で近年注目されている手法を、Dioid 代数系での状態空間表現に適用することを試みた。CCPM 法では、ジョブの処理時間に不確実性がある場合に、納期短縮と遅れの防止を両立させるために、時間バッファと呼ばれる余裕時間を工程列の中の数箇所に挿入する。これらのバッファを挿入すべき位置と量の計算を、Dioid 代数系で行う方法を検討した。従来の CCPM 法では、これらは目視あるいは発見的な方法で行っていたが、本研究ではこれらの計算が Dioid 代数系での線形演算に帰着されたことが大きな特徴である。このため、上述した研究成果(2)などと組み合わせることにより、より大規模なシステムへの適用、あるいはより短い時間単位での運用が可能になることが期待できる。

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 23 件)

- ① Hiroyuki GOTO, A Fast Computation for the State Vector in a Max-Plus Algebraic System with an Adjacency Matrix of a Directed Acyclic Graph, Journal of Control, Measurement, and System Integration, 査読有, Vol. 4, No. 5, 2011, pp. 361-364, <http://www.sice.or.jp/JCMSI/>
- ② Shotaro YOSHIDA, Hiroataka TAKAHASHI, Hiroyuki GOTO, Resolution of Time and Worker Conflicts for a Single Project in a Max-Plus Linear Representation, Industrial Engineering and Management Systems, 査読有, Vol. 10, No. 4, 2011, pp. 279-287, <http://kiie.org/iems/contents/vol10no4/10-4-06.pdf>
- ③ Shotaro YOSHIDA, Hiroataka TAKAHASHI, Hiroyuki GOTO, Resolution of Resource Conflict for a Single Project in Max-Plus Linear Representation, Journal of Computations and Modelling, 査読有, Vol. 1, No. 1, 2011, pp. 31-47, [http://www.scienpress.com/upload/JCM/Vol%201\\_1\\_3.pdf](http://www.scienpress.com/upload/JCM/Vol%201_1_3.pdf)
- ④ Hiroyuki GOTO, Acceleration of Computing the Kleene Star in Max-Plus

- Algebra using CUDA GPUs, IEICE Transactions on Information & Systems, 査読有, Vol.E94-D, No.2, 2011, pp.371-374, DOI: 10.1587/transinf.E94.D.371
- ⑤ Hiroyuki GOTO, Efficient Computation of the State Equation for Sparse Adjacency Matrices in Max-Plus Algebraic Systems, International Journal of Computational Science, 査読有, Vol.4, No.6, 2010, pp.505-516, <http://www.gip.hk/ijcs/v4n6.htm>
- ⑥ Munenori KASAHARA, Hiroataka TAKAHASHI, Hiroyuki GOTO, Resolution of Resource Conflict Between the Different Two Projects in MPL-CCPM Representation, WSEAS Transactions on Information Science and Applications, 査読有, Vol.7, No.1, 2010, pp.774-783, <http://www.wseas.us/e-library/transactions/information/2010/89-699.pdf>
- ⑦ Hiroyuki GOTO, High-speed Computation of the Kleene Star in Max-plus Algebraic System Using a Cell Broadband Engine, IEICE Transactions on Information & Systems, 査読有, Vol.E93-D, No.7, 2010, pp.1798-1806, DOI: 10.1587/transinf.E93.D.1798
- ⑧ 五島 洋行, 離散事象システムに対するロバトスケジューリング方法とその交通工学分野への応用, マツダ財団研究報告書 科学技術関係, 査読無, Vol.22, 2010, pp.27-34.
- ⑨ Hiroyuki GOTO, Hiroataka TAKAHASHI, Transferring Progress Control Policies in Scheduling Problems for a Class of Repetitive Discrete Event Systems, International Journal of Control, 査読有, Vol.83, No.2, 2010, pp.421-431, DOI: 10.1080/00207170903177782
- ⑩ Munenori KASAHARA, Hiroataka TAKAHASHI, Hiroyuki GOTO, On a Buffer Management Policy for CCPM-MPL Representation, International Journal of Computational Science, 査読有, Vol.3, No.6, 2009, pp.593-606, <http://www.gip.hk/ijcs/v3n6.htm>
- ⑪ Hiroyuki GOTO, A Solution for Faster Computation of the Transition Matrix in a Class of DESs Using a CELL/B.E., International Journal of Computational Science, 査読有, Vol.3, No.6, 2009, pp.618-628, <http://www.gip.hk/ijcs/v3n6.htm>
- ⑫ Hiroyuki GOTO, Hiroataka TAKAHASHI, Fast Computation Methods for the Kleene Star in Max-Plus Linear Systems with a DAG Structure, IEICE Transactions on Fundamentals, 査読有, Vol.E92-A, No.11, 2009, pp.2794-2799, DOI: 10.1587/transfun.E92.A.2794
- ⑬ Hiroyuki GOTO, Hiroataka TAKAHASHI, Monitoring and Prediction Methods for a Class of Railway Systems Based on State-Space Representation In Dioid Algebra, International Journal of Computational Science, 査読有, Vol.3, No.3, 2009, pp.233-250, <http://www.gip.hk/ijcs/v3n3.htm>
- ⑭ Hiroyuki GOTO, Robust MPL Scheduling Considering the Number of In-process Jobs, Engineering Applications of Artificial Intelligence, 査読有, Vol.22, No.4, 2009, pp.603-607, DOI: 10.1016/j.engappai.2008.11.007
- ⑮ Hiroyuki GOTO, Shiro MASUDA, Monitoring and Scheduling Methods for MIMO-FIFO Systems Utilizing Max-Plus Linear Representation, Industrial Engineering and Management Systems International Journal, 査読有, Vol.7, No.1, 2008, pp.23-33, [http://kiie.org/iems/contents/vol7\\_n01.htm](http://kiie.org/iems/contents/vol7_n01.htm)
- ⑯ Hiroyuki GOTO, Efficient Calculation of the Transition Matrix in a Max-Plus Linear State-Space Representation, IEICE Transactions on Fundamentals, 査読有, Vol.E91-A, No.5, 2008, pp.1278-1282, DOI: 10.1093/ietfec/e91-a.5.1278
- ⑰ Hiroyuki GOTO, Dual Representation and Its Online Scheduling Method for Event-Varying DESs with Capacity Constraints, International Journal of Control, 査読有, Vol.81, No.4, 2008, pp.651-660, DOI: 10.1080/00207170701616007
- ⑱ Hiroyuki GOTO, Shiro MASUDA, Dynamic Backward Scheduling Method for Max-Plus Linear Systems with a Repetitive, MIMO, FIFO Structure, WSEAS Transactions on Information Science and Application, 査読有, Vol.5, No.2, 2008, pp.182-191, <http://www.worldses.org/journals/information/information-2008.htm>
- ⑲ Hiroyuki GOTO, Online Scheduling for Event-Varying MPL Systems with Finite Buffer Size, International Journal of Computational Science, 査読有, Vol.2, No.2, 2008, pp.167-183, <http://www.gip.hk/ijcs/v2n2.htm>

[学会発表] (計 28 件)

- ① Hiroyuki GOTO, Tatsuki YOSHIZUMI, A Lightweight Model Predictive Controller for Repetitive Discrete Event Systems, SICE Annual Conference 2011, 2011/9/16, 早稲田大学.
- ② Hiroyuki GOTO, Tatsuki YOSHIZUMI, Reduction in Computation Complexity of Scheduling Problems for a Class of Repetitive Discrete Event Systems, 2011 First IRAST International Conference on Data Engineering and Internet Technology (DEIT '11), 2011/3/17, in Bali, Indonesia.
- ③ Hiroyuki GOTO, Yutaka SAKAI, Efficient Computation of a Schedule for a Class of Discrete Event Systems with Sparse Adjacency Matrices, 2011 First IRAST International Conference on Data Engineering and Internet Technology (DEIT '11), 2011/3/17, In Bali, Indonesia.
- ④ Shotaro YOSHIDA, Hiroataka TAKAHASHI, Hiroyuki GOTO, Modified Max-Plus Linear Representation for Inserting Time Buffers, The IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM '10), 2010/12/9, In Macau, China.
- ⑤ 五島 洋行, 繰返し型離散事象システムのスケジューリング方法に関する研究, 日本経営工学会 平成 22 年度秋季研究大会, 2010/10/23, 福岡工業大学.
- ⑥ Hiroyuki GOTO, Shotaro YOSHIDA, A Fast Computation of the State Vector in a Class of DES System, The 9th WSEAS International Conference on Applications of Computer Engineering (ACE '10), 2010/3/24, In Penang, Malaysia.
- ⑦ Hiroyuki GOTO, Takahiro ICHIGE, High-Speed Computation of the Kleene Star in Max-Plus Algebra Using a Cell Broadband Engine, The 9th WSEAS International Conference on Applications of Computer Engineering (ACE '10), 2010/3/23, In Penang, Malaysia.
- ⑧ Hiroyuki GOTO, Munenori KASAHARA, Efficient Computation Methods for the Kleene Star in Max-Plus Linear Systems, The 9th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA '09), 2009/12/2, In Pisa, Italy.
- ⑨ Hiroyuki GOTO, Takakazu TSUBOKAWA, Transferring the Progress Control

Policy for a Class of Discrete Event Systems, The 9th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA '09), 2009/12/1, In Pisa, Italy.

- ⑩ Hiroyuki GOTO, Atsushi KAWAMINAMI, An Efficient Solver for Scheduling Problems on a Class of Discrete Event Systems Using CELL/B.E. Processor, The 9th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA '09), 2009/12/1, In Pisa, Italy.
- ⑪ Hiroyuki GOTO, Atsushi KAWAMINAMI, Hiroataka TAKAHASHI, Scheduling Method for Repetitive Discrete Event Systems in which Each Job Uses a Different Set of Facilities, 2009 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits and Signal Processing (NCSP '09), 2009/3/3, In Hawaii, USA.
- ⑫ Hiroyuki GOTO, Munenori KASAHARA, Masaki TANAKA, Efficient Calculation Method of the Transition Matrix for Max-plus Linear Systems with Buffer Constraints, The 4th IEEE International Conference on Management of Innovation & Technology (ICMIT '08), 2008/9/25, In Bangkok, Thailand.

[図書] (計 2 件)

- ① Hiroyuki GOTO (ほか計 16 名), SCIYO, Discrete Event Simulations, pp.35-62, 2010.
- ② 五島洋行 (ほか計 31 名), 近代科学社, 挑戦こそが成功の鍵, pp.58-65, 2010.

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: スケジュール作成方法, スケジュール作成装置及びコンピュータプログラム  
発明者: 五島洋行, 高橋弘毅, 笠原統徳  
権利者: 長岡技術科学大学  
種類: 特許  
番号: 特願 2009-42643・特開 2010-198339  
出願年月日: 2009 年 2 月 25 日  
国内外の別: 国内

○取得状況 (計 1 件)

名称: プロセス行列作成方法, スケジュール生成方法, プロセス行列作成装置, スケジュール生成装置, コンピュータプログラム, 及び記録媒体  
発明者: 五島洋行, 増田士朗  
権利者: (株) 日本総合研究所

種類：特許  
番号：特許第 4383063 号  
取得年月日：2009 年 10 月 2 日  
国内外の別：国内

〔その他〕  
ホームページ等  
<http://syslab.k.hosei.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

五島 洋行 (GOTO HIROYUKI)  
法政大学・理工学部・准教授  
研究者番号：00398950

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

高橋 弘毅 (TAKAHASHI HIROTAKA)  
山梨英和大学・人間文化学部・講師  
研究者番号：40419693