

## 多モード切り替え型ハイブリッドシステムの オンラインスケジューリング方法

五島, 洋行 / GOTO, Hiroyuki

---

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

科学研究費助成事業 研究成果報告書

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

5

(発行年 / Year)

2015-05

平成 27 年 5 月 23 日現在

機関番号：32675

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23510163

研究課題名(和文)多モード切り替え型ハイブリッドシステムのオンラインスケジューリング方法

研究課題名(英文)Online scheduling methods for multimodal switching hybrid systems

研究代表者

五島 洋行(GOTO, Hiroyuki)

法政大学・理工学部・教授

研究者番号：00398950

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：プロセスの実行時間が調整可能、または不確実な事象駆動型の離散事象システムを検討対象とし、その挙動をmax-plus代数を用いて表現し、計算負荷の低いスケジューリング方法を構築した。制御入力とシステムパラメータの両方の調整が行えるシステムに対しては、モデル予測制御の手法を適用し、連続変数と離散変数とが混在するハイブリッドシステムの制御器を設計した。一方実行時間の変動幅が大きいシステムに対しては、クリティカル・チェーン・プロジェクト・マネジメント(CCPM)法と呼ばれる手法を適用し、スケジュール計算の枠組みをmax-plus代数系で表現する方法を検討し、多重積分を用いない手法を構築した。

研究成果の概要(英文)：We have focused on event driven discrete event systems in which the duration times of processes are adjustable or vary stochastically. The behavior of target systems was represented using max-plus algebra, and scheduling methods with lightweight computation load were developed. For systems in which both the control inputs and system parameters are adjustable, we applied the concept of model predictive control, and designed a controller for hybrid systems in which there are both continuous and discrete variables. On the other hand, we applied the concept of the Critical Chain Project Management (CCPM) method to systems with highly uncertain processing times. In constructing the framework for calculating a desirable schedule, max-plus algebra was used to avoid multiple integration.

研究分野：経営数理工学、オペレーションズリサーチ

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 max-plus代数 ハイブリッドシステム CCPM法

## 1. 研究開始当初の背景

Max-plus 代数を用いたシステムモデリングと、その制御系設計問題を検討対象とする。max 演算を(+), +演算を(\*)として定義すると、複数プロセスの同期や並列実行、前後のジョブとの非競合性、などの特徴を有するシステムの振る舞いが、

$$x(k)=A(*)x(k-1)(+)B(*)u(k), y(k)=C(*)x(k)$$

のように、現代制御理論の状態空間表現に類似した形式で表現できる。実システムへの適用という点では、生産システム、交通システム、プロジェクトマネジメントなどのスケジューリング問題のほか、通信ネットワークのフロー制御への応用例なども報告されている。

既存手法の大半は、資源の使用順序やジョブの処理時間は所与であると仮定しており、システムに対する制御は入力時刻の調整のみで行われる。また、システムの状態は単一の方程式系で記述され、途中で別の状態に遷移することなどは想定していなかった。これは、例えば生産システムでは、初期状態と各工程の処理時間を与え、製品の完成時刻を予測することや、与えられた納期に間に合うようにジョブの処理を開始する、といった計画立案は行えることを意味する。しかし、現在の進捗状況を見ながらジョブの処理時間を調整することや、途中で何らかのトラブルが発生した時に、人員や設備を増強して状態回復にあたる、というような計画や調整は行えない。現実のシステムでは、このようなオンラインでの状態把握と迅速な意思決定が必要であり、また異常やトラブルの発生時には、通常の状態とは異なる体制に切り替え、早急な状態回復を図ることが必要である。

## 2. 研究の目的

本研究は、上記のような背景と要請を踏まえて、max-plus 代数を用いたスケジューリング手法を、シミュレーションツールの一つから実際的な意思決定支援システムに昇華させることを目的とする。鉄道システムや生産システムへの適用を念頭におく。Max-plus 代数を用いたアプローチは、基本的に離散系システムの記述に用いられているが、これを連続事象と離散事象とが混在するハイブリッド系に拡張し、小さな外乱に対するロバスト性を実現する。さらに大きなトラブル発生時に迅速な状態回復が行えるように、複数のモード切り替えによる最適化を実現し、並行してオンライン運用のための高速な計算技法についても検討する。

## 3. 研究の方法

研究テーマは大きく分けて、(1)ハイブリッド系への拡張、(2)複数モード切り替えの導入と最適化、(3)オンライン運用のための高速な計算技法の検討、の三つに分けられる。

(1)では、状態空間表現中に表れる定数パラメータを連続変数として扱うようにし、従来

の離散系ダイナミクスに加えて新たに連続系ダイナミクスの要素も加味し、ハイブリッド系の制御系設計問題を構成する。これにより、小さな外乱の発生、例えば小規模なトラブルの発生により若干の遅れが生じた時に、パラメータを少しずつ調整することで、システムに大きな負荷や変化を生じさせることなく、滑らかに状態回復する、といったことが可能になる。

(2)では、システムに大きな外乱が混入し、現在のモードでは回復が難しい場合に、通常の状態とは別のモードに切り替え、迅速な状態回復を図るような、複数モードの切り替えが考慮できる方法論と、その最適化方法を検討する。大規模な外乱としては、例えば設備の故障や作業者が抜けた状態などを指し、別のモードとは、例えば人や設備が増強された状態、あるいはタスクの実行順序を変更した状態などを指す。

(3)では、主に状態空間表現の高速な計算方法について検討する。上記(1)、(2)の両方とも、大規模なシステムを扱ったり、ロバストな解を求めたりしようとする、計算時間が大幅に増加することが懸念される。このため、オンライン運用には不可欠な計算時間短縮のための方法論を、理論と実装の両面から検討する。

## 4. 研究成果

平成 23 年度は、(1)システムパラメータに大きな確率的変動を伴う場合のロバストなスケジューリング方法、(2)システムパラメータ変化時の軽量な再スケジューリング方法、の 2 点について主に検討した。

並列実行可能な複数タスクがすべて終了するのを待つ同期条件を取り扱う場合、タスクの実行時間の最大値を求める畳み込み積分が必要である。従って、同期箇所あるいは並列タスクの数が多い場合には、高次の多重積分が必要になり、従来では多数タスクからなるシステムを取り扱うことが困難であった。そこで、経営工学分野で近年注目されている、クリティカル・チェーン・プロジェクト・マネジメント法 (CCPM 法) の概念を、max-plus 代数系の状態空間表現に適用し、多重積分を用いずに確率的変動を考慮する方法を検討した。

また、タスクの実行時間が変更された場合に再スケジューリングを軽量に行う方法を考案した。ノード数が  $n$ 、アーク数が  $m$  のグラフで表されるシステムを扱う場合、従来は全ノードペアの最長経路長を表す行列を計算し、さらに現在のタスクの状態を表す状態ベクトルとの積を計算しており、 $O(n*(n+m))$  の時間計算量が必要であった。そこで、最長経路長の行列を計算せずに直接状態ベクトルを計算する方法を考案し、初回は  $O(n^2)$ 、先行制約関係が変わらない再スケジューリング時には、 $O(m)$  まで時間計算量を削減することに成功した。

平成 24 年度は、(1)max-plus 代数系における軽量なモデル予測制御器の開発、(2)CCPM 法の枠組みを max-plus 代数系で表現する時の表現形式の簡素化、の 2 点を主に検討した。

モデル予測制御は一般に、予測ホライズンを大きく取るほど外乱に対して頑健になる反面、制御入力を決定する最適化問題を解くための計算負荷が高くなる。本研究では、制御入力だけでなくシステムパラメータも可調整である場合を扱う必要があり、軽量な制御器の開発はオンラインでの運用に不可欠である。そこで、出力予測式をシステムパラメータの関数として扱うための、計算機上での内部表現方法を考案し、分枝限定的な枝刈り演算によって冗長な制約条件式を除去し、軽量に最適解を求める方法を考案した。検討の結果、従来法と比較して予測ホライズンを 2 倍程度大きく取れるようになった。

さらに(2)では、システムパラメータの値の不確実性が大きい場合に頑健なスケジューリングが行える CCPM 法の枠組みを max-plus 代数系で表現する、CCPM-MPL 法の表現形式の簡素化に取り組んだ。頑健性実現のために途中工程数か所に時間バッファを挿入するが、従来はバッファの大きさと挿入位置の計算が煩雑であり、特殊な演算や一時的な作業用行列とベクトルの計算を必要としていた。そこで、変数の値がゼロかどうかを判定する演算の他はすべて max-plus 代数系での標準的な演算系のみを用いて、適切な大きさの時間バッファを適切な位置に挿入できる方法を考案した。

平成 25 年度は、(1)モデル予測制御器の記述能力向上、(2)状態方程式の最悪計算量の見積もり、(3)複数のスケジューリングポリシーが混在する場合の状態方程式の導出、の 3 点を主に検討した。

(1)は、前年度の検討までは単一設備内の最大容量が 1、設備間の容量が無限大のクラスのみを対象としており、適用範囲が限られていた。そこで任意の 2 設備間の最大バッファ容量が考慮できるような拡張を行い、当該手法の実用性を向上させた。(2)では、システムサイズに対して最適化問題の制約式の数がどれほどのオーダーで増加するのか、システムパラメータの値が無制約の場合に、ノード数を固定した時の最大パス数を計算した。その結果、ノード数  $n$  が十分大きい場合に、独立なパス数の最大値が  $O(3^{n/3})$  のオーダーで増加することが判明した。(3)では、状態方程式の拡張を行い、タスク間に先行制約関係のみが課される場合と、複数タスクの相対的な開始・終了時刻が固定されている場合の、両方のスケジューリングポリシーが混在できるようにした。従来はジョブ単位でいずれか一方のポリシーのみしか選択できなかったが、この検討により、単一ジョブ内にも複数のポリシーを混在させることが可能になった。

なお当初の研究計画に入っていた検討項

目の、「複数モード切り替えの導入と最適化」については、状態空間表現に現れる入力ベクトルや遷移行列に、切り替え用の変数を組み込むことで実現できると予想していたが、平成 25 年度の検討途中で、その構想に極めて近く、より統一的な枠組みが欧州の研究グループによって先に発表された(文献①)ことが判明した。このため当項目に関して独自の方法を新たに検討することはせず、研究目的達成のために必要な修正や拡張を行う検討に注力することにした。

平成 26 年度は、上記の経緯から当初計画を見直し、CCPM-MPL 法を主な検討対象とし、(1)オリジナルの CCPM 法に対して上位互換性を有するように CCPM-MPL 法を改良、(2)組合せ最適化問題としての実行時間最小化問題の構築、(3)最適化問題のソルバー開発、の 3 点について主に検討した。

(1)については、クリティカルチェーンの同定を max-plus 代数を用いて行う方法を考案し、オリジナルの CCPM 法と同一の結果を返し、かつ多入力多出力系にも対応し、上位互換性を持たせることに成功した。(2)では、タスクの実行順序を制約付き変数に割り付け、プロジェクトの実行時間を目的関数とする目的関数最小化の最適化問題に帰着させた。(3)では、全探索によって厳密解を求めるソルバーと、局所探索を用いて近似解を求めるソルバーを開発した。

修正後の研究計画は、検討項目が再度整理され、「限られたリソースを有効に活用するスケジューリング方法」(研究課題番号：26350436)で継続して検討が行われている。

#### <引用文献>

① T. Boom and B. De Schutter, "Modeling and control of switching max-plus-linear systems", *Discrete Event Dynamical Systems*, vol.22, no.3, pp.293-332, 2012.

#### 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 12 件)

① 五島 洋行, "Coexisting two scheduling policies in a class of discrete event systems", *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*, 査読有, vol.6, no.4, pp.1-12, 2014,

[http://www.i-asr.com/jardcs/Uploadsend/1990Vol\\_6\\_Issue\\_4\\_JARDCS\\_pp\\_01-12.pdf](http://www.i-asr.com/jardcs/Uploadsend/1990Vol_6_Issue_4_JARDCS_pp_01-12.pdf)

② 小田切 真輔, 五島 洋行, "On the greatest number of paths and maximal paths for a class of directed acyclic graphs", *IEICE Transactions on Fundamentals, Communications and Computer Sciences*, 査読有, vol.E97-A, no.6, pp.1370-1374, 2014,

DOI: 10.1587/transfun.E97.A.1370

- ③ 五島洋行, Nguyen Thi Ngoc TRUC, 高橋弘毅, "Simple representation of the critical chain project management framework in a max-plus linear form", SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 査読有, vol.6, no.5, pp.341-344, 2013,  
<http://www.sice.or.jp/JCMSI/cover6-5.pdf>
- ④ 五島洋行, "Model predictive control-based scheduler for repetitive discrete event systems with capacity constraints", An International Journal of Optimization and Control: Theories & Applications, 査読有, vol. 3, no. 2, pp.73-83, 2013,  
 DOI: 10.11121/ijocta.01.2013.00140
- ⑤ 五島洋行, "A lightweight model predictive controller for repetitive discrete event systems", Asian Journal of Control, 査読有, vol. 15, no. 4, pp.1081-1090, 2013,  
 DOI: 10.1002/asjc.613
- ⑥ Nguyen Thi Ngoc TRUC, 武井 由智, 五島洋行, 高橋弘毅, "Buffer management method for multiple projects in the CCPM-MPL representation", Industrial Engineering and Management Systems, 査読有, vol.11, no.4, pp.397-405, 2012,  
 DOI : 10.7232/iems.2012.11.4.397
- ⑦ Nguyen Thi Ngoc TRUC, 五島洋行, 高橋弘毅, 吉田 翔太郎, 武井 由智, "Critical chain project management based on a max-plus linear representation for determining time buffers in multiple projects", Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 査読有, vol. 6, no.5, pp. 715-727, 2012,  
 DOI: 10.1299/jamdsm.6.715
- ⑧ 五島洋行, 高橋弘毅, "Efficient representation of the state equation in max-plus linear systems with interval constrained parameters", IEICE Transactions on Fundamentals, Communications and Computer Sciences, 査読有, vol.E95-A, no.2, pp.608-612, 2012,  
 DOI: 10.1587/transfun.E95.A.608
- ⑨ 吉田 翔太郎, 高橋弘毅, 五島洋行, "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, pp.279-287, 2011,  
 DOI: 10.7232/iems.2011.10.4.279
- ⑩ 五島洋行, "A fast computation algorithm for the state vector in a max-plus algebraic system with an adjacency matrix of a directed acyclic graph", SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 査読有, vol.4, no.5, pp.361-364, 2011,  
<http://www.sice.or.jp/JCMSI/cover4-5.pdf>
- ⑪ Nguyen Thi Ngoc TRUC, 五島洋行, 高橋弘毅, 吉田 翔太郎, "Enhanced framework for determining time buffers in the MPL-CCPM representation -Case of a single project-", International Journal of Information Science and Computer Mathematics, 査読有, vol.4, no.1, pp.1-18, 2011,  
<http://www.pphmj.com/abstract/6403.htm>
- ⑫ 吉田 翔太郎, 高橋弘毅, 五島洋行, "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, pp.31-47, 2011,  
[http://www.scienpress.com/upload/JCM/Vol%201\\_1\\_3.pdf](http://www.scienpress.com/upload/JCM/Vol%201_1_3.pdf)
- [学会発表] (計 13 件)
- ① 古賀 裕紀, 五島洋行, 千葉 英史, "Resolution of Resource Conflicts in the CCPM framework using a local search method", IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, 2014/12/11, セランゴール (マレーシア) .
- ② 五島洋行, 横山 朔, "Mixture of two different scheduling policies in a class of discrete event systems", IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, 2014/12/10, セランゴール (マレーシア) .
- ③ 古賀 裕紀, 五島洋行, 千葉 英史, "CCPM 法の枠組みにおける資源競合の解消方法～遺伝的アルゴリズムの活用～", 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会, 2014/11/23, 岡山大学 (岡山県・岡山市) .
- ④ 豊田 一裕, 五島洋行, "作業時間の不確実性を考慮した max-plus 線形システムでのモデル予測制御", 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会, 2014/11/23, 岡山大学 (岡山県・岡山市) .
- ⑤ 古賀 裕紀, 五島洋行, 千葉 英史, 豊田 一裕, "CCPM 法の枠組みにおける遺伝的アルゴリズムを利用した資源競合の解消法", 計測自動制御学会 第 55 回離散事象システム研究会, 2014/6/6, 高千穂コミュニティセンター (宮崎県・高千穂町) .
- ⑥ 五島洋行, 豊田 一裕, "Scheduling framework for discrete event systems with capacity constraints based on a model predictive control", Asia Pacific Industrial Engineering & Management Systems Conference, 2013/12/6, セブ (フィリピン) .
- ⑦ 五島洋行, 豊田 一裕, "Efficient computation of the Kleene star in max-plus algebra using a CUDA GPU", WSEAS International Conference on Mathematical and Computational Methods in Science and Engineering, 2013/4/2, クアラルンプール (マレーシア) .

- ⑧ 五島 洋行, Nguyen Thi Ngoc TRUC, 高橋 弘毅, "CCPM 法のフレームワークを簡素な Max-plus 線形方程式で定式化する", 計測自動制御学会 第 52 回離散事象システム研究会, 2013/1/22, グランキューブ大阪 (大阪府・大阪市) .
- ⑨ Nguyen Thi Ngoc TRUC, 武井 由智, 五島 洋行, 高橋 弘毅, "CCPM-MPL representation for monitoring time buffers in a multiple-output system", Asia Pacific Industrial Engineering & Management Systems Conference, 2012/12/4, プークェット (タイ) .
- ⑩ 吉田 翔太郎, 高橋 弘毅, 五島 洋行, "Resolution of resource conflict in a max-plus linear representation -case of a single project-", IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, 2011/12/9, シンガポール (シンガポール) .
- ⑪ 五島 洋行, 善積 竜希, "A lightweight model predictive controller for repetitive discrete event systems", SICE Annual Conference, 2011/9/16, 早稲田大学 (東京都・新宿区) .
- ⑫ Nguyen Thi Ngoc TRUC, 五島 洋行, 高橋 弘毅, "Redefined MPL representation for buffer execution -case of a single project-", SICE Annual Conference, 2011/9/14, 早稲田大学 (東京都・新宿区) .
- ⑬ Nguyen Thi Ngoc TRUC, 吉田 翔太郎, 高橋 弘毅, 五島 洋行, "A MPL-CCPM framework for systems with multiple inputs", International Symposium on Scheduling, 2011/7/2, 大阪大学 (大阪府・大阪市北区) .

[その他]

ホームページ等

<http://syslab.k.hosei.ac.jp/research.html>

## 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・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)

長岡技術科学大学・技学研究院 情報・経営システム工学専攻・准教授

研究者番号：40419693