

令和元年6月28日現在

機関番号：54601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06844

研究課題名（和文）不確実性を有する離散型生産システムの統合的な意思決定支援環境の開発

研究課題名（英文）Development of Integrated Support Environment for Decision-Making in Discrete Manufacturing Systems with Uncertainty

研究代表者

橋爪 進（Hashizume, Susumu）

奈良工業高等専門学校・電子制御工学科・教授

研究者番号：60242913

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、システムを流れるものの処理時間や処理工程などが動的に変更されるといふ不確実性を有する離散型生産システムを対象に、設計・制御・運用に係る意思決定を支援するための総合的な意思決定支援環境の開発を目指した。そのために、処理の間の因果関係をネットワーク型モデルを用いて表し、それらに基づくシステム構成の設計手法、運用方策の最適化手法、異常回避のためのコントローラ構成法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

不確実性を有する離散型生産システムの設計・運用は、従来熟練者のノウハウによるところが多く、システムズアプローチとしても離散型シミュレーションツールを利用することがほとんどであった。システム構成や運用方策の合理的な最適化手法の開発により、さらなる生産性や品質の向上が期待される。また、事象事象システムモデルをベースにした共通可能なモデルによる統合的な意思決定支援環境の開発により、システム構成設計、運用方策決定、異常検出・異常回避コントローラ設計が有機的な繋がりをもって進められる。

研究成果の概要（英文）：This research project aims at developing a integrated support environment for decision making in discrete manufacturing systems with uncertainty. To achieve this objective, we represented the causality between tasks in systems by network based models in common. Using the models, we developed methods for optimizing system configuration, finding optimal operation policy and constructing fault avoidance controller.

研究分野：システム工学

キーワード：不確実性 離散事象システム ペトリネット クリティカルパス法 ペイジアンネットワーク アントコロニー最適化 異常回避制御 意思決定支援

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

製鋼プロセスでは各鋼材の処理状況によって当初予定されていた処理時間・処理工程が変更になることがしばしば起こり、このことがプロセスの最適な運用方策立案を難しくしている。このようにシステム内を流れるものの状況や生産環境により動的に処理時間・処理工程が変更されることは、多品種少量型生産の特に品質が求められる分散型生産システムでは頻出する。従来、そのようなシステムの運用は熟練したオペレータのノウハウによるところが多かった。しかし、昨今の厳しい経営環境のなか、さらなる生産性や品質の向上を目指し、システムズアプローチを用いた最適なシステム構成の設計法、さらには運用方策の立案手法、迅速な異常検出とその異常を回避するコントローラ設計法の開発が求められている。

設計、制御、運用といった異なる業務を一貫した枠組みの中で扱おうという研究は、研究分担者として参画した基盤研究(B)「共通モデルを利用したバッチプラント計画・制御・運転支援システムの開発」(H12~14年)、および基盤研究(B)「バッチプラントの製品・プロセス開発から生産・管理までを短縮する統合情報環境の開発」(H16~18年)がある。前者では、共通モデルとして事象駆動型論理モデルの1つであるペトリネットを用い、定性的な視点から設計、制御、運用に関する問題を扱った。後者では、製品開発から生産管理までの製品ライフサイクルの中で生じる情報の流れを整理し、それらを首尾一貫して扱える一つのフレームワークを提案した。しかしながら、これらの研究ではシステムがもつ不確実性を念頭に置いた手法の開発までは検討されていない。

最適なシステム構成に関する研究では、我々は処理時間が変動する生産システムに対してプロセス全体の完了時刻を改善するための処理装置の構成を求める問題を取り上げ、その解法を開発した[引用文献①]。この問題は、処理工程が最初から決まっている場合、プロジェクト管理のCPMの手法が適用できる。CPMでは一般に処理時間の不確実性を3点見積り法などにより確定的な値にするが、より精度よい運用を図るために確定的な値にせず不確実性を確率モデル等で表した上でプロセス完了時刻やクリティカルパスを求める方法がいくつか提案されている。Chenらは不確実性(曖昧さ)をファジィ理論を用いて表してクリティカルパスを求める方法を提案した[引用文献②]。また蓮池は、プロセス完了時刻を改善するための処理装置の構成(装置の改善)を含む問題の定式化を図った[引用文献③]。いずれにせよ処理時間の変動のみに限定したものであり、処理工程の変更も考慮した方法の開発が課題である。

運用方策の決定に関する研究では、我々は処理数や処理工程が変動する生産システムに対して、処理数や処理工程の変動とシステム内に滞留する製品数との因果関係をベイジアンネットワークで表し、将来の状態を動的ベイジアンネットワークにより推定することによって滞留する製品数を制御する方法を提案した[引用文献④]。近年このようにベイズ統計学を生産システムに現れる不確実性を扱うためのツールとして用いられることが多く、例えばShinらは生産在庫管理に動的ベイジアンネットワークを利用している[引用文献⑤]。この種のアプローチの鍵となるのは因果関係の精度良いモデル化であり、そのモデル化手法との融合が1つの課題である。

異常回避のコントローラ設計に関する研究では、我々は分散型生産システムの挙動を表すモデルとしてペトリネットを用い、異常検出・特定から異常回避までの異常対応を同一の枠組みで実施できる可能性を示した[雑誌論文②]。その枠組みの中では、異常検出から異常回避のためのコントローラを含めた制御系全体もペトリネットで表すことが鍵となっている。制御対象のペトリネットにコントローラのペトリネットを合成することにより、異常状態への遷移を回避する制御系を設計する研究については、Diddebanらがセーフペトリネットで表された制御対象に対して一つのヒューリスティックな方法を示した[引用文献⑥]。また、Y.F.Chenらは、普通のペトリネットで表された制御対象に対して整数計画法を用いて求める方法を示した[引用文献⑦]。いずれの方法も最大許容(異常以外の正常状態への遷移を最も妨げない)となるコントローラを構成するが、不確実性を有する分散型生産システムでは安全のため禁止状態に近い状態の遷移もできるだけ避けようとする場合も多く、必ずしも最大許容が望ましいとは限らない。そのようなコントローラの構成についての検討が1つの課題である。

2. 研究の目的

本研究では、システムを流れるものの処理時間や処理工程などが動的に変更されるという不確実性を有する分散型生産システムを対象に、システム構成の設計手法、運用方策の最適化手法、異常診断法、制御系設計手法を開発し、設計・制御・運用に係る意思決定を支援するための総合的な意思決定支援環境の開発を目的とした。

3. 研究の方法

分散型生産システムにおける設計・制御・運用に係る意思決定を統合的に支援するためには、分散型生産システムを分散事象システムとしてとらえ、お互いに変換可能なモデル概念をベースにし、それらの上でシステムの構成の設計手法、運用方策の最適化手法、異常診断・異常回避コントローラの設計法を考えることが肝要である。本研究では、「1. 背景」の節で述べた各課題に対して、次のことを行った

(1) システム構成の最適設計

分散型生産システムの処理の間の因果関係をペトリネットによりモデル化し、処理時間や非

決定解消に不確実性が与えられたとき、全体のメイクスパンの期待値とばたつきが最小となるようなシステム改善を図る問題に対して、ネットワークの構造に着目したヒューリスティックな方法を開発する。また、汎用の最適化ツールを利用するために、その特定の問題を混合整数線形計画問題(MILP)に帰着して解く方法を開発する。

(2) ベイジアンネットワークの構造学習

運用方策の最適化に利用するためにシステム内の因果関係を表すモデルとしてベイジアンネットワーク(BN)を用い、操業データからBNの構造学習を効率かつ精度よく行う方法を開発する。

(3) 異常回避コントローラ的设计

異常状態への遷移を回避するコントローラを設計する問題を、遷移できる許可状態(禁止状態でない状態)を最大に、コントローラのプレースを最小にする2目的最適化問題としてとらえ、整数計画問題として定式化し解く方法を開発する。

4. 研究成果

(1) システム構成の最適設計

① 処理順序の不確実性がない場合の混合整数線形計画問題による解法

離散型生産システムのモデルであるペトリネットの動作は、半語(処理を頂点とする半順序多重集合)の集まりである半言語により表される。生産システムの処理順序が1つしかない場合は1つの半語からなる半言語に対応する。このとき処理時間に不確実性がなければ、本研究が対象とする問題は従来のCPMの問題と同種のものと考えることができ、線形計画問題として解くことができる。よって、本研究の問題は従来のCPMに処理時間に不確実性を加えて拡張した問題ともみることができ、その視点から本研究の問題を混合整数線形計画問題(MILP)として定式化した(図1)。これにより汎用の最適化ツールを用いて解くことが可能となった。また、計算負荷の低減のためMILPの変数の数や制約式の数減らす工夫をした。さらに、局所探索法を用いた近似解法を開発した。[雑誌論文①]

② 処理順序の不確実性がある場合のヒューリスティックな解法

生産システムの処理順序が複数ある場合は、システムの動作はその数の半語を含む半言語に相当する。本研究は、対象とする問題を「各処理に対して、その処理時間の期待値とばらつき的一方もしくは両方を改善した処理(改善候補と呼ぶ)と、改善候補への置き換えコストが与えられたとき、決められた総コストの範囲内でタスクを改善候補に置き換えることにより、メイクスパンの期待値とばらつきがなるべく小さくなるようにせよ」という組合せ最適化問題としてとらえた。そして、[引用文献①]と同じ考え方のヒューリスティックな解法、すなわち各半語のソースからシンクまでのパスの中で、クリティカルパスになる確率の大きいパスに着目し、そのパス上の処理を優先的に改善候補に入れ替えるという方法を提案し、その有効性を示した。[学会発表⑩,⑫]

(2) ベイジアンネットワークの構造学習

運用方策の最適化に利用するためにシステム内の因果関係を表すモデルとしてベイジアンネットワーク(BN)を用いた。BNは不確実な事象間の関係を図2のような非巡回有向グラフによって表した確率モデルの1つである。確率変数をノード、確率変数間の因果関係をアーク、定量的な関係を条件付確率表によって表す。BNの構造学習は、実行時間内に解く厳密解法がないとされているNP困難な問題に属する。本研究では、この問題に対してメタヒューリスティクスの1つであるアントコロニー最適化法(ACO)を用いたBNの構造学習法を提案した。従来よく用いられている欲張り法では望ましいアークを順次追加していくことによりBNを構成するが、提案解法ではアリの行動原理を用いて追加アークの選択を確率的に行うことにより解の探索空間を広げ、より良い解を見つけようとしている。予め構造がわかっているBNから学習データを作成し、その構造が求められるかどうかを調べた数値実験結果を図3に示す。BNの複雑さ(ノード数が大きい)によらずに元の構造が高い割合で学習できており、その有効性が示された。[学会発表②,⑤]

本研究ではさらに、この学習法を複数のBNからなる混合BN(図4)の構造学習に適用し、

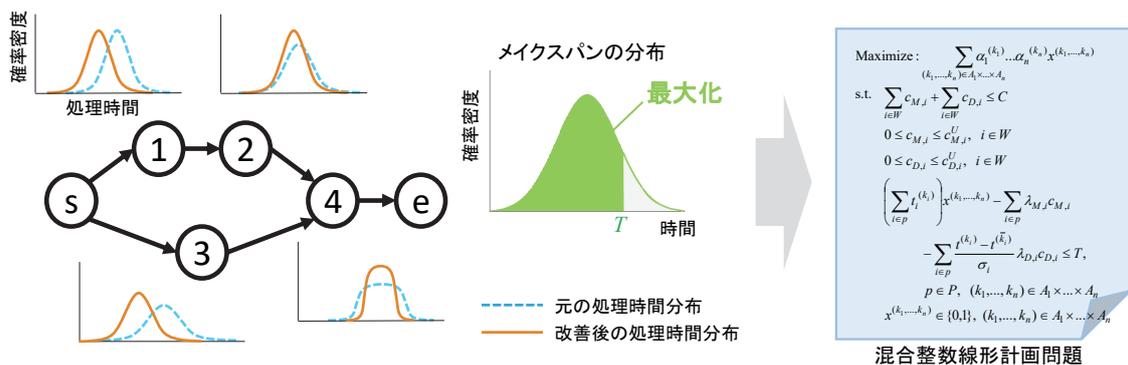


図1 処理時間に不確実性を有するCPMの混合整数線形計画問題としての定式化

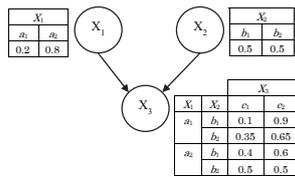


図2 BN

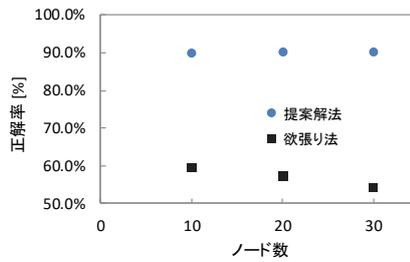


図3 数値実験結果

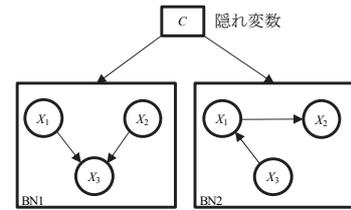


図4 混合BN

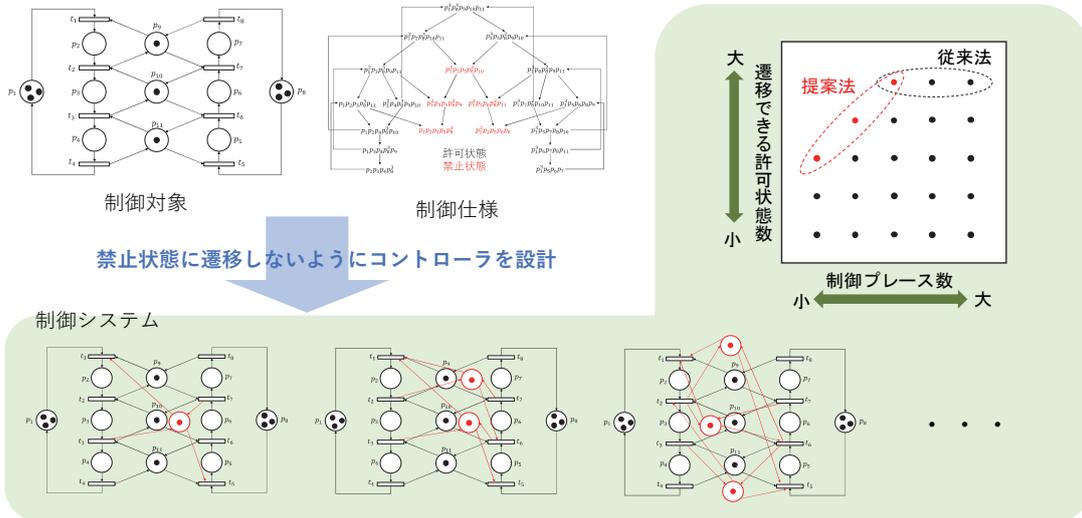


図5 対象とするペトリネット禁止状態問題

その有効性を示した。混合BNは、例えば環境の変化によって生産システム内の因果関係が変わるような操業をモデル化するのに有用である。[学会発表③]

(3) 異常回避コントローラ的设计

制御対象を表すペトリネットと、制御仕様として遷移を禁止する禁止状態（図5の状態遷移図の赤字）が与えられたとき、禁止状態への遷移を回避するコントローラは一般に複数個存在する。従来はその中から極大許容となるものを求めようとする研究がほとんどであったが、安全を見積もって禁止状態に近い状態への遷移もなるべく避ける要求もある。本研究では、遷移できる許可状態数を最大に、コントローラに含まれる制御プレース数が最小にする2目的問題を対象にその問題のパレート解（図5の赤の点線で囲まれた部分）を求める解法を提案した。提案解法の考え方は、Y. F. Chenら[引用文献⑦]が定式化した整数計画問題を2目的最適化問題に拡張し、 ϵ -制約法を用いて解こうするものである。[学会発表①]

<引用文献>

- ① 今岡侑太, 他, 不確実性を含む生産システムのプロセス完了時刻の改善, 計測自動制御学会 第58回離散事象システム研究会, 2015
- ② C. P. Chen and M. J. Tsai, Time-cost trade-off analysis of project networks in fuzzy environments, European Journal of Operational Research, Vol.212, pp.386-397, 2011
- ③ 蓮池隆, CPMを用いた不確実・不確定状況下におけるクリティカルパスの求解, 数理解析研究所講究録, 第1829巻, pp.72-79, 2013
- ④ 矢島智之, 他, 不確実性を含む動的システムのモデリングと意思決定支援, 化学工学論文集, Vol.41, No.6, pp.374-380, 2015
- ⑤ J. S. Shin, et al., A Dynamic Bayesian Network Model for the Production and Inventory Control, IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems, Vol.128, pp.1789-1796, 2008
- ⑥ A. Diddeban and H. Alla, Reduction of Constraints for Controller Synthesis based on Safe Petri Nets, Automatica, Vol.44, No.7, pp.1697-1706, 2008
- ⑦ Y. F. Chen and Z. W. Li, Optimal Supervisory Control of Automated Manufacturing Systems, CRC Press, 2013

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Yuya Takakura, Tomoyuki Yajima, Yoshiaki Kawajiri, Susumu Hashizume, Application of

Critical Path Method to Stochastic Processes with Historical Operation Data, Chemical Engineering Research and Design, 査読有 (掲載決定)

- ② 橋爪進, 離散事象システムにおける異常のモデリングと回避制御, 計測と制御, 査読有, Vol. 56, No. 7, pp. 498-502, 2017

[学会発表] (計 12 件)

- ① 佐久間優太, 橋爪進, 矢野智之, 川尻喜章, ペトリネットの禁止状態問題における最適な制御スペース構成に関する研究, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2018(SSI2018), 2018
- ② 河合駿兵, 矢野智之, 橋爪進, アントコロニー最適化法を用いたベイジアンネットワークの構造学習, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2018(SSI2018), 2018
- ③ 河合駿兵, 矢野智之, 川尻喜章, 高倉有矢, 橋爪進, アントコロニー最適化法に基づく混合ベイジアンネットワークの学習, 計測自動制御学会第 64 回離散事象システム研究会, 2018
- ④ 橋爪進, 今井諒太, 矢野智之, 処理時間に不確実性を有する繰返生産におけるプロセス完了時刻の改善, 計測自動制御学会第 63 回離散事象システム研究会, 2018
- ⑤ 河合駿平, 矢野智之, 橋爪進, アントコロニー最適化法を用いたベイジアンネットワークの構造学習, 計測自動制御学会第 63 回離散事象システム研究会, 2018
- ⑥ 高倉有矢, 橋爪進, 矢野智之, 処理時間のばらつき改善を考慮した CPM に関する研究, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2017(SSI2017), 2017
- ⑦ 高倉有矢, 橋爪進, 矢野智之, 処理時間に分布をもつ生産システムへの CPM の適用, 化学工学会第 49 回秋季大会, 2017
- ⑧ 高倉有矢, 橋爪進, 矢野智之, 処理時間が確率変動する生産システムへの CPM の適用, 計測自動制御学会第 62 回離散事象システム研究会, 2017
- ⑨ 佐久間優太, 橋爪進, 久門杏, 兼重明宏, 矢野智之, セーフペトリネットのコントローラ合成のための制約式の単純化, 計測自動制御学会第 61 回離散事象システム研究会, 2017
- ⑩ 今岡侑太, 橋爪進, 矢野智之, 小野木克明, 不確実性を有する生産システムのプロセス完了時刻改善問題とその解法, 化学工学会第 48 回秋季大会, 2016
- ⑪ 矢野智之, 橋爪進, 小野木克明, ベイズ推定を利用した不確実性を含む待ち行列ネットワークの制御, 計測自動制御学会第 60 回離散事象システム研究会, 2016
- ⑫ 今岡侑太, 橋爪進, 矢野智之, 小野木克明, 不確実性を有する生産システムのプロセス完了時刻改善問題の定式化とその解法, 計測自動制御学会第 60 回離散事象システム研究会, 2016

[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) 研究分担者

研究分担者氏名: 矢野 智之

ローマ字氏名: (YAJIMA, Tomoyuki)

所属研究機関名: 名古屋大学

部局名: 大学院工学研究科

職名: 助教

研究者番号 (8 桁): 80262864

(2) 研究協力者 なし

※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。