

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420815

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設計・運用支援環境の開発

研究課題名(英文) Development of Design, Operation and Control Support Environment for Discrete Manufacturing Systems with Uncertainty

研究代表者

橋爪 進 (Hashizume, Susumu)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・講師

研究者番号：60242913

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000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・処理工程が動的に変更されるという不確実性を有する離散型生産システムを対象に、システム構成から運用方策までを協調して最適化する手法の開発を目指した。そのために、処理の間の因果関係やシステム動作に含まれる不確実性を確率分布付きのネットワーク型モデルを共通に用いて表した。そして、これらのモデルをもとに、システムの構成手法、運用に係る意思決定支援の手法、ネック工程の改善手法を開発した。

研究成果の概要(英文)：This research project aims at developing a framework for optimizing the design, operation and control of discrete manufacturing systems with uncertainty in a coordinated manner. To achieve this objective, we represent the causality between tasks and the uncertainty in system behavior by network based models in common. Using the models, we develop methods for constructing system models, supporting decision-making in operation and improving bottleneck processes.

研究分野：プロセスシステム工学

キーワード：不確実性 離散事象システム ペトリネット ベイジアンネットワーク クリティカルパス 半言語
意思決定支援

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離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運用方策の立案手法、さらには最適なシステム構成の設計も同時に考慮した手法の開発が求められている。システム構成と運用方策を協調して最適化しようとするこれまでの研究のほとんどは確定的なシステムを対象としており、それらの結果を動的に処理時間・処理工程が変更されるといった不確実性を含む対象にそのまま適用することはできない。

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・処理工程が動的に変更されるという不確実性を有する離散型生産システムを対象に、生産性や品質などの目的関数を最大にするようなシステム構成とその上での運用方策を協調して最適化する手法を開発し、設計・運用に係る意思決定を支援するための設計・運用支援環境の開発を行うことを最終的な目的とした。この目的のためには、システムの構成、運用方策の獲得、システムのネック工程の導出とその改善案の作成、という最適化サイクルを考え、そのサイクルをまわすことが必要である。本研究では、このための要素技術を開発することを目指した。

3. 研究の方法

システムの構成、運用方策の獲得、システムのネック工程の導出とその改善案の作成、という最適化サイクルを間断なくまわすためには、システム構成変更に対応し、システムに含まれる不確実性を適切に表すことができるモデル表現手法と、実システムに関わる情報からそのモデルをシステムチックに構築するためのモデル構築手法が不可欠である。離散型生産システム内の原料、部品、製品、人の流れに着目すると、その動作は離散事象システムとしてとらえることができる。本研究では、離散型生産システムのシステム構成を離散事象システムの代表的なモデルであるペトリネットで表すこととし、システムの振る舞いに含まれる不確実性をペトリネットのトランジションの発火に確率分布を加えたモデルとベイジアンネットワークにより共通に表すこととし、次のことを行った。

(1) システム構成と運用方策の最適化サイクルに対応可能なモデル表現手法と構築方法を開発する。

(2) システムモデルをもとに将来の状態を推定し、最適な運用方策を求めるための手法を開発する。

(3) ネック工程を導出・評価し、それを改善するための手法を開発する。

(4) システム設計・運用に係る意思決定を支援するための設計・運用支援環境を開発する。

4. 研究成果

(1) 離散型生産システムのモデル化と制御

離散型生産システムのシステム構成を合理的に進めるためには、システムのモデルとなるペトリネットのシステムチックな構成手法の確立が必須である。本研究では、これに対して、次のことを行った。

① ペトリネットのコントローラ構成

制御仕様として所期の動作が半語（事象発生半順序集合）の集まりである半言語で与えられたとき、制御対象を表すペトリネットに対してそのトランジションの発火を適宜抑制するようなコントローラを追加することにより、制御仕様を満たす制御系を構成する問題を定式化した。そして、この問題が解をもつための条件を明らかにするとともに、1つの解法を示した。離散事象システムのモデルとしてオートマトンを用いたコントローラ（スーパーバイザ）構成については数多くの研究があるものの、それに比べるとペトリネットを用いた制御系設計の理論体系化は進んでいない。しかしながら、離散事象システムの特徴である並行性についてはオートマトンよりはペトリネットの方が自然に表現できることから、本研究の成果の有用性は高いと考えられる。まだ、コントローラ構成問題のいくつかのクラスでは未解決な問題が残されており、それらの解決を図ることにより、離散事象システムの理論体系化が進むものと期待される。

② 異常のモデル化とその回避

生産システムを安全に運転するためには、そこで発生する異常に適切に対応することが必要であるが、あらかじめすべての異常を把握しておくことはシステムが大規模・複雑化すると困難になってくる。そこで、本研究では、操業中に検出された未知の異常をシステムチックにペトリネットモデルに組み込む1つの方法を提案した。また、検出した異常を回避する制御手法についても検討した。制御手法については、その一部に上記①でのコントローラ構成方法も利用できる。本研究の画期的な点は、システムの正常動作のモデル化、異常のモデル化、異常検知・診断、異常回避がすべて同じペトリネットモデル上で進められることである。従来は、制御設計や異常診断のそれぞれに特化したモデルを利用することが多いが、それらを共通の土俵で扱うことにより、モデル化から異常診断、

制御までを間断なく進めることができるようになるものと考えられる。

(2) システムの状態推定と意思決定支援

近年、生産システムでの品質管理、在庫管理など様々な問題において、ベイジアンネットワーク (BN) を用いた確率モデルを活用した方法が提案され、成果が上がっている。本研究では、不確実性を含む動的生産システムに対し、その挙動を BN の拡張であるダイナミックベイジアンネットワーク (DBN) でモデル化し、その上での確率推論を応用した意思決定支援の手法を提案した。DBN は、図 1 に示すように、各時刻の静的な BN を作成し、それらを隣り合う時刻の BN の間で共通するノード (赤丸で示すような前時刻の終了状態と次時刻の開始状態) を重ねることにより、システムの動的挙動を表したものである。本研究では、システムの変数 (青丸) を目標状態にできるだけ一致するように操作変数 (緑丸) の値を決定する問題について検討し、次の 2 つの方策を考案した。

方策 1 : DBN を用いて将来の状態を推定し、各操作変数に対して目標状態に達成し得る可能性の最も高い値を求める。

方策 2 : DBN を用いて将来の状態を推定し、操作変数の値の組合せの中から、目標状態に達成し得る可能性の最も高い組を求める。

方策 1 と方策 2 は、複数の操作変数が相互に影響し合わなければ同じ結果となる。

本研究では、この手法の有効性を検討するために、いくつかの処理装置がネットワーク状につながっている生産システムに対して、処理装置前のバッファに置かれる材料数を指定された閾値以下に保つように、処理装置の処理速度やバッチサイズを操作する問題例に提案手法を適用した。また、比較するために、直接影響する目標変数のみに着目して操作変数を決定するというヒューリスティックに基づく手法 (局所探索法) も適用した。

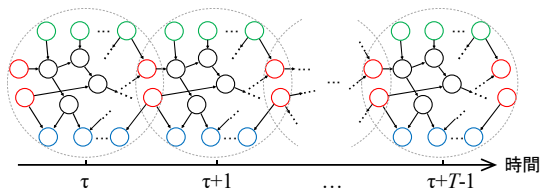


図 1 DBN

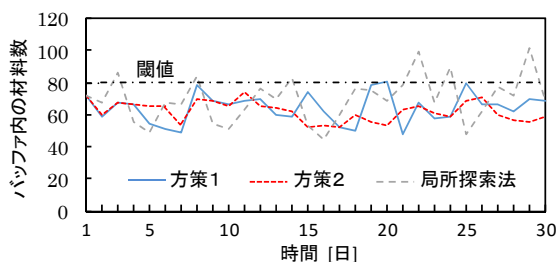


図 2 適用結果

適用結果の一例を図 2 に示す。図 2 は、バッファ内の材料数の日ごとの変化を示したものであり、局所的な情報のみから意思決定を行う局所探索法では閾値を超えてしまうこともあるが、提案手法では超過することなく複数の不確実な要素のバランスをとりながら最適な意思決定を行うことができた。また、方策 1 と方策 2 の比較であるが、短期予測の場合には方策 1 より方策 2 の方が効果的であるが、一方で変数が増えた場合には方策 2 の方が計算コストが急増する。したがって、複数の操作変数が相互に影響し合わない場合には方策 1 を用いるなど、システムの特성에応じて使い分ける必要がある。

本研究では対象システムの因果関係は既知として与えられたが、現実問題としては因果関係が必ずしも明確でない場合も多い。そうした状況に対しては、実績データからネットワーク構造を学習する方法が提案されており、今後はこうしたモデル構築の手法を動的生産システムのモデル化に適用し、提案手法との融合を図ることが課題である。

(3) ネック工程の導出とその改善

離散型生産システムの改善を図るためには、操業データからシステムチックにネックとなる工程を見つけるとともに、その部分を速やかに改善することが必要となる。プロジェクトマネジメントでは PERT/CPM と呼ばれる手法があり、プロジェクトを進める上でネックとなる一連のタスク (クリティカルパス上のタスク) を導出し、それらのタスクを費用対効果が高くなるように改善することができる。しかしながら、タスクの処理時間には確定的な値が用いられており、処理順序も静的なネットワークが与えられるため、本研究が対象とする不確実性を含む動的な生産システムには適用できない。本研究では、これに対して、次のことを行った。

① 処理完了時刻の推定

離散型生産システムのタスクの間の因果関係がペトリネットによりモデル化したとき、そのシステムに現れる処理順序は半言語で表される。そこで、各タスクの処理時間に関する確率分布が与えられたとき、半言語を用いて各タスクの処理完了時刻の分布、ならびにすべての処理が完了するプロセス完了時刻の分布を推定する 2 つの方法を提案した。それらをいくつかの計算例を通してまとめた結果を表 1 に示す。

表 1 処理完了時刻推定手法の比較

推定法	推定精度	計算時間
厳密逐次法	◎	×
木展開逐次法	△	○
最支配パス法	△	◎
連接分解法	○	○
支配 2 パス法	○	○

ここで、厳密逐次法、木展開逐次法、最支配パス法は既存の手法であり、比較のために用

いた。各手法の概略は以下のようである。

厳密逐次法：

半語のソースから順に確率密度関数の畳み込み積分をして求める。並行なタスクがある場合には、互いの各時刻のもとでの条件付き確率を求めておき、周辺化する。

木展開逐次法：

厳密逐次法と同じであるが、並行タスクの部分は互いに独立と仮定して計算する。

最支配パス法：

半語のソースからの処理時間の期待値が最大となるパス上のタスクのみに着目して厳密逐次法を用いる。

接続分解法：

半語をいくつかの部分半語の接続の形で表し、各部分半語に対して木展開逐次法を用いて処理時間を計算しておき、それを1つのタスクとしてみなして厳密逐次法を用いる。

支配2パス法：

半語のソースからの処理時間の期待値が最大および2番目に大きいパス上のタスクのみに着目して接続分解法を用いる。

表1で示したように、提案手法（接続分解法、支配2パス法）は、少ない計算時間でよい精度で推定できる。

② クリティカルパスの推定

次に本研究では、上記の手法を用いて、1つの半語において各タスクがクリティカルパス（CP）に含まれる確率を推定するための次の2つの方法を提案した。

CP推定法（厳密逐次法、木展開逐次法、接続分解法）：

半語のソースからシンクまでの各パスに対して、そのパスがCPであるとしたときの各タスクの処理完了時刻の同時確率密度関数を上記の厳密逐次法、木展開逐次法、もしくは接続分解法を用いて求め（以下では、用いた処理完了時刻推定法をそのままCP推定法の名称とする）、それらをもとに各タスクのCPに含まれる確率を求める。

パス計算法：

半語のソースからシンクまでの各パスに対して、そのパス上のタスクのみに着目して厳密逐次法によりその完了時刻の確率密度関数を求め、それらをもとに各タスクのCPに含まれる確率を求める。

これらの手法をいくつかの計算例を通してまとめた結果を図3と表2に示す。図3は、

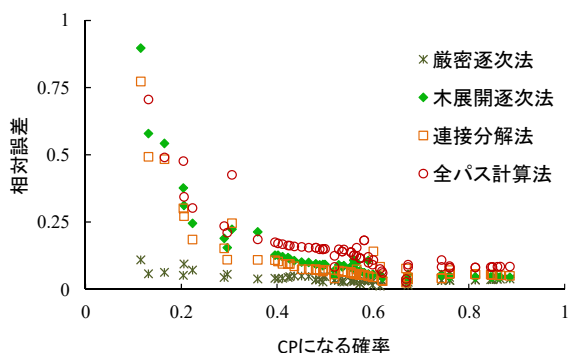


図3 CPになる確率の精度への影響

半語のソースからシンクまでの各パスがCPになる確率の精度への影響を示したものであり、いずれの手法もCPになる確率が高ければ精度よく推定できることがわかる。

表2 CP推定手法の比較

推定法	推定精度	計算時間
厳密逐次法	◎	×
木展開逐次法	○	○
接続分解法	○	○
全パス計算法	○	○

③ プロセス完了時刻の改善

本研究では、次のような問題を検討の対象とした：各タスクに対して、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タスク（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、プロセス完了時刻の期待値とばらつきがなるべく小さくなるようにせよ。この問題はプロセス完了時刻の期待値とばらつきをともに小さくする2目的最適化問題である。したがって、この問題の解法はパレート解（その解より期待値とばらつきがともに小さくなるような解が存在しない）を求めるものとなる。それらの解は、原理的には、改善候補のすべての組合せを列挙し、その中からパレート性をもつものを取り出すことにより得られるが、半語の規模が大きくなったり、改善候補数が増えれば計算コストがかかる。そこで、本研究では、前項のCP推定法を利用して、次のような近似解法を考案した。

提案手法：

半語のソースからシンクまでのパスの中で最もCPになる確率の大きいパスを求め、そのパス上のタスクを改善候補に入れ替えたものを解候補として作成することを繰り返す。ただし、解候補の集合が大きくなると計算コストがかかるため、適当なタイミングで解候補の集合の中からパレート性をもたないものを除く。

提案手法をある例（改善候補組合せ数が240程度）に適用した結果を図4に示す。列挙法に比べて1/4程度の計算時間でパレート

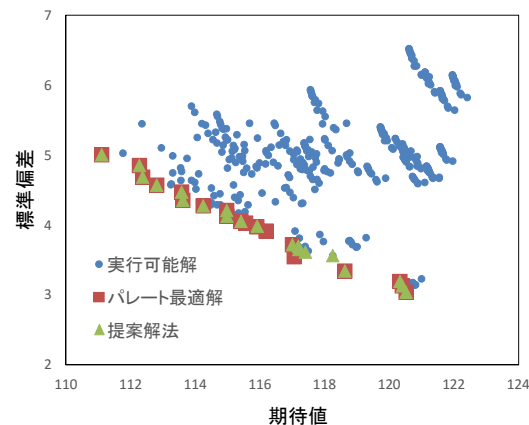


図4 提案手法による近似パレート解

最適解あるいはそれに近い解が得られた。

提案手法では複数の並行的なパス間をまたいだ改善候補の組で改善されるような解を見つけることができない。本研究では、その点も考慮して改良した手法も提案した。

上記の②, ③では1つの半語のみを対象にしたが、これでは処理順序が動的に変更されるといふ不確実性に対応することができない。本研究の手法を複数の半語に対して拡張することが今後の課題である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計1件)

- ① 矢嶌 智之, 添田 幸宏, 橋爪 悟, 橋爪 進, 小野木克明, 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, 査読有, Vol.41, No. 6, 2015, pp.374-380, DOI: 10.1252/kakoronbunshu.41.374

[学会発表] (計15件)

- ① Satoru Hashizume, Susumu Hashizume, Tomoyuki Yajima, Katsuaki Onogi, Condition/Event Net Synthesis for Discrete Event Control Using Partial Language Specifications, SICE Annual Conference 2013, Sep. 15, 2013, Higashiyama Campus of Nagoya University (Aichi-ken・Nagoya-shi)
- ② 山川達也, 橋爪悟, 橋爪進, 矢嶌智之, 小野木克明, ペトリネットモデルを利用した異常診断システムの構築, 化学工学学会第45回秋季大会, 2013年9月17日, 岡山大学 津島キャンパス (岡山県・岡山市)
- ③ 後藤雄貴, 橋爪進, 橋爪悟, 矢嶌智之, 小野木克明, 処理時間が確率変動する生産システムの処理完了時刻の推定, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会2013 (SSI2013), 2013年11月18日, ピアザ淡海 (滋賀県・大津市)
- ④ 後藤雄貴, 勝野智博, 橋爪進, 矢嶌智之, 小野木克明, 処理時間が確率変動する生産システムの処理完了時刻とクリティカルパスの推定, 電子情報通信学会システム数理と応用研究会, 2014年3月7日, 愛媛大学 (愛媛県・松山市)
- ⑤ 山川達也, 橋爪悟, 橋爪進, 矢嶌智之, 小野木克明, ペトリネットによる化学プロセスの異常動作のモデル化, 化学工学学会第79年会, 2014年3月19日, 岐阜大学 (岐阜県・岐阜市)
- ⑥ 山川達也, 今泉ゆうか, 橋爪悟, 橋爪進, 矢嶌智之, 小野木克明, ペトリネットによる離散事象システムの異常動作のモデル化, 計測自動制御学会第55回離散事象システム研究会, 2014年6月6日, 高千穂町コミュニティセンター (宮崎県・高千穂町)
- ⑦ 今泉ゆうか, 山川達也, 橋爪悟, 橋爪進, 矢嶌智之, 小野木克明, 離散事象システ

ムにおける異常動作のモデル化と制御, 化学工学学会第46回秋季大会, 2014年9月17日, 九州大学 伊都キャンパス (福岡県・福岡市)

- ⑧ 橋爪進, 後藤雄貴, 矢嶌智之, 小野木克明, 並行処理経路間の干渉を考慮した処理完了時刻とクリティカルパスの推定, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会2014 (SSI2014), 2014年11月23日, 岡山大学 津島キャンパス (岡山県・岡山市)
- ⑨ 守月哲朗, 橋爪進, 矢嶌智之, 小野木克明, 異なる評価基準をもつ2工程間のエントロピーに基づくマッチング, 計測自動制御学会第57回離散事象システム研究会, 2015年3月5日, ITビジネスプラザ武蔵 (石川県・金沢市)
- ⑩ 棚橋祐弥, 矢嶌智之, 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離散型生産システムの制御, 化学工学学会第80年会, 2015年3月20日, 芝浦工業大学 豊洲キャンパス (東京都・江東区)
- ⑪ 今泉ゆうか, 橋爪悟, 橋爪進, 矢嶌智之, 小野木克明, 不可制御事象/不可観測状態をもつ化学プロセスの異常動作の検出と回避, 化学工学学会第47回秋季大会, 2015年9月10日, 北海道大学 札幌キャンパス (北海道・札幌市)
- ⑫ 守月哲朗, 橋爪進, 矢嶌智之, 小野木克明, 多品種少量生産の工程間のエントロピーに基づくマッチング, 化学工学学会第47回秋季大会, 2015年9月10日, 北海道大学 札幌キャンパス (北海道・札幌市)
- ⑬ 今岡侑太, 橋爪進, 矢嶌智之, 小野木克明, 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年9月25日, 名城大学 名駅サテライト (愛知県・名古屋市)
- ⑭ 棚橋祐弥, 矢嶌智之, 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システムの制御, 化学工学学会第80年会, 2015年11月23日, 函館アリーナ (北海道・函館市)
- ⑮ 今岡侑太, 橋爪進, 矢嶌智之, 小野木克明, 処理時間が確率変動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, 化学工学学会第81年会, 2016年3月14日, 関西大学 千里山キャンパス (大阪府・大阪市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

橋爪 進 (HASHIZUME, Susumu)
名古屋大学・大学院工学研究科・講師
研究者番号: 60242913

(2) 研究分担者

矢嶌 智之 (YAJIMA, Tomoyuki)
名古屋大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 80262864