



生産システムシミュレーションにおけるデータ駆動型マルチスケールモデリングに関する研究

永原, 聡士

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2024-09-25

(Date of Publication)

2026-09-25

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第9029号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100492538>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



(別紙様式 3)

論文内容の要旨

氏 名 _____ 永原 聡士 _____

専 攻 _____ システム情報学研究科 システム科学専攻 _____

論文題目 (外国語の場合は, その和訳を併記すること。)

生産システムシミュレーションにおける

データ駆動型マルチスケールモデリングに関する研究

指導教員 _____ 貝原 俊也 教授 _____

(注) 2, 000 字～4, 000 字でまとめること。

近年、市場ニーズの多様化に伴い、多品種少量生産やマスカスタマイゼーションが求められ、生産システムはより複雑化している。複雑な生産システムを効率的に運用するためのコンセプトとして、**Cyber-Physical Production System** や **Digital Twin** が注目されているが、本コンセプトを実現するためには、サイバー空間上で将来の生産を予測する生産システムシミュレーションが重要な役割を担う。一方、シミュレーションモデルを構築するには多大な労力と専門知識を要しているのが現状であり、高精度なシミュレーションモデルの自動モデリング技術が求められている。これに対し、近年、**IoT (Internet of Things)** デバイスの進歩により、生産システムからより多くのデータを取得することが可能になっている。加えて、機械学習技術は近年飛躍的な進歩を見せており、旧来の演繹的なモデリングではなく、データからシステムの挙動を同定する帰納的なモデリングの有用性も増している。機械学習を用いたモデリングでは、生産プロセス単体やシステム全体などの異なるスケールのモデルを構築することが可能である一方、得られるモデルの精度は利用可能なデータなどに依存する。また、現状のモデリングプロセスにおいては、所望の精度を得るために試行錯誤的なモデル構造の見直しを必要としている一方、自動モデリングに関する既存研究にはモデル構造を最適化するものは見当たらない。

以上の背景から、本研究では、演繹的・帰納的を含めた様々なモデリング手法を組み合わせることで、精度の高いシミュレーションモデル構造を半自動で構築する手法としてデータ駆動型マルチスケールモデリングアプローチを提案する。本論文では、本アプローチの実現に向けて、様々なモデルの具体的な構築方法と、対象システムの特徴に対する各モデルの特性解析を示すことを目的とする。なお、本論文では、加工組立などの離散系の生産システムを対象とし、特に生産システムシミュレーションの重要性の高い多品種混流の生産システムを対象とする。

本論文では、まず第 1 章で研究背景を述べた上で、第 2 章で生産システムシミュレーションの概要とモデリングプロセスにおける課題を述べ、関連研究と本研究の位置付けを述べる。そして、第 3 章において、モデリング方法の分類と、提案手法でデータ駆動型マルチスケールモデリングの全体像を示す。本研究では、様々なモデリング方法を、アクティビティ/プロセス/システムというモデルのスケールの観点と、**White/Gray/Black-Box** というモデルのタイプの観点で分類する。ここでプロセスとは 1 つの生産工程を指しており、一般的な生産システムシミュレーションでは、対象工程を処理待ちジョブ群のキューとそれを処理するアクティビティからなるキューモデルで表現する。またアクティビティとは、キューモデルの構成要素であり、例えば、着工順序決定、生産リソース割当決定、加工・組立による生産リソース占有などである。提案手法は、シミュレーションの利用目的や対象システムに対する背景知識・取得可能データに基づいて、多様なスケールやタイプのモデルを組合せることで、システム全体のモデル構造を最適化することを狙ったものである。

次に第 4 章では、アクティビティスケールモデルの構築方法として、従来人手による現場調査に頼っていた着工順序ルールモデリングを、生産実績データと機械学習により自動化する方法を提案する。着工順序ルールモデリング問題が、情報検索分野におけるランキング学習問題の一形態であることに着目し、Artificial Neural Network を用いたランキング学習手法である RankNet, ListNet などを用いる。また、多品種混流システムでは、品種切替による段取替えを考慮した着工順序決定がなされる場合が多いことに着目し、RankNet や ListNet の入力に品種属性情報を特徴量として導入する方法を提案し、実際の機械加工システムのデータによりその有用性を確認した。また、実際の着工順序決定がルールから逸脱する様な不確実性があるケースを想定し、Voting Filter により不確実性の影響を低減する方式を提案し、仮想的システムを対象とした実験を通してその有用性を確認した。

第 5 章では、プロセススケールモデルとして、第 3 章で示したモデル分類のうち、プロセス Gray-Box Model(GBM)とプロセス Black-Box Model(BBM)を扱う。本章では、各ジョブの工程リードタイムを予測することをシミュレーションの要件とおいている。工程をキューモデルで表現したプロセス GBM に対しては、連続最適化手法である Particle Swarm Optimization(PSO)により、リードタイムの予測誤差が最小となるように、キューモデル内のアクティビティのパラメータを同定する方法を提案する。また、プロセス BBM に対しては、Artificial Neural Network(ANN)によりリードタイムを直接予測する方法において、多品種混流におけるリードタイム予測に対応するために、品種の異なるジョブの投入条件を ANN の入力として特徴量表現する方法を提案する。そして、仮想的な単工程システムを対象とした計算機実験を通して、プロセス GBM, プロセス BBM の精度比較を示す。実験の結果、対象とする実システムのアクティビティ構成が既知である場合は、それをモデルに反映可能なプロセス GBM が優位な傾向にあることを確認した。ただし、複数並列設備や品種切替による段取替えなどの複雑さを有する GBM においては、PSO によるパラメータ同定が難化し、実システムとモデルでアクティビティ構成が一致していても、その精度が BBM に劣る場合があることを確認し、対象システムのアクティビティ構成に関する背景知識や複雑さによって最適なモデルが異なることを示した。

第 6 章では、システムスケールモデルとして、第 3 章で示したモデル分類のうち、複数工程システムを対象としたシステム GBM とシステム BBM を扱う。本章では、前章で述べたプロセススケールのモデリング手法を複数工程システムに拡張する方法を示すとともに、対象システムから取得可能なデータに応じて取り得るモデル構造を整理する。また、仮想的なフローショップシステムを対象としたモデル構造の比較実験結果を示す。実験結果を通して、対象システムに対する背景知識や利用可能な生産実績データによって、精度が最も高いモデル構造が変化することを示した。また、生産実績データが取得可能な粒度でモ

(氏名： 永原聡士 NO.3)

デルを分割して個別に同定することが、必ずしもシステムレベルでの高精度化に繋がるとは限らないことを示した。

最後に第7章では、実験結果から得られたモデル特性に関する知見をまとめ、今後の課題について記述している。

本研究では、対象システムに関する背景知識、利用可能な生産実績データ、システム・モデルの複雑さによって、モデリング方法やモデル構造の優劣が変化することを示し、多様なモデル構造を生成して選定するデータ駆動型マルチスケールモデリングアプローチの有用性を示した。今後の課題としては、ジョブショップシステムなどのより複雑なシステムや現実のシステムを対象とした提案手法の汎化への検証や、加工時間のばらつきなどの不確実性を有するシステムに対するモデル構築方法の評価や改良が挙げられる。また、提案アプローチを実現するためには、モデル特性を踏まえたモデル構造の自動生成・選定方法が必要である。本方法を用いることで、対象システムの変化に追従したモデル構造の自動生成・最適化が実現されれば、高精度な CPPS, Digital Twin の実現に繋がることが期待される。

氏名	永原 聡士		
論文 題目	生産システムシミュレーションにおけるデータ駆動型マルチスケールモデリングに関する研究		
審査委員	区 分	職 名	氏 名
	主 査	教 授	貝原 俊也
	副 査	教 授	鳩野 逸生
	副 査	教 授	田中 成典
	副 査	教 授	藤井 信忠
	副 査		
要 旨			
近年、市場ニーズの多様化に伴い、多品種少量生産やマスカスタマイゼーションが求められ、生産システムはより複雑化している。複雑な生産システムを効率的に運用するためのコンセプトとして、Cyber-Physical Production System (CPPS)や Digital Twin が注目されているが、本コンセプトを実現するためには、サイバー空間上で将来の生産を予測する生産システムシミュレーションが重要な役割を担う。一方、シミュレーションモデルを構築するには多大な労力と専門知識を要しているのが現状であり、高精度なシミュレーションモデルの自動モデリング技術が求められている。これに対し、近年、IoT (Internet of Things) デバイスの進歩により、生産システムからより多くのデータを取得することが可能になっている。加えて、機械学習技術は近年飛躍的な進歩を見せており、旧来の演繹的なモデリングではなく、データからシステムの挙動を同定する帰納的なモデリングの有用性も増している。機械学習を用いたモデリングでは、生産プロセス単体やシステム全体などの異なるスケールのモデルを構築することが可能である一方、得られるモデルの精度は利用可能なデータなどに依存する。また、現状のモデリングプロセスにおいては、所望の精度を得るために試行錯誤的なモデル構造の見直しを必要としている一方、自動モデリングに関する既存研究にはモデル構造を最適化するものは見当たらない。以上の背景から、本論文では、演繹的・帰納的を含めた様々なモデリング手法を組み合わせることで、精度の高いシミュレーションモデル構造を半自動で構築する手法としてデータ駆動型マルチスケールモデリングアプローチを提案している。そして、本アプローチの実現に向けて、様々なモデルの具体的な構築方法と、対象システムの特徴に対する各モデルの特性解析を示すことを目的とする。なお、本論文では、加工組立などの離散系の生産システムを対象とし、特に生産システムシミュレーションの重要性の高い多品種混流の生産システムを対象とする。 本論文では、まず第1章で研究背景を述べた上で、第2章で生産システムシミュレーションの概要とモデリングプロセスにおける課題を述べ、関連研究と本研究の位置付けを述べている。そして、第3章において、モデリング方法の分類と、提案手法でデータ駆動型マルチスケールモデリングの全体像を示している。本論文では、様々なモデリング方法を、アクティビティ/プロセス/システムというモデルのスケールの観点と、White/Gray/Black-Box というモデルのタイプの観点で分類している。ここでプロセスとは1つの生産工程を指しており、一般的な生産システムシミュレーションでは、対象工程を処理待ちジョブ群のキューとそれを処理するアクティビティからなるキューモデルで表現する。またアクティビティとは、キューモデルの構成要素であり、例えば、着工順序決定、生産リソース割当決定、加工・組立による生産リソース占有などである。提案手法は、シミュレーションの利用目的や対象システムに対する背景知識・取得可能データに基づいて、多様なスケールやタイプのモデルを組合せることで、システム全体のモデル構造を最適化することを狙ったものである。 次に第4章では、アクティビティスケールモデルの構築方法として、従来人手による現場調査に頼っていた着工順序ルールモデリングを、生産実績データと機械学習により自動化する方法を提案している。着工順序ルールモデリング問題が、情報検索分野におけるランキング学習問題の一形態であることに着目し、Artificial Neural Network を用いたランキング学習手法である RankNet, ListNet を用いている。また、多品種混流システムでは、品種切替による段取替えを考慮した着工順序決定がなされる場合が多いことに着目し、RankNet や ListNet の入力に品種属性情報を特徴量として導入する方法を提案し、実際の機械加工システムのデータによりその有用性を確認している。また、実際の着工順序決定がルールから逸脱する様な不確実性があるケースを想定し、Voting Filter により不確実性の影響を低減する方式を			

氏名	永原 聡士
----	-------

提案し、仮想的システムを対象とした実験を通してその有用性を確認している。

第5章では、プロセススケールモデルとして、第3章で示したモデル分類のうち、プロセス Gray-Box Model(GBM)とプロセス Black-Box Model(BBM)を扱っている。本章では、各ジョブの工程リードタイムを予測することをシミュレーションの要件とされている。工程をキューモデルで表現したプロセス GBM に対しては、連続最適化手法である Particle Swarm Optimization(PSO)により、リードタイムの予測誤差が最小となるように、キューモデル内のアクティビティのパラメータを同定する方法を提案している。また、プロセス BBM に対しては、Artificial Neural Network(ANN)によりリードタイムを直接予測する方法において、多品種混流におけるリードタイム予測に対応するために、品種の異なるジョブの投入条件を ANN の入力として特徴量表現する方法を提案している。そして、仮想的な単工程システムを対象とした計算機実験を通して、プロセス GBM、プロセス BBM の精度比較を示す。実験の結果、対象とする実システムのアクティビティ構成が既知である場合は、それをモデルに反映可能なプロセス GBM が優位な傾向にあることを確認している。ただし、複数並列設備や品種切替による段取替えなどの複雑さを有する GBM においては、PSO によるパラメータ同定が難化し、実システムとモデルでアクティビティ構成が一致していても、その精度が BBM に劣る場合があることを確認し、対象システムのアクティビティ構成に関する背景知識や複雑さによって最適なモデルが異なることを示している。

第6章では、システムスケールモデルとして、第3章で示したモデル分類のうち、複数工程システムを対象としたシステム GBM とシステム BBM を扱っている。本章では、前章で述べたプロセススケールのモデリング手法を複数工程システムに拡張する方法を示すとともに、対象システムから取得可能なデータに応じて取り得るモデル構造を整理している。また、仮想的なフローショップシステムを対象としたモデル構造の比較実験結果を示している。実験結果を通して、対象システムに対する背景知識や利用可能な生産実績データによって、精度が最も高いモデル構造が変化することを示している。また、生産実績データが取得可能な粒度でモデルを分割して個別に同定することが、必ずしもシステムレベルでの高精度化に繋がるとは限らないことを明らかにしている。

最後に第7章では、実験結果から得られたモデル特性に関する知見をまとめ、今後の課題について記述している。

以上のように本研究は、多様なモデル構造を生成して選定するデータ駆動型マルチスケールモデリングアプローチについて研究したものであり、今後のものづくりにおける高精度な CPPS, Digital Twin の実現に大きく貢献する内容である。よって、提出された論文はシステム情報学研究科学位論文評価基準を満たしており、学位申請者の永原聡士は、博士(工学)の学位を得る資格があると認める。