

令和 6 年 2 月 22 日現在

機関番号：24405

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18K03872

研究課題名（和文）スマート工場の適正運用に向けた自律分散型生産スケジューリングシステムの開発

研究課題名（英文）Development of Autonomous Distributed Production Scheduling System for Smart Factory

研究代表者

森永 英二（Morinaga, Eiji）

大阪公立大学・大学院情報学研究科 ・准教授

研究者番号：80432508

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、設備単位で高度に分散化された生産システムを対象として、設備間での情報交換と設備単位での局所的な意思決定を特徴とする、優先規則に基づく自律分散型生産スケジューリングの方法論を構築した。(1)優先規則の組合せの最適化手法の開発、(2)所与の優先規則に対する高性能なスケジューリングの生成法の開発、(3)リスケジューリング実施判断の意思決定支援法の開発を行った。高度に分散化された生産システムに対する自律分散型適正運用メタシステムの方法論を構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

分散型生産スケジューリングの既存手法は、スケジューリングの生成操作における意思決定や情報統括を担うモジュールを必要としている点で、いわば分権的手法に留まっている。これに対して、本研究で構築した方法論は、そのようなモジュールを要せずに、適正なスケジューリングを構築することができるという点で、真に分散的手法を与えており、学術的意義がある。

また、産業界において、IoT/AIを活用したスマート工場の構築に高い関心が寄せられている中で、現実的な方策である優先規則に基づくスケジューリング手法に基づいた、スマート工場の適正運用の方法論を提供する点で、社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：For highly-distributed manufacturing systems (HDMSs) in which each machine is computerized and can communicate with other machines, a methodology of decentralized production scheduling based on simulation approach with emphasis on message exchanges among machines and localized decision-makings on each machine was given by developing the following methods: (1) a method for optimizing a blend of priority rules, (2) a method for generating better schedules with a given priority rules, (3) a method for supporting decision-making in rescheduling. By these accomplishments, a methodology of a decentralized meta-system for proper operation of HDMSs was provided.

研究分野：生産システム

キーワード：生産スケジューリング 自律分散型システム フレキシブルジョブショップ シミュレーション最適化
リアクティブスケジューリング フレキシブル生産 Internet of Things サイバーフィジカルシステム

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

工場の効率的運用に関して、生産システム全体をモデル化した上で、運用案の生成・修正と評価を繰り返して最適な運用計画を立てる集中管理型の枠組みが古くから構築されてきた。しかし、多品種少量生産では、頻繁に生じる生産条件の変動に応じて即座に運用計画を立て直すことが求められ、モデルの再構築等に負荷が生じる集中管理型の方策では対応が難しい。このため、生産エリア単位で個別にモデル化し、それらの情報を統括して意思決定を行うモジュールとモデル群との情報通信によって、即座に計画を立て直す自律分散型のアプローチが、この数十年間に論じられてきた。

近年、様々な機器を相互に接続させて産業価値を創出する取組みが、IoT や M2M といった呼称の下で、世界的に推進されている。同様に、生産分野においても、様々な部署の様々な機器・設備を接続して設計・開発・生産に関するデータを蓄積・分析・活用し、自律的で知的な「スマート工場」の構築を目指す活動が各国で行われている。自律分散型システムの観点からこの動向を捉えると、生産エリア単位ではなく、設備単位で高度に分散化された「超分散型生産システム」が具現化されつつあると言える。このような生産システムに従来の分散型の手法を適用すると、設備単位でモデル化が行われることになる。その結果、モデルの数が膨大になり、情報統括・意思決定モジュールに大きな負荷がかかるおそれがある。

この動向と問題意識を踏まえて、研究代表者は、「超分散型生産システム」に合わせた自律分散型の枠組みで、優先規則に基づく生産スケジューリングを行う、一連の手法を開発してきた。これらの手法では、各設備の性能や特徴に関する情報を、所与の優先規則に応じた所定の通信規約に基づいて知的に送受信し合うことで、情報統括や意思決定を担うモジュールがなくても、インテリジェント・ネットワークを介して、各設備への作業の割当ての優先度を自律的に調整して、スケジュールを生成することができる。このため、上述した問題の解決策になり得るものと期待できる。しかし、生成されるスケジュールの良否は、外部から与えられる優先規則に依存する。良好なスケジュールを得るための適正な優先規則を決める意思決定の枠組みを構築する必要がある。

2. 研究の目的

生産スケジューリングの現場では、指定された優先規則に従って材料を各設備に割り当てていく、現実的な手法が広く実用されている。研究代表者は、フレキシブルジョブショップ型の生産（品種によって機械とその使用順序が異なり、かつ、各工程を担える機械が複数存在する、多品種少量生産向けの生産形態）を対象として、複数の優先規則でそれぞれ算出される優先度の重み付け加算によって得られる総優先度の値に基づいて、各工程を処理する機械の選定と各機械が次に処理する工程の選択とを順次行うことで、その重みに対応するスケジュールを意思決定・情報統括モジュールを用いずに生成する手法を、これまでの研究によって確立した。

本研究では、種々の優先規則を適切に組み合わせることで適正なスケジュールを得るための、組合せの「塩梅」の調整を、インテリジェント・ネットワークも巧みに活用して行い、スケジュールの適正化を図る、自律分散型の手法を開発する。また、前述した手法は、生産条件の変動に応じてスケジューリングを実行するかどうかの判断を計画者が下した後の段階を対象としているが、その判断を的確に実施するための支援の枠組みも与える。これらによって、「超分散型生産システム」の適正運用のための、計画者をも含めた、自律分散型メタシステムの方法論を構築することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 優先規則の組合せの「塩梅」の調整手法の開発

上述のフレキシブルジョブショップスケジューリング法における、各工程を処理する機械の選定と各機械が次に処理する工程の選択では、複数の優先規則でそれぞれ算出される優先度の重み付け加算によって得られる総優先度を、機械と工程のそれぞれで計算し、その値の最大のものが選ばれる。この重みの最適値を、最適化アルゴリズムを適用して求める手法を構築する。

(2) 所与の優先規則に対する高性能なスケジュールの生成法の開発

最適化の指標として、スケジュールのメイクスパンを採用する場合、フレキシブルジョブショップスケジューリング問題のークラスである、ジョブショップスケジューリング問題においては、遅れなしスケジュールの集合ではなく、それを包含する、アクティブスケジュールの集合の中に、最適スケジュールが存在することが知られている。遅れなしスケジュールを生成する、上記フレキシブルジョブショップスケジューリング法に、機械の遊休状態を敢えて許容する機構を組み込み、アクティブスケジュールの集合を対象とした最適化を実施できるようにすることで、指定された優先規則に対して、より良好なスケジュールが生成されるようにする。

(3) リスケジューリング実施判断の意思決定支援法の開発

上記の手法により、生産実施中に必要に応じてリスケジューリングを速やかに実施することができ、生産条件の変動への柔軟な対応が可能になる。しかし、条件変動の内容によっては、元々のスケジュールが依然として良好に機能する場合も考えられる。このため、変動が生じた場合に、リスケジューリングを実行するかどうかを、計画者が的確に判断することが求められる。リスケジューリングの要否の判断を支援する手法を構築する。

4. 研究成果

(1) 優先規則の組合せの「塩梅」の調整手法の開発

ボックス・ミュラー法による正規乱数生成とシミュレーティッドアニーリング法（SA 法）による近似最適化を採用し、優先規則の重み調整を行う手法を構築してシステム実装を行い、数値例題に適用して評価を実施した。前述のフレキシブルジョブショップスケジューリング法では、各設備間のメッセージ交換をモニタリングして生成されたスケジュールを把握するためのモジュールがある。そのモジュールに、重みの値と最適化機構を持たせる、集中管理型の調整システムを構築して実行した。ジョブ数 10、工程数 10、マシニングセンター3 台、自動倉庫 1 台、経路誘導式無人搬送車 2 台、搬送経路上の知的セグメント（搬送制御用の装置）5 台の例題を用い、初期温度等の SA の諸条件を、200 回の反復で最適化が終了するように設定して実行した。この場合のメッセージ交換の総数は約 717 万回であった。メッセージ一つのデータ量を 80byte 程度と仮定して、標準的な無線 LAN 規格に則った通信を想定すると、10 秒程度で最適化されたスケジュールが得られることになり、一定の実用性が確認できた。

また、重みの値と最適化機構を各機械に持たせ、モニタリングシステムからのスケジュールの評価指標値の情報を受けて、各機械が自身の重みを最適化する、自律分散型の調整システムを構築して、最適化性能の評価を行った。ジョブ数 10、工程数 6、マシニングセンター6 台、自動倉庫 1 台、経路誘導式無人搬送車 2 台、搬送経路上の知的セグメント（搬送制御用の装置）15 台の例題を用い、初期温度等の SA 法の諸条件を、100 回の反復で最適化が終了するように設定して実行した。各工程の処理時間をランダムに変えて 10 題のインスタンスを作成して、集中管理型と自律分散型のそれぞれの調整システムで実行した場合に得られたスケジュールのメイクスパンを表 1 に示す。各機械で、自身に合った最適な重みを求めようとするところから、理論的には集中管理型の調整システムよりも良好なスケジュールが得られるものと期待されるが、この評価実験においては、有意な効果は見られなかった。自律分散型調整システムでは、重みの探索空間が大きくなり、この例題と SA の条件設定では、十分な探索性能を発揮できなかったものと考えられる。SA の条件設定、自律分散型調整システムが持つ探索性能、および、対象とするスケジューリング問題との関係についての分析と、それを踏まえた活用が鍵となる。

表 1 集中管理型・自律分散型の各調整システムで得られたスケジュールのメイクスパン

No.	集中管理型調整システム	自律分散型調整システム
1	375	374
2	369	360
3	363	368
4	361	368
5	390	418
6	392	406
7	377	404
8	374	378
9	365	363
10	315	326

(2) 所与の優先規則に対する高性能なスケジュールの生成法の開発

ジョブショップスケジューリングに対するアクティブスケジュール生成手法である GT（Giffler & Thompson）法を、上記フレキシブルジョブショップスケジューリング法に組み込み、機械が遊休状態になった時点で、そこから一定期間先までに、その機械に到着するジョブの集合の中から、優先度の高いものを選択する機構を組み入れてシステム実装した。

上記(1)の自律分散型の調整システムの最適化性能評価で用いた、ジョブ数 10、工程数 6、マシニングセンター6 台、自動倉庫 1 台、経路誘導式無人搬送車 2 台、搬送経路上の知的セグメント（搬送制御用の装置）15 台のインスタンス 10 題を用い、初期温度等の SA の諸条件を、100 回の反復で最適化が終了するように設定して、評価実験を行った。遅れなしスケジュールに限定した生成手法とアクティブスケジュールも考慮した生成手法とで、最適化を実行した。集中管理型、自律分散型のそれぞれの重み調整システムを用いて得られたスケジュールでのメイクスパンの値を表 2 に示す。いずれの重み調整システムにおいても、遅れなしスケジュールに限定して探索する場合と比較して、良好なスケジュールが得られ、有効性が確認できた。

表2 遅れなしスケジュールに限定した生成手法およびアクティブスケジュールも考慮した生成手法によって得られたスケジュールにおけるメイクスパン

No.	集中管理型調整システム		自律分散型調整システム	
	遅れなしスケジュールに限定した生成	アクティブスケジュールを考慮した生成	遅れなしスケジュールに限定した生成	アクティブスケジュールを考慮した生成
1	375	350	374	337
2	369	338	360	336
3	363	360	368	352
4	361	335	368	326
5	390	359	418	382
6	392	376	406	354
7	377	352	404	353
8	374	367	378	359
9	365	320	363	332
10	315	310	326	304

(3) リスケジューリング実施判断の意思決定支援

対象とする生産条件の変動を、工程の処理終了時刻の遅延に限定して、リスケジューリング実施判断の支援手法を構築した。元のスケジュールに対して右シフト操作を施した修正スケジュールを生成し、クリティカルパスに着目した簡易な条件に基づく、リスケジューリング要否の判断手法を与えた。ジョブ数5、工程数6の例題を用い、処理時間をランダムに変えることで、500題のインスタンスを作成し、処理時間の0.1~0.5倍の遅延をランダムに生成して、性能評価を行った。表4に示すように、84.4%の正解率を達成できることが確認できた。

表4 リスケジューリング実施要否についての判断の精度の評価

要否についての判断結果	必要(不要)と判断されたインスタンス数	必要(不要)と判断され、実際にも必要(不要)であったインスタンス数	必要(不要)と判断されが、実際には不要(必要)であったインスタンス数	必要(不要)と判断された全インスタンスに対する、実際にも必要(不要)であったインスタンスの割合	正解率
必要	360	288	72	80.0%	84.4%
不要	140	134	6	95.7%	

また、ジョブ数5、工程数6の例題を用い、処理時間をランダムに変えることで生成した100題のインスタンスの各々において、工程の処理終了時刻の遅延をランダムに生起させ、遅延が生じた場合には常にリスケジューリングを実施する手法(手法Ⅰ)と、提案手法(手法Ⅱ)とをそれぞれ適用して評価を行った。表5に示すように、工程の遅延に対して常にリスケジューリングを実施する場合に比べて、メイクスパンの悪化は2%程度に抑えつつ、スケジュールの修正回数を5割程省略でき、無駄の少ない対応が可能となることを確認した。

表5 遅延に対して常にリスケジューリングを実施する手法と提案手法との比較

手法	初期スケジュールのメイクスパンの平均値	最終的なメイクスパンの平均値	スケジュールの修正回数の平均値
Ⅰ	236.05	419.81	13.08
Ⅱ		426.15	6.26

上述の成果によって、「超分散型生産システム」の特徴を、運用案の生成だけでなく、運用案の適正化にも活かした、自律分散型適正スケジュール生成メタシステムを構築することができ、この新しい生産システムの概念に対する適正運用メタシステムの在り方を提示することができた。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 2件）

1 . 著者名 Daiki Yasuda, Eiji Morinaga, Hidefumi Wakamatsu	4 . 巻 2
2 . 論文標題 A Method of Distributed Production Management for Highly-Distributed Flexible Job Shops	5 . 発行年 2020年
3 . 雑誌名 Advances in Production Management Systems. Towards Smart and Digital Manufacturing.	6 . 最初と最後の頁 485 ~ 492
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/978-3-030-57997-5_56	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1 . 著者名 Morinaga Eiji, Yasuda Daiki, Wakamatsu Hidefumi	4 . 巻 36
2 . 論文標題 Method for Supporting Decision-Making in Rescheduling for Lean Flexible Manufacturing	5 . 発行年 2023年
3 . 雑誌名 Transactions of the Institute of Systems, Control and Information Engineers	6 . 最初と最後の頁 271 ~ 278
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5687/iscie.36.271	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件／うち国際学会 2件）

1 . 発表者名 Daiki Yasuda, Eiji Morinaga, Hidefumi Wakamatsu
2 . 発表標題 A Method of Distributed Production Management for Highly-Distributed Flexible Job Shops
3 . 学会等名 International Conference on Advances in Production Management Systems 2020（国際学会）
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 安田大輝、森永英二、若松栄史
2 . 発表標題 高度分散環境を活用した生産スケジューリングとシミュレーションの統合化
3 . 学会等名 2020年度精密工学会春季大会学術講演会
4 . 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	安田 大輝 (Yasuda Daiki)		
研究協力者	若松 栄史 (Wakamatsu Hidefumi)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------