

平成 30 年 6 月 1 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K21144

研究課題名(和文) スマート工場の運用に向けた自律分散型生産スケジューリング法の開発

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

研究代表者

森永 英二 (Morinaga, Eiji)

大阪大学・工学研究科 ・助教

研究者番号：80432508

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：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のみによって、優先規則に基づく生産スケジューリングを行う手法を開発した。同様の特徴を有する生産シミュレーション手法との連携をも可能にし、スケジュールの詳細な評価もシームレスに行うことを可能にした。用いる優先規則の調整を人間が行い、それに基づくスケジュールの生成とシミュレーションによる評価を高度に分散化された生産システム自身が行う、生産管理の新たな環境を構築することができた。

研究成果の概要(英文)：For highly-distributed manufacturing systems, a set of methods of production scheduling have been developed, where scheduling based on priority rules is performed only by message exchanges among facilities and local decision makings in each facility. A method for using the scheduling methods and the highly-distributed simulation method in tandem has been also developed for seamless detailed evaluation of the generated schedule. These accomplishments have realized a new environment of production management, where a planner adjusts the priority rules and the highly-distributed manufacturing system by itself generates a production schedule based on the rules and evaluates the schedule by performing simulation.

研究分野：生産システム

キーワード：自律分散型生産スケジューリング 優先規則 高度分散生産システム

1. 研究開始当初の背景

工場の効率的運用に必須である生産スケジューリングに関して、生産システム全体をモデル化した上で最適スケジュールを求める集中管理型の枠組みが構築されてきた。しかし、現在主流の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スケジュールを組み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くなっている。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、準最適なスケジュールを即座に求める自律分散型のアプローチが、この四半世紀に国内外で活発に論じられてきた。例えば、アクティブデータベースや組合せオークションを用いる方法等、多くの手法が提案されている。

一方、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 といった呼称の下に世界的に推進されてきている。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。我が国でも、(一社)日本機械学会生産システム部門で「つながる工場」研究分科会(略称)が発足し、産学官の各界から多くの研究者が参画する等、本格的な議論が始まりつつある。分散型生産スケジューリング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ことが懸念される。

生産シミュレーションの分野では、設備単位で高度に分散化されているという特徴を活かして、全体モデルを構築することをせず、即座にシミュレーションを行うことを目指す、超分散シミュレーション法が論じられており、研究代表者もその開発に参画している。この手法は、各設備に実装された個々のモデルに、所定の通信規約に従ってイベント生起時刻を送受信させ、イベント生起に関する優先度を自律的に調整させることで、全体のイベント駆動型シミュレーションを行うものである。情報統括や意思決定を担う要素がなくても、システム全体のシミュレーションを実行できることが明らかにされつつある。

生産スケジューリングに対しても同様に、各設備の性能や特徴に関する情報を、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、各設備への作業の割当て等の優先度を自律的に調整して、スケジュールを生成できるものと期待できる。

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、前述の期待に基づき、フローショップ型の生産形態に対して、優先規則に基づく生産スケジューリングを、情報統括や意思決定を行うモジュールを一切導入せずに、各設備間の情報交換のみによって、自律分散型の枠組みで実行する手法を開発してきた。本研究では、これを以下のように発展させることを目的とする。

- (1) フレキシブルジョブショップスケジューリング法への拡張
- (2) 複数種の優先規則に基づくスケジューリング法の拡張
- (3) 超分散シミュレーション手法との連携が可能な手法への拡張

3. 研究の方法

- (1) フレキシブルジョブショップスケジューリング法への拡張

前述の超分散シミュレーション手法では、各設備が持つ最早イベントの生起時刻についての順序付けを行うための、図1のような簡易なアルゴリズムが提案されている。各設備 A_i が、自身の中で最早イベントの生起時刻 T_i を他者全員に送信するとともに、自身が受信した、他者の最早イベントの生起時刻の方が、自身の最早イベントの生起時刻より早い場合に自身の優先度 O_i を1つ繰り下げる。この処理を全ての設備が行うことで、自身の最早イベントが設備群全体の中で何番目に生起すべきものかを、各設備が情報交換のみによって知ることができる。

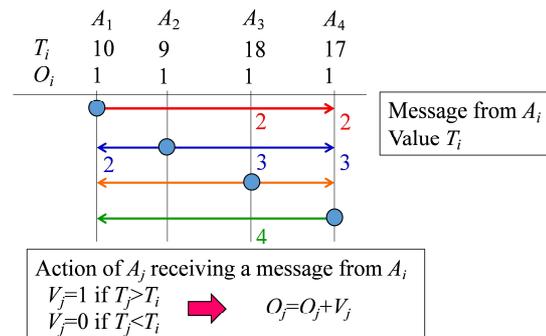


図1 設備間での順序付けアルゴリズム

本研究では、図2のように、有限バッファを持つ機械群と自動倉庫で構成される生産システムを考え、そのフレキシブルジョブショップスケジューリング問題を対象とする。この問題では、設備群の中で最早のイベントを持つ設備を特定する設備選択と、現工程の処理が完了した中間品の次工程をどの機械に担わせるかを決定する機械選択、および、バッファ内に滞留している処理待ちの中間品群の中から次に処理する中間品を決定するジョブ選択の、三種類の意思決定を行う必

要がある。これらを、設備間での情報交換のみによって実行することを考える。

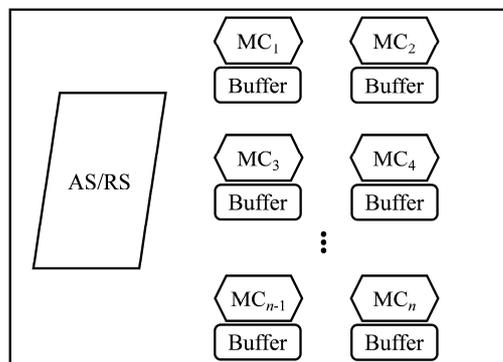


図2 対象とする生産システム

設備選択は、図1の順序付けアルゴリズムをそのまま適用することで達成できる。機械選択については、その代表的な優先規則であるPT則（最も速く処理できる機械を選ぶ規則）を採用することにし、図1の順序付けアルゴリズムにおけるイベント生起時刻を、工程の処理に要する時間に読み替えて適用することで、実現することができる。ジョブ選択については、それに関する代表的優先規則であるSPT則（最も早く処理を完了できる中間品を選ぶ規則）を採用することになると、各機械で独立した意思決定行為となるため、情報交換の必要はなく、設備単独の情報処理のみによって達成することができる。各設備が適正に同期し合い、これらの意思決定が適切なタイミングで行われるような処理フローを構築して、各設備に適用することで、情報統括や意思決定を担うモジュールを用いずに、フレキシブルジョブショップスケジューリングを行うことが可能になる。

(2) 複数種の優先規則に基づくスケジューリング法の拡張

上述の手法では、機械選択とジョブ選択にそれぞれ最も単純な規則を適用しているため、効率の良い良好なスケジュールが得られる可能性は低い。様々な規則をも適用できるようにし、問題に応じて良好なスケジュールが得られるようにすることが必要となる。PT則やSPT則は、事前に与えられる機械の性能を根拠にして選択を行うため、基本的には静的な選択を行うことになる。選択規則については、より複雑な規則が古くから様々な提案されてきており、後工程や納期等の設備の外部から与えられる情報と、設備や中間品の状況の情報とに基づいて、動的な選択を行うことが検討されている。本研究では、それらの一例として、機械選択に関してはNINQ則を、ジョブ選択に関してはLWKR則とMWKR則、および、EDD則をもそれぞれ採用して、手法の拡張を行う。

NINQ則は、自身のバッファに滞留している未処理の中間品が最少である設備を優先する規則であり、図1の順序付けアルゴリ

ズムにおけるイベント生起時刻を、滞留している未処理の中間品の数に読み替えて実行することで、この規則に基づく優先順序付けが達成できる。

LWKR則とMWKR則は、残っている工程の処理時間の合計がそれぞれ最小、最大の中間品を選ぶ規則である。厳密には、残りの工程を担う機械の決定とそれによって確定する処理時間とが、現工程における意思決定の際に既知でなければならないが、フレキシブルジョブショップでは、これらの情報は不定であるため、この実現は不可能である。このため、残りの各工程について、それを担い得る全ての設備に対して処理時間の情報を収集し、その平均値をその工程の処理時間と見なすことで意思決定を行うことにする。情報交換によって、各設備の各工程についての情報を収集することで、この意思決定を実行することができる。

EDD則は、納期が最も迫っている中間品を優先する規則であり、設備間で中間品の受渡しを行う際に、納期情報をも併せて送ることで、意思決定に必要な情報を当該設備が保有することができ、この意思決定を実行することができる。

さらに、上記の各種規則で得られる優先度の値の、重み付け総和の値に基づいて、機械選択やジョブ選択についての優先順序付けを行うことで、各種の規則を所定の割合で融合させた意思決定を行うことができる。

これらの意思決定が適切なタイミングで行われるような処理フローを構築して、各設備に適用することで、情報統括や意思決定を担うモジュールを用いずに、様々な選択規則やそれらを所定の割合で融合させた規則に基づくフレキシブルジョブショップスケジューリングを行うことが可能になる。

(3) 超分散シミュレーション手法との連携が可能手法への拡張

超分散シミュレーション手法では、自動倉庫やマシニングセンターのような加工系の設備だけでなく、自動搬送車（AGV）やその搬送路のような搬送系の設備のシミュレーションも検討されている。このシミュレーション手法と、本研究で開発するスケジューリング手法とを連携させ、情報統括や意思決定を担う要素を要さずに、生産システム運用に関する意思決定とその評価とをシームレスに行う環境を構築するとともに、意思決定に関する適正化を図る環境まで構築することが望まれる。そのためには、搬送経路の決定やAGVの選択に関する意思決定を行う手法を与える必要がある。

搬送に関して、超分散シミュレーション手法では、搬送路を分割して生成される要素（Zoneと称する）を知的要素として取り扱い、中間品やそれらを運搬するAGVをも搬送物と見なして、Zone間での授受の対象として取り扱うことが検討されている。シーム

レスな連携のために、本研究でもこの考え方を踏襲し、Zone 同士の情報交換によって、搬送経路の決定や AGV の選択を行う。加工系設備が位置する Zone に、別の加工系設備向けのメッセージを発信させ、「バケツリレー」の方式で、そのメッセージを隣接する Zone に順次伝達していくことを考える。その際、メッセージ内に、伝達した Zone の ID 番号と長さの組を追記していく。目的となる加工系設備が位置する Zone がそのメッセージを受け取った時に、発信元の Zone 宛にそのメッセージを返信させることで、それまでに経由した Zone の ID 番号と Zone 長の組の順列を発信元の Zone が知ることができ、搬送経路と経路長の情報を獲得することができるため、最短となる経路を選択することで、経路の決定を行うことができる。

ある加工系設備で中間品の処理が完了し、(2)で述べた手法によって次工程を担う設備が決定すると、その設備への搬送のための AGV を選定する必要が生じる。中間品を持つ加工系設備に付随する Zone が、AGV の位置情報を要求するメッセージをブロードキャスト発信し、AGV を有する Zone が自身の ID 番号と AGV の ID 番号とを返信することで、要求元の Zone は、受信した返信メッセージと、自身が持つ経路情報から、その AGV までの距離を知ることができる。最も近くに位置する AGV を選択することができる。

このような、情報交換のみによって搬送経路情報獲得・決定や AGV 選定を行う手法を用いることにより、加工系設備の情報のみによって生成されたスケジュールを、シミュレーションによってシームレスに評価することが可能になる。その評価結果を見て、機械選択・ジョブ選択における規則の融合の重みを調整していくことで、シミュレーションレベルでの評価に基づいた適正なスケジュールを生成することが可能になる。

4. 研究成果

上述した方法に基づき、具体的な処理フローを構築するとともに、検証設備への実装と例題への適用により、その有用性を検証した。

(1) フレキシブルジョブショップスケジューリング法への拡張についての成果

自動倉庫 1 台、マシニングセンター 3 台で、それぞれ 2 工程を要する 3 種類の製品を 2~3 台生産するシナリオを設定し、提案手法を適用した。図 3 に示すように、従来の集中管理型の枠組みで生成されるものと同じのスケジュールが、提案手法によっても正しく生成されることが確認できた。

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
MC1	A-1	A-1	A-1				B-2	B-2				C-2													
MC2	B-1	B-1		C-2			A-1				C-2		A-2												
MC3	C-1	C-1	C-1				A-2				A-2		A-2												

図 3 PT 則と SPT 則での実行結果

このスケジューリングに要した情報交換は 908 回であり、これは、50 台の設備で 40 工程を要する製品を 90 台生産する、現実規模の生産シナリオの一例を想定した場合には、約 185,000 回の情報交換に相当する。1 回の情報交換で 30byte のデータを UDP 送信することを仮定すると、合計で約 18Gbit のデータの送受信を行うことになる。すなわち、最新の無線 LAN 通信規格 (IEEE802.11ac) を適用すれば、数秒程度に必要な情報交換を行うことができることを示唆しており、通信負荷の観点からは実用に耐え得る手法であることを確認することができた。

(2) 複数種の優先規則に基づくスケジューリング法の拡張についての成果

自動倉庫 1 台、マシニングセンター 3 台で、2~3 工程を要する 3 種類の製品を 2~4 台生産するシナリオを設定し、提案手法を適用した。図 4、5 に示すように、従来の集中管理型の枠組みで生成されるものと同じのスケジュールが、提案手法によっても正しく生成

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
MC1	A-1		A-1					B-2					A-2							A-3
MC2	B-1			B-1				C-2		C-2			B-2							A-3
MC3	C-1				C-1					A-2				B-3						B-1
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35					
		B-3		A-1				B-3												A-3
		A-1			B-2			A-2												
														A-3						

図 4 NINQ 則と LWKR 則での実行結果

されることが確認できた。

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
MC1	A-1(14)		A-1(24)					A-2(16)				A-2(14)			B-3(18)					A-3(24)
MC2	A-1(16)			B-1(22)				B-2(18)				C-2(20)			B-2(22)					A-3(14)
MC3	B-1(18)				C-1(20)							A-2(24)								A-3(16)
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32								
		A-1(30)			C-2(26)			B-3(28)												
			B-1(28)					A-2(30)												
			B-3(22)					B-2(28)												A-3(30)

図 5 NINQ 則と EDD 則での実行結果

(3) 超分散シミュレーション手法との連携が可能な手法への拡張についての成果

自動倉庫 1 台、マシニングセンター 3 台で、それぞれ 3 工程を要する 3 種類の製品を 2~4 台生産するシナリオを設定し、提案手法を適用した。重みの初期値では図 6、7 に示すスケジュールとシミュレーション結果が得られたが、シミュレーション結果に基づいて重みを調整していく操作を繰り返すことで、図 8、9 のようなスケジュールとシミュレーション結果が得られた。情報統括や意思決定を担う要素を用いずに、スケジューリングとシミュレーションとをシームレスに実行し、重みの調整という上位レベルの意思決定のみを人間が行って、搬送を考慮したシミュレーションレベルで効率の良い、良好なスケジュールを得る環境が構築できた。

