

# 知識処理を用いたフレキシブル生産 オンラインスケジューリング

鳩野 逸生, 田村 担之

## 1. はじめに

一般に生産スケジューリングは、各生産システムにおける資源(工作機械、搬送機械など)におけるジョブの処理順序を決定する問題として設定される。スケジューリング問題を組合せ最適化として定式化した場合、最適解探索のための計算量が膨大となり、実際規模の問題に対して最適解を求めるのが困難であることが知られている[2,3]。さらに、FMS (Flexible Manufacturing System) [1] など、より柔軟性が高い生産システムでは、

- (1)配置された工作機械の順序に依存しない
  - (2)ロット単位でシステムに投入されるが各工作物毎に個別に扱われる
  - (3)代替機械が存在する
  - (4)ジョブの搬送スケジューリングも必要である
  - (5)作業者に対する作業スケジューリングも必要である
  - (6)工具供給スケジューリングも必要である
  - (7)各工作機械ごとのバッファとその容量、さらに生産システム全体での中間在庫を考慮する必要がある
- などの特徴があるためさらに複雑なものとなる。一方、スケジューリング作成の形態として月間、週間単位など一定期間のスケジューリングをオフラインで計算し、生産システムに適用するオフラインスケジューリングと、必要が生じた時点で必要最小限のスケジューリングをリアルタイムに行なうオンラインスケジューリングの2つが存在するが、通常生産システムにおけるスケジューリングとはオフラインスケジューリングを意味することが多い。ところが、実際の生産においては、工作機械の故障およびそれに伴う修理時間、加工時間のばらつきといった生産システム自体に内在する不確実性や、特急ジョ

はどの いつお, たむら ひろゆき

大阪大学 工学部 精密工学科

〒565 吹田市山田丘2-1

ブの割込、急なジョブのキャンセルなどの外的環境の変化によりオフラインで作成した生産スケジュール通りに生産することができなくなる場合が多い。本稿では、オフラインスケジューリングでは対応することが実際的ではない不確実な環境におけるスケジューリングの方法論について概説した後、ルールベースを用いることによりオンラインスケジューリングを行なった例[18]および今後知識ベースを用いたオンラインスケジューリングに必要な技術課題について述べる。

## 2. 不確実な環境下におけるスケジューリング

一般的なスケジューリング問題に対するアプローチとしては、(1)分岐限定法などのOR手法[2]、(2)スケジューリング・シミュレーション[5]、(3)AI (Artificial Intelligence) 的手法[9,10]などがあげられる。しかし、動的かつ不確実な環境にある生産システムでは、オフラインスケジューリングに比べてごく短い時間でスケジュールを行なう必要があるため(1)~(3)の手法をそのまま適用することは困難である。このような生産環境におけるスケジューリングの方法論としては

- (1)再スケジューリング
- (2)確率的最適化
- (3)オンラインスケジューリング

の3つが考えられる。

(1)のアプローチは、環境の変化が生じた時点で現時点のスケジュールをキャンセルし環境の変化を考慮し再スケジューリングを行なう方法であり、再スケジューリングを行なうタイミングを含めた研究が報告されている[6]。しかし、生産の周期性など計算量を減らすための仮定を設けているものがほとんどであるため、そのままではより自由度の高いフレキシブル生産システム等には適用することは困難である。

(2)のアプローチは不確実な環境を待ち行列ネットワーク等を用いて確率的にモデル化し、スケジューリング目

的に対して、確率的に最適化することによりスケジューリングを行なう方法であり、工作機械の故障や処理時間の不確実性を考慮した上で納期を満たすなどのスケジューリング目標を達成することをめざしたシステムが報告されている[7, 8]。このアプローチは不確実な状況を正確に確率的にモデル化できることが前提であり、FMSのように正確なモデル化が困難なシステムに適用することは困難なように思われる。また、このアプローチも計算量を減らすために非現実的な仮定が設定されることが多い。

一方、オンラインスケジューリングを行なう場合は簡単なディスパッチングルール[5]にもとづいて行なわれることが多く、オンラインスケジューリングの研究は(1)、(2)に比べて進んでいないのが現状である。これは(1)、(2)に比べて従来スケジューリングに用いられてきた手法がオンラインスケジューリングには計算量の点で不向きであることに起因していると考えられる。オンラインスケジューリング研究の例としては、スケジューリング対象を搬送車スケジューリングまたはジョブのルーティング等に限定した上で、小規模な準最適化問題をオンラインで解くことによりオンラインスケジューリングを行なったシステム[11]や、離散形状態方程式でモデル化することにより最適制御理論を適用してスケジューリングを行なう例[12]、ルールなどの人工知能手法を用いてオンラインスケジューリングを行なう例[13, 14, 15, 16, 17, 18]などがあげられる。部分的に最適化を行なうものや最適制御理論を応用するものは適用できる場面が限られており、人工知能的な手法がオンラインスケジューリングに対して最も期待できる手法であると考えられる。以下の章ではルールベースを用いてオンラインスケジューリングを行なった例[17, 18]について、オンラインスケジューリングのためのルールベースおよびその評価について述べる。

### 3. ルールベースを用いたオンライン・スケジューリング

#### 3.1 オンライン・スケジューリングのためのルールベース

ここでは、部品の加工に際し、ディスパッチングやルーティングに関する意思決定をルールベースによってオンラインで制御することによりスケジューリングを行なう。システム構成を図1に示す。ここでディスパッチングとは工作機械または搬送機械に対して次に作業可能な

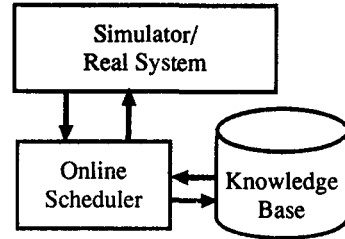


図1 An example of knowledge-based online scheduling system

部品が複数個存在する状態において、次に作業を行なうべき部品を選択することを指し、ルーティングとはある部品について次工程の作業ができる機械または搬送機械が複数台存在する状態において次工程を行なう工作機械または搬送機械を選択することを指す。

上述のディスパッチングやルーティングを行なわなければならない状態を検出した場合に、以下に示すようなルール[4]にしたがって優先規則を決定し、それに対応する作業または機械を優先的に選択する。

if  $P$  then  $R$  (1)

ここで、条件 $P$ はFMSモデル内のバッファの状態や各部品の加工進展状況等を調べる述語を表わす。また、結果 $R$ は優先規則[5]かまたは次にチェックするルールのグループ番号を表わす。本稿では、オンライン・スケジューリングにおける納期余裕および納期遅れの最小化を第一義的な生産目標とするスケジュールを求めることとし、以下に示すような $D_1 \sim D_8$ の優先規則を考えている。また、各工作機械が効率よく稼動し、生産目標を達成することを補助的な目標として $D_9 \sim D_{11}$ を使用している。

- $D_1$  : 納期順ジョブ優先
- $D_2$  : スラック時間最小ジョブ優先
- $D_3$  : 最大納期遅れ時間最大ジョブ優先
- $D_4$  : 納期遅れ個数最大ジョブ優先
- $D_5$  : 総納期余裕時間最小ジョブ優先
- $D_6$  : 納期余裕率最小ジョブ優先
- $D_7$  : ランダムにジョブを選択
- $D_8$  : どのジョブも負荷しない
- $D_9$  : バッファ占有率最大ジョブ優先
- $D_{10}$  : 次工程バッファ占有率最小ジョブ優先
- $D_{11}$  : 残り工程数最小ジョブ優先

ディスパッチングまたはルーティングが発生した時刻

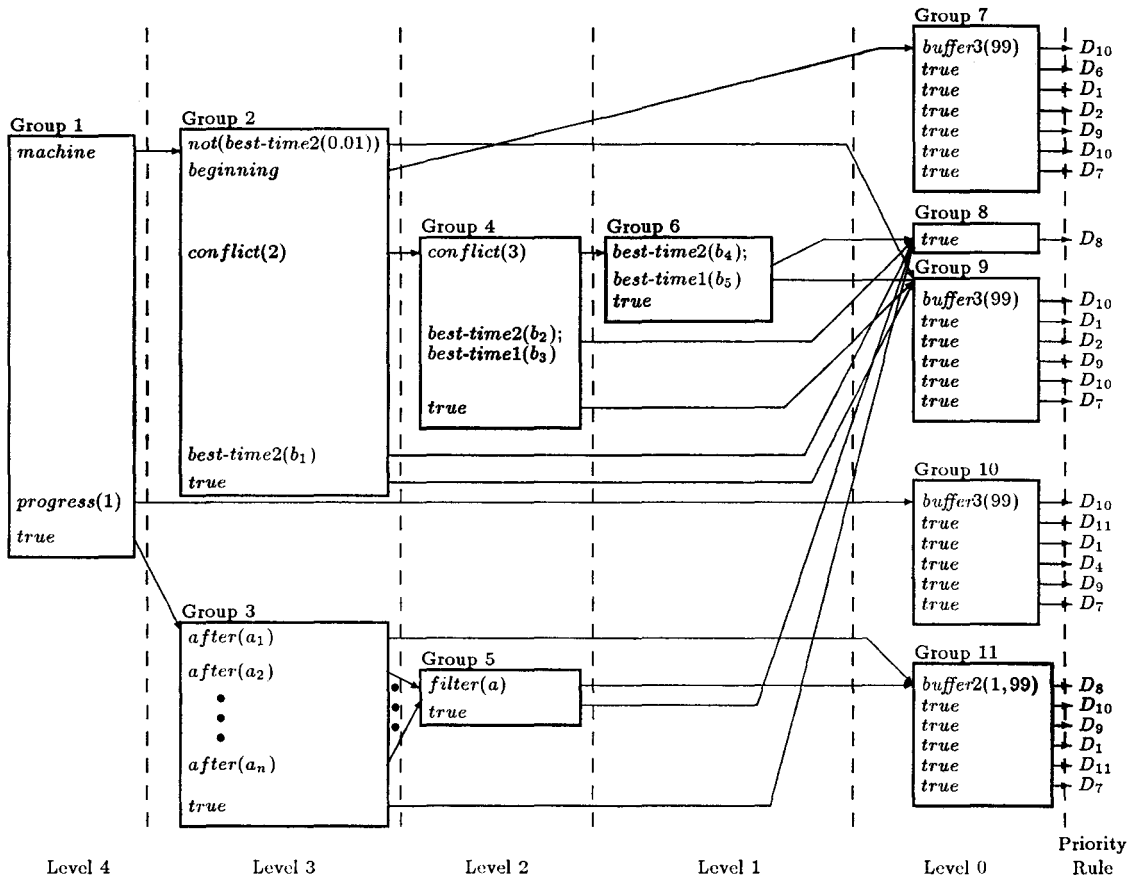


図 2 An example of the rule base[17]

において対象システムから得られる情報により述語  $P$  を構成する。以下に  $P$  の例を示す。

$not(a)$  :  $a$  が真のときのみ偽となる。

$time(a)$  : 現時刻が  $a$  以降のときのみ真となる。

$buffer1(a, b)$  : 現工程より  $a$  工程先のバッファの占有率が  $b\%$  以上のものが存在するときのみ真となる。

$processing-time(a, b)$  : 現工程から  $a$  工程先の加工時間の最小・最大の比  $\times 100$  が  $b\%$  以上のときのみ真となる。

$progress(a)$  : 競合している部品の残りの工程数が  $a$  以下のものがあるときのみ真となる。

$attain$  : 競合している部品のうち、現時刻で1つでも完成しているものがあるときのみ真となる。

$best-time1(a)$  : 競合している部品のうち納期までの残り時間とその部品についての  $I_{min}$  の比が  $a$  以上のものがあるときのみ真となる。

ここで、 $I_{min}$  は述語の真偽を検証する時刻において受

注個数すべてを仕上げるのにかかると予想される最小時間を表わしている。納期遅れが生じないときは納期余裕を小さくし、納期遅れが生じる場合は納期遅れが1つの部品に集中せず、納期遅れを小さくおさえようとする目標を設定し、図2のようなルールベースを構築している。推論の簡単化および高速化のため、スケジューリングの知識をグループ化しかつ推論木に展開している[18]。

### 3.2 数値例によるルールベースの評価

簡単な数値例としてライン型FMSのオンライン・スケジューリングを考える。FMSは3台の工作機械( $M_1, M_2, M_3$ )とローディングステーション、アンローディングステーションおよび1台の搬送車から構成されているものとする。各部品( $a, b, c$ )が加工される順序は以下のとおりである。ただし、カッコ内の数字は、各部品が各工作機械で加工されるときに要する生産計画における加工時間を示す。

部品  $a$  :  $M_1(6) \rightarrow M_2(6)$

部品  $b$ :  $M_1(4) \rightarrow$

$M_2(3) \rightarrow M_3(5)$

部品  $c$ :  $M_1(5) \rightarrow$

$M_3(6)$

各部品が工作機械間を搬送されるのにすべて1単位時間かかるとし、各工程にはそれぞれ容量5のバッファが設置されているものとする。各工作機械において現在までと異なる種類の部品を次に加工する場合の工具付け替え時間を1単位時間と設定する。このようなFMSにおいて各部品をそれぞれ20個ずつ、納期を300単位時間として生産を行なう例を考える。

ここではルールベースの評価を行なうため、図2に示すルールベースおよび表1に示すディスパッチング・ルールに従ってオンラインスケジューリングのシミュレーションを行なっている。工作機械の故障率、修理時間、加工時間のばらつきの各条件は表2に示した13種類であり、搬送機械については故障は発生せず、搬送における所要時間の分散は0.7であるものとしている。

シミュレーションには、確率ペトリネット[19,20]にネット中のあるプレスから他のプレスへトークンが移動するのにかかる時間を経過した後発火する階層化時間トランジション(hierarchical timed transition)を導入した階層的確率ペトリネットを用いている[17,18]。

表3に以上の条件のもとで行なった数値実験の結果を示す。表中の各要素はそれぞれの条件のもとで、100回スケジューリングを行ない、その加工終了時間の平均をと

表1 Dispatching rules

Rule-base	: Rule-base
FCFS	: First Come First Served
SPT	: Shortest Processing Time
MINSLACK	: Minimum Slack Time
MAXROB	: Maximum Rate of Occupation for Buffers
MINROBN	: Minimum Rate of Occupation for Buffers in Next Process
MAXLOSS	: Maximum Sum of Loss Time
MINSPPARE	: Minimum Sum of Spare Time
MAXTARD	: Maximum Tardiness

表2 Conditions of numerical experiments

	Failure Rate	Variance of Processing Time	Mean Repair Time
Case 1	0.000	1.00	10
Case 2	0.001	1.00	10
Case 3	0.005	1.00	10
Case 4	0.010	1.00	10
Case 5	0.015	1.00	10
Case 6	0.005	0.00	10
Case 7	0.005	1.00	10
Case 8	0.005	2.00	10
Case 9	0.005	3.00	10
Case 10	0.005	1.00	5
Case 11	0.005	1.00	10
Case 12	0.005	1.00	15
Case 13	0.005	1.00	20

ったものである。300単位時間という納期は、故障や加工時間のばらつきが生じないと仮定したとき、ほぼ最適なスケジューリングが行なわれた場合に達成することのできる納期で、非常に厳しい条件である。ここでの数値実験では、工作機械の故障や加工時間のばらつきが発生することを想定しているため、各実験結果とも設定した納期からは大幅に遅れている。表3からもわかるようにルールベースを用いた方がいずれの条件でも短い加工時間で終了していることがわかる。他のディスパッチングル

表3 Average completion time

Case	Rule-base	FCFS	SPT	MINSLACK	MAXROB	MINROB	MAXLOSS	MINSPPARE	MAXTARD
1	337.97	380.50	371.93	524.77	370.27	379.86	378.18	386.69	383.72
2	342.38	385.39	377.79	531.48	374.08	386.95	383.71	384.98	389.43
3	353.98	404.08	393.98	556.09	387.48	400.87	398.10	406.68	406.21
4	369.67	433.93	412.72	591.49	407.18	420.69	430.32	428.25	431.64
5	397.82	457.89	436.36	621.89	433.58	435.45	448.23	470.81	450.40
6	337.87	380.90	363.50	514.29	360.29	362.09	373.64	380.12	377.76
7	353.71	404.58	396.26	552.23	391.97	397.86	400.89	407.11	414.03
8	359.41	409.89	405.09	566.70	392.13	401.04	405.70	419.09	409.31
9	369.25	421.40	407.37	577.22	401.73	408.75	411.97	430.04	419.30
10	348.06	393.51	382.67	539.78	381.46	392.04	394.78	393.51	394.93
11	355.23	405.34	395.70	552.65	387.29	399.49	406.01	403.76	412.77
12	369.79	419.40	403.01	564.59	401.42	406.15	410.88	417.29	418.26
13	372.49	434.80	416.41	592.07	407.76	420.52	428.36	428.35	435.49

ールに固定した場合でも特定の条件のもとではルールベースを用いた場合と比較して近いものもあるが、他の条件に対しては大幅に劣るといふ結果を示している。

#### 4. 知識ベースを用いたオンラインスケジューリングの課題

知識ベースを用いたオンラインスケジューリング実用化に対する課題としては、(1)知識ベース構築のための知識収集、知識ベースのデバッグをどのように行なうか？(2)実際の生産システムにおいて推論のための情報(知識)収集機構をどのようにモデル化しインプリメントするか？の2つがあげられる。(1)に対しては、知識ベース自体を外部環境の変化に対して対応しやすい構造にする方法や機械学習により自動的または半自動的に知識を生成する方法などが期待される。しかし、いずれの方法もシミュレーションを知識源および知識ベースの評価に用いる必要があると考えられる。この点で、シミュレーション技術と知識処理技術の融合を計っていく必要がある。一方、知識ベース・オンラインスケジューリングシステムを実際の実生産システムに組み込む場合、スケジューリングのための情報(知識)をリアルタイムに収集する必要がある。この情報収集機構は生産システムをコントロールするソフトウェアに組み込む必要があることを考えると、将来の設備、および環境の変化に対して柔軟に対応可能な知識ベース向け情報モデルおよび情報交換プロトコルを構築しておく必要がある。これは、いくら性能が高い知識ベースであっても得られる知識が外界の変化を表現できていなければ、スケジューリング目的を達成することが困難なことを考えれば、知識ベースと同等な重要性をもつものと思われる。この点で近年研究が活発化している分散協調および自律分散[21]などのアプローチが注目される。

#### 5. おわりに

本稿では、不確実性の多い生産システムに対するスケジューリングの方法論の概要を述べた後、ルールベースを用いることによりオンラインスケジューリングを行なった例および知識ベースを用いたオンラインスケジューリングに対する課題について述べた。オンラインスケジューリングは、不確実な環境におけるスケジューリングに対する方法論の1つであり、この分野では今後ますます知識処理の応用が期待される。

#### 参考文献

- [1] 伊東, 岩田: フレキシブル生産システム, 日刊工業新聞社, 1984.
- [2] K. R. Baker, *Introduction to Sequencing and Scheduling*, John Wiley & Sons, New York, 1974.
- [3] F. A. Rodammer, and K. P. White, JR, A Recent Survey of Production Scheduling, *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 18, No.6, 1988, 841-851.
- [4] 中村, 鳩野, 田村: ルールベースに基づいたフレキシブル生産システムのスケジューリング, 計測自動制御学会論文集, Vol.23, No.1, 1987, 66-71.
- [5] J. H. Blackstone Jr., D. T. Phillips, and G. L. Hogg, A state-of-the-art Survey of Dispatching Rules for Manufacturing Job Shop Operations, *International Journal of Production Research*, Vol.20, No.1, 1982, 27-45.
- [6] S. Fujii, Y. Watanabe, and H. Sandoh, Optimal Rescheduling Policy Based on Real Time Disturbance Information, *Japan-USA Symposium on Flexible Automation*, Kyoto, Japan, 1990, 1147-1150.
- [7] 太田, 斎藤, 久村, 時間付きプレースをもつペトリネットの繰返し工程スケジューリング問題への応用 計測自動制御学会論文集, Vol.25, No.6, 1989, 714-716.
- [8] 斎藤, 太田, 久村, 処理時間に不確実性を有するスケジューリング問題への確率タイム・ペトリネットの応用, 計測自動制御学会論文集, Vol.25, No.4, 1989, 476-481.
- [9] M. S. Fox and S. F. Smith, ISIS—A Knowledge-based System for Factory Scheduling, *Expert Systems*, Vol.1, No.1, 1984, 25-49.
- [10] J. J. Kanet, Expert System in Production Scheduling, *European Journal of Operational Research*, Vol.29, No.1, 1987, 51-59.
- [11] A. Agnetis, C. Aribib, M. Lucertini, and F. Nicolo, Part Routing in Flexible Assembly Systems, *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol.6, No.6, 1990, 697-705.
- [12] P. R. Kumar and T. I. Seidman, Dynamic

- Instabilities and Stabilization Methods in Distributed Real-time Scheduling of Manufacturing Systems, *IEEE Trans. Automatic Control*, Vol.35, No.3, 1990, 289-298.
- [13] R. Akella, B. Krogh, and M. R. Singh, Efficient Computation of Coordinating Controls in Hierarchical Structures for Failure-Prone Multi-Cell Flexible Assembly Systems, *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol.6, No.6, 1990, 659-671.
- [14] B. B. P. Brandimarte, C. Greco, and Gi. Menga, Hybrid Hierarchical Scheduling and Control Systems in Manufacturing, *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol.6, No.6, 1990, 673-686.
- [15] J. Sharit and G. Salvendy, A Real-Time Interactive Computer Model of a Flexible manufacturing, *IIE Transactions*, Vol.19, No. 2, 1987, 167-177.
- [16] D. Ben-Arieh, and C. L. Moodie, Knowledge Based Routing and Sequencing for Discrete Part Production, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol.6, No.4, 1989, 287-307.
- [17] I. Hatono, K. Yamagata, and H. Tamura, Modeling and On-Line Scheduling of Flexible Manufacturing Systems Using Stochastic Petri Nets, *IEEE Trans. Software Engineering*, Vol.17, No.2, 1992, 126-131.
- [18] 鳩野, 山県, 田村, ルールベースを用いたフレキシブル生産システムのオンライン・スケジューリング, システム制御情報学会論文誌, Vol. 4, No. 9, 1991, 375-381.
- [19] M. A. Marsan, G. Conte and G. Balbo, A Class of Generalized Stochastic Petri Nets for the Performance Evaluation of Multiprocessor Systems, *ACM Trans. Computer Sys.*, Vol.2, No.2, 1984, 93-122.
- [20] F. Archetti and A. Sciomachen, Representation, Analysis and Simulation of Manufacturing Systems by Petri Net Based Models, *Proc. of IIASA Conference on Discrete Event Sopron, Hungary*, 1987, 162-178.
- [21] 計測自動制御学会編, (特集)分散と協調, 計測と制御, Vol.26, No.1, 1987.

### 報文集価格表 (会員価格)

T-73-1	ネットワーク構造を有するオペレーションズ・リサーチ問題の電算機処理に関する基礎研究	1200円
T-76-1	オペレーションズ・リサーチのためのデータとプログラムに関する研究	4000円
T-77-1	システムダイナミクス——方法論と適用例	2500円
R-79-1	「ORの実践とその有効活用」視察団報告	1200円
R-82-1	「欧州におけるOR実施状況」視察団報告書	1200円
R-84-1	「米国におけるORの実践」視察団報告	1200円
T-86-1	「南北協力の新しい戦略——マイクロ電子技術を起爆として——」	3500円
R-88-1	「南米諸国とのOR交流視察団」報告書	1200円