ホロニック生産システムにおけるリアルタイム スケジューリングに関する研究*

(第2報, システム状態の予測に基づく効用値の決定)

岩村 幸治^{*1}, 森下 大^{*2}
谷水 義隆^{*1}, 杉村 延広^{*1}

A Study on A Real-Time Scheduling of Holonic Manufacturing Systems (2nd Report, Determination of Effectiveness Values Based on Estimation of Future Status of HMS)

Koji IWAMURA^{*3}, Yutaka MORISHITA,
Yoshitaka TANIMIZU and Nobuhiro SUGIMURA

^{*3} Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University,
1-1 Gakuen cho, Sakai shi, Osaka, 599-8531 Japan

This paper deals with a real time scheduling system of HMS (Holonic Manufacturing System). A decision making process based on the effectiveness values have been proposed and applied to the real-time scheduling problems of the HMS in the previous report. New systematic methods for the individual holons are proposed, in the paper, to determine the effectiveness values based on the estimation of the future HMS status, aiming at improving the previous methods. Simulation based procedures are newly developed and implemented to estimate the future HMS status and to determine the effectiveness values. The effectiveness of the proposed methods are verified through the case studies.

Key Words: Holonic Manufacturing System, Decision Making Procedure, Real-Time Scheduling, Estimation of Future Status, Simulation

1. 緒 言

生産システムの構成要素が通信機能と意思決定機能を持ち、情報交換を行いながら自律的に生産プロセスを実行する自律分散型生産システム⁽¹⁾⁽⁴⁾の概念が提案されている。その中のひとつにホロニック生産システム (Holonic Manufacturing System) ⁽⁵⁾⁽⁶⁾がある。以下では、これを HMS と呼ぶ。

著者らは、HMS のリアルタイムスケジューリング手法について研究を行ってきた。これまでの研究⁽⁷⁾⁽¹¹⁾では、効用値に基づくホロンの意思決定プロセスを提案し、効用値を用いてリアルタイムスケジューリングを行うことで、ヒューリスティックルールを用いた従来のスケジューリング手法よりも、各ホロンの目的関数の値が全体として良くなることを示した。しかし、この手法では、各ホロンは次工程のみを考慮して効用値を決定しており、HMS の将来の状態を考えた時、必ずしも適切な効用値を求めているとは言えない。

そこで本研究では、各ホロンが HMS の将来の状態

を予測して効用値の決定を行う手法について検討する。本論文では、その第一段階として、ホロンが HMS の状態を正確に予測することができる場合について、予測に基づく効用値の決定方法を提案する。

自律分散型の生産システムにおける予測に基づくスケジューリングに関する研究として、山本は生産システム全体の稼働率を予測し、この予測を基に AGV の行動をリアルタイムに決定する手法を提案している⁽¹²⁾⁽¹³⁾。また、これにより、生産システム全体における各部品の目標生産比率を遵守する搬送スケジュールを実現している。これに対して、本研究は、機械加工プロセスを対象とし、各ホロンの目的関数の値を改善することを目的とする。

2. 予測に基づくホロンの意思決定プロセス

前報⁽⁹⁾では、ある時刻 t において加工プロセスが終了したホロンおよび待機状態にあるホロンが、次の加工プロセスのスケジュールを効用値に基づいて決定する手法を提案した。本論文では、HMS の状態の予測に基づいて効用値を求めるために、図 1 に示すように、以下の 5 つのプロセスからなる手順を提案する。このうち、(3)が新たに予測のために追加するプロセスである。

* 原稿受付 2004 年 4 月 8 日。

^{*1} 正員、大阪府立大学大学院工学研究科(〒599-8531 堺市学園町 1-1)。

^{*2} 学生員、大阪府立大学大学院工学研究科。

E-mail: iwamura@mecha.osakafu-u.ac.jp

(1) 各ホロンの状態の収集: 各ホロンは、時刻 t における他のホロンの状態に関する情報を収集する。すなわち、ジョブホロンは各リソースホロンが加工可能な加工プロセスを、リソースホロンは各ジョブホロンのまだ実行されていない加工プロセスを求める。

(2) 候補ホロンの選択: 各ホロンは、次の加工プロセスを実行するために候補となるホロンを求める。すなわち、ジョブホロンは、次の加工プロセスを加工することができるリソースホロンを求める。リソースホロンは、まだ実行されていない加工プロセスの中で実行することができる加工プロセスを求め、その加工プロセスを持つジョブホロンを候補とする。

(3) HMS の状態の予測: 各ホロンは、候補ホロンにある効用値を与えた場合について、HMS の将来の状態を予測する。この予測は、HMS のシミュレーションにより行う。この予測プロセスの詳細については、第3節に示す。

(4) 効用値の決定: 各ホロンは、(3)で予測した HMS の状態の内、自身の目的関数の値が最も良くなった HMS の状態に基づいて、候補ホロンの効用値を決定する。効用値は0から1の範囲で与え、目的関数を良くするために最も適する候補ホロンに、効用値1を与える。

(5) 協調: 各ホロンは、候補ホロンの効用値をコーディネーションホロンに送る。コーディネーションホロンは、各ホロンからの効用値に基づいて、次の加工プロセスを実行するためのリソースホロンとジョブホロンの組み合わせを決定する。この時、コーディネーションホロンは、効用値の和が最大となるリソースホロンとジョブホロンの組み合わせを求める。

以上の5つのプロセスを繰り返すことで、各ホロンは次に実行する加工プロセスを決定する。

3. HMS の状態の予測

3.1 予測を行うための前提条件 本研究では、HMS の構成要素であるリソースホロン、ジョブホロンおよびコーディネーションホロンの意思決定行動についてシミュレーションを行うことで、HMS の状態を予測する方法を考える。HMS において各ホロンは自身の意思決定基準に基づいて行動する。ジョブホロンとリソースホロンの意思決定基準は効用値の算出の方法であり、コーディネーションホロンの意思決定基準は協調の方法である。

本論文では、予測に基づく効用値の有効性を検証することを目的として、ホロンが HMS の状態を正確

Fig. 1 Real-time scheduling processes based on estimation of status

Fig. 2 Estimation of status of HMS by simulation

に予測することができる場合を考える。そのために、以下の仮定をおくことにより、問題を単純化する。

- (1) HMS において予測を行うホロンは一つである。
- (2) 他のホロンの意思決定基準を既知として予測する。

3.2 HMS の状態の予測 ホロンがシミュレーションを行うことにより、HMS の状態を予測する方法を図2に示す。ホロンは、次の加工プロセスの候補ホロンにある効用値を与えた場合に HMS の状態がどのように変化するかを、シミュレーションを行うことにより予測する。シミュレーションにおける HMS の状態変化を次のように定義する。

$$S(t) = (h_1(t), h_2(t), \dots, h_k(t)) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $h_1(t), h_2(t), \dots, h_k(t)$ は、シミュレーションにおいて、HMS に含まれるすべてのホロンの時刻 t における状態を表す。 $h_k(t)$ はホロン i について、以下の情報を含む。

- (1) 待機中であるか加工中であるかの情報。
- (2) 待機中の場合は待機が終了する予定時刻、加工中の場合は現在の加工プロセスが終了する予定時刻。
- (3) これまでに実行した加工プロセスの情報。
- (4) 目的関数の値。

シミュレーションの実行手順を以下に示す。このとき、シミュレーションの開始時刻を t_0 とする。また、シミュレーションを行うホロンを、以下では当該ホロンと呼ぶ。

STEP1: 効用値のパターンの生成

時刻 t_0 における HMS の状態 $S(t_0)$ を初期状態として、当該ホロンの次の加工プロセスを実行する際の候補ホロンを求め、各候補ホロンの効用値の組合せを生成する。この時、複数の候補ホロンに対してどのような効用値を与えるかについては、複数の組合せを考慮することができる。ここでは、候補ホロンに与える効用値の組合せを効用値のパターンと呼ぶ。効用値のパターンの数を制限するために、候補ホロンが一つの場合は効用値 1 を、複数の場合はその内の一つに効用値 1 を与え、その他の候補ホロンに対しては効用値 0 を与えることとする。すなわち、図 2 に示すように、時刻 t_0 においては n 個の候補ホロンに対して、 n 通りの効用値のパターンを生成する。

STEP2: 次の意思決定を行なう時刻 t_α ($\alpha=1, 2, \dots$) までのシミュレーション

STEP1 で生成した効用値のパターンについて、当該ホロンは次の意思決定が必要となる時刻 t_α までシミュレーションを行い、 t_α における HMS の状態 $S_\alpha(t_\alpha)$ を求める。この際、当該ホロン以外のホロンの意思決定基準は既知であるため、一つの効用値のパターンに対して、一つの状態が得られる。この結果、図 2 に示すように、 t_0 の状態から n 個の状態 $S_\alpha(t_\alpha)$ が生成される。

STEP3: 終了時刻 T までのシミュレーション

STEP2 で得られたすべての状態を初期状態として、STEP1 および STEP2 を繰り返すことにより、図 2 に示すように、当該ホロンが意思決定を行なう時刻($t_0, t_1, \dots$)において HMS の状態が分岐しながら、あらかじめ決められたシミュレーションの終了時刻 T における HMS の状態を得ることができる。すなわち、シミュレーションの結果として、当該ホロンは時刻 t_0 から T までにおける HMS のすべての可能な状態と効用値のパターンを得る。

3-3 シミュレーションの終了時刻 図 2 に示すシミュレーションでは、終了時刻 T の設定が重要となる。終了時刻 T を大きくすると HMS の状態の予測を長期間行うことにより適切な効用値を求めることができるが、計算時間が増大する。そのため、本研究では以下の3種類の終了時刻を考える。

(1) すべての生産プロセスの終了時刻: T_1

Fig. 3 Termination time for simulation

Table 1 Objectives and Objective functions of holons

Objectives		Objective functions
Resource Holon	Efficiency	$\Sigma \text{Machining Time} / \text{Total Time}$
	Machining Accuracy	$\Sigma (\text{Machining Accuracy of Resources} - \text{Required Machining Accuracy of Jobs})$
Job Holon	Total Processing Time	$\Sigma (\text{Machining Time} + \text{Waiting Time})$
	Machining Cost	$\Sigma (\text{Machining Cost of Resources})$

図 3 に示すように、すべての生産プロセスが終了する時刻 T_1 までシミュレーションを行う。この場合、ジョブホロン、リソースホロンのそれぞれにおいて、候補ホロンにある効用値を与えた場合の、時刻 T_1 における目的関数の値を、前報⁹⁾で提案した表 1 に示す目的関数により求めることができる。表 1 において、各目的関数における Σ は、生産プロセスが開始してから、すべての生産プロセスが終了する時刻までに、ホロンが実行した加工プロセスの回数に対して和をとることを意味する。

シミュレーションの終了時刻を T_1 とする場合、計算の負荷が大きくなるという問題がある。このため、以下の2つのシミュレーションの終了時刻を考える。

(2) t_0 から T_1 の間の終了時刻: T_2

リソースホロンについては、図 3 に示すように、 t_0 から T_1 の間の時刻 T_2 をシミュレーションの終了時刻とする。この時、時刻 T_2 における目的関数の値は、次式で求めることができる。

• 稼働率

$$\sum_{i=1}^n \text{Machining Time} / T_2 \dots \dots \dots (2)$$

• 加工精度

$$\sum_{i=1}^n (\text{Machining Accuracy of Resources} - \text{Required Machining Accuracy of Jobs}) \dots (3)$$

ここで、 i は、当該リソースホロンがシミュレーションを開始する時刻 t_0 までに実行した加工プロセスの

回数を表し, m は, 当該リソースホロンが時刻 t_0 から T_2 までに実行した加工プロセスの回数を表す.

(3) ジョブホロンの n 回目の加工プロセスの終了時刻: T_3

ジョブホロンについては, 図 3 に示すように, 当該ジョブホロンが n 回の加工プロセスを終了する時刻 T_3 をシミュレーションの終了時刻とする. この時, 時刻 T_3 における目的関数の値は, 次式で求めることができる.

- 加工時間

$$\sum_{i=1}^{1+n} (\text{Machining Time} + \text{Waiting Time}) \dots \dots \dots (4)$$

- 加工コスト

$$\sum_{i=1}^{1+n} (\text{Machining Cost of Resources}) \dots \dots \dots (5)$$

ここで, 1 は, 当該ジョブホロンが, シミュレーションを開始する時刻 t_0 までに実行した加工プロセスの回数を表す.

3.4 効用値の決定

シミュレーションの実行結果に基づいて, 当該ホロンが, 候補ホロンの効用値を決定する方法を説明する. 当該ホロンは, シミュレーションを実行した結果, 以下の情報を得る.

- (1) シミュレーションの終了時刻 T における, HMS のすべての可能な状態 $S(T)$ ($i=1, 2, \dots, p$).
- (2) 各 HMS の状態 $S(T)$ から得られる, 当該ホロンの目的関数の値 OFV_i .
- (3) すべての実行可能な効用値のパターンの順序.

最も目的関数の値を良くする HMS の状態 $S(T)_{OFV_{\max}}$ は, 以下の式により与えられる.

$$S(T)_{OFV_{\max}} = S(T) : OFV_i \geq OFV_j, (i \neq j) \dots \dots \dots (6)$$

以上のことから, 当該ホロンは, $S(T)_{OFV_{\max}}$ を得るために時刻 t_0 に候補ホロンに与えた効用値を, コーディネーションホロンに送る効用値とする.

4. ケーススタディ

本論文で提案する手法の有効性を検証するために, リアルタイムスケジューリングのケーススタディを行った. 対象とする HMS の構成は前報⁹⁾と同一である. すなわち, 10 台のマシニングセンタ (リソースホロン) を用いて 12 個の製品 (ジョブホロン) が生産されるケースを考える. ケーススタディの条件としては, 以下の組み合わせを考える.

- (1) ジョブホロンの加工工程: 2通り(Case1, 2)
- (2) リソースホロンの目的関数: 2通り(CaseA, B)

Fig. 4 Case study

- (3) リソースホロンの加工時間, 加工精度, 加工コストの組み合わせ: 3通り(Case①, ②, ③)

これらの組み合わせにより, 12 通りの条件を設定することができる. なお, ジョブホロンには, 加工工程数 (ジョブの生産に必要な加工プロセスの総数) が 4 工程のものと 6 工程のものを作成している.

予測を用いる意思決定プロセスの有効性を検証するために, 図 4 に示す手順でケーススタディを行う.

まず, 比較の対象として, すべてのホロンが予測を行わない従来の意思決定プロセスを実行してリアルタイムスケジューリングを行う. 次に, 10 個のリソースホロンおよび, 12 個のジョブホロンのそれぞれについて, 一つのホロンが予測に基づく意思決定プロセスを実行し, 他のホロンが従来の意思決定プロセスを実行して, リアルタイムスケジューリングを行う. これにより一つの条件について 22 個のスケジュールが得られる. このスケジュールに基づいて, 各ホロンの目的関数の値が, 予測を用いた場合にどの程度改善されるかを検討する.

はじめに, 予測を用いるホロンが, すべての生産プロセスが終了する時刻 T_1 までシミュレーションを行う場合について考える.

スケジューリングの結果の一例を, 図 5(a)および(b)に, ガントチャートの形で示す. 同図(a)はすべてのホロンが従来の意思決定プロセスを実行することによりスケジューリングを行った結果を示し, 同図(b)は Job5 のみが予測を用いた意思決定プロセスを実行してスケジューリングを行った結果を示す. Job5 が予測を用いた意思決定プロセスを実行することで, 自身の加工プロセスを終了するまでの時間を短縮できていることがわかる.

図 6 に 12 の条件のケーススタディに対して比較を行った結果を示す. 図 6 の横軸は各ホロンの目的関数

を、縦軸は予測を用いることにより目的関数の値が改善したホロンの数を示す。図6より、すべての目的関数において、予測を用いることにより、各ホロンが目的関数の値を改善している事がわかる。

つぎに、シミュレーションの終了時刻と予測の効果との関係を検討する。そのために、リソースホロンについては、あらかじめ定められた時刻 T_2 まで、ジョブホロンについては、ある回数の加工プロセスを終了する時刻 T_3 までシミュレーションを行う。

すべての加工プロセスが終了する時刻 T_1 まで予測する場合を基準とし、 T_2 もしくは T_3 まで予測する場合の目的関数の値を達成率と呼ぶ。達成率は、リソースホロンおよびジョブホロンに対して、以下のようになる。

- (1) リソースホロンの稼働率の達成率

$$X = \text{OFV}_{T_2} / \text{OFV}_{T_1} \quad (7)$$

- (2) リソースホロンの加工精度の達成率

$$X = \text{OFV}_{T_1} / \text{OFV}_{T_2} \quad (8)$$

- (3) ジョブホロンの加工時間、加工コストの達成率

$$X = \text{OFV}_{T_1} / \text{OFV}_{T_3} \quad (9)$$

ここで、 OFV_T は、 T まで予測を行った場合の目的関数の値を示す。また、式(8)および(9)の達成率は、値が小さいほど目的関数は良好になるため、分母が T_2 もしくは T_3 まで予測する場合の値としている。さらに、各ホロンの達成率の平均を、平均達成率 Y と呼び、次式で定める。

$$Y = \sum_{i=1}^N X_i / N \quad (10)$$

ここで、 X_i はホロン i の達成率、 N はホロンの総数である。リソースホロンについて、シミュレーションによる予測の終了時刻 T_2 と達成率との関係をまとめると図7のようになる。図中の横軸 t は、ジョブホロンの各加工工程における加工時間の平均値である。シミュレーションによる予測を終了する時刻は、この t を基準にして 0 から $7t$ まで変化させている。また、すべての加工プロセスの終了時刻は、生成されるスケジュールにより異なり、今回のケーススタディにおける加工プロセスの終了時刻は、 $8t$ から $10t$ の範囲になっている。図7(a)および(b)は、それぞれ目的関数が稼働率および加工精度の場合の達成率を示している。いずれの場合についても、予測する時間を長くすると達成率は増加している。また、達成率が95%となる予

(a) Previous method

(b) New method based on estimation

Fig. 5 Gantt chart of scheduling results

Fig. 6 Results of case study

測期間は、 $7t$ から $8t$ となっている。すなわち、リソースホロンの場合には、シミュレーションをほぼすべての加工プロセスが終了する時刻まで行わないと、高い予測の効果が得られないことを示している。

図8は、ジョブホロンの達成率をまとめたものである。同図(a)および(b)は、それぞれ加工工程数が4工程

および6工程のジョブホロンについてまとめたものである。いずれの場合についても、予測する期間を長くすると達成率が上昇しており、総工程数の半分程度まで予測すれば、95%以上の達成率を得ることができる。ジョブホロンの場合には、リソースホロンの場合と比較して、短い予測期間で高い効果が得られることを示している。

5. 結 言

本研究では、HMS におけるリアルタイムスケジューリングにおいて、各ホロンが予測に基づいて効用値を決定する手法を提案した。内容をまとめると以下のようになる。

- (1) 従来のリアルタイムスケジューリングの意思決定プロセスを拡張し、シミュレーションを用いた予測に基づくホロンの意思決定プロセスを提案した。
- (2) 各ホロンが、シミュレーションを行うことにより、HMS の将来の状態を予測する方法を提案した。
- (3) ホロンが正確に HMS の状態を予測できる状況において、予測を用いたリアルタイムスケジューリングのケーススタディを行った。この結果、予測を用いて効用値を求めることにより、目的関数の値を改善することができた。
- (4) シミュレーションを用いた予測期間が、各ホロンの目的関数に与える影響を検討し、予測期間を長くすると、目的関数の値が改善されることを示した。

参考文献

- (1) 森, 他 2 名, 電気学会論文誌, 104-12, C(1984), 303-311.
- (2) 湯浅・伊藤, 計測自動制御学会論文集, 25-12(1989), 93-100.
- (3) 森脇, 他 3 名, 機論, 58-549, C(1992), 1674-1679.
- (4) 森脇, 他 4 名, 機論, 59-568, C(1993), 3976-3981.
- (5) 樋野・森脇, 機論, 67-658, C(2001), 2063-2069.
- (6) 杉村, 他 2 名, 機論, 65-633, C(1999), 2129-2134.
- (7) SUYOTO, 他 2 名, 機論, 66-645, C(2000), 1718-1723.
- (8) K. Iwamura et al., Japan-USA Symposium on Flexible Automation (2002), 967-970.
- (9) 岩村, 他 2 名, 機論, 69-682, C(2003), 1733-1738.
- (10) K. Iwamura et al., 7th World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics (2003), Vol. 8, 261-266.
- (11) K. Iwamura et al., 5th International Conference on Design of International Infrastructure Systems for Manufacturing, (2002), 3-14.
- (12) 山本, 機論, 65-631, C(1999), 1281-1287.
- (13) 山本, 機論, 66-644, C(2000), 1388-1393.

(a) Efficiency

(b) Machining accuracy

Fig. 7 Effects of simulation time (Resource holon)

(a) Job holons with 4 machining processes

(b) Job holons with 6 machining processes

Fig. 8 Effects of simulation time (Job holon)