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4報, ホロンとシステム全体の多目的最適化プロセス)

岩村 幸治^{*1}, 関 陽太^{*2}
谷 水 義 隆^{*1}, 杉 村 延 広^{*1}

A Study on Real-Time Scheduling of Holonic Manufacturing Systems (4th Report, Multi-objective Optimization Process for Individual Holons and Whole HMSs)

Koji IWAMURA^{*3}, Yota SEKI,
Yoshitaka TANIMIZU and Nobuhiro SUGIMURA

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

This paper deals with a real-time scheduling system of HMSs (Holonic Manufacturing Systems). A scheduling process based on the utility values have been proposed and applied to the real-time scheduling problems of the HMSs in the previous report. It was shown that the proposed methods generate suitable schedules from the view point of the objective functions of the individual holons in the HMSs. A new real-time scheduling method is proposed, in the paper, to consider both the objective functions of the individual holons and the whole HMSs. In this method, all the pareto optimal combinations of the resource holons and the job holons are generated based on the objective function values of the individual holons. Following this, a most suitable combination is selected from the pareto optimal ones, based on the objective functions of the whole HMSs, such as total make span and total tardiness. It is shown, through case studies, that the proposed method is effective to improve the production schedules from the viewpoint of the objective functions of the whole HMSs in comparison with the previous method.

Key Words: Holonic Manufacturing Systems, Real-time Scheduling, Multi-objective Optimization, Coordination

1. 結 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⁾⁽²⁾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 Systems) ⁽³⁾⁽⁴⁾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ている。本一連の研究⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾では、HMSをジョブホロン、リソースホロンおよびコーディネーションホロンの3種類のホロンから構成し、効用値に基づくリアルタイムスケジューリン

グ手法を提案した。ここで、ジョブホロンおよびリソースホロンは、HMSで加工される製品およびHMSに含まれる加工機械を表す。コーディネーションホロンは、効用値に基づいて次の加工プロセスを実行する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ホロンを表す。以下、単にホロンと呼ぶ場合は、ジョブホロンおよびリソースホロンを示す。

これまでの研究⁽¹⁾において、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、従来のディスパッチングルールを用いたスケジューリング手法⁽⁴⁾と比較して、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、個々のホロンが自身の目的関数に基づいて適切な加工プロセスを決定することができるが、生産システム全体の目的関数を考慮することができないため、総納期遅れや総処理時間といった生産システム全体の評価指標の観点からは問題を残している。

* 原稿受付 2005年5月2日。

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

^{*2} 学生員、大阪府立大学大学院工学研究科。

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

そこで本研究では、個々のホロンの目的関数と生産システム全体の目的関数を同時に考慮することで、両者の評価指標の観点から適切なスケジュールを生成することができる新しいリアルタイムスケジューリング手法を提案する。

複数の目的関数を考慮した自律分散型のスケジューリング問題の研究として、貝原らは相互選択を基本とする契約ネットプロトコルをベースとしたスケジューリングプロトコルを提案している⁽¹⁵⁾。この研究は、生産システム全体の目的関数を最適化することを目的としており、この手法により全ジョブの平均リードタイムの最小化と、システムスループットの最大化を満たすスケジュールを実現している。

これに対して、本研究は、生産システムの構成要素である個々のホロンと、生産システム全体の目的関数を同時に考慮することができるシステムの開発を目的とする。

2 リアルタイムスケジューリングプロセス

2.1 決定手順 これまでの研究⁽¹¹⁾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、各ホロンおよび、生産システム全体の目的関数を考慮して、次の加工プロセスのスケジュールを求めるために、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)~(5)が本研究で新たに提案するプロセスである。

(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。この時、候補ホロンは、必ずしも待機中でなくても現在実行中の加工を終了したのちに加工プロセスを実行することができるホロンでよい。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

Fig.1 Real-time scheduling processes proposed for optimization of individual holons and whole HMSs

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) 目的関数の評価値の算出

各ホロンは、次の加工プロセスを実行するために、(2)で求めた候補ホロンを選択した場合、または、次の加工プロセスを実行せずに待機する場合の目的関数の評価値を求める。各ホロンの目的関数の評価値については、第2.2節に示す。

(4) 全てのパレート最適解の生成

各ホロンは、候補ホロンの目的関数の評価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、各ホロンからの目的関数の評価値に基づいて、全てのパレート最適解であ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。この組み合わせを求める手順は、第3.1節に示す。

(5) 次の加工の組み合わせの決定

コーディネーションホロンは、(4)で求めた全てのパレート最適解であるリソースホロンとジョブホロンの組み合わせから、生産システム全体の目的関数に基づいて、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。この組み合わせを求める手順については、第3.2節に示す。

ここで、コーディネーションホロンは、あらかじめ設定した時間間隔 ΔT ごとに起動し、次の ΔT の間に伝達されてくる目的関数の評価値を待つ。この時、目的関数の評価値を伝達するホロンがなければ、待機状態にあるホロンはないと考え、処理は行わない。これに対して、目的関数の評価値が伝達された場合には、待機中のホロンがあると判断し、パレート最適解の決定およびパレート最

適解の中からひとつの解の選択を行い、次に加工作業を実行すべきジョブホロンとリソースホロンの組み合わせを決定する。

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。

2.2 ホロンの目的関数の評価 これまでの研究⁽¹⁾により、リソースホロンおよびジョブホロンの目的関数として、表1に示す4つの目的関数を提案している。また、これまでの研究⁽¹⁾に従いリアルタイムスケジューリングの観点からジョブホロン、およびリソースホロンが持つ情報を以下にまとめる。まず、ジョブホロン i ($i = 1, 2, \dots, \alpha$) が持つ加工プロセスの情報は次の通りである。

M_k : ジョブ i の k 番目の加工プロセス ($k = 1, 2, \dots, \beta$).
 AC_k : 加工プロセス M_k の要求精度。ただし、精度は、低精度、中精度、高精度の3つのレベルに分け、それぞれ1, 2, 3の整数値で表す。

R_{km} : 加工プロセス M_k を行うことができる候補リソースホロン ($m = 1, 2, \dots, \gamma$).

T_{km} : 加工プロセス M_k をリソースホロン R_{km} で実行する場合の加工時間。

また、リソースホロン R_{km} の持つ情報は次の通りである。

MAC_{km} : 加工プロセス M_k をリソースホロン R_{km} で実行する場合の加工可能精度。 AC_k と同様に、1, 2, 3の整数値で表す。

MCO_{km} : 加工プロセス M_k をリソースホロン R_{km} で実行する場合の加工コスト。

以下、これらの情報に基づいて目的関数の評価値を求める手法を示す。まず、リソースホロン j の場合を考える。現在時刻 t において、リソースホロンが稼働を開始してから時間を $TT_{j,t}$ 、稼働率を $ME_{j,t}$ とする。この時、次の加工プロセスの候補として、ジョブホロン i の加工プロセス M_k を選択した場合を考える。ただし、リソースホロン j は、 M_k を加工できるとする ($j = R_{km}$)。この場合、稼働率の評価値を次式で定める。

$$ME_{j,t+1}(i) = -(ME_{j,t} \cdot TT_{j,t} + T_{km}) / (TT_{j,t} + T_{km} + W_t) \dots (1)$$

ここで、 W_t は、ジョブホロン i が加工中の場合、その加工が終了するまでの待ち時間である。また、負号を与えることにより、他の目的関数と同じように最小値を最良とする。

また、現在時刻 t において、リソースホロン j が稼働を開始してからこれまで実行した加工プロセスの加

Table 1 Objective functions of holons

Objective functions		Objective function values
Resource Holon	Efficiency	Σ Machining Time / Total Time
	Machining Accuracy	Σ (Machining Accuracy of Resources - Required Machining Accuracy of Jobs)
Job Holon	Flow-time	Σ (Machining Time + Waiting Time)
	Machining Cost	Σ (Machining Cost of Resources)

工精度の評価値を $MA_{j,t}$ として、加工精度の評価値を次式で定める。

$$MA_{j,t+1}(i) = MA_{j,t} + (MAC_{km} - AC_k) \dots (2)$$

リソースホロン j が次の加工プロセスを実行せずに待機する場合の稼働率、および加工精度の評価値を以下のように定める。

$$ME_{j,t+1}(0) = \max_{i=1, \dots, \delta} \{ ME_{j,t+1}(i) \} \dots (3)$$

$$MA_{j,t+1}(0) = \max_{i=1, \dots, \delta} \{ MA_{j,t+1}(i) \} \dots (4)$$

ここで、 δ は、リソースホロン j が次の加工プロセスを加工することができる候補ジョブホロン i の数である。(3)式、(4)式は、待機する場合の目的関数の評価値を、最も目的関数の評価値が悪くなる候補ホロンを選択した場合と同じ値にすることを意味する。

次に、ジョブホロン i の場合を考える。現在時刻 t において、ジョブホロンが生産システムに投入されてからの経過時間を $JT_{i,t}$ とする。この時、次の加工プロセス M_k を加工するために候補リソースホロン j ($= R_{km}$) を選択する場合、滞留時間の評価値を次式で定める。

$$JT_{i,t+1}(j) = JT_{i,t} + T_{km} + W_{km} \dots (5)$$

ここで、 W_{km} は、リソースホロン j が加工中の場合、その加工が終了するまでの待ち時間である。

また、現在時刻 t において、ジョブホロン i が生産システムに投入されてからの加工コストの合計を $JC_{i,t}$ として、加工コストの評価値を次式で定める。

$$JC_{i,t+1}(j) = JC_{i,t} + MCO_{km} \dots (6)$$

ジョブホロン i が次の加工プロセスを実行せずに待機する場合の滞留時間、および加工コストの評価値を以下のように定める。

$$JT_{i,t+1}(0) = \max_{j=1, \dots, \gamma} \{ JT_{i,t+1}(j) \} \dots (7)$$

$$JC_{i,t+1}(0) = \max_{j=1, \dots, \gamma} \{ JC_{i,t+1}(j) \} \dots (8)$$

Table2 Objective function values of job holons and resource holons

	wait	Resource 1	...	Resource ε	...	Resource μ
wait		$ROF_i(0)$	...	$ROF_i(0)$		
Job 1	$JO F_i(0)$	$ROF_i(1)$	...	$ROF_i(1)$	...	$JO F_i(\mu)$
...	...	...	...	...	...	...
Job ζ	$JO F_i(0)$	$ROF_i(\zeta)$	...	$ROF_i(\zeta)$	...	$JO F_i(\mu)$
...	...	...	...	...	...	...
Job λ		$ROF_i(\lambda)$	...	$ROF_i(\lambda)$		

ここで、 γ は、ジョブホロン i の次の加工プロセス M_k を加工することができる候補リソースホロン j の数である。(7)式、(8)式は、待機する場合の目的関数の評価値を、最も目的関数の評価値が悪くなる候補ホロンを選択した場合と同じ値にすることを意味する。

3. 多目的最適化問題としてのホロンの協調

3-1 パレート最適解であるホロンの組み合わせ
各ホロンが目的関数の評価値を求めた後、コーディネーションホロンは各ホロンから得られた目的関数の評価値に基づいて、全てのパレート最適解であ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ことが必要となる。すなわち、全てのホロンの目的関数を考慮して、そのパレート最適解となるジョブホロンとリソースホロンの組み合わせを求める。

各ホロンの候補ホロンに対する目的関数の評価値は、表2で表現することができる。ここで、 $JO F_i(j)$ 、 $ROF_j(i)$ は、ジョブホロン i およびリソースホロン j の次のスケジュールに対する目的関数の評価値であり、目的関数の種類によりそれぞれ以下の式で与える。

$$JO F_i(j) = JT_{i+j}(j) \text{ or } JC_{i+j}(j) \quad (9)$$

$$ROF_j(i) = ME_{j+i}(i) \text{ or } MA_{j+i}(i) \quad (10)$$

なお、表2の ζ および ε は、現在、待機状態にあり次の加工プロセスを求めるジョブホロンおよびリソースホロンの総数を表し、 λ および μ は、それらの候補ホロンとなるジョブホロンおよびリソースホロンの総数を表す。

これらのジョブホロンとリソースホロンの組み合わせを、表3に示すように、行列 $A = \{a_{ij} | (i=0, 1, \dots, \lambda,$

Table3 Combination of job holons and resource holons

	wait	Resource 1	...	Resource ε	...	Resource μ
wait		a_{01}	...	$a_{0\varepsilon}$		
Job 1	a_{10}	a_{11}	...	$a_{1\varepsilon}$	...	$a_{1\mu}$
...	...	...	...	...	...	...
Job ζ	$a_{\zeta 0}$	$a_{\zeta 1}$	...	$a_{\zeta \varepsilon}$	...	$a_{\zeta \mu}$
...	...	...	...	...	...	...
Job λ		$a_{\lambda 1}$	...	$a_{\lambda \varepsilon}$		

$j=0, 1, \dots, \mu\}$ で表す。ここで、待機状態にあるジョブホロン $i (i=1, 2, \dots, \zeta)$ について、 $a_{ij}=1 (j=1, 2, \dots, \mu)$ のときリソースホロン j で加工することを、 $a_{ij}=0$ のとき、そうでないことを示す。また、 $a_{00}=1$ のとき、ジョブホロン i が待機することを、 $a_{00}=0$ はそうでないことをそれぞれ示す。同様に、待機状態にあるリソースホロン $j (j=1, 2, \dots, \varepsilon)$ について、 $a_{ij}=1 (i=1, 2, \dots, \lambda)$ のときジョブホロン i を加工することを、 $a_{ij}=0$ のとき、そうでないことを示す。また、 $a_{ij}=1$ のとき、リソースホロン j が待機することを、 $a_{ij}=0$ はそうでないことをそれぞれ示す。この時、各リソースホロンは同時に1つしかジョブホロンの加工プロセスを実行できないことから、以下の制約条件を満たすことが必要になる。

$$\sum_{j=0}^{\mu} a_{ij} = 1 \quad i=1, 2, \dots, \zeta \quad (11)$$

$$\sum_{i=0}^{\lambda} a_{ij} = 1 \quad j=1, 2, \dots, \varepsilon \quad (12)$$

この時、現在、待機状態にあり次の加工プロセスを求めるジョブホロン $i (i=1, 2, \dots, \zeta)$ およびリソースホロン $j (j=1, 2, \dots, \varepsilon)$ の目的関数の評価値 x_{ji} (A) および x_{Rj} (A) は次式となる。

$$x_{J_i}(A) = \sum_{j=0}^{\mu} a_j \cdot JOF_j(j) \dots\dots\dots (13)$$

$$x_{R_i}(A) = \sum_{i=0}^{\lambda} a_i \cdot ROF_i(i) \dots\dots\dots (14)$$

この時、これらの全てのホロンの目的関数を考慮した多目的最適化問題の目的関数は、次のベクトルで表現することができる。

$$\text{minimize } \bar{X}(A)$$

$$\bar{X}(A) = [x_{J_1}(A), \dots, x_{J_{\zeta}}(A), x_{R_1}(A), \dots, x_{R_{\epsilon}}(A)] \dots\dots\dots (15)$$

この問題において、ある候補解 A^* に対して、以下の式を満たす A が存在しないとき、 A^* がパレート最適解であるジョブホロンとリソースホロンの組み合わせである。

$$x_p(A) \leq x_p(A^*) \text{ for all } p, p = J_h, \dots, J_{\zeta}, R_h, \dots, R_{\epsilon} \dots\dots\dots (16)$$

$$x_q(A) < x_q(A^*) \text{ for any } q, q = J_h, \dots, J_{\zeta}, R_h, \dots, R_{\epsilon} \dots\dots\dots (17)$$

ここで、(16)式は、 $\zeta + \epsilon$ 個の全てのホロンの目的関数の評価値に対して不等号の関係を表す式である。また、(17)式は、 $\zeta + \epsilon$ 個の内一つ以上のホロンの目的関数の評価値に対して不等号の関係を表す式である。上記2つの式を満足する解がパレート最適解となる。

コーディネーションホロンは、はじめに(11)式および(12)式を満たす、全てのリソースホロンとジョブホロンの組み合わせとなる集合 $\{A\}$ を求める。次に集合 $\{A\}$ から、(16)式、(17)式に基づいて、全てのパレート最適解であるホロンの組み合わせの集合を求める。

3.2 次の加工の組み合わせの決定 コーディネーションホロンは、全てのパレート最適解であるリソースホロンとジョブホロンの組み合わせの集合から、生産システム全体の目的関数に基づいて、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。

本研究では、生産システム全体の目的関数として、総納期遅れ、および総処理時間の最小化を考える。しかし、これらの最小化問題をリアルタイムスケジューリング手法で直接解くことはできない。そのため、これらの目的関数に対して、適切と考えることができる以下の2つの評価指標を考える。これらの評価指標は、従来スケジューリング問題に適用されているディスパッチングルールより定めている。

(1) 納期余裕の和

総納期遅れ最小化の観点から、以下の納期余裕の和を評価指標の一つとする。

$$SLACK = \sum_{i=1}^{\lambda} (d_i - t - TWKR_i) \dots\dots\dots (18)$$

ここで、 d_i および t は、ジョブホロン i の納期、および現在の時刻をそれぞれ表す。 $TWKR_i$ はジョブホロン i が残りの加工プロセスを終了するのに必要な加工時間の平均値であり、以下の式で与える。

$$TWKR_i = \sum_{k=\zeta+1}^{\beta} \left(\sum_{m=1}^{\gamma} T_{km} / \gamma \right) \dots\dots\dots (19)$$

ここで、 T_{km} はジョブホロン i の k 番目の加工プロセスを候補リソースホロン m ($m = 1, 2, \dots, \gamma$) で加工する場合の加工時間である。また、 β および ζ は、ジョブホロン i の加工プロセスの総数、およびジョブホロン i が現在の時刻 t までに完了した加工プロセスの数を表す。

(2) 次の加工時間と残りの加工時間の比率の和

総処理時間最小化の観点から、以下に示す次の加工時間と残りの加工時間の比率の和を評価指標とする。

$$PT/TWKR = \sum_{i=1}^{\lambda} T_{k(\zeta+1)m} / TWKR_i \dots\dots\dots (20)$$

ここで、 $T_{k(\zeta+1)m}$ はジョブホロン i の次の加工プロセスの加工時間である。

コーディネーションホロンは、まず、全てのパレート最適解であるリソースホロンとジョブホロンの組み合わせについて、 $SLACK$ または、 $PT/TWKR$ の値を求める。つぎに、 $SLACK$ または、 $PT/TWKR$ の値が最も小さくなるリソースホロンとジョブホロンの組み合わせを、次の加工プロセスを実行するためのホロンの組み合わせとして決定する。

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。対象とする生産設備として、マシニングセンタ10台を持つ生産システムを考える。また生産対象として、それぞれ加工プロセスの異なる6種類の製品を4ロットずつ生産することとした。リソースホロンの加工時間 T_{km} 、加工精度 MAC_{km} 、加工コスト MCO_{km} がそれぞれ異なる8通りの条件について、従来のディスパッチングルールを用いた手法⁽¹⁴⁾、効用値に基づく

手法⁽¹⁾、および提案する手法を用いてリアルタイムスケジューリングを行った。

従来のディスパッチングルールを用いた手法は、総処理時間および総納期遅れを最小にするために有効と考えられているディスパッチングルールを用いるものである。その処理手順を以下に示す。

(1) ジョブホロンの選択

ジョブホロンは、SPTルールを用いて、適切なリソースホロンを選択する。

(2) 競合が生じたリソースホロンの選択

複数のジョブホロンから選択されたリソースホロンは、競合を解消するためにルールを用いて適切なジョブホロンを選択する。この際、生産システム全体の目的関数が総処理時間の場合にはSPT/TWKRルールを、総納期遅れの場合にはSLACKルールを用いる。

以上の2つのプロセスを、競合するリソースがなくなるまで繰り返すことにより、次の加工プロセスを実行するジョブホロンとリソースホロンの組み合わせを決める。

図2(a)から(c)はガントチャートを示し、ディスパッチングルールによる手法、効用値による手法および本論文で提案した手法を総処理時間の観点から比較した結果の一例である。この図から明らかなように、総処理時間の観点からは、ディスパッチングルール、提案手法および従来の効用値の手法の順に有効である。また、複数のケースについてケーススタディを行い、総納期遅れおよび総処理時間の平均値を比較した結果を図3に示す。同図(a)および(b)は、生産システム全体の目的関数が総納期遅れの場合および総処理時間の場合を示す。この結果からも、提案した手法は、従来の効用値による手法に対して生産システム全体の目的関数を改善することはできているが、ディスパッチングルールによる結果のレベルには到達していない。

次に、個々のホロンの目的関数の値を複数のケーススタディについて比較した結果を図4にまとめる。同図からも明らかなように、個々のホロンの目的関数の値の観点から性能を比較すると、従来の効用値による手法、提案手法、ディスパッチングルールの順になる。

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関して、個々のホロンと生産システム全体の目的関数を同時に考慮することができる手法を提案した。内容をまとめると以下ようになる。

(a) Based on dispatching rule

(b) Based on utility values

(c) Based on proposed method

Fig.2 Gantt chart of scheduling results

- (1) 従来の効用値に基づくリアルタイムスケジューリングプロセスを拡張し、各ホロンとシステム全体の目的関数を考慮することができるリアルタイムスケジューリング手法を提案した。
- (2) ホロンの協調を多目的最適化問題として定式化することにより、次の加工を行うためのパレート最適解であるリソースホロンとジョブホロンの組み合わせを定義した。またパレート最適解である組み合わせの集合から、生産システム全体の目的関数とその評価指標に基づいて、適切な組み合わせを選択する手法を提案した。
- (3) 提案したリアルタイムスケジューリング手法を用いたケーススタディを行った。この結果、従来の効用値に基づくスケジューリング手法と比較して、個々のホロンの目的関数の値を同等に保持したまま、生産システム全体の目的関数の値を改善することができることを示した。

□ Dispatching rule based method ■ Utility value based method ■ Proposed method

(a) Objective functions of HMSs = Total tardiness

(b) Objective functions of HMSs = Total make span

Fig.3 Comparison of objective function values of whole HMSs

□ Dispatching rule based method ■ Utility value based method ■ Proposed method

(a) Objective functions of HMSs = Total tardiness

(b) Objective functions of HMSs = Total make span

Fig.4 Comparison of objective function values of individual holons

参考文献

- (1) Mori, K. et al., Autonomous Decentralization Concept, *Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan, Publication of Electronics, Information and Systems Society*, Vol.104, No.12, (1984), pp.303-311.
- (2) Yuasa, H. and Ito, M., A Theory on Structures of Decentralized Autonomous Systems, *Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers*, Vol.25, No.12, (1989), pp.1355-1362.
- (3) Moriwaki, T. et al., Design and Management of Autonomous Distributed Manufacturing System (Modeling and Application to Production Scheduling), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.58, No.549, (1992), pp.1674-1679.
- (4) Moriwaki, T. et al., Design and Management of Autonomous Distributed Manufacturing Systems (2nd Report, Application to Scheduling Problems Considering Unscheduled Disruptions), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.59, No.568, (1993), pp.3976-3981.
- (5) Hino, R. and Moriwaki, T., Proposal of Holonic Manufacturing System Concept, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.67, No.658, (2001), pp.2063-2069.
- (6) Izawa, H. et al., Development of a Holonic Assembly System (1st Report) -System Architecture and Assembly Execution-, *Journal of the Japan Society of Precision Engineering*, Vol.70, No.3, (2004), pp.368-373.
- (7) Maeda, Y. et al., Development of a Holonic Assembly System (2nd Report) -Implementation of Plug & Produce-, *Journal of the Japan Society of Precision Engineering*, Vol.70, No.4, (2004), pp.506-511.
- (8) Sugimura, N. et al., Study on Process Planning System for Holonic Manufacturing (1st Report, System Architecture and Recognition of Machining Feature), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.65, No.633, (1999), pp.2129-2134.
- (9) Rais, S. et al., Study on Process Planning System for Holonic Manufacturing (2nd Report, Selection of Machining Sequences and Sequences of Machining Equipment), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.66, No.645, (2000), pp.1718-1723.
- (10) Sugimura, N. et al., Study on Process Planning System for Holonic Manufacturing (3rd Report, Process Planning Considering Machining Schedules), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.70, No.696, (2004), pp.2469-2475.
- (11) Iwamura, K. et al., A Study on A Real-Time Scheduling of Holonic Manufacturing Systems (1st Report, Decision Making Processes Based on Effectiveness Values), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.69, No.682, (2003), pp.1733-1738.
- (12) Iwamura, K. et al., 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), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.70, No.700, (2004), pp.3625-3630.
- (13) Iwamura, K. et al., A Study on Real-Time Scheduling of Holonic Manufacturing Systems (3rd Report, Modeling of Decision Criteria of Utility Values for Estimation of Future Status of HMS), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, to be published.
- (14) Sugimura, N. et al., A Study on Real-time Scheduling for Holonic Manufacturing System, *CIRP Journal of Manufacturing Systems*, Vol.33, No.5, (2004), pp.467-475.
- (15) Kaihira, T. and Fujii, S., A Study on Mutual Selection Scheduling under Multi-Purpose Environment, *Transactions of the Institute of Systems, Control and Information Engineers*, Vol.12, No.9, (1999), pp.531-539.