2 機械フローショップ形 FMS における工具配分法*

(第 4 報, ジョブの加工要素間の先行関係を考慮した機能分散形の場合)

平林直樹^{*1}, 長沢啓行^{*1}, 西山徳幸^{*1}

A Method for Distributing Tools in 2-Machine Flowshop-Type FMS (4th Report, A Case of Partly Separated Functional FMS with Precedence Constraints on Job Operations)

Naoki HIRABAYASHI, Hiroyuki NAGASAWA and Noriyuki NISHIYAMA

A method for distributing tools to each machine in a 2-machine flowshop-type FMS with duplicated tools is proposed when there are precedence constraints on job operations. The duplicated tools are selected according to the from-to chart which represents the technical precedence constraints on the tools. Some simulation results show that the proposed method is effective for increasing the utilization of the FMS, especially when the utilization of the completely separated functional FMS is low.

Key Words: Flexible Manufacturing System, Distribution of Tools, Precedence Constraints

1. 緒 言

FMS は現存する最も高度な自動生産設備であり, その主な構成要素であるマシニング・センタへの工具配分は重要な課題である。従来の工具配分法の多くは並列システムに対するものであり⁽¹⁾⁽²⁾, 個々のジョブが複数のマシニング・センタで加工される場合の工具配分法は数少ない。前報では, 完全機能分散形の 2 機械フローショップ形 FMS を対象とし, 現実的な加工要素間の先行関係を考慮した稼働率最大化のヒューリスティックな工具配分法を提案した⁽³⁾。この提案法によれば, ジョブ種類数が大きく工具利用回数に偏りがない場合には全機能形 FMS と同程度の高い稼働率が得られる。しかし, ジョブ種類数が 10 程度に小さく, ジョブの加工に必要な工具の本数が, ジョブによって偏っている場合には稼働率が低くなる欠点が残された。

本報では, これを解決するため, マシニング・センタ間で工具を重複配分させる機能分散形の 2 機械フローショップ形 FMS を対象に, ジョブの加工要素間の先

行関係を考慮した場合の稼働率最大化のヒューリスティックな工具配分法を提案する。シミュレーション実験により, 提案法による稼働率と全機能形 FMS の稼働率とを比較し, 提案法が有効となる条件を明らかにする。

2. 工 具 配 分 法

2.1 工具配分の考え方 機能分散形の工具配分法は, ジョブの加工要素間に先行関係が存在しない場合と同様に, 重複工具の選定法および重複工具によって加工されるジョブの加工要素の割付け法の二つからなる。まず, 完全機能分散形 FMS に対する工具配分法により, 各マシニング・センタ (MC) への工具配分ならびにジョブの加工要素の割付けの初期状態を生成する。この状態から, 重複工具を選び, 重複工具で加工されるジョブの加工要素の割付けを変更し, 稼働率を改善していく。

重複工具を選定する際には, ジョブの加工要素間の先行関係, したがって, 対応する工具の先行関係を考慮しなければならない。例えば, 6 本の工具 (T1~T6) で加工されるジョブ J があり, 工具の間には T1 → T2 → T3 → T4 → T5 → T6 の先行関係があるものとする。また, 完全機能分散形の工具配分により T1, T2,

* 原稿受付 平 3 年 7 月 25 日。

^{*1} 正員, 大阪府立大学工学部 (〒591 堺市百舌鳥梅町 4-804)。

T3がMC1に配分され、ほかはMC2に配分されたとする。ここで、6本の工具の中でT1とT6を重複工具に選定すると、ジョブJに関してはT1やT6で加工される加工要素をそれぞれMC1やMC2に割付け変更することができない。このように、工具の先行関係を考慮せずに重複工具を選定すると、有効な加工要素の割付け変更を行えない場合が生ずる。

そこで、本研究では加工要素を割付ける際に、加工要素間の先行関係の影響を受けないような工具の集合を逐次生成し、その中から重複工具を選定する方法を採用した。重複工具の選定基準には、前報で提案したmaximum IIを用いた⁽⁴⁾。このような重複工具の選定法を用いれば、重複工具で加工されるジョブの加工要素を割付け変更する際に加工要素間の先行関係を考慮する必要がなくなる。すなわち、前報と同じ割付け法を用いればよい。

2・2 提案アルゴリズム 以上の考察に基づき、重複工具の選定法とジョブ加工要素の割付け法からなる加工要素間の先行関係を考慮した機能分散形FMSにおける工具配分法を次のように提案する。

2・2・1 重複工具選定法 工具利用時間と工具利用回数に着目して重複工具を選定する。この場合、工具利用時間および工具利用回数のともに大きな工具を重複工具とするほうがシステムの生産性を向上できると考えられる。しかし、1回当たりの工具利用時間があまりに大きな工具を重複工具とすると、ジョブ加工要素をMCへ割付ける際に、負荷平準化が行いにくくなり、稼働率も向上しない。ここでは、1回当たりの工具利用時間が小さく、工具利用回数の大きな工具を重複工具として選ぶmaximum IIを用いた次の7手順からなる重複工具の選定法を提案する。なお、 t は各過程において選定された重複工具の本数であり、 $X1 \setminus \{i\}$ および $X2 \setminus \{i\}$ は、集合 $X1$ および $X2$ から要素 i を除いた差集合を表す。

<手順1> 完全機能分散形FMSに対する工具配分法⁽⁹⁾により工具配分の初期状態を生成する。重複させる工具の本数を TT (≥ 1)とし、 $t=1$ とする。

<手順2> maximum IIにより、工具 i の順位 S_i を求める(工具を工具利用回数の非増加順に並べ、工具利用回数が等しい工具は工具利用時間の非増加順に並べ、その順番を順位 S_i とする)。

<手順3> 全工具をMC1に配分されている工具集合 $X1$ とMC2に配分されている工具集合 $X2$ に分ける。

<手順4> $X1$ の中で後続工具のない工具をすべて抽出し、工具集合 $Y1$ を生成する。

<手順5> $X2$ の中で先行工具のない工具をすべて抽出し、工具集合 $Y2$ を生成する。

<手順6> $Y1$ の中で S_i の値が最小の工具 i を重複工具とする。 $t=TT$ なら終了し、さもなければ、 $X1=X1 \setminus \{i\}$, $t=t+1$ とする。

<手順7> $Y2$ の中で S_i の値が最小の工具 i を重複工具とする。 $t=TT$ なら終了し、さもなければ $X2=X2 \setminus \{i\}$, $t=t+1$ とし、<手順4>へいく。

2・2・2 ジョブ加工要素の割付け法 本研究では、スケジューリング法に2機械フローショップにおける総処理時間最小化の最適解法であるJohnson法を用いる⁽⁵⁾。Johnson法によれば、MC1での加工時間がMC2での加工時間よりも小さなジョブがスケジュールの前半部に順序づけられ、後半部にはその逆の加工時間を持つジョブが順序づけられる。したがって、負荷平準化を計った上で、重複工具で加工される加工要素を、スケジュールの前半部ではMC2で加工し、後半部ではMC1で加工するように割付け直せば、遊休時間が削減され稼働率が向上すると考えられる。以上の方針に基づく、ジョブ加工要素の割付け法は次の7手順からなる。

<手順1> 完全機能分散形FMSに対する工具配分法⁽⁹⁾により配分された工具に関する N 個のジョブの各MCでの加工時間を用いてJohnson法でスケジューリングし、ジョブ加工要素の割付けの初期状態を生成した上で稼働率 U_0 を求める。 $k=1$, 稼働率 $U=U_0$ および稼働率 $U_s=U_0$ とする。

<手順2> MC1の第 k 番めに順序づけられているジョブの加工要素の中で重複工具で加工されるものをMC2へ割付け変更する。

<手順3> MC2の第 $N-k+1$ 番めに順序づけられているジョブの加工要素の中で重複工具で加工されるものをMC1へ割付け変更する。

<手順4> Johnson法でスケジューリングし、稼働率 U' を求める。

<手順5> この割付け変更による稼働率が以前の U より改善されていれば、すなわち $U'>U$ なら $U=U'$ とし、さもなければ割付け変更を取消し、元の状態に戻す。

<手順6> $k=[N/2]$ なら<手順7>へ、さもなければ $k=k+1$ として<手順2>へいく。

<手順7> $U_s<U$ なら $k=1$ および $U_s=U$ として<手順2>へいく。さもなければ、終了。

なお、<手順6>の $[]$ の記号は小数点以下切り捨てによる整数化を表し、 k は<手順2>、<手順3>で加工要素の割付け変更の対象となるジョブを定

めるための値である。

3. シミュレーション実験および結果

3.1 シミュレーション条件 ジョブ種類数 N , 工具種類数 M および加工要素数の割合 P ($(\text{加工要素数} \times 100) / (N \times M)$) を変えてシミュレーション実験を行い, ジョブ・グループ I~IV に対して機能分散形 FMS の稼働率を調べた。ジョブ・グループ I~IV は, ジョブ加工回数と工具利用回数の各分布がそれぞれ, (I) 一様分布と一様分布, (II) 一様分布と指数分布, (III) 指数分布と一様分布, (IV) 指数分布と指数分布となるように与えた。ジョブ加工回数とは, 個々のジョブの使用工具本数のことである。要素加工時間は [1, 50] の一様乱数で与え, シミュレーション回数は 50 回とした。シミュレーション回数と結果の精度との関係は前報⁽³⁾の付録に示した。なお, 工具の先行関係に関しては前報⁽³⁾と同様に与えた。

3.2 シミュレーション結果

3.2.1 工具重複の効果 完全機能分散形 FMS ではジョブ種類数が $N=10$ と少ない場合に平均稼働率が低くなる欠点があった。図 1 および図 2 より, 機能分散形 FMS によれば, これが大幅に改善されることがわかる。ジョブ加工回数が一様分布に従うジョブ・グループ, 特にジョブ・グループ I においては, 重複工具の増加にほぼ比例して, 平均稼働率が高くなっている。ジョブ加工回数が指数分布に従うジョブ・グ

図 1 重複工具種類数の平均稼働率への影響 ($N=10, M=100, P=40$)

ループ III および IV では, 図 1 および図 2 より, 工具を 20% 重複させるだけで, 平均稼働率が絶対値で 6~9 パーセントも大きく改善されている。

このジョブ・グループの違いによる平均稼働率の改善度の差は, 遊休時間の発生状況がジョブ・グループによって異なり, 工具重複による遊休時間減少のメカニズムが異なることに起因する。ジョブ加工回数が一様分布に従うジョブ・グループ I および II では, ジョブの各 MC での加工時間にあまり差がないため, 1 番めのジョブが MC1 で加工されている間の MC2 の遊休時間と, 最後のジョブが MC2 で加工されている間の MC1 の遊休時間, すなわち最初と最後の遊休時間が主なものになる。一方, ジョブ・グループ III および IV では, ジョブ加工回数が指数分布に従うため, 最初の遊休時間は小さいが, 図 3 に示すように, 工具を多く

図 2 重複工具種類数の平均稼働率への影響 ($N=10, M=100, P=20$)

図 3 ジョブ・グループ III および IV に対する完全機能分散形 FMS で生じる遊休時間の典型例

使用するジョブ5やジョブ6によって、MC2の中間に発生する遊休時間や、その影響によって発生するMC1の最後の遊休時間が主になる。

3・2・2 ジョブ加工回数に偏りがある場合 図3のMC2におけるジョブ5とジョブ6の間の遊休時間を減らすためには、MC1におけるジョブ5の負荷の一部を工具の1対1交換によってMC2に割付け変更する方法も考えられる。しかし、ジョブ・グループIIIの場合には、工具利用回数の分布が一様分布であるため、MC2におけるジョブ4やジョブ6の負荷の一部も同時にMC1へ割付け変更されることになり、この方法では稼働率が改善されない。また、ジョブ・グループIVの場合には、工具利用回数に偏りがあるために、利用回数の少ない工具の1対1交換によって限られたジョブの負荷だけを割付け変更することも可能になる。しかし、工具の先行関係の制約により、負荷の移動が制限され、1対1交換による稼働率の改善には限界がある。このような場合に工具を重複させると、重複工具で加工される加工要素をMC1とMC2のどちらに割付けてもよいことになり、完全機能分散形の場合の上記制約がなくなる。また、機能分散形FMSの工具配分法においては、工具利用回数の大きな工具から重複工具を選定しているため、より多くの工具を利用するジョブ5の負荷の一部をMC2に割付け変更できるような工具が重複工具として選ばれる可能性が高い。こうして工具種類数の20%の工具を重複させるだけでも、平均稼働率が大きく改善されるのである。

しかし、ジョブ・グループIIIおよびIVでは、重複工具種類数 D が20本を超えると、平均稼働率の改善度は小さくなり、図2の $D \geq 40$ の範囲では、ジョブ・グループIおよびIIよりも平均稼働率が低い場合がある。これは、ジョブの加工要素を割付ける際に、あるジョブの重複工具によって加工される加工要素のすべてを、ほかのMCに割付け変更するため、先に述べたようなガントチャートの中央部にわずかに残っている短い遊休時間を解消するような微調整がしにくいためである。重複工具によって加工される加工要素ごとに割付け変更を行えばより稼働率を高めることができるが、計算量が膨大になるためにこのようなアルゴリズムは利用できない。

3・2・3 ジョブ加工回数に偏りが無い場合 ジョブ・グループIやジョブ・グループIIの場合には、ジョブ加工回数に偏りが無いために、ジョブ加工要素の割付けの初期状態では、各ジョブの各MCでの加工時間に大きな差はない。この状態から重複工具で加工される加工要素の割付け変更によって、MC1での加工時

間やMC2での加工時間が短いジョブを生成し、主な遊休時間である最初と最後の遊休時間を小さくすることによって稼働率が向上する。これらの遊休時間は、ほぼ重複工具の本数に比例して小さくなるために、少ない重複工具本数では、ジョブ・グループIIIやIVのような平均稼働率の大きな改善はなされないのである。なお、重複工具の増加に伴う平均稼働率向上の度合は、 $D \leq 60$ の範囲で、ジョブ・グループIIのほうが大きい。これは、重複工具が工具利用回数の多い工具から選ばれ、ジョブ・グループIIの工具利用回数に偏りがあるため、ジョブ・グループIに比べて、より多くのジョブで加工要素の割付け変更が可能になるからである。

以上より、ジョブ・グループII、IIIおよびIVではジョブ・グループIに比べて、重複工具種類数が少なくても平均稼働率が大きく改善される。表1より、 $N=20$ の場合の平均稼働率をみると、加工要素数の割合が40%以下であれば工具種類数の約20%を重複させるだけで、ジョブ・グループIを除くすべてのジョブ・グループで、全機能形と同じ99%前後の高い平均稼働率が得られていることがわかる。

4. 結 言

(1) 2機械フローショップ形FMSにおいて、加工要素間の先行関係を考慮した機能分散形の工具配分法を提案した。

(2) シミュレーション実験により、完全機能分散形FMSで稼働率が低くなる場合に対して、機能分散形FMSによれば稼働率を大幅に改善できることを示した。

(3) 提案法によれば、工具利用回数やジョブ加工

表1 平均稼働率 ($N=20, M=100$)

P	D	J o b g r u o p			
		I	II	III	IV
20	0	97.5	96.7	98.5	97.9
	20	98.5	98.9	99.8	99.8
	40	99.0	99.4	99.8	99.8
	60	99.5	99.8	99.8	99.8
	80	99.8	99.8	99.7	99.7
	100	99.9	99.8	99.9	99.8
40	0	96.8	95.7	97.4	95.5
	20	97.9	98.6	99.4	99.0
	40	98.4	99.0	99.6	99.6
	60	99.1	99.4	99.7	99.8
	80	99.6	99.9	99.8	99.7
	100	99.8	99.9	99.9	99.8

回数に偏りがあり, ジョブ種類数が20以上の場合には, 工具種類数の約20%を重複させるだけで, 全機能形FMSと同程度の高い稼働率が得られることがわかった。

文 献

- (1) Berrada, M. and Stecke, K. E., A Branch and Bound Approach for Machine Load Balancing in Flexible Manufacturing Systems, *Manage. Sci.*, 32-10(1986), 1316.
- (2) 大場・朱・村山, GT概念とヒューリスティクスに基づくFMS工具配分, 機論, 56-530, C(1990), 2756.
- (3) 平林・長沢・西山, 2機械フローショップ形FMSにおける工具配分法(第3報, ジョブの加工要素間の先行関係を考慮した完全機能分散形の場合), 機論, 58-551, C(1992), 308.
- (4) 長沢・永野・平林・西山, 2機械フローショップ形FMSにおける工具配分法(第2報, 機能分散形の場合), 機論, 55-512, C(1989), 1133.
- (5) Johnson, S. M., Optimal Two- and Three-stage Production Schedules with Set-up Times Included, *Nav. Res. Log. Q.*, 1-1(1954), 61.