ジョブのジグ・機械割り当てを考慮した スケジューラの開発*

渡辺美知子** 古川正志** 三添朗宏*** 渡辺龍男*** 嘉数侑昇†

Development of a Practical Scheduler Taking into Account of Assignment of Jigs and Machines Assignment to Jobs

Michiko WATANABE, Masashi FURUKAWA, Akihiro MIZOE, Tatsuo WATANABE and Yukinori KAKAZU

For the efficient operation at a manufacturing factory required to produce a small size and various type of products, it is important to make a good schedule taking into account of jigs and machines assignment to jobs. This is because a tool and jigs are commonly equipped with machines. In this study, a practical scheduler is developed, which solves job-shop scheduling problem including the jobs and jigs assignment to the machines by use of a genetic algorithm (GA). A new chromosome representation is introduced into GA for applying it to the given problem and effective genetic operations are examined. Furthermore, a user-friendly graphic interface is reported that produces a suitable database for the operation. Numerical experiments verify that the proposed GA solves the job-shop scheduling in a practical time.

Key words: job-shop scheduling, quadratic assignment problem, genetic algorithm, evolutionary computation

1. 緒 言

近年、FMS工場をもつ大企業のみならず中小企業においても需要の多様化や個性化に対して多種少量生産から変種変量生産への移行が進み、これらを実現する迅速かつ効率的な生産体制が強く望まれている。従って、このような生産体制を作るには中小企業においても実用的でかつ安価なジョブショップスケジューラの開発が強く望まれている。

しかしながら、多くの中小の金型工場や成形工場では実用的でかつ安価なジョブショップスケジューラがほとんど導入されておらず、熟練者による経験に基づいたスケジュール作りが行われているのが現状である。また、スケジュール作成は人間が行い、それをデータベースとして計算機で日程管理を表示している場合も多い。

こうした中小企業の生産過程では、ある製造工程に対していくつかの機械が割り当てられる候補として存在し、かつ機械に対してもその機械専用及びいくつかの機械に対して共通のジグを持ち、また同じように専用及び共通の工具を持つことが多い。これは機械やジグ、工具などの製造における資源が少なく、限られているためである。それゆえに、機械やジグ、工具などの資源の組合せを考慮した上でスケジューリングの作成を行う必要がある。同様のスケジューリング問題はFMS工場においても生じている。すなわち、マシニングセンタやマシニングセルに対して、いつも同じマガジンや工具を取り付けておくのではなく、マガジンや工具を分離して管理し、必要に応じてそれらを組合せる工具配分と負荷計画問題である¹⁾。

このようなスケジューリング問題は、単にジョブショップ問題

であるだけでなく、同時にジグ・工具の機械割り当て問題をも解く必要がある。しかしながら、藤井ら¹⁾によって指摘されるようにこうした問題を数理計画法やヒューリスティックな問題として取り扱うときは、工具・ジグをグループ化したり機械群をセル化し、簡易化した問題として取り扱う場合が多い。一方、遺伝アルゴリズム (Genetic Algorithm, GA) は最適化の一般手法として多方面で使用されスケジューリング問題に対してもディスパッチ規則やランダム法と比較して良い結果が得られることが報告されている^{2)~3)}。本研究では上記に示した問題に対して、GAを実用レベルで適用し、また、既存のデータベースを容易に作成する簡便なユーザ・インターフェースの実現を目的とする。

GAを採用したスケジューリング問題へのアプローチは、Syswerda²⁾やWhitleyら³⁾によって1980年代後半の研究がまとめられており、また、日本においても小林ら⁴⁾、玉置ら⁵⁾、大倉ら⁶⁾及び飯間ら⁷⁾が、遺伝子の設計方針や遺伝演算として採用される演算の効率などに関する精力的な研究を行っている。これらの研究からGAを実用的に利用するには、(1)染色体の効果的な構文表現 (Genotype Representation)、(2)染色体の解釈 (Phenotype Representation)、(3)使用する遺伝演算の選択、の三つを考慮することが重要である。これらは別個に存在するのではなく相互に影響する。小林らの研究は構文表現において形質遺伝を良好に設計することで遺伝演算が効果的に働くことを報告しており、大倉らは染色体の構文表現から染色体の解釈に翻訳される過程で中間遺伝子を多く作り出すことが有効であることを報告している。

しかしながら、現在普及しているPC (クロックタイム400MHz) の能力でこれらの方法を採用することは、長大な計算時間から実用的ではないといえる。本研究では、先の問題に遺伝アルゴリズムを適用するために、染色体構文表現をジョブ・ショップ部とジグ・機械の工具割り当て部の合成から構成した。すなわち、前者にはSyswerda²⁾の実験において比較的良好な結果を示した順序表現を変更し、染色体の解釈において工程先行関係を実現できる形式に変形した表現を提案する。後者には染色体の解釈においてモード計算によって工具・機械の割り当てがジョブショ

* 原稿受付 平成11年3月15日

** 正会員 旭川工業高等専門学校 (旭川市春光台 2-2-1-6)

*** (株) システムラボムラタ (大津市石山寺 3-24-1)

† 正会員 北海道大学大学院工学研究科 (札幌市北区北13条西8丁目)

ップ部の変更に対応できる2進数染色体構文表現を提案する。また、遺伝演算として単純GAの淘汰・交叉・突然変異に加え逆位を採用する。モード計算表現の特徴は、演算数が少なくかつ割り当て問題については実行可能な割り当てを実現することにある。数値計算実験においては、山村の方法と比較しジョブショップ部の有効性を確認するとともに、採用した演算子の効果を報告する。また、最後に実用化のために作成した簡便なユーザインターフェースの概要を報告する。

2. ジグ・機械の工具割り当てを考慮したジョブショップスケジューリング問題

ここでは、本研究で取り扱うジグ・機械の工具割り当てを考慮したジョブショップスケジューリング問題について述べる。

2.1 記号の定義

以降で取り扱う記号を以下のように定義する。

J : 与えられたジョブの集合

n : ジョブ数

J_i : ジョブ集合に含まれるジョブ i

M : 機械集合

m : 機械数

M_j : 機械集合に含まれる機械 j

J_{ij} : 機械 j で加工されるジョブ i の工程

n_j : 機械 j に割り当てられた工程数

N : 工程 J_{ij} の総数

t_{ij} : 工程 J_{ij} の加工時間

B : 与えられたジグの集合

$B(J_{ij})$: 工程に使用可能なジグの集合

$B_k(J_{ij})$: $B(J_{ij})$ に含まれるジグ k

$b(J_{ij})$: $B(J_{ij})$ に含まれるジグの総数

$M(B_k(J_{ij}))$: ジグ $B_k(J_{ij})$ を取付け可能な機械の集合

$M_j(B_k(J_{ij}))$: $M(B_k(J_{ij}))$ に含まれる機械 j

$m(B_k(J_{ij}))$: $M(B_k(J_{ij}))$ の総数

$(\ll J_{ij})$: 工程 J_{ij} の先行関係 (仕事順序)

W_{jh} : 機械 j の h 番目の工程の待ち時間

D : ジョブ i の納期時刻の集合

D_i : ジョブ i の納期時刻

$s_j(h)$: 機械 j における h 番目までの工程順序

r_{jh} : 機械 j における h 工程の段取り時間

2.2 問題の記述

ジョブ集合 J とその納期時刻の集合 D が注文として与えられる。ジョブ J_i の工程 J_{ij} には1本の工具が割り当てられ、この工具によって使用可能な複数のジグと機械があらかじめ与えられているとする。すなわち、ジョブの工程 J_{ij} に対して使用可能な複数のジグと機械が存在する。また、ジョブ J_i の工程 J_{ij} には先行関係 (仕事順序) $(\ll J_{ij})$ があらかじめ与えられている。このとき、ジョブ J_i にジグと機械の割り当てを決定し、かつ設定した評価基準を最小にするような工程計画 (日程計画) を工程の先行関係 $(\ll J_{ij})$ を満たすように決定する。

制約条件として上記の先行関係の他に、工程の取り掛かり時間を8時から17時までと設定する。これは工場の作業者の労働時間内に工程の段取りを終了させるためである。

本問題は、ジョブの工程 J_{ij} に対するジグと機械の割り当て方により加工能率が変化するため、一般のジョブショップ問題にみられる工程の順序決定問題と、工程に対するジグと機械の2次割

り当て問題を含んでいる。

2.3 加工時間の計算

ジョブの工程 J_{ij} に対するジグ $B_k(J_{ij})$ と機械 $M_j(B_k(J_{ij}))$ の割り当てがジグ k 及び機械 j と決定したとき、この工程が $(h+1)$ 番目に機械 j で処理されるとすれば、以下のように加工時間 t_{ij} を決定する。

$$t_{ij} = r_{jh} + (\text{mod}[R_i, e_{jk}] + 1) e_{jk} \quad (1)$$

ここで、 $\text{mod}[x, y]$ は x の y によるモード計算を示し、 R_i は一つのジョブ J_i が要求する製品の品数、 e_{jk} はジョブに割り当てられた工具とジグによる1半製品当たりの加工時間である。従って、異なる工程が連続して同じジグ、及び機械を使用する場合には、段取り時間が不要となるので加工時間は短縮する。

2.4 スケジューリング評価

以下の4つの評価を採用する。

(1) 最大滞留時間の最小化

機械 j の $(h+1)$ 番目の滞留時間 $C(s_j(h+1))$ は、

$$C(s_j(h+1)) = C(s_j(h)) + W_{j,h+1} + t_{ij} \quad (2)$$

によって計算する。これから、最大滞留時間の最小化は、

$$\min_{s_j(n_j)} F_1 = \max_j [C_j(s_j(n_j))] \quad (3)$$

なる機械 j の工程 (加工) 順序 $s_j(n_j)$ を求めることである。 n_j はジョブの工程に対するジグと機械の割り当てが決定したときに定まる。

(2) 待ち時間総和の最小化

すべてのジョブの工程の待ち時間の総和を最小化する。これは、

$$\min_{s_j(n_j)} F_2 = \sum_{j=1}^m \sum_{h=1}^{n_j} W_{jh} \quad (4)$$

なる機械 j の工程順序 $s_j(n_j)$ を求めることである。

(3) 納期遅れ時間総和の最小化

ジョブ J_i の終了時間を C_i とする。このとき納期遅れ時間総和の最小化は、

$$\min_{s_j(n_j)} F_3 = \sum_{i=1}^n [\max(C_i - D_i, 0)] \quad (5)$$

なる機械 j の工程順序 $s_j(n_j)$ を求めることとなる。

(4) 段取り総和時間の最小化

段取り時間総和の最小化は、

$$\min_{s_j(n_j)} F_4 = \sum_{j=1}^m \sum_{h=1}^{n_j} r_{jh} \quad (6)$$

であるが、本研究では単に段取りの回数を F_4 として採用する。

3. 遺伝アルゴリズムの設計

本問題に遺伝アルゴリズムを適用するためには、

(1) ジョブ工程 J_{ij} の順序決定問題

(2) ジョブ工程 J_{ij} へのジグの割り当て問題

(3) ジョブ工程 J_{ij} への機械の割り当て問題

が同時に解けるような染色体遺伝子を設計し、かつ効果的な遺伝演算を導入する必要がある。

3.1 遺伝子の全体設計

染色体遺伝子は(1)~(3)の解を同時に表現できるように $3N$ バイトを1ストリングとして用意する。ここで、 N はジョブ集合 J の含む総工程数とする。ジョブ J_i に含まれる工程数を n_j とすれば、

$$N = \sum_j N_j \quad (7)$$

となる。遺伝子は最初の N バイトをジョブ部と呼び工程順序を割り当てる。続く N バイトをジグ部と呼び各工程で使用するジグ、最後の N バイトを機械部と呼び各工程で使用する機械を割り当てる。

3.2 ジョブ部の遺伝子表現とその翻訳

ジョブ部の表現には TSP 問題で開発された順序表現⁹⁾を多重遺伝子として採用する。順序表現は単一機械の場合以下のように作成される。

- (1) リストにジョブ番号を順に並べ、1 から順にリストにアドレスを与える。
- (2) ランダムにアドレス範囲の整数を発生し、そのアドレスを遺伝子の先頭から順に 2 進化して格納する。
- (3) リストからアドレスのジョブを除去し、再度リストに 1 から順にアドレスを付け直す。
- (4) リストが空になったら終了する。そうでないときは(2)へ戻る。

遺伝子の翻訳(形質表現)は、その先頭からアドレスを 10 進化し、そのアドレスに対応するリストのジョブ番号を取り出し、その後リストのその部分を除去し、この手続きを繰り返してジョブ順序を得る。

本問題は単一機械ではないことと、各ジョブの工程には先行関係が存在するため、上記表現を直接採用できない。従って、順序表現の手続き(1)を以下のように変更する。

- (1) リストの最初から N_1 個にジョブ番号 1、次の N_2 個に番号 2、…、最後の N_n 個にジョブ番号 n を格納し、1 から順にリストにアドレスを与える。

これは同じジョブ番号が連続して初期のリストに格納されるから、遺伝子は同じジョブをその工程数だけ含んだ表現となる。従って、この遺伝子表現を多重遺伝子とここでは名付ける。

遺伝子の翻訳は先と同じであるが、同じジョブ番号が現れるごとに、工程の先行関係順にジグと機械をジグ部と機械部から決定し、アクティブスケジュールを作成する。アクティブスケジュールの決定を行う時に、工程の開始時間が 8~17 時以外であれば、その開始時間は翌日の 8 時とする。

3.3 ジグ部の遺伝子表現とその翻訳

ジグ部の u バイト番目をジョブ部の u バイト番目に対応させ、0~255 の 2 進数をランダムに格納する。この 10 進数を $g(u)$ と置く。 u バイト番目のジョブ部は工程 J_{ij} を定めるから、これによって使用可能なジグ集合 $B(J_{ij})$ とジグ数 $b(J_{ij})$ が決定される。このとき、ジグ k は以下の計算によって求める。

$$B_k(J_{ij}) = \arg(\text{mod}[g(u), b(J_{ij})] + 1) \quad (8)$$

ここで、 $\arg$ は引数 k を定める関数とする。もしジョブ部が突然変異や交叉によって変化しても、それに対応した工程 J_{ij} が現れ、その工程により使用可能なジグ集合 $B(J_{ij})$ とジグ数 $b(J_{ij})$ が指定される。従って、遺伝子に格納されている値は影響を受けず、これを変更する必要がない。これは、ジョブ工程を環境とすると、同一遺伝子が環境が変化すると別の形質を発現する一つの表現方式である。また、同一時間帯に他の機械に選択されたジグが使用されている場合は、ジョブ部のアクティブスケジュールの決定の時に、工程の開始時間を重複しないように工程の開始時間を同じジグを採用している工程の終了時間とする。

3.4 機械部の遺伝子表現とその翻訳

ジグ部と同様に決定する。すなわち、機械部の u バイト番目をジグ部の u バイト番目に対応させ、0~255 の 2 進数をランダムに

格納し、この 10 進数を $p(u)$ と置く。 u バイト番目のジグ k は使用可能な機械集合 $M(B_k(J_{ij}))$ と機械数 $m(B_k(J_{ij}))$ を決定し、機械 j は以下の計算によって求める。

$$M_j(B_k(J_{ij})) = \arg(\text{mod}[p(u), m(B_k(J_{ij}))] + 1) \quad (9)$$

機械部も遺伝子は直接ジョブ部とジグ部の遺伝演算による影響をジグ部同様に受けない。工程と機械の決定によりアクティブスケジュールが決定される。

Fig. 1 A comparison of convergence curves

3.5 遺伝演算

遺伝演算はジョブ部、ジグ部、機械部それぞれ別個に適用する。ジョブ部には順序表現による 1 点及び 2 点交叉、1 点突然変異、逆位を設定した比率で実施する。なお、これらは 1 バイトを単位として行う。ジグ部及び機械部は、単純遺伝アルゴリズムの 1 点交叉及びバイナリー反転による突然変異を実施する。個体群でエリート保存を 1 個体適用し、淘汰は個体数を 50~200 位と仮定し、Fortune roulette によらず、上位指定率の個体数を下位に同数複製する淘汰圧方式を採用する。

3.6 適応関数

2.4 章で述べた 4 つの評価関数にウェイトを乗じたスカラー関数として使用する。これは、

$$F = w_1 F_1 + w_2 F_2 + w_3 F_3 + w_4 F_4 \quad (10)$$

と定式化される。ウェイト値 $w_1 \sim w_4$ は工場の状況によって任意に設定可能とする。

4. 数値計算実験

これまでに述べた遺伝アルゴリズムを適用してその性能を調べる数値計算実験を行った。実験の内容は、(1)多重遺伝子の有効性を調べる、(2)遺伝子演算の効果を確認する、(3)デスパッチングルールと本方法を比較する、である。

4.1 多重遺伝子の有効性に関する実験

多重遺伝子がどのくらいの有効性を持つかを調べるため、小林らのアルゴリズムとの比較をジョブ部に関してのみ行った。遺伝演算は 1 点交叉、突然変異、淘汰のみを採用し、通常のジョブシヨップスケジュールリング問題を取り扱った。すなわち、 n ジョブ m 機械が与えられ、これらのジョブ工程には先行関係が指定される問題である。実験条件としては、突然変異率 0.03、交叉率 0.06、淘汰圧 0.7、ジョブ数 20、機械数 20 とし、各工程の加工時間は 20~40 の間の一様乱数で発生し、工程順序も一様乱数で定めた。また、個体数を 200 とした。

このときの最大滞留時間を評価とした収束曲線を図 1 に示す。これから多重遺伝子による方法は収束が早い、エンドゲームで

Fig. 2 Effectiveness of genetic operations

Table 1. Comparison with dispatching rules

	F_1 day	F_2 day	F_3 h	F_4 day	Time sec
SPT	401.07	354.90	42.00	48.00	0.015
LPT	297.03	260.32	69.00	45.00	0.016
DDATE	255.09	222.19	0.00	40.00	0.016
GA	168.06	143.86	0.00	32.00	6.75

は山村らのアルゴリズムが勝ることがわかった。一方、Indy 5000 による計算時間の比較を行うと、300 世代の計算で多重遺伝子による方法は約 5 秒、山村らの方法は約 60 秒を要し、多重遺伝子による計算は演算数が少ないことがわかった。この傾向は平均滞留時間による評価でも同様であった。

4.2 遺伝演算の効果

各遺伝演算がどれだけ効果を持つかを調べるためにジョブ部には淘汰と各遺伝演算のみを採用し、ジグ部と機械部には単純遺伝演算を行いながら PC (Pentium 400) を用いて数値実験を行った。実験条件としては、実際の工場のデータを用い、ジョブ数 10、工程数 74 (1 ジョブ当たり 3~5 工程)、工具数 20、機械数 10 で行った。遺伝演算は、ジョブ部において突然変異率 0.005、1 点交叉率 0.05、2 点交叉率 0.05、逆位率 0.05、ジグ・機械部において突然変異率 0.005、1 点交叉率 0.05 とし、全体では淘汰圧 0.9、エリート保存上位 1 個体とした。このときの収束状況を図 3 に示す。本実験から遺伝演算では逆位が最も効果的であることが判明した。また、これらを同時に組合せたときが最も探索効率が良いことも分かった。

4.3 ディスパッチングルールとの比較

提案した遺伝アルゴリズムとディスパッチングルールとの比較を上記と同じ実験で行い、その結果の日程計画の比較を行った。比較を行ったディスパッチングルールには以下を採用した。

- (1) SPT 加工時間最小の工程を選択し、アクティブスケジュールを作成する。ジグと機械は加工時間が最小のものを選択する。
- (2) LPT 加工時間最大の工程を選択し、アクティブスケジュールを作成する。ジグと機械は加工時間が最小のものを選択する。
- (3) DDATE 納期時間が最も早いものを選択し、アクティブスケジュールを作成する。ジグと機械は加工時間が最小のものを選択する。

遺伝アルゴリズムの設定条件は前節と同じとし、ウェイトはすべて 1.0 と置き、10 例の問題を乱数で作成して数値計算を実施した。また、全遺伝演算を採用した。Pentium (400MHz) を用いて計算したとき得られた結果の平均値を表 1 に示す。表 1 において Time は計算時間を示す。これから、提案手法が優れた方法である

Fig. 3 Weight input by use of a radar chart

Fig. 4 A product database

Fig. 5 A machine tool database

ことが分かる。

5. ユーザインターフェースの作成

本研究で開発した遺伝アルゴリズムを工場の現場で簡便に使用可能とするため、ビジュアル C++ を用いてグラフィックスインターフェース (GUI) を作成した。その概要は以下のとおりである。

5.1 遺伝アルゴリズムのパラメータ設定

遺伝演算の実行比、ウェイトの設定を GUI 化した。各演算のパラメータ値はボックスメニューからタイプし、ウェイトはレーダチャート上で工場の状況に合わせてマウスで設定する。レーダチャートを図 3 に示す。

Fig. 6 A jig database

Fig. 7 A process editor

Fig. 8 A jig editor

5.2 ジョブ、工程、ジグ、機械エディタ、出力の作成

ジョブ、工程、ジグ、機械エディタを作成し、これらのデータベースが自動的に容易に作成可能とした。ジョブ、治具、機械のデータベース及びこれらのエディタを図4～8に示す。エディタは新規・変更・維持に共通に利用可能である。また、データベースは工場内に存在する既存のデータベースからも採用可能とした。図9にガントチャートによる計算結果出力の一部を示す。

6. 結 言

遺伝アルゴリズムを採用した実用的なジョブショップスケジューラの開発を目的とし、遺伝アルゴリズムの設計、簡易なグラフィックスインターフェースの作成を行った。これらから以下のことが述べられる。

Fig. 9 An example of output by a process chart

ラの開発を目的とし、遺伝アルゴリズムの設計、簡易なグラフィックスインターフェースの作成を行った。これらから以下のことが述べられる。

- (1) 工程の制約条件を表現するためにジョブ部の順序表現に導入した多重遺伝子は、小林らのアルゴリズムと比較して、アルゴリズムが単純であるにもかかわらず十分な効果を持ち、演算時間が少なく実用的である。
- (2) 割り当て問題に導入したジグ・機械部のモードによる遺伝子表現は、工程によってモード数が決定するためジョブ部の変更によってジグ・機械部の遺伝子进行操作することなく変更された工程へのジグ・機械割り当てを行える利点をもつ。
- (3) ジョブ部の多重遺伝子を採用した順序表現には、逆位演算が大きな役割を果たすことが示された。これは順序問題におけるサブツァー交換がよい効果を持つことに匹敵する。
- (4) ディスパッチング・ルールと比較して良好な解が得られる。
- (5) 実用的なスケジューラとするために、簡便なグラフィックス・ユーザ・インターフェースを作成し、必要なデータベースの作成・更新を容易にした。

本研究では、1工程に1工具を割り当て、その後にジグ・機械の割り当てを行う問題を取り扱ったが、モード計算による遺伝子表現に工具部を付加すれば容易に工具・ジグ・機械の割り当てを考慮したスケジューラへと拡張可能である。

参 考 文 献

- 1) 藤井 進, 森田 浩はか: FMSにおけるジョブと工具の機械割り当て法に関する研究, 日本機械学会論文集 (C編), 64, 623 (1998) 2369.
- 2) G. Sysweda: Schedule Optimization Using Genetic Algorithms, *Handbook of Genetic Algorithms*, Ed. by L. Davis, Van Nostrand Reinhold, (1991) 332.
- 3) D. Whitley, T. Starkweather and D. Shaffer: *Handbook of Genetic Algorithms*, Ed. by L. Davis, Van Nostrand Reinhold, (1991) 332.
- 4) 小林 重信, 山村 雅幸, 小野 功: GAによるジョブショップスケジューリング問題の解法, 第3回インテリジェントシステムシンポジウム講演論文集, (1993) 227.
- 5) H. Tamaki, T. Mukai, K. Kawakami and M. Araki: Genetic Algorithm Approach to Multi-objective Scheduling Problem in Plastic Forming Plant, *Advances in Production Management Systems* (Ed. by N. Okino, H. Tamura and S. Fujii), Chapman & Hall, UK, (1998) 435.
- 6) 大倉和博, 郷東末和, 上田完次: 中立遺伝子によるジョブショップ・スケジューリングの解法, 日本機械学会論文集 (C編), 63, 614 (1977) 3554.
- 7) 飯間 等, 三宮 信夫: 遺伝アルゴリズムを用いた変形フローショップ型加工工程のスケジューリング, 第3回インテリジェントシステムシンポジウム講演論文集, (1993) 215.
- 8) J. J. Grefenstette, R. Gopal, B. Rosmaita and D. V. Gucht: Genetic Algorithm for the TSP, *Proc. of the First International Conf. of Genetic Algorithms*, Lawrence Erlbaum Associate, Hillsdale, (1985) 160.