オーダー分割を考慮した生産スケジューリングへの遺伝的アルゴリズムの適用

正 員 石 川 明 (三 洋 電 機)
非会員 森 川 雅 司 (三 洋 電 機)
正 員 貴 志 宗 紀 (三 洋 電 機)
非会員 沓 山 弘 (三 洋 電 機)
正 員 河 田 宏 (三 洋 電 機)
正 員 塚 本 一 義 (三 洋 電 機)

An Application of Genetic Algorithms to Production Scheduling Considering the Division of Orders

Akira Ishikawa, Member, Masashi Morikawa, Non-member, Munenori Kishi, Member, Hiroshi Kutsuyama,
Non-member, Hiroshi Kawata, Member, Kazuyoshi Tsukamoto, Member (SANYO Electric Co.,Ltd.)

In recent years, genetic algorithms (GA) which simulate the process of natural evolution have gained attention as a means of solving optimization problems, beginning with scheduling problems.

This paper intends for the problem of division of orders (unit quantity of manufacturing units comprising one type of model) in production process scheduling. In actual production activity, since some orders cannot be completed by the delivery date due to the production situation at the factory or the customer's requirements, scheduling is conducted to divide an order among many machines. The introduction of order division also has considerable effects on improving the operation rate of production equipment and reducing total production time. However, there are many combinations for determining which orders should be divided and how many machines they should be divided among, and no effective solution has yet been reported.

We suppose that GA is effective for solving the combination problem mentioned above. This paper proposes an individual description of GA which realizes optimum order division, and reports experimental results of our simulation.

キーワード：遺伝的アルゴリズム，スケジューリング，オーダー分割

1. はじめに

近年、生物の進化過程を模擬した、遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithms：以下GA) がスケジューリング問題をはじめとする最適化問題の解法として注目を集めている。GAは、問題の解候補である個体を数字や記号などを用いて表現し、その個体が形成している集合の中で、環境への適応度を生き残りのパラメータとして評価しながら、個体の選択、交差、突然変異などの操作を繰り返すことにより、次の世代へと進化していく確率的探索法である⁽¹⁾。

本論文では、生産工程のスケジューリングにおけるオーダー（一種類の機種で構成される製造単位量とする）の分割問題を対象としている。実際の生産活動においては、現場の生産状況や顧客ニーズなどの要因により納期に間に合わ

ないオーダーが発生するため、オーダー分割して複数の機械に割り付けたスケジューリングを行う場合がある⁽²⁾⁽³⁾。さらに、オーダー分割は、生産設備の稼働率の向上や総生産時間の短縮などに対しても大きな効果がある。しかし、オーダー分割を行うにあたっては、分割対象オーダーや分割数などの決定について多種多様な組み合わせが存在し、有効な解法は報告されていない。

ここでは、前記組み合わせ問題にGAが有効と考え、並列機械型スケジューリングにおいて、オーダー分割を考慮したGAの個体表現を提案するとともに⁽⁴⁾、シミュレーションによる実験結果を報告する。

なお、本論文では、処理順序を納期順としており、オーダーを機械へ割り付ける作業を「スケジューリング」と定義した。

2. オーダ分割を考慮したスケジューリング問題の概要

<2・1> 並列機械型工程 今回は、並列機械型工程をGA適用の対象とした。並列機械型工程とは、納期 $L_j(j=1,2,\dots,n)$ を持つ n 種類のオーダ $O_j(j=1,2,\dots,n)$ を同じ機能で生産能力の異なる m 台の機械 $M_i(i=1,2,\dots,m)$ によって、並列に処理する工程である。ここで、オーダ O_j は、任意の機械 M_i において所要時間 P_{ij} で処理されるものとする。また、同一の機械で異なるオーダを処理する際、オーダが切り替わる毎に機種切り替え時間 T が発生する。なお、オーダは各機械に対して任意に割り付けられるが、同一機械に割り付けられたオーダの処理順序は納期順とした。本論文では、納期を制約条件とし、かつ総生産時間 $Cmax$ が、可能な限り短いスケジュールを立案する。

<2・2> オーダ分割における問題 実際の生産現場では、納期に間に合わないため割り付けが不可能となった場合、納期遅れとなるオーダもしくは当該オーダが割り付けられた機械における他のオーダを分割し、別の機械に振り分け、納期遅れの対策とすることが多い。

図1はオーダ数4、機械台数2、分割数2の並列機械型工程モデルにおいて、上記で述べたオーダ分割を実行した場合の総生産時間および納期遅れに対する効果の一例をガントチャートを用いて示したものである。図中のアルファベットは、オーダ番号を表しており、■は機種切り替え時間を表している。図1(a)は分割を行う前、すなわち納期遅れが発生している状況を表している。ここでは、オーダDが納期遅れを生じている。図1(b)は、納期遅れが発生した

際に行われたオーダ分割の一例を示している。納期遅れとなるオーダ、すなわちオーダDを分割後機械1と2に割り付けることにより、納期を満足するとともに総生産時間の短縮が実現できている。図1(c)では、納期遅れとなるオーダが割り付けられた機械における他のオーダ、すなわちオーダBを分割することにより、納期遅れの回避および総生産時間の短縮を図ることができる。

しかし、実際の現場では、オーダの数や機械数が多い上、機械により生産能力が異なるなどの複雑な要因が混在しているため、スケジュール担当者は上記の方法によるオーダ分割を実行しても、納期遅れの回避に対応することが限度であり、総生産時間の短縮や機種切り替え回数の低減、さらには設備稼働率の向上など生産工程の効率化について十分な対応を図ることができないという問題がある。

この原因として、オーダ分割を行う際には、どのオーダを分割するか（分割対象オーダ）、またそのオーダをどこで、いくつに分割するか（分割数）というような不均等、複数の分割を考慮する必要がある、多種多様な組み合わせが天文学的に発生し、人間の能力では算出が不可能なためである。

3. スケジューリング問題へのGAの適用方法

<3・1> オーダ分割における最小管理単位 現場における分割方法については、管理上の問題から極端な不均等分割は行っておらず、分割における基準単位、すなわち最小管理単位が存在し、その単位の倍数となるようオーダ分割を行っている。

そこで、あらかじめオーダサイズを最小管理単位に分割しておけば、分割したオーダを一つのオーダと見なすことができ、不均等分割問題を均等分割問題に置き換えることが可能となる。

<3・2> オーダ分割を考慮した個体表現 個体の表現は、解の探索能力や処理時間に大きく影響を及ぼす最も重要なポイントであり、現在様々な表現方法が研究されている⁽⁵⁾。

今回提案する最小管理単位によるオーダ分割を実現するための遺伝子構成を図2に示す。図は、オーダ数4、機械台数2の生産工程における個体表現例である。遺伝子については、通常用いられる0, 1のバイナリ表現ではなく、機械番号をそのまま用いた。すなわち、オーダAは機械1、オーダBは機械2で処理されることを意味する。ところで、各オーダにおける分割数は、オーダサイズにより異なり、その最大分割数 X を用いて、染色体長を X 倍し、分割されたオ

図1 一般的なオーダ分割の方法

Fig.1. Division of orders in general.

図2 個体表現例 (オーダー分割)
Fig.2. Example of individual description.
(Division of orders.)

図3 個体とスケジュールの関係
Fig.3. Relation between individual and schedule.

オーダーがどの機械で処理されるかを表現できるようにした。図中のBxにおける0は、オーダーBの分割数がX未満であることを示す。すなわち、オーダー毎に異なる分割数に対応可能な個体表現方法となっている。

<3・3> 個体とスケジュールの関係 今回の個体表現方法では、個体とスケジュールは1対1に対応する。図3はオーダー数4、機械台数2の工程において、オーダーA, B, Dを均等に2分割、Cを3分割した場合の個体とスケジュールの関係を示したものである。図中のオーダーAとA2、オーダーBとB2、オーダーCとC2の様に同機種で構成されるオーダーが同一の機械に割り付けられた場合には、機種切り替え時間が発生しない。そのため、図3は、オーダーA, Bは実質的にオーダー分割が行われず、オーダーCは2:1に不均等2分割、オーダーDは均等2分割されて、各機械に割り付けられた状態を表すことになる。

<3・4> 評価値の算出方法 本論文では、総生産時間 C_{max} を個体の評価基準とした。総生産時間 C_{max} は、(1)式右辺の第1項において求められる機械毎の総処理時間に第2項の機種切り替え時間を加えた各機械の処理完了時間 $C_i (i=1, 2, \dots, m)$ の最大値で表される。

$$C_i = \sum_{k=1}^{R_i} P_{ik} + (R_i - 1 - W_i)T \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 R_i : 機械 i に割り付けられたオーダーの数、 $k (=ORD_{il})$: 機械 i に割り付けられた l 番目のオーダー番号、 W_i : 機械 i に割り付けられた同一オーダーの数、 T : 機種切り替え時間

表1 パラメータ

Table 1. Parameters.

遺伝子	機械番号
染色体	遺伝子をオーダー数並べた1次配列
個体	解の候補となるスケジュール
評価値	総生産時間
制約条件	納期

なお、当問題では、オーダー分割が総生産時間に及ぼす影響を容易に評価できるよう機種切り替え時間を一律とし、また、各オーダーの処理順序を納期順とした。

ここで、これまで述べてきた各パラメータを表1にまとめて示す。

<3・5> オーダー分割を考慮したスケジューリング処理の概要

今回は、先記のオーダー分割における最小管理単位に基づいて、全オーダーを均等にX分割した後、個体の作成、選択、交差、突然変異など一連の遺伝的操作により世代を進行させていく。ここで、処理全体のフローチャートを図4に示し、各STEPの詳細を以下に記す。

【STEP 1】オーダー分割

全オーダーを各々均等にX分割する。

【STEP 2】個体の作成

機械番号を遺伝子とし、遺伝子をオーダー数並べた1次配列を個体とする前述の個体表現方法により、予め設定した数の個体を作成する。

【STEP 3】実行可能解の総数チェック

STEP2で作成された個体の中から制約条件を満足するもの即ち実行可能解を取り出し、その総数をカウントする。

ここで、実行可能解が全く得られなかった場合あるいは一つだけ得られた場合には処理を終了し、以後の処理を行うために必要な複数の実行可能解が得られた場合にはSTEP4以後へ進む。

【STEP 4】初期集団の構成

この時点で得られた複数の実行可能解 (以下：個体) により、初期集団 (第1世代) を構成する。

【STEP 5】評価値チェック

各個体の評価値をチェックし、最も評価値の良い個体を無条件で次世代へ残すエリート保存戦略を用いることにより、交差などで優れた個体が破壊されるのを防ぐ。

【STEP 6】選択

評価値を基準として確率的に個体の選出を行うルーレット法により、STEP7で行われる交差の対象となる個体対を選択する。

図4 フローチャート
Fig. 4. Flow chart.

【STEP 7】交差

STEP6で選り出された個体対を任意の確率で交差させることにより、個体対の特徴を継承する新しいパターン（遺伝子配列）の個体を作り出す。

交差方法は、3方法（1点交差、2点交差、一様交差）について予備実験を行った結果、世代の進行に伴い良好な評価値推移を示した一様交差を採用した。一様交差とは、ランダムに選定した複数の遺伝子座の遺伝子を個体間で入れ替える遺伝的操作である。

【STEP 8】突然変異

交差後の個体を任意の確率で突然変異させることにより、交差では得られないパターンの個体を作り出す。その結果、制約条件を満足する個体が得られなかった場合には、交差対象となった個体対をそのまま次世代へ複製する。

なお、今回採用した突然変異とは、個体の任意の遺伝子1つを他の対立遺伝子に置き換える操作である。

【STEP 9】次世代の構成

交差の結果得られた初期集団と同数の個体により、次世代を構成する。

【STEP10】世代管理

予め設定した処理打ち切り世代に達していない場合にはSTEP5に戻って世代を更に進行させ、到達している場合には処理を完了する。

4. 数値実験例

オーダー分割を考慮した個体表現方法の有効性を数値実験により確認する。

実験条件を表2に示す。先記の通り最小管理単位を考え方をういたオーダー分割では、全オーダーの均等2分割にとどまらず様々な分割パターンが混在すると考えられるが、今回は、数値計算の簡略化を図るために全オーダーの分割条件を均等2分割に設定し、基本的な効果の確認を行うことにした。

図2. 個体表現例および表2. 実験条件に基づいて作成される個体表現の一例(均等2分割)を図5に示す。前述の通り、ここでは、全オーダーを均等2分割としたため、遺伝子が“0”を示すことはない。

表2 実験条件

Table 2. Condition of experiment.

分割条件	全オーダーを均等2分割
工程モデル	並列4機械型
オーダー数	20
個体数	80
平均納期	11000分
機種切替時間	100分
交差手法	一様交差
交差確率	0.5
突然変異確率	0.1
世代数	4000

図5 個体表現の一例(均等2分割)

Fig. 5. An example of individual description
(Divided every order into two equal parts).

また、全オーダの納期余裕の平均値 $\overline{H}$ は、(2)式を用いて設定し、それを基に数値実験用の問題作成を行った。

$$\overline{H} = \{ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (L_j - P_{ij}) \} / (m \times n) \tag{2}$$

ただし、 m ：機械数、 n ：オーダ数

数値実験問題の作成手順を以下に記す。全オーダの平均処理時間を約2500分として予備実験を行った結果、当実験条件下において平均値 $\overline{H}$ が7000分以下では、オーダ分割を行っても割り付けが不可能であり、10000分以上であれば、オーダ分割を行わなくても割り付けが可能となった。すなわち、平均値 $\overline{H}$ の取り得るべき範囲が7000分～10000分程度となる。よって(2)式より、納期遅れが生じるように納期余裕の平均値 $\overline{H}$ を8500分程度とした。また、機種切り替え時間は一律100分とした。なお、今回提案する個体表現方法の有効性を確認する際の判断基準として、最適解を設定(10000分)して実験用の問題を作成した。

5. 評価

表2の実験条件に基づく計算結果および評価を以下に記す。まず始めに、先記の手順でオーダ分割を実行しない限り制約条件(納期)を満足するスケジュールの立案が不可能な問題を作成し、オーダ分割を実行したところ、第1世代が形成でき、解の探索が可能となった。

GAによる計算結果の一例(均等2分割)を図6に示す。

図6 計算結果(均等2分割)

Fig.6. Result of calculation (Divided every order into two equal parts).

図は納期を満足する個体群における最小値の推移であり、参考として最大値および平均値も合わせて示してある。本実験例の場合、最終世代における最小値(総生産時間)は10841分となった。この値から、総生産時間が世代の進行に伴って、問題作成時に設定した最適解10000分へ向け、順調に推移することが確認された。なお、最終世代までの処理時間は、パソコン(DOS/V, 486DX4, 100MHz)において、約50分であった。

さらに、第1世代、2000世代および最終世代において最小値を有する個体をスケジュールとして割り付けた結果(均等2分割)を図7に示す。図では各オーダが割り付けられた機械および処理順序を示している。図7(a)より第1世代において機種切り替えは32回(分割オーダ数=16)であったが、図7(b)より2000世代では26回(分割オーダ数=10)、図7(c)より最終世代では21回(分割オーダ数=5)へと減少している。このように、制約条件(納期)を満足した

図7 最小値を有する個体のスケジュール
(均等2分割)

Fig.7. Schedule of individual with minimum value
(Divided every order into two equal parts).

上で機種切り替え時間の発生に係わる分割オーダー数を減少させる方向で世代が進行しており、総生産時間短縮の観点から見て効果的な分割対象オーダーを導き出す方向に進化していることが分かる。

今回の実験における評価を以下に要約する。

(1) 総生産時間の短縮

世代の進行に伴って、分割しているオーダーについての分割を解除し合体させることにより、オーダー分割の影響による機種切り替え時間の増加を抑え、総生産時間の短縮を実現することができた。

これらの評価から、今回提案した個体表現およびそれを用いた遺伝的操作が、オーダー分割を考慮したスケジューリング問題に対して有効であることが確認された。

(2) 分割対象オーダーの導出

オーダー分割を考慮したスケジューリング問題に対して、今回提案した個体表現方法を適用したところ、評価値が総生産時間であるにもかかわらず、総生産時間短縮の観点から見て、効果的なオーダー分割が行われている。すなわち、適切な分割対象オーダーを導き出す方向に進化していくことが確認された。

6. むすび

以上、オーダー分割を考慮した生産スケジューリング問題に対して、GAの適用を行った結果を報告した。

実際の生産現場においては、納期遅れを生じたため割り付けが不可能となった場合、オーダーを分割して複数の機械に割り付けて生産している。しかし、どのオーダーを分割すればよいか、さらに分割されたオーダーをどのようにスケジュールすれば総生産時間が短縮できるのかを効率のかつ正確に導出することは非常に困難な問題であり、これが現状での生産の効率化に対する大きな課題となっていた。

本研究では、最大分割数を基に染色体長を倍増する個体表現方法を用いてオーダー分割問題を解くことにより、GAの評価値である総生産時間を短縮するという基本的な効果を確認できた。また、評価値が総生産時間のみににもかかわらず、効果的な分割対象オーダーの導出も合わせて行われた。このことから、今回提案した個体表現方法のオーダー分割問題に対する有効性ととも、分割対象オーダー決定に向けた進化の可能性が確認された。

今回は、均等2分割による実験を行ったが、今後、より実用的な多分割における遺伝的操作方法を検証し、設備稼働率の向上や在庫削減などを必要とする多品種少量生産への適用を図るとともに、最適な分割対象オーダーをパラメータにより任意に決定する方法についても取り組んでいく。

さらに、並列機械型工程以外のフローショップ工程やジョブショップ工程についても、オーダー分割を考慮したスケジューリングを検討していく予定である。

(平成7年2月1日受付、同7年6月23日再受付)

文 献

- (1) 北野編：「遺伝的アルゴリズム」，産業図書
- (2) 黒田，田部他：「生産管理」，朝倉書店
- (3) 横谷，中島他：「複合戦略を用いたスケジューリング」，第38回システム制御情報学会講演論文集 P323
- (4) 森川，石川他：「オーダー分割を考慮した生産スケジューリングへの遺伝的アルゴリズムへの適用」，平成6年電気関係学会関西支部連合大会講演論文集 G311
- (5) 飯間，三宮：「変形フローショップスケジューリング問題における遺伝アルゴリズムの個体の考察」，電気学会論文誌 Vol.113-C, No.10

石川 明 (正員) 1959年12月29日生まれ。1983年大阪

大学工学部機械工学科卒業。同年三洋電機(株)入社。現在，同社研究開発本部メカトロニクス研究所にて，生産システムに関する研究に従事。

森川 雅司 (非会員) 1965年6月4日生まれ。1991年鳥取

大学大学院工学研究科生産機械工学専攻修士課程修了。同年三洋電機(株)入社。現在，同社研究開発本部メカトロニクス研究所にて，パワーアシストに関する研究に従事。電子情報通信学会，精密工学会会員。

貴志 宗紀 (正員) 1963年12月16日生まれ。1986年関西

大学工学部電子工学科卒業。同年三洋電機(株)入社。現在，同社研究開発本部メカトロニクス研究所にて，AI応用に関する研究に従事。

沓山 弘 (非会員) 1952年5月10日生まれ。1971年和歌山工業高校電気科卒業。同年三洋電機(株)入社。生産システムなどの研究を経て、現在、同社研究開発本部メカトロニクス研究所にて、AI応用に関する研究に従事。

塚本 一義 (正員) 1939年11月22日生まれ。1963年東京理科大学理学部物理学学科卒業。同年三洋電機(株)入社。生産システム、ロボティクス、パワーエレクトロニクスなどの研究に従事。現在、同社研究開発本部メカトロニクス研究所長。神戸大学工学部電気電子工学科非常勤講師。工学博士。IEEE, SME, システム制御情報学会会員。

河田 宏 (正員) 1948年2月2日生まれ。1970年京都大学工学部機械工学科卒業。同年三洋電機(株)に入社。画像認識, AI応用などの研究に従事。現在、同社研究開発本部メカトロニクス研究所知識処理システム研究部部長。システム制御情報学会, 日本機械学会, 精密工学会会員。