混流生産に対する生産性向上を目的とする工程設計法の開発
(作業時間のバラツキとバッファによる影響)和田 拓己^{*1}, 荒川 雅裕^{*2}Development of procedure of process design to aim to promote productivity for mix production
(Influence of fluctuation of operation time and buffer)Takumi WADA^{*1} and Masahiro ARAKAWA^{*2}^{*1} Graduate University of Engineering, Nagoya Institute of Technology

Gokiso, Showa-ku, Nagoya-shi, Aichi 466-8555, Japan

^{*2} Faculty of Engineering, Nagoya Institute of Technology

Gokiso, Showa-ku, Nagoya-shi, Aichi 466-8555, Japan

Received 4 December 2014

Abstract

In recent production environment, many factories introduce mixed production system to simultaneously produce multi-types of products. Ordinarily, multiple work elements are assigned to workers or work centers in the process of process design to aim at high productivity. However, fluctuation of operation times is normally included in mixed production line and capacity of buffer affects productivity of the line. In this study, we deal with the problem of process design for mixed production line including fluctuation of operation time. In addition, we treat the problem of process line as multi-objective problem. In this paper, multi-objective genetic algorithm is developed to resolve the problem to minimize the bi-objective functions: the maximum value of operation time at all work centers and the maximum value of dispersion of operation time all work centers. Numerical experiments are performed to evaluate performance of the algorithm and characteristics of solutions. Productivity of the production line designed by the proposed algorithm is evaluated by using event-driven simulation. Simulation result shows that production line designed by the proposed mathematical model generates high productivity and small size of WIP when buffers are located between work centers.

Key words : Process design, Multi-objective genetic algorithm, Simulation, Variation of operation time, Mathematical model, Productivity

1. 緒 言

一般に、セル生産は 1～少人数の作業員が多工程の作業を受け持ち、狭い作業領域を構成することで多品種少量生産に対して柔軟に対応できる仕組みを実現している。セル生産においては、U 字型ライン、直線型ライン、一人生産ラインなどの工程が構成されるが、ラインの小規模化によって作業員の移動を少なくし、作業員の少人数化によって工程間に発生する仕掛りを削減することが有効である(岩室, 2002)(坂爪, 2004)。一般に、生産ラインの生産性を向上させるにはラインバランスを取ることが有効であることが知られているが、ラインバランシングが行われていたとしても、作業員一人あたりの作業数が多ければ、作業時間の変動により工程間で待ち時間が発生し、生産性が減少することが考えられる。さらに、混流生産では異なる製品がラインを流れてくるため、各工程では異種製品の作業による作業時間でのバラツキが生じ、手持ち時間が大きくなる。これにより、生産性が減少することが予想される。生産ラインの各工程への作業割付けの問題は、一般に「工程設計」や「ライン設計」として扱われており(村松, 1979)、これまでにラインバランシングを目的として多数の研究がなされている。混流生産ラインの工程設計に関する研究では、各工程での作業時間を全作業時間から見積った平均作業時間の偏差を

No.14-00660 [DOI:10.1299/transjsme.14-00660], J-STAGE Advance Publication date : 20 May, 2015

^{*1} 名古屋工業大学大学院 社会工学専攻 (〒466-8555 愛知県名古屋市中昭和区御器所町)^{*2} 正員, 名古屋工業大学 工学部

E-mail of corresponding author: m.arakawa@nitech.ac.jp

小さくするように要素作業の割り付けをヒューリスティックなルール(Matnachai and Yano, 2001)や遺伝的アルゴリズム(Noorul, et al., 2006)(Ponnambalam et al, 2000)によって操作する方法が考えられている。混流生産の問題として各工程での作業負荷がバランスするよう異種製品の投入順序を決定する問題を扱った研究も存在する(Rekiek, et al., 2000)。また、多目的問題として工程設計を扱う研究が存在するが、バランスロスなどのラインバランシングに関する複数の評価値と工程数の組合せや、作業によるコストなどを扱っている(Ponnambalam et al, 2000)(Rekiek and Delchambre, 2005)(Rahimi-Vahed, et al., 2007)。しかしながら、これらの工程設計の問題では、主に生産計画を満足するためのサイクルタイム以下の作業時間となるように各工程へ要素作業を割り付ける操作が行われており、厳密にはラインバランシングの操作とは言えない。また、ラインバランシングに関する評価値を目的関数として扱っている場合においても作業時間の変動に考慮した操作は考慮されていない。また、混流生産においては異種製品が同一工程を流れるため、工程間で作業時間差が生じやすく、待ち時間の発生から生産性が劣る場合が生じる。しかしながら、これまでの研究では、製品の工程設計により得られた各工程の割付け結果のみを評価しており、割付け結果の生産性の評価は十分行われていない。

本研究では混流生産による作業者の多工程持ちによる生産ラインに着目し、生産性向上を目的として、(1)作業時間の変動を含んだ条件においてラインバランシングを目的とする多目的遺伝的アルゴリズムによる工程設計法を開発し、(2)イベント駆動型シミュレーションによる工程案の生産性評価とともに必要な工程間のバッファ容量の算出を行う。本論文では単純モデルによる数値実験から提案法の有効性を示すとともに、混流生産における工程設計の問題点と対策を示す。

2. 問題とする工程設計の特徴

本研究では生産性の高い生産ラインの設計を目的として、下記の2点の操作を行う。

- (1)全工程の平均作業時間の最大値と作業時間の分散の最大値の最小化を目的とし、要素作業を工程に割り付ける操作
- (2)工程間にバッファを導入する操作

図1は本研究における工程設計における要素作業を各工程に割り付ける操作の概要図を示す。(1)について、各工程に割り付けられた要素作業の作業時間の合計が各工程の作業時間となり、全工程内の最大作業時間によって生産ラインから製品が製造される時間間隔(サイクルタイム)となる。要素作業の作業時間が正規分布を有するものと仮定すれば、全工程の平均作業時間の最大値は実行時の平均サイクルタイムとなり、生産性を向上させるには平均サイクルタイムを削減することが必要である。また、工程間の平均作業時間が同一であっても要素作業の作業時間の分布によって作業の待ち時間やブロッキングが発生するため、一時的にサイクルタイムが変化し、生産性の減少やバラツキが生じる。これより、全工程における作業時間の分散値を小さくすることによって、隣り合う工程間の作業時間差から生じる作業の手待ち時間を削減でき、ラインの生産性のバラツキを抑制できることが考えられる。本研究では、全工程における平均作業時間の最大値を小さくすることで、サイクルタイムを小さくするとともに、全工程で作業時間の変動の影響が小さいラインを作成することを目的とするため、全工程の“平均作業時間の最大値”と“作業時間の分散の最大値”を目的関数として用いる。

ここで、各要素作業の作業時間の平均値と分散値は独立に与えられるため、平均作業時間の和が最大となる工程と作業時間の分散の和が最大となる工程は必ずしも一致しない。しかしながら、“平均作業時間の最大値”と“作業時間の分散の最大値”の多目的問題として扱うことで、全工程の平均作業時間と作業時間の分散はそれぞれの最大値以下の値となることから、全工程を対象として平均作業時間と作業時間のバラツキを小さくする生産ラインの設計案が作成できる。

(2)について、工程間に仕掛けバッファを設置することによって、手待ち時間を削減でき、生産性の向上が行える。必要とするバッファ量は工程間の生産対象の時間と作業時間から見積もれるが、混流生産においては投入させる製品の種類により、工程間の作業時間差が都度、変化するため、見積もりを行うことも容易ではない。

本研究では、(1)と(2)を連続に行うことで工程設計を行う方法を提案する。(1)において、要素作業を工程に割り付ける操作を多目的問題として扱い、局所探索法を利用する多目的遺伝的アルゴリズムを適用する。次に、(2)に

において、(1)の割付け結果をイベント駆動型シミュレーションによって評価するとともに、工程間のバッファの有無の条件から得られる数値実験結果を利用してバッファ量を算出する。

本問題で扱うモデルの特徴を以下に示す。

- ・直線型生産ライン
- ・各工程において複数の要素作業が割り付く
- ・複数の製品がランダムに生産ラインに投入される

Fig.1 Schematic diagram of assignment of work elements to work centers in process design. This figure denotes assignment process of work elements to work centers for a single product. Since the maximum value of operation time in all work centers generates practical cycle time, the maximum value requires to be reduced to improve productivity.

工程設計の問題を明確にするため、(1)の操作に関する数理モデルを以下に記述する。

記号

- p_i : 要素作業 i の平均作業時間
 s_i : 要素作業 i の作業時間の分散
 k : 工程 ($k \in [1, K]$)
 i : 要素作業 ($i \in [1, I]$)
 $C_{\max}$: 全工程内の平均作業時間の最大値
 $D_{\max}$: 全工程内の作業時間の分散の最大値
 δ_{ik} : 要素作業 i が工程 k に割り付く場合 1, その他は 0 とする変数
 u_i : 要素作業 i が割り付く工程番号 ($u_i \in [1, K]$)
 M : 大きな正の数

$$\text{Min } C_{\max} \quad (1)$$

$$\text{Min } D_{\max} \quad (2)$$

s.t.

$$C_{\max} \geq \sum_{i=1}^I \delta_{ik} p_i \quad (3)$$

$$D_{\max} \geq \sum_{i=1}^I \delta_{ik} s_i \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^K \delta_{ik} = 1 \quad \forall i \quad (5)$$

$$k + M(\delta_{ik} - 1) \leq u_i \quad \forall i, \forall k \quad (6)$$

$$u_i \leq K(1 - \delta_{ik}) + k \quad \forall i, \forall k \quad (7)$$

$$u_i \leq u_j \quad i \neq j \quad (8)$$

本問題は全工程内の平均作業時間の最大値と各工程の中の作業時間の分散の最大値を目的関数とする多目的問題として取り扱う．式(1), (2)はそれぞれ，全工程内の平均作業時間の最大値と各工程の中の作業時間の分散の最大値に関する目的関数を示す．式(3)は各工程の中の平均作業時間の最大値を与える制約条件を，式(4)は各工程の中の作業時間の分散の最大値を与える制約条件を示す．式(5)は要素作業 i が 1 つの工程に割り付く条件を示す．式(6)と(7)は要素作業 i が工程 k に割り付いた場合， $u_i = k$ とする制約条件を示す．式(8)は要素作業 i, j 間の先行関係に関する制約条件式である．この式は要素作業 j が要素作業 i の“直後”である先行作業の関係に利用する．式(8)は各要素作業について異なる要素作業間の先行関係に従って与える．すなわち，要素作業の先行関係図内の接続する 2 つの要素作業の全組み合わせについて，式(8)の制約式を適用する．

3. ハイブリッド型多目的遺伝的アルゴリズム

要素作業を工程に割り付ける操作を行うため，全工程の平均作業時間の最大値と全工程の作業時間の分散の最大値を目的関数とする多目的遺伝的アルゴリズム(MOGA)と局所探索法を組み合わせたハイブリッド型 MOGA を開発する．工程数は条件として与え，異なる工程数に対してハイブリッド型 MOGA によって計算を行う．これより，工程数による工程設計案の特徴を評価する．

要素作業を各工程に割り付ける操作においては，要素作業間で先行関係が存在するため，探索操作の過程で先行関係を満足しない実行不可能解が発生しやすい．一方で，事前の数値実験から，実行不可能な解を除外し，実行可能解のみを対象として遺伝的アルゴリズムによって解の探索を行った場合，実行可能解を発見する時間が長く，局所解に陥りやすいため，優れた解の探索が困難となる傾向が見られた．このため，“実行不可能”解となる個体も個体集合に保存し，交叉や次世代への個体の選択過程で“実行不可能”解となる個体も選択対象とするとともに，個体の選択に利用する評価値を係数によって変更することで“実行不可能”解を選択する確率を操作する．図 2 は解空間における個体選択の概要図を示す．具体的には，選択に利用する個体の評価値 g を係数 K と評価値 f の積($g=Kf$)で与え，解の特徴によって係数を変化させる．実行可能解となる個体の場合では $K=1$ とし，実行不可能解となる個体では 1 以上の任意の値を係数に設定する．そして，操作の過程で実行不可能解となる個体の係数の値を動的に変化させることで最適パレート解を探索する．係数 K の操作では黄金分割探索法(茨木, 福島, 1991)に類似する局所探索法を適用する．以下に提案するハイブリッド型 MOGA の処理の流れを示す．

ハイブリッド型 MOGA

(HM1) 左側係数 $KL0$, 右側係数 $KR0$ の初期値, 係数の操作パラメータ α を設定する．さらに, 係数の探索回数 MTR を設定し, 現探索回数を 0 とする．

(HM2) 下式から係数 KL, KR を算出する．

$$KR = KR0 - \alpha(KR0 - KL0)$$

$$KL = KL0 + \alpha(KR0 - KL0)$$

(HM3) 係数 KL と KR について, 未実行の係数を係数 K として単体 MOGA を実行する．

(HM4) 係数 KL と KR の最終個体集合内の実行可能解を比較し, 優れた個体数を調べる．

(HM5) 係数 KR の集合内に優れた個体数が多い場合は以下の式により, 各係数を算出する．

$$KR0 = KR$$

$$KR = KL$$

$$KL = KL0 + \alpha(KR0 - KL0)$$

係数 KL の集合内に優れた個体数が多い場合は以下の式により, 各係数を算出する．

$$KL0 = KL$$

$$KL = KR$$

$$KR = KR0 - \alpha(KR0 - KL0)$$

とする．優れた個数が同数の場合は $KR0 = KR, KL0 = KL$ として, KR, KL を算出する．

(HM6) 探索回数が MTR であれば, 探索終了する．それ以外ならば, 探索回数を 1 増やし, (HM4)へ戻る．

本研究では $\alpha = 0.382$ とし, 黄金分割探索法と同様の操作を行う. 提案法では係数の操作の過程で個体集合は同一のものを利用し, ある係数での初期個体は前の係数の最終世代の個体集合とする. これにより, 係数の操作は最適な係数を探索することが目的ではなく, 多様な係数を利用して優れた解を見つけることを目的とする. 以下に(HM 3)での単体 MOGA の処理の流れを示す.

単体 MOGA

(SM1) 個体数と最大世代数の設定

(SM 2) 係数 K の設定

(SM 3) 初期個体の生成, 現世代の初期化

(SM 4) 交叉と突然変異

(SM 4-1) ルーレット選択による親個体の抽出

(SM 4-2) 交叉処理

(SM 4-3) 子個体の染色体の個体集合内の有無の評価

(SM 4-4) 個体集合内に存在する場合は突然変異処理を行い, (SM 4-3)へ戻る. 存在しなければ(SM 4-5)へ進む.

(SM 4-5) 子個体の個体集合への保存

(SM 5) エンコードと各種評価値の算出

(SM 6) 次世代集合のための個体選択

(SM 6-1) パレート解の選択

(SM 6-2) 並列選択

(SM 6-3) ルーレット選択

(SM 7) 世代数が最大世代数ならば終了する. その他ならば世代数を 1 増やし, (SM 4)へ戻る.

(SM3)では, 位置的重み法(Helgeson and Birnie, 1961)によって工程設計案を生成し, 一様乱数によってその工程設計案の作業割付けを変更することでの初期個体を生成する.

交叉処理は 2 点交叉とする. 突然変異においては, 染色体の任意の 2 点を一様乱数で選択し, 該当する要素の値を交換する. この処理を[1, 5]から一様乱数で選択した整数だけ繰り返す. ルーレット選択においては, 式(9),(10)によって二目的関数の評価値を規格化した単一の評価値 f に変換した値の逆数を利用する.

$$f = \sqrt{\tilde{f}_1^2 + \tilde{f}_2^2} \quad (9)$$

$$\tilde{f}_i = \frac{f_i - f_{i\min}}{f_{i\max} - f_{i\min}} \quad (10)$$

ここで, $f_{i\min}$ と $f_{i\max}$ はその世代での f_i の最小値と最大値とする. (SM 6-1)と(SM 6-2)において選択する個体数の合計, およびは(SM 6-3)において選択する個体数はそれぞれ個体集合の総個体数の 1/2 とする.

図 3 と図 4 はそれぞれ, 染色体表現例とその染色体から得られる要素作業の割付け結果例を示す. 染色体は要素作業番号の列と工程番号の列から構成される. 工程番号の列内では, 左側の要素は小さい番号か, 同一の番号とする. 要素作業番号の列と工程番号の列の左側からの要素のペアについて, 要素作業が当該要素の工程に割り付くことを表す. 交叉と突然変異においては, 作業番号列と工程番号列を独立に操作する. このとき, 工程番号列では連続する同一工程番号の最終要素を 1, その他の要素を 0 とする数列に変換する. 変換後は数列には工程数の 1 が存在する. この数列の操作において, 1 の数量のみを評価すればよいので交叉と突然変異の操作を容易に行える. 図 5 は変換した染色体の部分数列の例を示す.

Fig.2 Schematic diagram of search process for process design. Both feasible solutions and infeasible solutions are included in the solution area. Since infeasible solutions are ordinarily superior to feasible solutions, infeasible solutions and feasible solutions are selected to generate new chromosomes at the crossover process by using uniform random number.

1	3	4	5	7	6	2	8	9	12	13	10	11
0	0	1	1	1	2	2	2	3	3	3	4	4

Fig.3 Representation of chromosome. A sequence of upper numbers denotes work elements numbers and a sequence of lower numbers denotes work center numbers.

Fig.4 Schematic diagram of work elements assigned by the chromosome shown in Fig.3.

0	0	1	1	1	2	2	2	3	3	3	4	4
	↓			↓			↓			↓		↓
0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1

Fig.5 Modification of a sequence of work center numbers in chromosomes. A sequence of upper numbers denotes the original sequence of work center numbers. A sequence of lower numbers denotes the modified sequence of the numbers.

4. 数値実験による提案法の評価

4・1 実験条件

本章ではハイブリッド型 MOGA から計算される工程設計案を評価するため、数値実験を行う。数値実験の対象とする生産ラインは3種類の製品(製品 A, B, C とする)から構成されるものとする。製品 A は基本製品として、製品 B は製品 A の一部の部品が異なり、類似作業によって行われる。製品 C は製品 A に複数の部品が追加され、これにより要素作業が追加される。図 6 は製品 A, B, C に関する要素作業の先行関係図を示す。図内の記号は製

品を示し、番号は要素作業の番号を示す。製品 A, B, C の要素作業数はそれぞれ、11, 11, 14 であり、割付け対象の要素作業数は 18 である。

製品 A, B, C の生産量はそれぞれ 100 個, 220 個, 100 個とする。混流生産ラインの工程設計のため、各要素作業の作業時間(平均作業時間 μ_r , 作業時間の分散 s_r)を下記の式で修正し、修正した作業時間を利用して要素作業を各工程に割り付ける。

$$\mu_r = \sum_i \left(P_i \sum_k \mu_{ik} \delta_{rik} \right) / \sum_i P_i \quad (11)$$

$$s_r = \sum_i \left(P_i \sum_k s_{ik} \delta_{rik} \right) / \sum_i P_i \quad (12)$$

ここで、 P_i は製品 i の生産量、および μ_{ik}, s_{ik} はそれぞれ製品 i の要素作業 k の平均作業時間、作業時間の分散を示す。 δ_{rik} は製品 i の要素作業 k が統合された要素作業 r を構成するならば 1 を取り、その他は 0 を取る。表 1 は製品 A, B, C の要素作業の作業時間の平均値と標準偏差を示す。Table.1 の左向きの矢印は左の値に一致することを指す。また、表 1 の要素番号は図 6 内の番号を指す。

数値実験では、単体 MOGA の遺伝子操作について世代数 100, 重み係数 α に対する局所探索の繰り返し探索回数を 15, 開始時の係数 α の最小値を 1.0, 最大値を 50.0 とする。遺伝子操作での集合の個体数を N , 世代数を T , 重み係数 α に対する局所探索の繰り返し探索回数を N_K 回とすれば、提案アルゴリズムでは最大 $N_K \cdot N (T+1)$ の個体を探索することに相当する。一方で、要素作業数を I , 工程数を K とすれば、遺伝子表現による組み合わせ数は $(I!)^2 / (K!(I-K)!)$ で表すことができ、数値実験の条件では提案アルゴリズムによって探索対象の要素数が約 $1/(17!)$ に減少している。

Fig.6 Precedence diagram of work elements.

Table 1 Operation time of work elements of products. "No." denotes work elements number.

Product A			Product B			Product C		
No.	Operation time		No.	Operation time		No.	Operation time	
	Average	Standard deviation		Average	Standard deviation		Average	Standard deviation
1	14	4	12	14	0.3	1	←	←
2	15	2.2	13	16	4.7	2	←	←
3	9	2.1	3	←	←	3	←	←
4	9	4.4	4	←	←	4	←	←
5	13	6.2	14	14	3.3	5	←	←
6	7	1.1	6	←	←	6	←	←
7	16	6.3	15	13	2.4	7	←	←
8	4	0.1	8	←	←	8	←	←
9	6	2.2	9	←	←	9	←	←
10	5	1.2	10	←	←	10	←	←
11	10	0.2	11	←	←	11	←	←
						16	3	0.4
						17	3	1.3
						18	4	0.2

4・2 ハイブリッド型 MOGA 法による工程設計案の特徴

図 7 は異なる工程数に対してハイブリッド型 MOGA 法から得られた実行可能解のパレート解の分布を示す。図の横軸は平均作業時間の最大値を、縦軸は平均分散値の最大値を指す。工程数が少ないほど、平均作業時間の最大値は大きく、一工程当たりの割り付けの組合せ数が増加するためパレート解の分布の範囲が広がる。この結果は工程数が少ないほど、パレート解から見た選択対象の工程設計案の数が多いことを示す。

図 7 の直線 OW3, OW4, OW5, OW6 はそれぞれ、工程数 3, 4, 5, 6 の条件における平均作業時間の最大値の最小値(以下、平均作業時間の minimax と略記)を示す。作業時間の分散値の最大値の最小値(以下、作業時間の分散の minimax と略記)は全工程数の条件において同値が得られおり、図中の OD は作業時間の分散の minimax を示す。これらの値は 2 章での数理モデルにおいて、各目的関数を単一目的関数として扱い、求解した結果である。計算には Gurobi Optimizer (October Sky Co., Ltd)を利用した。

図中の PW3, PW4, PW5, PW6 はそれぞれ、工程数 3, 4, 5, 6 の条件における位置的重み法から得られた解を示す。全工程数の条件においてハイブリッド型 MOGA によって単目的関数での最適解に近似する結果が得られていることを示している。位置的重み法による解はハイブリッド型 MOGA 法の初期解として利用しており、パレート解は位置的重み法による解に優る。A1, B1, C1, D1 は、工程数が 3, 4, 5, 6 の場合の平均作業時間の最大値が最小となるパレート解を指す。また、A2, B2, C2, D2 は比較のために利用する、パレートフロントの中央部付近の解を指す。図 8 は A1, B1, C1, D1 の工程設計案から得られた、各工程の作業時間を示す。図中の棒グラフはハイブリッド型 MOGA から得られた各工程に割り付けられた要素作業の平均値であり、エラーバーは作業時間の標準偏差を示す。図 9 は異なる方法から得られた工程設計案のバランス効率(Balance Effectiveness)の比較結果を示す。横軸は工程数を示す。バランス効率は各工程の平均作業時間の分布を利用し、式(13), (14)から算出した。ここで、 μ_k^* は工程 k の平均作業時間である。

$$\text{Balance Effectiveness} = \frac{\sum_{k=1}^K \mu_k^*}{K \cdot \mu_{\max}^*} \quad (13)$$

$$\mu_{\max}^* = \max\{\mu_k^*\} \quad (14)$$

Fig.7 Pareto solutions obtained by hybrid type of MOGA under different number of work centers.

図内で"Hybrid MOGA (1)"は A1, B1, C1, D1 の工程設計案のバランス効率を示し, "Hybrid MOGA (2)"は A2, B2, C2, D2 における工程設計案の効率を, "Positioned Weighted"は位置的重み法による工程設計案の効率を示す。"Hybrid MOGA (Original)(1)"は製品の生産量の比による作業時間の修正を行わず, オリジナルの作業時間による工程設計案の結果を示す。なお, これらの工程設計案は平均作業時間の最大値が最小のパレート解に相当する。

全ての工程数で"Hybrid MOGA (1)"の結果は"Hybrid MOGA (2)"と"Positioned Weighted"の結果に比べて優れているか、ほぼ同値であることは明らかである。一方、"Hybrid MOGA (Original)(1)"の結果は各工程におけるオリジナルの作業時間がバランスするように要素作業の割付けが行われるため、全条件で高いバランス効率を得ており、ほぼ全条件で最も優れた結果を得ている。しかしながら、工程数が5の条件では、"Hybrid MOGA (Original)(1)"の結果は"Hybrid MOGA (1)"に比べて劣っているが、この結果は Hybrid MOGA の操作において局所解が得られたことが考えられる。しかしながら、その差は 0.05 程度である。

工程数が少なければ一工程あたりに割り付けられる要素作業数が多くなるため、ラインバランスが良くなる傾向が予想される。図9において、"Hybrid MOGA(1)"から得られた結果ではいずれの工程においても 0.9 以上の優れた効率が得られており、工程数が少ないほど効率が高くなる傾向は明確には現れていない。しかしながら、"Positioned Weighted"と"Hybrid MOGA(2)"の結果では工程数が少ないほど効率が高い傾向が見られる。さらに、全計算条件において、工程数が3の計算結果は他の工程数に比べて優れた効率が得られており、この結果は工程数が少ないほど効率が高い傾向を示しているものと考えられる。

Fig.8 Operation times at different work centers in production lines designed by Hybrid MOGA. Operation time of work elements assigned to work centers is modified by the production ratios of products.

Fig.9 Comparison of balance effectiveness of production lines designed by different methods

4・3 イベント駆動型シミュレーションによる生産性の評価

提案法では異種製品の生産量の割合を考慮し、各工程に要素作業を割り付けた。生産ライン上での作業を考えた場合、ライン内を異種製品が流れ、製品に適する作業が行われるため、工程間の作業時間差や作業時間のバラツキにより、工程での作業の手待ちやブロッキングが生じる。本節では、設計された生産ラインの生産性を評価するため、工程設計案における各工程の要素作業の作業時間とバラツキを与えて、生産ライン上の作業の流れを模擬する。製品の投入順序は一様乱数によって決定し、生産ラインの生産性は全量の生産に要した時間を 100 回の試行結果によって評価する。これより、全製品数の製造完了時間を調べ、短時間で生産が完了した工程を生産性の高い工程と判定する。生産ラインの模擬にはイベント駆動型シミュレーションには「Arena」(Rockwell Software) (Kelton, et al., 2007) を利用する。

シミュレーションでは、各工程間にバッファを未設置の条件、あるいは、バッファの容量を最大総仕掛量が 150 である条件を設定する。ただし、後者はソフトウェアの利用条件によって決定されている。

図 10 は、図 7 に示す異なる工程数のパレート解の生産ラインについて、シミュレーションから得られた全製品数の製造完了時間を示す。(a)は A1, B1, C1, D1 の比較であり、(b)は A2, B2, C2, D2 の比較である。「Buffer」はバッファを設置、「No Buffer」はバッファ未設置の条件を指す。また、図中の*はバッファの容量が最大総仕掛量に達し、シミュレーションが停止したため、停止時点での生産量から完了時間を見積もった値である。棒グラフは全試行の平均値を、エラーバーは標準偏差を示す。

図 10 より、バッファの導入によって生産性が向上することが明らかである。A1, B1, C1, D1 の比較から、平均作業時間の最大値が小さいほど生産性は高い。一方で、A2, B2, C2, D2 の工程設計案はパレート解の分布の中央部分の解であり、A1, B1, C1, D1 に比べて平均作業時間の最大値は大きく、作業時間の分散の最大値は小さい。A2 におけるバッファ設置の条件を除き、バッファの有無に限らず、平均作業時間の最大値の増加による生産性が低下している。これらの結果は、平均作業時間の最大値の削減が作業時間の分散の最大値の削減に比べて、生産性の向上に影響を与えることを示す。これは要素作業の作業時間について、平均作業時間が大きいほど標準偏差の値が大きい傾向があること、さらに、標準偏差の値が大きい工程が必ずしも平均作業時間の最大値をとる工程と一致していないことが原因と考えられる。

しかしながら、作業時間の変動が大きいラインならば、ブロッキングが生じやすく、全作業の完了時間を遅らせる可能性があることは明らかである。このことから、最大平均作業時間と作業時間の分散の最大値を目的関数とする多目的問題から得られるパレート解において、最大平均作業時間の最小値とする解を選定することによって、生産性の高い工程設計案が得られるものと考えられる。

(a) Comparison of completion times obtained from production lines designed by solutions A1, B1, C1, and D1

(b) Comparison of completion times obtained from production lines designed by solutions A2, B2, C2, and D2

Fig.10 Completion time obtained from event-driven simulation with regards to different production lines obtained by Hybrid MOGA under the condition that operation times of works are estimated using ratios of products. These are related to results obtained from Hybrid MOGA (1).

図 11 は製品の生産量の比による作業時間の修正を行わず、オリジナルの作業時間を利用した工程設計案(Hybrid MOGA (Original) (1)) による完了時間の比較を示す。図 9 でのバランス効率では、いくつかの条件で提案法が劣るが、図 10(a)と図 11 の比較から全ての工程数で提案法によるハイブリッド型 MOGA による完了時間が Hybrid

MOGA (Original) (1)の結果に比べて優るか、ほぼ同値である。とくに、バッファを導入した条件では、提案法の優位さが大きい。全要素作業の作業時間についてバランス効率を高めたとしても、各工程では異種製品の作業を行うため、連続して工程間では作業時間差が大きくなり、生産性が劣ることが考えられる。上記の結果は、混流生産ラインでは製品の生産量比から計算される要素作業の作業時間を利用することで生産性の高い工程設計を行えることを示す。

Fig.11 Completion time obtained from event-driven simulation with regards to different production lines obtained by Hybrid MOGA using original operation times of works. These are related to results obtained from Hybrid MOGA (Original) (1).

4・4 イベント駆動型シミュレーションによるバッファ量の評価

図 12 は、提案法から得られた工程設計案 A1, B1, C1, D1 について、バッファを設置した条件において、シミュレーションから得られた各工程間の最大仕掛量を示す。この最大仕掛量は 100 回のシミュレーションから得られた平均値を示す。工程数が 4 と 6 の仕掛量は、バッファの容量が最大総仕掛量に達し、シミュレーションが停止したため、停止時点での生産量から仕掛量を見積もった値である。図 12 から、仕掛量の大きい工程間を調べることができるため、バッファの設置位置と必要量を見積もることが可能となる。比較のため、各工程間の仕掛量を各工程の平均作業時間を利用して式(15)から算出する。

$$I_k = \sum_{n=1}^N \text{Max} \left(\frac{t_{n,k} - t_{n,k-1}}{t_n^{\max}} P_n, 0 \right) \quad (k = 2, 3, \dots, K) \quad (15)$$

ここで、 $t_n^{\max}$ は全工程内の平均作業時間の最大値、 $t_{n,k}$ は工程 k の平均作業時間を示す。式(15)は同一製品の連続生産をモデルから導出した式である。図 12 内の”Estimated”は式(15)の解を示す。実験条件では一品ごとに異種製品が投入される混流生産のため、複数の工程間バッファにおいて、シミュレーションから得られた仕掛量は式(15)の見積もり量に比べて大きい。さらに、前工程ほど仕掛量が大きく、後工程では式(15)の見積もり量よりも小さい傾向が得られている。この結果は、混流生産ラインにおいて、生産性を高めるためには前工程間のバッファ容量を大きく、後工程では小さくすることが生産性向上に有効であることを示唆する。

さらに、シミュレーションによる図 12 による最大仕掛量の分布と図 11 の製造完了時間から、要求される製造完了時間からバッファの容量を決定することが可能である。

Fig.12 The maximum value of inventory level between work centers with regards to different process lines obtained by Hybrid MOGA.

5. 結 言

本研究では生産性向上を目的とする混流生産ラインの工程設計法として、要素作業の割り付け操作のためのハイブリッド型多目的遺伝的アルゴリズムと、バッファ量の見積りのためにイベント駆動型シミュレーションを利用した方法を組み合わせた方法を開発した。そして、単純モデルを用い、開発した方法を利用して工程設計例を示した。数値実験から、ハイブリッド型多目的遺伝的アルゴリズムの有効性を示すとともに、イベント駆動型シミュレーションによって工程設計案の生産性を評価し、工程設計案の特徴を示した。また、バッファの導入による生産性の効果を示すとともに混流生産が生産性に及ぼす影響や問題点を示した。

今後の課題として、工程間のバッファ量を操作パラメータや目的関数として本提案法に加えることで、混流生産に対して、より工程間のバッファ量を小さく、生産性の高い工程設計案が作成できるものと考えられる。また、三目的関数や四目的関数を取り扱うため、要素作業の割り付け操作の探索処理を早めるため、Particle Swarm Optimization 法などの他の多目的進化型計算の導入を検討する必要がある。

本研究は日本学術振興会・科学研究費(基盤研究 C : 課題番号 24510214)の助成を受けたものである。

文 献

- Helgeson, W. P. and Birnie, D.P. Assembly Line Balancing Using the Ranked Positional Weight Technique, *International Journal of Industrial Engineering*, Vol. 12, No.6 (1961), pp.394-398.
- 茨木俊秀, 福島雅夫, *FORTRAN 77 最適化プログラミング* (1991), 岩波書店, pp.133-140.
- 岩室宏, *セル生産システム* (2002), 日刊工業新聞社, pp.37-48.
- Kelton, W.D., Sadowski, R.P. and Sturrock, D.T., シミュレーション—ARENA を活用した総合的アプローチ(高桑宗右エ門 (訳), 野村淳一 (訳)) (2007), コロナ社.
- Matanachai, S. and Yano, A.C., Balancing mixed-model assembly lines to reduce work overload, *IIE Transactions*, Vol.33 (2001), pp.29-42.
- 村松林太郎, *生産管理の基礎*(1979), 国元書房, pp.169-219.
- Noorul, H. A., Jayaprakash, J. and Rengarajan, K., A hybrid genetic algorithm approach to mixed-model assembly line balancing, *The International Journal Advanced Manufacturing Technology*, Vol.28, Issues 3-4 (2006), pp.337-341.
- Ponnambalam, S.G., Aravindan, P. and Naidu, G.M., A Multi-Objective Genetic Algorithm for Solving Assembly Line Balancing Problem, *The International Journal Advanced Manufacturing Technology*, Vol.16, Issue 5 (2000), pp.341-352.
- Rahimi-Vahed, A.R., Mirghorbani, S.M. and Rabbani, M., A New Particle Swarm Algorithm for a multi-objective mixed-model assembly line sequencing problem, *Soft Computing*, Vol.11, Issue 10 (2007), pp.997-1012.
- Rekiek, B. and Delchambre, A., *Assembly Line Design*, Springer (2005), pp.59-102.
- Rekiek, B., Lit, P.D. and Delchambre, A., Designing Mixed-Product Assembly Lines, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 16, No. 3 (2000), pp. 268-280.
- 坂爪裕, なぜセル生産方式の導入後に継続的な改善活動が必要となるのか, *IE レビュー*, Vol.45, No.2 (2004), pp.6-13.

References

- Helgeson, W. P. and Birnie, D.P. Assembly Line Balancing Using the Ranked Positional Weight Technique, *International Journal of Industrial Engineering*, Vol. 12, No.6 (1961), pp.394-398.
- Ibaraki, T. and Fukushima, M., *FORTTRAN 77 Programming for Optimization Problem* (1991), Iwanami Shoten, pp.133-140 (in Japanese).
- Iwamuro, H., *Cell Production System* (2002), Nikkan Kogyo Shinbun, LTD, pp.37-48 (in Japanese).
- Kelton, W.D., Sadowski, R.P. and Sturrock, D.T., *Simulation with Arena* (2007), Corona Publishing Co. LTD (in Japanese).
- Matanachai, S. and Yano, A.C., Balancing mixed-model assembly lines to reduce work overload, *IIE Transactions*, Vol.33 (2001), pp.29-42.
- Muramatsu, R., *Fundamental Production Management* (1979), Kunimoto Shobo, pp.169-219 (in Japanese).
- Noorul, H. A., Jayaprakash, J. and Rengarajan, K., A hybrid genetic algorithm approach to mixed-model assembly line balancing, *The International Journal Advanced Manufacturing Technology*, Vol.28, Issues 3-4 (2006), pp.337-341.
- Ponnambalam, S.G., Aravindan, P. and Naidu, G.M., A Multi-Objective Genetic Algorithm for Solving Assembly Line Balancing Problem, *The International Journal Advanced Manufacturing Technology*, Vol.16, Issue 5 (2000), pp.341-352.
- Rahimi-Vahed, A.R., Mirghorbani, S.M. and Rabbani, M., A New Particle Swarm Algorithm for a multi-objective mixed-model assembly line sequencing problem, *Soft Computing*, Vol.11, Issue 10 (2007), pp.997-1012.
- Rekiek, B. and Delchambre, A., *Assembly Line Design*, Springer (2005), pp.59-102.
- Rekiek, B., Lit, P.D. and Delchambre, A., Designing Mixed-Product Assembly Lines, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 16, No. 3 (2000), pp. 268-280.
- Sakadume, Y., Why is continuous improvement process required after cell production system is introduced? , *IE Review*, Vol.45, No.2 (2004), pp.6-13 (in Japanese).