マッチングを考慮した加工・組立自動生産ラインの挙動解析* (組合せ優先規則の影響)

井山 俊郎^{*1}, 水野 雅裕^{*1}, 後藤 正三^{*2}

Behavior of Machining-Assembly Automatic Transfer Line Systems Adapting a Matching Method (Effects of Rules of Part Combinations)

Toshirou IYAMA, Masahiro MIZUNO and Shōzō GOTŌ

A matching method is used in many factories to produce high-quality bearings efficiently. In this method, the rule of part combinations affects the production rate and the consumption rate ratio of balls with various dimensions purchased from an outside factory, and an effective rule must be considered. This paper studies the effect of 2 rules of part combinations; an in-process part rule in which an inner race preferentially selects the outer race which has the maximum number of combinations from outer races stored in buffer storage, and an accuracy rule in which an inner race preferentially selects the outer race which has an accuracy closest to the inner race accuracy. From the numerical analysis, it is shown that the in-process part rule cancels the decrease of the production rate caused by the matching method, and that two rules give different consumption rate ratios of balls.

Key Words: Production System, Process Planning, Production Planning, Machining Stage, Assembly Stage, Matching Method, Rule of Part Combination, Production Rate, Consumption Rate Ratio

1. 緒 言

複数の部品から構成されるベアリングなどの機械要素を量産する場合、部品の加工工程と組立工程からなる合流形自動生産ラインが導入される。しかし、一般に加工工程では、加工部品に加工誤差が生じ仕上がり寸法が変動するため、各加工工程から出力される部品を出力順に組立工程で組み合わせると所定の性能を発揮できない機械要素が生産される。そこで、高性能の機械要素を生産するため、各工場では組立作業にマッチングの手法を取入れている。マッチングは、機械要素を構成する量産された各種部品の仕上がり寸法に応じて組合せ相手部品を選択し機械要素を組み立てる方式である。しかし、組合せ相手部品の選択に対し、通常用いられる精度優先規則を使用した場合には、マッチングを考慮しないで単に加工部品を出力順に組み立てる場合に比べ、大きな生産率の低下が発生し生産性の改善のために大きなバッファ容量の導入が必要になること、また、加工精度が部品の種類ごとに異なる場合には、バッファ導入により生産性が改善されない場合

も存在することが示された⁽¹⁾。

そこで本研究では、ベアリングの量産形加工・組立自動生産ラインにマッチング手法を導入した場合の組合せ相手部品の選択に対し、新たに仕掛品優先規則を用いた場合の物流挙動を解析し、各加工工程で量産される部品の加工精度あるいはバッファ容量が生産率および外部から導入される部品の消費割合に及ぼす影響を解析する。また、仕掛品優先規則と精度優先規則の比較を行い、仕掛品優先規則の効果を明らかにする。

2. マッチングを考慮した 合流形ラインのモデル化

2・1 ライン構成 本研究で扱うマッチングを考慮した加工・組立合流形生産ラインの構成を図1に示す。工程1A、1Bはそれぞれ部品A(内輪)、B(外輪)の加工工程で、加工部品の寸法を測定する検査工程が組み込まれている。これらの加工部品は一般に正規分布の加工精度をもつが、所定の寸法に対して図2に示すように3種類の精度区分 $i(i=-, 0, +)$ に識別され出力される。ただし、精度区分 i の部品 A_i 、 B_i が出力される確率をそれぞれ α_i 、 β_i ($\alpha_- + \alpha_0 + \alpha_+ = 1$, $\beta_- + \beta_0 + \beta_+ = 1$)とする。また、バッファ S_A は容量 M_A をもつ部品Aの共有バッファで、工程1Aから出力され

* 原稿受付 平成6年1月24日。

^{*1} 正員、岩手大学工学部 (〒020 盛岡市上田4-3-5)。

^{*2} NTN(株)生産技術研究所 (〒438 磐田市東貝塚1578)。

た部品を出力順に精度区分を記憶しながら一時保管する。バッファ S_i は容量 M_B をもつ部品 B の精度区分別独立バッファで、部品 B_i を個別に一時保管する。工程 2 は組立工程で、バッファ S_A 内の先頭部品 A の精度区分に応じて組合せ可能部品 Bの中から仕掛品優先規則あるいは精度優先規則のいずれかに従って対応する部品 B と部品 C (ボール) をおのおののバッファから選択して組み立てる。

仕掛品優先規則 (Rule 1) : 部品 A に対し表 1 に示される組合せ可能部品の中から仕掛品個数 (バッファ内個数 + 工程 1 B での作業完了個数) が最大の部品 B を組み合わせる。仕掛品個数が同一の場合には精度優先規則に従う。

精度優先規則 (Rule 2) : 表 1 に示される組合せ優先順位に従って部品 B を組み合わせる。

部品 C は組立工程で組み立てられる部品 A と B の精度区分組合せに対応して 3 種類の寸法 (−, 0, +) が用意されている。この部品 C は外部からつねに補給され欠乏することはない。

また、マッチングを考慮したラインでは、デッドロックが発生する。デッドロックは、精度区分 $A_-(A_+)$ の部品がバッファ S_A の先頭位置に存在するとき、組合せ可能な部品 B が工程 1 B とバッファ $S_-, S_0(S_+)$ に存在せず、部品 $A_-(A_+)$ がバッファに停滞し、工程 1 A と 1 B にブロック状態を発生させ、部品の流

れが停止する状態である。このような状態を回避する方法として、デッドロックを引き起こした部品 $A_-(A_+)$ をバッファからライン外に強制退避させる方法がとられる。

2.2 モデル化 前述のようなマッチングを考慮した合流形自動生産ラインでは一定の加工・組立サイクルで各工程から部品の入出力が行われるので、部品の流れの挙動は直列形自動生産ライン同様マルコフ連鎖を用いてモデル化が可能である^{(2)~(5)}。本研究では、マルコフ連鎖によるモデル化に対し以下の仮定を導入する。

(1) 工程 1 A, 1 B の前には無限個の素材が存在し、工程 1 A, 1 B では素材欠乏によるアイドル状態は発生しない。

(2) 工程 2 には無限容量のバッファが接続され、組立完成品の出力閉塞によるブロック状態は発生しない。

(3) 部品の検査と工程間移動に要する時間およびデッドロック回避に要する時間は加工・組立サイクルタイムに比べ無視できるほど小さい。

(4) 加工・組立サイクルタイムは一定で、このサイクルタイムをモデル化の単位時間とする。

(1), (2) の仮定は、ラインの最大生産能力を与える。

マルコフ連鎖を用いてライン挙動を解析する場合、任意のサイクルタイムで起こり得るすべてのライン状態とその推移および推移確率を捉える必要がある。本研究では、ライン状態を [工程 1 A の作業を終えバッファ S_A と工程 1 A に存在する仕掛り部品数 m_A , バッファ S_A 内の先頭に位置する部品 U : 工程 1 B の作業を終えバッファ $S_i (i = -, 0, +)$ と工程 1 B に存在する仕掛り部品数 m_-, m_0, m_+ : 工程 2 の状態 V] の 6 種類のパラメータで表す。ただし、 $m_A = 0$ のとき、U は工程 1 A で加工中の部品が出力された場合の精度区

図 1 加工・組立合流形生産ラインの構成

図 2 加工部品の精度区分

表 1 優先規則

	Rule 1		Rule 2
Part A	Part B	Part C	Priority
A_-	B_-	C_0	1
	B_0	C_+	2
A_0	B_-	C_-	2
	B_0	C_0	1
	B_+	C_+	3
A_+	B_0	C_-	2
	B_+	C_0	1

分を表し, $U=A_i$, V は稼動 (W) あるいはアイドル (I) の状態をとる。ラインの取得状態を表2に示す。また、ライン状態の状態推移と推移確率は、ライン状態を構成する各要素の矛盾のない状態推移と推移確率から求められ、ラインの定常状態方程式が得られる。この状態方程式を状態確率の総和が1の正規化条件下で解き各ライン状態の定常状態確率が求められる。この結果、定常状態確率を用いて、Rule 1を適用した場合のライン性能を示す単位時間当たりの部品 A_i 対 B_j の組立完成品個数 (個別生産率) R_{ij} は式(1)で与えられ、ラインの総完成品個数 (ライン生産率) $R(R=R_{--}+R_{-0}+R_{0-}+R_{00}+R_{0+}+R_{+0}+R_{++})$ および部品 C_i の個別消費速度 R_{ci} ($R_{c-}=R_{0-}+R_{+0}$, $R_{c0}=R_{--}+R_{00}+R_{++}$, $R_{c+}=R_{-0}+R_{0+}$) が計算される。式中、 $P[\cdot]$ は定常状態確率を表し、表2のライン状態表示 $Y_{1,U,m-,m0,m+}$ で

$$\begin{aligned} U &= A_i \& \{D_{j,0}^1(m_0 \geq 1) \text{ or } m_j \geq 0(m_0=0)\}, \\ U &= A_i \& D_{j,0}^3, \\ U &= A_i \& \{D_{j,0}^2(m_0 \geq 1) \text{ or } m_j \geq 1(m_0=0)\}, \\ U &= A_i \& D_{0,j}^4, \\ U &= A_i \& D_{0,j}^2, \\ U &= A_i \& D_{0,j}^3, \\ U &= A_0 \& D_{-,0}^2 \& D_{-,+}^1, \\ U &= A_0 \& D_{-,0}^4 \& D_{-,+}^2, \\ U &= A_0 \& D_{-,0}^3 \& D_{-,+}^3, \\ U &= A_0 \& D_{0,-}^3 \& D_{0,+}^2, \\ U &= A_0 \& \{D_{0,-}^1(m_- \geq 1) \text{ or } m_0 \geq 0(m_- = 0)\} \\ &\& D_{0,+}^1, \\ U &= A_0 \& D_{0,-}^2 \& D_{0,+}^3, \\ U &= A_0 \& D_{+,0}^3 \& D_{+, -}^4, \\ U &= A_0 \& D_{+,0}^4 \& D_{+, -}^3, \\ U &= A_0 \& D_{+,0}^2 \& D_{+, -}^2, \end{aligned}$$

の条件を満たす状態の部分集合をそれぞれ

$$\Omega_{i,j}^1, \Omega_{i,j}^2, \dots, \Omega_{i,j}^6, \Omega^7, \Omega^8, \dots, \Omega^{15}$$

表2 ライン状態

State	Condition	Description
$[m_A, U: m_-, m_0, m_+ : W]$	$0 \leq m_A \leq M_A$ $m_- + m_0 + m_+ = M_B$ $U = A_-, A_0, A_+$	$Y_{1,U,m-,m0,m+}$
$[m_A, A_- : 0, 0, M_B + 1 : I]$	$0 \leq m_A \leq M_A$	$Y_{2,mA}$
$[m_A, A_+ : M_B + 1, 0, 0 : I]$	$0 \leq m_A \leq M_A$	$Y_{3,mA}$
$[0, A_- : M_B + 1, 0, 0 : I]$		Y_4
$[0, A_0 : 0, 0, M_B + 1 : I]$		Y_5
$[0, A_0 : M_B + 1, 0, 0 : I]$		Y_6
$[0, A_+ : 0, 0, M_B + 1 : I]$		Y_7

とする。ただし、 $D_{j,k}^1, D_{j,k}^2, D_{j,k}^3, D_{j,k}^4 (j, k = -, 0, +)$ はそれぞれ条件 $m_j \geq m_k - 1$, $m_j \geq m_k$, $m_j \geq m_k + 1$, $m_j \geq m_k + 2$ を表す。

$$\begin{aligned} R_{--} &= \sum_{\omega \in \Omega_{-,-}^1} \beta_- \cdot P[\omega] + \sum_{\omega \in \Omega_{-,-}^2} \beta_0 \cdot P[\omega] \\ &+ \sum_{\omega \in \Omega_{-,-}^3} \beta_+ \cdot P[\omega] + P[Y_4] \\ &+ \alpha_- \cdot \frac{1 - \alpha_+^{M_A}}{1 - \alpha_+} \cdot P[Y_{3,MA}] \\ R_{-0} &= \sum_{\omega \in \Omega_{-,0}^4} \beta_- \cdot P[\omega] + \sum_{\omega \in \Omega_{-,0}^5} \beta_0 \cdot P[\omega] \\ &+ \sum_{\omega \in \Omega_{-,0}^6} \beta_+ \cdot P[\omega] \\ R_{0-} &= \sum_{\omega \in \Omega_{0,-}^7} \beta_- \cdot P[\omega] + \sum_{\omega \in \Omega_{0,-}^8} \beta_0 \cdot P[\omega] \\ &+ \sum_{\omega \in \Omega_{0,-}^9} \beta_+ \cdot P[\omega] + P[Y_6] + \alpha_0 \cdot \frac{1 - \alpha_+^{M_A}}{1 - \alpha_+} \cdot P[Y_{3,MA}] \\ R_{00} &= \sum_{\omega \in \Omega_{0,0}^{10}} \beta_- \cdot P[\omega] + \sum_{\omega \in \Omega_{0,0}^{11}} \beta_0 \cdot P[\omega] \\ &+ \sum_{\omega \in \Omega_{0,0}^{12}} \beta_+ \cdot P[\omega] \dots \dots \dots (1) \\ R_{0+} &= \sum_{\omega \in \Omega_{0,+}^{13}} \beta_- \cdot P[\omega] + \sum_{\omega \in \Omega_{0,+}^{14}} \beta_0 \cdot P[\omega] \\ &+ \sum_{\omega \in \Omega_{0,+}^{15}} \beta_+ \cdot P[\omega] + P[Y_5] \\ &+ \alpha_0 \cdot \frac{1 - \alpha_-^{M_A}}{1 - \alpha_-} \cdot P[Y_{2,MA}] \\ R_{+0} &= \sum_{\omega \in \Omega_{+,0}^6} \beta_+ \cdot P[\omega] + \sum_{\omega \in \Omega_{+,0}^7} \beta_0 \cdot P[\omega] \\ &+ \sum_{\omega \in \Omega_{+,0}^8} \beta_- \cdot P[\omega] \\ R_{++} &= \sum_{\omega \in \Omega_{+,+}^9} \beta_- \cdot P[\omega] + \sum_{\omega \in \Omega_{+,+}^{10}} \beta_+ \cdot P[\omega] \\ &+ \sum_{\omega \in \Omega_{+,+}^{11}} \beta_0 \cdot P[\omega] + P[Y_7] \\ &+ \alpha_+ \cdot \frac{1 - \alpha_-^{M_A}}{1 - \alpha_-} \cdot P[Y_{2,MA}] \end{aligned}$$

3. 優先規則のライン挙動に及ぼす影響

3.1 生産率に及ぼす影響 組立工程で組合せ相

図3 優先規則の生産率に及ぼす影響 ($\alpha_i = \beta_i$)

手部品を選択する優先規則が生産率に及ぼす影響を調べる。はじめに、部品 A, B の加工工程が同一の加工精度分布をもつ場合の結果を調べるため、 $\alpha_0 = \beta_0 = 0.9, 0.7, 0.5$, $\alpha_- = \alpha_+ = (1 - \alpha_0)/2$, $\beta_- = \beta_+ = (1 - \beta_0)/2$, $M_A = 0, 1, 5$ の条件下でバッファ容量 M_B を変化した場合の生産率を図 3 に示す。ただし、仕掛品優先規則(Rule 1)と精度優先規則(Rule 2)を適用した結果をそれぞれ実線と一点鎖線で示す。この場合、 $M_A = 0, 1, 5$ に対する生産率は一致する。この結果、図 3 から Rule 1, 2 では、ともに、部品 A に対するバッファ導入が生産率に影響をもたず、部品 B に対するバッファ導入のみが生産率向上に有効であること、Rule 1, 2 の生産率は $M_B = 0, 1$ で一致することがわかる。また、 M_B が小さいあるいは α_0, β_0 が小さい場合、Rule 1, 2 両方でマッチングの影響が現れ生産率は大きく低下するが、 M_B の増加とともに生産率は単調に増加する。このとき、Rule 1 では M_B の増加に対し生産率が急増し $M_B = 5$ 程度で 1 に収束するが、Rule 2 では生産率の増加量が小さく生産率が 1 に収束するには大きなバッファ容量を必要とする。したがって、優先規則として Rule 1 を適用した場合、マッチングの影響を小さなバッファ容量の導入で除去することが可能であり、Rule 1 は Rule 2 に比べ生産率向上に有効である。

一方、部品 A, B の加工工程が異なる加工精度分布をもつ場合の結果を図 4 に示す。図 4 は、部品 B_i の出力確率を $\beta_0 = 0.8$, $\beta_- = \beta_+ = 0.1$ と固定し部品 A_i の出力確率 α_0 , $\alpha_- = \alpha_+ = (1 - \alpha_0)/2$ を変化した場合と α_i を同様に固定し β_i を変化した場合の結果である。ただし、この場合も $M_A = 0, 1, 5$ に対する生産率は一致する。図 4 から、Rule 1 では、すべての加工精度分布の組合せにおいて、 M_B の増加に対し生産率は急増し

$M_B = 2$ 程度で 1 に収束することがわかる。しかし、Rule 2 では、 $\alpha_0 \leq \beta_0$ の組合せに対して M_B の増加により生産率は徐々に 1 に収束するが、 $\alpha_0 > \beta_0$ の場合には 1 に収束せず、1 以下の値に収束する。したがって、各加工工程が異なる加工精度分布をもつ場合にも、Rule 1 の適用はマッチングの影響を小さなバッファ容量の導入で除去可能にするので、除去不可能な Rule 2 に比べて効果的である。

3・2 部品 C の消費割合に及ぼす影響 組立工程では組み合わせる部品 A, B の精度区分に応じて 3 種類の寸法の部品 $C_i (i = -, 0, +)$ が消費される。この消費割合は部品 C_i の生産計画や購入計画に影響を与える。そこで、本節では、はじめに、Rule 1 を適用した場合の部品加工工程の加工精度分布とバッファ容量 M_B が部品 C_i の消費割合 $C_{i\%} = R_{Ci}/R (i = -, 0, +)$ に及ぼす影響を解析し、次に、優先規則の比較を行う。

3・2・1 Rule 1 での部品 C の消費割合 図 5 に $M_A = 0$ の条件下で $\alpha_0 = \beta_0 = 0.9, 0.7, 0.5$ と変化した場合の部品 C_i の消費割合 $C_{i\%}$ を示す。図 5 から、 α_0 が小さくなるにつれ $C_{0\%}$ は全体的に減少し $C_{-\%}$, $C_{+\%}$ は増加すること、また、 M_B が小さい場合、 $C_{-\%}$ は $C_{+\%}$ よりわずかに大きな値をもつが $M_B \geq 2$ でほぼ一致することがわかる。さらに、 $C_{0\%}$ は $M_B \geq 2$ でほぼ周期的に変化しその周期は 3 となる。この周期的変化では、 $M_B = 3 \cdot k (k = 1, 2, \dots)$ のとき $C_{0\%}$ が最小となり、 $M_B = 3 \cdot k + 1$ のとき最大となる。ただし、 $M_B = 3 \cdot k + 2$ の場合は $3 \cdot k + 1$ の場合とほぼ等しい値をもつ。したがって、バッファ導入により生産率が 1 に収束しても、部品 C_i の消費割合はバッファ容量によって周期的に変化するので注意が必要である。

この消費割合の周期的変化は以下のように考えられ

図 4 優先規則の生産率に及ぼす影響 ($\alpha_i \neq \beta_i$)

図 5 Rule 1 での部品 C の消費割合 ($\alpha_i = \beta_i$)

る。マッチングを考慮したラインでは、デッドロックが発生した場合、部品 B のバッファ内仕掛品個数は部品 B₋ か B₊ のいずれかが M_B 個となる。したがって、この状態から生産が継続し部品 B が工程 1 B からバッファにバッファから組立工程に出力されるとバッファ内仕掛品個数の総和はつねに M_B と一定である。このとき、Rule 1 では、バッファ内仕掛品と工程 1 B で作業を終えた部品 B_i ($i = -, 0, +$) の中で組合せ可能なものの中から総個数が最も多いものが部品 A によって優先的に選択され組立工程に流れるため、バッファ内の部品 B_i はそれぞれ等しい個数となるよう調整される。この結果、 $M_B = 3 \cdot k$ の場合、 $3 \cdot k + 1$ or $3 \cdot k + 2$ の場合に比べ各部品 B_i のバッファ内仕掛品個数が等しくなる確率が高くなり、加工工程 1 B で作業を終了し出力される部品 B_i の仕掛品個数が最大となるので、この部品 B_i が部品 A によって選択されやすくなる。したがって、Rule 1 では、複数の精度区分の部

品 B が同一の件掛品個数をもち精度優先規則が用いられる機会が少なくなる。一方、バッファ容量が $3 \cdot k + 1(3 \cdot k + 2)$ ではバッファ内仕掛品個数が等しくなる機会が少なく、部品 B₋, B₀, B₊ のいずれかの個数が 1 個多くなり (部品 B₋, B₀, B₊ のいずれか 2 種類の個数が 1 個多くなり)、工程 1 B から出力される仕掛部品を加えると複数の精度区分の部品が同一の仕掛品個数となる確率が高くなる。したがって、Rule 1 の中で精度優先規則が適用される機会が多くなる。以上のことから、精度優先規則では、部品 C₀ を消費する組合せを優先するから、 $M_B = 3 \cdot k$ で C₀ の消費割合が最小となる。

次に、加工工程の加工精度分布が異なる場合の $C_{i\%}$ を図 6 に示す。この場合も C₋% と C₊% はほぼ等しい値となるので C₊% は省略する。図 6 から、 $\alpha_0 \neq \beta_0$ の場合にも $\alpha_0 = \beta_0$ の場合と同様、 $C_{i\%}$ に対して周期的変化が見られ、 $M_B = 3 \cdot k$ の場合に C₀% が最小となることがわかる。また、C₀% は $\alpha_0 > \beta_0$ のとき $M_B = 3 \cdot k + 2$ で $\alpha_0 < \beta_0$ のとき $M_B = 3 \cdot k + 1$ で最大となる。

3.2.2 部品 C の消費割合に及ぼす優先規則の影響

図 7 に Rule 1, 2 での C₀% を示す。ただし、Rule 2 でも C₋% と C₊% はほぼ等しい値をもち $(1 - C_{0\%})/2$ で近似的に表される。図 7 から、 $\alpha_0 \leq \beta_0$ の場合、Rule 2 では M_B の増加に伴い C₀% は単調に増加し 1 に収束する傾向をもち、Rule 1 より大きな値をもつことがわかる。これは、Rule 2 では、部品 C₀ を消費する部品 A, B の組合せが優先されるのに対し、Rule 1 では、バッファ内仕掛品個数が等しくなるような部品 A, B の組合せが優先し、必ずしも C₀ が優先的に消費されないためである。また、 $\alpha_0 > \beta_0$ の場合、Rule 2 では M_B の増加に伴い C₀% は単調に増加するが 1 に収束せず 1 以下の値に収束し、Rule 1 での $M_B = 3 \cdot k + 2$ の結果に近い値となる。

4. 部品消費割合の推定

加工・組立ラインにマッチング手法を導入した場合、Rule 1 を適用すると小さなバッファ容量の導入によって生産率は 1 に収束し、マッチングによる生産率低下の欠点は解消される。しかし、部品加工精度やバッファ容量によって、部品 C_i の消費割合が変化するため、その消費割合を明らかにする必要がある。本章では、部品 C₀ の消費割合を推定する近似解法の説明を行う。

近似解法は、Rule 1 を適用したラインの部品 B に対するバッファ内仕掛品個数の総和が定常状態でバッファ容量 M_B となり、しかも、部品 A が部品 B_i の仕

図 6 Rule 1 での部品 C の消費割合 ($\alpha_i \neq \beta_i$)

図 7 優先規則の部品 C の消費割合に及ぼす影響

掛品個数が等しくなるように部品 B を選択するという性質を用いる。

(1) $M_B = 3 \cdot k$ の場合 定常状態における部品 B_i のバッファ内仕掛品個数の状態は、部品 B_i に対する仕掛品個数 $m_i (i = -, 0, +; m_- + m_0 + m_+ = M_B)$ を用いて、 $(m_-, m_0, m_+) = (k + i_1, k + i_2, k + i_3)$ で表される。ただし、 $-k \leq i_1, i_2, i_3 \leq M_B - k, i_1 + i_2 + i_3 = 0$ 。この結果、Rule 1 のもとではバッファ内仕掛品個数が等しくなるように部品 B が選択されるため、近似的に $-\Delta M \leq i_1, i_2, i_3 \leq \Delta M$ の範囲で状態推移が起きると仮定すると、バッファ容量が十分大きく生産率が 1 に収束した場合、バッファ内仕掛品個数に対する定常状態方程式と部品 C_0 の消費割合 $C_0\%$ は、 $\Delta M = 0, 1, 2$ に対して、それぞれ式(2)~(7)で与えられる。ただし、バッファ内仕掛品個数の状態 $(k + i_1, k + i_2, k + i_3)$ に対する定常状態確率を X_{i_1, i_2, i_3} 。 $\gamma_{ij} = \alpha_i \cdot \beta_j$ とする。

(1-1) $\Delta M = 0$ の場合

$$X_{0,0,0} = (\beta_0 + \gamma_{--} + \gamma_{0-} + \gamma_{0+} + \gamma_{++}) \cdot Q \cdot X_{0,0,0} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$Q = 1 / (1 - \gamma_{--} - \gamma_{+-})$$

$$C_0\% = (\gamma_{--} + \gamma_{00} + \gamma_{++}) \cdot Q \cdot X_{0,0,0} \quad \dots\dots\dots (3)$$

(1-2) $\Delta M = 1$ の場合

$$\begin{aligned} X_{0,0,0} &= (\beta_0 + \gamma_{--} + \gamma_{0-} + \gamma_{0+} + \gamma_{++}) \cdot X_{0,0,0} \\ &\quad + (\gamma_{0-} \cdot Q1 + \gamma_{+-}) \cdot X_{-1,0,1} + \beta_- \cdot X_{-1,1,0} \\ &\quad + \beta_+ \cdot X_{0,1,-1} + (\gamma_{--} + \gamma_{0+} \cdot Q2) \cdot X_{1,0,-1} \\ X_{-1,0,1} &= \gamma_{-+} \cdot X_{0,0,0} + \{ \gamma_{--} + \gamma_{00} + \gamma_{++} \\ &\quad + (\gamma_{0-} + \gamma_{0+}) \cdot Q1 \} \cdot X_{-1,0,1} + (\gamma_{--} + \gamma_{0+}) \cdot X_{-1,1,0} \\ X_{-1,1,0} &= \gamma_{+0} \cdot X_{-1,0,1} + (\beta_0 + \gamma_{++}) \cdot X_{-1,1,0} \quad \dots\dots\dots (4) \\ X_{0,1,-1} &= (\beta_0 + \gamma_{--}) \cdot X_{0,1,-1} + \gamma_{-0} \cdot X_{1,0,-1} \\ X_{1,0,-1} &= \gamma_{+-} \cdot X_{0,0,0} + (\gamma_{0-} + \gamma_{+-}) \cdot X_{0,1,-1} \\ &\quad + \{ \gamma_{--} + \gamma_{00} + \gamma_{++} + (\gamma_{0-} + \gamma_{0+}) \cdot Q2 \} \cdot X_{1,0,-1} \\ Q1 &= (\gamma_{0-} + \gamma_{+-} + \gamma_{0-} + \gamma_{0+}) / (\gamma_{0-} + \gamma_{0-} + \gamma_{0+}) \\ Q2 &= (\gamma_{0-} + \gamma_{0+} + \gamma_{+-} + \gamma_{+0}) / (\gamma_{0-} + \gamma_{0+} + \gamma_{+0}) \\ C_0\% &= (\gamma_{--} + \gamma_{+-} + \gamma_{00} + \gamma_{+-} + \gamma_{++}) \cdot X_{0,0,0} \\ &\quad + (\alpha_+ + \gamma_{--} + \gamma_{00}) \cdot X_{-1,0,1} + (\alpha_0 + \gamma_{++}) \cdot X_{-1,1,0} \\ &\quad + (\alpha_0 + \gamma_{--}) \cdot X_{0,1,-1} + (\alpha_- + \gamma_{00} + \gamma_{++}) \cdot X_{1,0,-1} \\ &\quad \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

(1-3) $\Delta M = 2$ の場合

$$\begin{aligned} X_{0,0,0} &= (\beta_0 + \gamma_{--} + \gamma_{0-} + \gamma_{0+} + \gamma_{++}) \cdot X_{0,0,0} \\ &\quad + (\gamma_{0-} + \gamma_{+-}) \cdot X_{-1,0,1} + \beta_- \cdot X_{-1,1,0} \\ &\quad + (\gamma_{00} + \gamma_{+0}) \cdot X_{0,-1,1} + (\gamma_{-0} + \gamma_{00}) \cdot X_{1,-1,0} \\ &\quad + \beta_+ \cdot X_{0,1,-1} + (\gamma_{--} + \gamma_{0+}) \cdot X_{1,0,-1} \\ X_{-1,0,1} &= \gamma_{-+} \cdot X_{0,0,0} + (\gamma_{--} + \gamma_{0-} + \gamma_{00} + \gamma_{0+} + \gamma_{++}) \\ &\quad \times X_{-1,0,1} + (\gamma_{--} + \gamma_{0+}) \cdot X_{-1,1,0} + \gamma_{-0} \cdot X_{0,-1,1} \\ &\quad + (\gamma_{--} + \gamma_{0-}) \cdot X_{-2,1,1} + (\gamma_{0-} \cdot Q1 + \gamma_{+-}) \\ &\quad \times X_{-2,0,2} + (\gamma_{00} + \gamma_{+0} \cdot Q4) \cdot X_{-1,-1,2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_{-1,1,0} &= \gamma_{+0} \cdot X_{-1,0,1} + (\beta_0 + \gamma_{++}) \cdot X_{-1,1,0} \\ &\quad + \gamma_{+-} \cdot X_{-2,1,1} \\ X_{0,-1,1} &= (\gamma_{--} + \gamma_{0-} + \gamma_{0+} + \gamma_{++}) \cdot X_{0,-1,1} + (\gamma_{--} \\ &\quad + \gamma_{0+}) \cdot X_{1,-1,0} + (\gamma_{0-} + \gamma_{+-} \cdot Q4) \cdot X_{-1,-1,2} \\ X_{1,-1,0} &= \gamma_{+-} \cdot X_{0,-1,1} + (\gamma_{--} + \gamma_{0-} + \gamma_{++}) \cdot X_{1,-1,0} \\ &\quad + (\gamma_{--} \cdot Q2 + \gamma_{0+}) \cdot X_{2,-1,-1} \\ X_{0,1,-1} &= (\beta_0 + \gamma_{--}) \cdot X_{0,1,-1} + \gamma_{-0} \cdot X_{1,0,-1} \\ &\quad + \gamma_{+-} \cdot X_{1,1,-2} \quad \dots\dots\dots (6) \\ X_{1,0,-1} &= \gamma_{+-} \cdot X_{0,0,0} + \gamma_{+0} \cdot X_{1,-1,0} + (\gamma_{0-} + \gamma_{+-}) \\ &\quad \times X_{0,1,-1} + (\gamma_{--} + \gamma_{0-} + \gamma_{00} + \gamma_{+0} + \gamma_{++}) \\ &\quad \times X_{1,0,-1} + (\gamma_{-0} \cdot Q2 + \gamma_{00}) \cdot X_{2,-1,-1} \\ &\quad + (\gamma_{0+} + \gamma_{++}) \cdot X_{1,1,-2} + (\gamma_{--} + \gamma_{0+} \cdot Q3) \\ &\quad \times X_{2,0,-2} \\ X_{-2,1,1} &= (\beta_0 + \gamma_{0+} + \gamma_{++}) \cdot X_{-2,1,1} \\ &\quad + (\gamma_{00} \cdot Q1 + \gamma_{+0}) \cdot X_{-2,0,2} \\ X_{-2,0,2} &= \gamma_{+-} \cdot X_{-2,1,1} \\ &\quad + \{ (\gamma_{0-} + \gamma_{0+}) \cdot Q1 + \gamma_{++} \} \cdot X_{-2,0,2} \\ X_{2,-1,-1} &= \gamma_{+-} \cdot X_{1,-1,0} + \gamma_{+-} \cdot X_{1,0,-1} \\ &\quad + \{ (\gamma_{--} + \gamma_{++}) \cdot Q2 + \gamma_{0-} + \gamma_{+0} \} \cdot X_{2,-1,-1} \\ &\quad + \gamma_{++} \cdot Q3 \cdot X_{2,0,-2} \\ X_{1,1,-2} &= (\beta_0 + \gamma_{--} + \gamma_{0-}) \cdot X_{1,1,-2} \\ &\quad + (\gamma_{0-} + \gamma_{00} \cdot Q3) \cdot X_{2,0,-2} \\ X_{2,0,-2} &= \gamma_{+-} \cdot X_{1,1,-2} \\ &\quad + \{ \gamma_{--} + (\gamma_{0-} + \gamma_{+0}) \cdot Q3 \} \cdot X_{2,0,-2} \\ X_{-1,-1,2} &= \gamma_{+-} \cdot X_{-1,0,1} + \gamma_{+-} \cdot X_{0,-1,1} + \gamma_{--} \cdot Q1 \\ &\quad \times X_{-2,0,2} + \{ (\gamma_{--} + \gamma_{++}) \cdot Q4 + \gamma_{-0} + \gamma_{0+} \} \\ &\quad \times X_{-1,-1,2} \\ Q1 &= (\alpha_- + \alpha_0) / (\alpha_0 + \gamma_{--} + \gamma_{-0}) \\ Q2 &= (\alpha_- + \gamma_{+-} + \gamma_{++}) / (\alpha_- + \gamma_{++}) \\ Q3 &= (\alpha_0 + \alpha_+) / (\alpha_0 + \gamma_{+0} + \gamma_{++}) \\ Q4 &= (\alpha_+ + \gamma_{--} + \gamma_{+-}) / (\alpha_+ + \gamma_{--}) \end{aligned}$$

図 8 ΔM の値による近似精度

図 9 近似解法の推定誤差

$$\begin{aligned}
 C_0\% = & (\gamma_{--} + \gamma_{-+} + \gamma_{00} + \gamma_{+-} + \gamma_{++}) \cdot X_{0,0,0} \\
 & + (\alpha_+ + \gamma_{--} + \gamma_{00}) \cdot X_{-1,0,1} + (\alpha_0 + \gamma_{++}) \\
 & \times X_{-1,1,0} + (\alpha_- + \alpha_+) \cdot X_{0,-1,1} + (\alpha_- + \alpha_+) \cdot X_{1,-1,0} \\
 & + (\alpha_0 + \gamma_{--}) \cdot X_{0,1,-1} + (\alpha_- + \gamma_{00} + \gamma_{++}) \cdot X_{1,0,-1} \\
 & + (\gamma_{0-} + \gamma_{00} + \gamma_{+-} + \gamma_{++}) \cdot X_{-2,1,1} + \alpha_+ \cdot X_{-2,0,2} + \\
 & (\alpha_- + \gamma_{++}) \cdot Q_2 \cdot X_{2,-1,-1} + (\gamma_{--} + \gamma_{-+} + \gamma_{00} + \gamma_{0+}) \\
 & \times X_{1,1,-2} + \alpha_- \cdot X_{2,0,-2} + (\alpha_+ + \gamma_{--}) \cdot Q_4 \cdot X_{-1,-1,2} \\
 & \dots \dots \dots (7)
 \end{aligned}$$

各 ΔM に対する $C_0\%$ の相対誤差を図 8 に示す。図 8 から、 $\Delta M=1$ の場合に誤差が 1% 以下となることが示され、 $\Delta M=1$ の仕掛品個数の変化を考慮することで高精度な部品 C_i の消費割合が推定可能となる。

(2) $M_B=3 \cdot k+1$ or $3 \cdot k+2$ の場合 (1) と同様に定常状態におけるバッファ内仕掛品個数の状態を $(k+i_1, k+i_2, k+i_3)$ で表す。ただし、 $-k \leq i_1, i_2, i_3 \leq M_B-k$, $i_1+i_2+i_3=1$ or 2 とし、近似的に $-\Delta M \leq i_1, i_2, i_3 \leq \Delta M+1$ の範囲で状態推移が起きると仮定する。この場合の定常状態方程式と部品 C_0 の消費割合 $C_0\%$ は $M_B=3 \cdot k$ の場合と同様に考えられるので省略する。

上記の近似解法を用いて $\Delta M=1$ の場合の $M_B=3 \cdot k, 3 \cdot k+1, 3 \cdot k+2$ に対する $C_0\%$ を計算し、その相対誤差を図 9 に示す。図 9 から、近似解法は消費割合 $C_0\%$ を $\pm 1\%$ 以内で推定可能にしていることがわかる。

したがって、バッファ内仕掛品個数 $m_i (i=-, 0, +)$ が等配分から最小の範囲で変化すると仮定した場合の

仕掛品個数の定常状態方程式から高精度の $C_0\%$ が近似的に推定可能となる。

5. 結 言

本研究では、マッチングの手法を導入した加工・組立合流形自動生産ラインにおける優先規則の影響を解析した。また、ライン外から供給される部品の消費割合に対する近似解法を提案し、以下の結論を得た。

(1) 仕掛品優先規則(Rule 1)、精度優先規則(Rule 2)では、ともに、組合せ相手部品を選択する部品 A に対しては、バッファ導入効果はない。

(2) Rule 1, 2 では、部品 A に選択される部品 B に対してはバッファ導入効果が高い。このとき、Rule 1 は Rule 2 よりもバッファ導入効果が高く、部品 A, B の加工精度分布が等しい場合、バッファ容量 $M_B=5$ 程度でマッチングによる生産率低下は解消される。したがって、Rule 1 は Rule 2 よりも生産率向上に有効である。

(3) 部品 A, B の加工精度分布が異なる場合、Rule 2 では $\alpha_0 > \beta_0$ のとき、 M_B を増加しても生産率は 1 以下に収束するが、Rule 1 ではすべての加工精度分布の組合せに対し $M_B \geq 2$ で 1 に収束する。

(4) 部品 A, B のすべての加工精度分布の組合せにおいて、Rule 1 では、部品 C の消費割合が $M_B \geq 2$ に対して周期的に変化し周期は 3 となる。また、 $M_B=3 \cdot k (k=1, 2, \dots)$ で部品 C_0 の消費割合は最小となる。

(5) Rule 1 では、部品 B_i のバッファ内仕掛品個数が等しくなるように B_i を選択するので、部品 B_i に対するバッファ内仕掛品個数が等配分から最小の範囲で変化すると仮定した場合の仕掛品個数定常状態方程式から部品 C_i の消費割合が近似的に推定可能となる。この近似解法による $C_0\%$ の相対誤差は $\pm 1\%$ 以下である。

文 献

- (1) 井山・ほか 3 名, 機論, 58-551, C(1992), 2249.
- (2) Buzacott, J. A., *Int. J. Prod. Res.*, 5 3(1967), 183.
- (3) Okamura, K. and Yamashina, H., *AIIE Trans.* 9-2 (1977), 127.
- (4) Shanthikumar, J. G. and Tien, C. C., *Management Sci.*, 29-9(1983), 1069.
- (5) Yeralan, S. and Muth, E. J., *IIE Trans.*, 19-2(1987), 130.