加工・組立自動生産システムにおけるマッチング法に関する研究* (マルコフ決定過程を用いた最適部品選択組合せ政策)

井山俊郎^{*1}, 水野雅裕^{*1}
田牧純一^{*2}, 小野仁^{*3}

A Matching Method in Machining-assembly Automatic Production System (The Optimum Part Selection Policy by a Markov Decision Process)

Toshirou IYAMA^{*4}, Masahiro MIZUNO,
Jyunnichi TAMAKI and Hitoshi ONO

^{*4} Iwate University, Dept. of Mechanical Engineering, Ueda 4-3-5, Morioka, Iwate, 020-8551 Japan

High quality assembly products are produced by a matching method in machining-assembly production systems. If we use an accuracy policy in the part selection policy which is applied to a ball-bearing manufacture, the part flow stagnates and buffer storage is necessary to increase the production rate. Furthermore, in some combinations of part machining error distributions buffer storage is not useful, and the production rate drops. In this paper, we study the optimum part selection policy which yields the maximum production rate using a Markov decision process. Next, we study the characteristics of the optimum policy, and show the effectiveness of the policy by comparing the production rates yielded in the systems by the policy and the accuracy policy. Finally, we discuss the flexibility of the optimum policy. From the analysis, it is presented that the optimum part selection policy is very effective to increase the production rate, and in every combination of part machining error distributions the policy yields the ideal maximum production rate.

Key Words: Production System, Process Planning, Production Planning, Machining-Assembly System, Machining Error, Assembly Error, Matching Method, Markov Decision Process, Production Rate

1. 緒 言

機械要素などの各種工業製品に対する高性能化の要求は、製品を構成する各部品の加工に対し高精度加工を、また、製品の組立に対し高精度組立を求める。高精度加工は、一般に、高性能工作機械や熟練作業者のノウハウを必要とするが、加工精度を高めると加工能力が低下し加工コストが増加する。そこで、低コストで高性能の製品を量産するため、各工場では、加工誤差を許した部品を用いて製品の組立を行うが、この場合、高い組立精度を得る方法の一つとして、マッチング法が用いられる。マッチング法は、量産した各部品の加工寸法を計測・選別し、組立誤差が所定の誤差内に収まる一組の寸法の部品を選択して組立てる方法であり、自動車、飲料供給装置、医療器械などの各種機械要素の生産に用いられている。しかし、マッチング法を用いると、一部の部品は組合せ相手部品がなくシ

ステム内に停滞する可能性があり、マッチング法を用いないで部品を加工出力順に組合せる一般の生産システムに比べ生産効率が大きく低下する。したがって、生産効率を高めるため、バッファの導入が不可欠となる。また、組立部品の加工精度分布組合せが生産効率に大きな影響をもつ可能性もある。

マッチング法を用いた生産システムに関する研究は、これまでベアリング、バルブリフター、燃料噴射インジェクタ、心臓弁などを対象として、マルコフモデル、グラフ理論、動的計画法などを用いて行われてきた⁽¹⁾⁻⁽⁶⁾。バッファ導入効果については、精度優先政策(工場で通常用いられる部品選択組合せ政策)をもつ生産システムを対象として解析され、効果に及ぼすバッファ導入方式の影響が、さらに、効果が得られない加工精度分布組合せが明らかにされた。また、生産効率を向上させる方法については、バッファ内の各部品の寸法を記憶し、複数の部品の組合せを同時に考え、最大効率を生み出す部品組合せを選択する方式が提案された。さらに、生産効率を高めるための組合せ部品の加工順序を考える問題は、無限バッファの容量の生産システムを対象として行われた。

本研究では、ボールベアリングの量産工場を対象と

* 原稿受付 1999年4月5日。

^{*1} 正員、岩手大学工学部 (☎ 020-8551 盛岡市上田 4-3-5)。

^{*2} 北見工業大学 (☎ 090-8507 北見市公園町 165)。

^{*3} 日立東北ソフトウェア(株) (☎ 980-0811 仙台市青葉区 1 番町 2-4-1)。

E-mail: iyama@iwate-u.ac.jp

し、生産効率を向上させる部品選択組合せ政策について考える。具体的には、精度優先政策を用いた場合にバッファ導入効果が期待できない種々の組立部品の加工精度分布組合せに対し、システムが達成可能な最大生産率を生み出す最適部品選択組合せ政策をマルコフ決定過程を用いて明らかにする。次に、精度優先政策で得られる生産率と最適政策によって得られる生産率を比較し、最適政策の有効性を明らかにする。最後に、マルコフ決定過程で明らかにされた最適政策のフレキシビリティについて考察する。

2. 生産システムモデル

2.1 システム概要 本研究で対象とする製品は、部品 A (内輪), B (外輪), C (ボール) の三つの主要部品で構成され、図 1 に示す加工・組立自動生産システムで生産される。工程 S_{1A} , S_{1B} はそれぞれ部品 A, B の加工工程であり各部品の加工誤差を測定する検査工程が組込まれている。このとき、各加工工程から出力される部品は、種々の加工精度分布をもつが、3 種類の精度区分 $i(i=-, 0, +)$ に識別して出力される。ただし、加工工程から出力される精度区分 i の部品 A_i , B_i の出力確率を α_i, β_i ($\alpha_- + \alpha_0 + \alpha_+ = 1, \beta_- + \beta_0 + \beta_+ = 1$) とする。通常のベアリング工場では、部品 A, B ともに加工誤差は $\pm 3.0 \mu\text{m}$ を超えることはなく、各区分はそれぞれ $2 \mu\text{m}$ 程度の幅を持ち、区分 $-$, 0 , $+$ の加工誤差範囲は、 $-3.0 \sim -1.0 \mu\text{m}$, $-1.0 \sim +1.0 \mu\text{m}$, $+1.0 \sim 3.0 \mu\text{m}$ となる。また、工程 S_{1A} , S_{1B} にはそれぞれ容量が M_A の共有バッファ B_A , 個々の容量が M_B の精度区分別独立バッファ B_{Bi} が導入され、 S_{1A} から出力された部品 A は加工順に B_A へ、 S_{1B} から出力された部品 B は各精度区分に対応するバッファ B_{Bi} へ出力され一時保管される。

工程 S_2 は、部品 A, B, C の組立工程であり、バッファ B_A 内の先頭部品と組合せ可能な部品 B, C を部品選択組合せ政策に従って選択し組み立て、組合せ可

能な部品がない場合には、組合せ可能な部品 B が出力されるまで待ち、出力後、組立てられる。ただし、部品 C は外注部品であり、 S_2 で組立てられる部品 A, B の精度区分組合せに対応して 3 種類の寸法 $i(i=-, 0, +)$ がバッファに個別に用意されている。ベアリング工場で通常用いられる部品選択組合せ政策は、精度優先政策であり、表 1 に示す部品組合せ優先規則をもつ。

マッチング法を用いた生産システムではデッドロックが発生する。デッドロックとは、部品 A と組合せ可能な部品 B がバッファ B_{Bi} 内になく、部品 A, B がともにバッファに停滞し、加工工程 S_{1A} , S_{1B} 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。デッドロックが発生した場合、デッドロックの発生原因となるバッファ B_A 内先頭部品をシステム外に出力し、部品 B と組合せ可能な部品 A が見出されるまでこの出力操作を繰り返す。

2.2 モデル化 ベアリングのように量産を行う加工・組立生産システムは、一般に、各工程の作業バランスが取られ、各工程での部品の入出力が一定のサイクルタイムで行われる。したがって、部品物流挙動は、各種自動生産システム同様、マルコフ連鎖を用いてモデル化が可能である⁽⁷⁾。モデル化に対し以下の仮定を導入する。

- (1) S_{1A} , S_{1B} の前には無限個の素材が存在し、素材の欠乏によるアイドル状態は発生しない。
- (2) S_2 の下流には無限容量のバッファが存在し、完成品の出力閉塞によるブロック状態は発生しない。
- (3) 加工部品の検査や工程間の部品移動およびデッドロック退避に要する時間は無視できるほど小さい。
- (4) 加工・組立サイクルタイムはバランスがとられ等しく一定であり、このサイクルタイムをモデル化の単位時間とする。
- (5) 各工程では故障や不良品は発生しない。

Fig. 1 System model

Table 1 Accuracy policy

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

(6) 部品Cは外部から常に供給され、欠乏しない。

生産システムの部品物流挙動をマルコフ連鎖を用いてモデル化する場合、任意のサイクルタイムにおけるすべてのシステム状態とその推移および推移確率を捉える必要がある。システム状態は一般に各工程の状態とバッファ内仕掛品個数によって表され、本研究ではシステム状態を以下の6パラメータで定義する。

$$\{N_{MA}, m_A | m_{B-}, m_{B0}, m_{B+} | U\}$$

ただし、 N_{MA} は B_A 内先頭部品の精度区分、 m_A と m_{Bi} はそれぞれ B_A 内仕掛品個数と B_{Bi} 内仕掛品個数(工程 S_{1A} と B_{1B} をブロックする加工完了部品を含む)、 U は S_2 の状態(W :稼働, I :アイドル)を表す。

また、システム状態の推移は、各加工工程から出力される部品の精度区分と組立可能部品の有無から求められる各バッファ内仕掛品個数 m_A と m_{Bi} の変化で与えられ、推移確率は、各加工工程から出力される部品の精度区分出力確率の積で与えられる。この結果、システム状態の状態確率ベクトル $\underline{X}$ と推移確率行列 $\underline{P}$ が構成され、システム状態確率に対する定常状態方程式は式(1)で与えられる。

$$\underline{X} = \underline{X} \cdot \underline{P} \quad \dots\dots\dots (1)$$

式(1)をシステム状態確率の総和が1となる正規化条件下で解くと各システム状態の定常状態確率が得られ、定常状態確率から、システム性能を示すシステム生産率(単位時間あたりの平均完成品出力個数) R が求められる。

3. 最適部品選択組合せ政策

3・1 マルコフ決定過程 本システムでは、表1に示す七つの部品選択組合せが可能であり、この組合せを用いた場合に得られる最大システム生産率で生産することが理想である。しかし、最大システム生産率は、一般に、システム状態に依存して変化する部品選択組合せによって与えられ、これまで用いられてきた精度優先政策のように状態に依存しない部品組合せ優先規則(例えば、部品 A_- に対して部品 B_- と B_0 の組合せが可能であるが、 $A_- : B_-$ の組合せを $A_- : B_0$ の組合せに対して常に優先させる規則)を状態依存形に変える必要があり、最大システム生産率を生み出す状態依存形の最適部品選択組合せ政策を明らかにする必要がある。このような最大システム生産率を与える最適部品選択組合せ政策は、マルコフ決定過程を用いて求めることができる。

マルコフ決定過程を用いて最適部品選択組合せ政策を求める場合、各システム状態で取得の政策下での期

待総報酬と利得(システム生産率)を用いた再帰関係式を解く必要がある。本システムの再帰関係式は式(2)で与えられる。ただし、 $v_N = 0$ とし、本システムで用いた政策を表2に示す。

$$\begin{aligned} v_i &= \max_{k \in \delta_i} \left[q_i^k - g + \sum_{j=1}^{N-1} p_{ij}^k \cdot v_j \right] \\ g &= \max_{k \in \delta_N} \left[q_N^k + \sum_{j=1}^{N-1} p_{Nj}^k \cdot v_j \right] \quad (i=1, 2, \dots, N-1) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、

N : システム状態の総数

v_i : 状態 i における期待総報酬の相対値

q_i^k : 状態 i において政策 k を用いた場合に得られる直接期待報酬

g : システムの利得

p_{ij}^k : 政策 k を用いた場合の状態 i から状態 j への推移確率

δ_i : 状態 i で選択可能な部品選択組合せ政策の集合

式(2)を v_i と g が収束するまで繰返し計算すると、収束した g はシステムの利得すなわち最大システム生産率を与え、このとき各システム状態がとる政策はそのシステムの最適部品選択組合せ政策となる。

3・2 最適部品選択組合せ政策 マルコフ決定過程を用いて得られた最適部品選択組合せ政策の一例を表3に示す。ただし、 $\alpha_- = 0.2$, $\alpha_0 = 0.5$, $\beta_- = 0.1$, $\beta_0 = 0.7$, $M_A = 0$, $M_{Bi} = 2$ とする。表3より、最大システム生産率を与える最適政策では、精度優先政策のように $A_- : B_-$, $A_0 : B_0$, $A_+ : B_+$ の組合せを優先せず、部品 A が複数の部品 B と組合せ可能な場合、バッファに存在する部品 B の精度区分や仕掛品個数に依存して部品選択組合せが変化し、システム状態に依存した政策となっていることがわかる。

そこで、 $\alpha_0 > \beta_0$, $\alpha_0 = \beta_0$, $\alpha_0 < \beta_0$ の条件下で部品加工精度分布組合せを種々変化させ、最適部品選択組合せ政策を調べた。この結果、最適政策では、以下のよう

Table 2 Part selection policy

Policy k	Combination	Part C
1	$A_- : B_-$	C_0
2	$A_- : B_0$	C_+
3	$A_0 : B_-$	C_-
4	$A_0 : B_0$	C_0
5	$A_0 : B_+$	C_+
6	$A_+ : B_0$	C_-
7	$A_+ : B_+$	C_0
8	No combination	

な部品選択組合せをとることが明らかになった。

(1) B_A 内先頭部品が A_- の場合：

各加工工程の加工精度分布組合せや B_{Bi} 内仕掛品個数に関係なく、 $A_- : B_-$, $A_- : B_0$ の順に組合せを行う。

(2) B_A 内先頭部品が A_+ の場合：

各加工工程の加工精度分布組合せや B_{Bi} 内仕掛品個数に関係なく、 $A_+ : B_+$, $A_+ : B_0$ の順に組合せを行う。

(3) B_A 内先頭部品が A_0 の場合：

各加工工程の加工精度分布組合せに依存して部品の組合せが変化し、図2に示すように、部品の組合せは以下の四つの加工精度分布組合せ領域に分けられる。

Table 3 Example of the optimum policy

State	Policy k	Combination
$\{-, 1 0, 1, 2 W\}$	2	$A_- : B_0$
$\{-, 1 0, 2, 1 W\}$	2	$A_- : B_0$
$\{-, 1 1, 0, 2 W\}$	1	$A_- : B_-$
$\{-, 1 1, 1, 1 W\}$	1	$A_- : B_-$
$\{-, 1 1, 2, 0 W\}$	1	$A_- : B_-$
$\{-, 1 2, 1, 0 W\}$	1	$A_- : B_-$
$\{0, 1 0, 1, 2 W\}$	5	$A_0 : B_+$
$\{0, 1 0, 2, 1 W\}$	5	$A_0 : B_+$
$\{0, 1 0, 3, 0 W\}$	4	$A_0 : B_0$
$\{0, 1 1, 0, 2 W\}$	5	$A_0 : B_+$
$\{0, 1 1, 1, 1 W\}$	5	$A_0 : B_+$
$\{0, 1 1, 2, 0 W\}$	3	$A_0 : B_-$
$\{0, 1 2, 0, 1 W\}$	3	$A_0 : B_-$
$\{0, 1 2, 1, 0 W\}$	3	$A_0 : B_-$
$\{+, 1 0, 1, 2 W\}$	7	$A_+ : B_+$
$\{+, 1 0, 2, 1 W\}$	7	$A_+ : B_+$
$\{+, 1 1, 1, 1 W\}$	7	$A_+ : B_+$
$\{+, 1 1, 2, 0 W\}$	6	$A_+ : B_0$
$\{+, 1 2, 0, 1 W\}$	7	$A_+ : B_+$
$\{-, 1 2, 1, 0 W\}$	6	$A_+ : B_0$

Fig. 2 Relations between the combinations of part machining error distributions and the optimum policy

・領域 R_1 ; $\alpha_- < \beta_- + \text{Min}[(\beta_0 - \alpha_0), 0]$

B_{Bi} 内仕掛品個数に関係なく、 $A_0 : B_-$, $A_0 : B_+$, $A_0 : B_0$ の順に組合せを行う。

・領域 R_2 ; $\beta_- + \text{Max}[(\beta_0 - \alpha_0), 0] < \alpha_-$

B_{Bi} 内仕掛品個数に関係なく、 $A_0 : B_+$, $A_0 : B_-$, $A_0 : B_0$ の順に組合せを行う。

・領域 R_3 ; $\beta_- + \text{Min}[(\beta_0 - \alpha_0), 0] \leq \alpha_- \leq \{(1 - \alpha_0)/(1 - \beta_0)\} \cdot \beta_-$

B_{Bi} 内仕掛品個数を比べ、 $m_{B-} \geq m_{B+}$ の場合、 $A_0 : B_-$, $A_0 : B_+$, $A_0 : B_0$ の順に組合せを行い、 $m_{B-} < m_{B+}$ の場合、 $A_0 : B_+$, $A_0 : B_-$, $A_0 : B_0$ の順に組合せを行う。

・領域 R_4 ; $\{(1 - \alpha_0)/(1 - \beta_0)\} \cdot \beta_- < \alpha_- \leq \beta_- + \text{Max}[(\beta_0 - \alpha_0), 0]$

B_{Bi} 内仕掛品個数を比べ、 $m_{B-} > m_{B+}$ の場合、 $A_0 : B_-$, $A_0 : B_+$, $A_0 : B_0$ の順に組合せを行い、 $m_{B-} \leq m_{B+}$ の場合、 $A_0 : B_+$, $A_0 : B_-$, $A_0 : B_0$ の順に組合せを行う。

以上の結果から、最適部品選択組合せ政策は、 α_+ や β_- が増加した場合、デッドロックを発生させる A_+ と B_- の仕掛品個数が増加しないよう B_- を消費し、 α_- や β_+ が増加した場合、 A_- と B_+ の仕掛品個数が増加しないよう B_+ を消費する政策となることがわかる。

4. 最適部品選択組合せ政策の効果

最適部品選択組合せ政策下において、各加工工程の部品加工精度分布組合せとバッファ容量が、システム生産率に及ぼす影響を調べるため、 $\alpha_0 = 0.50$, $\beta_0 = 0.70$, $\alpha_0 = \beta_0 = 0.50$, $\alpha_0 = 0.70$, $\beta_0 = 0.50$ の条件下で、 α_- と β_- を変化させた場合のバッファ容量とシステム生産率の関係を求めた。一例として、 $\alpha_0 = 0.50$, $\beta_0 = 0.70$ と $\alpha_0 = \beta_0 = 0.50$ の条件下で α_- を 0.10, 0.30 に固定し β_- を変化させた場合の結果を図3, 4に示す。ただし、精度優先政策との比較を行うため、精度優先政策を用いた場合のバッファ容量とシステム生産率の

Fig. 3 Production rate under the optimum policy ($\alpha_0 = \beta_0$)

Fig. 4 Production rate under the optimum policy ($\alpha_0 < \beta_0$)

関係も図3, 4に同時に示す。また、バッファ B_A の導入効果はないことが示されているので、 $M_A=0$ とする⁽²⁾。

図3, 4より、精度優先政策と最適政策のどちらの政策を用いてもバッファ容量の増加はシステム生産率を増加させ一定値に収束することがわかる。しかし、精度優先政策を用いた場合、システム生産率は、システムで達成可能な理想最大生産率すなわち1に収束する部品加工精度分布組合せと1以下に収束する部品加工精度分布組合せが存在し、1に収束する場合にはバッファ導入効果が一般に小さく、 $M_{Bi} \geq 10$ の大きな容量のバッファを必要とする。一方、最適部品選択組合せ政策を用いた場合、すべての部品加工精度分布組合せに対し、システム生産率は1に収束する。この場合、精度優先政策でシステム生産率が1に収束する部品加工精度分布組合せに対しては、 $M_B \leq 4$ の小さなバッファ容量で、精度優先政策で1に収束しない部品加工精度分布組合せに対しては、 $M_B \leq 8$ のバッファ容量でほぼ1に収束する。なお、 $\alpha_0=0.70, \beta_0=0.50$ の場合は、 $\alpha_0=0.50, \beta_0=0.70$ と同様の結果となった。

以上の結果、マルコフ決定過程で得られる最適部品選択組合せ政策を用いると、精度優先政策でバッファ導入効果が得られなかった部品加工精度分布組合せに対し、システム生産率は理想最大生産率で生産可能となる。したがって、マッチング法を用いた生産システムで発生する生産率低下は、3章で示したような部品加工精度分布組合せに応じた最適政策を用いることで防ぐことができ、少ないバッファ容量で高い生産率を得ることが可能となる。

5. 最適政策のフレキシビリティ

マルコフ決定過程を用いて最適部品選択組合せ政策を求める場合、各システム状態に対し唯一の最適政策が決定される。しかし、最適政策は一つと限らず複数個存在する場合がある。例えば、表3のシステム状態 $\{0, 1|1, 1|W\}$ に対し、マルコフ決定過程では $A_0: B_+$ の組合せを最適政策と考えるが、 $A_0: B_-$ の組合せを選択してもシステム生産率は1となり $A_0: B_-$ の組合せも最適政策と考えられる。この問題は、式(2)において最適政策を決定する場合に使用される政策の適用順序から発生する。そこで、すべてのシステム状態に対して使用可能な政策の適用順序を変化させ、得られたすべてのシステム生産率を比較し、システム生産率の差が0.0001(マルコフ決定過程で利用したシステム生産率の収束精度)以下の最適政策をすべて最適政策とみなし、最適部品選択組合せ政策のフレ

Fig. 5 Flexibility of the optimum policy

キシビリティについて考察する。

4章で用いたシステムパラメータと同一のパラメータに対し上述の比較を行った。この結果、最適部品選択組合せ政策が複数個存在するのは、 B_A 内先頭部品が A_0 で、 B_{B-} と B_{B+} 内仕掛品が同時に存在する場合であり、そのとき取り得る部品選択組合せ政策は、図5に示すように、次の4種類(a, b, c, d)となった。

a : B_{B-} 内仕掛品個数に関係なく、 A_0 : B_{-} , A_0 : B_{+} , A_0 : B_0 の順に組合せを行う。

b : B_{B-} 内仕掛品個数に関係なく、 A_0 : B_{+} , A_0 : B_{-} , A_0 : B_0 の順に組合せを行う。

c : B_{B-} 内仕掛品個数を比べ、 $m_{B-} \geq m_{B+}$ の場合、 A_0 : B_{-} , A_0 : B_{+} , A_0 : B_0 の順に組合せを行い、 $m_{B-} < m_{B+}$ の場合、 A_0 : B_{+} , A_0 : B_{-} , A_0 : B_0 の順に組合せを行う。

d : B_{B-} 内仕掛品個数を比べ、 $m_{B-} > m_{B+}$ の場合、 A_0 : B_{-} , A_0 : B_{+} , A_0 : B_0 の順に組合せを行い、 $m_{B-} \leq m_{B+}$ の場合、 A_0 : B_{+} , A_0 : B_{-} , A_0 : B_0 の順に組合せを行う。

図5から、 $\beta_{-}=0, \beta_{+}=0$ や $\alpha_{-}=\{(1-\alpha_0)/(1-\beta_0)\} \cdot \beta_{-}$ の領域近くでは、 a, b, c, d が、また、 $\alpha_{-} > \{(1-\alpha_0)/(1-\beta_0)\} \cdot \beta_{-}$ の領域では b, d が、 $\alpha_{-} < \{(1-\alpha_0)/(1-\beta_0)\} \cdot \beta_{-}$ の領域では a, c が最適部品選択組合せとなることからわかる。したがって、最適部品選択組合せ政策にはフレキシビリティが存在するので、使用された最適政策は、部品加工精度分布組合せの変化にも柔軟に対応できる可能性がある。

6. 結 言

本研究ではマッチング法を適用したボールベアリングの加工・組立自動生産システムの部品物流挙動をモデル化し、種々の部品加工精度分布組合せに対しシステムが達成可能な最大システム生産率を生み出す最適部品選択組合せ政策をマルコフ決定過程を用いて明らかにした。

本研究で得られた結論は以下のとおりである。

(1) 精度優先政策を用いた場合、バッファを導入してもシステム生産率が理想最大生産率(システムが達成可能な最大生産率)に収束しない部品加工精度分布組合せが存在するが、最適部品選択組合せ政策を用いると、そのような組合せに対し小さな容量のバッファ導入で理想最大生産率に収束する可能性がある。

(2) 最適部品選択組合せ政策はデッドロック発生の原因となる部品を優先的に消費する政策であるが、すべての種類の部品と選択組合せが可能な場合、部品加工精度分布組合せ領域によって四つの異なる最適政策が存在する。

(3) デッドロック発生の原因となる複数の種類の部品と選択組合せが可能な場合、一部の部品加工精度分布組合せにおいて、最適部品選択組合せ政策は複数個存在する。

文 献

- (1) Sumin, V. V., Podobryanskii, A. V. and Vorebev, V. I., Calculation of the part classification conditions for selective assembly, *Sov. J. of Opt. Technol.*, **51**-3 (1984), 135-138.
- (2) 井山俊郎・水野雅裕・後藤正三・古賀敏生, 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(モデル化と加工精度の影響), 機論, **58**-551, C(1992), 243-248.
- (3) Arai, T. and Takeuchi, K., A simulation system on assembly accuracy, *Annals. of the CIRP*, **41**-1 (1992), 37-40.
- (4) 山田泰弘, 連続生産の選択組立における組合せ最適化, 機論, **60**-573, C(1994), 1877-1881.
- (5) So, K. C. and Scott, C. H., Optimal production sequence for a product with matching components, *Oper. Res.*, **42**-4 (1994), 694-708.
- (6) 井山俊郎・水野雅裕・田牧純一・乾英一, マッチングを考慮した加工・組立自動生産システムに関する研究(最大生産率を与える部品加工精度分布組合せ領域), 機論, **64**-625, C(1998), 3667-3672.
- (7) Yeralan, S. and Muth, E. J., A general model of a production line with intermediate buffer and station breakdown, *IIE Trans.*, **19**-2 (1987), 130-139.