マッチング法を適用した加工・組立システムにおける 部品寸法制御政策*

井山 俊郎^{*1}, 水野 雅裕^{*1}
田牧 純一^{*2}, 武田 一成^{*3}

A New Size Control Policy for a 'Matching Method' in Machining-assembly Systems

Toshirou IYAMA, Masahiro MIZUNO,
Jyunichi TAMAKI and Kazunari TAKEDA

A 'matching method' is widely used in a machining-assembly system for high quality products. However, parts composing products have a machining error, and the error distributions of parts are usually different from each other. This causes unmated parts, which stagnate in buffers, and decreases the production rate. So, it is necessary to control the machining size of one type of parts to decrease unmated parts. In this paper we propose a new size control policy to improve the production rate, and study the part flow using a simulation method. From the simulation results, it is presented that the new policy increases the production rate and the effectiveness depends on the combination of machining error distributions.

Key Words: Production System, Process Planning, Production Planning, Machining-Assembly System, Machining Error, Assembly Error, Matching Method, Size Control Policy, Production Rate

1. 緒 言

各種工業製品は、一般に、量産された複数の加工部品で構成されるが、製品に対し高い性能が要求されると、その要求性能に従って、高い組立精度が必要になる。このとき、高い組立精度を得るには、組立部品に対し高精度加工を行い加工誤差を小さくする必要があるが、高精度加工は高性能工作機械や熟練作業を必要とするため、加工コストの増加や加工能率の低下を引き起こす。したがって、コストと能率を考え、加工誤差を許した部品を生産して組立を行うが、この場合には、組立部品を加工順に組立てると所定の組立精度をもたない製品が生産される。そこで、各種高精度組立製品を生産する工場では、高い組立精度を得るために、マッチング法を適用して組立生産を行う。マッチング法は、加工部品の加工寸法を測定し、組立誤差が所定の誤差内に収まる寸法をもつ部品を選択し組立てる方法であり、自動車、飲料水供給装置、医療機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

チング法を適用すると、加工部品の寸法選択組合せを行うので組合せ不可能な部品が停滞し、マッチング法を適用しない場合に比べ生産効率は大きく低下する。また、各部品の加工方法は一般に異なるので、各部品の加工誤差分布は異なり、組合せ不可能な部品が発生し停滞する。したがって、停滞部品の在庫を減少させるため、一方の部品の加工寸法を制御する必要がある。

マッチング法を適用した場合の部品物流挙動や部品選択組合せ方式の生産効率に及ぼす影響は、ベアリングやバルブリフタを対象として、マルコフモデルやグラフ理論を用いて研究された⁽¹⁾⁽²⁾。また、組合せ部品の加工順序を決定する問題は心臓弁を対象として、さらに、組合せ不可能な部品の仕掛在庫を低減する寸法制御政策は燃料噴射装置を対象として、統計的手法や動的計画法を用いて研究された^{(3)~(6)}。しかし、これらの研究は、無限のバッファ容量を仮定する、あるいは、部品寸法制御時に考慮すべき段取り時間や加工ロットサイズの影響を考慮していない。また、これらの点を考慮したシステムの部品物流挙動は、バルブリフタを対象として解析されているが、現在、工場で用いられている寸法制御政策を用いると、バッファ容量が小さい場合あるいは特定の加工誤差分布組合せに対し、生

* 原稿受付 1998年1月30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} 岩手大学大学院。

産効率が大きく低下する⁽⁷⁾。したがって、寸法制御時に段取り時間や加工ロットサイズを考慮した有限バッファをもつシステムに対し、生産効率を高める新たな寸法制御政策を考える必要がある。

そこで本研究では、上記の有限バッファ容量をもつバルブプルの組立生産システムを対象として、部品物流挙動をシミュレーション解析し、現在用いられている寸法制御政策の問題点を明らかにし、生産効率を高める新たな寸法制御政策を提案する。具体的には、

- (1) 寸法制御された加工部品の加工誤差分布を考慮した寸法制御政策、
- (2) 寸法制御されない加工部品の加工誤差出力傾向を考慮し、さらに、出力頻度が高いあるいは仕掛在庫量の多い加工誤差をもつ部品と組合せ可能な制御寸法をもつ部品を繰返し加工可能とする寸法制御政策を考え、その寸法制御政策が生産率に及ぼす効果を明らかにする。

おもな記号

本研究で用いたおもな記号は以下のとおりである。

- A_i : 寸法区分 i の部品 A
- B_i : 寸法区分 i の部品 B
- N : 部品 A, B の寸法区分数
- σ_i : 部品 i の加工誤差分布標準偏差 ($i=A, B$)
- M_A : バッファ S_i の容量 ($i=A1, A2, \dots, AN$)
- M_B : バッファ S_B の容量
- L : 寸法制御において選択される寸法区分の数
- L_B : 部品 B を加工するロットサイズ
- C_1 : 寸法制御命令実行時の初期段取り時間
- C_0 : ロットごとの寸法変更時の段取り時間
- $R_{\max}$: システムが達成可能な最大生産率
- $m_{k,i}$: k 回目の寸法制御命令を出す時点でのバッファ S_{A_i} 内仕掛品個数 ($i=1, 2, \dots, N$)
- $p_{j,i}$: 部品 A_j と組合せ可能な制御寸法をもつ部品 B を加工した場合の部品 B_i の出力確率 ($i=1, 2, \dots, N$)
- $\Delta_{k,i}$: $k-1$ 回目と k 回目の寸法制御命令間に工程 1 A から出力される部品 A_i の出力個数 ($i=1, 2, \dots, N$)
- α, γ : 重み係数 ($\alpha_1=\alpha, \alpha_2=1-\alpha$)

2. モデル化

本研究で対象とするバルブプルの組立システムは、ボデーとプランジャを主要組立部品とする複数の部品で構成されるが、製品として高い性能を発揮するには、ボデーとプランジャを組立てた場合のクリアランスを厳しい許容

範囲に納める必要があり、ボデーとプランジャの内径と外径に対し寸法選択組合せが必要である。バルブプルの生産システムダイアグラムを図 1 に示す。工程 1 A, 1 B は部品 A (ボデー)、部品 B (プランジャ) を加工する加工工程であり、各工程にはそれぞれ部品の加工寸法を測定する検査工程が組込まれている。検査工程は、図 2 に示すように、部品 A の内径と部品 B の外径を $1\mu\text{m}$ 刻みの幅で $N+2$ 個の寸法区分 $A_{NG-}, A_i (i=1, 2, \dots, N), A_{NG+}$ および $B_{NG-}, B_i (i=1, 2, \dots, N), B_{NG+}$ に識別する。ただし、NG で識別された部品は許容範囲を超えた加工誤差をもつ部品であり、組立工程に送られずライン外に出力される。また、内径を加工する部品 A と外径を加工する部品 B の加工誤差分布は一般に正規分布となり、その標準偏差を σ_A, σ_B で表す。バッファ $S_{A_i} (i=1, 2, \dots, N)$ は有限容量 M_A をもつ寸法区分別独立バッファであり、工程 1 A から出力された寸法区分 i の部品 A_i を一時保管する。バッファ S_B は有限容量 M_B をもつ共有バッファであり、工程 1 B から出力された部品 B をその寸法区分を記憶しながら出力順に一時保管する。工程 2 は部品 A と B の寸法選択組合せを行い他の必要な部品とともに組立作業を行う組立工程であり、バッファ S_B から 1 個ずつ出力された部品 B_i と組合せ可能な寸法

Fig. 1 System diagram

Fig. 2 Machining error distribution and size class

区分の部品 A_i をバッファ S_{Ai} から取り出し組立てる。このとき、組合せ可能な部品 A_i がバッファにない場合、部品 B_i は組合せ可能な部品 A_i が出力されるまで工程 2 で待機する。ただし、待機中に、バッファ $S_{Aj}(j \neq i)$ と S_B が部品で満たされ、工程 1 A と 1 B にブロック状態が発生すると、部品の流れは停止する。この状態はデッドロック状態と呼ばれ、デッドロックを引き起こした部品 B_i は工程 2 から強制退避される。強制退避は、バッファ $S_{Aj}(j \neq i)$ 内に存在する部品と組合せ可能な部品 B が見い出されるまで行われる。

本研究で扱うシステムでは、加工工程 1 A、1 B と組立工程 2 は作業バランスが取られ等しい作業サイクルタイム T をもつが、部品 A と B の加工誤差分布が一般に異なり、 $\sigma_A \geq \sigma_B$ となるので、部品 A_i と組合せ可能な部品 B_i の生産速度が異なり、組合せ不可能な部品 A がバッファに停滞する。したがって、バッファ S_{Ai} に停滞する仕掛品個数に応じて、定期的に部品 B の加工寸法を変更して、仕掛部品 A と組合せ可能な部品 B を加工し、仕掛在庫の低減を行う必要がある。この寸法変更は、図 3 に示すように、寸法制御政策に従って部品 A の寸法区分を L 種類選択し、その L 種類の寸法区分の中心寸法と組合せ可能な同一寸法をもつ部品 B を外径が大きい順にそれぞれロット単位で加工することによって行われる。ただし、1 ロットの大きさを L_B 個、工程 1 B で寸法変更のための

寸法制御命令を実行するのに要する初期段取り時間を C_1 サイクルタイム、1 回の寸法制御命令において各ロットごとの寸法変更に必要な $L-1$ 回の段取り時間をそれぞれ C_0 サイクルタイムとする。したがって、寸法制御命令は、工程 1 B が部品 B を $L \cdot L_B$ 個加工することに出される。

3. 現寸法制御政策の問題点

現在用いられている寸法制御政策を以下に示す⁽⁷⁾。ただし、 $m_{k,i}$ は、 k 回目の寸法制御命令を出す時点でバッファ S_{Ai} 内に存在する仕掛品個数である。

現寸法制御政策手順

- (i) 式(1)の[]内の値が最大となる寸法区分 i^{*1} を選択する。
- (ii) 式(2)を用いて $m_{k,i^{*1}}$ を修正する。
- (iii) 修正された $m_{k,i^{*1}}$ を用いて手順(i)を繰返し、寸法区分 i^{*2} を選択する。
- (iv) 式(2)の i^{*1} を i^{*2} に変更し、手順(ii)、(iii)を繰返し、 $i^{*3} \sim i^{*L}$ を選択する。

$$m_{k,i^{*1}} = \text{Max}_{1 \leq i \leq N} [m_{k,i}] \quad (1)$$

$$m_{k,i^{*1}} = m_{k,i^{*1}} - L_B \quad (2)$$

したがって、現寸法制御政策は、部品 A のバッファ内仕掛品個数を基準値として部品 B の制御寸法を選択する政策であり、その基準値を、選択した寸法区分の仕掛品個数から部品 B の 1 ロットの加工個数 L_B を引いて修正している。

現寸法制御政策を使用した場合の生産率 R と部品 A に対するバッファ容量 MA の関係の一例を図 4 に示す。ただし、 $L=3$ 、 $L_B=20$ 、 $C_1=15$ 、 $C_0=5$ 、 $MB=L_B$ とし、 $\sigma_A=\sigma_B=0 \sim 2 \mu\text{m}$ と変化させた。図 4 から、

Fig. 3 Size control

Fig. 4 Production rate (Present size control policy)

σ_A が一定の場合、 σ_B が増加するにつれ生産率はわずかに増加し最大値を取り、さらに増加すると生産率は大きく減少することがわかる。また、バッファ容量が小さい場合、生産率は大きく低下し、バッファ容量が増加するにつれ、生産率は式(3)で与えられるシステムが達成可能な最大生産率 $R_{\max}$ に収束する⁽⁷⁾。

$$R_{\max} = L \cdot L_B / (C_1 + (L-1) \cdot C_0 + L \cdot L_B) \quad \cdots (3)$$

このとき、 σ_A が小さくなるにつれ、また、 σ_B が大きくなるにつれ、収束に必要なバッファ容量は大きくなる。

以上のことから、現寸法制御政策では、各部品の加工誤差分布の組合せによって生産率が変化し、生産率を最大にする適切な加工誤差分布組合せが存在することがわかる。しかし、以下の場合に生産率が大きく低下する。

- (1) バッファ容量が小さい場合、
- (2) σ_B が大きく、部品 B がばらついて出力される場合、
- (3) σ_A が小さく、部品 A が特定の加工誤差に集中して出力される場合。

したがって、これらの生産率低下原因は、種々の加工誤差をもつ部品がランダムに出力されるためと考えられるが、さらに、現寸法制御政策では、部品 A に対する仕掛品個数を基準値として用い、以下の点を考慮していないことが原因と考えられる。

- ① 寸法制御された部品 B の加工誤差のばらつきを考慮していない。
- ② 部品 A の加工誤差の出力傾向を考慮していない。
- ③ 部品 A の加工誤差出力傾向に合わせて、組合せ可能な寸法の部品 B を繰返し加工できる可能性を

考慮していない。

4. 新寸法制御政策と効果

3章で示した原因の中で①を解決するため、以下に示す新寸法制御政策1を考える。ただし、 $p_{i^*,i}$ は部品 A の寸法区分 i^* と組合せ可能な制御寸法をもつ部品 B を加工した場合に出力される寸法区分 i の出力確率である。

新寸法制御政策1手順

- (i) 式(4)の[]内の値が最大となる寸法区分 i^* を選択する。
- (ii) 式(5)を用いて $m_{k,i}$ を修正する。
- (iii) 修正された $m_{k,i}$ を用いて手順(i)を繰返し、寸法区分 i^{*2} を選択する。
- (iv) 式(5)の i^* を i^{*2} に変更し、手順(ii)、(iii)を繰返し、 $i^{*3} \sim i^{*L}$ を選択する。

$$m_{k,i^*} = \text{Max}_{1 \leq i \leq N} [m_{k,i}] \quad \cdots (4)$$

$$m_{k,i} = m_{k,i} - p_{i^*,i} \cdot L_B \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad \cdots (5)$$

新寸法制御政策1は、部品 A のバッファ内仕掛品個数を基準値とするが、制御寸法で部品 B を加工する場合に発生する加工誤差のばらつきを手順(ii)で考慮している。すなわち、制御寸法で部品 B をロット生産した場合、標準偏差 σ_B の加工誤差分布でばらついて出力される各寸法区分の期待部品個数 $p_{i^*,i} \cdot L_B$ を部品 A の対応する寸法区分の仕掛品個数から引いて、基準値を修正している。

新寸法制御政策1を使用した場合の生産率とバッファ容量の関係を図5に示す。ただし、図5には、比較のため、現寸法制御政策を使用した場合の生産率も同時に示す。図5から、バッファ容量が小さく部品 B の

Fig. 5 Production rate(New size control policy 1)

加工寸法にばらつきが発生する場合 ($\sigma_B \geq 0.5$), $\sigma_A = \sigma_B$ 付近で生産率が大きく増加し, 新寸法制御政策 1 は大きな効果を生み出していることがわかる。しかし, σ_A が大きい場合, 生産率増加量は小さく, σ_A が小さい場合, 最大生産率へ収束するバッファ容量は変化せず, 新寸法制御政策 1 の効果には限界がある。この結果, σ_B が大きい場合, 生産率低下の原因は①と考えられるが, σ_A が小さい場合に最大生産率への収束が遅い原因や σ_A が大きい場合に生産率増加が小さい原因は①以外と考えられ, ②と③を考慮した新たな寸法制御政策を考える必要がある。そこで新たに原因②と③を解決するため, 以下に示す新寸法制御政策 2 を考える。ただし, $\Delta_{k,i}$ は, $k-1$ 回めと k 回めの寸法制御命令間における工程 1 A からの寸法区分 i の出力個数, $\alpha (0 \leq \alpha \leq 1)$ と $\gamma (0 \leq \gamma \leq 1)$ は重み係数である。

新寸法制御政策 2 手順

(i) 式(6)の[]内の値が最大となる寸法区分 i^* を選択する。

(ii) 式(7)を用いて $\alpha_1 \cdot m_{k,i} + \alpha_2 \cdot \Delta_{k,i}$ を修正する。ただし, $\alpha_1 = \alpha$, $\alpha_2 = 1 - \alpha$ 。

(iii) 修正された $\alpha_1 \cdot m_{k,i} + \alpha_2 \cdot \Delta_{k,i}$ を用いて手順 (i) を繰返し, 寸法区分 i^{*2} を選択する。

(iv) 式(7)の i^{*1} を i^{*2} に変更し, 手順 (ii), (iii) を繰返し, $i^{*3} \sim i^{*L}$ を選択する。

$$\alpha_1 \cdot m_{k,i^{*1}} + \alpha_2 \cdot \Delta_{k,i^{*1}} = \max_{1 \leq i \leq N} [\alpha_1 \cdot m_{k,i} + \alpha_2 \cdot \Delta_{k,i}] \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & \alpha_1 \cdot m_{k,i} + \alpha_2 \cdot \Delta_{k,i} \\ &= \alpha_1 \cdot m_{k,i} + \alpha_2 \cdot \Delta_{k,i} - \gamma \cdot p_{i^{*1},i} \cdot \bar{L}_B \\ & (i=1, 2, \dots, N) \quad (7) \end{aligned}$$

新寸法制御政策 2 は, 部品 A のバッファ内仕掛品個数と部品 A の加工誤差の出力傾向を同時に考慮した政策であり, 出力傾向として前回の寸法制御から今

回の寸法制御までに出力された部品 A の加工誤差出力分布を用い, さらに, この加工誤差出力分布の影響の強さを調整できるように, 部品 A のバッファ内仕掛品個数とこの加工誤差出力分布に重み係数 α_1 , α_2 を適用した値を基準値として用いている。また, 部品 B の制御寸法選択の際に, 仕掛品個数の多い, あるいは, 出力頻度の高い誤差をもつ部品 A と組合せ可能な部品 B の制御寸法を繰返し選択可能にするため, 基準値の影響の強さをコントロールする重み係数 γ を用いている。

新寸法制御政策 2 において重み係数 $\alpha_i (i=1, 2)$, γ が生産率に及ぼす影響の一例を図 6 に示す。ただし, $\sigma_A = 0.5 \mu\text{m}$, $\sigma_B = 0.125 \mu\text{m}$ とし, $\alpha_1 = 1$, $\alpha_2 = 0$, $\gamma = 1$ は新寸法制御政策 1 を表す。図 6 から, 重み係数 α_1 , α_2 , γ は生産率に影響をもち, 適切な重み係数を選択すると新寸法制御政策 2 は新寸法制御政策 1 よりも高い生産率を与えることがわかる。しかし, 不適切な重み係数の選択は, 逆に, 生産率を低下させるので注意が必要である。各加工誤差分布組合せに対し生産率を最大化する重み係数の一例を表 1 に示す。また, 新寸法制御政策 2 の効果を調べるため, 表 1 の重み係数を用いた場合の生産率を図 7 に示す。ただし, 図 7 には, 比較のため, 現寸法制御政策と新寸法制御政策 1 による生産率も同時に示す。図 7 から, 新寸法制御政策 2 は, σ_A が小さい場合, 生産率を増加させ, 最大生産率に収束するのに必要なバッファ容量を減少させ, 大きな効果を生み出していることがわかる。しかし, σ_A

Table 1 Optimal coefficients

σ_A	σ_B	α_1	α_2	γ
0.5	0.125	0.6	0.4	0.6
0.5	0.5	0.4	0.6	0.6
2.0	0.5	0.6	0.4	0.6
2.0	2.0	0.6	0.4	0.2

Fig. 6 Effects of coefficients

Fig. 7 Production rate(New size control policy 2)

が大きい場合、効果が小さい。したがって、新寸法制御政策2は部品Aの加工誤差のばらつきが小さく特定の加工誤差に集中する場合に効果を発揮し、加工誤差のばらつきが大きい場合には効果が小さいと考えられる。部品Aの加工誤差のばらつきが大きい場合には、ランダムに出力される加工誤差の範囲が広がるので、本研究で提案した寸法制御政策では生産率増加が難しく、大きなバッファ容量を必要とする。

5. 結 言

本研究では、マッチング法を用いて組立て生産されるバルブリフタの加工・組立システムを対象として、生産率を向上させる新たな寸法制御政策を提案し、その効果を解析した。その結果、以下の結論を得た。

(1) 部品Bの加工誤差のばらつきを考慮した寸法制御政策1を用いると、部品Bの加工誤差がばらつく場合に効果が見られる。

(2) 部品Aの加工誤差出力傾向を考慮し、さら

に、部品Bの同一制御寸法を繰返し選択可能とした寸法制御政策2を用いると、部品Aの加工誤差のばらつきが小さい場合に効果が見られる。

(3) 部品Aの加工誤差のばらつきが大きい場合、本研究で提案した寸法制御政策は効果が小さい。

文 献

- (1) 山田泰弘, 機論, **60**-573, C(1994), 1877-1881.
- (2) 井山俊郎・水野雅裕・後藤正三・古賀敏生, 機論, **58**-551, C(1992), 243-248.
- (3) Yampol'skyy, L. S. and Holovanov, B. O., *Soviet Automatic Control*, **4**-1(1971), 30-36.
- (4) Gutierrez, G. J., Hausman, W. H. and Lee, H. L., *III Trans.*, **27**-4(1995), 669-678.
- (5) Lee, H. L., Hausman, W. H. and Gutierrez, G. J., *IEEE Trans. Robotics autom.*, **6**-6(1990), 652-658.
- (6) So, K. C. and Scott, C. H., *Oper. Res.*, **42**-4(1994), 694-708.
- (7) 井山俊郎・水野雅裕・田牧純一・平野賢一・安藤泰夫, 機論, **63**-605, C(1997), 304-309.