連続生産の選択組立における組合せ最適化*

山 田 泰 弘^{*1}Combinatorial Optimization of Selective Assembly
in Continuous Production

Yasuhiro YAMADA

This paper proposes a new method for optimizing the selective assembly process in an automated continuous production system, in which two kinds of components are continuously provided into corresponding buffer storages and the stored components are selectively assembled to units. Using the proposed method, (1) the maximum matching rate is obtained with the condition of making the mean value of absolute differences between the relevant properties of matched components as small as possible, and (2) the buffer sizes are automatically controlled to reduce the number of unmatched components remaining in buffer storages when the number of successfully assembled units reaches the ordered number. The proposed method is compared with the conventional grouping method in various situations through computer simulations. Simulation results show that better performance is achieved using the proposed method rather than that by the grouping method.

Key Words: Production System, Process Planning, Production Planning, Matching Method, Selective Assembly

1. 緒 言

一般に、製品設計は部品の互換性を基本として考えられてきたため、組立品の高精度化の要求に対しては部品の高精度化によって対応しており、その厳しい公差設定と高い加工コストが、多品種少量生産の増加に伴って製造コストの上昇を招いているという問題が増加している。

そこで、組立工程において、個々の部品をその特性に応じて選択的に組立てることによって低精度の部品から高精度な組立品を得る選択組立が、組立における高精度化の要求を低コストで実現する手段として注目されている。

従来より多用されている選択組立の方法として、層別法 (Grouping Method) がある。これは、部品をその特性に応じて幾つかのクラスに区分けし、組立規格を満たす関係にあるクラスに属する部品を無作為に組立てる方法である。1950年代からメカニカルオートメーションにおいて、機械的な機構で鋼球等の部品を全数

選別する自動選別機などに適用された⁽¹⁾。現在では、層別法による選択組立機能を有する自動組立システムが構築され、組立品の後調整が不要になり、製品の小型化にも役立てられている⁽²⁾。層別法については、Sumin⁽³⁾, Catton⁽⁴⁾, Pugh⁽⁵⁾に詳述され、その挙動解析については井上⁽⁶⁾の研究がある。

近年、コンピュータテクノロジーの進歩と普及に伴って、生産に関わる設計、加工、組立、検査の各工程を構成する機械がコンピュータネットワークによって統合され、生産管理を含めて個々の情報を利用して、生産活動の最適化を図る CIM (Computer Integrated Manufacturing) 化が進められている。そこで、組立工程において、個々の部品の特性情報に応じて組合せ最適化手法を適用することによって、層別法よりも高精度な選択組立を行うことが可能になっている。しかし、組合せ最適化に関する研究^{(7)~(11)}はあるが、自動組立システムに適用する手法についての研究はほとんど見当たらないのが現状である。

本報告では、連続供給される2種類の部品の選択組立を行う組立工程について、バッファに保管した全ての部品の特性に基づいて、最大組立率のもとで組立品の絶対特性差のばらつきを最小化する組合せ最適化基

* 原稿受付 平成5年7月2日。

^{*1} 正員, 長岡技術科学大学 (〒940-21 長岡市上富岡町 1603-1)。

準によって部品の最適組合せを決定するとともに、生産終了時点においてバッファに残留する部品数を低減するようにバッファ容量を制御する選択組立手法を提案する。さらに、提案手法を適用する自動組立システムについての挙動解析を実施し、層別法よりも小さなバッファ容量で、残留部品数が少なく、絶対特性差の少ない組立品が得られ、効率的な選択組立ができることを明らかにする。

2. 選択組立機能を有する自動組立システムのモデル

本研究において扱う、2種類の部品の選択組立機能を有する自動組立システムについての構成を以下に示す。

部品A, Bは、それぞれの特性情報とともに1個ずつ同時に組立工程に連続供給される。組立工程において、組立規格に適合する部品の組合せが決定され、選択的に組立てられて組立品が得られる（以下では、選択組立工程と呼ぶ）。部品A, Bの選択組立工程への供給は、所与の発注数に相当する組立品が得られるまで継続されるものとする。

組立規格を下限 C_L 、上限 C_U として、部品Bの j 番目と部品Aの i 番目は、その特性値 B_j, A_i が

$$C_L \leq B_j - A_i \leq C_U \quad \dots\dots\dots (1)$$

を満たすときに限り組立可能とする。

ここで、組立規格の中心を $C = (C_U + C_L) / 2$ 、規格幅の半分を $W = (C_U - C_L) / 2$ とし、 S を任意の定数として、特性値を

$$a_i = \frac{A_i - S}{W}, \quad b_j = \frac{B_j - S - C}{W} \quad \dots\dots\dots (2)$$

と変換すると、式(1)は

$$|b_j - a_i| \leq 1$$

となる。さらに、 S として部品Aの特性分布の平均を選べば、変換された部品Aの特性分布の平均は0となる。

そこで、以下の考察では組立規格が

$$|B_j - A_i| \leq 1 \quad \dots\dots\dots (3)$$

で与えられ、部品Aの特性値の平均が0であるものと仮定して検討を進める。

なお、組立規格が特性値の和に対して与えられるとき、すなわち

$$C_L \leq A_i + B_j \leq C_U \quad \dots\dots\dots (4)$$

のときも、

$$a_i = \frac{A_i - S}{W}, \quad b_j = \frac{-B_j - S + C}{W} \quad \dots\dots\dots (5)$$

と変換すれば同様のことが成り立つ。

3. 選択組立法

ここでは、層別法を適用する選択組立法と、提案手法を適用する選択組立法について、その選択組立工程の構成と挙動を述べる。

3.1 層別法 予め、部品の特性が分布する範囲を、組立規格の半分の区間幅（式(3)より0.5）を有する複数のクラスに分割し、部品を特性に応じてクラスに保管するためのバッファを選択組立工程に設ける。部品A, Bが1個ずつ選択組立工程に供給される毎に、その特性を参照し、部品が属する同じクラスに組合せ対象部品がある場合は組合せて組立品を得る。この場合、組立品を構成する部品の特性の差の絶対値（以後、絶対特性差と呼ぶ）は0~0.5の範囲に分布する。同じクラスに組合せ対象部品が無い場合は、隣接上位クラスもしくは隣接下位クラスの組合せ対象部品と組合せて組立品を得る。この場合、組立品の絶対特性差は0~1.0に分布する。いずれにも組合せ対象部品が無い場合には、該当するクラスのバッファに部品を保管する。バッファに保管した部品の特性は、以後の組合せの決定において不要となるため、特性値の記憶装置は持たない。

発注数100個の場合について、ある特性分布と組立規格のもとにシミュレーションした例を図1に示す。横軸は選択組立工程への部品の供給数を示し、縦軸はバッファに滞留した累積部品数と、得られた累積組立品数を示している。部品A, Bが1個ずつ供給される毎に、部品の特性と組立規格に従って、0から2個の組立品が得られる。この場合、100個（発注数）の組立品を生産するために105個の部品を必要とし、生産終了時に5個の部品がバッファに残留した。また、バッファの最大滞留部品数は、部品の供給数92個目での11個であった。

図1 層別法による選択組立

3・2 提案手法 ここでは、2種類の部品が1個ずつ選択組立工程に供給される毎に、その特性を記録するとともに部品を一度バッファに保管し、部品の保管数がバッファ容量に達した時、保管している全ての部品に対して最適組合せを求める方法を提案する。

バッファ容量 N_s （初期値 N_{sF} ）は、次に示す手順に従って制御する。発注数 N_o 、累積組立品数 N_u 、組合せ決定後のバッファの残留部品数 N_R として、 N_o 、 N_{sF} は予め与えるものとする。

手順1：バッファ容量 N_s に初期値 N_{sF} を与える。

手順2：バッファの残留部品数がそれぞれ N_s になるまで部品を保管し、その特性を記録する。

手順3：バッファに保管されている全て（ N_s 組）の部品に対して最適組合せを求める。

累積組立品数 N_u が N_o に到達すれば生産終了する。

手順4：バッファ容量 N_s を次のようにして変更し、手順2へ戻る。

(1) $N_u + N_R \geq N_o$ ならば、 $N_s = N_R + 1$ とする。

(2) $N_s > N_o - N_u$ ならば、 $N_s = N_o - N_u$ とする。

(3) $N_R = N_s$ ならば、 $N_s = N_R + 1$ とする。

その他は、 N_s を変更しない。

手順4(1)、(2)は、累積組立品数 N_u が発注数 N_o に近づいた時に機能し、バッファ容量 N_s を縮小することによって、生産終了時点での残留部品数 N_R を低減する。

手順4(3)は、バッファ内の全ての部品から最適組合せが1個も得られなかった時に限り機能し、バッファ容量 N_s を拡大する。

最適組合せは、次のようにして求める。図2に示すように、部品A、Bに対応する N_A 、 N_B 個からなる2つの点集合と、組立規格に適合する部品の対に相当する点同士を結んだ枝から成る2部グラフを考えると、組立の集合は、このグラフでマッチングになる。そこで、最大マッチングの中で、組立品の絶対特性差の分散が最小になるように特性差の2乗を費用とし、費用の総和を最小にする最小費用マッチングを求めることにする⁽¹¹⁾。最小費用マッチングを求めるアルゴリズムとして、プライマル・デュアル法⁽¹²⁾を用いる。

図2 2部グラフとマッチング

$N_{sF}=10$ として、図1と同じ条件のもとにシミュレーションした例を図3に示す。供給部品数10個目ではバッファの全ての部品の組合せが得られて組立品となっている。20個目では9個の組立品が得られ、1個の部品がバッファに滞留している。供給部品数100個目では、累積組立品数が99個となり、滞留部品は1個である。発注数100個に対して組立品をあと1個必要とするため、手順4(1)に従って更に部品を1個供給し、100個目の組立品を得て生産終了している。バッファの残留部品数は1個であった。バッファの最大滞留部品数は10個であり、手順4(3)によるバッファ容量の拡大は発生していない。

図3 提案手法による選択組立

4. 挙動解析

自動組立システムの選択組立機能として、層別法、提案手法を適用する場合の、部品と組立品に関する次の3項目をシミュレーションによって評価する。

最大滞留部品数：バッファに滞留した最大部品数。

残留部品数：生産終了時にバッファに残留した部品数。

絶対特性差：組立品を構成する部品の特性差の絶対値。

なお、最大滞留部品数、残留部品数は、部品A、Bとも同数になるため、それぞれの部品の数で表す。

次節において、層別法と提案手法を、部品の特性がランダム組立率 $p=60\%$ 、 90% 、組立規格 $C_L=-1$ 、 $C_U=1$ の場合について、発注数 $N_o=10\sim 10\,000$ のもとでモンテカルロ・シミュレーション（シミュレーション回数は10,000回）した結果を示す。層別法では、組立規格に適合するように、特性値0を中心に区間幅0.5（組立規格の半幅）のクラスを十分な数だけ設定している。提案手法では、 $N_{sF}=10$ （ $p=60\%$ ）、4（ 90% ）とした。

ランダム組立率 p は、部品をランダムに組合せて組立可能な確率を示す。部品A、Bの特性分布がそれぞれ $N(\mu_A, \sigma_A^2)$ 、 $N(\mu_B, \sigma_B^2)$ に従うとき、標準正規

分布の累積確率を $\Phi(u)$ として

$$p = \Phi((1 - \mu_D)/\sigma_D) - \Phi((-1 - \mu_D)/\sigma_D)$$

$$\text{ただし, } \mu_D = \mu_B - \mu_A, \sigma_D^2 = \sigma_A^2 + \sigma_B^2 \cdots (6)$$

で与えられる。部品 A, B の特性分布は同じ正規分布に従って $\mu_A = \mu_B = 0$ とすれば, 式(6)より, $p=60\%$ では $N(0, 0.7059)$, 90% で $N(0, 0.1848)$ となり, シミュレーションには, この正規分布に従う乱数を使用した。

4.1 最大滞留部品数 発注数とバッファの最大滞留部品数の関係を図4に示す。最大滞留部品数は全シミュレーション中での最大値とした。

層別法, 提案手法とも, ランダム組立率が低いほど滞留部品数が多くなり, より大きなバッファ容量を必要とする。 $p=60\%$, $N_0=10\,000$ において, 層別法では最大滞留部品数が25個発生し, 提案手法では N_s を手順4(3)に従って拡大して15個発生している。提案手法ではバッファの全ての部品について最適組合せを決定するため, 層別法よりもバッファ容量が少なく済む。

(a) $p = 60\%$

(b) $p = 90\%$

図4 発注数と最大滞留部品数の関係

4.2 残留部品数 発注数とバッファの残留部品数との関係を図5に示す。残留部品数は全シミュレーションでの平均値とした。

発注数10,000において発生する残留部品数を比較すると, 層別法の場合, ランダム組立率90%にて0.748個, 60%にて3.836個である。提案手法の場合, バッファ容量を手順4(1), (2)によって制御しているので残留部品数の発生は少なく, ランダム組立率90%にて0.110個, 60%にて1.347個である。

ここで, 供給部品数と残留部品数との比率を不良率として計算すると, ランダム組立で不良率40%の事例は, 層別法にて0.0383%, 提案手法にて0.0135%に低減でき, ランダム組立で不良率10%の事例は, 層別法にて0.00748%, 提案手法にて0.00110%にまで低減できるといえる。

提案手法によれば, 常に層別法よりも残留部品数を低減できるため, 高い生産性が得られるとともに, 必要とする部品数の生産計画も容易に行える。

(a) $p = 60\%$

(b) $p = 90\%$

図5 発注数と残留部品数の関係

4・3 組立品の絶対特性差 発注数と組立品の絶対特性差との関係を図6に示す。絶対特性差はシミュレーションで得た全ての組立品についての平均値とした。両手法とも、絶対特性差は発注数によらずほぼ一定になり、ランダム組立率の低い特性ほど大きくなる。品質工学では、特性を規格内の中心(目標値)に近くするように考えて、生産性向上のための品質設計が行われる⁽¹³⁾。提案手法を適用すれば、初期バッファ容量を $N_{SF}=20, 50$ と大きく設定することによって絶対特性差を低減することも可能である。

(a) $p = 60\%$ (b) $p = 90\%$

図6 発注数と組立品の絶対特性差の関係

5. 結 言

本研究では、部品が連続供給される自動組立システムのための選択組立法として、バッファに保管した全ての部品の特性情報を参照し、これに最小費用マッチング法を適用することによって部品の最適組合せを決定して組立品を得るとともに、バッファ容量を制御する手法を提案し、挙動解析によって以下の結論を得た。

- (1) 初期バッファ容量を大きく設定することによって、組立品の絶対特性差を低減できる。
 - (2) バッファ容量を制御することによって、生産終了時点における残留部品の発生が抑制できる。
 - (3) 提案手法によれば、層別法よりも小さなバッファ容量にて、残留部品の発生を低減し、組立品の絶対特性差も低減できる。
- 最後に、本研究を遂行する上で貴重なご助言をいただいた法政大学工学部古林隆教授、元東京大学教養学部故藤野和建教授に、深甚の謝意を表します。

文 献

- (1) 磯部孝・ほか3名, 自動機械と自動製造装置, (1961), 1, 共立出版.
- (2) 日本機械学会編, ファクトリーオートメーション, (1987), 98, コロナ社.
- (3) Sumin, V. V. et al., *Sov. J. Opt. Technol.*, 51, [5], (1984), 296.
- (4) Catton, M. J., *Proc. 3rd Int. Conf. on Assembly Automation and 14th IPA Conf.*, (1982), 461.
- (5) Pugh, G. A., *Comput. Ind. Eng. / Int. J.*, 11, (1976), 175.
- (6) 井上・ほか3名, 機論, 58-551, C (1992), 243.
- (7) Sumin, V. V. et al., *Sov. J. Opt. Technol.*, 51, [4], (1984), 223.
- (8) Fujino, Y., *Rep. Stat. Appl. Res., JUSE*, 34, [4], (1987), 1.
- (9) Malmquist, E., *Linköping Studies in Science and Technology. Thesis No. 214*, Linköping University, Linköping, Sweden, (1990).
- (10) 山田, 藤野, 日本品質管理学会誌, 22-4, (1992), 335.
- (11) 山田, 古林, 日本品質管理学会誌, 23-4, (1993), 409.
- (12) 古林, ネットワーク計画法, (1984), 88, 培風館.
- (13) 田口, 品質設計のための実験計画法, (1988), 1, 日本規格協会.