複数の加工ラインが連結した加工・組立合流形自動生産システムの システム生産率推定法*

井山俊郎^{*1}, 水野雅裕^{*1}
本田則夫^{*2}, 田牧純一^{*3}

Approximation Method for System Production Rate of Machining-Assembly Automatic Production System Connected by Series Machining Lines

Toshirou IYAMA, Masahiro MIZUNO,
Norio HONDA and Junnichi TAMAKI

This paper describes an approximation method to estimate the system production rate of a machining-assembly automatic production system connected by series machining Lines. In this method, the system is decomposed into 2-stage assembly systems, which are further decomposed into series lines with the assembly stage. Thus, the system production rate of any machining-assembly system can be estimated. It is shown that the estimated production rate agrees with the simulation result. Furthermore, this paper describes the effects of system parameters (numbers of assembly stages, machining lines and machining stages, and buffer capacities) on the production rate. The results show that operation probabilities of stages and buffer capacities affect the system production rate significantly, and that the increase in the number of parts assembled in each assembly stage has little effect on the production rate when the number of parts is large.

Key Words: Machining-Assembly Automatic Production System, Production Rate, Approximation Method, Operation Rate, Buffer Capacity

1. 緒 言

組立ラインの各組立工程に複数の加工ラインが連結し組付部品を加工・供給するシステムは、加工・組立合流形自動生産システムと呼ばれ、複数の部品で構成される各種機械要素の量産形加工・組立工場で導入されている。このようなツリー構造の生産システムでは、一つの工程で発生する機械トラブルが他の工程にアイドルやブロック状態を引き起こす工程間干渉が多発し、加工ラインが連結されていない直列形組立ラインに比べシステム生産率は大きく低下する。したがって、ツリー構造の加工・組立合流形自動生産システムの物流挙動を解析し、組立工程数、加工ライン数、加工工程数などのシステムパラメータや機械トラブル特性がシステム生産率に及ぼす影響を明らかにする必要がある。また、各組立工程や加工工程の遊休を減少させるための適切なバッファ導入を考える必要がある。

自動生産システムのシステム生産率推定法や物流挙動に関する研究は、これまで数多くの研究者によって

扱われてきた^{(1)~(9)}。しかし、各組立工程で組付けられる複数の部品が、部品ごとに異なる工程数をもつ多工程直列形ラインで加工・供給される一般的なツリー構造の加工・組立自動生産システムのシステム生産率推定法や物流挙動に関する研究はほとんど行われていない。

そこで本研究では、各組立工程で組込まれる任意の数の部品がそれぞれ任意の工程数を持つ直列形加工ラインで加工・供給される一般的なツリー構造の加工・組立合流形自動生産システムのシステム生産率を推定する近似解法を提案し、近似解法の精度を調べる。また、組立工程数、加工ライン数、加工工程数がシステム生産率に及ぼす影響とバッファ導入効果を明らかにする。

2. モ デ ル

加工・組立合流形自動生産システムのモデルを図1に示す。このシステムは、組立ラインの組立工程 S_i ($i=1, 2, \dots, n$) とバッファ B_i ($i=1, 2, \dots, n-1$) および組立工程 i に組付部品 i,j を供給する加工ラインの加工工程 $S_{i,j,k}$ ($i=2, 3, \dots, n; j=1, 2, \dots, L_i; k=1, 2, \dots, N_{ji}$) とバッファ $B_{i,j,k}$ で構成される。このとき、加工・組立合流形自動生産システムは、工程 S_h (h

* 原稿受付 1995年7月28日。

^{*1} 正員、岩手大学工学部 (〒020 盛岡市上田4-3-5)。

^{*2} 日立化成工業(株) (〒163-04 東京都新宿区西新宿2-1-1)。

^{*3} 北見工業大学 (〒090 北見市公園町165)。

Fig. 1 Machining-assembly production system

Fig. 2 Decomposition of system

$=1, 2, \dots, n, 2.1.1, 2.1.2, \dots, n.L_n.N_{Lnn})$ の作業サイクルタイム T 、各作業サイクルタイムにおいて工程 S_h が作業可能状態である確率 P_h 、作業不可能状態である確率 $\bar{P}_h = 1 - P_h$ およびバッファ B_h の容量 M_h で定義される。このモデルの各工程の作業時間、トラブルの発生、ラインへの素材投入に関しては、Sheskin ら⁽²⁾⁽⁶⁾ のモデルと同じである。また、本システムを解析するにあたり以下の仮定を導入する。

(1) 各工程間の部品の移動時間は、各工程の作業時間に比べ無視できるほど小さい。

(2) 組立工程は組立に必要な仕掛品あるいは組付部品を 1 個ずつ保持でき、すべての種類の部品がそろそろ組立作業を開始する。そろわない場合には、組立工程はアイドル状態(入力欠乏による工程機械の遊び)となり、組立作業を行わずに不足部品を待つ。

(3) 素材が投入される加工工程 $S_{i,j-1}$ には常に素

材の供給があり、素材の欠乏によるアイドル状態は発生しない。最終組立工程 S_n では組立作業を終えた完成品は即座に工程外に出力され、ブロック状態(出力閉塞による工程機械の遊び)は発生しない。

(4) 作業可能状態と不可能状態は各工程、各作業サイクルタイムで独立である。

なお、任意の作業サイクルタイムに組立工程 S_n から完成品が出力される確率をシステム生産率と定義する。

3. 近似解法

本研究で示す近似解法は、図 2 で示すように、加工・組立合流形自動生産システムを二つの相続く組立工程をもつ二組立工程合流形システムに分割し、さらに、図 4 に示すように、二組立工程合流形システムを組立工程を含む多工程直列形ラインに分解して考える

ため、3・1節で多工程直列形ラインの近似解法を、3・2節で二組立工程合流形システムの近似解法を、3・3節で加工・組立合流形自動生産システムの近似解法を示す。

3・1 多工程直列形ラインの近似解法 工程 S_i ($i=1, 2, \dots, N$) と S_i の下流にあるバッファ B_i ($i=1, 2, \dots, N-1$) で構成される多工程直列形ラインを考える。ただし、作業可能状態確率を P_i 、バッファ容量を M_i とする。本節では、多工程直列形ラインを相続く工程 S_i と S_{i+1} からなる二工程直列形ライン i ($i=1, 2, \dots, N-1$) に分解して生産率を推定する⁽⁶⁾。このとき、二工程直列形ライン i において、工程 S_{i+1} がアイドル状態となる確率 $X_{L,i}(P_i, P_{i+1})$ と工程 S_i がブロック状態となる確率 $X_{B,i}(P_i, P_{i+1})$ はそれぞれ式(1)、(2)で与えられる。

$$X_{L,i}(P_i, P_{i+1}) = \frac{1 - P_i/P_{i+1}}{1 - (P_i/P_{i+1})^2 (P_i \bar{P}_{i+1} / \bar{P}_i P_{i+1})^{M_i+1}} \quad (P_i \neq P_{i+1})$$

$$= \frac{\bar{P}_i}{2\bar{P}_i + M_i + 1} \quad (P_i = P_{i+1}) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$X_{B,i}(P_i, P_{i+1}) = (P_i/P_{i+1})(P_i \bar{P}_{i+1} / \bar{P}_i P_{i+1})^{M_i+1} \cdot X_{L,i}(P_i, P_{i+1}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

近似解法の手順を以下に示す。ただし、工程 S_i において作業サイクルタイムの初めに仕掛品がありかつその仕掛品がそのサイクルタイムに加工を終了する確率を Q_i 、工程 S_{i+1} において作業サイクルタイムの初めに仕掛品があった場合そのサイクルタイムに加工が終了し工程から出力される確率を W_{i+1} とする。

ステップ1 二工程直列形ライン i ($i=1, 2, \dots, N-1$) に対し順に Q_i と W_{i+1} を用いて式(3)から Q_{i+1} を求める。ただし、境界条件を $Q_1 = P_1$ 、初期条件を $W_{i+1} = P_{i+1}$ とする。

$$Q_{i+1} = P_{i+1} \cdot \{1 - X_{L,i}(Q_i, W_{i+1})\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ステップ2 ライン i ($i=N-1, N-2, \dots, 2$) に対し順に式(3)で得られた Q_i と W_{i+1} を用いて式(4)から W_i を求める。ただし、境界条件として $W_N = P_N$ とする。

$$W_i = P_i \cdot \{1 - X_{B,i}(Q_i, W_{i+1})\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ステップ3 式(4)、(3)で求められた W_i と Q_{i+1} を用いてステップ1, 2を繰返し、順に Q_{i+1} と W_i を求め、この手順を Q_N が収束するまで繰返す。このとき、 Q_N は多工程直列形ラインの生産率推定値を与える。

3・2 二組立工程合流形システムの近似解法 図3に示すような組付部品 i,j ($j=1, 2, \dots, L_i$) を加工・供給する加工ライン i,j と組立工程 S_{i-1} , S_i および工程間にあるバッファ B_{i-1} で構成される二組立工程合流形システムを考える。ただし、加工ライン i,j は加工工程 $S_{i,j,k}$ ($k=1, 2, \dots, N_{j,i}$) およびバッファ $B_{i,j,k}$ で構成される。本節では、二組立工程合流形システムを、図4に示すように、組立工程 S_i を含む L_i+1 本の直列形ライン i,k ($k=0, 1, \dots, L_i$) に分割し、各直列形ラインからの仕掛品および組付部品が未供給状態となる影響を、各直列形ラインに連結した組立工程 S_i の作業可能状態確率に含ませ、生産率を推定する。

近似解法の手順を以下に示す。ただし、任意の作業サイクルタイムにおいて組立工程 S_i が直列形ライン i,k から供給される仕掛品あるいは組付部品を保有しない確率を $F_{i,k}$ 、直列形ライン i,k から供給される仕掛品あるいは組付部品以外のすべての仕掛品あるいは組付部品が組立工程 S_i にそろい、直列形ライン i,k から仕掛品あるいは組付部品が供給されると組立作業が可能になる確率を $PR_{i,k}$ とおく。このとき、 $PR_{i,k}$ は、直列形ライン i,kk ($kk=0, 1, \dots, L_i; kk \neq k$) からの仕掛品および組付部品が未供給状態となる影響を

Fig. 3 2-stage merge system

Fig. 4 Decomposition of 2 stage merge system

考慮した組立工程 S_i の作業可能状態確率となり式 (5) で与えられる。

$$PR_{i,k} = P_i \cdot \prod_{kk=0, kk \neq k}^{L_i} (1 - F_{i,kk}) \quad (k=0, 1, \dots, L_i) \dots\dots\dots (5)$$

ステップ1 直列形ライン $i.0$ に対し、 $F_{i,kk}=0 (kk=1, 2, \dots, L_i)$ と置き、式(5)から $PR_{i,0}$ を求める。さらに、3・1節の手順から直列形ライン $i.0$ の生産率を求める。

ステップ2 ステップ1の直列形ライン $i.0$ において組立工程 S_i が直列形ライン $i.0$ からの仕掛品を保有しない確率 $F_{i,0}$ を求める。以下、直列形ライン $i.k$ ($k=1, 2, \dots, L_i$) に対し、いま求めた $F_{i,kk} (kk=0, 1, \dots, k-1)$ と $F_{i,kk}=0 (kk=k+1, k+2, \dots, L_i)$ を用いて順に式(5)から $PR_{i,k}$ を求め、さらに、3・1節の手順から直列形ライン $i.k$ において組立工程 S_i が直列形ライン $i.k$ からの組付部品を保有しない確率 $F_{i,k}$ を求める。

ステップ3 直列形ライン $i.0$ に対し、ステップ2で得られた $F_{i,k} (k=1, 2, \dots, L_i)$ を用いて式(5)から新たに $PR_{i,0}$ を求め、直列形ライン $i.0$ の生産率を再び求める。

ステップ4 ステップ3の直列形ライン $i.0$ に対し、再び、組立工程 S_i が直列形ライン $i.0$ からの仕掛品を保有しない確率 $F_{i,0}$ を求める。以下、直列形ライン $i.k$ ($k=1, 2, \dots, L_i$) に対し、ステップ2同様、新たに得られた $F_{i,kk} (kk=0, 1, \dots, k-1)$ と以前に得られた $F_{i,kk} (kk=k+1, k+2, \dots, L_i)$ を用いて $F_{i,k}$ を求め順に置き換える。

ステップ5 ステップ3に戻り、直列形ライン $i.0$ の生産率を再び求める。以下、ステップ4と3を直列形ライン $i.0$ の生産率が収束するまで繰返す。このとき、直列形ライン $i.0$ の生産率は、二組立工程合流形システムの生産率推定値を与える。

3・3 加工・組立合流形自動生産システムの近似解法

加工・組立合流形自動生産システムを、図2に示すように、 $n-1$ 個の二組立工程合流形システム $i (i=1, 2, \dots, n-1)$ に分割する。このとき、上流と下流の合流形システムの影響を分割した二組立工程合流形システムの上流組立工程と下流組立工程の作業可能状態確率に含ませ、システム生産率を推定する。

近似解法の手順を以下に示す。

ステップ1 合流形システム1の $PR_{2,k} (k=0, 1, \dots, L_2)$ を、3・2節の手順から求める。ただし、組立工程 S_2 は下流の合流形システムの影響を考慮するため、式(5)の P_2 の代わりに W_2 を用いた式(6)を使用す

る。

$$PR_{i+1,k} = W_{i+1} \cdot \prod_{kk=0, kk \neq k}^{L_{i+1}} (1 - F_{i+1,kk}) \quad (k=0, 1, \dots, L_{i+1}) \dots\dots\dots (6)$$

ただし、境界条件として $Q_1=P_1$ 、初期値として $W_2=P_2$ を用いる。この結果、組立工程 S_2 の Q_2 は、 S_2 で組立に必要な仕掛品と組付部品が存在する確率 $\{1 - X_{1,1}(Q_1, PR_{2,0})\}$ を用いて式(7)で求められる。ただし、 A_2 は組立工程 S_2 に連結した各加工ラインの影響を含んだ S_2 の作業可能状態確率であり式(8)で与えられる。

$$Q_{i+1} = A_{i+1} \cdot \{1 - X_{i,1}(Q_i, PR_{i+1,0})\} \dots\dots\dots (7)$$

$$A_{i+1} = P_{i+1} \cdot \prod_{kk=1}^{L_{i+1}} (1 - F_{i+1,kk}) \dots\dots\dots (8)$$

次に、合流形システム1を一つの工程と考え、合流形システム2の組立工程 S_2 の作業可能状態確率として Q_2 を用いると、合流形システム2の組立工程 S_3 の Q_3 は合流形システム1と同様の手順で求められる。ただし、初期値として $W_3=P_3$ を用いる。このとき、 Q_2 は合流形システム1の全工程の影響を考慮している。以後、同様の手順で、合流形システム $i (i=3, 4, \dots, n-1)$ の組立工程 S_{i+1} の Q_{i+1} をいま求められた Q_i を用いて順に求める。ただし、初期値として $W_{i+1}=P_{i+1}$ を用いる。この結果、 Q_n は、最後の組立工程 S_n でブロック状態が発生しないため、加工・組立合流形自動生産システムのシステム生産率推定値となる。しかし、この値は上流の合流形システムで発生するアイドル状態の影響は考慮しているが、下流の合流形システムで発生するブロック状態の影響は考慮していない。したがって、このシステム生産率は下流のバッファに空きがある場合の生産率となり、第1近似解である。

ステップ2 下流の合流形システムで発生するブロック状態を考慮するため、ステップ1で求めた $Q_i (i=n-1, n-2, \dots, 2)$ を用いて W_i を求める。合流形システム $n-1$ に対し、3・2節の手順を用いて式(2)から組立工程 S_{n-1} がブロック状態になる確率 $X_{B,n-1}(Q_{n-1}, PR_{n,0})$ を求め、式(9)から S_{n-1} のブロック状態を考慮した作業可能状態確率 W_{n-1} を求める。

$$W_i = P_i \cdot \{1 - X_{B,i}(Q_i, PR_{i+1,0})\} \dots\dots\dots (9)$$

次に、合流形システム $n-1$ を一つの工程と考え、 W_{n-1} を合流形システム $n-2$ の組立工程 S_{n-1} の作業可能状態確率として用いると、合流形システム $n-2$ の組立工程 S_{n-2} の W_{n-2} は W_{n-1} と同様の手順で式(9)から求められる。このとき、 W_{n-1} は合流形システム $n-1$ の全工程の影響を考慮している。ただし、組立

工程 S_{n-2} がブロック状態になる確率 $X_{B,n-2}(Q_{n-2}, PR_{n-1,0})$ は、合流形システム $n-2$ に対し、いま求めた新しい W_{n-1} の値を用い 3・2 節の手順をもう一度繰返して求める。以下、合流形システム $i(i=n-3, n-4, \dots, 2)$ に対し、組立工程 S_{i+1} の作業可能状態確率としていま求めた W_{i+1} を用いて W_i を順に計算する。このとき、 W_{i+1} は組立工程 S_{i+1} の下流のすべての合流形システムで発生するブロック状態の影響を考慮している。

ステップ 3 再びステップ 1 の手順で、合流形システム $i(i=1, 2, \dots, n-1)$ に対し順に Q_{i+1} を求める。ただし、 W_{i+1} の値としてステップ 2 で求めた値を用いる。この結果、 Q_n は、すべての合流形システムで発生するアイドル状態とブロック状態の影響を考慮した第 2 近似解となる。

ステップ 4 ステップ 2 と 3 の手順を Q_n の値が収束するまで繰返す。このとき、 Q_n の収束値はシステム生産率推定値を与える。

Fig. 5 Approximation error ($P^a = P^m$)

Fig. 6 Approximation error ($P^a \neq P^m$)

4. 近似解法の精度

近似解法の精度を調べるため、一例として、図 5 にすべての工程が等しい作業可能状態確率をもつシステムの生産率相対誤差を、図 6 に組立工程と加工工程が異なる作業可能状態確率をもつシステムの生産率相対誤差を示す。相対誤差の計算には、100 000 サイクルタイムのシミュレーション結果から得られたシステム生産率を用いた。ただし、 $M_i = M_{i,j,k} = M$, $L_i = L$, $N_{ji} = N$, 組立工程の作業可能状態確率 $P_i = P^a (i=1, 2, \dots, n)$, 加工工程の作業可能状態確率 $P_i = P^m (i=2.1.1, 2.1.2, \dots, n, L_n, N_{lnn})$ とする。図 5 から、全工程の作業可能状態確率が等しい場合、相対誤差が $M \geq 2$ で約 1.2% 以下、 $M \geq 3$ で約 0.8% 以下となり、 M が増加するにつれ零に収束することが示される。また、図 6 から、加工工程の作業可能状態確率が組立工程より高い場合、相対誤差が $M \geq 1$ で約 1.0% 以下となり、 M が増加するにつれ零に収束することが示され、逆に、組立工程の作業可能状態確率が加工工程より高い場合、相対誤差が $M \geq 2$ で約 1.7% 以下、 $M \geq 5$ で約 1.3% 以下となり、 M が増加するにつれ 0 に収束することが示される。

以上のことから、本研究で示した近似解法は、 $M \geq 2$ に対し加工・組立合流形自動生産システムのシステム生産率推定法として使用できる。なお、図 5, 6 に示したパラメータをもつシステムの平均計算時間は約 8.8 秒であり、計算効率はシミュレーションと比較して約 130 倍である。

5. 数値解析

組立工程数、加工ライン数および加工工程数がシステム生産率に与える影響とバッファ導入効果を調べ

Fig. 7 Effect of n

Fig. 8 Effect of L Fig. 9 Effect of N

る。図7に L , N を一定にして n を 5, 10 と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示す。図7から, P^a , P^m の変化はシステム生産率に大きな影響を与え, バッファ導入はシステム生産率を上昇させ効果的であることが示される。また, n が増加するとシステム生産率はわずかに減少するが, M が増加するにつれ n の影響はなくなる。図8に n , N を一定にして L を 1, 2, 3 と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示す。図8より, L が増加するにつれシステム生産率は減少することが示される。しかし, L が増加するにつれシステム生産率の減少幅は小さくなり, 組付部品数が多いシステムでは組

付部品数をさらに増加してもシステム生産率に与える影響が小さいといえる。図9に n , L を一定にして N を 1, 2, 5 と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示す。図9から, N が 1 から 2 に増加したときわずかにシステム生産率は減少するが, 2 から 5 に増加したときほとんど変化しないことが示される。したがって, 加工ラインの加工工程数増加は, 二工程以上ではシステム生産率にほとんど影響を及ぼさないといえる。

6. 結 言

本研究では, 一般的なツリー構造の加工・組立合流形自動生産システムのシステム生産率に対する近似解法を提案した。この近似解法の精度は, $n \leq 10$, $L \leq 3$, $N \leq 5$ の加工・組立合流形自動生産システムに対し, 組立工程の作業可能状態確率 $\leq$ 加工工程の作業可能状態確率の場合, 相対誤差が $M \geq 2$ で約 1.2% 以下, $M \geq 3$ で約 0.8% 以下となり, 組立工程の作業可能状態確率 $>$ 加工工程の作業可能状態確率の場合, $M \geq 2$ で約 1.7% 以下, $M \geq 5$ で約 1.3% 以下となることを示した。また, システム生産率に影響を及ぼすシステムパラメータは, 主として各工程の作業可能状態確率とバッファ容量であり, ついで各組立工程の組付部品数であることを示した。さらに, 組立工程数の影響は大きな容量のバッファを工程間に導入することで抑えることができ, 加工ラインの加工工程数の影響は $N \geq 2$ で無視できるほど小さくなることを示した。

文 献

- (1) Law, S. S., Baxter, R. J. and Massara, G. M., *Trans. ASME, J. Eng. Ind.*, **97**-3(1975), 1079-1086.
- (2) Sheskin, T., *AIIE Trans.*, **8**-1(1976), 146-152.
- (3) 古田興司・大見孝吉, 日本経営工学会誌, **28**-4(1978), 394-399.
- (4) Buzacott, J. J. and Kostelski, D., *IIE Trans.*, **19**-4(1987), 429-438.
- (5) Gershwin, S. B., *Oper. Res.*, **35**-2(1987), 291-305.
- (6) 山下英明・鈴木誠道, 機論, **53**-487, C(1987), 807-814.
- (7) 井山俊郎・ほか3名, 機論, **57**-537, C(1991), 352-357.
- (8) Xie, X., *IIE Trans.*, **25**-1(1993), 99-108.
- (9) Park, T., *Int. J. Prod. Res.*, **31**-3(1993), 613-631.