自動組立ラインの稼働率について*
(トラブル発生率, 回復時間およびバッファ容量の影響)

本 間 義 彦**

On the Production Efficiency of Automatic Assembling Lines
(Influences of Trouble Rate, Recovery Time and Buffer Capacity)

by Yoshihiko HONMA

This paper presents data for estimating the production efficiency of automatic assembling lines, with calculations and considerations for numerical examples. The efficiency of assembling lines is influenced by the trouble rate, the recovery time and the buffer capacity of each assembling station. Calculations and considerations are performed for various values of those factors by use of the method proposed previously. The main results reported in this paper are as follows: (1) The efficiency increases with buffer capacity in $b_{12}/R_i < 2.0$ (b_{12} ; buffer capacity, R_i ; a multiple of the cycle time) and takes approximately a constant value in $b_{12}/R_i > 2.0$. (2) As the number of stations increases, the effect of the capacity increases. (3) The efficiency takes maximum value at the same trouble rate and recovery time in each stations.

Key Words: Automatic Machine, Production System, Automatic Assembly, Production Efficiency, Buffer Capacity, Trouble Rate, Recovery Time, Free Transfer Lines.

1. 緒 言

設置した組立ラインが予測した稼働率をもって動作するかどうかは, そのラインの成否を決定する。組立ラインの稼働率は, 部品供給の不良, 動作不完全など組立ステーション自身に起因する停止のほか, 隣接ステーションのトラブルによる干渉によっても大きな影響を受ける。したがって自動組立ラインの稼働率を予測するためには, 各ステーションにおける種々のトラブルの発生頻度を予測するとともに, 相互の干渉の度合を知ることが重要である。このようなラインの稼働率に関する研究として, 待行列を用いて解析した例⁽¹⁾, 各バッファの中の部品数の状態を各々式で表し, 連立させて解く方法⁽²⁾などが見られるが, 計算がやや複雑であるなど, 実際のラインに適用するには多少難があるように思われる。著者は, バッファによって継がれた二つのステーションから成る組立ラインを, ラインの基本構成要素と考え, この基本構成要素の解析を行うことによって, ラインの稼働率を求める方法を報告した⁽³⁾。本報は, この方法によって, 稼働率に影響を与

える諸要因, トラブルの発生率, 回復時間およびバッファの容量, の種々の値に対するラインの稼働率を計算し, 各々の要因が稼働率に与える影響の度合について検討し, さらに計算機によるシミュレーションの値と比較して, 組立ラインの合理的な設計と, その稼働率の向上に寄与しようとするものである。

2. 解析方法の概要

図1は基本構成要素を示し, ST. i ($i=1, 2$) は各々 i 番めのステーションを示してある。中間バッファの容量 b_{12} , バッファの部品充足率 r_{12} とする。各ステーションの仕様は各々のステーション番号 i を接尾字に付して表し, 組立速度 n 個/分, トラブル発生率 λ_i 回/分, 部品不良率 x_i 回/個, トラブル時の平均回復時間を t_{ri} 分とする。またライン全体の平均は, 例えば平均部品不良率 $\bar{x}$ のように表す。ここで部品不良率は, 組立総部品数に対するトラブル回数として表すもので, トラブル発生率 λ_i との間に,

図1 ラインの基本構成要素

* 昭和61年6月21日 東北支部秋田地方講演会において講演, 原稿受付 昭和60年9月30日。

** 正員, 秋田大学教育学部 (〒010 秋田市手形学園町1-1)。

$$\lambda_i = \frac{nx_i}{1-x_i(1-R_i)}, R_i = nt_{Ri} \dots\dots\dots (1)$$

の関係がある。 R_i はトラブル時の平均回復時間をサイクルタイム($1/n$)の倍数で表したもので、回復時間率と呼ぶ。またトラブルが1回起こる確率が最大となる時間を基準時間 $t_s (=1/\lambda)$ とし、この時間におけるラインの動作状態について考える。ここに、 λ は各ステーションのトラブル発生率の平均である。さらに、

$$T_i = \frac{t_i}{t_s}, B_{12} = \frac{b_{12}}{nt_s}, B_1 = \frac{1}{nt_s} \\ T_{Ri} = \frac{t_{Ri}}{t_s}, q_i = \frac{\lambda_i}{\lambda} \dots\dots\dots (2)$$

とおく、ここに t_i は基準時間中のステーションの休止時間で、 T_i は休止時間率となる。 T_i は各々次の式で与えられる。

$$T_1 = q_1 T_{R1} + \alpha_1 (q_2 - P_2) + \beta_1 P_2 \\ P_2 = \{1 - (1 - q_2)e^{q_2}\}e^{-(q_1 + q_2)} \\ \alpha_1 = (T_{R2} - B_{12} + r_{12}B_{12})e^{-q_1(T_{R1} + B_{12} - r_{12}B_{12})} \\ \beta_1 = (T_{R2} - B_1 + r_{12}B_1)e^{-q_1(T_{R1} + B_1 - r_{12}B_1)} \\ \dots\dots\dots (3)$$

$$T_2 = q_2 T_{R2} + \alpha_2 (q_1 - P_1) + \beta_2 P_1 \\ P_1 = \{1 - (1 - q_1)e^{q_1}\}e^{-(q_1 + q_2)} \\ \alpha_2 = (T_{R1} - r_{12}B_{12})e^{-q_2(T_{R2} + r_{12}B_{12})} \\ \beta_2 = (T_{R1} - r_{12}B_1)e^{-q_2(T_{R2} + r_{12}B_1)} \\ \dots\dots\dots (4)$$

T_1, T_2 の第1項は各ステーションの自己要因による停止時間率、第2項はバッファ内に平均量の部品が蓄えられているときの干渉による停止時間率、第3項は、一度干渉が起きた後にバッファに余剰部品が補給されないときに起こる干渉による停止時間を各々表している。さらに回復時間が極めて小さいか、バッファ容量が大きいとき、例えばステーション2において、 $T_{R1} - r_{12}B_{12} \leq 0$ となることがある。このとき T_2 の式の第2項の干渉は起こらず、バッファ内残数が $r_{12}B_{12} - T_{R1}$ となる。干渉するためには、さらに時間率 $q_1(r_{12}B_{12} - T_{R1})$ 中にステーション1が少なくとも一回トラブルを起こさなければならず、このような場合の起こる t_s 中の期待数は、

$$(q_1 - P_1)e^{-q_2(T_{R2} - T_{R1} + 2r_{12}B_{12})} \\ \times \{1 - e^{-q_1(r_{12}B_{12} - T_{R1})}\} \dots\dots\dots (4')$$

となる。このとき干渉による一回当りの停止時間率は $2T_{R1} - r_{12}B_{12}$ であるから、このような場合のステーション2の停止時間率 T'_2 は、

$$T'_2 = q_2 T_{R2} + (q_1 - P_1)(2T_{R1} - r_{12}B_{12}) \\ \times e^{-q_2(T_{R2} - T_{R1} + 2r_{12}B_{12})} \{1 - e^{-q_1(r_{12}B_{12} - T_{R1})}\} \\ + \beta_2 P_1 \dots\dots\dots (5)$$

となる。ステーション1についても、 $T_{R2} - B_{12} + r_{12}B_{12} \leq 0$ の場合について同様に考えれば、停止時間率 T'_1 は

$$T'_1 = q_1 T_{R1} + (q_2 - P_2)(2T_{R2} - B_{12} + r_{12}B_{12}) \\ \times e^{-q_1(T_{R1} - T_{R2} + B_{12} - 2r_{12}B_{12})} \\ \times \{1 - e^{-q_2(B_{12} - r_{12}B_{12} - T_{R2})}\} + \beta_1 P_2 \dots\dots\dots (6)$$

となる。各々の場合に依じて、式(3)、(4)あるいは式(5)、(6)によって休止時間率が求められ、一つのラインであるから、 $T_1 = T_2$ ($T'_1 = T'_2$)とおいて r_{12} を近似的に求めて式(3)、(4)あるいは式(5)、(6)に代入して、基本構成要素の休止時間率 T_{12} は、

$$T_{12} = T_1 = T_2 \dots\dots\dots (7)$$

として求められる。この基本構成要素は下段側のステーションから見たとき、一つのステーションとみなすことができ、そのトラブル発生率の平均発生率に対する比 q_{12} 、休止時間率 T_{R12} とすれば、

$$q_{12} = q_2 + (q_1 - P_1)e^{-q_2(T_{R2} + r_{12}B_{12})} \\ + P_1 e^{-q_2(T_{R2} + r_{12}B_1)} \\ T_{R12} = T_{12}/q_{12} \dots\dots\dots (8)$$

となる。したがって、この見かけのステーションと次段のステーションとによって新たな基本構成要素を構成して、その停止時間率を同じ方法で求める。このように組立ラインの最終段まで繰返し適用すれば、最終段ステーションの停止時間率 T_{mn} が求められる。ラインの非稼働率 $D\%$ 、稼働率 $\eta\%$ は、

$$D = T_{mn} \times 100, \eta = 100 - D \dots\dots\dots (9)$$

で与えられる。

3. 数値計算およびシミュレーション

式(3)～(6)により、ラインの稼働率に影響を与える要因は、トラブル発生率 λ_i あるいは部品不良率 x_i 、所要回復時間 R_i およびバッファの容量 b_{12} の三要因である。これら三つの要因がラインの稼働率に与える影響の度合を検討するため数値計算を行った。また計算結果の妥当性を確かめるためシミュレーションを行った。シミュレーションにおいて、トラブル発生率は3けたの乱数が、任意に設定した範囲の値になるときトラブル発生したものとして定め、回復時間は休止時間率 R_i の値の回数だけ、トラブル発生後休止させることによって実現した。バッファ充足率 r_{12} は初期値を0.5とした。また1回のシミュレーションに組立数10000個に相当する回数とした。シミュレーションの結果は以下において各々図中に、I印をもって示すが、一つの条件について10回以上試行し、I印の上端はその中の最大値を、下端は最小値を各々示している。

3・1 基本構成要素の稼働率 基本構成要素の稼働率の三つの要因による変化について見る。図2は、二つのステーションの部品不良率 x_i 、回復時間 R_i が等しい場合の部品不良率に対する非稼働率の変化の様子を示している。実線はバッファ容量 $b_{12}=0$ の場合で、回復時間は $\bar{R}$ で示し、 $\bar{R}=10, 15$ および 20 の場合である。またバッファ容量は $b_{12}/\bar{R}$ で表し、バッファ容量の増加による非稼働率の変化を一点鎖線で示している。図2から、部品不良率したがってトラブル発生率が増すにつれて、非稼働率は一様に増し、回復時間が大きいほど、非稼働率の増加は著しいことがわかる。またバッファ容量を増せば、非稼働率を低下させることができるが、その効果は回復時間が短い場合ほど大きい。 $b_{12}/\bar{R} \geq 2.0$ では、休止時間は式(5)および式(6)より与えられ、非稼働率はほぼ一定となる。このときの非稼働率は、干渉がなく自己要因による停止のみの場合に極めて近い値となる。図3は、回復時間はステーション1および2とも等しく、 $b_{12}=10$ で、部品不良率の平均 $\bar{x}=0.01$ の場合の、両ステーションの部品不良率が異なる場合の非稼働率とステーション1の部品不良率 x_1 との関係を示した。したがって $x_1=0.005$ のとき、 $x_2=0.015$ であり、 $x_1=0.01$ のとき x_2 も同じ不良率となる。また+印はシミュレーションの結果の平均である。両ステーションの部品不良率が等しいとき非稼働率は最小となり、 $x_1=0.01$ を中心として、ほぼ対称となる。ラインの中にトラブル発生率の特に大きいステーションがある場合、ラインの稼働率を著しく低下させることを示している。

図4は、両ステーションの休止時間率 R_i が等しい場合について、 R_i と D の関係を示している。部品不良率 x_i も等しく、平均不良率 $0.005, 0.01$ および

図2 部品不良率 x_i と非稼働率 D

0.02 の場合について、 $b_{12}=0$ を実線、 10 の場合を破線で示す。一点鎖線はバッファ容量の変化に対する非稼働率の変化する様子を示した。 $\bar{x}$ が増しても $\bar{R}$ が増してもともに自己要因停止時間を増すから、図2の場合と同様な非稼働率の増加傾向を示す。図5には、 $b_{12}=10, \bar{R}=15$ として、 R_1, R_2 が異なった値をとる場合の非稼働率を図3の場合と同様にして示した。 $R_1=R_2$ のとき、 D は最小となる。

3・2 ラインの稼働率 組立ラインは三ステーション以上のステーションが並ぶのが普通である。ステーション数が増すにつれて非稼働率 D が増す。そのステーション数と非稼働率の関係を図6および図7に示した。回復時間率 R_i および部品不良率 x_i は各ステーションとも、同じ値をもつとし、ステーション数 M

図3 部品不良率の違いによる非稼働率の変化

図4 回復時間と非稼働率

が2の場合を破線で示し、さらにステーション数が2, 3, ..., 5の場合を実線で示している。図6は部品不良率0.005, 図7は0.01の場合を各々示している。またバッファ容量は0, 10および20の場合を各々表している。I印はシミュレーションの結果である。

図6および図7から、ステーション数 M が増せば非稼働率 D も増すが、その増加の度合は、部品不良率や回復時間による影響は小さいが、バッファ容量による影響が大きいことがわかる。すなわちバッファ容量が小さいとき、ステーション数の増加につれて非稼働率は急激に増し、例えば $x_i=0.005$, $R_i=15$, $\bar{b}=0$ において、 $M=5$ の非稼働率 D は $M=2$ のときの2.3倍となるが、 $\bar{b}=20$ のとき、1.4倍になる。このことは、ステーション数が多いラインの場合、十分な容量をもつ中間バッファを用意しなければならないことを示し

ている。

ラインの中の各ステーションのトラブル発生率や回復時間が異なる場合、ラインの稼働率に及ぼす影響について検討するため、ステーション数5, バッファ容量 $\bar{b}=10$, 平均部品不良率 $\bar{x}=0.01$ のラインについて、一つのステーションの部品不良率が他と異なる場合および回復時間率が異なる場合について各々非稼働率を求めた。図8(a)は部品不良率が異なる場合で、横軸は、そのステーションの位置を番号で示している。図中の $\max \cdot x_i$ の値は、そのステーションの部品不良率が他より大きいときの値を示し各々実線で各位置に対する非稼働率を示している。()中に示した値は他より小さい場合の値で、破線で示している。図6(b)は回復時間率 R_i が一つのステーションだけ、他と異なる場合である。図から、部品不良率、回復時間の大きいステーションがラインの前段にあるほうが非稼働率が大きくなり、この例の場合では2番めのステーションに位置するとき非稼働率は最大となっている。また、一つのステーションの部品不良率、回復時間が他より小さい場合は、そのステーションがラインの前段にあるとき非稼働率は小さくなっている。一点鎖線は、すべてのステーションの部品不良率、回復時間が等しい場合を示し、基本構成要素の場合と同様に平均化されている場合が最小の非稼働率を示す。

4. 結 言

組立ステーションのトラブル発生率あるいは部品不

図5 回復時間の相違による非稼働率の変化

図6 ステーション数と非稼働率

図7 ステーション数と非稼働率

(a) 部品不良率が異なる場合

(b) 回復時間が異なる場合

図 8 要因の大きさが位置によって異なる場合

良率、回復時間および中間バッファの容量が、組立ラインの稼働率に影響を与える要因となる。各々の要因がラインの稼働率に与える影響の度合について検討を行うため、種々の場合について数値計算を行って次の結論を得た。

(1) バッファ容量を大きくとって稼働率を増加できるが、 $b_{12}/R_i \geq 2.0$ では、稼働率はほぼ一定となる。したがって R_i が小さいとき（一般に n が小さいとき R_i は小さいと考えられる）、バッファが過大にならないよう留意することが必要である。

(2) トラブル発生率（部品不良率）および回復時間率が、各ステーションで同じ値のとき、その平均値

が同じならば、ラインの稼働率は最大となる。

(3) 組立ラインのステーション数が多いほど、バッファ容量を大きくとることがラインの稼働率を高める効果大きい。

(4) ラインの前段に近い位置に、トラブル発生率回復時間の大きいステーションがあるとき、後段に位置する場合に比して、ラインの稼働率は小さくなる。

文 献

- (1) 例えば, RaO, N. P., *AIIE Trans.*, 7-4 (1975), 414.
- (2) Bothroyd, G. (佐田・ほか訳), 自動組立工学, (昭 45), 126, 培風館.
- (3) 本間, 機講論, No. 841-2 (昭 59-11), 126.