

生産システムのボトルネック発見手法

(株)豊田中央研究所 中野 冠, ROSER Christoph、田中 稔

1. はじめに

生産ラインなど離散事象型システムの設計や改善において、シミュレーションを用いて、What-if 分析をすることが一般化している[1]。熟練計画者が従来シミュレーションしなくても一定レベルの質の工程が設計できたことを考えると、シミュレーションモデルができたところで、シミュレーションをしないあるいは 1 回のシミュレーションだけで実用的な最適解が得られないかと考えるのは自然なことである。この見地に立った研究テーマとして、

- (1) 一回のシミュレーションでシステムスループットや機械の利用率に関する信頼区間を求め、所望の信頼区間が得られたところでシミュレーションを自動的に停止させる。
- (2) シミュレーションなし、あるいは一回のシミュレーションでボトルネックを計算し所望の信頼区間でボトルネックが得られたところでシミュレーションを自動的に停止させる。
- (3) 一回のシミュレーションで設計パラメータの感度分析を行う。
- (4) シミュレーションなし、あるいは一回のシミュレーションで設計パラメータの最適解を求める。

が考えられる。(1)については、すでに実用的なアルゴリズムが Roser[2]によって提案されている。この手法はシステム量の微係数を用いてその分散を求めるデルタ法をベースとしており、従来のバッチ平均法では適用が難しい短時間シミュレーションや稀な事象にも有効である。また、所望の信頼度が得られた時点でシミュレーションを自動停止させることができ、市販シミュレータへの組み込みも容易である。(3)については、摂動法[3]が提案されているが、サービス分布に指数分布を仮定したり、設計パラメータとして微分可能な連続関数を仮定するなど制約が強すぎるため実用的な応用が難しいアルゴリズムである。(4)については研究例はきわめて少ないが、Nakano[4]において、AGVシステムの設備投資を定式化してAGV台数、加工機バッファ容量、加工ステーション配置を決定変数とする最適化問題を考え、AGVの搬送時間を確定的とした場合シミュレーションを用いなくても最適解が得られることが示されている。本稿では、同じく研究例の少ない

(2)の問題に対して、一回のシミュレーションによってボトルネックを検出するアルゴリズムを提案する。ブロッキングやスタービングでない連続時間を監視することによって、リアルタイムにボトルネックの移動を検出することをベースとしている。このアルゴリズムは、従来一般に使われる利用率に基づくボトルネック検出法と比べてロバスト性があることが示される。フローショップやジョブショップなど実際的な生産システムのシミュレーションで有効性が確認されている。

従来、平準化されたシステムに対して、信頼性区間を考慮した上でボトルネックを自動的に発見する実用的方法がなかった。離散事象型シミュレーションの分野で、1) 最大平均稼働率、2) 最大平均休止時間、3) 最長平均待ち行列を持つサーバーをボトルネックとするなど、いくつかの手法が知られている[1]。しかし、従来の方法は、精度[2]上問題があり、経験に基づいた判断が必要とされる。自動化を試みた研究も、手法の複雑さ[3]など実際的な問題がある。

本稿では、システムの中で最も影響しているボトルネックを簡便にまちがいないく知るための数理的手法を述べる。

2. ボトルネック発見方法

サーバーの状態を稼働(active)・非稼働(inactive)の2つに分類する(Table 1)。生産システムでは、故障による修理中や工具交換時間も稼働時間とすることに注意されたい。

今、サーバー*i*の連続稼働時間(Fig. 1)集合を A_i 、その平均を \bar{a}_i とおく。

$$A_i = \{a_{i,1}, a_{i,2}, \dots, a_{i,j}, \dots, a_{i,n}\} \quad (1)$$

$$\bar{a}_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{i,j}}{n} \quad (2)$$

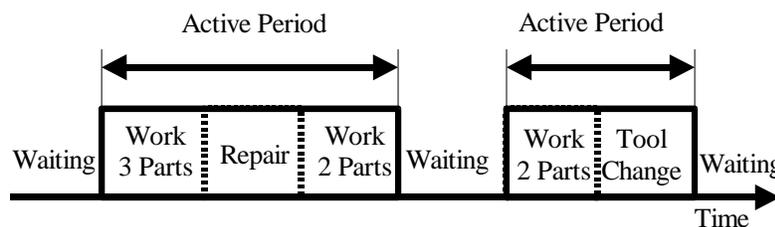


Fig. 1: Active Periods of Machine during Simulation

Table 1: Active–Inactive States for Different Servers

| Server | Active | Inactive |
|--------------------|--|--|
| Processing Machine | Working, in repair, changing tools, serviced | Waiting for part, waiting for service, blocked |
| AGV | Moving to a pickup location, moving to a drop off location, recharging, being repaired | Waiting, moving to a waiting area |
| Human Worker | Working, recovering | Waiting |
| Supply | Obtaining new part, | Blocked |
| Output | Removing a part form the system | Waiting |
| Computer | Calculating | Idle |
| Phone Operator | Servicing Customer | Waiting |

本法では、最大平均連続稼働時間を持つサーバーをボトルネックと定める。非稼働時間はほぼ独立と考えられるので、連続稼働時間も独立と考えられる。従って、連続稼働時間の信頼性区間は、次式で得られる。

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (a_{i,j} - \bar{a}_i)^2}{n-1}} \quad (3)$$

$$CI_i = t_{\alpha/2} \cdot \frac{\sigma_i}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

本手法は、シミュレーション結果、現場実績データのどちらを用いることもできる。

3. 実験

Fig.2 の生産ライン（7 機械 3 バッファ）にシミュレータ GAROPS[4]を用いて、本計算手法を検証した。機械の状態は、動作/停止（starved）/停止(blocked)/工具交換/修理の 5 状態であり、稼働中とは停止以外の場合である。暖機運転期間を削除し、約 130 時間分のシミュレーションを行った。比較のため、最大平均稼働率でボトルネックを発見する従来法と比べる。

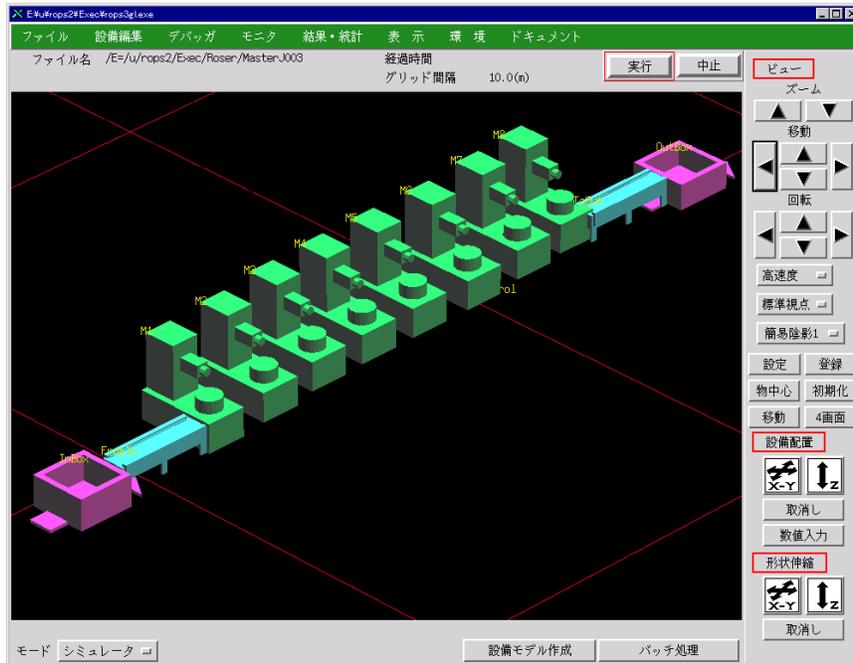


Fig. 2 :Simulation Model

Table 2,3 および Fig. 2,3 によれば、本法ではボトルネックが特定されるが、従来法では 95%信頼性区間でボトルネックを特定できないことがわかる。また、従来法では、平均稼働率の信頼性区間を得るのに一般的にバッチ平均法[1]などを用いて、複数回のシミュレーションをしなければならない。本法は、1 回のシミュレーションでボトルネックが検証でき、かつシミュレーションを自動的に停止させるができる。

Table 2: Conventional Bottleneck Detection Approach: Machine Workload

| Machine | Percent Active | 95% Confidence Interval | Bottleneck |
|-----------|----------------|-------------------------|-----------------|
| M1 | 18.82% | 0.18% | |
| M2 | 97.38% | 1.40% | Possible |
| M3 | 55.58% | 0.42% | |
| M4 | 99.08% | 2.68% | Possible |
| M5 | 88.36% | 0.49% | |
| M6 | 69.83% | 0.39% | |
| M7 | 80.69% | 0.58% | |
| M8 | 87.14% | 0.60% | |

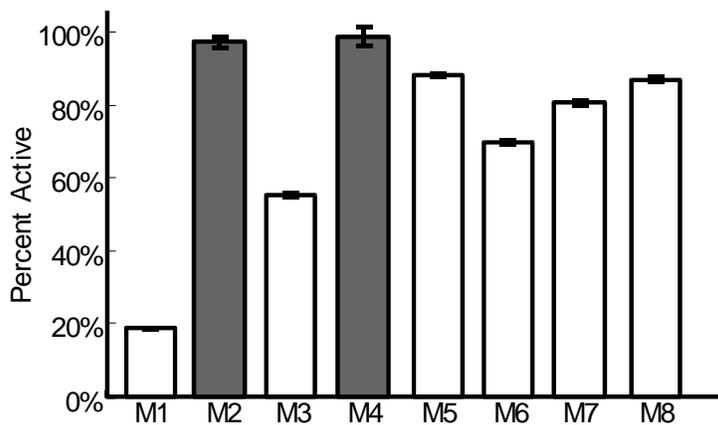


Fig. 3: Conventional Bottleneck Detection Approach: Machine Workload

Table 3: New Bottleneck Detection Approach: Average Duration of Active Period

| Machine | Active Period | 95% Confidence Interval | Bottleneck |
|-----------|----------------|-------------------------|------------|
| M1 | 13.2 | 0.0 | |
| M2 | 168.0 | 42.0 | |
| M3 | 39.0 | 0.0 | |
| M4 | 14885.2 | 7376.9 | Yes |
| M5 | 62.0 | 0.0 | |
| M6 | 49.0 | 0.0 | |
| M7 | 59.0 | 1.0 | |
| M8 | 65.5 | 1.4 | |

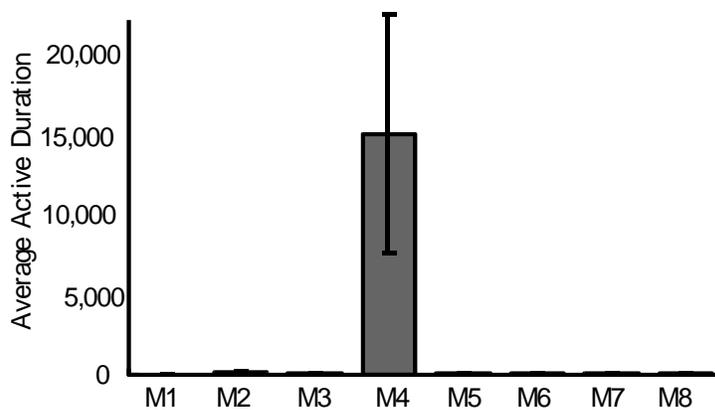


Fig. 4: New Bottleneck Detection Approach: Average Duration of Active Period

4. おわりに

離散事象型システムのボトルネックを自動的に発見する計算手法を提案した。生産ラインにおけるシミュレーション実験で従来法と比較して実用性を示した。本手法は、一般のシステムシミュレータに組み込むことが容易であり、また、現場の実績データを用いて改善に利用することもできる。

参考文献

- [1] Law, A. M., and Kelton, D. W. 1991. *Simulation Modeling & Analysis*. McGraw Hill.
- [2] Roser, C., Nakano, M., "Single Simulation Confidence Intervals", Proceedings of 2002 Japan-USA Symposium on Flexible Automation, pp.289-294, 2002.
- [3] Ho, Y. C. and Cao, X. R. 1991. *Perturbation Analysis of Discrete Event Dynamic Systems*. Kluwer Academic Publishers.
- [4] Nakano, M. and Ohno, K. 2000., "An Integrated Analytical/Simulation Approach for Economic Design of an AGV System", Journal of the Operations Research Society of Japan, Vol.43, No.3, pp.382-395
- [5] Luthi, J., and Haring, G. 1997. "Bottleneck Analysis for Computer and Communication Systems with Workload Variabilities & Uncertainties." *Int Sympo. on Mathematical Modelling*.
- [6] Berger, A., Bregman, L., and Kogan, Y. 1998. "Bottleneck Analysis in Multiclass Closed Queuing Networks and Its Application." *Baltzer Journals*.
- [7] Nakano, M., Sugiura, N., Tanaka, M., and Kuno, T. 1994. "ROPSII: Agent Oriented Manufacturing Simulator on the basis of Robot Simulator." In *Japan-USA Symposium on Flexible Automation*, Kobe, Japan.