

S142032

柔軟性と俊敏性を有したバッチ式生産システムのためのロボット群操作戦略の提案*

星野 智史*¹, 関 宏也*², 太田 順*³

Operational Strategy for Robots in Flexible and Agile Batch Manufacturing Systems

Satoshi HOSHINO*¹, Hiroya SEKI*² and Jun OTA*³

*¹ Chemical Resources Laboratory, Tokyo Institute of Technology
4259 R1-19, Nagatsuta-cho, Midori-ku, Yokohama, Kanagawa 226-8503, Japan

This paper focuses on a batch manufacturing system with multiple industrial robots. Inappropriate coordination of the robots might cause a bottleneck. In addition, a bottleneck is a constraint that dominates the entire system performance, which is the productivity. Therefore, these robots are required to operate appropriately while relating to each other. For this challenge, we propose the following operational strategies: route planning approaches and operation dispatching rules on the basis of task-assignment that will reduce the negative effect of the bottleneck. Furthermore, reactive cooperation, so that the robots respond to a fluctuating heavy workload caused by the shifting bottleneck, is an essential operational strategy. Through the simulation experiments, each combination of the operational strategies is examined; finally, the effectiveness of the operational strategies for the productivity and integrated operational strategies are shown.

Key Words : Robotic Batch Manufacturing System, Operational Strategy, Factory Automation

1. 緒 言

多品種少量生産を目的とした生産システムでは、そのために必要とされる多様な種類の機械が稼働している。本システム全体の作業性能、すなわち生産性を向上させるためには、各機械を特定の目的のためだけに効率良く稼働させるのでは不十分であり、機械全体の操業状態を考慮した上で統合的な管理を行う必要がある。

化学プロセス産業におけるパイプレスプラントは、バッチ式生産システムの一つの応用例である。このプラントでは、移動タンクにより原材料が運ばれ、所定の位置にて製造処理が施され、これにより潤滑剤、接着剤、調合薬、インク、塗料などといったファインケミカル製品が作られている。原材料となる液体物や製品を移送するためのパイプ（配管）を必要としないため、コンタミネーション（異物混入）の問題がなく、一つのプラントで同時に複数種類のバッチ（レシピ）を実行できるため、需要に応じた様々な製品を生産することが可能となる。

著者らは、搬送と製造処理を行うロボットを複数台用いたバッチ式生産システムに焦点をあてた研究を行っている⁽¹⁾。各ロボットは分散制御に基づきタスクを実行し、さらに、通信によって環境や他のロボットと情報を共有することで⁽²⁾、時々刻々と変動する状況に対しても、柔軟かつ俊敏に対応することができる。ただし、システムにはボトルネックが存在することがあるため、これが原因で生じる作業負荷がシステム全体の生産性に影響を与えることとなる。また、ある箇所でのボトルネックを解消しても、システム内の別の場所にて再度ボトルネックが発生することがある。これは、変動ボトルネックと呼ばれている⁽³⁾。したがって、生産システムの効率化をはかるためには、ロボットはこの変動ボトルネックの存在を考慮し、互いに関連し合いながら必要に応じてリアクティブに協調して作業を遂行することが求められる。

本研究で対象とするシステムには、搬送と製造処理の2種類のタスクを実行するロボットが存在する。そのた

*¹ 正員, 東京工業大学資源化学研究所 (〒 226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259-R1-19)

*² 東京工業大学資源化学研究所

*³ 正員, 東京大学人工物研究センター (〒 277-8568 千葉県柏市柏の葉 5-1-5)

Email: hosino@pse.res.titech.ac.jp

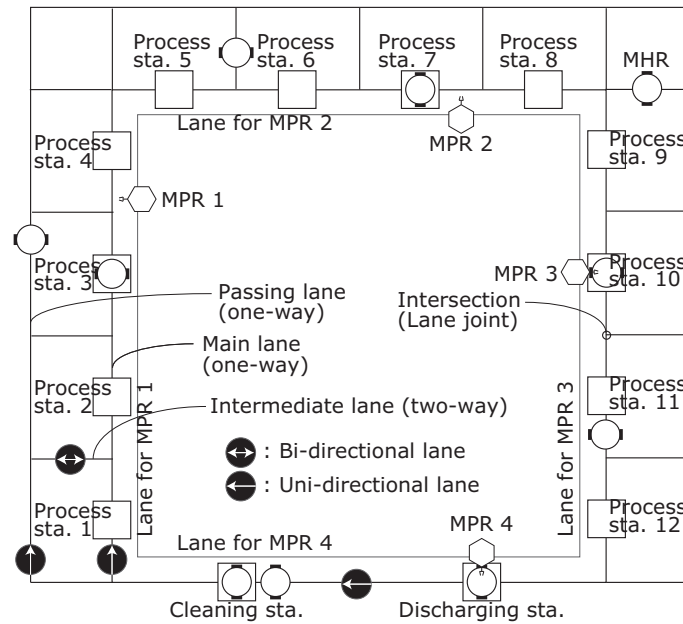


Fig. 1 Robotic Batch Manufacturing System with a Cyclic Layout Structure in a Pilot Plant Facility (top view)

め、一方のロボットの作業が効率化されても、もう一方のロボットがボトルネックとなり、当該ロボットに作業負荷が発生してしまう可能性がある。そこで、1. 搬送ロボットの移動経路計画、2. 搬送ロボットへのタスク割当て、3. 製造処理ロボットの作業ディスパッチング、4. 製造処理ロボット間でのリアクティブな協調作業負荷分散、に関するロボット群操作戦略を提案し、シミュレーション実験により、それらの生産性向上に対する有効性ならびに最も効果的な組合せを示す。

2. ロボット群によるバッチ式生産システム

本研究では、Fig. 1 が示す周回型の構造をした生産システムを対象とする。これにより、循環作業が可能となる。本システムには、材料搬送ロボット (MHR: Material-Handling Robot) と製造処理ロボット (MPR: Material-Processing Robot) が稼働している。MHR は、洗浄ステーションにて搬送タスクが割当てられ、1 から 12 までのうち所定のステーションへと材料を搬送し、払出し・洗浄ステーションへと戻り、タンクの洗浄を受ける。そのため、MHR は時計回りにシステム内を循環することとなる。ステーションに到着した MHR に対しては、MPR がタンク内の原材料を製品にするため、製造処理作業を実行する。

MHR が効果的に材料搬送を行えるよう、メイン (単方向)、追越し (単方向)、中間 (双方向) の 3 種類のレーン (移動経路) が用意されている。メインレーン上には、作業ステーションが配置されている。原材料は、MHR により作業ステーションを経て最終製品となる。メインレーンの内側には、MPR 用の双方向レーンが設けられている。各 MPR には、基本、それぞれが担当する作業ステーションが割当てられている (例: MPR 1 は、作業ステーション 1 ~ 4 を、MPR 4 は洗浄と払出しステーションを担当)。

3. ロボット群操作戦略

3.1 MHR の移動経路計画

Fig. 2 に、経路上を移動中の MHR が、現在地から目的地のステーションに対して経路計画を行う様子を示す。本研究では、(a) 最短経路計画、(b) 一つ先のステーションの状況までを考慮した動的経路計画、(c) 目的地までのステーション全てを考慮した動的経路計画、の 3 種類の経路計画手法を MHR に実装する。

Fig. 2 のスタートステーションにて、MHR 1 がゴールステーションまでの経路を計画する際、(a) の最短経路計画では MHR 2 や MHR 3 により、経路上で停止しなくてはならない。これに対して、変動する状況に対応するため、(b) では MHR 間 (例えば MHR 1 と MHR 2) で通信を行い、走行経路を再計画する。このとき、再計画され

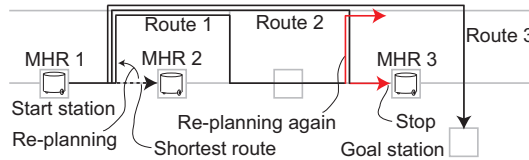


Fig. 2 MHR Route Planning with the Use of Each Approach

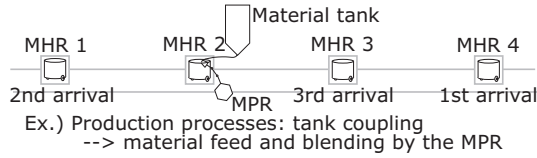


Fig. 3 Operation Dispatching

る経路の候補 1, 2, 3 があるが, 1 の経路を選択した場合, MHR 3 により再度追越し経路に向かう経路を計画しなくてはならず, また, 2 の経路を選択した場合は, MHR 3 によりステーション手前の経路上で停止しなくてはならない. 一方 (c) により再経路計画した場合, MHR 1 は当該 MHR と通信を介して情報を共有, 目的地までの全ステーションの状況を把握し, それらに基づき経路 3 を選択する. なお, (b) と (c) の経路計画は, メインレーンと中間レーンの合流地点を MHR が通過する際に行われる.

3.2 MPR への作業ディスパッチング

Fig. 1 の示す MPR のうち, 1 から 3 は, ステーション 1 ~ 4, 5 ~ 8, 9 ~ 12 の 4 つのステーションで MHR が搬送してきた材料に対する製造処理を行う. したがって, 同時に複数台の MHR が別々のステーションに到着した際, MPR が効率良く処理作業を遂行することが重要となる. そこで本研究では, (a') ステーションへの到着順 (FIFO), (b') 近傍, (c') 全 MHR を処理するための総移動距離最小化, の 3 種類のディスパッチングルールを基に, 次に作業を行う MHR ならびにステーションを決定する.

Fig. 3 は, ある MPR が MHR 2 に対して製造処理作業を行っている最中に, その他の全ステーションへ MHR が 4, 1, 3 の順で到着した場合を示す. このとき, (a') のルールを適用すると, MPR は左右への往復移動を繰り返さねばならない. 一方, (b') あるいは (c') を適用すると, MHR 2 → MHR 3 → MHR 4 → MHR 1, あるいは, MHR 2 → MHR 1 → MHR 3 → MHR 4 の作業順序が決定され, これに基づき MPR は処理作業を実行する.

3.3 MHR への搬送タスク割当て

本システムでは, MHR あるいはそのタンクと搬送する材料を切り離して考えることができない. また, 各製品はそれぞれのレシピにしたがって生産され, 全工程を同一の MHR とともに経ることとなる. したがって, 数ある生産オーダすなわちタスクの中から, その都度変動するシステムに適したタスクを選択し, MHR に割当てて必要がある. そこで本研究では, 以下の評価関数に基づきタスク ($Task_k$) を MHR へと割当てて. この評価関数は, ある時刻におけるシステム内での全タスク実行状況から, 最も類似度の低いタスクを選択することを意味している. そのため, MHR 群は 1 ~ 12 のステーションへまんべんなく向かうようタスクが割当てられる.

$$\text{minimize } \sum_k \sum_n Task_{n,k} (ExeTask_n - Task_{n,k}),$$

ここで, k は参照するタスク, n はステーションのことである. また, $ExeTask_n$ は, ステーション n にて MPR から処理作業を受けている MHR ならびに, ステーション n が目的ステーションになっている MHR の合計台数のことである. $Task_{n,k}$ には, k 番目の参照タスクのステーション n が目的地か否かで, 0 か 1 の 2 値変数が与えられる.

ただし, この評価関数により全ての未遂行タスクを参照し, そこから一つのタスクを選択し MHR へ割当てた場合, 作業の前半に処理工程数の少ないタスクが集中し, 後半に処理工程数の多いタスクが残ってしまう. そこで本研究では, (a'') ランダムタスク割当て, (b'') 全タスク参照割当て, (c'') 部分タスク参照割当て, の 3 種類の割当て方策に基づき, 搬送タスクを MHR に割当てて.

Table 1 Simulation result on operation time [h] and combination of operational strategies

# of MHRs	Non-reactive cooperation		Reactive cooperation	
	Best	Worst	Best	Worst
5	9.23 (b)(c')(c'')	11.18 (a)(b'/c')(b'')	9.38 (b)(b'/c')(a'')	11.32 (a)(b'/c')(b'')
10	7.16 (b)(c')(c'')	8.62 (a)(a')(b'')	6.89 (c)(c')(c'')	7.94 (a)(a')(b'')
15	7.12 (c)(b')(c'')	8.27 (a)(c')(b'')	6.46 (c)(c')(c'')	7.4 (a)(b')(a'')

3.4 MPR 間での作業負荷分散のためのリアクティブな協調

変動ボトルネックに対して、本研究では、MPR 間でリアクティブに協調することで作業負荷を分散できるようなアルゴリズムを構築した。これにより、手隙の MPR はその他の MPR と MHR の情報 (MHR と MPR) に基づき、作業負荷の高い MPR を支援するか否かを決定することとなる。ただし、隣接する MPR のみを協調の対象とする。

ある MPR (MPR_i) が自らの担当する作業ステーション ($x_{S_{MPR_i}}$) に待機中、MHR が隣接する MPR (MPR_{i-1}) の担当するステーション ($x_{S_{MPR_{i-1}}}$) に到着した際、 MPR_{i-1} に隣接するもう一方の MPR (MPR_{i-2}) が作業中であれば、 MPR_i が MPR_{i-1} を支援するための協調を開始する。ただし、 MPR_{i-1} も作業中であることを前提とする。 MPR_{i-2} も待機中の場合、 $x_{S_{MPR_{i-1}}}$ に近い方の MPR が支援することとなる。 MPR_i がすでに隣接する MPR (MPR_{i-1} か MPR_{i+1}) の担当ステーションにいる場合、MHR が $x_{S_{MPR_i}}$ に到着しない限り、隣接する MPR との協調を継続する。なお、 MPR_i は自分が作業中の場合は MPR_{i-1} と MPR_{i+1} とも協調しない。

4. シミュレーション実験

4.1 実験条件

Fig. 1 が示す生産システムに対して、4 台の MPR, MHR を 5, 10, 15 台投入したシミュレーション実験を行う。3.1, 3.2, 3.3 節より、 $3 \times 3 \times 3 = 27$ 通りの操作戦略を MHR と MPR へ実装し、最も効率の良い組合せと悪い組合せに対して、3.4 節の協調負荷分散を MPR へ実装する。

タスク数は 200 で、各タスクには搬送・製造レシピとして 1~12 のステーションに対して 0 か 1 の 2 値変数が $2/3$ と $1/3$ の割合で与えられ、1 の場合にはそのステーションへ MHR と MPR が向かう。各ステーションに要する時間は、1~12 では 30~80 [s]、払出しステーションでは 10~40 [s]、洗浄ステーションでは 20~80 [s] を、それぞれランダムに決定した。また、3.3 節の (c'') に関して、割当ての際の未実行タスク参照範囲は 10 とした。

4.2 シミュレーション結果

Table 1 に、MHR の投入台数に対する作業時間とそのときの操作戦略の組合せを、MPR 間での協調負荷分散の有無ならびに 200 タスク遂行に要した作業時間で最も優れた (最短) 結果と悪かった (最長) 結果に別けて示す。

5 台の MHR が投入されたシステムでは、協調負荷分散を行うことで、作業時間が最短と最長いずれの場合も 0.15 と 0.14 [h] だけ長くなった。これは、MHR の台数が少なかったため MPR 側にボトルネックが存在せず、作業負荷も発生しなかったためである。そのため、必要のない MPR 間での協調負荷分散を行うことにより MPR の無駄な動きが増え、これが作業時間に悪影響を及ぼす結果となった。したがって、MHR の台数が少ないシステムでは、最も効果的な操作戦略の組合せは (b), (c'), (c'') に協調負荷分散を行わない場合となる。

一方 MHR の台数が増えるにしたがって、最短時間も最長時間もそれぞれ MPR が協調負荷分散を行うことにより、MHR10 台では 0.27 と 0.68 [h]、MHR15 台では 0.66 と 0.87 [h] だけ短縮される結果となった。さらに、15 台の MHR による最短時間は、10 台の結果と比べ 0.43 [h] だけ短くなった。これは、MPR による協調負荷分散がその他の操作戦略に加え、生産性の向上に有効であったことを示している。以上のことから MHR の台数が多いシステムでは、最も効果的な操作戦略の組合せは (c), (c'), (c'') に協調負荷分散を行った場合となる。

4.3 変動ボトルネックへの対応と均等化された作業負荷

Fig. 4 は、Table 1 が示す協調負荷分散を行い最短時間が得られた際の操作戦略の組合せに基づき、MHR がステーションに到着してから MPR が処理を終えるまでにかかった時間の比率を、MPR が担当する 2, 4, 4, 4 つの

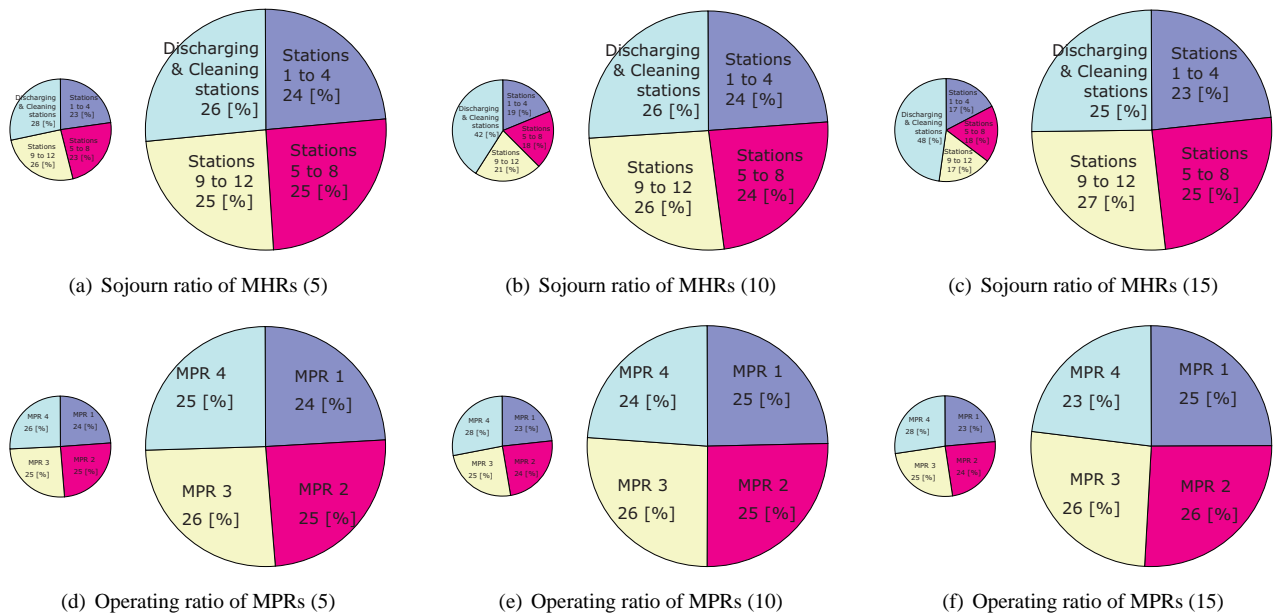


Fig. 4 Robots Utilization Ratio with the Use of the Operational Strategies ((·) indicates the # of MHRs)

ステーションごとに、また各 MPR の稼働比率を示している。各結果の左には、比較のため協調負荷分散を行わなかった結果も示してある。円グラフに占める割合が高い作業ステーションあるいは MPR がボトルネックとなり、そこで作業負荷が生じていることとなる。

Fig. 4(a) と Fig. 4(d) の結果から、MHR が 5 台のシステムでは、協調負荷分散実行の有無にかかわらず、MPR の稼働率はどれもほぼ均等であり、MHR の滞在時間も、若干払出しと洗浄ステーションが高いものの、各ステーションで 25 [%] 前後であることが分かる。これは、すなわちボトルネックがないことを示している。Fig. 4(b) と Fig. 4(e), Fig. 4(c) と Fig. 4(f) の結果から、MHR の台数が 10 台、15 台となると、協調負荷分散が行われない場合、払出しと洗浄の 2 つのステーションへ続々と到着する MHR により、そこでの MHR の滞在時間と担当する MPR 4 の稼働率が大幅に増加していることが分かる。しかし、MPR 4 の作業負荷を隣接する MPR 1 と 3 が協調して分散することにより、MHR の台数が増えても MPR 間で作業負荷は均等化され、さらに、MHR の滞在時間も各ステーションで同等なもとなり、ボトルネックへの対応が適切になされていることが分かる。

5. 結 言

本研究では、ロボットを用いたバッチ式生産システムに焦点をあて、そこで稼働する材料搬送ロボット (MHR) と製造処理ロボット (MPR) が、時々刻々と変動する状況において柔軟かつ俊敏に作業を遂行するための操作戦略、1. MHR の移動経路計画、2. MHR へのタスク割当て、3. MPR の作業ディスパッチング、4. MPR 間でのリアクティブ協調作業負荷分散、を提案した。シミュレーション実験の結果から、提案した操作戦略により、ロボットはボトルネックならびにそれによって生じる作業負荷を解決し、本操作戦略が生産性の向上に有効であることを明らかにした。そして、MHR の台数に応じた最も効果的な操作戦略の組合せを示した。

文 献

- (1) Hoshino, S., Seki, H., Naka, Y., and Ota, J., "Multi-Robot Coordination for Flexible Batch Manufacturing Systems Experiencing Bottlenecks," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, Vol. 7, No. 4 (2010), pp. 887–901.
- (2) Wang, J., "On Sign-board Based Inter-robot Communication in Distributed Robotic Systems," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (1994), pp. 1045–1050.
- (3) Roser, C., Nakano, M., and Tanaka, M., "Comparison of Bottleneck Detection Methods for AGV Systems," *Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference*, (2003), pp 1192–1198.