

分解・調整アプローチによる生産システムの

最適運用計画システムの開発

Development of Production Planning and Management Systems
by Decomposition and Coordination Approach

1071019

研究代表者 大阪大学大学院基礎工学研究科 准教授

西 竜 志

【研究の目的】

高齢化社会の進行とともに、工場などの生産システムに関する管理運営に携わってきた熟練技術者の数がますます減少してきており、熟練者の知識や経験をシステムで実現することが急務となっている。人間の判断や行動、機械の動作を表現する離散事象モデルとしてペトリネットがある。本研究では、生産システムの最適運用問題を解決する問題をペトリネットで実現し、最適な運用計画を導出することを目的とする。ペトリネットのサイズが増加するにつれ、状態数が急激に増大し、最適な行動計画を決定することが難しい。そこで、ペトリネットを複数の要素に分解し、各要素での決定を全体として調整することで望ましい行動計画を得るという生産システムの最適運用計画システムを開発する。

FA(Flexible Automation)のスケジューリング問題は組合せ最適化問題として定式化される。組合せ問題に対する汎用アプローチは現実の問題を数学モデルに変換し、分枝限定法などを実装した商用のソルバーで解を得るという方法である。コンピュータの性能向上や商用ソルバーの性能向上に伴ってこれらの方法でもある程度問題は解決できるようになってきているが、大規模問題は依然として実用的な時間での計算は困難である。本研究では、ペトリネットを複数のサブネットに分解し、分解されたサブネットの部分問題を繰り返し解くことによって全体を調整する最適化アルゴリズムを採用した最適運用計画問題の解法を提案している。ペトリネットによる問題記述のメリットは、システムのモデル化、検証、解析、シミュレーション、最適化、

設計、実装を共通モデルで表現できることであり、本研究による研究成果は様々な問題の汎用のソルバーとして利用できる。

【研究の内容、成果】

半導体工場、コンテナターミナル、生産システムなどにおける搬送システムでは、複数台の自律無人搬送車(AGV: Automated Guided Vehicle)が広く用いられており、AGV 間の衝突やデッドロックが生じることなく、搬送時間を最短にする搬送経路を高速に作成することが求められている。従来の研究では、搬送要求の AGV への割当ては予め定められているという条件、あるいは AGV の衝突やデッドロックを考慮しない条件下でのタスク割当てを採用した AGV 経路計画問題が主に対象とされてきた。しかしながら、実際の搬送システムでは、リアルタイムに与えられる搬送要求に対して、AGV 間の干渉を考慮して AGV のタスク割当てと経路計画を同時に最適化する必要がある。このような動的問題は、ある時点で与えられたタスク集合に対して総搬送時間を最短にするような AGV へのタスク割当て、および経路計画を決定する静的問題を繰り返し解くことで解決できる。本研究では上記の静的問題に対して、ペトリネットの分解と調整を用いた AGV のタスク割当てと経路計画の同時最適化手法の開発を行った。

ペトリネットによる AGV のタスク割当てと経路計画問題のモデリング

問題設定：最大 4 方向への移動、または停止が

可能な地点を表すノードと、ノード間を接続した移動可能な搬送路を表す同一長のエッジから構成される搬送システムを考える。複数の AGV が同一時間において同一ノードに存在できない(衝突回避)。また、同一エッジを同時に占有できない(すれ違い回避)。AGV の隣接ノードへの移動、および荷積み(荷下し)に要する時間は各々1 単位時間とし、AGV の速度は一定かつ始動、停止、方向転換に要する時間は移動時間に比べて無視できると仮定する。各タスクは1 個の搬送先ノードを有し、1 台の AGV に対して複数のタスクを割り当てることが可能である。対象とする AGV のタスク割当てと経路計画の同時決定問題とは、上記の搬送システムにおいて各 AGV の初期位置が与えられたとき、各タスクの完了時間の総和(完了時間)が最短となるような AGV へのタスク割当てと、各 AGV の搬送経路を決定する問題である。

AGV v_j がノード s_x に存在する状態を p_{v_j, s_x} ,

AGV v_j がノード s_a からノード s_b へ移動する事

象を t_{v_j, s_a, s_b} で表現するとき、図 1 左図の搬送

経路は図 1 右図のようになる。

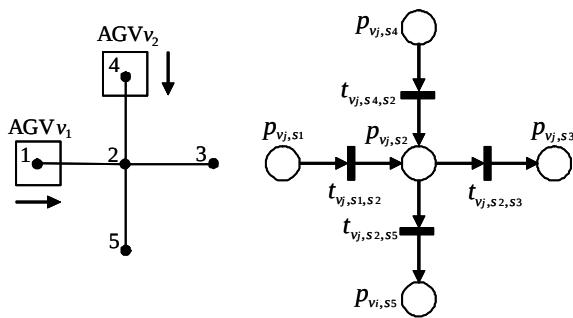


図 1 AGV 搬送システムのペトリネットモデル

タスク u_i ($1 \leq i \leq l$) については、割当て待ち状態を $p_{u_i, 0}$, AGV v_j にタスク u_i を割り当てるという事象を $t_{u_i, v_j, 0}$, AGV v_j の到着待ち状態を p_{u_i, v_j} , AGV v_j の荷積み(荷下し)動作を $t_{u_i, v_j, 1}$, タスクの完了を $p_{u_i, 1}$ で表す。図 2 左図に示す搬

送システムにおいて、2 個のタスク u_1, u_2 (搬送先はそれぞれ s_1, s_2) が与えられたとき、ペトリネットは図 2 右図になる。

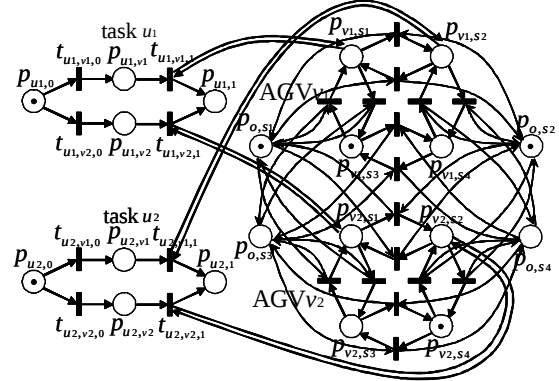


図 2 タスク割当てと経路計画問題のペトリネットモデル

ペトリネット $PN = (P, T, w, M_0)$ が与えられたとき、タスク l 個、AGV m 台におけるタスク割当てと経路計画の同時最適化問題はペトリネットの最適発火系列問題と定式化できる。

ペトリネットの分解と調整による最適化

ペトリネットの分解：タスク数や AGV 台数の増加に伴い、最適化問題を表すペトリネットは大規模化するため、最適発火系列問題を解くことは困難になる。そこで、ペトリネットを複数のサブネットに分解し、サブネットに関する部分問題を繰り返し最適化することにより、全体の問題を最適化するという方法をとる。対象とする最適発火系列問題が以下の条件を満たしているとき、ペトリネットの分解が可能である。

- 1) 目的関数 J は、個々の要素 u_i ($1 \leq i \leq M$) についての目的関数 J_{u_i} の和 $J = \sum_{i=1}^M J_{u_i}$ として表現される。
- 2) 複製プレース集合 P_R に関して、目標マーキングが定義されていない($\forall p \in P_R$ に対する目標マーキングはドントケア項(*)である)。

タスク l 個、AGV m 台におけるタスク割当てと経路計画の同時決定問題は、タスク u_i の搬送先ノードを表すプレースと、衝突回避のために導入したリソースプレースを複製することで、タス

ク割当てに関する l 個のサブネットと AGV の経路計画に関する m 個に分解される。たとえば、図 3 右図に示すペトリネットをサブネットに分解した場合、図 3 に示す 4 つのサブネットが生成される。

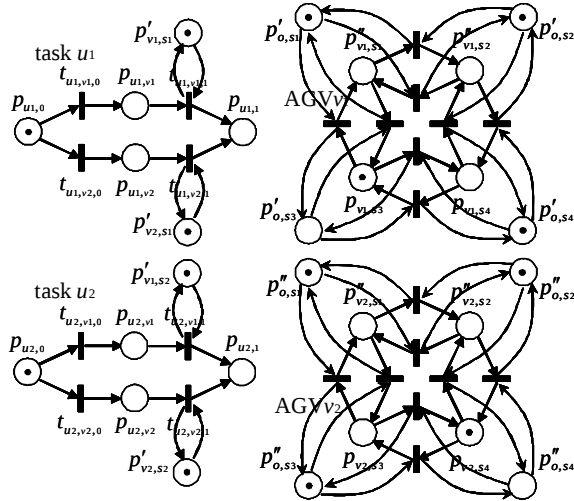


図 3 ペトリネットのサブネットへの分解

最適化アルゴリズム

各サブネットに対して独立に求めた発火系列は、もとのペトリネットで実行可能とならない。もとのペトリネットで実行可能な発火系列を得るため、(1)式の目的関数に発火条件違反に対するペナルティを導入する。ペナルティ法を用いた最適化アルゴリズムを以下に示す。

Step 1 初期最適化

繰返し回数 $N := 1$ とし、要素 u_j ($j = 1, 2, \dots, M$) について、部分問題に対する最適解を求める。

Step 2 収束判定

暫定解が実行可能かどうかを判定する。実行可能かつ解の更新が行われていなければ、暫定解を準最適解として出力し、アルゴリズムを終了する。

Step 3 再度最適化

再度最適化を行う要素を選ぶ。前回の再度最適化時に u_i ($i \neq M$) が選ばれていたのであれば u_{i+1} を選択し、 u_M が選ばれていたのであれば u_1 を選択する。再度最適化を行う要素 u_j につ

いて、 u_j 以外の暫定解を定数として固定し、部分問題を解く。

Step 4 ペナルティの重み更新

要素 u_j について、Step 3 で得られた解と暫定解を用いてペナルティ関数を計算し、ペナルティの重み係数の更新を行う。

Step 5 暫定解の更新

Step 3 で部分問題を解くことによって得られた解を暫定解とし、 $N := N + 1$ として Step 2 に戻る。

数値実験

提案法と汎用ソルバー(CPLEX)による厳密解法、および最近傍法によるタスク割当てを用いた最適化法との比較を行う。使用した搬送経路は、図 4 に示す 115 ノード・128 辺の単方向経路である。AGV 台数 5 台、タスク 10 個の場合、 $|P| = 760$, $|T| = 740$ となる。ペナルティの重み更新幅は $\Delta\omega = 0.3$ とした。使用した計算機は、Pentium D3.4GHz, メモリ 1GB である。汎用ソルバーとして ILOG 社の CPLEX10.1 を使用し、厳密解を求める。

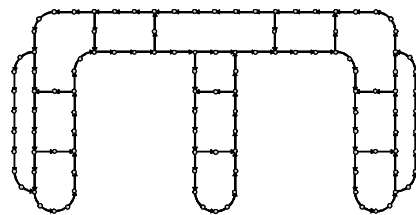


図 4 115 点と 128 辺から構成される単方向搬送システム

AGV5 台、タスク 10 個において 5 ケースの数値実験を行った結果を表 1 に示す。各ケースにおいて、AGV の初期位置およびタスクの搬送先ノードはランダムに与えられる。また、表 1 中の TCT はタスク完了時間の総和である。表 1 より、提案手法では平均して 48.1 秒で解を導出できるが、CPLEX

では最適解を導出するために、平均して約11,400秒以上の計算時間を必要とした。提案法はすべてのケースにおいてCPLEXよりも短時間で実行可能解が得られていることがわかる。また、2つのケース(Case 1, 3)においては、提案法により最適解が得られている。以上より、提案法は厳密解法より短時間で最適に近い解が得られることを確認した。

表 1 提案手法(Proposed method)と汎用ソルバー(CPLEX)の性能比較

Case	Proposed method		CPLEX	
	Time[s]	TCT	Time[s]	TCT
1	54.4	171	4738.3	171
2	32.1	107	100.5	105
3	48.2	139	154.9	139
4	69.5	208	52012.0	189
5	26.2	85	79.6	79
Ave.	48.1	142	11417.1	136.6

搬送シミュレーション、および搬送実験

数値実験によって得られた搬送経路計画の有効性を検証するため、半導体工場を模擬したシミュレーションを実行することにより、提案手法の有効性を確認している(図 5)。また、2台のAGVを用いることによる有効性も確認している(図 6)

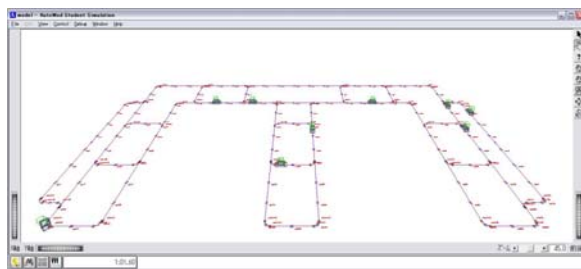


図 5 搬送シミュレーション実験

[今後の研究の方向、課題]

本研究では、ペトリネットの分解によるAGVのタスク割当てと経路計画の同時最適化法を開発した。現実の搬送システムでは、搬送物を保持可能なバッファが制限される場合やゾーンに関する制限が存在する。また、搬送要求がリアルタイムで与えられるため、これらの制約条件や動的環境に対応し

た経路計画問題に対する有効性を検証する予定である。



図 6 2台のAGVによる衝突回避実験

[成果の発表、論文等]

- 1) T. Nishi, K. Shimatani, M. Inuiguchi, Decomposition of Petri nets and Lagrangian relaxation for solving routing problems for AGVs, International Journal of Production Research, Vol. 47, No. 14, pp. 3957-3977 (2009)
- 2) T. Nishi, K. Shimatani, M. Inuiguchi, Lagrangian Relaxation Technique for Solving Scheduling Problems by Decomposition of Timed Petri Nets, Preprints of IFAC 2008 World Congress, pp. 10528-10533 (2008)
- 3) T. Nishi, Y. Tanaka, M. Inuiguchi, Petri Net Decomposition Approach for the Simultaneous Optimization for Task Assignment and Routing for Automated Guided Vehicles, Proc. of 2008 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, pp. 175-180 (2008)
- 4) T. Nishi, M. Wakatake, M. Inuiguchi, Decomposition of Timed Automata for Solving Scheduling Problems, Proc. of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, pp. 2459-2464 (2008)
- 5) 田中, 西, 乾口:ペトリネットの分解によるAGVのタスク割当てと経路計画の同時最適化, システム制御情報学会, Vol. 22, No. 5, pp. 191-198 (2009)