遅延外乱による衝突回避を目的とした複数台 AGV の分散型経路計画法

森 中 翔一朗*・西 竜 志**・小 西 正 躬*

A Distributed Collision-free Routing Method for Multiple AGVs under Motion Delay Disturbances

Shoichiro MORINAKA*, Tatsushi NISHI** and Masami KONISHI*

In this paper, we propose a distributed routing method for multiple AGVs robots under uncertain motion delays. In real transportation environments, unexpected motion delays and demands may cause re-routings. The feature of the proposed method is that each AGV subsystem creates the routing to minimize the sum of the transportation time and the penalties for collision frequency distribution taking into account motion delay disturbances. The proposed method is applied to routing problem for a transportation system with 143 nodes and 20 AGVs in a semiconductor fabrication bay. The computational results show that the total transportation time obtained by the proposed method is shorter than that of the conventional method under various disturbances.

Key Words: automated guided vehicles, distributed routing, motion delay disturbance, re-routing

1. はじめに

近年、半導体工場の大規模化、高密度化に伴い、搬送システムには、数十台規模の AGV(Automated Guided Vehicle) が用いられている。搬送要求は時々刻々と発生することから、AGV 間の衝突を回避した経路計画を数秒以内に得ることが求められている。AGV の経路計画問題に対する従来研究として、遺伝的アルゴリズムによる解法¹⁾、ディスパッチングルールを用いた行動則の決定法²⁾や線形計画問題への定式化による解法³⁾など数多くの研究がなされている。筆者らは、AGV ごとに設置されたサブシステムがほかのサブシステムと通信し、それぞれの AGV が経路計画を行ないながら全体を最適化する自律分散型経路計画法を提案している^{4),5)}。これらの従来研究は、すべての AGV が経路計画システムによって導出された搬送スケジュール通りに走行する条件下における経路計画問題を対象としている。しかしながら、現実の搬送環境下では、搬送要求の変動やタイミングのずれ、タスク遅延、走行遅延等の発生により、想定していなかった衝突が生じ、頻繁に再経路計画を行なう必要が生じる。また、再経路計画によって外乱を回避するための行動により、搬送時間が増加する可能性がある。全 AGV を同時に考慮して最適化を行なう従来の経路計画法は、すべての AGV に対してすべ

ての外乱を想定した経路計画を行なわなければならないため、考慮すべき組合せの数が膨大となり、経路計画作成のために多大な時間を必要とする。したがって、集中型手法で外乱に対処できる機能をもたせようとするれば、大規模問題に対して迅速に解を得ることは難しくなる。

このような問題を解決し、搬送システムにおける安全性を確保するため、本論文では、遅延外乱に対して、衝突可能性を考慮して経路計画を最適化する新たな分散型経路計画法を提案する。不確定環境下における研究に関して、Østergaard らは、センサ情報が不確実な環境下において、マルコフシステムを用いた戦略を提案している⁶⁾。Moorthy らはデッドロックをあらかじめ予測する方法を提案しているが、搬送経路が方向性であり、かつすべての AGV を一括に管理している⁷⁾。本論文は、双方向に移動可能な搬送システムにおいて、各 AGV に対して遅延外乱を想定したときにほかの AGV との衝突頻度分布を定量評価し、各 AGV の衝突と衝突の可能性に対するペナルティに組み込むことで、外乱に対してロバストな経路計画を作成する分散型経路計画法を提案する。衝突可能性に対するペナルティの計算法として、遅延外乱を想定したとき、マルコフ連鎖によって得られる遅延頻度分布を用いた方法と、シミュレーションによって得られる衝突頻度分布を用いた方法、および Q 学習を用いた方法を比較検討し、数値実験により提案法の有効性を検証する。

本論文の構成はつぎのとおりである。2 章では、対象とする搬送経路計画問題のモデル、遅延外乱の定義、および問題設定を示す。3 章では、遅延外乱を考慮した分散型経路計画法のアルゴリズムを示す。そして、4 章では、衝突頻度分布、および遅延頻度分布の作成法を述べ、提案手法をさまざまな環境下における搬送経路計画問題に適用し、従来法との比較、

* 岡山大学大学院自然科学研究科 岡山市津島中 3-1-1

** 大阪大学大学院基礎工学研究科 豊中市待兼山町 1-3

* The Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University, 3-1-1 Tsushima-Naka, Okayama

** Graduate School of Engineering Science, Osaka University, 1-3 Machikaneyama, Toyonaka

(Received July 1, 2005)

(Revised November 30, 2005)

有効性の検証を行なう。5章で本論文の結論と今後の課題を述べる。

2. 問題設定

2.1 対象モデルの説明

対象とする2次元の搬送レイアウトモデルを Fig. 1 に示す。対象とする搬送システムは、所定の限られた範囲内に敷設された格子構造の領域となっており、143個のノードと複数のエッジから構成される。ノードは、AGVが停止・方向転換のできる場所を示し、エッジはノード間をつなぐAGVの軌道を表わす。また、議論を簡単にするために、ノード間の軌道長はすべて等しく、AGVはエッジ上を双方向に移動可能とし、ノード上でのみ方向転換を可能とする。ただし、AGV同士の衝突を回避するために、以下の2つの制約を満たさなければならない。

- 同一期間に、同一ノードへ2台以上のAGVが同時に進入しない(衝突の禁止)。
- 同一期間に、同一エッジを2台以上のAGVが占有しない(すれ違いの禁止)。

以上のようなモデル化を行なうため、各AGVの動作を離散化して考える。

Fig. 1 AGV transportation system in semiconductor fabrication bay.

2.2 遅延外乱の定義

現実の搬送環境下において起こりうる外乱の中で、Fig. 2に示す遅延外乱を対象とする。遅延外乱は、あるAGV k が1ノード間(ノード i からノード j)を移動するために必要な時間ごとに確率 P_d で発生するものとし、あるAGVに時刻 t で遅延外乱が発生した場合、そのAGVは時刻 $t+1$ でも時刻 t におけるノードに存在すると定義する。

Fig. 2 Definition of disturbance of motion delay

2.3 問題設定

Fig. 3にタイミングチャートを示す。各AGVは時刻0で1つの初期ノードと1つの目的ノードが与えられる。AGV

は現時点から目的ノードまでの期間の経路計画を作成する。すべてのAGV間で衝突を生じない実行可能な経路計画が与えられた時点で搬送が開始される。遅延外乱の発生によってAGV間に衝突が起こる場合は、衝突が起こる1期間手前でAGVは停止し、すべてのAGVが再経路計画を立案し、衝突を回避する。ただし、再経路計画立案時にすべてのAGVはその場で1期間停止して経路計画計算を行なう。これは、遅延外乱による衝突する可能性が生じた場合は、すべてのAGVで同期をとるために時間が必要となるためである。各AGVは再経路計画立案時に目的ノードまでの期間の経路計画を作成する。以上の条件のもとで、すべてのAGVが初期ノードから目的ノードに達するまで、再経路計画を繰り返すことによって、外乱による衝突を回避しながら、各AGVが目的ノードに到着するまでの搬送時間の総和を最小とする経路計画を作成する動的問題を本論文の問題設定とする。

Fig. 3 Timing chart of re-routing for motion delay disturbances

3. 遅延外乱を考慮した分散型経路計画法

3.1 遅延外乱に対する経路計画法

複数台AGVの経路計画が総搬送時間を最短とするように最適化されたとき、遅延等の外乱が生じることによって、AGV同士で衝突が生じる可能性が高い。したがって、遅延を考慮して経路計画を行なう場合は、遅延が生じたとしてもAGV間で衝突する可能性の低い経路計画を作成する必要がある。しかしながら、すべてのAGVの経路計画を同時に最適化する手法を用いた場合、想定されるすべてのAGVに対して種々の外乱を想定して経路計画を行なう必要が生じるため、これらすべての組合せを考慮して経路計画を最適化することは難しい。そこで、以下では、遅延外乱に対する分散型経路計画法を提案する。

3.2 遅延外乱を考慮した分散型経路計画アルゴリズム

経路計画に対する分散アプローチとして、移動ロボットの動作経路計画問題を経路計画問題と速度調整問題の2段階に分解するアプローチ^{8), 9)}や、拡散方程式を用いた経路計画法¹⁰⁾、アント法¹¹⁾などが提案されている。これらのアプローチは局所的情報から全体として整合性のとれた局所最適解を迅速に得ることを指向している。それに対して、著者らは、AGVをサブシステムとして、各サブシステムが情報交換と経路計画の作成を繰り返すことにより、解の最適性と求解の

即応性の両方を指向する分散型経路計画法が提案した⁵⁾。この手法は、整数計画問題として定式化された経路計画問題をAGVごとの部分問題に分解し、分解された部分問題をダイキストラ法を用いて繰り返し解くことにより、全体の問題を効率よく解くことのできる方法である。以下では、この分散型経路計画法を用いて、遅延外乱に対する衝突可能性の列挙数を削減する新たな分散型経路計画アルゴリズムを提案する。**Fig. 4**に遅延外乱を考慮した分散型経路計画アルゴリズムのフローチャートを示す。各AGVは以下の手順で経路計画を作成する。

Fig. 4 Distributed routing algorithm for motion delay disturbances

ステップ1 初期経路計画の作成

AGV k はほかのAGV (AGV l とする) との衝突やすれ違いを考慮せずに、各AGVとして最適な経路計画をダイキストラのアルゴリズムを用いて作成する。

ステップ2 情報交換

AGV k はほかのAGV l と、暫定的に作成された経路計画 $\{\bar{x}_{i,j,t}^k\}$ を交換する。 $\{\bar{x}_{i,j,t}^l\}$ は、AGV l が時刻 t にノード i からノード j に移動するときに1、それ以外は0となる変数の暫定解を表す。

ステップ3 収束判定

AGV k は収束判定を行なう。全AGVで経路計画作成時に得られた経路が更新されず、かつAGV同士に衝突がない場合は収束とみなし、処理を終了する。

ステップ4 スキップ判定

ある確率(以下、スキップ確率と呼ぶ)に基づき、再経路計画の作成を飛ばし、ステップ6に進む。これは競合しているAGVがほかのAGVの経路を参照してつぎの経路計画を作成するときに、同一の経路計画が周期的に作成されることを防ぐためである。スキップ確率は25%~45%程度に設定することが望ましい⁴⁾。そこで、スキップ確率を30%に

設定した。

ステップ5 再経路計画

AGV k は情報交換によって得られたほかのAGVの経路計画を用いて、目的関数である J_k を最小とする経路計画を作成する。目的関数 J_k はAGV k の搬送時間と衝突あるいは衝突の可能性に対するペナルティ項から構成される。各AGVは、情報交換を行なうことによって得られたほかのAGVの経路計画を参照し、AGV間で衝突が起こる場合は、衝突に対するペナルティを評価関数に組み込むことで再経路計画を行なう。遅延外乱を考慮するため、各AGVが各時刻でほかのAGVと衝突するかどうかだけではなく、遅延外乱によって生じる衝突の可能性を定量的に評価した衝突頻度分布をペナルティとして加える。(1)式にAGV k の目的関数 J_k を示す。

$$J_k = T_k + \sum_{l \in V, l \neq k} \alpha_{k,l}^{(n)} \left(C_{k,l}^1 + \sum_{\Delta t=1}^H F_{k,l}(\Delta t) \cdot C_{k,l}^2(\Delta t) \right) \quad (1)$$

V : AGVの集合

T_k : AGV k の搬送時間

H : AGV k とAGV l の考慮すべき遅延期間の最大値

$\alpha_{k,l}^{(n)}$: n 回目のイタレーションにおける

衝突に対するペナルティの重み係数

$C_{k,l}^1$: AGV k とAGV l の衝突回数

$C_{k,l}^2(\Delta t)$: AGV k がAGV l に対して Δt 期間

遅れた場合の衝突可能性の頻度

$F(\Delta t)$: 搬送が終了するまでに、AGV間に

遅延期間 Δt のために生じる衝突の回数の頻度分布

衝突頻度分布は、全AGVに初期ノードと目的ノードを与え、確率的に外乱を発生させた搬送シミュレーションを実行することにより、あるAGV間において、遅延期間 Δt のために発生した衝突の回数の期待値を統計的に取得した分布である。 $F(\Delta t)$ の同定法は4.1節で述べる。 $C_{k,l}^1$ および $C_{k,l}^2(\Delta t)$ はそれぞれ(2)式、(3)式を用いて求める。

$$C_{k,l}^1 = \sum_t \sum_{i \in N_{P(k,t)}} \bar{x}_{i,P(k,t),t}^l + \sum_t \bar{x}_{P(k,t),P(k,t-1),t}^l \quad (2)$$

$$C_{k,l}^2(\Delta t) = \sum_t \sum_{i \in N_{P(k,t)}} \bar{x}_{i,P(k,t),t-\Delta t}^l + \sum_t \bar{x}_{P(k,t),P(k,t-1),t-\Delta t}^l \quad (3)$$

$P(k,t)$: AGV k が期間 t の終わりに到着するノード

$N_{P(k,t)}$: $P(k,t)$ から双方向へ移動可能なノードの集合

(2)式の右辺の第1項はAGV k が期間 t の終わりに到着するノードと、AGV l が期間 t の終わりに到着するノードが同じ場合はノード j で衝突が起こることを示しており、右辺の第2項はAGV k が通過するエッジとAGV l が通過するエッジが等しい場合にはエッジ上で衝突が起こることを

示している. また, (3) 式において, 右辺の第1項は AGV1 が Δt 期間遅れた場合に AGV k とノード j で衝突する可能性を示しており, 右辺の第2項は AGV1 が Δt 期間遅れた場合に AGV k と同一エッジ上で衝突する可能性を示している.

ステップ6 ペナルティ関数の重み係数の更新

ステップ5で得られた経路計画について, AGV 間で衝突が生じ, 実行不可能であれば, AGV k は (4) 式を用いて, n 回目のイタレーションにおけるペナルティ関数の重み係数 $\alpha_{k,l}^{(n)}$ を更新し, ステップ2へ戻る.

$$\alpha_{k,l}^{(n+1)} = \alpha_{k,l}^{(n)} + \Delta\beta \quad (\forall l \in V) \quad (4)$$

ここで, $\Delta\beta$ は衝突に対するペナルティ更新幅である. $\Delta\beta$ の値を大きくすると, 実行可能解を作成するために必要な計算時間は短くなるが, 解の評価が悪くなる. 一方, $\Delta\beta$ の値を小さくすると解の評価は多少良くなるが計算時間が長くなるため, 解の評価と経路計画のための計算時間のトレードオフを考慮して $\Delta\beta$ の値を決定する必要がある. ここでは $\Delta\beta = 0.8$ とした.

3.3 例題を用いた衝突に対するペナルティの計算方法

Fig. 5 を用いて9ノードの搬送路上で, 2台の AGV1, および AGV2 が矢印のように走行する問題において, AGV2 の経路を固定した条件下で AGV1 の経路計画を作成する方法を説明する. ここで, S_1 および S_2 は AGV1 および, AGV2 の初期ノード, G_1 および G_2 はそれぞれの AGV の目的ノードを示している. Fig. 6 に示すように AGV1 の経路計画は, 3通りが考えられる. 遅延外乱を考慮しない分散型経路計画法において, AGV1 は Route1~3 のいずれの経路を選択しても, 予定通りに走行する環境下では衝突が起こることはないため, Route1~3 を選択したときの目的関数 $J_1(\text{Route1})$, $J_1(\text{Route2})$, $J_1(\text{Route3})$ は (5) 式のように同一評価となる.

$$J_1(\text{Route1}) = J_1(\text{Route2}) = J_1(\text{Route3}) = 3 + \alpha_{1,2} \cdot 0 \quad (5)$$

しかしながら, 遅延外乱を考慮した分散型経路計画法においては, 次式のように Route1~3 を選択したときの目的関数 $\hat{J}_1(\text{Route1})$, $\hat{J}_1(\text{Route2})$, $\hat{J}_1(\text{Route3})$ の値は (6)~(8) 式のように異なる.

$$\hat{J}_1(\text{Route1}) = 3 + \alpha_{1,2} \cdot 2 \cdot F(1) \quad (6)$$

$$\hat{J}_1(\text{Route2}) = 3 + \alpha_{1,2} \cdot F(1) \quad (7)$$

$$\hat{J}_1(\text{Route3}) = 3 \quad (8)$$

これは, Route1 を選択するとノード4あるいはノード5で AGV2 が1期間遅れたときに衝突する可能性があり, Route2 を選択するとノード4で AGV2 が1期間遅れたときに衝突する可能性があるためである. このとき, 次式が成立するために, AGV1 は遅延外乱が起こったとしても, 衝突が起こりにくい Route3 を選択する.

$$\hat{J}_1(\text{Route3}) < \hat{J}_1(\text{Route2}) < \hat{J}_1(\text{Route1}) \quad (9)$$

Fig. 5 An example of routing

Fig. 6 Routing candidates for AGV1

Fig. 7 と Fig. 8 に従来法および提案法における, AGV1 の経路を固定した条件下で, AGV k のペナルティ関数の計算方法を説明する. ここで, ○の中の数字は各 AGV で算出する経路計画におけるノードの走行順序を示している. (1) 式における右辺第2項の衝突に対するペナルティの計算時に, 従来法では, Fig. 7 に示すように, 各時刻 t について AGV k が AGV1 と同時刻における, 衝突とすれ違いに対してのみペナルティを加えていた. それに対して, 提案法では, 各時刻 t から $0, 1, 2, \dots, H$ 期間, ほかの AGV が遅れることによって生じる衝突の可能性をすべて列挙し, それらに対してペナルティを加える. Fig. 8 の例では, $t = 3$ のとき, AGV1 に遅れが生じない場合と, 1 期間遅れた場合と, 2 期間遅れた場合における衝突とすれ違いの可能性もペナルティとして加える. このように, 遅延外乱によって起こりうる衝突の可能性に対してペナルティを加えることで, 遅延外乱が生じたとしても衝突が起こりにくい経路を作成することができると考えられる.

Fig. 7 Conventional calculation method for penalty for collision

Fig. 8 Proposed calculation method for penalty for collision ($t = 3$)

4. 数値実験による有効性の検証

4.1 衝突頻度分布の作成

衝突頻度分布は, 全 AGV に初期ノードと目的ノードを与

え、確率的に外乱を発生させた搬送シミュレーションを実行することにより、ある AGV 間において、 Δt の遅延期間によって発生した衝突の回数の期待値を統計的に取得した分布である。以下の手順で衝突頻度分布を求めることができる。Fig. 1 の 143 個のノードの搬送路上で、1~20 台の AGV が走行する問題を対象とする。AGV の台数を固定した状態で、50 パターンの搬送要求を発生させ、初期ノード、目的ノードは一様乱数により作成し、全 AGV に与える。遅延外乱発生確率 P_d に対して 1000 回の搬送要求をもとに、1 回の搬送が終了するまでに生じた AGV 間の衝突のうち、各遅延期間 Δt ($1 \leq \Delta t \leq H$) によって起こった衝突回数の AGV に対する平均値を取得する。

Fig. 9 にシミュレーションによって得られた遅延外乱発生確率 P_d に対する Δt 期間の遅れによる衝突頻度分布 $F(\Delta t)$ を示す。AGV 間の衝突はある AGV に 1 期間の遅れが起こったときに最も多く発生しており、遅延外乱発生確率 P_d が増加するごとに衝突可能性回数が増加している。一方、2 期間以上の遅れに対してはほとんど衝突が起こっていない。これは、従来までの同時刻の衝突のみを回避する分散型経路計画アルゴリズムは、互いの AGV が最小限の移動で衝突を回避しようとするために、AGV の走行経路が密になるためである。AGV の走行経路が密である状態では、1 台の AGV だけに遅延外乱が発生したとしても、その遅延によってほかの AGV と衝突する可能性が高くなる。Fig. 10 に Fig. 9 に示す衝突頻度分布を利用し、提案法を採用することによって得られる衝突頻度分布を示す。Fig. 10 の結果は、Fig. 9 に比べて、1 期間のずれに対する衝突可能性回数が減少し、2 期間のずれに対する衝突頻度が増加していることがわかる。これは、提案法を用いることで、衝突可能性を定量的に評価し、1 期間の遅れに対して、大きなペナルティが加わっているために、1 期間のずれに対しては、遅延外乱が起きたとしても、衝突が起こりにくい経路を作成するためである。ただし、つぎに衝突の起こりやすい 2 期間のずれに対する衝突可能性が大きくなっていることがわかる。

4.2 遅延頻度分布の作成

前節において、衝突頻度分布をシミュレーションによって求めているが、衝突頻度分布があらかじめ得られない場合においては、遅延外乱発生確率 P_d から、マルコフ連鎖を用いて、AGV k が AGV l に対して Δt 期間遅れる確率を示した遅延頻度分布 $D(\Delta t)$ を作成できる。得られた $D(\Delta t)$ を、ステップ 5 の再経路計画時に、右辺第 3 項の $F(\Delta t)$ の代わり用いることで、シミュレーションにより $F(\Delta t)$ を取得することなく、衝突の可能性を評価することができると期待される。以下では、遅延外乱発生確率 P_d から $D(\Delta t)$ を計算する方法を検討する。2.2 節に示した遅延外乱の定義に従うと、AGV k と AGV l の遅延期間 Δt が現在の遅延期間 Δt のみに依存し、過去の履歴に無関係であることから、マルコフ性が成立する¹²⁾。したがって、AGV k が AGV l に対して、1 期間遅れる、あるいは 1 期間進む確率は $P_d(1 - P_d) = u$ 、AGV k

Fig. 9 Collision frequency distribution

Fig. 10 Collision frequency distribution using proposed method

と AGV l との間に遅延が起こらない確率は、両者とも予定通りに走行するか両者ともに遅延が発生するかの 2 通りであるため、 $P_d^2 + (1 - P_d)^2 = v$ となる。時刻 $t+1$ において、AGV k に対して、AGV l が Δt 期間遅れる確率 $P_{t+1}(\Delta t)$ は (10) 式を用いて求めることができる。ここでは、考慮すべき遅延期間 Δt を ± 5 期間とし、10 期間後の遅延分布 $D(\Delta t)$ を予測する。

$$P_{t+1}(\Delta t) = P_t(\Delta t - 1)u + P_t(\Delta t)v + P_t(\Delta t + 1)u \quad (10)$$

ただし、 $P_t(\Delta t = -5, \dots, 5)$ は、(11), (12) 式に示す制約条件を満たす。

$$P_0(0) = 1 \quad (11)$$

$$\sum_{\Delta t=-5}^5 P_t(\Delta t) = 1 \quad (\forall t) \quad (12)$$

このとき、遅延頻度分布 $D(\Delta t)$ は時間の経過とともに分布が異なってくる。(12) 式を満たすように状態ベクトル $\mathbf{a}(t)$ と状態推移行列 $\mathbf{P}$ を (13) 式、(14) 式のように定義すると、

$$\mathbf{a}^T(t) = (P_t(-5), \dots, P_t(0), \dots, P_t(5)) \quad (13)$$

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} v & 2u & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ u & v & u & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & u & v & u & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & u & v & u & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & u & v & u \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 2u & v \end{bmatrix} \quad (14)$$

10 期間が経過した後の AGV k と AGV l との状態ベクトル $a(10)$ は次式で求めることができる。

$$a(10) = P^{10} \cdot a(0) \quad (15)$$

ただし、初期状態において、AGV k と AGV l の間に遅延が起っていないため、つぎの初期条件を満たす。

$$a^T(0) = (0, 0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0) \quad (16)$$

Fig. 11 にマルコフ連鎖を用いて導出した、遅延頻度分布 $D(\Delta t)$ を示す。遅延頻度分布は $\Delta t = 0$ を中心に左右対称であり、 $|\Delta t|$ の値が大きくなるごとに確率は低くなる。

Fig. 11 Time delay between AGVs using Markov chain

4.3 搬送要求が一樣な場合における有効性の検証

本節では、搬送要求が一樣である場合において、さまざまな搬送要求を想定して数値実験を行ない、(1) 計算時間、(2) 総搬送時間、(3) 再経路計画回数の3点について提案手法の有効性を検証する。

比較手法としては、以下に示す手法を用いる。

- Simulated Annealing 法を用いた集中型手法 (以下 SA 法)
- 従来の分散型経路計画法 (以下 CD 法)
- 衝突頻度分布 $F(\Delta t)$ を用いた提案法 (以下 DF 法)
- 遅延頻度分布 $D(\Delta t)$ を用いた提案法 (以下 DD 法)

集中型手法の詳細なアルゴリズムは付録 A に示す。数値実験には、遅延外乱発生確率が低い場合 ($P_d = 1\%$) と、遅延外乱発生確率が高い場合 ($P_d = 10\%$) の2通りについて検討する。なお、頻度分布はそれぞれの遅延外乱発生確率 P_d に対する値を用いた。シミュレーションや実験によって、衝突頻度分布があらかじめ得られる場合は DF 法、衝突頻度分布が得られない場合は外乱発生確率からマルコフ連鎖によって導出される遅延頻度分布を用いた DD 法が利用できる。

4.3.1 平均計算時間に関する検証

Fig. 12, 13 に、 $P_d = 1\%$ と $P_d = 10\%$ の場合に対して、AGV の台数を変化させた場合の、1 回の経路計画に必要な計算時間を示す。図中の値は、50 パターンの搬送要求を与えた場合における平均値を示している。SA 法においてはすべての AGV に対して衝突の回避と、衝突の可能性を考慮しているために CD 法、DF 法および DD 法に比べて計算時間が増加していることがわかる。これは、AGV の経路計画法を一

Fig. 12 Comparison of average of computation time when $P_d = 1\%$

Fig. 13 Comparison of average of computation time when $P_d = 10\%$

箇所で集中的に作成するため、AGV 台数の増加に伴い、組合せ数が増大することが原因と考えられる。それに対して、DF 法と DD 法は CD 法に対して、計算時間がわずかに増加している。これは、衝突可能性をペナルティ項に加えているために、実行可能解を得るために必要なイタレーション回数が増加しているためである。DF 法は、加えられるペナルティが大きいため、分散型経路計画法の中で、もっとも計算時間がかかることもわかる。

4.3.2 総搬送時間に関する検証

Fig. 14, 15 にそれぞれ、 $P_d = 1\%$ と $P_d = 10\%$ の場合に対する、AGV 台数の変化による、総搬送時間の変化を示す。 $P_d = 1\%$ の場合には、CD 法と DF 法、DD 法にほとんど総搬送時間に変化はない。一方、 $P_d = 10\%$ になると、DF 法と DD 法の総搬送時間は CD 法に比べて、AGV 台数が増加するごとに減少する。これは、CD 法を用いると、AGV 台数の増加に伴って搬送路に対する AGV の密度が高くなり、頻繁に遅延が起ることによって、AGV の衝突が起りやすくなるためである。DD 法を用いると、CD 法よりは総搬送時間が短くなるが、DF 法よりは搬送時間は長くなる。遅延頻度分布を用いることで、衝突可能性を予測することができるが、統計的に取得した衝突頻度分布を用いたほうが総搬送時間が短くなることがわかる。また、SA 法は AGV 台数が増加することによって、総搬送時間が増加している。これは AGV 台数が増加すると組合せ数が増加するために、不必要な通過待ちや遠回りが多く生じるためである。したがって、 $P_d = 10\%$ の場合には、提案法である DF 法、DD 法を用いる

Fig. 14 Comparison of total transportation time when $P_d = 1\%$

Fig. 15 Comparison of total transportation time when $P_d = 10\%$

ことで、従来法に比べ、総搬送時間を短くすることができる。

4.3.3 再経路計画回数に関する検証

各 AGV は再経路計画を行なうたびに、全 AGV の同期を取る必要があるために、再経路計画回数は少ないほうが望ましい。Fig. 16, 17 にそれぞれ、 $P_d = 1\%$ と $P_d = 10\%$ の場合において、AGV 台数の変化させた場合の、再経路計画回数の変化について示す。Fig. 16 に示すように、 $P_d = 1\%$ の場合においては、AGV 台数が増加しても、再経路計画回数はほとんど変化しない。一方、Fig. 17 に示すように、 $P_d = 10\%$ の場合においては、AGV 台数が増加するごとに、再経路計画回数が増加する。これは、頻繁に遅延外乱が発生することによって、衝突が多く生じるためである。DD 法や DF 法は CD 法より再経路計画回数が減少している。ここで、SA 法は、少しだけ再経路計画回数が減少しているが、Fig. 14, 15 に示すように、総搬送時間が長くなるという欠点がある。それに対して、提案法である DF 法は総搬送時間を短くしつつ、再経路計画回数を減少できることがわかる。また、Fig. 12, 13 より、DF 法と DD 法は、CD 法に比べて 1 回当たりの計算時間は多少大きくなるが、Fig. 16, 17 からわかるように再経路計画回数が少なくなるために、総計算時間はほぼ同じ値となることもわかる。

4.4 搬送要求が一様でない場合における有効性の検証

一般に、半導体工場の製造工程のような大規模な生産現場において、生産工程間の半導体ウエハなどの搬送要求は一様でなく、複数の工程を繰り返すため、搬送要求が一箇所に集中することも考えられる。以下では、搬送要求を作成する際に、Fig. 18 に示すように 143 ノードの搬送路を 6 つのエリ

Fig. 16 Comparison of average of re-routing when $P_d = 1\%$

Fig. 17 Comparison of average of re-routing when $P_d = 10\%$

Area1					Area2					Area3				
125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139
108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122
90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104
74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88
55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69
39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53
20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Area5					Area5					Area6				
140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154
135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149
130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144
125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139

Fig. 18 Area partition for transportation system model

アに分け、目的ノードのみ 1 つエリアからランダムで発生する場合 (Case I) と、初期ノード、目的ノードともに 1 つエリアからランダムに発生する場合 (Case II) について検討を行なう。ここで、4.1 節と同じシミュレーション条件とする。ただし、 $P_d = 10\%$ と固定する。エリア内のほとんどのノードに AGV が存在することは考えにくいので、AGV 台数は最大で 15 台とし、衝突頻度分布はシミュレーションにより得られるとする。

Fig. 19 に目的ノードのみ同一エリアからランダムに発生する場合 (Case I) における CD 法と DF 法の総搬送時間の比較を示す。AGV 台数の増加に伴い、DF 法は、CD 法に比べて、わずかながら総搬送時間が減少する。これは、各 AGV の目的エリアが同一であるため、AGV 同士のすれ違いが起る回数が少なく、搬送経路が密でないために、AGV 同士の衝突が同一エリア内に近づかないと AGV 同士の衝突が生じないためである。よって、搬送要求がランダムに発生する場合に比べて、総搬送時間の変化は大きくない。Fig. 20 に初

期ノード、目的ノードともに同一エリアから搬送要求が発生する場合における総搬送時間の比較を示す。CD法に比べて、DF法は総搬送時間を大幅に減少させることができる。これは、初期ノード、目的ノードともに同一エリアであることから、AGVの密度が高くなるために、少しの遅延が生じただけでも、搬送システムに与える影響が大きいため、提案法が有効であると考えられる。

Fig. 19 Comparison of total transportation time (Case I)

Fig. 20 Comparison of total transportation time (Case II)

4.5 Q学習を用いた遅延期間の決定法との比較

提案法の有効性を確認するために、従来法との比較を行なう。比較に用いた従来法は、過去の行動から将来を予測するQ学習¹³⁾を利用し、外乱による衝突の履歴情報から考慮すべき最適な遅延期間を決定することにより、遅延外乱を考慮する方法である。なお、Q学習法におけるAGVの経路計画手法としては、CD法を用いた。Q学習の詳細なアルゴリズムは付録Bに示す。提案法であるDF法とCD法を用いたQ学習法(Q-learning)について、Fig. 21にAGV台数の変化による総搬送時間の変化を、Fig. 22にAGV台数の変化による再経路計画回数の変化を示す。 $P_d = 10\%$ とした。Q学習を用いると再経路計画回数は減少するが、総搬送時間が増加するという結果が得られる。Q学習では、得られる報酬が最も大きくなる行動を選択するため、長い遅延期間をもつ戦略を選択する傾向がある。しかしながら、あまりに長い遅延期間をもつ戦略を選択すると、総搬送時間を増加させてしまう。このように、Q学習を用いた方法は、総搬送時間減少と再経路計画回数の減少というトレードオフの関係を解決することができないため、Q学習を適用させることは難しい。以上より、提案法の有効性を確認することができる。

Fig. 21 Comparison of total transportation time

Fig. 22 Comparison of number of re-routing

5. おわりに

本論文では、遅延外乱による衝突回避を目的とした複数台AGVの分散型経路計画法を提案した。提案したアルゴリズムは、AGV間の衝突を回避するだけでなく、現実の搬送環境下で起こりうる遅延外乱に対する衝突可能性を評価してペナルティ項として加えた方法である。提案手法を143個のノードから構成される搬送システムに適用し、20台のAGVに対する搬送経路計画問題に対して、従来までの分散型経路計画法に比べて、計算時間を増加させることなく、搬送時間を減少させ、外乱による再経路計画回数を減少できることを示した。また、事前に衝突頻度分布が求まらない場合においては、マルコフ連鎖から衝突可能性を評価する方法を示した。今後は動的な搬送要求が与えられる問題に対して、遅延外乱、タスク遅延などによる渋滞を考慮した搬送経路計画問題に取り組んでいきたい。

参考文献

- 1) 遠藤, 小西, 森脇, 吉田: 大規模搬送システムにおける遺伝的アルゴリズムを用いた移動ロボットの経路探索, システム制御情報学会論文集, **13**-3, 115/123 (2000)
- 2) S.H. Kim and H. Hwang: An adaptive dispatching algorithm for automated guided vehicles based on an evolutionary process, *International Journal of Production Economics*, **60**-61, 465/472 (1999)
- 3) Y. Seo and P.J. Egbelu: Integrated manufacturing planning for an AGV-based FMS, *International Journal of Production Economics*, **60**-61, 473/478 (1999)
- 4) 安藤, 西, 小西, 今井: 複数台移動ロボットの搬送経路計画問題に対する自律分散型最適化法, 計測自動制御学会論文集, **39**-8, 759/766 (2003)
- 5) T. Nishi, M. Ando and M. Konishi: Distributed Route Planning for Multiple Mobile Robots using an Augmented Lagrangian Decomposition Technique, *IEEE Transactions on Robotics*, **21**-6, 1191/1200 (2005)

- 6) E.H. Østergaard, M.J. Matric and G.S. Sukhatme: Multi-robot Task Allocation in the Light of Uncertainty, *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3002/3007 (2002)
- 7) R.L. Moorthy, W. H.-Guan, N. W.-Cheong and T. C. Piaw: Cyclic deadlock prediction and avoidance for zone-controlled AGV system, *International Journal of Production Economics*, **83**, 309/324 (2003)
- 8) Y. Guo and L. E. Parker: A Distributed and Optimal Motion Planning Approach for Multiple Mobile Robots, *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2612/2619 (2002)
- 9) C. Ferrari, E. Pagello, J. Ota and T. Arai: Multirobot motion coordination in space and time, *Robotics and Autonomous System*, **25**, 219/229 (1998)
- 10) 市川, Chomchana, 太田, 湯浅, 深澤, 新井, 浅間: グラフ上の反応拡散方程式を用いた環境探索経路計画, 計測自動制御学会論文集, **38-11**, 996/1002 (2002)
- 11) T. Nishi, K. Sotobayashi, M. Ando and M. Konishi: An Agent-Based Transportation Route Planning Method for LED Fabricating Line and its Evaluation using Lagrangian Relaxation, *JSME International Journal C*, **146-1**, 18/23 (2003)
- 12) 宮沢政清: 確率と確率過程; 近代科学社 (1993)
- 13) 古屋, 平嶋, ト, 井上: タスク分割型強化学習における AGV 経路計画, 第 13 回計測自動制御学会中国支部学術講演論文集, 174/175 (2004)

【付 録】

A. 集中型経路計画法のアルゴリズム

ステップ 1 初期実行可能解の作成

AGV1 から順に衝突を生じないように経路計画をランダムに生成し, 実行可能解を作成する。

ステップ 2 初期目的関数値の導出

(A.1) 式に示す目的関数値 J を導出する。

$$J = \sum_{k \in V} T_k + \sum_{k \in V} \left(\sum_{l \in V} (C_{k,l}^1 + \sum_{\Delta t=1}^H F(\Delta t) C_{k,l}^2(\Delta t)) \right) \quad (\text{A.1})$$

ステップ 3 近傍解作成

1 台の AGV をランダムに選び, 経路の任意の位置を 2 点選び, 経路を変更し, 近傍解を作成する。

ステップ 4 解の評価

近傍解が実行可能解であり, 前回の J より小さくなれば, 採用する。そうでなければ, 確率に従い, 解を採用する。

ステップ 5 同一温度における探索を探索回数だけ続ける

ステップ 6 温度の更新

ステップ 7 終了判定

条件を満たせば終了し, そうでなければステップ 2 へ戻る。

B. Q 学習を用いた考慮すべき遅延期間の決定法

s_1 を初期状態, s_2 を最終状態 (遅延による衝突なし), s_3 を最終状態 (遅延による衝突あり), $a_n \in A$ を n 期間 ($n = 0, \dots, 5$) までの遅延を考慮する戦略と定義する。AGV は行動 a_n を選択し, 経路計画を行ない搬送した結果, 目的ノードに到着するまでに衝突が起これなければ, 状態 s_2 に

遷移し, そうでなければ状態 s_3 に遷移する。最適な遅延期間は以下に示すアルゴリズムを用いて決定する。

ステップ 1 Q テーブルを初期化する

ステップ 2 状態 s_1 に初期化する

ステップ 3 政策 f に従って行動する

ボルツマン分布に従って行動を選択する。 $T = 0.3$ と固定する。

$$B(a|s_1) = \frac{\exp(Q(s_1, a)/T)}{\sum_{b \in A} \exp(Q(s_1, b)/T)} \quad (\text{B.1})$$

ステップ 4 選択した行動 a を実行する

遷移した状態を $\acute{s}$, 得られた強化信号を R とする。ここで, 状態 s_2 に遷移した場合 $R = 1$, 状態 s_3 に遷移した場合 $R = -1$ が与えられる。

ステップ 5 Q テーブルを更新する

$$\Delta = R + \gamma \max_{\acute{a} \in A} Q(\acute{s}, \acute{a}) - Q(s_1, a) \quad (\text{B.2})$$

$$Q(s_1, a) \leftarrow Q(s_1, a) + \alpha \Delta \quad (\text{B.3})$$

α は学習率, γ は割引率である。 $\alpha = 0.1$, $\gamma = 0.9$ とする。

ステップ 6 ステップ 2~5 を繰り返す

50 パターンの搬送要求を与え, 1~20 台まで学習を行なう。

【著 者 紹 介】

森 中 翔一郎

2006 年岡山大学大学院自然科学研究科博士前期課程修了。同年トヨタ自動車 (株) に入社し, 現在に至る。在学中は, 搬送システムの設計と制御に関する研究に従事。

西 竜 志 (正会員)

2001 年京都大学大学院工学研究科博士後期課程修了。同年岡山大学助手, 2006 年大阪大学大学院基礎工学研究科助教授となり現在に至る。離散システムの最適化, 生産スケジューリング, サプライチェーンの最適化に関する研究に従事。博士 (工学)。システム制御情報学会, 電気学会, 日本 OR 学会, IEEE などの会員。

小 西 正 躬 (正会員)

1969 年京都大学大学院工学研究科数理工学専攻修士課程修了。同年 (株) 神戸製鋼所入社。同社中央研究所, 浅田研究所, 電子技術研究所を経て, 94 年より同社技術開発本部研究首席。99 年 9 月同社を退職し, 同年 10 月より岡山大学工学部電気電子工学科教授。プロセス制御の知能化, 生産スケジューリング技術の研究に従事。工学博士。システム制御情報学会, 日本鉄鋼協会, 人工知能学会, 電気学会, IEEE などの会員。