AGV 搬送システムにおける投入台数および双方向性走行経路設計法[†]

千葉 龍 介*・太 田 順*・新 井 民 夫*

Design of Fleet Size and Bi-directional Flow Path Network for AGV Systems[†]

Ryosuke CHIBA*, Jun OTA* and Taimo ARAI*

Flow path network design problem and fleet size design problem are important so as to design Automated Guided Vehicle (AGV) systems. AGVs are guided with the paths and the path network should be designed appropriately for the high performance of transportation. In this paper, we propose a method to design the flow path network and fleet size suitable for transporter routings with Genetic Algorithm. The effect of our method is verified through simulations.

Key Words: AGV system, transporter routing, flow path network

1. 序 論

1.1 研究の背景

現在、生産工場などで無人搬送車 (Automated Guided Vehicle ; AGV) を用いた搬送システムが普及している。AGV は通常複数台で工場内の物品搬送を取り扱う。

AGV 系の設計のためには、以下の 3 種類の設計問題を解決する必要がある。

- 走行経路 (ネットワーク) 設計問題... AGV の走行をガイドする磁気テープや反射板等の効率的な敷設を設計する問題。
- 行動則設計問題... AGV 群をどのように動かすことによって搬送要求を達成するか、という行動決定法を設計する問題。
- 投入台数設計問題... 何台の AGV が搬送達成のために必要であるかを設計する問題。

この設計段階において、AGV 系のセンサ・通信・アクチュエータ等のハードウェアスペックは事前に与えられていることが通常である。行動則設計問題は、これらの要素の制約を大きく受けるため、ほかの 2 種に先立ち設計されることが多い。

このような状況においてシステム設計に必要なことは、さまざまな行動則が与えられたときに、効率的な搬送を行なうための AGV 台数および走行経路を設計することである。すなわち、行動則に適した AGV 台数や走行経路の設計手法が必要である。

1.2 従来研究

走行経路には大きく分類して、単方向性走行経路と双方向性走行経路がある。単方向性走行経路は一方通行であるのに対し、双方向性走行経路はどちらの方向からでも通行可能な走行経路である。

単方向性走行経路研究は、Gaskins らはあらかじめ固定されたグラフ構造における各アークの方向決定を、分枝限定法を用いて行なっている¹⁾。さらにその発展した形として、Kaspi らは、ノードだけを設定し、ありえるアークを決め、そのアークにおける方向の決定を行なっている²⁾。しかし、これら単方向性走行経路は、走行方向が一方に限定されるため、双方向性走行経路と比較して搬送効率の低減を招く³⁾。また、搬送に必要な走行経路が密になる。これは、一方通行ゆえに、双方向性経路を採用したときと同量の搬送量を達成するためには、走行経路が多くなると搬送が不可能になるからである。次章で述べるが、経路はまばらであることが望ましいため、これは欠点となる。

双方向性走行経路の研究には、2 本の単方向アークを並列にしている研究がある⁴⁾。また、あらかじめ設定された単方向性走行経路における各アークを、単方向か双方向かどうかを決定している研究もある⁵⁾。しかし、これらの研究はネットワークの構造があらかじめ決定されており、走行経路自体を設計対象としていない。

上記のように、より一般的な双方向性走行経路、すなわち進行方向が限定されていない経路の設計法は、ほとんど議論されていない。

1.3 研究の目的

上記の事柄を踏まえ、入力された行動則に対し適切な AGV 台数・走行経路を設計する方法を提案することを目的とする。ここで搬送効率という観点から、双方向性走行経路の設計を

[†] 第 13 回自律分散システムシンポジウムで一部発表 (2001・1)

* 東京大学大学院工学系研究科 東京都文京区本郷 7-3-1

* School of Engineering, The University of Tokyo
(Received May 26, 2003)

(Revised October 9, 2003)

目的とする。

生産工場のスペックにより決定される行動則に対し、本手法が適用可能であることを示すために必要な事柄とそのアプローチを以下に示す。

- AGV 行動則のバリエーションを記述する (3 章)...ある基本となる行動則を考え、そのパラメータの値を分類することにより従来提案されているさまざまな行動則を包括的に議論する。
- 分類された行動則の入力に対し適切な AGV 台数を算出する (4 章)
- 行動則に適した走行経路を設計する (5 章)...環境をセルに分割することによりグラフ表現し、各ノード間の経路の必要性を遺伝的アルゴリズムにより求める。

このアプローチにより、さまざまな行動則に対し、ある評価項目を最適化する AGV 台数・走行経路を設計可能であることを示す (6 章)。

2. AGV 搬送システムの設定

2.1 環境・タスク

本研究における搬送環境の例を Fig.1 に示す。図中の P が倉庫、D がマシン、斜線部が障害物を表わしている。環境中に複数の倉庫および工作機械がある。これは、一般的な工場環境を想定している。倉庫・工作機械の配置や個数の制限は無い。環境はセルに分割可能であるとしている。ここで、1 セル分は、AGV が 1 台が入る大きさとする。

また、本研究におけるタスクとは、搬送要求群を表わす。各搬送要求は、その搬送物がある倉庫の位置およびその部品の搬送先の位置によって構成されている。各搬送要求は、一定の時間ごとに発生する。

Fig. 1 Environment for material handling system

2.2 AGV 搬送システムに対する要求仕様

AGV 搬送システムにおいて、その仕様は

- A) 搬送要求がすべて達成されること
- B) AGV 台数が少ないこと
- C) 経路 (ガイド) がまばらであること

と考える。ここで、AGV は工場内で人と共存するため、密な走行経路は工場内に働く労働者に対する安全面から好ましくない。そのため、まばらな経路の構築が必要となる。

要求仕様は A, B, C の順に重視される。たとえば、まばらであろうとも搬送要求が満足されない走行経路や、AGV 台

数が多数必要な走行経路は好ましくない。

3. 行動則

生産現場で用意される行動則はさまざまな仕様が考えられるため、包括的に議論可能な枠組みを考える必要がある。

そこで本研究では、行動決定時に用いる情報量という観点に基づき分類し (3.1 節)、そのパラメータ化を行動則に対し行なう (3.2 節)。この行動則を本研究では基底アルゴリズムと呼ぶ。この分類および基底アルゴリズムにより、従来提案されている AGV 行動則の表現を可能にする。

3.1 行動則の分類

AGV の行動を決定するためには、目的地を定め、そこに至る経路を決定することが必要である (3.2 節)。このときに用いられる情報として、経路を決定するときの『ほかの AGV に関する情報』および目的地を設定するための『目的地情報』を考え、これにより分類を行なう。

3.1.1 ほかの AGV に関する情報

『ほかの AGV に関する情報』というパラメータの違いとして、従来の行動則は大きく 2 つに分けられる。それは、静的接近法とセミダイナミック接近法⁶⁾である。

本研究では、これを“ほかの AGV 把握能力による分類”として 3 段階に分類する。ある AGV が自身の行動を計画するときに、ほかの AGV に関して「全く無視する」・「現在の位置のみを把握する」・「現在の位置および今後の行動予定をすべて把握する」の 3 段階が考えられる。

上記のほかの AGV に関して「全く無視する」、「位置・行動予定をすべて把握する」の 2 つは従来研究において、それぞれ前述の静的接近法およびセミダイナミック接近法に対応している。したがって、本研究では「全く無視する」を静的接近型、「現在の位置のみを把握する」を中間型、「現在の位置および今後の行動予定をすべて把握する」をセミダイナミック型と呼ぶ。ここで、今後の行動予定とは、すでに決定されたほかの AGV 群の行動予定すべてである。

3.1.2 目的地情報

本研究では、搬送要求待機状態にある AGV の行動を待機行動と呼ぶ (3.2 節)。従来研究において、待機行動のための行動則はいくつか提案されているが^{7), 8)}、これらの行動則は、『待機行動のための目的地情報』の有無で議論可能である。すなわち、つぎに発生する搬送要求を把握可能な場合と把握不可能な場合があり、『待機行動のための目的地情報』をパラメータとして、行動則を分類可能である。

本研究では、これを“タスクの予知能力による分類”として 2 段階に分類する。それは、「つぎに発生する搬送の内容を考慮する」と「つぎの搬送内容を考慮しない」である。すなわち、待機行動における目標地点が「つぎの搬送要求の倉庫」と「ランダムに選択された倉庫」に分類される。上記の情報量に関して分類された各行動則を、本研究ではそれぞれをタスク予知型・タスク無知型と呼ぶこととする。

以上により、本研究では『ほかの AGV 把握能力』に関し

Table 1 Classifications of routing

	Grade 1st	Grade 2nd	Grade 3rd
Preception of other AGVs	No perception of other AGVs (static approach)	Perception of the current position of other AGVs (intermediate approach)	Perception of the current position and planned action of other AGVs (semi-dynamic approach)
Knowledge of task	No Knowledge of task (ignorance)	Knowledge of next assignment (knowledge)	

3種、『タスクの予知能力』に関し2種、計6種の行動則を扱う。まとめた表を Table 1 に示す。

3.2 行動則アルゴリズム

前述の分類を行なう基底となる行動則アルゴリズムのフローチャートを Fig.2 に示す。ここにおいて、そのアルゴリズムは以下の3つの基本行動から構成されている。

- 計画行動...倉庫や工作機械といった目的地に到達するための行動。この行動には以下の2種類が必要である。
 - 搬送行動...搬送物を目的地に搬送する状況のとき、必要な計画行動。ほかのAGVに関する情報に依存して振る舞いが異なる。
 - 待機行動...搬送要求を待機している状態で必要な計画行動。つぎの目的地の情報次第で計画される行動が異なる。
- 反射行動...ほかのAGVを回避するための行動。このとき、目的地はほかのAGVとの衝突・デッドロックを回避するためのサブゴールとなる。

搬送中にそれぞれのアルゴリズムが必要に応じて呼び出され、行動が計画される。これらのアルゴリズムは Fig.2 中の網掛け部で示されている。

ここで計画行動とは、目的地までの経路を探索し、移動先までの行動を計画するアルゴリズムにより作られる。

本研究では、Configuration space-time⁹⁾により平面に時間軸を加えた3次元のマップを作り、これを基に経路を探索し行動を計画する。

Fig.3 は、現在から t step 後における各AGVの位置および行動決定を行なっているAGVの到達可能性をマッピングしたものである。各時刻において、その1step前の到達可能性マップと、ほかのAGVが存在するであろう位置から、そのセルに到達可能であるかどうかを判断する。これにより目的地までの行動は可能となる。ここで、計画の際、ほかのAGVが把握能力次第で、ほかのAGVを移動障害物と認識する。すなわち、前項の『ほかのAGV把握能力』に従う分類により、この計画行動の振る舞いはさまざまに表現される。

また、搬送行動中にAGV同士の衝突を回避する必要がある。そこで、本研究では衝突の可能性を検知した際、その場

回避を行ない、それを反射行動とする。本研究では仮定として、近傍のAGVの存在はセンサにより把握可能であるとし、また隣接したAGV同士は通信によりお互い行動を把握できるとする。そして、衝突の可能性があるときには、お互いの邪魔をしないように反射的に回避行動を行なう。このとき、どちらのAGVが回避するか、という問題があるが、本研究では交差点に近いAGVが回避にまわるという方策を採用する。資材の有無などにより優先順位をつけることも考えられるが、そのとき回避の可能性がなくなる場合やシステム全体としてのパフォーマンスが向上しない場合があり、本研究ではこれを採用しない。

搬送を終え搬送要求待機状態となったAGVは走行経路上に存在しつづける。したがって、搬送を終え暇となったAGVはその場に留まらず、ほかの場所に退避する必要がある。本研究では、搬送を終え待機状態にあるAGVが倉庫に向かって走行することを待機行動とする。ここで計画の際、どの倉庫に向かうかが待機行動を左右するため、前節において『タスクの予知能力』として分類の対象となっている。

以上、上記の分類および基底アルゴリズムにより、AGV行動則を包括的に議論できると考える。なぜなら、生産現場から決定される行動則仕様は、多くの場合、行動決定に使える情報量の多少であるからである。具体的には、集中的に管理可能であるか否か、つぎの生産品目があらかじめ決まっているか否か、等である。

Fig. 2 Flow-chart of routing

Fig. 3 Configuration space-time map

4. AGV 投入台数の設計

本研究では、ある行動則を採用したときに必要最下限となる AGV 台数を決定する。これは要求仕様において AGV 台数が走行経路の疎度より重要視されるため、走行経路の設計以前に AGV 投入台数が決定される必要があるからである。

AGV の投入台数設計手法は、Fig.4 のようにネットワークが網羅的に接続している条件のもと、AGV を一台ずつ増加しては、行動則に基づいた搬送シミュレーションを行ない、最終的に搬送要求達成率が 100% になった時点の投入台数を、搬送要求を満たすための AGV 台数とする。

ここで、搬送要求達成率とは、すべての搬送要求に対し、どれほど AGV が達成したかの割合を示す。つまり、搬送要求達成率が 100% であることは、すべての搬送要求を達成可能であることを意味する。

Fig. 4 Network with all connected cell

5. 走行経路の設計

5.1 GA による経路の最適化

双方向性走行経路の設計には以下の方法が考えられる。

- グラフ理論における最大フロー問題に帰着し、解決する。

- シミュレーションベースのアルゴリズムを用いて、繰り返し順問題を解き評価する。

物流を最大化するネットワークを求めるため、グラフ理論における最大フロー問題を解く手法は、従来研究でも取り上げられている。すなわち、物流をフローとして定式化することにより問題を解いているが、AGV 搬送システムにおいては AGV の動きと搬送対象物の動きは等しくない。また、AGV は進行・停止の間欠動作をするため、連続値であるフローとしてモデル化を行なうのは困難である。さらには、フローモデルは双方向性走行経路に適用が困難であることから、その設計手法は満足に提案されていない。したがって、グラフフローモデルを構築することは双方向性走行経路ではたいへん困難である。

そこで、本研究ではシミュレーションにより繰り返し順問題を解くことで、走行経路を設計する。すなわち、繰り返し走行経路の候補の評価を行ない、その評価値を用いて解を探索する方法を用いる。

この方法に適した手法に遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm; GA) が挙げられる。本問題は非線形であり、解が多峰性になるため、この手法は有効であると考えられる。

5.2 遺伝的アルゴリズムの適用

双方向性走行経路の設計のため、GA のバイナリで表わす遺伝子はセル間の接続の有無とする。各セルから上と右のセルに対する 2 つの接続が表現できる。すなわち、接続非接続でセル間の移動の可能不可能は表わされる。

このようにして、すべてのセル間の接続 (01) を遺伝子として一列に並べたものが個体となる。この遺伝子列により構築された全セル接続関係が表現され、これが走行経路となる。すなわち、遺伝子長は $2 \times (\text{セル数})$ になる。これを 1 個体として、各個体ごとに搬送シミュレーションを行ない、それぞれの適応度をそのシミュレーションに基づき計算する。

上記の構成法の例を Fig.5 に示す。各セルごとに上と右の接続を 0 or 1 で表わすことで経路が表現される。

なお、経路設計は倉庫および機械の位置を考慮せずに行なう。

Fig. 5 Gene type of a network

5.3 評価関数

GA による設計を行なう際、個体の優秀さを示す適応度 (fitness) を計算する評価関数が必要となる。本研究では、シミュレーションの結果に従い、適応度を計算するが、その式は

$$\text{fitness} = K_1 * \text{搬送達成率} + (1 - K_1) \{ K_2 * \text{経路の疎度} + (1 - K_2) * \text{直線率} \}$$

とした。各数値の意味を以下に記す。

●搬送達成率...搬送要求に対し、達成できた搬送の割合を示す。式はつぎの通り。

$$\text{搬送達成率} = \text{搬送終了数} / \text{搬送要求数}$$

●経路の疎度...経路本数の割合を示す。式はつぎの通り。

$$\text{経路の疎度} = 0 \text{ である遺伝子数} / \text{総遺伝子数}$$

●直線率...経路同士の接続が直線である割合を示す。直角の接続より直線の接続の方が簡潔な接続であるため、好ましい。式は以下の通り。

$$\text{直線率} = 2 \text{ 本の経路が直線であるノード数} / \text{接続数が} 2 \text{ であるノード数}$$

ここで、 K_1, K_2 は定数であり、ここでは、試行錯誤的にそれぞれ 0.8, 0.9 に設定した。この値は搬送達成率等といった各数値に対し十分に大きい。したがって、上記の評価関数は多目的関数ではなく、制約条件付き評価関数と言える。すなわち、搬送達成率が少しでも低いものは、経路がまばらであろうとも評価が低くなる。したがって、この式により第 2 章で述べた、搬送システムの要求仕様が満たされることとなる。

ここで、本研究では搬送を全く行なえない走行経路を示す個体でも、致死遺伝子とはしない。なぜなら、搬送を行なえないことによって適応度は低くなるが、経路の疎度はある程度あり、経路としての良さを含んでいる可能性があるためである。また、設計時間の短縮のために、ある一定時間以上搬送が行なわれていない場合、そこでシミュレーションを終了し適応度を計算している。

5.4 走行経路設計手順

本節で説明した走行経路設計手法をまとめる。

- (1) 環境タスク行動則 AGV 台数を入力。
- (2) 初期個体を用意する。
- (3) 1 個体を翻訳し、経路を示す。
- (4) その経路上で搬送シミュレーションを行なう。
- (5) 搬送の結果から評価関数により、その個体の適応度 (fitness) を求める。

すべての個体について、3~5 を行なう。

全個体に対し適応度にしたがって、選択交叉を行なう。また、一定確率で突然変異を個体のコードに対し行なう。

次世代に移り、3 に戻る。ある世代数に達したら終了する。

このようにして、生き残った最優秀な個体が、最終的な走行経路を示す個体である。

6. システム構築シミュレーション

本研究の有効性を検証するために、シミュレーションによる AGV 搬送システムの構築を行なう。前述したように分類された 6 種の行動則に対し、AGV 台数・双方向性走行経路が適切に設計されることを確かめる。

6.1 シミュレーション条件

そのシミュレーション条件を述べる。

- GA の個体数...100 個体。
- GA の世代数...300 世代。
- GA の交叉...一点交叉。交叉率 0.7。

- GA の突然変異率...0.01。

- 保存・選択...エリート保存戦略、ルーレット選択。

6.2 環境・タスク・AGV の設定

本シミュレーションで想定する環境・タスクおよび AGV は以下になる。

- シミュレーション環境は Fig.1 に示されたものを用いる。
- AGV の初期位置は、各 pick-up およびその近傍に固定で配置される。
- AGV は上下左右に等速度で動く。ここで、隣接するセルへの移動にかかる時間を 1 step と定義する。
- 搬送要求で指定される倉庫と機械は、倉庫 3 つ機械 2 つの組み合わせからランダムで指定される。その指定される確率は等しい。

本研究では倉庫および機械の組み合わせはランダムとしたが、実際の搬送データの適用も可能である。

提案手法の有効性を示すため、タスクは搬送要求発生頻度の異なる 7 種類を用意する。最も搬送要求発生頻度が高いタスクは 7step ごとに搬送要求が発生し、最も頻度が低いタスクは 13step ごとに搬送要求が発生するものである。

6.3 シミュレーション結果

上記の環境・タスクを入力とし、分類された 6 種の行動則についてそれぞれ AGV 台数・双方向性走行経路を設計した。結果を数値で表わしたものを Table 2 に示す。この表における数値は総走行経路長 (ネットワーク長) であり、10 回の試行結果の平均値を示している。総走行経路長とは、走行経路全体の長さを表わし、すなわち経路の疎度の指標となるものである。カッコ内は AGV 台数である。Fig.6 に、搬送要求頻度が 11step ごとに発生するタスクが入力されたときの、行動則ごとに構築された経路を示す。この結果から、各行動則に適した各経路はさまざまな相違があることがわかる。

6.4 考察

Table 2 の結果から、各タスクにおいて、それぞれの行動則に適した AGV 台数・走行経路が生成されていると考える。なぜなら、搬送頻度が高いタスクに比べ、搬送頻度が低いタスクのとき、AGV 台数は少なく、走行経路はまばらになっているからである。

また、走行経路が行動則に適した設計となっているかどうか

Table 2 Result of network for several tasks

*	semi-dynamic approach		intermediate approach		static approach	
	knowledge	ignorance	knowledge	ignorance	knowledge	ignorance
7.0	33.8(4)	33.6(4)	37.1(4)	35.6(4)	42.1(4)	33.9(4)
8.0	31.4(4)	28.4(4)	34.3(4)	33.9(4)	34.2(4)	33.5(4)
9.0	29.7(4)	34.8(3)	26.8(3)	27.4(3)	28.3(3)	26.1(3)
10.0	27.2(3)	27.6(3)	27.9(3)	27.5(3)	27.9(3)	24.2(3)
11.0	23.5(3)	22.2(3)	26.2(3)	24.4(3)	26.5(3)	24.3(3)
12.0	22.3(3)	21.3(3)	23.5(3)	23.4(3)	23.7(3)	23.6(3)
13.0	26.4(2)	26.3(2)	26.6(2)	23.6(2)	26.5(2)	22.2(2)

*frequency of conveyance requirement (step)

Fig. 6 Difference of networks by routings; the conveyance requirements occur at every 11 steps

かを判断する指標は、搬送頻度の高低に対し、どのような走行経路が構築されているかで見ることができる。行動則がセミダイナミック型のときは搬送頻度が低くなると飛躍的に経路が少なくなるのに対し、静的接近型のときはそれほど少なくなならない。これは、搬送頻度が高いと AGV の計画を頻繁に変更する必要がある、セミダイナミック型は無駄な予知をしてしまうことを示しているからである (Fig.7). すなわち、各行動則の特徴を反映した経路が算出されていると言える。

さらに、行動則がタスク予知のときは、総じて走行経路が多く必要であると言える。これは、以下の理由によると考えられる。タスク予知の場合では、同時に 2 台以上の AGV が同一の目標地点(倉庫)を持ち、渋滞が起こる。搬送頻度が低いほど、2 台以上が搬送要求待ちになることが多いため、この現象は起きやすい。得られた結果は、この現象をよく反映した走行経路が設計されていることを示している。

ここで、12step ごとの搬送要求の場合に比べ、13step ごとの搬送要求のときの方が必要な走行経路が増えている。これは AGV 必要台数が 3 台から 2 台に減少したため、1 台あたりの稼働率が上がったためである。具体的には、1 台あたり平均して 36step ごとの搬送必要性が、26step ごとの必要性になっている。したがって、必要な走行経路が増えることは極めて妥当である。またシステムの評価項目として、AGV 必要台数の少なさが走行経路の疎度より優先される (2 章) ため、問題は無い。

上記の事柄より結果は妥当であり、適切な双方向性走行経路が構築できたと考える。

以上より、本研究で提案する手法により、さまざまな行動則に対し、適切な AGV 台数・走行経路を構築したと考える。

Fig. 7 Errors of prediction

7. 結 論

本論文では、AGV 搬送システムにおけるシステム構築のため、さまざまな行動則に適した AGV 台数および双方向性走行経路設計手法の提案を行なった。

AGV 搬送システムにおいて、用意され得る行動則を包括的に議論するため、基底のアルゴリズムを分類する方法を考えた。基底のアルゴリズムとして configuration space-time を用いた行動決定法を採用し、振る舞いを決定付ける計画時の情報量という観点から分類を行なった。これにより行動則を包括的に議論可能となった。

分類された各行動則に対し、必要となる AGV 台数を求める方法を述べた。また、妥当な双方向性走行経路を設計するため、遺伝的アルゴリズムを用いた経路間の通行必要性を求める手法を提案した。

シミュレーションにより、適切な AGV 台数・走行経路が設計されていることが確認され、提案手法の有効性を示すことができた。

また、AGV の行動則が走行経路に影響を著しく与えることがわかった本論文の結果から、適切な AGV 行動則を設計する手法が必要であることがわかる。これについては今後の

課題とする。

参 考 文 献

- 1) R.J.Gaskins and J.M.A.Tanchoco: Flow path design for automated guided vehicle system, International Journal of Production Research, **25**-5, 667/676 (1987)
- 2) M.Kaspi and J.M.A.Tanchoco: Optimal flow path design of unidirectional AGV system, International Journal of Production Research, **28**-6, 1023/1030 (1990)
- 3) P.J.Egbelu and J.M.A.Tanchoco: Potentials for bidirectional guide path for automated guided vehicle based system, International Journal of Production Research, **24**-5, 1075/1097 (1986)
- 4) R.J.Gaskins, J.M.A.Tanchoco and F.Taghaboni: Virtual flow paths for free-range automated guided vehicle systems, International Journal of Production Research, **27**-1, 91/100 (1989)
- 5) H.K.Kim and J.M.A.Tanchoco: Economical design of material flow paths, International Journal of Production Research, **31**-6, 1387/1407 (1993)
- 6) S.Rajotia, K.Shanker and J.L.Batra: A Semi-Dynamic Time Window Constrained Routing Strategy in an AGV System, International Journal of Production Research, **36**-1, 35/50 (1998)
- 7) D.Newton: Simulation model calculates how many automated guided vehicles are needed, Industrial Engineering, **17**-2, 69/78 (1985)
- 8) S.H.Chang and P.J.Egbelu: Dynamic relative positioning of AGVs in a loop layout to minimize mean system response time, International Journal of Production Research, **34**-6, 1655/1674 (1996)
- 9) 藤村希久雄: 行動ストラテジーとアルゴリズム, 日本ロボット学会誌, **11**-8, 1124/1129 (1993)

新 井 民 夫 (正会員)

70年東京大学工学部精密機械工学科卒, 87年より東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻教授。自動組立, 移動ロボットの協調, 自律分散システムなどの研究に従事。IMS 賞など受賞。精密工学会, IEEE, CIRP, 日本ロボット学会などの正会員。現在, 人工物工学研究センター長を併任。

[著 者 紹 介]

千 葉 龍 介

1999年東京大学工学部精密機械工学科卒, 2001年同大学院修士課程修了, 同年より東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻博士課程に在籍。マルチロボットシステム設計などの研究に従事。2000年IMS論文賞受賞。日本ロボット学会会員。

太 田 順 (正会員)

1989年東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻修士課程修了, 同年新日本製鐵(株)入社。91年東京大学工学部助手。94年同講師。96年より東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻助教授。この間96-97年Stanford大学Center for Design Research 客員研究員, 群知能ロボット, 大規模搬送システム, ロボットの環境設計等の研究に従事。博士(工学)。