学術論文

掃引作業における移動ロボット群の動作計画

倉 林 大 輔^{*1} 太 田 順^{*1} 新 井 民 夫^{*1} 吉 田 英 一^{*2}

Motion Planning of Multiple Mobile Robots for Cooperative Sweeping

Daisuke Kurabayashi^{*1}, Jun Ota^{*1}, Tamio Arai^{*1} and Eiichi Yoshida^{*2}

In this paper, we propose an off-line planning algorithm for cooperative sweeping of multiple mobile robots. Sweeping of a whole work area is fundamental and essential task of mobile robots. For efficient cooperation, setting appropriate burden onto each robot is very important because interference of robots and overlaps of their sweeping units make efficiency low. In proposed algorithm, sweeping cost is evaluated by means of length of paths on which robot should move. We introduce both edges of the configuration space and Voronoi diagram so as to compute paths in the whole area. We generate a tour for traversing all the paths by applying the algorithm of the Chinese Postman Problem. According to the cost evaluation, appropriate paths of the tour are assigned to each robot. The efficiency of the proposed algorithm is verified by simulations.

Key Words: Multiple Mobile Robot System, Cooperative Sweeping

1. 序 論

移動ロボットの適用範囲が広がるにつれ、複数台のロボットによる協調行動が重要になってきた。複数台のロボットを一つの作業に投入することによる作業効率の向上は、その代表的な例である。与えられた作業に対し、各ロボットの通るべき経路を生成する動作計画問題は、複数ロボット系における最も基本的かつ重要な問題である。

従来、移動ロボットの動作計画問題は、領域内のある地点から目標地点へ移動するための経路を生成することを取り扱ったものがほとんどであった (Fig. 1 (a))。

具体的には、ロボット自身の移動、物体の搬送などが挙げられる。この作業における動作計画問題は、与えられた2点間を補間する曲線を生成する問題に等しい。基本的な経路生成問題に関する研究 (例えば文献 [1])、大型物体の協調搬送作業 [2] [3]、ロボットの群れの動作計画 [4] など、これまでに多くの研究が行われてきた。

しかし、清掃、塗装、監視など、ロボットの適用が期待される作業の多くは二次元的な広がりをもった領域を“覆う”動作を要求する。

本論文では、このような作業を“掃引作業 (Sweeping)”と呼ぶ (Fig. 1 (b))。

このような問題に対し、通路などネットワーク状の領域において、点検などを行うロボット群の動作計画問題はこれまでになされてきた。複数台の移動ロボットを扱う研究として、通路の通行可否情報の信頼性を一定に保つための調査移動ロボットの速度制御手法 [5]、一方通行路を含む経路を巡回する移動ロボットの最適台数決定とそれらに対する巡回路決定法 [6] などが挙げられる。しかし、二次元領域をロボット群が覆うような動作計画手法はほとんど実現されていない。単体の清掃ロボットに対する経路生成 [7] や、フライス盤における刃先軌道生成 [8] の研究は行われてきたが、複数台のロボットによりこのような作業を行う研究は、これまでビヘイビア・ベースによるものがほとんどであった。

一つの掃引作業に携わるロボットの台数が増加した場合、ロ

Fig. 1 Examples of robot tasks

原稿受付 1996年4月12日

^{*1}東京大学大学院工学系研究科

^{*2}通商産業省工業技術院機械技術研究所

^{*1}The graduate school of the university of Tokyo

^{*2}Mechanical engineering laboratory, AIST MITI

2.3 作業対象領域のモデル化

作業の対象となる領域を二次元ユークリッド空間とし、 $W = R^2$ と表す。 B_j を W に配置された静止物体、すなわち障害物とする。実際に作業を行うことが可能であるのは、障害物 B_j の占める領域を除いた領域 W_{free} である (式 (1))。ただし、 p は W における位置である。また、記号 “\” は集合の減算を意味する。

$$W_{free} = W \setminus \bigcup_{j=1}^p B_j \quad (1)$$

2.4 問題の定式化

作業対象領域において、ロボット i の作業単位は W 内の有界閉部分集合 A_i とみなすことができる。このことから、掃引作業とは、 A_i により、 W_{free} を有限時間内に被覆する動作とすることができる。

これより、掃引作業における動作計画問題とは A_i , W , B_j を入力とし、 W_{free} を構成するすべての点を少なくとも 1 回作業単位が通過する A_i の連続経路 τ_i を求める問題となる。

ここで、 W における経路 τ は、式 (2) により表現される連続写像である。

$$\tau : [0, 1] \rightarrow W_{free} \quad (2)$$

ここで、 W_{free} 全体が掃引されるためには、 W_{free} 中のすべての位置 p が少なくとも最も近い経路 τ_i より距離 R 以内に存在しなくてはならない。このことから、 τ_i は次の条件を満たすことが必要となる。

$$\exists \tau_i \forall p \in W_{free} \ d(\tau_i, p) \leq R \quad (3)$$

ここで、 $d(\tau_i, p)$ は、 τ_i と p のユークリッド距離を表す。

複数ロボットによる協調作業では、単体のロボットに比べ高速に作業を完了させることが期待できる。複数ロボット系全体では、最も長い $\|\tau_i\|$ により全体の掃引作業に要する時間が決定される。このことから、動作計画の評価として $\max \|\tau_i\|$ を用いる。

以上から、掃引作業計画問題は、拘束条件式 (3) を満たし、

$$[\text{maximum } \|\tau_i\| \rightarrow \text{minimum}] \quad (4)$$

とする経路の組 $\tau_i, i \in \text{Rob}$ を求めることである。

3. 動作計画手法

3.1 動作計画手法の構成

一般にある領域を掃引する経路は複数存在し、解析的に一意に求めることができない。そのため、なんらかの制約条件を置くことが必要となる。本論文では任意台数のロボットに対し連続かつ拘束条件を満たす経路を生成するために、次のように動作計画手法を構築する。

- (1) 対象領域全体に対し、拘束条件を満たす 1 本の経路を生成
- (2) 評価関数を最小とするよう各ロボットに経路を分配 (Fig. 4)

Fig. 4 Outline of the algorithm

Fig. 5 Basic concept of path generation

3.2 経路生成手法

ここでは、領域全体を掃引する 1 本の連続経路を生成する。前述のように、任意の領域に対して掃引経路を解析的に求めることはできないため、次の手順で生成する。

- (1) 作業単位の通るべき線図の生成
- (2) (1) で生成された線図の通過順路の決定

3.2.1 作業単位の通るべき線図の生成

効率よく掃引作業を行うためには、作業単位が通過する領域が重ならないことが望ましい。

掃引経路生成の基本手法として、Contour parallel (沿輪郭) 型と Direction parallel (蛇行) 型の 2 種の経路生成が考えられる (Fig. 5)。これらは NC 工作機械や塗装ロボットなどで一般に用いられる経路形態である。同一の領域を掃引する場合、経路長は短い方が望ましい。そこで、両者を比較することでより適切な基本手法を定める。

掃引対象領域として、Fig. 6 (a), (b) 2 種を用いて比較を行う。領域 1 は一辺の長さが x である正方形の領域である。一方領域 2 はその正方形を五つ組み合わせた形状である。正方形間には、作業単位の直径に相当する穴の空いた壁があり、この部分でロボットの通過に制約が設けられている。

蛇行型はそのままではこのような領域に対処できないため、(1) 領域を多角形とみなし、最小数の凸多角形に分割、(2) 各凸多角形のなかで経路生成、(3) 各経路を障害物と干渉しない最短経路で結ぶ、というルールを用意し適用した。

作業単位の半径 R を 1 に固定し、 x を 5 から 20 まで変化した場合の経路長を Fig. 7 に示す。この結果から、以下の考察を得る。

- 領域 1 において、蛇行型は x が作業単位直径の整数倍で

Fig. 6 Areas for basic algorithms

Fig. 7 Comparison of basic algorithms

あるときは沿輪郭型より約3%短い経路を生成しているが、そうでない場合は最大10%長い経路を生成している。

- 領域2においては、沿輪郭型が蛇行型に比べ約3%短い経路を生成している。

以上の結果から、経路生成の基本として沿輪郭型を用い、式(3)を満たす経路を次のように生成する。

はじめに、沿輪郭線図を Fig. 8 (a) に示すように生成する。領域内において、作業単位（自由空間（領域形状と重ならない）となる C-Space を生成し、その境界線の領域への写像により、線図を生成する。これを、生成された線図により掃引される領域を除き、再帰的に C-Space が生成できなくなるまで繰り返す。C-Space が生成されない領域、すなわち作業単位（の大きさに比較して狭い自由空間については、領域形状についてのボロノイ線図、すなわち障害物間の中線を用いて経路を生成する

Fig. 8 Schematic view of path generation

Fig. 9 Calculation of a complete path

(Fig. 8).

3.2.2 線図の通過順序の決定

前項で求めた線図をグラフとみなし、その通過順序を決定し一つの経路とする。求められた線図について、曲線が交わる点をグラフの頂点、その間の曲線を枝とみなす。

線図から求められたグラフが非連結であった場合は、すべての枝を連結とするための最短の枝を追加し、連結なグラフとする。これはボロノイ線図と双対関係にあるドロネー線図を用い、最小木を求めることで可能である。

この連続となったグラフ上で、すべての枝を少なくとも1回通る最短の経路を求める。一般にここで求められたグラフはオイラーグラフ（一筆書きでたどることができるグラフ）ではないために、重複して通るべき枝を決定することが必要となる。これは「チャイニーズ・ポストマン問題[12]」と呼ばれる問題に等しい。ここでは、Edmonds らによる解法[13]を適用し、経路を生成する (Fig. 9)。

ここで求められる解は、出発点と終了点と同じ頂点となる解である。しかし、掃引経路では、出発点と終了点は異なってもいい。グラフをたどる経路の出発点と終了点に異なる点を用いていい場合、ある重複すべき辺の両端を出発点/終了点とするならば、その枝を重複して通る必要はない。この性質を利用し、チャイニーズ・ポストマン問題の解から、重複して通るべきとされた枝のうち最も長いものを選び、その両端を経路の始点/終点とする。

3.3 経路分配手法

前節で生成された経路に対し、 $\max \|r_i\|$ を最小とする分配を求める。経路は始点から終点までの連続した軌道として求められているため、経路を分配することは、ロボット台数分に切断することと等しい。経路を分配する際、切断点が重複動作を行う

部分に位置する場合が考えられる。この場合、重複動作の往路と復路を2台のロボットで分けることには、掃引作業遂行上意味がないため、その一方を省略することで $\max \|\tau_i\|$ を減少させることが考えられる。つまり、 n 台のロボットに対し、 $\max \|\tau_i\|$ を最小とする、 $n-1$ 個の切断点の組 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_{n-1}\}$ を求める最適化問題となる。

本論文では、この問題を閉区間における直線探索問題に定式化し解決する。

n 台の等しい能力を有するロボットに対する最適分配は、基本的に均等分配である。全長 L の経路を均等に分配した場合、ロボット1台あたりの経路長を M とすると $M = \frac{L}{n}$ である。一方、経路中において分配時省略されうる部分、すなわち往復動作を行う部分の片道の長さを b_i とすると、ロボット1台あたりの経路長がとりうる最小値 m は $m = \frac{L - \sum b_i}{n}$ である。しかし、往復動作を行う部分すべてが省略できるとは限らない。つまり最小の $\max \|\tau_i\|$ の値は必ず閉区間 $[m, M]$ 内に存在する。

逆にロボット1台あたりに分配されるべき経路長 ℓ を与えると、 $\max \|\tau_i\|$ の値と各ロボットに対する切断点は ℓ の関数として求まる。ここで $\max \|\tau_i\| = f(\ell)$ と記述する。

各ロボットの経路を定める切断点は、全体の経路の先頭から順次ロボット1、ロボット2、...、ロボット n へと経路を分配していくことで定まる。この際、Fig. 10 中 * で示すような往復動作を行う経路上に切断点があった場合、必ず (b) の状態をとる。これは (a) の状態においても (b) の状態においてもロボット $i+1$ 以降への分配経路長に変化がなく、なおかつロボット i の経路長を減少させることができるためである。仮に (c) の状態をとった場合、ロボット $i+1$ 以降への経路長は (b) の場合に比べ減少するが、ロボット i の経路長が ℓ を超えてしまうため意味がない。これを $n-1$ 回繰り返すことですべての切断点と $\max \|\tau_i\|$ の値が決定される。

つまり、 ℓ が理想的な $\min[\max \|\tau_i\|]$ より大きい場合、全ロボットに対し ℓ 以下の経路長を分配可能であり、 $f(\ell)$ は ℓ の減少と共に減少する。一方理想の $\min[\max \|\tau_i\|]$ より小さくなった場合、最後のロボットに分配される経路長が $f(\ell)$ に現れ、 ℓ の減少とともに増大する。

Fig. 10 Schematic view of path distribution

以上より、 $\max \|\tau_i\|$ を最小化する切断点を求める問題は、定義域 $m \leq \ell \leq M$ の閉区間において、 $f(\ell)$ を最小とする ℓ を求める問題と定式化される。

この定式化に対し直線探索アルゴリズムを適用することで、必要な精度で ℓ 、つまり $\max \|\tau_i\|$ と切断点を求めることが可能となる。本論文では経路全長のロボット台数あたり平均を初期値とし、等間隔 V 型 3 点探索法 [16] により探索を行う。

3.4 計算時間の評価

掃引対象領域 W が長さ $x_1 \times x_2$ の矩形領域と、その内部の n_B 個の多角形障害物により表現されていると仮定する。 W において n_R 台のロボットに対する経路 $\tau_{i \in rob}$ を生成する問題の計算時間を考察する。

ボロノイ線図を生成するために要する計算時間は $O(n_B \log n_B)$ である。このボロノイ線図は、最大で $2n_B - 5$ 個のボロノイ点および $3n_B - 6$ 本のボロノイ線を有する [8]。一方、沿輪郭線 (C-Space の境界線) は障害物の輪郭線をオフセットすることで得られる。仮定した W においては、最大で $n_c = \lceil \frac{x_1}{4r} \rceil \times \lceil \frac{x_2}{4r} \rceil$ 個の、互いに非連結な沿輪郭線が生成され得る。ただし、 $\lceil x \rceil$ は x を越えない最大の整数を表す。

提案したアルゴリズムでは、沿輪郭線とボロノイ線図の交差 1 箇所につき最大で 2 頂点が生成される。最悪の場合、すべての沿輪郭線とボロノイ線が交差する可能性がある。一方、非連結の沿輪郭線を結ぶための辺を 1 本付加すると最大で 2 頂点が増大する。なお、この辺の付加に要する計算時間は $O(n_c \log n_c)$ である [14]。以上から、経路生成のためのグラフにおける頂点数 n_v は最大で

$$n_v = 2n_c(3n_B - 6) + (2n_B - 5) + 2(n_c - 1) \quad (5)$$

を越えない。すなわち、 n_v は $O(n_c n_B)$ にある。

頂点数 n_v を有するグラフにおいて、すべての辺を一巡する経路を生成する (チャイニーズ・ポストマン問題を解く) ための計算時間は $O(n_v^3) = O(n_c^3 n_B^3)$ を要する [15]。

切断点の探索は、一巡の経路中で行われるため、一次元の探索問題である。

以上の考察において、 n_B が領域形状の複雑さに、 n_c が領域に対する作業単位の相対的な小ささに対応すると考えられる。これらのことから、提案したアルゴリズムにおいては一巡経路を生成するために必要な計算時間が、入力データに対して非常に敏感であり、領域形状が複雑であるほど、作業単位の大きさが相対的に小さいほど計画に時間を要するといえる。これに対し、チャイニーズ・ポストマン問題を近似的に $O(n_v)$ の計算時間で解くアルゴリズムが提案されている [14]。このようなアルゴリズムを応用することで、近似解であれば計算時間を削減することが可能であると考えられる。

3.5 ロボットの初期位置が与えられた場合への拡張

協調掃引問題において、完全に一般の場合に対し、任意の初期位置を持つ、任意台数のロボットに対し真の最適経路を生成することは非常に困難である。ここでは実現可能な準最適解を得る手法について考察する。

本手法においては、経路の分配過程を拡張することで、任意台数のロボットの初期位置を考慮した作業量分配手法を実現す

Fig. 11 Schematic view of consideration of initial/goal position of a robot

ることが可能である。

以下、順に条件を緩めながら、手法と計算量について考察する。

(a) 全ロボットが同一の初期位置を持つ場合

(a-1) 経路の始点から分配

始めに、3.3節と同様に、生成された経路の始点から順に分配を行っていく場合を考察する。各ロボットの経路長評価 $\|\tau_i\|$ は、掃引経路自体の長さ $\|u_i\|$ に加え初期位置からの移動量 $\|v_{i1}\|, \|v_{i2}\|$ が加わる (Fig. 11)。

$$\|\tau_i\| = \|u_i\| + \|v_{i1}\| + \|v_{i2}\| \quad (6)$$

この $\|\tau_i\|$ に対し、初期位置を考慮しない場合と同様に $f(\ell)$ を算出し、実現可能な $\ell = \min[\max\|\tau_i\|]$ を探索する。

この際、 $\ell = \|\tau_i\|$ を与える u_i を探索する必要が生じる。つまり、 ℓ の探索において、ロボット台数分の一次元探索を行うことで初期位置からの移動量を考慮することができる。

ロボットの初期位置からの移動経路は、可視グラフを生成し Dijkstra 法により最短路を算出することで求められ、その計算量は $O(|E| + |V|\log|V|)$ である。ここで $|V|$ は領域形状を構成する頂点数、 $|E|$ は可視グラフの枝数である [14]。可視グラフの枝数は領域形状に依存するが、冗長な枝を排除する手法が提案されている [1]。

(a-2) 分配開始点を経路上の任意の点とする

(a-1) の探索だけでは、ロボットの初期位置からの移動量が大きく冗長になる可能性がある。そこで、(a-1) の探索に加え、分配される経路のどこを分配開始点とするかを探索することが必要となる。3.2節で算出された経路の始点と終点が一致していない場合（閉路でない場合）、これらを結ぶ枝を追加することで閉路として扱うことができる。閉路上のどの点を分配開始点とするかを表す変数が一つ増加し、二次元探索問題となる。

(b) 各ロボットが異なる初期位置を持つ場合

各ロボットに対し、分配した経路の割り当てを決定することが必要となる。この組み合わせ計算には、ロボット台数 n_R に対し $O(n_R^3)$ の計算量が求められる。これを (a) の一次元探索で逐一割り当て計算を行うと、計算量は一次元探索の計算量に $O(n_R^3)$ を乗じたものとなる。

4. シミュレーション

4.1 シミュレーション条件

本章では提案手法をシミュレーションに適用する。提案手法により、ロボットの作業単位の大きさおよび領域の形状に応じ

Fig. 12 Areas for simulations

て作業時間評価がなされ、各ロボットに対し適切な経路が生成されることを示す。

シミュレーションとして、次の二つを行う。

● Simulation 1: 領域形状の変化に対する対応

Simulation 1 では、ロボットの作業能力を固定し、同一面積であり形状の異なる領域に対し経路生成を行う。提案手法が領域形状に応じて連続な経路を生成可能であることを、掃引の作業時間を明示的に評価可能であることを示す。また、複数台への分配での往復路の省略について考察する。

同一面積で形状の異なる領域 A, B, C (Fig. 12) それぞれについて、作業単位半径 $R = 30$ のロボット 5 台に対する経路を生成する。すべての領域は 400×400 の正方形内に斜線部で示された障害物を含んだ形状をしている。

● Simulation 2: 作業単位の大きさの変化に対する対応

Simulation 2 では、Simulation 1 で固定としていたロボットの作業能力を変化させた場合に、提案アルゴリズムが対処可能であることを示す。領域 A に対し、作業単位半径が $R = 30$ の場合と $R = 60$ の場合について、ロボット 5 台に対する計画を行う。

4.2 シミュレーション結果

● Simulation 1

領域 A, B, C に対して生成された経路を Fig. 13 に示す。また、ロボットの作業時間を Table 1 に示す。

結果から、領域 C に対する作業時間が最も少なく、領域 A はこれに比べ約 21%、領域 B は約 25% 多くなっている。これは、領域 B では障害物により入り組んだ形状ができており、そのためにロボットが往復動作をしなければならない部分が多いためだと考えられる。一方、領域 C は単純な長方形をしておりロボットの動作に制約が少ないため、作業時間も少ないと考えられる。面積が同一の領域に対して、その形状に応じた作業時間評価が行われ、経路が分配されていることが示されている。

経路分配においては、初期値（経路全長のロボット台数あたり平均）に対し、領域 A, B では約 0.6%、6% それぞれ減少したが、領域 C では減少しなかった。領域 C では、往復動作を行う箇所の全体の経路に占める割合が小さいため、経路長の減少が起きにくいと考えられる。 $\max\|\tau_i\|$ の減少量は与えられた領域形状およびロボット数により影響されるが、往復動作を多く含む経路において、作業時間短縮に貢献しているといえる。

(i) $R = 30$ in Area A (ii) $R = 30$ in Area B (iii) $R = 30$ in Area C

Fig. 13 Results of the simulation 1

Table 1 Comparison of the results

	Area A	Area B	Area C
Length of the total path	3,169	3,231	2,583
Initial τ_i	633.2	646.3	516.7
Minimized $\max \tau_i$	628.9	617.3	516.7

• Simulation 2

生成された経路を Fig. 14 に示す。また、ロボットの経路長を Table 2 に示す。

生成された動作経路の全長は $R = 30$, $R = 60$ の場合それぞれ 3,169, 1,762 である。作業時間分配における初期状態では、各ロボットに対して総作業時間のロボットあたり平均が割り振られ、それぞれ 633.2, 352.4 である。この結果から、作業単位の大きさが変化した場合、これに応じて作業時間の評価がなされ、各ロボットに対する経路生成がなされていることが示

Fig. 14 Results of the simulation 2: $R = 60$ in Area A

Table 2 The results of the simulations

	$R = 30$	$R = 60$
Length of the total path	3,169	1,762
Initial τ_i	633.2	352.2
Minimized $\max \tau_i$	628.9	351.2

された。

以上二つのシミュレーションにより、提案手法が各ロボットに対し飛び地のない連続な掃引経路が生成すること、領域形状とロボットの作業能力に基づく作業時間評価とこれに基づく作業時間分配がなされることが示された。

5. 結 論

本論文において、協調掃引の動作計画手法を提案した。ここでは、

- 協調掃引作業の定式化
- 掃引作業における経路生成
- 複数台のロボットに対する作業時間分配

を実現した。提案した手法により、対象領域の形状と、ロボットの作業能力を考慮した動作経路を生成することを可能とした。この手法は、任意形状の領域における、任意台数のロボットに対して適用可能である。シミュレーションにより、提案手法の有効性を示した。

本手法はまた、これまで評価が困難であった、自律ロボットシステムの作業効率に対する一つの評価指標となることが期待される。

参 考 文 献

- [1] J.C. Latombe: "Robot Motion Planning," Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [2] D.J. Stilwell and J.S. Bay: "Towards the Development of a Material Transport System Using Swarms of Ant-like Robots," Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.766-771, 1993.
- [3] 橋本, 江口, 銭谷, 大場: "並進リンク機構を有する連結器を用いた群構成移動ロボットシステムの協調搬送制御", 第11回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.99-102, 1993.
- [4] 太田, 新井, 倉林: "作業の性質を考慮したロボット群の動作計画", 日本ロボット学会誌, vol.13, no.4, pp.517-524, 1995.
- [5] J. Takeno, K. Iijima, K. Kato and S. Nishiyama: "Harmonious Control System for Multiple Mobile Investigation Robots," ASME Symp. on Flexible Automation, pp.679-683, 1992.
- [6] 柿倉, 武野, 向殿: "一方通行路の存在する道路網におけるある種の

最適経路問題”, 電気学会論文誌, C 編, vol.98, no.8, pp.257-264, 1978.

- [7] C. Hofner and G. Schmidt: "Path Planning And Guidance Techniques For An Autonomous Mobile Cleaning Robot," Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.610-617, 1994.
- [8] M. Held: "On the Computational Geometry of Pocket Machining," Springer-Verlag, 1991.
- [9] L. Steels: "Cooperation between distributed agents through self-organization," in Journal on Robotics and Autonomous Systems, North Holland, Amsterdam, 1989.
- [10] T. Balch and R.C. Arkin: "Communication in Reactive Multiagent Robotic Systems," Autonomous Robots, 1, pp.27-52, 1994.

- [11] R. Beckers, O.E. Holland and J.L. Deneubourg: "From Local Actions to Global Tasks: Stigmergy and Collective Robotics," Artificial Life IV, pp.181-189, 1994.
- [12] M. Kwan: "Graphic Programming using Odd or Even Points," Chinese Math, 1, pp.273-277, 1962.
- [13] J. Edmonds and E.L. Johnson: "Matching Euler Tours and the Chinese Postman," Mathematical Programming, no.5, pp.88-124, 1973.
- [14] 伊理, 腰塚: 計算幾何学と地理情報処理. 共立出版, 1993.
- [15] E.L. Lawler, J.K. Lenstra, A.H.G.R. Kan and D.B. Shmoys: "The Traveling Salesman Problem," A Wiley-Interscience Publishers, 1986.
- [16] 嘉納: システムの最適理論と最適化. コロナ社, 1987.

倉林大輔 (Daisuke Kurabayashi)

1970年9月15日生。1995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。現在、同博士課程在学中。マルチエージェント・ロボットシステムの協調作業の研究に従事。精密工学会, IEEE 学生会員。(日本ロボット学会学生会員)

新井民夫 (Tamio Arai)

1947年8月4日生。1970年東京大学工学部精密機械工学科卒業, 1977年同博士課程修了。工学博士。1979年英国エディンバラ大学人工知能学科研究員。1987年東京大学工学部精密機械工学科教授。産業用ロボット言語の標準化活動を推進。自動組立, 移動ロボットなどの研究に従事。精密工学会監事, 自動化推進協会会長, IEEE, などの会員。(日本ロボット学会正会員)

太田 順 (Jun Ota)

1965年2月19日生。1989年東京大学精密機械工学専攻修士課程修了。博士(工学)。同年新日本製鉄(株)入社。1991年東京大学助手。講師を経て, 1996年より東京大学工学系研究科助教授。1996年~97年 Stanford 大学 Center for Design Research 客員研究員。複数ロボットの計画, 環境設計, マンマシンインタフェース, 協調制御の研究に従事。日本機械学会, 精密工学会, IEEE 会員。(日本ロボット学会正会員)

吉田英一 (Eiichi Yoshida)

1967年11月8日生。1996年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修了。同年通産省工業技術院機械技術研究所入所, 自律分散機械システムの設計・制御の研究に従事。1990~91年スイスローザンヌ工科大学留学。博士(工学)。計測自動制御学会, 日本機械学会, IEEE 会員。(日本ロボット学会正会員)