複数移動ロボット系の計画

新井 民夫* 太田 順*

1. 序 論

移動ロボットに関する研究の多くは単体の移動ロボットを研究対象としたものである。しかしながら移動ロボットの使用される環境がオフィス、家庭へと広がり、移動ロボットに要求するタスクの性能が高度となるにつれて、ロボット同士の衝突回避や能動的な協調が重要になった。進んで現在は多数の移動ロボット系の研究が不可欠となってきた。Caloud⁶⁾によれば、複数移動ロボット系の計画は以下の3段階に分割される。

(a) タスクプランニング：外部から与えられた目的をロボットが実現できるタスク群に変換するルーチン

(b) タスクアサインメント：生成されたタスク群を実現するために、そのタスクを各ロボットに配分するルーチン

(c) 動作計画：現在位置から目標位置まで移動するための動作を生成するルーチン

本論では、上記の中で最も多くの研究がなされている(c)の動作計画について論じる。この分野は理論的な側面からの研究、実際の側面からのFMSにおける自動搬送車の制御法の研究等があり、1970年代終わりから研究されてきたが、本論は複数移動ロボット系の動作計画に関する研究概要を解説することを第一の目的とする。

多数の人間が動き回っている場合には、人間同士が群を形成することにより行動する例が多々見受けられることから、移動ロボット系においてもロボット群の形成を行う動作計画手法が重要であると予想される。そこで本論は第二の目的としてロボット群の動作計画に関する研究の概要を述べる。なお本論では、ロボットの制御問題、特に移動ロボットの操舵特性に関する問題は扱わない。また、参考文献は著者のABC順に配列した。

2. 動作計画手法の分類

衝突回避問題は当初ソフテプロブレムとかピアノムーバといわれる物体のすりぬけ問題であったが、その後マニピュレータの動作計画を中心として、多数のアルゴリズムが提案された。ロボットが単体の場合の動作計画は衝突回避と最適パス問題との組合せであり、アルゴリズムは空間表現方法(作業空間、形態空間、グラフ)、時間軸の取扱、回避戦略などで分類された。複数ロボットの場合も基本的には単体ロボットの計画の積み重ねであるから、この分野での研究はそのまま複数ロボットの動作計画に適用可能である。しかし、複数のロボットが相互に動作するとなると最適化の要求は弱まるが、計画立案の分担、情報の共有が必要になる。よって、既存の動作計画の手法を論ずるには、アルゴリズムの性質を論ずる前に、計画の“枠組み”すなわちアルゴリズムの適用条件の違いを評価しなければならない。そこで、本論では“枠組み”の分類を行った上でアルゴリズムを列挙する。

移動ロボットが自律かつ自立型であるとする、複数の移動ロボット系の動作計画に伴う本質的問題として、①自己の現在位置の測定ならびに推定、②他のロボットとの相対位置、速度の測定、③環境の状態の測定、④複数ロボット間の通信、⑤操舵系の制御の実時間性能、の難しさが常に指摘されている。そのため、これらの測定や処理の分担が計画の分類では重要であり、そこで“枠組み”を以下の2つの観点から分類する。

(a) Who? (誰が行うのか)：

(a-1) スーパーバイザー(集中管理型
[Centralized])、

(a-2) 各ロボット(分散管理型 [Decentralized])

(b) When? (いつ行うのか)：

(b-1) オフライン [Off-line]、

(b-2) オンライン [On-line]

(a) は計算機の構成方法を意味するのではなく、計画の主体の分類であり、情報の流れの違いである。(a-1) の集中管理型計画 (centralized planning) とは、「シ

原稿受付 1992年5月29日

Planning of Multiple Mobile Robots

* 東京大学工学部精密機械工学科

表 1 集中型計画と分散型計画との相異

	最適性の考慮	ロボットの台数増加時の計算量	フォールトトレラント性
集中型	○ (可能)	× (計算量↑)	× (機能集中)
分散型	× (不可能)	○ (計算量→)	○ (機能分散)

表 2 オンライン計画とオフライン計画との相異

	誤差に対するロバストネス	計算時間に 関する制約	視点
Off-line	× (開ループ制御)	○ (小)	鳥瞰図的
On-line	○ (閉ループ制御)	× (大)	ロボット中心

システム内にすべての移動ロボットを統轄する管理者が存在して、動作計画を推進する方式」と定義する。一方、(a-2)の分散管理型計画 (decentralized planning) とは、「複数移動ロボット系を構成する個々のロボットが独立して動作計画をとりおこなう方式」と定義する。それぞれの手法の特徴を表1にまとめる。

(b)は動作計画の立案の時期の分類である。(b-1)のオンライン計画 (on-line planning) とは、「センサ情報を利用し、実時間で動作計画を行う方法」であり、(b-2)のオフライン計画 (off-line planning) とは「ロボットの動作実行前にあらかじめ動作計画を実施する方法」と定義する。それぞれの手法の特徴を表2に示す。

(a), (b)は一応独立なので、その組合せは4通り存在し、その混合型システムと併せて以下の様になる。

- (S1) 集中管理オフラインシステム
- (S2) 集中管理オンラインシステム
- (S3) 分散管理オフラインシステム
- (S4) 分散管理オンラインシステム
- (S5) 混合型システム

ここで、(S2)のシステムは多数のロボットの動作を実時間で計画することを意味し、現状の計算機の能力では難しいことと、中心となる計算機の信頼性に依存しすぎることから、この範疇に入る研究は見られない。また(S3)のシステムは、各ロボットが独立して動作計画をするために、作業領域内の環境情報をすべて同等に保持するという冗長な方式となることから、研究がほとんどなされていない。(S5)の混合型とは(S1)~(S4)の組合せである。そこで、実際には3種類の“枠組み”でのアルゴリズムの比較検討を行った。なお、本論は移動ロボットが対象なので、以下の議論においては環境を2次元平面に限定する。道路網を対象とする研究も多数^{8),12),30),41)}行われているが、本論では触れない。

3. 複数移動ロボット系の動作計画手法の概要

上述の分類に従い、アルゴリズムの比較検討を行う。

3.1 集中管理オフラインシステム

この枠組みでの動作計画は移動ロボット系の動作計画研究の基本形であり、時間的制約もなく環境情報も十分存在すると仮定できるので、決定論的に計画する。よって、ここでの手法は他の枠組みにおいても適用可能であるから、分散管理処理や実時間性を重要視していない手法と考えることもできる。アルゴリズムを概観すれば、以下の3種の手法が多い。

- (1) cell decomposition method^{31),32),27)}
- (2) retraction method^{25),4)}
- (3) ロボット間の priority を設定する方法^{9),5),42)}

空間を cell で分割する(1)の方法は問題を有限の空間に圧縮し、アルゴリズムを単純化出来る長所を持つ、しかし、精度高く計画を行うには、非常に計算時間がかかるという欠点がある。そこで、(1)になんらかの改良を加えた方法や、volonoi graph を用いて次元を縮退させる(2)の方法や、優先度の設定により単体ロボットの計画問題に縮退させる(3)の方法が提案されている。この分野の研究の調査は文献33)に詳しい。

3.2 分散管理オンラインシステム

分散管理処理の場合、たとえ採用したアルゴリズムが大域的な演算に適用可能だとしても、各ロボットの計画はそのロボット周辺の局所的動作についてのみ意味を持つことに注意すべきである。分散管理オンラインシステムの計画手法は多くの場合、相手ロボットを含む環境との衝突回避を局所的に効率良く行うことを目的とする。その結果生ずる大域的な動作計画の最適性や安定性は別途チェックされることが一般的である。この枠組みでのアルゴリズムの分類を以下に示す。

- (1) ポテンシャル場を用いた方法及びそれに類した方法^{17),38),39),29),19)}
- (2) ルールを用いた方法^{36),22)}
- (3) ロボット間通信を用いた方法^{28),24),3)}

(1)の方法は目標地点からの引力と障害物からの斥力がロボット自身に仮想的にかかるとして、ロボットを駆動する方法である。この手法の最大の問題点は、停留が本質的に存在することと解がポテンシャル場の張り方に依存することであるが、それらの欠点を考慮した改良型は多い。

Khatib¹⁷⁾は、作業空間内において、目標地点からの仮想引力と、障害物からの仮想斥力をロボット自身にかけることによりロボットの動作計画を表現する“Artifi-

cial Potential Method”を提案している。Tournas-soud³⁵⁾は、ロボット近傍にある障害物とロボットの両者と接する2直線の法線ベクトルから他のロボットと干渉しない領域を求めることにより、計画を実現している。Wang^{38),39)}は、軌道追従のためのスライディングモード制御と障害物回避のための障害物からの仮想斥力とを組合わせた簡単な制御則を用いて、動作計画を行っている。その際、パラメータ変動に対する詳細な解析を位相平面を用いて行っている。Saito ら²⁹⁾は、ポテンシャル法ではないが、近接したロボットの相対位置・速度から衝突危険性を判断して、動作計画する方法を提案した。Lee ら¹⁹⁾は、ニューラルネットワークの Hopfield モデルを用い、停留(deadlock)を起した場合にその地点に仮想的な障害物を付加することにより、回避動作を実現している。

一方、(2)は人間社会における交通ルールを適用した方法であり、効率的な衝突回避が可能である。いかなるルールを準備し、かつそれらのルールが遵守されたと仮定しても、解決不能となる状況を生成することは理論的に可能と思われるが、この手法では衝突回避の大半がルールの存在で表現できるとする立場をとる。

Tuijnman³⁶⁾は、海洋における船舶の回避ルールを適用している。この方法はロボットの大きさが作業空間と比較して著しく小さく、ロボットの操作性が悪い場合に適用できる。Noborio ら²²⁾はルールベースの動作計画を提案しているが、その際、停留を生じさせないためのパラメータに関する条件について論じている。Premvuti ら²⁸⁾は、道路網等を複数ロボットの共有資源と考え、その資源を他のロボットになるべく譲ろうとする“遠慮的協調”の考えと、停留のときにはある1台のロボットが管理者となる集中管理的管理手法のもとで道路網中の三叉路における相互通り抜け動作を実現している。

(1)や(2)の手法の欠点として、衝突回避時に各ロボットは相互に相手の行動が予測可能と仮定していることが挙げられる。つまり、自分以外のロボットや環境が予測通りの動きを取らない場合を想定すれば、環境の測定頻度を高め、実時間処理を要求することとなる。これを解決する一手段として(3)は近接したロボット同士が通信を介して交渉することにより計画を行う方法であるが、ロボット間の相互通信の信頼性とチャネル容量に依存する。また、通信を実現する段階にも優先順位関係を確立する必要があることも注意しなければならない。

Noreils ら²⁴⁾は、ロボットに優先順位を持たせた計画を実現している。2台のロボットが干渉した際に、優先順位の高いロボットが優先順位の低いロボットへ指令(ある地点で待て等)を出すことにより衝突回避を実現

している。Asama ら³⁾は移動ロボットの障害物回避手法を表3の階層で表現し、階層の低い方から順番に回避動作を実現すべきであると主張している。なお、通信すべき情報についての研究はMMS¹⁵⁾のような汎用的な定義を除けば殆どなく、場当りの提案されているのが現状である。

3.3 混合型システム

表1、表2に示したそれぞれの短所を補うように、上述の2手法を混合させた計画手法が提案されている。混合形態としては、

(M1) 集中管理オフライン+分散管理オンライン混合型計画^{18),15)}

(M2) 分散管理オフライン+分散管理オンライン混合型計画^{27),1)}

の2通りが考えられている。ロボットの台数が比較的少なく、高い作業効率を要求する際には(M1)の方法が望ましいが、ロボットの台数が増加するにつれて、完全自律分散型である(M2)の方式が有利となる。後者の研究は、分散問題解決、分散人工知能の研究分野と関連し、興味深い分野である。この分類の手法は、計画システムの構成を大域的計画(global planning)と局所的計画(local planning)とに分割し、階層構成を取ることが一般的で、前者がオフライン、後者はオンラインとなる。

Krogh ら¹⁸⁾は、大域的計画では経路緩和法(path relaxation)を用いて経路を生成し、局所的計画では一般化ポテンシャル場(generalized potential field)法を用いて、実時間の動作を実現している。一般化ポテンシャル場とはポテンシャルが位置のみの関数でなく速度の関数でもある場である。Kant ら¹⁶⁾は2ステップからなる大域的計画を提案し、第1ステップはV-graphを用いてロボット相互の干渉を考慮しない軌道計画を行い、第2ステップでは相互に衝突を起こさないような速度の設計を行う。局所的計画ではポテンシャル法を用いたオンライン制御を行っている。

一方、(M2)の分散管理オフライン+分散管理オンライン複合型計画の例として、Yeung ら³⁷⁾は二層構造を採用し、大域的計画ではロボット相互の衝突を考慮しないロボット単体の経路計画をV-graph法に似たより簡単な方法で行い、局所的計画はその時のロボットの状況に応じて実時間で優先順位を設定し、優先順位の低いロボットが回避行動を行うことにより、経路生成を可能にしている。またArai ら¹⁾は未知の障害物をも環境内に含んだ複数のロボットの動作計画をやはり二層構造で実行することを提案している。大域的計画ではオフラインで既知障害物のみを考慮し他のロボットや未知障害物との干渉を考慮しない動作計画を行う。局所的計画では、

図 1 仮想インピーダンス法 の概念図¹⁾

大域的計画で算出された移動する現在目標位置からの引力と、他のロボットや未知障害物からの斥力をバネ・マス・ダンパ系で表現する仮想インピーダンス法 (virtual impedance model) で演算する (図 1)。停留 (deadlock) 時には、(1) エネルギー関数が停留点において安定か不安定かを判断し、(2) 安定点の場合には大域的に再計画し、(3) 不安定点の場合にはロボットの位置を停留点から微小量ずらして進めることを提案している。

4. ロボット群の制御問題

4.1 ロボット群の概念

ロボット数の増加は計算量の増加に直結するのみならず、質的に異なる問題をも発生させる。図 2 の 5 台のロボットを想定するなら、中央のロボットが監視すべき相手は前 1 台だけかあるいは前後 1 台ずつか、また、動作の計画は先頭のロボットの移動を予測してなすべきかといった問題である。特に駅の構内の雑踏のような多数台のロボットを想定した場合、自分以外のすべてのロボットの行動の測定に基づき動作計画を立てるというフィードバックを用いた計画システムは遅れを本質的に伴うことから、全体としてきわめて効率の悪い移動となるし、停留も起りやすい。また、一部のロボットのアルゴリズムが他のロボットの行動 (maneuver) を拘束する場合も多く、雑路の中で一部の複数ロボットが遠慮的協調に

図 2 ロボット群の動作計画

従い道を譲り始めると、全体として動きが止ってしまうことを想起されたい。そこで、我々人間が雑踏では「流れにのって移動する」ことからの類推に従い、群 (group) の概念を適用することが重要であると考えられる。群を形成することにより、

- ・計画に要する計算量の軽減
  - ・群全体の移動としての高い安全性
  - ・なめらかな軌道の生成
- のような利点が考えられる反面、
- ・突発的事態に対する適応性の悪さ
  - ・移動必要時間の平均値の増加

が発生する危険性がある。このように群を構成することは動作計画に新たな拘束条件、あるいは共通のルールを追加することに相当する。

4.2 ロボット群の動作計画に関する研究の概要

複数ロボットをロボット群として扱う研究の数はそれほど多くない。Wang⁴⁰⁾ はロボット群の動作計画について論じており、基本的にはリーダーとフォロワーの制御となるが、その選び方として、(1) リーダーが 1 台、他がフォロワー、(2) リーダーが n 台、他がフォロワー、(3) リーダーが仮想ロボット、の 3 通りについて検討を行っている。Arai ら⁴¹⁾ は同じ方向を目的とするロボット同士を仮想バネで結ばれたロボット群とみなした場合のロボット群同士の通り抜け問題を解いている (図 3)。

表 3 衝突回避問題のレベル³⁾

Difficulty of Situation	Method for Path Planning		Path Planner for Collision Avoidance	Means
High ↑ ↓ Low	Dynamic Path Planning	Planning by A Human Operator	Human	Communication
		Planning by A High-Level Deadlock Solver	Deadlock solver	
		Planning by A Low-level Deadlock Solver		
		Path Planning by A Robot Leader		
		Giving Way Based on Priority of Tasks		
		Collision Avoidance Based on Mobile Rules	Mobile Robot	Sensing
Static Path Planning				

図 3 ロボット群の動作計画

これらの研究は群が予め形成されている場合には、一定の成果を収めている。しかし、群の形成、解消の基準は未だ不明確であり、また、群の構成形態ならびに群内での相互拘束関係に関する議論はなされていない。

☆ ☆

本論では複数移動ロボット系の動作計画に関する研究の概観し、幾つかの研究を紹介した。現状の研究はきわめて単純なモデルやルールを単独で適用したシミュレーションにとどまっている。本論での分類は、複数ロボット間の主従関係と処理の実時間性の反映であり、妥当な分類基準を示したと言えよう。実際の移動ロボット動作計画では混合型システムにならざるを得ないと言えようが、それには「解決が困難な問題は上位に任せている」方法論であるとの批判も存在する。今後のこの分野の研究の発展のためには、動作計画のアルゴリズムを定量的に評価するための方法論が必要であり、その中で、枠組みの異なる手法を比較検討して行くことが望まれる。

実際の制御系を想定して、今後の研究の展望を述べるなら、

1. センシング系と計画との関係
2. 移動ロボットの車輪機構の考慮
3. 異種のロボット間の動作計画
4. 動作計画の学習
5. 複数の目的を持つ移動ロボットの動作計画

などが重要であると思われる。特に、異種ロボットあるいは機差の存在するロボットの取扱いは“個性”の問題として興味深い。

参考文献

- 1) Arai, T., Ogata, H., Suzuki, T.: Collision Avoidance among Multiple Robots Using Virtual Impedance, Proc. IROS '89, 479/485 (1989).
- 2) Arai, T., Ota, J.: Motion Planning of Multiple Mobile Robots, Proc. IROS '92, 1761/1768 (1992).
- 3) Asama, H., Ozaki, K., Itakura, H., Matsumoto, A., Ishida, Y., Endo, I.: Collision Avoidance among Multiple Mobile Robots Based on Rules and Communication, Proc. IROS '91, 1215/1220 (1991).
- 4) Barrapuan, J., Langlois, B., Latombe, J.: Robot Motion Planning with Many Degrees of Freedom and Dynamic Constraints, Proc. 5th Int. Symp. Robotics Research, 435/444 (1989).
- 5) Buckley, S. J.: Fast Motion Planning for Multiple Moving Robots, Proc. 1989 IEEE Int. Conf. Robotics and Automat., 322/326 (1989).
- 6) Caloud, P., Choi, W., Latombe, J., Pape, C. L., Yim, M.: Indoor Automation with Many Mobile Robots, Proc. IROS '90, 67/72 (1990).
- 7) Carrori, L.: Unsupervised Path-Planning of Many Asynchronously Self-Moving Vehicles, Proc. IROS '91, 555/559 (1991).
- 8) Chen, C. L., Lee, S. G., McGillem, C. D.: Task Assignment and Load Balancing of Autonomous Vehicles in a Flexible Manufacturing System, Proc. 1987 IEEE Int. Conf. Robotics and Automat., 1033/1039 (1987).
- 9) Erdmann, M., Lozano-Perez, T.: On Multiple Moving Objects, Proc. 1986 IEEE Int. Conf. Robotics and Automat., 1419/1424 (1986).
- 10) Fujimura, K.: A Model of Reactive Planning for Multiple Mobile Agents, Proc. 1991 IEEE Int. Conf. Robotics and Automat., 1503/1509 (1991).
- 11) Freund, E., Hoyer, H.: Pathfinding in Multi-Robot Systems: Solution and Applications, Proc. 1986 IEEE Int. Conf. Robotics and Automat., 103/111

- (1986).
- 12) Grossman, D.D.: Traffic Control of Multiple Robot Vehicles, IEEE J. Robotics and Automat., 4, 5, 491/497 (1988).
  - 13) Gurewitz, E., Fox, G., Wong, Y.: Parallel Algorithm for One and Two-vehicle Navigation, Proc. IROS '90, 51/58 (1990).
  - 14) Hopcroft, J. E., Schwartz, J. T., Sharir, M.: On the Complexity of Motion Planning for Multiple Independent Objects; PSPACE-Hardness of the "Warehouse-man's Problem", Int. J. Robotics Research, 3, 4, 76/88 (1984).
  - 15) ISO/IEC 9506-1, Industrial automation systems-Manufacturing Message Specification-Part 3: Companion Standard for Robotics, First edition, 1990-10-15 (1990).
  - 16) Kant, K., Zucker, S.: Planning Collision-Free Trajectories in Time-Varying Environments: A Two-Level Hierarchy, Proc. 1988 IEEE Int. Robotics and Automat., 1644/1649 (1988).
  - 17) Khatib, O.: Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots, Int. J. Robotics Research, 5, 1, 90/98 (1986).
  - 18) Krogh, B. H., Thorpe, C. E.: Integrated Path Planning and Dynamic Steering Control for Autonomous Vehicles, Proc. 1986 IEEE Int. Conf. Robotics and Automat., 1664/1669 (1986).
  - 19) Lee, J., Bien, Z.: Collision-Free Trajectory Control for Multiple Robots Based on Neural Optimization Network, Robotica, 8, 3, 185/194 (1990).
  - 20) Liu, P., Fu, L.: Planning and Scheduling in a Flexible Manufacturing System Using a Dynamic Routing, Proc. 1990 IEEE Int. Conf. Robotics and Automat., 1584/1589 (1989).
  - 21) Liu, Y., Kuroda, S., Naniwa, T., Noborio, H., Arimoto, S.: A Practical Algorithm for Planning Collision-Free Coordinated Motion of Multiple Mobile Robots, Proc. 1989 IEEE Int. Conf. Robotics and Automat., 1427/1432 (1989).
  - 22) Noborio, H., Hashime, J.: A Feasible Collision-Free and Deadlock-Free Planning Algorithm in a Certain Workspace where Multiple Robots Move Flexibly, Proc. IROS '91, 1074/1079 (1991).
  - 23) Noreils, F. R.: Integrating Multi Robot Coordination in a Mobile-Robot Control System, Proc. IROS '90, 43/49 (1990).
  - 24) Noreils, F. R.: Coordinated Execution of Trajectories by Multiple Mobile Robots, Proc. IROS '91, 1061/1067 (1991).
  - 25) Ó'Dúnlaing, C., Sharir, M., Yap, C.: Retraction: A new Approach to Motion Planning, Proc. 15th ACM Symp. Theory and Computing, 207/220 (1983).
  - 26) Pape, C. L.: A Combination of Centralized and Distributed Methods for Multi-Agent Planning and Scheduling, Proc. 1990 IEEE Int. Conf. Robotics and Automat., 488/493 (1990).
  - 27) Parsons, D., Canny, J.: A Motion Planner for Multiple Mobile Robots, Proc. 1990 IEEE Int. Conf. Robotics and Automat., 8/13 (1990).
  - 28) Premvuti, S., Yuta, S.: Consideration on the Cooperation of Multiple Autonomous Mobile Robots, Proc. IROS '90, 59/63 (1990).
  - 29) Saito, M., Tsumura, T.: Collision Avoidance between Mobile Robots, Proc. IROS '89, 473/478 (1989).
  - 30) Saito, M., Tsumura, T.: Collision Free Motion Control of Multiple Mobile Robots on Path Network, Proc. IROS '91, 1068/1073 (1991).
  - 31) Schwartz, J. T., Sharir, M.: On the Piano Movers' Problem: II. General Techniques for Computing Topological Properties of Real Algebraic Manifolds, Advances in Applied Mathematics, 4, 298/351 (1983).
  - 32) Schwartz, J. T., Sharir, M.: On the Piano Movers' Problem: III. Coordinating the Motion of Several Independent Bodies: The Special Case of Circular Bodies Moving Amidst Polygonal Barriers, Int. J. Robotics Research, 2, 3, 46/75 (1983).
  - 33) Sharir, M.: Algorithmic Motion Planning in Robotics, Computer, March, 9/19 (1990).
  - 34) Sugihara, K., Suzuki, I.: Distributed Motion Coordination of Multiple Mobile Robots, Proc. 5th IEEE Int. Symp. Intelligent Contr. 1990, 1, 138/143 (1990).
  - 35) Tournassoud, P.: A Strategy for Obstacle Avoidance and Its Application to Multi-Robot Systems, Proc. 1986 IEEE Int. Conf. Robotics and Automat., 1224/1229 (1986).
  - 36) Tuijnman F.: Algorithms for the Avoidance of Collision between Autonomous Mobile Robots, Proc. IROS '88, 193/197 (1988).
  - 37) Yeung, D., Bekey, G. A.: A Decentralized Approach to the Motion Planning Problem, Proc. 1987 IEEE Int. Conf. Robotics and Automat., 1779/1784 (1987).
  - 38) Wang, P. K. C.: Dynamics of Interacting Multiple Autonomous Mobile Robots with Simple Navigation Strategies, Proc. IROS '88, 179/185 (1988).
  - 39) Wang, P. K. C.: Interaction Dynamics of Multiple Mobile Robots with Simple Navigation Strategies, J. Robotics Systems, 6, 1, 77/101 (1989).
  - 40) Wang, P. K. C.: Navigation Strategies for Multiple Autonomous Mobile Robots, Proc. IROS '89, 486/493 (1989).
  - 41) Wang, J.: Fully Distributed Traffic Control Strategies for Many-AGV Systems, Proc. IROS '91, 1199/1204 (1991).
  - 42) Warren, C. W.: Multiple Robot Path Coordination Using Artificial Potential Fields, Proc. 1990 IEEE Int. Conf. Robotics and Automat., 500/505 (1990).

新井 民夫 (Tamio ARAI)

1970年東京大学工学部精密機械工学科卒、1977年同大学院博士課程修了、工学博士。同年東京大学工学部精密機械工学科講師、助教を経て、1987年同学科教授、1979年8月より2ヶ年英国エディンバラ大学人工知能学科研究員。産業用ロボット言語の標準化活動を推進。自動組立、柔らかいロボットの制御、距離画像処理などの研究に従事。精密工学会、計測自動制御学会の会員、自動化推進協会会長。(日本ロボット学会正会員)

太田 順 (Jun OTA)

1965年2月19日生。1989年東京大学工学部大学院精密機械工学専攻修士課程修了。同年新日本製鐵(株)入社。1991年東京大学工学部助手。ロボットのプランニング、制御の研究に従事。

(日本ロボット学会正会員)