

知的データキャリアを用いた誘導情報の自律的獲得による 自律分散形移動ロボットの繰り返し搬送作業*

倉林大輔^{*1}, 浅間 一^{*1}, 嘉悦早人^{*2}
遠藤 勲^{*2}, 新井民夫^{*3}

Effective Iterative Transportation by Autonomous Mobile Robots which Obtain Information for Navigation by Intelligent Data Carriers

Daisuke KURABAYASHI, Hajime ASAMA^{*4}, Hayato KAETSU,
Isao ENDO and Tamio ARAI

^{**}The Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN),
Hirosawa 2-1, Wako-shi, Saitama, 351-0198 Japan

In this paper, we propose a device for cooperation of multiple autonomous mobile robots. A device which enables local communication, called "Intelligent Data Carrier (IDC)" is proposed. In this paper, we propose an algorithm to improve efficiency of iterative transportation tasks by autonomous mobile robots. An autonomous mobile robot gives name of its latest visited destination to an IDC which is located on a junction in a work area. An IDC summarizes the information from robots and tells a direction which it expects best way to a destination which a robot wants to go. By the proposed algorithm and system, mobile robots construct information of navigation and improve the efficiency of a task automatically. We verified the effect of the proposed algorithm by simulations and experiments.

Key Words: Moving Robot, Intelligent Equipment, Mechatronics and Robotics, Local Communication

1. 序 論

製造業へのロボット普及が進んだ今日、ロボット化が期待される作業は、工場のように整備された環境から、より一般的な環境でのものに移りつつある。とりわけ、人間の進入が好まれない、原子力施設内、災害現場、山林などにおける作業を自律的に達成するロボットシステムが期待されている。このために、より柔軟なロボットシステムを目指した研究が自律分散システム⁽¹⁾、創発システム⁽²⁾などを中心に行われてきた。

一般的な環境にロボットを適用する場合、その環境のモデルを生成する手間が大きな障壁となる。逆にいえば、詳細なモデルを用意しなくとも、自律的に最適な動作手順を獲得する、柔軟な適応能力を有するロボットシステムが必要である。

しかし、個々のロボットの情報獲得能力は限定されている。また、自律ロボットの行動範囲が広がり、台

数が増加すると、ロボット間の情報を集中管理することは困難となる。このため、環境を介した、ローカルな情報管理が必要となる。

これまでに、ロボット間の口コミ通信による情報伝達手法の解析⁽³⁾⁽⁴⁾、情報のブロードキャストによる動作効率の変化の解析⁽⁵⁾、単純化された小形群ロボット同士の通信による、領域探索行動の創発⁽⁶⁾など、ロボット同士の局所的な情報通信の研究が行われてきた。

これに対し、ロボット同士だけでなく、環境を介して情報を管理する手法の研究として、新井ら⁽⁷⁾⁽⁸⁾は領域中をランダムウォークするロボットによる分散地図生成手法を提案している。しかし、生成される地図の精度と入力情報の関係、生成される地図がロボットの動作効率向上にどのように寄与するかについては、明確にされていない。また、実際に情報を環境に蓄積し、管理するデバイスを実現した例はほとんど見られなかった。

本論文では、環境を介してローカルに情報を管理・蓄積可能とするデバイス、「知的データキャリア (Intelligent Data Carrier, IDC)」を開発する。自律移動ロボットによる繰り返し搬送作業に対し、IDCを適用する。自律的に目的地到達のための誘導情報を獲得し、搬送効率の向上を可能とするアルゴリズムを構築

* 原稿受付 1999年3月18日

^{*1} 正員、理化学研究所工学基礎研究部(〒351-0198 和光市広沢2-1)。

^{*2} 理化学研究所生化学システム研究室。

^{*3} 正員、東京大学大学院工学系研究科(〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)。

E-mail: dkura@riken.go.jp

する。シミュレーションおよび実験により、手法の有効性を示す。

2. 知的データキャリア (IDC)

著者らは、環境を介してローカルに情報を管理・蓄積可能とするデバイス、「知的データキャリア (Intelligent Data Carrier, IDC)」を開発した。IDC システムは、環境に設置する IDC と、ロボットに搭載される Reader/Writer から構成される。

この IDC を環境内のさまざまな場所 (壁, 床, 荷物等) に設置することで、IDC を環境に対する情報蓄積機構として用いることができる。また、IDC を搬送することで、ある IDC が不要となった場合、IDC を必要とするほかの場所へ移送することも可能である。この IDC システムを利用することで、ロボットは通信資源に負担をかけることなく、環境や搬送物から情報を得たり、逆に書き残したりすることができる。特定の局所領域について、環境を介した情報伝達が可能となるため、集中管理形態のように情報の内容と空間の位置を管理する必要がなく、情報管理の簡便化を図ることが可能となる (図 1)。

個々の IDC は、CPU およびメモリからなる情報処理部、通信部、電源をもつ。ロボットの処理系と Reader/Writer はシリアル通信 (RS-232 C) により接続される。Reader/Writer はロボットからの指令に基づいて IDC と通信を行い、IDC に対する情報の書き込み、IDC 内の情報の読み出しを行う。製作した IDC システムを図 2 に示す。

Reader/Writer と IDC 間の通信は、300, 320 MHz

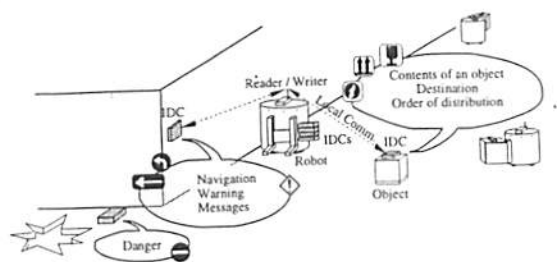
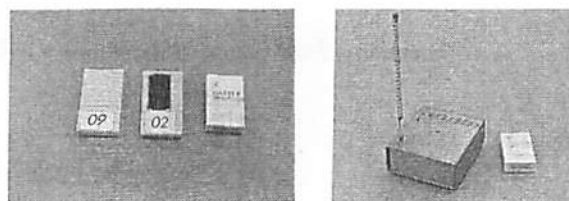


Fig. 1 The overview of the IDC system



(a) Tags (b) Reader/writer

Fig. 2 Photographs of the IDC system

の無線により行う。通信部は、通信距離が 1.5 m 以下の範囲となるよう構成されている。このように通信距離を限定することによって、局所的な部分以外のロボット、IDC には影響を与えない局所的な情報管理を実現している。IDC システムの諸元を表 1 に示す。製作した IDC は、環境内に長時間設置することを想定し、メモリ量を抑えて消費電力を低減させた。消費電力は最大で約 8 mA である。

3. 繰り返し搬送作業の問題設定

移動ロボットの基本的な応用形態として、柔軟な物体搬送システムが挙げられる。本論文では、ロボットの行う作業の典型例として取上げられる、繰り返し搬送作業⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾を対象とする。繰り返し搬送作業とは、作業領域内にいくつか存在する搬送目標地点の間を、繰り返し移動する行動を意味する。このような作業では、たとえ搬送目標地点間の距離が短くとも、ロボットが多数回往來するため、デッドレコニングによる自己位置推定は誤差の蓄積が大きく、利用が困難である。また、自律移動ロボットの環境認識性能は限定されたものであるため、センサのデータから、大域的に整合性のとれた地図情報を構築することが困難である。このことから、本論文における自律移動ロボットを以下のようにモデル化する。

- ・ロボットは地図をもたず、デッドレコニングによる位置推定を行わない。
- ・ロボットは、自分の絶対的な向きを知ることができる。
- ・ロボットは、進行可能な方向をセンサにより検知することができる。現在地が交差点あるいは目標地点であるかどうか判断することができる。
- ・ロボットは、自分の走行したステップ時間を記録することができる。

すなわち、ロボットは、世界座標系における位置を推定したり、行動判断に利用することはないが、自分の周囲の状況や、自分の向きを検知することができる。これは、赤外線センサ、超音波センサやジャイロ、コンパスなど、現実に利用可能なセンサを想定したも

Table 1 Specifications of the IDC system

Media	Electromagnetic wave
Frequency	300, 320 [MHz]
Memory	24 Bytes
Modulation	ON/OFF Key
Data speed	1200 [bps]
Power source	Li-ON battery (3.6V)
Size (tag)	100 x 65 x 25 [mm]
(reader/writer)	195 x 130 x 50 [mm]

のである。

この自律ロボットに対して、繰り返し搬送作業を以下のようにモデル化する。

- ・ロボットは目的地の番号のみを指示される。
- ・ロボットが指示された目標点に到達すると、新たな目標点がランダムに指示される。
- ・作業環境は、正方形のマス目と、その辺にあたる壁からなる迷路状領域とする(例:図3)。
- ・ロボットは、1ステップ時間あたり1マス分移動することができ、ロボット同士の干渉はない。

このようなモデル化の下、自律移動ロボットを一定ステップ時間動作させ、指定された目標に到達できた回数が多い、すなわち、到達に要した平均ステップ数が短いほど、作業が効率よく行われたと判断する。

4. IDCの誘導情報構造とロボットの動作アルゴリズム

4.1 誘導情報の構造と獲得 ロボットが「効率よく」作業を行うためには、交差点で正しい方向、すなわち、現在目標としている地点に最短で向かう方向に進むことが求められる。そこで、IDCを交差点に配置し、これに目標地点方向を示す誘導情報を構成することで、ロボットの作業効率を向上させる。

3章の仮定により、自律ロボットは世界座標系における位置情報を得ることができず、軌跡や地図を生成することができない。そのため、交差点におけるロボットの進入方向と、そのロボットが直前に立ち寄った目標地点名称を用いて、IDC内で交差点の分岐方向と目標地点名とを位相構造的に連結する。具体的には、ロボットが交差点に進入してきた方向に、そのロボットが直前に訪れた目標点が存在する、と仮定し、誘導情報を構築していく。

IDCのデータ構造を図4に示す。初期状態では、IDCには何も記録されていない。ロボットがIDCと

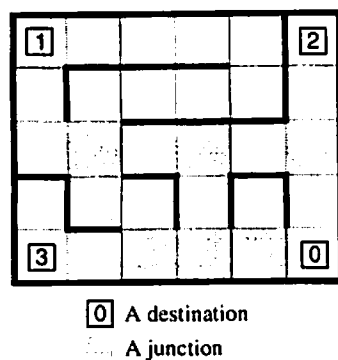


Fig. 3 An example of a work area

の交信範囲内に進入すると、ロボットがやってきた方向と、ロボットが直前に到達した目標点の番号を記録する。その際、ロボットが直前に到達した目標点から、このIDCと更新するまでに要したステップ時間を併せて記録する。

すでに、同一の方向に、その目標点の情報がある場合は、所要ステップ時間を比較する。すでに記録されているデータより、新たに得られた情報のステップ時間が短い場合、ステップ時間の記録を新たなものに置き換える。逆に、すでに記録されているステップ時間のほうが短かければ、新たに得られた情報は破棄する。図4の例では、W(西)方向から、目標点2番からステップ時間19でやってきたロボット、目標点1番からステップ時間8でやってきたロボットがいた、という記録を表している。

この記録に応じて進行方向を確率的に選択することで、環境自体にロボットの誘導を可能とする情報が自律的に形成される。この手法においては、すべてのロボットが「方向」を共有していることが必要である。

4.2 動作アルゴリズム 交差点において、IDCが存在しなければ、ロボットはランダムに進行方向を決定するほかない。これに対し、本手法では、IDCに誘導情報を蓄積し、これを利用することで、目的地到達に有利な方向へロボットを誘導する。

ロボットが進入した交差点にIDCが存在した場合、以下のように確率的に進路を選択する。

(1) あるロボットが、目的地*i*に向かおうとしている。交差点に、進行可能な方向が*m*方向にあるとする。このとき、IDC内の、方向*j*での、目的地*i*からのステップ時間の記録を t_{ij} と表すものとする。

(2) すべての方向*j*について、ステップ時間の記録データが存在しなければ、ロボットはランダムに方向を選択する。

(3) 一つ以上のデータが存在するとき、最大値 $t_{\max} = \max\{t_{ij}\}$ を求める。ただし、データが一つの場合、 $t_{\max} = 0$ とする。

(4) $s_{ij} = \|t_{\max} - t_{ij}\|$ とする。データが存在しない方向*j*については、 $s_{ij} = 0$ とする。

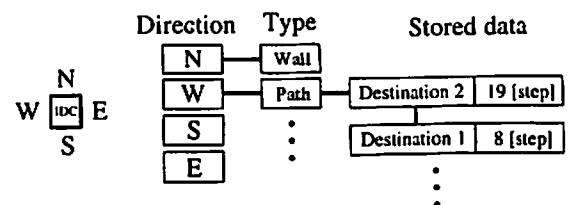


Fig. 4 Data structure in an IDC

(5) 方向 j を選択する確率 p_{ij} を、式(1)により決定する。

$$p_{ij} = (1 - p_{\min}) \frac{S_{ij}}{\sum_j^m S_{ij}} + \frac{p_{\min}}{m} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 p_{\min} は、たとえ IDC が存在してもロボットがランダムに進行方向決定を行う確率を表す。これは、ロボットの初期状態に依存して、好ましくない状態に IDC の誘導情報が固定されないようにするものである。

5. 提案手法の検証

5.1 シミュレーションによる検証 IDC を用いることにより、繰返し搬送作業の効率が自律的に向上すること、また複数ロボット間での協調が、明示的な通信や集中管理なしに自律的に行われることをシミュレーションにより示す。図3に示す領域において、交差点に IDC を設置した場合とそうでない場合について比較を行った。シミュレーションでは、ロボットの動作時間を 1000 ステップとし、この間の目標到達回数により、作業効率を評価する。なお、 $P_{\min} = 0.10$ とした。

はじめに、ロボットが1台の場合での、IDC 有無による搬送効率の比較を図5(a)に示す。IDC を用いて環境中に誘導情報を蓄積した場合、1000 ステップ後の到達目標数は76であった。これに対し、IDC を用いない場合は11であった。提案手法は、IDC を用いない場合の約6.9倍の作業効率を上げることが可能とした。

次いで、ロボット台数を4台に増加させた場合の作業効率変化を比較する。図5(b)は IDC を用いない場合、(c)が用いた場合である。ここでは、ロボット1台あたり平均の目標到達回数を比較する。IDC を用いない場合、ロボット台数が増加しても1台あたりの作業効率に変化はない。これに対し、IDC を用いることにより、単数の場合1000 ステップで76であった到達目標数が、4台での1台あたり平均では84.5となり、作業効率が約11%向上した。これは、複数のロボットが同時に作業を行うことで、単数の場合に比べ誘導情報の蓄積が高速に行われるためと考えられる。このことから、IDC を用いてロボット群による作業を行うことにより、ロボット平均の作業効率においても単体以上の能力を発揮することが可能になることが示された。

5.2 検証実験 本論文でのロボットの仮定が、ロボットシステムとして実現可能であり、提案手法が有効に機能することを示すため、自律移動ロボットを

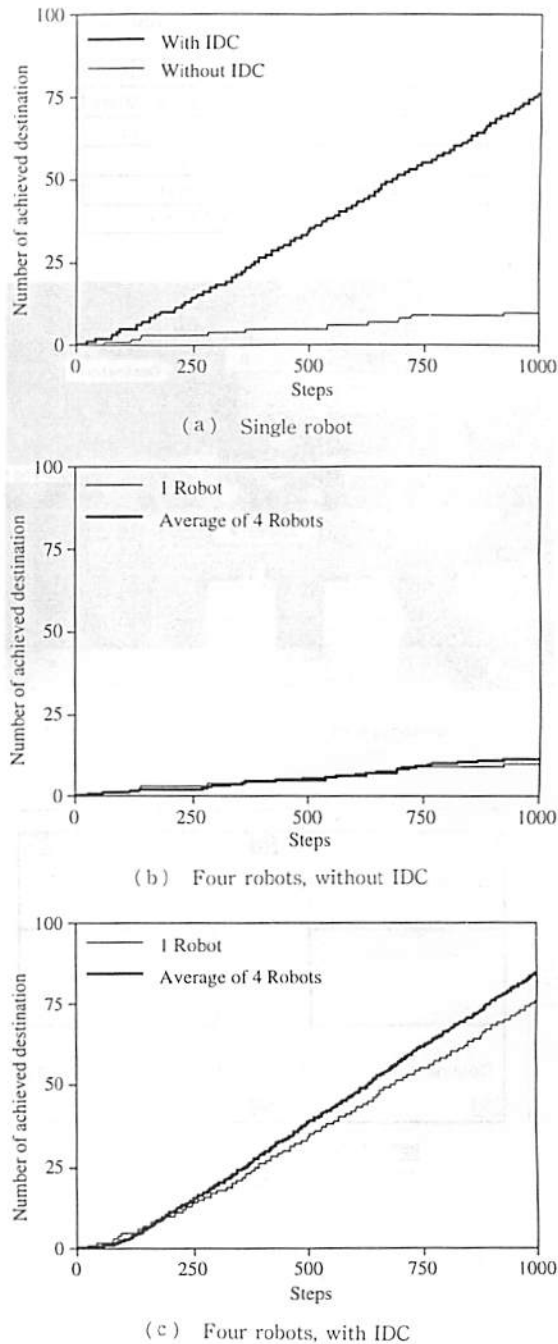


Fig. 5 Comparison of task execution

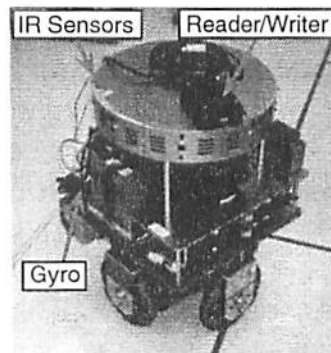
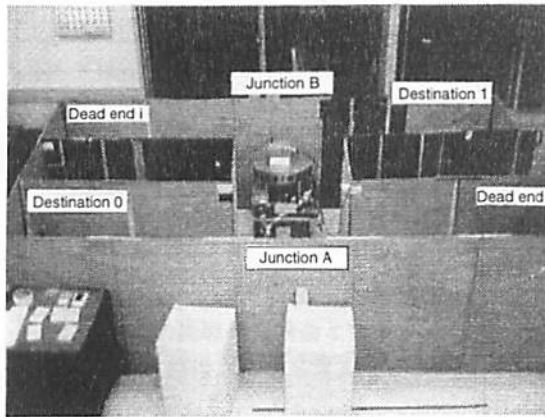


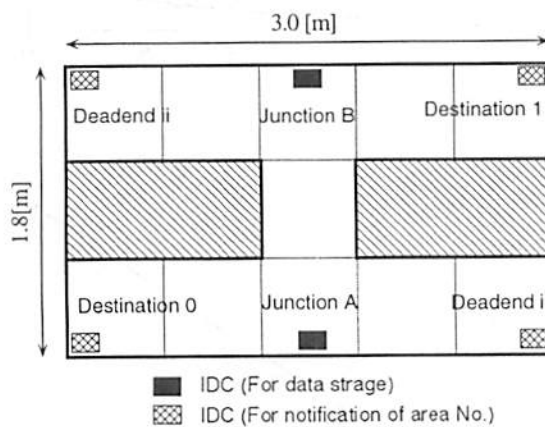
Fig. 6 The autonomous omni-directional robot

Table 2 Spec. of the autonomous mobile robot

Robot size	0.42 x 0.42 x 0.70 [m]
CPU	MMX Pentium 200 [MHz]
Sensor	8 IR sensors, a gyro
Sensing range (IR)	0.3 [m]
Running speed	0.04 [m/s]
Batteries	12V 5Ah x 4



(a) Photograph of the experimental environment

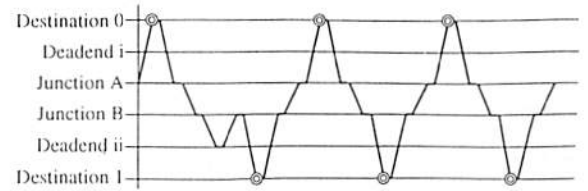


(b) Model of the experimental environment

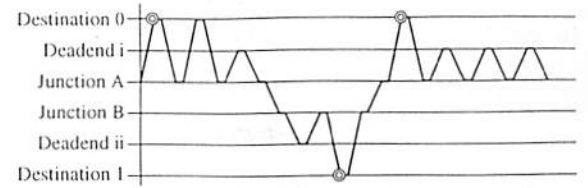
Fig. 7 The map for the experiments

用いた検証実験を行った。実験に用いたロボットを図6に示す。

移動ロボットは、理化学研究所で開発された、全方向移動機構を有する自律移動ロボット⁽¹¹⁾である(表2)。CPUにMMX Pentium 200 MHzを搭載し、16 MBytesのメモリを有する。ISAバスを介して各種I/Oボードを接続している。ロボット上部には、円周上に八つの赤外線センサ⁽¹²⁾が装備されている。また、ジャイロが搭載されており、自分の向きを知ることが可能となっている。電源として、12V 5Ahの鉛蓄電池を4個搭載している。ロボットは、リアルタイムOSであるVxWorksにより、スタンドアロンで制御されるが、無線Ethernetを介して、ホストコンピ



(a) With IDC



(b) Without IDC

Fig. 8 Comparison of transition of the robot

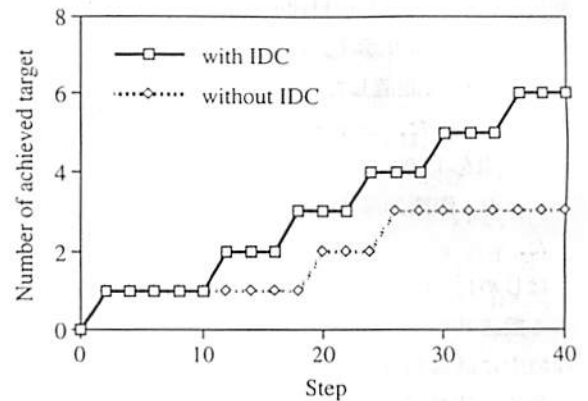


Fig. 9 Number of achieved target

ュータによるモニタリングも可能である。ロボットの大きさは、幅0.42 m、長さ0.42 m、高さ0.7 mである。本実験では、ロボットの走行速度を0.04 m/sと設定した。

実験環境は、図7に示すように、壁で囲まれた3.0×1.8 mの領域であり、2箇所の交差点が存在する。ロボットは、側部の赤外線センサを用い、反射的な動作によって常時壁面に沿うように走行する。壁面と相対的な位置関係を保つことで、走行誤差の蓄積による壁面への衝突を解消している。また、正面のセンサにより行き止まりを、両側面のセンサにより交差点を検出している。

この環境において、2箇所の交差点にIDCを設置した場合としない場合について、40ステップ分ロボットを動作された場合の目標到達数を比較した。なお、設定した目的地付近にもIDCを設置し、ロボットに対してそこが何番の目的地であることを提示する。ロボットの走行時間は約25分間であった。

ロボットの動作の様子を、ダイアグラム状に表したものを図8に示す。また、ステップ数と到達した目的

地数との関係を図9に示す。本実験では、目的地は2箇所のみなので、ロボットはこの2点間を往復する動作を繰り返す。図8において、◎で示されているのは、ロボットが与えられた目的地に到達したことを示している。IDCに誘導情報を蓄積する提案手法の場合、動作開始初期段階ではデータがないので、ロボットが誤った方向に移動することがあるが、一度両方の目的地に到達すると、その後は最短経路で往復を行い、40ステップ中に6回、目的地に到達した。一方、IDCを用いない場合、ロボットの交差点における進路選択は乱数に委ねられる。このため、40ステップ中に到達した目的地数は3であった。40ステップにおける比較において、提案手法によりIDCを利用することで、利用しない場合の倍の効率をあげることができたといえる。さらに時間が経過した場合、提案手法は誘導情報獲得に要する時間が相対的に短くなるため、効率の差はさらに大きく開くと考えられる。なお、実験では、シミュレーションに比べ短いステップ数で到達目標数が増大している。これは、実験環境がシミュレーションの場合と比べ、大きさが小さく、単純な形態をしているという環境側の要因と考えられる。

以上の結果より、提案手法により、自律移動ロボットが環境自体に誘導情報を蓄積し、繰り返し搬送作業の効率を向上させることが可能であること、知的データキャリアを用いて、実際のロボットシステムとして構築することが可能であり、有効性を発揮することが示された。

6. 結 論

本論文では、環境を介してローカルに情報を管理・蓄積可能とするデバイス、「知的データキャリア

(Intelligent Data Carrier, IDC)」を開発した。自律移動ロボットによる繰り返し搬送作業に対し、IDCを適用し、自律的に誘導情報を獲得し、搬送効率の向上を可能とするアルゴリズムを構築した。シミュレーションおよび実験により、手法の有効性を示した。

文 献

- (1) 伊藤正英, 自律分散システム, 文部省科学研究費補助金重点領域研究報告書, (1994), 1-508.
- (2) 北村新三, 創発的機能形成のシステム理論, 文部省科学研究費補助金重点領域研究報告書, (1999), 1-445.
- (3) 新井民夫・ほか2名, 複数移動ロボット系の局所的な通信に関する研究, 日本ロボット学会誌, 12-6(1994), 886-892.
- (4) 吉田英一・ほか4名, 多数移動ロボットシステムの最適な局所的通信範囲の設計, 日本ロボット学会誌, 15-3(1997), 394-401.
- (5) Balch, T. and Arkin, R. C., Communication in Reactive Multiagent Robotic Systems, *Autonomous Robots*, No. 1(1994), 27-52.
- (6) Ichikawa, S. and Hara, F., Experimental Characteristics of Multiple-Robots Behaviors in Communication Network Expansion and Object Fetching, *Distributed Autonomous Robotic Systems 2*(1996), 183-194.
- (7) 新井民夫・ほか2名, 自律分散型移動ロボット用環境情報システムの構築, 第10回日本ロボット学会学術講演会, (1992), 279-280.
- (8) 新井民夫・ほか2名, 移動ロボット用分散地図の生成と利用, 1992年精密工学会秋季大会, (1992), 967-968.
- (9) Drogoul, A. and Feber, J., From Tom Thumb to the Dockers: Some Experiments with Foraging Robots, *From Animals to Animals 2*, (1992), 451-459.
- (10) 吉村裕司・ほか5名, 群ロボットによる多数物体の繰り返し搬送計画, 日本ロボット学会誌, 16-4(1998), 499-507.
- (11) 浅間一・ほか5名, 3自由度独立駆動型全方向移動ロボットの開発, 日本ロボット学会誌, 14-2(1996), 249-254.
- (12) Arai, Y., ほか6名, Adaptive Behavior Acquisition of Collision Avoidance among Multiple Autonomous Mobile Robots, *Proc. Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, (1997), 1762-1767.