

# 知的データキャリアによる群ロボットの機能創発

藤井輝夫\*<sup>1</sup> 浅間 一\*<sup>2</sup> 倉林大輔\*<sup>2</sup>  
嘉悦早人\*<sup>3</sup> 遠藤 勲\*<sup>3</sup>

## Function Emergence in Multirobot Systems Utilizing Intelligent Data Carriers

Teruo Fujii\*<sup>1</sup>, Hajime Asama\*<sup>2</sup>, Daisuke Kurabayashi\*<sup>2</sup>,  
Hayato Kaetsu\*<sup>3</sup> and Isao Endo\*<sup>3</sup>

This paper describes the use of the newly developed system named "Intelligent Data Carrier System: IDC System" to execute several tasks by a multirobot system in a so-called "emergent" manner. In order to realize the function emergence in real systems, it is important to consider how to design and embed the system into a real form, rather than theoretical or numerical researches on an emergent behavior itself. Based on the discussion on the design frameworks of an "emergent system", we try to implement the IDC system along with an actual multirobot system which consists of omnidirectional mobile robots equipped with folk lifts for handling of the IDC units. The applicability of the IDC system is demonstrated through the experiments for two kinds of tasks; 1) object transportation, and 2) patrolling. It can be concluded that the IDC system is effectively used in the tasks appearing in the practical missions of multirobot systems which can be regarded as one of the physical (real) systems that could realize "function emergence".

**Key Words:** Intelligent Data Carrier, Multirobot System, Function Emergence

### 1. はじめに

筆者らは、創発的機能形成を具体的に実現する対象として、複数の移動ロボットによって構成される群ロボットシステムをとりあげ、環境およびオペレータと相互作用しながら学習、進化を通じて作業目的や環境条件に応じた知的行動を獲得しようとする群ロボットシステムの研究を進めてきた。実際に工学システムにおける機能創発を考える場合、1) 創発システムをどのようにとらえるか、どのように設計するかといった側面と、2) 具体的な創発メカニズムをソフトウェア、ハードウェアを含めてどのように実現するかといった実装上の側面を同時に考慮する必要が

ある[1].

創発システムの研究では、状況が変化したり予測できなくても、環境に適応した動作ができるような機能がどのような仕組みになっているのか、どうすればそれを実現できるのか、が興味の対象である[2]. ロボットを創発システムの具体的な題材として議論する場合、その構造のどこまでを創発する部分と考えるかによって、

- 1) レベル1：情報処理機構の創発
- 2) レベル2：制御システムも含めた創発
- 3) レベル3：物理的機構も含めた創発

の三つのレベルを考えることができる[3]. 群ロボットシステムを考える場合、例えばロボットのために整備した作業環境までも含めたシステム全体を設計対象ととらえれば、以下のように創発のレベルの解釈が可能である。すなわち、ロボットが参照する標識や通信回線などを設置し、群ロボット間でやりとりする情報などについても、あらかじめ設計した上で、ロボットにどのような動作をさせればシステム全体として創発的にふるまうかという議論がレベル1である。また、特定の情報に対して、ロボットが参照すべき標識や各種の通信や表示などの内容を固定的なものにせず、その物理的な配置のみをあらかじめ設計

原稿受付 1998年6月4日

\*<sup>1</sup> 東京大学生産技術研究所

\*<sup>2</sup> 理化学研究所工学基礎研究部

\*<sup>3</sup> 理化学研究所生化学システム研究室

\*<sup>1</sup> Institute of Industrial Science, University of Tokyo

\*<sup>2</sup> Department of Research Fundamentals Technology, The Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN)

\*<sup>3</sup> Biochemical Systems Laboratory, The Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN)

した上で、創発的な挙動を実現しようとするれば、これはレベル2にあたりと考えられる。さらにインフラストラクチャの物理的な配置や動作そのものも含めて、ロボットとの情報のやりとりによって積極的に変更することまで考慮すれば、レベル3の創発をも含めたシステム構成を考えることができる。

本論文では、群ロボットシステムにおける機能創発を柔軟に行うための具体的なハードウェアとして、ローカルな情報管理のためのデバイスである“知的データキャリア (Intelligent Data Carriers: IDCs)” [4] [5]を導入し、具体的作業への応用可能性について検討を行う。はじめにIDCシステムの概要について述べた後に、群ロボットによる荷物搬送作業ならびに環境探索作業を取り上げ、IDCを用いた機能創発の方法を示すと同時に実ロボットを用いた実験を通じてその実現可能性を検討する。

## 2. IDCシステムの開発

群ロボットシステムにおけるロボット相互の情報のやり取りについては、何らかの通信手段を用いてブロードキャストによって行う方法が普通であるが、この場合、システム内のロボットの数が増えるに従って、グローバルな通信に必要な容量が膨大なものとなる。一般に群ロボットシステムのミッションにおいて高度に知的な機能が必要となる局面は、ほとんどの場合特定の物や場所などの局所的な状況であり、こうした局面に関する情報や経験についても局所的に蓄積されていけば十分である。例えば、プラントのメンテナンスを想定するとき、特定の機器のメンテナンス履歴やその方法などの情報は、各ロボットがそれぞれ持ち歩くよりは、その機器の周辺に置いておくことが望ましい。すなわち局所的に情報を蓄積ことができ、かつその場所に達したロボットがアクセス可能なデバイスを考えることにより、グローバルな通信のための資源を圧迫することなく必要な情報をやりとりすることができる。そのような局所的な情報の蓄積、通信および処理を行う具体的なデバイスとして筆者らはインテリジェントデータキャリアの開発を進めている[3][4]。IDCはロボットによって持ち運び可能なデータストレージであり、局所的通信によってデー

タを読み書きすることができるとともに、搭載しているCPUによって内部で情報処理を行うことが可能なデバイスである。特定の場所や物にIDCを取りつけることは、その場所や物をエージェント化することに対応しており、ロボットはIDCによって作業エリアの情報環境を積極的に作り替えることができる。前章での議論によれば、すなわちIDCを用いることにより、原理的にはレベル3の創発が実現可能である。

### 2.1 IDCシステムの概要

IDCシステムはFig.1に示すように、環境中に設置されるデバイスであるIDCと局所的通信を行うためにロボットに搭載されるReader/Writerとからなる。IDCは環境内の場所や物に配置され、電源節約のため通常は通信を行わない状態 (sleep mode) になっており、Reader/Writerがある特定の通信可能範囲に入ると通信が開始され、データの読み出しおよび書き込みが可能となる。なお現状では、Reader/Writerからの通信開始要求に対して最初に応答したIDCとの間のみ通信が成立するいわゆるコンテンツン方式を採用することによって、複数のIDCが通信可能範囲に存在する状況に対処している。

### 2.2 IDCの構成と諸元

IDCはFig.2に示すように、「無線通信部 (Communication Unit)」「情報処理部 (Data Processing Unit)」および「電源部」

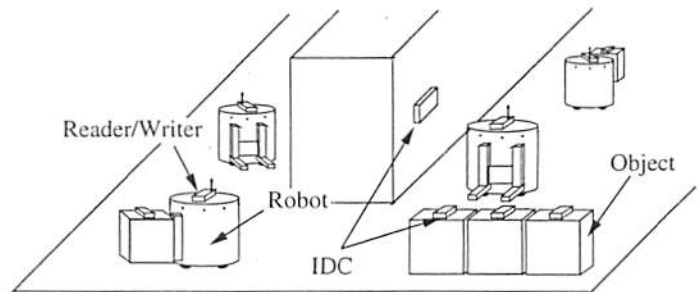


Fig.1 The concept of the IDC system

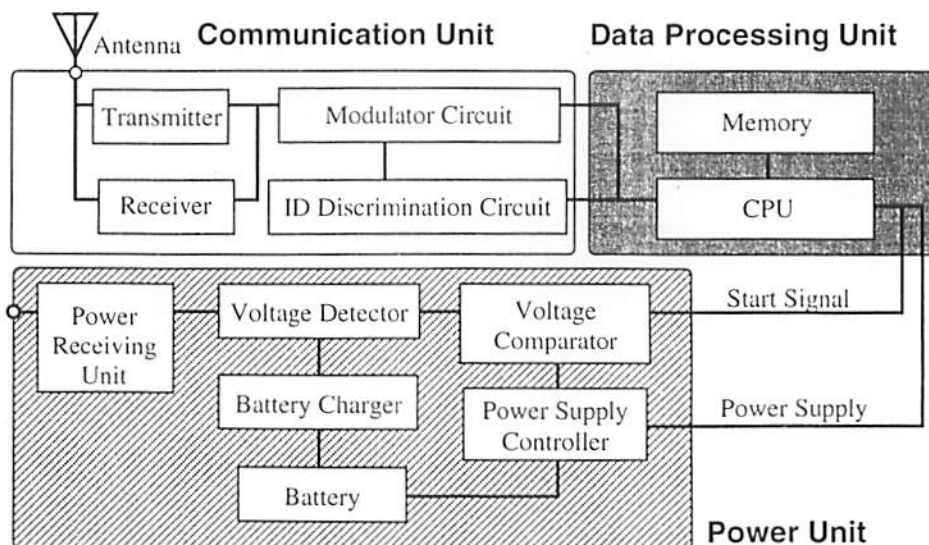


Fig.2 Schematic circuitry of the intelligent data carrier

Table 1 Specifications of the IDC

Media	Electromagnetic Wave
Frequency	90MHz
Modulation	FM
Data Rate	9600bps
Range	1m
Intensity	<10mW
Power Supply	DC5V
CPU	z80 class
Memory	32 Kbyte

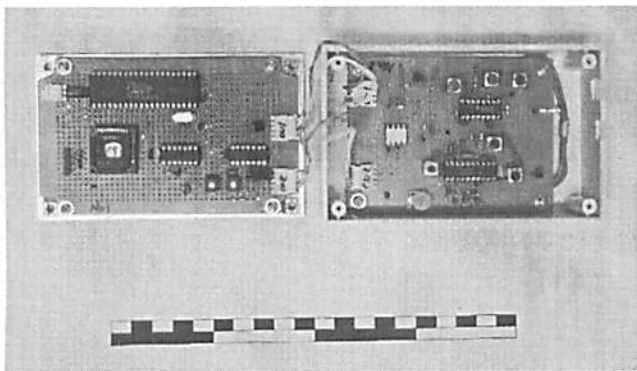


Fig.3 A prototype of the IDC

(Power Unit)の三つの部分から構成される。無線通信部は、FM変調された電磁波を用いて、データの送受を行う。情報処理部は受信したデータを解釈し、情報をメモリに蓄積したり、逆にメモリから情報を取り出したりすると同時に、特定のプログラムを実行することによって、新たな情報を作り出すこともできる。電源部は、太陽電池、あるいはロボットからの電磁放射などの非接触手段により供給された電池を二次電池に蓄積する構成を最終目標とするが、現段階においては、乾電池による駆動方法をとっている。なお、ロボット側に装備するReader/Writerは、Fig.2の構成から電源部分を取り外したもので、電源供給と制御についてはロボット側から有線で行う。Table1に試作第一号機の諸元を、Fig.3にその外観を示す。

### 2.3 通信性能の確認

ローカルに限定した通信が可能かどうかを検証するために、Reader/WriterとIDCとの間の距離を変化させながらデータ送信を行い、受信成功率の変化を測定した。Fig.4の結果は、IDCのハウジングとなっている箱の長軸と、同じくReader/Writerの箱の長軸を描いた上で、その間の距離を0 [cm]から10 [cm]おきに徐々に遠ざけながら、通信確立動作を各100回ずつ行い、その成功率を記録したものである。その結果、0 [m]から1 [m]の間では100%通信に成功しており、1.25 [m]を越えるあたりから急速に成功率が低くなっている。これにより、当初の目的である通信の局所性が確認された。

### 2.4 IDCユニットの製作

IDCを用いて具体的実験を行うためのプラットフォームとし

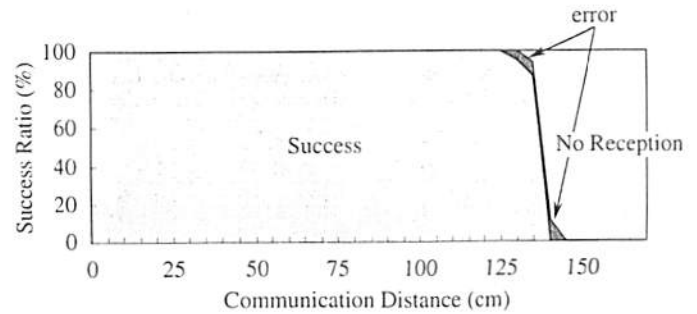


Fig.4 Communication characteristics of the IDC

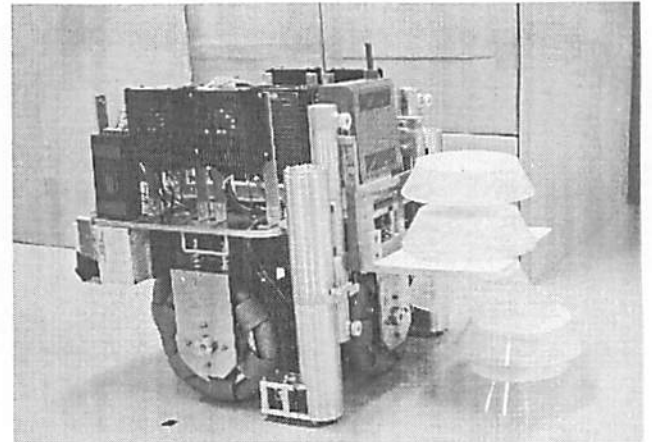


Fig.5 The omnidirectional mobile robot

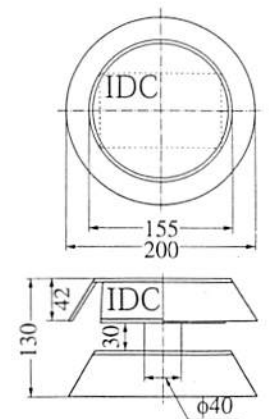


Fig.6 Design of the IDC unit

て、Fig.5に示すようなフォークリフトを搭載した全方向移動ロボット[6]からなる群ロボットシステムを考える。フォークによって配置したり回収したりという作業が可能となるように、Fig.6に示すようなキノコ型のカバーをIDCに取り付けたものをIDCユニットと呼ぶ。キノコ型IDCユニットは、上下二つの傘を持つことにより、複数のユニットを重ねて運ぶことができる。IDCは上の傘の内部に格納される。これにより、Fig.7に示すようにロボットがIDCを拾い上げたり、必要な場所に置いたりすることが可能となる。すなわち、三つに重ねたIDCユニットのうちの一つを床面上に置く際には、1) フォークをIDCユニット

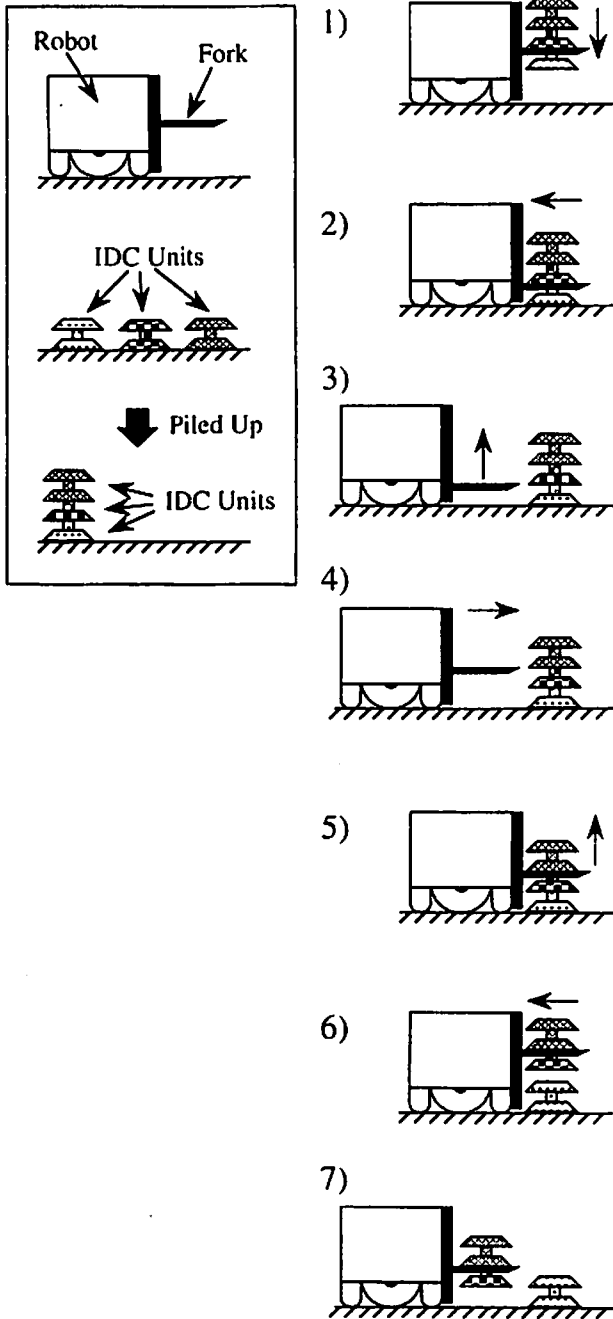


Fig.7 Handling method of the IDC units

が床面につくまで下げ、2) フォークをはずしてロボットが後退し、3) フォークを持ち上げ、4) 一つ上のユニットの傘の間に差し込み、5) 上の二つの IDC ユニットを持ち上げ、6) 一番下の IDC ユニットを残して、7) 立ち去るという手順をとる。また、床に置かれた IDC ユニットの回収する場合には、まず7) 目的の IDC ユニットに接近し、6) 床面上の IDC ユニットが手持ちの IDC ユニットに重なる位置まで前進し、5) フォークを下げて両者を重ね、4) いったんフォークを引き抜き、3) フォークを一つ下のユニットの傘の位置まで下げ、2) ロボットが前進してフォークを差し込み、1) フォークを持ち上げるという手順となる。

### 3. IDC の実作業への適用

群ロボットシステムにおける IDC の具体的な応用例として、荷物搬送作業、環境探索作業を取り上げ、これらの作業において必要となるローカルな情報を IDC に持たせることにより、効率良く作業が行えることを示す。

#### 3.1 荷物搬送作業

群ロボットによる協調作業の典型的な例として、環境内に随時運び込まれる荷物を目的位置へ運んで整理する作業が考えられる。複数のロボットが並列分散的に搬送作業を行うことによって効率が上がることが期待されるが、荷物によって大きさや重量あるいは目的位置が異なるケースを想定すると、あらかじめすべての荷物に関する情報が各ロボットに与えられていないかぎり効率よく作業を進めることができない。また、作業の途中で想定されていない荷物が加わった場合には、これに対応することは困難である。このような問題に対し、Fig.1 に示した IDC システムの概念によれば、荷物に IDC を載せ、その中に荷物の属性、目的位置、作業状況などの荷物固有の情報を書き込むことによって、ロボットはあらかじめ荷物に関する情報を与えられていなくとも、作業対象とする荷物そのものから作業に必要な情報を得ることができる。すなわち、IDC を用いることにより、ロボットは並列分散的な動作が可能となり、また、全体を統括しないにもかかわらず、群ロボットシステム全体としては、荷物搬送作業という特定の機能を実現（創発）しうる。

##### (1) 荷物搬送のシナリオ

以上の議論をふまえ、群ロボットによる荷物搬送作業に IDC を適用する際には、以下のようなデータを IDC に書き込むことが想定される。

- 1) 荷物の ID
- 2) 現在位置
- 3) 目的位置
- 4) 重量、形状など荷物の属性データ
- 5) 作業状況（搬送前／搬送済）

これらのデータを荷物に持たせれば、以下のような作業のシナリオを考えることができる（Fig.8 参照）。

- 1) ロボット（図中■）は作業環境内の巡回軌道に沿って、ID を探しながら移動を続ける。
- 2) 荷物（図中●）の近傍にさしかかると、IDC との通信が接続され、荷物に関する情報を読みとる。
- 3) 荷物が搬送済みでなければ、荷物の属性、現在位置などを参照して、荷物を把持する。
- 4) 目的位置データに従って、荷物を搬送する。
- 5) 目的位置（図中○）に達したら、搬送済を示す情報を IDC に書き込んで、再び巡回軌道に戻る。

##### (2) 荷物搬送のシミュレーション

前節に述べたシナリオに従い、複数のロボットによる荷物搬送作業の実現可能性を確認するため、計算機シミュレーションを行った。その結果を Fig.9 に示す。Fig.9 では 3 台のロボット A、B、C がそれぞれ□で表される位置からスタート地点として巡回軌道に沿って移動し、まず○で表される荷物 1~3 について、ロボット A は荷物 1 を、ロボット B は荷物 2 をロボット C は荷物 3

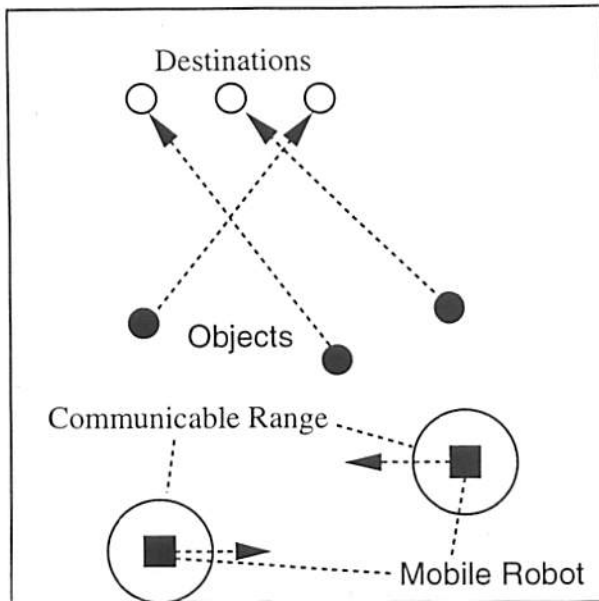


Fig.8 Object Transportation Task

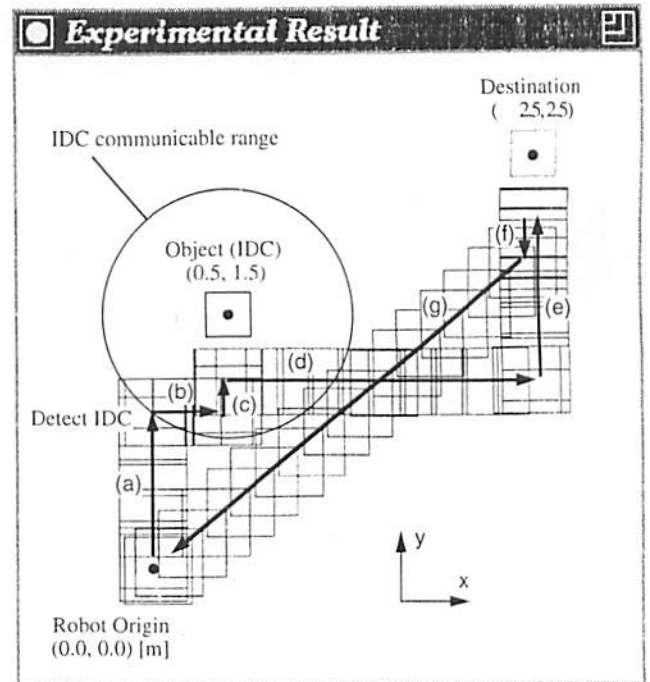


Fig.10 Experimental Results of Object Transportation

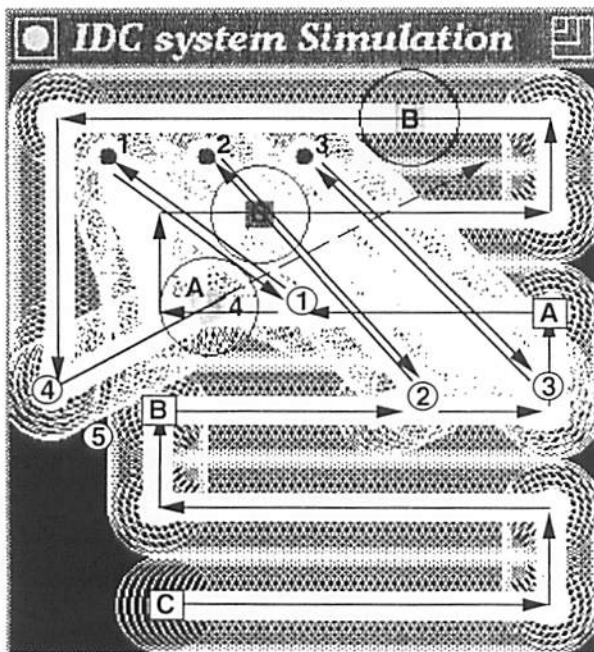


Fig.9 The results of numerical simulation

を発見して、目的位置まで搬送していることを示している。さらにロボットAは後から軌道上に置かれた荷物4を発見し、目的位置に向かうところである。以上により、IDCを用いれば、上に述べたシナリオに従って、並列分散的に荷物が搬送できることが確認された。

### (3) 荷物搬送の実験

さらに実環境において、ロボットがIDCから情報を読みとることによって荷物の搬送ができることを確かめるために、全方向移動ロボット[6]を用いて荷物搬送の実験を行った。その結果をFig.10に示す。実験では、(a)まずロボットは(0.0, 0.0)の位置か

らスタートして巡回軌道上をY方向に進む。荷物に取り付けられたIDCの通信可能範囲に入ると、IDCと通信を行い、その現在位置を獲得して、アプローチする(b)。さらにフォークを荷物の下に挿入して荷物を持ち上げ(c)、目的位置に向けてまずX方向に(d)、次にY方向に(e)移動する。目的位置に到達すると荷物を下ろしてからフォークを引き抜き(f)、元の軌道に戻る(g)。本実験により、IDCに書き込まれた情報を使うことにより、以上のような一連の荷物搬送動作が可能であることが確認された。

### 3.2 環境探索作業への適用

群ロボットシステムを用いたもう一つの作業例として、屋内の直行した廊下で構成される通路環境における探索作業を考える。これは、ビル内の通路環境など人工的環境における巡回点検、警備作業への応用につながる作業例で、複数のロボットが手分けして、環境内に変化がないかどうかを確かめながら、効率よく全体を網羅することが求められる。一般にこうした作業を行う場合、環境全体のマップを中央で集中管理し、それぞれのロボットに配布すると同時に、作業中に各ロボットが獲得した最新情報をそのマップに加えていく方法がとられる。この場合、すべてのロボットがマップを持ち歩く必要がある上に、情報が更新されるごとに、すべてのロボットにそれを伝えなければならず、通信に対する負荷が非常に大きくなる。これに対して、環境内にIDCをあらかじめ設置しておき、付近の情報をその中に蓄積する方法をとれば、各ロボットは環境マップをすべて持ち歩くことなく、IDCから随時ローカルな情報を獲得することによって、作業が遂行できる。作業中に新たに獲得しうる情報は、一般に場所に依存したローカルな情報であり、IDCに書き込むことによって、他のロボットにもその内容を伝えることが可能である。

#### (1) 環境探索作業のシナリオ

以上のような議論をふまえて、例えばFig.11に示すような環境内において複数のロボットによって探索作業を行うことを考え

る。環境内の主要な分岐点には IDC をあらかじめ設置するものとし、IDC にはロボットに搭載されたセンサによって得られる情報をもとに、以下のようなデータを蓄積する。

- 1) 分岐方向 (North, West, South, East)
- 2) 通路状態 (Path, Wall, Deadend)
- 3) 探索作業状況 (Not Yet, Searching, End)

各ロボットは分岐点に設置されている IDC を発見すると、その中のデータを参照し、“Not Yet”の作業状況となっている方向があれば、その方向に進む。“Not Yet”の状況が一つもない場合には、“Searching”の方向に進むものとする。また、“Not Yet”の方向が二つ以上あるときには、例えば反時計回りの順番で、進む方向を決定すればよい。IDC に書き込まれたわずかな情報と簡単なアルゴリズムを用いるだけで、複数のロボットによって環境内を効率よく探索することができる。すなわち、この例についても荷物搬送作業と同様、IDC を用いることにより、各ロボットは並列

分散的に動作することができるようになり、また、全体を統括しないにもかかわらず、群ロボットシステム全体としては、環境探索という特定の機能を実現（創発）することが可能である。

(2) 環境探索の実験

以上のようなシナリオに基づいて、ロボットが IDC との間で情報を読み書きすることによって環境探索作業ができることを確かめるために、前節と同様に全方向移動ロボット[6]を用いた環境探索の実験を行った。実験では、Fig.12 に示すような環境を想定し、入口 (Entrance) から複数のロボットが順次環境内へ進入し、IDC の情報に基づいて、環境内を移動し出口 (Exit) から出るという過程を繰り返し、最終的に環境内の全通路をロボットがくまなく通過することを目的とする。ロボットは障害物の有無を検知するための赤外線センサシステム (LOCISS)[7]を搭載しており、各分岐方向の通路状態を知ることができる。実験の結果は、Fig.13 に示すように、まず1台目のロボットが環境内に入り、N および S の方向について、Wall と Path であることを確認し、そ

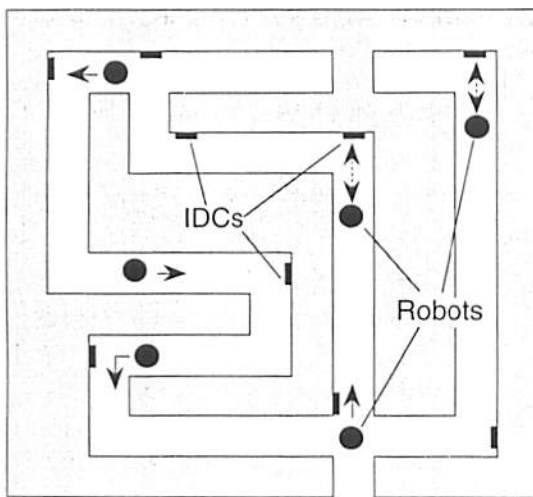


Fig.11 Patrolling Task in the Corridor Environment

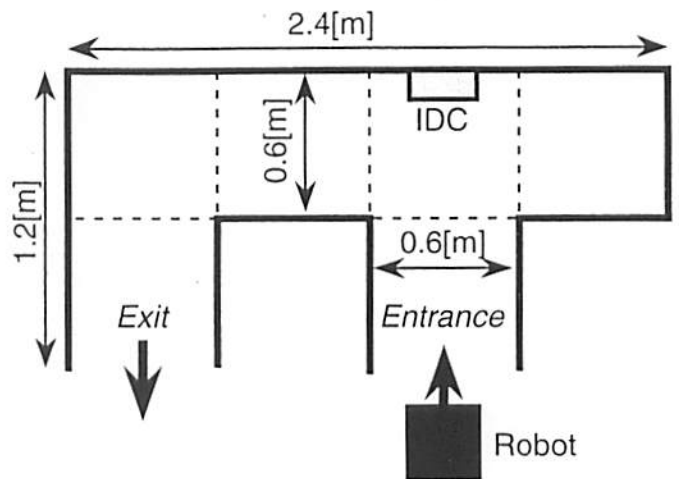


Fig.12 The experimental setup for patrolling tasks

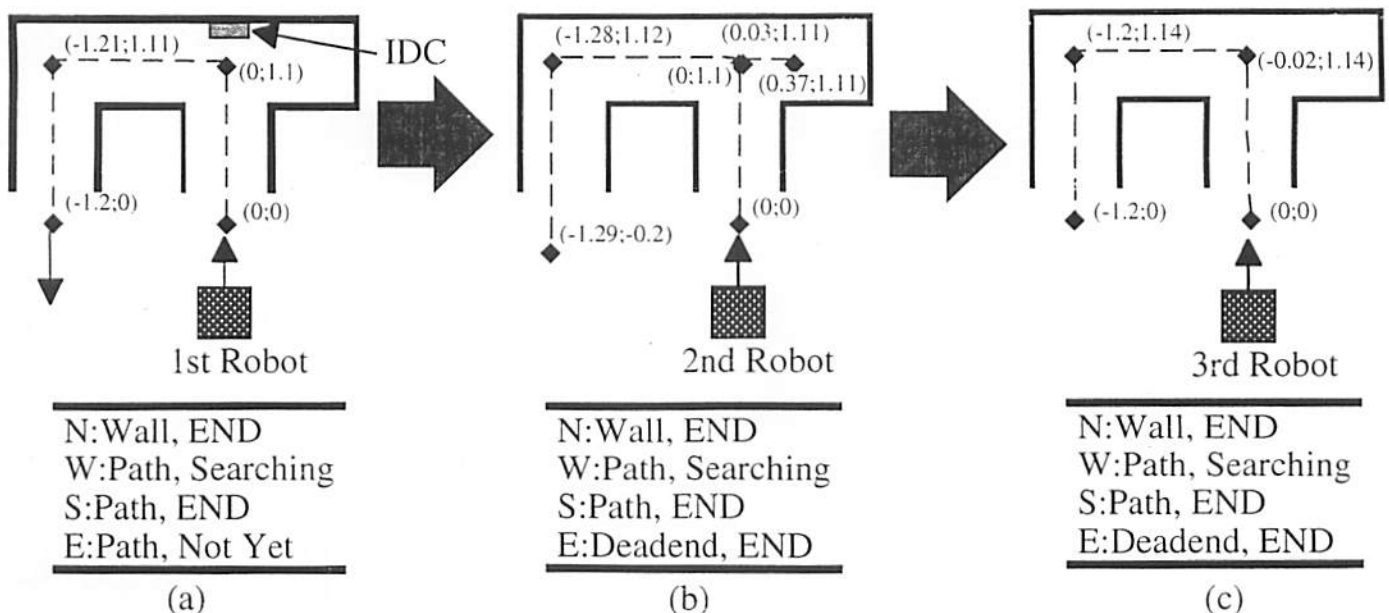


Fig.13 Experimental results of patrolling task in the corridor environment

の情報をIDCに書き込む (Fig.13 (a)). 2台目のロボットは、進入後IDCの情報に基づいて、“Not Yet”の作業状態になっているE方向へ進み、Deadendであることを発見して、これをIDCに書き込む (Fig.13 (b)). 3台目以後のロボットはIDCに書き込まれたE方向の情報を考慮して、作業状況がSearchingとなっているW方向へ進むことになる (Fig.13 (c)). 以上のように、ロボットが新たに発見した情報をIDCに書き込んだり、IDCから読み出した情報を使うことにより、一連の環境探索作業の実行が可能であることが確認された。

#### 4. おわりに

本稿では、群ロボットシステムにおいてローカルな情報からシステム全体としての機能を創発するための具体的デバイスとして、インテリジェントデータキャリア (IDC) について述べ、その実作業への応用について議論した。具体的作業事例として、荷物搬送作業および環境探索作業を取り上げ、実験によってそれらの機能創発が可能であることを確認した。これらの事例はいずれも、いわゆる「創発システム」[2]を、あらかじめ明示的に意識してインプリメントしたたものではないが、システム全体を創発的なものとするためには(レベル3)、少なくとも「モノ」として構造を変えることができるような物理的実体を意識することが必要で

ある。本論文における議論によれば、IDCを応用した群ロボットシステムは、そのような物理的実体の実現形態として有望なシステムの一つであると考えられる。

最後に、本研究の機会を与えていただいた文部省科学研究費補助金重点領域研究「創発システム」関係各位に深甚なる感謝の意を表す。

#### 参考文献

- [1] 藤井輝夫, 浅間一: “群ロボットシステムにおける創発の実現”, 計測と制御, vol.35-7, pp.545-548, 1996.
- [2] 創発システム公開シンポジウム資料, 長津田, 1997.
- [3] 浅間一, 藤井輝夫: “ロボットの創発性に関する一考察”, 第3回創発システムシンポジウム資料, 諏訪, pp.29-40, 1997.
- [4] H. Asama, et al.: “Distributed Task Processing by a Multiple Autonomous Robot System using an Intelligent Data Carrier System,” Proc. WAC '96, Volume 3, TSI Press Series, pp.23-28, 1996.
- [5] T. Fujii, et al.: “Intelligent Data Carrier System for Cooperative Behaviors Emerged among Collective Robots,” Proc. IEEE SMC'97, Orlando FL, pp.299-304, 1997.
- [6] H. Asama, et al.: “Mutual Transportation of Cooperative Mobile Robots Using Forklift Mechanisms,” Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation '96, Minneapolis MN, pp.1754-1759, 1996.
- [7] S. Suzuki, et al.: “An Infra-Red Sensory System with Local Communication for Cooperative Multiple Mobile Robots,” Proc. IROS'95, Pittsburgh, PA, pp.2091-2096, 1995.



藤井輝夫 (Teruo Fujii)

1964年4月5日生。1988年東京大学工学部船舶工学科卒業。1991年～1993年日本学術振興会特別研究員。1993年東京大学大学院博士課程修了, 博士(工学)。同年, 東京大学生産技術研究所客員助教授。1994年同助教授, 1995年より理化学研究所生化学システム研究室勤務, 1999年より東京大学生産技術研究所海中工学研究センター助教授。生化学および生物学のためのマイクロシステム, 自律分散型ロボットシステム, モジュラー型ロボットの研究開発に従事。AAAS, INNS, IEEE, 日本生物物理学会, 日本造船学会などの会員。(日本ロボット学会正会員)



倉林大輔 (Daisuke Kurabayashi)

1970年9月15日生。1998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。現在, 理化学研究所研究基盤技術部基礎科学特別研究員。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。博士(工学)。精密工学会, IEEEの会員。(日本ロボット学会正会員)



遠藤 勲 (Isao Endo)

1940年8月14日生。1970年東京大学工学研究科博士課程修了。理化学研究所化学工学研究室勤務, 現在, 同主任研究員。1989年より埼玉大学理工学研究科客員教授兼任。生物工学, 特にバイオプロセスエンジニアリングの研究に従事, 1978年化学工学協会論文賞受賞, 1994年ヘルシンキ工科大学名誉工学博士, 1999年化学工学会学会賞受賞。ニューヨーク科学アカデミー, アメリカ化学工学会, アメリカ化学会, 化学工学会などの会員。(日本ロボット学会正会員)



浅間 一 (Hajime Asama)

1959年1月18日生。1984年東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。1986年理化学研究所化学工学研究室研究員補, 生化学システム研究室研究員, 前任研究員を経て, 現在工学基盤研究部副主任研究員。1999年埼玉大学大学院理工学研究科客員助教授。自律分散型ロボットシステム, 複数移動ロボットの協調, 群知能, ロボットによる保全技術, バイオプロセスの知能化技術の開発に従事。1995年日本機械学会ロボメック賞, 1996年日本機械学会ロボメカ講演会Best Poster賞, RoboCup-98 Japan Open人工知能学会賞(UTTORI United Team)等受賞。工学博士(東京大学)。Distributed Autonomous Robotic Systems(Springer-Verlag)の第1, 2巻の編者。IEEE, ニューヨーク科学アカデミー, 日本機械学会, 精密工学会などの会員。(日本ロボット学会正会員)



嘉悦早人 (Hayato Kaetsu)

1948年10月30日生。1971年東京理科大学中退。1971年理化学研究所同位元素研究室勤務, 1981年同化学工学研究室へ移籍。同位体分離, 分散型ロボットシステムの研究に従事, 専任技師として現在に至る。日本原子力学会, 日本機械学会, 精密工学会の会員。