学術論文

群ロボットシステムにおける群知能の発現特性に関する研究
—空間探索能力とその応用—

市川 純章* 原文 雄*

Characteristics on Swarm Intelligence Generated in Multi-Robot System
—Space Coverage Behavior and its Application—

Sumiaki Ichikawa* and Fumio Hara*

This paper deals with two fundamental evaluation of characteristics of swarm intelligence in multi-robot system. One is related to swarm intelligence emerged as an ability of space coverage behavior. The other is that as an ability of solving a simple maze. In general, a certain ability emerged only in multi-robot system is called 'swarm intelligence' and the multi-robot system is expected to consist of many robots with simple mechanical function and small intelligence. With respect to space coverage behavior generated by many robots equipped with locomotion function and obstacle avoidance intelligence, we investigate the characteristics of space coverage ratio with respect to two parameters; one is population size of multi-robot system and the other is diameter size of a single robot. We show that the effect of population size on the space coverage behavior is greater than the ratio of the population size increase, and that the effect of robot diameter is minor in the case of large population size of multi-robot system. In using the multi-robot system for the task to find the route in simple maze the multi-robot system can solve simple maze problem and we evaluate the ability of accomplishment of the task.

Key Words: Multi-Robot System, Swarm Intelligence, Space Coverage Ratio, Robot Population Effect, Mobile Robot

1. はじめに

現在、複数台のロボットを同時に動かし協調的な作業を行わせる研究が盛んである。複数台のロボットを使用し群ロボットシステムを構成する利点には次のようなものがある。ひとつにシステム全体での能力の増大である。すなわち、1台のロボットの持つ能力が、あるタスクを達成するために不足であっても、2台で運ぶことにより2倍の運搬能力が期待できるという発想である。この利点を逆に応用すればロボットの小型化を期待できる。つまり小型で能力に制限のあるロボットでも複数台用意することで、あるタスク処理が可能となると考えられている。Brooksは小型軽量化ロボットの利点として宇宙空間で作業を行うロボットの輸送を挙げている[1]。また川内らは1台のロボットが持てる情報の量に制限がある場合に、群ロボット間で情報を分散管理する方法[2]を提案している。第二の大きな利点としては、ロボットの台数が多くなることから、あるタスク処理に対してロボットの台数が冗長的になり耐故障性が増

すことが期待される。

しかし、これらの期待とは裏腹にロボットの台数が増えることに帰因して次のような問題も発生する。通路を移動するとき、相手のロボットを無視すれば互いに通路を通れなくなることが起こるだろう。これに関して油田らは相手ロボットのことを考えた行動計画を立てること[3]を提案している。また柴田らによって最適な移動計画をロボット全体で情報交換を行いながら決定する方法[4]、新井らによって個々のロボットに他のロボットへ追従する行動を取り入れた行動計画方法で多数のロボットを整然と移動させる方法[5]の研究が行われている。しかしこの様なロボットの協調的行動を行うには、他のロボットと互いに情報を交換したり、タイミングを合わせたりするといった、ロボット間でのコミュニケーションが必要となる。浅間らはそのコミュニケーションの具体的なシステムを提案し、実験的に検証している[6]。

こうした研究が進められる一方で、ロボットの機能が制限された小型のロボットに関する研究も行われている[7][8]が、そこではどれだけの機能や知能を与えたのか、あるいは必要となるのかといったことが明確に論じられず、漠然と「少ない機能」「簡単な機能、知能」とされることが多い。これはこの分野

原稿受付 1994年6月21日

*東京理科大学工学部

*Faculty of Engineering, Science University of Tokyo

で機能や知能の定量的な評価基準が確立されていないためであり、これらの定量的な評価を行うことが必要であろう。

このような現状にあって、筆者らは個々のロボットに与えられた知能や機能のみでは、そのロボット1台が単独で行動するときには発現しないが、複数台のロボットが集まり行動するときに新たに発現される知能に関して興味がある。これは「群知能」として群ロボットの行動に本質的に秘められている能力であると考えている。この群知能に関しては近年研究報告[9]がいくつかなされているが、その能力や発現条件等ははまだ十分に解明されていない。筆者らは、その群知能の能力と発現特性には1台のロボットが持つ機能と知能の量が影響をもっていると考えており、それらの量的関係とともに群知能の発現特性を明らかにすることを目指して研究を進めている。

本論文では1台のロボットに与える機能と知能についてできる限り簡単であり要素的なものを用いることから始める。これはあるタスクを達成させるために、複雑な機能や知能を与えた場合、結果としてロボットにどれだけの知能や機能が与えられたかは分かり難くなると考えているからである。また本論文では、自律移動ロボットの最も基本的行動と考えられる障害物回避の行動に着目する。このロボットの行動を壁で囲まれた平面空間で実行すると1台のときは壁を避け壁沿いに移動する行動をとるが、複数台数が行動すると移動が複雑になり、空間を網羅する行動が行われるようになる。この行動を群知能による空間探索行動としてとらえ、その能力の発現特性を空間探索度によりロボットの大きさ、ロボットの台数のパラメータからコンピュータシミュレーションを用いて解明し、その空間探索行動の応用として簡単な迷路を抜けるタスクを実行させたのでここに報告する。

2. ロボットのモデル

本論文で用いる1台のロボットが持つ機能、知能はできる限り要素的であり最小限と考えられるものを用いる。この前提に基づいてロボットの機能と知能を設定する。

2.1 ロボットの機能と知能の関係

本論文では、ロボットを「動作するとき外界から情報を得、外界へ行動を返すエージェント」と考えることにする。ロボットにとって外界からの情報が入力情報であり、外界に対してロボットが働きかける内容が出力情報であるとする。外界からの情報は、障害物が進行方向にあるといった、ロボットが置かれている外界の様々な状況を表す情報である。一方、ロボットの外界への行動は、「移動する」といったロボットが実際に行う行動である。

ロボットの「機能」は、外界からの情報をロボットへ取り込み、入力情報へと変換させること(sensor)およびロボットが外界へ働きかける情報を動作へ変換させること(actuator)であり、ロボットの「知能」は入力情報を出力情報へ変換させることと考える(Fig. 1)。また知能はロボットの行動を決定することから、ロボットの行動原理であるとも言える。

2.2 ロボットに与える機能

本論文で取り扱う1台のロボットには、入力機能として障害物の検知機能を与える。この入力機能はロボットのまわりの障

Fig. 1 Concept of a single robot system

Fig. 2 Structure of a single robot with 3 sensors

Table 1 Input function

	Situation	Input code
Object perception	None	0
	Right side	1
	Left side	2
	Front	3

Table 2 Output function

	Action	Output code
Loco-motion	Proceeding forward	0
	Left turning	1
	Right turning	2

害物の状況を検知するもので、Fig. 2のようにロボットの本体に配置する3つの障害物検知センサーによって、障害物の存在に関して次のように0～3の状態で表現する。すなわち0)「障害物がない」、障害物が1)「左前」、2)「右前」、3)「前面」にある、の計4つの状態を入力情報として得られるものとする。ただし、3つの障害物検知のセンサーに同時に複数の反応がある場合は3)「前面」と同等の入力情報とする(Table 1)。

またロボットの出力機能として移動機能を与える。この出力機能は、次のように0～2の状態で表現する。すなわち0)前進、1)左回転、2)右回転の3つの動作を行うことができるものとする(Table 2)。このロボットの移動動作は、単位時間(step)毎の単位動作からなるものとする。本論文ではロボットのこのような動きには動特性を考慮せず、前進の速度は $v=1$ [/step]、回転は左右それぞれ $\beta=0.1$ [rad/step]という一定量を与え、これらの仮定した動作量がどの単位時間でも即座に且つ確実に実行されるものと仮定する。

2.3 ロボットに与える知能

本論文で取り扱うロボットの行動は、障害物を回避しながら移動する行動である。この行動を実行する知能はロボットが前進を続ける行動を基本に、障害物を検知している場合に方向転

換を行うものである。すなわち方向転換の方向は、障害物を右前に検知したときは、左回転、左前に検知したときは右回転の動作を行い、前面に検知した場合、それまでに行った回転動作のうち一番最後に行った方向へ回転を行う。この動作の実現のためには、ロボットは知能として方向転換を行った場合の方向をひとつ記憶しておく必要がある。このため本論文のロボットの知能は、最後に行った回転方向を記憶することも含めるものとする。この記憶は次のような0, 1の2つの状態で表現される0)右回転, 1)左回転からなる。

2.4 ロボットの動作

ロボットの動作は単位時間(step)毎に行われるが、検知機能はロボットが置かれている状況を入力情報へ変換し、ロボットはこの情報を取得する。ロボットの知能はその状況の情報と記憶とに基づいた判断を行い、結果を出力情報として移動機能へ与える。その情報を受けた移動機能は与えられた動作を単位時間の間、維持する。すなわちロボットの知能は、入力情報と記憶とに対応する出力情報へ変換する動作を決定する。

3. シミュレーション実験の方法

前述の機能と知能を与えたロボットの動作をコンピュータを用いたシミュレーションで行う。シミュレーションでの時間は離散的に単位時間(step)が経過するものとし、ロボットに設定した各動作量(移動速度 v [step], 回転速度 β [rad/step])を単位時間毎に離散的に加算することでシミュレーションを実行する。

ところでロボットがセンサー以外の部分で何らかの障害物に接触するときを物理的衝突として扱い、次に述べる処理を行う。

3.1 物理的衝突の処理

シミュレーション中では、移動するロボットには2つの物理的接触が起こり得る。1つはロボットとロボット、もう1つはロボットと壁の接触である。シミュレーションプログラムの処理過程では、1台のロボットの移動処理を行う前の位置を「元の位置」とし、移動処理を終えた段階での位置を「仮の位置」として、これをすべてのロボットについて「仮の位置」を算出した後、各ロボットについて他のロボットや壁との接触状態を調べる。このときロボットが他のロボットや壁と幾何的な重なりが起こっている状態を物理的衝突として考える。本論文のシミュレーションではその処理負荷の軽減化のため、厳密な物理的衝突現象のシミュレーションではなく以下に説明する近似的な衝突処理を用いる。

i) ロボットとロボット

物理的衝突に対する処理はロボット毎に行い、その処理対象のロボットに衝突するロボットの台数に応じて次のように処理内容を変える。すなわちこの処理はロボットすべての「仮の位置」が決定した段階で行われ、1台のロボットの衝突が2台以上と起こるときは移動を行わず「元の位置」から動かないとする。衝突が1台の場合は Fig. 3 に示すように、処理対象のロボットと相手のロボットの中心を結ぶ線分 ab を考え、その垂直二等分線 cd を与える。処理対象のロボットの速度ベクトル v を線分 cd に投影した成分ベクトル v' を、処理対象のロボ

Fig. 3 Geometrical model for processing physical collision

ットの衝突処理後の速度ベクトルとして「元の位置 o 」から次のステップの移動先を計算し直して、新たな「仮の位置 o' 」とする。

ii) ロボットと壁

ロボットとロボットの物理的衝突の処理と同様で、処理対象のロボットの速度ベクトル v を衝突する壁の線分へ投影した成分ベクトル v' を求め、これを処理対象の衝突処理後の速度ベクトルとして「元の位置」から次のステップの移動先を計算し直して、新たな「仮の位置」とする。

特に対象のロボットが他のロボットと壁と同時に衝突する場合には、「仮の位置」は「元の位置」とし、移動が行えなかったものとする。

このようにすべてのロボットについて新たな「仮の位置」が決定した段階で再び幾何的の干渉を調べ、この再チェックの段階で再び干渉が起こったロボットについては「仮の位置」を「元の位置」へ戻すという処理をする。すべてのロボットに対して「仮の位置」が決定した段階で1 stepの終了とし次の step へ移る。

4. シミュレーション結果

4.1 ロボットの台数の効果に関する基本実験

4つの壁で囲まれた平面空間で障害物回避の行動を行う群ロボットのシミュレーションを実行した。ロボットの直径 D を10, 空間の大きさは1台のロボットの大きさを基準に 640×400 とする。ロボットの初期配置は、空間内へ位置、方向ともにランダムに行い、シミュレーションの開始と同時にすべてのロボットの移動を開始する。シミュレーション時間は1台のロボットが壁に沿って移動した場合に2周する時間にほぼ等しい4000 step とする。

シミュレーションにより得られたロボットの移動の軌跡の例を Fig. 4, 5 に図示する。図中の○はロボットの初期位置を表し、●は4000 step後の位置であり、その間の移動の軌跡を実線で示している。Fig. 4は1台のロボットの場合の移動の軌跡である。壁沿いの単調な移動となっている。Fig. 5はロボットの台数が20台の場合である。1台の場合に比べ複雑な移動経路をとり、特に空間の中央付近でも多くのロボットが通過していることがわかる。

このようにロボットの台数の違いにより、ロボットが異なった移動経路を示す要因は、ロボットの台数が1台のとき、ロボットにとって空間内の壁のみが障害物であり、これを回避して

Fig. 4 Trajectory of a single robot in 4000 steps

Fig. 5 Trajectories of 20 robots in 4000 steps

移動の様式が壁沿いになっているからである。ところがロボットの台数が増えてくると、互いの存在が移動の際の障害となり回避行動によるロボットの方向転換が頻繁に起こり、複雑な移動経路をとるようになる。

このシミュレーション結果より障害物回避行動を行うロボットには、その台数が多くなると移動経路の複雑さが増す傾向があることが示された。この複雑な移動行動は与えられた空間を網羅する動きとなることから、空間を探索する行動として考えることができ、ここに空間を網羅する探索行動の群知能が発現したといえるだろう。次節でこの空間探索行動の能力を評価する。

4.2 空間探索度

複数台のロボットシステムの障害物回避行動に発現する空間探索能力を以下に説明する空間探索度を用いて評価する。空間探索度 α は次のように算出する。シミュレーションに用いた空間をいくつかの要素空間に分割し、ロボットの中心位置が少しでも通過した要素空間を探索した空間として数え、その要素空間数 N の要素空間の総数 N_s に対する割合を空間探索度 α とする。

$$\alpha = \frac{N}{N_s}$$

α : 空間探索度

N : 探索した要素空間数

N_s : 要素空間の総数

ただし、空間の大きさに対して要素空間をどの程度の大きさにするかによって空間探索度の値は大きく影響を受ける。例えば非常に小さい要素空間を用いると空間探索度は低い値にとどまり、逆に大きくすればすぐに上がってしまうと考えられる。そこで本論文では直径 $D=10$ のロボットを基準として考えその半分程度である 4×4 大きさを持つ要素空間の大きさを目安として考え、この要素空間の大きさを用いて空間探索度を計量

Fig. 6 Space coverage ratio α plotted against robot diameter D at 4000 th time step Fig. 7 Space coverage ratio α plotted against robot diameter D at 16000 th time step

し、空間探索能力の評価を行った。

この空間探索能力は、ロボットが互いに障害物となることをきっかけとして発現する能力であると考えられるため、ロボットの台数 P 、ロボットの大きさ（直径） D をパラメータとして、これらが空間探索度に与える影響と空間探索度の時間的変化の度合いをコンピュータシミュレーションから調べた。各パラメータの組み合わせ毎に、ロボットの初期配置と移動方向をランダムに設定し、シミュレーションを 10 回ずつ行い、その空間探索度の平均値を求めて評価する。シミュレーションに用いるパラメータはロボットの台数を $P=1, 5, 10, 20, 40, 60, 80$ 、ロボットの大きさを直径 $D=3, 5, 10, 15, 20$ とし、また対象空間の大きさを 400×400 としてシミュレーションを行った。このとき総要素空間数 N_s は 10000 個である。

まずシミュレーション結果をロボットの大きさ D について比較検討する。Fig. 6 は 4000 step のとき、Fig. 7 は 16000 step のときの空間探索度 α をロボットの直径 D に対してロボットの台数をパラメータにして図示したものである。Fig. 6 ではロボットの台数が 10, 20 台のときにグラフは、ロボットの直径の増大にしたがって空間探索度もやや上がる傾向がみられるが、40, 80 台においては、直径 D が大きくなると空間探索度 α が減少する傾向にある。16000 step では空間探索度は 4000 step のときよりも当然大きくなっているが、直径 D に対する空間探索度の変化は 10 台以外ではほとんどみられない。ロボットが 20 台以上では空間探索度はほぼ飽和状態になっているとみられる。ロボットの台数が多く空間探索度が 1 に近いときにロボットの直径が大きくなった場合の空間探索度が減少する傾向は、ロボットの直径が大きくなることで対象空間の壁沿いの要素空間を幾何的に探索することができなくなるためである。

次にロボットの台数の効果について比較検討する。前述の結果よりロボットの大きさは空間探索度へそれほど大きな影響を示さないことから、コンピュータシミュレーション結果をロボ

Fig. 8 Space coverage ratio α in population size P ($D=10$) Fig. 9 Space coverage ratio α in time step standardized by population size

ットの直径が10の場合に注目し、ロボットの台数に対して同一シミュレーション時間の空間探索度を Fig. 8 に示す。Fig. 8 より台数の増加とともに空間探索度は増大することがわかる。また少ないロボットの台数では時間をかけても空間探索度が増大しにくいことがわかる。

ロボットの台数と空間探索度の時間的な増大の度合いについて注目する。80 台のロボットの時間推移を基準とし、その 1 step 時間に対して、40 台のときは 2 step、20 台のときは 4 step を対応させるというように台数比で時間を基準化して空間探索度の時間推移を調べる。Fig. 9 はロボットの直径 10、対象空間の大きさ 400×400 、ロボットの台数 $P=2, 5, 10, 20, 40, 80$ の場合において、ロボット 80 台のときのシミュレーション時間 5000 step に相当するまで時間の結果である。ロボットが 2 台のときは、300 step (実際は 40 倍の 12000 step) で降ほとんど空間探索度の上昇は見られない。5 台においてもやや横這いの傾向が見られる。空間探索度 α の増大が最も早いのは 80 台であり、ロボットの台数が小さくなると空間探索度も小さくなる。この結果からロボットの台数の増加は、その台数比以上の空間探索能力を発揮するということが示された。

4.3 壁への衝突頻度分布

ロボットの障害物回避行動から発現する群知能の空間探索の能力特性は、ロボットが与えられた空間をくまなく移動するようになることを空間探索度で評価することより明らかとなった。これは台数の増加とともに個々のロボットの移動経路がランダムになるからであると考えられる。このロボットの移動のランダム性の評価のもうひとつとして、壁への衝突分布を採用する。ロボットの壁への衝突に関して、前進移動を行っていたロボットが壁を障害物として検知して方向転換を行ったときに、その衝突度数を 1 として数え上げ、壁面に対してそのロボットの中心位置を投影した壁面位置についての衝突度数の分布をつくる(この方法はロボットが壁を検知し、数 step に渡って方向転換をする場合でも、はじめの壁面の検知のときのみに度数 1 を数えることになることを注意しておく)。評価の対象空間

Fig. 10 Variation index in the distribution shape of collision frequency on wall

Fig. 11 Collision frequency in central portion of wall

は 4 方を壁で囲まれた正方形空間 3 種類とするが、壁への衝突分布は 1 つの壁面長を 25 個の区間に等分割しその度数を数える。空間形状の対称性から各辺の度数分布を重ね合わせ、更に壁の 1 辺の対称性から 25 の区間を中央で折り返して度数分布を重ね合わせ、13 区間に区分された範囲で、衝突度数分布を評価する。得られた衝突度数を総衝突度数で割って各度数を基準化した衝突分布を求め、この 13 区分の度数の標準偏差 σ を衝突分布形状の評価の指標値とした。この分布形状の指標値は、分布が最も偏る場合、すなわち 13 区間のうちの 1 区間にすべての度数が集中する場合 $\sigma \approx 0.277$ の最大値を示し、すべての度数が等しいとき最小値 $\sigma=0$ を示すことになる。

シミュレーションに用いるパラメータは、ロボット台数 $P=1, 5, 10, 20, 40, 80$ 、ロボットの直径 $D=3, 5, 10, 15$ 、対象空間の大きさ $400 \times 400, 200 \times 200, 100 \times 100$ である。ロボットの直径が大きくなり、かつその台数も多くなると対象空間にロボットの初期配置を完了できずシミュレーションが行えないケースも出てくるので、これらの 3 種類を対象空間とした。

Fig. 10 は衝突分布の形状の指標値である。対象空間の大きさをパラメータとし、3 種類の対象空間に対してロボット台数毎に線で結んであり、ロボットの直径の影響を比較しやすくしている。したがって横軸は、まず同じロボットの台数のグループに分け、そのひとつのグループではロボットの大きさ D の順に並べてある。この結果から、ロボットの直径が大きくなるにしたがって衝突分布の指標値が下がること、すなわち壁への衝突分布が均等になることが示されている。しかし、例えば対象空間 100×100 、 $D=15$ 、 $P=20$ のときや対象空間 200×200 、 $D=10$ 、 $P=80$ の場合の様に、その指標値が増大に転じている部分がある。このときのロボットの対象空間に対する占

有比率はそれぞれ約 35%, 16% であった. このことよりロボットの対象空間に占める割合がある程度大きくなると移動のランダム性が減少すると考えられる. 参考として最も低い指標値 σ を示している対象空間 400×400 , $D=15$, $P=80$ のとき, ロボットの空間に占める割合は 9% であることを述べておく.

次に, ロボットの壁への衝突分布に関して, 壁の中央付近 (25 区間中の中央部の 8 区間) の衝突度数に注目する. Fig. 11 は, この度数を前述の各パラメータ毎に比較した結果を図示したものである. 全体的傾向としてロボットの直径が大きくなると衝突度数が増大することが示されている. しかしロボットが 1 台の場合は度数が非常に小さく, またロボットの直径に対する変化もほとんど見られない. 一方で, ロボットの台数が多く, さらにロボットの直径が大きくなると衝突度数が減少する傾向にある. これらの傾向は, 衝突分布形状の評価においても同様に示されており, ロボットの対象空間に占める割合, 引いてはロボットの台数がこの特性にも影響していると考えられる.

またロボットの大きさ D に対するこの衝突度数の変化をみると, ロボットの対象空間に占める割合の影響を除いて, ロボットの直径が大きくなると度数が増大する傾向にあるが, その度数の増大比率はロボットの台数が多くなってくると小さくなっている. すなわちロボットの大きさがその移動のランダム性に影響を大きく与えるのはロボットの台数が少ないときであり, ロボットの台数の増大とともにロボットの大きさの影響は小さくなるといえる.

5. 迷路抜けへの応用

障害物回避行動を行うロボットが複数台集まって行動するときには発現する群知能として空間探索能力を示し, 前節でその発現条件を詳しく分析し, その特徴として壁方向へ衝突する度数分布の特性も明らかにした. この壁との衝突特性は, もしも空間を囲む壁に新たな空間への入り口が開いているとした場合に, その入り口にロボットが突入できるか否かを左右するものである.

対象空間の壁に別な空間への入り口のある例として簡単な迷路空間を用意する. Fig. 12 はその空間形状を示したものであり, 図中に斜線で示す円形の部分をスタート位置として複数台のロボットを初期配置し, 斜線で示す四角形の部分をゴール位置として, ロボット群の障害物回避の行動のコンピュータシミュレーションを実施し, ゴール位置への到達能力を評価する.

Fig. 12 Configuration of simple maze

この能力の評価方法は次の通りである. すなわちロボットの台数 P , ロボットの大きさ D をパラメータとし, ゴール位置に到達するロボットが現れたときをタスクの達成として考え, 10000 step をシミュレーション時間の上限として設け, 同一パラメータに対して 10 回のシミュレーションを実施し, その達成回数を調べる. またタスクの達成した場合の平均達成時間も評価する. ロボットの初期配置は, スタート位置内に, 位置と方向ともにランダムとする. シミュレーションに用いたパラメータはロボットの直径 $D=3, 5, 10, 15$ の 4 種類, ロボットの台数 $P=1, 5, 10, 20, 40, 60, 80$ 台の 7 種類とした.

Table 3 にタスクの達成回数, Table 4 にタスクの達成のときの平均時間の結果を示す. 表中で網掛けをしている部分はロボットのスタート位置に占める面積の関係でロボットの初期配置が完了できず, シミュレーションの実行ができなかった場合である. Table 3 から, この迷路抜けのタスクの実行については, ロボットの台数が 10 台以下のとき達成がかなり難しくなることがわかる. またロボットの台数が 10 台と 20 台のときが達成率の大きな分かれ目となっているが, その台数のとき, ロボットの直径が大きい方が, 達成率が良いことがわかる. また

Table 3 Successful numbers in simulations

	Diameter			
	3	5	10	15
Population size				
1	0	0	0	0
5	0	1	0	0
10	0	0	2	5
20	5	10	9	10
40	10	10	10	10
60	10	10	10	0
80	10	10	10	0

Table 4 Average of accomplishment time steps

	Diameter			
	3	5	10	15
Population size				
1				
5		3417		
10			7224	5745
20	5261	4107	4904	3507
40	3862	3406	2628	2138
60	1846	1888	1533	
80	1811	1504	1391

Fig. 13 Partition of given space

Table 4 よりロボットの台数が40台のときを見ると、ロボットの直径が大きくなるほど早くタスクが達成される傾向にあるが、60台以上ではその差が少なくなってくる。ここにも台数が増えることによって、前述のようにロボットの大きさの影響が小さくなる結果が示されている。

この迷路抜けタスクの達成能力は、与えた空間を Fig. 13 のように A から D と4つの部分に分けて考えると、前章でのロボットの移動のランダム性による空間探索能力の分析結果との対応がつきやすい。すなわちロボットが初期配置される空間 A ではロボットの台数が少ないとき壁沿いの移動が主となり、ほとんど空間 B へ突入するロボットは現れない。また空間 B から空間 C へ、ロボットは容易に移動するが、空間 D への入り口も空間 B の長手壁の中央に位置するため、突入することも少ないロボットの台数では難しい。ゴールへのロボットの到達は空間 B から D へ突入することであり、この点でロボットの大きさとロボットの台数の壁への衝突分布特性および壁中央部での衝突度数特性との関係を反映した結果となっている。

6. ま と め

本論文では、簡単な機能と知能を有するロボットが群を形成したときに発現する群知能の発現特性を明らかにするために、ロボットの障害物回避行動から発現される移動のランダム性に着目した。ロボットの大きさ、ロボットの台数のパラメータから、群ロボットが壁で囲まれた空間を移動する際の移動のランダム性の発現の結果、群ロボットシステムには空間探索の能力が創発され、その能力特性を空間探索度、空間を囲む壁へ衝突度数分布から評価を行い、その発現特性を明らかにした。

ロボットの移動のランダム性から発現する群ロボットシステムの空間探索能力は、ロボットに目標物を検知する機能を付加すれば、空間内に存在する目標物を探し出す行動に応用できると考えられる。またこの能力は迷路抜けの能力の発現にもなり、ロボットが与えられた空間の情報を何も持っていない場合

でも、その空間内のある場所にロボットが到達することを可能にすることを示していると言える。そのロボットに移動過程で移動経路を管理する機能を付加すれば、この能力は空間の経路探索行動へ応用ができるであろう。

本論文では、このように簡単な知能と機能のロボットからなる群ロボットシステムの群知能について、群ロボットシステムの基本的な要素行動である空間探索行動とそれを応用した迷路抜け行動を行い、その定量的評価により群知能の発現特性の一部を明らかにした。このことより本論文の結果は、群知能を活用することで、限定された機能と知能をもつロボットからなる群ロボットシステムが協調行動を実現する可能性を示すものである。

参 考 文 献

- [1] R. A. Brooks et al: "Lunar Base Construction Robots," Proc. IEEE Int. Symp. on Intelligent Robots and Systems (IROS '90), pp. 389-392, 1990.
- [2] 川内, 稲葉, 福田: "セル構造化ロボットシステムに関する研究 (適応性, 自己組織性, 自己進化性のあるロボットを目指して)", 日本ロボット学会誌, vol. 12 no. 1, pp. 116-132, 1994.
- [3] プレムウッティ, 油田: "簡単な自律移動ロボットの協調行動のモデルのインプリメンテーション", 第9回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 591-594, 1991.
- [4] 柴田, 福田: "マルチエージェントシステムの遺伝的アルゴリズムを用いた学習による進化的協調行動", 日本ロボット学会誌, vol. 11 no. 8, pp. 168-176, 1993.
- [5] 太田, 新井: "群秩序生成可能な追従戦略を用いた複数移動ロボット系の動作計画", 日本ロボット学会誌, vol. 12, no. 4, pp. 97-102, 1994.
- [6] 尾崎, 浅間, 他: "自律分散型ロボットシステム ACTRESS (第9報) - 通信を用いた同期による協調作業の実現 -", 第10回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 297-298, 1992.
- [7] 渡辺, 山下, 三浦: "マイクロロボット群の行動決定法", 第9回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 219-220, 1991.
- [8] 福田, 石原: "マイクロマシンの自律分散制御", 日本ロボット学会誌, vol. 12, no. 4, pp. 25-29, 1990.
- [9] G. Beni and S. Hockwood: "Coherent swarm motion under distributed control", Proc. of Int. Symp. on Distributed Autonomous Robotic System, (DARS '92), pp. 39-52, 1992.

市川純章 (Sumiaki Ichikawa)

1969年3月11日生。1995年東京理科大学大学院修士課程修了。現在、同大学博士課程在学中。1995年度より日本学術振興会特別研究員。群ロボットの協調制御および群知能の創発性に関する研究に従事。(日本ロボット学会学生会員)

原 文雄 (Fumio Hara)

1941年4月7日生。1970年東京大学大学院(博士課程)修了。1971年東京理科大学工学部助教授, 1983年同教授。流体関連振動とその制御, ヒューマン・インターフェース, ロボットのダイナミクスと制御の研究に従事。工学博士。日本機械学会, ASME, IEEE, 等の会員。

(日本ロボット学会正会員)