

解説



## 分散協調ロボットシステム†

坂根 茂 幸†

## 1. はじめに

多数のロボットが協調して働くシステムの研究が近年盛んになっている<sup>1)~4)</sup>。このシステムは、自律分散ロボット、マルチエージェントロボット、群知能ロボット、自己組織化ロボット、collective intelligence, swarm intelligenceなどの名称で呼ばれている。分散協調ロボットシステムの研究が盛んになってきた背景には、以下のようなことがあげられる：

(1) 単体ロボットの限界：ロボット作業の対象や作業環境が大規模・複雑・多様化するのにもない、ロボット1台では対処することが困難になる。多数のロボットを使うことにより、これらの空間的・時間的な制約を克服しようとするニーズがある。たとえば、大規模プラントの点検保守作業を、多数台のロボットで効率よく実施することが期待されている。また、作業の信頼性の点でも、1台が故障したときに他のロボットでカバーできるような、故障に強い頑健なシステム化が望まれている。

(2) 機器の小型化、マイクロプロセッサ技術・ネットワーク技術の進歩：様々な情報処理システムが、集中管理から自律分散化へと進んでいる。これを加速しているのは、各種機器の小型化・高性能化、そして、マイクロプロセッサ技術、ネットワーク技術の著しい進歩である。

(3) 移動ロボット研究の増加：従来の、センシング→環境モデルの再構築→動作計画→作業実行という情報処理機能に基づくシステムの分割方法には、移動ロボットの場合のような動的な環境、状況への適応が難しいという問題点がある。

Brooks<sup>5)</sup>は、これに対してビヘービア (behavior) の競合・結合に基礎を置くアプローチを提唱した。この一連の研究をはじめ、移動ロボットに関する研究が増加し、様々な機関で研究が行われている。研究用の移動ロボットも市販され、より上位レベルのロボット研究が可能になっている。1台の移動ロボットの研究から、多数台の協調を扱う研究へ発展する例も多い。

(4) 自律分散、人工生命：多数のモジュールが自律分散し、それらが協調的に働くことにより全体として高次の機能、興味深い挙動を生み出すメカニズム、個と全体の相互作用、などへの関心が高まっている<sup>6)</sup>。また、人工生命<sup>7)</sup>という観点からも、群ロボットの創発行動の研究を位置づけることができる。

(5) 分散人工知能：人工知能の分野では、80年代から分散人工知能、分散問題解決の研究が蓄積されてきた<sup>8)</sup>。従来の抽象的なエージェントの姿をロボットとして具現化し、マルチエージェントシステムを構成する分散人工知能の研究も増加している。

分散協調ロボットシステムの分類には様々な座標軸が考えられるが、以下では2つに大別する：(1)社会性昆虫集団のように群行動を創発するメカニズムを考えるアプローチ、(2)比較的知能レベルの高いロボットが集団としての協調を意図的に行うアプローチ、である。このような分類が、動物社会の構成の分類に対応するという指摘もある。ただし、理念的には(1)を志向し、実際には(2)のアプローチというように、明確な分類ができないものもある。

## 2. 群知能・ロボット—創発的協調

蟻や蜂などの生物が群れとなって集合・移動する挙動と同様なことを、ロボットの群行動に試みる研究が多数行われている。個々のロボットの知

† Decentralized and Cooperative Robot Systems by Shigeyuki SAKANE (Department of Industrial and Systems Engineering, Faculty of Science and Engineering, Chuo University).

†† 中央大学理工学部管理工学科

能レベルは低くてもよい。1台のロボットの行動は局所的だが、それらが群を構成すると全体として秩序ある群行動が創発される。群のマクロな挙動は、再びロボット個体への境界条件を与える。このような個と全体の相互作用から群行動の創発を目的とする研究は、自律分散システムや人工生命の研究として捉えることができる。このアプローチの特徴は、ロボットは機能的に均質 (homogeneous) であること、また、ロボット間の通信はまったく行わないか、行うとしても環境の変化を介した間接的な通信が多い、などの点である。

### 2.1 群の集合、移動

ポテンシャル関数を設定し、位置の差や速度差を制御することにより、集結、拡散、リーダに従う移動などの群行動を導くアルゴリズム<sup>9)</sup>、また、他のロボットとの距離や相対位置情報に基づき、特定形状 (円弧、多角形、線分) に集結させるアルゴリズムなどが提案されている<sup>10)</sup>。移動ロボットの経路計画では、障害物からの斥力とゴール地点からの引力との合成力がロボットに仮想的に加わると考え、その移動ベクトルを求める方法が用いられている。これに加えて自分の近接するロボットからの斥力を考慮すれば、相互衝突も回避しながらゴール地点に向かうロボットの群移動に拡張できる<sup>3)</sup>。

Mataric<sup>11)</sup> は、実際の移動ロボット 20 台を使って群行動の実現を試みた。ロボットはビヘービアベーストのアーキテクチャに基づいている。行動計画は行わず、局所的に認識した他のロボットの存在のみに基づいて行動する。群行動のための基本的なビヘービアとして以下の 5 つをあげた：(1) 衝突を回避する安全なうろつき行動 (safe-wandering), (2) 追従 (following), (3) 離散 (dispersion), (4) 集合 (aggregation), (5) 帰巣 (homing)。この中の (5) はロボット群が目標の領域 (あるいは地点) に到達する行動である。より複雑な群行動は、これらの基本ビヘービアを基礎に構成する。たとえば、群れ行動 (flocking) は、安全なうろつき、追従、離散、集合の基本ビヘービアから構成される。餌集め行動は、離散、帰巣、そして、密度の高い場所では追従と群れ行動を併用して構成できる。

### 2.2 餌集め型の群行動

社会性昆虫集団の餌集め行動のアナロジーか

ら、惑星探査における岩石サンプルの収集作業がよく取り上げられている。この作業は 1 台のロボットでも可能だが、耐故障性や作業の並列実行による効率化を考慮すれば、多数台のロボットシステムの方が優位と考えられるからである。

Deneubourg ら<sup>12)</sup> は、基本的にはランダムに動き回るロボットに、餌を拾い上げる/落とすの確率的な操作を行わせることにより、餌をクラスタ状に集める群行動が実現できることを示した。各ロボットは短期メモリを持つ。餌を持たないロボットが餌に遭遇したときに、それを拾う確率は、最近の餌との遭遇頻度が少なければ高くなるようにする。また逆に、餌を持つロボットが餌のない場所にきたときに、それを下に落とす確率は、最近の餌との遭遇頻度が多ければ高くなるようにする。このような単純なアルゴリズムに基づくシミュレーションの結果は、実際の蟻のコロニーの集合例と非常によく一致した。

Steels<sup>13)</sup> は、惑星探査における岩石サンプルの採集作業をビヘービアベーストのロボット群により実施することを想定し、各ロボットがとるべき行動アルゴリズムを構成した。サンプルを回収するための定量的な評価として、サンプルが発見されるまでの時間と、それを地上車を持ち帰るまでの時間の総和を用いる。3 種類の方式：(1) ランダムウォーク、(2) グラジェント場、(3) 「自己組織化」について実験を行った。第 1 のランダムウォーク方式における移動のビヘービアは、(i) ランダムに移動する方向を選択する、(ii) その方向に移動する、の 2 つである。また、サンプルをハンドリングするビヘービアは、

(i) サンプルをセンスし、かつ、自分が何も持っていないならば、それを拾う、

(ii) 地上車をセンスし、かつ、サンプルを持っているときはそれを落とす、

の 2 つである。障害物回避のビヘービアは、前方に障害物をセンスしたらランダムに向きを変えることであり、移動のビヘービアよりも優先させる。第 3 の「自己組織化」の方式では、サンプルを発見したことを他のロボットに伝える。この暗黙の通信は「パン屑」の跡により行われる。つまり、ロボットがセンサで容易に検出できる物質を置いたりとったりすることができる。これは、ちょうど蟻が餌を発見してそれを巣へ運ぶ道がフェ

ロモンにより形成されることに相当している。このパン屑操作のビヘービアは以下ようになる：

- (i) サンプルを持っていればパン屑を2つ落とす。
- (ii) サンプルを持っていず、パン屑を検出したら1つパン屑を拾う。

前者は経路を作り、後者は経路を再び壊す効果をもたらす。経路の誘因のビヘービアは、「もしサンプルを持っていずパン屑をセンスしたら、パン屑の最も密度の高い方向に移動する」ことである。移動ビヘービア間の優先順位は、(ランダム移動) < (帰還移動) < (探索移動) < (経路誘因) < (障害物回避) である。シミュレーションにより、このアルゴリズムの効果を確かめた。この方式では、ロボット台数の増加にともなってロボット同士の交通渋滞が生じ、作業効率が低下するので、ロボットが連鎖して「バケツリレー」を生じるようにした協調方式<sup>14)</sup>もある。岩石サンプルの収集以外では、月面基地の建設に有望な場所の決定と、地面の高さをならし土砂を堆積場所に積み上げる作業をする群ロボット<sup>15)</sup>の提案がある。

Kubeら<sup>16)</sup>は、ちょうど蟻の群が餌を運んでいくような協調行動を、2つのビヘービアを用いて明示的通信なしに実現している。運ぶ対象物は、ライトを取り付けた板である。左右の光センサからの情報に応じて、左右の車輪モータを駆動し、対象物へ接近する「GOAL」ビヘービア。また、障害物を左右のセンサで検出すると、それに依りて車輪モータを駆動する「AVOID」ビヘービアからなる。GOALよりAVOIDが常に優先される。したがって、すでに対象を押しているロボットがいれば、後からきたロボットはこれを避けて隙間に入り込み、物体を押し移動する挙動となる。対象物のまわりから押す力が釣り合う場合は移動停止状態になるが、これを検知したときは接触位置や方向の摂動を与えて、この状態からの脱出を図る。

### 3. 群・知能ロボット一意図的協調

前章のアプローチは、個々のロボットの知能レベルは低いものでもよく、群行動の創発を目的とした。これに対して、知能レベルがある程度高いロボットを多数台使い、一意図的協調により作業を

行うアプローチがもう一方の極である。ロボット間で明示的通信を用いることも特徴の1つである。この通信方式をテーマとする研究もある。

#### 3.1 衝突回避

複数の自律移動ロボットが、移動経路の交差点のような場所で出会ったときにはどのように衝突を回避すればよいただろうか？ 油田ら<sup>17)</sup>は、「遠慮的協調」(modest cooperation)を提案している。行動の基本方針は、ロボットはできるだけ他のロボットの邪魔をしないように振る舞うことである。具体的には、ブロードキャスト通信を使い、以下のような手順で行動する：

(i) 次に進入する区間の予約宣言をする。もし、その区間が使用中もしくは予約済みならば、それが解放されるまで待つ。

(ii) 一区間走行の後、次の区間の予約宣言が確立していれば、その区間に進入し、そうでなければ待機する。

(iii) 新しい区間に進入したときは、それまでの走行区間を解放する。

デッドロックの状態が検出された場合には、1台をリーダーとして選び、一時的に集中方式で意思決定を行ってデッドロック状態を解消する。

移動ロボットの走行経路があらかじめ定まっていなような作業環境では、経路計画から行わなければならない。各ロボットが一定数の候補経路を持つとすると、そのロボット台数分の組合せを考慮しなければならず、探索空間は膨大なものとなる。これに対処するために、柴田ら<sup>18)</sup>は遺伝的アルゴリズム(GA)を適用した。自由空間をあらかじめグラフ構造化しておき、各ロボットは自分の出発点とゴール点のみを考えた「利己的経路計画」をたてる。次に、それらの組合せを扱う「協調的計画」を行う。GAの適応度としてのコスト関数には、経路長およびグラフ化された分割領域への進入を排他的にするために生じる待ち時間を合成して用いた。この方法により、経路計画を効率よく求められたことが報告されている。

#### 3.2 作業分担

分散協調ロボットで室内の清掃作業を行うとする。たとえば、1つの屑かごは1台のロボットが清掃するというにすると、ある作業をどのロボットが行うのかという作業分担問題を解決しなければならない。

第1に考えられるのは、作業に優先順位をつけておくことである。浅間ら<sup>19)</sup>の開発した自律分散ロボットシステム ACTRESS では、屋内の清掃作業における分担問題を扱った。荷物の片付け行動には、(1)単独で片付けるモード、(2)重い荷を処理するために他のロボットに協力依頼をするモード、(3)他のロボットに協力して作業を行うモード、(4)待機モードがある。ロボット間の作業分担に関して、重い荷を片付ける際の協調依頼を行う前に、他のロボットからの協調依頼の有無をチェックし、すでに依頼があればその協力を優先する。

第2の方法は、作業分担をロボット間の交渉に委ねる方式である。沼岡<sup>20)</sup>は、エージェント指向プログラミング言語を用いてマルチロボットシステムを構成し、知識と共にその知識の使い方も送ることのできるエージェント間の通信方式を提案している。屑回収作業への適用例では、2台のロボットがある屑かごの清掃を同時に行おうとした場合に、両者の交渉を経てロボットの移動距離が最小の評価に基づいて最終的に一方のロボットに作業が委ねられる。

ロボットの故障で作業分担を再び行うことが必要になった場合はどうすればよいのだろうか？ Parker<sup>21)</sup>は、このような場合を扱うことのできるエージェントアーキテクチャ：ALLIANCEを提案している。ロボットはビヘービアベースで行動するが、協調のために明示的な通信を用いる。図-1はビヘービアの適応的な選択を行うこのアーキテクチャを示したものである。特徴的なメカニズムは動機ビヘービア (motivational

behavior) である。動機ビヘービアは、センサフィードバック、エージェント間通信、他の活性化したビヘービアからの禁止フィードバック、そして、内部の motivation などを含む多数の入力を受け取る。その出力は、それに対応するビヘービア集合の活性化レベル (正の数で表わされる) である。この活性化レベルが一定のしきい値を超えると、ビヘービア集合が活性となって他のビヘービア集合を抑制する。1つのエージェントでは、同時に2個以上のビヘービア集合が活性となることはない。直観的には、以下のような意味を持つ。あるビヘービア集合を実行する動機はビヘービア集合のプライオリティを反映したある数値で初期化される。このプライオリティはエージェントが内部に持つビヘービア集合間の相対的な重要度を示している。あるビヘービア集合を実行する動機は、それが対応するタスクが完了していない限り増大していく。他のロボットの行動を自分の行動に通信なしで反映させるには、行為の認識問題が生じるので、このシステムでは自分の現在の行動を他のロボットにブロードキャストする通信を採用している。動機ビヘービアと通信の働きは次の例が分かりやすい。2台のロボット R1と R2で屑箱を掃除する。たまたま R1のセンサが先に反応し、R1はその掃除作業を自分が行う旨をブロードキャストする。屑箱が掃除されるであろうという情報に R2は満足する (動機ビヘービアの出力値はいったん0になる)。しかし、R1に故障が生じて掃除作業不能に陥ってしまったとする。すると、R2のセンサは屑箱がまだ掃除されていないことを知らせ続け、R2の動機ビヘービアの値は徐々に増大してくる。その値がしきい値を超えると R2は自ら掃除作業にとりかかる。このように、状況に応じた各ロボットの「動機」の変化が、ビヘービアの適応的な選択を制御している。

### 3.3 御輿かつぎ型の協調

マニピュレータを持つ移動ロボットが1つの物体を運搬/操作するような協調の研究も多い。運搬作業ではロボット同士の密接な協調が必要なので通信が不可欠に思われるが、それに係わるロボットは運搬物を介して相互に力学的拘束関係にあるので、明示的な通信なしでも一定の協調行動ができる。たとえば、Ogasawaraら<sup>22)</sup>は、複数台

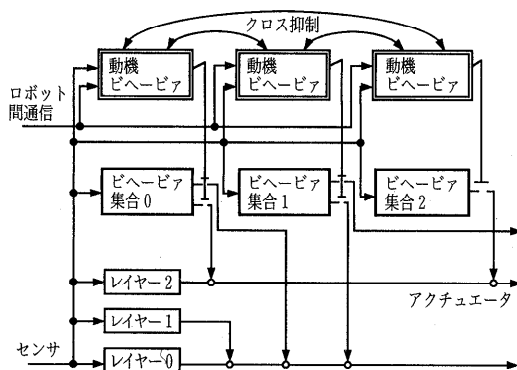


図-1 動機ビヘービアを用いるエージェントアーキテクチャ：ALLIANCE

の移動ロボットで1つの物体を、障害物を回避しながら目標地点まで運搬する行動アルゴリズムを構成した。対象物のどこを把持すればよいかは、力とモーメントの力学的つりあい条件を満たすことから定まる。また、各ロボットは、力センサと共に、自分の周りのローカルな状況を知るための視覚センサを持つものとした。障害物回避については障害物からの斥力とゴールからの引力のポテンシャルを評価する。また、持ち替えについては前述の力学的条件を評価する。各ステップにおけるロボットの行動は、統計的決定理論に基づき、両者の条件を考慮した効用関数を最大にするものを選ぶ。

沢崎ら<sup>23)</sup>は、マニピュレータを持った複数台の移動ロボットという不確定要因の多い環境下で、物体を適切に転がす作業を実現した。移動ロボットに装備した2本のマニピュレータで物体を操作する際には、位置と力のハイブリッド制御を

用いる。マニピュレータ先端に作用する力、速度・加速度などのローカルなセンサ情報に基づき、位置制御方向に発生する力と位置の定常偏差をゼロにするようなフィードバック制御方法を構成した。さらに、明示的な通信を使って力制御目標値を動的に探索することにより、物体を適切に転がす作業を実現した。

3.4 脳を持ち歩かないロボット

稲葉ら<sup>24)</sup>は、「脳を持ち歩かないロボット」を提案している。これは、移動、マニピュレータの制御、センサ情報の処理を、無線を介して行うマルチロボットシステムである。これにより動きのよいロボットボディと高次の情報処理が可能な脳部分を分離し、ビヘービアベーストとモデルベーストの両アプローチが可能である。分散協調という点からは、「群知能・ロボット」、「群・知能ロボット」のどちらも可能な実験環境といえる。目と手をそれぞれ備えた2台のハンドアイ移動ロボットによる結び作業や、目と手を別々のロボットに分散させボール集めやサッカーを行わせた例が報告されている。

3.5 分散協調センシングシステム

坂根ら<sup>25)</sup>は、カメラ、照明など、各種のセンシングデバイスを装備した多数の自律ロボットを分散協調させて環境に適応してセンシング行動をするシステムを構成した。このシステムでは、カメラや照明光源を手首に装着したマニピュレータ、小型移動ロボット、画像処理プロセッサなどが、それぞれ独立したエージェントとして動作する。ロボット群は相互に協調しながらバルブのハ

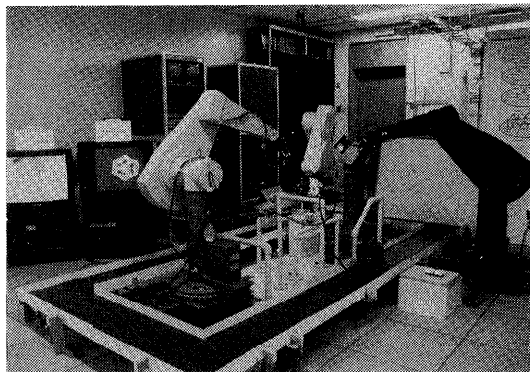


図-2 分散協調センシングシステム

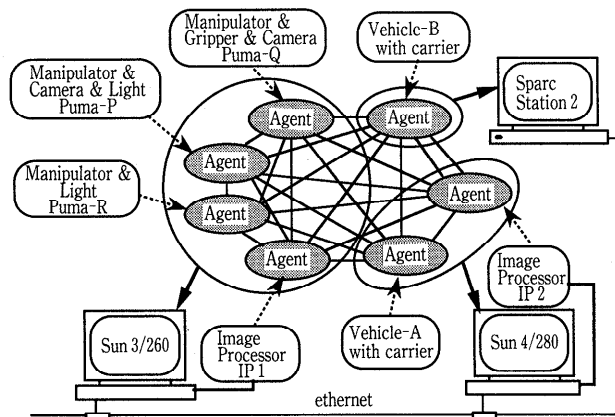


図-3 分散協調センシングを行うマルチエージェントシステムの構成

ンドルをはずして水漏れ検査作業を実施する(図-2)。システムの特徴は、(1)契約ネットに基づくマルチエージェントシステム構成、(2)エージェントは不均質(heterogeneous)、(3)エージェントによる作業環境モデルの利用が可能、などの点である。図-3は、マニピュレータや移動ロボットに対応するマルチエージェントの構成を示したものである。タスク実行は、あるエージェントが作業依頼を他のエージェント達にブロードキャストすることにより開始される。自分がこの作業を実行できると判断したエージェントは、これに対して入札する。そして、作業依頼をしたエージェントは入札してきたエージェントの条件などを比較して、適当と判断されるエージェントに落札する。契約ネットの枠組みのもとで、エージェント間の相互選択に基づく分散型のシステム構成とタスク実行が自然な形で実現される。エージェント間で、作業環境の3次元幾何モデルデータを必要に応じて通信し合うことができることも、システムの特徴の1つである。これにより、複数エージェントにおける分散型の作業計画が可能になる。たとえば、マニピュレータのエージェントがタスクのアナウンスをする際に、環境モデル情報を作業依頼と共に通信する。これを受けた複数の移動ロボットエージェントは各自の状況に応じた作業計画(センシングの計画など)をたて、その結果と共に入札する。マニピュレータエージェントは、両方の作業計画の結果を比べて適切な方を依頼先に選定する。このメカニズムにより作業計画の負荷が複数エージェントに分散され、システム全体の効率化を図ることができる。

#### 4. 協調学習

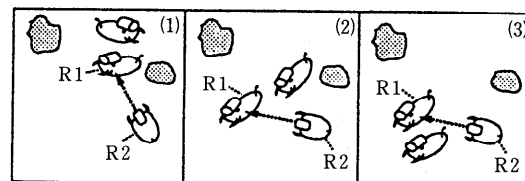
多数台ロボットの学習の研究も増えている。学習内容としては、地図や移動経路などの環境情報の学習、行動の学習、行動選択の学習、協調行動の学習などがあるが、ここでは協調行動の学習に係わる研究を紹介する。

##### 4.1 観察に基づく協調

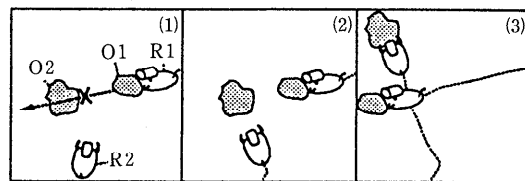
明示的な通信に頼ってロボット協調を行うシステムでは、ロボットの台数の増加にともなって通信に要するオーバーヘッドが増大する問題がある。これに対して、各ロボットが明示的な通信を行わずに他のロボットや作業の状況を確認し、状況に

対応して的確に行動する機能を持てば、通信負荷の問題を回避して効果的な協調を行うロボットシステムが期待できる。さらに、他のロボットの行為を理解することは、新しいロボットが群に入って他のロボットと協調して作業することを学習するための基礎である。

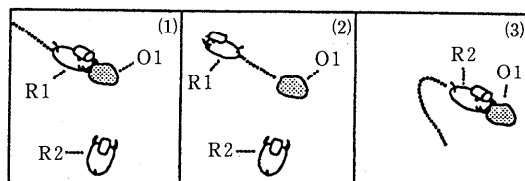
國吉は、このような立場から「観察に基づく協調(cooperation by observation)」を提案した<sup>26)</sup>。ロボットが互いの行為を(特に視覚により)観察し、自分の置かれた状況を考慮して適切な行動を決定する。図-4はこの観察に基づく協調の例を示したものである。図-4(a)は、ロボットR2はロボットR1に常に一定の距離を保つような追尾行動を示している。図-4(b)は、障害物の排除行動の例である。ロボットR1が物体O1を運搬しているときに、その移動方向に障害物O2があるとすると、ロボットは運ぶ物により前方を遮られているので、障害物の存在を認識できない。別のロボットR2は、側方から観察することによりその状況を理解し、衝突が生じる以前に障害物を排除する行動をとる。また、図-4(c)では、ロボットR1が物体O1を運んできたもの



(a) 追尾行動



(b) 障害物排除



(c) 運搬物体受け渡し

図-4 観察に基づく協調パターン

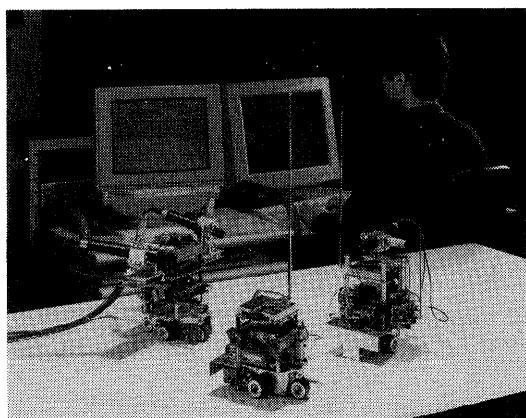


図-5 観察に基づく協調を行うロボット群

を、別のロボット R2 が引き続いて運んでいく受け渡し行動の例である。これらの協調パターン状況に応じて切り替えるためのアーキテクチャも提案されている<sup>27)</sup>。図-5 に示すように移動ロボットは、2 台のカメラの各視線方向が制御可能なビジョンシステム<sup>28)</sup>を搭載し、移動物体を注視、視線追跡することができる。ロボットが動き回る動的作業環境では、このようなアクティブビジョン機能が必要になる。

#### 4.2 社会ルールの学習

Mataric<sup>29)</sup> は、餌集め型行動をとりあげ、(1) 他のロボットに場所を譲るビヘービア、および(2) 餌 (実際にはパック) のある場所にきたらその場所の情報をブロードキャストするビヘービア、の 2 つの社会性を持つビヘービア (社会ルール) の強化学習を試みている。問題となるのは、そのビヘービアが必ずしも特定のロボット個体への直接的な報酬 (reward) に結びつかず、集団としての報酬になる点である。このため、以下の 3 種類の報酬を導入している：

(1) 進捗状況監視ビヘービアが常にエージェントの現在の状態とその直接のゴールとの比較 (たとえば、餌探索のような場合にはそのサブゴールに到達しているか、帰巣行動の場合にはゴール地点までの距離が減少しつつあるかといった比較) を行って、最近活性化された社会性ビヘービアに対して与える報酬。

(2) 別のエージェントの最近行ったビヘービアを、自ら繰り返すことに対する報酬。

(3) 他のエージェントが受け取った報酬。こ

れは、局所的なインタラクションに含まれる全てのエージェントで「共有」される強化の分配に相当する。

(1) の報酬を用いている理由は、Q 学習などの遅延報酬を用いる強化学習法では非マルコフ的な不確定性・不整合性を持つ群ロボットの状況に対処することが困難だからである。提案した報酬関数を用いる強化に基づき、通信可能な移動ロボット群による学習実験を行った。結果は、(1) のみ、(1) と (2) のみの場合は収束しなかったが、(1)、(2)、(3) のすべてを重み付き加算で合成して用いた場合に収束したことが報告されている。どの程度の社会ルールまで学習できるのかは、興味深い問題である。

#### 5. む す び

分散協調ロボットシステムの研究について紹介した。まだ研究の歴史は浅く、解決すべき課題は多岐にわたる。たとえば、遠隔操縦を行うテレロボティクスにおいて、人間 (オペレータ) に操縦される側が群ロボットの場合には、人間がすべてのロボットに各々対応して操縦することは非常に困難となる。このため、オペレータとロボット群との間で円滑に対話できるようなシステム化が必要であり、1 対多のインタフェースの研究<sup>30)</sup> も開始されている。

「分散協調」ということは、分散して自律的に働いているもの同士が協調するという、矛盾した要請を合わせ持っており、それゆえに解決の難しい問題も多い。しかし、生物では進化がそうであるように、常に群という多数個体の存在が個を育てている。人間の持つ知能も、その社会的な存在から切り離すことはできない。同様の意味で、この分野の研究がロボット知能の探求に新たな発展をもたらすことを期待したい。

#### 参 考 文 献

- 1) 特集：マルチエージェントロボットシステム, 日本ロボット学会誌, Vol. 10, No. 4 (1992).
- 2) 特集：群知能ロボット, 計測自動制御学会誌, Vol. 31, No. 1 (1992).
- 3) 新井民夫, 太田 順: 移動ロボットの群制御, 機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, pp. 1419-1424 (1994).
- 4) 特集：ネットワーク型ロボットシステム, 日本ロボット学会誌, Vol. 12, No. 6 (1994).

- 5) Brooks, R. A.: Robust Layered Control System for a Mobile Robot, IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. 2, No. 1, pp. 14-23 (1986).
- 6) 特集: 自律分散の新たな展開, 計測自動制御学会誌, Vol. 32, No. 10 (1993).
- 7) 小特集: 人工生命, 電子情報通信学会誌, Vol. 77, No. 2 (1994).
- 8) 特集: 分散人工知能, 人工知能学会誌, Vol. 5, No. 4 (1990).
- 9) 三浦宏文: 昆虫規範型ロボットと群知能, 計測自動制御学会誌, Vol. 31, No. 11, pp. 1180-1184 (1992).
- 10) Sugihara, K. and Suzuki, I.: Distributed Motion Coordination of Multiple Mobile Robots, Proc. of IEEE Int. Symp. on Intelligent Control, pp. 138-143 (1990).
- 11) Mataric, M. J.: Interaction and Intelligent Behavior, PhD thesis, MIT (1994).
- 12) Deneubourg, J. L. et al.: The Dynamics of Collective Sorting Robot-Like Ants and Ant-Like Robots, in From Animals to Animats (Proc. of 1st Int. Conf. on Simulation of Adaptive Behavior), MIT Press, pp. 356-363 (1990).
- 13) Steels, L.: Cooperation between Distributed Agents through Self-Organization, in Demazeau, Y. and Muller, J. P. (ed.), Decentralized A. I., North-Holland, pp. 175-196 (1990).
- 14) Drogoul, A. and Ferber, J.: From Tom Thumb to the Dockers: Some Experiments with Foraging Robots, in From Animals to Animats 2, MIT Press, pp. 451-459 (1992).
- 15) Brooks, R. et al.: Lunar Base Construction Robots, Proc. of IEEE Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems, (IROS90), pp. 389-392 (1990).
- 16) Kube, R. and Zhang, H.: Collective Robotic Intelligence, in From Animals to Animats 2, MIT Press, pp. 460-468 (1992).
- 17) 油田信一, スパルーク・プレムウッティ: 複数の自律移動ロボットの協調に関する検討—遠慮的協調の提案, 第8回日本ロボット学会学術講演会, pp. 887-890 (1990).
- 18) 柴田崇徳, 福田敏男: Genetic Algorithm を用いた移動ロボットの最適経路計画 (第2報, 複数ロボットのための利己的計画と協調的計画), 日本機械学会論文集 (C編), Vol. 59, No. 560, pp. 166-173 (1993).
- 19) 浅間 一: 通信を用いた分散的管理に基づく複数の自律型ロボットの協調的作業分担決定手法, 日本ロボット学会誌, Vol. 10, No. 7, pp. 111-119 (1992).
- 20) 沼岡千里: 協調作業のためのコミュニケーション, 機械学会ロボティクス・メカトロニクス'93 講演会講演論文集, pp. 974-979 (1993).
- 21) Parker, L. E.: ALLIANCE: An Architecture for Fault Tolerant, Cooperative Control of Heterogeneous Mobile Robots, Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS94), pp. 776-783 (1994).
- 22) Ogasawara, G. et al.: Multiple Movers Using Distributed, Decision-Theoretic Control, Proc. of Japan-USA Symposium on Flexible Automation (1992).
- 23) 沢崎直之, 井上博允: 複数の自律ロボットによる協調物体操作, 日本機械学会論文集 (C編), Vol. 59, No. 564, pp. 54-61 (1993).
- 24) 稲葉雅幸他: 脳を持ち歩かない分散型ロボットシステムにおける分散機能の協調アルゴリズムの研究, 機械学会ロボティクス・メカトロニクス'93 講演会講演論文集, pp. 970-973 (1993).
- 25) Sakane, S. et al.: Distributed Sensing System with 3D Model-Based Agents, Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS93), pp. 1157-1163 (1993).
- 26) Kuniyoshi, Y. et al.: Cooperation by Observation—The Framework and Basic Task Patterns—, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 767-774 (1994).
- 27) 國吉康夫他: 観察に基づく協調 (第5報) 基本協調行動アーキテクチャ, 第12回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 855-856 (1994).
- 28) 喜多伸之他: 仮想ホロボタに基づく実時間両眼追跡, 日本ロボット学会誌, Vol. 13, No. 5, pp. 683-690 (1995).
- 29) Mataric, M. J.: Learning to Behave Socially, in From Animals to Animats 3, MIT Press, pp. 453-462 (1994).
- 30) 森島昭男, 平井成興: マルチロボットによる作業計画の研究 (第2報) 1対多のインタフェース, 第12回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 999-1000 (1994).

(平成7年1月10日受付)



坂根 茂幸

1949年生。1972年東京工業大学工学部制御工学科卒業。1974年同大学院修士課程修了。同年、電子技術総合研究所入所。知能システム部自律システム研究室室長を経て、1995年4月より中央大学理工学部管理工学科教授。視覚センサプランニング、マルチエージェントロボット、センサフュージョンなどの研究に従事。工学博士。日本ロボット学会、計測自動制御学会など各会員。