

第7章 アリに学ぶ群ロボットシステム

菅原 研¹

1 はじめに

今日の工学システムは、入力情報と制御機構をひとつ、あるいは少数の中核機構に集めて管理する「集中管理型」機構によって、効率良く安定に運用されている。しかし、システムが巨大化、複雑化し、全体と部分の因果関係が見えにくくなると、さまざまな問題が見え始めてくる。特に深刻なのは、何らかの不具合が生じた時、システム全体のダウンにつながる危険性があること、またその原因を探り、解決を図るのが困難になることである。近年、特定の中核機構をもたず、複数（多数）の小規模な機構に管理を委ねる「分散管理型」システムへシフトする現象も見られるようになってきた。コンピュータのネットワーク化は1つの典型例である。

制御工学、情報工学、ロボット工学などの工学分野では、かなり早い段階から「自己組織化」「自律分散」「創発」などをキーワードとした分散型システムに関する研究が進められてきた。その営みのなかで、多くの工学研究者が生物に内在する仕組みに強く関心を持ち、学び、そして応用することを試みてきた。本稿では、生物の中でも社会性昆虫（特にアリ）の振る舞いに着目した群ロボットシステムについて論じる。アリは個体—個体間ならびに個体—環境間の相互作用によって適応的に機能している。個体レベルでは比較的単純なルールと局所的な相互作用に従って機能しているにもかかわらず、集団としては柔軟で適応的な機能を発現するところに群ロボットシステムの面白さがある。

2 社会性昆虫に学ぶ群ロボットシステムの事例紹介

社会性昆虫をモチーフとした群ロボットシステムの研究は多数報告されている[1]。特に着目されてきた特性は採餌行動と分業である。本節では社会性昆虫の採餌行動に関連する群ロボットシステムの研究をいくつか紹介する。

2.1 Deneubourg のゴミ集めロボット

Deneubourg らはアリの観察を通して、分散しているゴミをクラスター状に収集する行動を簡単なアルゴリズムで再現できることを明らかにした[2]。ゴミのクラスター形成においてアリがもつ特性を単純化すると次のようになる。

- ・アリがとる状態は「ゴミを持っている」「持っていない」の2つ
- ・アリの基本行動はランダムウォーク
- ・動きまわることによってゴミに遭遇したとき、
 - 自身がゴミを持っていない状態であればそのゴミを拾う
 - 自身がゴミを持っている状態であれば持っているゴミをその場に置く

¹ 東北学院大学教養学部情報科学科 准教授

Beckers らはこの至極単純なアルゴリズムに基づいてクラスター構造を作る群ロボットを製作し、ロボット工学の分野でも注目を集めた[3].

2.2 アルコールフェロモンロボット

Fujisawa らはアリのエタノールと市販のアルコールセンサを用いてアリのリクルートフェロモンを模擬したロボットシステムを開発した[4]. 長方形の実験フィールドには巣に見立てた領域があり、赤外光を発している。ロボットは赤外線センサを用いて巣に戻ることができる。実験フィールドには重量物があり、運搬対象であることをロボットに知らせるための光を発している。ロボットたちは巣と重量物の間にエタノールのトレイルを塗布することで仲間を活性化し、重量物まで誘引する。ある程度以上のロボットが集まると協調的な運搬機能が発現する。

2.3 熱フェロモンロボット

化学的メディアには、場を介したコミュニケーションを可能にするなどのユニークな特性があることから、前述のように揮発性あるいは芳香性のある物質を検知できるセンサを有するロボットの試作が行われてきた。しかし、ロボット間コミュニケーションに化学物質を導入する際、物質に対応するセンサを入手することは一般に困難である。Russell はヒーターと熱センサを有するロボットを製作し、ヒーターで地面を熱することでフェロモントレイルを形成する実験を行った[5]. 熱フェロモンの残存時間は短い、熱拡散によって蒸発が表現できること、物理センサのひとつである熱センサが使用できる、といった点に着目して試作されたところが興味深い。

2.4 プロジェクタを用いた仮想フェロモンシステム

著者らは、物質を検出できるセンサの入手困難さに加え、化学物質の視認困難さの理由から、プロジェクタを用いたコンピュータグラフィックス (CG) の投影によって化学物質の蒸発・拡散を表現するシステム V-DEAR (Virtual Dynamic Environment for Autonomous Robots) を提案した[6]. このシステムでは化学物質の量が CG の明るさで表現される。ロボット群は自身が有する光センサにより、自身の場の「物質の濃度」を検出し、それに基づいた行動をとる。ロボットの頭部には上方に向けた LED もついている。システムはビデオカメラにより各ロボットの LED をモニターしており、発光を検出すると「ロボットが化学物質を放出した」と見なして、その位置にスポット状の CG を投影する。このスポット CG は与えられた拡散係数と蒸発係数に基づいてリアルタイムで計算され、物質の濃度に応じた明るさの CG として投影される。つまり、ロボットは「化学センサに見たてた」光センサーで物質の濃度を検知して行動していると思なすことができる。Nishinari らはこのシステムを用いてフェロモンが関与する交通流の実験を行った[7].

3 群ロボットによる餌集め行動の数理

採餌行動において、道しるべフェロモンへの依存度が強いアリの場合、個体数が増えると行列が形成されるためにはある程度以上の個体数が必要である。ここでは餌を集めるロボット集団において、その個体数が臨界値を超えることで集団として協調的な採餌行動が発現する仕組みについて数理的に考えてみよう。ランダムに動くロボットが、他の状態にある別のロボットとの接触により状態が変化する仕組みは、確率的なオートマトンモデルで表現することができる。

探索状態のロボット数を S 、えさ運搬状態のロボット数を R とする。また、探索状態のロボットが運搬状態のロボットと出会うことで運搬状態になれる確率を α 、運搬状態にあったロボットが運搬後に道を見失い、再び運

搬状態になれない確率（すなわち探索状態になる確率）を β ，探索状態のロボットが偶然えさに出会う確率を γ とすると，以下の方程式が成立する．

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = -\alpha \cdot S \cdot R + \beta \cdot R - \gamma \cdot S \\ \frac{dR}{dt} = -\beta \cdot R + \alpha \cdot S \cdot R + \gamma \cdot S \\ S + R = N \end{cases} \quad (1)$$

この方程式の定常状態を考える．簡単のため， $\gamma=0$ とし，定常状態，すなわち $dS/dt=0$ としたときに R に対して上式を解くと

$$R=0, R=N \cdot \beta / \alpha \quad (2)$$

の2つの解が得られる．行列ができるとき， $R>0$ であることから，行列ができるためには $N>N_c$ ， $N_c = \beta / \alpha$ という条件が必要になることがわかる． N と R の関係を図1に示す．個体数が臨界値 N_c を超えたところで初めて運搬する個体数が N に依存する形で出てくる．

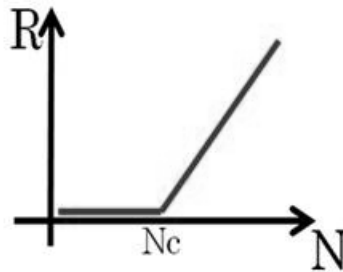


図1 総個体数に対する餌運搬状態の個体数

もう少し要素を加えてみる．餌場での渋滞を考慮しよう．ただし m 匹程度のロボットがいることで渋滞が現れるとし，その発生確率を δ で表すものとする．

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = -\alpha \cdot S \cdot R + \beta \cdot R - \gamma \cdot S + \delta \cdot S^m \\ \frac{dR}{dt} = -\beta \cdot R + \alpha \cdot S \cdot R + \gamma \cdot S - \delta \cdot S^m \\ S + R = N \end{cases} \quad (3)$$

この方程式を数値的に解いたもの，ならびにエージェントベースでロボットの振る舞いをシミュレーションした結果を図2に示す．数理モデルで現象がうまくとらえられていることが分かる．

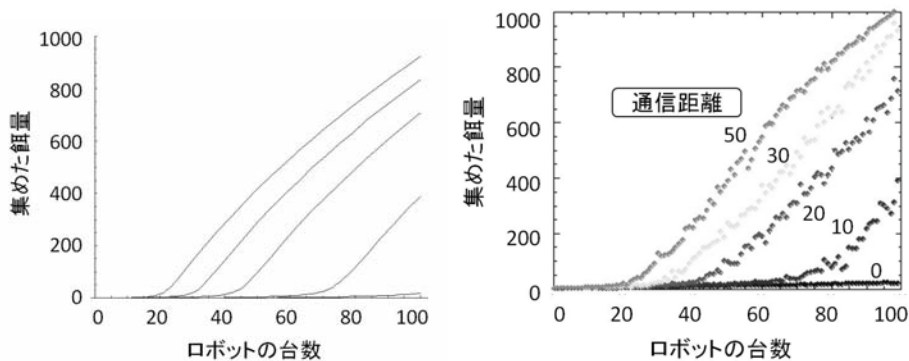


図2 アリ型ロボットの数値解 (左) とロボットシミュレーションの結果 (右)

4 ヘテロな集団が示す探索収集行動の数理

探索収集するロボットが餌の収集を行うとき、餌が局在している場合は、ロボット間でコミュニケーションをとり、餌場に誘引することで収集効率を上げることができる。一方、餌が広く点在している場合は、コミュニケーションをとらずに個別に収集するほうが効率が高い。誘引する機能を有するロボットと、その機能がないロボットを混在させたヘテロな集団の効率はどれほどだろうか。餌の分布状態を定量的に取り扱うために、フラクタル状に餌を分布させたフィールドにおいて探索収集作業をおこなわせてみよう。

さて、餌の分布次元とヘテロなロボット集団の割合の関係をシミュレーションベースで調べた結果を図3に示す。餌分布の次元が低い(=局在している)場合、通信を行う個体の割合が多いほうが収集効率が高いこと、一方、餌分布の次元が高い(=分散している)場合は通信を行う個体が少ないほうが収集効率が高いことがわかる。ただし、必ずしも通信を行わない個体だけで構成される集団よりも、通信を行う個体が多少含まれている集団の方が収集量は多くなっている。これは分布次元が高い場合でも分布には多少のムラがあり、通信が有効に機能する状況がありうることを示唆している。

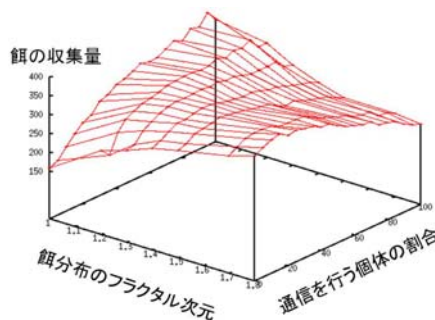


図3 異なる餌分布次元下で個体間通信の有無が採餌効率に与える影響

5 ヘテロなアリ型エージェント集団の振る舞いから学ぶ

ヘテロな集団が示す探索収集行動に関しては、興味深い現象が西森らによって報告されている[8]。一般に、勤勉で優秀なメンバーで構成される集団がもっとも効率よく餌を集めることができるはずである、と我々は考えがちである。ところが、必ずしもそうではない、とする、いわば直感に反する結果が出る場合があることを西森らが計算機実験によって示した。ここで導入されたアリの行動は以下の通りである。

1. ランダムウォーク：道しるべフェロモンが検出できない場合は、ランダムに餌を探す。このとき足跡フェロモンを地面に残しながら歩き回る。
2. 餌探索：ある量を超える濃度の道しるべフェロモンを検出した場合、その道しるべフェロモンをたどって歩く。このときも足跡フェロモンを地面に残しながら歩き回る。
3. 帰巢：餌を見つけると道しるべフェロモンを残しながら足跡フェロモンの濃度が高いほうに向かって巣に帰る。巣に到着すると再びランダムウォークを始める。

ここで、2種類のアリを用意する。ひとつは正常アリで、フェロモンに対し、的確に移動できるものである。もうひとつは鈍感アリで、ある確率で必ずしも正しい方向に行けないものである。この確率の値により、正常アリとほとんど変わらないものから、ランダムウォークに近いものまで、「鈍感の程度」を変えることができる。正常アリと鈍感アリをさまざまな割合で混ぜたとき、この集団が示す餌集めの効率はどうなるであろうか。直感的には全てが正常アリの集団が一番よい成績、すなわち、一定時間内にもっとも多く餌を集めることができるように思われる。ところがシミュレーション結果から、正常アリ 100%の集団よりも鈍感アリが一定割合で含まれる集団のほうが餌集め効率が高いことが分かった。西森らの考察によると鈍感アリが含まれる集団の餌集め効率が向上する理由は次のようになる。

まず鈍感アリは歩き回ることによって、ほどよい足跡フェロモンの濃度勾配を巣の周りに形成する。一方、正常アリはランダム歩きによって餌を見つける。ランダム歩きによって見つけた餌場であるため、巣に帰るときに形成する道しるべフェロモンの路は必ずしも直線になるとは限らない。これは、巣と餌場が最短経路で結ばれるとは限らない。ここで全てのアリが正常アリであった場合、フェロモン路を"忠実に"トレースできるため、曲がった経路のまま、餌場から巣に餌を運ぶ。一方、鈍感アリがいるとどうなるか？鈍感アリは鈍感であるがゆえに、なんとか餌場にたどりついたところで、帰巢時に既成のフェロモン路からはずれた歩き方をしてしまう。すなわち、フェロモン路の道幅を広げる作用をもたらすのである。道幅が広がると正常アリはより短い経路に沿って行き来するようになる。餌場と巣の間に複数の経路がある場合、より短い経路が選択される特性がここでも成り立つからである。つまり、鈍感アリの存在によって「足跡フェロモンの濃度勾配形成」と「餌場・巣間に形成された曲がった経路の整形」が生じ、結果として集団の効率が上がるのである。正常なユニットだけで構成されるシステムよりも、正常ではないユニットが一部含まれているシステムのほうが、むしろ効率が上がることを示したこの研究は群ロボットシステムの研究に大きく寄与するものと考えられる。

6 おわりに

本稿では、社会性昆虫をモチーフとした群ロボットシステムについて、いくつかの事例に基づいて解説した。生物学には「社会生理学」という分野がある。この分野は、社会性昆虫に見られる興味深い特性、すなわち、局所的意決定システムであるにも関わらず集団としてうまく機能する特性の背景に「組み込まれているルール」の『巧妙さ』があると考え、そのルールを発見し、理解していくことに重きをおいたものとなっている。この考え方は、これまで工学分野において積極的に進められてきた自律分散システム論や創発システム論などの概念と相通ずる点がある。ここには「生物に学ぶ工学」と「生物学に寄与できる工学」の、分野を越えた相互理解・相互協力が成立しうること、また互いの積極的な連携を通して、双方の発展につながる貴重な知見が得られる可能性が充分にあることが期待できる。

参考文献

[1] Parker, L.E., 2008. Distributed Intelligence: Overview of the Field and its Application in Multi-Robot Systems, invited article, Journal of Physical Agents, special issue on multi-robot systems, 2: 5-14

- [2] Deneubourg, J. L., Goss, S., Franks, N., Sendova-Franks, A., Detrain, C., & Chretien, L., 1990. The dynamics of collective sorting, *From Animals to Animats*, MIT Press, Massachusetts. pp.356-363
- [3] Beckers, R., Holland, O.E., Deneubourg, J.L., 1994. From Local Actions To Global Tasks: Stigmergy and Collective Robotics. *Artificial Life IV*, MIT Press, Massachusetts. pp.181-189
- [4] Fujisawa, R., Imamura, H., Hashimoto, T. & Matsuno, F., 2008. Communication Using Pheromone Field for Multiple Robots, *Proceedings on IEEE/RSJ 2008 International Conference on Intelligent Robots and Systems*:1391-1396
- [5] Russell, R. A., 1997. Heat Trails as Short-Lived Navigational Markers for Mobile Robots, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation 4*: 3534-3539
- [6] Sugawara, K., Kazama, T. & Watanabe, T. 2004. Foraging behavior of interacting robots with virtual pheromone, *Proceedings on 2004 IEEE/RSJ. International Conference on Intelligent Robots and Systems*:3074-3079
- [7] Nishinari, K., Sugawara, K., Kazama, T., Schadschneider, A. & Chowdhury, D., 2006. Modelling of self-driven particles:foraging ants and pedestrians, *Physica A*, 372:132-141
- [8] 中川寛之, 田尾知巳, 西森拓. 2003. 蟻の化学走性と役割分化の模型, *京都大学数理解析研究所講究録*, 1305:15-23