

マーカー型アリ群知能の特性

松田 浩[†] 米澤 保雄^{††}

現在の知能化システムの方法論の一つとして、群知能と呼ばれる集団で生成される行動型知能がある。本研究では、自律分散移動ロボットの行動制御問題をアリ集団で利用されているフェロモン様マーカーをモデルとして知能性の創発を検討した。その結果、従来の移動ロボット制御で用いられる環境埋め込み情報としてのマーカーを用いた情報処理より効果的である事をシミュレーションで明らかにした。更に、本フェロモン様マーカーモデルは自律分散移動ロボットに不可欠なエネルギー消費制御に対する有効性を示唆した。

Properties of Swarm Intelligence Generated with Ants Behavior by Marking System

HIROSHI MATSUDA[†] and YASUO YONEZAWA^{††}

At present, one of constitution methods of intelligent system is swarm intelligent which called as collective intelligence generated with the behavior rule base in population. In order to elucidate the information processing method for regulation autonomous distributed mobile robot, we proposed the regulation effectivity of pheromon like marker modeled on ant's collective intelligence. In this paper deal with the collective intelligence at population dynamics which generated with behavior rule and communication of individual ant in population supported with pheromon like marker. We represented that the marker effects in population behavior are very usefull as decided processing of total action plane's.

1. はじめに

現在では駆動型機械の高機能化要求に伴い、一つの機械に機能を集中する万能型機械から自律分散機械への展開が進歩している。これに伴い、自律分散機械の知能化である群知能情報処理¹⁾の研究が行なわれ、具体的な工学技術として用いられるまでに至っている。

群知能の研究は社会生物学を基礎とした、集団を形成する各生物の行動の相互作用で創出される知能をモデルとされる。すでに、我々は蜂集団に見られる群知能を検討し、巣分けや集餌行動などの判断を極めて速やかに行うという情報処理が蜂巣内での情報伝達のダイナミクスで成されている事を報告した²⁾。

本研究では群知能の実用化を念頭に置いて、複数の移動ロボットを用いて群知能を実装する場合の課題である「自律移動ロボットの制御」に焦点を当てる。既

に、ロボット工学分野では「環境埋め込み情報」³⁾などのマーカーを用いた移動ロボット制御の研究が進捗しているが、本研究では実在の群知能系であるアリの数理モデルを構築し、フェロモン様マーカー⁴⁾の効果性に関して検討する。

すなわち、アリのフェロモン様マーカーの分泌とそのマーカー認識とで構成される高次のマーカーシステムの集餌探索行動への効果性を検討する。更には、本数理モデルが現実の自律分散移動ロボットには重要である駆動の為のエネルギー消費問題への適応可能性に言及する。

2. 背景となるアリ集団挙動

高等動物などは脳に代表されるような多くの機能を一個体に集中、集約した形態のシステムを持つ。これに対し、社会性昆虫などにおいては集団を構成する個々の知能は高等動物に比べ低レベルであるが、集団挙動によって高知能性を呈することができる。生物集団の挙動で生成される知能は群知能として知られる分散系の行動型知能であり、集団化で得られる単純効果は次の3点に要約される。

(1) 集団を構成する複数の個体数は、その個体数に

[†] 茨城大学大学院理工学研究科
Graduate School of Science and Engineering, Ibaraki University

^{††} 茨城大学工学部システム工学科
Department of Systems Engineering, Faculty of Engineering, Ibaraki University

比例した作業量の増加が見込まれる。

(2) 集団を構成する複数の個体による役割分担（専従化）により効率向上が見込まれる。

(3) 集団での役割分担により行為者の損失に基づいて、受け手に多大な利益をもたらすという利他行動により集団全体としての利益向上が見込まれる。

本研究では自律分散移動の制御モデルを検討する為、アリ集団の行動ルールを規範としてモデル化し、その情報処理特性を検討する。アリ集団では集餌行動時にフェロモン様分泌を伴う移動をとり、既に先発しているアリ個体を追跡する行動特性を持つ。すなわち、集餌行動時には巣を中心に未知領域を探索し、餌を発見し、餌を巣に持ち帰る帰巣行動を繰り返す。この行動により巣から餌場までの行程にアリ集団による行列（輸送経路）が形成される。この時、

- 餌場で集餌したアリは帰巣し、巣内で餌情報を他の個体に直接伝達する。
- 餌場までの経路にフェロモン様物質を分泌して環境埋め込み情報（間接情報）をマークする。

という2つの情報処理が最適な餌場の選択を行い、その餌場から巣までの餌輸送を行う集団における個々のアリ行動を制御しているといえる。2番目のフェロモン様マーカ―は前述したように「自律移動ロボットの自己位置同定」の研究などで成されている「環境埋め込み情報」として用いられている人工マーカ―と同等の機能を与えるものと理解される。しかしながら、現在のアリ集団で用いられているフェロモンは化学物質であり、その量や濃度に比例した分泌場所からの個々のアリのセンシングの差異が生じる事などは人工マーカ―とは異なる点である。以上のアリ集団挙動を背景として、本特性を処理機構に取り込んだアリ型フェロモン様マーカ―モデルの構築を次章で述べる。

3. アリ集団フェロモン様マーカ―挙動モデル

本章では、前章で概説したアリ集団挙動を構成する個々のアリ行動を基盤としたアリ集団フェロモン様マーカ―挙動モデル（[Ant's Population Behavior driven with Phromon Like maker] Model：以下 APBPL Model と表記）の構築について述べる。

3.1 集餌シミュレーションの環境

本シミュレーションは $N \times M$ のラティスマップ上に巣ならびに探索空間を設定して行われる。巣及び餌に関する基本条件は以下の通りである。

- (1) 巣は探索領域の中心に位置する。
- (2) 巣には初期探索アリと巣内で待機する集団の2種類が存在する。

(3) 巣内で待機中のアリは探索に成功した集餌アリに追従して餌場に向かう。

(4) アリの母集団数は変化しない。

(5) 餌場は複数個固定とし任意の場所に設置する。

(6) 餌場に存在する餌は集餌行動で減少する。

(7) 集餌行動で餌が全て減少した餌場は消滅する。

3.2 集餌シミュレーションの行動ルール

(1) 初期探索アリの行動はランダムウォークである。

(2) マーカ―の利用は餌場発見後とする。

(3) アリの移動において後退は禁止する。

(4) マーカ―利用時にはマーカ―の量によって現在位置から N ラティス（マス）先のマーカ―探索を可能とする。

(5) マーカ―を検知した場合にはマーカ―の位置に向けて移動方向が決定される。

(6) 移動方向は移動距離の最短方向が優先される。

(7) アリ移動のラティスマップ上の1マスを単位時間とする。

行動ルールにおいて、移動方向決定はマーカ―利用シミュレーションでは個体位置の近傍に存在するマーカ―の位置情報と巣と餌場の位置（距離と方向）情報を記憶し、双方の比較による重み付けで行われる。

3.3 情報伝達ルール

(1) マーカ―の配置は初期の N マス毎で行われる。

(2) 探索空間領域に配置（フェロモン分泌）されたマーカ―は時間経過に従い減少する。

(3) アリが同じ軌道を通った場合、同じマスにマークされ、マーカ―情報量は加算される。

(4) 直接情報伝達による場合、個体自身の場所（位置）と記憶している餌場までの距離（差）の比較によって、より近い情報を与える。

4. シミュレーション結果

前章で述べた「APBPL Model」の基本動作性を確認、検証する為、「ランダムウォーク」⁵⁾、「フェロモン位置情報」、そして「フェロモン濃度依存位置情報」という3つのシミュレーションを行った。「ランダムウォーク」はマーカ―無しでの探索行動でアリ集団としての効果のみの観測である。「フェロモン位置情報」はフェロモンを単なる環境位置情報として用いるシミュレーションであり、「環境埋め込み情報」と同等の移動マーカ―機能性を検討する為に行った。更に「フェロモン濃度依存位置情報」では本研究で着目したアリが分泌するフェロモン様マーカ―の探索行動特性を検討するものである。これはマークされたマーカ―が経時変化に伴いフェロモン濃度が減少し、マーク機能が低下す

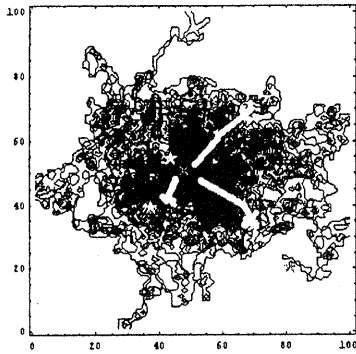


図1 ランダムウォークの集餌における移動範囲分布 1 ~ 500 回の累積 × が巣 * が餌場を示す。
 Fig. 1 Lattice map of the random walk simulation of food collection. From start step to 500 step. × is nest. * is food.

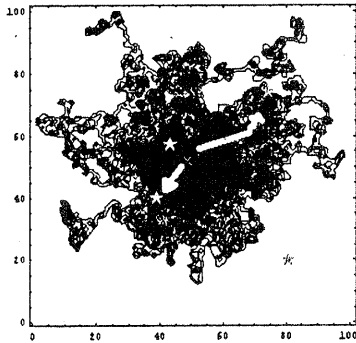


図2 フェロモン濃度依存位置情報集餌における移動範囲分布 1 ~ 500 回の累積
 Fig. 2 Lattice map of food collection simulation by positional information depended on pheromon concentration. From start step to 500 step

る事と、同じ位置にマークされた場合、フェロモン濃度が増加しマーク機能が強化される事を示す。

シミュレーションの餌場発見までの初期行動は乱数列を用いたランダムウォークである。探索空間は 100×100 のラティスマップとし、巣はラティスマップの中心 (50,50) に位置する。また 4 つ設置する餌場は a(55,45), b(20,80), c(40,40), d(75,75) の位置に置いた。500 ステップごとに作成した移動範囲の累積データから分布図を作成した (図 1, 図 2, 図 4)。これらの図では、× が巣を表し、* が餌場を表している。更に色の濃淡により、往復している部分ほど濃い色で表しており、矢印でアリ集団の主な動きを示した。

ランダムウォークに比べ、フェロモンの効果を加える事で位置情報が伝わり、探索範囲を縮める事が確認

できた。

5. エネルギー消費問題へのフェロモン様マーカーク挙動モデルの適応

前章で基本動作性を確認、検証した「APBPL Model」を、本章では現実の移動ロボットへの適応を検討する。これまで、アリはその移動時にエネルギー消費なしとして扱い、主に行動ルールとマーカークによって生成される「行動の軌道」をシミュレーションし、その効率を検討してきた。しかしながら、移動ロボットは現実にはエネルギー消費を伴って移動を実行しているものであり、ここではアリの移動距離に対応したエネルギー消費を与え、実装の有効性を測った。

エネルギー消費を検討したシミュレーションは以下の要件に従って行った。

- (1) 探索行動中のアリはエネルギーが半分消費した時点で帰巣行動に移る
- (2) 巣に帰還できたアリはエネルギーを充填できる

前述のモデルにエネルギー消費の有無を加え、a から d の各餌場近郊のアリの集密度を算出した (図 3 参照)。グラフから明らかな様に、エネルギー消費が無く、かつエネルギー充填も無いという無限に移動可能な場合にはマーカーク効果が十分に発揮されるまでの間多くのアリが探索行動にあっていたが、エネルギー消費が在る場合には初期から餌場への集密度を増加させるように観測される。又、4 章と同様に各餌場からの距離に依存したアリ集密度の観察ではエネルギー消費を設定した方が、初期において巣からの餌場の距離差での大きな差異が存在し、巣からの餌場距離に近い方から遠い方へ順次に集密度を増加させるという挙動を見せている。

6. 議論と総括

本論文ではアリ型群知能生成に関する基本行動ルールの動作で起こり得る挙動を確認し、アリ集団の集餌行動で成されるフェロモン様マーキングに着目したモデルを作成し、その動作による「マーカーク型アリ群知能の特性」を検討した。その結果、従来の移動ロボットなどで用いられている「埋め込み環境情報マーカーク」と比べ、効果的な集餌行動を与えることが判明した。

ランダムウォークや機械的な「埋め込み環境情報マーカーク」に比べて、化学物質であり、分子濃度に依存するフェロモン様マーカークはセンシング距離という距離情報が加わり、餌場までの集餌行動の軌道の生成が速やかに形成されることが理にかなった方策であり、マーカーク型アリ群知能の予想される効果を呈した。

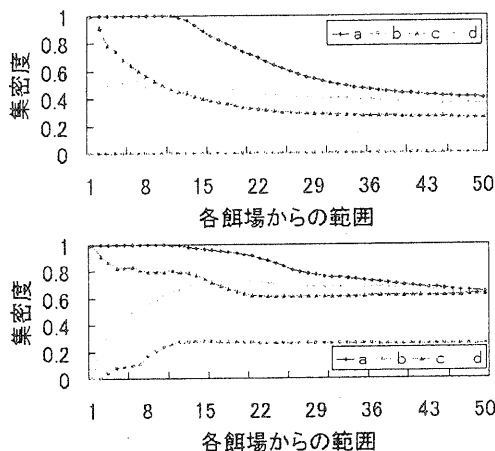


図3 エネルギー消費の効果を加えた集餌行動の移動分布 (上) 1 ~ 500回 (下) 1001 ~ 1500回
 Fig. 3 Food collection simulation by positional information depended Pheromon concentration in case of consumption (top) From start to 500 step (bottom) From 1001 step to 1500 step

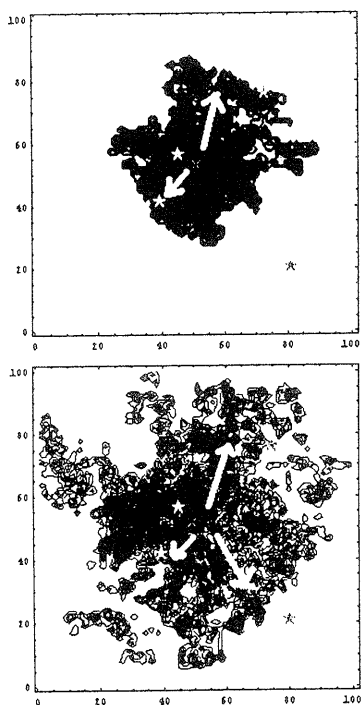


図4 エネルギー消費の効果を加えた集餌シミュレーションの移動範囲分布 (上) 1 ~ 500回の累積 (下) 1001 ~ 1500回の累積
 Fig. 4 Food collection simulation by positional information depended Pheromon concentration in case of consumption (Top) from start step to 500 step (Bottom) from 1001 step to 1500 step

更に、実ロボットへの適応の為に「エネルギー消費」を導入した結果、先の「フェロモン濃度依存位置情報」とは異なる挙動を示した。これはエネルギー消費を導入した為に起こった行動の制限が原因であり、餌場に関する距離情報を同じく持たせているにも関わらず、エネルギー消費という行動の制限事項が距離情報に基づく餌場選択をアリ集団全体における順番制御機能を強化させた。

本結果はフェロモン様マーカーによる行動制御とアリ行動範囲の有限性ととのバランスも問題と考えられ、これらの行動の組み合わせが「選別餌場」へのアリ集密度増加を向上させている情報処理を司るものと考えられる。

すなわち、フェロモン様マーカーによる「餌場へ向かう行動制御」と移動に伴うエネルギー消費による「帰巢の行動」という相反する制御命令がアリ集団の中でどのような「情報伝達のダイナミクス」を形成しているのかを検討する事によって、本論文で得られた餌場までの行動順位を強化しているかが判明する。更に、その処理機構を明らかにする事によって移動ロボットの制御に関わる新たな情報処理モデルの取得の方策として期待できる。今後、本マーカー型アリ群知能モデルを用いたより詳細なシミュレーションを実行し、先に述べた2つの行動命令が生成するアリ集団全体での行動決定解析を進める計画である。

謝辞 本研究の実施に当たり本学 SVBL (複雑機能ロボットラボラトリー) の研究資金援助を受けた、ここに記して感謝の意を表する。又、群知能に関する議論を頂いた下原勝憲氏 (ATR 研究所)、並びに Professor Casti (Santa Fe 研究所) に記して感謝致します。

参考文献

- 1) Bee, R., D.; Intelligence as adaption behavior, Academic Press, (1990).
- 2) Yasuo, Y. and Tadatoshi, T.; Emergent information processing in collective intelligence modeled on Honeycomb Fluctuation, Proc Alife V, pp. 163-168 (1996).
- 3) 新井義和, 藤井輝夫, 浅間一, 藤田隆則, 遠藤勲; 環境埋め込み情報に基づく自律移動ロボットの自己位置同定, 日本機械学会論文誌 (C 編), Vol. 64, No. 619, pp. 945-959 (1998).
- 4) Hoyt, E.: The Earth Dwellers, Adventures in the Land of Ants, Touchstone Books, (1997).
- 5) Schweitzer, F., Lao, K., Family, F.: Active Random Walkers Simulate Trunk Trail Formation by Ant, *Biosystems*, Vol. 41, pp. 153-166 (1997).