

ロボット群の他個体誘引行動における フェロモン・トレイル持続時間調整機能の有効性

藤澤隆介^{†1} 清水裕亮^{*1} 松野文俊^{*2}

本研究では、蟻の集団採餌行動に着目する。真社会性昆虫である蟻は高度な社会構造を有していることが知られている。彼らは、採餌時にフェロモンを用いてコミュニケーションを行い集団的な振舞いを見せる。餌を発見したときに蟻は餌の状況によってフェロモンの性質を変えていることが知られている。この振舞いはフェロモン・コミュニケーションを行うロボット群にも有意である。そこで、我々はフェロモン・トレイルの持続時間を変更するメカニズムを提案する。このメカニズムを搭載することで、餌を見つけたロボットがその状況に応じてフェロモン・トレイルの持続時間を調整することができる。計算機シミュレーションを行うことで、フェロモン・トレイルの持続時間の調整機能が採餌に有効であることを実証する。

Effectiveness of Tuning of Pheromone Trail Lifetime in Attraction of Robot Swarm

RYUSUKE FUJISAWA,^{†1} YUUSUKE SHIMIZU^{*1}
and FUMITOSHI MATSUNO^{*2}

We focus on swarm behavior of ants. They communicate with each other using pheromone. They forage food using pheromone trail to attract many ants to food. They also realize adaptive foraging by adjusting the property of the pheromone trail according to changes in the environment. This sort of behavioral mechanism is expected to be effectively applicable to robotics. We propose adjustment method of the pheromone trail lifetime based on quantity of food. We obtained simulation and experimental results that the proposed adjustment of the trail lifetime is effective.

1. はじめに

1.1 群れと蟻の採餌行動

一般に群れは自律分散系であり、各個体は大域的情報を持たず、環境中の局所的情報のみで行動する¹⁾。言い換えると、各個体は周囲の状況に応じて自己の行動を自律的に決定することができる。したがって、群れの内外の変化に対して柔軟な対応が可能になり、以下に示す特性²⁾を有する。1) ロバストネス：群れを構成する1体もしくは複数の個体が活動不能に陥ったとしても、タスクを遂行できる。2) 柔軟性：群れは環境の変化を許容し、タスクを遂行できる。生物界には、群れを形成する種が数多く存在する。自然界で群れを構成している生物は相互にコミュニケーションを行うことで複雑なタスクを実現している。その一例である蟻はフェロモンと呼ばれる化学物質を介して餌の位置情報を共有し、群れによる採餌行動を実現している^{3),4)}。

蟻は道標フェロモンを用いることで、効果的な採餌活動を行う。ある個体が餌場を発見すると、餌を巣へ持ち帰りながら道標フェロモンを敷設する。フェロモンの敷設で蟻が餌場に誘引され、さらにそれらの蟻によってフェロモン場が強化されるというポジティブフィードバックによって、フェロモン・トレイル形成に基づく採餌行動が行われる。また、蟻は周囲の環境の状況に応じてフェロモン・トレイルの性質を調整していることが知られている^{5),6)}。このことから、フェロモン・トレイルの性質を環境に適したものに調整することで、群れの効率を向上させていると理解できる。このような生物の群行動をロボティクスに応用することは工学的に有用であると思われる。タスク解決(目的達成)に要求される機能を群知能を持つロボットに与えれば、群れを形成したロボットによって目的を達成するための群行動が創発される。したがって、一体一体のロボットはタスク解決に必要な機能さえ有していればよいので、過度に高機能・高知能化する必要がない。餌の量に応じてフェロモン・トレイルの持続時間を変えて効率化を計ることは、実ロボット群を運用するときにタスクの達成率に応じて適切な個体数をタスクに割り当てることに相当する。実際にロボット群を運用するときに、タスクに応じて作業する個体数を変化させる機能は必須になる。

^{†1} 八戸工業大学

Hachinohe Institute of Tech.

^{*1} 現在、株式会社ジェイテクト

Presently with JTEKT Corporation

^{*2} 現在、京都大学

Presently with Kyoto University

1.2 先行・関連研究

近年、前述の群れの性質や個体間の相互作用が注目され、多くの分野で研究が行われている。特に、フェロモン・コミュニケーションを用いた群ロボットの研究として、仮想的にフェロモン場を実現した研究と実際にフェロモンを用いた研究がある。仮想的なフェロモンを用いた研究として、Sugawara ら⁷⁾、Nishinari ら⁸⁾、Garnier ら⁹⁾による研究がある。これらの研究では、フィールド上のロボットの位置を CCD カメラで検出し、その動きに連動させてプロジェクタでフェロモン場を実験フィールドに投影し、ロボットはその上部に搭載したセンサで色と明るさを検知することにより蟻の採餌活動を再現している。数式モデルに基づいた数値演算による仮想フェロモンを用いているため、フェロモンの拡散・蒸発に大きな影響を与える気温や湿度といった環境の様々なパラメータを任意に設定することができる。したがって、群れの振る舞いを検証する上では非常に優れているといえることができる。温度・湿度変化、大気の流れなどノイズの多い実環境を完全に再現することは困難であることが考えられる。実際のフェロモンを用いたロボット研究として、下山ら¹⁰⁾は実際の昆虫の触覚とフェロモンを用いてフェロモン追従行動を単体のロボットで実現した。しかし、群行動については考察されていない。Purnamadajaja ら¹¹⁾は、2種類の化学物質と化学センサーを用いて群ロボットを誘引させることに成功している。しかし、この研究ではフェロモンを介した個体間の相互作用は考慮されておらず、リーダー・フォロワの関係で集団の制御を行うことに着眼している。したがって、このシステムは機能分化されたシステムと言える。

また、我々はフェロモン・コミュニケーションを行う群ロボット ARGOS (Antelligent Robot Group Operation System) を開発し、実際に化学物質を用いてフェロモン・トレイルを構成し、餌場への他個体誘引を実現している¹⁾。この研究では、ロボットが活動する環境は餌場の位置が1箇所に固定されており、餌場にある餌の量が無限と設定されており、単純化された静的な環境であるといえる。さらに、我々はフェロモン・コミュニケーションを行う群ロボットを用いた実験で、餌を巣まで協調運搬する集団採餌行動を実現している^{12),13)}。この実験では、餌は群ロボットによって巣に持ち帰られる。協調運搬終了後には、餌が存在していた場所と巣の間にはフェロモン・トレイルが残存する。餌が有限の場合、ロボットの採餌行動によって徐々に餌が減少していき、採餌行動が進み、最後には餌場の餌が消失する。この時、餌場と巣との間に敷設されたフェロモン・トレイルは餌が消失した後も残存しロボットを誘引し続けるため、他の場所への探索を妨げるように作用する。そのため、餌が有限で餌が消失する環境設定は、フェロモン・コミュニケーションを用いた採餌行動において重要である。

1.3 研究目的

群ロボットに何らかの複数のタスクを課すとき、効率的に複数のタスクを解決することが望まれる。1つのタスクを集団で解決する場合、多くの個体がタスクに殺到する状態を作ればよい。この状態は、持続時間の長い(揮発しない)フェロモン・トレイルを生成すれば達成できる。2つ以上のタスク(ここで、多量のタスクをタスク A、少ない量のタスクをタスク B とする)が存在し、それらのタスクの総量に差がある場合、群れがタスク B を解決した場合、全個体がタスク A に集中して集団的に解決するのが望ましい。しかし、フェロモン・トレイルがタスク B が存在した場所に残っていると存在しないタスク B に誘引される個体が発生(以下、誤誘引)してしまい、効果的な集団的問題解決にならないことが問題になる。そこで、本論文では、環境の変化に応じたトレイル持続時間の調整がフェロモン・コミュニケーションを行う群ロボットの他個体誘引行動の効率に与える影響について調べることを目的とする。ここでは、環境情報のひとつである、餌場に存在する餌の量に着目し、発見した餌の量に応じてトレイル持続時間を調整する機能を、我々が提案した他個体誘引アルゴリズム¹⁾に付加する。そして、餌の量を知覚し、それに応じてトレイル持続時間を調整する機構を有したフェロモン・コミュニケーションを行う群ロボットを開発する。さらに、トレイル持続時間調整行動を付加した他個体誘引アルゴリズムを実装したモデルによる計算機シミュレーションを行い、トレイル持続時間調整機能の有効性を検証する。

2. 群行動のための行動規則

2.1 他個体誘引ルール

本章では、まず我々が設計した他個体誘引ルール¹⁾について述べる。決定性有限オートマトンで記述したルールを図 1 に示す。なお、実際にヒアリの一種 (*S. invicta*) では太陽の方向を知覚し巣方向を判断することが知られている⁴⁾。そこで、各ロボットは活動環境上のどの場所でも巣 (Nest) の大まかな方向を知覚することができることを仮定している。ルール設計のために、3個の内部状態: S_i ($i = 1, 2, 3$), 6個の知覚標識: P_j ($j = 1, \dots, 6$), そして3個の作用標識: E_i ($i = 1, 2, 3$) を設定する。本ルールでは複数体のロボット、壁を設けた有限フィールドを想定しており、ロボットには衝突した時に衝突対象を判別する機能を持たせている。衝突が発生した際、内部状態が S_i のロボットは図 1 に示した *Collision processing*[i] ($i = 1, 2, 3$) の処理を行う。衝突処理時の行動は、表 1 に準ずる。図 1 に示すように、 S_i のロボットは行動 E_i を選択する。 S_i のロボットが P_j ($j = 1, \dots, 4$) を知覚すると、ロボットは自己の内部状態を S_k へ状態遷移させる。また、 S_i のロボットが P_i

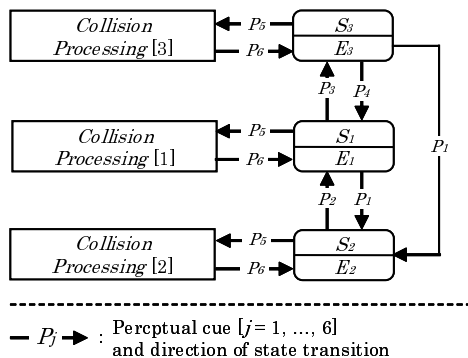


図 1 他個体誘引ルール¹⁾
Fig.1 Behavior rules for attracting other robots¹⁾

表 1 ロボットの衝突時の行動規則

Table 1 The action rules when a robot detects collision

Collision processing[i]	Collision object	Action of robot after collision
Collision processing[1]	robot or wall	disengage from collision point and turn around
	food	lay down the pheromone trail
Collision processing[2]	robot	temporary stop
	food or wall	(out of the model)
Collision processing[3]	robot or wall	disengage from collision point
	food	lay down the pheromone trail

($l = 5, 6$) を知覚すると、衝突処理を行う。以下で内部状態・知覚標識・作用標識を具体的に説明する。内部状態は S_1 : 探索, S_2 : 誘引, S_3 : 追従の 3 つである。知覚標識は P_1 : 餌との接触, P_2 : 巣への到着, P_3 : フェロモンの存在, P_4 : 時間経過, P_5 : 客体との接触, P_6 : 衝突処理完了の 6 つである。そして、作用標識は、 E_1 : ランダムウォーク, E_2 : フェロモン・トレイル敷設, E_3 : フェロモン・トレイル追従の 3 つである。

2.2 餌の量からのトレイル持続時間調整

フェロモン・コミュニケーションを用いた採餌行動において、周囲の環境の状況に応じてトレイル持続時間を変化させることにより採餌行動を効率化できる可能性がある。生物の蟻に関して、餌の情報からトレイルの性質を調整して誘引の強度を変えることが知られている^{5),6)}。生物は、餌の量を知覚するための感覚器（例えば視覚や単位時間あたりの採餌回数

表 2 フェロモン・トレイル持続時間の調整手法

Table 2 Tuning method for trail duration time

Condition	Pheromone trail duration time
$F > F_{th}$	T_1
$1 < F \leq F_{th}$	T_2
$F = 1$	0 (Not laying down the pheromone)

の記憶) を有しており、知覚するためのコストは決して高くない。そこで、本研究ではトレイル持続時間を餌の量に応じて変化させることを考える。本研究では以下に示す設定の環境を想定する；1) 餌場に存在する餌の量は有限である。2) 活動環境には複数の餌場が存在する。

ここで、餌場とはロボットが餌が存在すると認識できる領域であり、餌の量とは餌場に存在する餌の量であり、1台のロボットが1回に収集できる餌の量を1とする。ロボットが1回餌を発見すると、餌の量は1減少する。活動環境に存在する餌の量を有限と設定しているので、ロボットの採餌行動により餌の量は減少し、収集終了後は残存したトレイルによる誤誘引が発生する。そして、活動環境上に複数の餌が存在するため、残存するトレイルが他の餌の探索と採餌を妨げるように作用し、採餌効率を悪化させる可能性がある。

本論文で用いるロボットは発見した餌場に存在する餌の量を知覚し、その餌の量に応じてトレイル持続時間を決定し、帰巣とともに決定した持続時間になるようなフェロモンを環境に敷設する。表 2 に、発見した餌場の餌の量に対応するトレイル持続時間の調整法を示す。表 2 中の F , F_{th} はそれぞれロボットが発見した餌の量とフェロモン・トレイル持続時間調整を行う閾値となる餌の量を示す。 T_1 , T_2 はそれぞれ、初期と調整後のトレイル持続時間である。発見した餌場の餌の量が閾値より多い場合 ($F > F_{th}$)、ロボットは餌の量が十分であると判断し持続時間の長い (T_1) フェロモンを敷設する。逆に、発見した餌場の餌の量が閾値より少ない場合 ($F \leq F_{th}$)、ロボットは餌の量が少ないと判断し、他の餌の探索を促すために持続時間の短い (T_2) フェロモンを敷設する。そのため、調整前後のトレイル持続時間の関係は $T_1 > T_2$ となる。また、餌の量が1の場合 ($F = 1$)、その餌を収集したことで採餌した餌場の餌の量は0となるので、ロボットはフェロモンを敷設しないで帰巣する。

3. ロボット構成

3.1 ロボット概要

本研究では前章で述べた他個体誘引アルゴリズムを実装可能とする、トレイル持続時間調

表 3 エタノール濃度・エタノール流量とフェロモン・トレイル持続時間の関係

Table 3 Relation of duration time of pheromone trail, ethanol concentration and flowing volume of pheromone

Duration time of Pheromone [min]	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Ethanol concentration [%]	100	100	100	100	50	75	60	50	50	50	50
Ethanol volume of flowing [ml/min]	15	20	25	35	15	45	30	20	25	30	35
Water volume of flowing [ml/min]	15	20	25	35	15	45	30	20	25	30	35

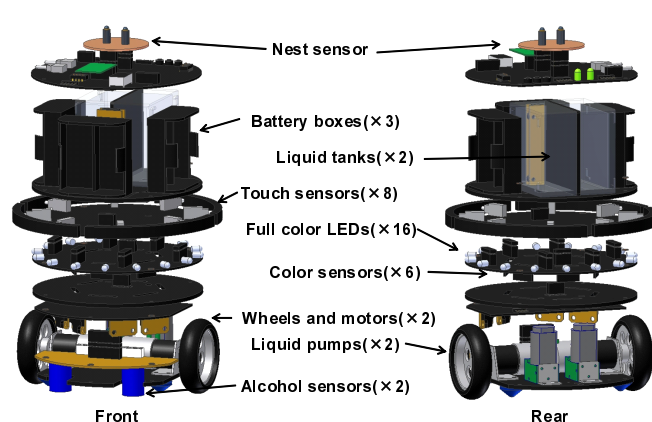


図 2 開発したロボット (ARGOS02)

Fig. 2 Overview of a developed robot (ARGOS02)

整機能をもったロボットを開発した。図 2 に開発したロボット (ARGOS02) を示す。開発したロボットの仕様は以下の通りである; ボディ直径:150[mm], 高さ:225[mm], 重量:1.45[kg], 移動速度:0.1[m/s]。電源には Ni-MH バッテリー (1.2[V], 4500[mAh]) を 6 本直列に接続して使用する。ロボットは大きく分けて 4 つの層から構成され、各層はスペーサで支持されている。第 1 層 (最下層) には、駆動用の DC モータ、アルコールセンサ、マイクロポンプ、フェロモン吐出口が搭載されている。第 2 層には、カラーセンサーとフルカラー LED、接触を検知するプッシュスイッチが搭載されている。第 3 層には、フェロモン放出機構のタンクとバッテリーが搭載されている。第 4 層 (最上層) には、システム基板とロボットの内部状態を表示するインジゲーター類、ロボットの内部状態を送信するワイヤレス USB 回路、電源回路と Nest センサが搭載されている。バッテリーが第 4 層の電源回路に接続され、必要な

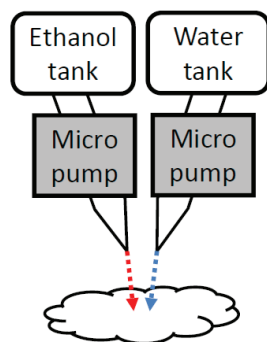


図 3 フェロモン・トレイル持続時間のための液体混合メカニズム

Fig. 3 Mixing mechanism for tuning duration time of pheromone trail

電源電圧に変圧されて各層に供給される。

3.2 ロボットの機能

3.2.1 トレイル持続時間調整

本研究でフェロモンの働きをする代替の化学物質としてエタノールを用いる。トレイル持続時間はエタノール濃度とエタノール放出量によって変化する。そこで本研究では 2 つのパラメータを調整することで、広範囲にフェロモン・トレイル持続時間を調整できるフェロモン放出機構をロボットに搭載する。図 3 に示すように、本研究で開発したフェロモン放出機構は 2 個のタンクと 2 個のマイクロポンプから構成されている。それぞれのタンクには無水エタノールと水が充填され、それぞれのポンプが動作することで、エタノールと水が放出される。2 個の放出口は隣接しており、エタノールと水は放出後に混ざり合いながらフィールドに散布される。マイクロポンプを駆動する DC モーターの回転数を制御することで放出量を制御する。また、エタノール側のマイクロポンプと水側のマイクロポンプの放出量の比を調整することで濃度を制御する。ロボットによって敷設されたトレイルの持続時間を予備実験により測定し、指定の持続時間を実現するフェロモン (エタノール) 濃度と放出量を決定した。表 3 にフェロモン濃度と放出量、トレイル持続時間の関係を示す。トレイル持続時間は、厳密に設定することが困難であり、おおよその時間を取っている。ポンプの最低流量が対応できなかったため、トレイル持続時間を 3 分以下にすることはできなかった。後述するが、計算機シミュレーション結果から 14 分以上の長時間のトレイル持続時間は設定していない。

3.2.2 餌の量の知覚

本研究で開発したロボットは、衝突時に餌と他の物体との識別、発見した餌の量の知覚を行う。本研究の実験実験で用いる餌は周囲にフルカラー LED を搭載しており、スイッチを切り替えることで赤・緑・青の 3 色の発光が可能である。そして、ロボットに光とその色を検出するカラーセンサーを搭載した。6 個のカラーセンサーをロボットの外周に等間隔に配置し、ロボットの側面全方向の光検出を実現する。なお、あくまでも餌の位置情報は餌周辺

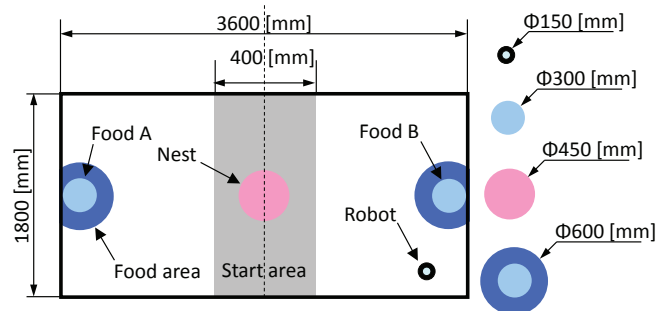


図4 シミュレーション・実験環境の概要
Fig.4 Top view of experimental field

でのみ得られる局所情報とするため、ロボットが餌から発される光を検出できる範囲を活動範囲全体と比較して十分小さくなるように閾値を決定している。

トレイル持続時間の調整を行うためには、餌の量の知覚が必要となる。本研究では、餌の量の知覚を餌の発光色の識別によって実現する。ロボットは餌の発光色を検知し、発光色が青色の場合、ロボットは発見した餌がトレイル持続時間を切り替える残りの餌の量より多い量である ($F > F_{th}$) と判断する。また、発光色が緑色の場合、ロボットは発見した餌がトレイル持続時間を切り替える残りの餌の量以下の量である ($F \leq F_{th}$) と判断する。そして、発光色が赤色の場合、ロボットは発見した餌が残り1個 ($F = 1$) であると判断する。

4. トレイル持続時間調整の有効性の検証

4.1 実験環境

図4にシミュレーション実験と実機実験で設定したフィールドと巣、餌の位置を記した平面図を示す。フィールドは長さ3600[mm]、幅1800[mm]で、四方が壁で囲われている平坦な環境である。巣の範囲を直径450[mm]と設定する。そして、餌は直径300[mm]の円筒形状で、ロボットが餌を知覚する餌場を直径600[mm]とし、2つの餌であるFood A, Bを設定する。実験開始時のロボットは図4中の灰色で示された範囲にランダムに配置する。計算機シミュレーションで用いるロボットモデルの諸元は実機の数値を用いる。

4.2 計算機シミュレーション

計算機シミュレーションにより、トレイル持続時間調整の有効性を検証する。ここでは、一定時間内に収集した餌の量を評価値とする。ロボット台数を8、初期の餌の量をFood A

を100, Food Bを5, 10, 15とした。シミュレーション中に片方の餌が消失することを考慮してシミュレーション時間を30[min]と設定した。トレイル持続時間を調整しない場合、初期トレイル持続時間を4~20[min]の範囲に設定した。トレイル持続時間調整を行う場合、初期トレイル持続時間を14[min]とし、調整後のトレイル持続時間を4~12[min]と設定した。調整後のトレイル持続時間を0[min]にすることもあり得るが、この設定では、餌を発見したらトレイルを敷設しないことを同義であり、餌の探索を完全にランダム・ウォークに頼ることに他ならず、採餌回数が低いこと我々の予備実験からわかっているためパラメータに入れないこととした。また、トレイル持続時間調整を行う餌の量の閾値をFood Bの初期の餌の量に応じて $F_{th} = 2, 4, 6$ (Food Bの初期の餌の量5の場合), $F_{th} = 4, 8, 12$ (Food Bの初期の餌の量10の場合), $F_{th} = 2, 4, 8, 16$ (Food Bの初期の餌の量15の場合)とした。各条件につき、100回のシミュレーション実験を行った。フェロモンの蒸発・拡散・消失は、以前の研究で開発したシミュレータ¹⁾を用いた。ロボットがフェロモン・トレイルを追従するメカニズムも同様である。

4.2.1 トレイル持続時間調整を行わない場合

図5, 図6, 図7にそれぞれFood Bの初期の餌の量を5, 10, 15と設定し、トレイル持続時間調整を行わない場合のシミュレーションによって得られた各トレイル持続時間における採餌量を示す。グラフは積上げグラフであり、横軸はトレイル持続時間、縦軸は総採餌量である。これらの図の棒グラフにおいて、総採餌量の内訳を示すために、Food Aからの採餌量を白でFood Bからの採餌量を黒で示している。図5より、どの場合もFood B(棒グラフの黒色の部分)は5ほぼすべて収集されて消失しており、トレイル持続時間が短くなるほど採餌量が減少していることがわかる。その原因として、本シミュレーションにおけるロボット数とフィールドサイズの設定条件ではトレイル持続時間が短い場合にはフェロモン・コミュニケーションが有効に作用していないと推測される。つまり、フェロモン・トレイルによってロボットが餌に誘引される前にフェロモンが揮発してしまい十分に誘引が行われないため、採餌量が減少している。一定のトレイル持続時間を超えると採餌量の変化がなくなり一定の値に収束していく傾向が見られる。さらにトレイル持続時間を長くしても採餌量が増加しない原因として、先に消失したFood Bの方向に敷設されたトレイルの誤誘引により、残存しているFood Aへの誘引を妨げている。

次に、Food Bの初期の餌の量と評価値である採餌量の関係を見ると、Food A:100, Food B:5の場合、Food Bが最も早く消失し餌の量の多いFood Aへ収集に従事する時間が最も長くなると予測され、Food Aからの採餌量が他の条件と比べて多くなることが想定でき

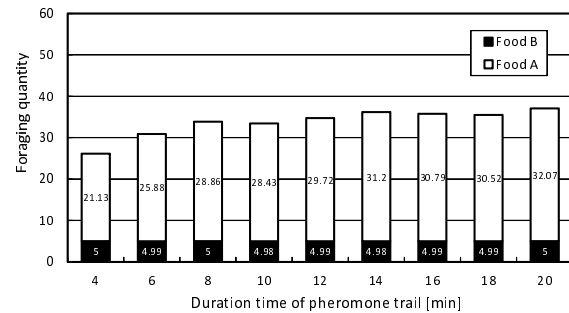


図 5 シミュレーション結果 持続時間調整無し (Food A:100, Food B:5)
Fig. 5 Simulation result without adjusting trail duration time (Food A:100, Food B:5)

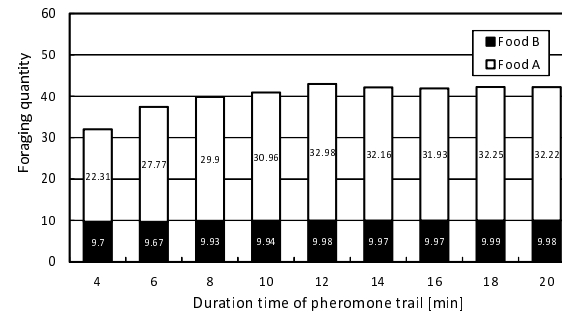


図 6 シミュレーション結果 持続時間調整無し (Food A:100, Food B:10)
Fig. 6 Simulation result without adjusting trail duration time (Food A:100, Food B:10)

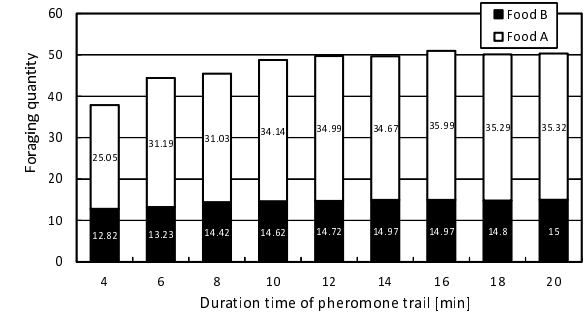


図 7 シミュレーション結果 持続時間調整無し (Food A:100, Food B:15)
Fig. 7 Simulation result without adjusting trail duration time (Food A:100, Food B:15)

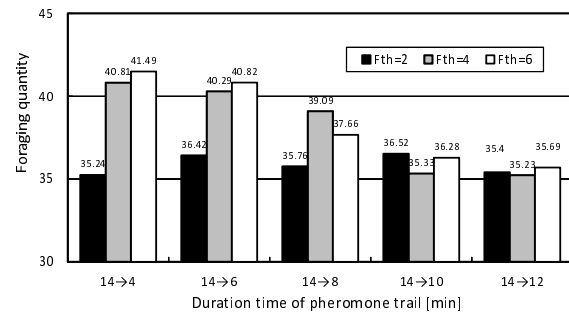


図 8 シミュレーション結果 持続時間調整あり (Food A:100, Food B:5)
Fig. 8 Simulation result with adjusting duration time of pheromone trail (Food A:100, Food B:5, Initial duration time of pheromone trail:14[min])

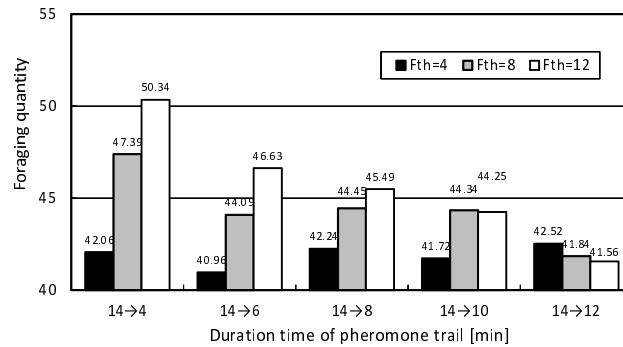


図 9 シミュレーション結果 持続時間調整あり (Food A:100, Food B:10)
Fig. 9 Simulation result with adjusting duration time of pheromone trail (Food A:100, Food B:10, Initial duration time of pheromone trail:14[min])

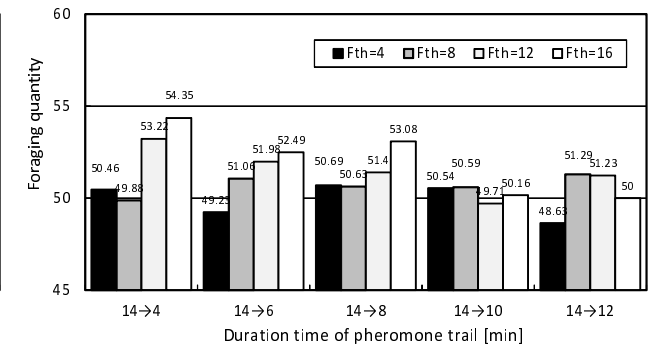


図 10 シミュレーション結果 持続時間調整あり (Food A:100, Food B:15)
Fig. 10 Simulation result with adjusting duration time of pheromone trail (Food A:100, Food B:15, Initial duration time of pheromone trail:14[min])

る。しかし、Food A からの採餌量をシミュレーション結果から比較すると、Food A:100, Food B:5(図 5) の場合は、Food A:100, Food B:15(図 7) の場合では、平均差分*1 4.34 であるが、Food A:100, Food B:10(図 6) の場合では平均差分 1.54 となって大きな違いは見られなかった。初期の餌の量が Food B:5 の場合、Food B の消失が最も早いため、Food B の方に誘引していた残存トレイルによる誤誘引が影響する時間の割合も大きい。その結果、Food A:100, Food B:5(図 5) の場合では誤誘引の影響が最も大きく作用し、Food A への誘引を妨げたことを裏付ける。

る。しかし、Food A からの採餌量をシミュレーション結果から比較すると、Food A:100, Food B:5(図 5) の場合は、Food A:100, Food B:15(図 7) の場合では、平均差分*1 4.34 であるが、Food A:100, Food B:10(図 6) の場合では平均差分 1.54 となって大きな違いは見られなかった。初期の餌の量が Food B:5 の場合、Food B の消失が最も早いため、Food B の方に誘引していた残存トレイルによる誤誘引が影響する時間の割合も大きい。その結果、Food A:100, Food B:5(図 5) の場合では誤誘引の影響が最も大きく作用し、Food A への誘引を妨げたことを裏付ける。

*1 Food A:100, Food B:15 のときの Food A の採餌量と Food A:100, Food B:5 のときの Food A の採餌量の差分を平均した値

4.2.2 トレイル持続時間調整を行う場合

図 8, 図 10 に Food B の餌の量をそれぞれ 5, 10, 15 に設定した場合のシミュレーションによって得られた各トレイル持続時間調整法における総採餌量を示す。グラフの横軸はトレイル持続時間の調整方法 (初期トレイル持続時間 調整後のトレイル持続時間), 縦軸は総採餌量である。表 3 に示すように, ロボットが生成するフェロモン・トレイルの最短のトレイル持続時間は 4[min] である。これ以下の持続時間のフェロモン・トレイルを生成することはできないため, 調整後のトレイル持続時間の最短を 4[min] とした。それぞれの調整法に対して, 持続時間調整を行う際の閾値 F_{th} を変化させた場合の総採餌量を並べて示している。図 8 よりトレイル持続時間調整を行う餌の量の閾値を $F_{th} = 6$ と設定 (図中の白色の棒グラフ) し, トレイル持続時間を 14[min] から 4[min] へと調整した場合に総採餌量が最も多いことがわかる。図 8 ~ 図 10 のそれぞれで採餌量が最も多かった設定の閾値を見ると, すべての初期の餌の量の条件 (Food B: 5, 10, 15) において, Food B の初期の餌の量より大きい値に閾値 (それぞれ, $F_{th} : 6, 12, 16$) が設定されていることがわかる。この設定の場合, Food B 発見と同時に Food A と Food B にそれぞれ異なった持続時間のトレイルが敷設される。Food A には Food B と比較して持続時間の長いトレイルが敷設されるため, より多くのロボットが Food A に誘引される可能性が高くなる。逆に Food B には持続時間の短いトレイルが敷設されるため, ロボットの誘引が少なく, 揮発も速いため Food B 消失後の誤誘引の影響が小さくなる。その結果, 餌の量の多い方の Food A により多くのロボットが集まるようになり, 一定時間内 (30[min]) の総採餌量がトレイル持続時間調整なしの場合 (図 5, 図 6, 図 7 参照) と比較して向上した。トレイル持続時間を調整しない場合の 14[min] のときの総採餌量は, それぞれ 36.18 (Food A: 100, Food B: 5), 42.13 (Food A: 100, Food B: 10), 49.64 (Food A: 100, Food B: 15) であったのに対して, トレイル持続時間の調整を行った場合の総採餌量は, 14[min] から 4[min] へと変更したときが最大で 41.49 (Food A: 100, Food B: 5, $F_{th} = 6$), 50.34 (Food A: 100, Food B: 10, $F_{th} = 12$), 54.35 (Food A: 100, Food B: 15, $F_{th} = 16$) であった。つまり, 餌を発見した時に餌の総量を瞬時に判断してトレイル持続時間を短縮したパターンが最も総採餌量が高く, 調整をしない場合と比較して最大で 119% になっている。

また, 初期の餌の量を Food A: 100, Food B: 5, 初期トレイル持続時間 14[min] の場合における, トレイル持続時間調整の有無による実験開始から Food B が消失するまでの時間を比較する (図 5, 8 参照) と, トレイル持続時間調整を行わない場合が 480[sec] であったのに対し, トレイル持続時間調整を行う餌の量の閾値を $F_{th} = 6$ と設定し, トレイル持続時間

を 14[min] から 4[min] と調整した場合は 611[sec] となり, 調整を行った場合の方が長くなった。これは, トレイル持続時間調整により Food B に敷設されたトレイル持続時間が Food A に敷設されたトレイルの持続時間と比較して短いため, Food B への誘引が活発に行われなかったためである。その結果, 残存トレイルによる誤誘引の影響が小さくなり, より多くのロボットが Food A へ誘引されたため, 総採餌量が増加した。

以上のシミュレーション結果から以下のことが結論できる。餌場が複数存在し, それぞれの餌場に存在する餌の量に偏りがあるような, トレイルの誤誘引が大きく影響するような環境においては, 餌の量からトレイルの持続時間を調整する手法が有効であることが示された。そして, 持続時間調整を行う餌の量の閾値は, 図 8 に示すような餌の量に大きな差がある場合 (Food A: 100, Food B: 5) には, 餌の量が多い餌場にはトレイル持続時間が長く, 少ない餌場には餌の量に応じて持続時間の短いトレイルを敷設することが有効である。

5. 結 論

本研究では, 環境の変化に応じたトレイル持続時間の調整がフェロモン・コミュニケーションを行う群ロボットの採餌行動における効率に与える影響について考察した。蟻の採餌行動に基づいて, 餌場の餌の量に応じてトレイル持続時間を調整する手法を他個体誘引アルゴリズムへ付加することでロボットの採餌量を増加させることを提案した。この提案を実証するためにフェロモン濃度とフェロモン放出量を制御することでトレイル持続時間を調整する機能を有した群ロボットを開発した。そして, 計算機シミュレーションを行い, トレイル持続時間調整の有無による一定時間内に収集した総採餌量を評価し, トレイル持続時間調整の採餌行動における有効性を検証した。実験の結果, 複数の餌場が存在し, それらの餌の量に偏りがあり餌消失後の残存トレイルによる誤誘引が発生するような環境において, トレイル持続時間調整の有効性を確認することができた。特に, ロボットが餌場の発見と同時に餌の量を判断し, 餌の量が少なければフェロモン・トレイルの持続時間を一気に下げることによって誤誘引を抑制することが分かった。初期トレイル持続時間や調整後のトレイル持続時間, トレイル持続時間を調整する餌の量の閾値の決定に関する知見を得た。

今後の課題として, 餌の量以外の活動環境情報をパラメータとしたトレイル持続時間調整の有効性についての考察があげられる。また, 活動環境内に 3 箇所以上の餌が存在するといったより複雑化した環境での最適な持続時間調整パラメータの決定手法の構築があげられる。

謝辞 この研究は, 文部科学省科学研究費 (基盤研究 (B) 課題番号 20360107) によって

行われました。

参 考 文 献

- 1) 藤澤隆介, 今村光, 橋本敬, 松野文俊: フェロモン場を用いて誘引を行うロボット群の開発, 情報処理学会論文誌 数理モデル化と応用, Vol.2, No.2, pp.81-90 (2009).
- 2) Bonabeau, E., Dorigo, M. and Theraulaz, G.: *Swarm Intelligence*, Oxford University Press (1999).
- 3) 勝又綾子, 尾崎まみこ: アリのケミカルコミュニケーション, 比較生理生化学, Vol.24, No.1, pp.3-17 (2007).
- 4) エドワード・O・ウィルソン: 社会生物学, 新思索社 (1999).
- 5) Jackson, D.E. and Châline, N.: Modulation of pheromone trail strength with food quality in Pharaoh's ant, *Monomorium pharaonis*, *ANIMAL BEHAVIOUR*, Vol.74, pp.463-470 (2007).
- 6) Dussutour, A., Nicolis, S.C., Shephard, G., Beekman, M. and Sumpter, D. J.T.: The role of multiple pheromones in food recruitment by ants, *The Journal of Experimental Biology*, pp.2337-2348 (2009).
- 7) Sugawara, K., Kazama, T. and Watanabe, T.: Foraging behavior of interacting robots with virtual pheromone, *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS2004)*, Vol.3, pp.3074-3079 (2004).
- 8) Nishinari, K., Sugawara, K., Kazama, T., Schadschneider, A. and Chowdhury, D.: Modeling of self-driven particles: Foraging ants and pedestrians, *Physica A*, Vol.372, pp.132-141 (2006).
- 9) Garnier, S., Tache, F., Combe, M., Grimal, A. and Theraulaz, G.: Alice in Pheromone Land: An Experimental Setup for the Study of Ant-like Robots, *Proc. IEEE Swarm Intelligence Symposium (SIS2007)*, pp.37-44 (1-5 April 2007).
- 10) 下山勲, 神崎亮平: 生物型マイクロマシン, バイオメカニズム学会誌, Vol.22, No.4, pp.152-157 (1998).
- 11) Purnamadajaja, A. H. and Russell, R. A.: Guiding robots' behaviors using pheromone communication, *Autonomous Robots*, Vol.23, No.2, pp.113-130 (2007).
- 12) 藤澤隆介, 今村光, 松野文俊: フェロモン・コミュニケーションによるロボット群の協調運搬, 情報処理学会論文誌 数理モデル化と応用, Vol.4, No.4, pp.10-18 (2011).
- 13) Fujisawa, R., Imamura, H. and Matsuno, F.: Cooperative Transportation by Swarm Robots Using Pheromone Communication, *Proc. of 10th International Symposium on Distributed Autonomous Robotics Systems (DARS2010)* (2010).