

原著論文

実世界コンピューティングによる フェロモンコミュニケーションの実装 — 小型群移動ロボットの数値シミュレーション —

福田 耕治*・伊丹 伸*・杉野 隆三郎*・三宅 修平**

要旨： 蟻のフェロモンコミュニケーションによる群知能の発現は、以前から生物学的にも注目され研究対象となってきた。このような群知能はモデル化され、シミュレートする研究、群ロボットシステムへの適用研究などが行われ、工学的応用や教育への展開にも取り組まれている。しかし、多くの群ロボットシステムでは、単一のフェロモン提示、可搬性に欠けるシステムサイズなどに問題がある。そこで、著者らは工学的応用および教育への展開が容易となるような、複数の仮想フェロモン提示、可搬性のあるサイズ・構成を特徴とする群ロボットシステムを提案してきた。本稿では、実際にロボットシステムを構築する前段階として、開発した群ロボットシミュレーションシステムの特徴・構成について述べる。そして、採餌行動シミュレーションを行い、ロボットサイズおよび投入台数の食料運搬効率への影響を明らかにした。

キーワード： フェロモンコミュニケーション, 小型群移動ロボット, 自律動作, フェロモン群行動アルゴリズム, 実世界コンピューティング

Pheromone Communication for Real World Computing: Computer Simulation of Small Mobile Swarm Robots

Koji FUKUDA*, Shin ITAMI*, Ryuzaburo SUGINO* and Shuhei MIYAKE**

Abstract: The emergence of swarm intelligence caused by ant's pheromone communication has been an interesting research subject in biological, scientific and engineering fields. These type swarm intelligences are modeling and developing of its applications for engineering and educational field through the research of numerical simulation or swarm robot experiment. However, the many swarm robot systems have the problems in which the system can't run more than one pheromone and have not the portability to transport. Therefore, we have proposed the new swarm robot system to make an easy handling for engineering or educational application. It has a special feature in which our system can use the multiple virtual pheromones and has the compact size and the well-structured devices for transporting package. In this paper, first, we show the characteristics and the structures of our developed numerical computation to design for building up the swarm robot system. Second, we try to make a numerical simulation of feeding behavior and find out the efficiency of robot size or unit ball for the food transport performance.

Keywords: Pheromone communication, Small mobile swarm robot, Autonomous action, Pheromone swarming algorithm, Real world computing

* 阿南工業高等専門学校 創造技術工学科

Department of Creative Technology Engineering, National Institute of Technology, Anan College

** 東京情報大学 総合情報学部

Faculty of Informatics, Tokyo University of Information Sciences

2017年9月20日受付

2018年3月28日受理

1. はじめに

世界は、生物の個体や集団、さらにそれらと環境との相互作用により生まれる複雑な現象であふれている。一般にこのような現象は、生物が環境に対して生存可能性を高めるように適応的な行動をとることで発現する。現実世界で生物がとるこのような適応的行動・活動の構造や動作を取り入れることで、コンピュータによって現実世界における様々な問題に対処し得る柔軟な情報処理を実現しようとする取り組みは、実世界コンピューティングと呼ばれる枠組みの一部である（通産省機械情報産業局 1992）[1]。また、バイオミメティクス（生物模倣）により現実世界の中で柔軟かつ適応的な行動を発現させ、目的を達成するようなロボットシステムの開発に関する研究を実世界コンピューティングと称することもある。

さて、生物の集団適応行動の一つとして群知能がある。これは、個々の個体は単純な行動様式を有しているに過ぎないが、集団となり、それが環境と相互作用することで環境に対し柔軟に適応的な活動を発現する現象と言えらる。群知能を発現する生物としてはアリやハチなどの社会性昆虫が知られているが、特にアリはフェロモンを分泌し食料の効率的な運搬を実現することが知られている（Fourcassié et al. 2010）[2]、（Wilson 1978）[3]、（Holldobler 1978）[4]、（Krogh 1978）[5]。

アリは互いに接触する際、自身がフェロモンを分泌し、相手のフェロモンを検出することで自身の行動を選択している。また、直接アリ同士が接触しない場合でも、周囲のフェロモンの状態から自身の行動を選択している。このように、アリはフェロモンを通して情報交換することを通して先の適応的行動（群知能）が発現することから、フェロモンによる情報交換全体を指してフェロモンコミュニケーションという。このことは以前から知られており、生物学的見地から実際にアリを用いて実験し、その現象をかなり詳細に検討した報告も見られる（Fourcassié et al. 2010）[2]。また、コンピュータ上でこれらの仕組みを取り入れたシミュレーションによって群知能行動の評価を行っている研究が見られる（Kurumatani 1995）[6]、（Nakamura and Kurumatani 1998）[7]、（中村・車谷 1999）[8]。さらに、進化的

アルゴリズムを蟻の行動ルールに適用し、採餌行動の効率化・最適化を目指す研究も行われている（川村ら 2001）[9]、（Nakamichi and Arita 2006, 2009）[10] [11]、（Bai et al. 2017）[12]。

近年、フェロモンコミュニケーションの原理を利用した工学的応用に関する研究もおこなわれている。たとえば、（Schoonderwoerd et al. 1997）[13]は電話回線ネットワークの負荷調整を、ネットワークのノード間を移動するエージェントと移動に伴って発生させるフェロモンを用いてシミュレートし、その有効性を示した。また、工業用・医療用ガスを製造しているアメリカの企業は、全米の生産拠点からパイプラインや鉄道、トラックを使って多くの顧客に製品を納入している。この企業は人工知能の開発会社と共同でアルゼンチンアリの餌取り行動にならったアルゴリズムを開発し、ソフトウェア上で何十億匹もの“アリ”を放ってフェロモンが一番強力になる、すなわち最適なルートを探し出すことに成功し、これにしたがって生産計画と輸送ルートを作成することで大幅にコストを削減できたということである（Millar 2007）[14]。

さらに、アリのフェロモンコミュニケーションに代表される群知能を、コンピュータシミュレーション等のソフトウェアだけでなく、ロボットをアリなどの生物のように動作させることで、多数のロボットによって群知能を発現させる研究もおこなわれている。これらの研究は、フェロモンに何をを使うかによって特徴づけられる。（Payton et al. 2001, 2003）[15][16]は、ロボットに搭載した赤外線によるメッセージ伝達装置を利用して仮想的なフェロモンを設定し利用することで群ロボットシステムを構築している。（大場ら 2008）[17]、（竹下ら 2015）[18]は、ロボットに水筆を持たせ、水を含んでいるところだけ黒くなるシート上を走行することでフェロモンの分泌に対応する仕組みを構成した。水を含んだシート部分は水の蒸発とともに色が薄くなり、最終的に元の色に戻る。このことから、フェロモンの蒸発による消失には対応しているが、蒸発に伴う拡散には対応していないものと考えられる。藤澤らは、アルコールをフェロモンとして利用するロボットシステムを提案し、その有効性を確認している（藤澤ら 2009, 2011, 2012）[19]-[21]。また、（Nishinari et al. 2006）[22]はプロジェクトでフェロモンを投影しつつ上方からカ

メラでロボットの位置とフェロモンの分泌マーカを検出するコンピュータシステムを構築し、一方で自身の場所に投影される光による色と明るさを計測することでフェロモン検出が可能なロボットを開発した。そして、これらのロボットおよびコンピュータシステムを用いて、群ロボットとしての機能がフェロモンの特性によって変化することを実験により確認している。

これらの研究は、フェロモンに見立てた水、アルコール、熱などでは、その物理的特性を調整することが難しく、実験という立場では、環境条件、すなわち温度、湿度、空気の流れなどをコントロールしないと実験条件が変化してしまうという問題を含んでいる。また、一般にアリのフェロモンには種類があることが知られているが、これらの方法では2種類以上のフェロモンに対応することができないといった問題もある。そこで、菅原らの用いたCGによるフェロモンのシミュレーションと実際のロボット駆動とのハイブリッドなシステムは、実際にロボットを駆動させながら、環境条件に影響を受けずに安定してフェロモン特性を容易に制御できるという利点がある。ただし、プロジェクトによる投影光を計測するため、光の環境を整える必要がある。

以上のように、フェロモンコミュニケーションに代表される群知能に関する研究がシミュレーションや実際のロボットを用いて行われているが、一方

で、教育方面への利用も考えられている。藤澤らは、身近な昆虫の振る舞いをロボット技術によって理解するという新たなアプローチによって高校生に理工学系科目に興味を持ってもらうことを目的として、フェロモンコミュニケーション型ロボットを用いた教育活動を実施している(藤澤・大国 2011)[23]。また、このような群知能の発現を直接確認できるシステムは、ロボットシステムや自律分散などに関連する工学教育の導入として有効なものとなり得ると考えられる。ただし、それぞれの群ロボットは教育のための装置としてはサイズが大きく移設が困難な場合が多く、移設できたとしても設置や撤去に手間がかかってしまうことは、運用上大きな問題となる。

以上述べたように、現実世界、シミュレーションシステムおよびロボットシステムの関係性は図1のように示すことができる。そこで、著者らは現実世界でフェロモンコミュニケーションにより群知能を発現する群ロボットシステムを構成し、様々な条件により発現する群としての特性および個々の挙動を詳細に評価することを通して、複雑な挙動の構造を明らかにするとともに現実世界に適用可能な工学的応用および教育への展開の可能性を検討することを大きな目標とする研究に取り組んでいる。

本研究では、まず液晶ディスプレイ(LCD)をロボットの活動フィールドとする、可搬性の高い群ロボットシステムを提案する。このシステムは、

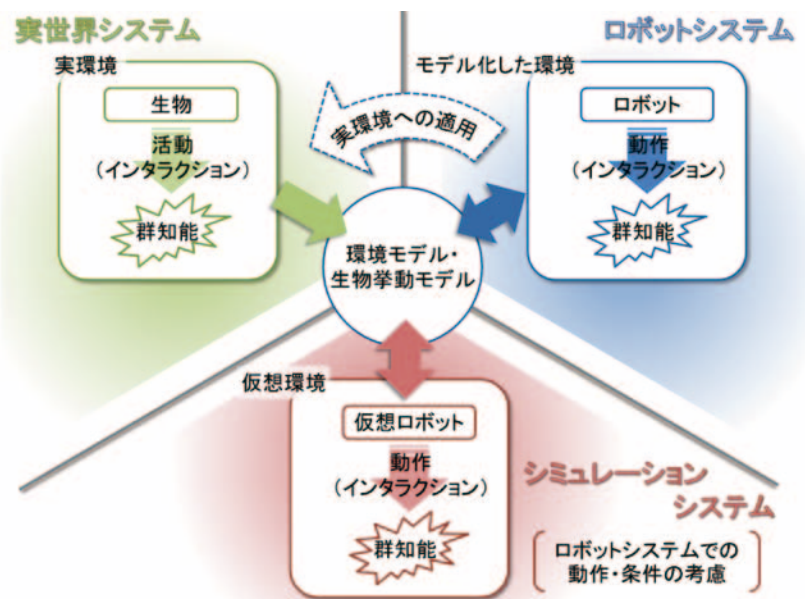


図1 実世界・シミュレーション・ロボットシステムの関係性

水平にしたLCDにフェロモン分布を表示・シミュレートし、LCD上を多数の移動ロボットが自律的に移動するものである。しかし、少なくとも現時点では移動ロボットはアリのように数ミリメートル以内のサイズに小型化できないことから、ある程度の大きさにならざるを得ない。実際に群ロボットによる群知能の発現を考えると、その特性はロボットサイズの影響を受けると推察される。そこで、実機による確認や実験をする前段階として、ロボットのサイズを考慮した、フェロモンコミュニケーションによる群ロボットシミュレーションシステムを構築し、ロボットサイズの影響等について検討することにした。

本稿では以降の章で、構築を目指すシステムの構成を説明し、フェロモンのモデル、移動ロボットの採餌に対する行動モデル、ロボットサイズを考慮したシミュレーション、アプリケーションの概要および実行例、さらにロボット台数・サイズによる採餌効率の変動について論じる。

2. 群ロボットシステム

前章で言及したように、従来の群ロボットシステムでは、水、アルコール、熱などをフェロモンに見立てて構成している。しかし、フェロモンを1種類しか取り扱えないこと、フェロモンを分泌させる機能を持たせるために小型化が困難でありシステム全体が大型になること、さらに実験の際には実験条件を整えるための措置が重要となることなどに問題がある。一方、プロジェクタを用いたフェロモンの投影による菅原らの提案システムでは、フェロモン分布が数値シミュレーションになるが、逆に特性を制御しやすく再現しやすいこと、フェロモンごとに色を定義することで複数のフェロモンを表現でき、なおかつ直接視認することができる点で研究・実験システムとして利点がある。しかしながら、教育への利用も考慮すると、現段階で考慮できるハードウェア条件としてはシステムのサイズが大きく、投影された光の色を判別するためシステム周辺の光環境を整える必要があるといった問題も残る。

そこで、本研究ではシステム全体が小型で可搬性が高いこと、移動ロボット自体も小型で多数準備しやすいこと、周囲環境の影響を受けにくいことなどの要件を、より満足させるシステムとして図2に示

す群ロボットシステムを提案する。図より、ホストPCは、USBカメラでとらえたロボットの位置を検出し、状況に応じてフェロモンをLCD上に表示する。フェロモンの分布状況は、ホストPCによりシミュレートされ、リアルタイムでLCDに表示される。ロボットは、LCD上を活動フィールドとしてLCDに表示されるフェロモンやその他の餌や巣などのオブジェクトを、ロボット底面に配置したカラーセンサにより検出する。

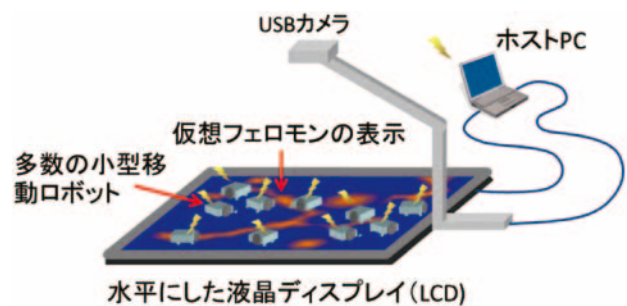


図2 提案する群ロボットシステムの構成

本研究では、実際に群ロボットを動作させることを想定したシミュレーションシステムを開発することから、実際にロボットやその活動フィールドであるLCDについて設定しておくことにする。ただし、これらは今後利用するLCDやコンピュータシステムによって変更可能なものであることは言うまでもない。使用するLCDは20.1インチ、1,600×1,200 [pixel] 分解能のディスプレイとする。ただし、フィールドのマッピングは8ピクセル単位とし、200×150 [cell] とする。

ロボットは、複数のセンサによりフェロモンの勾配を検出し、行動モデルに従って動作する。シミュレータは、実際のロボットに対応させる必要があることから、ロボットが備える必要条件を以下のように定義した。

- ・可能な範囲で小型にすること。
- ・カラーセンサを本体底面に4つ配置すること。
- ・ロボットは球形もしくは円柱形とすること。

第3の条件は、ロボットどうしが接触した場合に、相互の向きによって挙動が変化してしまうような形状的な異方性をなくすためである。これらの基本方針に基づくロボットに関する設定については、移動ロボットモデルの項で述べる。

3. フェロモンのモデル

アリの種類は非常に多く、その生態も非常に変化に富んでおり多様であることがわかっている。ただし、多くのアリは群れを形成し、全体として生き抜くために様々な種類のフェロモンを分泌・判別することができる。中村と車谷[8]は、アリの採餌行動に対するフェロモンモデルとして2種類のフェロモンを定義しているが、本稿でもそれに基づき以下のフェロモンを定義した。

- ・巣フェロモン

アリが巣から出て餌を探すと分泌する、探索していることを示すフェロモン。

- ・動員フェロモン

アリが餌を発見してそれを巣に持ち帰るときに分泌する、帰巣を示すフェロモン。このフェロモンは、他のアリの餌に誘導する働き（動員）を有する。

3.1 巣フェロモンのモデル

フェロモン濃度は、それが蒸発し消失しない時間内に多数のアリが通った領域ほど高いといえる。一方、アリは巣から出て餌を探索する際、最初はランダムに探索を開始するしかないと考えられる。非常に多くのアリが巣を出発してランダムに探索する状況を考えると、ある一定の形状・サイズの領域内に存在するアリの数、すなわちアリの密度はフェロモンの消失時間内に通ったアリの数に対応するといえる。すなわち、巣フェロモンの濃度は、探索アリの密度に対応していると考えられる。アリの密度は、先に述べたように非常に多くのアリが巣から出発してランダムに餌を探索することを考えれば、巣からの距離に比例して小さくなる。したがって、巣フェロモンの濃度は、巣からの距離に比例するといえる。本来であれば、このような状況は実際のロボットシステムにおいても非常に多くのロボットを準備して再現するべきであるが、現実的に準備できるロボットはアリとは比較にならないほど少ないことから、直接これに近い分布を得ることは困難と言わざるを得ない。もちろん、実際には個々のアリの行動によって変動が生じ、空気の流れや気温などの環境によって変化する状況を設定することも考えられるが、最もシンプルなモデルとしては定常的に巣からの距離に比例した濃度を有するといえることができる

だろう。

3.2 動員フェロモンのモデル

餌を獲得したアリは、動員フェロモンを分泌しながら巣に向かって移動する。分泌された動員フェロモンは地表に付着するが、やがて気化し拡散する。気化・拡散した動員フェロモンは、次第に霧散し消失する。ここで、アリが分泌し地表に付着した動員フェロモンを「地表フェロモン」、気化した動員フェロモンを「気化フェロモン」と呼ぶことにする。図3には、空間を小領域（セル）に分割し、そのセルごとに分泌付着、気化・拡散、消失といった一連の挙動を示す。これらの挙動から、以下のような離散式によって、次の時点の地表フェロモン量 $T^*(x,y)$ および気化フェロモン量 $P^*(x,y)$ を得ることができる。

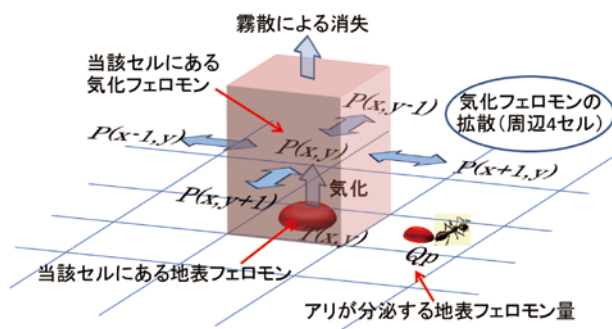


図3 セル (x,y) における動員フェロモンの挙動

$$\Delta T^k(x,y) = \begin{cases} Q_p & k_th \ ants \ pheromone \ secretion \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (1)$$

$$T^*(x,y) = (1 - \gamma_{eva})T(x,y) + \sum_{k=1}^N \Delta T^k(x,y) \quad (2)$$

$$P^*(x,y) = (1 - \gamma_{dsp})P(x,y) + \gamma_{eva}T(x,y) + \gamma_{dif}(P(x-1,y) + P(x,y+1) + P(x+1,y) + P(x,y-1) - 4P(x,y)) \quad (3)$$

(1) 式の $\Delta T^k(x,y)$ は、 k 番目のアリがセル (x,y) において分泌する動員フェロモンの量である。アリが動員フェロモンを分泌する条件を満たしていれば一定の分泌量 Q_p が与えられ、条件を満たさなければ分泌しないということで 0 が与えられる。(2) 式の $T^*(x,y)$ は、セル (x,y) における次の時刻の地表フェロモン量である。この式の右辺第 1 項は気化に伴う地表フェロモン量の減少を表しており、第 2 項が当該セルにおいて分泌されるフェロモンの総量を表し

ている。すなわち、この式は第2項が地表フェロモンの供給による増加を表し、第1項が気化による減少を表しており、一度供給により地表フェロモンが増加しても、以降の供給がなければ次第に減少して最後は気化によって消失することを示している。(3) 式の $P^*(x,y)$ は、セル (x,y) における次の時刻の気化フェロモン量である。この式の右辺第1項は現在の気化フェロモン量 $P(x,y)$ が霧散により消失する割合 γ_{dsp} を考慮して次の時点に残存する気化フェロモン量を示しており、第2項は(1)式により供給される、地表フェロモンから気化したフェロモンの量を示している。さらに、第3項は拡散項であり、拡散率 γ_{dif} を係数として、周辺4方向との濃度勾配に対応して流入・流出する気化フェロモン量を求めている。

4. 移動ロボットモデル

小型移動ロボットは、実現可能な構造・機能を有する必要がある。また、ロボットの挙動シミュレーションのアルゴリズムを適切な範囲でシンプルにすることが望まれる。

4.1 ロボットの基本仕様

本研究の目的から、小型移動ロボットは可能な限り小型であることが望ましいが、以下の条件を考慮し、直径40 [mm] 程度の円柱型移動ロボットとした。

- ・ロボットの底面に4つのカラーセンサを配置すること。使用を想定しているカラーセンサは、端子を含めて7 [mm] × 5 [mm] のサイズである。なお、フォトダイオードがマトリックス状に配置されている感知部はおおよそ1.2 [mm] × 1.2 [mm] であり、現時点で設定しているフィールドにおけるセルサイズである2.04 [mm] × 2.04 [mm] よりも小さいことから、十分な空間分解能を有しているといえる。
- ・ロボットが他のオブジェクトと接触した場合、その瞬間のロボットの向きによって挙動が異なると計算処理が複雑になることから、ロボットの形状に異方性がないこと。

4.2 ロボットの挙動モデル

アリの行動モデルは、中村と車谷(1999)[8]によって提案されているモデルをベースとしている。本研究で提案する行動モデルの状態遷移図を図4に

示す。ここで移動ロボットは、センサ情報に対応して変化する4つの行動モードをもち、モードを遷移させながら、餌を獲得していく。なお、トレイルとは地表フェロモンによって形成された餌まで続くはずの経路であり、誘引域とはトレイル周辺に広がる気化フェロモンが一定以上の濃度で存在する領域である。ロボットは、最初はランダムに移動することで餌を探索する。そして、偶然餌を発見すると動員フェロモンを分泌しながら巣に戻ろうとする。この動作では巣フェロモンを検知し、濃度の高い方に向かって移動することで巣に到達することができる。巣に到達したロボットは、再び餌を探索するモードに切り替わる。ただし、餌を探索中に誘引域を発見した場合は、その濃度の高い方に移動し、トレイルを発見した場合はトレイルをたどって餌に向かう。このような一連の動作により、ロボットが餌を発見しトレイルが形成された後に、それが消失するよりも早い時点で他のロボットがトレイルをたどって餌にたどり着くことが繰り返されることでトレイルが強化され、最終的に全体として効率的な採餌活動が実現される。

このような動作を実現するための、4つの行動モードについて、以下に説明する。

- ・探索モード：ロボットはランダムに動き回り、トレイルや誘引域、餌場を探すモードである。それぞれ、対象を検知するとモードを切り替える。トレイルを検知すると追跡モードに切り替える。誘引域を検知すると誘引モードに切り替える。また、餌を発見するとそれを巣に持ち帰るため帰巣モードに切り替える。
- ・誘引モード：ロボットは、気化フェロモン濃度が高い方に向かって移動する。気化フェロモンが地表フェロモンから発生することを考えると、気化フェロモンの濃度が高い方に地表フェロモンが存在している可能性が高いといえる。このモードは、気化フェロモンを利用して地表フェロモンでできた餌までのトレイルを探す役割を持っているといえる。そして、トレイルを検知した場合は追跡モードに切り替え、移動中に誘引域を見失うと探索モードに戻る。
- ・追跡モード：ロボットは、トレイルを巣と逆に辿っていく。つまり、巣フェロモン濃度が低く、動員フェロモン濃度が高い方に向かって移動す

る。餌を発見するとそれを巣に持ち帰るため帰巢モードに切り替える。また、追跡中にトレイルを見失うと探索モードに戻る。

- ・帰巢モード：ロボットは、動員フェロモンを地表に分泌しながら餌場から巣まで餌を運ぶ。つまり、巣フェロモンの濃度の高い方に向かって移動する。巣に到着すると、探索モードに戻る。

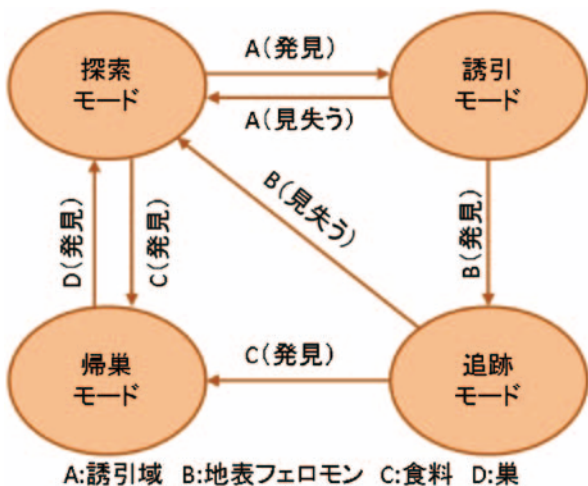


図4 移動ロボットの4つの動作モードと遷移

4.3 ロボットが接触する際の挙動

実際のロボットシステムでは、ロボットが単独で移動するだけではなく、ロボットの行く手を他のロボットが妨げてしまうなど、ロボット同士相互に干渉する。このため、シミュレーションにおいても、ロボットどうしが接触する際の挙動を考える必要がある。このような状況は、ロボットが活動領域に対してある程度大きくなってくると頻繁に発生し、実験結果に影響を及ぼすと推察される。本研究では、シミュレーション中でロボットが接触した際に、以下の手順によりロボットが重ならないように移動するものとした。

図5には、2台のロボットが接触している状態例を示す。ロボット R_i の向きを θ_i 、ロボット R_i から見たロボット R_j の方向を θ_{ij} 、 θ_{ij} を基準とする θ_i とのなす角を θ_{id} とする。また、ロボット R_i の移動ベクトルを v_i とし、 v_{iv} と v_{ip} を速度 v_i の θ_{ij} 方向成分と、その垂直成分とする。このとき、 v_{ip} は、ロボット R_i が速度 v_i でロボット R_j に当たり、 v_{iv} が消滅して残った移動成分と考える。この時、 v_{ip} の X 成分および Y 成分は、次式によって表される。

$$v_{ip_X} = v_{ip} \cos(\theta_{ij} + \pi/2) \tag{4}$$

$$v_{ip_Y} = v_{ip} \sin(\theta_{ij} + \pi/2)$$

ここで、 R_i が速度ベクトル v_i に従ってそのまま移動したと想定した場合の、 R_i と R_j 間の距離を $Dist$ 、2台のロボットの仮想的な重なり量を len とする。ロボットの半径を R とすると、 $Dist$ および len は次式によって表される。

$$Dist = \sqrt{(R_{jX} - R_{iX})^2 + (R_{jY} - R_{iY})^2} \tag{5}$$

$$len = 2R - Dist \tag{6}$$

実際にロボットどうしは重ならないことから、仮想重なり量がゼロになるように移動するとして、移動の X 成分、 Y 成分である v_{idX} 、 v_{idY} は次のように求められる。

$$v_{idX} = v_{ip_X} - len \cdot \cos\theta_{ij} \tag{7}$$

$$v_{idY} = v_{ip_Y} - len \cdot \sin\theta_{ij}$$

結果として、ロボットの動きは接触点における接戦方向への移動となり、その際の方向や移動量が求められることになる。

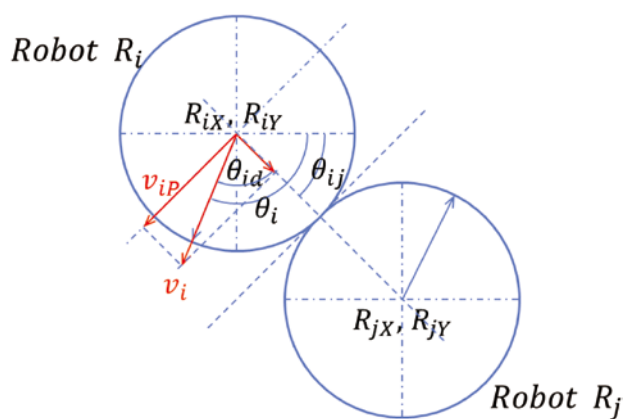


図5 ロボットどうしが接触する場合の関係

5. シミュレーションシステムと実行例

前章までのフェロモンおよびロボットのモデルに基づき、群ロボットのシミュレーションシステムを構築した。本章では、最終的に実際のロボットを動

作させる際、LCDに表示するフェロモン分布やオブジェクト・ロボットの表示方法、さらにシミュレーションの実行例を示す。

5.1 フェロモンおよびオブジェクトの表示

カラーセンサによって計測される色データは、RGB（赤、緑、青）という光の三原色の強度の組み合わせによって得られる。一方、LCDの表示色もRGBの輝度の組み合わせにより指定することができる。そこで、ロボットはLCD上の輝度を測定することができるとして赤色を動員フェロモン、青色を巣フェロモン、そして緑色をその他のオブジェクトを表す色と定義し、フェロモンについてはそれぞれの色の輝度をフェロモンの濃度とすることとした。図6には、フォームへの表示イメージを生成す

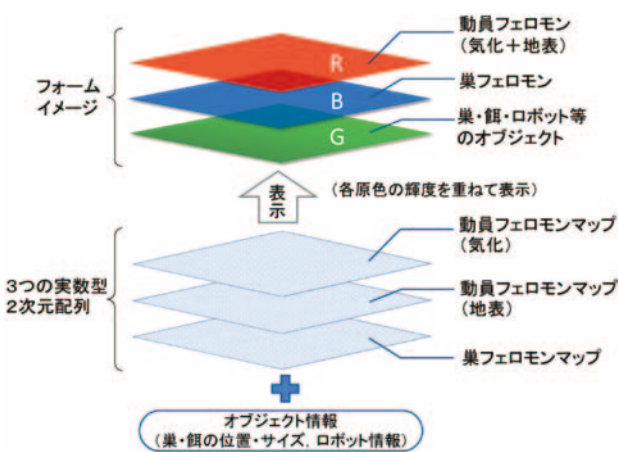


図6 シミュレーションデータに基づくウィンドウフォーム表示

際の各種データとの対応関係を示す。シミュレーションによって得られる各フェロモンの濃度マップデータは、フォーム上のR、Bの輝度に反映され、餌場や巣の情報、およびロボットの情報に基づいてGに必要なオブジェクトが描かれるように処理される。この処理によって、一つのセルにおいて巣フェロモンと動員フェロモン、さらにオブジェクトが同時に存在するという現実的な状況を構成することが可能となる。

なお、この原理に従えば、巣フェロモンも動的に変動させることが可能であり、さらにGの一部の輝度範囲を別のフェロモンに割り当てることで3種類までのフェロモンを個別の特性を持たせてシミュレートすることが可能である。

図7には、図6に基づいて表示したウィンドウフォームの例とシミュレーションにおいて表示される移動ロボットの例を示す。巣フェロモンは、定常的に青のグラデーションで濃度が示されており、動員フェロモンは地表フェロモンの周辺に気化フェロモンが広がるように分布している状況がわかる。一方、ロボットは図のようにロボットの外形を表す円にロボットの向きを表す中心から前方に向けての線分が描かれる。また、ロボットの番号および、到達回数が提示される。到達回数とは、そのロボットがシミュレーションを開始してからその時点までの間に巣から餌場、逆に餌場から巣に到達した回数である。したがって、一往復すると2回のカウントということになる。

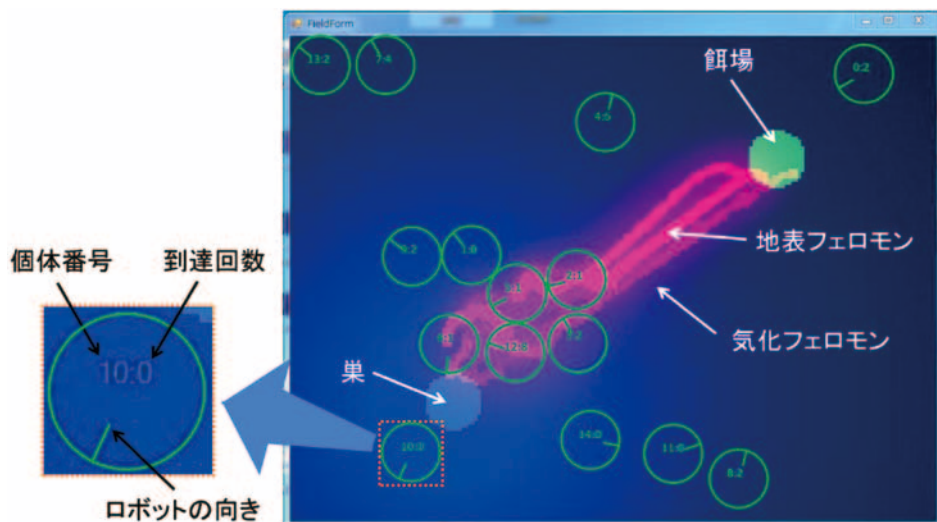


図7 フェロモンなどオブジェクトの表示例

5.2 シミュレーションの条件とコントロール

本シミュレーションシステムでは、1回の計算試行を1ステップとすることで、ステップ回数に従って時間が経過することに対応させる。また、1ステップの時間間隔を0.1 [sec] と定めている。そして、この場合の仮想ロボットの最大移動速度を約17.90 [mm/s] と設定している。次に、動員フェロモンの特性は各パラメータを試行錯誤により決定し、表1に示す固定値としている。

表1 動員フェロモンの特性

パラメータ	値 [%/step]
気化率	1.0
拡散率	23.0
消失率	0.8

先に述べたシミュレーションにおいて、フェロモンなどオブジェクトの種類に対する輝度値もしくは輝度の範囲を表2に示す。地表フェロモンと気化フェロモンは同じ赤色を用い、輝度範囲を分割している。表示は地表フェロモンが優先され、気化フェロモンがあっても地表フェロモンがあればその輝度値が設定される。図6でもわかるように、実際のマップは別々に計算され保持されているので、地表フェロモンがセル内に存在していても気化フェロモンは個別に保持・更新されているので、矛盾は生じない。また、ロボットの動作としても、気化フェロモン濃度の高い方に移動し地表フェロモンを発見することで誘引モードから追跡モードに移行する、というルールに対応しており、矛盾なく動作する。

表2 オブジェクトの輝度・輝度範囲

オブジェクト	色	輝度範囲
巣	緑	100
餌	緑	200
巣フェロモン	青	0~255
気化動員フェロモン	赤	0~200
地表動員フェロモン	赤	201~255

図8には、シミュレーションをコントロールするウィンドウフォームを示す。シミュレーションは、設定した回数(ステップ)だけ繰り返す。シミュレーションの開始、一時停止、中止などのコントロール、およびフェロモンの特性を設定することができる。

さらに、シミュレーション中にロボットの状態や各種パラメータの値などを確認したい時などは、プログラム中に表示命令を挿入することで図中の情報表示用テキストボックスに反映されるようになっている。

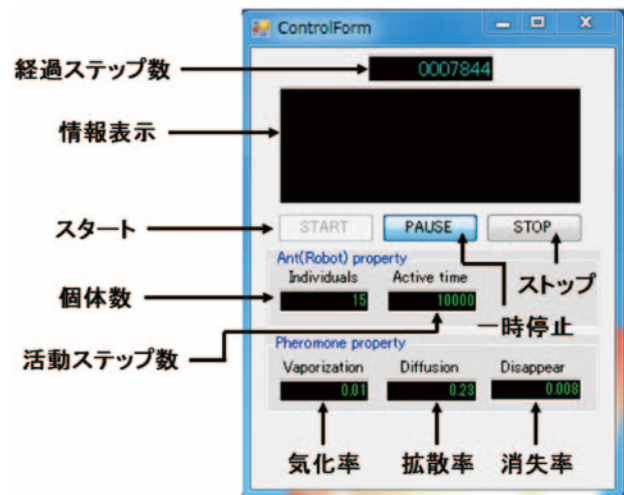
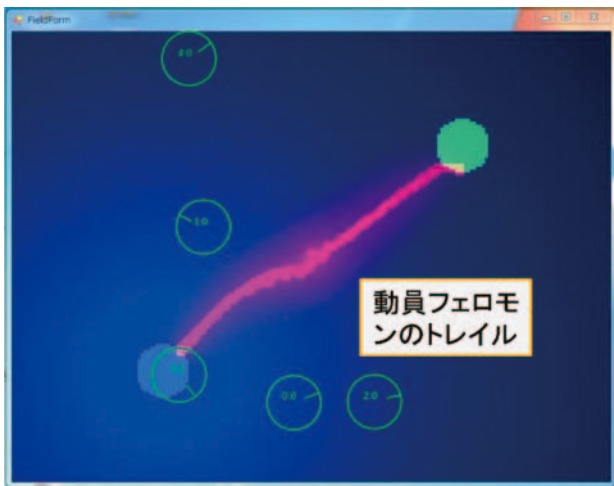


図8 シミュレーションコントロールフォーム

5.3 シミュレーション実行例

以上の条件を設定し、シミュレーションを行った結果、得られたいくつかの実行例を図9~図11に示す。なお、本稿では、フィールドに対するロボットサイズの影響を確認するため、いくつかのロボットサイズについてシミュレーションを実施している。ここで、ロボットサイズは、使用を想定しているLCD(ディスプレイ範囲)と開発予定のロボットサイズ(直径40 [mm])の比率をロボットサイズ1.0とする相対サイズとして示している。

図9は、ロボットサイズ1.0、5個体でシミュレーションを実行した結果である。ロボットは、探索モードでランダムに移動しているうちに偶然餌を発見する。餌を得たロボットは帰巣モードに遷移し、巣フェロモン濃度の高い方向を目指して移動する。この時、図9(a)のように動員フェロモンを地表に分泌しながら移動することで動員フェロモンの道ができる。この地表フェロモンは気化フェロモンとなり、後に続くロボットがないと最終的に消失する。したがって、図9(b)に示すように、基本的には先にフェロモンが分泌された餌場付近から消失していくことになる。



(a) 動員フェロモントレイルの形成

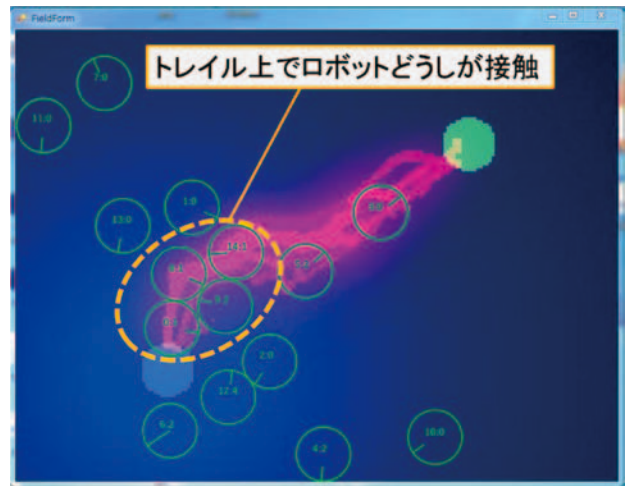
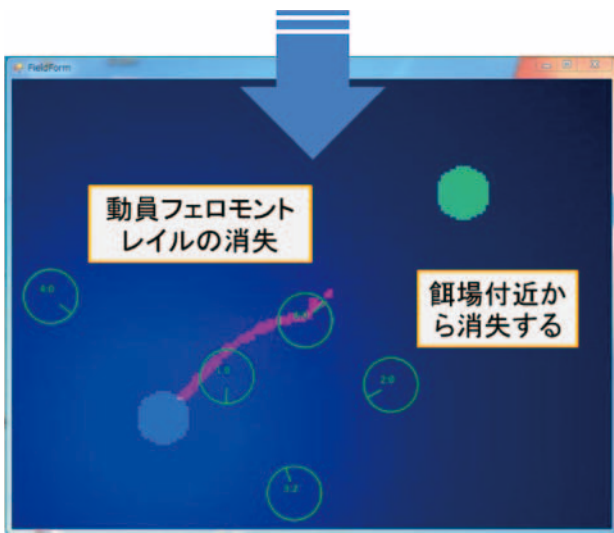


図10 シミュレーション実行例2



(b) 動員フェロモントレイルの消失

図9 シミュレーション実行例1

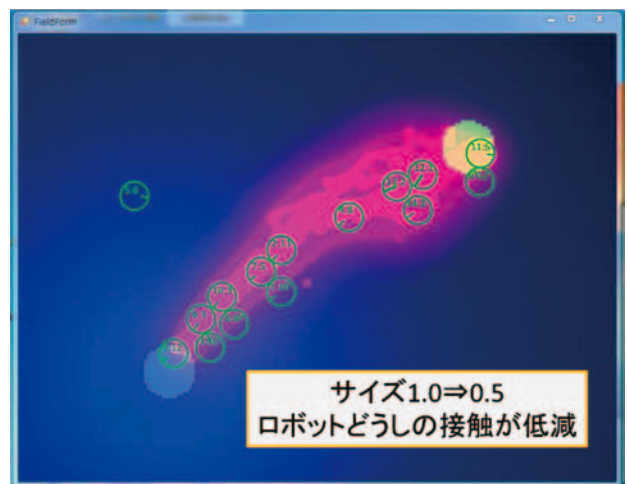


図11 シミュレーション実行例3

ロボットの数を多くすると、図10のようにロボットが一度できた地表フェロモンの道であるトレイルを発見し、それをたどって餌場にたどり着くことが多くなる。そうすると、トレイルも多く発生し「太い道」が形成される。ただし、ロボットサイズが大きいと図に示すようにロボットどうしが接触し、相互に行く手を阻む現象も発生する。これによりトレイルの経路も変化することがある。図11は、ロボットサイズを小さくしてシミュレーションした場合である。15台あるロボットのほとんどがトレイル上に存在し、餌場と巣を往復する状況が確認された。

6. フェロモンコミュニケーションの効果

前章までに、フェロモンコミュニケーションによって巣と餌場とを効率的に移動する現象は確認

できた。一方で、先に述べたように、純粋なコンピュータシミュレーションでは、アリは大きさを定義しないことが多い。それは、活動領域に対してアリが十分に小さいことが主な理由といえるが、ロボットシステムの場合は活動領域に対してロボットがある程度のサイズを有するため、大きさの無い、ロボットどうしの接触を無視したシミュレーションは適切とは言えなくなってくる。そこで、本シミュレーションシステムにおいてロボットの相対サイズを変化させて運搬効率を評価してみた。また、ロボットの投入台数についても比較するシミュレーションを行った。

図12にその結果を示す。横軸はロボットの相対サイズ、縦軸は平均移動ステップ数である。ここで、平均移動ステップ数とは、シミュレーション時間（ステップ数）を、ロボットが巣から餌場、餌場

から巣に到達した回数で除した値について、投入したすべてのロボットについて平均した値である。したがって、この値が大きいと、ロボット1台が他方のサイトに移動する平均時間が長いということになり、移動に時間がかかっていることを示す。なお、図に用いた結果は、同一条件で10回ずつ試行した平均値である。図より、全ての台数・サイズにおいて、フェロモンコミュニケーションを伴う方が、フェロモンコミュニケーションを伴わないランダムな探索を続けた場合よりも運搬効率が良好となった。

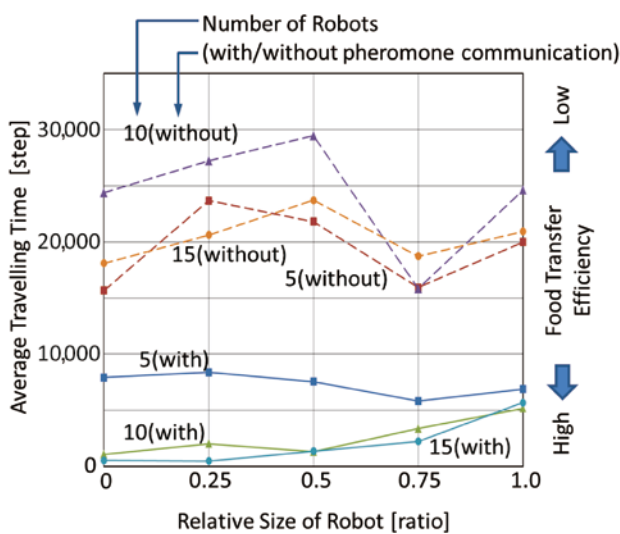


図12 相対ロボットサイズと平均到達時間

また、フェロモンコミュニケーションを伴わない場合、投入台数による明示的な相違は確認できなかったが、フェロモンコミュニケーションを伴う場合、投入台数が10台、15台ではサイズが大きくなるにしたがって運搬効率が悪化する結果が得られた。しかしながら、5台の場合はロボットサイズに関係なく平均到達時間は大きく変化しない結果となった。これは、ロボットが偶然餌場を発見し動員フェロモンを分泌してトレイルを形成しても台数が少ないと他のロボットが動員フェロモンに遭遇しないため、定常的なトレイルが発生しにくく運搬効率がサイズによって向上しないものと推定される。

7. まとめ

本研究では、現実世界でフェロモンコミュニケーションにより群知能を発現する群ロボットシステムを構成し、複雑な挙動の構造を明らかにするとともに

に現実世界に適用可能な工学的応用および教育への展開の可能性を検討することを大きな目標として、ロボットシステムに対応するコンピュータシミュレーションシステムを開発した。

構築したシミュレーションシステムでは、小型移動ロボットをモデル化してフィールド上に円で表示し、この仮想ロボットどうしの接触を考慮している。一方、フェロモン、餌および巣の表示は実際のロボットシステムに用いる場合と同様である。この数値シミュレーションでは、モデル化した仮想ロボットをアリと見立ててフェロモン (LCD上の色) を検出させ、採餌行動における平均到達時間を得ることで食糧運搬効率について検討した。比較のため、餌および巣をランダムに探索する、フェロモンコミュニケーションを伴わない場合と、フェロモンコミュニケーションに基づく行動をさせた場合についてシミュレーションした。また、仮想ロボットの投入台数とサイズを変化させた。なお、これらのシミュレーションではフェロモンの気化率、拡散率および消失率といったパラメータは試行錯誤により決定した固定値を使用した。その結果、フェロモンコミュニケーションを伴う場合は、仮想ロボットの台数やサイズに関係なく、フェロモンコミュニケーションを伴わない場合よりも明確に食糧運搬効率が高くなることを確認した。すなわち、群ロボットシステムを想定した数値シミュレーションにより食料運搬課題に対するフェロモンコミュニケーションの効果が確認できた。また、仮想ロボットの投入台数がある程度多くなると、ロボットサイズに対応して食糧運搬効率が悪化することが確認できた。これらの結果から、提案する小型群移動ロボットシステムにおいても同様に採餌行動におけるフェロモンコミュニケーションの効果、台数、相対サイズの影響が予想される。

今後は、小型移動ロボットを開発し、多数の移動ロボットを用いてこれらの結果との対応を確認するとともに、フェロモン特性の違いによるフェロモンコミュニケーションの効果の変化、餌場の個数や量の有限性考慮、等をより詳細に検討していく。また、実際のアリの行動についても検討するため、アリの挙動計測・解析を行い、開発する群ロボットシステムとの相違点を検討することで現実世界での応用可能性や教育システムとしての適用可能性を探っていく方針である。

【引用文献】

- [1] 通産省機械情報産業局, 『リアルワールドコンピューティングパラダイム』, 産調出版, (1992) Fourcassié
- [2] Fourcassié, V., Dussutour, A. and Deneubourg, J., “Anttraffic rules”, *Journal of Experimental Biology*, 213, pp.2357-2363, (2010)
- [3] Wilson, E.O., 「科学的通信システム」, 別冊サイエンス, pp.94-105, (1978)
- [4] Holldobler, B.K., 「ツムギアリの高度な社会」, 別冊サイエンス, pp.106-113, (1978)
- [5] Krogh, A., 「ミツバチの言語」, 別冊サイエンス, pp.114-119, (1978)
- [6] Kurumatani, K., “Generating Causal Networks for Mobile Multi-Agent Systems with Qualitative Region,” In Proc. of International Joint Conf. on Artificial Intelligence (IJCA'95), Montreal, pp.1750-1756, (1995)
- [7] Nakamura, M. and Kurumatani, K., “Mechanism for Changing the Foraging Behavior in an Ant Colony Model,” In Proc. of Complex System'98 (CS'98), Sydney, pp.66-73, (1998)
- [8] 中村真理, 車谷浩一「蟻の採餌行動の数理モデルについて」, *日本ファジィ学会誌*, 11(4), pp.553-560, (1999)
- [9] 川村秀憲, 山本雅人, 大内「外部観測に基づく進化的フェロモンコミュニケーションの評価と群知能の創発現象に関する研究」, *計測自動制御学会論文集*, 37(5), pp.455-464, (2001)
- [10] Nakamichi, Y. and Arita, T., “An evolutionary simulation of the origin of pheromone communication”, In Proc. of Trans Inform Process Soc Jpn, 47 (SIG1 (TOM14)), pp.78-88, (2006)
- [11] Nakamichi, Y. and Arita, T., “Food Exploitation by Social Insects: Ecological, Behavioral, and Theoretical Approaches, ch. Evolutionary Simulation of Pheromone Communication in Ant Foraging”, CRC Press, pp.279-292, (2009)
- [12] Bai, J., Meng, J. and Li, M., “Ant Colony Foraging Behavior Modeling, Simulation and Application Based on the Evolution of Rules”, *International Journal of Hybrid Information Technology*, 10(1), pp.403-414, (2017)
- [13] Schoonderwoerd, R., Holland, O., Bruten, J. and Rothkrantz, L., “Ant-Based Load Balancing in Telecommunications Networks”, 5(2), pp.169-207, *Adaptive Behavior (journal)*, January, (1997)
- [14] Millar, P., “Swarm Theory”, *NATIONAL GEOGRAPHIC*, pp.118-135, (2007)
- [15] Payton, D., Daily, M., Estkowski, R., Howard, M. and Lee, C., “Pheromone robotics”, *Autonomous Robots*, 11(3), pp.319-324, (2001)
- [16] Payton, D., Estkowski, R. and Howard, M., “Compound Behaviors in Pheromone Robotics”, in *Robotics and Autonomous System*, 44(4-5), pp.229-240, (2003)
- [17] 大場公隆, 松浦了麻, 平田隆幸「アリ型群ロボットによる餌運搬経路の最適化」, *形の科学会誌*, 23(2), pp.190-191, (2008)
- [18] 竹下聡亮, 高田宗樹, 平田隆幸「彷徨えるロボット一群ロボットの自己位置同定」, *福井大学大学院工学研究科研究報告*, 64, pp.25-32, (2015)
- [19] 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*, 2(2), pp.80-91, (2009)
- [20] 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」, *情報処理学会研究報告*, 2011-MPS-83(9), pp.1-6, (2011)
- [21] 藤澤隆介, 清水裕亮, 松野文俊「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」, *情報処理学会研究報告*, 2012-MPS-88(13), pp.1-8, (2012)
- [22] Nishinari, K., Sugawara, K., Kazama, T., Schadschneider, A. and Chowdhury, D., “Modelling of selfdriven particles: Foraging ants and pedestrians”, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 372(1), pp.132-141, (2006)
- [23] 藤澤隆介, 大国正敏「フェロモンコミュニケーションを行うロボット群を用いた科学・工学教育」, *工学教育*, 59(4), pp.38-42, (2011)