

環世界概念に基づくフェロモントレイルと自己組立を用いた群行動アルゴリズムの設計と評価

藤澤隆介¹ 橋本敬² 松野文俊¹

1:電気通信大学 2:北陸先端科学技術大学院大学

概要: 本研究では群行動の設計と評価を行う。群れは、集団の性能が評価対象であるが設計対象は個体の行動である。このギャップが当該研究を困難なものにしている。そこで本研究では、動物行動学における「環世界」という概念を用いて群れの振る舞いを設計した。この概念を用いる利点は、個体の目的から群れの振る舞いに必要な全ての行動を導出可能な点である。この概念を用いることにより群れの振る舞いを個体の行動アルゴリズムに組み込むことができる。そして、この群行動アルゴリズムを実装する。計算機実験では、各種パラメータには現実的な値を入力する。解析では、群れがタスクを解決するときの「タスク解決時間」に着目し、群れの並列性・作業分担について解析を行った。解析の結果、本研究で構築した群行動アルゴリズムにおいて、群れの特徴である並列性が有効に働いていることがわかった。また、協調しなければ運搬できないような物体を運搬する際、群れは自己の内部状態を効果的に遷移させて作業分担していることが判明した。

キーワード:環世界, 群行動アルゴリズム, 仮想フェロモントレイル, 自己組立, 作業分担

Designing and Evaluation of Swarm Behavior Using Pheromone Trail and Self-assembly Based on the Concept of *Umwelt*

Ryusuke FUJISAWA¹, Takashi HASHIMOTO² and Fumitoshi MATSUNO¹

1:University of Electro-Communication

2:Japan Advanced Institute of Science and Technology

Abstract: In this study, we design and evaluate swarm behavior. In the swarm, an object of evaluation is a performance of a group, but an object of designing is the action of individual. This gap does this research difficultly. Then, in this research, the swarm behavior was designed by using the concept “Umwelt” in ethology. The advantage to use this concept is that all actions necessary for the swarm behavior can derive from the purpose of the individual. The swarm behavior can be built into the action algorithm of the individual by using this concept. In the computer simulation, input realistic value to various parameters. We analyze a parallel processing and a task allocation of the swarm by attention to “task solution time”. As a result, the parallel processing is working effectively by constructed algorithm. And, we discover that the swarm is doing task allocation, when the swarm have to transport the object that cannot be transporter by individual.

Keywords:Umwelt, Swarm behavior algorithm, Virtual pheromone trail, Self-assembly, Task allocation

1 序論

群れは自律分散系の一つであり、多くのエージェントが中央制御なしに行動する。群れの注目すべき特徴は、柔軟性、ロバストネス、並列性の3つである。これら3つの特徴を多体で行動する社会性昆虫の例を用いて説明する。

柔軟性とは、動的な環境に適応する特徴である。各個体は単純な行動をするだけであるが、多くの個体が群れを構成することで、個体間の相互作用を通して群れ全体として様々な機能を発揮することができる[1]。たとえば、グンタイアリなどは、互いの身体を強力な

顎を用いて把持することができ、状況に応じて枝と枝の間に「梯子」のような構造を構築したり、障害物を乗り越える構造を作ったりする[2]。

ロバストネスとは、幾体かのエージェントが活動不能に陥ってもシステムの機能を保つことが可能であるという特徴である。群れは多個体で構成されるために群れの振る舞いを一個体に強く依存しない。故に、群れはエージェントの消耗や採餌・帰巢の失敗を許容することができる。

そして、群れは並列処理を行うことが可能である。多数の個体が自律的に活動する結果として群れは複数のタスクを同時に解決することができる。代表例とし

てアリの採餌行動が挙げられる。全個体が一つの餌に集中するわけではなく、複数の餌を並列に探索・収集することによって広大な環境を探索し餌を収集している。また、採餌タスクは探索タスクと収集タスクに分解でき、これらタスクを複数個体が並列に行っている。

これらの有用な特徴を工学的に実現するには解決が困難な問題がある。それは、群れ全体を設計できないという問題である。群れの作業性能は集団全体の振る舞いによって決定される。しかし、集団全体の振る舞いは構成要素である個体の自律的な行動の結果として現れる。故に、全体を設計することはできないのである。設計対象はエージェント単体であるが評価対象は集団全体である。このギャップが自律分散系研究を困難なものにしている [3]。

群行動の関連研究に「SWARM-BOTS[4]」や「Ant Colony Optimization(ACO)[5]」という研究がある。SWARM-BOTS プロジェクトは、社会生物学者とロボット研究者によって実機 [6, 7] と計算機シミュレーション [8] の両面から研究が進められている。実機による研究では、エージェント群は個体間で協調することによって独立した個体群よりも高い性能を発揮すると結論付けられている。具体的には、個体では越えられないような段差や溝を越える。計算機シミュレーションによる研究では、群れは様々な環境に対して個体間相互作用を通して状況に適応した様々な構造を生成することによって対応することを示している [8]。しかし、このプロジェクトは様々なタスクを扱っているにも関わらず、それらを個別に解決しており一般的应用性について深く議論がなされていないのが残念である。

ACO は、最適化アルゴリズムの一種である。具体的には、蟻の振舞いから導出した巣と餌場間の最短経路を発見するメカニズムを用いている [5]。このアルゴリズムの要点は、エージェントが生成するフェロモントレイルを利用する点である。そして、ACO は巡回セールスマン問題やネットワーク経路問題などの組合せ最適化問題に適用されている。しかしながら、これら ACO 研究においても群行動の一般的应用性についての議論がされていない。群行動の優位性を効果的に活用するためにも、群行動の設計方法論について議論すべきである。

群れは自律エージェント群で構成されており中央制御システムを持たない。そして、エージェントは俯瞰視点を持たず、近接した環境に関する局所的な情報しか得ることができない。自律エージェント群の振舞いは、このようなエージェント群の主観的な情報に基づいて設計されるべきである。「環世界」概念は、エージェント群の主観的世界に基づく振舞いを設計する助けになる。本概念は、生物の振舞いを理解するために動物行動学分野において Uexküll[9] によって提案された。彼は生物は環世界と呼ばれる種固有の世界を持つと考えた。生物は物理世界において行動するのに必要な情報のみを検出し行動する。環世界とは、それらの必要な

情報と行動によって構成される生物の内部に存在する種固有の世界である。しかし、Uexküll は生物単体の振舞いの方に言及しており群れの振舞いには言及していない。我々は、この環世界概念を群行動の設計に利用するためにエージェントの環世界間相互作用について考慮する必要があるだろう。

本研究の目標は、群行動アルゴリズムの設計方法論を提案し評価することである。以下の3つが具体的な目的である。

- 環世界概念を用いて群行動アルゴリズムの設計方法論を提案する。
- 群れによる物体運搬¹のための群行動アルゴリズムの構築に設計方法論を適用する。
- 上述のアルゴリズムを実装したマルチエージェント・システム (MAS) によって群行動を評価する。

2 タスク

群れの利点を最も活かせるタスクは「探索と収集」である。群れは多数の個体で構成される。そのため、広大な空間を探索し多くの物体を並列に収集することができる。群れが漸次的に収集タスクを解決していくとき、環境は必然的に変化する。しかし、群れの柔軟性のおかげでエージェントの行動アルゴリズムを変更することなく動的な環境に対応できる。

一方で、高精度の位置決め等の俯瞰視点が必要になるタスクは群れにとって非常に困難なタスクである。通常、彼らは環境内の自身の正確な位置を知覚できない。エージェントは局所情報のみを有するためである。

タスクが個体能力を超えるような問題を含むとき、得意であるはずの探索・収集タスクも不得意なタスクになる。例えば、エージェント単体で運搬するには物体が重過ぎる、エージェントのサイズより広い溝を越える、高い段差を登るなどの問題がこれに当たる。これらの問題を解決するためには「単なる個体の集積」以上の機能が必要になる。即ち、群内のエージェントは互いに協調しなければ前述のタスクは解決できない。

本研究では、群行動アルゴリズムを効果的に検証するために探索・収集タスク扱う。しかし、収集する物体は単体では運搬不可能な大質量物体とする。この協調しなければ解決不可能なタスクを解くためには、エージェント群は以下の機能を有していることが有効である:

- 物理的結合
- 誘引

相互に物理結合するために、社会性昆虫 (蟻) に見られる自己組立 (SA) と呼ばれる振舞いを模倣する [2][10]。蟻、蜂、白蟻などの社会性昆虫は、個体としてはシンプルな知能のみを有するにも関わらず群れることによ

¹群行動による問題解決の代表的なタスク

て高度な振舞いを見せる。特に、SA は社会性昆虫の蟻と蜂に見られる集団的な振舞いであり、個体集団による物理的な構造を構成する [2]。SA は、SWARM-BOTS において大質量物体の運搬などの問題に対処するためにも用いられている [6, 7]。以下の機能が SA によって実現されている:

- 防御
- 牽引するための構造
- 温度調整
- 過酷な環境下でのコロニーの生存
- 障害物回避

本研究において、我々は大質量物体の運搬のために「牽引するための構造」の機能を用いる。エージェントが重過ぎて単体では動かせない物体を発見したと想定する。もし、エージェント群が互いに結合できて一方に牽引することができたならば物体を移動させるのに十分な力を得ることができるとは限らない。

上記の振舞いを実現するためには、大質量物体の周辺に運搬するのに十分な数のエージェントが存在しなければならない。物体を発見したエージェントが他個体を誘引することができればこの振舞いは達成される。我々は、他個体の誘引のためにフェロモントレイルを用いる。フェロモンとは、生物の身体より分泌され他個体の特定の行動を誘発する物質の総称である。蟻は、巣と餌の間にフェロモントレイルを生成することで知られている。フェロモンを知覚した蟻は、より高濃度の方向へ誘引される。群行動においてフェロモントレイルを用いる利点は以下の通りである。

- 物体の位置を記憶する必要がない。
- 物体を発見したエージェントが周辺他エージェント群に間接的に情報伝達することができる。
- 電磁波干渉等の問題がない。
- 集団効果と呼ばれる個体間通信による作業の継続・加速が期待できる。

3 群行動のための設計方法論

3.1 環世界とは

Uexküll は、環世界という概念を用いて生物単体の振舞いを説明することを試みた。環世界とは、知覚世界と作用世界で構成される生物内部に存在する世界である (Fig.1)。これらの世界は互いに相互作用する。知覚世界は自己が知覚する全ての要素によって構成される。また、作用世界は自己の行動全てによって構成される。そして、これら各々の世界は知覚標識と作用標識で構成される。これらの標識の定義を以下に示す:

知覚標識

- 主体にとって有意な信号のまとめり

作用標識

- 主体が客体に与える有意な信号のまとめり
- 主体の振舞い

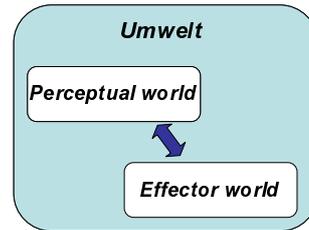


Fig. 1: Umwelt
Umwelt はドイツ語で環世界の意

Uexküll は、交尾後の雌ダニの例を用いて環世界を具体的に説明している。交尾後の雌ダニは、表皮に在る光受容体を用いて適当な灌木の枝先までよじ登る。そして、動物の皮膚腺から分泌される「酪酸」刺激を知覚すると、枝先から「落下」する。そして、敏感な温度感覚によって「なにか暖かいもの」に落ちたことを知覚し、「体毛のない場所へ移動」する。そして、触覚により「皮膚」を知覚し、「吸血」する。この例における知覚標識と作用標識を以下に示す:

知覚標識

- P_1 動物の酪酸
- P_2 暖かさ
- P_3 皮膚

作用標識

- A_1 落下
- A_2 体毛のない場所へ移動
- A_3 吸血

本例における注目すべき点は、数多くある動物の特徴の中でダニにとって知覚標識となり得るのが3つのみであるということ、そして、それらが連鎖しているということである。ダニは、行動の確実さを少ない知覚標識によって確保しているのである。全ての知覚・作用標識は「最後の作用標識²から逆順に同定する」ことによって定義される。我々は、アルゴリズムの設計にこの特徴を用いる。

この特徴は、決定性有限状態オートマトンに似ている。決定性有限状態オートマトンは、イベント・状態遷移・アクションで構成される。エージェントは、イベントを検出し、状態を遷移させ、各状態で規定された行動をする。

ダニの決定性有限状態オートマトンによる状態遷移を Fig.2 に示す。 P_i は知覚標識、括弧内の 0 もしくは 1 は入力を示す。0 は未検出、1 は検出を示す。また、 S_i はダニの状態を示し、 A_i はダニの状態における行動を示す。ダニは、知覚標識 P_i を検出し、内部状態を S_i へ遷移させ、行動 A_i する。

²主体の目的

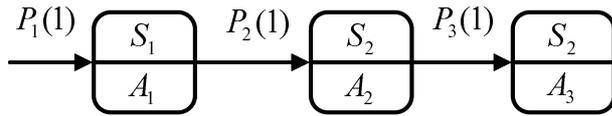


Fig. 2: State transition of tick

3.2 設計方法論

ダニの決定性有限状態オートマトン (Fig.2) を元に、エージェントの内部の処理手順を以下に示す:

1. エージェントは客体から知覚標識を得る .
2. 知覚標識は自己の内部状態 (State) を遷移させる .
3. 新たな知覚標識を得るまで State に規定された作用標識を行う .

上述の処理手順のために以下の手順で State , 知覚・作用標識を決定する:

1. 個体の最終目的から逆順に全ての知覚・作用標識を同定する .
2. 各 State の作用標識を決定する .
3. State 遷移条件となる知覚標識を決定する .

さらに、以下の2つが群行動アルゴリズムに欠かさない特徴であると考えられる .

- エージェントの環世界内に他個体が存在する .
- 行動が他個体に依存する .

これらの帰結として、群れにおいては「他個体の作用標識を自己の知覚標識とする」という特徴が挙げられる (Fig.3) . 群行動アルゴリズムは、この特徴に基づいて設計されなければならない . この特徴を取り入れなければ、集団はただの「単体の集まり」であり協調行動する群れにはならない . この「環世界間の相互作用」という特徴を群れの定義として用いる .

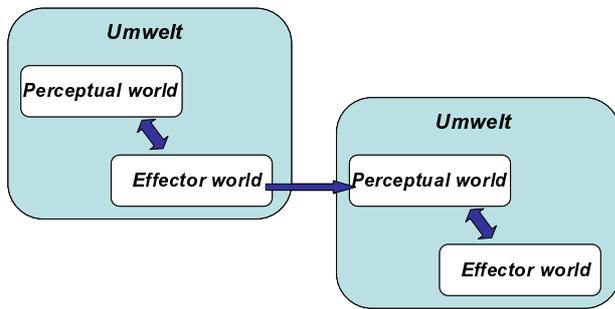


Fig. 3: Interaction of the Umwelt between different agents

3.3 自己組立とフェロモントレイルを含む環世界

上述の方法論を用いて、SA とフェロモントレイルを含んだ大質量物体の運搬をするエージェントの知覚・作用標識を説明する . 以後、運搬対象物体を Pack、運搬目的地を Nest とする . 知覚標識の箇条書きにおける括弧内の数字は入力を示す . $P_1, P_2, P_3, P_4, P_6, P_7$ における 0 は未検出, 1 は検出を示す . P_5 における括弧内の数字は接触したエージェントの内部状態を示す .

知覚標識

- P_1 Pack との接触 (0/1)
- P_2 Pack の挙動 (0/1)
- P_3 フェロモン (0/1)
- P_4 Nest へ到着 (0/1)
- P_5 接触したエージェントの State(1-9)
- P_6 受動 SA(0/1)³
- P_7 時間経過 (0/1)⁴

作用標識

- A_1 ランダムウォーク
- A_2 Nest へ移動
- A_3 Pack を把持
- A_4 能動 SA⁵
- A_5 フェロモンを放出
- A_6 フェロモンを追尾

エージェントは Nest 方向を知覚できるものとする . この機能がなければエージェントは Nest に戻ることができない .

3.4 状態遷移規則

一般的に、群行動アルゴリズムの設計に決定性有限状態オートマトンが用いられるが、その設計方法論は確立していない . 故に、我々は §3.2 で提案した「環世界」概念による設計方法論に基づいて SA とフェロモントレイルを用いた探索・収集タスクのための群行動アルゴリズムのための状態遷移規則を設計する . エージェントは、客体と内部タイマーから知覚標識を得る . そして Fig.4 の状態遷移規則に従って State を遷移させる .

各 State の作用標識と知覚標識を以下に示す . State の次の行に書かれた A_i は各 State における作用標識 (行動) をあらわす . また、 $A_i \wedge A_j$ は両方の作用を同時に行うことを示す . そして、 $P_i(1) \rightarrow S_i$ は知覚標識 P_i に 1 が入力されたときに内部状態が S_i へ遷移する

³他個体から把持されること

⁴時間経過を知覚するためにエージェントは3つのタイマーを持つ . 1) 個体運搬解除タイマー, 2) 化学誘引解除タイマー, 3) SA 解除タイマー

⁵自身が他個体を把持すること

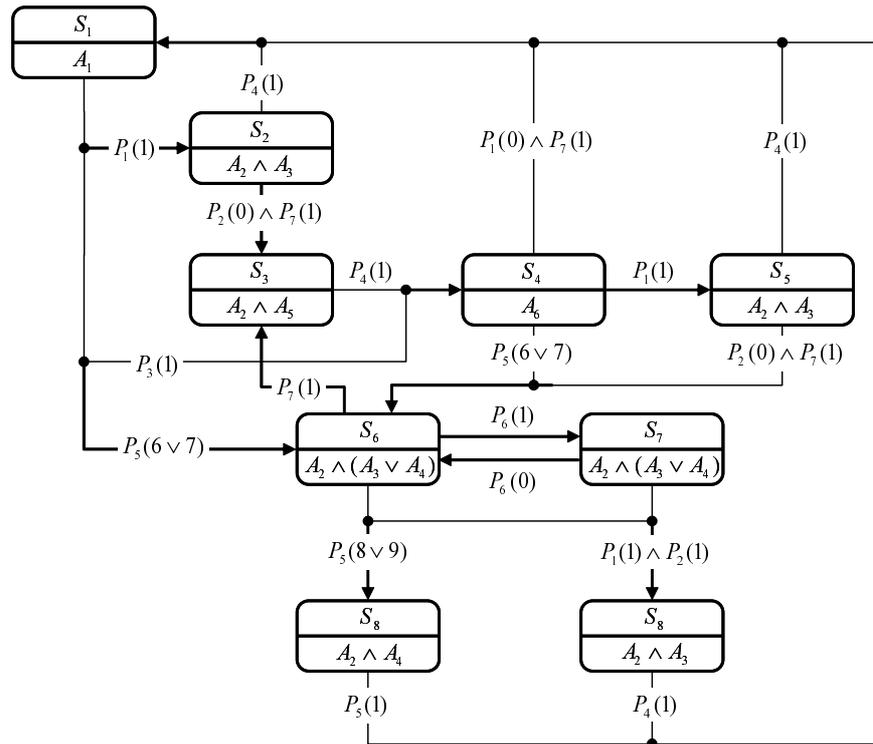


Fig. 4: State transition rule for swarm behavior

ことを示す .

State1: S_1 (初期状態)

A_1
 $P_1(1) \rightarrow S_2$
 $P_3(1) \rightarrow S_4$
 $P_5(6 \vee 7) \rightarrow S_6$

State2: S_2 (個体運搬)

$A_2 \wedge A_3$
 $P_2(0) \wedge P_7(1) \rightarrow S_3$
 $P_4(1) \rightarrow S_1$

State3: S_3 (フェロモン誘引)

$A_2 \wedge A_5$
 $P_4(1) \rightarrow S_4$

State4: S_4 (フェロモン被誘引)

A_6
 $P_1(1) \rightarrow S_5$
 $P_1(0) \wedge P_7(1) \rightarrow S_1$
 $P_5(6 \vee 7) \rightarrow S_6$

State5: S_5 (非 SA 運搬)

$A_2 \wedge A_3$
 $P_2(0) \wedge P_7(1) \rightarrow S_6$

$P_4(1) \rightarrow S_1$

State6: S_6 (SA 待ち [Foot-SA])

$A_2 \wedge (A_3 \vee A_4)$
 $P_1(1) \wedge P_2(1) \rightarrow S_9$
 $P_5(8 \vee 9) \rightarrow S_8$
 $P_6(1) \rightarrow S_7$
 $P_7(1) \rightarrow S_3$

State7: S_7 (SA 待ち)

$A_2 \wedge (A_3 \vee A_4)$
 $P_1(1) \wedge P_2(1) \rightarrow S_9$
 $P_5(8 \vee 9) \rightarrow S_8$
 $P_6(0) \rightarrow S_6$

State8: S_8 (SA 運搬)

$A_2 \wedge A_4$
 $P_5(1) \rightarrow S_1$

State9: S_9 (SA 運搬 [Root-SA])

$A_2 \wedge A_3$
 $P_4(1) \rightarrow S_1$

SA とフェロモントレイルを用いた大質量物体運搬のための群行動アルゴリズムは、上述の7つの知覚標識と6つの作用標識によって確立される。知覚・作用

標識を適切に繋いだ図を Fig.4 に示す。エージェントは、上述の状態遷移規則に従って自己の State を遷移させる。

4 群行動シミュレーター

群行動アルゴリズムを検証するために、我々は計算機シミュレーターを構築した。本章では、シミュレーターとタスクの詳細について説明する。

4.1 エージェント

基本構造・機能

物理エージェントへの実装を考え、エージェントには現実的な次元とパラメーターを用いた。エージェントの本体は円筒形で上下のパートで分かれている。上部には Pack や他個体を把持し SA を構築するためのアームと Nest 方向を検出するユニットを装備する。下部には移動のための駆動系、フェロモンを検出するためのアルコールセンサー、フェロモントレイルを生成するためのアルコール塗布機構を装備する。これら上下構造物は個別に回転することができる⁶。この機構には、把持対象によって進行方向が限定されないという利点がある。エージェントの代表的な次元と不変パラメーターを Table1 に示す。

Table 1: Physical dimensions and parameters of the agent

Shape	Cylindrical, Two-tiered system
Size	$\phi 200[\text{mm}]$
Max speed	100[mm/s]
Max force	15[N]
Max action time	3600[s]

通信

エージェントは、直接・間接的に他個体と通信する。直接通信は、エージェントが他個体と接触したとき自己の現在の State を他個体に送信することで達成される。フェロモントレイルは間接通信の役目を果たす。実際のロボットシステムでは、アルコールがフェロモンの代用となる。エージェントは、フェロモン誘引 (S_3) のときに本体底面にあるアルコール放出機構からアルコールを放出する。アルコールは、初期状態 (S_1) のエージェントにとっては知覚標識として検出される。アルコールセンサーはフェロモントレイルを追尾するために用いられる。追尾メカニズムは蟻の振舞いを模倣した。蟻はフェロモントレイルを左右の触角を用いて検出する [11]。右の触角がフェロモンを検知したとき、蟻は右方に前進する。また、逆も同様である。この振舞

⁶SWARM-BOTS[4] にも同様のメカニズムが採用されている。

いを模倣するために触角の代用である 2 つのアルコールセンサーを本体底面の進行方向に向かって左右 $\pi/4$ の位置に取り付ける Fig.5。

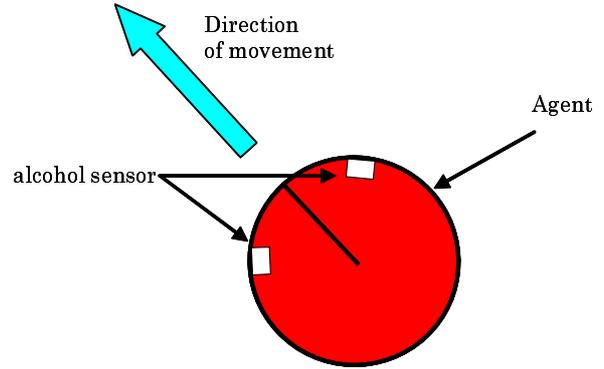


Fig. 5: The place of alcohol sensors on the bottom of the agent's body

4.2 環境

エージェントは、有界な $10000 \times 10000[\text{mm}]$ の 2 次元空間内 (以下 Field) で活動する。Field は、フェロモンの蒸発・拡散を計算するために $20 \times 20[\text{mm}]$ で離散化している。この計算格子を Grid と呼ぶ。Field 上に添加されたフェロモンは、Field から蒸発、大気中で拡散、という 2 つの過程を経て環境中に蒸散していく。蒸発は以下の式で計算される:

$$F_p(x, y, t) = \gamma_{vap} F_p(x, y, t - 1) + \Delta F_p(x, y, t) \quad (1)$$

ここで、 $F_p(x, y, t)$ は、時間 t , Grid(x, y) における Field 上のフェロモン量である。 x, y は、Grid の X-Y 座標であり、 γ_{vap} は蒸発係数である。第二項の $\Delta F_p(x, y, t)$ は添加するフェロモン量である:

$$\Delta F_p(x, y, t) = \begin{cases} Q_p & \text{If an agent}(S_3) \text{ is on the grid}(x,y) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

Q_p は実際のフェロモン添加量である。

そして、フェロモンの拡散は以下の式で計算される。

$$A_p(x, y, t) = A_p(x, y, t - 1) + \gamma_{dif} \begin{Bmatrix} A_p(x + 1, y, t - 1) \\ + A_p(x - 1, y, t - 1) \\ + A_p(x, y + 1, t - 1) \\ + A_p(x, y - 1, t - 1) \\ - 5A_p(x, y, t - 1) \end{Bmatrix} + (1 - \gamma_{vap}) F_p(x, y, t) \quad (3)$$

ここで、 $A_p(x, y, t)$ は、時間 t の大気中のフェロモン量を表現しており、 (x, y) は上述のように Grid を示す。そして、 γ_{dif} は拡散係数である。

4.3 タスク

群れに課すタスクは Pack の探索・収集である。エージェント群は Field を移動し Pack を運搬する。Pack は同じサイズ、質量で Field 上に Field 中央から同距離に位置している。Field 中央には Nest がある (Fig.6)。格子状のチェス盤は Field である。Field 中央の小円は Nest を意味し、Nest の外円は運搬の目的地 (以下 Goal) である。また、Goal 周囲の円柱は Pack である。エージェント群は Nest から探索を開始する。もし、彼らが Pack を発見したら Nest へ引くを試みる。Nest へ全ての Pack を運んだらタスク完了である。

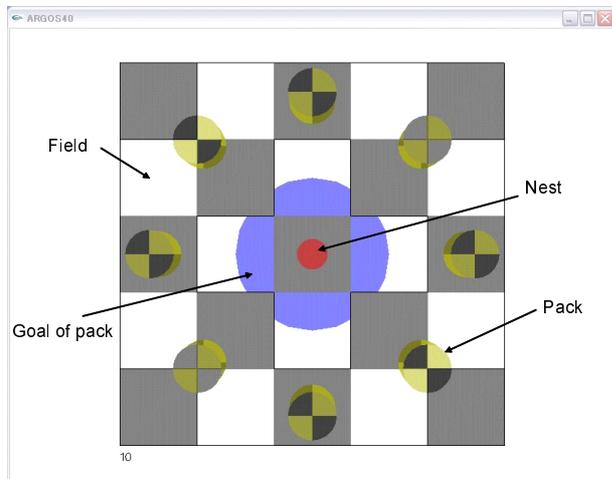


Fig. 6: Field configuration

5 シミュレーション結果

前章で説明した MAS シミュレーターを用いて Fig.4 に示された群行動アルゴリズムの計算機シミュレーションを行った。本章では、1) 群れはタスクを解決するか否か、2) 並列処理は有効に働いているか否か、3) 作業分担は有効に働いているか否かについて注目した解析を報告する。

計算機シミュレーションの初期状態では、Pack は Fig.6 に示されるように Nest 周囲 4000[mm] の円周上に位置する。そして、エージェントは Nest から探索を開始する。

5.1 タスク解決

タスク解決のための代表的なパラメーター設定を Table2 に示す。

Table 2: Parameter settings1

Number of agents	30
Number of packs	8
Mass of a pack	15[kg]

実際のシミュレーションの様子を Fig.7 に示す。図中の小さな黒または白の円がエージェントである。エージェントから伸びている線は移動方向を意味する。そして、Field 隅の数字は時間を示す。

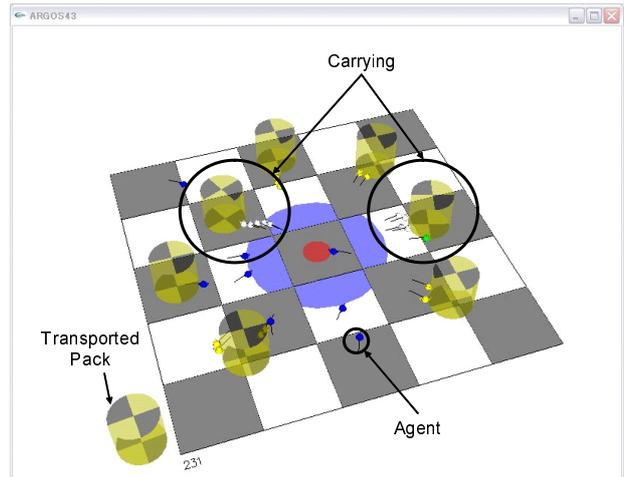


Fig. 7: Task solution

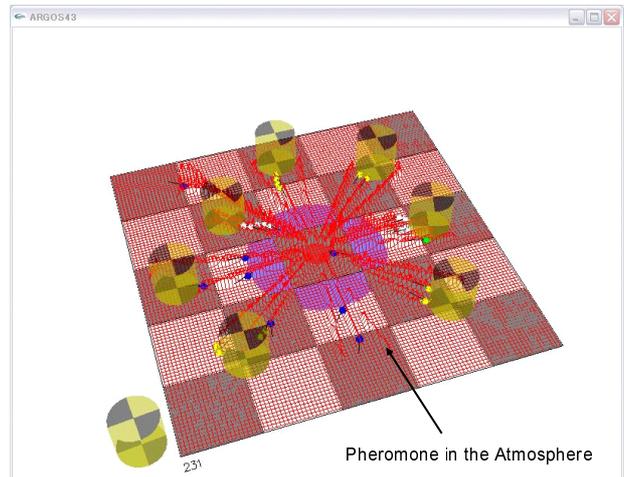


Fig. 8: Pheromone in the atmosphere

エージェントは規則に従ってフェロモントレイルを生成し (Fig.8)、他個体を誘引し、SA を繰り返し (Fig.7)、最終的に運搬する。Fig.7 中の左側の運搬中のエージェ

ント5体が連結している．これがSAである．

5.2 並列処理

Fig.7において、群れは2つのPackを同時に運搬しており、並列処理していることを示している．群れの並列処理を評価するために、Pack数によってタスク解決時間がどのように変化するかを計測した．パラメータ設定をTable3に示す．ここでは、並列処理を観測するため、エージェント数を多くし、Pack質量を重くした．

Table 3: Parameter settings2

Number of agents	40
Number of packs	1,2,4,6,8
Mass of a pack	20[kg]

タスク解決時間をFig.9に示す．本図では、比較のためにPackが1つときのタスク解決時間をPack数倍でプロットした直線を描いた．実際のタスク解決時間は、常にこの直線より低い．これは、提示した群行動アルゴリズムが並列処理を効果的に実行していることを意味する．

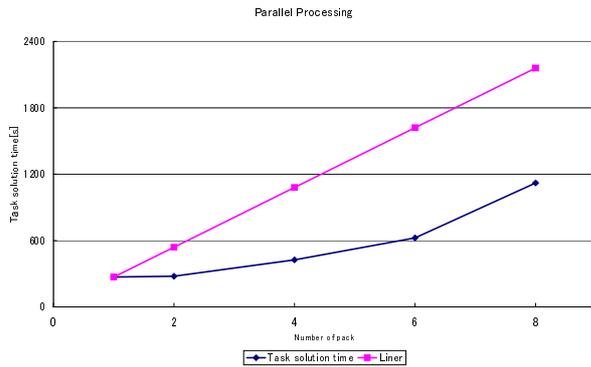


Fig. 9: The time to solve the tasks
縦軸はタスク解決時間を示し、横軸はPack数を示す．直線はPack数1個のときのタスク解決時間をPack数倍にしたときのプロットである．

5.3 作業分担

§.3.4で紹介した各々のStateはそれぞれの機能に応じて以下のように分類できる:

- Searching (S_1)
- Attracting (S_3, S_4)
- Non-SA transporting (S_2, S_5)
- Wating SA (S_6, S_7)

- SA transporting (S_8, S_9)

エージェント群は、タスク解決の過程においてPackを運搬するために適切に機能を変化させる．

5.3.1 タスク解決

Fig.10は、解決可能なタスクを与えた実験における時間経過とState比の推移を示す．この実験におけるパラメータ設定をTable4に示す．本設定において、エージェント単体の運搬能力は1.5[kg]である．そして、Field-Pack間の摩擦係数を0.5としている．故に、15[kg]のPackは5体のエージェントによって運搬が可能である．

Table 4: Parameter setting of a solvable task

Number of agents	5
Number of packs	1
Mass of a pack	15[kg]

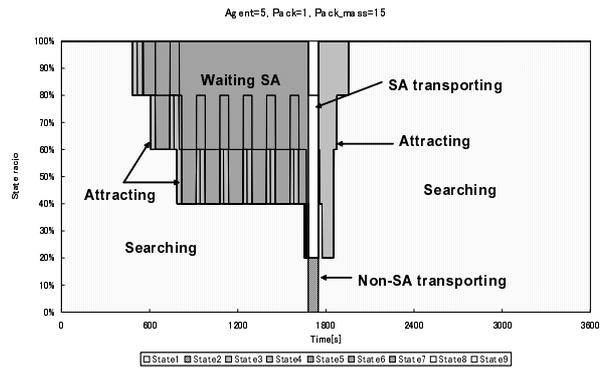


Fig. 10: The transition of the ratio of states in a process of task solving

縦軸はState比、横軸は時間．同領域中の線はStateの差異を示す．同領域中の線は同じ機能であるが異なるState (S_3 と S_4 , S_2 と S_5 , S_6 と S_7)であることを示す．

初めに、全てのエージェントはPackを並列に探索する (S_1 , Searching)．481[s]にエージェントの1個体がPackを発見し、知覚標識 $P_1(1)$ を受けて、エージェントは自己のStateを S_2 (Non-SA transporting⁷) に遷移させる．しかし、1個体ではPackが動かないため、エージェントはStateを S_3 (Attracting) に遷移する．そして、エージェントは他個体を誘引するためにPack-Nest間をフェロモンを添加しながら往復する．608[s]には、他のエージェントがフェロモントレイルを発見し、知覚標識 $P_3(1)$ を受けて S_3 に遷移する．そして、639[s]

⁷ エージェントのStateは S_1 から S_2 に遷移する．しかし、 S_2 は5秒間しか存在しないためグラフには現れない．

には2個体がSAを形成する(S_6, S_7). 786[s]に, 他個体がフェロモンレイルを発見し, 知覚標識 $P_3(1)$ を受けて S_3 に遷移する. そして, 1680[s]に5体目のエージェントがPackに接触し, Stateを S_1 から S_2 遷移させ, 4体でSAを構成しているエージェント群と共に運搬を開始し, Packは動き始める.

5.3.2 タスク未解決

タスクが解決不可能な場合, State比の推移はFig.11のように完全に異なる. Table5は, 解決不可能なタスクの実験のパラメーター設定を示す. Pack質量は20[kg]でそれ以外のパラメーターは前の実験と同じである. それ故, このPackはたとえ5体全てのエージェントがSAを形成したとしても運搬することができない.

Table 5: Parameter setting of a unsolvable task

Number of agents	5
Number of packs	1
Mass of a pack	20[kg]

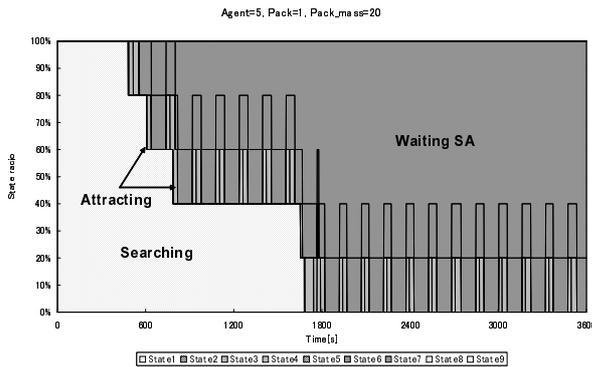


Fig. 11: The transition of the ratio of states in a process of task solving
縦軸は State 比, 横軸は時間を示す.

1680[s]まで群れの振舞いはFig.10と同様である. すなわち, 群れはPackを探索し, 他個体を誘引しSAを形成する. しかし, 5体全てのエージェントがSAしてもPackは動かず, SA最後尾のエージェントがフェロモンレイルを強化しようと試みる. 故に, 1680[s]の後, Fig.11は誘引(S_3, S_4)とSA待ち(S_6, S_7)の間で振動する.

6 Conclusion

群れの特徴はトップダウン式に設計できないこと知られている [3]. 故に, 群れを設計するために個体の設

計のなかに群れの振舞いを組み込む必要がある. そこで, 我々は環世界 [9] として知られている動物行動学の概念を用いた. この概念を用いることにより, 任意のタスクのための単純なアルゴリズムを導出できることを発見した. 群れを扱う上で, 環世界の重要なアイデアは以下の4つである:

- 群れをトップダウン式に設計するのではなく, ボトムアップ式にエージェントの主観から設計する.
- 最終目的(主体の目的)から逆順に全ての知覚・作用標識を同定する.
- センサー情報や行動を統合し, 知覚標識もしくは作用標識として扱う.
- 他個体の作用標識を自己の知覚標識として扱う.

我々は「群れ」を「環世界間の相互作用」と定義した. そして, 環世界を用いた群行動アルゴリズムの設計方法論を提案した. 具体的には, 以下の手順で設計する:

1. 個体の最終目的から逆順に全ての知覚・作用標識を同定する.
2. 各 State の作用標識を決定する.
3. State 遷移条件となる知覚標識を決定する.

この手順に基づいて, フェロモンとSAを用いた大質量物体の運搬タスクのための群行動アルゴリズムを構築する. 7つの知覚標識と6つの作用標識を同定し, 9つのStateを決定し, 各Stateにおける作用標識を決定した.

このアルゴリズム (Fig.4) をMASシミュレーターに実装し, 並列処理と作業分担の観点から分析した. その結果, 並列処理をしない場合の倍程度の効率でタスクを解決できること, 及び, エージェント達が内部状態を遷移させ探索と収集という群れの機能を自己組織化していることが分かった.

すなわち, ここで構築したアルゴリズムにより群れは効果的に動作していることがわかる. 故に, 我々はここで提案した設計方法論が群れの設計に有効であると考え.

今後, 我々は本論文で提案した設計方法論に基づき2面から「群行動の振舞いのメカニズム」にアプローチする. ひとつはより詳細な計算機シミュレーション・アプローチ. そして, もう一方はロボティクス・アプローチである. 群れのメカニズムを解明するには, 両面から研究を進めることがとても重要であると考え. また, タスクの複雑さに適したエージェントの投入量を決定するための指標を提示できる可能性がある. 計算機シミュレーション結果を解析することによって, 現実に群ロボットを運用する際に「必要なエージェント数を見積もる」という工学的な要求に応えたい.

References

- [1] C. Detrain and J.-L. Deneubourg. Complexity of environment and parsimony of decision rules in insect societies. *The Biological Bulletin*, Vol. 202, No. 3, pp. 268–274, 2002.
- [2] C. Anderson, G. Theraulaz, and J.-L. Deneubourg. Self-assemblages in insect societies. *Insects Sociaux*, Vol. 49, pp. 1–12, 2002.
- [3] 太田順. 群知能ロボットシステム. 日本ロボット学会誌, Vol. 20, No. 5, pp. 487–490, 2002.
- [4] M. Dorigo, E. Tuci, R. Groß, V. Trianni, T.H. Labella, S. Nouyan, C. Ampatzis, J.-L. Deneubourg, G. Baldassarre, S. Nolfi, F. Mondada, D. Floreano, and L.M. Gambardella. The swarm-bot project. In E. Sahin and W.M. Spears, editors, *Swarm Robotics: SAB 2004 International Workshop*, Vol. 3342, pp. 31–44. Springer Verlag, 2005.
- [5] M. Drigo, G.D. Caro, and L.M. Gambardella. Ant algorithms for discrete optimization. *Artificial Life*, Vol. 5, No. 2, pp. 137–172, 1999.
- [6] F. Mondada, M. Bonani, A. Guignard, S. Magnenat, C. Studer, and D. Floreano. Superlinear physical performances in a swarm-bot. In Mathieu S. Capcarrere, Alex A. Freitas, Peter J. Bentley, Colin G. Johnson, and Jon Timmis, editors, *Advances in Artificial Life: 8th European Conference*, Vol. 3630, pp. 282–291. Springer Verlag, 2005.
- [7] R. O’Grady, R. Groß, F. Mondada, M. Bonani, and M. Dorigo. Self-assembly on demand in a group of physical autonomous mobile robots navigating rough terrain. In Mathieu S. Capcarrere, Alex A. Freitas, Peter J. Bentley, Colin G. Johnson, and Jon Timmis, editors, *Advances in Artificial Life: 8th European Conference*, Vol. 3630, pp. 272–281. Springer Verlag, 2005.
- [8] E. Sahin, T.H. Labella, V. Trianni, J.-L. Deneubourg, P. Rasse, D. Floreano, L.M. Gambardella, F. Mondada, S. Nolfi, and M. Dorigo. Swarm-bot: Pattern formation in a swarm of self-assembling mobile robots. In A. El Kamel, K. Mellouli, and P. Borne, editors, *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. NJ: IEEE Press, 2002.
- [9] Jakob von Uexküll. Streifzüge durch die umwelten von tieren und menschen. Japanese edition published 2005, 1934.
- [10] B. Hölldobler and E.O. Wilson. *The ants*. The Belknap Press of Harvard University Press Cambridge, Massachusetts, 1990.
- [11] W. Hangartner. Spezifität und inaktivierung des spurpheromons von lasium fuliginosus latr. und orientierung der arbeiterinnen im duftfeld. *Insects Sociaux*, Vol. 57, pp. 103–136, 1967.