

## 要 旨

複数のエージェントを群として制御することは、マルチエージェントシステムの制御に関する問題としては非常に重要な問題である。本研究では、群を成す複数のエージェントを制御するために、統計力学の理論より導出される熱力学に基づいたパラメータを用いる方法を提案する。そして、免疫アルゴリズムを用いた数値計算実験を行って有効性の検証を行う。

## 1 はじめに

複数のエージェントを協調させて制御する場合、個々のエージェントを独立に制御する方法では、エージェントの増加に伴い状態数が爆発的に増加する。これを回避する方法として、複数のエージェントを群として扱った研究がいくつか行なわれている。Nishida<sup>1)</sup> は、系の状態量として Shannon<sup>2)</sup> の情報量の定義と熱力学の定義より導出したパラメータを採用し、群の状態の観測に成功している。また、木下<sup>3)</sup> は、報酬系の切り替えによって群行動の制御を行っている。

マルチエージェントシステムを群として制御する場合、個々のエージェントには注目しないため、システムの相空間の次元を抑えることができる。しかしながら、制御パラメータを上手に選択しなければシステムの状態を把握することはできない。

本研究では、これまでの研究<sup>4)</sup> を基に、エージェント群の群行動を分類するために熱力学に基づいたパラメータを統計力学の定義で導出した値を採用する。

## 2 熱力学に基づいたパラメータ

統計力学では、膨大な数の気体分子を統計的に扱って導出した熱力学のパラメータを用いて気体の性質を記述する。本研究ではエージェント群と熱力学のアナロジーを考え、統計力学と同様に熱力学パラメータをエージェント群に見出し、群行動を分類・制御する事を目的とする。

今、エージェント群を  $G = \{a\}$  ( $a$  は群に属するエージェント) とする。群  $G$  の状態量として採用するパラメータは、エントロピー  $S$ 、温度  $T$ 、そして圧力  $P$  の3つである。この3パラメータは、いずれも群の内部エネルギー  $E$  より導出される。

2.1 内部エネルギー  $E(G)$ 

群  $G$  の内部エネルギー  $E(G)$  は、エージェント  $a$  の運動量  $p_a$  と質量  $m_a$  より

$$E(G) = \frac{1}{2} \sum_{a \in G} \frac{p_a^2}{m_a} \quad (1)$$

と定義する。

2.2 エントロピー  $S$ 

群  $G$  のエントロピー  $S(G)$  を

$$S(G) = k_B |G| \left[ \frac{2}{3} \ln \frac{4\pi \{2mE(G)\}^2}{3(\Delta p|G|)^2} + \frac{5}{2} \right] \quad (2)$$

と定義する。ここで、 $k_B$  は Boltzmann 定数、 $|G|$  はエージェント数、 $\Delta p$  は運動量のサンプリング間隔である。

2.3 温度  $T$ 

群  $G$  の温度  $T(G)$  を

$$T(G) = \frac{E(G)}{k_B |G|} \quad (3)$$

と定義する。

2.4 圧力  $P$ 

群  $G$  の圧力  $P(G)$  を

$$P(G) = \frac{E(G)}{V} \quad (4)$$

と定義する。ここで、 $V$  はエージェントの行動空間の体積である。

## 3 免疫アルゴリズム

従来の遺伝的アルゴリズムは適合度が極値となるひとつの遺伝子表現を探索するものである。遺伝的アルゴリズムは、単に極値を見付けるだけで良い問題では非常に強力な武器になるが、極値が多数存在するような問題において、ある閾値よりも良い極値を複数見付けなければならない場合などでは役に立たない。

このような場合は、免疫アルゴリズムを用いることができる。免疫アルゴリズムは、探索された解に対して類似度が定義されていれば用いることができる。遺伝的アルゴリズムと免疫アルゴリズムを組み合わせる場合、遺伝子同士の類似度を定義する。そして、通常の遺伝的アルゴリズムにおける淘汰のステップで次を実行する：

1. 個体の遺伝子が、これまで蓄えられた遺伝子群に含まれている場合は、その個体を淘汰する。このとき、遺伝子群に含まれているかどうかの判定に遺伝子同士の類似度を用いる。
2. 最良の適合度を与えた個体の遺伝子を遺伝子群に蓄える。

上の手順 1 によって、類似した解は唯一つとなる事が保証され、手順 2 によって、類似していない解が保存される。

## 4 環境設計

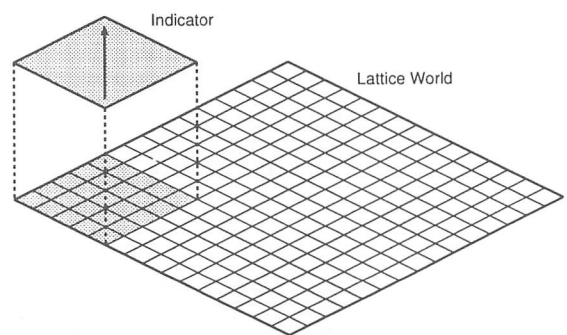


Figure 1: Structure of Environment

図 1 に環境の構造を示す。図示したように、本研究で想定する環境は格子世界である。一つの格子に存在できるエージェントは唯一つである。5×5 格子領域に対し、一つの Indicator が対応する。Indicator は、北、北東、東、南東、南、南西、西、そして北西の計 8 方向のうちの 1 方向を示す。

## 5 エージェント設計

本研究で想定するエージェントは適応能力を持たず、予め設定したルールに基づいて行動する。エージェントは1ステップで1格子だけ移動できる。また、エージェントは最後に移動した方向を保持する。エージェントが移動する場合のルールを次に示す：

1. エージェントの位置に対応する Indicator が示す方向へ移動できる場合は、その方向へ移動し、その方向を保持する。
2. 上の条件で移動できない場合、かつ最後に移動した方向へ移動できる場合は、その方向へ移動し、その方向を保持する。
3. 上の条件で移動できない場合、かつ移動可能な方向が存在する場合は、ランダムで選択した方向へ移動し、その方向を保持する。
4. 上の条件で移動できない場合、移動せず、保持している方向も変更しない。

## 6 数値計算実験

熱力学に基づいたパラメータの有効性を検証するため、数値計算による実験を行った。

### 6.1 実験の条件

環境の条件は次のとおりである：

- 群  $G$  に属するエージェント数は  $|G| = 200$  とする。
- 群  $G$  に属する任意のエージェント  $a$  について、その質量は  $m_a = 1$  する。

### 6.2 実験方法

実験では、はじめに図2に示した Indicator の配置でエージェントを1000ステップ行動させ、上述のパラメータを継続的に測定し、平均値を求める。

次に、Indicator の配置を遺伝子とした遺伝的アルゴリズムを実行し、最良の Indicator の配置を探索する。個体の評価関数を

1. 遺伝子によって決定される Indicator の配置でエージェントを1000ステップ行動させてパラメータを測定し平均値を求める。
2. その平均値が、事前に測定した平均値の  $\epsilon$  近傍に存在すれば、評価値として1を、存在しなければ評価値として0を返す。

と定義する。

また、免疫アルゴリズムを用いて評価値が1となる矢印の配置をいくつか探索する。

#### 6.2.1 遺伝子設計

遺伝子は、8bit 整数列として定義する。遺伝子の各要素は0~7の範囲の値を取り、それぞれ表1に示した関係で矢印と対応させる。

表1: Pair of the Indicator and Gene

遺伝子	0	1	2	3	4	5	6	7
矢印	↑	↗	→	↘	↓	↙	←	↖

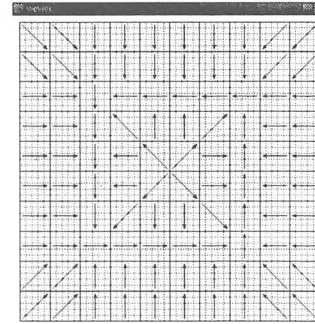


Figure 2: Reference Field

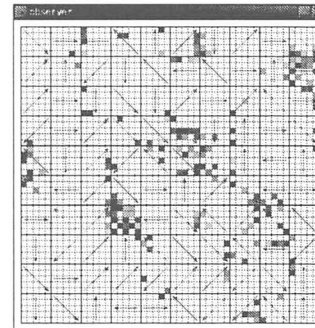


Figure 3: Screenshot of Simulator Window

### 6.3 実験結果

図2に示した行動空間におけるパラメータの平均値は

$$\bar{S} = 719.13, \quad \bar{T} = 0.5558, \quad \bar{P} = 0.0445 \quad (5)$$

となった。

遺伝的アルゴリズムおよび免疫アルゴリズムによる Indicator パターンの探索は現在実行中である。

## 7 おわりに

エージェント群の群行動を分類するためのパラメータとして、熱力学に基づいたパラメータを提案し、免疫アルゴリズムを用いた数値計算実験を行って検証した。今後は、この方法を、位置や速度が連続的に変化する場合に対して適用し、その有効性を検証する必要がある。

## 参考文献

- 1) Yosuke Nishida, et al., MACROSCOPIC OBSERVATION OF MULTI-ROBOT BEHAVIOR, International Symposium of Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM2000), pp.990-909, Maryland, June, U.S.A (2000)
- 2) C. E. Shannon, A Mathematical Theory of Communication, The Bell System Technical Journal, Vol. 27, pp. 379-423, 623-656 (1948)
- 3) 木下ほか, 報酬系の変化を伴う強化学習による群システムの制御, 2003年度精密工学会春期大会学術講演会講演論文集 CD-ROM, p517 (2003)
- 4) 村田ほか, 熱力学に基づく群ロボットシステムのマクロ制御, 2003年度精密工学会春期大会学術講演会講演論文集 CD-ROM, p516 (2003)