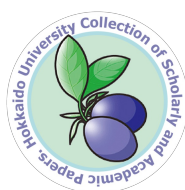




Title	外部観測に基づく進化的フェロモンコミュニケーションの評価と群知能の創発現象に関する研究
Author(s)	川村, 秀憲; 山本, 雅人; 大内, 東
Citation	計測自動制御学会論文集, 37(5), 455-464 https://doi.org/10.9746/sicetr1965.37.455
Issue Date	2001
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/64591
Rights	©2000 SICE. 本文データは計測自動制御学会の許諾に基づきJ-STAGEから複製したものである
Type	journal article
File Information	37_455.pdf



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

川 村 秀 憲*・山 本 雅 人*・大 内 東*

Investigation of Evolutionary Pheromone Communication Based on External Measurement
and Emergence of Swarm Intelligence

Hidenori KAWAMURA*, Masahito YAMAMOTO* and Azuma OHUCHI*

In this paper, we focus on the emergence phenomenon related with artificial pheromone communication and swarm intelligence among many agents in Ants War environment, in which two colonies of artificial ant agents compete for the limited number of food items in order to survive in evolutionary process. The purpose of this research is to clarify the emerging process of communication and the relationship between communication and swarm intelligence. For investigation of communication, we introduce Shannon's entropy and the amount of information to externally measure "the effectivity of communication signals for decision-making of agents" and "the specialty of environmental situation in sending communication signals". In computer simulations, we confirm that the amounts of information of pheromone sensory inputs and selecting of sending pheromone signal are increased with correlation according to the progress of evolution. These experimental results derive that evolutionary communication is incrementally formed by the interaction among agents with self-organization and the self-reinforcement in communication-loop of repeated sending and receiving signals. In addition, we confirm the level of swarm intelligence with evolved pheromone communications by measurement of the correlation between the size of swarm and the performance in Ants War. In investigation, we find that the size of swarm and emergence of swarm intelligence are strongly related. The results introduced in this research will be a base for investigation of multi-agent communications.

Key Words: multi-agent systems, pheromone communication, emergence, genetic algorithm, swarm/collective intelligence

1. はじめに

進化・学習等を通して自律的にマルチエージェント社会にコミュニケーションを創出させることは、人工知能・人工生命の重要な課題であり、生物のコミュニケーションの原理を解明する上でも興味深いことである。また、そのようにして得られたエージェントコミュニケーションと群知能との関わりを明らかにしていくことは、マルチエージェント研究の重要な課題と言える。これらの動機に基づいて行われているエージェントコミュニケーションの研究に対するアプローチは、以下の2つの見方で大別できる。

一つは、エージェントコミュニケーションに用いられるある種のシグナルに対して、そのシグナルが表象する意味の

存在を事前に仮定した上で、複雑な言語に基づくコミュニケーションを行わせようという研究である。関連研究として、Werner等は雄エージェントが雌エージェントの気を引くためのシグナルをニューラルネットワークを用いて進化的に変化させることで、性選択の観点からコミュニケーションの多様性の起源に関する研究を行った¹⁾。また小野はWerner等のモデルを出発点に、雄と雌を異種生物と見立て、同じ動機で行動するが本質的にヘテロなエージェント間でも、分類システムによって共通コミュニケーション規約が獲得できる例を示した²⁾。有田等は複雑な言語コミュニケーションの出発点として、ベルベットモンキーなどの動物のコミュニケーションを想定したモデルに基づいて、言語の起源についてシミュレーションによる実験を行っている³⁾。

これらの研究は、概して人間社会などで用いられる複雑な言語に基づく進化的コミュニケーションに内在するダイナミクスの起源・原理を解明する上で有効なアプローチであるが、陽にコミュニケーションを行うことを前提としているので、「エージェントが合目的的に振る舞う中で、果たして無からコ

* 北海道大学大学院工学研究科システム情報工学専攻複雑系工学講座調和系工学分野 札幌市北区北十三条西8

* Lab. of Harmonious Systems Eng., Research Group of Complex Systems Eng., Division of Systems and Information Eng., Graduate School of Eng., Hokkaido Univ., Sapporo
(Received September 5, 2000)
(Revised January 22, 2001)

コミュニケーションを創出できるか、またそれがコミュニケーションと呼べるのか」というような下位レベルの疑問を検証するには適さない。

一方二つ目は、シグナルが表象する意味をアブリオリに与えず、進化・学習等を通して自律的に獲得させることに焦点を当てた研究である。関連研究として、柴田等はリカレントニューラルネットワークで構成されたエージェントが離散的なシグナルをやりとりすることによって、簡単な学習からコミュニケーションを獲得するのが可能であることを示している⁴⁾。今井等の研究ではコミュニケーションが許されるグリッド環境での獲物捕獲問題に対して、分類子システムでエージェントを学習させ、ID3を用いたルール分類から獲得されたコミュニケーションの検証を行っている⁵⁾。

これらの研究は、コミュニケーションを用いていかに与えられたタスクを達成するかに主眼が置かれるか、またはコミュニケーションとその発生そのものに焦点を当てていても、対象となるモデルに特化した解析手法をとっているものが多く、一般的な解析手法を用いていることは稀である。したがって、コミュニケーションの発生という現象とエージェントの群知能との関わりを明らかにする観点から、エージェントの内部構造や内部環境モデルに立ち入らずに、エージェントシステムを基本的にブラックボックスとして捉え、コミュニケーションをエージェントシステムの外部からのI/Oの観測（本稿ではこれを外部観測と呼ぶ）に基づいて定量評価する理論の構築が必要である⁶⁾。

したがって本稿では、シグナルが表象するアブリオリな意味を仮定せずに、エージェント群に与えられたタスクの達成を通して進化的にコミュニケーションの発生を行わせることと、その外部観測的定量評価に焦点をおく。そのために我々は、エージェント間のコミュニケーションの進化モデルとして、単純な個の能力から適応的な群知能を創発することが可能であるフェロモンコミュニケーションに着目してきた。ここでは、本質的にエージェント群の協調が要求される環境として、人工蟻エージェントの餌争奪ゲーム（以降 *Ants War*）を提案し、コミュニケーションの進化的創発に関して予備的な実験を行ってきた⁷⁾。

更に本稿の基礎として、文献^{8),9)}では「エージェントの行動選択におけるコミュニケーションシグナルの影響性」に関して検証を行った。本稿はそれらの基礎を拡張し、エージェントの入出力について、行動選択におけるシグナルの影響性だけでなく、「シグナル発信時におけるエージェントの環境特異性」という観点からも観測し、エージェントシステムの入出力に対する情報エントロピーに基づいた定量的評価を導入してコミュニケーションループの外部観測的評価を行う。更に、進化的に獲得されたコミュニケーションによる群知能の創発現象に対する検証を行う。

2. フェロモンコミュニケーションと従来研究

社会性昆虫と呼ばれる蟻や蜂は、個々は単純な行動パター

ンに従うにも関わらず、群になると驚くべき協調行動を見せる¹⁰⁾。協調的群知能発現において重要な意味を担っているのが、個体と個体、個体と全体の相互作用である。社会性昆虫の相互作用ではシグナルによるコミュニケーションが重要な役割を担っており¹¹⁾、その例として蜜蜂のダンス行動や¹¹⁾、蟻のフェロモンを介したコミュニケーションがよく知られている。特に本論文では、環境に対しての場形成を通して行われるフェロモンコミュニケーションに着目する。

フェロモンによるコミュニケーションは、単純な情報処理に基づく行動から複雑な群行動を創発するための有効な手段の一つと言われている¹²⁾。フェロモンに基づく群行動の例として、蟻の採餌行動が有名である。蟻は餌を集めるとき、まず周りをランダムにうろつく。そして一匹が餌を発見すると、餌を持ち返る帰りの道に道標フェロモンと呼ばれる化学物質の目印を付けていく。やがて地面のフェロモンは空中に拡散し、それを知覚したほかの蟻が濃度差を利用してその道に追従し、効率よく餌までたどり着く。また、その蟻が道標フェロモンを置いていく。すなわちポジティブフィードバックに基づいて群全体が効率よく採餌行動を行う。餌が無くなったときは、フェロモンが蒸発していくので、不要になった情報は自動的に消えていき、適応的な場の形成を通して群行動が実現される。このようにフェロモンコミュニケーションは単に化学物質の拡散に基づく単純なものであるが、フェロモンの濃度による場が単に個の情報だけではなく、群全体の情報を表現することで適応的な群知能が実現されている¹³⁾。

フェロモンコミュニケーションはマルチエージェントシステムに実装が容易であり、研究がいくつかなされている。Collins 等、Bennette はそれぞれニューラルネットワーク、遺伝的プログラミングに基づいて、フェロモンコミュニケーションを用いた人工蟻の採餌行動設計について研究を行った^{14),15)}。また、中村等は蟻の採餌行動に対して、フェロモンに対する人工蟻の行動規則が大域的振る舞いに与える影響について考察を行っている¹⁶⁾。鈴木等は個々の限定情報に基づく行動に従うと原理的に競合が発生してしまう状況において、進化的フェロモンコミュニケーションを用いて競合解消が行えることを示した¹⁷⁾。実用面においては、Dorigo 等が蟻の採餌行動にヒントを得たアントアルゴリズムを提案し、いくつかの組み合わせ最適化問題でその有効性を示している¹⁸⁾⁻²⁰⁾。また、川村等はエージェントの群の概念を複数に拡張することによって、アントアルゴリズムの改良を行った²¹⁾。更に、香川等は画像の領域分割問題においてフェロモンのアナロジーを用い、有効な結果が得られたと報告している²²⁾。

以上のように、フェロモンコミュニケーションはマルチエージェントの適応的コミュニケーション手段として有望視されており、研究がなされている。しかし、上述の研究例においては単にタスク達成の補助としてフェロモンが使用できるといった程度か、またはコミュニケーションそのものに対象を置いても、どう自律的に獲得させ、それが群全体の振る舞い

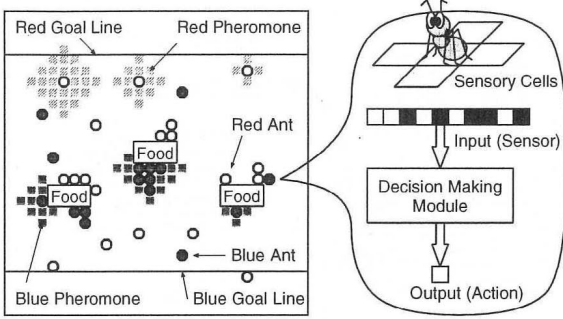


Fig. 1 An image of Ants War game between red ant colony and blue ant colony

にどう関わっているかを詳細に検証した例はない。したがって、本稿では次章に述べる Ants War を用いて、これらを明らかにしていく。

3. 人工蟻エージェントの餌争奪ゲーム: Ants War

Ants War は生物の餌の奪い合いにヒントを得たエージェント環境であり、本質的に協調行動が要求される。久保等によって類似のゲームが提案されているが²³⁾、フェロモンによるコミュニケーションが実装されている点で大きく違う。以下にその概要を述べる。

Ants War は Fig. 1 の様に $X \times Y$ のグリッド環境で行われる。環境中には赤エージェントコロニーと青エージェントコロニー（それぞれ N_a 匹のホモな人工蟻エージェントの集団からなる）が存在し、相手より多くの餌を獲得することが勝利条件である。開始時ランダムに配置されていた各エージェントは時刻 t において、近傍の餌の有無、前後左右の仲間の有無、前後左右のフェロモンの量に関する離散的な 10bit の値をセンサー入力として感知できる（センサー入力については次章参照）。センサー入力から出力として“1: 前”, “2: 後”, “3: 左”, “4: 右”, “5: 待機”, “6: 餌引”, “7: フェロモン放出”のうち一行動を選択する。ただし、赤エージェントはグリッドの下方向を正方向として、青エージェントは上方向を正方向として固定されており、相対的に前後左右と表現している。

餌は質量 W_f を持ち、ゲームの開始時に N_f 個中央に設置される。各餌 i はその餌に対する総合牽引力を表す変数 F_f^i を持つ。各時刻において F_f^i の値は（青コロニーの“餌を牽引しているエージェント”の数）－（赤コロニーの“餌を牽引しているエージェント”の数）で増減される。餌 i は、 $|F_f^i| > W_f$ となったときに正であれば青コロニーのほうへ、負であれば赤コロニーのほうへ 1 グリッド動かされ（移動方向は上下のみである）、 F_f^i の値は 0 にリセットされる。ここで、“餌を牽引しているエージェント”とは、

- 条件1 餌引行動を選択し、かつ餌に隣接している、または
- 条件2 餌引行動を選択し、かつ同時刻に“餌を牽引している同コロニーのエージェント”に隣接している。

のどちらかの条件を満たすエージェントと定義する。つまり、餌に隣接していなくても仲間を介して餌を牽引することが出来る。餌がゴールラインを超えたときは引き切ったコロニーが獲得したとして、環境中から消滅する。

各コロニーそれぞれに対して、コミュニケーション環境としてフェロモン場 $T(x, y)^{\{red, blue\}}$, $P(x, y)^{\{red, blue\}}$ が与えられる。赤コロニーと青コロニーのフェロモン場は独立な同一定義が与えられるので、煩雑さをさけるために以降それぞれの場合を代表して $T(x, y)$, $P(x, y)$ と表すこととする。 $T(x, y)$ はグリッド (x, y) の地面に置かれたフェロモンの量であり、 $P(x, y)$ は空中のフェロモン量を表すものとする。 $T^*(x, y)$, $P^*(x, y)$ をそれぞれ次時刻の状態としたとき、以下の式にしたがって蒸発・拡散していくものとする。

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

$$\Delta T^k(x, y) = \begin{cases} \text{エージェント } k \text{ がグリッド } (x, y) \text{ にフェロモンを放出したとき.} \\ Q_p \\ 0 \quad \text{それ以外.} \end{cases} \quad (2)$$

$$P^*(x, y) = P(x, y) + \gamma_{dif}\{P(x-1, y) + P(x, y+1) + P(x, y-1) + P(x, y+1) - 5P(x, y)\} + \gamma_{eva}T(x, y) \quad (3)$$

ここで γ_{eva} , γ_{dif} はそれぞれ蒸発係数、拡散係数とする。すなわち、各エージェントは地面にフェロモンを置き、それが時間とともに空中へ蒸発・拡散していくようにモデル化されており、濃度差による場に基づいたフェロモンコミュニケーションが可能な枠組みになっている。なお、 $P(x, y)$ の境界条件として、定められたグリッドの範囲外についてはすべて $P(x, y) = 0$ とする吸収端とする。

以上の設定に基づき、終了時刻 t_{MAX} になる前に餌の過半数を獲得したコロニーが勝利となる。また、終了時刻で獲得餌数が同じ場合は、餌が自分のゴールラインにより近いほうのコロニーの勝利とする。この環境で勝つためには、限られたセンサー能力でどうすればやく餌を発見し餌を引くかが鍵になり、お互いのコミュニケーションが重要な役割を担うエージェント環境として、本論文の要請を満たした適切なものであるといえる。

4. エージェントの構造と遺伝的アルゴリズム

Ants War に適用されるエージェントの構造と遺伝的アルゴリズムについて概説する。コロニーを構成するエージェントは各時刻において環境からの離散的な 10 センシング入力に対し、2 層ニューラルネットを通して 7 行動から一つを選択する。ここでニューラルネットを採用したのは、進化を含めた実装の簡易性、少ない状態変数でも多様な行動決定が期待できる柔軟性、トポロジーを変えることによってたとえば反射的エージェントからリカレントネットに基づくエージェント等への拡張容易性、などが理由に挙げられる。

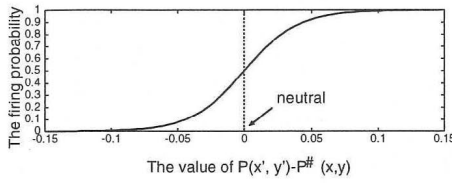


Fig. 2 The firing probability of a pheromone sensory unit

また、このニューラルネットに対して遺伝的アルゴリズムを適用することによって、エージェントの進化が駆動される。エージェントの行動獲得に遺伝的アルゴリズムを用いたのは、マクロな振る舞いに関する評価からミクロなエージェント間の相互作用を獲得するシステムの構築が容易であること、またエージェントの行動獲得に関して強力かつ広く使われているツールであり、ここでの議論が広く応用可能だろうという理由による。

順にエージェントの構造と遺伝的アルゴリズムについて述べる。

4.1 エージェント構造

エージェントの現在グリッド座標を (x, y) とし、その 4 近傍のグリッドを $(x', y') \in \{(x-1, y), (x+1, y), (x, y-1), (x, y+1)\}$ とするとき、エージェントのセンサー入力には以下の式で与えられる。

$$i_1 = \begin{cases} 1 & \text{餌に近接.} \\ 0 & \text{それ以外.} \end{cases} \quad (4)$$

$$i_{2 \sim 5} = \begin{cases} 1 & (x', y') \text{ に仲間エージェントが存在.} \\ 0 & \text{それ以外.} \end{cases} \quad (5)$$

$$i_6 = \begin{cases} 1 & \text{餌を引いている仲間に近接.} \\ 0 & \text{それ以外.} \end{cases} \quad (6)$$

$$i_{7 \sim 10} = \begin{cases} 1 & \text{rand}[0, 1] \leq Ps(x', y') \text{ を満たす.} \\ 0 & \text{それ以外.} \end{cases} \quad (7)$$

$$i_{11} = -1 \text{ (Bias)} \quad (8)$$

式 4, 6 の i_1, i_6 は 4 近傍グリッド中のいずれかに対して条件を満たせばよいものとし、式 5, 7 の $i_{2 \sim 5}, i_{7 \sim 10}$ はエージェントの正方向に対して前後左右の順に、近傍グリッドそれぞれに対して条件を満たす必要がある。 $i_{7 \sim 10}$ はフェロモンに対するセンサー入力であり、発火確率 $Ps(x', y')$ は以下の式で与えられる。

$$Ps(x', y') = \frac{1}{1 + \exp \left\{ -\frac{P(x', y') - P^\#(x, y)}{T} \right\}} \quad (9)$$

$$P^\#(x, y) = \{P(x-1, y) + P(x+1, y) + P(x, y-1) + P(x, y+1)\} / 4 \quad (10)$$

すなわち、センシング対象となるグリッドのフェロモン量が

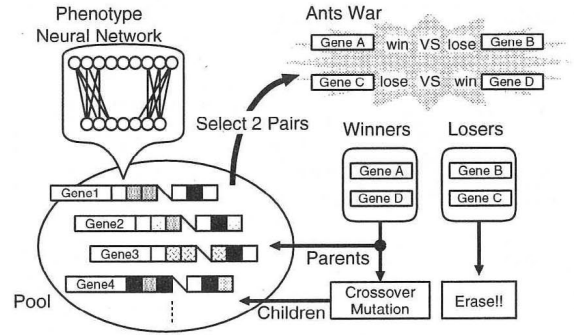


Fig. 3 A flow of co-evolutionary process

4 近傍の平均フェロモン量と比べて多ければ発火する確率が高く、少なければ低いことになる (Fig. 2 参照)。平均量と比べて差がないときは発火確率は 0.5 となる、離散的ながらも連続量を反映したセンサーになっている。なお、センサーの感度に関するパラメータ T は 0.02 を用いている。

これらの入力から、ニューラルネットワークの出力 i ($1 \leq i \leq 7$) が以下の式にしたがって計算される。

$$o_i = 1 / (1 + \exp(-\sum_{j=1}^{11} w_{ij} \cdot i_j)) \quad (11)$$

w_{ij} は入力ユニット i から出力ユニット j への重みを表す実数である。それぞれの出力ユニットはエージェントの各行動と結びつけられており、これらの出力値からルーレット選択で最終的に各時刻におけるエージェントの行動 o を決定する。つまり、エージェントの行動決定はすべてニューラルネットワークの重みに集約されていることになる。

4.2 遺伝的アルゴリズム

つぎに適用する遺伝的アルゴリズムについて説明する。進化の単位となる遺伝子は、ニューラルネットワークの重み集合を直接エンコードするので 11 (入力ユニット数) $\times 7$ (出力ユニット数) の計 77 属性のベクトルになる。遺伝子プールには、 N 個の遺伝子が存在し、それぞれの重みは $[-0.5, 0.5]$ のランダムな値で初期化されている。終了世代 g_{MAX} まで、各世代で下記のアロリズムを遺伝子に適用することによって、進化が駆動される (Fig. 3 参照)。

- Step 1. 遺伝子プールからランダムに 2 組の遺伝子を取り出す。
- Step 2. それぞれ Ants War 環境でゲームを行わせる。2 勝者は親となり、2 敗者はプールより消去される。
- Step 3. 2 個の親が子の原型としてコピーされる。
- Step 4. 2 個の子に対して確率 P_c で交叉が適用される。
- Step 5. 2 個の子に対して確率 P_m で突然変異が適用される。
- Step 6. 2 個の親と 2 個の子がプールに戻される (すなわちプール中の遺伝子数は常に N に保たれる)。

Table 1 The settings of parameters in Ants War and GA

Ants War parameters									
X	Y	N_a	N_f	W_f	t_{MAX}	Q_p	γ_{eva}	γ_{dif}	
44	50	80	5	100	2000	50	0.1	0.1	

GA parameters				
N	g_{MAX}	P_c	P_m	P_o
20	50000	0.4	0.8	0.1

交叉は、確率 P_o によって幾つかの出力ユニットを選択し、その出力ユニットに結合されている重みを2つの遺伝子間で交換する。突然変異は、同様の確率 P_o で選択された出力ユニットに結合されている重みに $[-0.5, 0.5]$ の範囲のランダムな値を加えることとする²⁴⁾。

以上が Ants War で行われる進化アルゴリズムの概要である。特に、大域的評価関数ではなく Ants War のゲーム結果のみに基づく共進化型相対評価によって進化が駆動される。そして、そのような状況に置いて大域的評価関数最適化の結果としての進化過程を観察するのではなく、コミュニケーションの発生が必然ではない共進化的状況に置いて、果たしてコミュニケーションや群知能が現れてくるかを検証する。

5. 実 験

予備実験に基づいて決定された Table 1 のパラメータ設定に基づいて、10 試行の実験を行った。最初に進化過程を通して最終的に得られたエージェントの行動パターンについて説明する。得られたエージェントの行動パターンは明らかに以下の2つに分類できる²⁵⁾。

誘引フェロモンに基づくエージェント (7 試行) これらのエージェントの行動は、フェロモンを感知していないときは基本的にランダムウォークである。しかし一度餌に接触すると、餌を牽引しながらフェロモンを放出し始める。フェロモンの濃度差を感知したほかのエージェントは、濃度勾配の高いほうへ移動し始め、仲間を集めて協調的に餌を牽引する。もし餌が獲得されて環境中から無くなったときは、その周囲のフェロモンが自動的に蒸発していくので、餌があったという情報が消滅し、再びランダムウォークしながらフェロモンによってほかの餌ヘターゲットを変更することが出来る。

忌避フェロモンに基づくエージェント (3 試行) これらのエージェントは高確率でフェロモンをばら撒きながら移動する。移動の仕方は誘引フェロモンとは逆に、フェロモンの濃度勾配が低いほうへ移動する傾向を持つ。また、餌または餌を牽引している仲間に接したエージェントは、フェロモンを放出せず餌を牽引し続ける。すなわち、餌を発見していないときにフェロモンをばら撒くことによって、餌に向かって低くなる濃度勾配を形成し、効率よく餌を発

(a) Attractive Pheromone (b) Repulsive Pheromone

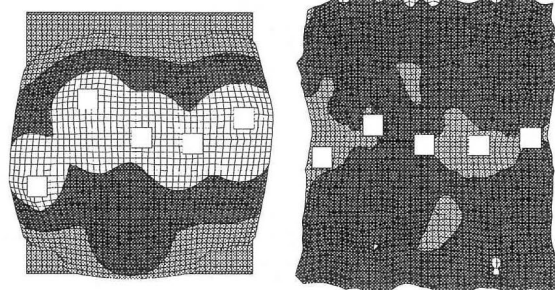


Fig. 4 The distribution of intensities of pheromone in the attractive pheromone and the repulsive pheromone

見する。

誘引フェロモンと忌避フェロモンという名は現実の昆虫で使われるフェロモンから名付けたが¹²⁾、エージェントの行動様相から便宜上名付けたものであり、実験上において拡散等のルールは全く同じである。Fig. 4 は誘引フェロモン・忌避フェロモンの濃度分布の一例を示している。 X, Y 軸はそれぞれグリッドに対応しており、 Z 軸は各グリッドでのフェロモン濃度を $\log$ スケールでプロットしたものである。また、中央付近の正方形は餌を表している。

(a) の誘引フェロモンの場合は餌に向かって濃度が高くなっており、逆に (b) の忌避フェロモンの場合は餌に向かって濃度が低くなっている。各エージェントは4近傍の局所的な情報しか知覚出来ないが、そこから形成されるフェロモン場は大域的な情報を形成しているのが確認できる。10 試行のシミュレーションの結果から、採用した実験環境ではこの2つが局所的最適戦略として存在すると考えられる。全く同じ設定によって明らかに違う2つの戦略に進化するの興味深い。以後この2つの戦略の進化的形成過程に着目することによって、コミュニケーションと群知能の進化的創発過程について明らかにしていく。なお今後示す実験結果は全て、誘引フェロモンの場合は7試行、忌避フェロモンの場合は3試行のデータによって平均化している。

5.1 検証1

まず始めに、進化過程においてエージェントの戦略がどのような方向へ進化したのかを定量的に評価する。進化モデルの駆動力は各世代における相対的評価に基づいているので、尺度を決定するための評価基準が必要である。そこで最終世代の集団を基準とし、各世代の集団が最終世代に対して何割勝つかによって戦略進化を評価する。Fig. 5 は誘引・忌避フェロモンそれぞれにおける最終世代に対する勝率を縦軸に、世代を横軸にグラフ化したものである。なお、勝率は各集団の中からランダムに選んだ戦略による Ants War100 試行の平均である。

結果を見ると両ケースとも勝率が単調増加的に変化し、最

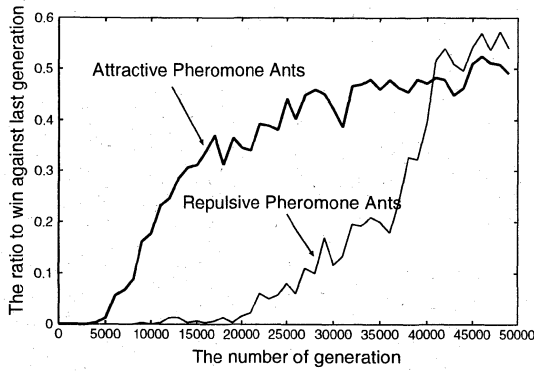


Fig. 5 The distribution of intensities of pheromone in the attractive pheromone and the repulsive pheromone

終世代では約 0.5 になっている。つまり両方の過程において、確かに優位な戦略へ一方向的に進化が進んだことが確かめられる。特に、誘引フェロモンの場合は比較的世代の早い時期に勝率が上がっており、約 25,000 世代付近で既に最終世代に対してはほぼ互角の勝率に達しているが、忌避フェロモンの場合は 35,000 世代すぎあたりになって急激に勝率が上昇している。これは本実験設定における Ants War の戦略空間での進化過程においては、誘引フェロモン戦略へは比較的収束しやすいが、忌避フェロモン戦略へは収束に時間がかかることを示唆している。

5.2 検証 2

つぎに「エージェントの行動選択に対するフェロモンのセンサー入力の影響」と「エージェントがフェロモンを放出するときのセンサー入力のパターンの特異性」を定量化し、進化過程におけるコミュニケーションの発生を外部観測的に定量評価する。具体的には、エージェントの入出力に着目し、入出力特性における情報理論のエントロピーと情報量を測ることによって外部観測的定量化が可能になる²⁶⁾。以下にその概要を述べる。

まず情報理論のエントロピー、情報量の計算概略を述べる。ある事象系 X, Y における 2 つの事象 $x \in X, y \in Y$ において、 $p(x), p(y)$ をそれぞれ x, y が生起する確率、 $p(x, y)$ を複合事象 (x, y) が生起する確率、 $p(x|y)$ を y のもとで x が生起する条件付き確率とすると、エントロピー $H(X)$ 、情報量 $I(X, Y)$ はそれぞれ以下のように計算できる²⁷⁾。

$$H(X) = - \sum_{x \in X} p(x) \log p(x) \quad (12)$$

$$I(X, Y) = H(X) - H(X|Y) \quad (13)$$

$$H(X|Y) = - \sum_{x \in X, y \in Y} p(x, y) \log p(x|y) \quad (14)$$

$H(X)$ は事象系 X の不確実性を表し、その不確実性が事象系 Y を知ることによってどれだけ減少するかが事象系 Y の提供する情報量 $I(X, Y)$ である。つまり、 $I(X, Y)$ が大きいとき事象系 Y が X の決定に対して大きな影響を与え、逆に小さ

いときはあまり影響を与えていないと言える。このエントロピーと情報量を基礎にコミュニケーションを定量評価する。

フェロモンのセンサー入力が行動選択にどの程度影響を与えているかを測るために、行動選択に対するフェロモンのセンサー入力の情報量を観測する。あわせて比較のためにフェロモン以外の環境のセンサー入力の情報量も観測する。具体的には、観測事項を行動出力のエントロピー $H_O = H(\tilde{O})$ 、フェロモン以外の環境センサー入力の情報量 $I_S = I(\tilde{O}, \tilde{S})$ 、フェロモンのセンサー入力の情報量 $I_P = I(\tilde{O}, \tilde{P})$ とし、事象系 $\tilde{O}, \tilde{S}, \tilde{P}$ をそれぞれ

$$\tilde{O} = \{o; o \in \{1, 2, \dots, 7\}\} \quad (15)$$

$$\tilde{S} = \{(i_1, i_2, \dots, i_6); i_1, i_2, \dots, i_6 \in \{0, 1\}\} \quad (16)$$

$$\tilde{P} = \{(i_7, i_8, i_9, i_{10}); i_7, i_8, \dots, i_{10} \in \{0, 1\}\} \quad (17)$$

とする。用いられる属性はそれぞれエージェントの入力・出力に対応するものとし、計算上必要な確率 $p(\cdot)$ は Ants War の各試合において実測されたものを用いる。

Figs. 6, 7 は誘引・忌避フェロモンそれぞれの過程における H_O, I_S, I_P の値の 100 世代ごとの平均を、世代を横軸にとってプロットしたものである。まず誘引フェロモンの場合をみると、行動出力のエントロピー H_O は約 2,500 世代付近で 1.3 程度の値に達し、ほぼ収束している。これは進化の初期段階で「餌を見つけたら必ず牽引する」という重要な行動選択をパターン化し、後はわずかな修正によって行動を精錬化させているからである。情報量 I_P, I_S はともに緩やかな上昇を見せ、25,000 世代程度でほぼ収束している。 I_P, I_S の増加からフェロモンのセンサー入力・環境のセンサー入力が行動決定に対して重要な要因になっていることがわかる。25,000 世代程度で情報量が収束すること、また Fig. 5 における最終世代に対する勝率の変化から、誘引フェロモンにおけるエージェントの進化はほぼ 25,000 世代あたりで、フェロモンのセンサー入力と環境のセンサー入力に同程度依存した局所最適戦略に収束していると推論できる。

忌避フェロモンの場合をしてみると、 H_O は始め 1.4 付近まで減少するが、その後わずかに増加し、また緩やかに減少している。これもやはり初期の段階で餌の牽引行動をパターン化し、後に行動を精錬化していく過程によるものである。誘引フェロモンと比較して減少した後わずかに増加するのは、フェロモン場の状態が激しく変化するので、行動のちょっとした変化がセンサー入力を大きく変化させてしまうことに原因があると考えられる。つまり、誘引フェロモンは餌を発見したときフェロモンを発し、それによって集まってきたエージェントも含めてポジティブ・フィードバックにしたがって餌の周りにフェロモンの濃度勾配が安定して出来るのに対して、忌避フェロモンでは餌のないところにフェロモンを撒きながら移動を続けるので、ポジティブ・フィードバックによる安定したフェロモンの濃度勾配が形成できずに変化が激しくなるのである。

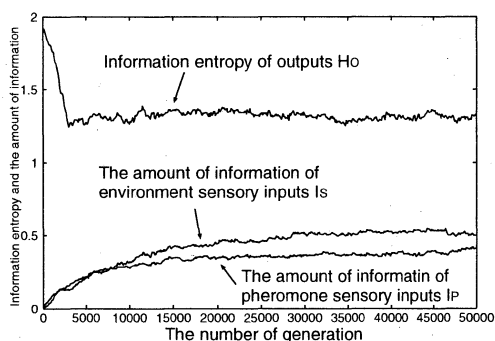


Fig. 6 The transition of output entropy H_O , the amount of information of environment sensory inputs I_S , and the amount of information of pheromone sensory inputs I_P in the case of attractive pheromone

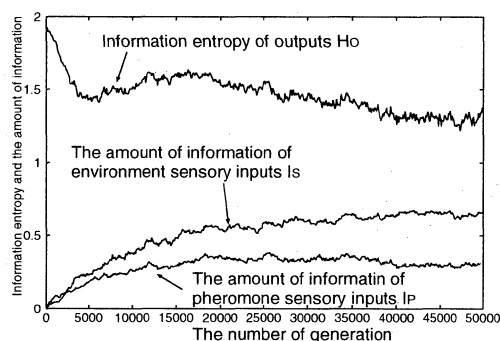


Fig. 7 The transition of output entropy H_O , the amount of information of environment sensory inputs I_S , and the amount of information of pheromone sensory inputs I_P in the case of repulsive pheromone

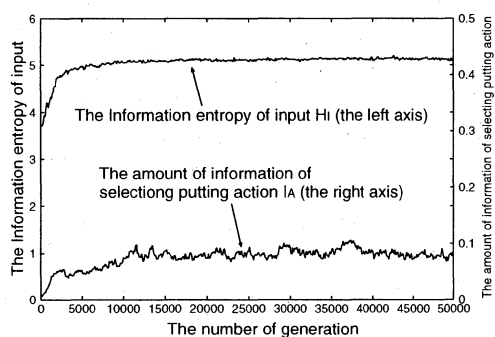


Fig. 8 The transition of input entropy H_I , and the amount of information of putting pheromone inputs I_A in the case of attractive pheromone

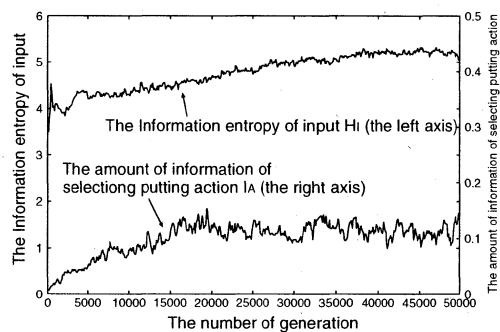


Fig. 9 The transition of input entropy H_I , and the amount of information of putting pheromone inputs I_A in the case of repulsive pheromone

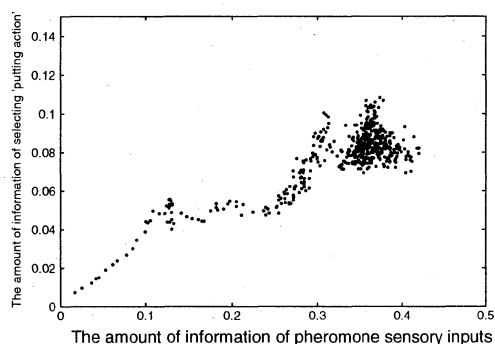


Fig. 10 The distribution of pairs of amounts of I_P and I_A in the attractive pheromone

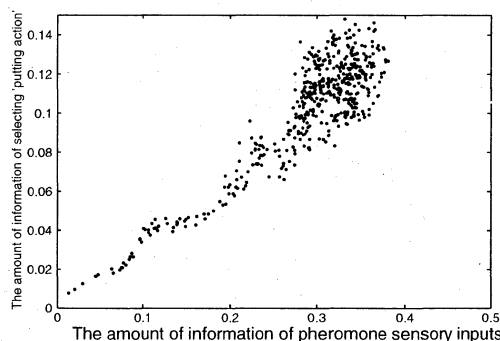


Fig. 11 The distribution of pairs of amounts of I_P and I_A in the repulsive pheromone

I_P, I_S はともに緩やかな増加をみせていることから、フェロモンのセンサー入力、環境のセンサー入力徐徐に行動決定において影響を増していることがわかる。特に各値の変化がわずかながら最終世代まで続いている結果は、Fig. 5で示した忌避フェロモンの勝率の変化が最終世代付近まで続いていることと一致する。

つぎにフェロモン放出行動の選択という事象が環境入力に対してどのくらい情報量を持っているか観測することによって、フェロモンを放出するときのセンサー入力パターンの特異性を検証する。センサー入力のエントロピー $H_I = H(\tilde{I})$,

フェロモン放出行動出力の情報量 $I_A = I(\tilde{A})$ とし、 $\tilde{I}, \tilde{A}$ はそれぞれ

$$\tilde{I} = \{(i_1, i_2, \dots, i_{10}); i_1, i_2, \dots, i_{10} \in \{0, 1\}\} \quad (18)$$

$$\tilde{A} = \{a; a \in \{0, 1\}\}, a = \begin{cases} 1 & o=7 \text{ のとき} \\ 0 & \text{それ以外} \end{cases} \quad (19)$$

とおく。

Figs. 8, 9は誘引・忌避フェロモンそれぞれの場合における H_I と I_A の値の 100 世代ごとの平均を、世代を横軸にとってプロットしたものである。

ともに初期の H_I が低く後に増加するのは、初期状態ではランダムに生成された行動戦略がセンサー入力に関係なくある特定の方向へ移動する傾向を持っているために、エージェント群がグリッドの隅に密集するということに起因すると思われる。すなわち、ほとんどすべてのエージェントが密集してしまうことによって、互いに周りすべてがほかのエージェントに囲まれてしまう状況に極端にセンサー入力のパターンが偏っているためである。そこから世代が進み Ants War に適応していった結果、センサー入力のパターンの偏りが減少するほうへ進化している。Ants War の性質上、ほぼすべてのエージェントのセンサー入力と同じ様なパターンに偏るのは好ましくないという結果は容易に想像できる。誘引フェロモンの H_I は早い世代で 5 付近に収束しているのと比較し、忌避フェロモンが初期の段階で 4.5 付近まで増加し、また 4 程度まで減少した後に徐々に増加している。この理由は、最初のピークを迎えるまではグリッド空間上に分散することを進化させ、後に行動戦略とコミュニケーションを緩やかに洗練させるという 2 段階のフェーズで進化しているのが理由と考えられる。両方の場合において I_A は初期状態から増加し、ある一定値まで達していることから、フェロモン放出行動を選択するときのセンサー入力のパターンが特異的な方向へ進化していることがわかる。

つぎに I_P, I_A 間の関係を調べるために、進化過程で観測された I_P を横軸に、 I_A を縦軸にとってプロットしたのが Figs. 10, 11 である。誘引フェロモンの場合は相関係数が 0.421、忌避フェロモンの場合は 0.668 と各々正の相関を示した。この 2 つの変量がほぼ 0 の段階から正の相関を伴って増加していることから、進化的フェロモンコミュニケーションの発現過程において、フェロモン放出行動がパターン化されてからフェロモンに対する反射行動が進化したり、逆にフェロモンに対する反射行動がパターン化されてからフェロモン放出行動がパターン化されているのではなく、進化の過程で徐々に 2 つの関係を強化しているのがわかる。すなわち進化過程において、シグナルの発信→シグナルの解釈→シグナルの発信→… というコミュニケーションループの中で、進化にしたがってそれぞれを自己強化的に自己組織化しているというシナリオが想定できる。以上よりアプリオリな知識なしに、進化論的計算のパラダイムによって自律的にエージェント間コミュニケーションが創出する過程を検証した。

5.3 検証 3

ここではフェロモンコミュニケーションとマルチエージェント群における群知能の関係を検証する。ジェラルト・ベニは自律分散ロボットシステムにおける群知能について「ロボットユニットの数がクリティカルナンバを越えるときにしか現れない」と言及している^{28), 29)}。また下原は「個々のロボットは単純でそれほど優れていないが、数多く集まってそれらが協調的に動作することによって、全体として複雑で、かつ、すぐれた機能を実現する」という観点から群知能の創発現象を述べている¹³⁾。これらを鑑みるに、群知能の創発を

検証するためにはエージェントの集団サイズと、それに伴って発現する群の機能を何らかの指標で測る必要がある。

本稿の Ants War は相対的に優劣がつくので、勝敗によって群知能のレベルを簡易的に測ることとする。具体的には、最終世代の集団とフェロモン放出行動を無効化した（つまりフェロモン放出行動が待機行動とされる）同集団を Ants War で対戦させたときの勝率を、集団数を変えながら測ることによってフェロモンコミュニケーションによる創発現象を評価する。Fig. 12 において横軸は集団サイズであり、縦軸は各々フェロモン無効化集団に対する 100 試行の勝率である。両ケースとも数が少ないときと比べ、エージェント数が多くなるにしたがって勝率は 1 に近づき、集団数が 25 以上のときにはほぼ 1 になっている。つまり、集団数が 25 程度までフェロモンコミュニケーションの群知能は段階的に創発し、集団サイズ 25 を越えてフェロモン無効化集団に対しての効果が最大限になっている。この結果から、フェロモンコミュニケーションは集団のなかでその効果を増し、群知能における創発に重要な役割を果たしていることがわかる。

つぎに誘引フェロモンと忌避フェロモンのコミュニケーションの群知能の創発を比較するため、集団サイズを変えながら互いに Ants War で試合を行わせた。Fig. 13 において、横軸は集団サイズであり、縦軸は 100 試行の平均勝率である。集団数が少ないときには忌避フェロモンが有利であるが、集団数が大きくなるにしたがって次第に誘引フェロモンが有利になっていく。つまり、集団サイズの増加に伴って忌避フェロモンの創発のレベルを誘引フェロモンの創発のレベルが上回っていると考えられる。コミュニケーションに基づく相互作用の様相から群知能の創発性に違いが現れてくるのは興味深い結果であり、今後議論を深めていく必要があると考えられる。

6. おわりに

本稿では計算機実験を通して、Ants War 環境で誘引フェロモンと忌避フェロモンに基づくコミュニケーションを用いた 2 つの局所最適戦略への進化過程を示した。そこではマルチエージェント間のコミュニケーションを、「エージェントの行動選択におけるシグナルの影響性」と「シグナル発信時におけるエージェントの環境特異性」という観点からエントロピーと情報量を導入することによって、外部観測的に定量評価した。重要な結論として、エージェント群が進化計算におけるコミュニケーションループの中で、自己強化的にコミュニケーションを自己組織化している過程を明らかにした。特にそこでは、戦略パラメータ空間における初期の僅かな偏りによって、まったく違うコミュニケーションへ進化していく現象が確認できた。

また、エージェント群の集団サイズと群の知能レベルを簡易的に測定することで、フェロモンコミュニケーションと群知能の創発現象を確認した。そこでは、コミュニケーションのタイプによって創発レベルに違いがあることがわかった。

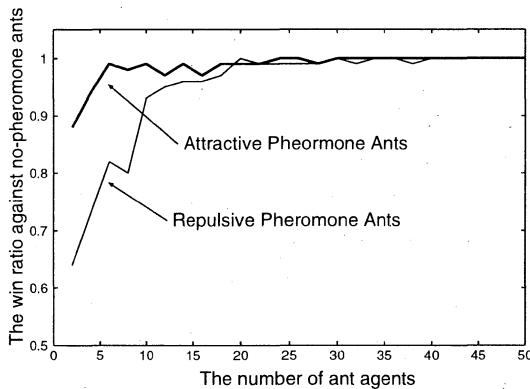


Fig. 12 The transition of winning ratios against non-pheromone ant colonies according to the number of agents in the case of attractive and the repulsive

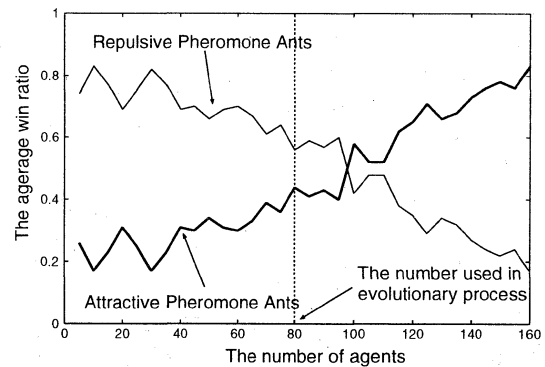


Fig. 13 The transition of winning ratio of the attractive colony and the repulsive colony with various numbers of ants

今後マルチエージェントシステムの創発性を論じるとき、創発レベルについて論じていく必要があるように思われる。

参考文献

- G. M. Werner and M. G. Dyer: Evolution of Communication in Artificial Organisms, Artificial Life II, Proceedings of the Second International Conference on Artificial Life, 659/687 (1991)
- 小野 典彦: 人工生物群による通信の自己組織化, マルチエージェントと協調計算 II, 日本ソフトウェア科学会, 181/195 (1993)
- T. Arita and Y. Koyama: Evolution of Linguistic Diversity in a Simple Communication System, Artificial Life IV, Proceedings of the Sixth International Conference on Artificial Life, the MIT press, 9/17 (1998)
- 柴田, 伊藤: 利害の衝突回避のための交渉コミュニケーションの学習 - リカレントニューラルネットワークを用いたダイナミックコミュニケーションの学習 -, 計測自動制御学会論文集, 35-11, 1346/1354 (1999)
- 今井, 小倉, 渡辺: マルチエージェント環境におけるコミュニケーションの発生とその分析, 信学技報, NC99-93, 1/8 (2000)
- 三上, 嘉数: マルチエージェント系における機能創発, 計測と制御, 38-10, 630/635 (1999)
- H. Kawamura, M. Yamamoto, K. Suzuki and A. Ohuchi: Ants War with Evolutionary Pheromone Style Communication, Lecture Notes in Artificial Intelligence 1674, Advances in Artificial Life, ECAL'99, Springer, 639/643 (1999)
- 川村, 山本, 鈴木, 大内: 人工蟻の餌争奪ゲームにおけるフェロモンコミュニケーションの進化的獲得. 第12回創発システム・シンポジウム講演集, 17/20 (2000)
- H. Kawamura, M. Yamamoto and A. Ohuchi: A Study on Evolutionary Emergence of Pheromone Communication on Ants War, Proceedings of Intelligent Autonomous Systems 6, 527/534 (2000)
- 東 剛正: 地球はアリの惑星, 平凡社 (1995)
- T. D. Seeley: The Wisdom of the Hive: The Social Physiology of Honey Bee Colonies, Harvard University Press (1995)
- W. C. Agosta: Chemical Communication - The Language of Pheromone -, W. H. Freeman and Company (1992)
- 下原 勝憲: ロボット集団における生物的コミュニケーションと協調動作 - 人工生命の視点から -, 日本ロボット学会, 12-6, 808/812 (1994)
- R. J. Collins and D. R. Jefferson: AntFarm: Towards Simulated Evolution, Artificial Life II, Proceedings of the Second International Conference on Artificial Life, 159/168 (1991)
- F. H. Bennett III: Emergence of a Multi-Agent Architecture and New Tactics for the Ant Colony Food Foraging Problem Using Genetic Programming, From Animals to Animats 4, Proceedings of the Fourth International Conference on Simulations of Adaptive Behavior, 430/439 (1996)
- M. Nakamura and K. Kurumatani: Formation Mechanism of Pheromone Pattern and Control of Foraging Behavior in an Ant Colony Model, Proceedings of the Fifth International Workshop on the Synthesis and Simulation of Living Systems, 67/74 (1997)
- K. Suzuki and A. Ohuchi: Reorganization of Agents with Pheromone Style Communication in Multiple Monkey Banana Problem, Proceedings of Intelligent Autonomous Systems 5, 615/622 (1997)
- M. Dorigo, V. Maniezzo and A. Colnori: Positive Feedback as a Search Strategy, Technical Report No. 91-016, Politecnico di Milano, Italy (1991)
- A. Colnori, M. Dorigo and V. Maniezzo: Distributed Optimization by Ant Colonies, Proceedings of ECAL91, 134/142 (1991)
- M. Dorigo and L. M. Gambardella: Ant Colonies for the Travelling Salesman Problem, BioSystems 43, Elsevier, 73/81 (1997)
- H. Kawamura, M. Yamamoto, K. Suzuki and A. Ohuchi: Multiple Ant Colonies Algorithm Based on Colony Level Interactions, IEICE Transactions, E82-A-3, 371/379 (2000)
- 香川, 木内, 萩原: 人工生命的手法による画像の領域分割, 日本ファジイ学会誌, 12-1, 176/184 (2000)
- 久保, 嘉数: 蟻の争奪戦ゲームによるマルチエージェントシステムの協調動作評価, 情報処理学会論文誌, 35-8, 1555/1566 (1994)
- D. J. Montana and L. D. Davis: Training Feedforward Networks using Genetic Algorithms, Proceedings of the International joint Conference on Artificial Intelligence 67/74 (1989)
- <http://ses3.complex.eng.hokudai.ac.jp/~kawamura/ants-war>
- 高階, 渡辺: マルチエージェントシステムの学習過程の定量化手法 - 人工株式市場モデルでの評価 -, 計測自動制御学会論文誌, 35-12, 1609/1616 (1999)
- C. E. Shannon and W. Weaver: The Mathematical Theory

- of Communication, The University of Illinois Press (1964)
- 28) ジェラルド・ベニ: 自律分散ロボットシステムと群知能, 日本ロボット学会, 10-4, 457/463 (1992)
- 29) 湯浅 秀夫: 相転移現象を応用した群ロボット系の創発的制御の試み, 計測と制御, 38-10, 646/649 (1999)

[著 者 紹 介]

川 村 秀 憲 (正会員)



1996 年北海道大学工学部情報工学科卒業. 98 年同大学院工学研究科システム情報工学専攻修士課程修了. 2000 年同大学院博士後期課程修了. 同年北海道大学大学院工学研究科複雑系工学講座助手, 現在に至る. 複雑系工学, 人工知能, マルチエージェントシステム, 人工生命に関する研究に従事. 人工知能学会, 情報処理学会, 電子情報通信学会, 日本オペレーションズ・リサーチ学会各会員. 博士 (工学).

山 本 雅 人 (正会員)



1991 年北海道大学工学部情報工学科卒業. 93 年同大学院工学研究科修士課程情報工学専攻修了. 96 年同大学院博士後期課程修了. 同年日本学術振興会特別研究院 (PD). 97 年北海道大学大学院工学研究科複雑系工学講座助手. 2000 年同大学助教授, 現在に至る. 自動推論, ゲノム情報処理などに関する研究に従事. 人工知能学会, 情報処理学会, 電子情報通信学会, 日本オペレーションズ・リサーチ学会各会員. 博士 (工学).

大 内 東 (正会員)



1974 年北海道大学大学院工学研究科博士課程修了. 北海道大学大学院工学研究科複雑系工学講座教授, 現在に至る. システム情報工学, 応用人工知能システム, 医療システムの研究に従事. 人工知能学会, 情報処理学会, 電気学会, 日本 OR 学会, 医療情報学会, 病院管理学会, IEEE-SMC 各会員. 博士 (工学).
