

## 情報伝達と自律主体システムの自己組織化に関する研究

今 井 正 文

本論文は、自律主体システム(Autonomous agent systems)における自己組織化(Self-organization)の現象と情報伝達の関係について考察している。自律主体システムは、相互作用をするような規則を含めた簡単な行動規則(if-then rule)を持つ多数の自律主体によって構成されるが、全体を制御するような機能無しで目標物運搬システムとして機能する。この自律主体システム全体の相互作用と移動量の状態推移を観察することにより見られる自己組織化の現象について議論していく。自律主体システムの自律主体の構成要素数を変化させること、各構成要素の情報伝達的能力を変化させ比較することにより、情報伝達によって起こる相互作用が自己組織化に重要な役割を果たすことと自律主体システムのカオス的な挙動を引き起こすことを示す。さらに遺伝的アルゴリズムによるシステムと比較することにより、自律主体システムの自己組織化の達成度を考察する。

### Mutual Communication in Organization and its Self-Organization regarding Autonomous Agent Systems

Masafumi Imai

**Abstract:** This Abstract: Phenomena of Self-Organization in Autonomous agent systems and relations of its mutual communication are presented. Autonomous agent systems are constructed by many autonomous agents applied simple behavioral rules (if-then rules) as their interaction arise and function as the information transmission systems with partial control function for targets. The characteristics of self-organization is considered by observing the state transition of interactions and activities in autonomous agent systems. By changing the numbers of component and ability of their communication and comparison with the both characteristics. It is showed that interaction perform important role for self-organization and cause chaotic behavior of autonomous agent systems by mutual communication. Then a level of achievement of self-organization is clarified in comparison with applying genetic algorithm to autonomous agent systems.

## 1 緒論

本論文は、自律主体システム(Autonomous agent systems)における自己組織化(Self-organization)の現象と情報伝達の関係について考察している。自律主体システムは、相互作用をするような規則を含めた簡単な行動規則だけを用いて全体を制御するような機能無しでシステムが機能するが、情報伝達の方法を変化させ比較することにより、情報伝達によって起こる相互作用が自己組織化に重要な役割を果たすことと、その非線形な特性が自律主体システムのカオス的な挙動を引き起こすことを示す。また、遺伝的アルゴリズムを利用して効率の良い自律主体システムの構成要素数を探索することにより、本研究の自律主体システムの自己組織化が達成されていることを検証する。

## 2 自律主体システム

従来の研究において我々は組織行動の自己組織化モデルでは非線形モデルの動特性が示すカオス的アトラクタ(Chaotic attractors)の形成過程から把握される自己組織化を考察した[1],[2],[3]。本論文では、自己組織化とは相互作用を含む行動規則に従った個々の自律主体の行動の結果としてのシステム全体の秩序形成であるとして[1],[4]、自律主体が互いに相互作用をするような規則を含めたいくつかの簡単な行動規則(if-thenルール)を持つ構成要素によって定義される自律主体システムを考察する。さらに、直接接触による情報伝達から自分の近くにいる構成要素に情報伝達できるように変化させその相互作用の違いを比較することによって、自己組織化のレベ

ルが変化すること明らかにする。結果として、自己組織化と相互作用の関係、カオス特性、特に情報伝達による相互作用が重要な役割を果たすことを示す。

### 2.1 自律主体の行動規則

多数の自律主体が、それぞれ目標物を探索して定位置に移動するような自律主体システムを考える。自律主体システムの構成要素となる自律主体は以下のようないくつかのif-thenルールによって行動する。ただし、これらの自律主体は、離脱が無く接触によって行なわれる情報伝達によって相互作用を行なうものとする。本論文は、直接接触による情報伝達と距離が近い構成要素に対する情報伝達を考え、その相互作用の違いを比較する。

### 自律主体システムの行動規則

全ての要素は定位置(home)から出発し、ステップ時間毎のランダム移動により目標物(object)を探索するが、目標物が見つからなければ一定時間毎に定位置に戻る。

もし移動した場所に目標物があれば、位置を記憶し定位置(home)に持ち帰る。

定位置に目標物を置いて再び目標物を取りに行くが、もし記憶した位置に目標物が無ければランダム探索を行う。他の構成要素と情報伝達できる場合、どちらかが目標物の情報を持ってれば情報伝達される。

目標物の位置情報を持たない要素が情報伝達された場合、伝達された目標物の情報に従って目標物を運びに行く。

このif-thenルールによって行動する多数の自律主体は、基本的にはランダムな探索を行なうが定位置に戻ることによって周期性を持つものとする。

## 2.2 情報伝達の方法

自律主体システムの情報伝達の方法を変化させその相互作用の違いを比較することによって、自己組織化のレベルが変化することを明らかにする。図1に示すように、直接接触による情報伝達を行なう自律主体システムと距離が近い構成要素に情報伝達できる場合の自律主体システムを考え比較を行なうと考えれば良い。シミュレーションでは、情報伝達できる距離を0unit(直接接触)から4unitまで変化させてシミュレーションを行なう。

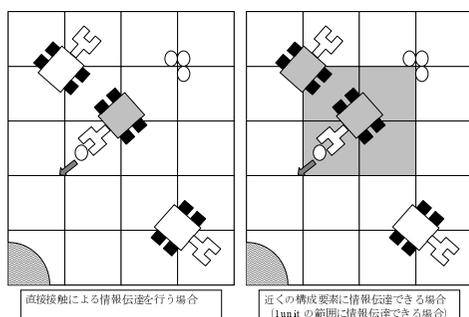


図1 情報伝達の方法

## 2.3 自律主体システムのカオス性

多数の自律主体によって構成される自律主体システムの自己組織化の現象におけるカオス性を考察する[1],[2],[3].ただし、自律主体システムはデータ生成の構造が明確ではないため、時系列データから直接、最大リアプノフ数(Lyapunov spectrum)を求める[5].自律主体システムの生成するデータを状態空間表示して得られた点の集合から、なるべく近い2点  $x_i(t), y_j(t)$  を取

り、この2点の  $\tau$  時間後の距離の比  $\Lambda_{ij}(t, \tau)$  を求めて、多くの  $N$  個の点について距離の比の平均操作を行えば時間  $t$  における最大リアプノフ数  $\lambda(t)$  が求められる。具体的には、以下のように計算される。

$$\Lambda_{ij}(t, \tau) = \frac{|x_i(t+\tau) - y_j(t+\tau)|}{|x_i(t) - y_j(t)|} \quad (2.1)$$

$$\lambda(t) = \frac{1}{\tau N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \log \Lambda_{ij}(t, \tau) \quad (2.2)$$

式(2.1),(2.2)で時間  $t$  における最大リアプノフ数  $\lambda$  を時間  $t$  について平均して正の値に収束すれば、システムにカオス性が存在しているといえる[5],[6].

## 3 シミュレーション

### 3.1 自律主体システム

直接接触により情報伝達をする自律主体システムに以下の表1のようなパラメータを与えて、挙動を計算すると図2から図5が得られる。

1つの自律主体の移動の軌跡の例図2より、個々の構成要素はランダムな探索と情報を得た場合の規則的な目標物の移動によって複雑な挙動をしていることがわかる。

表1. 自律主体システムのパラメータ

自律主体の要素数N	20
総計算時間T	8000 step
目標探索の制限時間	20 ± 5 step
目標探索の移動距離	-5 ~ 5 units / step
目標物の位置	$x = [5 \sim 6], y = [7 \sim 8]$
目標物の配置数	30個/1回
目標物の再配置時間	15steps
目標物の配置制限時間	30steps

時間  $t = 234$  における自律主体の状態の例を図3に示す．黒点は探索のためのランダム移動，白丸は目標物運搬中もしくは情報に従って目標物を取りに行く構成要素である．各自律主体の位置  $x_i(t), y_i(t)$  を移動量に変換し平均した場合の移動量の平均  $|x(t)|, |y(t)|$  と相互作用の平均  $Int(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n Int_i(t)$  の時系列データを図4に示す．図4より，構成要素間の情報伝達による相互作用が生成され，システム全体の挙動が複雑になっていることがわかる．自律主体システムは，行動規則によって生成される多数の自律主体間の相互作用によりシステム全体としての自己組織化を達成しているといえる．自律主体システムの生成するデータから時間  $t = 8000$  において収束した最大リアプノフ数を求めると  $\lambda_1 = 0.0124$  となり，正の値を持つことからカオスである[5],[6]．構成要素の移動量の平均と目標物に関する情報を持つ構成要素の比率，及び定位置に到着した目標物の平均を図5に示す．各構成要素の単位時間当りの移動量の平均は1.674，目標物の情報を持つ構成要素の構成要素数全体に対する比率0.06323，及び定位置に到着した目標物の平均0.1288となる．

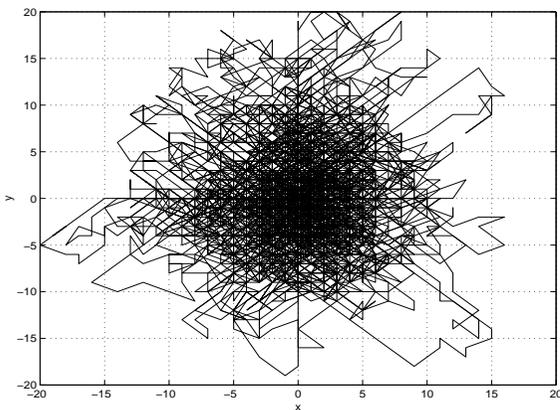


図2 自律主体の移動の軌跡の例

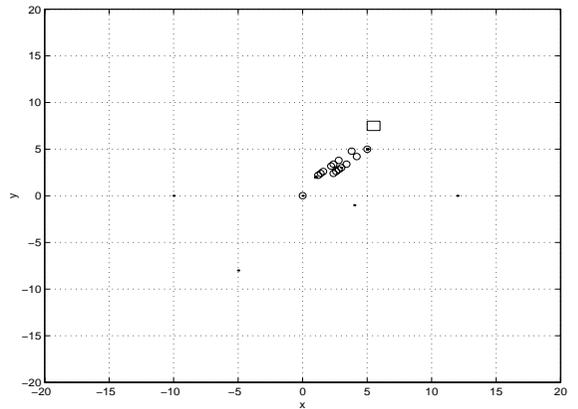


図3 自律主体の状態の例 (time = 234)

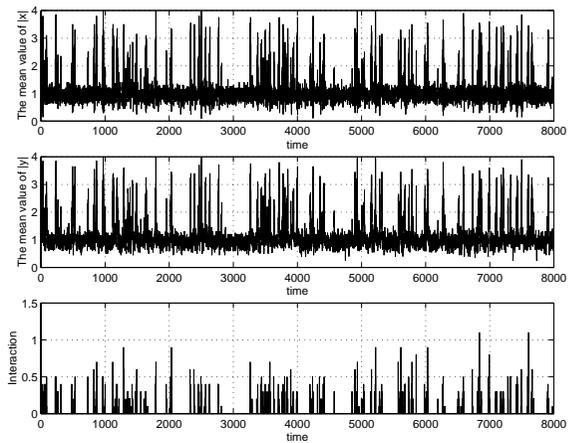


図4 移動量の平均と相互作用の平均

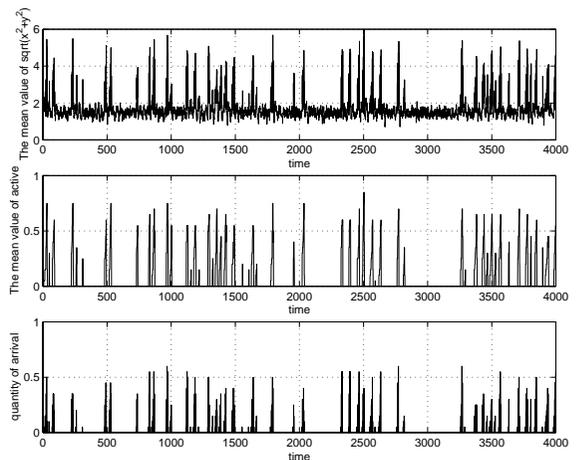


図5 移動量と目標物情報を持つ構成要素の比率と定位置に到着した目標物の平均

### 3.2 情報伝達と自己組織化のレベル

以下のようなシステム全体の平均値を自己組織化のレベルを表す関数  $s$  として利用する事によって、構成要素数  $N$  と情報伝達に対応する自律主体システムの自己組織化の達成度の変化を考察する。

- ・ 移動量：
$$s(\bar{x}, \bar{y}) = \frac{1}{TN} \sum_t \sum_{i=1}^N \sqrt{(x_i(t+1) - x_i(t))^2 + (y_i(t+1) - y_i(t))^2}$$
- ・ 相互作用：
$$s(Int) = \frac{1}{TN} \sum_t \sum_{i=1}^N Int_i(t)$$
- ・ 目標物移動数：
$$s(Obj) = \frac{1}{TN} \sum_t \sum_{i=1}^N Obj_i(t)$$
- ・ 最大リアプノフ数：
$$s(\lambda) = \lambda_1$$
- ・ 目標物情報：
$$s(Inf) = \frac{1}{T} \sum_t Inf(t)$$

ただし、 $Inf(t)$  は時間  $t$  における目標物の位置情報を持つ構成要素の比率である。

#### 3.2.1 直接接​​触による情報伝達を行なう場合

直接接​​触による情報伝達を行なう自律主体システムに表 1 と同じパラメータを与えて、構成要素数  $N$  を 2 から 70 まで変化させた場合の移動量  $s(\bar{x}, \bar{y})$ 、相互作用  $s(Int)$ 、目標物移動数  $s(Obj)$ 、最大リアプノフ数  $s(\lambda_1)$  を計算すると図 6 から図 8 が得られる。図 6 の移動量  $s(\bar{x}, \bar{y})$  は、少ない構成要素数  $N$  で急速に増加しある程度の範囲で増加減少するが、構成要素数  $N \geq 12$  で高い値を示す。目標物移動数  $s(Obj)$  は、構成要素数  $N$  の増加に対して一旦増加し構成要素数  $N = 12$  で最大値を示し減少する。図 7 の相互作用  $s(Int)$  は、構成要素数  $N$  の増加に対応して増加するが、目標物情報を持つ構成要素の比率が  $N = 16$  において最大値を持つことがわかる。

構成要素数  $N$  の増加により相互作用  $s(Int)$  が増加し、目標物の位置情報を得ることによって移動量  $s(\bar{x}, \bar{y})$  と目標物移動数  $s(Obj)$  が増加するが、目標物が有限なために構成要素数  $N$  がある程度以上になると飽和・減少すると解釈できる。図 8 の最大リアプノフ数  $s(\lambda_1)$  は、相互作用の増加は移動量と目標物移動数を増加させるが、構成要素数がある程度以上になると情報伝達が無駄になり時間的なずれをもって移動量を飽和・減少させ、カオス特性を発生させると解釈できる。

#### 3.2.2 近くの構成要素に情報伝達できる場合

距離が近い構成要素に対する情報伝達を行なう自律主体システムに、情報伝達できる距離を 1unit から 4unit まで変化させてシミュレーションを行なう。

まず、情報伝達できる距離を 1unit としてシミュレーションを行なうと図 9 から図 11 が得られる。図 9 より、移動量  $s(\bar{x}, \bar{y})$  は少ない構成要素数  $N$  で急速に増加するが、目標物移動数  $s(Obj)$  は構成要素数  $N = 20$  で最大値を示す。図 10 の相互作用  $s(Int)$  と目標物情報を持つ構成要素の比率が構成要素数  $N$  の増加に対して増加傾向を示すことがわかる。直接接​​触による情報伝達と比較すると、構成要素数  $N$  の増加による相互作用  $s(Int)$  の増加が移動量  $s(\bar{x}, \bar{y})$  と目標物移動数  $s(Obj)$  を増加させるのは同様だが、有限な目標物に対する飽和がより多くの構成要素数  $N$  で起こり、またそのレベルも高いといえる。図 11 の最大リアプノフ数  $s(\lambda_1)$  は、移動量と目標物移動数が高い値を示す構成要素数  $N$  の範囲において負の符号を持つ。

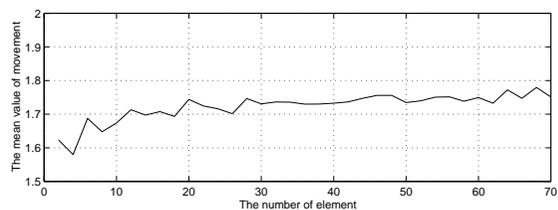
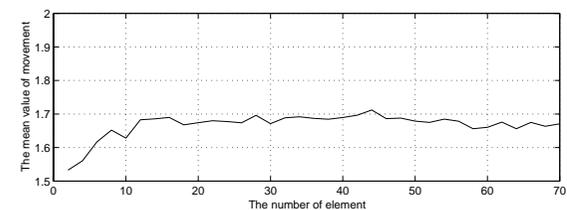


図6 構成要素数  $N$  と移動量  $s(\bar{x}, \bar{y})$  と目標物移動数  $s(Obj)$

図9 構成要素数  $N$  と移動量  $s(\bar{x}, \bar{y})$  と目標物移動数  $s(Obj)$

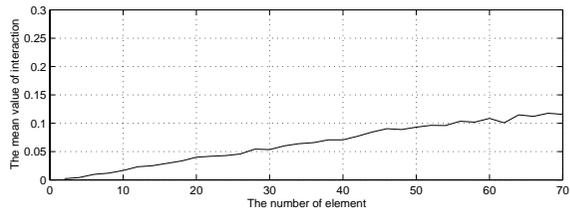
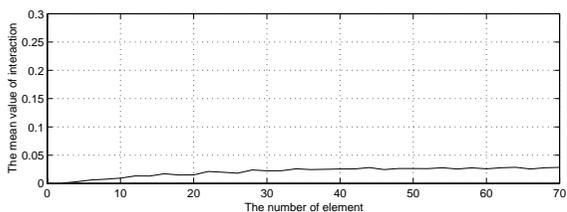
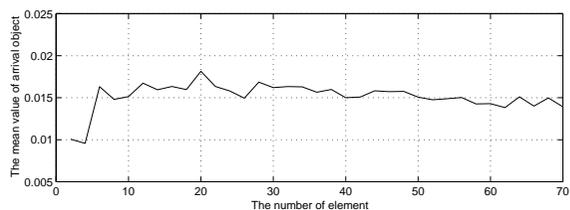
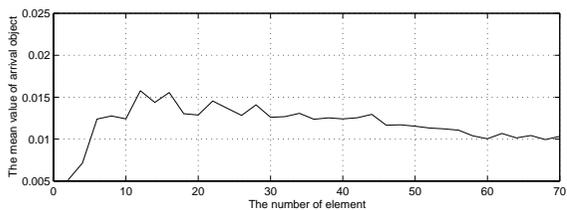


図7 構成要素数  $N$  と相互作用  $s(Int)$  と目標物情報を持つ構成要素の比率

図10 構成要素数  $N$  と相互作用  $s(Int)$  と目標物情報を持つ構成要素の比率

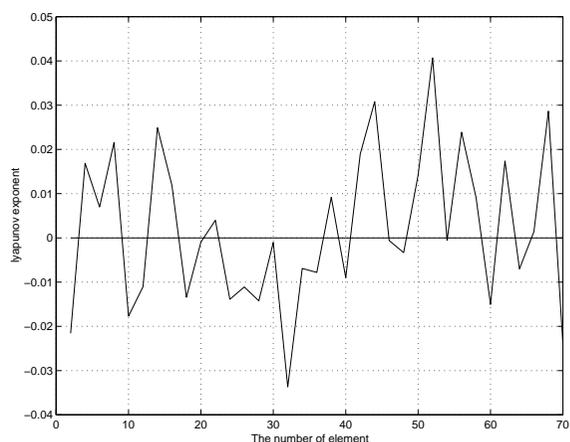
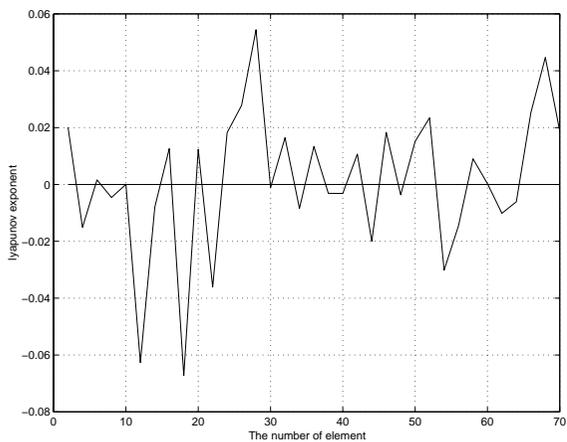
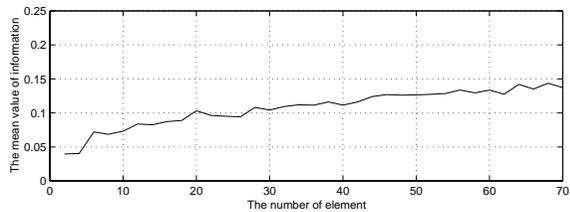
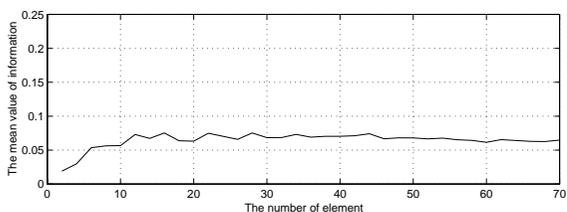


図8 構成要素数  $N$  とリアプノフ数  $s(\lambda_1)$

図11 構成要素数  $N$  とリアプノフ数  $s(\lambda_1)$

### 3.3 情報伝達の能力と構成要素数と自己組織化のレベル

さらに、情報伝達できる距離を1unitから5unitまで変化させてシミュレーションを行なうと図12から図16が得られる。図12 移動量  $s(\bar{x}, \bar{y})$  と図13 目標物移動数  $s(Obj)$  において、少ない構成要素数  $N$  でレベルが急速に増加する傾向は情報伝達の距離に関係なく見られるが、情報伝達できる距離が大きくなるに従ってレベルが高くなることわかる。図14 相互作用  $s(Int)$  と図15の目標物情報を持つ構成要素の比率は、構成要素数

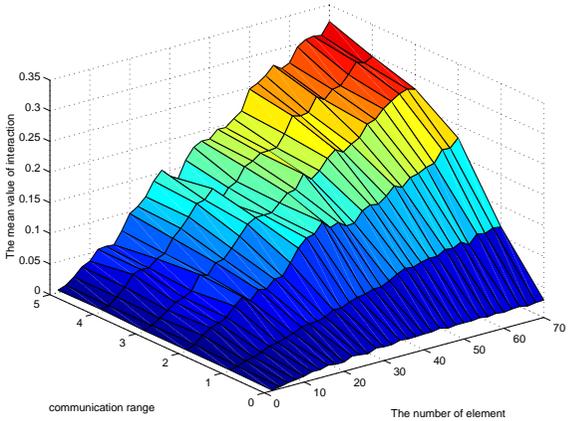


図14 構成要素数  $N$  と情報伝達の距離と相互作用  $s(Int)$

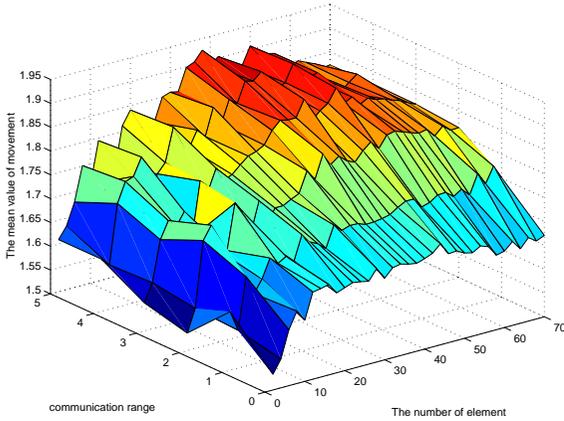


図12 構成要素数  $N$  と情報伝達の距離と移動量の平均  $s(\bar{x}, \bar{y})$

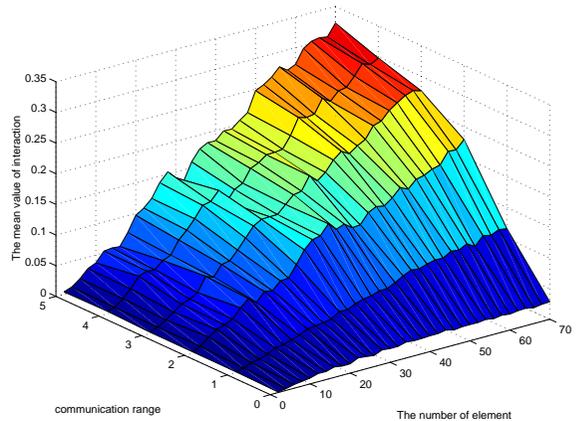


図15 構成要素数  $N$  と情報伝達の距離と目標物情報を持つ構成要素の比率

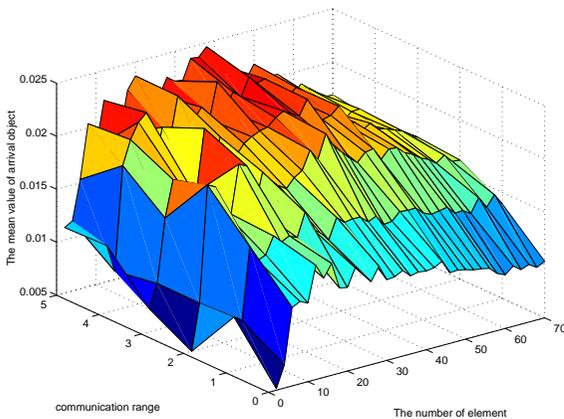


図13 構成要素数  $N$  と情報伝達の距離と目標物移動数  $s(Obj)$

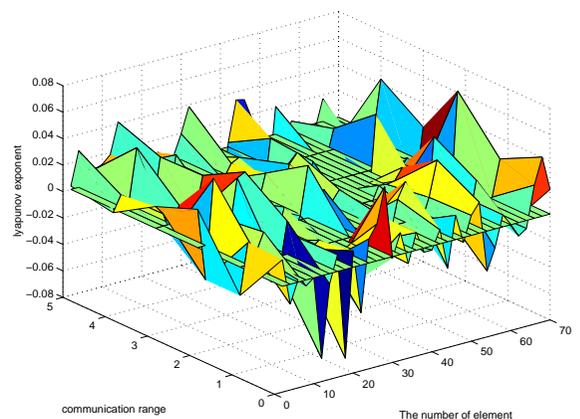


図16 構成要素数  $N$  と情報伝達の距離とリアプノフ数  $s(\lambda_1)$

$N$ の増加に対して増加傾向を示すことがわかる．構成要素数  $N$ の増加による相互作用  $s(Int)$ の増加が移動量  $s(\bar{x}, \bar{y})$ と目標物移動数  $s(Obj)$ を増加させるのは同様だが，情報伝達できる距離が大きくなるに従って，有限な目標物に対するレベルの飽和がより多くの構成要素数  $N$ で起こり，またそのレベルも高くなる．

### 3.4 遺伝的アルゴリズムによる自律主体システムのパラメータ探索

遺伝的アルゴリズム (genetic algorithm) を利用して効率の良い自律主体システムの構成要素数  $N$ と情報伝達できる距離を探索する [7]．通常の自律主体システムのシミュレーション結果と遺伝的アルゴリズムによって探索した構成要素数や情報伝達できる距離パラメータを採用した自律主体システムの結果を比較することにより，情報伝達によって起こる相互作用によって自律主体システムの自己組織化の妥当性を検証することができる．

#### 3.4.1 構成要素数の探索

まず，効率の良い自律主体システムの構成要素数  $N$ を探索する．自己組織化のレベルを表す関数の1つである目標物の移動数  $s(Obj)$ を評価尺度として利用し，連続世代モデル (continuous generation model) を採用する．次の世代にむけて淘汰される割合である世代ギャップは遺伝子全体の10%とする．交差はランク戦略で選ばれた評価値の良い2つの構成要素を親とした平均値とし，突然変異は交差後遺伝子全体に対して5%の割合で発生するものとする．直接接触による情報伝達を行う場合の自律主体シス

テムの構成要素数  $N$ の探索を100個の集団を用いて探索した場合の平均適合度のオンラインパフォーマンス (on-line performance)の様子を図17に示す．図17より，自律主体システムの遺伝的アルゴリズムによるパラメータ探索が収束していることがわかる．20回目の世代における上位10%の遺伝子の  $N$ の値を効率の良い構成要素数として採用すると構成要素数の範囲は  $N=11\sim 28$ となる．この構成要素数は，図6の目標物移動数  $s(Obj)$ において高いレベルを示す構成要素数と一致しており，妥当な結果であることがわかる．

#### 3.4.2 構成要素数と情報伝達距離の探索

同様にして，構成要素数  $N$ と情報伝達できる距離を遺伝的アルゴリズムを利用して探索した場合の平均適合度のオンラインパフォーマンスの様子を図18に示す．図18より，自律主体システムのパラメータ探索が収束していることがわかる．20回目の世代における上位10%の遺伝子の  $N$ の値を効率の良い構成要素数として採用すると構成要素数の範囲は  $N=26\sim 37$ ，情報伝達できる距離は4から5となる．この構成要素数と情報伝達できる距離は，図13の目標物移動数  $s(Obj)$ において高いレベルを示す構成要素数，情報伝達距離と一致することから本研究のシミュレーションの結果は妥当であるといえる．上記の結果から，情報伝達によって起こる相互作用によって自律主体システムの自己組織化が達成されているという判断は妥当であることが検証された．

## 4 結論

本論文は，多数の自律主体によって構成

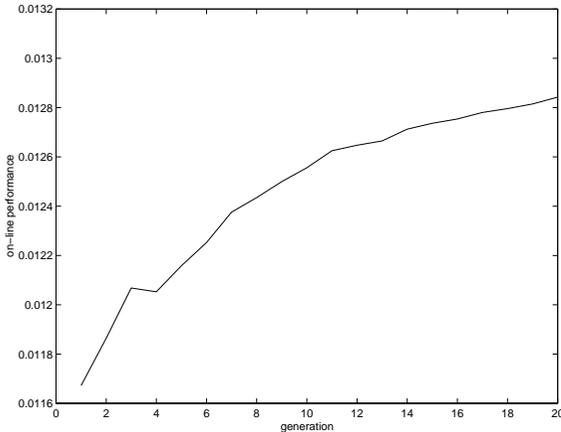


図 17 遺伝的アルゴリズムのオンラインパフォーマンス (直接接触の場合の  $N$  を探索)

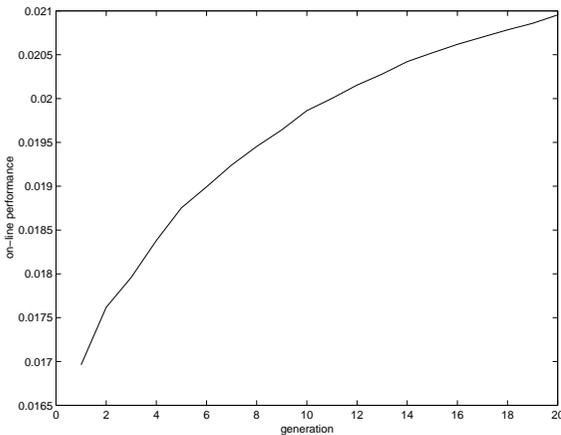


図 18 遺伝的アルゴリズムのオンラインパフォーマンス ( $N$  と情報伝達できる距離を探索)

される自律主体システムにおける自己組織化の現象と情報伝達の関係について考察した。簡単な行動規則 (if-thenルール) を持つ多数の自律主体が相互作用しながら行動する自律主体システムにおいて自己組織化の現象が生じていることを示した。従来の研究では非線形モデルの動特性が示すカオス的アトラクタの形成過程から把握される自己組織化を考察したのに対して、本論文の自律主体システムでは、相互作用を含む行動規則に従った個々の自律主体の行動の結果としてのシステム全体の秩序形成の過程を自己組織化として考察した。さらに、直接接触によるものから自分の近くにいる構成要素に情報伝達できるように変化させその相互作用の違いを比較することによって、自己組織化のレベルが変化することを明らかにした。結果として、自律主体システムにおける自己組織化やカオス特性が、相互作用による情報伝達の特性によるものであることを明らかにした。また、遺伝的アルゴリズムを利用して効率の良い自律主体システムの構成要素数を探索することにより、本研究の自律主体システムの自己組織化が達成されていることを検証した。

#### 参考文献

- [ 1 ] M. Imai, S. Shimizu, T. Nishikawa: Self-organization of Non-linear Model, The 14th International Conference on Production Research, vol. 2, pp. 1398-1401 (1997).
- [ 2 ] 今井正文, 清水静江, 西川智登: 「自己組織化モデルにおけるカオスに関する研究」, 日本経営システム学会誌, pp 15-20, Vol. 13, No. 1, (1996)
- [ 3 ] 今井正文, 清水静江, 西川智登: 「自己組織化モデルにおける非線形現象について」, 日本ファジィ学会誌, pp 127-132, vol. 8, No. 4, (1996)
- [ 4 ] H. Ulrich and G.J.B. Probst 著 徳安彰訳: 「自己組織化とマネジメント」, 東海大学出版局, pp. 61-117, pp. 159-183 (1992)
- [ 5 ] 長島弘幸, 馬場良和: 「カオス入門」, 培風館, pp. 85-88, pp. 105-108 (1992)
- [ 6 ] I. Shimada and T. Nagashima: A numerical approach to ergodic problem of dissipative dynamical systems, Progr. Theor. Phys., vol. 61, No. 6, pp. 1605-1616 (1979).
- [ 7 ] 北野宏明: 「遺伝的アルゴリズム 1」, 産業図書, (1994)