動的再構成可能ロボットシステムに関する研究*

(第10報, CEBOTの群構造に対するネットワーク・エネルギー評価 を用いた組織の分散制御構造化)

植山 剛^{*1}, 福田 敏男^{*2}, 新井 史人^{*2}
加藤 雄平^{*3}, 松村 司朗^{*3}, 上杉 武弘^{*3}

A Study on Dynamically Reconfigurable Robotic Systems (10th Report, Distributed Control Structure for Organization using an Evaluation of Network Energy for Group Structure of CEBOT)

Tsuyoshi UYAMA, Toshio FUKUDA, Fumihito ARAI,
Yuuhei KATOU, Shirou MATSUMURA and Takehiro UESUGI

Control architecture is an important problem for the distributed intelligent system. We describe on the evaluation of grouping with plural master cells for a cellular robotic system (CEBOT) as one of the group robotic systems. For the evaluation of the grouping, we use network energy as the estimation function, which we have proposed in a previous paper. By describing the grouping of the network with plural master cells as cores in a subnetwork, we represent the effect for the group structure of the organization or the society. Then for the estimation of the grouping of the network, which is organized by autonomous robotic units called "cells," we propose the cross-dependence matrix in the cells. The matrix is led from the "task matrix," which represents the relations between the cells and executing task steps. Finally, we show the simulation results for the example of the organized network by the cellular robotic system. This paper also describes mathematically the efficiency of grouping of the organization or the society.

Key Words: Robotics, Distributed Intelligent System, Cellular Robotic System, Grouping, Cell, Organization, Network Energy, Cross-dependence Matrix

1. はじめに

近年ロボットの能力が高まるに従い、より一層広範囲の領域で、応用が期待されるようになってきている。従来からのロボット単体を高機能化する研究開発に加え、群れをなすロボット(群ロボットシステム)の研究がなされてきている⁽¹⁾⁽²⁾。これは分散形ロボットシステムとして、一定の能力を備えた個々のロボットが群れをなして作業を行うものである。このようなロボットシステムでは、ロボット間で協調を行い作業を実行するため、従来の個々のロボットが備えた能力以上の作業能力を示すことが可能である。著者は、このような個々のロボット間の協調による分散形ロボットシステムの考えをさらに進め、個々のロボットシステムの形態や構成を動的に変化可能なロボットシステムを Cellular Robotic System (CEBOT) と称し提案してきた。

Cellular Robotic System (CEBOT) とは、ロボッ

トシステムの構成に対し生物の構成をモデルとし、各機能単位に分割された自律的なユニットにより構成されるロボットシステムである。このロボットシステムでは、ロボットを各機能単位のユニット(以下セルと称す)によって構成するため、作業内容や環境に合わせた形態をとることが可能となる。また、作業内容などが断定し難い場合においては、各セル間による通信により認識された状態に合わせ形態を構成することが可能である。さらに、システムが複数のセル群によって構成されるため対故障性を備え、フォールトトレランス性に優れたシステムである。このように、CEBOTは、知能ロボット群によって構成される、作業やシステムの状態に合わせた形態の動的再構成が可能なロボットシステムである。概念図を図1に示す。

上記の概念を実現するため、セル構造化ロボットのプロトタイプを試作し、自動接近・結合・分離実験を行ってきた⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁹⁾。また、自己組織型ロボットシステムの一形態であるセル構造化エンドエフェクタの研究も行っている⁽⁸⁾。動的にロボットシステムの構成が可変である CEBOT の形態決定法や⁽⁵⁾⁽¹⁰⁾、知能ロボットユニットであるセル間での知識最適配分方法に関する研究を行ってきた⁽⁷⁾。さらに、CEBOT のネットワーク内にマスタとなるセル(マスタ・セル)を想定し、マス

* 原稿受付 平成3年8月26日。

^{*1} 正員, 日本電装(株)(〒446 安城市高棚町新道1)。

^{*2} 正員, 名古屋大学工学部(〒464-01 名古屋市千種区不老町1)。

^{*3} 中部電力(株)電力技術研究所(〒459 名古屋市緑区大高町字北関山20-1)。

タ・セルの評価にネットワーク・エネルギーを提案し、マスタ・セルが一つの時とマスタ・セル間で通信を必要とするマスタ・セルが二つの時に対し評価を行ってきた⁽¹²⁾⁽¹³⁾。

CEBOT は非常に数多くのセルより構成される群ロボットシステムであり、この群ロボットシステムをどの程度の規模にし、どのように配置するかが重要な問題である。このような、「群れ」に関する研究としては、生物学で、個体群生態学の領域において各種の個体群の生態密度に関し解析が行われている。特に、魚群や捕食関係を用いたモデルによる群の構成に関する研究も行われてきている^{(14)~(16)}。しかし、一般にシステムの分割により生じるシステムの効率の変化について、工学的な側面より論じられたものは見当たらない。

本論文では、セルにより構成される群の規模およびその配置について考察を行うため、セルによって構成されたネットワーク内に複数のマスタ・セルを存在させることにより、ネットワークを各マスタ・セルを核とし分割することによる影響について述べる。この影響の評価には、マスタ・セルの数およびその配置と各マスタ・セルによって構成されるサブ・ネットワークに対し、前報によって提案したネットワーク・エネルギーを用いて行う⁽¹²⁾。このようにセル構造化ロボットにより構成されたネットワークの分割の評価をモデルとし、組織の分割制御構造の決定に対する一評価方法を与えるものである。上述の評価に対し、ネットワー

ク内でのマスタ・セルの配置、および各マスタ・セルによって構成されるサブネットワークの領域と複数のマスタ・セル間での通信の必要性に関し考慮を行う。このマスタ・セル間での通信の評価基準として、各セル間の相互依存度を定義し、その依存度の影響を考慮した、複数のマスタ・セルの決定方法について述べる。

2. 群構造とマスタ・セルの最適配置問題

本論文では、自律能力を備えたセルにより構成された CEBOT のシステムを、複数のサブシステムに分割された群構造とした時の評価について述べる。このような、システムの構造に関しその規模や構造についての研究は、例えば社会学の組織論において社会構造に関する研究がなされてきている⁽¹⁷⁾。しかし、群構造の分割に関する数学的解析を行ったものは見当たらない。したがって本論文では、このような問題に対し、CEBOT のセルによって構成されたネットワーク内に複数のマスタ・セルを存在させ、マスタ・セルを核としてネットワークを分割し、システムを複数のサブ・ネットワークにより構成された群構造として捉え評価を行う (図 2)。

著者らは、CEBOT におけるマスタ・セルを提案し、ネットワーク内にマスタ・セルが 1 個および 2 個存在する時の、各マスタ・セルの決定の評価方法について述べてきた⁽¹²⁾⁽¹³⁾。ここで、マスタ・セルとは、ネットワーク内におけるコーディネータ的存在とし、各セルに対し情報を送受信するものとする。ここで、情報に次の 3 レベルを考える。第 1 レベルとして、セル単体を制御するためのセンサ情報レベル、次に第 2 レベルとして、コマンドレベルの情報レベルを考える。第 3 レベルの情報は、タスクの目的自体の情報であり、この情報と内部の知識を用いることによりタスク・プランニングを行うものとする。このような情報のレベルは、各セルの持つ知識により異なってくる⁽⁷⁾。ここでは、マスタ・セルとセル間での情報は、第 2 レベルのものを考える。自律分散形ロボットシステムである CEBOT では、各セルがマスタ・セルとなり得る能力を持つことが可能である。したがって、ネットワーク内に複数のマスタ・セルが存在する「マルチトップ構造の通信アーキテクチャ」を考えることができる。

この場合、タスクや環境によってネットワーク内に存在するマスタ・セルの個数および配置に対し最適な値が存在するものと考えられる。本論文における評価基準には、マスタ・セルを決定するために提案したネットワーク・エネルギーを用いる。この評価基準を用いて、各マスタ・セル間の通信量およびその配置に対

図 1 CEBOT の概念図

図 2 CEBOT の群構造の概念図

し評価を行うことが可能である。マスタ・セル間で通信が必要とされるのは、サブ・ネットワークごとのタスクの実行において他のサブ・ネットワークとの協調・同期の必要性のためである。各マスタ・セル間での通信の影響を考慮するため、各マスタ・セル間の通信確率を導入する。各マスタ・セル間の通信確率は、各セル間の相互依存度によって影響されるものと考えられる。したがって、次章以降でネットワーク・エネルギーの定義を述べた後、各セル間の相互依存度の評価方法について示す。

3. ネットワーク・エネルギーの定義

3.1 サブ・ネットワークの構成 ネットワーク・エネルギーの定義を述べる前に、基準となるネットワークの構成について述べる。システムの系としては、セルが2進木構造のネットワークによって構成された形態を想定し、閉ループを含まないものと仮定する。この仮定は、通信経路を一意に決定可能となるように簡略化するためである。このネットワーク内に複数のマスタ・セルが存在することにより各マスタ・セルを核としてネットワークがサブネットワークに分割されるものと仮定する。ネットワークの分割は幾何学的構造に基づき、各セルは必ず一つのマスタ・セルにのみ従属するものと仮定をする。分割例を図3に示す。

3.2 情報の推移確率行列の定義 セルによって構成されたネットワーク内において、各セルがタスクの実行を目的とし各セルが確率的に動作する場合を想定する。タスクを実行するためにセル*i*が活動する確率を p_{ai} とする。ただし、

$$\sum_{i=1}^n p_{ai} = 1 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 n はネットワークを構成するセルの総数とする。ここで、簡略化のため各セルの活動の確率 p_{ai} と各セルの情報の生起確率とが等しいものと仮定をする。第1段階として、第*r*サブ・ネットワークにおけ

る、従属セルを考慮した各セルの情報の生起確率 ${}^{mr}p^*i$ の定義式を式(2)に示す。ここで、従属セルとはあるセルに対しそのマスタ・セルから見てより遠方となるセルである。

$${}^{mr}p^*i = p_{ai} + \sum_{j \in s} p_{aj} \quad \dots\dots\dots (2)$$

s は、セル*i*の従属セルの集合であり、 m はマスタ・セルの番号を示す。

次にサブ・ネットワークに対する情報の推移確率行列 ${}^{mr}P$ の定義式(3)に示す。

$${}^{mr}P = [p_{ij}] \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、

$$p_{ij} = p_{ai}^* / \sum_{j=1}^{r_k} p_{aj}^* \quad (1 \leq i, j \leq r_k)$$

$$p_{r_k+1, r_k+1} = 0$$

$$p_{r_k+1, i} = p_{pi}, r_k+1 / \sum_{i=1}^{r_k} p_{pi}, r_k+1$$

r_k は第*r*サブ・ネットワークに含まれるセルの総数であり、 i, j はセルの番号を示す。 $P_a^* = [p_{ai}^*]$ は、核となるマスタ・セルから、より離れたセルの情報の生起確率 ${}^{mr}p_{ah}$ ($h=1, 2, \dots, r_k$)を、各セル間の結合に対応させて構成されるマトリックスである。ただし、マスタ・セルに対応する対角成分に対しては、マスタ・セルの従属セルを考慮した情報の生起確率を対応させる。

3.3 ネットワーク・エネルギーの定義 ネットワーク内の各セルの通信確率に基づくネットワーク・エネルギー E_{netr} の定義を、式(4)に示す⁽¹²⁾⁽¹³⁾。これは、従来、著者らが提案したものの拡張となっている。セル間での情報の推移確率として、行列 ${}^{mr}\bar{P}$ を用い、隣接セルの情報の推移を考慮した各セルの情報の生起確率として、確率行列 ${}^{mr}P$ の定常分布ベクトルの正規化ベクトルを用いる。 r は、サブネットワークの番号を示す。ここで、ネットワークのエネルギーは、確率的に動作するセルのネットワーク内の通信量評価を示しており、評価関数の値が小さいほど効率のよいネットワークを構成していることとなる。

$$E_{netr} = \beta \left\{ \frac{1}{2} \bar{w}_{mr} {}^{mr}\bar{P} \bar{w}_{mr} - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{r_k} p_{ii} \bar{w}_{ri}^2 \right\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、行列 ${}^{mr}\bar{P}$ は、各セル間の情報の推移確率行列 ${}^{mr}P((r_k+1) \times (r_k+1)$ 行列)の第1行第1列目から第 r_k 行第 r_k 列目までの $r_k \times r_k$ 成分行列である。 r_k は、第*r*サブネットワークに含まれるセルの数を示している。また、ベクトル $\bar{w}_{mr}$ は、行列 ${}^{mr}P$ の定常分布確率ベクトル w_{mr} の第1要素から第 r_k 要素までの r_k 成分ベクトルを、核となるマスタ・セルの情報の生起確率 ${}^{mr}p^*m$ によって正規化したベクトルである。添字

図3 サブ・ネットワークの構成例

T は転置を示す。第2項は、セル間での通信のみを考慮するために対角成分を差し引く。係数 β は、サブ・ネットワークの規模を考慮するためであり、次により定義する。

$$\beta = \frac{\text{サブ・ネットワークを構成するセルの数}}{\text{ネットワークを構成するセルの総数}}$$

以下に、定常分布確率ベクトル $w_{mr} = [w_{ri}]$ の定義式を示す。

$$\lim_{n \rightarrow \infty} {}^{mr}P^n = [w_{mr} w_{mr} \cdots w_{mr}]^T \cdots \cdots (5)$$

ここで、ネットワークの構成を非活動セルを含まないようにすることにより行列 ${}^{mr}P$ は、再帰的正なマルコフチェーンを構成する推移確率行列であり、唯一次式を満たす定常分布確率ベクトル w_{mr} が存在する⁽¹⁸⁾。

$$w_{mr} {}^{mr}P = w_{mr} \cdots \cdots (6)$$

以下にベクトル $\bar{w}_{mr} = [\bar{w}_{ri}]$ の定義式を以下に示す。

$$\bar{w}_{ri} = {}^{mr}p^* m \times w_{ri} / \sum_{i=1}^n w_{ri} \cdots \cdots (7)$$

4. セル間の相互依存関係

分散形ロボットシステムでは、与えられたタスクを実行するために、各セルが協調・分散して実行を行うシステムである。したがって、実行するタスクによって各セルの行動が異なり、各セル間での協調の割合はタスクに依存するものと考えられる。本論文では、この協調の割合、つまり各セル間の相互依存の割合を与える方法を示す。

4.1 タスク・マトリックスの定義⁽¹¹⁾ 各セル間の相互依存度の導出に際し、タスク・マトリックスを定義する。タスク・マトリックスは、セル構造化ロボットシステムの構成と、タスクの特徴との関係を用いることにより定義づけられる。タスクと CEBOT との関係を図4に示す。各セルの活動は、与えられたタスク・マトリックスの状態の割合に比例し活動するものとする。式(8)にタスク・マトリックス T の定義を示す。

$$T = [t_{ij}] = \begin{cases} 1: \text{Active} \\ 0: \text{otherwise} \end{cases} \cdots \cdots (8)$$

ここで、 i はセルの番号、 j はタスクのステップを示す。タスク・マトリックスを用いて、各セル間の相互関係(縦の関係)と、各タスク・モジュール間の相互関係(横の関係)を評価し、マスタ・セル間の通信確率を導出する。ここで、タスクモジュールとは、タスク・マトリックスの各ステップごとに実行されるタスクの単位を称するものとする。タスク・マトリックスの例を式(9)に示す。式(9)の例では、ステップ1においてセル①、②、③が活動することが示されている。

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \cdots \cdots (9)$$

4.2 縦の関係 タスク・マトリックスを基準とした、セル間の相互関係によるセル間相互依存行列の定義を式(9)に示す。

$$Cr = \frac{\omega_0}{ts} (T \quad T^T) \cdots \cdots (10)$$

ここで、 Cr はセル間相互依存行列であり、各セル間の相互依存度を示すものである。また、 ts はタスクのステップ数、 T は転置を示し、 ω_0 はセル間相互依存に対する重み係数を示す。

4.3 横の関係 次にタスク・モジュール間での相互関係に基づいた、セル間相互依存行列を定義する。この定義には、縦の関係に対し時間的要素を取り入れることにより評価可能である。式(11)に定義式を示すように、 $t1$ ステップ離れた各タスク・モジュール間での相互関係を評価するものとする。式(11)において $t1 = 0$ の時、式(10)と等価である。

$$Cr^{(t1)} = \frac{1}{ts - t1} \{T \quad (T \quad L^{(t1)})^T\} \cdots \cdots (11 \cdot a)$$

$$Cr = \sum_{i=0}^{t1} \omega_i Cr^{(i)} \\ = \sum_{i=0}^{t1} \frac{\omega_i}{ts - i} \{T \quad (T \quad L^{(i)})^T\} \cdots \cdots (11 \cdot b)$$

ここで、 $t1$ は進み時間を示し、 $Cr^{(t1)}$ は $t1$ ステップ後のセル間の相互依存行列を示す。 ω_i は、 i ステップ離れた時の、各セル間の相互依存度の重み係数を示す。以下、 ω_i を重みベクトル $\omega = [\omega_i] (i=0, 1, \cdots, n-1)$ として表記する。また、 $L^{(t1)}$ はタスク・マトリックスのステップ $t1$ の進み因子であり次式に示す。

図4 タスクと CEBOT との関係

$$L^{(1)} = [1 \quad xy] = \begin{cases} 1: x=y+t1 & \dots\dots\dots (12) \\ 0: \text{otherwise} \end{cases}$$

ただし, $1 \leq x, y \leq ts$ である. $ts=5, t1=2$ の時の例を式(13)に示す.

$$L^{(2)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (13)$$

5. マスタ・セル間の通信確率の評価

5.1 マスタ・セル間の通信形態 各マスタ・セル間での通信形態として, 直接通信を行う場合と隣接マスタ・セル間で通信を伝播させ通信を行う方法が考えられる. 本論文では, 各マスタ・セル間の通信形態は, ネットワークの幾何学的形状に基づいた通信経路を構成するものと仮定する. この場合にも, 上述の2形態の通信経路が構成可能であるが, 隣接マスタ・セル間でのみ直接通信可能と仮定をする. したがって, 他のサブ・ネットワークを通過する場合, 情報はマスタ・セルから他のマスタ・セルへと推移していくものと仮定する. この仮定は, 分散形ロボットシステムにおいて, 各サブ・ネットワークのマスタ・セルが, その近傍の領域に関する情報により通信路の決定を可能とするものである. 通信経路の模式図を図5に示す.

5.2 マスタ・セル間の通信確率 マスタ・セル間の通信確率を各セル間の相互依存行列 Cr を基にして, 各セルの情報の生起確率 (self-information flow probabilities) $p_{ai} (i=1, \dots, n)$ を用いて導出を行う. 隣接し合ったマスタ・セル間に起因する, マスタ・セル a からマスタ・セル b へのマスタ・セル間の通信確率 $p_{mc}^*(a, b)$ を次式により定義する.

$$p_{mc}^*(a, b) = \sum_{i \in \text{subnet}_a} (p_{ai} \cdot \bar{C}rib) \dots\dots\dots (14)$$

ここで, $Crib$ はサブ・ネットワーク a に含まれるセル

i とサブ・ネットワーク b 間での平均セル間相互依存度であり式(15)により示される.

$$\bar{C}rib = \frac{\sum_{j \in \text{subnet}_b} Crij}{ns_b} = \frac{\sum_{j=1}^{ns} Crij}{ns_b} \dots\dots\dots (15)$$

ns_b はサブ・ネットワーク b に含まれるセルの総数である.

マスタ・セル間の通信形態を上述の仮定を行うため, マスタ・セル間の通信確率は, 幾何学的条件により他のマスタ・セル間の通信で使用する通信確率を, 考慮する必要がある (図6). よって, ネットワークの構造によって隣接するマスタ・セル a からマスタ・セル b への平均通信確率 $p_{mc}(a, b)$ は,

$$p_{mc}(a, b) = \frac{1}{\gamma} \sum_{i \in \text{set}_A} \sum_{j \in \text{set}_B} p_{mc}^*(i, j) \dots\dots\dots (16)$$

となる. ここで, マスタ・セル a, b は隣接するマスタ・セルの組とする. また, 集合 A は, マスタ・セル a とマスタ・セル a を経由して, マスタ・セル b 側へ通信を行う必要性のあるマスタ・セル i の集合である. 集合 B は, マスタ・セル b とマスタ・セル b を経由して, マスタ・セル a 側へ通信を行う必要性のあるマスタ・セル j の集合である. γ は, 集合 B に含まれるマスタ・セルの数である.

5.3 マスタ・セル間の通信確率の評価 各マスタ・セル間の通信確率を用いて, 上述のネットワークエネルギーと同様に, 各マスタ・セル間に対するエネルギー関数を定義し, マスタ・セル間の通信確率を評価する. 最初に, 上述のセル間の情報の推移確率行列の導出と同様に, 隣接するマスタ・セル間で構成される通信ネットワークに対する情報の推移確率行列 Pc を導出する (図7参照). 隣接するマスタ・セル a, b 間の通信確率 $p_{mc}(a, b)$ を用いて, 定義式を以下に示す.

$$Pc = [pcij]$$

$$pcij = p_{mc}(a, b): i=j+1 \quad (1 \leq i, j \leq k)$$

$$pcij = p_{mc}(b, a): i=j-1 \quad (1 \leq i, j \leq k)$$

図5 マスタ・セル間の通信経路模式図

図6 マスタ・セル間の通信模式図

$$\begin{aligned}
 p_{ci, k+1} &= 1 - \sum_{j=1}^k p_{cij} : (j=k+1) \\
 p_{ck+1, j} &= p_{ci, k+1} \times (p_{mc}(a, b) \\
 &\quad + p_{mc}(b, a)) / \sum_{i=1}^k p_{ci, k+1} : (i=k+1) \\
 p_{ck+1, k+1} &= 1 - (p_{mc}(a, b) + p_{mc}(b, a)) \\
 &\quad \dots\dots\dots (17)
 \end{aligned}$$

ここで、 k はマスタ・セル a, b を含み、マスタ・セル間 a, b の通信のために用いられるセルの個数を示す。次に、マスタ・セル間によるエネルギー関数 $Ec(a, b)$ の定義式を式(18)に示す。

$$Ec(a, b) = \lambda \left\{ \frac{1}{2} \bar{w}c^T \bar{P}c \bar{w}c - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k p_{ci} \bar{w}c^2 \right\} \dots\dots\dots (18)$$

ここで、行列 $\bar{P}c$ は行列 Pc の第 1 行 1 列めから第 k 行 k 列めまでの $(k \times k)$ 行列である。また、ベクトル $\bar{w}c$ は、推移確率行列 Pc の定常分布ベクトル wc をマスタ・セル間の通信確率を用いて正規化したものであり、次式により示される。

$$\bar{w}ci = wci \times (p_{mc}(a, b) + p_{mc}(b, a)) / \sum_{i=1}^k wci \dots\dots\dots (19)$$

λ は、マスタ・セル間の通信によるネットワークの規模を考慮するための係数であり、次式により定義される。

$$\lambda = \frac{\text{マスタ・セル間通信のための小ネットワークに含まれるセルの数}}{\text{ネットワークを構成するセルの総数}}$$

6. マスタ・セルの探索方法

マスタ・セルの決定基準として本論文では、各サブ・ネットワークのネットワーク・エネルギーと各マスタ・セル間でのコミュニケーションによるエネルギー $Ec(i, j)$ との和 [式(20)] を用いて、最も最小値をとる時のマスタ・セルの数およびネットワークの分割状態を用いるものとする。

$$E = \sum_{r=1}^{ns} E_{net\ r} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{ns-1} \sum_{j=1}^{ns-1} Ec(i, j) \dots\dots\dots (20)$$

ここで、 ns はネットワーク内に存在するマスタ・セルの総数である。

また、マスタ・セルを探索するために用いる感度として、セル i, j 間での局所エネルギー $dEij^{(10)}$ を次式により定義をする。

$$dEij = w_m^T P_{ij} w_m$$

$$= (w_1 \dots w_n) \begin{bmatrix} & i & j \\ & \cdot & \cdot \\ i) & \cdot & \cdot & \cdot & p_{ij} \\ & \cdot & & & \\ & \cdot & & & \\ j) & \cdot & \cdot & p_{ji} \\ & & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ w_n \end{bmatrix} = w_i^2 p_{ii} + w_j^2 p_{jj} \dots\dots\dots (21)$$

ここで、行列 $P_{ij} = [p_{ij}]$ は、ネットワーク内にマスタ・セルが 1 個の時、第 m セルをマスタ・セルとした時の情報の推移確率行列のうち、第 j 行 i 列および第 i 行 j 列の要素のみによる行列である。ベクトル $w_m = [w_i]$ は、この時の情報の推移確率行列の定常分布確率ベクトルのうち、第 1 要素から第 n 要素のみによるベクトルである。

次に探索方法のフローチャートを図 8 に示す。本論文では、ネットワーク内に存在するマスタ・セルの数を与え、その状態において式(20)で示されるネットワーク・エネルギーを最小にするマスタ・セルの配置およびセルの分割を探索するものとした。

探索方法としては、最初にネットワーク内にマス

図 7 マスタ・セル間の通信ネットワーク

図 8 マスタ・セル探索のフローチャート

タ・セルが1個の時の最適なマスタ・セルの探索を行い、そのマスタ・セルに対し局所エネルギー感度を用いて、ネットワークの各枝の感度を計算する。第2ステップとして、与えられたマスタ・セルの数 k だけマスタ・セルの初期配置を、第1マスタ・セルを核として局所エネルギーの高い枝に接続するセルを順にマスタ・セルとする。第3ステップとして、第 k 番めのマスタ・セルから順に、局所エネルギー dE_{ij} を用いてエネルギー E を評価しつつ移動させていく。この時評価エネルギー E の値は、移動を行っているマスタ・セルのとり得る領域に対し計算を行ったエネルギー E のうち最小のものをを用いる。また、移動を行うことによりエネルギー E が、増加するときには状態を戻し、移動を行ったマスタ・セルの位置およびエネルギー E を最小とした時の領域を固定する。この時、初期状態におけるマスタ・セルの配置は、すべて隣接するため各マスタ・セルがとり得る領域は一意に定まる。

ただし、最急降下法による探索のため、本方法においては、必ずしもエネルギー E が最小値をとる状態に収束するとは限らない。

7. シミュレーション結果

以下に、セル間の相互依存度の変化に対し、評価エネルギー値をネットワーク内に複数マスタ・セル (#1

～15) が存在するときの評価エネルギー値のシミュレーション結果を示す。この時、各マスタ・セルの個数に対し、上述の探索方法により最小となった評価エネルギー値を用いている。

7.1 セル間相互依存度が低い時 式(9)の例のタスク・マトリックスに対し、セル間相互依存度に対する重みを

$$\omega = (1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$$

とした時のシミュレーション結果を図9に示す。この時の探索開始セルは、セル#2である。図中横軸に、ネットワーク内に存在するマスタ・セルの数を示し、縦軸にネットワーク・エネルギーの評価値を示す。

7.2 セル間相互依存度が局所的な時 式(22)に示されるタスク・マトリックスを用いて、セル間相互依存度に対する重みを

$$\omega = (3, 0, 0)$$

とし、同一ステップにおいて実行されるセル間での相互関係を重視した時の、シミュレーション結果を図10に示す。この時の探索開始セルはセル#2であり、シミュレーション結果より、ネットワーク内にマスタ・セルが5個存在する時最も評価エネルギー値が小さくなり、ネットワークの分割が最適に行われたものと思われる。この時の、エネルギー評価値は $E=0.0014$ であり、同様のモデルにおいてマスタ・セルが1個の時 $E=0.0067$ であり、マスタ・セルが14個の時最大となり $E=0.0079$ である。またマスタ・セルが5個の時のネ

図9 シミュレーション結果

図11 ネットワークの分割状態

図10 シミュレーション結果

図12 シミュレーション結果

ネットワークの分割状態を図11に示す。

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^T \quad \dots\dots\dots(22)$$

7・3 セル間相互依存度が密接な時 式(23)に示されるタスク・マトリックスを用いて、セル間相互依存度に対する重みを

$$\omega_0 = 1$$

とし、同一ステップにおいて実行されるセル間での相互関係を重視した時の、シミュレーション結果を図12に示す。この時の探索開始セルは、セル#1である。

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots(23)$$

以上の結果より与えられたタスクモデルおよび、セル間の相互依存度によって、情報の生起確率に基づきネットワークの最適な状態が異なることを示した。この結果より、セル間で依存関係が高い時には、その集団を統括するようにグループ分けを行うほうが、情報量を基準にした場合において効率が良いことが示された。このことは、社会集団において、共通のタスクや利益を目的とする個が集まることにより、より効率的に目的を達成可能となることと等価と思われる。

8. お わ り に

本論文では、CEBOTの群構造に対し、複数のマスタ・セルを核としたネットワークの分割に対する評価を行った。評価を行うに当たり、群ロボットシステムにおいてロボット間での相互関係の一評価方法を提案し、この相互関係を考慮したマスタ・セルの数と各マスタ・セルに対するセルの分割の評価を行った。シミュレーションにより、ネットワーク内に存在するマスタ・セル数およびセルの領域分けと、評価エネルギー値との関係を示した。

以上の評価により、セル構造化ロボットをモデルとし、「群れ」より構成される組織の分散制御構造に対する一評価を行い、状態に合わせた最適構造が存在することを示した。

文 献

(1) Asama, H., Ozaki, K., ほか4名, Negotiation between

Multiple Mobile Robots and An Environment Manager, *International Conference Advanced Robotics (ICAR '91)*, (1991), 533-538.

- (2) Yuta, S. and Premvuti, S., Consideration on Cooperation of Multiple Autonomous Mobile Robots-Introduction to Modest Cooperation-, 文献(1)の545ページ.
- (3) 福田・中川, セル構造を有する自己組織化ロボット-その基礎概念とセル間の粗接近制御及び形態決定方法について-, 電気論, 107-11, C (1987), 1019-1026.
- (4) 福田・中川, 動的再構成可能ロボットシステムに関する研究(第1報, セル間の自動接近・結合・分離制御実験), 機論, 58-509, C (1989), 114-118.
- (5) 福田・中川, 動的再構成可能ロボットシステムに関する研究(第2報, セル構造化マニピュレータの最適形態化), 機論, 55-516, C (1989), 2099-2106.
- (6) 福田・川内・ほか2名, 動的再構成可能ロボットシステムに関する研究(第3報, セル構造化ロボット“CEBOT”の認識, 通信システム), 機論, 56-532, C (1990), 709-716.
- (7) 福田・川内・浅間, 動的再構成可能ロボットシステムに関する研究(第4報, 分散知能システムとしての Cellular Robotics(CEBOT)の通信量による解析と評価), 機論, 56-532, C (1990), 151-158.
- (8) 福田・小野・川内・ほか5名, 動的再構成可能ロボットシステムに関する研究(第5報, ロボットの自己組織化エンドエフェクタの概念とその機構と制御に関する研究), 機論, 57-536, C (1991), 228-235.
- (9) 福田・植山, 動的再構成可能ロボットシステムに関する研究(第21報, シリーズIIIによる自動接近・結合・分離実験), ロボティクス・メカトロニクス講演会'90講演論文集, (1990-6), 345-348.
- (10) 福田・植山・伊藤, 動的再構成可能ロボットシステムに関する研究(第23報, タクソプランニングシステムによるセルラーロボティクスの形態決定法)第29回計測自動制御学会講演論文集, (1990-7), 445-446.
- (11) 福田・川内・原, 動的再構成可能ロボットシステムに関する研究(第6報, 分散知能システムにおける知識の自己再配分の一方法), 機論, 57-536, C (1991), 236-243.
- (12) 福田・植山・ほか5名, 動的再構成可能ロボットシステムに関する研究(第7報, ネットワークのエネルギー評価方法に基づくマスタ・セル決定方法), 機論, 57-537, C (1991), 234-242.
- (13) 福田・植山・ほか2名, 動的再構成可能ロボットシステムに関する研究(第26報, セル間通信量に基づいた2トップ構造のマスタ・セル決定法)第8回日本ロボット学会学術講演論文集, (1990-11), 899-900.
- (14) Haken, H., (高木訳), 自然の造形と社会の秩序, (1985), 85-93, 東海大学出版会.
- (15) Hofbauer J. and Sigmund K., (竹内訳), 生物の進化と微分方程式, (1990), 34-82, 現代数学社.
- (16) 岩澤・藤田, 「素々原理」による自律分散システムの協調-食餌行動を例として-, 第1回自律分散システムシンポジウム資料, (1990-4), 47-52.
- (17) Perrow, C., (佐藤監訳), 現代組織論批判, (1978), 1-87, 早稲田大学出版部.
- (18) 小和田, 確率過程とその応用, (1983), 67-100, 実教出版.