ロボット群による段階的空間パターン形成に関する研究

池 本 有 助^{*1} 長谷川 泰 久^{*2} 福 田 敏 男^{*1} 松 田 一 彦^{*3}

Graduated Spatial Pattern Formation of Robot Group

Yusuke Ikemoto^{*1}, Yasuhisa Hasegawa^{*2}, Toshio Fukuda^{*1} and Kazuhiko Matsuda^{*3}

This paper proposes a gradual formation of a spatial pattern for a homogeneous system. The autonomous formation of spatial pattern is important for the advancement of cooperative robotic systems because pattern formation can be regarded as function differentiation of multi-agent system. When multiple autonomous robots cooperatively work on an assigned local task for a global objective like a group of insects or animals, the function differentiation is the first step and indispensable. There were a lot of papers that reported spatial pattern formation of multiple robots, but global information was supposed to be available in their approaches. It is, however, almost impossible for a small robot to be equipped with an advanced sensing system for global information because of robot's scale and sensor. The algorithm for complicated pattern formation is needed even if each robot is not so comparative. We therefore propose a gradual pattern formation algorithm, i.e., the group of robots changes their pattern to goal pattern through a simple pattern like a line or a circle. Then we use the Turing Instability theory based only on local information for polygon pattern formation from circle pattern, and experimentally show the formation of several patterns with multiple autonomous robots.

Key Words: Graduated Spatial Pattern Formation, Homogeneous System, Turing Instability, Function Differentiation, Experiment by Robots

1. 序 論

これまでの作業とロボットが一对一の関係から、近年ではロボットシステムの多機能冗長性を目指し、ロボット群による形態形成に関する研究開発がなされている。つまり、ロボット群がそれぞれの空間的配置を変え、その形態を変形させることにより、様々な与えられた作業や環境条件に対して、最適なハードウェア構成を構築することで対応することが目指されている。さらに形態形成をロボット群自身が行うことで、動的環境下においてもロボット設計者はハードウェア再構成を改めて行う必要がなく、また、ロボット内部のセンサ、アクチュエータの配置などの物理的構成を考慮せずに制御手法を設計することができ、次世代ロボットシステムの一つとして期待されている。このような自己組織的なロボットの先駆的な研究として、福田らは生物が細胞レベルから、組織、器官、人、社会へとそれぞれのレベル内およびレベル間において協調的に自己組織化したシ

ステムをモデル化した CEBOT (Cellular robotic system) といった概念を提案し、複数の非均質型ロボットによる形態形成に関する手法の提案および実機実験を行ってきた [1]。

一方、均質ロボット群は、交代による耐故障性や、製造や管理の面で経済性に長けている。しかし、作業内容や作業効率を考慮して、空間配置や役割分担をロボット群の内在的な交渉により行うメカニズムが必要であり、均質な状態から不均質な状態へ機能的に変化するタスクアロケーションの作業が不可欠となる。この均質型ロボット群の研究は、主にハードウェア設計に関する研究と空間パターン形成の制御手法に関する研究に分類でき、前者では、村田、吉田らによる合体変形ロボット M-TRAN を使用した例 [2] がある。これは、外界から独立して駆動し、形態形成を実機にて実現している。また、ほかには文献 [3]~[5] などがあるが、それらの制御手法は大域的観測者、またはリーダーとなるロボットが他のロボットを管理し、指令を送る集中制御手法をとっており、自律的な形態形成はなされていない。空間パターン形成の制御手法に関する研究として文献 [6]~[8] などがあるが、これらはロボットへの大域座標の付加、確実な通信機能などの個々のロボットに高度な機能を装備していることを前提としており、分散制御での実機実験を行うまでには至っていない。

二次元平面上での移動ロボットを想定した形態形成に関する

原稿受付 2003 年 6 月 30 日

^{*1}名古屋大学大学院工学研究科

^{*2}筑波大学機能工学系

^{*3}富士重工業 (株)

^{*1}Nagoya University

^{*2}University of Tsukuba

^{*3}Fuji Heavy Industries Ltd.

研究として、山下らによる整列問題 [9] [10] がある。整列問題は均質ロボット群による形成可能なパターンを数理的に論じ、シミュレーション実験を行っている。また、Yamaguchi ら [11] は、ノンホロノミックなロボット群によるパターン形成手法を提案し、シミュレーション実験を行っているが、両者とも、ロボット群の重心座標を与えるなどの共有情報を各ロボットが持つことが前提であり、ロボットに高度な機能を与えているが、マイクロロボット [13] のように物理的拘束条件が大きい場合には、そのような高度な機能の搭載は困難となり、ハードウェアへの実装が困難であると考えられる。

また、下村ら [12] は移動ロボットでパターン形成実験を行っているが、実験環境として格子状のフィールドを用いており、ロボットは格子状のラインをライトレースして移動する。しかし、一般的な作業空間では格子状のラインの存在は期待できず、また、ロボットの移動およびロボット間の相対位置補正をライトレースで実現すると、位置精度が問題となる。

そこで、本稿では、比較的低機能な均質ロボット群が段階的にパターンを生成するアルゴリズムを提案する。つまり、ロボット群が複雑な多角形を形成する過程で、比較的容易な図形を経由して複雑なパターンへと移行することで、ロボット間の相対位置補正を容易にする手法を用いる。経由するパターンは外部観測者が設定する。具体的には、ミドルレンジの障害物検知センサ、通信機能、2 個のアクチュエータを用いて二次元平面を移動する機構を有したロボットが、三角形、四角形、六角形などの多角形パターンを形成する。この際、最終パターンまでに経由するパターンを線、円とし、目標パターンへ移行する段階的なパターン形成の手法をとる。また、多角形パターンの頂点や辺を担当するロボットを決定するタスク割り当て問題に対し、細胞の機能分化モデルである Turing 形態形成理論を用い、そのパラメータの解析的設計手法や通信障害に対するロバスト性を考察する。最後に実機実験によって、その手法の有効性を確認する。

2. 段階的なパターン形成

複数の個体からなる群が複雑なパターンを形成するとき、群に属する各個体はそれほど複雑な動きをしているわけではなく、全体的なパターン構造には無関係に、自己の周囲の状況に応じた行動をとっている。この典型的な例として、昆虫の群れによって作られるパターンがある。例えば、スズメバチの巣の形成過程において新たなセル（蜂の巣の一部屋）が追加される場所は、そこがすでにいくつの壁に囲まれているかによって確率的に決められる。したがって、新たなセルを追加するためのルールは既存のセルの局所的な位置情報のみによって決まり、巣は局所的な相互作用のみで形成されているといえる。このような、局所的な情報のみを用いたルールでも、多様で複雑な巣の形成を説明することができる。つまり、初期状態が単純な形態であっても、局所的な相互作用を経て段階的にパターンが形成されていくことによって、最終的には複雑な形態を形成できる可能性があることを示している。

本稿のロボット群の多角形状パターン形成においても、局所的な相互作用によって、Fig. 1 に示す段階的なパターン形成の

Fig. 1 Graduated pattern formation

手法を用いる。具体的には、まず初めにランダムな空間的配置から一次元的な広がりを持った線パターンを形成し、次に二次元的な広がりを持つ最も単純な円パターンを経て、円中心から回転方向に頂点・辺・頂点・辺といった周期的な特徴を有する多角形パターンを形成する。ここで、パターン形成は外部観測者の視点からみて、確実に目標パターンを形成するアルゴリズムが必要である。多角形状のパターン形成には、多角形の頂点の位置に存在するロボットと多角形の辺の位置に存在するロボットの 2 種類へ周期的に機能分化する必要がある。それらを行う代表的な手法としてトークンリングを用いた手法が考えられるが、初期通信のトリガとなるロボットを選出する必要があり、また、通信エラーに対して安定的であるとはいえない。よって、本研究では円から多角形パターン形成を近傍ロボット間の局所通信を利用し、完全分散的に行える Turing の形態形成理論を用いた手法を提案する。

3. Turing 形態形成理論の実装

3.1 Turing 形態形成理論

Turing の形態形成理論は、生体の成長初期における細胞の機能分化を司る物質には、細胞分化を積極的に促進しようとする性質を持つ物質である活性因子と細胞分化を抑える性質を持った物質である抑制因子の 2 種類が含まれ、その反応と拡散によって説明できると述べている [14]。このモデルは、式 (1)、(2) からなる拡散反応方程式の組で表現される。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = f(u, v) + D_u \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = g(u, v) + D_v \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \quad (2)$$

ただし、 u, v は、それぞれ活性因子、抑制因子の値であり、 f, g は u, v を変数に持つ関数である。式 (1)、(2) の右辺第一項、第二項はそれぞれ、物質の反応、拡散を表している。ここで、活性因子、抑制因子の間に以下のような相互作用があるものと仮定する。

- (1) 活性因子は自己触媒的に増加する
 - (2) 抑制因子は活性因子の増加を抑える
 - (3) 活性因子は抑制因子を作る
 - (4) 各因子は細胞内で常に作られつづけているとする
- この仮定に基づく線形方程式は、式 (3)、(4) によって表される。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = au - bv + D_u \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = cu - dv + D_v \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \quad (4)$$

ここで、 a, b, c, d はそれぞれ反応項の正の係数、 D_u, D_v

Fig. 2 Turing Instability

は、拡散項の正の係数である。活性因子、抑制因子の空間的濃度勾配に適当な揺らぎが生じたとき、不均質な部分で活性因子、抑制因子の値が係数 a , c の割合で自己触媒的に増加する。同時に、抑制因子の値の増加により両因子の増加に係数 b , d の割合で抑制される。しかしながら、 $D_v > D_u$ という条件下では、抑制因子が活性因子よりも空間的拡散速度が速いため、その部分で活性因子の局在化が生じる。活性因子の局在化する位置は両因子の拡散係数によるため等間隔に起こり、周期的な波形パターンが生成される。式 (3), (4) において、パラメータを適切に設定することにより、Fig. 2 のような大域的な空間的濃度勾配を生成することができる。本稿では活性、抑制因子の空間的濃度勾配を利用し、三角形、四角形、六角形などの正多角形パターン形成を実現する。つまり、拡散反応方程式によって出現する空間的定常波の極大値を多角形パターンの頂点に割り当てる。線パターンを生成する段階で、ロボットの台数はカウントしており、希望の多角形生成可能な台数でパターン形成を行うが、仮にロボットの台数が、多角形の頂点数の倍数でなくても空間的濃度勾配は設計どおり生成されるので、勾配の極大値にいちばん近いロボットが自身の u の値が隣接するロボットの u の値より大きいことを検知し、極大値付近で唯一頂点に割り当てられる。ただし、ロボットの台数は、希望の多角形の頂点数の 2 倍以上であることが必要である。つまり、ロボットの台数が極端に少ない場合には、活性因子の勾配が生成されず目標の頂点数が実現できない。例えば、ロボット台数が 5 台以下で三角形を形成するとき、活性因子の勾配が生成されても、3 台のロボットに頂点が割り当てられず、希望の頂点数より少ない図形が生成される。また、ロボットの台数が希望の頂点数の倍数でない場合、正多角形のような空間的に均等な頂点は生成できないが、ある範囲の台数変化では設計どおりの多角形が生成可能である。台数と生成される頂点数との関係は、3.4 節にて考察および検証を行う。

3.2 パラメータ設定

Turing 形態形成理論は非線形ダイナミクスの一つで、様々な分野で解析的考察がされている [15]~[17]。式 (3), (4) における定常波数 k_c は式 (5) によって与えられる。

$$k_c = \left\{ \frac{-ad + bc}{D_u D_v} \right\}^{1/4} \quad (5)$$

具体的には、希望の定常波数 k_c を式 (5) によって与え、波形の安定条件を満たす係数 a , b , c , d , D_u , D_v の組を探索し、求める手順となる。

3.3 ロボットへの実装

Turing 形態形成理論をロボットに実装するためには、式 (3), (4) の空間変数 x をロボット単位で離散化しなくてはならない。そこで、 N 台のロボットが円状に並んだ場合、 i 番目のロボットの活性因子と抑制因子を u_i , v_i とすると、その変分は式 (6), (7) で与えられる。

$$\Delta u_i = au_i - bv_i + \frac{D_u}{N^2} \cdot (u_{i+1} - 2u_i + u_{i-1}) \quad (6)$$

$$\Delta v_i = cu_i - dv_i + \frac{D_v}{N^2} \cdot (v_{i+1} - 2v_i + v_{i-1}) \quad (7)$$

ここで、 $i = 1, 2, \dots, N$ であり、ロボットは円環上に配置しているので $u_0 = u_N$, $u_{N+1} = u_1$, $v_0 = v_N$, $v_{N+1} = v_1$ となる。

各ロボットは式 (6), (7) を用いて両隣のロボットの活性因子 u と抑制因子 v の値を利用して自己の活性因子 u と抑制因子 v の値を更新する。ここで、ロボット間のインタラクションは因子の拡散のみで記述されており、ロボット間で、通信、値の更新の同期を取る必要はない。ただし、おのおののロボットの因子の更新頻度は反応速度に直接かかわっているため更新頻度はロボット間で統一する必要がある。本稿では円パターン終了後、設定した回数の更新を繰り返した後、更新を終えたロボットから順に自身の機能分化へと移行する。隣のロボットの活性因子 u を比較し、極大となったロボットだけが頂点となり、他のロボットは辺となることで機能分化を行う。

3.4 パターンの安定性

Turing 形態形成理論によるパターン生成手法の通信障害に対するロバスト性、初期状態の非依存性およびロボットの台数と生成されるパターンの頂点数の関係について数値シミュレーションにより確認する。

24 台のロボットが円状に並び、パターン生成がほぼ完成した際に通信障害によって大きくパターンが乱されたときのロバスト性に関する実験結果を Fig. 3 に示す。縦軸、横軸はそれぞれ、ロボットの持つ活性因子 u の値、ロボットの番号を表している。つまり、横軸は、左端から 1 番目、2 番目、... となり、右端が 24 番目となる。両因子の更新作業中 (Fig. 3(a)) に、ロボット No.20 の通信が途絶えた状態を想定し、そのロボットの活性因子 u の値を 0 にリセットした際にも (Fig. 3(b)), 通信の回復後には設計したとおりに 3 個の頂点が保持されることが確認された (Fig. 3(d))。パターン生成過程において、これは通信エラーだけでなく内部パラメータ更新エラーや通信のタイミングに対してもロバストであることを表している。仮に、通信エラーが空間的、時間的に連続に起こり、復帰の見込みがない場合には希望のパターンを形成することが不可能であるが、通信が完全に途絶えない限り、パターンは安定状態へと収束する。具体的な例として、ロボット 12 台を用いて、通信エラーが 2 回に一度起こるという条件では、空間的に連続して 5 台のロボットが通信エラーを起こしてもパターン形成可能であることが確認された。

また、初期値に依存せず、必ず設計されたパターンが発生することを確認するために、各ロボットの活性因子 u の初期値を変え、それ以外は耐故障性の実験と同条件のもとで行った結果を Fig. 4, 5 に示す。図に示すように、初期状態がランダムな

Fig. 3 Robustness against a communication error

Fig. 4 Impependence on initial condition 1

Fig. 5 Impependence on initial condition 2

状態であっても、すべてのロボットの活性因子 u が 0 の場合を除いて、必ず設計した数の頂点が生成され、また、その頂点の位置は初期値によって変化することを確認した。

さらに、ロボットの台数と生成されるパターンの頂点数の関係を確認するために、22 台から 26 台へロボット台数を変化させたときのパターン生成結果をそれぞれ Fig. 6 に示す。初期状態は、耐故障性の実験と同条件を用い、台数のみを変化させた。図に示すように、いずれの場合も 3 個の頂点が生成され、前後数台の台数変化に関しては同じパターンが生成可能である。ロボットの台数と生成される頂点数との関係を同様のシミュレーションで確認した結果を、Fig. 7 に示す。図に示すように、希望の頂点数を生成するために必要なロボット台数には領域が存在していることが確認される。これは、式 (5) において、波数 k_c が u, v の拡散長の幾何平均に比例しているためである。つまり、希望の頂点数とそれに対応する台数をそれぞれ k_h, N_h とおき、 N_h から台数変化した台数 $\hat{N}_h$ の場合に生成される頂点数を $\hat{k}_h$ とおくと、台数 $N_h, \hat{N}_h$ におけるロボットに実装する拡散係数は、式 (6), (7) よりそれぞれ $D_u/N_h^2, D_v/N_h^2$ と、 $D_u/\hat{N}_h^2, D_v/\hat{N}_h^2$ で表され、これを式 (5) に代入すると台数と頂点数の関係が次式で表される。

$$\hat{k}_h = \frac{\hat{N}}{N} k_h \quad (8)$$

ロボットは円環状に配置しているので、定常状態では k_h は必ず整数となる。よって、多角形の一辺を形成するロボットの数と同じ数のロボットが加わったとき、一つ角の多い多角形が生成される。

Fig. 6 Generated patterns with various number of robots (a) $N = 22$, (b) $N = 23$, (c) $N = 25$, (d) $N = 26$

Fig. 7 Relationship between number of robot and number of angle

4. 実験環境および手順

4.1 実機仕様

本報では、富士重工業（株）技術研究所開発の小型自律移動ロボット（MK-01）を実験に用いる（Fig. 8）。この MK-01 は、直径 6 [cm]、高さ 8 [cm] CPU（H8/3048F）、16 個のミドルレンジ用障害物検知赤外線センサ、8 個の近距離用障害物検知赤外線センサ、二つのアクチュエータを搭載しており、自律的に走行可能である。赤外線センサレンジは約 20 [cm] であり 16 段階の距離分解能を持つ。また、無線 LAN 通信でロボット間の通信も可能である。線、円、多角形パターン形成時における、無線 LAN のメッセージ部の送受信データの仕様を Fig. 9 に示す。送受信データは 0 または 1 のデジタル信号から成り、三つのブ

Fig. 8 Autonomous mobile robot "MK-01"

Fig. 9 Protocol format

ロックに分けられる。左側から 1 番目のブロックは送受信データの型を表す。2 番目、3 番目のブロックは ID や、パラメータの値などのデータを表す。また、 x は、通信データとして利用せず 0、1 のどちらの値をとってもよい。

4.2 線パターン形成

線パターン形成は、Fig. 10 に示すように線パターンの後端にロボットが順次、加わるにより形成される。最初はロボット一台から始め、先頭のロボットはいずれのロボットが選ばれてもよく、2 台のロボットが出会ったときにランダムに決められてもよい。線パターン最後尾のロボットが赤外線 LED を発光し、線パターンに加わっていないロボットがセンサでそれを感じると最後尾ロボットを追従し、線パターンに加わる。線

Fig. 10 Line pattern formation

Fig. 11 Circle pattern formation

パターンに加わったロボットは加わったことを局所通信で線パターンを構成するロボットに伝え、先頭のロボットが線パターンを構成するロボットの数をカウントする。希望台数に達すると、円パターン形成へと移行する。この間、線パターン内部に存在するロボットは、その前方ロボットの赤外線 LED が発光する赤外線の強度が一定となるように追従し、線パターンを保持する。

4.3 円パターン形成

線パターン形成時に希望の台数がそろった円パターン形成に移行するが、このとき、先頭のロボットが、ランダムに動く動作からある曲率を持つ円弧を描く様に移動し始める。一方、線パターン中のロボットは線パターン形成時と同様に前方ロボットとの距離が一定なるように追従するのみでよく、各ロボットの行動を切り替える必要はない。円パターンは、先頭のロボットが曲率を徐々に増加させながら移動することによって、先頭ロボットがライン最後尾のロボットに到達することで形成される (Fig. 11)。形成される円パターンの半径は、ロボットの台数とロボットの間隔に依存するが、線パターン形成時にカウントしたロボットの台数に応じて適切に設定し、また、先頭ロボットの描く曲率を徐々に大きくすることで誤差に対応する。そして、先頭のロボットが最後尾のロボットを赤外線センサで検知したときに、円パターン形成を終了するための指令を局所通信によって両隣のロボットに伝え、そのロボットがさらに局所通信によって隣のロボットへ伝え、最終的にすべてのロボットに伝播する (Fig. 9(c))。指令を受信したロボットは進行方向に対して左に 90 度回転することによって円の中心方向に向く。円の中心方向に向いたロボットから、次の多角形パターン形成のための局所通信を開始する。

4.4 多角形パターン形成

多角形パターン形成は、3 章で述べた Turing 不安定性理論を用いる (Fig. 12)。円パターン形成後、おのおののロボットは、活性因子 u と抑制因子 v を隣同士のロボット間で局所通信を行う (Fig. 9(d))。各ロボットは両隣の因子の値を受信し、自分自身の因子の値を式 (6)、(7) で更新する。局所通信は個々の

Fig. 12 Polygon pattern formation

ロボットの判断で開始するが、送信した相手が通信準備中の場合でも、内部パラメータの更新則の式 (6)、(7) に基づき、相手のパラメータを 0 と仮定しパラメータの更新を行う。ロボット間の通信開始タイミングに多少のタイムラグがあったとしても濃度勾配の初期値に依存しないので、希望のパターンへと収束する。ここで、個々のロボットの内部パラメータの更新頻度を一定にしているため、ある時間における各ロボットの更新回数に大きな差がなく、また、更新回数をシミュレーション上で確認した必要更新回数よりも多い値に設定しておくことにより、円弧中のあるロボットが既定の更新回数を終えたときには、内部のパラメータの値が十分安定している。よって、最初に規定回数の更新を終えたロボットが、両隣のロボットに更新を終了させるための指令 (Fig. 9(e)) を局所通信により送り、この局所通信を繰り返すことにより、すべてのロボットに指令を伝播させ、次の動作を開始することができる。また、シミュレーション実験により設定された更新回数を終了した後、または更新終了の指令を受けた後、個々のロボットは活性因子 u の値に基づき多角形パターン形成を開始する。活性因子 u が極大値となるロボットが頂点となり、その他は辺となる。つまり、各ロボットは自身と両隣のロボットの活性因子 u の値を比較し、自身の値が両隣のロボットの値よりも大きい場合に、円周外側に一定の距離移動して頂点となり、それ以外の場合には円周内側に一定の距離を移動し辺となる。

5. 実 験

9 台のロボットを用い、三角形パターンを生成する実験を行う。まず、線パターン形成において、線パターンの生成時間の短縮のため、線パターンに新たに加わるロボットを線パターン端周辺の赤外線センサレンジ内に設置することにより、各ロボットがランダムに線パターン後端を探索することなく線パターン生成を行った (Fig. 13 中 0~64 [sec])。これは、ロボットが完全にランダム移動では、線パターン後端のロボットが発する赤外線のエリア内に到達するまでにかなりの時間を要し、電源の制限からこのような方法を採用した。また、ロボット間の通信には、ハードウェアの制約上、無線 LAN を用い、仮想的な局所通信を実現する。LAN 通信を行うための各ロボットの ID は線パターン形成時に行われる通信によって取得し、近接する 1 台または両隣の 2 台のロボットとのみ通信可能とする。線パターン形成中に先頭ロボットが 9 台を数えたとき、先頭ロボットが左に回転し始め円パターン形成が行われる (Fig. 13 中 64~140 [sec])。先頭ロボットが最後端のロボットの出す赤外線を受信した際に、

Fig. 13 Experimental result 1

局所通信にて順次、回転指令を伝播させ、全ロボットが円中心を向き (Fig. 13 中 154 [sec]), 両隣のロボットの活性因子と抑制因子の値の交換を行いながら自らの値の更新を行う。値の交換

Table 1 Parameter setting

Pattern	a	b	c	d	$\frac{D_u}{N^2}$	$\frac{D_v}{N^2}$
Triangle	0.52	0.60	0.60	0.73	0.03	0.05
Quadrilateral	0.51	0.63	0.63	0.70	0.03	0.05
Hexagon	0.55	0.60	0.60	0.75	0.01	0.03

Fig. 14 Experimental result 2

を 100 回行った後、または終了指令を受信した際に、活性因子の値を両隣のロボットと比較して中心方向または外側方向へ移動し、三角形パターンを生成する (Fig. 13 中 312~316 [sec])。さらに、同手法にてパラメータを Table 1 に示すようにに設定し、数種の多角形パターンを形成する。本実験では、12 台のロボットの円パターンから、四角形パターン、五角形パターン、六角形パターンを形成する実験を行った。四角形パターン形成と六角形パターン形成の実験結果を Fig. 14 に示す。

6. 結 論

本稿では、比較的低知能を有する均質ロボット群による協調作業を想定し、均質ロボット群の機能分化を局所通信によって実現する問題の一つとして、ロボット群による空間パターン形成問題を取り扱い、ロボット群による段階的に空間パターン形成を自律的に行わせるための制御手法として、段階的パターン形成手法の提案、多角形パターン形成のための Turing 形態形成理論の解析的考察およびロボットによる実機実験を行い、線、円、正多角形パターン形成を実現した。また、多角形パターン形成において通信障害やロボット台数の変化に対するロバスト性の確認を行い、Turing 形態形成理論の制御手法の有効性を確認した。本稿の段階的パターン形成手法は、群ロボットにおける作業割り当て問題への応用が可能であり、特に、ハードウェアの制約によって低機能しか搭載できず、またその通信範囲の狭い小型ロボットにて特に有効になると思われる。

また、活性、抑制因子の組を複数用いて周波数の異なる波形を同時に複数生成し、それらの波形を重ね合わせることで 1 本

の対称軸を持った複雑なパターンを生成することが可能である。今後はより複雑なパターン形成を実現するための解析的考察および実験を進めて行きたい。

参 考 文 献

- [1] T. Fukuda, S. Nagasawa, Y. Kawauchi and M. Buss: "Structure Cection Method for Self Organizing Robots Based on Cell Structure-CEBOT," Proceeding of the 1989 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.698-700, 1989.
- [2] S. Murata, E. Yoshida, A. Kamimura, H. Kurokawa, K. Tomita and S. Kokaji: "M-TRAN: Self-Reconfigurable Modular Robotic System," ASME Transactoins on Mechatronics, vol.7, no.4, pp.431-441, 2002.
- [3] A. Castano, A. Behar and P. M. Will: "The Conro Modules for Reconfigurable Robots," ASME Transactoins on Mechatronics, vol.7, no.4, pp.403-409, 2002.
- [4] Z. Butler, R. Fitch and D. Rus: "Distributed Control for Unit-Compressible Robots: Goal-Recongnition, Locomotion, and Splitting," ASME Transactoins on Mechatronics, vol.7, no.4, pp.418-430, 2002.
- [5] M. Yim, Y. Zhang, K. Roufas, D. Duff and C. Eldershaw: "Connecting and Disconnecting for Chain Self-Reconfiguration With PolyBot," ASME Transactoins on Mechatronics, vol.7, no.4, pp.442-451, 2002.
- [6] H. Bojinov, A. Casal and T. Hogg: "Emergent Structures in Modular Self-reconfigurable Robots," Proceeding of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol.2, pp.1734-1741, 2000.
- [7] N. Inou, H. Kobayashi and M. Koseki: "Development of Pneumatic Cellular Robots Forming a Mechanical Structure," International Conference on Control Automation, Robotics And Vission(ICARCV), pp.63-68 (CD-ROM, PaperID 1457), 2002.
- [8] 中野: 生命をつくる. pp.16-26, サイエンス社, 2001.
- [9] I. Suzuki and M. Yamashita: "A Theory of Distributed Anonymous Mobile Robots —Formation and Agreement Problems," SIAM J. Computing, vol.28, no.4, pp.1347-1363, 1999.
- [10] 山下雅史: "自律分散ロボットにおける共有知識の創発 (招待解説論文)", 計測と制御, vol.38, no.10, pp.654-657, 1999.
- [11] H. Yamaguchi and J.W. Burdisk: "Asymptotic Stabilization of Multiple Nonholonomic Mobile Robots Forming Group Formations," Proc. 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation, pp.3573-3580, 1998.
- [12] 下村芳樹, 中野康夫, 大築康生: "マイクロマシーン群のための作業パターン形成技術", 電気学会誌 E, vol.122-E, no.5, pp.267-273, 2002.
- [13] T. Fukuda and Y. Ikemoto: 'Graduated Spatial Pattern Formation of Micro Robot Group,' Distributed Autonomous Robotic Systems 5, pp.340-349, Springer, 2002.
- [14] A.M. Turing: "The Chemical BASIS of Morphogenesis," Philosophical Transactions of the Royal Society of London, vol.237, no.641, pp.37-72, 1952.
- [15] S.H. Strogatz: Nonlinear Dynamics and Chaos. pp.248-254, Harpercollins, 2001.
- [16] 西浦: 岩波講座 物理の世界物理と数理 5 自己複製と自己崩壊のダイナミクス, pp.15-20, 岩波書店, 2003.
- [17] 富田: 生物と協同現象, pp.175-212, 東京大学出版会, 1976.

付録 A. 式 (5) の導出

式 (3), (4) の平衡点を $U^* = (u^*, v^*)$ とおくと, $U^* = (0, 0)$

が一つの平衡点であり, 反応系の式 (A.1) の U^* での安定性は式 (A.2) で保証される.

$$\frac{du}{dt} = au - bv, \quad \frac{dv}{dt} = cu - dv \quad (\text{A.1})$$

$$ad - bc < 0, \quad a - d < 0 \quad (\text{A.2})$$

平衡点 $U^* = (0, 0)$ において, 線形化方程式は式 (A.3) になる

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} a & -b \\ c & -d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \\ &+ \begin{pmatrix} D_u & 0 \\ 0 & D_v \end{pmatrix} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

これに式 (A.4) を入れ, 整理し, 定常波数 k のフーリエモードに対して時間的変動を表す λ_k という固有値を調べればよい.

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_k \\ v_k \end{pmatrix} \exp(\lambda_k t + ikx) \quad (\text{A.4})$$

λ_k と k に関する特性方程式は式 (A.5) のようになる.

$$\lambda_k^2 - T\lambda_k + S = 0 \quad (\text{A.5})$$

ここで,

$$\begin{aligned} T &= a - d + k^2(D_u + D_v) \\ S &= -(ad - bc) - (aD_u - dD_v)k^2 + D_u D_v k^4 \end{aligned} \quad (\text{A.6})$$

である. T, S は $k^2 (\equiv h)$ のみに依存する. ここで $D_u = D_v$ のとき, 式 (A.2) より, $S > 0$ となり, $T < 0$ とあわせて式 (A.5) は実部正の解は持ちえず, 不安定化は生じない. よって $D_u \neq D_v$ のときのみを考える. 式 (A.2) より, 常に $T < 0$ である. よって λ_k は純虚数値をとらず, ホップ分岐は起こらないので, 実解, すなわち $S = 0$ となる場合のみを考えればよく, $S = 0$ が正の h で成り立つためには,

$$aD_v - dD_u < 0 \quad (\text{A.7})$$

であることが必要であり, さらにそれが最初の不安定化であるためには, 重解条件

$$\frac{dS}{dh} = (aD_v - dD_u)^2 + 4(ad - bc)D_u D_v = 0 \quad (\text{A.8})$$

であることが必要で, このときの不安定波数を k_c とおくと $S = 0$ の重解の値で与えられ, 式 (A.6) より式 (5) を得る.

池本有助 (Yusuke Ikemoto)

1978 年 8 月 16 日生。2001 年名古屋大学工学部機械・航空工学科卒業。2003 年同大学大学院工学研究科マイクロシステム工学コース博士課程前期卒業。同年、同学科博士課程後期入学。現在に至る。
(日本ロボット学会学生会員)

福田敏男 (Toshio Fukuda)

1948 年 12 月 12 日生。1977 年東京大学大学院博士課程修了，工学博士。1977 年通産省工業技術院機械技術研究所研究員，主任研究官を経て，1982 年より東京理科大学工学部機械工学科講師，1983 年同大学助教授，1979～1981 年西ドイツシュツットガルト大学客員研究員，1986 年アメリカエール大学客員助教授，1989 年 4 月名古屋大学工学部機械工学第 2 学科教授。1992 年 4 月同大学機械情報システム工学科教授。1994 年同大学大学院工学研究科マイクロシステム工学専攻教授，現在に至る。自己組織化ロボット，マイクロロボット，マイクロ・ナノマニピュレーション，インテリジェント制御，ロボットハンドやマニピュレータの制御，特殊環境下のロボットの研究等に従事。現在，IEEE Nanotechnology Council President，日本知能情報ファジィ学会会長。
(日本ロボット学会正会員)

長谷川泰久 (Yasuhisa Hasegawa)

1972 年 1 月 26 日生。1994 年名古屋大学卒業。1996 同大学大学院博士課程前期課程修了。同年，三菱重工業株式会社に勤務。1998 年名古屋大学大学院工学研究科マイクロシステム工学専攻助手。2003 年岐阜大学工学部機械システム工学科講師，2004 年より筑波大学機能工学系講師，現在に至る。博士（工学）。主な研究領域は，学習型運動制御，ロボットハンド，知的ロボットシステム。現在，日本知能情報ファジィ学会理事。
(日本ロボット学会正会員)

松田一彦 (Kazuhiko Matsuda)

1964 年 3 月 1 日生。1987 年武蔵工業大学工学部電気科卒業。同年，富士重工業（株）入社。現在，技術研究所にて学習・進化システムの研究に従事。