局所視覚を持つロボット群が形成する円陣の安定性解析*

宮前 健裕^{*1}, 市川 純章^{*2}, 原 文雄^{*3}Stability Analysis of Circle Formation Generated by Multi-Robots
with Local VisionTakehiro MIYAMAE, Sumiaki ICHIKAWA and Fumio HARA^{*4}^{*4} Department of Mechanical Engineering, Science University of Tokyo,
1-3 Kagurazaka, Shinjuku-ku, Tokyo, 162-8601 Japan

This paper deals with a kinematic stability analysis of circle formation that emerges through interaction caused by local vision and obstacle-avoidance action in multi-robots. Individual robot has a specific, limited range of signal communication to detect other robots and, according to the location of other robots detected around each robot, the robot takes an action such as proceeding forward or turning left/right at particular angle for each time step. This action selection algorithm is implemented into each of robots. By changing the turning angle and vision angles, computer simulation of group behavior in the multi-robots is carried out and we find rather stable circle formation emerged in such robotic system. In order to analyze the kinematic stability of the circle formation, we propose a circle formation model that represents the ideal circle to be generated by multi-robots, and examine theoretically the stability of the circle formation in terms of the vision angles, the turning angle, and robot number forming a circle. The theoretical results are also examined by computer simulations and a good agreement is shown between the both results.

Key Words: Mechatronics and Robotics, Robot, Moving Robot, Multi-Robots, Local Vision, Local Interaction, Emergence of Circle Formation, Kinematic Stability, Robotic Morphology Formation

1. 緒 言

多数のロボットを協調的に作業させる群ロボットシステムに関する研究が、近年、さかんに行われている。この群ロボットシステムに関する研究は、ロボットの知能の程度によって、意図的協調と創発的協調とに分類できると考えられる⁽¹⁾。意図的協調とは、ロボット個々の知能レベルがある程度高く、例えば通信メッセージにロボットのとるべき行動が記述してあるような明示的な通信により、ロボット間で情報の伝達を行なうものである。その一例として、油田らによる「遠慮的協調」の提案がある⁽²⁾。

創発的協調とは、ロボット個々の知能レベルがそれほど高くなく、ロボット同士の局所的な相互作用により、群全体として何らかの秩序ある行動が行われるものである。この創発的協調に関する研究では、アリやハチと

いった昆虫や、鳥・魚などの動物の群行動をロボットシステムに応用するものが多数行われている。C. Reynoldsは、「Boids」理論を提案している⁽³⁾。これは、群れを構成するエージェントが3つの基本的なルール(1. Separation, 2. Alignment, 3. Cohesion)に従って行動することにより、整然とした群れの行動(たとえば飛行する鳥の群れ)を再現できるというものである。三宮らは「魚群行動モデル」を提案し、魚群の挙動やその形成メカニズムを解析している⁽⁴⁾。これらの研究において、個々のエージェントは群れとして一つの塊を形成しているが、個々のエージェント間の位置関係を特定する情報はなく、エージェントは局所情報によってある程度自由に行動できる。

また創発的協調の他の例として、ロボット群による形態形成に関する研究が行なわれている。鈴木、杉原らは、多数のロボットが直線、円、多角形などの特定形状に集合する単純な分散アルゴリズムを提案している⁽⁵⁾。山下らは、ロボット群における形態形成を個々のロボットが保有する局所座標系において原点および x , y 軸方向な

* 原稿受付 2002年5月20日。

^{*1} 東京理科大学大学院工学研究科(〒162-8601 東京都新宿区神楽坂1-3)。^{*2} 諏訪東京理科大学システム工学部。^{*3} 正員、東京理科大学工学部。

E-mail: harajf@rs.kagu.tus.ac.jp

どに関する共通の知識を獲得する座標系合意問題に帰着し、その可否を数学的に証明している^(9,7)。C. Ünsal, J.S. Bay は、問題を3次元空間に拡張し、ロボット群がパラボラ状の形態を形成するアルゴリズムをシミュレーションで実証している⁽⁸⁾。

ハードウェアによる形態形成に関しては、自己組織化するロボットシステムの研究がある。福田らは、環境に対する適応性・学習性の高いロボットシステムを実現するために、生物の世界にならぬシステムの最小構成単位を「セル」と定義し、セル構造化ロボット (CEBOT) を提案している⁽⁹⁾。村田らは、環境の変化に応じて形態や機能を変化させるロボットシステム (MTRAN)、自己修復する機械 (fractum) を開発している^(10,11)。これらの研究において、個々のモジュール間の位置関係は特定の構造に拘束されており、そのモジュール行動は制限される。

前述の群ロボットシステムによる形態形成に関する研究は、一般的に、マイクロロボット分野での適用を視野に入れているため、ロボットの物理的な大きさの制約から、その機能や知能は単純なものに制限されている。そこで本研究においては、単純な機能および知能を持つロボット多数から構成される群ロボットシステムにおける形態形成について取扱い、ロボット間の物理的・情報的な相互作用から特定の形態を形成・制御することを最終目標とする。ところで、筆者らは、物質が原子・分子の結合により構成されることをヒントに、ロボット群が形成する「円陣」を形態要素と考え、その円陣同士の結合により複合的な形態（複雑な形態）を形成しようと試みている。また他の応用例として、特定領域への外部からの何かの侵入を防いだり、逆に動物などを特定領域に囲っておくペリメータセキュリティとしての応用が考えられる。これまでにその第一段階として、ロボット群において円陣形成が発現するロボットの行動原理を提案し、円陣形成の確度とロボット単体の視野角との関連性などを、コンピュータシミュレーションを用いて解明してきた⁽¹²⁾。このロボット群が形成する円陣は、個々のロボットが局所視覚による大まかな観測に基づく進行方向の変更という相互作用により他のロボットと結びついて形成される。

本論文では、ロボット群が形成する円陣の挙動の安定性に着目する。ロボット群が形成する円陣の挙動に関しては3章で詳述するが、円陣に対する外部からの作用がない場合、円陣は「膨張」、「収縮」、「定常」のうちいずれかの挙動を示すことをシミュレーション結果より確認している⁽¹²⁾。円陣同士を何らかの相互作用により結合

させることで複合的な構造を実現することを考えると、これらの円陣の挙動の安定性を支配する要素を解明することは重要である。そこで本研究では、円陣挙動の運動学的安定特性を解明するためのモデルを提案し、そのモデルにおいて円陣の挙動を支配する条件式を運動学的に導出する。また、シミュレーションによりその条件式の妥当性を検証する。

2. ロボットの設定

2.1 ロボットの機能 本論文のシミュレーション解析で用いるロボット単体の機能の設定について述べる。群ロボットシステムにおける前述のような創発現象は、ロボット同士の物理的・情報的な相互作用が重要であると考えているので、シミュレーションにおいてもハードウェアベースのロボットモデルを用いる⁽¹³⁾。

個々のロボットは、その局所的な通信機能を用いて、通信可能範囲に存在する他のロボットへ通信を伝達する。これにより個々のロボットは、自己の存在を通信可能範囲に存在する他のロボットへ知らせることになる。個々のロボットが通信を受信するとき、これを「当該ロボットが他のロボットを観測する（局所視覚による観測）」と定義する。ロボットの通信可能範囲 R が等しい場合、図1より、ロボット (●印) はその通信可能範囲内に存在する他のロボット (○印) を観測していることになる。また個々のロボットはその通信受信機能により、自己の周囲を前後左右4方向の分解能で観測可能であるものとする。

Fig. 1 Local sensing around a robot

以上の通信機能を搭載したロボットをモデル化したものを図2で示す。ロボットの移動については、前進およびその場での左右の回転が可能であるとし、1ステップにいずれか一つの動作が行われるものとする。ロボットは自己の前方に左右2つのタッチセンサを備えており、それにより障害物を検知する。また、ロボットは特定の観測可能範囲 R を持ち、その観測可能範囲内を4分割した各区域 (Area 0-Area 3) のそれぞれに存在する他のロボット台数について、0台、1台、2台以上の3状態を検知できるものとする。ここで図2において、 α はロボットの1ステップ間での回転角度、 β はロボット

の進行方向軸から Area 0 と Area 1 (および Area 2) との境界線までの角度 (ロボットの前方視野角), μ はロボットの進行方向軸から Area 1 (および Area 2) と Area 3 との境界線までの角度 (ロボットの側方視野角) である。

Fig. 2 Schematic drawing of the robot vision model

2.2 円陣形成が発現するためのロボットの行動原理

2.2.1 ロボットの基本行動

ロボットの行動をある一定の時間ごとに繰り返される一連の動作と考え, その一連の動作を「ステップ」とする。ロボットは1ステップ間に

- (i) 自己の観測可能範囲に存在する他のロボットを観測する。
- (ii) 1ステップ前で選択している動作を実行する。
- (iii) 次のステップでの動作を選択する。

という3つの動作を行う。すなわち, 個々のロボットは自己の観測可能範囲に存在する他のロボットの大まかな相対位置および台数 (観測情報と呼ぶ) により次のステップでの動作を決定する。

2.2.2 障害物回避行動 (物理的インタラクション)

ロボットは前述のタッチセンサを備えており, そのオン・オフの入力情報により「前進」, α 度の「右回転」, 「左回転」のうちいずれかの動作を表1に従って選択する。タッチセンサが両方ともオフの場合は, ロボットは前進する。左右どちらかのタッチセンサがオンの場合は, ロボットはオンのセンサとは反対方向へ回転し, その回転方向を記憶する。左右両方のタッチセンサがオンの場合は, ロボットは内部に記憶している最新の回転方向へ回転する。この障害物回避行動はロボットの動作選択において最も優先されるものとする。

Table 1 Action selection by touch sensor input

Touch Sensor Inputs	Action
None	Proceeding
Right Side	Left Turning (α [deg])
Left Side	Right Turning (α [deg])
Both Sides	Left/Right Turning* (α [deg])

(*Select the turning direction by internal information which is memorized as the last turning direction of the robot)

2.2.3 観測情報に基づくロボットの行動 (情報的インタラクション)

ロボットは自己の観測可能範囲に他のロボットを観測した場合, その観測情報に基づいて図3および表2に従って動作を選択する。ロボットが左または右の回転動作を選択するのは, 図3で示す3ケースの観測情報に対してのみであるとし, それ以外の観測情報に対してロボットは「前進」するものとする。Case 1は, 当該ロボットがArea 1に1台のみロボットを観測し, その他の区域にはロボットが存在しない場合である。この観測情報に対して, 当該ロボットは「左回転」を選択する。Case 2は, 当該ロボットがArea 2に1台のみロボットを観測し, その他の区域にはロボットが存在しない場合である。この観測情報に対して, 当該ロボットは「右回転」を選択する。Case 3は当該ロボットがArea 1およびArea 2にそれぞれ1台ずつのロボットを観測し, Area 0にはロボットが存在しない場合である。この観測情報に対して, 当該ロボットは次に述べるFlag情報に基づいて「右回転」または「左回転」を選択する。Flag情報は, Case 1またはCase 2の観測情報が入力される際に, その回転方向を優先するように設定される。そしてこのFlag情報は, Case 3の観測情報に対する「右回転または左回転」の選択に反映される。

Table 2 Action selection by observed information around the robot

Observed Information	Action
case 1	Left Turning (α [deg])
case 2	Right Turning (α [deg])
case 3	Left/Right Turning* (α [deg])
others	Proceeding

(*Select the turning direction by flag information in which the last case either 1 or 2 is memorized)

Fig. 3 Robot-location information to be used at robot turning

3. 円陣の動的挙動の概要

3.1 円陣形成の発現

ロボット群において, 円陣形成が発現するシミュレーション結果の一例を図4に示す。2章で示したロボットの行動原理に従って個々のロボットが行動すると, ロボット間の物理的 (衝突・回避) および情報的 (観測) な相互作用により, ロボット群において円陣形成が発現する。その発現は確率的であり, それに関する諸特性 (円陣形成発現の確度など) を

コンピュータシミュレーションを用いて明らかにしている⁽¹²⁾。図4は10[m]×10[m]の平面空間に40台のロボット(●印)を投入した場合であり、2章で示したロボット視覚機能に関するパラメータは、(ロボットの1ステップ間での回転角度 α , 前方視野角 β , 側方視野角 γ) = (17.6, 30, 90[deg])である。図4で示すように、ロボットは動き回りながら相互に干渉し合い、結果として動的な円陣を形成する。

Fig. 4 Circle formation emergence in multi-robots (the arrows show the circulation direction)

円陣を形成している個々のロボットは、定常的な行動(個々のロボットが自己前方のロボットに追従し円軌道を描く)を行なうが、その行動を阻害する要因として2つの要素が考えられる。1つは、円陣に対する外部からの干渉によるものである。これは円陣へ向かって外部から他のロボットが接近・衝突する場合や、円陣と壁面とが接触する場合である。もう1つは、円陣を形成するロボット台数と前述のロボットの機能に起因する円陣そのものに内包的なものであると考えられ、これについては3.2節で述べる。

ロボット群が形成する円陣へ向かって外部から他のロボットが接近・衝突する場合、そのロボットは円陣に組み込まれることがある。本研究で用いるロボットの行動原理によると、ロボットは他のロボットを観測すると基本的にそれに追従しようとするので、円陣に接近するロボットはそれに組み込まれ、円陣を形成するロボット台数を増加させるように作用する。シミュレーションにおいて見られた円陣にロボットが組み込まれる過程の一例を図5に示す。このロボットの組み込みにより、円陣がその形成台数を増加させることを「円陣の成長」と呼ぶことにする。この円陣の成長の可否は、接近するロボットの円陣への突入位置や突入角度がランダムであることから確率的であると考えられ、ロボット同士の衝突によって円陣が壊れる場合もある。

Fig. 5 Growth of robot number in a circle formation

3.2 円陣の挙動 ロボット群が形成する円陣は、円陣外部からの干渉が無い場合、図6に示す3つの挙動(「収縮」、「定常」、「膨張」)のうちいずれかを示すことをシミュレーションで確認している⁽¹²⁾。図6において、各図中の○印はロボットの位置を示し、図中の曲線はそのうち1台のロボットの移動軌跡を示している。図6(a)は円陣が時間の経過と共に収縮する場合、(b)は円陣が定常的に存在する場合、(c)は円陣が時間の経過と共に膨張する場合である。(a)の場合はロボット同士の衝突、(c)の場合はいずれかのロボットが自己前方のロボットを観測不可能になることにより、最終的に円陣は崩壊する。このようにロボット群が形成する円陣は、その形成台数により挙動を変化させることが観測されている。

以上のロボット群における円陣形成の発現・崩壊の遷移をまとめたものを図7に示す。

Fig. 6 Circle formation behavior

Fig. 7 Transition chart of dynamic circle formation

4. 円陣の安定性解析

4.1 円陣挙動解析モデル 3章で述べたロボット群が形成する円陣挙動の安定性を解明するために、ロボット群が形成する円陣を次のように考える。ロボット群が形成する円陣は、図4で示したようなほぼ真円状のものであり、それを形成する個々のロボットは、自己前方のロボットに追従し定常的な行動(前進・回転動作を繰り返しながら円軌道を描く)を行う。そこで円陣を形成するロボットのうち特定の1台に注目し、そのロボットの行動について考える。ロボットは自己の各視覚区域

Area 0-Area 2 それぞれに存在するロボット台数について、0 台、1 台、2 台以上の 3 状態を検知でき、ロボットの回転動作は図 3 および表 2 で示した 3 ケースの観測情報が入力された際に行われるものと設定している。つまり、ロボットの回転動作の発動は、その前方 2 台のロボットとの相対位置関係により決定されと考えられる。図 8 は、 n 台 ($n \geq 3$) のロボットが常に正 n 角形の頂点に位置するように形成される円陣（理想円陣と呼ぶ）の一部に注目したものである。ここで、円陣を形成するすべてのロボットの回転動作が同期して行われるものとし、個々のロボットの進行方向は常にそれぞれ $2\pi/n$ [rad] づつずれているものとする。また図 8 中の ID 0 のロボットは注目するロボット、ID 1 はその前方 1 台目、ID 2 はその前方 2 台目のロボットであるとする。線分 ID 0-1 と ID 0-2 のなす角度は、 $\angle 0-1-2$ が二等辺三角形であることおよび三角形の外角の公式より、常に π/n [rad] である。

Fig. 8 Circle formation model

4.2 円陣挙動の運動学的解析 図 9 は、図 2 で示したロボット視覚モデルを展開したもので、横軸 ϕ はロボットの進行方向軸からの角度、縦軸 d はロボットからの距離を示している。図 9 における各区域 Area 0-Area 3 は、それぞれ図 2 で示したロボット視覚モデルの各区域と対応している。また図中の○印は前方 1 台目、●印は前方 2 台目のロボットと自己ロボットとの相対位置を示している。ロボット視覚とそこから獲得できる観測情報に基づくロボットの行動原理は左右対称なので、以下では片側（左側）のみについて考える。

ロボットの回転動作の発動は、その前方 1 台目および 2 台目のロボットの大まかな相対位置（正確な距離・角度情報を必要としない）によって決まり、そのための観測情報は図 3 で示した 3 ケースである。それらの観測情報に到る経路は、図 9 の (a) と (b) に示す 2 通りが考えられ、(a) 前方 1 台目のロボットが自己前方の区域 Area 0 から左側方の区域 Area 1 へ移動する場合、(b) 前方 2 台目のロボットが自己左側方の区域 Area 1 から後方の区

域 Area 3 へ移動する場合である。図 9(a) をロボットの回転動作が前方 1 台目のロボットに依存する場合、図 9(b) を前方 2 台目のロボットに依存する場合とする。

(a) Robot-turning depends on 1st front robot

(b) Robot-turning depends on 2nd front robot

Fig. 9 Robot-location (1st front robot: ○, 2nd front robot: ●)

4.2.1 前方 1 台目のロボットに依存する場合 当該ロボットとその前方 1 台目のロボット（図 10(a)中の◎と○印）が、傾きが $2\pi/n$ [rad] ずれている直線上を、等速度 V で移動する場合を考える。時間の経過、すなわちロボットの移動による (ϕ, d) の軌跡を図 10(b) に示す。 d の極小値は $\phi = \pi/n$ で起こる。ロボットが回転動作を行うと、 (ϕ, d) の軌跡は同図中の $\phi-d$ 座標において、例えば P_1 から P_2 へのように回転角度 α だけ遷移する。ロボットの回転動作がその前方 1 台目のロボットと自己との相対位置に依存する場合、図 9(a) で示すように、回転動作は $\phi > \beta$ で発現する。ロボットの前方視野角 β を $\pi/n + \alpha/2$ 以上（例えば $\phi = \beta$ ）に設定すると、相対位置 P_3 で回転動作が発現する。 d は $\phi = \pi/n$ で極小値をとるように変化するので、 $\phi-d$ 曲線は上方ヘシフトする。前方視野角 β を $\pi/n + \alpha/2$ より小さく（例えば $\phi = \beta$ ）に設定すると、相対位置 P_4 で回転動作が発現する。 d は $\phi = \pi/n$ で極小値をとるように変化するので、 $\phi-d$ 曲線は下方ヘシフトする。すなわち、ロボットの回転動作により $\phi-d$ 曲線は上方または下方ヘシフトし、この曲線の上方と下方へのシフトはロボット間の距離 d の増加と減少に対応している。

当該ロボットはその前方 1 台目のロボット (○) と自己との相対位置に基づいて前進および回転動作を行い、図 11 に示すように、当該ロボットの観測情報は状態 $A \leftrightarrow B$ ($\rightarrow$: 前進, $\leftarrow$: 回転) を繰り返す。この場合、前述の説明より、前方 1 台目のロボットとの距離 d_1 は次の式(1)および式(2)で支配される。

Fig. 10 Relation between two robots proceeding different axes

$$\begin{cases} \beta < \frac{\pi}{n} + \frac{\alpha}{2} \Rightarrow d_1 : \text{Decrease} & \dots\dots(1) \\ \beta \geq \frac{\pi}{n} + \frac{\alpha}{2} \Rightarrow d_1 : \text{Increase} & \dots\dots(2) \end{cases}$$

式(1)が成り立つ場合、当該ロボットの観測情報は状態 $A \leftrightarrow B$ を繰り返す、それに伴って徐々に前方1台目との距離 d_1 は小さくなり、やがてロボットの観測情報は図11の状態Cに到る。そして最終的には、ロボット同士が衝突することにより円陣は潰れて崩壊する。式(2)が成り立つ場合、当該ロボットの観測情報は状態 $A \leftrightarrow B$ を繰り返す、それに伴って徐々に d_1 は大きくなり、やがてロボットの観測情報は図11の状態Dに到る。そして最終的には、ロボットが自己前方のロボットを観測不可能になることにより円陣は散開して崩壊する。

4.2.2 前方2台目のロボットに依存する場合 当該ロボットは前方2台目のロボット(●)と自己との相対位置に基づいて前進および回転動作を行い、図11に示すように、当該ロボットの観測情報は状態 $E \leftrightarrow F$ (→: 前進, ←: 回転) を繰り返す。この場合、前方2台目のロボットとの距離 d_2 は次の式(3)および式(4)で支配される。これらの式(3)、(4)は、前方1台目に依存する場合と同様の考えから得られる。

$$\begin{cases} \gamma < \frac{2\pi}{n} + \frac{\alpha}{2} \Rightarrow d_2 : \text{Decrease} & \dots\dots(3) \\ \gamma \geq \frac{2\pi}{n} + \frac{\alpha}{2} \Rightarrow d_2 : \text{Increase} & \dots\dots(4) \end{cases}$$

式(3)が成り立つ場合、当該ロボットの観測情報は状態 $E \leftrightarrow F$ を繰り返す、それに伴って徐々に前方2台目との距離 d_2 は小さくなり、やがて当該ロボットの観測情報は図11の状態Gに到る。そして最終的には、ロボット同士が衝突することにより円陣は潰れて崩壊する。式(4)が成り立つ場合、当該ロボットの観測情報は状態 $E \leftrightarrow F$ を繰り返す、それに伴って徐々に d_2 は大きくなり、やがて図11の状態Hに到る。この場合、当該ロボットが前方2台目のロボット(●)を観測不可能になる時点で、ロボットの回転動作は前方1台目のロボット(○)に依存することになる。ここで、当該ロボットの回転動作

が前方1台目のロボットの相対位置に依存する場合を参照すると、式(2)が成り立つ場合、徐々に d_1 は大きくなり、最終的に、当該ロボットが自己前方のロボットを観測不可能になることにより円陣は散開して崩壊する(状態I)。式(1)が成り立つ場合、徐々に d_1 および d_2 は小さくなる。そしてロボットが再び前方2台目のロボット(●)を観測可能になり(状態E)、当該ロボットの回転動作が前方2台目のロボットの相対位置に依存することになる。

(a) Robot-turning depends on 1st front robot (b) Robot-turning depends on 2nd front robot

Fig. 11 States of front robots location

4.2.3 定常円陣の存在条件 4.2.1、4.2.2 項より、注目しているロボットの観測情報が図11で示す状態 $E \leftrightarrow F \leftrightarrow H$ を繰り返す場合に、ロボット群が形成する円陣は定常的に存在可能であると考えられる。その場合の条件式(1)、(4)を整理すると

$$\left\{ \frac{2\pi}{\gamma - \frac{\alpha}{2}} \right\} \leq n < \frac{\pi}{\beta - \frac{\alpha}{2}} \dots\dots(5)$$

となり、ここで式(5)の第一式において

$$\pi - (\gamma - \beta) - \left(\gamma - \frac{\alpha}{2}\right) \geq 0 \text{ のとき, } \frac{2\pi}{\gamma - \frac{\alpha}{2}} \dots\dots(6)$$

$$\pi - (\gamma - \beta) - \left(\gamma - \frac{\alpha}{2}\right) < 0 \text{ のとき, } \frac{2\pi}{\pi - (\gamma - \beta)} \dots\dots(7)$$

が用いられる。式(7)は、当該ロボットの側方視野角が大きく自己後方まで観測可能である場合において、自己後方のロボットを観測しないための条件式である。以上が、ロボット群が形成する定常円陣の存在条件であり、定常円陣の幾何学的大きさ(半径 R_{circle})は、 $d_2 \approx R$ 、円陣形成モデルの幾何学的関係から(図8参照)

$$R_{circle} \approx \frac{R}{2 \sin \frac{2\pi}{n}} \dots\dots(8)$$

で規定される。

5. 定常円陣の存在条件の検証シミュレーション

5-1 シミュレーション設定 ロボット群が形成する定常円陣の存在条件（すなわち挙動を支配する条件）の妥当性を検証するために、次に示すシミュレーションを実行した。

ロボットの初期配置は、円陣を形成するロボット台数を n 台とすると、正 n 角形の頂点に位置するように配置する（図 12）。個々のロボットの初期位置における進行方向は、それぞれ自己の進行方向軸上に前方 1 台目のロボットが存在するように設定する。また初期条件における円陣の大きさは、初期状態において常に個々のロボットが前方 2 台目のロボットを観測可能であるようにするために、前方 1 台目のロボットとの距離が観測可能距離 R の半分になるように配置する。

Fig. 12 Initial allocation in verification simulation

Table 3 Parameters in simulation

Body Diameter	10.0 [cm]
Velocity	15.1 [cm/s]
Communication Range	100.0 [cm]
Δt	0.05 [s]
Turning Angle α	8.8, 17.6, 35.2 [degree]
Front View Angle β	15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135, 150 [degree]
Side View Angle γ	30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135, 150, 165 [degree]
Robot Number	3-50 [robot]
Simulation Time	100,000 [step]

ロボット群が形成する円陣は、個々のロボットが 2 章で示した行動原理に従って行動することにより、「膨張」、「収縮」、「定常」のうちいずれかの挙動を示す。そこでロボット群が円陣を継続している時間、すなわちステップ数をカウントする。円陣崩壊の定義は、次の 2 項目のいずれかとする。

- (i) いずれかのロボットが他のロボットと接触する。
- (ii) いずれかのロボットが他のロボットを観測不可能になる。

この(i)または(ii)のどちらかを満たした場合、その時点が円陣崩壊であるとする。シミュレーションに用いるパ

ラメータは表 3 で示す通りであり、シミュレーション時間は十分長い時間に設定してある (100,000[step])。またシミュレーションにおいて、ロボットの観測可能範囲 R 付近（前後約 5[cm]）でのロボットの観測を確率的であるとしており、変形したシグモイド関数で規定している。

5-2 シミュレーション結果と考察 5-1 節で述べたシミュレーションを実行し、定常円陣の存在条件式 (5) とシミュレーションから得られた円陣継続時間ステップとの関連性について考察する。図 13 は、(ロボット)の 1 ステップ間での回転角度 α 、前方視野角 β = (8.8, 15 [deg]), (8.8, 30 [deg]), (17.6, 15 [deg]), (17.6, 30 [deg]) の場合において、側方視野角 γ および円陣を形成するロボット台数 n に対する円陣形成継続時間ステップ (50 試行の平均) を示している。また同図には、定常円陣の存在条件式 (5) に基づいて、理論的に円陣が安定である領域（太線）も示してある。

図 13.(a), (b), (d) より、(ロボットの 1 ステップ間での回転角度 $\alpha <$ ロボットの前方視野角 β) の場合は、定常円陣の存在条件式 (5) に基づく円陣の安定領域において、円陣継続時間ステップが大きくなっており、その傾向はよく一致している。つまり円陣挙動解析モデルが、ロボット群が形成する円陣の安定性をうまく表現していると考えられる。しかし、(ロボットの 1 ステップ間での回転角度 $\alpha >$ ロボットの前方視野角 β) の場合、つまりロボットが片側の視覚区域だけではなく左右の視覚区域 (Area 1, Area 2) を用いて自己前方のロボットを観測しながら円陣形成を継続する場合、式 (5) が円陣挙動特性をうまく表現しているとはいえないことが図 13.(c) からわかる。図 14 は、図 13.(c) の点 A, B における円陣の様子をそれぞれ示している。点 A において理論的に円陣は安定であるが、シミュレーションにおいては、円陣はその形状を乱し約 2,000[step] で崩壊する。しかし点 B においては、理論的に円陣は不安定であるにもかかわらず、円陣はその形状を多少乱しながらも長時間継続される。このように $\alpha > \beta$ の場合には、安定な円陣について別の何らかの定常的な存在条件があると考えられる。以上より、定常円陣の存在条件式 (5) とシミュレーションにおける円陣挙動特性が必要十分な関係であるためには、 $\alpha < \beta$ という条件式が必要である。

円陣を形成するロボットすべての回転動作が同期して行われる場合、その円陣の挙動は理論に従うことは明らかである。非同期で行われる場合では、前述の $\alpha < \beta$ という条件を満たしていれば、その円陣の挙動は理論に従う。すなわち、同期して行われると仮定したモデルで非同期の場合での円陣挙動をうまく説明できる。

Fig. 13 Duration of a circle formation

Fig. 14 Behavior of a circle formation ($\alpha=17.6$, $\beta=15$, $\gamma=90$ [deg])

6. 結 言

本研究で得られた知見は以下の通りである。

1. ロボット群が形成する円陣の挙動特性（「収縮」，「定常」，「膨張」）をうまく説明できるモデルを提案し，その挙動が個々のロボットの視野角および円陣を形成するロボット台数に依存することを示し，定常円陣の存在条件を導出した。

2. 定常円陣の存在条件の妥当性を実験シミュレーションとの比較によって検証し，その適用可能な必要十分条件について考察した。

ロボットの1ステップでの回転角度がその前方視野角より大きい場合 ($\alpha > \beta$) の安定条件の解明は今後の課題である。またハードウェア実験を考えると，ロボットの視覚境界（視覚エリア境界・観測可能範囲境界）における観測の曖昧さは必ず存在する。定常円陣の存在条件が成立するロボット視覚境界における曖昧さに関する検討も，今後の課題である。

参 考 文 献

- (1) 長田正 編著：自律分散をめざすロボットシステム，オーム社，1995。
- (2) 油田信一，スバルーク・プレムウッティ：複数の自律移動ロボットの協調に関する検討—遠慮的協調の提案，日本ロボット学会第8回学術講演会，pp.887-890，1990。
- (3) C. W. Reynolds, "Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model", *Computer Graphics*, 21(4), pp.25-34, 1987.
- (4) N. Sannomiya, and M. A. Dousrari, "A Simulation Study on Autonomous Decentralized Mechanism in Fish Behavior Model", *Intl. Journal of Systems Science*, 27, pp.1001-1007, 1996.
- (5) K. Sugihara, and I. Suzuki, "Distributed Algorithms for Formation of Geometric Patterns with Many Mobile Robots", *Journal of Robotic Systems*, 3(13), pp.127-139, 1996.
- (6) I. Suzuki, and M. Yamashita, "Distributed Anonymous Mobile Robots: Formation of Geometric Patterns", *SIAM Journal on Computing*, Vol.28, No.4, pp.1347-1363, 1999.
- (7) I. Suzuki, and M. Yamashita, "Distributed Anonymous Mobile Robots - Formation and Agreement Problems", *Proceedings of the 3rd Intl. Colloquium on Structural Information and Communication Complexity (SIROCCO '96)*, 1996.
- (8) C. Ünsal, and J. S. Bay, "Spatial Self-Organization in Large Populations of Mobile Robots", *IEEE Intl. Symposium on Intelligent Control*, pp.249-254, 1994.
- (9) T. Fukuda, M. Buss, and Y. Kawauchi, "Communication System of Cellular Robot: CEBOT", *Proceedings of IEEE Intl. Conference on Industrial Electronics Control and Instrumentation (IECON '89)*, pp.634-639, 1989.
- (10) A. Kamimura, S. Murata, E. Yoshida, H. Kurokawa, K. Tomita, and S. Kokaji, "Self-Reconfigurable Modular Robot - Experiments on Reconfiguration and Locomotion -", *Proceedings of the 2001 IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.590-597, 2001.
- (11) S. Murata, H. Kurokawa, and S. Kokaji, "Self-Assembling Machine", *Proceedings IEEE Intl. Conference on Robotics and Automation*, pp.441-448, 1994.
- (12) T. Miyamae, S. Ichikawa, and F. Hara, "Effects of Population Density on the Emergence of Circle Formation in Multiple Robots System with a Local Vision", *Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.2789-2794, 2002.
- (13) 市川，原：局所的通信を用いた群ロボットシステムの展開・帰還行動特性の実験的研究，機論（C編），64巻625号，pp.3464-3471，1998。