

自律分散ロボット群に対する分散アルゴリズムの理論基盤構築

泉 泰 介 名古屋工業大学大学院工学研究科准教授

1 はじめに

複数の自律的に動作する計算機群が、互いに通信し合いながら共通の目的を持って動作するようなシステムを、分散システムと呼ぶ。分散システムは故障耐性や負荷分散などの点で優れた特性が期待できる一方、システム全体を一元的に把握する集中管理機構を持たないため、全体を効率的に動作させるためのアルゴリズム(分散アルゴリズム)の設計が重要である。近年、複数のロボットが何らかのコミュニケーションを行いつつ動作するシステム(自律分散ロボットシステム)が注目を集めており、そのようなシステムのためのアルゴリズム設計手法が、分散アルゴリズム理論分野において盛んに研究されている。

計算機ネットワークのための分散アルゴリズムが、メッセージ通信量やメモリ使用量等により性能を測られることと同様に、自律ロボット群のための分散アルゴリズムも何らかの尺度にて性能評価されるべきである。しかしながら、従来の分散ロボット群のためのアルゴリズム研究においてはコスト的な観点から見たアルゴリズムの定量的な評価、あるいは計算複雑さの研究などについてはほとんど進展していないのが現状である。また、従来の分散アルゴリズム理論においては、計算機故障への耐性が大きなトピックスとして研究を進められているが、自律分散ロボット群に対する同種の研究は必ずしも本格化しているとは言えない。本研究では、分散アルゴリズム理論の成果を応用した、自律分散ロボット群のための新しい理論基盤の構築を目指し、研究を遂行した。特に、乱択化を利用したアルゴリズム設計、およびロボットに故障が生じる環境におけるアルゴリズムの設計(耐故障アルゴリズム)に着目し、いくつかの結果を得た。以下、個別の成果についてその概説を述べる。

2 乱択化一点集合問題の時間計算量について

2-1 課題の背景

前述のとおり、自律的ロボット群の協調問題に対するアルゴリズム的アプローチは近年のホットなトピックスの一つであり、その設計のための理論モデルが数多く提唱されている[10]。これらの理論的モデルにおいて、通常、一台のロボットは2次元平面上の一点として抽象化されており、他のロボットの位置を観測し、それに従って自身が位置を変えるという動作を繰り返す。そのため、各点(=ロボット)の位置をユーザにとって望ましいように制御することがアルゴリズム設計の基本となる。

この枠組みにおけるもっとも基本的な問題の一つとして、一点集合問題と呼ばれる問題がある。一点集合問題とは、平面上に散らばっているロボット群をある(あらかじめ定められていない)一点に集める問題であり、一種の合意形成問題とも捉えることができる。自律分散ロボット群のアルゴリズム論的研究における一つの中心的な話題として、解くべきタスク(ここでは一点集合)が与えられたときに、その問題を解くために必要なロボットの最小能力を明らかにするという問題がある[1、3、6、8、9]。ここで、「ロボットの能力」とは主に(1)記憶(アルゴリズムが過去の動作履歴を使えるかどうか)(2)匿名性(各ロボットが固有の識別子を持ち、互いに異なることを認識できるか)(3)非同期性(ロボットの動作タイミングにずれが生じるかどうか)(4)観測能力(他のロボットの位置をどれだけ正確かつ一貫して検知できるかどうか)、等の要因により特徴付けられる。驚くべきことに、一点集合問題のような単純な問題でさえ、少しの要因を緩和するだけで非可解となることが知られており、また可解となる最弱の条件はこれまでには知られていない。

本研究では、特に、乱択化を利用した記憶なしロボット群の一点集合問題に着目する。記憶なしロボットシステムは、次動作が過去の動作履歴に依存せず、現在の状況にのみ依存して決定されるようなロボットからなるシステムであり、その能力はきわめて弱い。しかしながら、過去の動作の影響を受けないことから、一時的な故障状況からの自動復帰能力を本質的に有しており、故障耐性の面で優れた特徴を有する。

記憶なしロボットシステムにおいては、一点集合問題は一般には非可解であり、他の何らかの仮定(例え

ば各ロボットの観測座標系の合意)がアルゴリズム実現のためには必要となる[9]。そのような仮定のうち、本研究では、乱択化を利用した解法(乱択化アルゴリズム)に着目する。乱択化アルゴリズムでは、アルゴリズムの動作に確率的な振る舞いを取り入れることで問題の不可能性を回避する手法であり、分散アルゴリズム設計においてしばしば使われる手法である。記憶なしロボット群の一点集合問題においては、乱択化を用いたアルゴリズムが過去の研究において提案されている。しかしながら、それらのアルゴリズムは、より強い仮定を置かなかつた場合、アルゴリズムの期待実行時間がロボット台数 n の指数時間となるものしか知られていなかった。本研究では、この未解決部分、すなわち、(1) n の多項式の期待実行時間を構成するアルゴリズムは構成可能か?(2)構成が不可能であるならば、どれだけの仮定を置けばそのようなアルゴリズムを構成できるのか?の2点に取り組む。

本研究の具体的な成果は、上記(1)の問題を否定的に解決するとともに、(2)について、従来の結果よりも弱い仮定の下で正しく動作する、定数期待実行時間のアルゴリズムを提案したことである。また、この結果を導く課程で、ロボットの能力を特徴づける新たな要素として、“重複度検知能力の局所性”という概念を新たに提案している。

2-2 ロボットモデル

本節では、ロボット群システムの理論モデルについて、その概要を述べる。基本的なモデルは主に文献[10、11、12]の定義に基づいている。本節の内容は、研究成果1のみならず、以降の研究においても共通で考えられるモデルである。

ロボット群システムは n 台のロボットの集合 $\{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ により構成されるシステムである。各ロボットは平面上を自律的に移動する点としてモデル化される。ロボット間は無線通信のような明示的なコミュニケーション手段を持たない。その代わりに、各ロボットは他のロボットの現在位置を観測することが可能であり、それに応じて自身のふるまいを決定する。

一般に、個々のロボットの能力は、どのような仮定を採用するかで決定される。ロボットの能力を決定づける代表的な要素を以下に挙げる。

1. 識別子の有無(匿名性):各ロボットが固有の識別子を持つ場合、複数のロボットを(互いに互いに)区別することが可能である。本研究では匿名なロボットを仮定する。すなわち、他のロボット観測において、個々のロボットを区別できないものとする。
2. 移動:ロボットの移動を離散的な動作、あるいは連続的な動作と見なすかどうかで2通りのモデルがある。本研究では離散的な動作でモデル化する。
3. 記憶:記憶なしロボットでは、次の目的地はロボットの観測結果のみから決定される(より形式的には、アルゴリズムは、観測結果から目的地への写像として定義される)。一方、ロボットが過去の履歴を自身の内部状態として保持しており、それに基づいて動作を決定することが可能である(すなわち、アルゴリズムは観測結果および内部状態から目的値への写像となる)。本研究では記憶なしロボットを仮定する。
4. 観測能力:各ロボットは自身を原点とした独自の座標系(局所座標系)を持ち、そのもとで観測結果を得る(図1)。各々の局所座標系がその向き、単位距離等について合意しているかどうかで、いくつかのバリエーションが存在する。また、観測誤差等により、他のロボットの正確な位置を得られないという仮定を置く場合もある。
5. 重複検知能力:複数台のロボットが同一点に滞在している状況において、他のロボットがその点をどのように観測するかを定める。よく知られたモデルとして(1)重複検知能力なし:複数台いるか単一かが区別不能(2)弱い重複検知能力:複数台滞在しているか単一かは区別が付くが、正確な台数を知ることが出来ない(3)強い重複検知能力:対象点に滞在しているロボットの正確な台数を知ることができる、の3つがあるが、本研究ではさらなるモデルを新たに導入する(これについては後述)。
6. 非同期性:前述の通り、ロボットは状況の観測、および計算された目的地へと移動を1サイクルとして動作する。同サイクルの実行に対する同期の程度により、以下の3種類モデルが提案されている(図2)。(1)完全同期:すべてのロボットが同期して同時にサイクルを実行(2)半同期:一部のロボットがサイクルを実行しない場合があるが、同時にサイクルを実行するロボットは完全に同期して動作する。(3)非同期:サイクルの実行タイミングに関して一切の仮定を置かない。本研究を通して、我々は半同期システムを考える

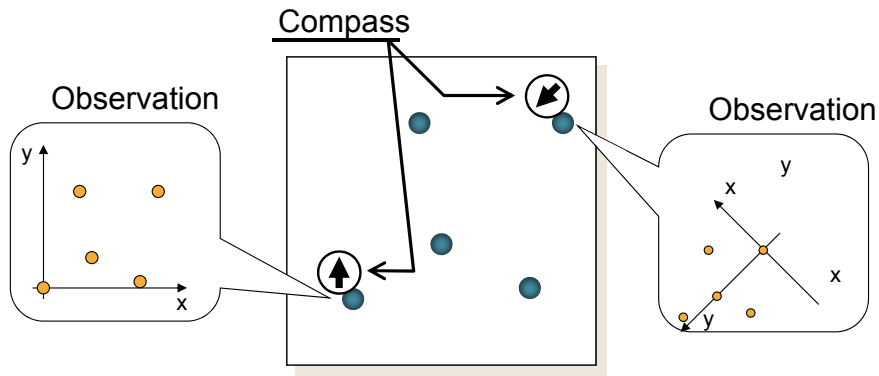


図 1 ロボットの観測とその結果

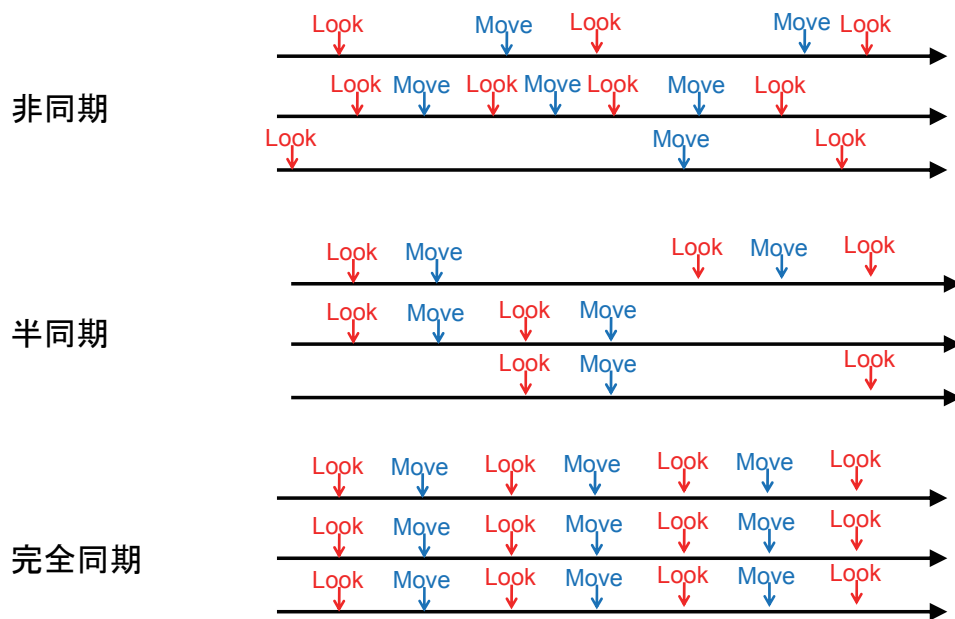


図 2 実行モデル

2-3 重複検知能力の局所性

本研究では、多項式時間乱択一点集合アルゴリズムを構成可能なロボットの能力に着目しているが、過去の研究において、重複検知能力の強弱がその可能性に影響を与えているということが指摘されている。本研究以前の結果として、重複検知能力の無いモデルにおける乱択を利用した期待実行時間 $\Omega(2^n)$ のアルゴリズム、および強い重複検知能力の仮定の下における多項式期待実行時間のアルゴリズムが示されている。これらの結果から、2つの仮定の間、指数実行時間と多項式実行時間の「境目」となるような仮定が存在することが分かる。この点を動機として、本研究では、従来の中間的な能力を持つ重複検知能力を新たに導入することで、その境目を明らかにすることを目的とした。具体的には、以下に説明するような、重複検知能力の局所性という特性を新たに定義することで、よりきめの細かいモデルのクラス分類を提案する。

1. 大域的な重複検知：各ロボットは、観測結果の任意の点の重複を検知可能であるとする。
2. 局所的な重複見地：各ロボットは、観測結果における原点（すなわち、観測者の現在地）の重複のみを検知可能とする。

上記の2つの特性は従来が強弱とは直行する概念であることに留意されたい。すなわち、上記の概念と従来のモデルを組み合わせることで、次の5種類モデルを得ることになる。(1)大域的な強い重複検知、(2)大域的な弱い重複検知、(3)局所的な強い重複検知、(4)局所的な弱い重複検知、(5)重複検知なし。

2-4 本研究の成果

本研究では、上記の枠組みに基づき、重複検知能力と乱択一点集合問題の実行時間の関連を明らかにした、具体的な成果を以下に示す。

1. 局所的な強い重複検知のもとで、定数期待実行時間を有する一点集合乱択アルゴリズムを提案した。局所的な重複検知は大域的な重複検知よりも弱いモデルとなるので、この結果は直接的に大域的な強い重複検知能力を持つロボット群の乱択一点集合が定数期待時間で可能であることも意味する。既存研究により示されていた最良の結果は、大域的な重複検知を仮定して $O(n)$ 期待時間のアルゴリズムであるため、本成果は、従来よりも高速な一点集合が、より弱い仮定で実現可能であるという、2重の意味での向上が達成されている。
2. 大域的な弱い重複検知のもとで、期待実行時間 $O(\log n \cdot (\log \log n))$ の乱択一点集合アルゴリズムを提案した。これは従来知られていた $O(n)$ 時間のアルゴリズムを大幅に向上させる結果である。
3. 局所的な弱い重複検知を仮定した場合、いかなる乱択化アルゴリズムも期待実行時間が $\Omega(2^n)$ となることを示した。この結果から、本研究の枠組みにおいては、局所的な強い重複検知および大域的な弱い重複検知が多項式時間乱択アルゴリズム構成のための極小条件となることが示される。なお、自明な帰結として、この結果から重複検知なしのモデルにおける多項式時間乱択一点集合の不可能性を得ることが出来る。

3 離散空間における一点集合問題の可解性と時間計算量

3-1 課題の背景

前節において説明したロボットモデルでは、ロボットの移動空間として二次元平面上を考えたが、グラフのような離散的な空間におけるロボット群の協調問題も、しばしば取り上げられる話題の一つである（例えば、壁で仕切られた部屋間の移動等を考えた場合、各部屋への入退室を離散的な振る舞いとしてモデル化することは妥当である。このような場合、例えば一点集合問題は「全ロボットを一つの部屋に集める」ということに相当する）。このような離散空間上の振る舞いにおいては、空間の位相構造（すなわち、グラフにおける辺のつながり）が問題の可解性に影響を与える場合がある。これまでに、特定のグラフクラス（木、サイクル、グリッド等）を対象とした一点集合の可解性が研究されている。

3-2 本研究の成果

本研究では特にサイクルグラフを対象とした一点集合問題に着目する。サイクルグラフは単一の閉路からなるグラフであり、高い対称性を持つことが特徴として挙げられる。すなわち、サイクルグラフにおいては、グラフの位相構造だけから2つの異なる頂点を区別することができない、通常、考えているグラフの対称性が高いほど、ロボット群の問題を解くことが難しくなる傾向がある。サイクルグラフにおける一点集合問題の困難性を示す例として、図 3 を挙げる事ができる。すべてのロボットがサイクルグラフ上に均等に配置されている状況からすべてが同期的に実行する場合、状況の対称性より、すべてのロボットの動作もまた対称となる。そのため、いかなるアルゴリズムであろうとも、全ロボットが完全に停止する、あるいは均等配置を保ったまま巡回を続ける、のいずれかの実行が永久に繰り返されることになり、一点集合を達成することは不可能である。一般に、ロボットの初期配置に何らかの対称性を許した場合、サイクルグラフ上で一点集合問題を解くことは不可能であることが知られている。そのため、非対称な初期配置を前提としたときの問題の可解性が、サイクルグラフ上の一点集合に対する主な興味の対象となる。

従来の研究においては、大域的な弱い重複検知能力を仮定した上で、すべての非対称な初期状況、および一部の特殊な対称状況からの一点集合が可能であることが示されている。本研究では、同様の結果が、より弱いロボットの能力を仮定しても得ることが出来るかどうかについて研究を行い、以下のような結果を得た。

1. 局所的な弱い重複検知能力を仮定しても、非対称な初期状況からは一点集合が可能であることを示した。
2. 上記のアルゴリズムが、時間計算量の点においてある種のトレードオフを示していることを証明した。具体的には、従来のアルゴリズムが非対称な初期状況に対して $O(m)$ の実行時間で一点集合を達成する

のに対し、上記アルゴリズムは最悪時 $\Theta(nm)$ の実行時間となる。ここで、 n ロボット数、 m はサイクルグラフのノード数である。

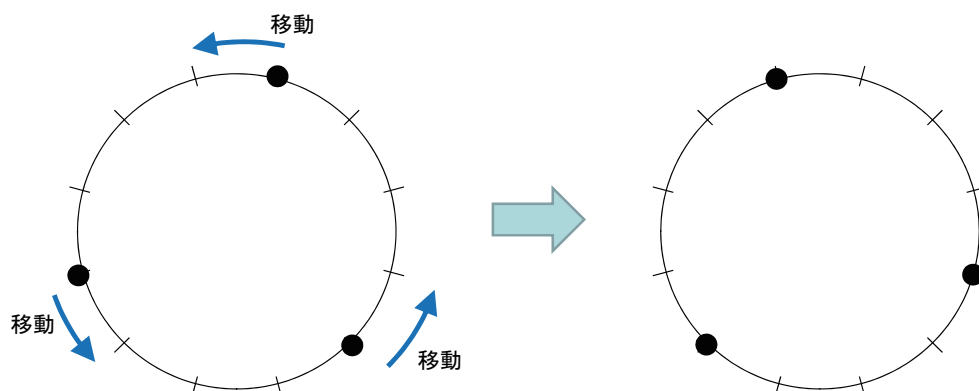


図 3 対称な配置と対称な動作

4 観測結果に誤差を含むロボット群の一点収束問題の可解性

4-1 課題の背景

実ロボットシステムにおいては、他のロボット位置の観測は何らかのセンシングデバイス、あるいは GPS 等の位置情報サービスを利用して実現されることが自然であるが、そのようなメカニズムはしばしば観測結果の誤差を含む場合がある。そのため、ロボット群のためのアルゴリズムはそのような誤差に対して頑健にデザインされる必要がある。

しかしながら、観測が誤差を含むような状況においては、ロボットの正確な目的地を計算することは不可能であり、例えば前述した一点集合問題などは解くことが自明に不可能である。そこで、本研究では、一点集合問題を緩和した一点収束問題を考える[4]。一点収束問題とは、任意の2ロボット間の距離を0に収束させる問題であり、近似的な一点集合問題と捉えることができる。本研究では、観測誤差を有するロボット群の一点収束問題に対して、その可解性を考察した。

4-2 観測誤差のモデル

本節では、ロボットの群の観測誤差に対する理論モデルについて説明する。本研究で考える観測誤差のモデルは、Cohen と Peleg による先行研究のモデルを一部拡張したものである[5]。

観測誤差は、角度誤差および距離誤差の2要素によって特徴づけられる。今、あるロボット r_1 が他のロボット r_2 を観測したとする。2節で述べた通り、各ロボットはそれぞれ独自の座標系を持っており、 r_1 の座標系における観測時の r_2 の実位置が $\mathbf{p} = r(\cos \theta, \sin \theta)$ であるとする。このとき、角度誤差 δ および距離誤差 ε が生じたとすると、 r_1 の観測結果において r_2 は座標 $(1 + \varepsilon)r(\cos(\theta + \delta), \sin(\theta + \delta))$ に観測されることになる。無論、 ε および δ の値がいくらでも大きく（小さく）なることを許容すると、観測結果は（誤差の影響が大きすぎるため）もはや実際の位置についての情報を全く含まないことになり、ロボット群のいかなる協調動作も不可能となる。そのため、角度誤差および距離誤差の絶対値についての上限 δ_0 、 ε_0 を設け、その範囲内での誤差が生じると仮定する。先行研究[5]においては、誤差上限の値と問題の可解性の関連が考察されている。

本研究では、個別の観測誤差については上記モデルを踏襲しつつ、複数台のロボットの観測について、より詳細なモデル化を検討する。一般に、観測対象となるロボットが複数台のとき、誤差の生じ方に関して以下の2通りが考えることができる。

1. 独立な誤差：一度の観測において、複数台のロボットが同時に観測される時、それぞれが異なる度合いの誤差を持ちうる。
2. 一様な誤差：一度の観測において、複数台のロボットが同時に観測される時、すべて等しい誤差を持つ（ただし異なるタイミングの観測においては誤差の度合いは異なる可能性がある）。

独立な誤差モデルは、先行研究[5]において考えられているモデルであり、一様な誤差モデルは本研究において新たに提案されたものがある。定義から分かるように、一様な誤差モデルのほうがより強い仮定となるが

実際のシステムにおいて生じる観測誤差の原因がデバイスのキャリブレーション等の問題により生じる場合は、一様誤差のモデルは妥当な仮定と考えられる。

4-2 本研究の成果

本研究の主たる興味は、一様誤差モデルを採用するおける仮定の強化が、問題の可解性にどのような影響を与えるかを明らかにすることである。従来の独立な誤差モデルでは、最大許容誤差が $\delta_0 < \pi/3$ および十分小さな $\varepsilon_0 (\ll 1)$ の場合のみ一点集合が可能であることが示されていた。本研究では、一様誤差モデルを導入することで、許容誤差限界が $0 < \varepsilon_0 < 1$ 、および $\delta_0 < \pi/2$ まで拡張可能となることを示した。また、 $\delta_0 \geq 0$ の場合において一様誤差モデル上で一点収束を達成するアルゴリズムが存在しないことも併せて示した。この結果は本研究の可解条件が最大許容角度誤差の点でタイトあることを意味する。

5 故障=復帰モデルにおけるフロッキング問題への故障検知器を利用したアプローチ

5-1 課題の背景

一部のロボットが停止故障を起こしうるシステムにおいて、故障から復帰したロボットが、実行中のタスクに速やかに再参加できることは実用上重要な特性の一つである。そのような特性は、一般に故障=復帰モデルと呼ばれる故障モデルを導入することで考えられることが多い。

通常の永久故障モデルと異なり、故障=復帰モデルにおいては一部の故障ロボットが故障状態から回復し、再び正常ロボットとして動作を行うことを許す（ただし、故障したロボットが必ず回復するという保証はなく、また一度回復したロボットが再度故障することも起こり得る）。故障=復帰モデルにおける困難制の一つとして挙げられるのは、あるロボットが正常であるか故障状態であるかは、観測結果からは判断がつかないという点である。もしロボットが正常（あるいは回復により将来的に正常になり得るならば）システムはその復帰を受け入れることを考慮しなければならない。一方、同ロボットが永久的に故障状態にあるならば、システムはそのロボットを無視して他のロボットのみで協調動作を続ける必要がある。逆に述べるならば、上記判断を行うためには、各ロボットが故障状態にあるかどうかを検知できる必要がある。しかしながら、一般に非同期および半同期モデルにおいては、単に動作が遅れているだけのロボットと、故障して動作を停止しているロボットにはその振る舞いの差が他のロボットには同一に見える（完全同期ならば、全ロボットは同期的に同じスピードで動作するので、「動作が遅れる」ということは起こり得ず、振る舞いは異なる）。そのため、一般に故障の起こり得る非同期・半同期システムにおいては、解ける問題のクラスが大幅に小さくなることが知られている[7]。これはロボットシステム関わらず、一般の（計算機ネットワーク等も含めた）分散システムにおいて同様に成立する否定的事実である。従来の分散アルゴリズム研究では、この不可能性を回避するために必要な仮定について多くの研究が成されており、特に、故障検知メカニズムを利用したアプローチがよく知られている[2]。

故障検知メカニズムは、システム内の各計算機に、故障検知器と呼ばれる仮想的なデバイスが存在することを仮定し、故障検知器が返す他のプロセスの故障情報を利用することで与えられた問題を解くというものである。ただし、故障検知器は必ずしも正確な検知情報を返すことは保証されておらず、一部誤った情報を返す場合がある。このとき、故障検知器が返す情報の正確性をもってモデルの強弱を測り、与えられた問題を解くために必要かつ十分な仮定を探るのが故障検知メカニズムによるアプローチである。

5-2 本研究の成果

本研究では、従来の分散アルゴリズムにおいて用いられてきた故障検知メカニズムによるアプローチを、ロボットシステムに導入することで、故障の存在下におけるロボット群の問題可解性について検討する。

本研究では、故障検知のメカニズムとしてよく知られたクラスである◇P(eventual perfect)を利用してアルゴリズムの設計を行う。◇Pとは、(1)いずれ永久に故障するロボットはいずれ正しく故障検知される、(2)正常なロボットは故障と誤検知されない(3)断続的に故障を繰り返すロボットについては一切の保証がない、の3条件を満たすような故障検知器である（なお、(3)の場合は、複数のロボット間で検出結果が異なる場合がある。すなわち、断続的に故障を繰り返すロボット r_1 は他のあるロボット r_2 には正常と認識されるが、さらに別のロボット r_3 においては故障と認識される場合が起こりえる）。この故障検知器を利用して、本研究ではフロッキング問題に対するアルゴリズムを構成した。フロッキング問題とは、リーダとなるロボットを起点とした隊列を形成し、隊列を維持したまま与えられる軌跡に沿って移動させる問題である(図4)。

前述の一点集合問題等と異なり、フロッキング問題はアルゴリズムに従ってロボットを「動き続けさせる」必要があり、そのような問題に対する故障復帰のメカニズムを実現することは容易ではないが、本研究では故障検知器によりアルゴリズムを上手く抽象化、モジュール化することで、簡潔な設計を実現している。

報告者の知る限りでは、この成果はロボット群のアルゴリズム設計に対して故障検知メカニズムによるアプローチを試みた初めての論文である。

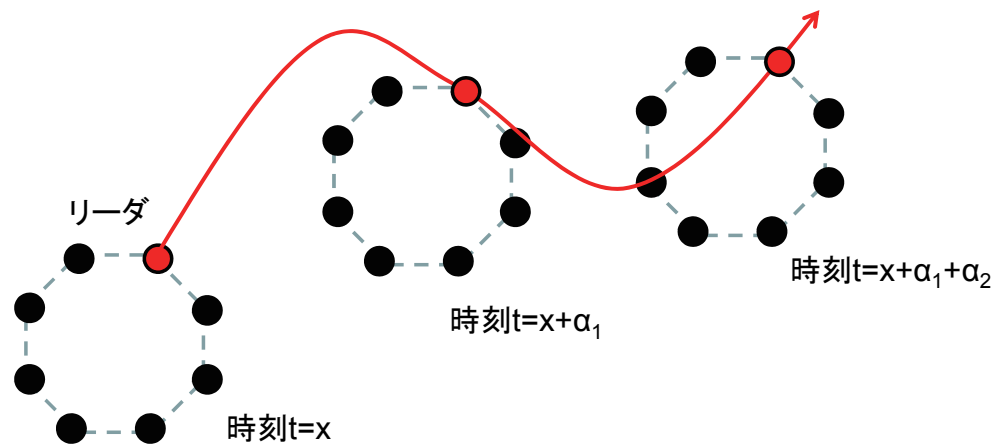


図 4 正多角形を隊列としたフロッキングの例

6 おわりに

本研究では、自律分散ロボット群のための新しい理論基盤の構築を目指し、主に乱択化を利用したアルゴリズムと耐故障性を有するアルゴリズムの設計手法、およびその理論的境界について研究を行った。本研究で得られた成果は理論的に見て興味深い結果が多いが、自律分散ロボット群の理論は未だ発展途上段階にあり、特に実システムとの整合性については今後さらなる研究が必要であると考えられる。また、本研究では自律分散ロボット群の設計に対しアルゴリズム的な方向からのアプローチを取っているが、一方で、制御理論等を主たるツールとして同様の問題に取り組むアプローチも近年発展を遂げている。今後は両手法の融合的な手法についても研究を行っていく必要があると考える。

【参考文献】

1. N. Agmon and D. Peleg. “Fault-tolerant gathering algorithms for autonomous mobile robots”. *SIAM Journal of Computing*, 36(1):56–82, 2006.
2. T. D. Chandra and S. Toueg. “Unreliable failure detectors for reliable distributed systems”. *Journal of the ACM*, 43(2):225–267, 1996.
3. M. Cieliebak, P. Flocchini, G. Prencipe, and N. Santoro. “Solving the robots gathering problem”. In *Proc. of 30th International Colloquium on Automata, Languages and Programming (ICALP)*, pages 1181–1196, 2003.
4. R. Cohen and D. Peleg. “Convergence properties of the gravitational algorithm in asynchronous robot systems”. *SIAM Journal on Computing*, 34(6):1516–1528, 2005.
5. R. Cohen and D. Peleg. “Convergence of autonomous mobile robots with inaccurate sensors and movement”. *SIAM Journal on Computing*, 38:276–302, 2008.
6. X. D’efago, M. Gradinariu, S. Messika, and P. R. Parv’edy. “Fault-tolerant and self-stabilizing mobile robot gathering”. In *Proc. of 20th International Symposium on Distribute Computing (DISC)*, volume 4167 of *LNCS*, pages 46–60, 2006.
7. M. J. Fischer, N. A. Lynch, and M. S. Paterson. “Impossibility of distributed consensus with one faulty process”. *Journal of the ACM*, 32(2):374–382, 1985.
8. P. Flocchini, G. Prencipe, N. Santoro, and P. Widmayer. “Gathering of asynchronous robots with limited visibility”. *Theoretical Computer Science*, 337(1-3):147–168, 2005.

9. G. Prencipe. "Impossibility of gathering by a set of autonomous mobile robots". *Theoretical Computer Science*, 384(2-3):222–231, 2007.
10. I. Suzuki and M. Yamashita. "Distributed anonymous mobile robots: Formation of geometric patterns". *SIAM Journal of Computing*, 28(4):1347–1363, 1999.
11. M. Yamashita and I. Suzuki. "Characterizing geometric patterns formable by oblivious anonymous mobile robots". unpublished.
12. 片山喜章,山下雅史. "ハウ・ツー・ランデブー",計測と制御,11(46), 853-859, 2007年11月.

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Mobile Robot Gathering Algorithm with Local Weak Multiplicity in Rings	17th International Colloquium on Structural Information and Communication Complexity (SIROCCO), Vol. 6058 of LNCS, pp 101-113.	2010年6月
Randomized Gathering of Mobile Robots with Local-Multiplicity Detection	The 11 th International Symposium on Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems, Vol.5873 of LNCS, pp 384-398	2009年11月
Oracle-Based Flocking of Mobile Robots in Crash-Recovery Model	The 11 th International Symposium on Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems, Vol.5873 of LNCS, pp 683-697	2009年11月
Convergence of Mobile Robots with Univormly-Inaccurate Sensors	16th International Colloquium on Structural Information and Communication Complexity (SIROCCO), Vol.5869 of LNCS, pp 309-322.	2009年5月