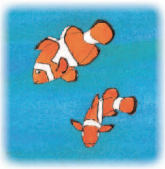
リング上の自律分散ロボット群に対する一点集合アルゴリズム



研究ノート

大　下　福　仁*

Gathering algorithms for oblivious mobile robots in rings

Key Words：Distributed algorithm, Gathering, Anonymous robot, Mobile robot, Look-Compute-Move

1　はじめに

自律分散ロボット群とは，複数のロボットが協調的に動作することで，群全体として一つのタスクを実現するシステムである．自律分散ロボット群は，宇宙や深海など，人間が直接管理できない厳しい環境で利用されると考えられる．このような環境で全ロボットを集中管理することは難しく，各ロボットが自律的に動作しながら協調し，群全体としてタスクを実現することが必要となる．一方で，多数のロボットを扱うためには，できるだけ低いコストでロボットを実装しなければならない．そのため，あるタスクを実現するために必要最低限な機能を明らかにすることが重要である．

鈴木，山下らは，文献 [5] にて，自律分散ロボット群の協調問題を扱う理論モデルを構築した．このモデルのロボットは，均一であり，メモリを持たず，直接通信が不可能であり，センサの情報のみで動作を決定する．このような弱い能力のロボットを基本とし，さまざまな協調問題に対して，問題を解くことができるかどうか，また，問題を解くために追加すべき必要最低限な能力は何か，などが考察されている．ユークリッド平面，グラフネットワークを対象としてさまざまな研究が行われているが [4]，本稿では，リング上の一点集合問題について代表的なアルゴリズムを紹介する．

*Fukuhito OOSHITA

1978年11月生
大阪大学大学院情報科学研究科博士後期課程退学（2003年）
現在、大阪大学　大学院情報科学研究科コンピュータサイエンス専攻アルゴリズム設計論講座　助教　博士（情報科学）
分散アルゴリズム
TEL：06-6879-4117
FAX：06-6879-4119
E-mail：f-oosita@ist.osaka-u.ac.jp

2　モデルと問題定義

システムは，n ノードのリングと k（≥3）個のロボットで構成される．初期状況では，各ノードに高々1個のロボットが存在する．ノードに ID はなく，ロボットはノードを見分けることができない．全てのロボットは均一（identical）である．すなわち，全てのロボットは同じアルゴリズムを実行し，その見た目で区別することができない．またロボットはメモリを持たず（oblivious），互いに直接通信を行うことはできない．

各ロボットはセンサを使って他のロボットの相対的な位置を観測できる．ただし，ロボットによってリングの向きの認識が異なる可能性がある．例えば，図1(a) において，A と B がそれぞれ矢印の方向を右向きと認識しているとする．このとき，A と B が観測する情報は，ともに「右向きに 2,1,0,2,0,1 の間を空けてロボットが存在する」である．つまり，A と B は全く同じ状況を観測することになる．

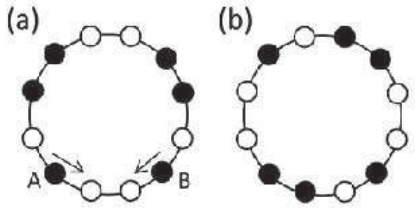


図1: (a) 辺 - 辺対称な状況と (b) 周期的な状況

ロボットは，重複感知能力（multiplicity detection）をもつ．本稿では，大域的な重複感知または局所的な重複感知のいずれかを扱う．大域的な重複感知では，任意のノードに対して，ロボットの重複（2台以上のロボットが存在するか）を感知できる．局所的な重複感知では，自身が存在するノードについてのみ，重複を感知できる．いずれの場合も，ノード

に存在するロボットの正確な数を知ることはできない．ロボットが2台以上存在するノードを重複ノードと呼ぶ．

ロボットは，観測，計算，移動という1サイクルを繰り返してアルゴリズムを実行する．すなわち，状況を観測し，観測結果に基づいて隣接ノードへ移動するかどうかを計算し，その結果に基づいて移動する（または同じノードに留まる）．本稿では非同期モデルを扱う．すなわち，1サイクルに要する時間が有限であるという以外，観測，計算，移動のタイミングに一切の仮定をおかない．また，ロボットには乱数発生器が存在せず，決定性アルゴリズムしか実行できないとする．

全ロボットがアルゴリズム A を実行したとき，有限時間内に1ノードに全ロボットが集合するなら，アルゴリズム A は一点集合問題を実現するという．

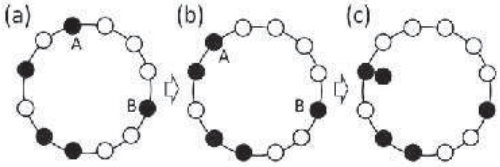


図2: 文献 [3] のアルゴリズム

3　一点集合の不可能な初期状況

初期状況によっては一点集合の実現が不可能な場合がある [3]．例えば，図1(a) のように，ロボットの配置が対称的であり，対称軸が辺を通っている場合（辺-辺対称と呼ぶ）は，どのようなアルゴリズムを用いても一点集合を実現できない．図において，対称軸の左側のロボットはAと同じ向きを左向き，対称軸の右側のロボットはBと同じ向きを左向きと認識しているとする．この場合，対称な位置にいるロボットは全く同じ状況を観測する．各ロボットは同じ決定性アルゴリズムを実行するため，同じ状況を観測した場合，その動作は同じである．そのため，全ロボットが全く同じタイミングで動き続けると，対称な状況を保ち続ける．そのため，対称なロボットが集合しようとしても，対称軸の通る辺ですれ違い続けて集合できない．

同様に，図1(b) のように，ロボットの配置が周期的な場合も，周期的な状況を保ったまま動き続けるため一点集合を実現できない．

大域的な重複感知を用いる場合，上記以外のほとんどの状況において一点集合が実現可能である．例外的に解けない状況がいくつか存在するが，詳細は省略する．

4　大域的な重複感知を用いたアルゴリズム

文献 [3] では，対称的でも周期的でもない状況と周期的でなくロボット数が奇数の状況について，大域的な重複感知を用いたアルゴリズムが提案されている．

本稿では，対称的でも周期的でもない状況に対するアルゴリズムを紹介する．ロボットは大域的な重複感知を持っており，初期状況で重複ノードはない．そのため，1つだけ重複ノードを作成すれば，近いロボットから順に重複ノードへ集まることで一点集合を実現できる．

では，重複ノードの作り方を説明する．アイデアは，ロボットの間隔が最大な部分に注目し，その端点のロボットを動かして最大間隔を広げていくことで，重複ノードを1つ作成するというものである．図2(a) の状況を考えると，AとBが動く候補となる．しかし，両方を動かすと，動作タイミングによって2つの重複ノードが発生するなどの問題が起こる．そのため，AとBのどちらかを選んで動かす必要がある．この選択を行うために，A, Bそれぞれにラベルを割り当てる．このラベルは，最大間隔の方へ向かって，ロボット間の距離を並べたものとする．つまり，Aのラベルは（3,2,0,1,1），Bのラベルは（3,1,1,0,2）となる．そして，辞書順で大きいラベルをもつ方が最大間隔を広げる方向に動く．対称的でも周期的でもない状況では，ラベルは必ず異なり，1つのロボットを選ぶことができる．図2(a) でAが動いて (b) の状況となり，(b) でAが動くことで，重複ノードが1つ作成される．ロボットの間隔が最大の部分が複数ある場合も考えられるが，同様のラベルを利用して1つのロボットを選ぶことができる．

5　局所的な重複感知を用いたアルゴリズム

4章では，大域的な重複感知を用いたが，ネットワーク全体で重複ノードを感知できるという仮定はやや強力である．そのため，近年，文献 [1] などで局所的な重複感知が考察されている．文献 [1] では，

$k < n/2$という条件のもとで，対称的でも周期的でもない状況に対して，局所的な重複感知を用いて一点集合を実現するアルゴリズムが提案されている．

アルゴリズムのアイデアを簡単に説明する．説明の簡略化のために，最大間隔が一つだけ（d_1とする）の状況を考える．さらに，d_1の隣の間隔が異なっている場合を考え，大きい方をd_2とする（図3(a)）．以下，d_1，d_2に続いて，間隔を順に$d_3, d_4, \ldots$とする．説明の簡略化のために，さらに$d_2 \geq 2$，$d_3 = 0$であると仮定する[1]．

4章とは異なり，1つだけ重複ノードを作っても，別のノードからそれを確認することはできない．そのため，ロボットの間隔だけを用いて特定できるノードに，重複ノードを作成しなければならない．具体的には，d_3とd_4 の間のノード（図3(a)でDが存在するノード）を重複ノードにする．この条件にあてはまるノードが変わらないように，以下の条件を満たしながらロボットを動かす．

- d_2とd_3に隣接するロボット（図3(a)のB,C,D）を動かさない．
- 最大間隔d_1を広げるようにロボット（図3(a)のA）を動かす．
- d_1の隣の間隔は，d_2の方が他方より大きくなるようにする．

図3を用いて動作を簡単に説明する．上記の条件を満たすために，AとEの間隔がBとCの間隔より小さい状態を保ちながら，Aを徐々にDへ近づけていく．まず，(a)でAが動く．(b)でAが動くとEに重なってしまうため，Eを先に動かしてAとEの間隔を1にする．
$d_2 \geq 2$という条件があるため，これでも上記の条件は満たしたままである．同様にして，(c)でAを動かし，(d)の状況となる．実行を続けていくことで，(e)のようにB, C以外がDに集まった状況となる．

図3(e)のように，3ノードにロボットが存在する状況になれば，真中のロボットが隣に移動することで，2ノードにロボットが存在する状況(f)になる．

[1] 文献[1]の対象とする状況は，すべてこの条件を満たす状況へ遷移させることができる．

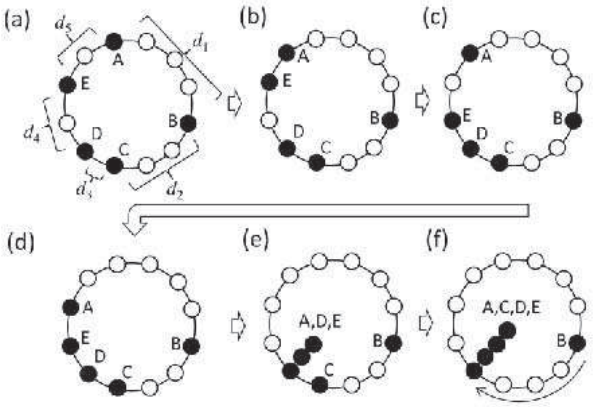


図3: 文献[1]のアルゴリズム

最後に，局所的な重複感知を用いて，重複していないロボットが移動することで一点集合が実現する．

上記のアルゴリズムは，対称的な状況では動作しない．一方，文献[2]では，ロボットの台数が奇数の場合に対して，周期的でなければ対称的であっても動作するアルゴリズムが提案されている．

6　おわりに

本稿では，リング上の自律分散ロボット群に対する一点集合アルゴリズムを紹介した．局所的な重複感知は最近提案されたばかりであり，各問題の可解性を明らかにすることが今後の課題である．一方，メモリや通信を利用するなど，ロボットの能力を強めた場合に対するアルゴリズムの開発も重要な課題である．

参考文献

[1] T. Izumi, T. Izumi, S. Kamei, and F. Ooshita. Mobile robots gathering algorithm with local weak multiplicity in rings. In *SIROCCO*, pages 101−113, 2010.

[2] S. Kamei, A. Lamani, F. Ooshita, and S. Tixeuil. Asynchronous mobile robots gathering from symmetric configurations without global multiplicity detection. In *SIROCCO*, pages 150−161, 2011.

[3] R. Klasing, E. Markou, and A. Pelc. Gathering asynchronous oblivious mobile robots in a ring. *Theoretical Computer Science*, 390:27−39, 2008.

[4] M. Potop-Butucaru, M. Raynal, and S. Tixeuil. Distributed computing with mobile robots: an

introductory survey. In *NBiS*, pages 318−324, 2011.

[5] I. Suzuki and M. Yamashita. Distributed anonymous mobile robots: Formation of geometric patterns. *SIAM Journal of Computing*, 28(4):1347−1363, 1999.