

2台のモジュールロボットの集合と結合について

宇佐美 智之^{2,a)} 山内 由紀子^{2,b)}

概要: 本研究では、2次元正方形グリッド上を移動する2台のモジュールロボットが集合して、新しい1台のモジュールロボットに結合するアグリゲーション問題を提案する。モジュールロボットとは、モジュールと呼ばれる自律的に移動する計算主体が複数集まり1台のロボットを構成する分散計算モデルである。各モジュールは識別不能でメモリを持たないが、モジュールの配置をモジュールロボットのメモリとして利用できることが知られている。山田(2022)は、5個のモジュールで構成されたモジュールロボット2台が集合するアルゴリズムを提案した。本研究では、山田のアルゴリズムと集合したモジュールロボットを結合させるアルゴリズムを統合し、5個のモジュールで構成されたモジュールロボット2台がアグリゲーション問題を解くアルゴリズムを提案する。

キーワード: 並列・分散アルゴリズム, アルゴリズム理論 - すべて, 分散・協調問題

Gathering and Integration for Two Metamorphic Robotic Systems

TOMOYUKI USAMI^{2,a)} YUKIKO YAMAUCHI^{2,b)}

Abstract: We propose the aggregation problem that requires two metamorphic robotic systems (MRSs) in the 2D square grid integrate into a single MRS. An MRS is a distributed computation model, which consists of autonomous mobile computing entities, called modules. Modules are anonymous (i.e., indistinguishable) and they are not equipped with memory. However, the shape of an MRS can be used as its memory. Yamada (2022) presented a gathering algorithm for two MRSs, each of which consists of five modules. We present an aggregation algorithm that consists of Yamada's algorithm and an integration algorithm that integrates gathered MRSs into a single MRS.

Keywords: Parallel/distributed algorithms, Algorithm Theory - ALL, Distributed problem solving and coordination

1. はじめに

自律的に移動、センシング、通信を行うモバイルロボットやドローン、分子ロボットの群れは、空中、水中、宇宙空間から体内といったマクロからマイクロまでの世界において、人の介入が困難な環境での活躍が期待されている。分散協調とは、多数の計算主体が相互に協調し、全体として目標を達成することである。例えば惑星の探査機は、通信遅延の問題や一部の機体が故障しても残りの機体で資源探

査を進めるといったリスク分散のために、複数の小型探査ロボットの分散協調の研究開発が進んでいる [8]。マイクロの世界では、分子ロボットを群れとして制御することにより、最大直径 30 マイクロメートルの物質を効率的に輸送するタスクの達成に成功した [7]。

モバイルロボット群のような複数の移動する計算主体による分散協調理論の研究は、理論計算機科学の分野で活発に行われてきた。想定するアプリケーションのスケールや場面に応じて、連続空間上のモバイルロボットモデル [6] や離散空間上の *amoebot* モデル [2], モジュールロボットモデル [3] などが様々なモデルが提案されている。マイクロな世界を想定すると、低機能な多数の計算主体が分子間力

¹ 九州大学 大学院システム情報科学府

² 九州大学 大学院システム情報科学府

^{a)} usami.tomoyuki.826@s.kyushu-u.ac.jp

^{b)} yamauchi@inf.kyushu-u.ac.jp

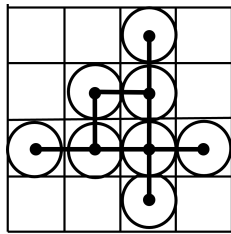


図 1: 連結なモジュール群。モジュール間の線分はモジュール同士の隣接関係を表す。

のような繋がりを維持して移動するモデルが考えられる。2次元正方形グリッド上の**モジュールロボットモデル** [3] は低機能な計算主体群を想定した分散計算モデルのひとつであり、モジュールと呼ばれる識別不能でメモリを持たないモバイル計算主体が多数集まり、1台のロボットを構成する。各モジュールは2次元グリッドの各セルに高々1個存在し、単体では移動できず、他のモジュールに沿って回転またはスライドという2種類の移動を行う。個々のモジュールの局所的な移動により、モジュールロボット全体が変形や移動を行うことができる。あるセルに対し、境界を共有する4つのセルを**隣接するセル**と呼び、2個のモジュール m_i, m_j がお互いの隣接するセルに存在する時、 m_i, m_j は**隣接する**という。モジュールを頂点とし、隣接するモジュール間に辺を引いたグラフを考える。モジュールロボットモデルでは各モジュールが移動しても、このグラフが連結性を保つことが要請されている。2次元正方形グリッド上において x - y 座標系を考え、一般性を失うことなく x 軸の正の向きを東、 y 軸の正の向きを北、 x 軸の負の向きを西、 y 軸の正の向きを南としている。全モジュールが東西南北を合意できる時、モジュールロボットが**大域的なコンパスを持つ**といい、そうでない時はモジュールロボットが**大域的なコンパスを持たない**という。

移動計算主体を点とみなす**モバイルロボットモデル**において、2台の計算主体が任意の初期配置から予め決められていない1点に集まるランデブー問題は最も基本的な分散協調問題として研究が行われてきた [1]。本研究では、2台のモジュールロボットが、任意の初期配置から集合し、2台が結合して新たに1台のモジュールロボットとなる**アグリゲーション問題**を提案する。2台のモジュールロボットが**集合する**とは、2台のモジュールロボットが任意の初期配置から、2台に含まれる任意のモジュールが他の全てのモジュールを観測できる配置になるまで移動することである。2台のモジュールロボットが**結合する**とは、2台のモジュールロボットがお互いを観測するような初期配置から、2台に含まれるモジュール全体で連結性を満たすような配置になるまで移動することである。アグリゲーションの応用例として、モジュールロボットが他のモジュールロボットと結合して充電機器のあるセルなどまで牽引することが考えられる。また、車輪のついたモジュールであれば、

モジュールが増えるほど発生するトルクも増加する。したがって、複数台のモジュールロボットが結合して1台になり、モジュール数を増やすことで物を押し出す力が必要な作業が可能となる。

山田は、2次元正方形グリッド上の2台のモジュールロボットの集合問題について、大域的なコンパスを持たない5個のモジュールから成るモジュールロボット2台が、四方を壁に囲まれた長方形領域内の特定の初期配置から集合するアルゴリズムを提案した [5]。本研究では、山田のアルゴリズムをもとに、5個のモジュールから成る2台のモジュールロボットが1台のモジュールロボットに結合するアグリゲーションアルゴリズムを提案する。各モジュールロボットを構成するモジュールが4個以下の時、2台のモジュールロボットが集合できないことを示し、アグリゲーション問題を解くために必要十分なモジュール数が5個であることを示す。

2. 準備

2.1 モデル

モジュールロボットは2次元正方形グリッド上で自律的に移動を行う**モジュール**と呼ばれる識別不能な計算主体の集合から構成されたシステムである。1台のモジュールロボットを構成する n 個のモジュールの集合を $R = \{m_1, m_2, \dots, m_n\}$ とする。 n をモジュールロボット R の**サイズ**とする。フィールド内に2台のモジュールロボットが存在する場合は各モジュールロボットを R_1, R_2 とする。モジュールは匿名であるが、記述のため m_i, R_j という表記を用いる。

R は幅 w 、高さ d の**フィールド**と呼ばれる、長方形領域内を移動する。2次元正方形グリッドを構成する各セルには同時に高々1個のモジュールが配置できる。 x - y 座標系を考え、セルの左下の座標でセルを指す。フィールドの左下のセルを $c_{0,0}$ 、右上端のセルを $c_{w-1,d-1}$ と表す。セル (x,y) を $c_{x,y}$ と表す。 x 軸の正の向きを東、 y 軸の正の向きを北、 x 軸の負の向きを西、 y 軸の正の向きを南とする。 R のどのモジュールも東西南北の方角に合意している時、 R は**大域的なコンパスを持つ**という。そうでない場合、つまり、 R のすべてのモジュールが方角に合意しているとは限らない時、 R は**大域的なコンパスを持たない**という。 x 座標または y 座標が同じセルの集合をセルの**列**という。フィールドは、**壁**と呼ばれる4つのセルの列 $\{(x,y) | x = -1, -1 \leq y \leq d\}$ (西の壁), $\{(x,y) | -1 \leq x \leq w, y = -1\}$ (南の壁), $\{(x,y) | x = w, -1 \leq y \leq d\}$ (東の壁), $\{(x,y) | -1 \leq x \leq w, y = d\}$ (北の壁) に囲まれている。 R は壁に囲まれた内側の領域内を移動し、壁のセルには入れないとする。

セル $c_{i,j}$ は4つのセル $c_{i+1,j}, c_{i,j+1}, c_{i-1,j}, c_{i,j-1}$ と境界を共有している。それら4つのセルはセル $c_{i,j}$ に**隣接す**

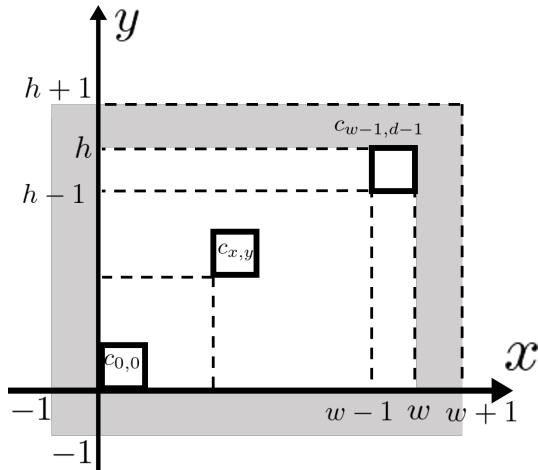


図 2: フィールドとそれを囲む壁。

るという。モジュール m_i が存在するセルがモジュール m_j が存在するセルに隣接しているとき、 m_i と m_j は隣接するという。

各モジュールは観測、計算、移動の3つのフェーズから成るサイクルを繰り返し実行する。観測フェーズでは自身の局所座標系で他のモジュールや壁の位置を観測する。各モジュールは自身のいるセルの上下左右 k セルまでを観測でき、その範囲を観測可能範囲という。計算フェーズでは観測結果をもとに、共通の決定性アルゴリズムを用いて移動経路を決定する。各モジュール無記憶で、計算には現在の観測結果のみを用いる。計算結果をもとに移動フェーズで移動する。全てのモジュールはこれら3つのフェーズを各時刻 $t = 0, 1, 2, \dots$ に同期して実行する。

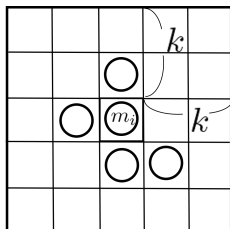


図 3: モジュール m_i の観測可能範囲 k 。 $k = 2$ の例。

各モジュール m_i は大域座標系を知らず、自身の局所座標系をもとに計算を行う。ただし、局所座標系の原点は現在の自身の存在するセルとし、座標軸はセルの座標軸と並行とする。つまり、各モジュールはセルの座標を識別できず、他のモジュールとは座標軸も異なる局所座標系のもとでアルゴリズムを実行する。ただし、すべてのモジュールは時計回りに合意しているとする。

モジュールは回転とスライドという2種類の動きによって移動を行う。

- 回転：あるモジュールが他のモジュールを中心に 90° 回転する移動方法である。時刻 t で m_i が他のモジュール m_j に隣接している時、 m_i は m_j を中心として時計

回りまたは反時計回りに 90° だけ回転して空のセルに移動することができる。ただし、 m_i は空でないセルを通過できず、時刻 t において m_j は移動できない。

- k -スライド：あるモジュールが、一列に並んだモジュールに沿って一方向に k セル進む移動方法である。時刻 t において、 m_i に隣接したモジュール m_j が他の1台以上のモジュールと列を作るとき、 m_i はその列に沿って並行に滑り現在のセルから列に隣接した空のセルまで移動することができる。ただし、 m_i は空でないセルを通過できず、時刻 t においてこの列を構成するモジュールはいずれも移動できない。

図 4 は回転、1-スライド、2-スライドの例である。

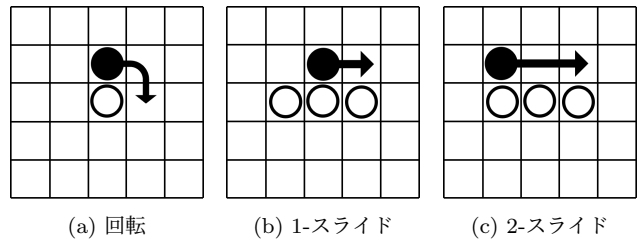


図 4: モジュールの移動の例。

各時刻 t に R のモジュールが占めるセルの集合を R の配置 C_t と呼ぶ。各時刻 t に動かないモジュールが占めるセルの集合を B_t とする。 R の局所的な形状を R の状態と呼ぶ。 R の状態は、 R の現在の位置と方向の情報を含まない。

次に、モジュールの連結性について説明する。モジュールが存在しているセルを頂点、隣接するモジュール間に辺を持つグラフ $G_t = (C_t, E_t)$ を考える。グラフ G_t が連結であるとき、配置 C_t は連結であると言う。

モジュールロボットは各時刻 t で以下の3つの条件を満たさなくてはならない。

- (1) 任意の時刻 t において、 C_t は連結である。
- (2) 任意の時刻 t において、 B_t は連結である。
- (3) 各時刻におけるモジュールの移動の軌道が重ならない。この条件を満たす場合、同時刻に複数のモジュールが移動してよいものとする。2個以上のモジュールの移動経路が重なった時、モジュールが衝突するという。

2.2 問題定義

本稿では2台のモジュールロボットによるアグリゲーション問題を提案し、問題を解くために必要十分なモジュール数を調べる。アグリゲーション問題を解くことで、集合問題と結合問題の2つの問題を解く。

2台のモジュールロボットによる集合問題とは、長方形フィールド中の2台のモジュールロボットが、任意の初期配置から、2台のモジュールロボットに含まれる全てのモジュールに対して、任意のモジュールが他の全てのモジュールを観測するような終端配置となる問題である。

2台のモジュールロボットによる結合問題とは、モジュールロボット2台に含まれる全てのモジュールに対し、任意のモジュールが他の全てのモジュールを観測するような任意の初期配置から、2台のモジュールロボットが結合して新しい1台のモジュールロボットに結合した終端配置となる問題である。2台のモジュールロボットが結合するとは、2台のモジュールロボットがお互いを観測するような初期配置から、2台のモジュールロボットに含まれるモジュール全体で連結性を満たすような配置になることである。

2台のモジュールロボットによるアグリゲーション問題とは、長方形フィールド中の2台のモジュールロボットが、任意の初期配置から新しい1台のモジュールロボットに結合した終端配置となる問題である。

3. アグリゲーション問題

本章では、山田 [5] が提案した集合アルゴリズムをもとに、5個のモジュールから成るモジュールロボット2台による2次元正方形グリッド上のアグリゲーション問題を解くアルゴリズムを与える。提案手法では、2台のモジュールロボット R_1, R_2 が集合した後、結合問題を解く。その時、 R_1, R_2 全体の初期配置の対称性が重要となる。

3.1 山田の集合アルゴリズム

山田 [5] は、幅 w 、高さ $h (w \neq h)$ の長方形フィールドにおいて大域的なコンパスを持たない5個のモジュールから成る2台のモジュールロボットが、同じモジュールロボットに属するどのモジュールの組も同一の観測結果を持たない任意の初期配置から、同一の経路パス A に沿って往復し続けることで、有限時間内に集合するアルゴリズムを提案した。パス A はフィールドに対して以下のように定める。

- (1) 一般性を失うことなく、長方形フィールドの長辺をそれぞれ北の壁、南の壁とし、短辺をそれぞれ西の壁、東の壁と仮定する。
 - (2) 始点を南西の角とする。
 - (3) 北東方向に南の壁となす角 45° で北の壁まで直進する。
 - (4) 北の壁で東へ1セルだけずれる。
 - (5) 南西方向に北の壁となす角 45° で南の壁まで直進する。
 - (6) 南の壁で東へ1セルだけずれる。
 - (7) 北東の角に到達するまで、(3) から (6) を繰り返す。
- 以上の手順により、 $w \neq h$ となる任意の長方形フィールドに対して図5に示したような一筆書きの経路パス A が一意に定まる。

モジュールロボット $R_i (i = 1, 2)$ は、基本の移動として壁に到達するまで正方形グリッドに対して 45° だけ傾きのある、斜めの移動を繰り返す。 R_i が斜めの移動を繰り返し、フィールドの角以外で壁に到達した場合、パス A に沿っているなら、壁は必ず進行方向左手の斜め 45° に位置する。従って、 R_i が壁に到達した時、進行方向に対する壁

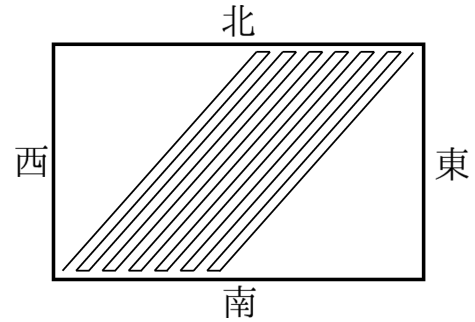


図5: パス A .

の角度によって次の2通りの移動が考えられる。

- 壁が前方右手の斜め 45° にある場合 (図6の点線矢印)。パス A に沿って往復するなら壁が進行方向左手の斜め 45° に位置するはずなので、全モジュールはこの時点で R_i がパス A に沿って移動していないことに合意できる。この時、直前の進行方向が南西方向であれば 90° だけ方向転換し、北東方向であれば壁に沿って角まで南下する。この軌道修正により、モジュールロボットは有限数時間内にパス A 上に乗ることができる。
- モジュールロボットが壁に到達した時、壁が前方左手の斜め 45° にある場合 (図6の実線矢印と破線矢印)。 R_i はパス A に沿って移動している可能性がある。 R_i は 180° だけ方向転換をした後、斜めの移動を繰り返す。到達した壁が南または北の壁、東または西の壁それぞれの場合で、 R_i は次のように移動が決定できる。
 - 北の壁か南の壁に到達した場合 (図6の実線矢印)。次に到達する壁は、進行方向に対して左手側と右手側のどちらに位置する場合も起こりうる。壁が左手側の場合、 R_i は向かい合った壁を往復しており、パス A に沿って移動できている。壁が右手側の場合、 R_i がパス A に沿ってないことがわかり、3.1の手順に従って軌道修正する。
 - 東の壁か西の壁に到達した場合 (図6の破線矢印)。 R_i は東の壁か西の壁において壁を進行方向左手に観測するため 180° だけ方向転換する。ただ、南北の壁が長辺となるため、次に到達する壁は必ず進行方向右手側に位置し (図6の点線矢印の一部)、 R_i がパス A に沿っていないことがわかる。この時、 R_i は3.1の手順に従って軌道修正する。

各モジュールは東西南北に合意しないが、壁との角度だけで次ステップの移動を決定できる。

以上より、パス A に沿って移動しないモジュールロボットも、壁との角度から進行方向を修正することで有限時間内にパス A に沿って往復できる。2台のモジュールロボットはパス A 上でいつかはすれ違うため、必ず集合できる。

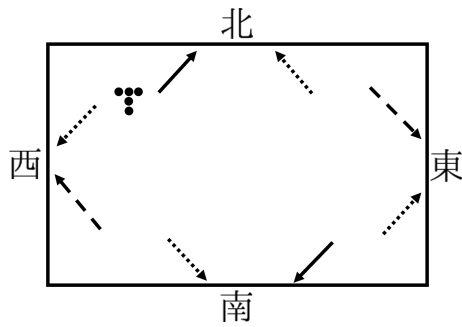


図 6: 各壁に対する R_i の斜めの移動の全ての入射角.

3.2 モジュールのビュー

2 台のモジュールロボットの動作順序を決めるための準備として、モジュールロボットの各状態のラベル付けとビューを導入する. 5 個のモジュールからなるモジュールロボットの取りうる状態は全部で 18 通りであり、それぞれ図 7 のように S_1^5 から S_{18}^5 までラベル付けを行う. ここで、モジュールが自身の属するモジュールロボットのみ観測する時、4 通りの状態 $S_{15}^5, S_{16}^5, S_{17}^5, S_{18}^5$ のみで図 7 の黒丸に対応するモジュールの組は同じ観測結果となる.

しかし、2 台のモジュールロボットが近接していると、各モジュールが他のモジュールロボットを観測でき、同一モジュールロボット内でどのモジュールも異なる観測結果を持つ. 図 7 の黒丸に対応するモジュールに対し次のビューを考えることで、観測結果の違いからモジュール間の順序付けをすることができる.

今回考えるビュー $V_i(t)$ は、[4] で提案されたビューを基に、離散空間で考える. 時刻 t におけるモジュール m_i のビュー $V_i(t)$ は、 m_i の局所座標系 $Z_i(t)$ を再定義し、 $Z_i(t)$ における全モジュールがいるセルの座標の集合 $V_i(t) = \{Z_i(t)[(x_j(t), y_j(t))] \mid r_j \in R_1 \cup R_2\}$ である. ここでの局所座標系 $Z_i(t)$ は以下のように定める: m_i 自身のいるセルの座標 (つまり、セルの左下の座標) を原点 $(0, 0)$ とし、隣接するモジュールのいるセルの座標を $(1, 0)$ とする. 2 個ビュー V_i, V_j を比較する時、それぞれのビューの要素を小さいものからソートした列に直し、この列について辞書式順序で大小比較を行う. ただし、座標同士の大小関係は、以下のように定義する: $(x, y) > (x', y')$ の時、またその時に限り、 $x > x'$ 、または、 $x = x'$ かつ $y > y'$ である. 以上の定義では $Z_i(t)$ が一意に定まらない場合があるが、ビューを最大とする $Z_i(t)$ を選びその時のビューを m_i のビューとする. 全モジュールは、自身の観測結果から他のモジュールのビューを計算することができる.

例えば、1 台の S_{18}^5 の黒丸のモジュールのビューを考えたと時、どのモジュールのビューも $(0, 0), (1, -1), (1, 0), (1, 1), (2, 0)$ となる. このように、同一のビューを持つモジュールの組が存在する時、モジュールロボットの配置は**対称性を持つ**と言う. S_{18}^5 では 1 個の

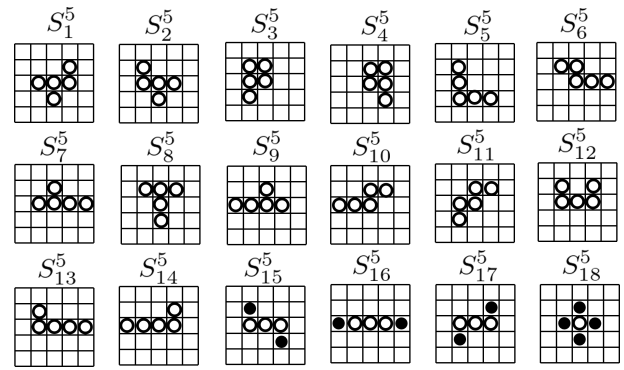


図 7: 5 個のモジュールからなるモジュールロボットの全状態.

モジュールが 1-スライドしようとする時、同じビューを持つ他の 3 つモジュールも同じ向きにスライドする. この時、モジュールロボットの連結性が崩れてしまうため、 S_{18}^5 はどのモジュールも移動できない.

今回考えるビューは、最大のビューを持つモジュールがモジュール全体の中で東西南北のいずれかの方角の端のセルに位置するという性質を持つ.

3.3 提案アルゴリズム

本節では、山田のアルゴリズムにより 2 台のモジュールロボットが初期配置から集合した後、全モジュールを観測可能範囲内に入れたまま結合する分散アルゴリズムを提案する. 提案アルゴリズムの開始条件は、2 台のモジュールロボットの任意のモジュール m_i に対し、 m_i の観測可能範囲内に自身を含めた全モジュール 10 個が入っているときである.

結合問題を解く提案アルゴリズムは、 R_1, R_2 が集合した時、2 台全体の初期配置が非対称な場合と対称な場合で分けて考える.

R_1, R_2 全体の初期配置が非対称な時、 R_1, R_2 の状態が異なるならば、図 7 の示す状態のラベルの大小が R_1, R_2 間の順序付けの大小に対応する. つまり、 S_i^5 と S_j^5 を比較した時、 $i > j$ ならば $S_i^5 > S_j^5$ となる. R_1, R_2 の状態が同じならば、全モジュールはビューを用いて順序付けに合意できる. 5 個のモジュールから成るモジュールロボットの全状態に対し、4 つの状態 $S_{15}^5, S_{16}^5, S_{17}^5, S_{18}^5$ については図 7 の黒丸モジュールの内、最大のビューを持つモジュールについてビューを考え、残りの状態については図 8 の黒丸モジュールのビューを考える. 全モジュールは、2 台のモジュールロボットについて上記のモジュールのビューをそれぞれ計算して比較し、大きいビューを持つモジュールの属するモジュールロボットを順序付けの大きいモジュールロボットとして合意できる. この時、順序付けの小さいモジュールロボットと大きいモジュールロボットをそれぞれ R_s, R_t とする. 提案アルゴリズムにおいて、順序付けの小

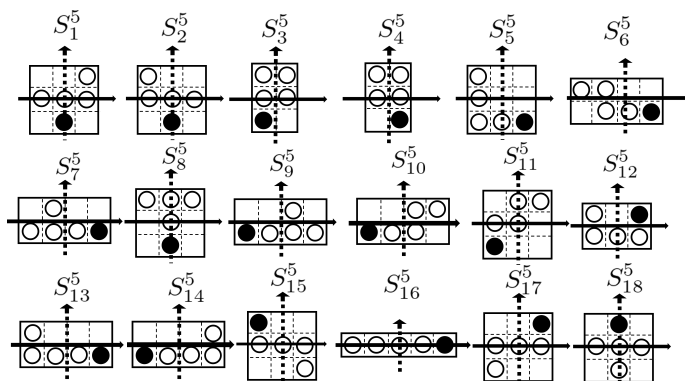


図 8: 5 個のモジュールからなるモジュールロボットの各状態に対し、回転対称な初期配置の時にビューを調べるモジュールを黒丸で表す。

小さいモジュールロボット R_s はより小さい数字の状態に変形し、順序付けの大きいモジュールロボット R_l はより大きい数字の状態に変形するため、 R_s, R_l の順序付けは実行中変わらない。

提案アルゴリズムで考える基本の動きとして、モジュールロボットの横移動と方向転換を定義する。図 9 のように、モジュールロボットは S_1^5 と S_2^5 の状態を交互に繰り返すことで 1 セルずつ正の行方向へ平行移動することができ、この平行移動をモジュールロボットの**正の横移動**とする。同様に、モジュールロボットは図 10 のように逆方向への並行移動もでき、この並行移動をモジュールロボットの**負の横移動**とする。また、図 11 のように、状態 S_1^5, S_2^5 のモジュールロボットはそれぞれ、黒丸のモジュールの 1-スライドにより $\pi/2$ だけ向きを変えた同じ配置への変形ができ、この変形をそれぞれ配置における S_1^5, S_2^5 の**方向転換**とする。

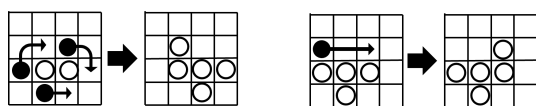


図 9: それぞれ S_1^5 と S_2^5 の正の横移動。モジュールロボット全体は、この横移動を続けて行うことで正の行方向に平行移動する。黒丸に対応するモジュールが矢印に従ってスライドまたは回転を行う。

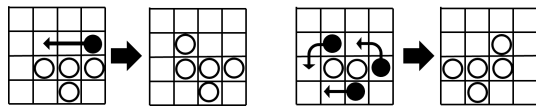


図 10: それぞれ S_1^5 と S_2^5 の負の横移動。モジュールロボット全体は、この横移動を続けて行うことで負の行方向に平行移動する。黒丸に対応するモジュールが矢印に従ってスライドまたは回転を行う。

提案アルゴリズムの概要は以下の通りとなる。

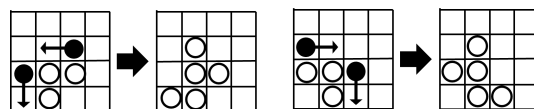


図 11: それぞれ S_1^5 と S_2^5 の方向転換。黒丸に対応するモジュールが矢印に従って 1-スライドを行う。

- 2 台全体の初期配置が非対称な場合。順序付けの小さいモジュールロボット R_s は、定数回の変形の後 S_1^5 または S_2^5 に変形できる。この変形が完了してから、順序付けの大きいモジュールロボット R_l が状態 S_{18}^5 になるように変形する。 R_s が変形した後、 R_s は R_l と同じ列になるまで横移動を繰り返す。 R_l と R_s が同じ列に到達したら、 R_s は方向転換をすることで進行方向を変える。その後、 R_s は、 R_l と結合するまで横移動を繰り返す。この時、任意の変形において、任意のモジュールは他のすべてのモジュールの観測可能範囲外に行かない。
- 2 台全体の初期配置が対称な場合。 R_1, R_2 は同じ変形を繰り返し、状態 S_4^5, S_3^5 からは共に状態 S_1^5 への変形し、残りの状態からは共に状態 S_2^5 への変形ができる。次に、各モジュールロボットは 2 台が同じ列に存在するまで横移動を繰り返す。2 台の列が揃った後、各モジュールロボットはそれぞれ方向転換をする。最後に、2 台のモジュールロボットは、お互いが結合するまで横移動を繰り返す。この時、横移動を行うことでモジュールロボット同士の衝突が起こる配置が存在する。このような配置を**例外的配置**と呼ぶ。任意の例外的配置に対してモジュールの適切な移動を行うことで、2 台のモジュールロボットは衝突することなく結合できる。

山田のアルゴリズムに対し、衝突が起こらないような観測可能範囲 k を調べた結果、モジュール同士が衝突しないためには $k \geq 7$ が必要であることがわかった。また、モジュールが 4 個以下の時、モジュールロボットは集合できないことが示せるため次の補題 3.1 が成り立つ。

補題 3.1 長方形フィールド中の大域的なコンパスを持たないモジュールから構成された 2 台のモジュールロボットを考える。このとき、同じモジュールロボットに属するどのモジュールの組も同一のビューを持たない任意の初期配置に対し、2 台のモジュールロボットが集合問題を解くことができる必要十分なモジュールロボットのサイズは 5 である。

衝突しないために必要な観測可能範囲と補題 3.1 により、次の定理 3.2 が成り立つ。

定理 3.2 大域的なコンパスを持たず、観測可能範囲 $k = 7$ である 5 個のモジュールから構成された 2 台のモジュールロボットを考える。このとき、同じモジュールロボットに属するどのモジュールの組も同一のビューを持た

ない任意の初期配置に対し、2台のモジュールロボットがアグリゲーション問題を解くことができる必要十分なモジュールロボットのサイズは5である。

4. 結合問題

集合問題を解くために必要なモジュール数と結合問題を解くために必要モジュール数は異なり、4個のモジュールから成るモジュールロボットの結合アルゴリズムを提案できる。また、モジュールが3個以下の時、結合問題を解くことができないことが示せるため、必要十分なモジュール数に関する次の定理4.1が成り立つ。

定理 4.1 大域的なコンパスを持たない、2台のモジュールロボットを考える。この時、2台のモジュールロボットが結合問題を解くためにモジュールロボットを構成する必要十分なモジュールロボットのサイズは4である。

5. まとめと今後の課題

本稿では、大域的なコンパスを持たない5個のモジュールから成るモジュールロボット2台が、山田 [5] のアルゴリズムをもとに特定の初期配置から集合した後、結合することで2次元正方形グリッド上のアグリゲーション問題を解く分散アルゴリズムを提案した。モジュールロボットによる集合問題と結合問題において必要十分なモジュール数がそれぞれ5個、4個であることを紹介した。

今後の課題として、1台のモジュールロボットが2台以上に分離できる拡張モデルに関する調査が挙げられる。

参考文献

- [1] Mark Cieliebak, Paola Flocchini, Giuseppe Prencipe, and Nicola Santoro. Solving the Robots Gathering Problem. In Proceedings of the 30th International Colloquium on Automata, Languages and Programming (ICALP 2003), pp. 1181–1196, 2003.
- [2] Joshua J. Daymude, Andréa W. Richa, and Christian Scheideler. The Canonical Amoebot Model: Algorithms and Concurrency Control, Proceedings of the 35th International Symposium on Distributed Computing (DISC 2021), No. 20, pp. 20:1–20:19, 2021.
- [3] Adrian Dumitrescu, Ichiro Suzuki, and Masafumi Yamashita. Motion Planning for Metamorphic Systems: Feasibility, Decidability, and Distributed Reconfiguration, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 20, No.3, pp.409–418, 2004.
- [4] Ichiro Suzuki, and Masafumi Yamashita. Distributed Anonymous Mobile Robots: Formation of Geometric Patterns. SIAM Journal of Computing, Vol. 28, No. 4, pp. 1347–1363, 1999.
- [5] Ryonosuke Yamada. Search and Evacuation in a Finite 3D Cubic Grid by a Metamorphic Robotic System. 九州大学大学院システム情報科学府修士論文, 2022.
- [6] Masafumi Yamashita, and Ichiro Suzuki. Characterizing Geometric Patterns Formable by Oblivious Anonymous Mobile Robots. Theoretical Computer Science, Vol. 411, Issues 26–28, pp. 2433–2453, 2010.
- [7] 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開

発機構. ”分子ロボットの「群れ」の実働に世界で初めて成功”. NEDO. https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101531.html.

- [8] ジグソー株式会社. ”月や小惑星における水などの資源探査を目的とする自律制御ロボット『宇宙群ロボット』の共同研究開発を開始”. ジグソー株式会社ホームページ. <https://www.jig-saw.com/news/20160302/>