

モジュールロボットによる三次元格子空間の探索

山田凌乃介^{*†}

山内由紀子^{‡§}

概要

モジュールロボットは、同一のアルゴリズムを持つモジュール複数台によって構成されるシステムである。各モジュールは周囲の状況を観測し、それに応じて移動することができる。このシステムを用いて、ある領域を探索することを考える。Doiらは二次元格子領域の探索を行うために必要十分なモジュールの数を示した(2018)。本研究では、探索する領域を三次元格子領域に拡張し、その探索に必要な十分なモジュールの数について考える。

1 はじめに

モジュールロボットはそれ単体では移動することができず、複数台の共通のアルゴリズムに従うモジュールの集まりによって構成される。モジュールは二次元格子領域のセル1つにつき最大1つ入れることができ、各モジュールは自分が入っているセルを中心とする、アルゴリズムによって定めた大きさの正方形内のセルの状況を認識することが可能である。周囲の状況に応じて各モジュールが動作を行い、モジュールロボット全体が動作する。

モジュールロボットについて、その変形や移動についての研究が長年行われてきた。

Dumitrescuらは、モジュールロボットが与えられた初期配置から目的の配置へ変形可能であるか、という問題が決定的であることを示した[1]。

Chenらはモジュールが集まった全体の形に穴がないような配置のモジュールロボットが変形し、

確実に一直線にモジュールが並んだ形態となることが可能であることを示し、それに付随して単位時間を1としたとき、先に述べた配置であれば平均1/3の速度でロボットが一方方向に移動可能であることを示した[2]。

Doiらは二次元格子領域を探索するために必要十分なモジュールの数をモジュールが大域座標系の方角を認識できる場合、とそうでない場合それぞれについて示した[3]。探索問題とは二次元格子領域のあるセルに置かれたターゲットをモジュールロボットが発見する問題である。

本研究では、このモジュールロボットシステムを用いてどのような問題が解けるか、ということに着目し、二次元格子領域の探索についての研究[3]の三次元格子領域への拡張を行う。先行研究では、各モジュールが二次元領域の東西南北を認識できる場合には3台、そうでない場合では5台のモジュールが探索問題を解くのに必要十分なことを示している[3]。

本研究では同じ設定を三次元格子領域に拡張した場合、探索問題を解くには何台のモジュールが必要であるかを調べた。

2 問題設定

モジュールロボットは、長さが x 軸方向に l 、 y 軸方向に m 、 z 軸方向に n の3次元格子領域の上に配置される。この格子領域をフィールドと呼ぶ。この領域の横軸を x 軸、縦軸を y 軸、奥行軸を z 軸とする。また、 x 軸の正方向を x^+ (または東)、負方向を x^- (西)、 y 軸の正方向を y^+ (天)、負方向を y^- (地)、 z 軸の正方向を z^+ (北)、負方向を z^- (南)、と呼ぶことにする。なお、フィールドの下端の座標は $(0, 0, 0)$ とするが、各モジュールは大

^{*} 九州大学大学院システム情報科学府

[†] yamada@tcs.inf.kyushu-u.ac.jp

[‡] 九州大学大学院システム情報科学研究院

[§] yamauchi@inf.kyushu-u.ac.jp

域座標を認識することができない。隣接したマスにモジュールが配置されている場合、それらのモジュールは**接続している**、という。

各モジュールはセルを移動することができるが、いくつかのルールがある。

(1) 移動は単位時間に一回行われる。

(2) モジュールは**スライド**と**回転**しかすることができない。

- **スライド** いずれかの軸に平行にモジュール二台が接続し、それらと L 字型になるようにモジュール M が接続している場合、図 1 上のように M は 2 台のモジュールの側面を滑るように一マス移動することができる。
- **回転** あるモジュールにモジュール M が接続している場合、図 1 下のように M は接続しているモジュールがあるマスを軸としていずれかの方向に 90 度回転して移動することができる。

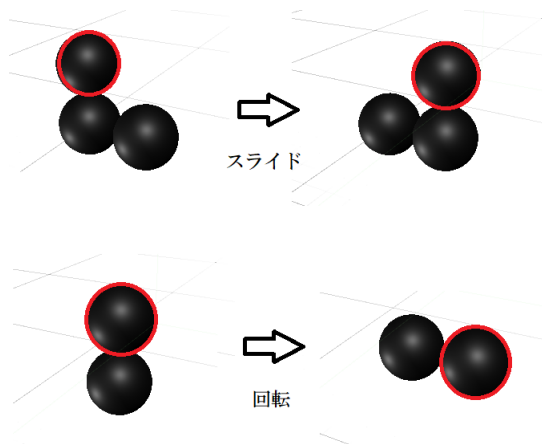


図 1 モジュールの移動

(3) モジュールが移動するとき、移動先のセルにモジュールが存在してはならず、また移動後に単一のセルに二つのモジュールが存在してはいけない。

(4) モジュールは常に、すべて他のいずれかのモジュールに連結していなければならない。

モジュールが動く時は以上のルールに従う。

また、各モジュールは自分を中心とする $(2k + 1) \times (2k + 1) \times (2k + 1)$ の大きさの立方体のセル (k 近傍) の状況を認識することができる。つまり、モジュールの配置の有無、及びそのセルがフィールド内であるか否かがわかる。後に示す定理 1、2、3 を証明するアルゴリズムそれぞれについて、モジュールが認識できる広さはそれぞれ 2 近傍、3 近傍、4 近傍である。

また、設定によってはモジュールが大域座標系の軸を認識することができる。あるモジュールに別のモジュールが接続しているとき、それが東西南北天地のどの方向に接続しているのか、がわかる、ということである。このような設定のことを**コンパスあり**、という。加えて、東西南北の方向は認識できないが天地方向は認識できる設定のことを**天地のみコンパスあり**、という。そして、いずれの方向も認識できない場合、**コンパスなし**、という。

各モジュールは同じアルゴリズムを持っており、それぞれが同期して周囲の状況を確認、それに応じて動く、を繰り返す。

このような設定の時に、モジュールロボットが 3 次元格子空間のいずれかのマスに置かれたターゲットを確実に見つけ出すことを三次元格子領域における**探索問題**と呼び、これをできるだけ少ないモジュール数で行うことを目指す。

3 三次元探索問題を解く必要十分なモジュール数

先行研究 [3] に従って、コンパスあり、コンパス無しの場合と、それに加えて天地のみコンパスありの場合についてについて以下に示す結果を得た。

すべてのセルをくまなく探索することで、ターゲットを確実に見つけ出す。すべてのセルを探索するモジュールロボットシステム全体の動きは容易に考えられる。例えば、フィールドをスライスした長方形を順次探索していき最終的に全体を探索する方法である。

問題は、その方策をモジュールで実現できるかどうかである。各モジュールは周囲の状況、すな

わちモジュールロボットがどのような配置を取っているのかによって、動きを決定する。例えばモジュール 2 台でシステムが作られている場合、東西、南北、天地の方向にモジュールを並べた 3 種類の配置しかとることができない。言い換えると、3 種類の動作しか行うことができず、本稿では省略するがこれで探索を行うことはできない。逆にモジュールの数が多いとそれだけ様々な配置ができるので、より複雑な動作ができる。

できるだけ少ないモジュールで、システム全体の配置をうまく変化させながら探索を行うアルゴリズムを構成し、以下の 3 つの主定理を得た。

定理 1 コンパスありの 3 台のモジュールからなるロボットは、任意の初期配置から三次元格子領域における探索問題を解くことができる。

定理 2 天地のみコンパスありの 4 台のモジュールからなるロボットは、三次元格子領域における探索問題を解くことができる。

定理 3 コンパスなしの 5 台のモジュールからなるロボットは、三次元格子領域における探索問題を解くことができる。

いずれの定理もフィールドを長方形に分割し各長方形の探索を繰り返して三次元探索問題を解くアルゴリズムによって証明する。

また、これらのモジュールの台数が必要であることを示す以下の三つの補題を得た。

補題 4 コンパスありの 2 台以下のモジュールからなるロボットは、三次元格子領域における探索問題を解くことができない。

補題 4 は 2 台のモジュールでは、絶対に探索できない範囲が必ず出てしまうことを示し証明する。

補題 5 天地のみコンパスありの 3 台以下のモジュールからなるロボットは、三次元格子領域における探索問題を解くことができない。

補題 6 コンパスなしの 4 台以下のモジュールからなるロボットは、三次元格子領域における探索

問題を解くことができない。

補題 5、6 はロボットが取りうるモジュールの配置とその変形をグラフとして表し、どのような変形をしたとしてもその場から移動することができないことを示し証明する。

4 まとめ

本研究では、各設定でモジュールロボットで三次元格子領域探索問題を解くアルゴリズムを提案し、その台数未満では三次元探索を行うことができないことを示した。今後は、フィールドに 2 台のモジュールロボットを置き、それらが確実に接触するために必要十分なモジュール数や、フィールドの外周に配置された 1 つの「出口」を確実に見つけるために必要十分なモジュール数を調べるなど、様々な問題について考える。最終的にモジュールの台数と解決できる問題の複雑さがどのように関連しているのか調べる。

参考文献

- [1] Adrian Dumitrescu, Ichiro Suzuki, and Masafumi Yamashita. Motion Planning for Metamorphic Systems: Feasibility, Decidability, and Distributed Reconfiguration. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 20(3), pp.409–418, 2004.
- [2] Fengqi Chen, Yukiko Yamauchi, Shuji Kijima and Masafumi Yamashita. Locomotion of Metamorphic Robotic System based on Local Information. *Proceedings of SRDS Workshops 2014*, pages 40–45, 2014.
- [3] Keisuke Doi, Yukiko Yamauchi, Shuji Kijima and Masafumi Yamashita. Exploration of Finite 2D Square Grid by a Metamorphic Robotic System. *Proceedings of SSS 2018*, pp 96–110, 2018.