

GAを用いた自己組織化ロボットの結合ルール生成

Rule Generation with GA for Connecting Self-Organization Robots

福田 エリック駿*¹ 伊庭 斉志*²

EricShun Fukuda

Hitoshi Iba

*¹東京大学大学院 新領域創成科学研究科

Graduate School of Frontier Science, The University of Tokyo

*²東京大学大学院 工学系研究科

School of Engineering, The University of Tokyo

In this paper, we propose a method to generate rules with GA for connecting two-dimensional self-organizing robots. Self-organizing robots consists of modular robots. Controlling a large number of modular robots at the same time is technically difficult because communicating and processing the information of the current state takes much time. The method we propose here enables modular robots to self-organize useful structures by equipping modular robots with local connection rules. The rules are generated by GA.

1. はじめに

自己組織化とは、似た性質を持ったたくさんの個体や粒子などが、それぞれの持つルールに従って振る舞うことで、全体としての統制なしにマクロな機能や構造を発現することをいう [Kauffman 95]。近年、自己組織化が生命の進化をはじめとする様々な複雑系との関連で重要視されてきている。ロボティクスの分野でも自己組織化は生物との架け橋として期待され、近年重要視されつつある。その代表例としてモジュラーロボットが挙げられる。モジュラーロボットとは、それぞれが駆動機構をもつ同一の機械モジュールが様々な結合することによって、全体として特定の動作をするロボットのことをいう。モジュラーロボットの利点として、結合や各モジュールの動作を変えることによって、今いる環境に適応した動作が可能である点や、入口が狭く中が広いタンクのような、通常のロボットでは入れないような構造物の中でも、モジュールをバラバラの状態ですぐ投入し中で自動的に組み立てることによって、作業が可能である点などが挙げられる。自己組織化ロボットは、このモジュラーロボットがモジュール毎に結合と動作のルールを持ち、全体としての機能を持つために全体的な統制を必要としないロボットをいう。本研究ではこの自己組織化ロボットの結合ルールのみを扱い、モジュール毎の結合ルールを遺伝的アルゴリズム (GA) によって進化させることで、シミュレータ上のモジュール群に自発的に目的の二次元構造を形成させることを目指す。特に、途中が欠落した壁のような構造の欠落部分をモジュールによって自動的に補完する、という命題を考える。

2. 関連研究

セルオートマトンを用いた構造の創発に関する研究として [三井 02] [伊能 06] などがある。これらの研究では、グリッド状に分けられた空間において強度計算を行い、そのセルにかかる応力に応じてセルのオンとオフを切り替えることによって橋梁構造などが得られている。

ほかにも、モジュラーロボットが構造的に取り得る三次元構造の研究 [Tohge 06] や、あらたな機能を持ったモジュラーロボットの開発 [Murata 00] [Eldershaw 02] も行われている。

連絡先: 福田 エリック駿, E-mail:fukuda@iba.k.u-tokyo.ac.jp
伊庭 斉志, E-mail:iba@iba.k.u-tokyo.ac.jp

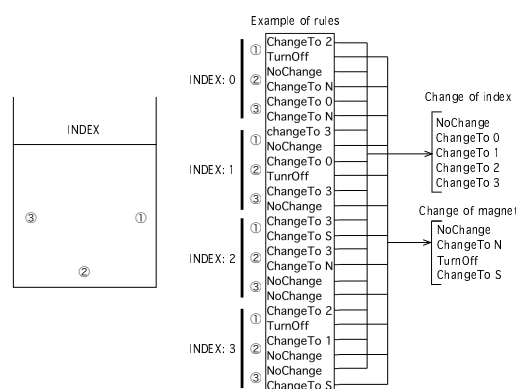


図 1: The genes directly stands for the connection rules.

本研究では、そのようなアイデアを基に、実際のモジュラーロボットでそのような構造を得るための手法を提案する。

3. 提案手法

本研究では、二次元平面上でシミュレーションを行う。モジュールは正方形で、四辺に磁石を持つ。磁石は N、S、Off に切り替えられ、初期状態でモジュールは、二組の対辺のうち一組を N、もう一組を S とする。モジュールは、空間内を回転しながらランダムに移動し、すでに固定されているモジュールの隣にきたときに、接する辺が N と S であれば結合し、固定されるものとする。

モジュールが結合した際には結合した辺以外の辺の磁石が変化するが、それぞれの辺は数種類のインデックスをもち (本実験では 4 種類、あるいは 10 種類)、それぞれのインデックスごとに磁石を変化させるルールが異なる。また、それぞれの辺のインデックス自体も結合した辺のインデックスに応じて変化する。

それらのルールはインデックスごとに、結合した辺から時計回りに、それぞれの辺の磁石の変化、インデックスの変化 (あるいは変化させない) を順に記述したもので表される。このルールの配列は GA の遺伝子としても使われる (Fig.1)。

GA は以下の流れで行う。まず、初期世代はランダムに遺伝子を決定する。それを複数の個体についてシミュレーションを

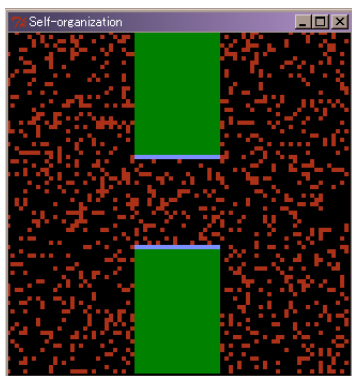


図 2: The initial state of the field.

行ったあと、適合度を算出し、各個体を順位付けする。二世代目以降は、前世代の上位個体をある数だけ残し（エリート戦略）、ほかには前世代でエリートに選ばれなかった個体から順位に応じた確率で二個体を選出し、一点交叉した後それぞれの遺伝子の要素一つをランダムに突然変異させる。

この実験ではシミュレーションを容易にするために、固定されていないモジュール同士はくっつくことはなく、固定されていないモジュールは固定されたモジュールにくっついたときのみ固定されるという単純化を行っている。実際のロボットに置き換えた場合を考えた時にこの点は不自然であるので、これは今後の課題としている。

4. 実験と結果

4.1 実験条件

次の条件で実験を行った。命題として Fig.2 に示すような、壁の一部が欠けているフィールドを設定し、欠けている部分の縁にはあらかじめモジュールを固定した。図に示す緑の部分は壁、青は固定されたモジュール、赤は自由に動き回れるモジュールを示す。各個体の評価は、開始後あるステップ数後に壁の欠けている部分に固定されたモジュール数とし、実験によってはそこから欠損部分以外に固定された（はみだした）モジュール数をそこから引いた。本実験では世代当たりの個体数を 50 とし、エリート戦略をとった。エリート数は各実験で異なる。エリートとしてそのまま次の世代に保存された個体以外の個体は、その順位に比例した確率で前の世代から親 2 個体を選び、それらの交叉（一点交叉）と突然変異により生成した。

4.2 実験 1

Fig.2 に示すような幅が 20 に渡って欠損している厚さ 20 の壁を想定した。壁の欠損部分の縁にあらかじめ固定してあるモジュールのインデックスはすべて 0 で、磁石はすべて N とした。本実験においてはエリートを上位 2 個体とし、残りの個体をエリート 2 個体の交叉と突然変異で生成した。このような GA は一般的ではないが、このようにしたのは同じ遺伝子を持っていてもモジュールがランダムに動く中で結果のばらつきが大きく、前の世代で選ばれた個体が次世代で淘汰されてしまうことが多く、安定して適合度が増加しないためである。

Fig.3 に 3 回行った実験の適合度の変化を示す。この図から、4 世代目か 5 世代目にはだいたい適合度が飽和していることがわかる。また、実験によって最大の値に差が見られた。これは初期の世代で上位 2 個体を選んでしまうため、遺伝子のバリエーションが限られてしまい、似たような遺伝子の中での最適

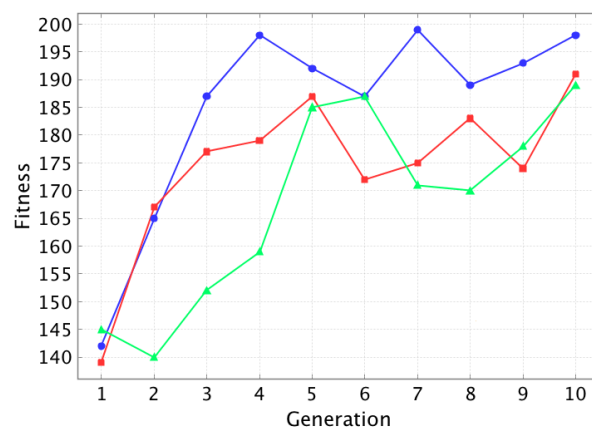


図 3: Generation v.s. Fitness

な遺伝子が得られたからであると考えられる。また、Fig.4 に最良個体の表現型の例を示す。枝が斜めに折れたままれて伸びることで、枝が伸びたあとも内部まで自由なモジュールが入ってくることができ、最後まで枝が生長することができることで適合度の高い個体を得られていることがわかる。これに対し、実験の初期世代ではまっすぐに枝が伸びてしまうことで欠損部分の両端を枝が塞いでしまい、内部に自由なモジュールが入れなくなり、適合度が低いまま終わってしまう個体が見られた。

4.3 実験 2

次に Fig.5 に示すような幅が 20 に渡って欠損している厚さ 4 の壁が 4 つあるフィールドを想定した。壁の厚さを 4 にしたのは 4 種類あるインデックスの数に合わせたもので、これらを合わせることで何か良い結果が得られるのではないかと期待したからである。また壁を 4 枚用意したのは、4 枚壁があることによって、同じ遺伝子を持った個体を壁 1 枚だけのフィールドでシミュレーションを行った場合の 4 回分の平均的な評価が得られるためである。実験 1 では各個体を 1 枚の壁でシミュレートしたため、同じ遺伝子を持っていても成績にばらつきがあり、安定した進化が行われず、特殊な GA 条件を用いざるを得なかった。本実験の方法では安定した評価が得られるため、安定した進化が行われた。壁の欠損部分の縁に固定したモジュールのインデックスはすべて 3、磁石はすべて N とした。エリート数は 3、そのほかの個体は順位に比例した確率で選ばれた 2 個体を親とした交叉と突然変異により生成した。

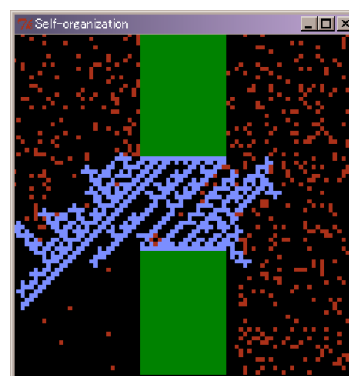


図 4: An example of the best individuals.

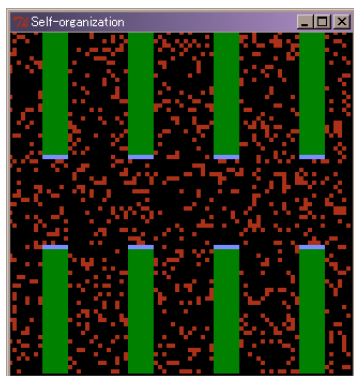


図 5: Initial state with four walls.

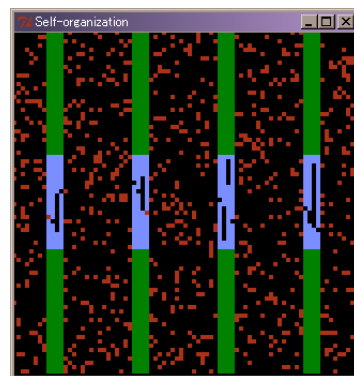


図 7: An example of the best individuals with four walls.

また個体の評価値は、壁の欠損部分の 20x4 の領域内に結合し固定されたモジュール数から、それ以外の領域に結合し固定されたモジュール数とした。

Fig.6 に本実験 3 回分の適合度の変化を示す。この図から、約 25 世代ほどで適合度が飽和し、3 実験ともほぼ同じ適合度が得られていることがわかる。本実験における最良個体の表現型の例を Fig.7 に示す。隙間は見られるが、比較的密に隙間を埋める個体が得られていることがわかる。

3 回の実験で得られた個体では隙間の埋め方にどれも似た様子が見られた。まず欠損部分の縁から枝が一列まっすぐに伸びる。一番外側の枝が早く伸びるが、完全にその列は埋まらず 1 マスだけ隙間が残る。その後、その隙間から自由に動き回れるモジュールが内部に入り込み内部を埋めていく、という様子が見られた。Fig.8 に各実験の最良個体の遺伝子型（結合ルール）を示し、さらにそれらの共通項を矢印で示した。ここで重要なのは下の 4 つの矢印で示した部分で、この部分で示されたルールというのは「インデックス 3 の側面に結合したモジュールは、結合した面と逆の面のインデックスを 3 に変化させ、残り 2 つの側面の磁石を off にする」というものである。このルールに従うと伸びた枝の先端のインデックスは必ず 3 になり、枝の左右両側は磁石が off になっているため、枝がまっすぐに伸びることになる。また、枝が上下両側から伸びてくると、最後の一マスになったときにその両端の磁性が N と S で違ってしまいうため、二組の対辺の磁性が同じである自由に動き回れるモジュールはそのマスに結合することができず、隙間が 1 マス

残ることになる。もっとも、これは欠損部分の幅が偶数であるため、奇数であった場合には隙間ができない。

本実験に関連して追加で二つの実験を行った。一つは、壁の厚さはそのまま、欠損部分の幅を 21 にしたフィールドにおいて、もう一つは壁の欠損部分の幅はそのまま壁の厚さを 6 にしたフィールドにおいて、実験 2 の最良個体の遺伝子を用いてシミュレーションを行った。Fig.9 に欠損部分の幅を 21 にしたフィールドにおけるシミュレーション結果を示す。やはり外側に隙間ができておらず、内部に自由に動き回れるモジュールが入り込むことができずに、内部に空洞ができてしまっており、適合度が低くなってしまっていることがわかる。また、Fig.10 に壁の厚さを 6 にしたフィールドにおけるシミュレーション結果を示す。こちらは一番外側に隙間はできているが、外から 2 列目の枝によってその隙間がふさがれてしまうためにそれよりも内側に自由に動き回れるモジュールが入り込むことができず、やはり適合度が低くなってしまっていることがわかる。

5. 考察

実験 1 において、本稿では例を一つしか示さなかったが、複数回実験する中で毎回違った個体を得られた。これはシミュレーションを行うたびに同じ遺伝子を持っていても適合度が変わってしまうために収束しない結果を、収束させるために実験の中で特殊な GA 条件を用いているからで、この条件を用いると逆に毎回局所解に陥ってしまい、ある程度の適合度は得

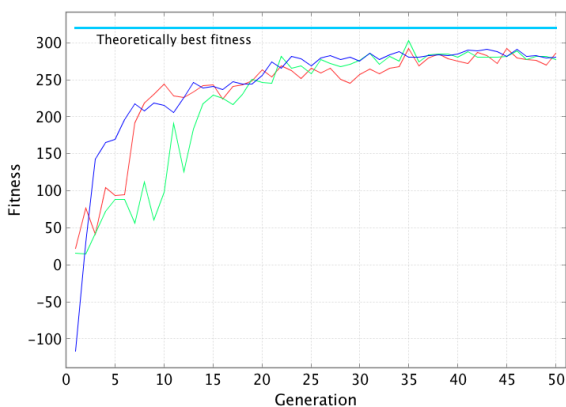


図 6: Generation v.s. Fitness.

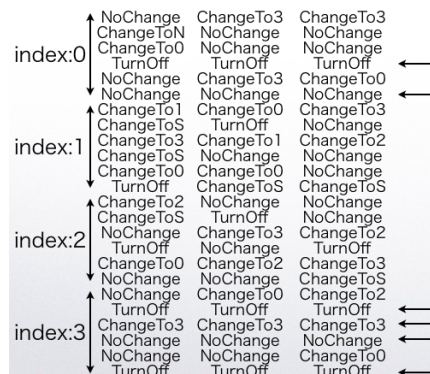


図 8: Genes of the three individuals.

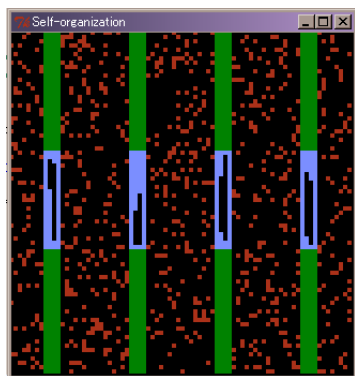


図 9: Result of the simulation when the length of the gap of the wall is 21.

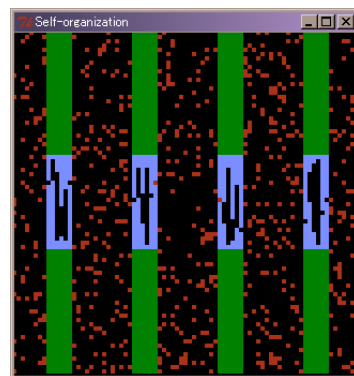


図 10: Result of the simulation when the width of the wall is 6.

られているものの、命題に対して最適な個体は得られていないと考えられる。また実験 2 では複数回の実験を繰り返しても安定した適合度が得られ、壁の欠損部分が埋まっていく様子も同じような個体が得られた。そして欠損部分もある程度密に補完できていると考えられるが、やはり隙間が残っている点を考えると真に最適な解ではなく、局所解に陥っていると考えられる。真に最適な解が得られるような条件 (GA 条件、モジュールが結合する仕組み、ルールの表現など) を考えることが今後の課題である。

また、実験 2 で得られた最良ルール (遺伝子) を用いると、フィールド条件が少し違っただけで適合度が低下してしまうという問題点がある。これはロバスト性の低さを示しており、この点の改善も今後の課題である。

6. おわりに

本研究では、二次元モジュラーロボットの結合ルールを GA によって進化させ、モジュラーロボットを自動的に所望の構造に組織化させるルールを得る手法を提案し、「壁の欠損部分を二次元モジュラーロボットが自動的にいかに効率よく補完することができるか」という命題によって本手法を評価した。結果として、本手法はある程度命題に合わせて壁を補完することができたが、完全に壁を補完することには成功しなかった。原因として、ランダム関数の影響により安定したルールの進化が行われていない、GA 条件が問題に適していない、結合ルールの表現方法などに原因があると思われる。今後これらを改善することにより、本実験で用いた命題に対する成績の向上と、さらに応用範囲の広い手法の確立を目指す。

参考文献

- [Kauffman 95] Stuart Kauffman: "At Home in the Universe, The Search for Laws of Self-Organization and Complexity", 1995(邦題, 米沢富美子: "自己組織化と進化の論理", 日本経済新聞社, 1999.)
- [三井 02] 三井和男: セルオートマトンによる構造システムの自律的生成と最適化, 日本建築学会構造系論文集, No.555, 101-105, 2002.
- [伊能 06] 伊能教夫, 小関道彦, 加藤一郎, 槇宏太郎: 構造物を構築するセル・オートマトン法による下顎骨形状の考察,

第 14 回顎顔面バイオメカニクス学会大会 抄録集, pp.1-2, 2006.

- [Tohge 06] Tohge, T., Iba, H.: "Evolutionary Morphology for Cubic Modular Robot", Proceedings of 2006 IEEE World Congress on Computational Intelligence, Vancouver, Canada, 2006.
- [Murata 00] Satoshi Murata, Eiichi Yoshida, Kohji Tomita, Haruhisa Kurokawa, Akiya Kamimura and Shigeru Kokaji: Hardware Design of Modular Robotic System, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2000), CD-ROM, 2000.
- [Eldershaw 02] Craig Eldershaw, Mark Yim, David Duff, Kimon Roufas, Ying Zhang: "Modular self-reconfigurable robots", Robotics for future land warfare seminar and workshop, Defence Science Technology Organisation, Adelaide, Australia, 2002.