

成長しながら行動する自己組織系の進化

石川貴士 有田隆也

名古屋大学 大学院情報科学研究科

1. はじめに

我々は生命に備わる様々な適応メカニズムの進化的基盤を追究し、同時にその応用を検討することを目的として、ロボットを題材とした構成論的手法に基づいて研究している。特に、我々は構造の変化と行動の変化が様々な時間スケールを超えてどのように相互作用するかという点に興味を持っている。前研究[1]では、生物の発生と進化を模擬したロボットの構造と行動の共進化モデルを作成し、進化シミュレーションを行い、断続平衡進化の様相から人手の設計を超える巧妙なロボットが出現することを示した。本稿では、前研究のように発生と行動の段階をわけずに、成長や環境に合わせて構造や機能を変える適応的なロボット実現のための理論的検討として、セルオートマトン(CA)の状態遷移ルールに構造の分散を防ぐ制約を与えて構造形成フェイズを行動フェイズに加えて1ステップとし、特定のセル機能により環境と相互作用することを可能とするモデルの構築を目指す。

2. モデル

2.1 構造形成フェイズ

平面上に並んだ立方体のブロックで構成されるロボットを想定する。個体の構造の成長過程を表現するため、ブロックを表す3状態(1~3)に、何もない状態(0)を加えた4状態からなる2次元CAを採用する。成長はCAの平面にひとつのブロックだけが存在する状態(一つのセルのみ状態1)で始まる。個体は遺伝子情報として優先順位を持った遷移ルール群を持つ。1つの遷移ルールは、図1に示すように、対象セルを中心とする13近傍の内の偏りを持った4近傍の状態とその向きを適用の条件としたセルの書き換えルールとして表現される。なお、セルAの状態または書き換え後のセルの状態(F)が状態0となるようなルールは生じないという制約を突然変異に設けることで、ブロックが分散しないようにする。

構造形成フェイズでは、各セルについて一致

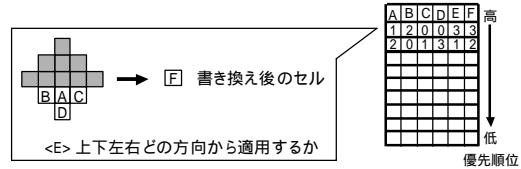


図1: 遷移ルール

する遷移ルールに従って1度だけ同時に書き換えを行う。一致する遷移ルールが複数ある場合は優先順位の高いルールを適用する。

また、書き換えにより状態2が生じた場合には、次のMステップ間において、構造形成フェイズの実行が抑制され、後述する行動フェイズのみが実行されるものとする。

2.2 行動フェイズ

行動フェイズでは、個体は、CAの平面とは独立に設定された2次元セルのフィールド上を移動する。本研究では、状態3のブロックに噴射機能を想定し、個体の外周にそれが存在する場合、個体はそのブロックから内側に隣接するブロックに向かう方向(縦または横)に力を受けるものとする。個体中にブロックが複数あって力が向かい合う方向に存在する場合は数の多い方向の力を受け、同数の場合は相殺されるものとする。最終的に、受ける力の方向に向かってNセル平行移動する。

2.3 進化

各個体について以上のフェイズから成るステップをタスク終了まで繰り返した後、適応度に依りて集団を進化させる。交配は適応度に従うルーレット選択で選ばれた2個体を親とし、優先順位に沿って並べた遺伝子列を一点交叉させて行う。突然変異は変異率に従って遷移ルールの各要素単位で生じるものとする。

3. 実験

3.1 タスク

図2に示すフィールドの内部を壁(黒いセル)に衝突せずに動き回るタスクを設定した。初期位置から壁に衝突するか、成長が止まって動かなくなるまでに個体が通過したセル数を得点とし、個体の適応度とみなす。最高得点は474点である。

Evolution of self-organizing systems which behave in parallel with their growing processes
Takashi Ishikawa and Takaya Arita · Graduate School of Information Science, Nagoya University

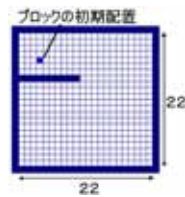


図 2: フィールド

3.2 基本的な進化過程

個体数は 30、遺伝子長(遷移ルール数)は 100、突然変異率は 1/500 とし、初期集団の遺伝子はランダムに作成した。基本的設定として、 $M=0$ 、 $N=1$ の条件で多く確認できた進化の一例を図 3 に示す。同図は、平均得点と最高得点の 1000 世代の推移、上の図は矢印に対応する世代で出現した個体の例(薄いグレーのセルは通過領域)である。初期世代から約 50 世代で壁のない方向へ移動しながら大きくなる個体が現れた。続いて約 200 世代では広い空間へ進行するようになり、600 世代を越えると、広い空間の遠くまで移動し、さらに大きくなって得点を稼ぐ個体が出現し、2 フェーズをうまく利用する適応的集団へ進化した。このような進行方向を広い空間へ変えながら体積を大きくする構造依存型の個体を多く確認できた。タイミングよく方向転換を繰り返して同じ場所に留まったり、複雑な移動を行ったりする個体(図 4(a))も出現した。

3.3 移動距離の影響

次に、1 ステップでの移動距離を決める N が個体の進化に与える影響について調べるために、 $M=0$ 、 $N=1 \sim 5$ の条件で 10 試行ずつ実験を行った。1000 世代までの各試行の最高得点の平均を表 1 に示す($N=1$ の時は 3.2 の条件と同じ)。 N が 2 以上の時、 $N=1$ に比べ平均で 30 点以上上回っているのがわかる。この条件では、1 ステップでより遠くに移動できるため、早い段階で壁の隙間を通過可能な個体が出現したが、逆に壁に衝突しやすくなるため、あまり大きく成長しないまま広い空間に向かって大きく方向を変えながら移動する行動依存型の個体が頻繁に出現した。最終的には、構造を適度に上下に伸ばしつつフィールドの外周を沿うように『コ』の字型に移動する個体(図 4(b))が出現し、3.2 節の場合よりも適応度が高くなった。この結果は条件設定の違いによって 2 つのフェーズを異なる形で利用するように進化した点で興味深い。

表 1: $M=0$ 、 $N=1 \sim 5$ における平均点の比較

N	1	2	3	4	5
得点	215	249	263	261	261

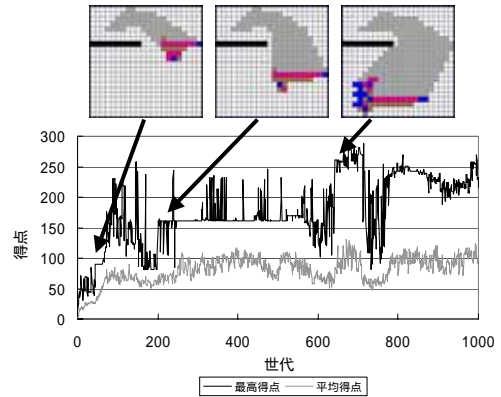


図 3: 進化の過程($M=0$ 、 $N=1$)

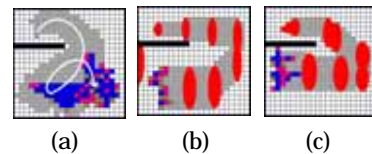


図 4: 出現したロボットの例

3.4 構造形成の抑制の影響

最後に、ブロック 2 の出現による構造形成フェーズの抑制の影響を調べるため、 $M=1 \sim 5$ 、 $N=1$ の条件で実験を行った。1000 世代までの各試行の最高得点の平均を表 2 に示す。 M が大きくなるほど平均が高いことがわかる。これは、 M が大きいほど抑制の影響が大きく働き、3.3 節で示したような行動依存型の個体が出現しやすいことによるが、同時に図 4(c)のように初期段階での成長を早め、体積をはじめから少し増やすことでより適応的となるような、抑制をうまく利用した個体も出現した。

表 2: $M=1 \sim 5$ 、 $N=1$ における平均点の比較

M	1	2	3	4	5
得点	213	255	252	252	284

4. おわりに

本研究では、環境に合わせて機能を変える適応的なロボット実現のための理論的検討の第一歩として、CA を拡張して、構造が成長しながら、行動するモデルを作成した。障害物にぶつかるまでの通過面積を適応度として遷移ルールを遺伝的アルゴリズムによって進化させた結果、広い空間へと進行方向を変えながら構造を大きくする構造依存型や何度も進行方向を変える行動依存型の個体が観察された。現在、環境との相互作用に焦点を絞ったモデルを検討中である。

参考文献

[1] 朝井勇次, 有田隆也: ブロック型ロボットを用いた構造と行動の共進化の試み, 情報処理学会論文誌, Vol. 43, No. SIG10 (TOM7), pp. 110-118, 2002.