

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

朝井 勇次[†] 有田 隆也[†]

自然界における生物の進化は、体構造の進化と行動の進化の相互作用という側面を持つと見なすことができる。本研究は、そのような観点から、ロボットの構造と行動の共進化モデルを構築し、進化シミュレーションを行い、その進化過程を分析する。本モデルは、生物の発生と進化の過程を模擬しており、多くの従来研究のように、ロボットの構造を定めただけでその行動（制御）のみを進化させるのではなく、各種センサやモータの選択や配置にも選択圧がかかる。そして、構造、行動、環境の密接な相互作用に基づいた現実的なロボット自動設計のための新しい方法論に関する知見を得ることを目指す。シミュレーションの結果、断続平衡進化的な様相が観察され、超音波センサや光センサを使い分ける様々な構造や行動のロボットが出現した。ブロック型可変構造ロボットを用いた実験により、創発した文法に基づいた、センサや車輪の予期せぬ使用法による壁よけ行動などが確認できた。

Coevolution of Bodies and Behavior in a Modular Reconfigurable Robot

YUJI ASAI[†] and TAKAYA ARITA[†]

Creatures in nature can be considered to have evolved under coevolutionary pressure between bodies and behaviors. Based on this view, we construct an evolutionary model in which morphology and control in artificial creatures coevolve based on ontogenesis and biological evolution, and analyze the process of evolution based on the computer simulation. The results of the simulation have shown that the punctuated equilibrium is a generic property of this model, and that artificial creatures arranging and using motors and sensors in a better-than-expected way can be evolved. Evolved creatures were embodied by using a reconfigurable robot composed of processor-embedded cubes with various functions in order to discuss a new robot design methodology.

1. はじめに

複雑な環境下における複雑なタスクをロボットが要求されるにつれて、ロボットのハードウェア、ソフトウェアの設計が困難になりつつある。そのような事情に対応して、近年、進化ロボティクスと名付けられた領域において、生物進化のメカニズムをロボット設計の自動化に応用する試みが始まり、その初期の頃から多様な研究の動機や背景を持つ研究者を集めてきた。現在、その方法論に関して、多様化しつつもほぼ確立された段階に至ったといえる面もある¹⁾。ただし、従来のほとんどの研究では（ロボット製作の場面全般において基本的にいえることであるが）ロボットの構造を人間がまず確定したうえで、その構造においてセンサからの入力をどのようにモータへの出力に結び付けるかという部分に進化的計算手法を適用するものであった。

一方、自然界における生物の進化は、体の構造の進化と体の制御法（行動）の進化の相互作用という側面を持つと見なすことができる。課せられた制約の下で、生息する環境に応じて、両者が相互作用しながら選択圧を受けてきたという見解である。生物のような自律性を持つロボットにおいても、構造と行動、そして、環境の間の高度に洗練された相互作用は本質的であろう²⁾。そのようなアプローチとして、2個体間に置かれたキューブを取り合う競争環境を用いて多様な構造と行動を持つ仮想生物の進化に成功した Sims による先駆的研究³⁾以来、いくつかの研究が行動だけでなく、構造との共進化を指向している⁴⁾。ただし、それらの多くは仮想空間内にとどまるものであった。最近、実ロボットの構造の進化を指向した研究も見られるようになってきた。Lipson らは、伸縮する棒状のアクチュエータを組み合わせたロボットの進化シミュレーションを行った⁵⁾。Mautner らは、文法を持った個体がニューラルネットを持つセルを分割することで、構造と行動の進化を行うモデルを提案している⁶⁾。また、Lee らは、ロボットの構造に遺伝的アルゴリズム、

[†] 名古屋大学大学院人間情報学研究所
Graduate School of Human Informatics, Nagoya University

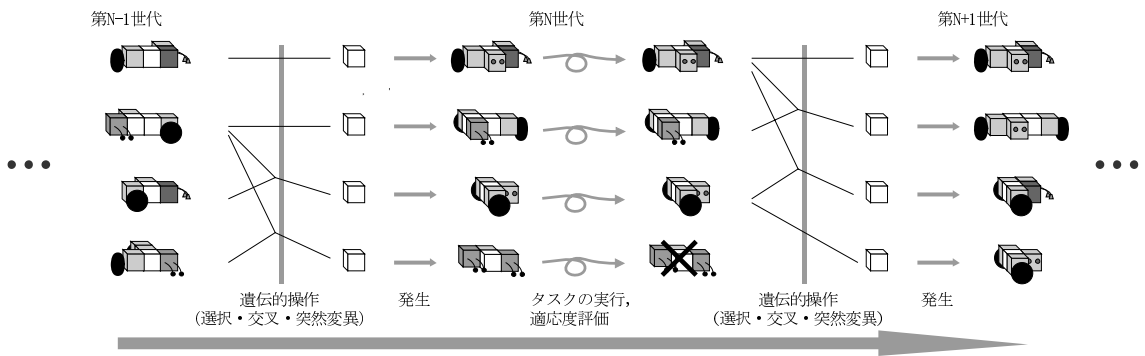


図1 ロボットの発生と進化の概念
Fig. 1 Evolution and ontogeny of the robots.

種類	条件								実行					
	接続 (○:接続, ×:非接続, -:どちらでもよい)				発火 (○:発火, ×:非発火, -:どちらでもよい)				ブロック接続 (○:接続, ×:非接続)				発火設定 (○:発火, ×:非発火)	
	上	右	下	左	上	右	下	左	上	右	下	左		
A	構造	○	×	-	×	○	○	-	×	×	○	×	○	○
B	発火	○	-	×	-	○	×	×	○	○	○	×	○	×
C	構造	×	×	-	×	×	×	-	-	×	×	○	○	×
D	発火	×	-	○	-	×	-	○	×	×	○	○	○	○
E	発火	○	-	×	-	×	-	×	×	○	○	×	×	○

構造の生成	1	→	3 1	→	3 1	→	3 1
			2		5 2 4		5 2 4
状態の変化							

図2 遺伝子情報の利用の例
Fig. 2 An example of gene information use.

制御に遺伝的プログラミングを用いる方法を提案している⁷⁾。ただし、基本的に、これらのいくつかの研究は、ロボットの形状、特に、各種センサの選択や配置までをも進化的に設計させるものではなく²⁾、環境との相互作用こそ知能の存立を決定付けているという立場⁸⁾は現段階ではまだ必ずしも重視されていないといえることができる。

本論文では、個体レベルでは、構造(どのようなセンサを採用し形状はどうするか)と行動(センサ入力をどのようにモータ出力へつなげるか)を、生物の個体発生を模した発生モデルにより統一的に決定し、集団レベルでは、個体レベルの発生を規定する情報を進化モデルにより探索するモデルを構築する。構造と行動、そして環境が密接に相互作用しながら現実的なロボットを進化的に設計する試みである。構造を固定せず探索の対象とするので、同一のハードウェア資源を前提とすると、構造を決定してスタートする場合に比べて自由度が大きくなり、探索空間が広がることを意味する。しかし、環境やタスクが複雑化すると、人間

による構造の決定の困難化やコスト増加、さらに、人間の決定した構造がすでに解を持ちえない可能性も想定される。その意味で、全体として効率的なロボット設計の方法論となりうると考える。本論文では、構築したモデルをもとに進化シミュレーションを行い、その過程を進化論的観点も含めて分析する。さらに、シミュレーションによって生成されたロボットを実際に組み立て検討する。

2. モデル

生物は1つの受精卵の卵割にはじまり、多数の細胞により構成される成体となる。体を構成する細胞は同一の染色体を持っている。それぞれの細胞は周囲の状態によって発現する遺伝子が異なる。その仕組みにより、細胞は異なる役割を果たし、生物は複雑な構造をとることができる。本モデルにおいても、各個体(ロボット)は遺伝子情報として記述され、その情報(文法)に基づいて発生と進化を行う(図1)。

遺伝子情報の表現方式は、細胞分化に関する Nakano

らの自己組織モデル⁹⁾で採用された表記方式をロボット設計の方法論の確立を念頭において変更したものである(図2)。両者とも、構造と制御を同等に表現し発現する点に特色があるが、本モデルでは、現実的なロボットの構造と行動の共進化を狙い、同一機能のブロックではなく、種々の機能を持つ非均質型ブロックを想定し、構造が決定する段階で各種センサの選択や配置が行われ、ハードウェア資源をより有効に活用するようにした。

遺伝子には発生の段階で作用する「構造」遺伝子と、ロボットが行動する段階で作用する「発火」遺伝子がある。1つの遺伝子は、「種類」、「条件」、「実行」の各部分からなる。「種類」は、その遺伝子が「構造」遺伝子か「発火」遺伝子かを区別する。「条件」は、「実行」部分を実行するための条件であり、さらに2つに分けられる。1つは、上下左右(二次元平面上のブロックを真上から見る)のブロックの接続状態を調べる「接続」条件である。「接続」条件は上下左右それぞれに対して「接続」、「非接続」、「どちらでもよい」のいずれかを示す。もう1つは上下左右のブロックの発火状態を調べる「発火」である。「発火」条件は、上下左右それぞれに「発火」、「非発火」、「どちらでもよい」のいずれかを示す。「実行」の内容は、上下左右に新たに接続するブロックの情報(種類と方向)を表す「ブロック接続」(種類や向きの情報については同図では省略)、および、ブロックの発火に関する情報を表す「発火設定」である。発火の設定としては、「発火1」、「発火2」、「発火しない」の3種類がある(「発火1」、「発火2」の区別は同図では省略)。モータブロックでは、「発火1」は車輪の時計回り、「発火2」は車輪の反時計回りの回転を意味する。遺伝子は縦に一列に並んでいるものとし、上から優先順位が与えられる。

本モデルにおける処理の全体の流れを図3に示す。各個体は、発生、タスク実行、適応度評価を行った後、遺伝的操作を行い、次世代集団を構成するということを繰り返す。

まず、発生は1つのブロックだけが存在する状態から始まる。そのブロックにおいて、「構造」遺伝子の「接続」部分を優先順位の高い順に調べる(発火条件は構造遺伝子では調べない)。条件を満たした遺伝子が発現し、「実行」部分が実行され、様々な機能を持つブロックが接続されていく。発生の段階では発火は抑制される。遺伝子情報は、接続された新たなブロックにもコピーされ、各ブロックにおいて同様に解釈されることが繰り返される。全ブロックにおいて遺伝子の発現が終わると発生の段階は終了する。

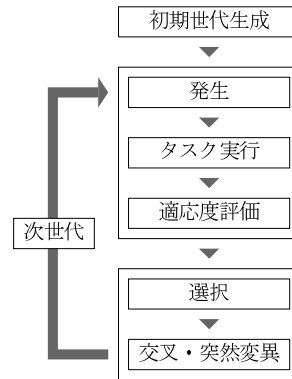


図3 処理の流れ
Fig. 3 General flow of processing.

次に、各個体は設定されたタスクを実行する。構成する各ブロックは「発火」遺伝子に従い、発火状態が動的に変化する。センサを持つブロックだけは「発火」遺伝子の記述に従わず、センサが反応したときに発火する。環境からの入力に応じて各ブロックの発火状態が伝播し、発火したブロックが相互に影響し合い、モータなどのアクチュエータブロックの状態変化によって再び環境への出力となる。全ブロックが遺伝子情報やセンサの入力に従って状態を更新するまでを1ステップとする。設定されたステップ数を終えるか、終了条件を満たすとタスクは終了し、適応度が評価される。

その後、遺伝的操作(選択、交叉、突然変異)を行い、同一個体数の次世代集団を構成する。親はルーレット選択により決定し、親2個体に対して子が1個体できる。2つの親においてそれぞれ交叉点がランダムに決まり、一点交叉する(遺伝子数は増減する)。一方の親の染色体の前半部分ともう一方の親の後半部分がつながられるが、その際、前半部分と後半部分の位置を入替えることが0.5の確率で起こる。遺伝子の位置によって優先順位を割り当てているため、この入替えは隠れた遺伝子情報を発現することを可能とする。突然変異は、全項目、つまり、「種類」、「条件」部分の8カ所、「実行」部分の「ブロック接続」の4カ所と「発火設定」の計14カ所において等確率で起こる。

図2の例を使って説明する。AからEの各行が遺伝子を表しており、網掛けをしている部分は使用されない。A、Cは「構造」遺伝子なので、発生段階でのみで使用され、「発火」に関する条件と「発火設定」は使用されない。また、B、D、Eは「発火」遺伝子であり、タスク実行時に使用され、「ブロック接続」は使用されない。同図の下図において、ブロックに網掛けがしてあるものは発火状態を示す。発生はブロック1が1つだけの状態から始まる。この周りにブロックが存

在しないので、Cだけが「接続」条件を満たし、その「実行」部分が実行され、下と左に、それぞれブロック2と3が接続される。ブロック2は、遺伝子Aに従い、右と左に、それぞれブロック4と5が接続される。タスク実行の段階では、各ブロックは「発火」遺伝子に従って発火状態と非発火状態をとる。ブロック2と5はEの条件、つまり、「接続」条件で上が「接続」、下が「非接続」、「発火」条件で上、下、左が「非発火」を満たすので、発火状態になる。次にブロック2と5が発火することにより、ブロック1と3がDの条件を満たし発火する。さらに、ブロック2はブロック1が発火したことによりBの条件を満たし、非発火状態になる。

3. シミュレーション

3.1 設 定

使用するロボットとして、各種機能を持った立方体の部品を結合してロボットを構成するブロック型可変構造ロボット ROBOCUBE を想定している。ロボットを構成するブロックは、モータブロック、タッチセンサブロック、超音波センサブロック、光センサブロック、機能のないノーマルブロックの5種類とする。各ブロックの使用最大個数はノーマルブロックは5つ、それ以外は2つとする。限定されたハードウェア資源下で構造の探索の付加によってどのような設計が可能となるか明らかにするため、および、構造と行動の共進化モデルの基本的な進化特性の把握のための解析の簡略化のため、このように設定した。発生段階はノーマルブロックに染色体を与えて開始する。ロボットは、モータブロックが2つないと移動することができないものとする。車輪の速度は一定で、10ステップでブロック1つ分進むことができるものとする。

フィールドの内部を壁に衝突せずに動き回るというタスクを設定した。フィールドを図4に示す。同図中の数字はブロック一辺の長さを1とした距離を表している。ロボットの通過した面積を得点とし（移動不可能でもロボットの体の大きさだけ得点する）、この値を評価値とする。ロボットが壁に衝突するか、3000ステップ経過するとタスクは終了する。なお、取得可能な得点の最大は510である。黒い床は光センサ（下方を向いている）の使用を意識したものである。ノーマルブロックは、実際はアンテナ、ブザー、ライトの各機能を持つ3種類のブロックに分類されるが、本タスク試行上は機能的に差がないため同等に扱っている。

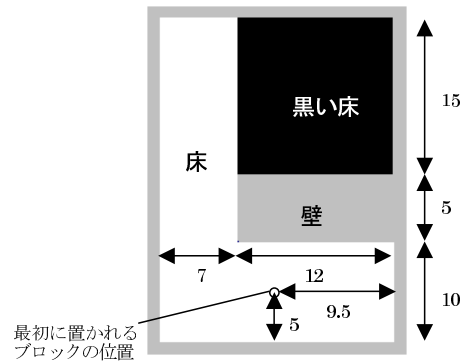


図4 フィールド

Fig. 4 The field for experiments.

パラメータは、個体数を100、初期世代の染色体長（遺伝子数）を1、突然変異率を0.2%とした。初期集団の遺伝子はランダムに作成する。2000より大きい染色体長を持つ個体が交叉によって生ずる場合は、選択をやり直す。

3.2 実験結果

5000世代までの進化実験を40試行実施した。実験の結果、最高得点を獲得したロボットの構造や行動が試行ごとに異なり多様であるということが全般にいえる。また、進化の傾向として、ある時点で突然、一段高い得点を獲得する個体が出現し、その個体と同様な構造と行動をする個体が比較的急速に広まるといったことの繰返しがほとんどの試行において見られた。世代ごとの平均得点をグラフ化すると、階段状に上昇しており、いわゆる断続平衡進化的な様相といえる。この点も含めて、4章において進化系列の例を取り上げて解析する。

シミュレーションの過程で生成された代表的なロボットにおいて、高い得点を獲得するために有効であると考えられるセンサの典型的な使用法を以下にまとめる。

- (1) 超音波センサやタッチセンサを進行方向にほぼ垂直に向け、壁に近づくときセンサが反応し、ロボットが壁から離れるような方向にやや向きを変え、センサが反応していないと、壁に近づきながら動く。これを繰り返すことにより、結果的に壁沿い進行を実現する。
- (2) 超音波センサやタッチセンサをほぼ進行方向に向け、正面に壁が近づくときセンサが反応し、ロボットが壁から離れるような方向にやや向きを変え、センサが反応していないと、壁に近づきながら動く。これを繰り返すことにより、徐々に正面の壁から向きを変える。なお、進行方向に対して斜め方向にセンサを向けている場合に

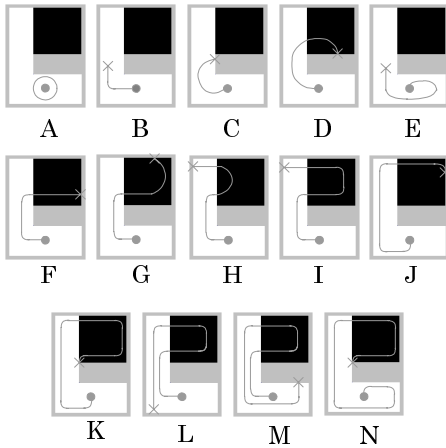


図5 ロボットの動きの分類

Fig. 5 Classification of the robots based on their tracks.

- (1) と (2) の両方の使用法が可能な場合もある。
- (3) たとえば、下方に向けた光センサが黒い床に反応し、向きを変えることによって結果的に壁を避けるというように、他の環境を間接的に利用する。
- (4) 沿って進行していた壁がなくなったときに、壁が存在していた方向に向かうようにして回り込もうとすると、その壁に体が接触しがちなので、センサ情報を巧みに利用して、接近しすぎずに壁を回り込むことが重要になる。本タスクでは、中央の壁を回り込むときが、この状況である。

観察されたロボットの典型的な動きの分類を図5に示す。上述のようなセンサの使用法で、壁に沿って動き、正面の壁を避け、フィールド中央の壁を回り込むことができるものは高得点を得る。タッチセンサや光センサを使用するものは少数で、ほとんどは超音波センサを使用して壁を避けて進む。似たような壁の位置関係にあっても、微妙な体の向きが影響して、避けられる場合と避けられない場合が生ずることもある。

図5の動きを簡単に説明する。Aは開始からその場で回転する。Dは中央の壁を回り込んでいるがそのまま中央の壁に衝突する。Eは回転しながら移動する。超音波センサを使っているが、中央の壁の左側に体が接触する。Fは超音波センサを使用して、壁との距離を保ちながら壁に沿って動く。Gは光センサが黒い床に反応して動きが変化する。Hは光センサによって黒い床から出るように動く。I, L, Mは超音波センサを利用して中央の壁を避け、さらにロボットの正面の壁も避けることができるようになった。しかし、すべての壁が避けられるのではなく、最終的に壁に衝突する。J, K, Nはロボットの進行方向に対して左の壁

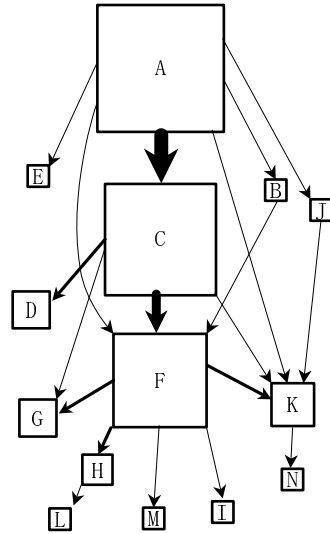


図6 進化系統

Fig. 6 The phylogenetic tree.

に沿って動く。Jは2つ正面の壁を避けたが、3つ目の壁を避けられない。K, Nは開始直後の進む向きが異なるが、ともに中央の壁を回り込めない。

図5に示された各分類のロボットの進化系統における位置付けを図6に示す。四角の中にある英字は図5の行動パターンに対応し、矢印は進化の進み方を示している。多く出現した行動パターンや進化の進み方ほど、それぞれ、大きな四角や太い矢印で表している。

進化の典型的なシナリオは以下のとおりであろう。最初、ロボットは動くこともできない。その場合、体を大きくして得点を稼ぐようになる。その中で、モータを発火させて動くロボットが現れる。動けるようになると、その場で回転しはじめる(A)。片方の車輪を軸にするものや2つの車輪を使って回転するものなど、その方法も多様である。得点を稼ぐために体を大きくするためだけのブロックは、回転により壁に接触して邪魔になる場合もある。多くの進化系列では、次に中央の壁を回り込むロボットが出現する(C)。この段階でも、構造や動き方が異なる様々なロボットが出現する。次に現れるのが、センサを使用して中央の壁に沿って進むものである(F)。5000世代において多くのロボットはこの段階にとどまっておき、正面に迫る壁を回避するのが難しい。

進化の結果得られた移動可能なロボットのほぼすべては、2つの車輪を平行に使うという我々の常識的な考えに反して、2つの車輪の方向が垂直であった。車輪がセンサの入力に応じて動くことにより、ロボットは細かく体を左右に動かしながら進む。2つ車輪のう

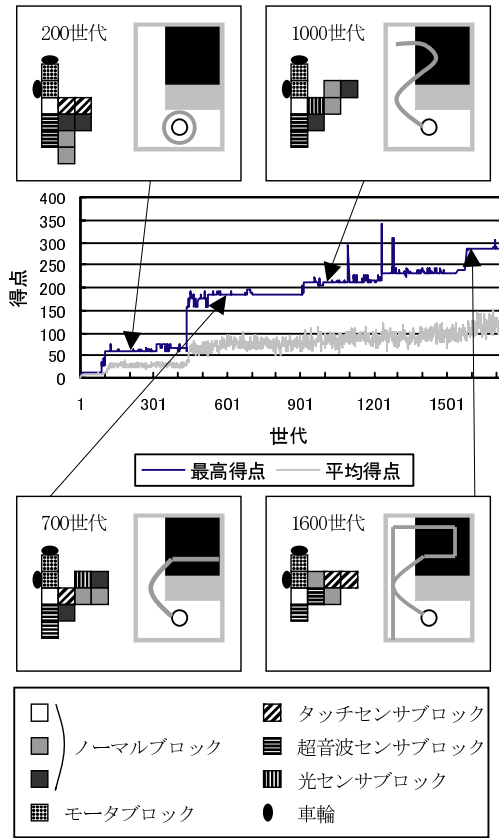


図7 進化の過程
Fig. 7 A process of evolution.

ち、1つが舵取りの役割を果たしている場合が多い。この方法であれば、進行方向を単純に決定することが可能となるので、平行の場合より効率が良い可能性がある。また、実験開始後、Cのようにセンサを使わず、中央の壁を回り込むようになるが、そのときに車輪を垂直に向けて両方の車輪を回転させると、車輪の位置によっては効率良く回り込むことができ、高い得点を獲得できる。そのために、早い段階で車輪が垂直方向に向き、世代が進んでもそれが受け継がれているという可能性も考えられる。

4. 進化系列の分析

4.1 進化の過程

40回の試行中の興味深い進化系列の1つ(図6でA C F H Lの順に進化)を例にとり分析する。その進化過程における各世代の得点の最高と平均を図7に示す。得点は階段状に上昇していることが分かる。同図中には、200世代、700世代、1000世代、1600世代における最高得点を獲得したロボットの構造と移動軌跡も示されている。105世代でロボットは

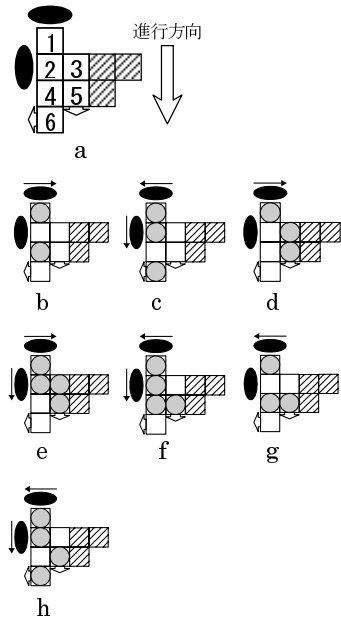


図8 ロボット(1600世代目の最高得点)の主な状態
Fig. 8 Typical internal states of the robot with highest score in the 1600th generation.

その場で回転しはじめる。435世代で直交する2つの車輪と超音波センサをうまく使い中央の壁を避けはじめる。912世代で黒い床から出るように動くようになる。1577世代で、2つの超音波センサを使用して、壁に沿って進み、正面に迫る壁も避けるようになった。ただし、動きつづけることはなく、下の壁に接触する。

1600世代目で最高得点を獲得したロボットの動きのメカニズムを図8を用いて示す。同図は、それを構成する各ブロックの状態(過渡の状態を除く)を示したものであり、aのブロックはそれぞれ1,2がモータブロック,3,4がノーマルブロック,5,6が超音波センサブロックである。同図の各ブロックの「発火」条件を表1に示す。斜線のブロックはその発火状態がモータの出力に結び付かなかったことを示す。ブロックに丸い印がついているものは発火状態を表す。モータブロックが発火している場合は、それに接続されている車輪の進行方向に黒い矢印が描かれている。5,6から出ている白い矢印は超音波センサの向いている方向を表す。試行を開始したとき、センサの反応範囲に壁はないので状態bになり、その場で回転する。6のブロックが反応しはじめると状態cになる。cは壁から離れる方向に進むので6が反応しなくなる。そして、bとcを繰り返すことにより、壁に沿って進むことが可能になる。bとcは、6の反応が4,2,1と伝わった後の状態である。進行方向に対して正面に壁が

表1 各ブロックの発火条件

Table 1 Conditions of firing in each block.

1	下のブロックが発火しているなら発火1. 下のブロックが発火していないなら発火2.
2	右と下のブロックがともに発火していないなら発火1. 右のブロックが発火しているなら発火1, ただし下のブロックが発火しているなら非発火.
3	下のブロックが発火しているなら発火, ただし左のブロックが発火しているなら非発火.
4	上のブロックが発火しているなら発火, ただし下のブロックが発火しているなら非発火.
5,6	超音波センサブロックなので, センサが反応したら発火.

迫ったとき, d, e, f, g の順序で1ステップずつこれらの状態を繰り返す. 結果として, 進行方向に対して左側, つまり壁のない方向へ少しずつ進路を変えていく. しばらくすると, それまで5が反応していた壁に6が反応するようになり, 再び壁に沿って進むことになる. このようにして, このロボットはフィールド全体を動き回る.

4.2 遺伝子情報の発現

遺伝子の発現と進化の進行の関係を調べるために, 適応度のジャンプが起こった前後で使用された遺伝子の数を比較した(表2). 使用された遺伝子の数とは, 条件部分が満たされた遺伝子の数である. 同一な遺伝子とは, 使用された遺伝子のうち, 全項目14が全部一致する遺伝子の数である. ほぼ同一とは, 13項目以上が一致する遺伝子の数である. ここでの遺伝子の一致とは, 実際には使用されない部分(「構造」遺伝子中の「発火」条件など)も含んでの意味である. 430世代ではその場で回転するだけだったが, 435世代では中央の壁に沿って進むことができるようになっている. 910世代から915世代にかけては光センサを使用するようになっている. 1575世代から1580世代にかけては, 超音波センサ2つを利用し, 正面に迫る壁を避けるようになっている. 同表より, 使用された遺伝子は全遺伝子数に比べて非常に少ないことが分かる. 使用されない遺伝子も次世代へと伝わるが, それらがすべて無駄であるとは必ずしもいえない. 使用されない遺伝子に突然変異が起こっても評価値は変わらず, その影響は蓄積されうる. そして, それらが表面に出るときに大きな変化をもたらす可能性があるからである. 多くの場合, それは有効には働かないが, 偶然, 高い評価値に結び付いた場合, それが適応度のジャンプになりうる.

また, 同表より, 後の世代における進化のジャンプのほうがジャンプの前後の使用された遺伝子の共通部分が大きくなっていることが分かる. この違いは, ロ

表2 使用された遺伝子数の推移

Table 2 Transition in usage of gene information.

世代	430	435	910	915	1575	1580
全遺伝子数	163	261	665	1192	1615	1581
使用された遺伝子の数	14	22	19	20	19	20
同一な遺伝子の数	1		10		9	
ほぼ同一な遺伝子の数	2		11		10	

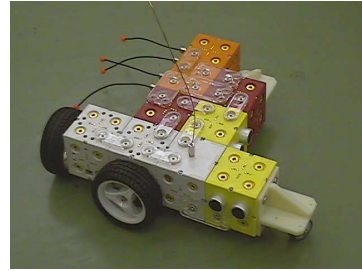


図9 作成したロボットの例

Fig. 9 An embodied robot.

ボットの複雑さの進化と関係があると考えられる. ロボットが複雑化すると, 小さな遺伝子情報の変化でも突然変異体の適応度の相対的な減少が激しくなると考えられるからである. それまでに形成された重要な行動, たとえば, 巧妙な壁伝い進行のメカニズムが壊された場合, 使われなかった遺伝子の発現でそのような適応度の上昇を起こす行動を生み出す確率は低いであろう.

5. ロボット実験

4章で取り上げ解析した進化系列の最終世代で最高得点を獲得したロボットをROBOCUBEを用いて実際に作成し(図9), フィールドを設定して実験した. シミュレーションにおけるロボットの動きなどに関する物理的計算は計算時間削減を考慮して最大限に単純化しているが, ロボットの重量や重心を調節したり, モータ速度を多少変更してタイヤの滑りを抑えたりすることにより, シミュレーションで得られた, 左右に本体を動かしながら前進し, 中央の壁や正面に迫る壁を避けるなどの行動を再現することができた. それだけでなく, シミュレーションでは, スタート地点近くに帰ってきた後, 壁に衝突して終了したが, 組み立てたロボットでは, そのような調整の結果, フィールドを回り続けることができた.

シミュレーションで生成された他のロボットもいくつか作成したが, 行動の再現が容易でないものも少な

くなかった．大きな原因はタイヤの滑りと考えられる．タイヤの滑りがロボットの動きにどう影響を与えるかを正確に計算，予測していないからである．また，センサの誤差，フィールドの設定の誤差，信号伝達の遅延も無視できない．

参考のために，シミュレーションとは独立に，同一の条件で人手でいくつかのロボットを設計したり実験したりしてみたが，うまくタスクを実行させることができなかった．2つの車輪の向きが平行なロボットを想定したためにそもそも解が見つかりにくくなっている可能性がある．また，各ブロックの状態数が制限されているという制約のために，センサの状態をロボットの制御に巧みに結び付けることが基本的に難しい作業となっていることが分かった．

6. おわりに

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構築し，進化シミュレーションを行った．その結果，多様な進化がみられ，それらから，安定した期間が訪れた後，突然，大きな進化が起こり新たな構造と行動を有するロボットが出現するということが繰り返される断続平衡進化的な様相が観察できた．また，進化系統を明らかにした後，進化系列の1つに着目し，詳細に進化の過程を分析した．出現したロボットは車輪の向きを垂直にし，細かく車輪を動かして壁避けをするという予期せぬものであった．得られた個体を実際のロボットとして作成して，実験したところ，同様の壁避け行動をすることが確認された．壁避け行動の出現そのものは，行動のみを進化させる従来研究においても少なからず報告されているが，センサ情報の伝達路や使用ブロック数などの大きな制約の下での興味深い構造や行動の出現という点が特に注目になると思われる．複雑な行動をするロボットでも実際に使用される遺伝子は全遺伝子の中できわめてわずかであった．高い得点を得たロボットが集団中に広まる一方で，実際の生物同様，使用されない遺伝子も次の世代へ伝わるため，重要ではない遺伝子に突然変異が蓄積され，それが表現型になるときに，ロボットの構造と行動が進化のジャンプを起こす可能性がある．

本論文では，構造と行動，そして環境の密接な相互作用の中で現実的なロボットが設計されるための進化ダイナミクスの基本的な特性をシミュレーションに基づいて検討することを主眼とした．今後の研究の1つの方向性として，工学的実用性をいっそう追究するアプローチがありうる．その場合，より現実的なハードウェアの設定とともに，より効率的な，遺伝子情報の

表現，発生の操作，遺伝的操作などの検討が重要な課題となると思われる．

参考文献

- 1) Nolfi, S. and Floreano, D.: *Evolutionary Robotics*, The MIT Press (2000).
- 2) Pollack, J.B., Lipson, H. and Funes, P.: Three Generations of Automatically Designed Robots, *Artificial Life*, Vol.7, pp.215–223 (2001).
- 3) Sims, K.: Evolving 3D Morphology and Behavior by Competition, *Artificial Life IV*, pp.28–39 (1994).
- 4) Taylor, T. and Massey, C.: Recent Developments in the Evolution of Morphologies and Controllers for Physically Simulated Creatures, *Artificial Life*, Vol.7, pp.77–87 (2001).
- 5) Lipson, H. and Pollack, J.B.: Automatic Design and Manufacture of Robotic Life Forms, *Nature*, Vol.406, pp.974–978 (2000).
- 6) Mautner, C. and Belew, R.K.: Evolving Robot Morphology and Control, *Proc. Genetic & Evolutionary Computation Conference*, pp.205–213 (1999).
- 7) Lee, W., Hallam, J. and Lund, H.H.: A Hybrid GP/GA Approach for Co-evolving Controllers and Robot Bodies to Achieve Fitness-Specified Tasks, *Proc. 1996 IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, pp.384–389 (1996).
- 8) Pfeifer, R. and Scheier, C.: *Understanding Intelligence*, The MIT Press (1999). 石黒ほか(監訳): 知の創成, 共立出版 (2001).
- 9) Nakano, K., Konishi, K., Ishiyama, R. and Ikeda, S.: A Self-Organizing System with Cell-Specialization, *Proc. 1997 IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, pp.279–284 (1997).

(平成 14 年 2 月 4 日受付)

(平成 14 年 4 月 9 日再受付)

(平成 14 年 5 月 15 日採録)



朝井 勇次

1978 年生．2001 年名古屋大学情報文化学部自然情報学科卒業．現在，同大学大学院人間情報学研究所博士課程前期課程在学中．人工生命の研究に従事．



有田 隆也(正会員)

1960年生．1983年東京大学工学部計数工学科卒業．1988年同大学大学院工学系研究科博士課程修了．工学博士．名古屋工業大学講師，カリフォルニア大学ロサンゼルス校客員

研究員を経て，現在，名古屋大学大学院人間情報学研究科助教授．人工生命や情報科学の研究に従事．複雑適応系，言語の進化，進化的計算論等に興味を持つ．人工知能学会，電子情報通信学会，日本認知科学会各会員．
