CGを用いたマシンの3次元構造進化システム

非会員 澤 亮 治 (慶應義塾大学)

正 員 萩 原 将 文 (慶應義塾大学)

A system for evolving 3D machine structure using CG

Ryoji Sawa, Non-member, Masafumi Hagiwara, Member (Keio University)

In this paper, we propose a system of evolving virtual machine structure in three-dimensional space. It is easy for users to design the structure of machines in the system by use of Computer Graphics(CG). The system can acquire suitable machine structures for given virtual world by evolutionary approach. In the proposed system, first, the virtual environment in which virtual machines move is set. Next, all types of the machine parts data are inputted to the system. A machine structure consists of parts data and the information on the combination. One machine structure is transformed to one gene. The first population of genes is made of combination of a few parts selected at random. Offspring are generated by evolutionary techniques: selection, mutation, and crossover. The machine structure is adapted to the virtual world by repetition of evolution. We assumed a flat plane with various obstacles as a virtual environment. It is confirmed that various structures could be obtained through computer experiments.

キーワード：遺伝的アルゴリズム, 進化システム, コンピュータグラフィックス

1. はじめに

工業社会の発達により、工業製品はますます高機能化し、その構造も加速度的に複雑化している。機械の構造の決定は重要な問題であるが、一般的には以前の構造を基本として行われることが多い。このような以前の構造を踏襲する決定法では、新規な構造決定は困難である。

ここで、生物の構造を考えてみる。生物の構造は一般的に進化が進むごとに複雑になっている。これは、生物が環境に適応するように進化した結果として、複雑な構造を獲得したのである。すなわち、生物の構造は初期の段階から構造が決定したのではなく、進化する段階で、徐々に環境に適合するように自動的に獲得されたのである⁽¹⁾⁻⁽³⁾。

近年、この生物の進化的な構造獲得を計算機上でシミュレートする研究が注目されている。生物の形態獲得を模擬した研究として、CGを用いた芸術分野での研究がある⁽⁴⁾⁽⁵⁾。この分野では細胞の分裂を数学的にモデル化したL-System⁽⁶⁾や遺伝的プログラミング⁽⁷⁾、対話型進化計算法⁽⁸⁾などの進化的手法が利用されている。しかし、これらの研究の多くは仮想生物の視覚的な美しさの部分に重点が置かれている。

進化的手法を構造獲得に用いる例として半導体素子の組合せを最適化する研究がある⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。より一般的な機械の構造の進化的な獲得を目指した例として、自動車の設計を

扱う研究がある⁽¹¹⁾。この研究では、パーツの最適な組合せの獲得は可能であるが、パーツの構造は考慮されていない。また、構造を自己組織化させる研究として、材料の支持構造をセル・オートマトンにより獲得する研究がある⁽¹²⁾。しかし、構造の自己組織化は材料の内部の支持構造に限られており、パーツの組合せによる機械の構造への適用は困難である。

生物の自己組織的な構造獲得を実ロボットに応用した研究もなされている⁽¹⁴⁾⁻⁽¹⁷⁾。しかしながら、現在の段階では実ロボットを莫大なパーツの組合せによって作成し試行するのは困難であり、パーツの数が制限されたものになってしまう。

こうした背景のもと、計算機上の仮想環境において生物の進化手法に着目して構造を獲得する研究が注目されている⁽¹⁸⁾⁻⁽²¹⁾。この分野での従来の構造の進化法では、主に2次元の構造進化が扱われている。例えば、円柱と見立てた線分により2次元上での荷重点を支持するモデルの進化がある⁽¹⁸⁾。これらは、2次元の構造の進化が可能であるが、3次元への適用は図られていない。また、3次元構造の進化として仮想生物の形態獲得を扱った研究がある⁽²⁰⁾⁽²¹⁾。これらは、仮想生物が特定の環境下で形態を獲得する様子を実験により示している。

そこで本論文では、CGを利用し、設定された仮想環境内に適応するマシンの3次元構造の進化システムを提案する。

図1 システムの概略図

Fig. 1. Basic structure of the proposed system

進化手法には遺伝的アルゴリズム^{(22) - (25)}を利用し、パーツごとの特性を活かしたマシン構造の自動獲得を行う。3次元構造の進化であるため、CGを用いており、ユーザはその動きや構造を容易に理解することができる。

以下、2章で提案する進化システムの概略について述べる。3章では実際に進化実験で適用した例について説明する。4章において、進化実験により獲得された構造について考察する。

2. 提案システム

〈2・1〉構造進化システム概略 生物は自らの構造を進化の過程で少しずつ機能を追加する形で獲得している。一方、マシンの構造は、機能の異なる複数のパーツが結合したものと捉えられる。複雑なマシン構造もつきつめれば、より簡単な部品を組み合わせたものである。生物が環境に適應するように構造を獲得したように、マシンの構造も進化的手法により獲得することが可能であろう。

ここでは、提案するマシンの3次元構造進化システムの概略について説明する。図1に提案システムの概略図を示す。提案システムでは、まずユーザがマシンを構成するパーツの集合であるパーツ群とその動作させる環境を設定する。初期のマシン構造は、パーツ群の中からランダムに選択されたパーツが結合され決定される。これらは遺伝子型 (genotype) に変換され、遺伝子が作成される。これらに対して淘汰、突然変異、交叉の遺伝的操作が施される。これらの遺伝子は表現型 (phenotype) であるマシン構造に再変換され、仮想的な環境内に生み出される。発生したマシンは設定された環境内で一定時間動作が行われ、その結果により適応度が決定される。この適応度を利用した進化的手法により、マシンは環境に適應していくことが可能となる。

図2 遺伝子コーディング

Fig. 2. Coding of the string in a gene

〈2・2〉遺伝子コーディング 提案システムでは一つのマシンの構造を、一つの遺伝子で表現している。マシンの構造は複数のパーツの結合で構成される。そのため、マシンの構造を表現する遺伝子は図2に示すように、各パーツの種類などのパーツ固有の情報と各パーツ間の結合の情報で構成されている。

パーツの基本的な情報には、パーツの大きさ (scale 要素)、パーツの軸方向の向き (rotate 要素)、結合位置の情報 (connect 要素) がある。scale 要素は (S_x, S_y, S_z) の3つの値を持ち、パーツの初期形状データに対して、それぞれ掛け合わされパーツの大きさが決定される。rotate 要素はパーツの軸方向の向きを (R_x, R_y, R_z) の値で格納している。初期形状のパーツは軸方向として z 軸が定められており、パーツの rotate 要素に合わせて向きが変更される。connect 要素も同様に (C_x, C_y, C_z) の値を持ち、パーツの scale 要素を適用後のパーツの大きさに掛け合わされる。掛け合わされた後の値がこのパーツの結合位置となる。図3に各結合情報をパーツに適用した場合の変化を示す。このようにして、scale 要素が適用されることでパーツの大きさが、rotate 要素によりパーツの軸の方向が変化する。また、connect 要素により結合の位置が決定される。

また、パーツの種類によっては、これらの情報の他にいくつかの情報を持つ場合がある。例えば、動力であるエンジンパーツは最大の回転角度の情報を持つ。

〈2・3〉遺伝的操作 提案システムでは、構造を進化させるにあたり、遺伝的操作の枠組を利用している。遺伝的操作として、突然変異、交叉を利用し、適合度に従った淘汰の操作を行う。

〈2・3・1〉突然変異 突然変異の操作では、遺伝子的一部分をランダムに変化させる。提案システムには、次の操

図3 遺伝子コーディングされるパーツの情報
Fig. 3. Coding of the information of parts

作の2つの操作がある。

- (1) 遺伝子の結合情報を変化させる操作: あらかじめ定められた確率に従って突然変異により変化させる結合情報の場所を決定する。突然変異が起こった結合情報に対しては、新しい結合情報がランダムに決定される。
- (2) 新しいパーツを追加する操作: あらかじめ定められた確率により、各遺伝子ごとに突然変異により新しいパーツを追加するか否かを決定する。突然変異の起こった遺伝子に対しては、新しいパーツを遺伝子の最後尾に追加する。追加するパーツの種類および結合の情報などは、ランダムに決定される。

突然変異の操作により、マシンの新しい構造を環境に取り入れることが可能となる。結合情報の変化と新しい部品の追加は、突然変異のフェーズでのみ起こる。特に新しいパーツの追加は、他の操作でパーツが追加されることが無いために重要なオペレータである。

〈2・3・2〉交 叉 交叉の操作ではまず、仮想環境内に存在する全ての遺伝子の中から、2つの遺伝子が選択される。この2つの遺伝子内でランダムに交叉位置が決定され、選択された交叉位置に従って、2つの遺伝子の交叉が行われる。なおその位置に関しては、遺伝子内に存在する各パーツ間の結合部分とした。交叉方法は、交叉位置が一

図4 パーツ群
Fig. 4. Parts using evolutionary simulations

つの一点交叉とした。

交叉の操作により、環境に有効なマシンの結合を組み合わせることが可能になる。また、交叉の操作は全ての遺伝子に対して適用しているのではない。環境には、各世代で無性の遺伝子と有性の遺伝子が存在すると仮定し、有性の遺伝子のみが交叉により、新しい子孫を環境に生み出す。無性の遺伝子は、突然変異のみにより新しい子孫を環境に生み出す。有性の遺伝子であるか無性の遺伝子であるかは、交叉率に従ってランダムに決定される。

〈2・3・3〉淘 汰 提案システムでは淘汰の方式として、トーナメント方式を用いている。この方法では、環境内に存在する全ての遺伝子からランダムにトーナメントサイズである t_{size} 個の遺伝子を選び出す。そして、その中で最も適合度の高い遺伝子を選択する。選択された遺伝子のみが、次世代に子孫を残すことができる。この過程を集団数が得られるまで繰り返す。トーナメント方式を選択した理由は、遺伝子の適合度の分布に偏りが生じても淘汰圧が変化しないことや、淘汰圧の調整がしやすいという利点を有しているためである。

〈2・4〉評 価 部 評価部では、設定した仮想的な環境内において、各世代の個体を動作させる。経過時間は離散値で表現され、単位時刻ごとに個体の動作が表示される。環境内での遺伝子の動作結果により、遺伝子の適合度が決定される。

3. 仮想環境への適用例

提案システムでは、地面と見立てた平面において、一定時間経過後のマシンの移動距離をパーツ数で割った値を適応度としている。

〈3・1〉使用したパーツ 図4にマシンの構造を構成するために用意したパーツ群の一覧を示す。短円柱、長円柱、四角柱、三角柱、動力の各パーツが用意されている。

動力を持たないパーツである短円柱、長円柱、四角柱、三角柱の各パーツは、大きさ (scale 要素)、向く方向 (rotate 要素)、結合位置 (connect 要素) の情報を持つ。

マシンの動力となる動力パーツには、回転の方法により 2 種類のパーツが用意されている。一つは、通常のエンジンのように、同じ回転方向に回転を続けるものである。もう一つは、回転の角度が制限されている動力である。この動力に結合したパーツは、振り子のような動作をする。回転角が制限される動力は大きさ、方向、結合位置の情報に加えて、最大の回転角度の情報を持つ。最大の回転角度の情報についても、他のパーツ情報と同様に突然変異が起こり得る。ただし、回転角度については、とりうる値の幅が定められており、この値の範囲内でのみ突然変異が起こる。突然変異が起こった場合、最大の回転角度 θ は次式で決定される。ここで r は、一様乱数 $[0,1]$ である。

$$\theta = (r \times \frac{\theta_{max}}{\theta_{unit}} + 1.0) \times \theta_{unit} \dots\dots\dots (1)$$

θ_{max} : 最大の回転角度

θ_{unit} : 角度の振り幅の単位

今回の実験では、 θ_{max} を 180° とし、 θ_{unit} を 30° としている。

〈3・2〉適 応 度 設定した仮想環境での平面は (x, y) 平面であり、 z 軸が高さを表している。遺伝子の先頭のパーツは構造の胴体部分とみなされ、この底面が (x, y) 平面と平行に置かれるように角度が調整される。マシンは動力パーツによりさまざまな動作を行う。それに伴うマシンの移動方向は、マシンが地面と接地している接地部分の動作により計算される。その移動ベクトルは動力の (x, y) 平面に平行で回転軸に垂直の方向で、回転軸と接地点の距離に比例した大きさとなる。移動距離は、動力の角速度と接地点と回転軸間の距離により計算される。この移動距離を遺伝子に結合している全パーツ数で割った数値が適応値として用いられる。

進行方向は、接点を通り回転軸に垂直で地面平面に水平な直線となる。進行方向を示す移動ベクトル $v(v_x, v_y, v_z)$ は以下のように求められる。まず回転軸の直線の式は、

$$\begin{cases} x = x_0 + ft \\ y = y_0 + gt \\ z = z_0 + ht \end{cases} \dots\dots\dots (2)$$

f, g, h : 定数 t : パラメータ

となる。ここで、点 (x_0, y_0, z_0) は回転軸のある一点である。式 (2) により回転軸の任意の一点 (x, y, z) が計算される。次に地面との接点を通り、回転軸に垂直な平面を式 (2) により求める。この平面は次式で表される。

$$a_1x + b_1y + c_1z + d_1 = 0 \dots\dots\dots (3)$$

$$a_1 = f, b_1 = g, c_1 = h$$

$$d_1 = -(fx_0 + gy_0 + hz_0)$$

表 1 遺伝的操作のパラメータ

Table 1. Parameters using genetic algorithm

淘汰のトーナメントサイズ t_{size}	2
scale 要素への突然変異率	0.03
rotate 要素への突然変異率	0.03
connect 要素への突然変異率	0.03
最大回転角度の突然変異率	0.03
パーツの挿入の突然変異率	0.2
交叉率 (有性遺伝子の割合)	0.1
動力の最大回転角度 θ_{max}	180°
回転角度単位 θ_{unit}	30°

この平面と地面平面とのなす交線が進行方向となる。仮想環境内での一時刻のマシンの動作による移動ベクトル v は、地面平面と式 (3) との交線方向となる。地面平面は次式で表される。

$$a_2x + b_2y + c_2z + d_2 = 0 \dots\dots\dots (4)$$

a_2, b_2, c_2, d_2 : 定数

以上より、移動ベクトル v は、次のように求められる。

$$f_v = b_1c_2 - b_2c_1 \dots\dots\dots (5)$$

$$g_v = c_1a_2 - c_2a_1 \dots\dots\dots (6)$$

$$h_v = a_1b_2 - a_2b_1 \dots\dots\dots (7)$$

$$v_x = \frac{g_v(d_1c_2 - c_1d_2) - h_v(d_1b_2 - b_1d_2)}{f_v^2 + g_v^2 + h_v^2} \dots\dots (8)$$

$$v_y = -\frac{f_v(d_1c_2 - c_1d_2) - h_v(a_1d_2 - a_2d_1)}{f_v^2 + g_v^2 + h_v^2} \dots\dots (9)$$

$$v_z = \frac{f_v(d_1c_2 - c_1d_2) - g_v(a_1d_2 - a_2d_1)}{f_v^2 + g_v^2 + h_v^2} \dots\dots (10)$$

〈3・3〉障害物が存在する平面上での進化 マシンの動作する環境として、前述した平面に障害物が存在する環境を設定し、進化実験を行った。

障害物のある環境では、障害物が存在するために障害物を飛び越すような移動形状が不可欠となる。

4. 実験結果

〈4・1〉平面上での実験 仮想環境として、まず前述した障害物の存在しない平面を設定し、平面上で移動可能な構造の獲得を目指し、進化実験を行った。適応度は、移動距離をもとにして計算される。実験に利用した遺伝的操作などのパラメータを表 1 に示し、結果の例を図 5 に示す。

図 5 に示した実験結果では、回転軸の方向がほぼ等しい複数の動力が結合したマシンが生成された。一つの動力に地面を蹴って回転するパーツが結合したのみでは、動力一つ分の回転角度しか得ることができない。回転軸の方向がほぼ等しい複数の動力を結合させることで、動力一つの場合と比較して回転角度を増大させて移動することが可能である。

通常の動力と、回転が制限された動力の両方を使用する場合では、進化の過程において通常の動力を使用した個体

図 5 実験結果 1: 障害物のない平面
Fig. 5. Simulation result 1: flat environment

に偏ってしまうことが多かった。そこで、動力に関して回転角度が制限された動力のみを使用した場合についての実験を行った。

図 6 にその結果例を示す。図 6 より、マシンは図 5 の場合とは異なった進化をしていることがわかる。単純に回転するだけでは、振り子の揺り戻しにより、前に進んだ後に元の位置に戻ってしまう場合も多い。動力部の回転角度の制限により、複数の動力を異なる向きで結合させこの問題を解決している。すなわち、図 7 に示すように、振り子動作する動力が前方へ進む回転を行っている間は、複数の動力の先頭に結合した回転体が地面に振り下ろされる。振り子動作の揺り戻しの間は、振り下ろされたままであれば後ろに戻ってしまうため、他の振り子の動力を利用して上方に振り上げられる。

平面環境では、使用する動力パーツの種類に制限を加えない場合と加えた場合の両方に、複数の動力が結合し移動メカニズムを構成するような傾向があった。使用する動力パーツの種類に制限が加えられない場合には、主に回転角度を大きくするように複数の動力の結合される傾向があった。一方、動力パーツの種類が制限される場合には、図 7

図 6 実験結果 2: 障害物のない平面
Fig. 6. Simulation result 2: flat environment

に示すように、前進するための工夫として複数の動力がより複雑に共同動作する傾向が高かった。

〈4・2〉 障害物の存在する平面 より複雑な環境を考慮し、障害物の存在する仮想環境で実験を行った。

図 8 に進化実験により得られたマシン構造の例を示す。平面上での実験とは異なり、生成されたマシンは棒高とびに類似したような動作を行っている。

障害物の存在する環境では、複数の動力を結合させるよりも、動力に結合し地面を蹴る部分となるパーツの長さが重要になると考えられる。この地面を蹴るパーツが短いと障害となる壁を乗り越えることができないからである。図 8 の結果では、複数のパーツを結合させてマシンをより高くすることで壁を乗り越えている。

〈4・3〉 移動距離についての考察 表 2 に移動距離とマシンの構造に利用されている動力数の関係を示す。単純に考えれば、動力数が大きいほど移動距離が大きくなると予想されるが、そのような結果とはなっていない。その理由について考察を行う。

まず、平面環境で構造を進化させたマシン 1 は、回転角度を制限した動力と制限しない動力の両種類を利用している。しかし、動力として移動に役立っているのは回転を制

図 7 振り子動作する動力を利用した移動

Fig. 7. A model of move with engines as the swing of the pendulum

表 2 図示したマシンの移動距離と動力数の関係
Table 2. Data comparison between distance and the number of engines

	動力数 (回転角制限なし)	動力数 (回転角制限あり)	動力数 (合計)	移動距離
マシン 1 図 5	4	2	6	575
マシン 2 図 6	0	4	4	288
マシン 3 図 8	4	0	4	427

表 3 図示したマシンの移動距離とマシンの幅・高さの関係

Table 3. Data comparison between distance and the width and height of virtual machines

	マシンの幅	マシンの高さ	移動距離
マシン 1 図 5	199	92	575
マシン 2 図 6	97	96	288
マシン 3 図 8	73	151	427

限しない動力である。また、6 個の動力を結合することで回転角度を上げている。しかし地面を蹴るパーツの長さが小さいため、効率良く利用されていない。移動距離については地面を蹴るパーツがより長いものを用いたマシン構造が発生すれば、移動距離がより大きくなると考えられる。複数の動力を結合させることも重要であるが、動力に結合するパーツの長さも移動距離にとっては重要である。

また、動力数と移動距離が比例しない理由として、動力

(a) 時刻 1

(b) 時刻 2

(c) 時刻 3

(d) 時刻 4

(e) 時刻 5

図 8 実験結果: 障害物ありの場合

Fig. 8. Simulation result: obstacles

として回転角度を制限した動力のみを利用したマシン 2 では、単純な構造では前進ができないことが上げられる。前進するためには、複数の動力を組み合わせる図 7 に示したような動作を基本として進まなくてはならない。よって、マシン 2 では動力数に対する移動距離が小さくなったと考えられる。

マシン 3 では、障害物を乗り越えるために高さが高くなる構造を獲得している。このようなマシンの特性は、表 3 に示すように、マシンの幅が短くなり、高さが高い構造として現れている。動力に結合するパーツの長さが長いために、障害物を越えることが可能となり、また長いパーツを回転させることにより移動距離をより長くすることが可能となっている。困難な環境になり、総合的な性能に優れたマシンが生成された興味深い結果となっている。

5. 結 論

本論文では、コンピュータグラフィックス (CG) を利用したマシンの 3 次元構造進化システムを提案した。提案システムでは、想定した仮想環境に適応するマシンの 3 次元的な構造を自動的に獲得することが可能である。

マシンの動作する環境としてさまざまな仮想環境を設定し、移動可能な構造の獲得を目標として進化実験を行った。想定した平面上でのマシンの動作から移動距離を算出し、環境への適応度とした。実験の結果より、移動可能な構造の進化が確認された。また障害物の存在する困難な環境においては、より総合性能の高いマシンが生成されるという興味深い現象も見られた。

本研究は、CGと進化的手法を用いてマシンの3次元構造を設計するための基礎的な研究であり、今後はより高度な機械の自動設計をめざす。またこのようなアプローチは形態学や進化学など、他の分野への応用も可能である。

本研究の一部は、文部省の分子・超分子・超構造体理工学プロジェクトによっている。

(平成12年4月14日受付)

文 献

- (1) Dawkins, R.: "The Blind Watchmaker", Harlow Longman, 1986.
- (2) Wainwright, S.: "Axis and Circumference", Harvard Univ. Press, 1988.
- (3) 酒井聡樹, 高田壮則, 近雅博: "生き物の進化ゲーム", 共立出版, 1999.
- (4) 畝見達夫: "遺伝的アルゴリズムとコンピュータグラフィクスアート", 人工知能学会誌, vol.9, no.4, pp.518-523, 1994.
- (5) Lee, P., Takahashi, H., Nakajima, M. and Agui, T.: "多様性のある人工生物の自動形成のための進化的モデリング", 映像情報メディア学会誌, vol.51, no.8, pp.1284-1290, 1997.
- (6) Lindenmayer, A.: "Mathematical models for cellular interactions in development", J. Theor. Biol., 18, pp.280-299, 1968.
- (7) Koza, J.: "Genetic Programming", MIT Press, 1992.
- (8) 高木英行, 畝見達夫, 寺野隆雄: "対話型進化計算法の研究動向", 人工知能学会誌, vol.13, no.5, pp.692-703, 1998.
- (9) Koza, J., Bennett, F., Andre, D., Keane, M., and Dunlap, F.: "Automated synthesis of analog electrical circuits by means of genetic programming", IEEE Trans. Evolutionary Computation, vol.1, no.2, pp.109-128, 1997.
- (10) Hemmi, H., Mizoguchi, J., and Shimohara, K.: "Development and evolution of hardware behaviors", Artificial Life IV, Proceedings of the Fourth international Workshop on the synthesis and Simulation of Living Systems, pp.371-376, 1994.
- (11) 山川宏: "遺伝的アルゴリズムを用いた設計の遺伝と進化に関する研究", 機論 (C), vol.61-592, pp.4646-4652, 1995.
- (12) 伊能教夫, 下平真子, 小林弘樹: "力学構造物を自己組織化するセル・オートマトン (ローカルルールによって生じるシステム全体の挙動)", 機論 (A), vol.61-586, pp.1416-1422, 1995.
- (13) 村尾元, 玉置久, 北村新三: "創発的アプローチによるシステム設計の実現に向けて", 第7回設計工学・システム部門講演会講演論文集, no.97-69, pp.129-132, 1997.
- (14) 嘉数侑昇: "ロボティクスにおける創発と進化", 日本ロボット学会誌, vol.15, no.5, pp.658-662, 1997.
- (15) 村田智: "均質ユニットによる機械のかたちづくり", 日本ロボット学会誌, vol.15, No.5, pp.675-679, 1997.
- (16) Hosokawa, K., Fujii, T., Kaetsu, H., Asama, H., Kuroda, Y., and Endo, I.: "Self-organizing collective robots with morphogenesis in a Vertical Plane", JSME Int. J., Ser.C, vol.40, no.1, pp.195-202, 1999.
- (17) 中野啓: "脳をつくる", 共立出版, 1995.
- (18) 吉村允孝, 清水義仁: "生物の進化を模擬した創生的機械システム設計", 機論 (C), vol.61-589, pp.3789-3797, 1995.
- (19) 吉村允孝, 能勢幸嗣: "先入観のない状態からの機械システムに対する形状・機能の創成的概念設計", 機論 (C), vol.60-571, pp.1098-1104, 1994.
- (20) Sims, K.: "Evolving 3D morphology and behavior by competition", Artificial Life IV, Proceedings of the Fourth international Workshop on the synthesis and Simulation of Living Systems, pp.28-39, 1994.
- (21) Ventrella, J.: "Explorations in the emergence of morphology

and locomotion behavior in animated characters", Artificial Life IV, Proceedings of the Fourth international Workshop on the synthesis and Simulation of Living Systems, pp.436-441, 1994.

- (22) Holland, J.: "Adaptation in Natural and Artificial Systems", MIT Press, 1992.
- (23) 北野宏明編: "遺伝的アルゴリズム", 産業図書, 1993.
- (24) 北野宏明編: "遺伝的アルゴリズム 2", 産業図書, 1995.
- (25) 伊庭齊志: "遺伝的アルゴリズムの基礎", オーム社, 1994.

澤 亮 治 (非会員) 1975年10月24日生。1998年度大・理工・電気卒。2000年、同大学大学院修士課程了。現在、サンマイクロシステムズ(株)勤務。在学中、ニューラルネットワーク、人工生命の研究に従事。

萩原 将 文 (正員) 1982年度大・工・電気卒。1987年同大学院博士課程了。工博。同年同大助手。現在、同大助教授。デジタル信号処理による復調方式・同期方式、ニューラルネットワーク、ファジィシステム、GAの研究に従事。昭60年度丹羽記念賞、昭61年度本会篠原記念学術奨励賞、平1年度IEEE Consumer Electronics Society論文賞、平6年安藤記念学術奨励賞、平8年日本ファジィ学会著述賞受賞。電気学会、IEEE、電子情報通信学会、情報処理学会、人工知能学会、INNS各会員。