HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	人工生物のための形態創発可能な遺伝子表現型に関する研究
Author(s)	萬谷, 和之; 鈴木, 育男; 山本, 雅人; 古川, 正志
Citation	情報処理北海道シンポジウム講演論文集, 2010(2010), 133-138
Issue Date	2010-10-02
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/51050
Rights	ここに掲載した著作物の利用に関する注意 本著作物の著作権は情報処理学会に帰属します。本著作物は著作権者である情報処理学会の許可のもとに掲載するものです。ご利用に当たっては「著作権法」ならびに「情報処理学会倫理綱領」に従うことをお願いいたします。
Type	article
File Information	Hokkaidosympo2010133-8.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

情報処理北海道シンポジウム 2010

人工生物のための形態創発可能な遺伝子表現型に関する研究

萬谷和之* 鈴木育男 山本雅人 古川正志
(北大情報科学)† (北大情報科学)

1 はじめに

近年, 計算機技術の発展により, グラフィックスの描画, 処理能力が向上している. それに伴い, 人工生物を用いた三次元アニメーションの生成 [1] や, 物理環境下でのシミュレーションによる行動獲得実験の研究 [2] が多く行われている. そのような人工生物の生成には, 環境が動的であること, また環境と人工生物自身との相互作用が考慮されるため, 進化的計算が有力である. 進化方法としては, 自然界の生物に倣い, 行動と形態の共進化が注目されている. このような背景から, 人工生物の行動進化, さらに形態進化に関する研究 [3][4] が一層重要視されている. また, 人工生物だけでなく, モジュラーロボットの設計にも共進化が取り入れられている [6].

しかし, 従来の研究では, 人工生物の形態に着目した進化が行われている例が少ない. 人工生物を構成するプリミティブは, 形状が全て統一されており, その構成数も少ない. また, プリミティブの接続方法も, 特定の位置に限定されていることが多い. そのため, 行動進化に比べ, 形態進化は多くの制約が依然として課せられている.

そこで, 本研究では, 人工生物の形態の表現性に着目し, 三次元物理環境における人工生物の形態と行動の共進化を行う. 形態の表現性を高めることにより, 求められるタスクに対して, より最適な人工生物を生成できると推測される. 進化的計算により生成するため, 人工生物の形態と行動の遺伝子型と, その表現に基づく共進化方法を提案した. また, 簡単なタスク獲得による数値計算実験を行い, 形態の表現性を制限した方法と提案方法で性能の比較をした. しかし, 形態の表現性を高めると, 進化過程でプリミティブの衝突や貫通のある遺伝子型が発生しやすくなる. 最悪の場合には数値爆発が頻発し, このような状態では正常な進化ができなくなってしまう. 本研究では, この数値爆発を発生する遺伝子型を致死遺伝子と呼び, 致死遺伝子を進化過程で回避, 防止する方法をいくつか提案し, これについても比較実験を行った.

2 提案方法

人工生物の形態と行動の遺伝子型表現と, その表現に基づいた生成方法を説明する。

2.1 形態と行動の遺伝子型表現

人工生物は, いくつかのプリミティブから構成され, 各プリミティブは生物の関節に当たるジョイントにより接続されている. つまり, 人工生物の遺伝子型によって, 各プリミティブの情報とプリミティブ間の接続情報を網羅できればよい. そこで本研究では, プリミティブの情報をノードリスト, プリミティブ間の接続情報を隣接リストとして遺伝子型を表現する. すなわち, 隣接リストにより形態のトポロジ, ノードリストにより具体的な形状を表現する. また, 行動の遺伝子型は隣接リスト毎に含まれる. その遺伝子型を元に, 固定正弦波を生成し, それによって各関節を独立に角度制御することで, 人工生物は運動することができる.

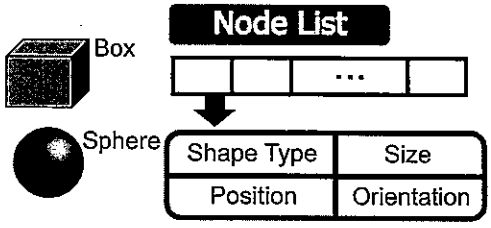

Fig. 1 ノードリスト

2.1.1 ノードリスト (プリミティブの情報)

各ノードには, 各プリミティブの形状 (*shapetype*, *size*) と位置情報 (*position*, *orientation*) が格納される (図 1). プリミティブの形状は *shapetype* と *size* により決定する. 使用する形状は直方体と球の二種類であり, *size* により寸法を指定する. ノードの集合は可変長の一次元配列により管理する. ノードリストにおける順序は, プリミティブの生成順となる.

2.1.2 隣接リスト (プリミティブ間の接続情報)

隣接リストでは, 形態のトポロジを表現する. プリミティブ間の接続情報として, 接続している二つのプリミティブ (*parentnode*, *childnode*), それぞれのプリミティブの接続点 $((\Theta_p, \Phi_p),(\Theta_c, \Phi_c))$ がある (図 2). それぞれのプリミティブは, ノードリストの順序から親ノード, 子ノードの関係が決定する. それぞれのプリミティブの接続点は, パラメータ (Θ, Φ) から, 各プリミティブの重心からの極ベクトル (2 の矢印) を生成し, そのベクトルとプリミティブの面の交点とする. この表現により, プリミティブは全てのプリミティブの表面上に, 自由に接続可能である.

また, 行動の遺伝子型も格納し, その遺伝子型に基づき, 親ノードに接続するジョイント (関節球) を固定正弦波により角度制御する. 行動の遺伝子型としては, 関節の可動軸 (*jointtype*), 正弦波の周期 (*frequency*), 位相 (*phase*)

*orozuya@complex.hokudai.eng.ac.jp
札幌市北区北 14 条西 9 丁目北海道大学大学院情報科学研究科

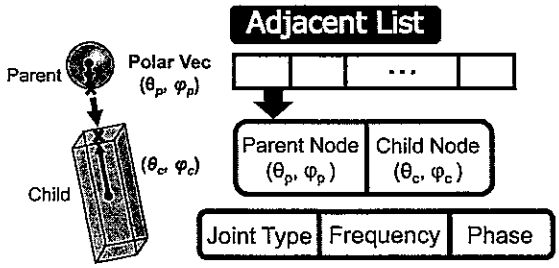

Fig. 2 隣接リスト

がある．全ての関節は 1 自由度であり，*jointtype* により稼働軸を固定，x 軸，y 軸，z 軸のいずれかから決定する．関節の可動域は，今回は全ての関節で統一している．

2.2 遺伝子型から表現型の発現

遺伝子型から表現型を発現するには，ノードリストを先頭から順に走査して，ノードからプリミティブを生成し，隣接リストによりそのプリミティブの配置を決定する．具体的な生成手法は以下の通りである．

1. ノードリストの先頭ノード (root ノード) を生成する
2. 走査中のノードを子ノードとする隣接リストから，接続先のノードである親ノードを探す
3. 2 における隣接リストから，それぞれのノードの接続点を求める
4. 子ノードの親ノードに対する重心位置，傾きを求める
5. 子ノードの情報からプリミティブを生成，配置する
6. 2〜4 をノードリストの最終要素まで行う

2.2.1 致死遺伝子

提案方法では，プリミティブの接続，配置は自由に行われる．そのため，プリミティブ間で衝突，貫通が起こる可能性がある．このような状態では，人工生物は不安定な挙動をし，最悪の場合，数値爆発を起こす．この数値爆発を起こす遺伝子型を，本研究では致死遺伝子とする．そのため進化過程で，プリミティブの衝突，貫通を極力回避することが重要である．本研究では，そのような遺伝子型への対処についていくつか提案している．なお，致死遺伝子の発生は，本研究では，全てのプリミティブ間の距離が一定の値以下であるかにより判定する．

2.3 進化方法

人工生物の共進化方法は，遺伝子型が木構造のトポロジを持つことから，遺伝的プログラミング (Genetic Programming, GP)[5] を基にしている．進化の手順は，個体の評価をした後に，遺伝演算としてノードの追加，交叉，突然変異を行う．以下では特に，遺伝演算の詳細について説明する．初期解生成，評価，選択の説明については省略する．

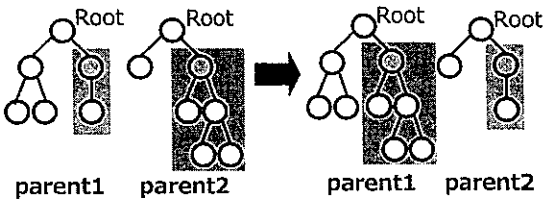

Fig. 3 交叉

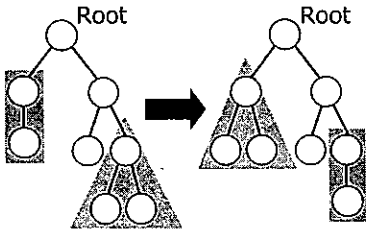

Fig. 4 逆位

2.3.1 ノードの追加

各個体に対して，一つのランダムなパラメータを持つノードを，木構造のランダムな位置に追加する．追加には，葉ノードとして追加する方法と，既に存在するリンクに挿入する方法の二種類がある．単純な操作ではあるが，プリミティブ数の増減の調節が形態に大きな影響を与えるので重要な操作である．

2.3.2 交叉

それぞれの親から，root ノードを除いてランダムに一つノードを選択し，それを交叉点とする．交叉する範囲は，その交叉点以下の部分木が対象となる (図 3)．

2.3.3 幾何 (数値) 的突然変異

幾何的突然変異は，ノードリスト及び隣接リストにおける実数値パラメータを変異させる操作である．本研究では，各パラメータをランダムな実数値に置き換える．

2.3.4 トポロジ (構造) 的突然変異

トポロジー的突然変異は，遺伝子型のトポロジーを変異させる操作である．本研究では変異として，逆位，挿入，削除，交換の四つを定義した．これら四つの方法は各個体ごとに等確率で選択される．

逆位 root ノードを除き，重複するノードがないように部分木を二つ選択し，それらを入れ替える．部分木が二つ得られない場合には，逆位は行わない (図 4)．

挿入 root ノードを除き，ノードをランダムに一つ選択し，挿入先のリンクを選択してそのノードを挿入する．そのノード以下の部分木は，選択したノードの親ノードに接続する (図 5)．

削除 root ノードを除き，ノードをランダムに一つ選択し，そのノードをノードリスト及び隣接リストから削除

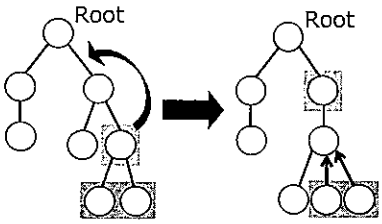

Fig. 5 挿入

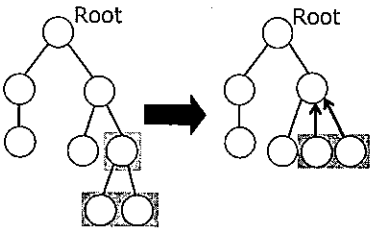

Fig. 6 削除

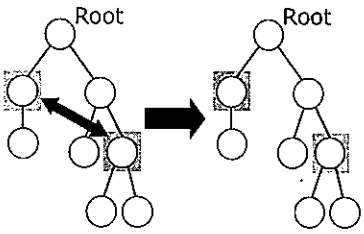

Fig. 7 交換

する. そのノード以下の部分木は, 挿入と同様に, 選択した親ノードに接続する (図 6).

交換 root ノードを除き, ノードをランダムに二つ重複がないように選択し, ノードリスト及び隣接リストでのそれらの配置を入れ替える (図 7).

3 数値計算実験

3.1 実験内容

行動と形態の共進化を行う上で, 形態の遺伝子型の表現性と, 致死遺伝子の発生を防止する方法が進化に与える影響について, 実験により調査した.

まず, 形態の遺伝子型の表現性とは, 人工生物を構成するプリミティブの形状及び, その接続方法の自由性のことである. 提案方法では, プリミティブの形状は直方体と球があり, それぞれのサイズもある範囲で自由である. また, プリミティブの全ての面上を接続点として指定できる. この提案方法に対し, 形態の表現性を制限した方法では, 使用するプリミティブは立方体と球であり, 全てのプリミティブのサイズを統一する. また, 各プリミティブの面上で予め定めた六点でのみ, プリミティブが接続できる. この点を本研究では「芽」と呼び, 芽に対して多重接続を許可している. この二つの方法について, 進化の結果を比較した.

次に, 致死遺伝子の発生を防止する方法について三つ提案し, それぞれについて比較を行った. 先述した通り, 提案方法ではプリミティブの接続, 配置が自由に行なわれるため, プリミティブの衝突, 貫通が容易に起こる. そのため, それが原因で人工生物の挙動に不本意な影響を与え, 最悪の場合, 数値爆発が発生してしまう. そこで, 進化の過程でプリミティブの衝突, 貫通を可能な限り少なくする工夫が必要である. 本研究では, それらを回避するために, 三つの方法を提案した. 一つ目の方法は, プリミティブの衝突回数に応じて, 個体ごとにペナルティを与える方法である. この衝突回数とは, 遺伝子型から表現型の生成時に, ある個体のプリミティブの全ペアに対して, ペアで一度でも衝突が発生した場合に, 衝突回数を一と数える. ペナルティは, 衝突回数が多いほど大きな値になる. 二つ目は, 衝突の原因となるプリミティブを個体から削除する方法である. プリミティブを削除する時, 親ノードではない (木構造で葉に当たる) プリミティブを優先的に削除する. また, プリミティブの生成順が新しい側 (ノードリストの後部) から, 衝突の原因となるプリミティブを全て削除する. 3つ目は, 一定以上のプリミティブの衝突回数のある個体を, 前の世代の個体と交換する方法である. この前の世代の個体とは, 現在の個体の要素番号と同じ番号を持つ前世代の個体である.

3.2 実験条件

各問題とも, 交叉率は 0.3, 両突然変異率ともに 0.1 とした. プリミティブは直方体と球を使用し, 直方体については, 一辺の長さの最大値, 最小値, 合計長の上限値を設定した. 形態の表現性を制限した方法では, プリミティブは立方体と球を使用し, 立方体の一辺の長さと球の半径を全て同じ長さに設定した.

進化計算の設定は, 個体数を 50, 世代数を 100 とし, 初期ノード数を 3, エリート個体数を 5 とし, ランク選択を用いた. また, 計算時間短縮のため, 上限ノード数を設定し, 個体のノード数がこの上限数を超えた場合, その超えた値に応じてさらにペナルティを与える. 上限ノード数は, 本研究では 10 とした.

実験として, 3 次元物理環境下で, 制限時間内に人工生物の開始地点から最終地点までの移動距離の最大化を行った. 制限時間はシミュレーション時間で 10 秒に設定した. 第一の実験では, 致死遺伝子への対応として, 両方法ともに 2 つ目の方法を用いる. また, 第二の実験の三つ目の方法では, プリミティブの衝突数がプリミティブの全ペア数の 1/3 を超えた場合に交換する. 各実験は全て 10 回試行した.

3.3 実験結果

以下に二つの実験の十回平均の結果を示す.

まず, 形態の表現性の違いによる実験結果を示す. 以下では, 提案方法と形態の表現性を制限した方法との結果を比較していく. 図 8 は二つの方法の評価値, 図 9 はノード数, 図 10 はプリミティブの衝突回数を示し, それ

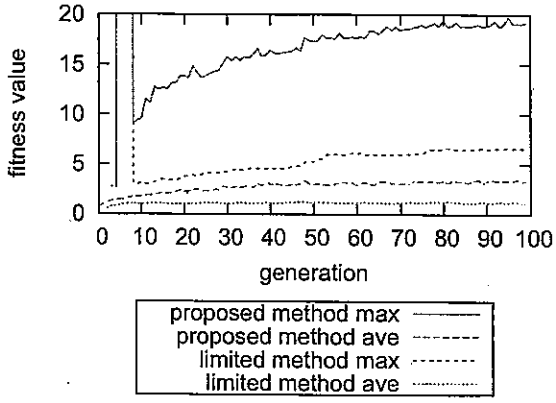

Fig. 8 提案方法と表現性を制限した方法の評価値の最大値, 平均値

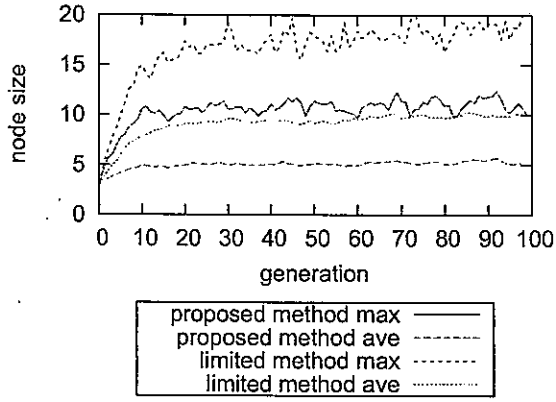

Fig. 9 提案方法と表現性を制限した方法のノード数の最大値, 平均値

ぞれにおいて最大値と平均値を示した. 図 8 から, 提案方法の方が形態の表現性を制限した方法よりも評価値が高く, より最適な人工生物が生成できていることを示している. また, 提案方法で生成された人工生物は, 大きな球のプリミティブに, 他の少数のプリミティブが付随しているものが多く見られた (図 11 左). この球を中心に回転することにより, 全体で転がる, または遠心力により回転するといった移動をする. それに対し表現性を制限した方法では, 転がることで移動する人工生物は少なく, シミュレーション開始時に反動をつけて移動する個体が多い (図 11 右). 図 9 から分かる通り, ノード数が提案方法に比べ非常に多く, できるだけ全長を長くすることにより距離を稼ぐ個体も多くみられた. そのため, 提案方法のように能動的に移動距離を最大化するのではなく, 受動的に距離を最大化する傾向が強い. 以上から, 提案方法の方が人工生物の進化性に優れていることが分かり, 形態の表現性を高めることで進化性が高まることが示された.

次に, 致死遺伝子の発生を防止する方法の違いによる実験結果を示す. 図 12, 図 15 に評価値, 図 13, 図 16 にノード数, 図 14, 図 17 にプリミティブの衝突回数を示し,

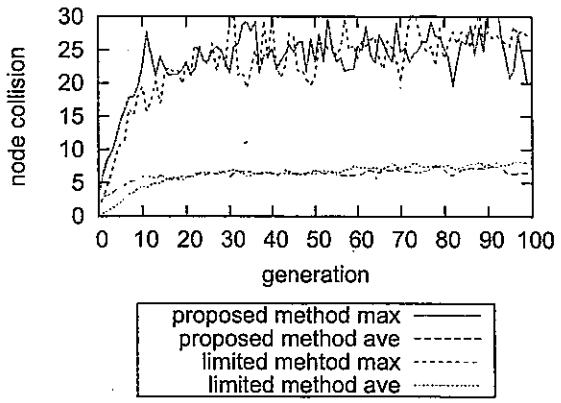

Fig. 10 提案方法と表現性を制限した方法の衝突回数の最大値, 平均値

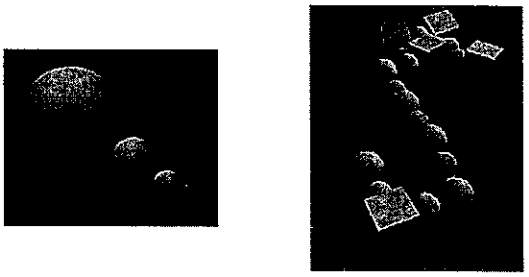

Fig. 11 形態の表現性の違いによる人工生物の例

それぞれにおいて三つの方法の結果を示した. 図 12 と図 15 から, 最も評価値の最大値, 平均値が高いのは, 二つ目の衝突の原因となるプリミティブを削除する方法であることが明らかである. さらに図 13 と図 16, 図 14 と図 17 から, 二つ目の方法ではノード数が他の方法よりも少ないため, プリミティブの衝突回数も少ないことが分かる. そのため, 致死遺伝子の発生を抑制する方法としては最適である. また, 各方法で生成された人工生物の特徴についても述べる. 二つ目の方法では先の通り, 少数のプリミティブで構成され, 転がることにより能動的に移動する人工生物が獲得できた. 一つ目の個体にペナルティを与える方法では, 二つ目の方法と同様に, 転がって移動する個体が出現している. しかし, 二つ目の方法に比べプリミティブ数が多く, 動作がやや非効率である. 三つ目の方法では, この転がる個体の出現頻度が悪く, 最初の反動を利用したり, 全長を長くする個体が多く見られた.

今回の実験では, 原点からの移動距離の最大化を評価関数とした. そのため, 大きな球を持ち, 構成プリミティブの数が少ない個体が有利となった. よって, 進化過程上でプリミティブの数を増加させにくい二つ目の方法が優位となり, 今回の実験では一概に, 二つ目の方法が高い進化性を持つとは言いにくい. しかし, 今回の三つの方法はそれぞれ異なる特徴を有しており, 実験条件を変更して, 改めて結果を確認する必要がある.

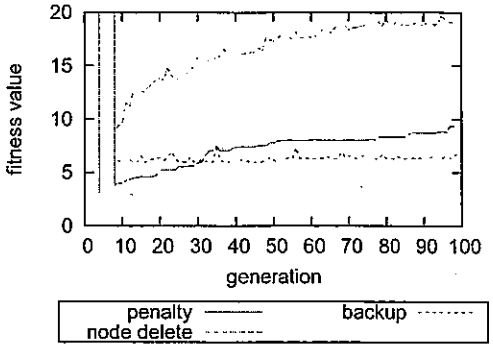

Fig. 12 致死遺伝子への対応の違いによる最大評価値の推移

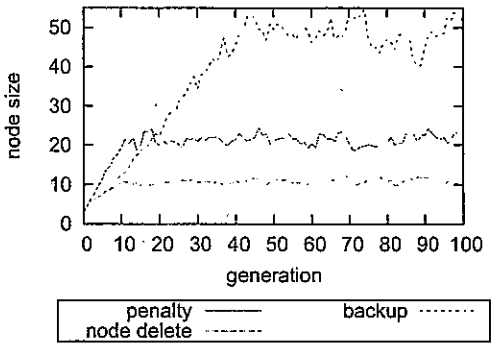

Fig. 13 致死遺伝子への対応の違いによる最大ノード数の推移

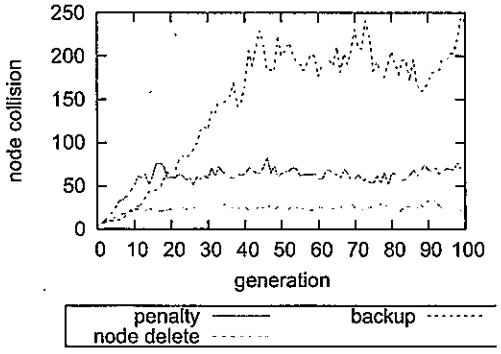

Fig. 14 致死遺伝子への対応の違いによる最大衝突回数の推移

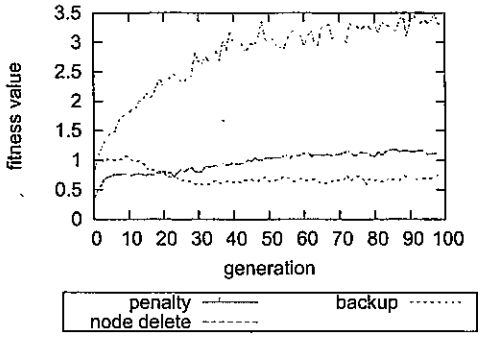

Fig. 15 致死遺伝子への対応の違いによる平均評価値の推移

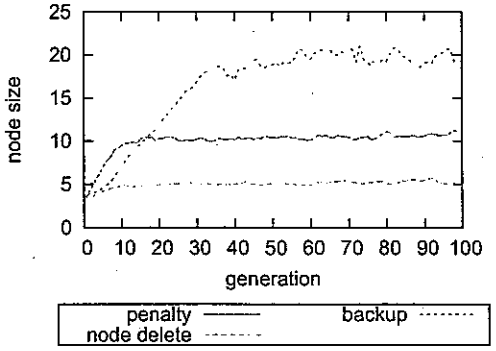

Fig. 16 致死遺伝子への対応の違いによる平均ノード数の推移

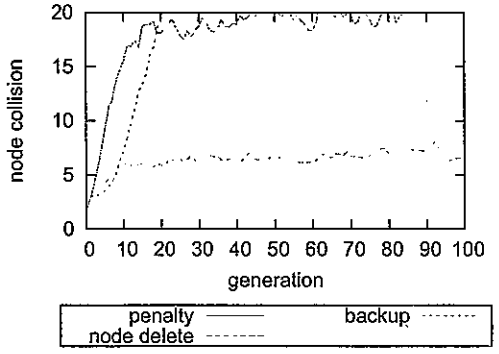

Fig. 17 致死遺伝子への対応の違いによる平均衝突回数の推移

4 まとめ

本研究では，形態の表現性に着目し，進化的計算により，複雑性と多様性のある人工生物を生成を目標として，形態と行動の遺伝子型とその表現に基づく共進化方法を提案した．また，実験により，提案方法の有効性と多様性を示した．

本研究では，人工生物の形態の表現性に着目し，三次元物理環境における人工生物の共進化を行った．また，進化的計算方法における人工生物の形態と行動の遺伝子型と，その表現に基づく共進化方法を提案した．そして，簡単なタスク獲得による数値計算実験を行い，形態の表現力を制限した場合と提案方法で比較をした．さらに，致死遺伝子の発生を防止する方法についても提案し，同様の数値計算実験により比較を行った．

二つの実験から，形態の表現性が進化に影響を与えること，また致死遺伝子への対応によっても進化に影響を与えることが示された．しかし，今回行ったタスクは至極簡単なため，より複雑なタスクに対しても同様のことが示されるか検証の必要がある．現状の行動の遺伝子では，単調な行動しか獲得できない．そのため，複雑なタスクを学習させるには，意思決定をより高度に行える遺伝子型に改善することが課題である．また，形態を構成するプリミティブも，より複雑な形状を扱える遺伝子型を

提案し，その結果についても調査する予定である．

参考文献

[1] J. Wu and Z. Popovic, "Realistic modeling of bird flight animations", 2003.

[2] K. Sims, "Evolving Virtual Creatures".

[3] Maciej Komosinski, "The world of Framsticks: Simulation, evolution, interaction", 2000.

[4] G.S Hornby and J.B Pollack, "Evolving L-Systems to generate virtual creatures", 2001.

[5] J.R. Koza, "Genetic programming: on the programming of computers by means of natural selection".

[6] Daniel Marbach and Auke Jan Ijspeert, "Co-Evolution of Configuration and Control for Homogenous Modular Robots".