

報告番号	※甲	第	号
------	----	---	---

主論文の要旨

論文題目 Heterochrony and Artificial Embryogeny (ヘテロクロニーと人工発生)

氏名 RIBEIRO DOS SANTOS CALDAS DE MATOS, Artur Manuel

論文内容の要旨

遺伝子アルゴリズム (以下 GA) と自然界における生物進化の大きな違いは、遺伝子型 (進化の主体) と表現型 (遺伝子型が表現する個体) の間に違いがないことである。GA の一種である人工発生 (以下 AE) はこの区別を強調したものである。AE では、遺伝子型は表現型を表すのではなく、表現型を“成長”させるための命令の集合である。

AE は、従来の GA よりも遺伝子型に表現力があるため GA より有望であり、理論的にはより複雑な表現型を作り出す能力を持っている。しかし、現状では、それに関する理論的な解析が乏しい状況である。つまり、現在は AE を解析するための広く受け入れられた方法論が無い。そのため、異なる人工発生を比較することが難しく、また、なぜある AE が他の AE と比べて良い性能を示すのかを理解することすら難しいと言える。

本論文では、AE の重要な特徴を推測し、意味のある比較を行うことを可能にする理論的な枠組みを提案する。AE は GA よりも生物進化をよりうまく記述するモデルであり、発生生物学と進化生物学の概念を利用して分析することができる。これら生物学における二つの分野に関連する中心的な概念の一つは、ヘテロクロニー (異時性) と呼ばれる、表現型に内在する発生過程を変更されることで新たな表現型が生じる過程である。ヘテロクロニーは進化的な変化をもたらす唯一の仕組みではないが、とても重要であると広く考えられている。たとえば、ネオテニー (幼生生殖、個体の全体的な成長が“遅れる”ことによって生じる新たな種の出現、新種の親は元の種のこどもに似る傾向がある) や、ハイパーモルフォシス (過形成、新種の個体が元の種の個体より長期間成長すること、新種は元の種より大きくなる) がヘテロクロニーとしてよく知られている。

我々は、Alberch らによるヘテロクロニーに関する重要な枠組みを AE において利用できるように適合させ、それをいくつかの人工発生に適用した。Alberch らの枠組みは、種内でのヘテロクロニー的な現象を厳密な方法で定量化し、分類するものである。まず、この枠組みでは、体長、体高、総重量など、比較のために利用される一連の量的形質を定める。こ

これらの形質は、注目している種においていくつかの個体が成長する間計測され、その種の典型的な個体の成長曲線を定めるのに用いられる。この枠組みでは、最も重要な特性を集約する3つのパラメータである、 α :成長が開始する時間、 β :成長が停止する時間、 K :平均の成長率を、成長曲線を用いて定義する。続いて、2つの種の間で生じうるすべてのヘテロクロニー的なイベントを、これらのパラメータの変化として定義する。たとえば、ネオテニーは、先祖種と子孫種の間で生じる K の減少として厳密に定義される。我々の提案手法においては、この枠組みを用いる対象を種から個体に変更し、先祖個体から突然変異で生じた個体を“子孫”個体として定義した。

はじめに、我々は、セルラーエンコーディング型発生という、ある具体的な人工発生を解析するのに利用した。これは、最も初期の段階で提案された人工発生であり、ニューラルネットワークの進化において良い性能を残している。我々は、奇数パリティ問題（ニューラルネットに関する一般的なベンチマーク問題）と“2つの1”（今回我々が設計した、解くのがより難しい問題）の2つの具体的な問題を解くネットワークの進化に注目して解析した。後者の問題では、全く同一のパラメータ設定でいくつかの試行を行い、問題をうまく解くネットワークを発見できた試行と、そうでなかった試行の2つにグループ分けした。次に、我々は、これらの2つのグループに対して個別に我々の枠組みを適用し、結果を統計的に比較した。この解析を行う理由は、より良い性能をもたらすヘテロクロニー的なイベントを選び出すためである。たとえば、良い試行においてのみ観測されたイベントはおそらく発生の進化を加速すると考えられる。解析の結果、両グループ間に主にパラメータの相関に関していくつかの違いが示された。

次に、これまでの解析を定式化し、異なる人工発生の比較に適用した。今回は、2次元パターンを進化させる2つの人工発生を実装した。一つはセルラーオートマトン型発生と呼ぶものであり、もう一つは文法ベース型発生と呼ぶものである。我々の解析では、1) それぞれの発生が可能にするヘテロクロニー的な変化の度合いを明らかにすること、2) それぞれの発生が、発生過程を変更する一方で最終的な表現型は変更しないという特定の種類の突然変異を可能にするかどうかを知ること注目した。我々が中立でヘテロクロニー的な突然変異（NH突然変異）と呼ぶこの種の突然変異は、人工発生の性能を向上させる可能性が高いため重要だと考えられている。比較の結果、一般にセルラーエンコーディング型発生は文法ベース型発生よりずっと大きな制約を受けるが、低い確率ではあるものの両者共にNH突然変異を可能にすることがわかった。

また、我々は、異なる人工発生間や問題間において、ヘテロクロニーに関するパラメータの相関を統計的に比較する手法を示し、上の2つの発生に適用した。その結果、ほとんどの相関は2つの発生間で異なるが、少なくともある一つの相関は両発生間で同様であることが判明した。相関がある同じ値をとった理由は各発生によって異なるため、それは厳密な意味で共通する要因があることを示してはいなかった。

以上、本論文では、Alberchらの枠組みをAEの文脈に適合させ、それを利用して次の比較を行った。1) あるヘテロクロニー的なイベントがより良い性能をもたらすかどうかを理解するために、ある人工発生における、ひとつの問題への適用に焦点を絞り、進化の成功した試行とそうでなかった試行の比較を行った。2) 異なる人工発生において、ヘテロク

ロニー的な変化や他のパラメータを比較した。3) 同一の人工発生を用いて、2つの異なる問題間でのヘテロクロニー的なイベントの発生を比較した。本論文で示された枠組みは、どのような種類の発生においても適用可能であり、定量的な指標をつくりだし、それらは簡単な実験で算出可能であるという点で、一般的であると言える。本論文で示された枠組みが、将来、人工発生が一つの研究領域としてより厳密な土台に立つのを可能にすることを期待している。