

報告番号	※甲	第	号
------	----	---	---

## 主論文の要旨

論文題目 共進化に基づく先行評価の実進化システムへの導入

氏名 中井 淳一

## 論文内容の要旨

進化ロボティクスは進化計算によるロボット制御器の自動設計を目指す研究分野である。従来は、ホスト計算機でのシミュレーションによる適応度評価に基づいて制御器を進化させ、それをロボットに転送して動作させる手法が主流であったが、シミュレーション環境に適応した制御器が実世界のロボットで必ずしも同様に有効とは限らず、実環境とのギャップを生みがちである。また、環境やタスクを変更するたびに、シミュレータを変更する必要がある。Watsonらは実進化型ロボットシステムを提案し、ホスト計算機なしに実環境でのロボット行動により適応度評価することで、問題解決を狙ったが、ロボット行動だけで適応度評価するため、特に適応度の向上していない進化初期に弊害を生みやすい。また、時間的コストとロボットの疲労が増大する可能性があった。

本論文では、ロボット行動の前に先行評価し、低適応度とみなす個体による行動を回避することによって、これらの問題の解決を狙う手法を提案している。先行評価器はその精度を適応度として進化させ、制御器の進化系との共進化系を構成することで、作成のコストの軽減を狙っている。まず、この提案手法を極めて単純化し、単純な問題に適用して、その基本的評価を行っている。次に、先行評価を実進化型2足歩行ロボットに導入し、歩行動作を自律的に獲得する際の初期に頻出しがちな転倒の回数の削減を試みている。さらに、関数最大化問題に適用することで、実進化に限らず、適応度評価にコストやリスクが要求される問題において、幅広く利用できることを示している。

本論文の各章の概要は次の通りである。第1章では、本論文の目的について述べている。近年、様々な場所でロボットが活用されている。しかし、複雑な機構を持つロボットの動作を人の手で設計するのは難しい。また、人とのやり取りが必要とされるロボットの場合、動作環境が予測できないことが多く、その動作や機構を設計するのが難しい。そのため、ロボットの動作や機構の設計の方法は大きな課題である。

進化ロボティクスは、人の手を借りる必要がないことが利点であるが、あまり実社

会では活用されていない。その理由として、以下のいくつかの問題が挙げられる。シミュレーションと現実の差異により、ロボットが予期しない動作をしてしまう可能性がある。また、実社会のような、予め動作環境を把握し難い状況では、シミュレーションを設計するのが難しい。実進化はそれらの問題の解決を狙った手法であるが、ロボット行動による評価により進化的計算を行うため、特に進化初期に危険な行動をしてしまう可能性がある。また、時間的コストとロボットの疲労が増大する可能性がある。

そのような問題は、実社会において、ロボットを動作させる際に障害となる。ロボットと人とのやり取りが必要となる場合には、人に危害を与える可能性があり、災害現場や原子力発電所などの危険な場所では、事態をさらに悪化させる可能性がある。本論文では、このような場合に、進化ロボティクスの手法を基にしながらも、ロボットの自律的な行動獲得の際の危険な行動を回避し、安全な動作を可能とするための手法を提案する。

第 2 章では、進化ロボティクスについての基礎的な知識と背景について述べ、その問題点を挙げている。そして、それらの問題点の解決を狙った手法である実進化について述べ、その先行研究を紹介し、実進化ロボット系全般に付随する問題点を挙げている。Watson らの実進化は、ロボットごとに個体 1 つを持ち、他ロボットとの遭遇時に適応度に応じた確率で送信することで、ロボットの行動は進化する。ただし、彼らの方式では、ロボット間の遭遇頻度に進化が強く依存してしまう。臼井らは、各ロボットに複数の仮想個体を持たせ、各個体単体でも進化可能にすることで、ロボット間遭遇頻度に左右されない実進化を実現した。Elfwing らも臼井らと同様に複数の仮想個体をロボット内に持つ方式を提案しているが、汎用的なタスク実行を狙っておらず、生物的妥当性に重点を置いて設計されたものと考えられ、ロボット単体では進化することができず、ロボット遭遇頻度に対する進化依存性は解決していない。他にも、多くの実進化に関する研究が行われているが、実進化ロボット系全般に付随する問題点として、これらの研究は、主にロボット行動のみで適応度評価を行うため、特に適応度の向上していない進化初期に、弊害を生みやすい。

第 3 章では、実進化ロボット系全般に付随する問題点である、ロボット行動で適応度評価するため、低適応度行動が弊害をもたらす可能性（特に進化の初期段階）を解決するための手法を提案している。具体的な提案手法の概要は以下の通りである。自己個体プールには制御器を表現する自己個体が適応度とともに格納されている。ロボット行動の前に「先行評価」を導入し、低適応度と予測される自己個体のロボット行動を回避する。さらに、先行評価系を環境個体として表現し、環境個体プールに格納する。先行評価の精度を環境個体の適応度とし、実進化系との共進化系を構成して、先行評価系も自動作成させる。環境個体で何を表現して先行評価系を構成するかについては、様々に設定可能である。タスクを忠実に再現し、不確実なパラメータのみを環境個体として表すケースから、タスクを完全にブラックボックスとして扱い、自己個体を引数として実評価の値を出力する関数を遺伝的プログラミングのように探索するケースまで考えられる。

この先行評価系のアーキテクチャを極めて単純化し、単純な問題に適用して、その基本的評価を行い、先行評価系の導入が制御器の進化に対して与える影響を調べている。その結果、先行評価系を導入することで、基準適応度に達するまでに必要な実評価回数を削減可能なことを示した。また、先行評価系の環境個体の適正な進化のために、進化初期のランダム性に基づく高適応度の環境個体を遺伝子プールから徐々に排除して再評価を促すこと（「風化」）が重要であることが分かった。さらに、自己個体プール中の各個体の先行評価値と実進化値に差が生じた場合に進化が停滞するが解決可能であることが分かった。

第 4 章では、先行評価を実進化型 2 足歩行ロボットに導入し、歩行動作を自律的に獲得

する際の初期に頻出しがちな転倒の回数の削減を試みている。2足歩行ロボットの転倒は損傷に直結するため、有用であろう。その結果、そのような転倒を削減しうることが示された。このことは、ロボット疲労の軽減や時間的コストの軽減も意味する。

さらに、その際、先行評価系を2つの手法で構築している。1つ目は定義された関数のパラメータ、2つ目はニューラルネットワークの重みをそれぞれ進化的に最適化する手法である。前者は探索空間が狭く、後者は探索空間が広がっており、先行評価系のユーザによる作り込みの度合いによる、提案手法の有効性の評価の観点ごとの変化を、先行研究の手法との比較において、調べている。その結果、提案手法は、実進化と比較すると実評価による弊害と進化計算時間を削減でき、Simulation & transfer 手法と比較すると、現実とのギャップによる問題の回避とシミュレーション構築のコストを軽減できると考えられるが、進化計算時間と実評価による弊害の両者と先行評価系作成コストのトレードオフの関係から先行評価系をどこまで作りこむかが重要となることが分かった。

第5章では、関数最大化問題に適用することで、実進化に限らず、適応度評価にコストやリスクが要求される問題において、幅広く利用できることを示している。進化計算は、最適解を得るまでに多くの適応度評価が必要で、適応度評価に高いコストやリスクが必要な問題においては、その適用が難しい。そこで、近似モデルを用いた適応度評価により、適応度評価の回数を減少させ、進化を効率的に行うための研究として進化制御が行われている。先行評価系をそのような適応度評価近似手法の1手法として捉え直し、一般化した。その結果、適応度評価の近似手法としても正常に動作し、汎用性を持つ可能性を示した。

第6章では、これまでの研究を総括し、研究目的がどこまで達成できたかをまとめ、今後の展望について述べている。提案アーキテクチャは、進化計算において適応度評価におけるコストやリスクを削減することを意図したものであり、そのコストやリスクが無視できないケース全般においてその枠組みは適用可能であると基本的には考えられ、実進化に限らず、インタラクティブ進化等への幅広い応用も考えられる。また、事前に行動を選別すると同時に環境モデルを内部モデルとして作っていく処理は、人の行動獲得における脳の働きと類似した側面を持っており、人の知能の形成という観点からも興味深い。