

学 位 論 文 題 名

Acquisition of Flight Behavior and Generalization Ability
by Evolving Artificial Neural Network

(進化的人工ニューラルネットワークによる飛翔行動と汎化能力の獲得)

学位論文内容の要旨

本論文では、進化的人工ニューラルネットワーク (EANN) を用いた仮想生物の行動獲得問題において、効率的に行動を獲得するための一般化された方法論の提案とその検証を研究の目的としている。与えられた制御対象の行動を制御する従来の研究では、制御対象の構造や物理的知識を用いて効率的な行動制御を実現してきた。一方進化的な行動獲得では、制御対象に関する知識なしで行動を獲得することが可能である。ゆえに進化的行動獲得では、進化の際に用いられる評価、および制御器の設計が極めて重要である。しかし、ある限られた制御対象に対して進化的行動獲得を適用する従来研究は多いものの、一般性のある制御器の設計指針は少なく、評価の設計指針についてはほとんど議論されていない。本論文では、効率的な行動獲得のための制御器として複合的人工ニューラルネットワーク (CANN) を提案し、数値計算実験によりその有効性を検証している。また、数値計算実験を通して行動の汎化性の変化を吟味し、汎化能力に焦点を当てた評価の設計指針を明らかにしている。

本論文は全 6 章で構成される。第 1 章では序論として研究の背景、目的および関連研究を概観している。

第 2 章では、仮想生物の行動獲得に用いる物理環境の有効性検証を行う。物理エンジンと流体力計算方法を組み合わせ、流体中の物体の運動を高速に計算可能な物理環境を構築している。また、流体力計算を効率的に物理エンジンに実装するため、ローカル座標系を用いた計算手順が述べられている。これらの有効性検証のために、レオナルド・ダ・ヴィンチのスケッチに基づく螺旋翼の形状を飛行能力が最大となるように粒子群最適化を適用し、最適化している。数値計算実験の結果、最適化された形状は流体力学の知識から推定される形状と一致することを明らかにした。この結果から、構築した物理環境による流体中の運動表現が妥当であり、仮想生物の行動獲得実験に利用可能であることが示されている。

第 3 章では、行動獲得をより効率的に行うための複合的人工ニューラルネットワーク (CANN) を提案し、飛翔行動の獲得を通してその有効性検証実施している。CANN は、複数の人工ニューラルネットワーク (ANN) をひとつにまとめた制御器であり、クラス分類問題の分野で研究されてきたアンサンブル学習を行動獲得に応用するため、ANN を切り替え器として利用することを提案している。ここで、組み合わせる複数の ANN は、アンサンブル学習で用いられるバギングと同様に独立な学習により得られる。本研究では、学習のための総計算量が等しい状況において、CANN と一般的な ANN を仮想生物の飛翔制御に適用し、両者の性能を比較を行っている。数値計算実験より、CANN は一般的な ANN よりも平均的に高い性能を有することが検証されている。

第 4 章では、数理的に表現された蝶の飛翔行動の進化過程を観察し、評価の設計方法と汎化能力の関係を明らかにしている。蝶の運動方程式は流体力計算を基に導出される。ある目標高度を維持するような飛翔行動を進化的に獲得させた結果、蝶特有の上下動を有する羽ばたき飛翔が得られ、また、行動獲得の進化過程の観察により、評価の際の初期状態によって汎化能力が変化するばかりでな

く、進化が進むに従って汎化能力が低下する過進化現象が発生し得ることが明らかにされた。過進化とはクラス分類の分野で知られている ANN の過学習と類似しているが、動的に変化する状態を評価する教師なし学習では議論されていない現象である。更に、初期状態の変化に応じた飛翔行動を分類を行い、一連の飛翔行動を構成するサブタスクとその難易度の関係を考察から、困難なタスクを学習するほど汎化能力が向上することが述べられている。

第 5 章では、状態の多様性を評価することにより汎化能力を向上させる方法を提案している。第 4 章の結果より、汎化能力を高めるためには困難なタスクを学習すれば良いことが示された。例えば、与えられたターゲット光源へ向かう行動を獲得する場合には、多数の光源が与えられたとき、それら全てに到達可能な行動はより困難なタスクのひとつといえる。ただし単に光源を増やすような評価の設計方法は、多くの数値計算を要するために効率が悪い。本研究では、4 つの光源へ到達するタスクと、1 つの光源へ到達し、かつその周囲に留まるタスクを学習させ、汎化能力の差異の調査を目的としている。また、光源情報の多様性と汎化能力の関係を解析し、これらの間に正の相関があることを明らかにしている。これらの光源情報の多様性を評価に含めた数値計算実験に基づいて、光源情報の多様性が汎化能力を向上し得ることを検証している。

最後に、第 6 章に、本論文の結果をまとめ、今後の展望について述べている。

学位論文審査の要旨

主査	特任教授	古川正志
副査	教授	栗原正仁
副査	教授	鈴木恵二
副査	教授	小野哲雄
副査	教授	山本雅人

学位論文題名

Acquisition of Flight Behavior and Generalization Ability by Evolving Artificial Neural Network

(進化的人工ニューラルネットワークによる飛翔行動と汎化能力の獲得)

人工生命における行動獲得のための制御器の設計方法として,Neuro-evolution と呼ばれる教師なし機械学習の方法が発展してきた.Neuro-evolution を使用する制御器の設計は,特に人工生命に限らず実用性の高い設計法であるが,その特性に基づく一般的な方法論は未確立である.特に,人工生命のような,その行動獲得に多くのシミュレーションを要する分野においては,短時間の効率的な学習速度やそこで使用する人工ニューラルネットワーク (ANN) の構成方法が重要な問題となる.これまでの研究は人工生命の行動獲得のための限定した ANN に対し進化計算を適用するのが,一般的であった.

著者は,Neuro-evolution における ANN の設計問題と人工生命の行動獲得問題を通して,それを制御器として効率的に行動を獲得するための一般化された方法論としての設計指針の提案とその検証を研究の目的としている.

そのために本論文においては,人工生命の制御器として複合的人工ニューラルネットワーク (CANN) の構成を提案し,その構成法と能力を調査し,数値計算実験を通して,従来の制御器と比較して柔軟性 (汎化性) があり,かつ,行動獲得の学習速度が効率的な方法論であることを検証している.特に,提案された CANN は多様な生物の行動獲得を進化計算の複数の局所解として備える,これまでの ANN とはまったく異なる側面をもち,これが人工生命の行動獲得に対して大きな汎化性を ANN に与えていることを,検証している.

本論文は全 6 章で構成される.第 1 章では序論として研究の背景,目的および関連研究を概観している.

第 2 章では,仮想生物の行動獲得に用いる物理環境の有効性検証を行う.物理エンジンと流体力計算方法を組み合わせ,流体中の物体の運動を高速に計算可能な物理環境を構築している.また,流体力計算を効率的に物理エンジンに実装するため,ローカル座標系を用いた計算手順が述べられている.これらの有効性検証のために,レオナルド・ダ・ヴィンチのスケッチに基づく螺旋翼の形状を飛行能力が最大となるように粒子群最適化を適用し,最適化している.数値計算実験の結果,最適化された形状は流体力学の知識から推定される形状と一致することを明らかにしている.この結果から,構築した物理環境による流体中の運動表現が妥当であり,仮想生物の行動獲得実験に利用可能であることが示されている.

第3章では、行動獲得をより効率的に行うための複合的人工ニューラルネットワーク (CANN) を提案し、飛翔行動の獲得を通してその有効性検証実施している。CANN は、複数の人工ニューラルネットワーク (ANN) をひとつにまとめた制御器であり、クラス分類問題の分野で研究されてきたアンサンブル学習を行動獲得に応用するため、ANN を切り替え器として利用することを提案している。ここで、組み合わせる複数の ANN は、アンサンブル学習で用いられるバギングと同様に独立な学習により得られる。本研究では、学習のための総計算量が等しい状況において、CANN と一般的な ANN を仮想生物の飛翔制御に適用し、両者の性能を比較を実施している。数値計算実験より、CANN は一般的な ANN よりも平均的に高い性能を有することが検証されている。

第4章では、数理的に表現された蝶の飛翔行動の進化過程を観察し、評価の設計方法と汎化能力の関係を明らかにしている。蝶の運動方程式は流体力計算を基に導出される。ある目標高度を維持するような飛翔行動を進化的に獲得させた結果、蝶特有の上下動を有する羽ばたき飛翔が得られ、また、行動獲得の進化過程の観察により、評価の際の初期状態によって汎化能力が変化するばかりでなく、進化が進むに従って汎化能力が低下する過進化現象が発生し得ることを明らかにしている。過進化とはクラス分類の分野で知られている ANN の過学習と類似しているが、動的に変化する状態を評価する教師なし学習では議論されていない現象である。更に、初期状態の変化に応じた飛翔行動を分類を行い、一連の飛翔行動を構成するサブタスクとその難易度の関係を考察から、困難なタスクを学習するほど汎化能力が向上すること発見している。

第5章では、状態の多様性を評価することにより汎化能力を向上させる方法を提案している。第4章の結果より、汎化能力を高めるためには困難なタスクを学習すれば良いことが示された。例えば、与えられたターゲット光源へ向かう行動を獲得する場合には、多数の光源が与えられたとき、それら全てに到達可能な行動はより困難なタスクのひとつといえる。ただし単に光源を増やすような評価の設計方法は、多くの数値計算を要するために効率が悪い。本研究では、4つの光源へ到達するタスクと、1つの光源へ到達し、かつその周囲に留まるタスクを学習させ、汎化能力の差異の調査を目的としている。更に、光源情報の多様性と汎化能力の関係を解析し、これらの間に正の相関があることを明らかにしている。これらの光源情報の多様性を評価に含めた数値計算実験に基づいて、光源情報の多様性が汎化能力を向上し得ることを検証している。最後に、第6章に、本論文の結果をまとめ、今後の展望について述べている。

これを要するに、著者は、人工生命の行動獲得における制御器の設計方法として CANN と呼ぶ新たな設計法を提案し、それが学習速度の効率化と強い汎化能力を備えることを証左し、それらに基づいて Neuro-evolution を利用する一般的な制御器の設計としても使用可能なことを具体的に明らかにした。従って、本学位論文は人工生命技術や複雑系工学の発展に寄与するところ大であり、博士(情報科学)の学位を授与するに値するものと認める。