

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 18 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560280

研究課題名(和文) 自律的制御機構の進化に基づく生物行動の分析と生成

研究課題名(英文) Analysis and generation of the behavior of the creatures based on the evolution of the motion controllers

研究代表者

山本 雅人 (Yamamoto, Masahito)

北海道大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：40292057

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円、(間接経費) 1,170,000円

研究成果の概要(和文)：本申請課題は、実際の物理環境を再現した高速なシミュレーション環境において、仮想生物の自律的制御機構の最適化にもとづき、実際の生物に近い行動を創発させることで生物行動創発の理解を目的とするものである。生物の周期的行動の基礎となる中枢パターン生成器(CPG)の振る舞いの分析にもとづいて、仮想筋肉を用いた魚モデルの遊泳行動生成やサラマンダーモデルの歩行・遊泳行動生成を行った。さらに、複雑な行動生成を行うための行動制御コントローラの構造として、複合ニューラルネットワークを提案し、柔軟な動きを可能とする筋骨格モデルにもとづく生物の行動生成と複数の飛翔ロボットの群行動生成に応用した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we aim at the understanding the emergence of the creature's behavior by using the high performance physics simulations. We investigated the parameter settings of the central pattern generator (CPG) for motion control of the virtual creatures and obtained the walking and swimming behaviors of the virtual salamander model like real one. Furthermore, we proposed the composite neural network with two components for intending to generate more complicated behaviors. As a result, more animal-like behaviors and the collective behaviors of some flying creatures can be obtained.

研究分野：複雑系工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：人工生命 進化型計算 ニューラルネット 中枢パターン生成器

1. 研究開始当初の背景

本研究で扱う仮想空間内で自律的に振る舞うソフトウェアロボットに関する従来研究は、Sims のバーチャルクリーチャにまで遡る。また、水中での魚の動きを再現した Terzopoulos らの Artificial Fish などもある。Sims のバーチャルクリーチャは、形状と行動コントローラの両方の進化という点で興味深い。クリーチャは直方体のみで構成されており、その形状は現実の生物の複雑な形状とはほど遠い。また、自身を構成する物体同士の衝突などを無視しており、獲得された動作は現実的(リアル)な動作とは言い難い。Terzopoulos らの Artificial Fish は、より現実の魚に近づいた形状ではあるが、コントローラの制御方法はアドホックに与えられており行動に多様性を持たせることは困難である。

一方、これらの仮想生物が行動をする環境についても、重力や摩擦に加えて、水中や空中における浮力や抗力などを考慮した地上・水中・空中といった多様な環境をシミュレートした研究はほとんどない。

本研究では、より現実の生物に近い形状をもち、行動の基礎となる多数のアクチュエータも実際の生物と同様に関節部分などに設定した仮想生物を扱う。これにより行動制御は劇的に困難なものとなるが、適切に制御することができればよりリアルな行動を生成可能であるともいえる。また、これらの仮想生物を多様な環境におくことで、同一の仮想生物であっても、環境や目的に応じて行動を使い分ける、といった現実の生物に見られる現象の実現が期待できる。よりリアルで複雑な身体性をもち、多様な環境で行動する仮想生物の開発には、身体性や環境、目的に強く依存した行動を生成する必要があることから、申請者らがこれまでの研究で扱ってきた人工ニューラルネットワークコントローラや進化型計算手法を用いて自律的に獲得させる方法が応用可能であると着想した。

2. 研究の目的

本申請課題は、物理法則にしたがう仮想空間内(計算機内)において、重力・摩擦・抗力・浮力・揚力などの様々な力を受ける地上、水中、空中といった多様な環境に適応して行動可能な仮想生物の開発を目的とする。特に、地上と水中の両方で異なった振る舞い(歩行と遊泳)を見せるサラマンダー(サンショウウオ)を模したモデルを作成し、環境に適応した行動を進化計算手法によって獲得することを目指す。その目的のため、必要となる物理環境をシミュレートするための高速な計算方法の提案、より精緻なモデルを作成するためのモデリングツールの開発、を行いつつ、知覚した環境情報から行動を生成する行動コントローラを進化させ、適応的行動の獲得

を目指す。リアルで合理的な自律的行動の獲得が実現されれば、アニメーションの自動生成やエンターテインメント分野への応用が可能となる。

3. 研究の方法

主な研究項目は以下の通りである。

(1) 仮想生物のモデリング/シミュレーション統合ソフトウェアの開発

本研究で対象とする仮想生物は、よりリアルで複雑な形状をもつため精緻な3次元モデルの生成を可能とするモデリングソフトウェアの開発が必要である。球や直方体、円錐などのプリミティブや自由に变形可能なメッシュオブジェクトを関節に模したジョイントで結合しその一部をアクチュエータとして設定することで仮想生物の自律的行動を可能とする。また、効率よくモデリングを行うために、プリミティブ単位やジョイントで結合したオブジェクト単位のコピー機能や保存・読み込み機能を実現する。さらに、モデリングを行った仮想生物を物理環境下で即座にシミュレーションが可能な機能を実現する。本ソフトウェアのプロトタイプは既に開発済みであり、研究期間の初期の段階で、この統合ソフトウェアの基本機能の完成を目指す。

(2) 多様な環境の実現へ向けた高速計算可能な近似流体環境の実現

3次元仮想空間内で仮想生物に行動をさせるとき、物理法則を忠実に仮想空間内で再現する必要がある。3次元物体の重力や摩擦力の計算、または、衝突検出の計算は一般に時間がかかるが、近年のゲーム開発競争で飛躍的に高速化された商用の物理エンジンを利用することで効率的なシミュレーションが可能となる。本研究では、研究目的の場合は無償で使用可能な NVIDIA 社が提供している PhysX という物理エンジンを使用することとする。PhysX がサポートしている機能以外にユーザが独自の計算を組み込むことが可能である。本研究では、PhysX がサポートしていない、物体が水中や空中で受ける浮力や抗力の影響を計算する高速な手法を提案し組み込むこととする。

(3) 行動コントローラの ANN による協調動作の獲得、または、結合振動子の同期・非同期の制御による協調動作の獲得

単一環境、単一目的の状況で、リアルで合理的な行動獲得が実現できたのち、それらの行動コントローラのパラメータや ANN の結合重みを固定し、複数の行動コントローラの出力を入力とする ANN を上位階層として設計する複合的人工ニューラルネットワーク(Composite ANN, CANN)を提案する。その結合重みを多様な環境下で行動させることによる進化実験を行う。計画通り進まない場合は、CPG をある構造で相互結合させ、それらの同期・非同期を制御することで多様な行動

出力の調整を行う手法について検討する。相互結合の構造と同期・非同期の関係については既に調査実験を行っているためその成果を利用する。

4. 研究成果

平成 23 年度では、主に、(1) 仮想生物のモデリングと高速な近似流体環境計算を内蔵したシミュレーションを行う統合ソフトウェアの開発と、(2) 生物の周期的行動の基礎となる中枢パターン生成器(CPG)の振る舞いの分析、を行った。(1)については、統合ソフトウェアの開発を完了し、仮想生物のモデリングとシミュレーションがシームレスに実行でき、かつ、仮想生物への自律的制御機構の付与や進化計算手法の適用が可能となる機能を開発した、仮想生物の行動シミュレーションを高速に行える環境を整えた。特に、水中や空中などの流体環境においては、移動する物体にかかる抗力計算を高速に行う手法を確立し、高速なシミュレーションを可能とした。(2)については、CPGのパラメータを最適化することにより仮想生物の行動生成を行い、パラメータが行動に与える影響についても検証した。また、CPGを用いなくとも人工ニューラルネットワーク(ANN)の結合重みの最適化のみで周期的行動を生成することも確認した。これらの成果を踏まえて、仮想筋肉を用いた魚モデルの遊泳行動生成やサラマンダーモデルの歩行・遊泳行動生成を行った。さらに、複合的で複雑な行動生成を行うための基礎として、複数の単純な行動を同一の自律的制御機構によって獲得可能であることを実験によって示した。

平成 24 年度では、主に、複雑な行動生成を行うための行動制御コントローラの構造として、複合ニューラルネットワークを提案し、その特性などについて調査した。前年度までに、単純な行動生成については、ニューラルネットワークと進化型計算を使用したニューロエボリューションや中枢パターン生成器の使用等によって可能であることが明らかになっていた。本年度は、さらに複雑な行動生成を行うために、移動や遊泳といった比較的単純な行動を生成可能なニューラルネットワークを複数用意し、それらの上位階層に新たなニューラルネットワークを組み込んだ複合ニューラルネットワークを提案した。例えば、バッタをモデルとした仮想生物について、歩行やジャンプ、起き上がり、といった行動を生成する下位のニューラルネットワークについて進化を事前に行ったのち、その結合重みを固定して、上位階層のニューラルネットワークの結合重みを進化させることで、適切な状況で歩行や起き上がり、ジャンプといった複雑な行動を生成可能であることを実験によって示した。

また、複合ニューラルネットワークの特性を調査するため、トンボをモデルとして飛翔

体の仮想生物による飛行行動の進化を通して、進化の速度を早めたり、より環境の変化に対応できる汎化能力に優れた行動を生成したりすることが可能であることを示した。

平成 25 年度では、より高速な行動生成を可能とするために、主に CANN の学習性能の検証を行った。CANN では、個別に学習した複数の下位 ANN の切り替えを上位 ANN でさらに学習することでより効率的な学習が可能である。飛翔ロボットや倒立振子の振り上げ問題を対象として、CANN が一般の ANN と比較して同じ学習時間でより効率的な学習が可能であることを示した。また、CANN と同数の重みをもつ一つの ANN による学習や、CANN の上位 ANN と下位 ANN を同時に学習する手法と比較して、下位 ANN の学習の後、上位 ANN を段階的に学習することの有効性を示した。また、これらの知見を通して、柔軟な動きを生成する筋骨格モデルに基づく生物と複数の飛翔ロボットの群行動生成などに応用して、より生物らしい行動の生成が可能であること、および、学習性能についての特性を明らかにした。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件)

- ① Ryosuke Ooe, Ikuo Suzuki, Masahito Yamamoto, Masashi Furukawa, Study on evolution of the artificial flying creature controlled by neuro-evolution, *Artificial Life and Robotics*, Vol. 17, No. 3-4, pp. 470-475 (2013), 査読有
- ② Jun Ogawa, Ikuo Suzuki, Masahito Yamamoto, Masahshi Furukawa, Control of water flow to avoid twining of artificial seaweed, *Journal of Artificial Life and Robotics*, Vol. 17, No. 3-4, pp. 383-387 (2013), 査読有
- ③ 大江 亮介, 鈴木 育男, 山本 雅人, 古川 正志, 複合的人工ニューラルネットワーク—教師なし学習を用いた動的制御における選択型ニューラルネットワークアンサンブラー, *精密工学会誌*, 第 79 巻, 第 6 号, pp. 552-558 (2013), 査読有
- ④ 大江 亮介, 鈴木 育男, 山本 雅人, 古川 正志, 流体中の運動計算のための物理シミュレーション環境—粒子群最適化によるダ・ヴィンチ型螺旋翼の形状決定—, *精密工学会誌*, 第 78 巻, 第 4 号, pp. 348-353 (2012), 査読有
- ⑤ 中村 啓太, 鈴木 育男, 山本 雅人, 古川 正志, 仮想流体環境内における人工生物の形状と移動能力の関係, *精密工学会誌*, 第 78 巻, 第 12 号, pp.

- 1069-1075 (2012), 査読有
- ⑥ Masashi Furukawa, Makoto Morinaga, Ryosuke Ooe, Michiko Watanabe, Ikuo Suzuki, Masahito Yamamoto, "Behavior Composed" for Artificial Flying Creature, *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, Vol. 15, No. 7, pp. 838-845 (2011), 査読有
- ⑦ Kenji Iwadate, Ikuo Suzuki, Masahito Yamamoto, Masashi Furukawa, Behavior Emergence of Virtual Creature Living in Complex Environments, *Artificial Life and Robotics*, Vol. 16, No. 2, pp. 185-189 (2011), 査読有
- ⑧ 米陀 佳祐, 鈴木 育男, 山本 雅人, 古川 正志, 複合型ビヘイビアによる円環構造弾性ロボットの自律行動獲得, *精密工学会誌*, 77, 5, pp.476-482 (2011), 査読有

[学会発表] (計 58件)

- ① Yuta Umemura, Ikuo Suzuki, Masahito Yamamoto, Masashi Furukawa, Acquisition of Jumping Behavior on the Artificial Creature under Virtual Physical Environment, *Proceedings of the 3rd International Joint Conference on Computational Intelligence*, pp. 311-314 (2011), パリ(フランス), 2011年10月24日
- ② 大江 亮介, 鈴木 育男, 山本 雅人, 古川 正志, 蝶の飛行制御における ANN の汎化能力に関する研究, *ロボティクス・メカトロニクス講演会'11(Robomec'11)*, 1A1-P02(2011), 岡山市, 2011年5月27日

他56件

[図書] (計 1件)

- ① 古川正志, 川上敬, 渡辺美知子, 木下正博, 山本雅人, 鈴木育男, *メタヒューリスティックとナチュラルコンピューティング*, コロナ社, 2012, 195

[産業財産権]

○出願状況 (計 0件)

○取得状況 (計 0件)

[その他]

ホームページ等

<http://gammon.jp/masahito>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本 雅人 (YAMAMOTO, Masahito)
北海道大学・大学院情報科学研究科・教授
研究者番号: 40292057

(2) 研究分担者

古川 正志 (FURUKAWA, Masashi)
北海道情報大学・経営情報学部・教授
研究者番号: 70042091

鈴木 育男 (SUZUKI, Ikuo)
北見工業大学・工学部・准教授
研究者番号: 40422026

(3) 連携研究者

なし