

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 4月30日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22360099

研究課題名（和文） 力学的プロセスによる生命行動の創発と認識

 研究課題名（英文） RECOGNITION AND BEHAVIOR OF ARTIFICIIL LIFE BEEING  
 BY EMERGING FROM DYNAMICAL PROCESS

研究代表者

古川 正志 (FURUKAWA MASASHI)

北海道大学・大学院情報科学研究科・特任教授

研究者番号：70042091

研究成果の概要（和文）：コンピュータ内部に地球環境仮想空間を作成し、人工生物がどのような行動と制御をおこなうかを研究目的としている。このために、研究者が共通の枠組みで研究を行える物理モデラーを作成した。また、大気及び水中の環境モデリング法と、その環境の中で人工生物が飛翔や遊泳行動の獲得を、進化計算と人工ニューラルネットによる制御に基づいて実現した。更に、単一な行動を組み合わせた複合行動獲得の方法の確立も行った。

研究成果の概要（英文）：This research focuses on how to acquire and control behaviors of artificial creature in a virtual earth environment. For this purpose, the physical modeling tool is firstly developed so that researchers can model the common artificial creature and its environment. Then, the method to model atmosphere and under-water environments are proposed by use of the empirical method. After that, behaviors such as flying and swimming and their control way are examined in these environments. It is realized that not only a simple behavior but also a sophisticated one of the artificial creature can be achieved in this research.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2011年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2012年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
総計	5,700,000	1,710,000	7,410,000

研究分野：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 物理モデリング

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 人工生命に関する研究は1990年前後に黎明期をむかえ、新技術が1995年頃に相次いで発表された。しかし、それからの10年はまるで熟成期のように、C. Langtonのいうところの Behavior as it could be はその実

現が停滞していた。

(2) ロボテックスの世界では、身体性が強く主張されるようになり、人工生命による制御のシミュレーション技術が In Silicon 技術として顧みられなくなりつつあった。これは、2000年当時にコンピュータ内に物理空間を

構築する技術がなく、現実に近い環境で人工生命を研究する技術が未熟であったためによる。

(3) アニメーション技術の世界では、1990年前後に N. Thalmann 等による多関節(84 関節)をもつ人間モデルを作成する Human Factory や Wilhelm による最大 6 自由度をもつ人間モデルが実現されている。しかし、これらの行動決定は前者ではモーションキャプチャー、後者では、キーフレーム間(Inbetween)をギブス・アップルの方程式で解く方法がとられ、環境との相互作用から自律的に目的にあった行動が得られるものではなかった。

(4) 人工生命の制御方式として、人工ニューラルネットワークとそのシナプスを最適化する進化計算または粒子群最適化の方法が未発達であり、ニューロエボリューションを堅牢な技術として発展させる必要性があった。

(5) こうした蓄積した技術を総合化した技術を開発することにより、体系的に人工生命を研究し、かつ新しい理論的発展をはかる必要性があった。

## 2. 研究の目的

(1) 人工生命の行動獲得を効率的に進めるためには、人工生命の形状モデリング、物理モデリング、制御装置としてのアクチュエータのモデリング等の一連のモデリング(人工生命モデリング)をその都度コーディングするのではなく、ツール化するのが望まれる。本研究の目的としては、これを人工生命研究の共通のプラットフォームを開発し、効率的に人工生命モデリングを実施できる GUI を作成する。

(2) 仮想物理空間として、物理モデリングに基づく地球環境を構築する。地球上の生物は、大気、地上、水中に展開している。大気中及び水中では流体の抗力を利用した飛翔あるいは遊泳が生物の行動となる。そのため、簡易にこれらを構築できる方法と、構築された環境においての人工生命の行動獲得を行う。

(3) 行動が複雑な場合の行動獲得のための新しい概念と制御方式が必要であり、これに対応した新しい行動獲得の概念と制御方式を新たに開発する。

## 3. 研究の方法

(1) 共通プラットフォームの開発 人工生命の研究を共通に行うためのプラットフォームとなる開発ツールの作成を行う。物理モデリングをコーディングで行うオープンソースとして nVIDIA 社が「Physx」を提供している。これを GUI (グラフィックス・ユーザ・インタフェース) にし、容易にオブジェクトを物理モデリングできるようにする。この GUI

には、オブジェクトの形状表現、ジョイント及びその自由度のモデリング、コピーやセーブの編集機能、ジョイントへのアクチュエータとしてのニューラルネットワークの割り当て、等を可能とさせる。

(2) 流体環境のモデリングと行動獲得 簡易な物理環境生成のモデリング方法を開発する。特に、水中及び大気中に於ける流体抗力の生成法を、高速で構築できることを目的とする。同時に、これらの環境の下で飛翔、歩行、跳躍、遊泳、等の行動生成をニューロエボリューションを用いて実施する。

(3) 複合的行動獲得方式の確立 単純な行動生成のみならず、複合的な行動生成のための概念とそれに基づいた人工生命の行動確立方法を検討し、確立する。用いる概念としては包摂構造 (Subsumption Architecture; SSA) を参考にする。また、これにともなう複合的な行動を実現する制御方式を確立する。

## 4. 研究成果

(1) 共通プラットフォームの開発 物理モデリングをコーディングではなく GUI を用いて容易に実現する開発ツールを実現した。開発したシステムは TIPS-PM と命名した。TIPS-PM システムの構成を図 1 に示す。

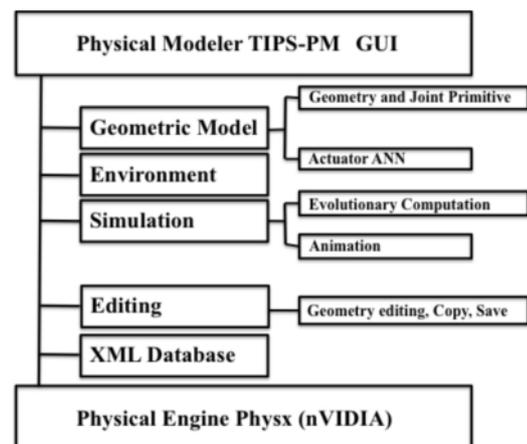


図 1 物理モデラー TIPS-PM システム構成

TIPS-PM は、幾何モデル(Geometric Model)の作成とそのシミュレーション(Simulation)を交互に実行可能である。

幾何モデルのモード選択により、オブジェクトを生成する。幾何モデルに用いるプリミティブには、剛性体プリミティブと軟性体プリミティブが用意されている。剛性体プリミティブは、CUBOID、SPHERE、FREE-FORMED MESH STRUCTURE が用意され、軟性体プリミティブには SPRING STRUCTURE が用意されている。これらは、自由度を任意に指定できる JOINT プリミティブによって結合され、オブジェクトがモデル化される。JOINT はアクチュエータとして使

用され、その制御には人工ニューラルネットワーク(ANN)が割り当て可能である。幾何モデルが作成されると、シミュレーションモードにより、オブジェクトのシミュレーションが可能となる。なお、環境指定(Environment)により、水中及び大気中での実行が可能である。

シミュレーションは PHYSX (nVIDIA 物理計算ライブラリ, 物理エンジン) により、力学運動計算が実施される。PHYSX はニュートン・オイラーの積分方程式を指定した積分ステップ (主に 1/60sec) で高速に計算する。結果は、同時にアニメーションとして描画される。シミュレーションモードでは、進化計算によるオブジェクトの運動最適化も実施可能としている。この場合、指定した方式で運動の評価関数を入力する。

幾何モデルのオブジェクトは、XML 形式によるデータベース(XML Database)に保存されるので、このデータベースに対して、編集機能を与えてある。編集機能(Editing)としては、プリミティブの追加、コピーによるプリミティブの作成、及び保存機能がある。このデータベースは、C++に変換可能としてあり、幾何モデルを TIPS-PM で作成し、C++へのコード展開をしてユーザー自身のプログラムを作成することも可能である。

図 2 に TIPS-PM によるモデリングの例を示す。

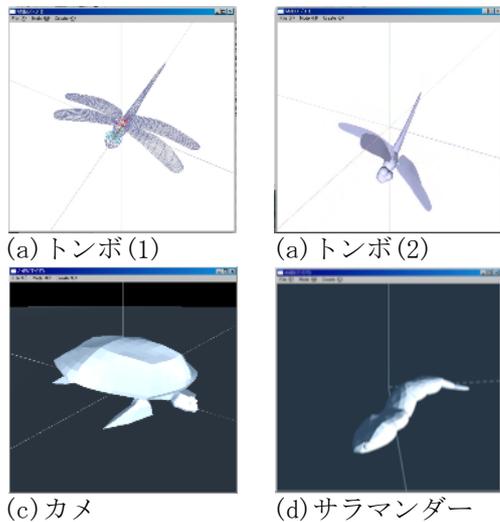


図 2 TIPS-PM によるモデリング

TIPS-PM は、研究用共通プラットフォームである物理モデリングを容易に行えるツールとして開発したが、力学的な現象を様々シミュレーション可能なのが分かった。その使用法の一つとして、大学の体験入学において物理シミュレーションで学ぶ力の運動として、中・高校生にも利用してもらっている。TIPS-PM は、オープンソースとしても解放している<sup>(1)</sup>。

(1) <http://autonomous.complex.ist.hokudai.ac.jp/research/physics-modeling/tips-pm>

(2) 流体環境のモデリングと行動獲得

これまでの人工生命に関する研究は、D. Terzopoulos の研究を除いてそのほとんどが流体抗力を考慮していない。その理由は、人工生命の行動獲得に遺伝的アルゴリズム(GA)を中心とした進化計算を用いるためであり、行動評価のシミュレーション時間が莫大になるためと思われる。こうした流体抗力のシミュレーション法としては移動粒子法(MPM)や有限要素法(FEM)、差分法が存在する。これらに対して簡易で高速な流体抗力の計算法として、流体工学で翼の設計式として採用されている抗力計算式(1)

$$F_d = \int_S C_d \rho v^2 ds \quad (1)$$

を採用し、水中及び大気中の流体抗力を適用する方法を開発した。ここで、 $F_d$ は抗力、 $C_d$ は抗力係数、 $\rho$ は流体密度、 $ds$ は細分化した進行方向に関する代表面積である。実際の適用に当たっては、オブジェクトの代表面積をメッシュ状に細分化し、各メッシュの中心に

$$\Delta F_d = C_d \rho v^2 \Delta s \quad (2)$$

で表される抗力を人工的に発生し、流体抗力を計算する。

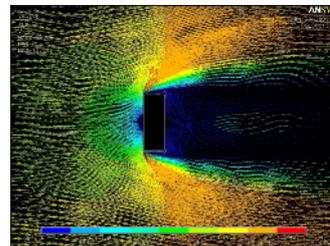


図 3 FEM による流速の計算

この方法によって、オブジェクトの水中に於ける遊泳行動及び大気中の飛翔行動を高速に実現することが可能になった。このような簡易計算では、抗力の精度が常に問題とされる。この精度を検証するために、FEMを用いた抗力計算を行った(図3)。提案した計算法とFEMの計算結果を比較した結果、提案方法は、FEMに比して、ほぼ4%以内の誤差に留まることが分かり、人工生命の行動獲得には十分に実用的であることが検証された。

また、浮力に関しては、人工的にオブジェクトの重心にアルキメデスの原理による力を人工的に与えている。

このようにして水中および大気中の環境にモデル化した人工生命オブジェクトに関して、ニューロエボリューションを用い、種々の遊泳行動と飛翔行動を実現可能とし

た. 図4に実現された遊泳及び飛翔行動のスナップショットを示す.

遊泳行動獲得に関しては, これまでジョイントを直接にトルクで制御する方法が使用されていた. 本研究に於いても開始後の2年間はジョイントを直接ANNで制御する方法を採用していた. しかし, 3年目にジョイント制御以外のアクチュエータの検討を行い, 筋肉をモデル化する筋骨格構造モデルを導入した. 筋骨格構造モデルは, ジョイント・アクチュエータと比較して制御は複雑となるが, 一方で, 制御パラメータが増えることによるより多様な行動の獲得と周期的な運動のピッチをこれ迄より大きくできる利点が予想された. 採用した粘性筋骨格モデルを図5に示す.

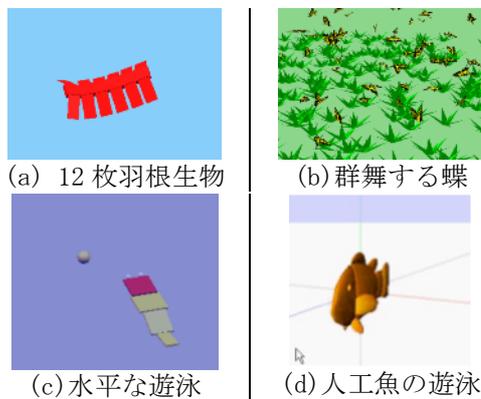


図4 流体環境での行動獲得

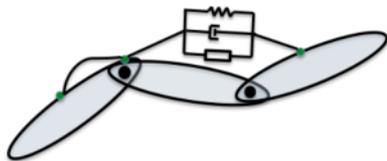


図5 筋骨格構造モデル

この筋骨格構造モデルはジョイントを介してバネ, ダンパー及び非線形粘性ユニットから構成され, 筋肉に生成される力  $F_v(t)$  は

$$F_v(t) = u(t) - k_v u(t) x_v(t) - b_v u(t) \frac{dx_v(t)}{dt} \quad (3)$$

で計算される. ここで  $u(t)$  は

$$u(t) = U z_v(t) \quad \text{where } z_v(t) \in [0, 1] \quad (4)$$

であり,  $x_v(t)$  は

$$x_v(t) = L_v - l_v(t) \quad (5)$$

である. 式(3)~(5)において  $k_v$ ,  $b_v$  はパラメータ,  $L_v$  はバネの自然長,  $l_v(t)$  は現在のバネ長,  $x_v(t)$  はバネの変位,  $U$  は非線形粘性ユニットの最大値である. この筋肉は  $u(t)$  により制御されるので制御を行う ANN の出力は  $u(t)$  となる.

図6に示す単純な板結合構造のジョイント

モデルと筋骨格構造モデルをニューロエボリューションで得た遊泳ピッチを図7(縦軸は結合部のジョイント, 横軸は経過時間)に示す. また, カエルの後ろ足に適用して得られた遊泳を図8に示す.

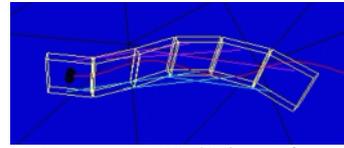


図6 板構造遊泳モデル

(2) Terzopoulos, D. et al., 1994. Artificial fishes: Autonomous locomotion, perception, behavior, and learning in a simulated physical world, Artificial Life, Vol. 1, No.4, pp. 327-351

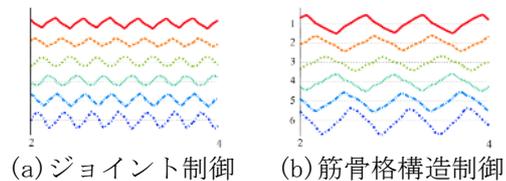


図7 遊泳ピッチの比較

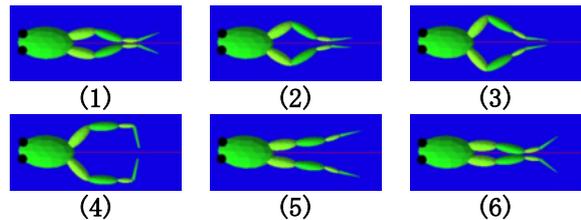


図8 筋骨格構造によるカエルの遊泳

(3) 複合的行動獲得方式の確立 生物の行動様式のモデルは図9のように示すことができる. 生物の最大の目的は生存と繁殖であり, 自身と環境によって意思が生じ, それによって目的行動(動作)が定まる. 目的行動はいくつかの基本行動(動作)によって組み合わせられ構成される.

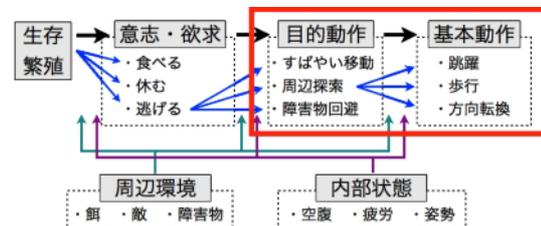


図9 生物の行動様式モデル

基本動作は, 生来的なものもあるが多くは学習によって獲得される. 単純な各基本動作を人工ニューラルネットワーク(ANN)で単一に獲得するのは, ニューロエボリューションの使用により, 確立された技術である. 従って, より複雑な組合せ行動を実現すること

が目的動作を獲得することとなる。本研究では、この単一動作を Behavior Simple, 目的動作を Behavior Composed と名付けた複合行動をニューロエボリューションを用いた学習により獲得する方式を、制御モデルとして確立した。このモデルを図 10 に示す。図 10 において下位の ANN は個別に単一行動を学習したものであり、上位の ANN はこれらを用いて単一行動を選択する優先度を学習する。これにより、状況に応じた複合的な（複雑な）行動獲得が可能となった。図 11 に示すような二枚バネの人工生物に、滑空と羽ばたきを単一行動として学習させ、この飛翔を更に上位 ANN で Behavior Composed として獲得させた飛翔の高度の軌跡を図 12 に示す。図 12 から経済的な飛行を行うには、羽ばたきと滑空が相互に出現することが実証された。この実験によって複合行動の行動獲得方法が確立された。

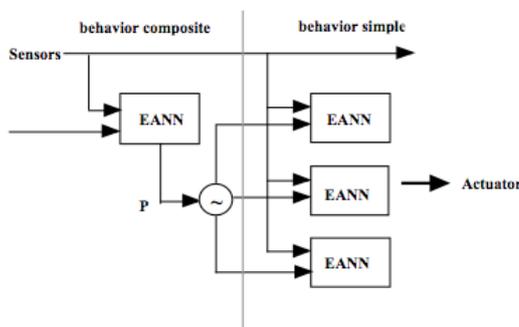


図 10 Behavior Composed



図 11 飛翔モデル

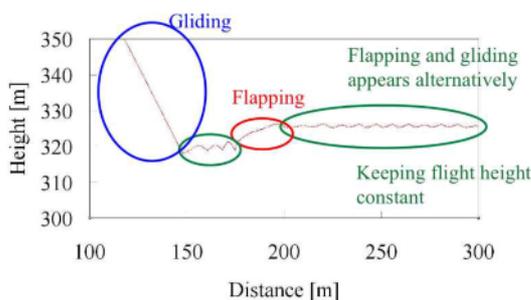


図 12 滑空と羽ばたきの複合行動

#### 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 13 件)

1. Masashi Furukawa, Michiko Watanabe, Akihiro Fukumoto, Ikuo Suzuki, and Masahito Yamamoto, SWIMMING ANIMATS WITH MUSCULOSKELETAL STRUCTURE, IADIS International Journal on Computer Science and Information Systems, Vol. 7, No. 2, pp. 152-164, ISSN: 1646-3692 (2013) (査読有り)
2. 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, 78 巻, 12 号, pp.1069-1075(2012) (査読有り)
3. Masashi Furukawa, Mokoto Morinaga, Ryosuke Ooe, Michiko Watanabe, Ikuo Suzuki, and Masahito Yamamoto, “Behavior Composed” for Artificial Flying Creature, Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, Vol. 5, No. 7, pp. 838-845 (2011) (査読有り)
4. Keita Nakamura, Ikuo Suzuki, Masahito Yamamoto, and Masashi Furukawa, Acquisition of Swimming Behavior on Artificial Creature in Virtual Water Environment, G. Kampis, I. Karsai, and E. Szathmáry (Eds.): ECAL 2009, Part I, LNCS 5777, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 99-106 (2011) (査読有り)
5. 米陀 佳祐, 鈴木 育男, 山本 雅人, 古川 正志, 円環構造型モジュラーロボットの自律的移動行動の獲得, 精密工学会誌, Vol. 76, No. 12, pp. 1351-1357 (2010) (査読有り)

[学会発表] (計 65 件)

1. Ryosuke Ooe, Ikuo Suzuki, Masahito Yamamoto, Masashi Furukawa, Study on evolution of the artificial flying creature controlled by neuro-evolution, Proceedings of the Seventeenth International Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB 17th '12), GS13-2 (2012) (査読有り)
2. Yuta Umemura, Ikuo Suzuki, Masahito Yamamoto, Masashi Furukawa, Acquisition of Ground Behavior on the Locust Model under the Virtual Physical Environment, Proceedings of the 12th International Conference on Intelligent Autonomous Systems (IAS-12), T3C-S2 (2012) (査読有り)
3. Keisuke Yoneda, Ikuo Suzuki, Masahito Yamamoto and Masashi Furukawa, Behavioral Acquisition of Complicated Locomotion for Artificial Elastic Robot using Decentralized Behavior Composed, Proceedings of the 11th European Conference on Artificial Life, pp.

- 882-889, (2011) (査読有り)
4. Keisuke Yoneda, Ikuo Suzuki, Masahito Yamamoto and Masashi Furukawa, Acquisition of Adaptive Behavior for Virtual Modular Robot Using Evolutionary Computation, Proceedings of the 10th European Conference on Artificial Life, pp.181-188, (2011) (査読有り)
  5. Masashi Furukawa, Michiko Watanabe, Ikuo Suzuki and Masahito Yamamoto, ANIBOT - ANIMATION ROBOT FOR A-LIFE, PROCEEDINGS OF THE IADIS INTERNATIONAL CONFERENCE COMPUTER GRAPHICS, VISUALIZATION, COMPUTER VISION AND IMAGE PROCESSING 2011, ISBN: 978-972-8939-48-9, Rome, Italy JULY 24 - 26, (2011) (査読有り)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

<http://autonomous.complex.ist.hokudai.ac.jp/>  
<http://autonomous.complex.ist.hokudai.ac.jp/research/physics-modeling/tips-pm>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

古川 正志 (FURUKAWA MASASHI)  
北海道大学・情報科学研究科・特任教授  
研究者番号：70042091

### (2) 研究分担者

山本 雅人 (YAMAMOTO MASAHITO)  
北海道大学・情報科学研究科・特任教授

研究者番号：42092057

鈴木 育男 (SUZUKI IKUO)

北見工業大学・情報システム工学科・准教授

研究者番号：40422023

(3) 連携研究者

なし