

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：10106

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560283

研究課題名(和文)ビヘイビアコンポーズドによる人工生物の複合・複雑行動の獲得

研究課題名(英文)Acquisition of complex behavior for artificial life based on the behavior composed neuro-control

研究代表者

渡辺 美知子(WATANABE, MICHIKO)

北見工業大学・工学部・准教授

研究者番号：50509289

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、現実の物理法則に基づいた三次元物理環境における生物モデルとして犬モデルを取り扱い、モデルの歩様リズムの生成に神経振動子(CPG)、制御コントローラに人工ニューラルネットワーク(ANN)、コントローラの進化学習に実数値遺伝的アルゴリズム(RCGA)を用いてニューロイボリューション(neuro-evolution)による自律行動の獲得を陸環境と水環境で行った。また、獲得された行動をビヘイビアコンポーズドによる複雑な一連の行動として開発した。

研究成果の概要(英文)：This study proposes and develops the behavior composed neuro control, which realizes complex behaviors for the artificial life (A-life). A dog model is used as the A-life model on two different environments, namely a land and water environment. The central pattern generator (CPG) to generate a walking rhythm, the behavior composed neural networks (NN) to control complex walking, and the real number coded genetic algorithm (RCGA) to evolve the walking controller are implemented with the dog model. Simulation results prove that the proposed methods acquire a series of complex behaviors for the artificial life.

研究分野：工学

キーワード：ビヘイビアコンポーズド 人工生命 物理エンジン ニューロイボリューション 進化計算 自律行動  
機械学習 神経振動子

### 1. 研究開始当初の背景

人工生命(Artificial Life, Alife)という言葉と概念は、1987年にC. Langtonが第1回人工生命国際会議を開催し、その後急激な広がり世界に普及して現在に至っている。

C. Langtonは、Alifeによって「我々の知っている生命 life as we know it」から「生命のありうる姿 life as it could be」へと広がっていかも知れないと述べている。

エンジニアリング(工学)指向の人工生命とは、「進化・学習・適応システムの構築手法に関する研究」と考えることができる。具体的には、進化モデル、形態形成モデル、学習モデル、免疫系モデルなどが挙げられる。

人工生命(人工物)は、様々な機械やロボット開発、実在したと思われる生物や実在する生物の行動解析、エンターテインメント(Computer Graphics アニメーション)等で、現在、重要な役割を果たしている。

### 2. 研究の目的

本研究は、人工生命を統合型エージェント(Synthetic Agent)とみなし、より複雑な行動を可能にする人工生命の行動獲得法を提案し、実現するものである。具体的には、複合的な行動を獲得するビヘイビアコンポズド(behavior composed)の行動制御法とニューロイボリューション(neuro-evolution)による行動制御の自律獲得法の開発を行い、これまでにできなかった人工生命のより複合された複雑な行動獲得を本研究により実現することを目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究では、重力、摩擦力、水・空気の抵抗や質量・材料などの特性に関する物理情報などの物理法則に従う三次元空間内に自律行動をする人工生命(構造物)をモデリングする。このモデルには、人工ニューラルネットワーク(Artificial Neural Network, ANN)のコントローラ、ANN間のシナプス結合の進化学習に遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm, GA)や粒子群最適化法(Particle Swarm Optimization, PSO)などの手法を適用して自律行動を獲得する。

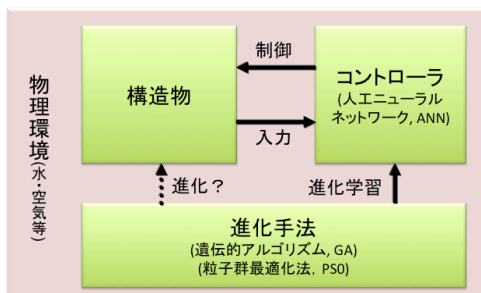


図1.自律行動獲得のイメージ図

#### 3.1 三次元物理空間内の自律行動獲得

本研究の先行研究としては、以下に示すモデルなどが挙げられる。

図2は、ヘリコプターの機体とロータの回

転を制御しながら地上から上昇、空中から地上への着陸、目的地までの飛行行動を自律的に獲得する。

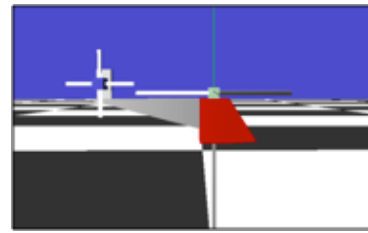


図2.ヘリコプターの自律飛行の獲得

図3は、ヘリウムを充填した飛行船本体とローターの回転を制御しながら機体の上昇・下降、目的地までの飛行行動を自律的に獲得する。

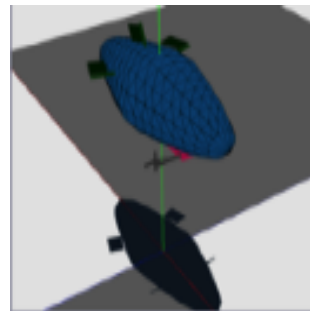


図3.飛行船の自律飛行の獲得

図4は、粘菌のアメーバを複数モデル化し、中央水平に設置された塀の障害物を回避しながら中央前方の目的地に向かって移動する群行動を自律的に獲得する。

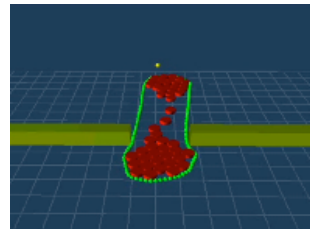


図4.アメーバ群行動の自律移動の獲得

図5は、無人搬送車(Automatically Guided Vehicle, AGV)が速度を調節し、壁の障害物を回避しながら目的地まで移動する行動を自律的に獲得する。

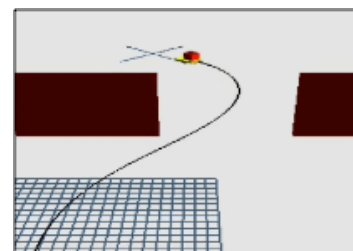


図5.無人搬送車の自律移動の獲得

#### 3.2 ニューロイボリューション

本研究では、モデル(人工生命)の行動制御の自律獲得法としてニューロイボリューションを採用している。以下に詳細を示す。

### 3.2.1 人工ニューラルネットワーク (ANN)

モデルの自律行動は、与えられた三次元物理内の環境を自身で認識し、望ましい結果へと学習が行われて実現される。この学習は、機械学習の一手法である ANN を用い、フィードフォワード型で入力層、中間層、出力層で構成されるネットワーク構造である。例えば、図 2 に示したヘリコプターは、ヘリコプター前方に取り付けられている 2 つのセンサーからの情報を入力とし、2 つのローター回転数と 4 つのメインローターブレード迎え角を出力としている。その結果、ヘリコプターの機体を制御しながら目的地である光源まで飛行する行動が自律的に獲得される。

### 3.2.2 遺伝的アルゴリズム (GA)

地球上に存在する生物は、動植物を問わず見事に環境に対して、適応、進化、競合、協調、組織化、修復、学習、知能化などを行っている。GA は、1975 年に J. H. Holland によって開発され、自然界の生物の進化過程を模倣した最適化手法の一つである。この GA は、3.2.1 で述べた人工ニューラルネットワークのニューロン間のシナプス結合の重み係数の最適化に進化学習として用いる。

### 3.2.3 神経振動子 (CPG)

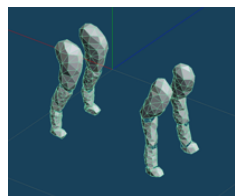
人間は足を交互に前へ出す事で歩行し、魚は尾ひれを左右に振る事で遊泳し、鳥は翼を上下に動かす事で飛翔を実現している。通常、生物は何らかの周期運動によってリズムカルな動きをコントローラによって制御されている。密接に結合されているコントローラ群は Central Pattern Generator と呼ばれ、この CPG をモデル化したのが神経振動子である。

## 4. 研究成果

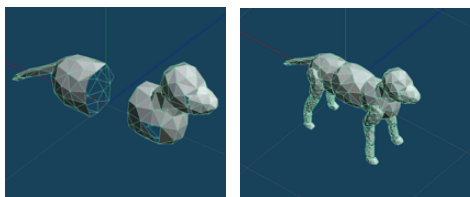
本研究では、三次元物理空間内に四足生物モデルとして犬モデルを取り扱った。

### 4.1 犬モデルの設計

犬モデルは、テトラフェイス社が提供している 3D ポリゴンモデラー Metasequoia を使用してモデリングを行った。モデルは、三角形メッシュの組み合わせにより構成し、関節のつなぎ目ごとに分けて作成したのを図 6 に示す。



(a) 足の作成



(b) 胴体の作成

(c) 全体図

図 6. Metasequoia による犬モデルの生成

Metasequoia を用いて作成した各パーツは、NVIDIA 社が提供している物理エンジンの PhysX の Actor として読み込ませる。次に、各パーツを PhysX の機能である Joint で繋ぐことで関節を再現している。図 7 と図 8 は、Joint の位置、モデルの完成図を示す。

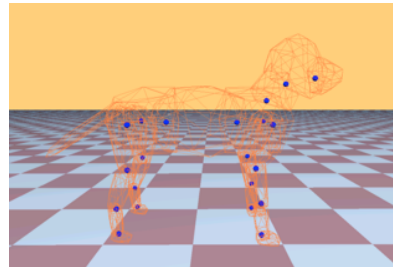


図 7. Joint の位置

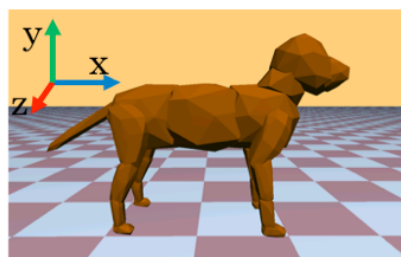


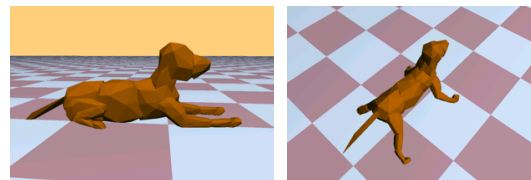
図 8. 犬モデルの完成図

本研究では、簡略化のためにモデルの密度を一律とし、 $970.0[\text{kg}/\text{m}^3]$  に設定した。モデルの全長は  $560[\text{mm}]$ 、全高は  $365[\text{mm}]$ 、質量は  $4.9[\text{kg}]$  である。

表 1. 各関節の可動域

| 関節   | x              | y              | z                          |
|------|----------------|----------------|----------------------------|
| 胴体   | $\pm 5^\circ$  | $\pm 50^\circ$ | $\pm 30^\circ$             |
| 首    | $\pm 45^\circ$ | $\pm 45^\circ$ | $\pm 45^\circ$             |
| 肩, 股 | $\pm 30^\circ$ | $0^\circ$      | $\pm 60^\circ$             |
| 前膝   | $0^\circ$      | $0^\circ$      | $-30^\circ \sim 120^\circ$ |
| 後ろ膝  | $0^\circ$      | $0^\circ$      | $-120^\circ \sim 30^\circ$ |
| 前手首  | $0^\circ$      | $0^\circ$      | $-100^\circ \sim 10^\circ$ |
| 後ろ手首 | $0^\circ$      | $0^\circ$      | $-10^\circ \sim 100^\circ$ |

表 1 に犬モデルの各関節の可動域を示す。この可動域の範囲内で関節に角度を与えることで、図 9 に示す伏せや開脚などの姿勢を再現することができる。



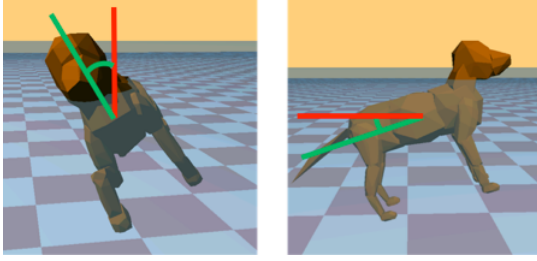
(a) 伏せ

(b) 開脚

図 9. 様々な犬モデルの姿勢

### 4.2 センサ

犬モデルは、自身の情報を取得させるための傾きセンサ、光センサ、水域判定センサを備えている。図 10 は、x 軸と z 軸周りの傾きセンサを示している。



(a) x 軸周りの傾き (b) z 軸周りの傾き  
図 10. 傾きセンサ

図 11 に示す光センサによって自身と光源までの距離を取得する．図 12 に示す水域判定センサは、全てのメッシュに持たせ、メッシュごとに水に入っているか否かを判定している．

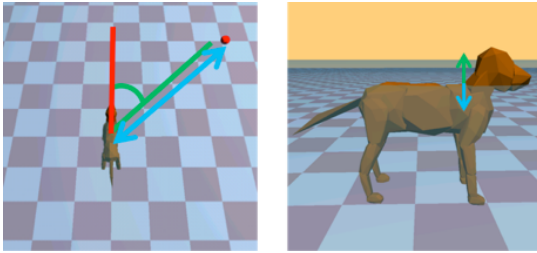


図 11. 光センサ 図 12. 水域判定センサ

### 4.3 学習と進化計算

図 13 に犬モデルのシステム構成図を示す．

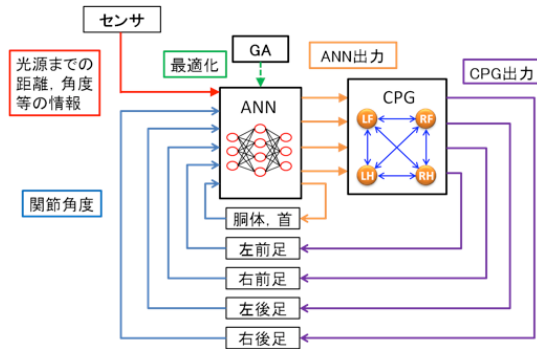


図 13. 犬モデルのシステム構成図

犬モデルは、センサによって取得した光源情報、自身の傾き等の情報を各脚の関節角度と共に ANN に入力する．その後 ANN によって変換された出力を用いて神経振動子(CPG)の振幅、周期パラメータと胴体、首の関節角度を制御する．CPG と ANN によって得られた値を用いて関節を動かした後、再び ANN に情報を入力、という流れを繰り返すことで犬モデルは動作を獲得する．また、ANN の性能を左右する結合荷重の組み合わせの最適化には実数値遺伝的アルゴリズムを用いる．

### 4.4 修正 Hopf 振動子

犬モデルの遊泳に必要な周期的なリズム生成に修正 Hopf 振動子を使用する．この振動子は、先に述べた松岡振動子に比べると内部パラメータが少なく、波形制御が比較的容易という特徴がある．修正 Hopf 振動子は、以下の式(1)～(4)に示す

$$\dot{x} = \alpha(u - r^2)x - \omega y \quad (1)$$

$$\dot{y} = \beta(u - r^2)y - \omega x \quad (2)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (3)$$

$$\omega = \frac{\omega_{stance}}{\exp(-by)+1} + \frac{\omega_{swing}}{\exp(by)+1} \quad (4)$$

$x, y$  は振動子の状態変数,  $\dot{x}, \dot{y}$  は  $x, y$  の時間微分,  $r$  は振動子の振幅を示している． $\omega_{stance}, \omega_{swing}$  は、それぞれ振動子の支持脚期と遊脚期の周波数であり、 $b$  はこれらの周波数を調整するパラメータである．この振動子を用いることで半径  $r$ , 角速度  $\omega$  [rad/s] の安定したリミットサイクルを生成できる． $\alpha, \beta$  は、このリミットサイクルの収束の早さを制御するパラメータである．

修正 Hopf 振動子を 4 脚の犬モデルに適用するためには、Righetti と Ijspeert が提案した式(5)～(7)に示すカップリングを用いる．

$$\dot{x}_i = \alpha(u - r_i^2)x_i - \omega_i y_i \quad (5)$$

$$\dot{y}_i = \beta(u - r_i^2)y_i - \omega_i x_i + \sum_j k_{ij} y_j + u_i \quad (6)$$

$$\omega_i = \frac{\omega_{stance}}{\exp(-By_i)+1} + \frac{\omega_{swing}}{\exp(By_i)+1} \quad (7)$$

ここで、 $i=1$  は左前脚、 $i=2$  は右前脚、 $i=3$  は左後脚、 $i=4$  は右後脚の振動子を示している． $k_{ij}$  は各振動子の位相差を決定するパラメータ、 $u_i$  は振動子へのセンサフィードバックである． $k_{ij}$  の組み合わせによって Trot 歩様、Pace 歩様、Gallop 歩様など 4 脚の歩様を決定することができる．

犬モデルに自律的な行動をさせるためには、リアルタイムで状況に応じた振幅、周期を持つ振動子波形の生成が必要である．そこで本研究では、修正 Hopf 振動子の振幅、周波数パラメータである  $\mu, \omega_{stance}, \omega_{swing}$  の値を ANN の出力を用いることで制御する．

### 4.5 数値シミュレーション実験

#### [数値実験 1]

この実験では、陸環境で犬モデルが床に横たわっている状態から起き上がって 4 足で安定して立っている状態までの行動獲得である．実験では、以下の式を満たしたときに立ち上がったと反判断する．ここで、 $y_i$  は胴体の  $y$  座標、 $\theta_{body\_x}, \theta_{body\_z}$  はそれぞれモデルの左右の傾き、前後の傾きを示している．

$$y_i > 140 \quad (8)$$

$$\sin \theta_{body\_x} + \sin \theta_{body\_z} > 1.8 \quad (9)$$

このとき、評価関数  $F_1$  は以下のとおりである．

$$F_1 = \sum_{t=0}^N (y_t + \sin \theta_{body\_x} + \sin \theta_{body\_z}) \quad (10)$$

図 14 は、右足を下に横たわっている状態から体の外側に足を広げることで地面を蹴

り、その反動で体を回転させている。また、体が垂直に近くなると足を伸ばして体を安定させようとしている。この時のステップ毎の胴体の傾き状況を図 15 に示す。

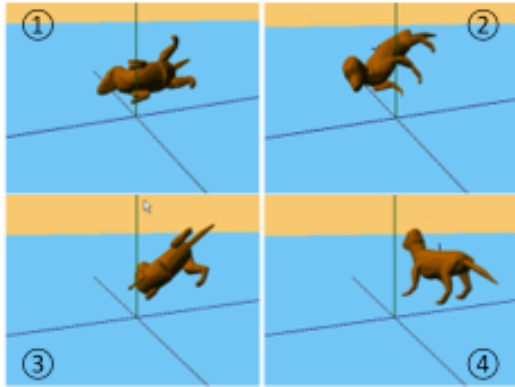


図 14. 起き上がり動作

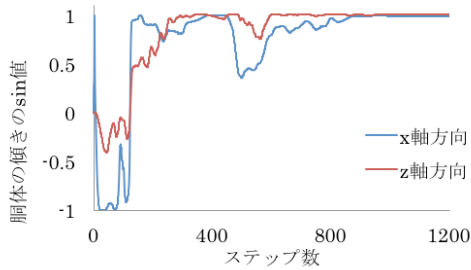


図 15. ステップ毎の胴体の傾き状況

**[数値実験 2]**

この実験では、図 16 に示すように様々な位置に設置された光源へ向かうような自律行動を獲得する。その後、図 17 に示すような光源に追従する行動が得られる。また、光源が右にある場合の CPG の出力状況を図 18 に示している。評価関数  $F_2$  は、以下のとおりである。ここで、 $N$  はシミュレーションのステップ数、 $d$  は光源との距離、 $P$  は転倒時のペナルティである。

$$F_2 = \sum_{t=0}^N d - 10 \cos \theta_{light} + P \quad (11)$$

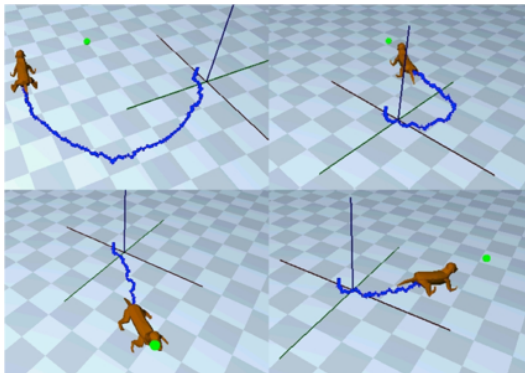


図 16. 犬モデルの光源到達歩行の軌跡

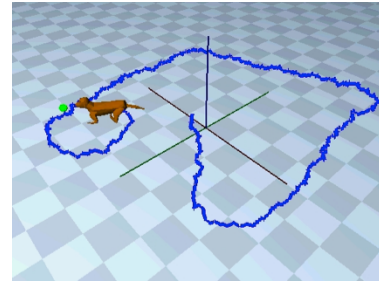


図 17. 光源追従歩行行動の軌跡

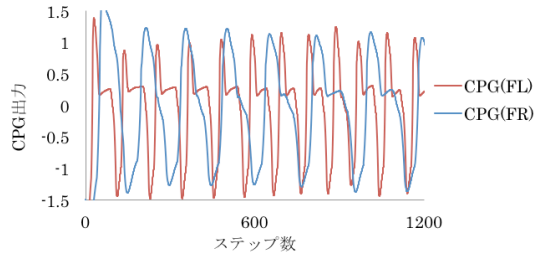


図 18. 光源が右にある場合の CPG 出力

**[数値実験 3]**

この実験では、水環境で犬モデルの遊泳行動、光源到達行動、光源追従行動を獲得する。評価関数  $F_3$  は、以下のとおりである。

$$F_3 = \sum_{t=0}^N (D_t - \alpha \cos \theta_t - \beta \cos \theta'_t - \gamma \cos \theta''_t) \quad (12)$$

ここで、 $N$  はシミュレーションのステップ数、 $D$  は光源までの距離、 $\theta$  はモデルと光源との角度、 $\theta'$  はモデルの上下の傾き角度、 $\theta''$  はモデルの左右の傾き角度を示している。また、 $\alpha$  は光源への向きの評価係数、 $\beta$ 、 $\gamma$  は上下、左右の傾きの評価係数であり、30、15、15 に設定した。

図 19 は、学習済みの犬モデルの光源追従遊泳行動の軌跡を示している。また、図 20 は光源が右側にある場合の CPG の出力状況である。

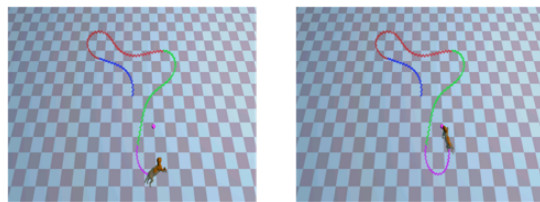


図 19. 光源追従遊泳行動の軌跡

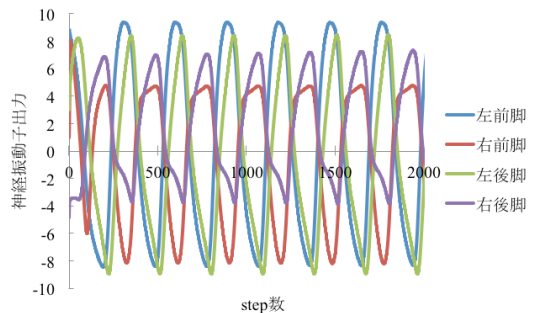


図 20. 光源が右側にある場合の CPG 出力

#### 4.6 おわりに

本研究では、現実の物理法則に基づいた三次元物理環境における生物モデルとして犬モデルを取り扱い、モデルの歩様リズムの生成に神経振動子(CPG)、制御コントローラに人工ニューラルネットワーク(ANN)、コントローラの進化学習に実数値遺伝的アルゴリズム(RCGA)を用いてニューロイボリューション(neuro-evolution)による自律行動の獲得を陸環境と水環境で実現した。

陸環境においては、1)四足歩行、2)地面に横たわった状態から起き上がり、3)起き上がりから体のバランスを保ちながら4足で立つ、4)光源への追跡歩行、移動する光源への追従歩行などの行動獲得を行った。また、水環境においては、5)水環境の構築、6)直線遊泳、7)右の旋回遊泳、8)左旋回遊泳、9)光源への追跡遊泳、10)移動する光源への追従遊泳などの行動獲得を行った。これらの行動を組み合わせることでビヘイビアコンポーズド(behavior composed)による行動制御が行える。このビヘイビアコンポーズドで得られた行動は、以下のとおりである。

- (1) 陸環境においては、犬モデルの右足を下に横たわっている状態から体の外側に足を広げることで地面を蹴り、その反動で体を回転させ、体が垂直に近くなると4本の足を伸ばして体を安定化させる一連の行動獲得である。
- (2) 水環境においては、犬モデルの体が水中に沈まないように4足で遊泳を行い、目的地方向に右旋回や左旋回を行いながら遊泳し、目的地方向に遊泳を始めて到達する一連の行動獲得である。

本研究では、複合的な行動を獲得するビヘイビアコンポーズドの行動制御法とニューロイボリューションによる自律行動獲得法の開発を行い、これまでにできなかった人工生命のより複合された複雑な行動獲得を実現することができた。今後は、より複雑な一連の行動獲得にも応用する予定である。

〈参考文献〉

- ① 人工生命研究会, 人工生命-情報と生命とCGの交差点-, 共立出版, 1994
- ② 嘉数, 古川他, ニューラル・コンピューティング-上級編-, 森北出版, 1998
- ③ 古川, 川上, 渡辺他, メタヒューリスティクスとナチュラルコンピューティング, コロナ社, 2012
- ④ L. Righetti and A. J. Ijspeert, Pattern generators with sensory feedback for the control quadruped locomotion, Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Robotics Automation (ICRA 2008), pp. 819-824, 2008
- ⑤ K. Matsuoka, Sustained Oscillations Generated by Mutually Inhibiting Neurons with Adaptation, Biological Cybernetics, vol. 52, pp367-376, 1985

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

- ① Kenji Iwate, Ikuo Suzuki, Michiko Watanabe, Masahito Yamamoto, and Masashi Furukawa, An Artificial Neural Network Based on the Architecture of the Cerebellum for Behavior Learning, The 14<sup>th</sup> International Symposium on Advanced Intelligent Systems (ISIS2013), pp. 1-9(T1f-6), 2013. 11 (査読有)
- ② 古川正志, 岩館健司, 鈴木育男, 山本雅人, 渡辺美知子, 人工生物の群れ行動のモデリングとその行動獲得, 計測自動制御学会会誌「計測と制御」. 第 52 巻第 3 号, pp1-6, 2013 年 3 月(査読有)
- ③ Masashi Furukawa, Michiko Watanabe, Akihiro Fukumoto, Ikuo Suzuki, Masahito Yamamoto, SWIMMING ANIMATS WITH MUSCULOSKELETAL STRUCTURE, IADIS International Journal on Computer Science and Information Systems, Vol. 7, No. 2, pp. 152-164, 2013. 2(査読有)

〔学会発表〕(計 6 件)

- 1) 飯淵敬太, 渡辺美知子, 鈴木育男, 岩館健司, 陸環境内における四足生物モデルの自律行動の獲得, 2014年度精密工学会秋季大会学術講演会, pp203-204, 2014. 9. 16(鳥取)
- 2) 谷祐紀, 渡辺美知子, 鈴木育男, 岩館健司, 多足生物モデルの歩行獲得, 2014年度精密工学会北海道支部学術講演会, pp35-36, 2014. 8(札幌)
- 3) 三串邦明, 渡辺美知子, 鈴木育男, 岩館健司, 物理環境における犬モデルの遊泳行動の獲得, 第 13 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会講演論文集(SI2012), pp215-217, 2012. 12(博多)
- 4) 白石陽介, 渡辺美知子, 鈴木育男, 岩館健司, 4足歩行における障害物回避の歩行行動獲得, 第 22 回インテリジェント・システム・シンポジウム講演論文集(FAN2012), 1B1-1, 2012. 8(沖縄)
- 5) 白石陽介, 渡辺美知子, 不整地における4足歩行動作の獲得, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012 講演論文集, 1A2-D11(1)- 1A2-D11(3), 2012. 5(静岡)
- 6) 成瀬幸史, 渡辺美知子, 鈴木育男, 岩館健司, 三次元物理空間における恐竜の歩行行動の獲得, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013 講演論文集, 1P1-M05, 2012. 5(つくば)

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡辺 美知子 (WATANABE, MICHIKO)  
北見工業大学・機械工学科・准教授  
研究者番号: 50509289