

## 多脚人工生物の行動獲得

北海道大学大学院情報科学研究科 ○尾尻 和也, 鈴木 育男, 山本 雅人, 古川 正志

## 要 旨

本研究では多脚人工生物であるムカデを模した剛体モデルに対し、自律的に各脚の制御規則を学習させることによる、歩行行動の獲得実験を行なった。モデルのサイズによる獲得行動の変化を検証するため、脚数の異なるモデルにおいて実験を行なった。その結果、脚数が少なく移動中に支える脚の少ないモデルは胴体を着地させながら移動し、脚数が増えたモデルでは脚を規則的に動かして前進する2種類の行動を得られたことを報告する。

## 1. はじめに

現在、人工生物の行動を生成、獲得するための研究が、人工生命の分野をはじめとした様々な分野で数多く実施されている<sup>(1)(2)</sup>。これらの研究は、コンピュータ内で設計された環境において、特定のモデルが所望の振る舞いを獲得する学習問題とみなすことができ、現実感のあるCG(Computer Graphics)の容易な制作及び機械の自動制御など、多くの応用が期待できる。

また、対象生物モデルとして多脚生物に注目する。多脚生物は、多くの脚を持つことによる安定性・耐故障性を有し、高い不整地踏破性を持つ有用な特徴を持つ。しかし、多くの脚を同時に制御しなければならないためコントローラが巨大化しやすく、学習が複雑になりやすい。

これらを踏まえ、本研究では多脚人工生物に焦点を当て、多脚生物であるムカデを模した剛体モデルに対し、自律的に各脚の制御規則を学習させることによる歩行行動の獲得を行なう。また同時に、脚数の異なるモデルに対してもシミュレーションを行い、獲得行動の変化を検証する。

## 2. ムカデモデル

本研究では、対象とする多脚生物のなかで、体節毎に左右1対の脚を持ち、各体節の基本形状の変化が少ない特徴を持つムカデを模したモデルを扱う。

直方体で作られた胴から左右1本ずつの脚がのび、胴の側面1点でそれぞれ接続されているものを1つの体節とする。多数の体節を直列に連結することによりムカデモデルを作成する。それぞれの部品(胴, 脚)は質量を持つ剛体で作成される。左右の脚は胴との接続点を中心とする、上下方向、前後方向の自由度を持つ。

## 2.1 ムカデ体節モデル

実験で使用したモデルの体節のサイズを図1に示す。モデルの密度は、全ての部品で $500\text{kg/m}^3$ とした。

## 2.2 アクチュエータ

1つの体節は、左右それぞれの脚を上下、前後に独立に動かすアクチュエータを合計4つ持つ。アクチュエータは、コントローラから出力された上下、前後方向それぞれの目標関節角度へ脚を回転移動させる。ANN(人工ニューラルネットワーク)コントローラにより出力された値から、以下の式により目標関節角度を求める。すなわち、左脚の前後方向関節角度( $S_{Ly}$ )を求める式を

$$S_{Ly}(i) = K_y \sin(\omega_{Ly}t + \phi_L i) \quad \dots \quad (1)$$

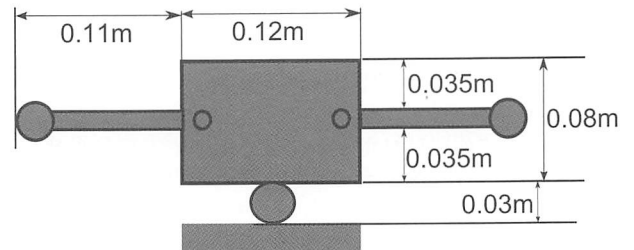


Fig.1 A centipede model size

とする。また左脚の上下方向関節角度( $S_{Lx}$ )を求める式を

$$S_{Lx}(i) = K_x \sin(\omega_{Lx}t + \phi_L i + \phi_0) \quad \dots \quad (2)$$

とし、同様に、右脚の前後方向関節角度( $S_{Ry}$ )を求める式を

$$S_{Ry}(i) = K_y \sin(\omega_{Ry}t + \phi_R i + \phi_1) \quad \dots \quad (3)$$

とし、右脚の上下方向関節角度( $S_{Rx}$ )を求める式を

$$S_{Rx}(i) = K_x \sin(\omega_{Rx}t + \phi_R i + \phi_1 + \phi_0) \quad \dots \quad (4)$$

とする。ここで、 $K_x, K_y$ は脚の最大振れ角を表す定数、 $i$ は先頭から数えた体節の番号、 $\phi_0$ は前後方向と上下方向に動かすアクチュエータ制御波の位相差、 $\phi_1$ は同じ胴に付く左右の脚の制御波の位相差を表す。 $\omega_{Lx}, \omega_{Ly}, \omega_{Rx}, \omega_{Ry}, \phi_L, \phi_R$ (位相差)がANNコントローラの出力となる。

## 2.3 センサ

ムカデモデルは先頭の体節(頭部)に左右1つずつの光センサを持つ。左右それぞれのセンサは、センサから光源への相対位置を認識し、センサから光源へ向かうベクトルをモデル頭部の空間座標系に対する単位ベクトルとして、ANNコントローラの入力値とする。

## 2.4 制御系設定

脚の関節角度制御には、先に述べたようにANNコントローラを用いた。実験モデルでは、全ての脚を一つのコントローラで同時に制御するのではなく、コントローラは前後及び自身の体節に付く脚の相対位置情報とセンサの入力情報から、自身の胴に接続している左右の脚の目標関節角度のみを出力する。1ステップ毎に、先頭の体節から末尾の体節まで順にコントローラの入出力処理を行い、全体の動作が次のステップで振る舞いとして表現される。これによって、体節数の変更に影響されないコントローラを作ることができ、コントローラをシンプルで学習速度の早いものにすることができる。入力値として、

左右のセンサから光源へ向かうベクトルの成分，胴の中心から脚へ向かうベクトル $L_i$ の成分をそれぞれ自身の胴に対して( $i = n$ )，前方の体節に対して( $i = n - 1$ )，後方の体節に対して( $i = n + 1$ )の3体節分得る．ここで， $n$ は先頭からの体節数である．

### 3. 行動獲得実験

ムカデモデルが光源へ向かって移動する振る舞いの獲得を目指すシミュレーション実験を行った．体節数や脚数の変化によって獲得する行動が異なるかを検証するために，体節数2から9のモデルに対して実験を行なう．行動獲得は，ANNの結合加重を，遺伝的アルゴリズム(GA)を利用して最適化することにより行なう．

#### 3.1 実験条件

シミュレーションにおける数値計算は，NVIDIA社<sup>(3)</sup>が提供している物理エンジン「PhysX」を利用し，各時間におけるモデルの物理的な振る舞いを求めた．

シミュレーション及びGAの実験条件を以下の様に示す．

GAは，個体数20，世代数600とし，エリート保存法(5体)を用いた．エリート以外の残る15体の内，13体を全固体からルーレット選択し，交叉率80%で二点交叉させ，残る2体をランダムな値で新たに作成する．最後に最上位エリート以外の個体に対し確率10%で突然変異を適用する．

実験では，1ステップ(1/60秒)毎にモデルがコントローラに従い振る舞う．1800シミュレーションステップ(実時間30.0秒)を各個体の1試行とした．

#### 3.2 評価関数

評価値は，ムカデモデルの頭部と光源との距離(高低差は含まない)及び，頭部の高度を一定の高さより高い位置に保つよう評価する関数の値の，1試行時間における累積値とした．頭部の高度を評価する関数は，モデルが胴体を地面に着けながら移動する行動の獲得を抑制するためのものである．このとき，評価関数を以下のように設定した．

$$F = \sum_{t=0}^T \sqrt{(L_x - He_x)^2 + (L_z - He_z)^2} + H(He_y) \quad (5)$$

$$H(u) = \begin{cases} 500 & : u \leq 0.05 \\ 0 & : \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

$$T = 30.0 \text{sec} / (1 \text{sec} / 60 \text{step}) = 1800 \text{step} \quad (7)$$

ここで $t$ はシミュレーションステップ， $L$ は光源の座標， $He$ はモデル頭部の座標である．

この評価値 $F$ を最小化するように，行動獲得を行なう．

#### 3.3 実験結果

全てのモデルにおいて，光源へ向かって前進し，光源の真下で脚を不規則に動かすことによって移動を止めようとする行動を獲得した．

体節数が2のモデルにおいては，水泳のバタフライのように全ての脚をほぼ同時に前方へ回転させ，胴体を着地させながら前へ移動する行動を獲得した(図2)．

体節数が3のモデルは，接地する脚が後ろから前へ伝播し，胴体を浮かせながら前進するものの，歩行の途中で胴体を支え

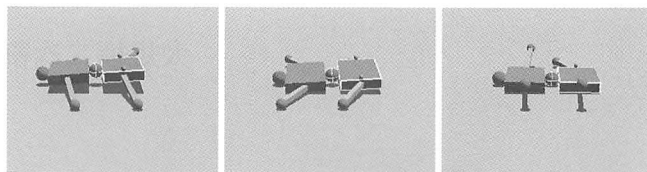


Fig.2 Two metamer model

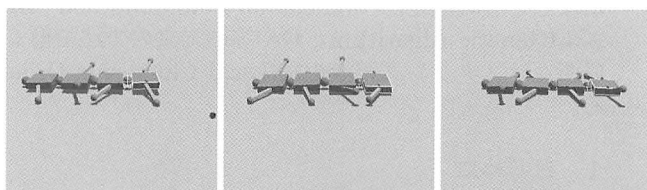


Fig.3 Four metamer model

きれず，1周期前進する度に急激に歩行速度が落ちてしまう行動を獲得した．

体節数が4以上のモデルでは，接地する脚を順序良く後ろから前へ伝播させ，胴体を地面に着けることなく前進する行動を獲得した(図3)．

#### 3.4 考察

実験では，体節数2のモデルのみ胴体を接地させ前進する行動を獲得した．これは，実験モデルにおいて，1本の脚だけを単独動かすことができず，2本の脚で胴体を支える必要が生じ，結果的に姿勢の維持を無視してより推進力の大きい行動を獲得したと考えられる．

その他のモデルでは，脚の運動位相をずらし，接地する脚を後ろから前へ伝播させながら前進する歩行行動を獲得した．体節数3のモデルのみ移動速度が急激に落ちたことは，少数の脚で胴体を支えなければならないため1本あたりの脚の接地時間が増加し，接地している状態での脚の前後の振りが大きくなったためであると考えられる．このとき，脚は胴体との接合部分を中心に前後に回転運動をするため，脚を大きく前に振り出している状態や大きく後ろへ振っている状態では進行方向への推進力が小さくなってしまい，歩行速度を減少させる要因になったと考えられる．

#### 4. おわりに

本研究では，多脚人工生物としてムカデモデルを取り上げ，ムカデモデルに対し歩行パターンを自律的に獲得させるための学習実験を行った．また，モデルのサイズにあたる体節数を変化させ，獲得する行動の違いを検証した．

今後は，モデルの自由度を増やすことや一部の脚を取り除くなどしてより多くの行動の遷移境界や条件を検証し，多脚生物の有用性が見込まれる不整地での歩行を可能とする行動の発現を目指す．

#### 参考文献

- (1) K.Sims, "Evolving Virtual Creatures", *Proceedings of the 21st annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp.15-22, 1994.
- (2) Herve Luga, "Automatic Generation of Behaviors, Morphologies and Shapes of Virtual Entities", *SCI 159*, pp. 103-121.
- (3) NVIDIA Corporation, <http://www.nvidia.com/object/nvidia.physx.html>