

# 進化的計算法を用いた2足歩行ロボットの形態と歩行パターンの生成 -2次元多リンクモデルを用いた手法の確立-

Simultaneous Generation of Morphology and Walking Pattern of  
Biped Walking Robot using Genetic Algorithm  
-Development of the Method by use of Two-Dimensional Model-

○ 非 遠藤 謙 (JST, 慶應大学) 非 山崎文敬 (JST, 大阪大学)  
非 北野宏明 (SonyCSL, JST) 正 前野隆司 (慶應大学)

Ken ENDO, JST, 6-31-15 M31, Jingumae, Shibuya-ku, Tokyo and Keio University  
Fuminori YAMASAKI, JST and Osaka Univ. Hiroaki KITANO, SonyCSL and JST  
Takashi MAENO, Keio University

In this paper, morphology and control systems that define the locomotion of biped walking robots are emerged using the evolutionary computation. The morphology and control systems have a close relationship to each other. Therefore, the model of the robot has to be constructed in which the morphology and control systems emerge simultaneously. Both of them are generated using a Genetic Algorithm. The environment that robots walk on is the flat ground which is two-dimensional lateral simulated space under the effect of the gravity. Simple multi-linked robots as the morphology model and pattern generator as the control system are used. Both the length of movement and the stability of upper body are evaluated through the evolution. With these method, the valid walking pattern are emerged using limited size of chromosomes.

*Key Words:* Biped Walking Robot, Pattern Generator, Genetic Algorithm, Co-evolution

## 1 はじめに

従来、ロボットの開発には、まずロボットを構成する要素や構造を決定し、実際に試作してからシミュレーションや実機を用いて制御法を確立し、最後に問題点改善のための再設計を行う、といった試行錯誤の繰り返しが行われてきた。これまでに、われわれも従来の手法を用いて、ヒューマノイドロボットのプラットフォームをめざして、PINO<sup>(1)</sup>を開発してきた。しかし、安価な要素で構成されているために、バックラッシュが大きい、最大出力トルクが小さいといった問題点があり、この構造での歩行制御は困難である。そして、このロボットの歩行制御を容易にするために、足の機構の設計を何度もやり直しているのが現状である。そこで、機構設計の段階からロボットの形態や歩容、および目的のタスクを行うことを同時に考慮すれば、この試行錯誤の段階を省き、目的をより容易に達成できるロボットの開発を行うことができると考えられる。形態と運動パターンを同時に自律的に生成させるボトムアップ的な手法は人工生命やバイオメカニクス分野で提案されている<sup>(2)(3)</sup>ものの、ロボットの設計手法としての実用化はされていない。このため、われわれは実ロボットの形態と運動パターンを同時に進化的に生成する自律的な設計の研究を行ってきた<sup>(4)</sup>。この考え方は、ヒューマノイドロボットの開発にも有効であると考えられる。そこで、本研究ではヒューマノイドロボットの形態と歩行パターンを同時に生成する手法に基づく2足歩行ロボットの設計方法を提案する。

## 2 手法

### 2.1 形態

ロボットの形態と歩容を同時に創発的に獲得するためには、まず両者を単純かつ適切にモデル化し、進化的な設計手法を確立する必要がある。そのため、ロボットの形態を Fig. 1 のような単純な2次元多リンクのモデルとした。各リンクの線密度は一定で、3.19kg/mとし、また、足先から腰までの長さは一定で0.28mとした。これらの値は従来のPINOの値を参考にした。また、足先のプレートは常に地面と平行になるように制御されるものとする。さらに、足先から膝まで、また膝から腰までの

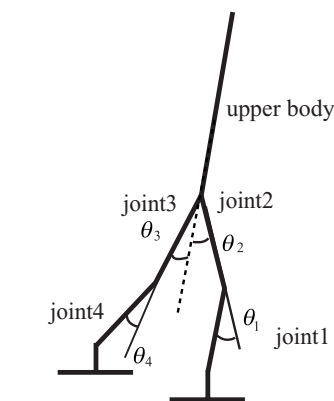


Fig. 1 model of biped walking robot

長さ、および上半身に相当するリンクの長さは進化の過程で変化するものとした。また、本研究は、実際のロボットの作成を目的としているため、各関節の駆動トルクの値を実際のサーボモータの出力トルクを参考に- 3Nm から 3Nm とした。

### 2.2 神経系

進化の過程でロボットの形態を変化させ、形態に適した歩行パターンを生成させるためには、そのロボットの制御系も変化させる必要がある。さらに、さまざまな形態に対して同様に動作する制御法を用いる必要がある。また、制御系だけでなく形態も進化の対象であることを考えると、進化的計算法を用いて最適解を求めるためにはパラメータの多い複雑な制御系を用いることはできない。そこで本研究では、歩行運動が周期的であり、左右が半周期の位相差をもつ対称的な運動であることに着目し、非線形な周期関数として神経振動子を用いることにした。ロボットに用いる神経系を Fig. 2 に示す。各神経振動子には相互抑制モデルを用いる。式で表すと

$$T_i \dot{u}_i = -u_i - \sum_{ij} w_{ij} y_j - \beta v_i + U_0 + \sum_k F B_k \quad (1)$$

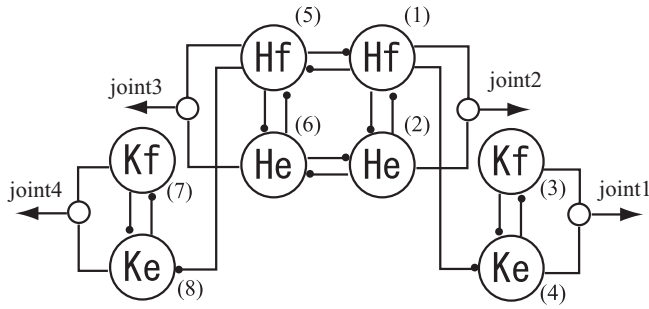


Fig. 2 structure of neural oscillator

$$T_i' \dot{v} = -v_i - y_i \quad (2)$$

$$y_i = \max(0, u_i) \quad (3)$$

のように1つの神経振動子について2変数からなる連立微分方程式となる。ただし、 $w_{ij}$ は第*i*神経振動子と第*j*神経振動子の結合係数、 $FB_k$ は各関節角度、各速度、床反力等のフィードバック成分、 $u_i$ は第*i*神経振動子の内部状態、 $y_i$ は*i*番目の神経振動子の出力、 $U_0$ は定常入力、 $v_i$ は第*i*神経振動子の疲労度、 $\beta$ は疲労度係数、 $T_i, T_i'$ はそれぞれ時定数を示す。また、Fig. 2の白抜きの円部分において

$$\theta_d = p(Xe.u - Xf.u) \quad (4)$$

のような処理が行われ、各関節の目標角度が決定する。ただし、 $Xe.u$ を正転成分の神経振動子の内部状態、 $Xf.u$ を逆転成分の神経振動子の内部状態、 $p$ をゲインとする。このようにして、決定した各関節の目標角度に対して、PD制御を行うことにより、各関節の駆動トルクが求まる。進化の過程では、 $U_0, \beta$ の値はあらかじめ決定しておき、残りのパラメータ  $T_i, T_i', w_{ij}, p$  フィードバックゲインの値を進化の過程で獲得するものとする。

### 2.3 進化的計算手法

本研究では、形態と歩行パターンを同時に生成する手法として、遺伝的アルゴリズム (GA) を用いた。進化のパラメータは、神経振動子のニューロン間の結合係数、各初期値、形態の各リンク長の比等であり、合計28のみのパラメータにより構成される。遺伝子型は各パラメータを0から1の実数とし、突然変異を正規分布状に与えることにより、局所探索ができるようにした。また、GAの各パラメータは以下のようにした。

Population	200	Generation	300
Crossover rate	0.8	Mutation rate	0.05

各個体は、遺伝操作が行われたあとに、10秒間の2次元動力学シミュレーションにより、実際に歩行を行わせることによって評価される。移動環境は、外乱のない平地とした。本研究ではロボットの設計を多目的最適化問題としてとらえ、2つの評価関数を用いた。1つめは、

$$fitness_1 = \sum_k (step_0 - |step_k - step_0|) \quad (5)$$

である。ただし、 $step_0$ は初期状態の歩幅、 $step_k$ は歩行中、遊脚が地面についた瞬間の歩幅である。つまり、一定の歩幅で長い距離移動できるものほど、高い評価を得ることになる。もう1つは

$$fitness_2 = \frac{l_g}{\int \dot{\theta}_{upper} dt} \quad (6)$$

である。ただし、 $\dot{\theta}_{upper}$ は上半身に相当するリンクの絶対座標における角速度に相当する。つまり、上半身の揺れが小さいも

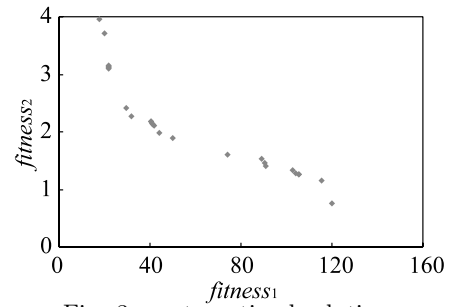


Fig. 3 pareto optimal solutions

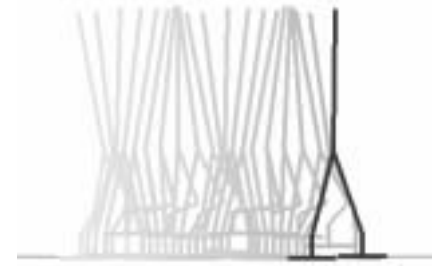


Fig. 4 walking pattern of preferred solution

のほど高い適応度を得ることができる。将来、2足歩行ロボットが歩行しながら作業することを考えると、安定した作業を行うためには、これらの評価関数は有効である。

### 2.4 結果と考察

最終世代のパレート最適解を Fig. 3 に示す。このように、2つの適応度は一方が高い場合には他方が低くなる傾向があり、その分布形状は特有である。評価関数を決定する際に、2つの成分に重みをかけて足しあわせるような手法を用いた場合、このような多様な解は生成されず、見当違いな解がでてしまうことにも成り得る。このパレート最適解の形状が問題に特有であることから、多目的最適化問題としてとらえることの妥当性が確認できた。また、その中から選んだ選好解の歩行パターンを Fig. 4 に示す。この個体は10秒間歩き続けることができ、上半身の揺れが小さいものであるということがいえる。

### 3 結論

2足歩行ロボットの形態と神経系を単純にモデル化し、両者を同時に生成する手法を提案した。その結果、28という少ないパラメータにもかかわらず、妥当な歩行パターンが生成された。これは今後、より複雑なモデルを用いる場合に有効な手法であるといえる。

### 【参考文献】

- (1) Fuminori Yamasaki, Tatsuya Matsui, Takashi Miyashita and Hiroaki Kitano, "PINO The Humanoid: A Basic Architecture", The 4th International Workshop on RoboCup, pp.52-61, (2000).
- (2) Karl Sims, "Evolving 3D Morphology and Behavior by Competition", Artificial Life IV, pp.28-39, (1994).
- (3) Kazunori Hase and Nobutoshi Yamazaki, "Computational evolution of human bipedal walking by a neuro-musculoskeletal model", Artif. Life Robotics, 3(3), pp.133-138, (1999).
- (4) Ken Endo and Takashi Maeno, "Simultaneous Design of Morphology of Body, Neural Systems and Adaptability to Environment of Multi-Link-Type Locomotive Robots using Genetic Programming", Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, (2001).