

# 進化的計算手法を用いた2足歩行ロボットの形態と歩行パターンの生成

## -3次元モデルを用いた手法の確立-

遠藤謙 †‡ 前野隆司 ‡ 北野宏明 †§

†科学技術振興事業団 ERATO 北野共生システムプロジェクト ‡慶應義塾大学 §Sony CSL

**Co-evolution of Morphology and Walking Pattern of Biped Humanoid Robot  
using Evolutionary Computation  
-Development of Method using Three Dimensional model-**

\*Ken ENDO†‡, Takashi MAENO‡ and Hiroaki KITANO†§

†Kitano Symbiotic Systems Project, ERATO, JST Corp. ‡Keio University §Sony CSL

**Abstract**— In this paper, we present a method for co-evolving morphology and controller of bi-ped humanoid robots. Currently, bi-ped walking humanoid robots are designed manually on trial-and-error basis. Although certain control theory exists, such as zero moment point (ZMP) compensation, these theories do not constrain design space of morphology and detailed control of humanoid robot. Thus, engineers has to design control program for apriori designed morphology, neither of them shown to be optimal within a large design space. We propose evolutionary approaches that enables co-evolution of morphology and control. Two steps of co-evolutions were achieved in a precision dynamics simulator. One is for obtaining the optimal lengths of links using simple multi-link model and the other is for obtaining the optimal geometry of servomotor which is often used for radio control car. Finally, unexpected optimal solutions were discovered. This indicate that a complex design task of biped humanoid can be performed automatically using evolution-based approach, thus varieties of humanoid robots can be designed in speedy manner. This is a major importance to the emerging robotics industries.

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

### 1. はじめに

これまでに、さまざまな種類のロボットが開発されてきた。近年では、形態を変化させずにさまざまな環境を移動できることや、人と同じ数の自由度を持ち、複雑なタスクを行うことができるから、ヒューマノイドロボットの研究が盛んに行われている。しかし、これらのほとんどは、高価な要素や高度な技術を必要とするため、開発は困難である<sup>1) 2)</sup>。

morph は市販のサーボモータや安価な要素により構成されているが、開発には長い年月を要しており、技術者の経験と技術が不可欠であることがわかる<sup>3)</sup>。これは、ロボット開発の過程において、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るためである。これまでに、われわれも、ヒューマノイドロボットのプラットフォームをめざし、従来の手法を用いて、PINO<sup>5)</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容易でない。このため、本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繰り返しているのが現状である。ZMP 補償<sup>4)</sup>や倒立振り子を応用したモ

デルを用いる手法<sup>?)</sup>のような歩行制御手法も存在するものの、これらは制御に形態を変数として考慮するものではない。このため、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設計変数として同時に考慮すれば、試行錯誤の段階を省き、形態と運動の最適性が高い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>6)7)</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2足歩行ロボットの形態と歩行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>8)</sup>。ただし、従来のモデルは2次元であったため、本稿では3次元モデルを用いた2足歩行ロボットの形態と歩行パターンの同時生成手法を提案する。

### 2. 手法

#### 2.1 形態モデル

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。また、2足歩行は高度な運動であるため、最初から2足歩行を獲得することは困難である。そのため、進化的計算を2段階

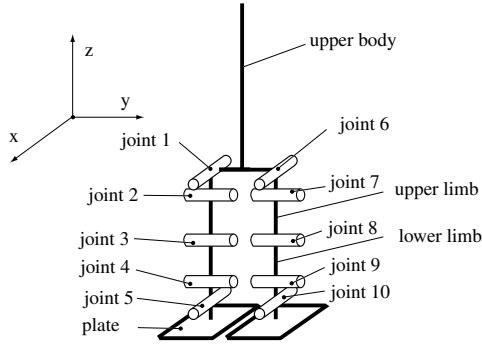


Fig.1 model of robot of the first step

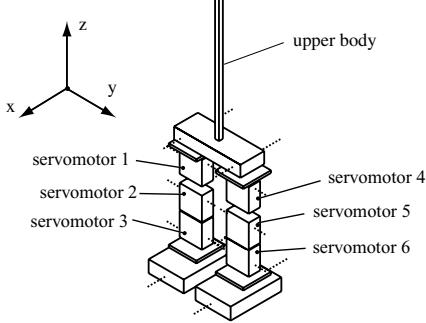


Fig.2 model of robot of the second step

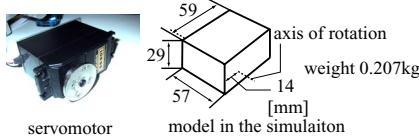


Fig.3 servomotor

にわけ、まず第1段階では2足歩行の基本的な運動を、第2段階ではロボットの詳細なモデルを獲得するものとする。

第1段階ではロボットの形態をFig.1のような単純な3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、足部は3.14kg/m、上半身部分は4.557kg/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の値を参考にして決定した。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。

第2段階では、Fig.2のような、パーツをつなぎ合わせたモデルを用いた。図中のservomotor1-6の配置位置を進化の過程で変化させるものとする。ただし、サーボの配置位置はz軸方向にのみ変化させるものとする。PINOははじめ、サーボのスペックの問題から歩行制御を行うことができず、開発の過程で、この足部分の再設計を何度もくり返した。つまり、歩行制御にはこの部分の機構が重要であるといえる。サーボモータの特性は、実際に市販されているFig.3のモータの、動特性を含む各パラメータをシステム同定した結果を力学シミュレーションで用いた。

## 2.2 コントローラ

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慮すると、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.4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

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

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

$$y(x_i) = \frac{1}{1 + e^{-\tau(x_i)}} \quad (3)$$

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、各角速度、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.4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される。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。また、Fig.4の中央のニューロンは単純に正弦波を出力するニューロンであり、出力そのものにゲインをかけたものが目標角度となる。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。また、進化的計算の2段階とも、このコントローラを用いるものとする。

## 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34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Table1のようにした。

各個体は、遺伝操作が行われたあとに、5秒間の3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。動力学シミュレーション

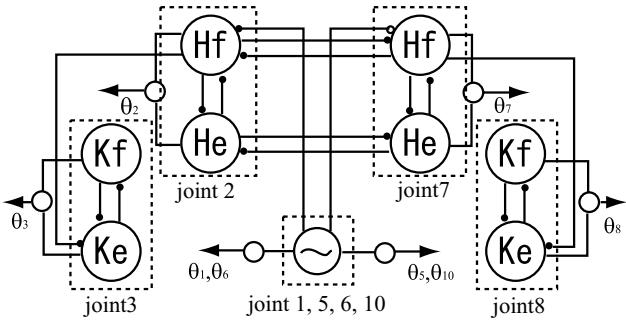


Fig.4 structure of neural oscillator

ンの際は 4 次の Runge-Kutta 法を用いて計算を行い、床のモデルバネとダンパーを組み合わせた単純なモデルとした。移動環境は、外乱のない平地とした。評価関数としては、

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

を用いた。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。

これらの条件は進化的計算の 2 段階とも同じものを用いる。

### 3. 結果と考察

#### 3.1 第 1 段階

第 1 段階の進化的計算後、Fig. 5 のような形態と歩行パターンが生成された。このロボットは 0.667m の上半身、0.1309m の上肢、0.0726m の下肢をもつ。これらのパラメータは第 2 段階の初期個体に含まれる。また、各関節の角度の変化を Fig. 6 に示す。図より、両ひざ関節の角度が変化せずに常に直線であることがわかる。つまり、このロボットは膝を伸ばしたまま、歩行を行っている。これには、3 つの原因が考えられる。1 つめは、動力学シミュレーションでの移動環境を平地のみとしたためである。不整地や、階段などの環境では、このような歩行パターンでの移動は不可能である。2 つめの原因としては、各関節の PD コントローラが考えられる。PD コントローラを用いると各関節の受動特性として、コンプライアンスが低くなるといえる。これは人間の歩行とは異なる。人間の場合には関節のコンプライアンスが高く、やわらかい関節を有效地に利用することにより、移動効率の高い受動歩行を行うことができる。最後の原因としては、評価関数があげられる。本稿では、移動距離のみを評価関数として考慮

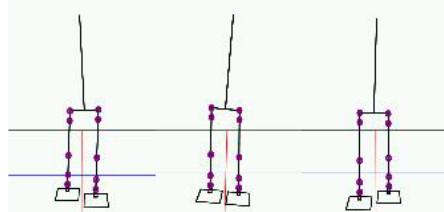
Table 1 parameters of GA

Population	200
Generation	300
Crossover rate	0.8
Mutation rate	0.05

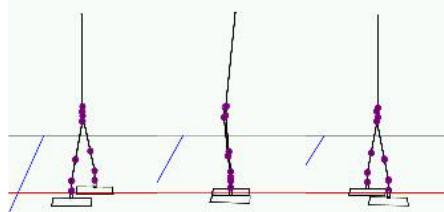
したが、移動効率や安定性などを評価関数に考慮すれば、異なる歩行パターンが生成されると考えられる。

#### 3.2 第 2 段階

第 2 段階の進化的計算後、Fig. 7 のような歩行パターンが生成された。第 1 段階の進化的計算の最適個体の歩行パターンとは異なり、支持脚が遊脚に入れ替わるとき、支持脚だった方の足の膝関節が少し曲ることがわかる。このことからも、形態が異なれば最適な歩行パターンも異なる、つまり、形態と歩行パターンを同時に考慮することが妥当であるといえる。また、この最適個体の形態を Fig. 8 に示す。これらのパラメータは実際にロボットを設計する際に有効な情報である。今回は z 軸の位置のみを設計パラメータとして与えたが、さらに x, y 軸の位置や回転も考慮すれば、さらに優秀な個体が生成されることも考えられる。さらに、実際にロボットを組み立てるサーボモータの位置の干渉も考慮する必要もある。



(a) front view



(b) side view

Fig.5 walking pattern of the best robot  
right leg

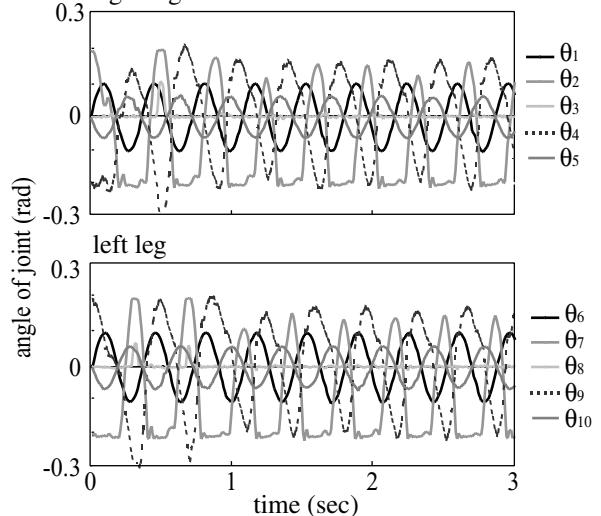
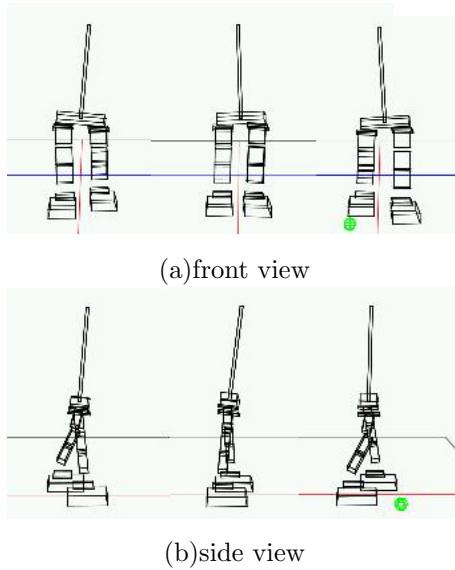
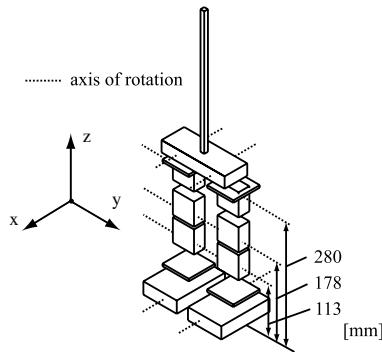


Fig.6 angle of joint during walking



**Fig.7** walking pattern of the best robot



**Fig.8** model of the best robot

#### 4. 結論

進化的計算手法を用いて、2足歩行ロボットの形態と歩行パターンを同時にかつ進化的に生成する手法を提案した。進化的計算は基本的な歩行パターンを獲得する段階と、詳細な形態モデルを獲得する2段階にわけた。その結果、市販のサーボモータの配置位置まで詳細に決定された形態モデルとそれに合った歩行パターンが生成された。また、形態と歩行パターンを同時に生成することの妥当性を確認することができた。

#### 謝辞

動力学シミュレーションは大阪大学の荻野氏の協力のもとに行われた。ここに感謝の意を述べる。

#### 参考文献

- 1) J. Yamaguchi, E. Soga, S. Inoue and A. Takanishi: Development of a Bipedal Humanoid Robot -Control Method of Whole Body Cooperative Dynamic Biped Walking, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.368-374, (1999)
- 2) Hashimoto, S., Narita, S., Kasahara, K., Shirai, K., Kobayashi, T., Takanishi, A., Sugano, S., et. al: Humanoid Robots in Waseda University – Hadaly-2 and WABIAN, Proc. The First IEEE-RAS Int. Conf. Humanoid Robots, vol. CDROM (2000)
- 3) T. Furuta, Y. Okumura, T. Tawara and H. Kitano: 'morph'A Small Size Humanoid Platform for Behavior coordination Research, Proc. IEEE-RAS International Conf. on Humanoid Robots, (2001)
- 4) M. Vukobratović, B. Borovac and D. Šurdilović: Zero-Moment Point – Propoer Interpretation and New Applications, Proc. The Second IEEE-RAS Int. Conf. Humanoid Robots, vol. CD-ROM (2001)
- 5) 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)
- 6) Karl Sims: Evolving 3D Morphology and Behavior by Competition, Artificial Life IV, pp.28-39 (1994)
- 7) G. Taga: A model of the neuro-musculo-skeletal system for human locomotion, Biol. Cybern., pp.97-111, (1995)
- 8) Ken Endo, Fuminori Yamasaki, Takashi Maeno and Hiroaki Kitano: A Method for Co-Evolving Morphology and Walking pattern of Biped Humanoid Robot, Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2775-2780 (2002)