

# 進化的計算法を用いたリンク型移動ロボットの形態と運動パターンの生成

## Generation of Morphology and Locomotion of Multi-Link-Robot using Evolutionary Computation

学 遠藤 謙 (慶大)      正 前野 隆司 (慶大)

Ken ENDO, Keio University, 3-14-1, Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama  
Takashi MAENO, Keio University

Morphology and locomotion of multi-linked locomotive robot that can adapt the changes in the environment including unknown shape of ground are designed simultaneously using Genetic Programming (GP). At first, both the morphology and neural system that define the locomotion of the robot are expressed as one simple tree expressions, and evolved simultaneously using GP. As a result, various combinations of the morphology and locomotion that can move in various ways are emerged. Especially, the morphology and locomotion of the robot that move to the longest distance are similar to the ones of higher animals. Moreover, the robots move on the inexperienced environment.

*Key Words:* Locomotive robot, adaptability, Genetic Programming

### 1. 緒論

生物は、形態・運動パターン・環境適応性を進化過程で同時に獲得している。ロボットにおいても、形態と制御系を同時に獲得させれば、より環境に適応能力の高い個体を設計できると考えられる。このため、ロボットの形態と制御系を同時に獲得させる研究が行われている[1]-[4]。しかし、実際に製作可能な要素からなるロボットの形態・運動パターン・環境適応性を同時に創発的に獲得させるには至っていない。本研究では、進化的計算法の1つである遺伝的プログラミング(GP)を用いて仮想空間内におけるロボットの移動シミュレーションを行うことにより、環境の変化に適応可能なリンク型移動ロボットの形態と運動パターンを創発的に獲得する手法を提案する。また、この手法により生成されたロボットが環境適応性に優れていることを確認する。

### 2. 手法

#### 2.1 形態

Fig. 1 に示すように、ロボットの形態には木構造に表現しやすく製作も容易な剛体リンクを用いた。各リンクの長さや接続位置、初期関節角度は進化の過程で獲得されるものとする。リンクの物性値は作成しやすいように実際に用いることのできる材料の値を参考にして決定した。また、各関節には回転角度に比例したばね力がはたらく特性があり、ばね定数も進化の過程で得られるものとする。これらのパラメータが決定するとロボットの形態も一意的に決まる。

#### 2.2 神経系

Fig. 1 に示すようにロボットの各関節に配置された神経系は木構造からなり、環境からの情報を受け取って各関節の駆動トルクを決定する働きがあるものとする。環境から得る情報量の差の環境適応性への影響を検討するために、デジタル神経モデルとアナログ神経モデルの2つを用意した。デジタル神経モデルはブール値を扱う関数を組み合わせたものとし、接地情報、角度情報、関節駆動トルクをデジタル値で表現した。アナログ神経モデルは環境からの情報をそのままアナログ値として入力し、扱う関数として三角関数など一般的なものを用いて、関節駆動トルクも連続的な値を出力する。これらの神経系は関数と引数の組み合わせなので、形態と同様に木構造で表現できる。

#### 2.3 計算手法

形態と神経系は全体として1つの木構造で表現されているので、木構造そのものを遺伝子型として扱うGPを進化的計算法として用いる。評価関数としては、単位質量当たりの移動距離(*fitness1*)と移動効率(*fitness2*)の2つを用いる。これらの評価関数により、単純な構造を持ち、効率よく移動できるロボットが生成される。移動運動の生成および評価は、動力学計算に基づく計算機シミュレーションにより行う。シミュレーションにおいて外力が作用する点はFig. 1におけるリンクの先端と各関節とする。環境の変化に対応するロボットの設計を目的としているため、移動環境は、最大高さ0.02mの山状の地形を含む平地とし、山の高さは0.0mから0.02mの間で世代ごとに変化するものとする。

また、解の多様性を保ちつつ解空間を探索するためにGP、パレート保存戦略、並列選択、シェアリング法を併用した。

### 3. 計算結果と考察

個体数を200、突然変異率を0.02とし、並列選択にはルーレット選択を用い、各神経系について1回づつ300世代まで計算を行った。また、初期個体はランダムに生成されるものとした。初期世代では全く移動しないものが多かったが、進化が進むと徐々に移動できるパターンが獲得され、最終的には山状の地形を乗り越える個体があらわれた。このことから、環境の変化に対応できる個体が獲得できたといえる。2種類の神経系の世代ごとのパレート最適解をFig. 2に示す。図より、いずれの神経系を用いた場合にも、移動効率がよく、移

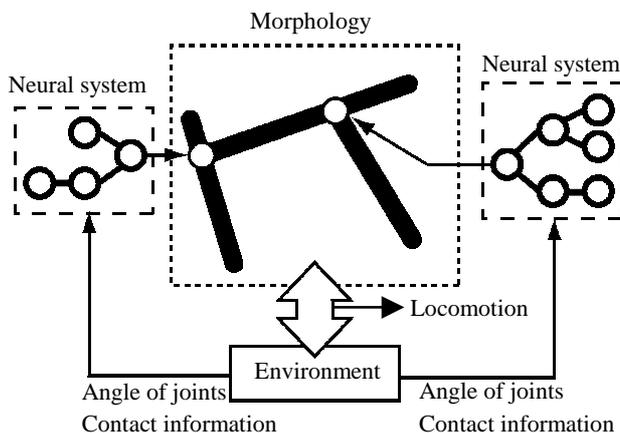
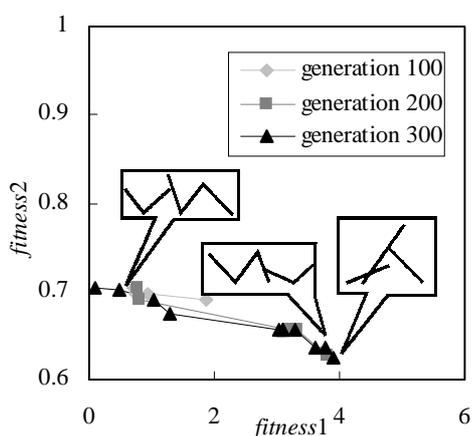
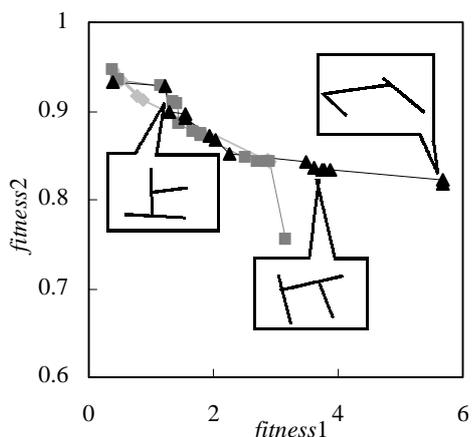


Fig. 1 Model of robots



(a) Digital neural model



(b) Analog neural model

Fig. 2 Pareto optimal solution

動速度の大きい個体が生成されていることがわかる。また、適応度の大きさよりアナログ神経モデルのほうがデジタル神経モデルよりも環境に適応していることがわかる。さらに、図中のロボットの形態をみるとさまざまなものが生成されており、アナログ神経モデルの方がより単純な構造であるにも関わらずより環境適応能力を備えている。これは、アナログ神経モデルのほうが環境から得る情報量や各関節に出力する情報量が多いためと考えられる。

選好解の高さ 0.02m の山を含む平地におけるデジタル神経モデルおよびアナログ神経モデルの移動の様子および各関節角度と時間の関係を Fig. 3 および Fig. 4 に示す。ただし、パレート最適解の中から選好解を選出した基準は  $fitness1$  (単位質量あたりの移動距離) とした。これらを見ると、いずれの神経モデルの選好解も特徴的な形態と運動パターンを獲得している。また、いずれも、山状の地形の上を移動するには、運動パターンを変化させることによって環境変化に適応していることがわかる。さらに、これらの個体は、進化の過程にはない山状の地形が複数並んだような環境にも運動パターンを変化させて適応することができた。なお、デジタル神経モデルをもつロボットは一般に「這う」ような運動パターンを呈するのに対し、アナログ神経モデルは高等生物の「歩行」のような形態と運動パターンを呈した。

また、アナログ神経モデルの選好解は銅谷[5]および川内野[6]のロボットの形態および運動パターンと似ている。これより、本選好解の妥当性を確認できたのみならず、銅谷、川内野のロボットの形態はリンク型ロボットとしては適切な形

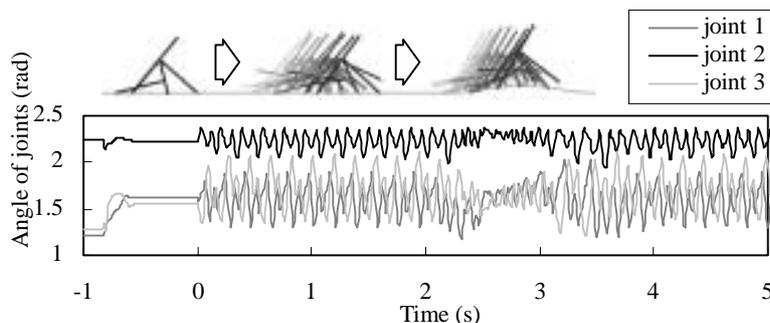


Fig. 3 Preferred solution of digital neural model

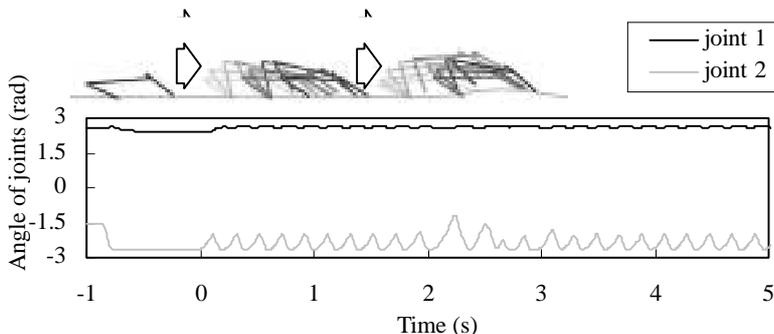


Fig. 4 Preferred solution of analog neural model

態であることがわかった。

今後は、モータの特性の考慮、3次元化等を行い、ロボットらしい実ロボットの適切な形態と運動パターンを探索する予定である。

#### 4. 結論

リンク型ロボットの形態と運動パターンを同時に設計するシステムを構築した。形態と神経系は木構造で表現し、進化的計算法には GP を用いた。つぎに、生成されたロボットがさまざまな形態や運動パターンで移動できることを確認した。また、進化の過程において世代ごとに異なる環境を移動させることにより、環境の変化に対応できるような形態と運動パターンの組み合わせが獲得できた。さらに、得られた個体は進化の過程で与えられなかったような未知の環境においても移動することができた。

#### 参考文献

- [1] Karl Sims, "Evolving Virtual Creatures," "Computer Graphics Proceedings," pp. 12-22, 1994.
- [2] J.Ventrella, "Exploration in The Emergence of Morphology and Locomotion Behavior in Animated Characters," "Artificial Life IV," pp. 436-441, 1994.
- [3] H.Lipson and J.B.Plollack, "Automatic design and manufacture of robotic lifeforms", "Nature," Vol.406, No.6799, pp. 974-978, 2000.
- [4] 北村新三, 角田謙, 村尾元, 後藤淳, 小藪正哉, "逆問題としての設計論と創発的計算法の適用", "計測自動制御学会論文集," Vol. 36, No. 1, pp. 90-97, 2000.
- [5] 銅谷賢治, 中野馨, "運動パターンの自己組織化", 第 16 回 SICE 学術講演会予講集, pp. 961-964, 1987.
- [6] 川内野明洋, 前野隆司, "進化的計算法を用いた直鎖リンク型移動ロボットの運動パターン生成", ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2P2-31-035, 2000.