

## 柔軟脊椎構造を持つ四脚ロボットのGAによる動作生成

東京大学機械情報工学科

水内 郁夫 松木 健 稲葉 雅幸 井上 博允

## GA-based motion generation for quadruped robot which has soft spine structure.

University of Tokyo

\*Ikko MIZUUCHI Takeshi MATSUKI

Masayuki INABA Hirochika INOUE

**Abstract :** By embedding soft spine structure into the robot body, robot can increase its ability to absorb shock and to work in various environment such as irregular ground. On the other hand, however, a robot with soft structure has the problem of behavior estimation and motion generation. We propose solving behavior estimation problem by using finite element method software and mechanical analysis software, and motion generation by using genetic algorithm. This paper describes the integration of these software and its application to the robot motion generation.

**Keywords :** Mechanical Flexibility, Spine Structure, Quadruped Robot, Genetic Algorithm, Finite Element Method

## 1 はじめに

脚型ロボットは多様な移動環境に対する適応能力が高いが、安全性・歩行速度・より複雑な環境に対する適応性を向上することを目指して、脚型ロボットに柔軟構造の脊椎を組み込むことに取り組んできた<sup>1, 2)</sup>。

試行錯誤やシミュレーションを利用して脊椎機構を設計し柔軟なハードウェアを作り、着地(シミュレーション)や不整地歩行(実機)などにおいて脊椎機構の有効性も確認されたが<sup>2)</sup>、動作生成は人間が実機で試行錯誤を繰り返すことにより行った。しかしこうした手法では、より複雑な動作や最適化された動作、または弾性エネルギーの蓄積を利用した動作等の生成は困難である。

そこで、有限要素法と動力学解析のソフトを統合し、全体の挙動をシミュレートできる環境を構築した。さらに、この環境を利用してGAによる動作生成を行い、実機に適用した。本稿では、こうした手法を説明し、その特徴を指摘する。

## 2 柔軟な脊椎機構を組み込んだロボット

脊椎機構には機構的な柔軟性、姿勢の多様性という二種類の特徴があるが、この二つの特徴を持つ脊椎機構を四脚ロボットの胴体部に組み込むことにより、以下のような利点が考えられる。

安全性 転倒時・衝突時の衝撃吸収。

環境適応能力 胴体部の姿勢を受動的に変化させることによる環境への適応性の向上。多様な体勢を能動的に利用した狭所での作業・移動や障害物回避。不整地において脚を接地する高さが未知の場合に、柔軟性により地面の形状になじむ。

動作能力の改善 脚部と胴体部を同時に動作させることによる出力する力・速度の改善<sup>3, 4)</sup>。弾性要素を利用したエネルギーの蓄積の利用。

上述のような利点を生かした動作の実現は、柔軟な脊椎構造を持つロボットにおける課題の一つである。

## 3 動作生成のためのソフトウェア環境

筆者らが製作した柔軟な脊椎機構を組み込んだ四脚ロボット<sup>2)</sup>は、Fig.1に示すようにモデル化が難しく実機を忠実に再現するのは非常に困難だが、そもそも動作やタイミングをどうすべきかが直感的にはわかりにくい口

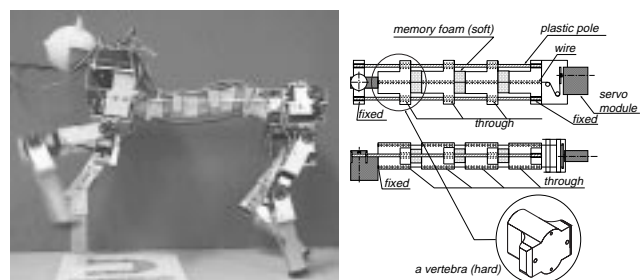


Fig. 1: 脊椎構造を持つ四脚ロボットとその脊椎機構

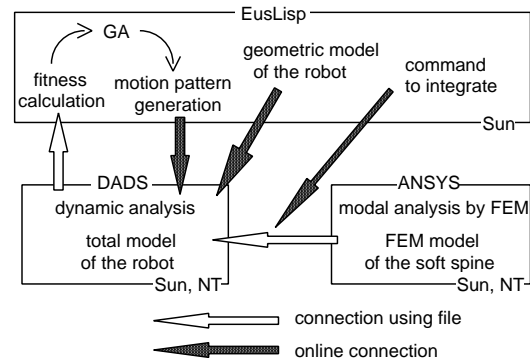


Fig. 2: ソフトウェア構成

ロボットなので、シミュレーションと探索手法を組み合わせることにより、少なくとも実機で可能な動作に近い動作を生成できることだけでも有効である。そこから、実機でモデル化誤差を修正するというアプローチが有効であると考えられる。

Fig.1右に示す非線形な柔軟構造の脊椎機構の部分の挙動は有限要素法ソフトANSYSを用いて解析し、その結果を動力学解析ソフトDADSに取り込むことにより、全体の挙動をシミュレートできる環境を構築した。さらに、この環境を統合的に扱うソフトウェア環境をEusLisp<sup>5)</sup>を利用して構築し、これを利用してGAによる動作生成を行った。ソフトウェア構成をFig.2に示す。

各ソフトウェアはソケット通信またはファイルを介して接続され、EusLisp上からコントロールする。EusLisp上のGAサーバが、Solaris及びWindowsNT上で走るDADSのソルバを多数のクライアントとして生成し、並列に解析を行う。

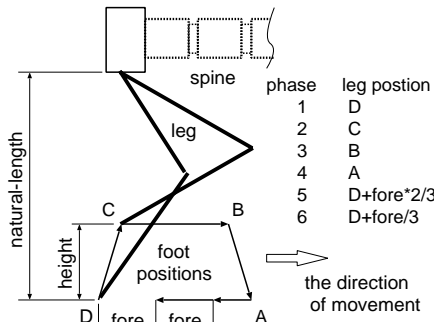


Fig. 3: 歩行動作パターンの生成パラメータ

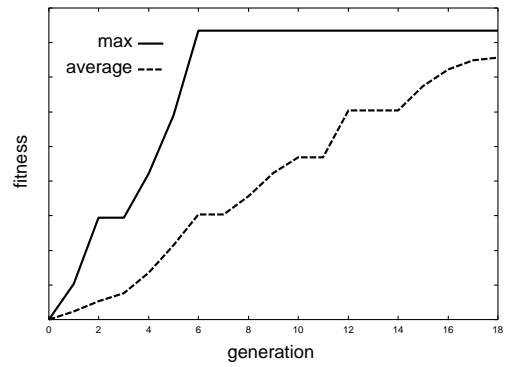


Fig. 4: GA における世代数と fitness の関係

## 4 GA による動作生成

### 4.1 遺伝子パラメータから歩行パターンへの変換

遺伝子パラメータから動作を生成する方法を説明する。Fig.3は、各脚先位置を横から見た簡略図である。脚先位置の経路を DCBA の台形形状とし、以下のようにパラメータを設定した。

1. 全脚共通パラメータ
  - cycle 1 サイクルの時間
  - fore 1 サイクルで進む距離
  - natural-length 脚が接地しているときの脚先と脚根本の鉛直方向の距離
  - height 脚を前方に運ぶ際、脚を上方に引き上げる距離
  - duty duty 比 (脚が接地している割合)
2. 各脚毎のパラメータ
  - start-time 1 サイクルの中で何秒後に前方に脚を運ぶ動作を行うか
  - leg-center 脚先の前後方向の中心位置

これらのうち、cycle (2.0 ~ 4.0[sec]), fore (40.0 ~ 80.0[mm]), natural-length (208.0 ~ 228.0[mm]), height (5.0 ~ 25.0[mm]), leg-center (前脚, 後脚. それぞれ -30.0 ~ 30.0[mm]) を GA の遺伝子に対応させ、これらのパラメータからロボット歩行動作パターンを生成した。duty は 0.5 に、start-time は 0.0, 1.5[sec] に固定した。

### 4.2 適応度の設定

適応度は、解析結果から計算される 前進量、ボディのねじれの平均、遊脚の高さの重み付きの和を用いた。

### 4.3 解析結果

上に述べた条件で、遺伝子長 6、個体数 20、交差率 0.2、突然変異率 0.02、淘汰率 0.4 で GA を行った。解析結果を Fig.4 に示す。

## 5 実機でのロボット歩行実験

### 5.1 実験

Fig.5 に、シミュレータ上での動作と実機の動作の様子を示す。実機では、シミュレータ上の動作と若干異り、脚を引きずりがちであり、また歩行の方向もシミュレータと完全に一致はしなかったが、歩行に成功した。

### 5.2 考察

シミュレータを利用する場合、モデル化誤差を完全に無くすことは困難である。例えば今回のシミュレーションでは、床面と脚先の接触は DADS の接触モデルを利用しそのパラメータは試行錯誤で決めたが、実機の接

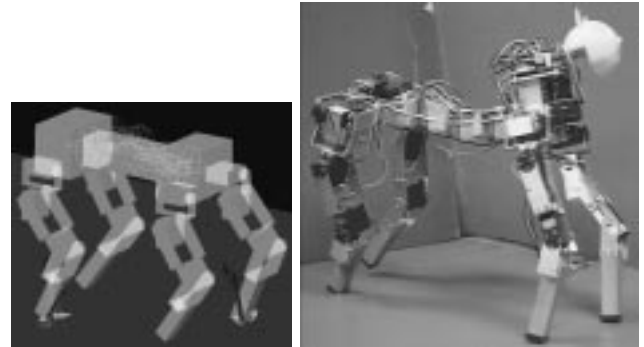


Fig. 5: シミュレーションと実機の実験

触を忠実にモデル化しているとは言いきれない。シミュレータと GA 等の探索手法を利用して動作の生成を行うのは、本ロボットのように動作パターンの生成に解析的手法や試行錯誤を用いるのが困難な問題に対し有効である。目的の動作が可能な解にある程度近い動作パターンが生成された後は、実機を用いた適応的調整機能とセンサフィードバックを用いるべきであると考えられる。

## 6 おわりに

柔軟構造の脊椎を組み込んだ四脚ロボットの動作生成が課題であることを指摘し、その解決へのアプローチとして、シミュレーションと GA による動作の生成と実機を用いた調整を行うこという手法を用いて、実際に柔軟構造を持つ四脚ロボットの動作生成を行った。

今後の課題としては、シミュレーション上のモデルパラメータの同定方法、センサフィードバックの利用、さらにロボットのボディの面で、可変柔軟性の導入、脊椎変形自由度の追加等が挙げられる。

なお、本研究は日本学術振興会 未来開拓推進事業「マイクロ・ソフトメカニクス統合体による高度生体機能機械の研究 (研究プロジェクト番号 JSPS-RFTF 96P00801)」の助成を受けて行なわれている。

## 参考文献

- 1) 松木, 水内, 加賀美, 稲葉, 井上. “脊椎構造を持つ四脚ロボットとそのシミュレーション環境”. 第 16 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 第 1 巻, pp. 85-86, 1998.
- 2) 松木, 水内, 加賀美, 稲葉, 井上. “柔軟な脊椎機構を持つ四脚歩行ロボットの動作生成と行動制御”. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'99 講演論文集, pp. 1P2-42-063, 1999.
- 3) 岩本, 植田, 石原, 戸高. “胴体可変機構を有する 4 脚歩行ロボット”. 日本ロボット学会第 5 会学術講演会予稿集, pp. 359-360, 1987.
- 4) K.F.Leeser. “Locomotion Experiments on a Planar Quadruped Robot with Articulated Spine”. Master's thesis, MIT, Department of Mechanical Engineering, Feb 1996.
- 5) T. Matsui and M. Inaba. “EusLisp: an Object-Based Implementation of Lisp”. *Journal of Information Processing*, Vol. 13, No. 3, pp. 327-338, 1990.