

# 動歩行に基づいた対話型進化計算による ヒューマノイドロボットの動作設計

Design of Dynamic Motion for Humanoid Robots using Interactive Evolutionary Computation

柳瀬 利彦<sup>\*1</sup>      伊庭 斉志<sup>\*1</sup>  
Toshihiko Yanase      Hitoshi Iba

<sup>\*1</sup>東京大学新領域創成科学研究科基盤情報学専攻  
Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo

We propose a new approach to generating the motion of humanoid robots intuitively by means of Interactive Evolutionary Computation (IEC). Motion design for humanoid robot requires technical knowledge about robotics and each particular humanoid robot. This is partly because a humanoid robot has a complex shape, and many actuators, and partly because designers must consider many constraints to make stable motions, such as Zero-Moment Point and Center of Mass. We used IEC to solve this problem. In our system, novice users are able to design effective motions through the subjective evaluation of displayed individuals, even if they do not have any technical knowledge. The system has a walking pattern generator to display stable individuals. We empirically show the effectiveness of our approach by experiments with a dynamic simulator.

## 1. はじめに

ヒューマノイドロボットは一般に複雑な形状をしており、高い自由度を持っている。その行動をコントロールするプログラムの作成は、研究者ごとに独自に行われている場合がほとんどであるが、その複雑さ、自由度の多さにより非常に手間がかかる。動作設計は専門的な知識を持っていても困難なであるが、ロボット工学の専門家以外の人々が動作生成を行う機会が徐々に出てきている。たとえば、デモンストレーション用途に3DCG分野の人がヒューマノイドロボットの振り付けを行うという事例が出てきている。安価なヒューマノイドロボットの登場と相まって、今後はよりいっそうロボットの専門家以外の人々がヒューマノイドロボットの動作生成を行う機会が増えるのではないかと考えられる。今後、ヒューマノイドロボットが広く普及していくためには、直感的な動作生成法の確立が必要不可欠である。3DCGのヒューマノイドフィギュアでは、対話型進化計算 [1] による直感的な動作設計法が若木らによって提案されている [2]。一方、ヒューマノイドロボットの分野では Nakaoka らによってモーションキャプチャを利用することで人の動きを取り込むなどの研究 [3] が行われている。この研究はキャプチャデータをヒューマノイドロボットで実現可能な動作に変換することに主眼が置かれており、動作設計にはキャプチャ装置と動作を実現可能な人間が必要になり、大掛かりなものになってしまう。本研究では、対話型進化計算を用いた直感的なインターフェースを持つ動作設計システムを提案する。システムの概要を図 1 に示す。

本手法ではヒューマノイドロボットの特徴である、

1. 多くの関節を持つため動作の自由度が大きい
2. 非常に転倒しやすい

という二点に特に注目したヒューマノイドロボットの動作設計の手法を提案し、その有効性を動力学シミュレータを用いて確認する。

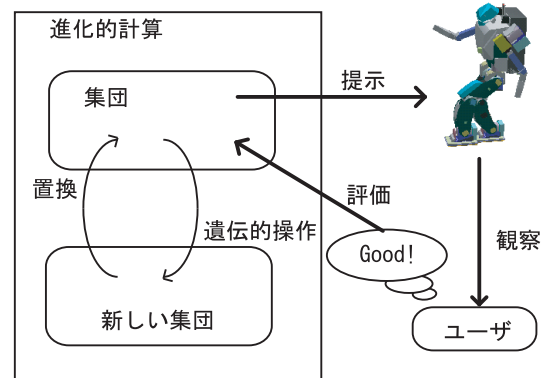


図 1: IEC を用いたシステムの概要

1 点目の動作の自由度の大きさは、ヒューマノイドロボットが多くのアクチュエータを持つことによって生じる。ヒューマノイドロボットを動かすためには、それぞれの関節について短いステップ時間ごとに値を指定している。単純に、各ステップ時間ごとに逐一指定することも考えられるが、本研究では 3DCG の一般的な動作生成法であるキーフレームアニメーションの方法を用いることを提案する。また、これと対話型進化計算を組み合わせることで直感的な操作法を実現する。

2 点目の非常に転倒しやすいという特徴に対処するために、目標 ZMP 追従軌道法 [4] と呼ばれる、ヒューマノイドロボットの二足歩行アルゴリズムを用いた。これによって、転倒する動作を生成する可能性を小さくすることができた。一方、この手法は目標とする着地位置に対して、重心位置は一意に決まってしまうため、キーフレームにおけるポーズの指定に制限を与える。従来は歩行生成アルゴリズムという転倒しないことを第一目標とし、動作の自由度を犠牲にしてきた。本手法では、動作の自由度の高さと動作の安定性の両立を目標としている。

連絡先: 柳瀬利彦, 東京大学, 〒 277-0882 千葉県柏市柏の葉 5-1-5 基盤棟 704, TEL:04-7136-3873, FAX:04-7136-3873, yanase@iba.k.u-tokyo.ac.jp

## 2. 提案システム

動作設計はキーフレームアニメーションの手法を用いる。キーフレームアニメーションでは、設計する動作の特徴となるポーズを決定し、ポーズを補間していくことで動作の生成を行う。提案手法では

- 歩行軌道作成画面を用いてキーフレームを作成
- 作成したキーフレームに対して IEC ポーズ設計画面を用いて振り付け
- 目標 ZMP 軌道追従法を用いて補間

という手順を繰り返し、動作設計を行う。ただし、2 番目の振り付けについては過去に作成されたポーズをそのまま用いることもできる。

### 2.1 ポーズのパラメータ

表 1 にキーフレームにおけるロボットの位置とポーズを指定するためのパラメータを示す。

表 1: ポーズのパラメータ

	Element name	DOF
(a)	Type of pose	1
(b)	Landing position and direction of support leg	3
(c)	Swing leg ankle-link position	3
(d)	Swing leg ankle-link attitude	3
(e)	Arm joint angle	8
(f)	CoM height	1
(g)	Waist-link attitude	3

Type of pose には右足立ち、左足立ち、両足立ちの 3 種類がある。片足立ちの場合に有効になるパラメータを図 2 に、両足立ちの場合に有効になるパラメータを図 3 に示す。どちらの場合でも着地位置、腰リンクの姿勢と腕関節角度のパラメータは有効である。CoM の高さについては、CoM が水平移動しない場合に限り、有効にした。CoM が水平に移動しない場合とは、目標 ZMP 軌道が変化しない場合であり、同じ種類のポーズが続く場合である。

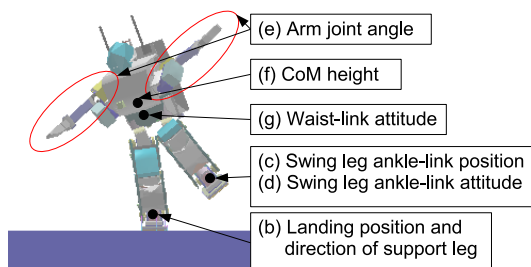


図 2: 片足立ちの際有効になるパラメータ

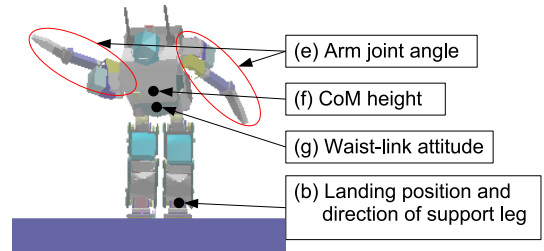


図 3: 両足立ちの際有効になるパラメータ

### 2.2 ポーズ間の補間

次に、ポーズ間の足先座標と姿勢、腰リンクの姿勢、腕関節角度を補間して目標 ZMP 軌道を求める。補間の種類には 2 つの場合わけが必要である。ひとつは、CoM の軌道が水平移動のみの場合、もうひとつは重心の軌道が垂直移動のみの場合である。

水平方向のみとなる場合は、ZMP の移動がある時である。これは、隣接するポーズの種類が異なる時に相当する。たとえば、両足立ちから右足立ちに移るときは、ZMP を初期位置から右足へ移さなければならない。その際、CoM の垂直方向の移動がないと仮定して、目標 ZMP 軌道追従法によって補間を行う。

一方、垂直方向のみの移動の場合は ZMP の移動がないときである。これは、隣接するポーズの種類が同じ時に相当する。その際の基準としては、CoM の運動量と角運動量が近似的に 0 とみなせるような静的に安定な動作の規範である。

補間はキーフレームごとに以下の手順で行われる。

1. ポーズのパラメータ (e) により腕関節角度を求め、補間する
2. ポーズのパラメータ (b) より着地位置を求める
3. 着地位置を実現するように左右の足先位置と姿勢を補間する
4. 現在の支持脚を基準として腰リンクの姿勢を計算する
5. 着地位置から目標 ZMP 軌道を計算する
6. 目標 ZMP 軌道から CoM の初期軌道を計算する

1 に関して腕ジョイントの関節角度は目標 ZMP 軌道には寄与しないので単純に関節角度を 3 次の自然スプライン法により補間するだけである。

ここで、CoM だけは初期軌道としてあるのは、転倒可能性に重要な影響を与える CoM の水平位置は次章で述べる ZMP を規範とする動作生成法によって求める。目標 ZMP 軌道を満たすような重心軌道を求めるために、本手法では Nakaoka らによる動作生成法 [3] と同じように Nishiwaki らによって提案された目標 ZMP 追従軌道生成法 [4] を用いた。

### 2.3 進化計算の実装

キーフレームにおけるポーズは、表 1 のような複数の実数配列であらわされる。本手法では、実数値 GA を採用し、この実数値を直接 GA の個体として用いた。用いた表 2 に GA のパラメータを示す。

表 2: 実数値 GA のパラメータ

パラメータ名	値
個体数	20
交差率	0.8
突然変異率	1 / 18

遺伝子型としては表 3 に示すポーズのパラメータを用いた。この表に載っていない着地位置とその向き、そして時間は別途設定用インタフェースを作成した。

表 3: 遺伝子型

	Element name	DOF
(c)	Swing leg ankle-link position	3
(d)	Swing leg ankle-link attitude	3
(e)	Arm joint angle	8
(f)	CoM height	1
(g)	Waist-link attitude	3

表現型とはこの場合、ユーザに提示するポーズのことである。ポーズを作成するため、実際に遊脚と支持脚の位置と姿勢を求め、逆運動学計算を行なった。この際、問題となるのは目標 ZMP 追従軌道法によってしかもたらさない CoM である。本手法では、CoM は ZMP に対して先行するように移動する性質に注目し、目標 ZMP 位置を CoM の水平位置として計算を行った。

図 4 に評価のためのインタフェースを示す。このようなインタフェースによって表現型がユーザに提示され、ユーザはスライダーを用いて評価値の入力を行う。

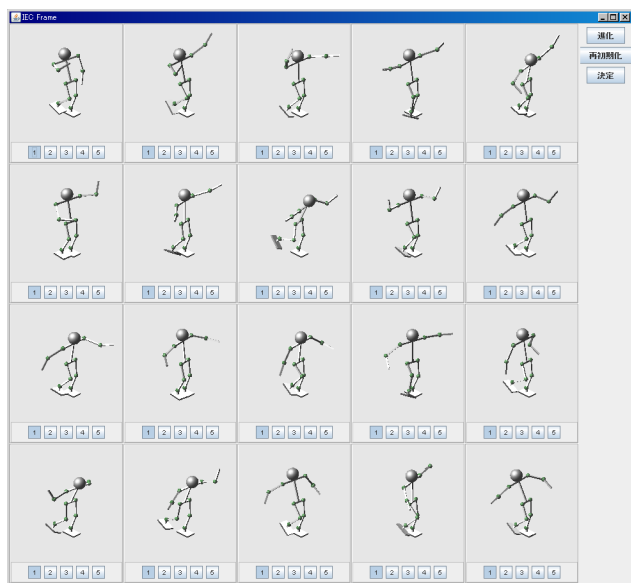


図 4: IEC を用いたポーズ設計画面

### 3. 提案システムの評価

実験には富士通オートメーション製のヒューマノイドロボット HOAP-1[5] と動力学シミュレータ OpenHPR2[6] を用いた。

#### 3.1 表現可能な動作の範囲

提案手法の遺伝子型について調べるために、右足立ちのポーズを 1000 個ランダムに生成し、遊脚の分布について調べた。図 5 は左足立ちのときの遊脚足首位置の分布状況である。ここで、x 軸はロボットに対して前後方向の軸である。ロボットの前側が正の向きである。y 軸はロボットの左右方向の軸であり、左側が正の向きである。z 軸はロボットの上下方向の軸であり、上側が正の向きである。左上が x-z 平面、左下が x-y 平面、右上が y-z 平面を表す。x-z 座標平面でのプロットで 0.05[m] までの間は空白領域となっているが、これは足裏が地面と干渉しないようにするために、この領域の個体は全て 0.05[m] として変換を行っている。また、足首姿勢を変化させたときに地面との干渉を避けるために、0.08[m] までの個体は全て足裏が床面と水平になっている。

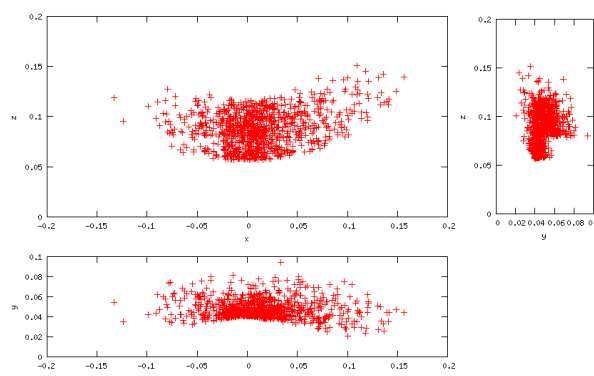


図 5: 遊脚足首位置の分布

図 6 に x 座標が最大値をとる動作を示す。図 6 については、上体を後ろ方向に倒れているのが確認できる。

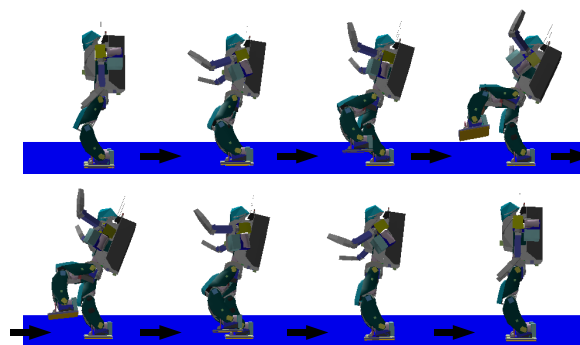


図 6: x 座標が最大値をとるポーズ

#### 3.2 動作設計例

対話型システムの動作設計例の検証として歩行動作の設計を行った。図 7 に歩行動作の設計例を示す。最上段一番右の姿勢が作成したポーズである。上半身を後ろに傾け、遊脚は足

裏を外側に向けている．図 7 の動作を生成した際の計算 ZMP

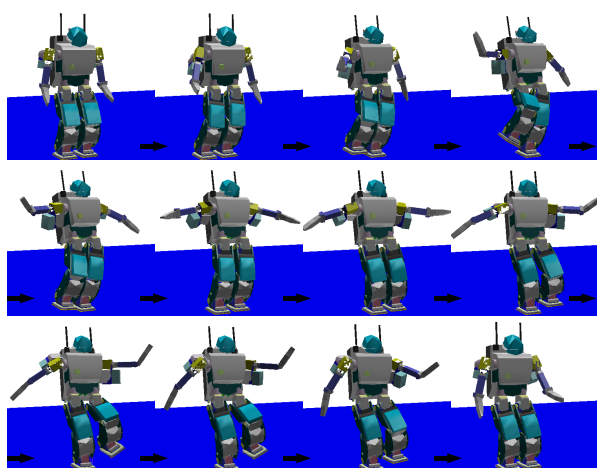


図 7: 動作設計例：歩行

の誤差は  $x$  軸 0.1509mm,  $y$  軸 7.357mm となっている． $x$  軸,  $y$  軸ともに基準の 40[mm] 以内を満たしている．

### 3.3 考察

表現可能範囲について図 5 において  $x, y, z$  各座標の最大値, 最小値を取る個体について考察する．

$y$  軸方向はあまり (0.04, 0.08) とあまり広くない．これは, 股関節と足首関節の横方向の可動範囲が前後方向に比べて小さいことによる．足を体の外側に出すことによって重心位置が体の左に偏り, より大きく足首関節を曲げる必要がある．このような場合に, 関節可動範囲の制限によって, 実現が不可能になる．これは, ヒューマノイドロボットそれぞれの特徴を知らなければできないことであり, 提案システムがユーザの知識を軽減しているひとつの要素となっている．

図 6 に見られるように, それぞれの値を実現するためには腰リンクの姿勢が密接に関係している．図 6 では上体を後ろに倒すことで足の前方向への可動範囲を伸ばしている．このような個体を手作業で生成するためには足位置と同時に腰の姿勢についても同時に探索を行わなければならない, 多くの試行錯誤が必要である．

次に設計例の考察を行う．設計された動作に関しては目標 ZMP と生成された運動の ZMP の誤差を見ることで安定性について評価することができる．この誤差は目標 ZMP 追従軌道法で用いたロボットの単質点による近似と, 多リンクモデルによる近似の誤差によって生じる．上半身の傾きの変化が大きいものほど, 計算 ZMP 誤差も大きくなっている．これは, 大きな質量を持つ上半身を動かすことで CoM から腰リンクを計算する際の誤差が大きくなることが考えられる．従来の歩行動作生成では ZMP の誤差を小さくすることによって安定な歩行動作を実現することを目指していた．一方で, 今後ヒューマノイドロボットがデモンストレーションなどに用いられる機会が増えることで, 安定性をある程度犠牲にしても観客の目を引くような動作を求められるような場合も考えられる．そのような場合に, 本手法を用いて設計した動作とその結果生じる計算 ZMP の誤差を使うことで安定性と動作のおもしろさのバランスの取れた動作を生成することができるのではないかと考えられる．

また, 問題点としてはキーフレーム間の補間部分での床面との干渉が生じる場合があったことである．これはプレビュー

を見ながら排除する必要があった．キーフレームで干渉しないような動作のパラメータ化だけでは不十分であり, 今後はキーフレーム間の補間中についても考慮する必要がある．

## 4. おわりに

本論文ではヒューマノイドロボットの動作生成に対話型進化計算を用いた, 直感的な動作設計法を提案した．ヒューマノイドロボットは複雑な形状を持った, 多自由度のロボットであるため, 動作生成には専門的な知識と試行錯誤が必要であった．

これに対し, 提案手法は多自由度ゆえの広い手先, 足先の可動範囲を探索することを可能とし, ポーズ補間に ZMP を規範とした歩行生成アルゴリズムを用いることで, 安定な動作の生成とその実現の可否の判定を実現した．また対話型進化計算により現在の動作のバリエーションをシステムから提案することで, 試行錯誤の補助を行った．

一方で, 本研究では無視してきた他の物体との干渉について, ポーズ補間時に問題を起こす場面が見られた．また, 対話型進化計算においては表示できる個体数に制限があるため, 早期の収束, 初期個体として表示される候補の偏りなどの問題が見られた．

今後は, ロボットと他の物体の干渉を考慮し実機への適応を行うこと, パラメータ間の依存関係に注目し探索の効率化を行うことを目標に研究を進めたい．

## 参考文献

- [1] H. Takagi. Interactive evolutionary computation - cooperation of computational intelligence and human kansei. Proceeding of 5th International Conference on Soft Computing and Information/Intelligent Systems, pages 41–50, Oct 1998.
- [2] H. Wakaki and H. Iba. Motion design of a 3d-cg avatar using interactive evolutionary computation. In 2002 IEEE international Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC'02). IEEE Press, 2002.
- [3] ”中岡慎一郎, 中澤篤志, 金広文男, 金子健二, 森澤光晴, 比留川博久, 池内克史”. ”脚タスクモデルを用いた 2 足歩行ヒューマノイドロボットによる人の舞踏動作の再現”. 日本ロボット学会誌, 第 24 巻, 第 3 号, pp. 388-399, 2006.
- [4] ”Koichi Nishiwaki and Satoshi Kagami and Yasuo Kuniyoshi and Masayuki Inaba and Hirochika Inoue”, ”Online Generation of Humanoid Walking Motion based on a Fast Generation Method of Motion Pattern that Follows Desired ZMP”, Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems, EPFL, Lausanne, Switzerland, pp.2684–2689, 2002
- [5] ”木村公一, 村瀬有一”, 「hoap」シリーズの事業化, 日本ロボット学会誌, 第 22 巻, 第 1 号, pp.10-12, 2004.
- [6] 金広文男, 藤原清司, 梶田秀司, 横井一仁, 金子健二, 比留川博久, 中村仁彦, 山根克, ヒューマノイドロボットソフトウェアプラットフォーム OpenHRP, 日本ロボット学会誌, vol.21, NO.7, pp.785-793, 2003