

# ヒューマノイドロボットのための遺伝的アルゴリズムを用いた歩行プロファイルの改善

## Improvement of Walking-Profile by Using GA for Humanoid

○和田 亮雅 (岡山大) 正 戸田 雄一郎 (岡山大)  
正 見浪 護 (岡山大)

Akimasa WADA, Okayama University, p3zs7vzv@s.okayama-u.ac.jp  
Yuichiro TODA, Okayama University  
Mamoru MINAMI, Okayama University

There were various studies of Humanoid's bipedal walking. However, most of the researches uses a simplified model. In this research, we study humanoid in hopes of realizing robot walking like a human and consider a gait model of humanoid robot including slipping, bumping, surface-contacting and point-contacting of foot is discussed. First, to stabilize attitude and prevent humanoid from falling down, we proposed Visual-lifting Approach. This method use it's eyes. Humanoid judged surrounding condition and keep it's head position high. Next, we need input torque to step forward by feed-forward control but it determined by try and error. This might be waste of energy. So, to solve this problem, I use genetic algorithm(GA). In the report, I explored the best input by GA method and investigated the result.

**Key Words:** Humanoid Robot, Genetic Algorithm, Create Walking

### 1 緒言

人類は長年に渡る進化の過程の中で、安定な直立二足歩行のメカニズムを獲得してきた。その一方でヒューマノイドや二足歩行ロボットを制御し、人間と同等の安定かつ効率的な歩行を実現することは困難である。これは、ヒューマノイドが強い非線形性や多数の干渉及び自由度を含むダイナミクスを有していることを考慮しなければならず、それ故に従来の線形制御理論を利用した制御器の設計は適用できない場合が多いためである。このような現状に対応する手法として、Zero-Moment Point (ZMP) 制御は最も有力で現実的な手法であることが知られている [3],[4]。ZMP 制御は本田技術研究所の ASIMO を始めとして、多くの実機によるヒューマノイドが ZMP に基づいて現実世界における二足歩行を達成している。ZMP 規範の制御以外にも、リミットサイクルに収束する歩行軌道や関節角度軌道を生成し、これらを参照して二足歩行を生成する手法も存在する。これに対し、我々の研究では、ZMP に依存しない人間らしい自然な二足歩行の実現を目指している。この実現には ZMP 以外の制御方法が必要となる。そこで我々は、“Visual-Lifting Approach” と名付けた姿勢安定化を行うための戦略をビジュアルサーボとインピーダンス制御の概念に基づいて提案した。この戦略はヒューマノイドが目標物体を実時間で認識することによって取得可能な物体に対する自身の位置/姿勢の偏差をフィードバックすることにより、直立及び歩行状態における姿勢安定化を可能とする。しかし、一方で“Visual-Lifting Approach” の入力だけでは足を踏み出すための入力トルクを決定できないという問題点があり、現状では補助入力を試行錯誤で決定し、歩行するか否かの検証を行ってきた。このようなアプローチでは、多数の冗長な補助入力が入っており、現状の入力ではエネルギーを浪費しているという問題点があった。そこでこの問題を解決する手段として本研究では、遺伝的アルゴリズムを用いて最適な入力トルクを探索する手法を提案する。また、本研究では、歩行における評価関数として、普段の日常生活において人間が無意識に歩行しているということをヒントに、最適な入力トルクとは最低限の入力エネルギーで最大距離の歩行をすることと考え、距離の最大化とエネルギーの最小化を同時に満たすような評価関数の設計を行う。

### 2 ヒューマノイドモデル

動力学モデルを導出する対象のヒューマノイドモデルの基準座標系  $\sum_W$ , 各関節角度  $q_i$  [rad] の定義を Fig.1(a) に各リンク座標系  $\sum_i$ , 各リンク長さ  $l_i$  [m] の定義を Fig.1(b) に示す。Table 1 には各リンクの長さ、質量を示しており、全長 1.7m, 全質量 63.8[kg] のヒューマノイドモデルを作成した。モデルは 17 本の剛体リンクと質量や長さを持たない 17 個の回転関節、1 個の直動関節で構成されている。直動関節は主脚の  $\sum_W$  の  $y$  軸方向の滑りを表現している。したがって主脚が滑る場合は、つま先を含む脚、胴体、腕などの全身モデルを 18 自由度を持つ。Fig. 1(a) に示すように脚は、 $\sum_W$  の  $y$  軸方向の並進と  $x$  軸回りの回転の自由度を持つが、Fig. 1(b) に示す脚の  $\sum_W$  の  $y$  軸回りの回転の自由度は与えていない。したがって下半身は矢状面内の運動しか行わないが、上半身は joint-8,9,10 により 3 次元空間内の運動が可能である。以降では、link-1, ..., 3 によって構成される脚を「支持脚」、link-5, ..., 7 によって構成される脚を状態に応じて「遊脚」と呼ぶ。link-1 につけられている直動関節は接地面との滑りを表現する関節である。ただし  $\sum_0$  は Fig. 1(a) の右下に示すように主脚つま先に固定されて  $\sum_0$  の  $y$  軸が  $\sum_W$  の  $y$  軸と一致している座標である。Fig. 1 中の  $\sum_0$  の運動は足の滑りを、 $\sum_1$  の運動は link-1 の回転を表している。

運動方程式を Newton-Euler 法を用いて導出を行う。まず、Newton-Euler 法の順動力学計算として根元リンクから各リンクの先端に向かって link- $i$  の関節角速度  ${}^i\omega_i$ , 関節角加速度  ${}^i\dot{\omega}_i$ , リンク座標系の原点における並進加速度  ${}^i\dot{p}_i$ , リンクの質量中心における並進加速度  ${}^i\dot{s}_i$  を以下の式から導出する。

導出結果は以下ようになる。

$$M(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) + g(q) + D\dot{q} = \tau \quad (1)$$

ここで、 $M(q)$  は慣性行列、 $h(q, \dot{q})$ ,  $g(q)$  はそれぞれ遠心力/コリオリ力の項及び重力項を表すベクトル、 $D$  は関節の摩擦係数を表す対角行列、 $\tau = [f_0, \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{17}]$  (ただし足の滑りは受動的であるため  $f_0 = 0$ ) は入力トルクベクトル、 $q = [y_0, q_1, \dots, q_{17}]$  は関節角度ベクトルである。

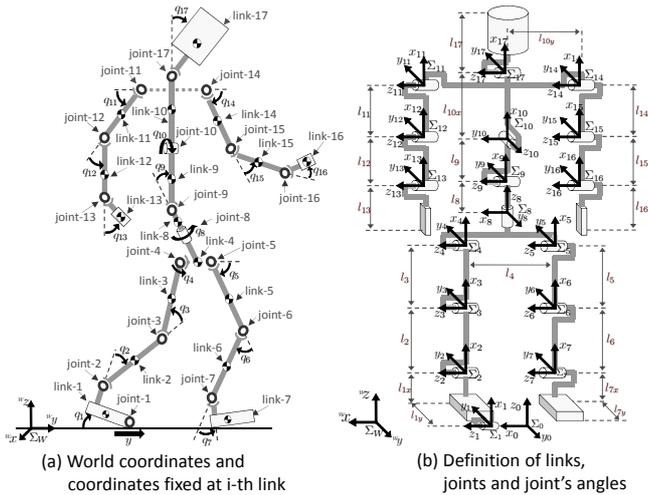


Fig.1 Gaits Including Contacting-foot With Surface-contacting

Table 1 Physical parameters

Link	$l_i$ [m]	$m_i$ [kg]	$d_i$ [Nms/rad]
Head ( $l_{17}$ )	0.24	4.5	0.5
Upper body ( $l_{10x}$ )	0.41	21.5	10.0
Middle body ( $l_9$ )	0.1	2.0	10.0
Lower body ( $l_8$ )	0.1	2.0	10.0
Upper arm ( $l_{11}, l_{14}$ )	0.31	2.3	0.5
Lower arm ( $l_{12}, l_{15}$ )	0.24	1.4	1.0
Hand ( $l_{13}, l_{16}$ )	0.18	0.4	2.0
Waist ( $l_4, l_5$ )	0.27	2.0	3.0
Upper leg ( $l_3, l_6$ )	0.38	7.3	10.0
Lower leg ( $l_2, l_7$ )	0.40	3.4	8.0
Foot ( $l_{1x}$ )	0.07	1.3	50.0
Total weight [kg]	—	64.2	—
Total height [m]	1.7	—	—

### 3 Visual-lifting Approach

一般的に ZMP を参照しない連続歩行は不安定な歩容が現れるため、困難であるとされる。不安定な歩容とは転倒状態を意味し、一旦転倒状態が生じると安定な姿勢に復帰することは難しい。本章ではこのような問題を避けるために、ヒューマノイドの直立時または歩行時の安定性向上を目的として“Visual-lifting Approach”と呼ぶ戦略を提案する。本戦略の概念は頭部の位置/姿勢を一定に保つことである。まず、その概略図を Fig.2 に示す。ヒューマノイドの頭部に固定された座標系  $\Sigma_H$  に基づいて、固定目標物体の位置/姿勢を測定するために Model-based matching 法を使用する。固定目標物体に対して設定された座標系との関係は同次変換行列として定義される。その結果、頭部の目標位置を表す座標系との偏差を表す同次変換行列は以下の式によって求まる。

$${}^H T_{H_d}(\psi_d(t), \psi(t)) = {}^H T_R(\psi(t)) \cdot {}^{H_d} T_R^{-1}(\psi_d(t)) \quad (2)$$

式 (9) において、 ${}^H T_R$  は文献 (10) で提案されている“On-line visual pose estimation”によって測定された  $\psi_d(t)$  を用いて計算可能であるが、本研究では  ${}^H T_R$  をビジュアルサーボによる認識によって得るのではなく、既知の変数として扱っている。そし

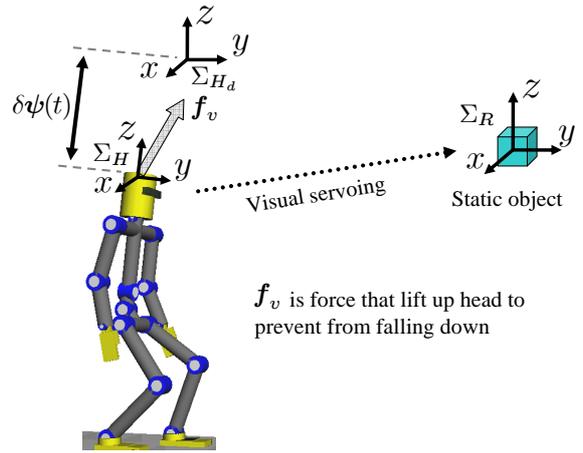


Fig.2 Concept of Visual Lifting Approach Stabilizing Walking.

て、 $\delta\psi(t) (= \psi_d(t) - \psi(t))$  として定義される頭部の目標値と実際の偏差を最小とするために、関連した関節に入力されるべきトルクが以下の式により計算される。

$$\tau_h(t) = J_H(q)^T K_p \delta\psi(t) \quad (3)$$

ここで、 $J_H(q)$  は支持脚から頭部までの位置/姿勢を表すヤコビ行列、 $K_p$  は比例ゲインを表している。すなわち式 (10) は頭部を目標位置に引っ張る力  $f_v$  を生み出し、重力による頭部や重心位置の低下及び予測不可能な滑りや外乱による転倒を防止する効果を持つ。

### 4 歩容遷移図の作成

歩容遷移図とは歩行周期に遷移条件を加えることで作成される図のことである。本研究は人間らしい歩行を目指しているため必要ない歩容は使用しないこととする。使用する歩容か否かの判断は世界的に臨床で使用されているランチョロスアミーゴ方式に対応させている。ランチョ・ロス・アミーゴ方式による歩行周期は 8 層ありそれぞれに名称が決まっている。これを踏まえた歩容遷移図が次の Fig.3 になる。

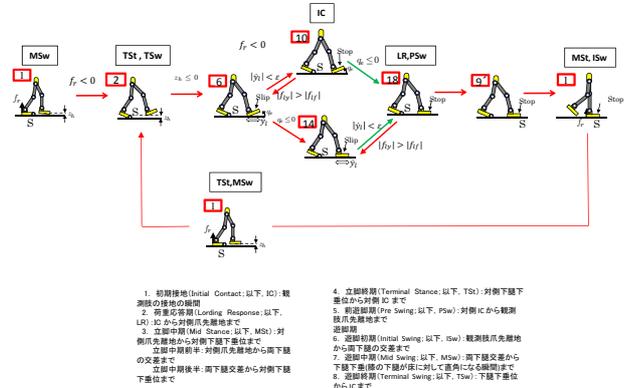


Fig.3 Translation of Bipedal Walking

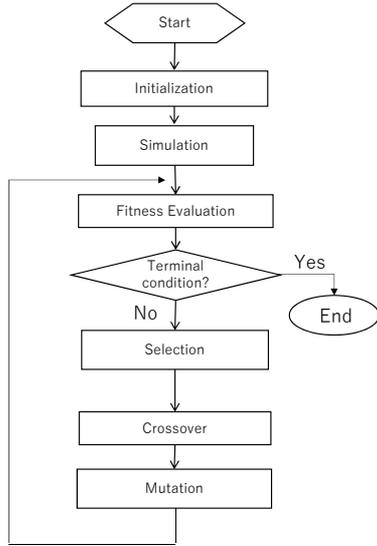


Fig.4 Flowchart about Genetic Algorithm

## 5 遺伝的アルゴリズムを入力トルクの最適化

### 5.1 歩数複合型評価関数 (Hybrid)

遺伝的アルゴリズム (以下, GA と呼ぶ) を使用して, 入力トルクを探索する. 遺伝子型は, 補助入力に必要な各関節の入力トルク係数  $g_{x_i}$  と周期係数は,  $\leq g_{per_i}$  から構成される. Fig.4 に GA のフローチャートを示す. なお, 個体数は 1000 個体とした. 歩容遷移図に従わない歩行 (エラー) もしくは最大 100 歩の歩行が完了した段階で評価値の最も小さい個体を 1 つ選択し, 交叉と突然変異を施す. これを 5000 世代まで繰り返し替える.

### 5.2 歩数複合型評価関数 (Hybrid)

理想的な人間らしい歩行は「最低限のエネルギーで最大の距離を歩行すること」であると考え, これを基に評価関数を提案した. 総入力エネルギーの最小化, 移動距離の最大化の両方を考慮して作成した評価関数  $S[]$  を実験的に作成した. 最大 100 歩の歩行動作, もしくは (エラー) が起きた段階までで評価値の計算を行う.

$$S = -E_{input}/k_1 + y_8/k_2 + k_3 x_{steps} \quad (4)$$

$$E_{input} = \sum_{i=1}^{17} \int_0^t \tau_{input,i} \dot{q}_i dt \quad (5)$$

ここで  $x_{steps}$  は歩数,  $k_1[m], k_2[], k_3[J]$  は正の定数である重み係数とする. また,  $y_8[m]$  は腰の移動距離,  $E_{input}[J]$  は, 現時刻  $t[s]$  における総入力エネルギー,  $\tau_{input}[N \cdot m]$  は入力トルク,  $\dot{q}_i$  [rad/s] は角速度を表す. 本評価関数は, 3 つの要素から構成され,  $y_8/k_1 + k_2 x_{steps}$ ,  $E_{input}/k_3$  はそれぞれ距離, エネルギーに関するパラメータを表しており, それぞれの要素を組み合わせることによって, 最低限の入力エネルギーで最大距離の歩行を実現することを目指す. また, 本研究では,  $k_1=1000[J], k_2=1[m], k_3=2[]$  を無次元化のためのパラメータとして用いた.

### 5.3 評価関数

理想的な人間らしい歩行は「最低限のエネルギーで最大の距離を歩行すること」であると考える. これを基に評価関数を提案した. 総入力エネルギーの最小化, 移動距離の最大化の両方を考慮して作成した評価関数  $S[]$  を実験的に作成した. 最大 100 歩の歩行動作, もしくは (エラー) が起きた段階までで評価値の計算を行う.

### 5.3.1 歩数複合型 (Hybrid)

ここで  $x_{steps}$  は歩数,  $k_1[m], k_2[], k_3[J]$  は正の定数である重み係数とする.  $t[s]$  は現在の時刻を表す.  $y_8[m]$  は腰の移動距離を表す.  $E_{input}[J]$  は総入力エネルギー,  $\tau_{input}[N \cdot m]$  は入力トルク,  $\dot{q}_i$  [rad/s] は角速度である.  $y_8/k_1 + k_2 x_{steps}$ ,  $E_{input}/k_3$  はそれぞれ距離, エネルギーに関するパラメータを表している.

$$-E_{input}/k_1 + y_8/k_2 + k_3 x_{steps} \quad (6)$$

$$E_{input} = \sum_{i=1}^{17} \int_0^t \tau_{input,i} \dot{q}_i dt \quad (7)$$

この評価関数は実験的に作成した.  $k_1=1000[J], k_2=1[m], k_3=2[]$  として無次元化を行った.

## 6 現在の入力トルクの整理

既存研究では, 入力に関するトルク制御として, 以下の 3 つのものを用いていた [4].

1. Visual Lifting Approach (支持脚)
2. foot control (接地脚+遊脚)
3. heel control (支持脚+遊脚+接地脚)

人間は余計なエネルギーを消費していないということを意識しているため, 3 つ目の入力は補助入力は使用せず 1, 2 の二つの入力を使用した. 既存の制御器は人間の歩行が周期的な運動であるにも関わらず, 一定の値を状態毎に設定しており, 非常に不自然かつ複雑な入力であった. そこで今回はその制御器を整理し, 比較的周期関数を多く用いるように変更を加えた. 今回整理したのは 2 の foot control(接地脚+遊脚) となる. 以下にその入力を示す.

$$\tau_i = \begin{cases} g_{x_1} \cos(\pi(t - t_{end})/g_{per_1}) & (i = 5) \\ g_{x_2} \sin(\pi(t - t_{end})/g_{per_2}) & (i = 6) \\ g_{x_3}(g_{per_3-q_6}) & (i = 7) \end{cases} \quad (8)$$

$$\tau_8 \leftarrow \begin{cases} \tau_8 + g_{x_4} \cos(\pi(t - t_{end})/g_{per_4}) & \text{if}(y_1 < 0) \\ \tau_8 - g_{x_4} \cos(\pi(t - t_{end})/g_{per_4}) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

$$\tau_6 = -g_{x_5} \cos(\pi(t - t_{end})/g_{per_5}) \quad \text{if}(y_3 - 0.1 < y_6) \quad (10)$$

本研究では, これらの入力トルク係数と周期係数を GA によって最適化していく.

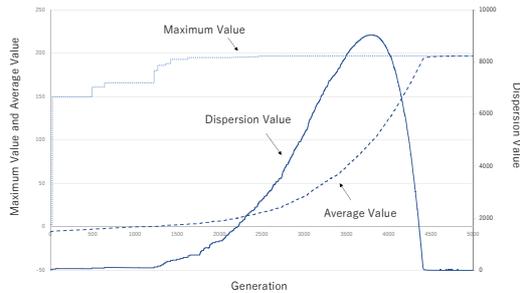
## 7 実験と結果

最大 100 歩をシミュレーションさせる. Fig.5 に評価値のグラフを示す. 平均値, 最大値は世代を重ねるごとに上がっている. 約 4400 世代目あたりまでは分散値が上がるにつれて平均値も大きく上がるが, 分散値がピークを過ぎれば一定の値を取るとなる. 4400 世代目あたりではそれと共に平均値もほぼ一定な値をとっていた. Table 2 に 5000 世代目の 100 歩の歩行による移動距離および, 総入力エネルギーを示す. 人間の歩行による平均の歩幅は身長  $\times 0.45$  で計算されるため, 1.7[m] である. このロボットの歩幅は 0.765[m] であればかなり平均的なものになるが, 結果では 0.2802[m] とかなり歩幅が短い歩行となった.

**Table 2** walk 100 steps

	GA walking 5000 gen
Moving Distance	28.04[m]
$E_{input}$	31318.2[J]
$E_{input}$ /moving distance	1116.91[J/m]
Step Size	0.2804[m]

[7] 石田, 村瀬, 小山, パソコンで学ぶ遺伝的アルゴリズムの基礎と応用, 森北出版(株),1997



**Fig.5** Relationship Between Moving Distance and Energy

## 8 考察

Fig.6 より, 世代数を増やしていくと最も低い評価値が1つだけ淘汰され続けているために最大値は毎回上がっておらず, またそれ故に平均値も少しずつ上がっている. 分散値が上がるということは探索空間が広いことを意味しているため, これがピークを過ぎれば一定に保つということは探索範囲が落ち着き, 探索可能な範囲内での評価値のピークが落ち着いたためと考える. 本研究で作成した歩行は歩幅が非常に短い歩行となった. これは実験的に作成した今回の評価関数では歩数とエネルギーを特に重要視しており, その結果小股で歩行することでエネルギー損失を抑えようとしたことが考えられる.

## 9 結言

今回は遺伝的アルゴリズムを用いて最適な入力トルクの探索を行った. 最適な入力トルクとは最低限の入力エネルギーで最大距離の歩行をすることと考え, 距離の最大化とエネルギーの最小化を同時に満たすような評価関数を実験的に設計し検証を行った. しかし, その結果生成された歩行は身長に対して歩幅は短く,

## References

- [1] W. Song, M. Minami, F. Yu, Y. Zhang and A. Yanou: 3-D Hand & Eye-Vergence Approaching Visual Servoing with Lyapunov-Stable Pose Tracking, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.5210/5217, (2011)
- [2] M. Vukobratovic, A. Frank and D. Juricic, "On the Stability of Biped Locomotion," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Vol.17, No.1, 1970.
- [3] M. Vukobratovic and J. Stepanenko, "On the Stability of Anthropomorphic Systems," *Mathematical Biosciences*, Vol.15, pp.1-37, 1972.
- [4] Zeyi Zhang, Daiji Izawa, Xiang Li, Takayuki Matsuno, Mamoru Minami, "Ice Skating Motion Using Feedforward Control System by Model of Humanoid Robot," 24th International Symposium on Artificial Life and Robotics, B-Con PLAZA, Beppu, JAPAN, pp.956-961, January 23-25, 2019
- [5] 嘉戸直樹, 伊藤正憲, 藤原聡, 高橋優基, 『移動動作の解釈』, 2016年.
- [6] 畠中泰彦, 歩行分析・動作分析のグローバル・スタンダードー最近の知見と治療に役立つ分析のポイントー, 2013年