

## NSGA-II を用いたヒューマノイドの効率の良い歩行プロファイルの探索

## Efficient Walking-Profile Search Based on NSGA-II for Humanoid

○学 森本 晃行 (岡山大) 和田 亮雅 (岡山大)

正 戸田 雄一郎 (岡山大) 正 見浪 護 (岡山大)

Teruyuki MORIMOTO, Okayama University, pzmb3jpb@s.okayama-u.ac.jp  
 Yuuichiro 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 Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II (NSGA-II). In the report, I explored the best input by NSGA-II method based on three evaluation(maximize a Walking speed, energy minimization, and taking both of them into consideration) 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。(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 [1]。これに対し、我々の研究では ZMP に依存しない人間らしい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った。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 [2] の概念に基づいて提案した。この戦略は文献 [3], [4] において提案されている "visual pose estimation" を利用しており、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適切な入力トルクを決定できない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 Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II(NSGA-II) を用いて適切な入力トルクを探索し、その結果を元に歩行シミュレーション実験を行った。

## 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  $q_i[\text{rad}]$  の定義を Fig.1(a) に各リンク座

標系  $\sum_i$ , 各リンク長さ  $l_i[\text{m}]$  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  ${}^i\ddot{p}_i$ , リンクの質量中心における並進加速度  ${}^i\ddot{s}_i$  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。

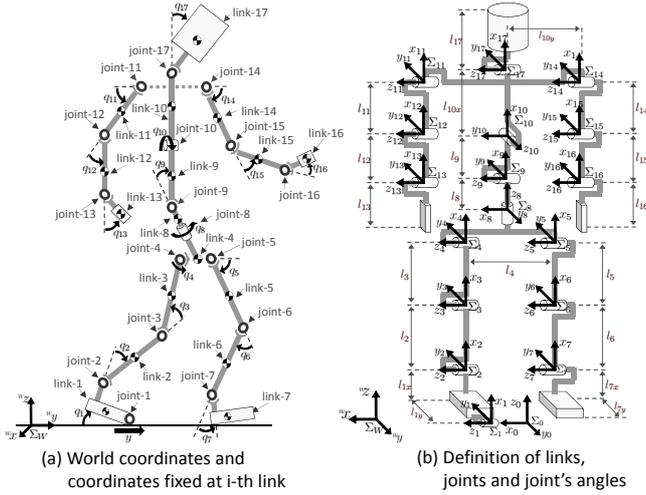


Fig.1 Gaits including contacting-foot with surface-contacting

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        | 0.03            |
| Lower arm ( $l_{12}, l_{15}$ ) | 0.24      | 1.4        | 1.0             |
| Hand ( $l_{13}, l_{16}$ )      | 0.18      | 0.4        | 2.0             |
| Waist ( $l_4$ )                | 0.27      | 2.0        | 10.0            |
| Upper leg ( $l_3, l_5$ )       | 0.38      | 7.3        | 10.0            |
| Lower leg ( $l_2, l_6$ )       | 0.40      | 3.4        | 10.0            |
| Foot ( $l_{1x}, l_{7x}$ )      | 0.07      | 1.3        | 10.0            |
| 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”と呼ぶ戦略を提案した。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

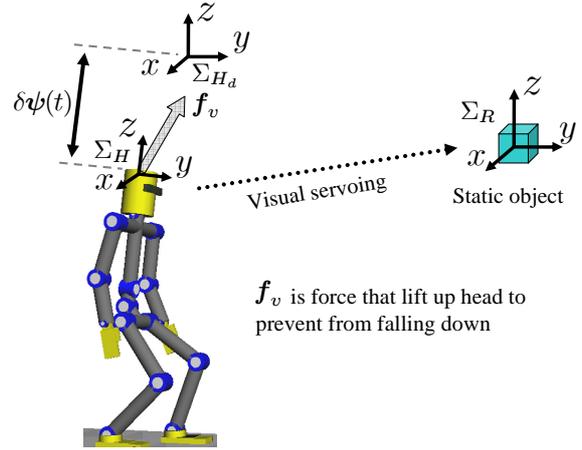


Fig.2 Concept of Visual Lifting Approach stabilizing walking.

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。

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

ここで、 $J_H(\mathbf{q})$  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 NSGA-II を用いた入力トルクの探索

ヒューマノイドの効率の良い歩行において、1[m] あたりの消費エネルギーを抑える歩行ができないかと考えた。その際の評価方法を「歩行速度の最大化」、「総消費エネルギーの最小化」とした。しかし、この2つの事象は互いにトレードオフの関係にあり、同時に満たす歩行は1つに定まらない。そこでこの問題を多目的最適化問題として考え、Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II(以下 NSGA-II と呼ぶ)を用いて適切な入力トルクを探索する。

#### 4.1 NSGA-II の概要

一般的に目的関数が3つ以下であるときに最適化性能を示し、世代ごとに交叉、突然変異を行い劣個体、非劣個体を生成し分類する。この動作を繰り返すことでパレート最適解が得られる。またパレート最適解とは他のどの解にも優越されない非劣個体であり、複数個存在する。

NSGA-II のフローチャートを Fig. 3 に示す。

#### 4.2 NSGA-II のアルゴリズムの説明

NSGA-II のアルゴリズムを以下に示す。

- 50 歩の歩行が可能な個体をランダム探索で用意した。その結果 30 個体生成された。
- 遺伝子操作を用いた探索を行うための母集団  $Q_t$ 、遺伝子操作を行った個体を保存するための母集団  $P_t$ (アーカイブ集団)を用意する。
- 母集団  $Q_t$  の中に 30 個の初期個体を入れ、ランダムに選択し、交叉、突然変異を行う。遺伝子操作された個体は  $P_t$  に保存する。
- $P_t$  と  $Q_t$  をあわせたものを  $R_t$  と呼び、 $R_t$  に対して評価関数に基づいた評価を行い、非優越ソートを行う。非優越ソー

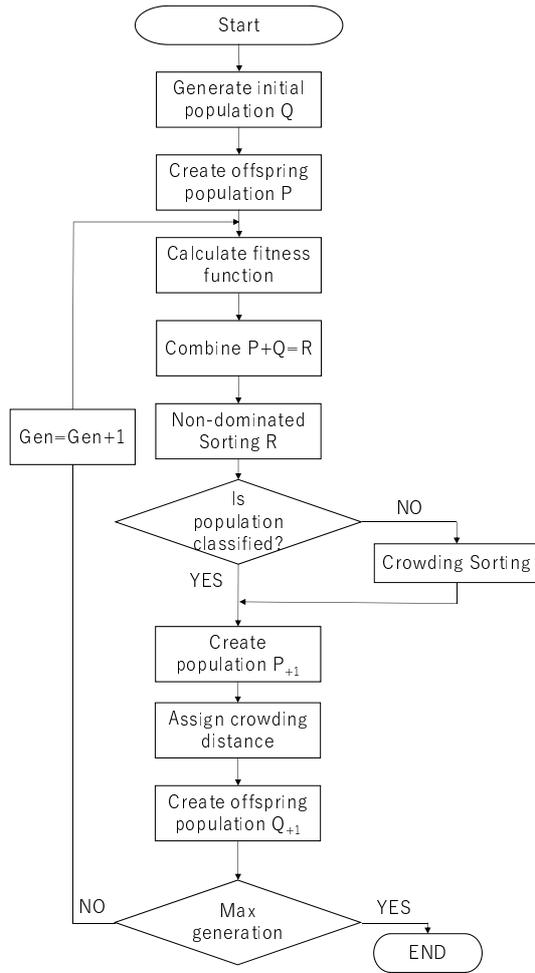


Fig.3 Flowchart about NSGA-II

トとは全ての個体群の中の非優越な解をそれぞれランク分けし、ランクの高い順に分類することである。また 30 個入る新しい母集団  $P_{t+1}$  を用意しランクの高い順に個体を入れていく。入らなかったランク体は淘汰する。

5.  $P_{t+1}$  にある個体を混雑距離を基に混雑度トーナメント選択をし新しい探索母集団  $Q_{t+1}$  に生成する。これを行うことで密集した個体を取り除き解の多様性を保つことができる。その後  $Q_{t+1}$  に対して交叉、突然変異させる。これを世代数を満たすまで行う。

#### 4.3 混雑度

同一ランク体の個体集合を目的関数でソートし、隣接する個体を調べる。全個体それぞれの隣接する個体間の混雑度距離を求め、個体間の和の数値が低いものほどその個体は混雑しているという。以下に混雑度距離の式を示す。

$$d_j = \sum_{m=1}^M \frac{F_m^{I_{j+1}} - F_m^{I_j - 1}}{F_m^{max} - F_m^{min}} \quad (4)$$

$j$  は個体数、 $M$  は目的関数の数を表している。個体間の距離を求めると、調べる個体に隣接している二つの個体の差を  $F_m$  の値が最大の個体と最小の個体の差で割ることで正規化することができ混雑度距離  $d$  を求められる。

#### 4.4 評価関数

ヒューマノイドの効率の良い歩行を図るため、以下に評価関数を作成した。関数  $F_1(v)$  では歩行速度の最大化、関数  $F_2(\tau_i, \dot{q}_i)$

では総消費エネルギーの最小化を図っている。また、50 歩歩くことを制約条件として定めた。

##### 4.4.1 歩行速度の最大化

$$F_1(v) = k_1 \frac{1}{v} \quad (5)$$

$v$  [m/s] は腰の並進速度、 $k_1$  [] = 10 は無次元化定数とする。

##### 4.4.2 総消費エネルギー最小化

$$F_2(\tau_i, \dot{q}_i) = k_2 \sum_{i=1}^{17} \int_0^t \tau_i \dot{q}_i dt \quad (6)$$

$k_2$  [] = 1/10000 は無次元化定数としている。また  $\tau_i$  [N · m] はトルク、 $\dot{q}$  [rad/s] は角速度である。

##### 4.4.3 制約条件

50 歩歩くことを条件に設定する。

$$x_{step} \geq 50 \quad (7)$$

$x_{steps}$  [steps] は歩数である。

#### 4.5 NSGA-II を用いるための入力トルク

NSGA-II を用いて評価関数に基づく適切な入力トルク係数、周期係数の探索を行う。以下に入力トルクの式を示す。

$$\tau_8 = \begin{cases} g_{x_1} \sin(\pi(t - t_{end})/g_{per_1}) & (C = 1) \\ -g_{x_1} \sin(\pi(t - t_{end})/g_{per_1}) & (C = 0) \end{cases} \quad (8)$$

$$\tau_5 = g_{x_2} \cos \pi(t - t_{end})/g_{per_2} \quad (9)$$

$$\tau_6 = \begin{cases} g_{x_3} \sin \pi(t - t_{end})/g_{per_3} & \\ g_{x_4} \sin \pi(t - t_{end})/g_{per_4} & (if \ y_2 - 0.1 < y_6) \\ & (otherwise) \end{cases} \quad (10)$$

$$\tau_7 = g_{x_5}(g_{per_5} - q_6) \quad (11)$$

ここで  $y_2, y_6$  はそれぞれ支持脚の膝の  $y$  座標、遊脚の膝の  $y$  座標である。 $g_{x_1} \sim g_{x_5}$  [] は入力トルク係数、 $g_{per_1} \sim g_{per_5}$  [] は周期係数を表し、範囲に制限は設けていない、 $C=0$  は支持脚の爪先が地面に接触し、支持脚と遊脚が入れ替わると  $C=1$  とし、次に遊脚の爪先が接地すると  $C=0$  とする。

#### 4.6 探索実験

本研究では 50 歩歩行する個体をランダム探索で探索した。その結果 30 個体得られた。これを初期個体とし個体数 30、個体長 10、最大世代数を 9000 とし、世代数を満たすまで進化させた。Fig.4 に 9000 世代の探索結果を示す。

この評価分布はパレート最適解であり、「総消費エネルギーの最小を優先した個体」、「歩行速度の最大を優先した個体」、「その両方を満たそうとする個体」を生成することができた。

## 5 歩行シミュレーション実験

上記の実験より得られた入力トルク係数、周期係数を用いて 10 歩の歩行シミュレーション実験を行った。評価する個体は「総消費エネルギーの最小を優先した個体」、「歩行速度の最大を優先した個体」、「両方を満たそうとする個体」の 3 つである。以下にシミュレーション結果を示す。

9000 世代における評価分布から歩行速度の最大を優先した歩行、総消費エネルギーの最小を優先した歩行、両方を満たそうとする歩行を生成することができた。Fig.5 のより総消費エネルギーの最小を優先した個体は足を滑らすように歩行をし、Fig.6 のように歩行速度の最大を優先した個体は足を大きく上げ上半身を並進方向に揺らして歩行した。Fig.7 は両方の評価関数を満たそうとする歩行で人間のような歩行を行った。

### 5.1 考察

Fig.8 ではこれらの3つの歩行に対して1[m]あたりの入力エネルギーの比較を行った。これより効率の良い歩行をするためには歩行速度、総消費エネルギーをバランスよくする必要があると考える。また、今回の実験で得られたのは歩行速度、総消費エネルギーの両方を満たそうとする歩行はわずかではあるが腕を振る歩行をした。考えられる原因として上半身の動きが足に正しく伝わっていないことである。このため今後は足の入力トルクそのものを見直す必要があると考える。

### 6 結言

本論文では可能な限り詳細にモデル化された複雑なダイナミクスを持つヒューマノイドについて議論し、ヒューマノイドロボットの効率の良い歩行を目的とし、以下の内容について記述した。試行錯誤により決められていた制御器内の入力トルクの整理を行い、NSGA-IIによって適切な入力を探した。50歩の歩行という制約条件のもと歩行速度の最大化、総消費エネルギーの最小化の両方をバランスよく満たす歩行の生成をすることができ、エネルギー効率を改善できた。

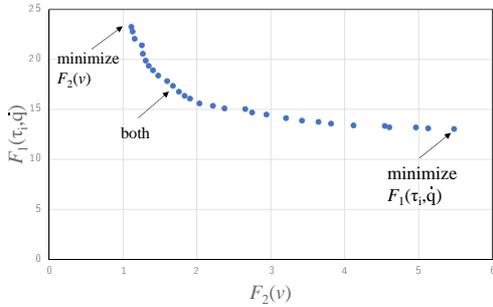


Fig.4 Evaluation distribution

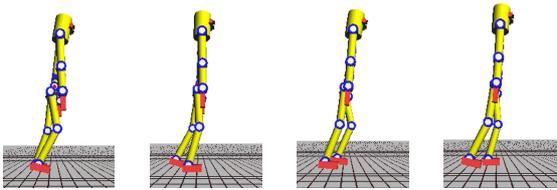


Fig.5 Walking of minimize energy

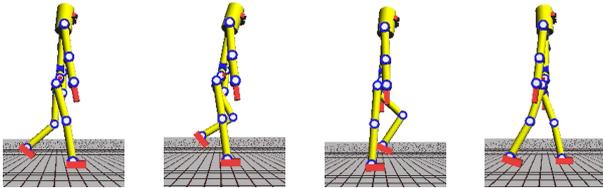


Fig.6 Walking of maximum speed

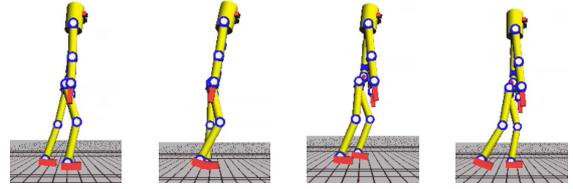


Fig.7 Walking of both

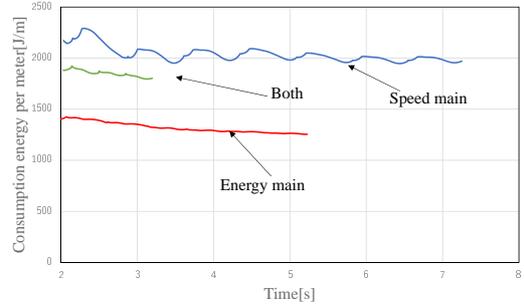


Fig.8 Consumption energy per 1 meter

### References

- [1] Y. Harada, J. Takahashi, D. Nenchev and D. Sato, "Limit Cycle Based Walk of a Powered 7DOF 3D Biped with Flat Feet," *Proc. of International Conference on IROS*, pp.3623–3628, 2010.
- [2] N. Hogan, "Impedance Control; An Approach to Manipulation, Parts I–III," *ASME Journal of Dynamics Systems, Measurement, and Control* Vol.107, No.1, pp.1–24, 1985.
- [3] 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.
- [4] F. Yu, W. Song and M. Minami, "Visual Servoing with Quick Eye-Vergence to Enhance Trackability and Stability," *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.6228–6233, 2010.