

静／動摩擦力を受ける足の滑りを考慮したヒューマノイドによる歩行のための歩容モデル

○井澤 大時(岡山大学) 季 想(岡山大学) 見浪 護(岡山大学)
松野 隆幸(岡山大学) 矢納 陽(川崎医療短期大学)

1. 緒言

ヒューマノイドによる二足歩行はシミュレーション実験や実機実験を問わず幅広く研究されている。その中でも線形近似などを用いることなく、かつ複雑なダイナミクスを避けるために、ヒューマノイドを倒立振子と見なしてモデル化を行っている研究 [1]-[5] が多数存在する。ヒューマノイドを線形倒立振子モデルに置き換えることによって、従来の線形制御理論を用いた制御器が容易に設計可能となることや、計算コストの減少によって歩行軌道や関節軌道などが実時間で生成できるなどのメリットがあるため、安定な二足歩行が数多く実現されてきた [6]-[8]。

しかしながら上記のモデル化や制御器設計の手法は全て単純化された二足歩行モデルが対象であり、足 (foot) の点接地、面接地を考慮したモデルの作成や足の滑りなどが歩行に与える影響に関する議論は避けられる傾向にある [9]-[11]。本研究では摩擦係数が小さい劣悪環境 (濡れた路面、雪、氷の上) における歩行中の足の滑りを考慮し、かつ足 (foot) を含むモデルの作成によって接地時における衝突 (遊脚の着地)、面 (足裏) / 点 (踵) 接地を明確に区別した歩行モデルを考えた。これらのダイナミクスを Newton-Euler 法を用いて導出をする。本論文では作成したヒューマノイドモデルと滑りを含む様々な歩容モデルを力学的エネルギーの保存則の観点からモデルとしての正しさを検証していく。

2. ヒューマノイドモデル

2.1 運動学モデル

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] の定義を図 1(a) に各リンク座標系 $\sum_i$ 、各リンク長さ l_i [m] の定義を図 1(b) に示す。表 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。図 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、図 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 $\sum_0$ は図 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り、 $\sum_1$ は図 1 に示すように $\sum_0$ と同じ原点を持つ座標系である。 $\sum_0$ 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。

2.2 動力学モデル

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。

$${}^i\omega_i = {}^{i-1}R_i^{T i-1} \omega_{i-1} + {}^i e_{zi} \dot{q}_i \quad (1)$$

$${}^i\dot{\omega}_i = {}^{i-1}R_i^{T i-1} \dot{\omega}_{i-1} + {}^i e_{zi} \ddot{q}_i + {}^i\omega_i \times ({}^i e_{zi} \dot{q}_i) \quad (2)$$

$${}^i\ddot{p}_i = {}^{i-1}R_i^T \{ {}^{i-1}\ddot{p}_{i-1} + {}^{i-1}\dot{\omega}_{i-1} \times {}^{i-1}\hat{p}_i + {}^{i-1}\omega_{i-1} \times ({}^{i-1}\omega_{i-1} \times {}^{i-1}\hat{p}_i) \} \quad (3)$$

$${}^i\ddot{s}_i = {}^i\ddot{p}_i + {}^i\dot{\omega}_i \times {}^i\hat{s}_i + {}^i\omega_i \times ({}^i\omega_i \times {}^i\hat{s}_i) \quad (4)$$

第 i 関節が直動関節の場合の計算は以下のように行う。このモデルにおいて直動関節は地面と link-1 の間に設置されている。これによって支持脚の滑りを表現している。

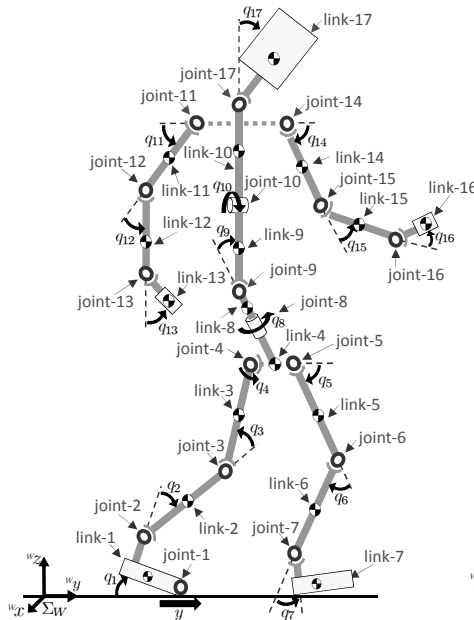
$${}^i\omega_i = {}^{i-1}R_i^{T i-1} \omega_{i-1} \quad (5)$$

$${}^i\dot{\omega}_i = {}^{i-1}R_i^{T i-1} \dot{\omega}_{i-1} \quad (6)$$

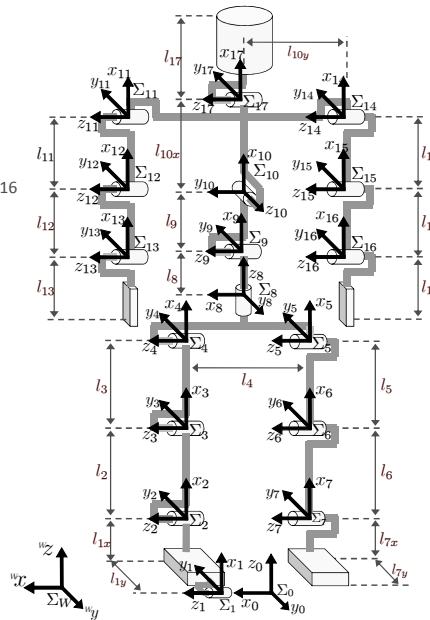
$${}^i\ddot{p}_i = {}^{i-1}R_i^T \{ {}^{i-1}\ddot{p}_{i-1} + {}^{i-1}\dot{\omega}_{i-1} \times {}^{i-1}\hat{p}_i + {}^{i-1}\omega_{i-1} \times ({}^{i-1}\omega_{i-1} \times {}^{i-1}\hat{p}_i) \} + 2({}^{i-1}R_i^{T i-1} \omega_{i-1}) \times (e_y \dot{q}_i) + e_y \ddot{q}_i \quad (7)$$

$${}^i\ddot{s}_i = {}^i\ddot{p}_i + {}^i\dot{\omega}_i \times {}^i\hat{s}_i + {}^i\omega_i \times ({}^i\omega_i \times {}^i\hat{s}_i) \quad (8)$$

ここで、 ${}^{i-1}R_i$ は $\sum_{i-1}$ から $\sum_i$ への回転行列、 $e_{zi} = [0, 0, 1]^T$ 、 $e_y = [0, 1, 0]^T$ は link- i の回転軸、直動軸を表す単位ベクトル、 ${}^{i-1}\hat{p}_i$ は $\sum_{i-1}$ の原点から link- i の質量中心までの位置ベクトルを表している。ただし、link-4 が link-5 と link-8 につながっていることから、式 (1) ~ (4) においてこれらの式によらない。また link-10 においても link-11, 14, 17 につながっているため、同様なことが言える。次に逆動力学計算に基づいて、先端リンクから根元のリンクに向かって link- i におけるニュートンとオイラーの動力学的な力のつり合いを以下の式に基づいて導出する。



(a) 基準座標系と関節角度の定義



(b) リンク座標系とリンク長さの定義

図1 ヒューマノイドモデルの定義

表1 各リンクの大きさの定義

リンク	l_i [m]	m_i [kg]	r_i [m]
l_{1x}, l_{7x}	0.07	1.3	-
l_{1y}, l_{7y}	0.19	1.3	-
l_2, l_6	0.40	3.4	0.04
l_3, l_5	0.38	7.3	0.04
l_4	0.27	2.0	0.04
l_8	0.10	2.0	0.04
l_9	0.10	2.0	0.04
l_{10x}	0.41	21.5	0.04
l_{10y}	0.22	21.5	0.04
l_{13}, l_{16}	0.18	0.4	-
l_{12}, l_{15}	0.24	1.4	0.04
l_{11}, l_{14}	0.31	2.3	0.04
l_{17}	0.24	4.5	0.09

$${}^i f_i = {}^i R_{i+1} {}^{i+1} f_{i+1} + m_i {}^i \ddot{s}_i \quad (9)$$

$$\begin{aligned} {}^i n_i = & {}^i R_{i+1} {}^{i+1} n_{i+1} + {}^i I_i {}^i \dot{\omega}_i + {}^i \omega_i \times ({}^i I_i {}^i \omega_i) \\ & + {}^i \dot{s}_i \times (m_i {}^i \ddot{s}_i) + {}^i \hat{p}_{i+1} \times ({}^i R_{i+1} {}^{i+1} f_{i+1}) \end{aligned} \quad (10)$$

リンク座標系の設定方法としてよく用いられるように全ての関節が ${}^i z_i$ 軸回りの回転を行うように Σ_i を定めた場合、単位ベクトルは $e_{zi} = [0, 0, 1]^T$ となり、回転関節の連 link- i の逆動力学計算は式 (11) となる。

$$\tau_i = e_{zi}^T {}^i n_i + d_i \dot{q}_i \quad (11)$$

link-0 は $\Sigma_0 y$ 軸方向に滑るため、この並進運動の逆動力学計算は次式で計算される。

$$\tau_i = e_{zi}^T {}^i f_i + k_{fi} \dot{y}_i \quad (12)$$

link-0~link-17 の以上の式を一般的な表現に改めると以下ようになる。

$$M(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) + g(q) + D\dot{q} = \tau \quad (13)$$

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のベクトル、 D は関節の摩擦係数を表す対角行列 D 、 $\tau = [f_0, \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{17}]$ (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。

3. 拘束条件付運動方程式

遊脚の地面への接地は拘束条件を用いて表現している。その条件を加えた運動方程式は式 (14) となる。

$$\begin{aligned} M(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) + g(q) + D\dot{q} \\ = \tau + j_{cz}^T f_{nz} - j_t^T f_t + j_r^T \tau_n + j_{cy}^T f_{ny} \end{aligned} \quad (14)$$

f_{nz} , f_t , τ_n , f_{ny} はそれぞれ抗力 (Σ_W の z 方向)・摩擦力・拘束トルク・抗力 (Σ_W の y 方向) である。また、 j_{cz} , j_t , j_r , j_{cy} は以下の式で定義されるベクトルである。

$$j_{cz}^T = \left(\frac{\partial r}{\partial q^T} \right)^T \left\{ \left(\frac{\partial C_{hz}}{\partial r} \right) / \left\| \frac{\partial C_{hz}}{\partial r} \right\| \right\} \quad (15)$$

$$j_t^T = \left(\frac{\partial r}{\partial q^T} \right)^T \frac{\dot{r}}{\|\dot{r}\|} \quad (16)$$

$$j_r^T = \left(\frac{\partial C_{fr}}{\partial q^T} \right)^T / \left\| \frac{\partial C_{fr}}{\partial r} \right\| \quad (17)$$

$$j_{cy}^T = \left(\frac{\partial r}{\partial q^T} \right)^T \left\{ \left(\frac{\partial C_{hy}}{\partial r} \right) / \left\| \frac{\partial C_{hy}}{\partial r} \right\| \right\} \quad (18)$$

C_{hz} , C_{fr} , C_{hy} はそれぞれ、接地脚の踵を地面に拘束 ($z_h = 0$)、接地脚の回転を拘束 ($q_e = q_0 + q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 + q_7 = 0$)、進行方向に対する接地脚の運動を拘束 ($y_h = \text{一定}$) という条件を意味しており、図2の(b)(c)(d)に示す。また Σ_W に基づく接地脚の踵の位置ベクトルを $r_h(q)$ と定義したとき以下の式で表現される。

$$C(r_h(q)) = \begin{bmatrix} C_{hz}(r_h(q)) \\ C_{fr}(r_h(q)) \\ C_{hy}(r_h(q)) \end{bmatrix} \quad (19)$$

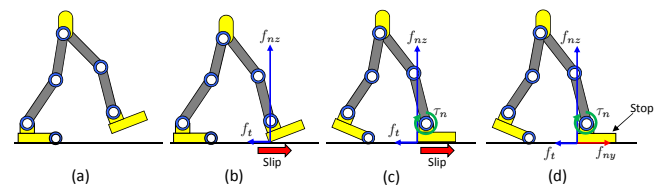


図2 接地中の遊脚の各拘束状態

式 (19) を時間 t で 2 階微分し, 式 (14) とを連立させることにより, 以下に示すダイナミクスを得る.

$$\begin{bmatrix} M(q) & -(\dot{j}_{cz}^T - \dot{j}_t^T K) & -\dot{j}_r^T & -\dot{j}_{cy}^T \\ \partial C_{hz}/\partial q^T & 0 & 0 & 0 \\ \partial C_{fr}/\partial q^T & 0 & 0 & 0 \\ \partial C_{hy}/\partial q^T & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q} \\ f_{nz} \\ \tau_n \\ f_{ny} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau - h(q, \dot{q}) - g(q) - D\dot{q} \\ -\dot{q}^T \left\{ \frac{\partial}{\partial q} \left(\frac{\partial C_{hz}}{\partial q^T} \right) \right\} \dot{q} \\ -\dot{q}^T \left\{ \frac{\partial}{\partial q} \left(\frac{\partial C_{fr}}{\partial q^T} \right) \right\} \dot{q} \\ -\dot{q}^T \left\{ \frac{\partial}{\partial q} \left(\frac{\partial C_{hy}}{\partial q^T} \right) \right\} \dot{q} \end{bmatrix} \quad (20)$$

4. 歩容モデル

4.1 ダイナミクスの拡張

ここまで支持脚の表現を次元数を用いて, 遊脚の表現を拘束条件を用いて紹介してきた. これらの表現を組み合わせることで歩行中に見られる歩容モデルを 16 種類作成した. また歩行中には遊脚が浮いている状態も考えられるため, この 16 種類の他に支持脚だけが設置した 4 種類の歩容モデルが作成されるため合計で 20 種類の歩容モデルが作成される. また表 2 には 20 種類の歩容モデルにおける支持脚の次元数, 遊脚の拘束状態を示している.

表 2 歩行中に現れる各歩容状態

歩容番号	支持脚の次元数, 拘束力	拘束条件
1	$q = [q_2, q_3, \dots, q_{17}]^T$	Nothing
2	$q = [q_1, q_2, \dots, q_{17}]^T$	Nothing
3	$q = [y_0, q_2, \dots, q_{17}]^T$	Nothing
4	$q = [y_0, q_1, \dots, q_{17}]^T$	Nothing
5	$q = [q_2, q_3, \dots, q_{17}]^T, f_{nz}$	$C_{hz} = 0$
6	$q = [q_1, q_2, \dots, q_{17}]^T, f_{nz}$	$C_{hz} = 0$
7	$q = [y_0, q_2, q_3, \dots, q_{17}]^T, f_{nz}$	$C_{hz} = 0$
8	$q = [y_0, q_1, q_2, q_3, \dots, q_{17}]^T, f_{nz}$	$C_{hz} = 0$
9	$q = [q_2, q_3, \dots, q_{17}]^T, f_{nz}, f_{ny}$	$C_{hz}, C_{hy} = 0$
10	$q = [q_1, q_2, \dots, q_{17}]^T, f_{nz}, f_{ny}$	$C_{hz}, C_{hy} = 0$
11	$q = [y_0, q_2, q_3, \dots, q_{17}]^T, f_{nz}, f_{ny}$	$C_{hz}, C_{hy} = 0$
12	$q = [y_0, q_1, q_2, q_3, \dots, q_{17}]^T, f_{nz}, f_{ny}$	$C_{hz}, C_{hy} = 0$
13	$q = [q_2, q_3, \dots, q_{17}]^T, f_{nz}, \tau_n$	$C_{hz}, C_{fr} = 0$
14	$q = [q_1, q_2, \dots, q_{17}]^T, f_{nz}, \tau_n$	$C_{hz}, C_{fr} = 0$
15	$q = [y_0, q_2, q_3, \dots, q_{17}]^T, f_{nz}, \tau_n$	$C_{hz}, C_{fr} = 0$
16	$q = [y_0, q_1, q_2, q_3, \dots, q_{17}]^T, f_{nz}, \tau_n$	$C_{hz}, C_{fr} = 0$
17	$q = [q_2, q_3, \dots, q_{17}]^T, f_{ny}, f_{nz}, \tau_n$	$C_{hz}, C_{hy}, C_{fr} = 0$
18	$q = [q_1, q_2, \dots, q_{17}]^T, f_{ny}, f_{nz}, \tau_n$	$C_{hz}, C_{hy}, C_{fr} = 0$
19	$q = [y_0, q_2, q_3, \dots, q_{17}]^T, f_{ny}, f_{nz}, \tau_n$	$C_{hz}, C_{hy}, C_{fr} = 0$
20	$q = [y_0, q_1, q_2, q_3, \dots, q_{17}]^T, f_{ny}, f_{nz}, \tau_n$	$C_{hz}, C_{hy}, C_{fr} = 0$

5. モデルの検証方法

5.1 力学的エネルギー

我々は複雑なモデルの検証するため, 力学的エネルギーの保存則を用いる事にした. 導出した運動方程式の整合性としを確認する方法として力学的エネルギー

の変化を観測する. モデルの入力トルク及び各関節の粘性摩擦, 接地面との摩擦を 0 にして自由落下をさせる. 摩擦による損失エネルギーは発生せず, 力学的エネルギーの初期値を保ったまま, 運動を行っていくと考えられる. 力学的エネルギーを導出するには, 位置エネルギー U , 並進エネルギー T_{ti} , 回転エネルギー T_{ri} の 3 つのエネルギーが必要となる. 各エネルギーの導出は, 以下の様になる.

$$U = \sum_{i=1}^l m_i g^w r_{zgi} \quad (21)$$

$$T_{ti} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^l m_i^W \dot{r}_{gi}^T \dot{r}_{gi} \quad (22)$$

$$T_{ri} = \sum_{i=1}^l \frac{1}{2} \omega_i^W \omega_i^T I_i^W \omega_i \quad (23)$$

ここで l はリンク数, $^w r_{gi}$ は基準座標系から見た各リンクの重心位置ベクトル, また $^w r_{zgi}$ はその z 座標を表す. これらのエネルギーによって力学的エネルギー Q を求める.

$$Q = U + T_{ti} + T_{ri} \quad (24)$$

6. モデルの検証

前章で示した検証方法を用いて歩容モデルの検証を行う. ここでは遊脚だけが滑るモデル (5), 両脚が滑るモデルとして (8), 支持脚だけが滑るモデルとして (20) の 3 つのモデルを取り上げて検証を行った. 各摩擦を 0 にして自由落下をさせた. 自由落下の様子を図 3 に示す. 各歩容モデルの力学的エネルギーの推移グラフをそれぞれ 図 4, 図 5, 図 6 に示す. 各グラフの力学的エネルギーが一定であることより各歩容モデルは正しく動作が行えている. 特に歩容モデル (20) は支持脚の次元数及び遊脚の拘束条件数が最も多く, 他の歩行モデルの次元要素をすべて含むより複雑な歩容モデルである. 離散的な数値計算のため, 各グラフを細かく見たとき誤差が生じているが数値計算の刻み幅を変更すれば誤差はより小さくなるため, モデルに大きく影響を及ぼさない.

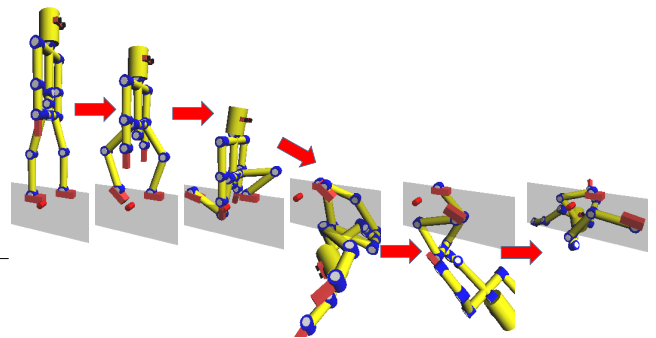


図 3 自由落下の様子

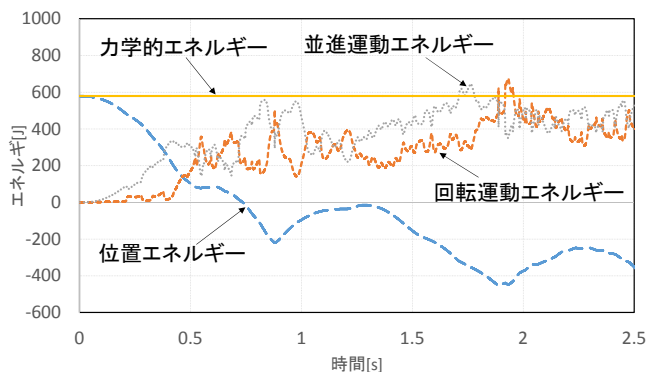


図4 歩容番号(5)での力学的エネルギーの変位

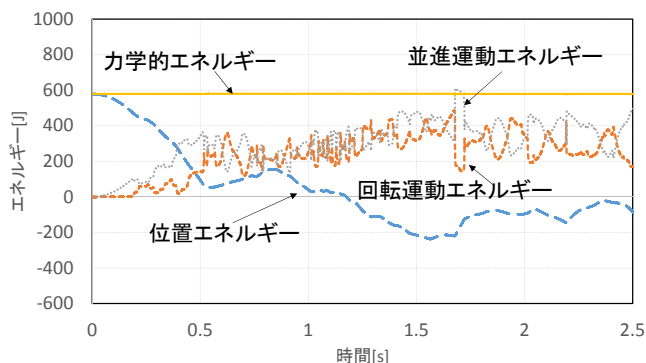


図5 歩容番号(8)での力学的エネルギーの変位

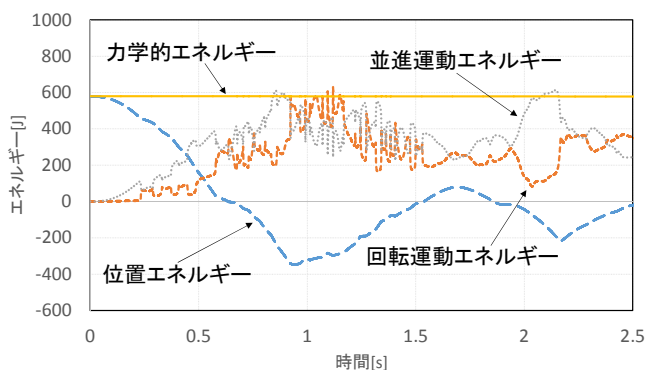


図6 歩容番号(20)での力学的エネルギーの変位

7. 結言

滑りを考慮した歩容モデルに関して力学的エネルギー保存則の観点から検証を行った。今後本論文で紹介したモデルを用いて、整地また不整地を想定した歩行、各関節の消費エネルギーが最少の歩行のシミュレーションやスケートのような歩行動作のシミュレーションを実現する予定である。

参考文献

- [1] S. Kajita, M. Morisawa, K. Miura, S. Nakaoka, K. Harada, K. Kaneko, F. Kanehiro and K. Yokoi, "Biped Walking Stabilization Based on Linear Inverted Pendulum Tracking," *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.4489–4496, 2010.
- [2] H. Dau, C. Chew and A. Poo, "Proposal of Augmented Linear Inverted Pendulum Model for Bipedal Gait Planning," *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.172–177, 2010.
- [3] S. Kajita and K. Tani, "Study of Dynamic Locomotion on Rugged Terrain-Derivation and Application of the Linear Inverted Pendulum Mode," *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.1405–1411, 1991.
- [4] S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Yokoi and H. Hirukawa, "The 3D Linear Inverted Pendulum Mode: A simple modeling for a biped walking pattern generation," *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2001.
- [5] J.H. Park and K.D. Kim, "Biped walking robot using gravity-compensated inverted pendulum mode and computed torque control," *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol.4, pp.3528–3593, 1998.
- [6] P.B. Wieber, "Trajectory free linear model predictive control for stable walking in the presence of strong perturbations," *Proc. International Conference on Humanoid Robotics*, 2006.
- [7] P.B. Wieber, "Viability and predictive control for safe locomotion," *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2008.
- [8] A. Herdt, N. Perrin and P.B. Wieber, "Walking without thinking about it," *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.190–195, 2010.
- [9] T. Aoyama, Y. Hasegawa, K. Sekiyama and T. Fukuda: "Stabilizing and Direction Control of Efficient 3-D Biped Walking Based on PDAC", *2009 IEEE/ASME transactions on mechatronics.*, pp.712-718, 2009.
- [10] T. Sugihara and Y. Nakamura: "Whole-body Cooperative COG Control through ZMP Manipulation for Humanoid Robots", *Proceedings of the 2nd International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines*, SaP-III-4, 2003.
- [11] Christine Chevallereau, J. W. Grizzle, Ching-Long Shih: "Asymptotically Stable Walking of a Five-Link Underactuated 3-D Bipedal Robot", *IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS*, VOL. 25, NO. 1, FEBRUARY 2009.