

足の滑り動作を考慮したヒューマノイドの時変運動次元変化に対応した二足歩行動力学モデル

前場 友秀 (岡山大学) 見浪 護 (岡山大学) 宋 薇 (上海大学) 矢納 陽 (岡山大学)

1. 緒言

安定な制御器の設計という観点でヒューマノイドロボットの取り扱いを考えると、厳密なヒューマノイドロボットのダイナミクスは強い非線形性や様々な干渉を持つため、リミットサイクルに収束するような安定な歩行を実現する制御器の設計は困難であり、複雑なモデルの作成は敬遠されることが多い。そのため、線形近似や倒立振り子モデルに置き換えたヒューマノイドロボットのモデルを作成し、ZMP などを利用して安定な二足歩行を実現している。

人間の歩行において、私達は踵やつま先による点接地と足全体による面接地を切り替えながら歩いている。しかしながら、単純化されたモデルは足を点として扱っているため面接地の状態を表現することは困難である。さらに、従来のダイナミクスは現実世界に存在する足の滑りを議論していないものがほとんどである。

そのため、本研究の目的は [1] と同様に厳密な歩容のダイナミクスを導出することである。しかし、[1] と異なるのは、Lagrange の方程式ではなく Newton-Euler 法 [3, 4] を利用している点である。また、[2] で提案されているダイナミクスを用いて、足の滑りを表現できるようにした。さらに、運動の次元を変化させることにより、面接地と点接地を区別した。

2. 二足歩行ダイナミクス

2.1 Newton-Euler 法による運動方程式の導出

本報では矢状面におけるヒューマノイドロボットの運動について議論する。図 1 にヒューマノイドロボットを構成するリンク・関節・関節角度の定義を示す。このモデルは一般的なマニピュレータに基づいており、支持脚から胴体・遊脚の方向に分岐する構造である。

Newton-Euler 法を用いて運動方程式を導出する手順として、まずは基準のリンクから先端のリンクに向かって正順計算を行い、各リンク間の位置・速度・加速度を求める必要がある。分岐後の Link-4 と Link-7 の重心の加速度 \ddot{s}_i ($i = 4, 7$) は以下の式で与えられる。

$$\ddot{s}_i = \ddot{p}_3 + \dot{\omega}_i \times {}^i\hat{s}_i + \omega_i \times (\omega_i \times {}^i\hat{s}_i) \quad (1)$$

ここで、 ${}^i\hat{s}_i$ は i 番目のリンクの重心位置、 R_i は回転行列、 \ddot{p}_3 は Link-3 の原点における加速度、 ω_i 、 $\dot{\omega}_i$ はリンクの角速度・角加速度を表している。ただし、左上に添え字がない変数は基準座標 Σ_W で表現されている。

次に、先端のリンクから基準のリンクに向かって逆順計算を行うことで、 i 番目のリンクにおける Newton の運動方程式 (式 (2)) と Euler の運動方程式 (式 (3))

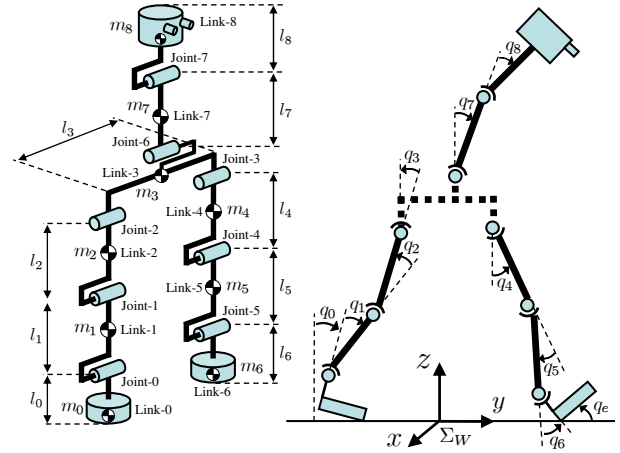


図 1 リンク・関節・関節角度の定義

が求まる。図 1 に示されるモデルを構成する関節は全て z_i 軸回りの回転運動を行うため、 i 番目のリンクの運動方程式は式 (4) となる。

$${}^i f_i = {}^i R_{i+1} {}^{i+1} f_{i+1} + m_i {}^i \ddot{s}_i \quad (2)$$

$${}^i n_i = {}^i R_{i+1} {}^{i+1} f_{i+1} + I_i {}^i \dot{\omega}_i + {}^i \omega_i \times (I_i {}^i \omega_i) + {}^i \hat{s}_i \times (m_i {}^i \ddot{s}_i) + {}^i \hat{p}_{i+1} \times ({}^i R_{i+1} {}^{i+1} f_{i+1}) \quad (3)$$

$$\tau_i = (e_{z_i})^T {}^i n_i \quad (4)$$

m_i は i 番目のリンクの質量、 I_i は慣性テンソル、 ${}^i \hat{p}_{i+1}$ は i 番目と $i+1$ 番目のリンクの原点の距離を示す。Link-3 に関しては Link-4, 7 から力とトルクが伝達されるため、運動方程式は以下の過程で導出できる。

$${}^3 f_3 = {}^3 R_4 {}^4 f_4 + {}^3 R_7 {}^7 f_7 + m_3 {}^3 \ddot{s}_3 \quad (5)$$

$${}^3 n_3 = {}^3 R_4 {}^4 n_4 + {}^3 R_7 {}^7 n_7 + I_3 {}^3 \dot{\omega}_3 + {}^3 \omega_3 \times (I_3 {}^3 \omega_3) + {}^3 \hat{s}_3 \times (m_3 {}^3 \ddot{s}_3) + {}^3 \hat{p}_4 \times ({}^3 R_4 {}^4 f_4) + {}^3 \hat{p}_7 \times ({}^3 R_7 {}^7 f_7) \quad (6)$$

$$\tau_3 = (e_{z_3})^T {}^3 n_3 \quad (7)$$

式 (4) と式 (7) を用いることで全リンクの運動方程式が表現されるため、ヒューマノイドロボットが片足で立っている状態は以下の式で与えられる。

$$M(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) + g(q) + D\dot{q} = \tau \quad (8)$$

ここで、 q は関節角度、 M は慣性行列、 h は遠心力・コリオリ力ベクトル、 g は重力項、 $D = \text{diag}[d_0, d_1, \dots, d_7]$ は粘性抵抗行列、 τ は入力トルクベクトルを示している。

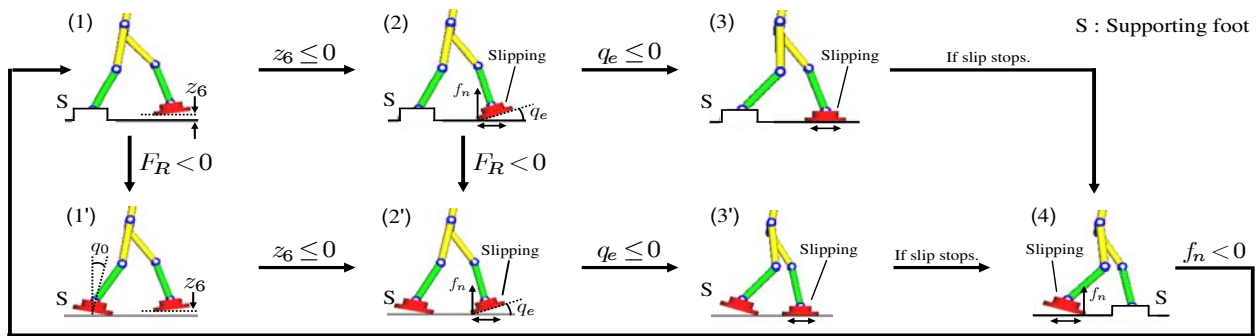


図2 歩容の状態遷移図

2.2 歩容の表現

歩行のモデルは、支持脚と遊脚の状態に応じて形や次元が変化する。しかし、以下に示すダイナミクスを用いることによって全ての歩容の表現が可能である。

$$\begin{bmatrix} M(q) & -(j_c^T - j_t^T K) & -j_r^T \\ \partial C_1 / \partial q^T & 0 & 0 \\ \partial C_2 / \partial q^T & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q} \\ f_n \\ \tau_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau - h(q, \dot{q}) - g(q) - D\dot{q} \\ -\dot{q}^T \left\{ \frac{\partial}{\partial q} \left(\frac{\partial C_1}{\partial q^T} \right) \right\} \dot{q} \\ -\dot{q}^T \left\{ \frac{\partial}{\partial q} \left(\frac{\partial C_2}{\partial q^T} \right) \right\} \dot{q} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式(9)は2つの拘束条件式と各リンクの運動方程式で構成され、遊脚に関する拘束条件は式(10)で表現される。

$$C(r(q)) = \begin{bmatrix} C_1(r_1(q)) \\ C_2(r_2(q)) \end{bmatrix} = 0 \quad (10)$$

C_1 は基準座標における踵・つま先の z 方向の並進運動に対する拘束($z = 0$)を表し、 $r_1(q)$ は拘束する点の座標である。 C_2 は地面に対するLink-6の角度 $q_e (= q_0 + q_1 + \dots + q_6)$ の拘束($q_e = 0$)を表現している。一方で、運動方程式は式(11)となる。

$$M(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) + g(q) + D\dot{q} = \tau + (j_c^T - j_t^T K)f_n + j_r^T \tau_n, \quad (11)$$

ここで、

$$j_c^T = \frac{\left(\frac{\partial C_1}{\partial q^T} \right)^T}{\left\| \frac{\partial C_1}{\partial r^T} \right\|}, \quad j_t^T = \left(\frac{\partial r}{\partial q^T} \right)^T \frac{\dot{r}}{\|\dot{r}\|}, \quad j_r^T = \frac{\left(\frac{\partial C_2}{\partial q^T} \right)^T}{\left\| \frac{\partial C_2}{\partial q^T} \right\|} \quad (12)$$

と定義した。また抗力 f_n とすべり摩擦力 f_t は直交し、 $f_t = Kf_n$ (K は比例定数)で求めると仮定した。

式(9)の第1行の関係を‘A’、第1,2行の関係を‘B’、第1,2,3行の関係を‘C’という記述式として定義する。そして、支持脚と遊脚の全ての接地パターンと変数、拘束条件の関係性を表1にまとめる。ただし本報では図2に示されるように、遊脚のみ滑りが生じるものとし、支持脚の滑りは考慮していない。また、両足が同時に地面から離れることはない。

表1 歩容・変数・拘束運動の関係

支持脚	遊脚	変数	拘束条件	状態	記述式
(静止)					
面	面	$q_a \in \mathbb{R}^n$	$C_1 = 0, C_2 = 0$	(3)	C
面	点	$q_a \in \mathbb{R}^n$	$C_1 = 0$	(2), (4)	B
面	なし	$q_a \in \mathbb{R}^n$	なし	(1)	A
点	面	$q_a \in \mathbb{R}^{n+1}$	$C_1 = 0, C_2 = 0$	(3')	C
点	点	$q_a \in \mathbb{R}^{n+1}$	$C_1 = 0$	(2')	B
点	なし	$q_a \in \mathbb{R}^{n+1}$	なし	(1')	A
(滑り)					
面	面	$q_b \in \mathbb{R}^{n+1}$	$C_1 = 0, C_2 = 0$		C
面	点	$q_b \in \mathbb{R}^{n+1}$	$C_1 = 0$		B
面	なし	$q_b \in \mathbb{R}^{n+1}$	なし		A
点	面	$q_b \in \mathbb{R}^{n+2}$	$C_1 = 0, C_2 = 0$		C
点	点	$q_b \in \mathbb{R}^{n+2}$	$C_1 = 0$		B
点	なし	$q_b \in \mathbb{R}^{n+2}$	なし		A

状態(1')のように、支持脚の足が点接地である場合、式(9)に含まれる変数 q は $q_a = [q_0, q_1, \dots, q_8]^T$ である。しかしながら、状態(1)のように支持脚の足が滑りのない状態で面接地をしている場合、その足は完全に運動を行わない。すなわち、Link-0の回転を表現する変数 q_0 は式(9)から排除できる。つまり、状態(1), (2), (3), (4)における変数は $q_a = [q_1, q_2, \dots, q_8]^T \in \mathbb{R}^n$ 、状態(1'), (2'), (3')における変数は $q_a = [q_0, q_1, \dots, q_8]^T \in \mathbb{R}^{n+1}$ となり、歩容に応じてダイナミクスの次元が変化する。支持脚が基準座標の y 軸方向に滑るときは、支持脚の位置を表す変数 y_0 が加わり、 $q_b = [y_0, q_1, q_2, \dots, q_8]^T \in \mathbb{R}^{n+1}$ または、 $q_b = [y_0, q_0, q_1, \dots, q_8]^T \in \mathbb{R}^{n+2}$ となる。

3. 歩容の状態遷移

図2は歩容の状態遷移の条件も示している。分岐のある箇所では、先に遷移条件が満たされた方に遷移する。ここで、歩容の切り替わりは完全に式(9)の解に依存しているという点が重要である。すなわち、歩容の変化は初期状態、入力トルク、地面の形状などに大きく影響され、歩容を予測することは不可能である。次

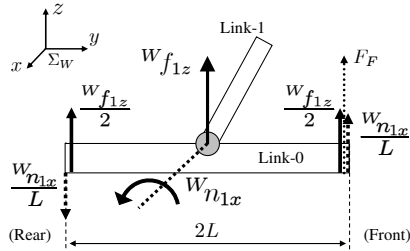


図3 Link-0に作用する力とトルク

節以降では、特記すべき遷移について述べる。

3.1 (1) から (1'), (2) から (2') への遷移

本節では面接地状態の支持脚の踵が地面から離れ、点接地となる遷移を考える。この判定には Link-1 の支点到に作用する力 1f_1 及びトルク 1n_1 を用いる。 1f_1 と 1n_1 は式 (2), (3) から導出できる。ここで、基準座標 Σ_W で考えた場合の力とトルクの z 軸成分と x 軸成分を ${}^Wf_{1z}$, ${}^Wn_{1x}$ とおき、単位ベクトル $e_z = [0, 0, 1]^T$, $e_x = [1, 0, 0]^T$ を用いると以下の式が成立する。

$${}^Wf_{1z} = (e_z)^T {}^Wf_1, \quad {}^Wn_{1x} = (e_x)^T {}^Wn_1 \quad (13)$$

式 (13) で導出された力とトルクは Link-0 に対して図 3 のように作用している。踵とつま先に作用する力の合力をそれぞれ F_R , F_F とおくと以下の式を得る。

$$F_R = \frac{{}^Wf_{1z}}{2} - \frac{{}^Wn_{1x}}{L}, \quad F_F = \frac{{}^Wf_{1z}}{2} + \frac{{}^Wn_{1x}}{L} \quad (14)$$

従って、 $F_R < 0$ のときに踵が地面から離れる。

3.2 地面と脚が衝突する場合

(1) から (2), (1') から (2'), (2) から (3), (2') から (3') の遷移においては、脚と地面との衝突を考慮する必要がある。そこで、[1] に記述されている手法を用いて衝突時のダイナミクスを導出する。拘束条件を含む運動方程式を積分することにより、衝突時の関係式が得られる。

$$M(q)\dot{q}^+ = M(q)\dot{q}^- + j_c^T I_c \quad (15)$$

$$M(q)\dot{q}^+ = M(q)\dot{q}^- + j_r^T I_r \quad (16)$$

式 (15) は踵と地面の基準座標 Σ_W における z 方向の衝突を表現している。同様に式 (16) は、 x 軸周りの回転によって生じるつま先と地面の衝突を表現している。 \dot{q}^+ , \dot{q}^- はそれぞれ衝突後、衝突前の角速度である。また I_c , I_r は力積であり、 $I_c = \lim_{t^- \rightarrow t^+} \int_{t^-}^{t^+} f_n dt$, $I_r = \lim_{t^- \rightarrow t^+} \int_{t^-}^{t^+} \tau_n dt$ として表現される。衝突後、以下の式を満たすようにロボットの運動が生じる。

$$\frac{\partial C_1}{\partial q} \dot{q}^+ = 0, \quad \frac{\partial C_2}{\partial q} \dot{q}^+ = 0 \quad (17)$$

表2 各リンクの物理パラメータ

Link Number	0	1	2	3	4
m_i [kg]	1.0	1.0	1.0	1.5	1.0
l_i [m]	0.5	2.0	2.0	1.5	2.0
r_i [m]	(1.0, 0.5)	0.2	0.2	0.2	0.2

Link Number	5	6	7	8
m_i [kg]	1.0	1.0	3.0	1.0
l_i [m]	2.0	0.5	2.0	0.5
r_i [m]	0.2	(0.5, 1.0)	0.2	0.5

上記の式をまとめると、衝突前後の関係を表現するダイナミクスは以下に示す行列として表される。

$$\begin{bmatrix} M(q) & -j_c^T \\ j_c & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}^+ \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M(q)\dot{q}^- \\ 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\begin{bmatrix} M(q) & -j_r^T \\ j_r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}^+ \\ I_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M(q)\dot{q}^- \\ 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

3.3 (3) から (4), (3') から (4) への遷移

すべり摩擦力 f_t によって、 y 軸方向(進行方向)の足の速度が ε ($\varepsilon = 0.01[m/s]$) 以下となったとき、足の滑りが止まったと見なし、状態 (4) に遷移する。

4. 歩行シミュレーション

各リンクは表 2 に示される物理パラメータ(質量 m_i [kg], 長さ l_i [m], 半径 r_i [m]) を持つ。一方で各関節には粘性抵抗 d_i [N·m·s/rad] が存在し、全ての関節において $d_i = 50.0$ とした。動作環境として、シミュレーションプログラムのコンパイルには“Borland C++ Builder Professional Ver. 5.0”, 3次元モデルの描画には“OpenGL”を利用した。また、シミュレーションにおけるサンプリング時間は 5.0×10^{-3} [sec] である。

4.1 Feed-forward 制御に基づいた入力トルク

一般的に、安定な歩行を実現するためには Feed-back 制御が頻繁に用いられる。しかしながら、本報では式 (20) 及び図 4 に示されるトルクを用いた Feed-forward 制御を行っている。これは、参照軌道の導出は困難でありロボットの特異点を回避しなければならなかったためである。

$$\tau = J_K^T f_K + J_H^T f_H \quad (20)$$

式 (20) において、 J_K は支持脚から遊脚の膝までのヤコビ行列、 $f_K = [f_{Kx}, f_{Ky}, f_{Kz}]^T$ は後足を前に踏み出すために使用される力である。一方で、 J_H は支持脚から頭部までのヤコビ行列、 $f_H = [f_{Hx}, f_{Hy}, f_{Hz}]^T$ は頭部と重心の位置が下がることを防止する力である。

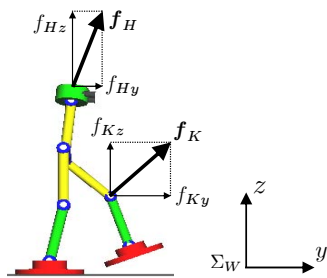


図4 二足歩行を生み出す2つの力

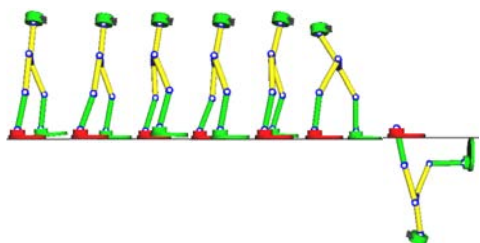


図5 シミュレーション結果のスクリーンショット

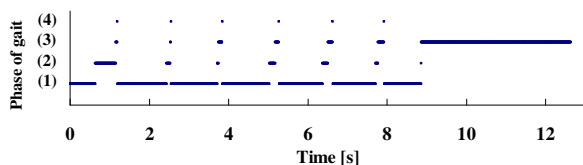


図6 歩容の変化

4.2 二足歩行の一例

摩擦力が $f_t = 0.5f_n$, f_K と f_H が式 (21) で与えられる環境において、歩行シミュレーションを行った。

$$f_K = \begin{bmatrix} 0 \\ 4.0 \cos \left\{ \frac{2.0\pi(t-T)}{2.9} \right\} \\ 40.0 \cos \left\{ \frac{2.0\pi(t-T)}{2.9} \right\} \end{bmatrix}, f_H = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.49 \\ 4.8 \end{bmatrix} \quad (21)$$

ここで、 t は現在時刻、 T は状態 (4) の開始時刻から次の状態 (4) の開始時刻までの時間を示している。すなわち、支持脚が右脚から左脚、または左脚から右脚に変わるまでの時間である。

図5-8 に示されるように6歩程度の歩行が実現されが、滑りの影響でロボットの体勢が崩れたため連続的な歩行は不可能であった。この時の滑りを発生する力と摩擦力の差 [N] と足の進行方向の速度 [m/s] を図9に示す。急激に滑りを止めるための力が弱まり、足の速度が0に収束していないことが確認された。その要因の1つが徐々に歩幅が小さくなったことである。

5. 結言

本報では足の滑りを含む二足歩行の歩容を7つに分割し、Newton-Euler法を用いて各歩容を表現するダイナミクスの導出を行った。ダイナミクスを構成する変

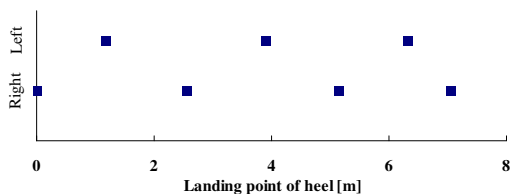


図7 踵の接地点と歩幅

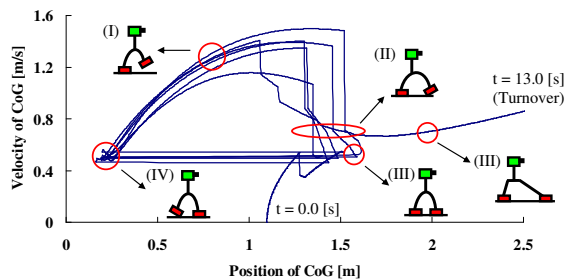


図8 歩容と歩行サイクルの関係性

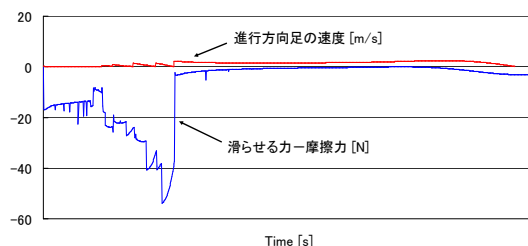


図9 足の滑りを生み出す要因

数の数は支持脚の接地状態に応じて変化し、歩容に応じてダイナミクスが適切に切り替わる。

数値シミュレーションの結果、ヒューマノイドロボットは数歩の歩行に成功したが、滑りによって体勢が崩れ、安定かつ連続的な歩行は実現できなかった。そのため、足の滑りを防止するような制御器の作成が安定な歩行を達成するための一手法として考えられる。

参考文献

- [1] Y. Huang, B. Chen, Q. Wang, K. Wei and L. Wang, "Energetic efficiency and stability of dynamic bipedal walking gaits with different step lengths," *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.4077-4082, 2010.
- [2] Y. Nakamura and K. Yamane, "Dynamics of Kinematic Chains with Discontinuous Changes of Constraints—Application to Human Figures that Move in Contact with the Environments—," *Journal of RSJ*, Vol.18, No.3, pp.435-443, 2000 (in Japanese).
- [3] J.Y.S. Luh, M.W. Walker and R.P.C. Paul, "On-Line Computational Scheme for Mechanical Manipulators," *ASME J. of DSME*, Vol.102, No.2, pp.69-76, 1980.
- [4] M.W. Walker and D.E. Orin, "Efficient Dynamic Computer Simulation of Robotic Mechanisms," *ASME J. of DSME*, Vol.104, pp.205-211, 1982.