

不整地における人型ロボットのバランス制御

Balance Control of Humanoid Robot on Uneven Ground

為ヶ谷 和也 (武蔵工大) 正 金宮 好和 (武蔵工大)
正 佐藤 大祐 (武蔵工大)

Kazuya Tamegaya, Musashi Institute of Technology

Yoshikazu Kanamiya, Musashi Institute of Technology, nenchev@rls.mes.musashi-tech.ac.jp

Daisuke Sato, Musashi Institute of Technology

A humanoid robot should be able to keep balance in the presence of various disturbances. We address here a class of disturbances that are due to uneven ground, when the usual ZMP methods are not applicable. The equation of motion has the form of that of an underactuated system, e.g. of a free-flying or a flexible base/link robot. We apply an inertial coupling based control method used in previous works for vibration suppression of flexible base robots. Simulations with a planar robot are presented for two types of disturbances: (i) rotating surface and (ii) jointed-toe foot model. In both cases, balance can be recovered in a stable and efficient way.

Key Words: Humanoid robot, Uneven ground, Inertial coupling balance control.

1 緒言

近年，本田技研工業の ASIMO に代表されるように，人型ロボットの性能が目覚しく向上している．そして，性能の向上に伴い，将来人間に代わる労働力として人間の生活環境など様々な環境での活躍が期待される．ただ，人間の生活環境は足場の变化や周りからの外乱など時々刻々と変化するため，人型ロボットはその変化に常に対応しなくてはならない．その一つとしてロボット自身の転倒を回避し周囲および自身への危険を取り除くことが必要である．ロボットが転倒を回避するためには，バランスを保ち姿勢を回復する必要がある，人間の動作を規範にする手法が広く用いられている [1]–[4]．

本論文では，人型ロボットが足部が回転するような凹凸のある不整地に立っており，足部と地面が点または線で接地している状態を想定する．この場合においてもバランスを保つために，反動零空間法，振動抑制制御を基にした制御について述べていく [5]．

2 回転する足場でのバランス制御

2.1 シミュレーションモデル

足部が自由な平面人型ロボットモデルを以下に示す．ただし，足部の Z_0 方向への並進移動は無視している．

Fig. 1 におけるモデルの運動方程式は以下ようになる．

$$\begin{bmatrix} \mathbf{H}_f & \mathbf{H}_{fl} \\ \mathbf{H}_{fl}^T & \mathbf{H}_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{v}}_f \\ \ddot{\boldsymbol{\theta}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{c}_f \\ \mathbf{c}_l \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{g}_f \\ \mathbf{g}_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \boldsymbol{\tau} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$\mathbf{H}_l \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$: リンク部慣性行列
 $\mathbf{H}_f \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$: 足部慣性行列
 $\mathbf{H}_{fl} \in \mathbb{R}^{2 \times 3}$: 干渉慣性行列

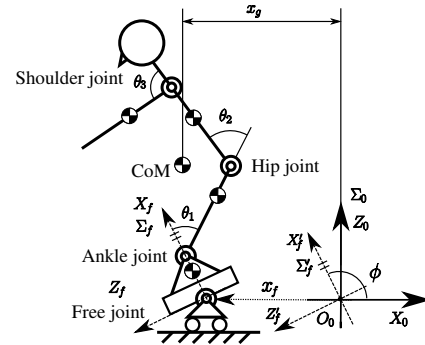


Fig. 1: Model with rotation and sliding surface.

$\mathbf{c}_l \in \mathbb{R}^3$: リンク部遠心力，コリオリ力項
 $\mathbf{c}_f \in \mathbb{R}^2$: 足部遠心力，コリオリ力項
 $\mathbf{g}_l \in \mathbb{R}^3$: リンク部重力項
 $\mathbf{g}_f \in \mathbb{R}^2$: 足部重力項
 $\boldsymbol{\tau} \in \mathbb{R}^3$: リンク部関節トルク
 $\boldsymbol{\theta} \in \mathbb{R}^3$: リンク部関節角度
 $\boldsymbol{\nu}_f \in \mathbb{R}^2$: 足部並進速度および角速度

ここで， \mathbf{H}_f , \mathbf{H}_{fl} , \mathbf{c}_f , \mathbf{g}_f , $\boldsymbol{\nu}_f$ は以下のようにになっている．

$$\mathbf{H}_f = \begin{bmatrix} h_{f11} & h_{f12} \\ h_{f21} & h_{f22} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{H}_{fl} = \begin{bmatrix} h_{fl1} \\ h_{fl2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{fl11} & h_{fl12} & h_{fl13} \\ h_{fl21} & h_{fl22} & h_{fl23} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{c}_f = [c_{f1} \quad c_{f2}]^T \quad (4)$$

$$\mathbf{g}_f = [g_{f1} \quad g_{f2}]^T \quad (5)$$

$$\boldsymbol{\nu}_f = [\dot{x}_f \quad \dot{\phi}]^T \quad (6)$$

式 (6)–(5) の値を用いると重心の X_0 方向加速度 \ddot{x}_g と足部の X_0 方向加速度 \ddot{x}_f の関係は以下のように表せる．

$$h_{f11}\ddot{x}_g = h_{f11}\ddot{x}_f + h_{f12}\ddot{\phi} + h_{f1l}\ddot{\theta} + c_{f1} + g_{f1} \quad (7)$$

さらに，Fig. 2 のような足部が X_0 方向に並進移動できないモデルを考える．Table 1 は各リンクのパラメータを表している．

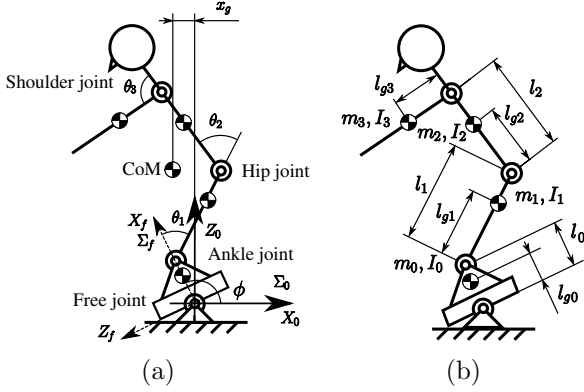


Fig. 2: Model with rotation surface.

Table 1: Link data (rotation surface).

	m [kg]	l [m]	l_g [m]	I [kg·m ²]
Foot (0)	0.616	0.0092	0.0281	0.000518
Leg (1)	1.498	0.2000	0.1001	0.002580
Body (2)	3.386	0.1450	0.1001	0.009723
Arm (3)	1.575	0.2170	0.0529	0.006609

Fig. 2 では式 (1) において $\ddot{x}_f = 0$ となる．そこで，式 (7) の関係を用いて座標変換を行い， \ddot{x}_g を運動方程式に組み込んだ．座標変換後の運動方程式を以下に示す．

$$\begin{bmatrix} H_g & H_{fl} \\ H_{lg} & H_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\nu}_g \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_f \\ c_l \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_f \\ g_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau \end{bmatrix} \quad (8)$$

$H_g \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$: 重心と足部の慣性行列
 $H_{lg} \in \mathbb{R}^{3 \times 2}$: 重心，足部とリンク部の干渉慣性行列
 $\nu_g \in \mathbb{R}^2$: 重心速度および足部角速度

ここで， H_g ， H_{lg} ， ν_g は以下となっている．

$$H_g = \begin{bmatrix} -h_{f11} & h_{f12} \\ 0 & h_{f22} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$H_{lg} = [0 \quad h_{fl2}^T] \quad (10)$$

$$\nu_g = [\dot{x}_g \quad \dot{\phi}]^T \quad (11)$$

2.2 制御式

重心位置と足部角度の PD 制御式を以下のように与えた．

$$\dot{\nu}_{gref} = \begin{bmatrix} \ddot{x}_{gref} \\ \ddot{\phi}_{ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{px}(x_{gd} - x_g) - k_{dx}\dot{x}_g \\ k_{p\phi}(\phi_d - \phi) - k_{d\phi}\dot{\phi} \end{bmatrix} \quad (12)$$

ただし， k_{px} ， k_{dx} ， $k_{p\phi}$ ， $k_{d\phi}$ はそれぞれフィードバックゲインであり， d は目標値を意味する．

また，式 (8) のから $\ddot{\theta}$ と $\dot{\nu}_g$ の関係が求まる．

$$\ddot{\theta} = -H_{fl}^+(H_g\dot{\nu}_g + c_f + g_f) - (I - H_{fl}^+H_{fl})\xi \quad (13)$$

ただし， H_{fl}^+ は H_{fl} の擬似逆行列， $(I - H_{fl}^+H_{fl})$ は H_{fl} の零空間射影行列であり， I は単位行列， ξ は任意のベクトルを表す．

式 (13) において $\xi = 0$ とし，制御に用いる関節角加速度 $\ddot{\theta}_{ref}$ を求めた．

$$\ddot{\theta}_{ref} = -H_{fl}^+(\tilde{H}_g\dot{\nu}_{gref} + c_f + g_f) - K_{d\theta}\dot{\theta} \quad (14)$$

ただし， $K_{d\theta}\dot{\theta}$ はセルフモーションを抑制するジョイントダンパ項であり， \tilde{H}_g は以下のように与えられる．

$$\tilde{H}_g = \begin{bmatrix} -h_{f11} & 0 \\ 0 & h_{f22} \end{bmatrix} \quad (15)$$

式 (9) において h_{g12} は x_g に対する ϕ の干渉を表しているが， \tilde{H}_g では x_g と ϕ の干渉をなくし独立させた．

さらに，式 (8)，(14) より動力学補償によって各ジョイントに与えるトルク τ_c を求めると，

$$\tau_c = (H_{lg} - H_lH_{fl}^+\tilde{H}_g)\dot{\nu}_{gref} + (c_l - H_lH_{fl}^+c_f) + (g_l - H_lH_{fl}^+g_f) - H_lH_{fl}^+K_{d\theta}\dot{\theta} \quad (16)$$

となる．

2.3 シミュレーション

直立した状態から足場の角度を $\phi = 90.5$ deg に傾け，その状態から平衡点である $\phi_d = 90$ deg，重心位置 $x_{gd} = 0$ m となるようにフィードバック制御を行った．

フィードバックゲインは $k_{px} = 1500$ s⁻²， $k_{dx} = 200$ s⁻¹， $k_{p\phi} = 900$ s⁻²， $k_{d\phi} = 450$ s⁻¹， $K_{d\theta} = \text{diag}[1, 1, 1]$ s⁻¹，サンプリングタイム $dt = 0.002$ s とした．

2.4 結果と考察

シミュレーションの結果を Fig. 3 に示す．

Fig. 3 の (a) は重心位置 x_g ，(b) は足部角度 ϕ を示しており，共に PD 制御により目標値に収束し，安定な姿勢になっていることがわかる．さらに，ジョイントダンパ項の働きにより (c) の関節角速度 $\dot{\theta}$ が各リンクで 0 rad/s となり，セルフモーションが抑制されて各リンクが静止することが確認できる．また，セルフモーションが抑制されたことで各関節のトルクも一定になったことがわかる．以上より，回転する足場でバランスを取り，静止することが可能となった．Fig. 4 のスナップショットからその様子を見ることができる．

3 踵の落下による足部角度の変化に対するバランス制御

人型ロボットが不整地を歩く際，接地点が足裏の中心から大きくずれている場合には，足部を水平に保つために大きな干渉が必要になる．よって，このような場合，前節で

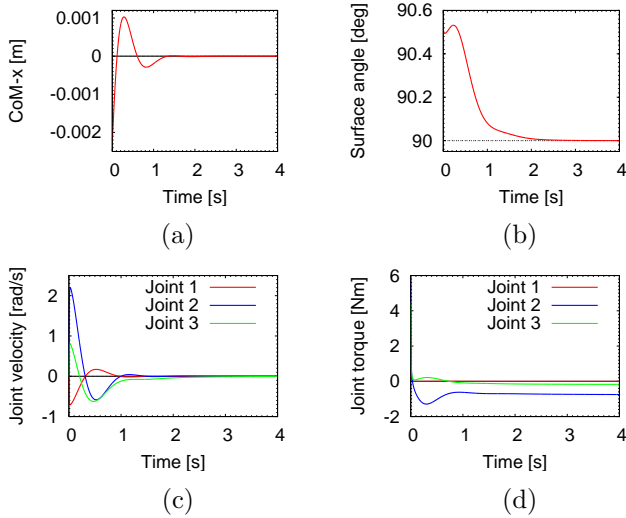


Fig. 3: Results of balance control (rotation surface).

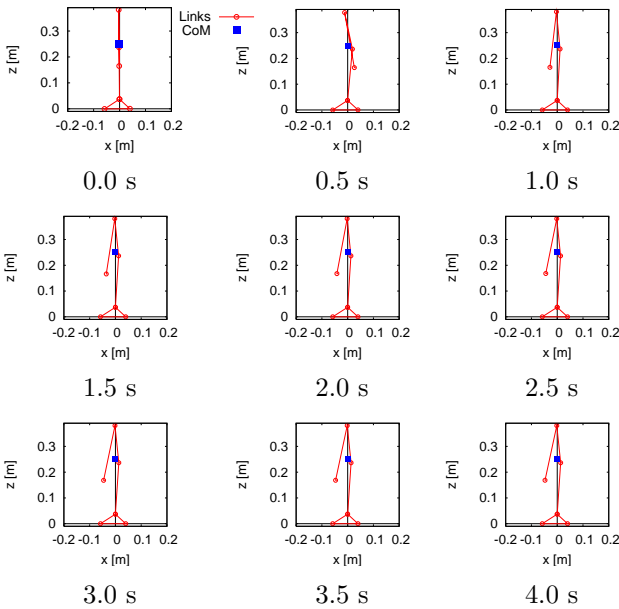


Fig. 4: Motion snapshots (rotation surface).

シミュレーションを行った制御では、各ジョイントに発生させるトルクが過大になり実機の限界を超え対応できなくなる。すると、足部に発生させるモーメントが不足するため、足部は落下してしまう。そこで本節では、足部角度を制御せず重心のみを制御し、バランスを保つ制御について述べていく。

また、歩行中という仮定を考慮すると、凹凸を踏む際の状態は膝を曲げた状態が大半であるが、エネルギー的に見て膝を伸ばした状態の方が効率は良い。よって、バランスを制御すると同時に膝を伸ばす制御も行った。

3.1 シミュレーションモデル

モデルは Fig. 2 より、肩関節を膝関節に置き換え、Fig. 5 のように使用した。足部と地面の接触点は回転ジョイントとみなし、足部リンクの質量は無視している。また、今回の制御では遊脚は考えず片足で立っている状態とする。足

部角度は制御せず、一定の値を超えると足部が固定される。Table 2 は各リンクのパラメータを表す。

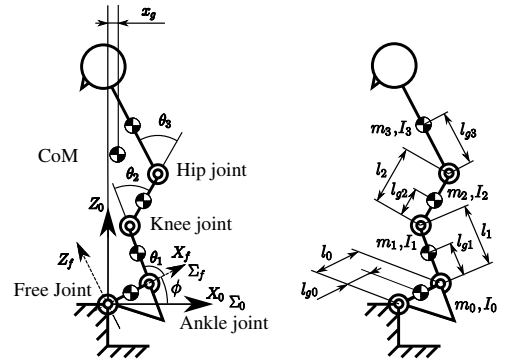


Fig. 5: Model with jointed toe.

Table 2: Link data (jointed toe).

	m [kg]	l [m]	l_g [m]	I [kg·m ²]
Foot (0)	0.308	0.0690	0.0639	0.000259
Tibia (1)	0.286	0.1000	0.0571	0.000286
Thigh (2)	0.436	0.1000	0.0281	0.000232
Body (3)	4.961	0.1450	0.0984	0.016333

3.2 制御式

運動方程式は式 (8) と同じであるが足部角度 ϕ を制御する必要がないため制御式は異なる。まず、膝関節 θ_2 は曲がった膝を伸ばす制御を行う。膝の PD 制御式は以下のよう

$$\ddot{\theta}_{2ref} = k_{p\theta 2}(\theta_{2d} - \theta_2) - k_{d\theta 2}\dot{\theta}_2 \quad (17)$$

ただし、 $k_{p\theta 2}$, $k_{d\theta 2}$ はフィードバックゲインである。

さらに、足首関節 θ_1 と腰関節 θ_3 によって重心の制御を行う。制御式は式 (13) をもとにし、以下のように与えた。

$$\begin{aligned} \ddot{\theta}_{13ref} = & -\mathbf{h}_{gl}^+(\ddot{x}_{gref} + \mathbf{h}_{fl12}\ddot{\theta}_2 + c_{f1} + g_{f1}) \\ & -\mathbf{K}_{d\theta 13}\dot{\theta}_{13} \end{aligned} \quad (18)$$

ただし、 $\theta_{13} = [\theta_1 \ \theta_3]^T$, $\mathbf{h}_{gl} = [h_{fl11} \ h_{fl13}]$ である。また、 \mathbf{h}_{gl}^+ は \mathbf{h}_{gl} の擬似逆行列であり、 $\mathbf{K}_{d\theta 13}\dot{\theta}_{13}$ はジョイントダンパ項である。重心の制御は PD 制御によって行い、制御式は以下ようになる。

$$\ddot{x}_{gref} = k_{px}(x_{gd} - x_g) - k_{dx}\dot{x}_g \quad (19)$$

ただし、 k_{px} , k_{dx} はフィードバックゲインである。

3.3 シミュレーション

Fig. 5 において、膝関節 θ_2 を 10 deg 曲げ、つま先を接地させる。足部が 10 deg 下降すると足部が固定されるように設定し、重心位置 $x_{gd} = 0$ m となるようにフィードバック制御を行った。

フィードバックゲインは $k_{px} = 60 \text{ s}^{-2}$, $k_{dx} = 20 \text{ s}^{-1}$, $k_{p\theta 2} = 100 \text{ s}^{-2}$, $k_{d\theta 2} = 60 \text{ s}^{-1}$, $\mathbf{K}_{d\theta 13} = \text{diag}[5, 5] \text{ s}^{-1}$, サンプルタイム $dt = 0.002 \text{ s}$ とした。

3.4 結果と考察

シミュレーションの結果を Fig. 6 に示す．

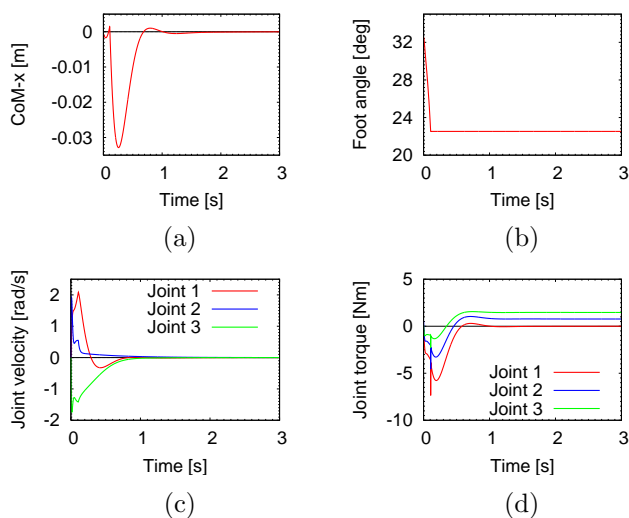


Fig. 6: Results of balance control (jointed toe).

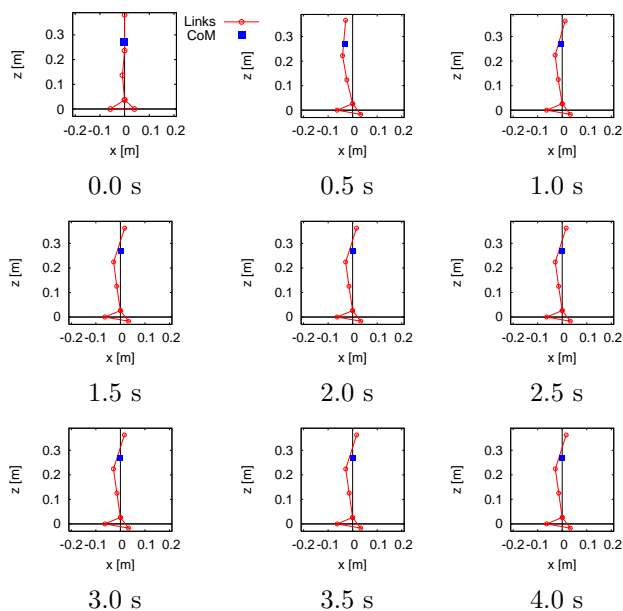


Fig. 7: Motion snapshots (jointed toe).

Fig. 6 の (b) は足部角度 ϕ を示しており，放物線的に変化し 10 deg 下降した後一定となったことがわかる．一方，(a) は重心位置 x_g であり，足部の着地によってずれを生じたが，その後フードバック制御により 0 m に収束した．これより，バランスの制御が可能となったと言える．次に，(c) はジョイントの角速度 $\dot{\theta}$ であり，足部が地面に衝突した際に大きく変化しているが，その後 0 rad/s に収束しセルフモーションが抑制されている．また，(d) よりトルクが足部の着地の際増大したが，その後 2 N·m 程度の値で一定となった．Fig. 7 のスナップショットからモデルの動きを見ることができ，膝関節が伸びた ($\theta_2 = 0$ deg) 状態となっているのがわかる．以上より，バランスを制御し膝を伸ばすことに成功した．

4 結言

不整地において人型ロボットの足部角度が変化した場合において転倒を防ぐため，二つのパターンのモデルを考え，それぞれの場合において姿勢を回復しバランスを保つ制御を考えていった．

回転する足場でのバランス制御については，擬似逆行列によって重心位置と足部角度を同時に制御し，足部にモーメントを発生させないことに成功した．さらに，仮想ジョイントダンパ項を追加した上で，重心位置と足部角度の干渉を発生させることで，フィードバックとセルフモーション抑制の両立を可能にした．

踵の落下における人型ロボットについては上述した制御法を変更し，重心位置と膝の角度を制御することで，バランスの確保とエネルギー的に効率の良い姿勢をとれるようにした．

文 献

- [1] 田宮 幸春, 稲葉 雅幸, 井上 博允: “人間型ロボットの片足立脚動作における全身を用いた実時間動バランス補償”, 日本ロボット学会誌, Vol. 17, No. 2, pp. 268–274, 1999.
- [2] 中山 学之, 木村 英紀: “姿勢反射を組み合わせた制御系によるロボットのバランス制御”, 日本ロボット学会学術講演会, 1B28, 2003.
- [3] Muhammad Abdallah and Ambarish Goswami, “A Biomechanically Motivated Two-Phase Strategy for Biped Upright Balance Control,” *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Barcelona, Spain, Apr. 18–22, 2005, pp. 1996–2001.
- [4] 工藤 俊亮, 幸村 琢, 池内 克史: “人間動作の観察に基づく全身動作を用いたバランス保持のモデル化”, 画像の認識・理解シンポジウム, IS3–111, 2005.
- [5] Akinori Nishio and Dragomir N. Nenchev, “Balance Control of a Humanoid Robot Based on the Reaction Null Space Method,” *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intell. Robots Syst.*, Beijing, China, Oct. 9–5, 2006, pp. 1996–2001.