

半球足を持つ二足歩行ロボットの 倒立振り子モデルにおけるバランス制御

○丸林央樹（九州大学） 舩屋 賢（九州大学） 杉原知道（大阪大学） 田原健二（九州大学）

1. 緒言

これまで、人間の住環境での稼働を目的とした二足歩行ロボットの研究・開発が行われているが [1], 移動のエネルギー効率人は人のそれにはまだ及ばない. 一方で, 車輪を用いた移動方法は既に広く利用されており, 二足歩行と比較するとエネルギー効率は高い. しかし, 車輪移動は段差がある環境では可動範囲が制限される場合がある. 足先に車輪機構を用いた脚車輪ロボット [2, 3] など開発されているが, それらを用いた歩容生成については十分に検証されていない. 円弧型足先を有する受動歩行ロボット [4] も提案されており, 転がりを利用することで平面足と比較して移動時のエネルギー効率が低いとされているが, 歩行中のみに特化しており, 歩行の開始や停止, および両足支持期や立位での安定性は議論されていない.

筆者等はこれまで, 足先に半球足を有する二足歩行ロボットを提案してきた (図 1 参照) [5, 6]. 提案機構では, 半球足による転がり運動により, 足首トルクに相当する力を得ることができる. また, 半球足を能動的に捻転させることにより, 半球部分を用いた車輪移動を行うことができ, 半球足を用いた高効率な二足歩行と, 半球足の能動捻転を用いた車輪移動を一つの機構で実現することができる. しかし, 半球足を持つロボットのダイナミクスは, 劣駆動自由度や転がり拘束などにより複雑化し, 運動の見通しが悪く制御系設計が難しい.

本稿では, 制御系設計の足掛かりとして, 新たに転がりで発生するモーメントのつり合いを考慮した, 全身ダイナミクスの近似モデルとして重心運動モデルを提案する. 実際, この提案モデルに基づいて設計を行ったロボットのバランス制御器を示し, その有効性を検証する. また, 提案モデルの重心への仮想入力から, 実際のロボットの入力を構築する場合, 重心ヤコビアンを用いた各関節の入力トルクへの変換する必要がある. このため, 半球足を持つ二足歩行ロボットにおける転がり接触拘束を埋め込んだ重心ヤコビアンを杉原らの方法 [7] を基に新たに導出する.

2. 半球足を持つ二足歩行ロボットの倒立振り子モデル

本節ではロボットが両足の水平位置が異なる場合でのバランス制御を考え, 二脚接地した倒立振り子モデルを構築する. 両足支持期の二脚倒立振り子モデルを図 2 に表す. 両足の水平位置が重なっている場合, もしくは片足支持の場合については, 各足先にかかる垂直反力の比 a を 1 または 0 として考慮する. a は本来 ZMP に基づいて決定するべきではあるが, 本稿は重心位置に基づいて近似的に決定した. 二脚接地倒立振り子モデル

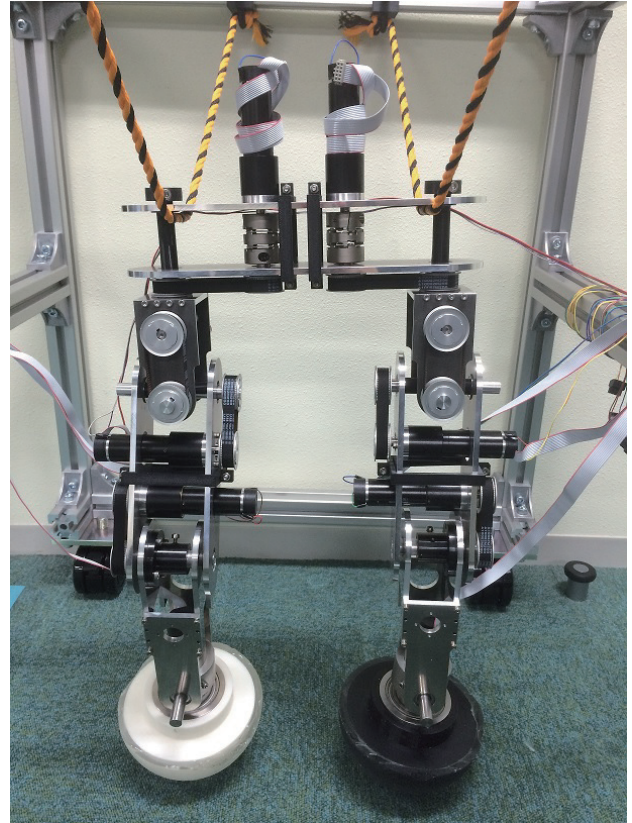


図 1 半球足を持つ二足歩行ロボット

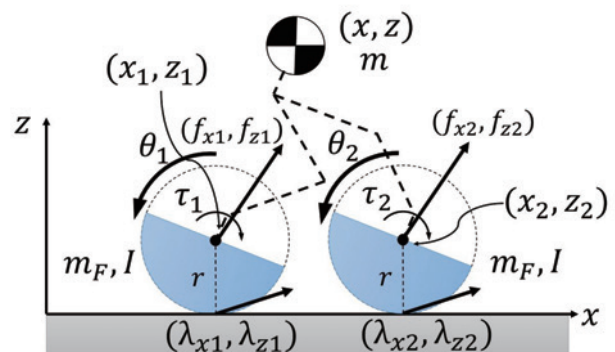


図 2 二脚接地倒立振り子モデル

ルにおける重心と各足先の半円の運動方程式より状態方程式を導出する.

$$\begin{cases} m\ddot{x} = f_x \\ m(\ddot{z} + g) = f_z \\ -m_F r \ddot{\theta}_i = -f_{x_i} + \lambda_{x_i} \\ I \ddot{\theta}_i = r \lambda_{x_i} + \tau_i + \tau_{i0} \end{cases}, \quad i = 1, 2. \quad (1)$$

ただし $i = 1, 2$ は各足を意味し, θ_i は各足の転がり角度, τ_{i0} は各足先中心への入力トルク, τ_i は重心の運動により各足先中心働くトルク, f_{x_i} は重心の運動により各足先中心に働く力, λ_{x_i} は各足先の接触拘束力である. また, 力とトルクのつり合いは次式で表される.

$$\begin{cases} f_x = f_{x1} + f_{x2} \\ f_z = a f_{z1} + (1-a) f_{z2} \\ \tau_i = (z - z_i) f_{x_i} - (x - x_i) f_{z_i} \end{cases}, \quad i = 1, 2. \quad (2)$$

また, 半球部分の転がり拘束は, 次式で表される.

$$\begin{cases} x_i = x_{i0} - r\theta_i \\ z_i = r \end{cases}, \quad i = 1, 2 \quad (3)$$

ただし, x_{i0} は各足先の慣性系から見た初期位置である. ここで $I_F = I + m_F r^2$ としている. また, 本稿では z_i を一定 ($z_i = \text{const.}$) としており, このとき $\dot{z}_i = 0$ かつ $f_{z_i} = mg$ となり, 状態方程式は以下のように表される.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}\mathbf{f} + \mathbf{d} \quad (4)$$

ここで

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x & \theta_1 & \theta_2 & \dot{x} & \dot{\theta}_1 & \dot{\theta}_2 \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{amg}{I_F} & -\frac{amgr}{I_F} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{(1-a)mg}{I_F} & 0 & -\frac{(1-a)mgr}{I_F} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{1}{m} & \frac{z}{I_F} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{m} & 0 & \frac{z}{I_F} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{I_F} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{I_F} \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

$$\mathbf{f} = \begin{bmatrix} f_{x1} & f_{x2} & \tau_{10} & \tau_{20} \end{bmatrix}^T \quad (8)$$

$$\mathbf{d} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{amg}{I_F} x_{10} & -\frac{(1-a)mg}{I_F} x_{20} \end{bmatrix}^T \quad (9)$$

であり, \mathbf{d} は, ロボットの初期足先位置によって決まる定数ベクトルである.

3. 転がり拘束を含む重心ヤコビアンを用いた関節トルク生成

3.1 仮想仕事の原理に基づく関節トルク生成

脚型ロボットは, 慣性系に固定された点が存在しないため, 現実には慣性座標系から質量中心 (重心) へ

直接的な入力はできない. 重心にかかる力を関節トルクにより生成する方法として, 仮想仕事の原理に基づく方法がある. これは, 重心ヤコビアンを用いて, 以下のように重心にかかる力を関節トルク $\boldsymbol{\tau}$ に変換する方法である.

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{J}_G^T \mathbf{f} \quad (10)$$

ただし, \mathbf{J}_G は重心ヤコビアンであり, 次式を満たす.

$$\dot{\mathbf{p}}_G = \mathbf{J}_G \dot{\mathbf{q}} \quad (11)$$

$$\mathbf{J}_G = \frac{\partial \mathbf{p}_G}{\partial \mathbf{q}} \quad (12)$$

ここで, \mathbf{q} はロボットの関節変位ベクトル, \mathbf{p}_G は慣性系に対する重心位置である. また, 慣性系から見た重心速度 $\dot{\mathbf{p}}_G$ は次式で表される.

$$\dot{\mathbf{p}}_G = \dot{\mathbf{p}}_0 - \mathbf{R}_0^0 \mathbf{p}_G \times \boldsymbol{\omega}_0 + \mathbf{R}_0^0 \dot{\mathbf{p}}_G \quad (13)$$

ただし, $\dot{\mathbf{p}}_0$, \mathbf{R}_0 , $\boldsymbol{\omega}_0$ はそれぞれの慣性系に対する胴体系の速度, 姿勢, 角速度である. また, ${}^0\mathbf{p}_G$, ${}^0\dot{\mathbf{p}}_G$ はそれぞれ胴体系に対する重心位置と重心速度であり, ${}^0\mathbf{p}_G$ は \mathbf{q} の関数として, ${}^0\dot{\mathbf{p}}_G$ は \mathbf{q} と $\dot{\mathbf{q}}$ の関数として表される.

本研究においても, 上記のように重心ヤコビアンを用いて関節トルクを生成する. このとき, \mathbf{J}_G を求める必要があるが, $\dot{\mathbf{p}}_G$ は関節角速度 $\dot{\mathbf{q}}$ に加えて, 慣性系から見た胴体系の速度 \mathbf{p}_0 および角速度 $\boldsymbol{\omega}_0$ の関数となる. このため, これらを $\dot{\mathbf{q}}$ の関数として表す必要がある.

3.2 転がり拘束を含む重心ヤコビアンの導出

杉原らは, 支持足は地面に対して固定されているという仮定のもとで重心ヤコビアンを計算する方法提案した [7]. 慣性系に対する支持足の速度 \mathbf{p}_{F_i} , 角速度 $\boldsymbol{\omega}_{F_i}$ を用いて, 慣性系から見た胴体系の速度 $\dot{\mathbf{p}}_0$, 角速度 $\boldsymbol{\omega}_0$ は次式のように表される.

$$\dot{\mathbf{p}}_0 = \dot{\mathbf{p}}_{F_i} - \mathbf{R}_0 ({}^0\mathbf{p}_{F_i} \times {}^0\boldsymbol{\omega}_{F_i} + {}^0\dot{\mathbf{p}}_{F_i}) \quad (14)$$

$$\boldsymbol{\omega}_0 = \boldsymbol{\omega}_{F_i} - \mathbf{R}_0^0 \boldsymbol{\omega}_{F_i} \quad (15)$$

ただし, ${}^0\mathbf{p}_{F_i}$, ${}^0\dot{\mathbf{p}}_{F_i}$, ${}^0\boldsymbol{\omega}_{F_i}$ は胴体系に対する支持足の位置, 速度, 角速度であり, $\dot{\mathbf{p}}_{F_i}, \boldsymbol{\omega}_{F_i}$ は慣性系から見た足先の速度, 角速度である. これらは慣性センサ, 各関節のエンコーダ出力から計算可能である. 式 (14), (15) を式 (13) に代入することにより, 重心速度は関節角度で表すことができる.

本研究では, 同じアプローチの元で, 足先が地面に対して転がり接触を行う場合の重心ヤコビアンを導出する. 半球足の転がりを考えた場合, $\dot{\mathbf{p}}_{F_i}$, $\boldsymbol{\omega}_{F_i}$ はそれぞれ次式で表される.

$$\dot{\mathbf{p}}_{F_i} = \begin{bmatrix} -r\dot{\theta}_i & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (16)$$

$$\boldsymbol{\omega}_{F_i} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dot{\theta}_i \end{bmatrix}^T \quad (17)$$

ここで、式 (14) を式 (13) に代入すると、

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{p}}_G &= \dot{\mathbf{p}}_{Fi} - \mathbf{R}_0 ({}^0\mathbf{p}_{Fi} \times {}^0\boldsymbol{\omega}_{Fi} + {}^0\dot{\mathbf{p}}_{Fi}) \\ &\quad - \mathbf{R}_0 {}^0\mathbf{p}_G \times \boldsymbol{\omega}_0 + \mathbf{R}_0 {}^0\dot{\mathbf{p}}_G \\ &= \left(\mathbf{J}_F - \mathbf{R}_0 ({}^0\mathbf{J}_G - {}^0\mathbf{p}_{Fi} \times {}^0\mathbf{J}_{\omega Fi} \right. \\ &\quad \left. - {}^0\mathbf{J}_{Fi} - {}^0\mathbf{p}_G \times {}^0\mathbf{J}_{\omega 0}) \right) \dot{\mathbf{q}}\end{aligned}\quad (18)$$

ただし、 \mathbf{J}_F は慣性系に対する足先速度のヤコビアン、 ${}^0\mathbf{J}_G$ は胴体系に対する相対的な重心ヤコビアン、 ${}^0\mathbf{J}_{Fi}$ 、 ${}^0\mathbf{J}_{\omega Fi}$ は胴体系に対する足先速度、足先角速度のヤコビアン、 ${}^0\mathbf{J}_{\omega 0}$ は胴体系に対する胴体の角速度のヤコビアンである。よって、 \mathbf{J}_G は以下のように表すことができる。

$$\mathbf{J}_G = \mathbf{J}_F - \mathbf{R}_0 ({}^0\mathbf{J}_G - {}^0\mathbf{p}_{Fi} \times {}^0\mathbf{J}_{\omega Fi} - {}^0\mathbf{J}_{Fi} - {}^0\mathbf{p}_G \times {}^0\mathbf{J}_{\omega 0})\quad (19)$$

4. 状態フィードバックによるバランス制御

本研究では、重心にかかる力 f_x を以下のように設計することで重心位置制御を行う。

$$f_x = -K_P x - K_D \dot{x}\quad (20)$$

ここで K_P 、 K_D は、それぞれ重心制御器における P ゲインと D ゲインである。次に足先角度の制御であるが、片足支持期と両足支持期において、異なる制御器を採用した。まず、片足支持期の場合、以下のような PD 制御を用いた。

$$\tau_0 = -K_\theta \theta - K_\omega \dot{\theta}\quad (21)$$

ただし、 K_θ および K_ω は、それぞれ片足支持期における足先角度制御器における P ゲインと D ゲインである。一方、両足支持期の場合、次の速度制御器を用いた。

$$\tau_{i0} = -K_{\omega_i} \dot{\theta}_i, \quad i = 1, 2\quad (22)$$

ただし、 K_{ω_i} は速度ゲインである。

5. シミュレーション

本稿では、片足支持期および両足支持期の二通りについて、バランス制御の有効性を確認するためのシミュレーションを行った。

5.1 片足支持期における倒立振り子モデルのシミュレーション結果

片足支持期の倒立振り子モデルにおけるシミュレーション結果を図 3, 4 に示す。図 3 は重心位置、図 4 は足先半球の角度の時間変化を示している。ここで、各目標値はゼロ、各ゲインは $K_P = 500$ 、 $K_D = 100$ 、 $K_\theta = 100$ 、 $K_\omega = 10$ に設定した。

シミュレーション結果より、重心位置および足先角度共に十分な速さで収束していることから、バランス制御が行えていると言える。しかし、足先の回転トルク入力 τ_0 をゼロとした場合、ロボットの重心位置、足先角度ともに発散し制御不可となった。すなわち、片足支持でバランス安定化を行うためには、足先半球の回転運動について、何らかの目標角度の設定が必要である。

5.2 両足支持期における倒立振り子モデルのシミュレーション結果

両足支持期の倒立振り子モデルにおけるシミュレーション結果を図 5, 6 に示す。図 5 は重心位置、図 6 は各足先半球の角度の時間変化を示している。ここで、各目標値は片足支持期と同様にゼロとし、各ゲインは $K_P = 2000$ 、 $K_D = 200$ 、 $K_{\theta_i} = 1$ に設定した。

シミュレーション結果により、重心位置は目標へ収束している。また、足先角度は半球の転がり得る角度の範囲内に収まっており、両足支持期には足先半球の目標角度を必要とせずバランス制御が実現していると言える。

6. 結言

半球足を持つ倒立振り子モデルを提案し、片足支持期、両足支持期それぞれにおけるバランス制御の有効性を数値シミュレーションにより確認した。また、半球足の転がり拘束を含む重心ヤコビアンの導出を行った。今後、導出した重心ヤコビアンを用いた全身フルダイナミクスモデルと提案モデルの比較を行い、導出したヤコビアンの有効性、提案モデルの妥当性を検証する。また、バランス制御だけでなく、歩容生成手法や軌道生成手法を提案していく。

参考文献

- [1] 松井俊浩: “人型ロボットはヒトに近づけるか”, 日本ロボット学会誌, vol. 15, no. 7, pp. 961–963, 1997.
- [2] 古賀昌史: “人間共生ロボット EMIEW2 の開発”, 日本機械学会誌, vol. 112, No. 1085, p. 314, 2009.
- [3] R. Nakamura and A. Amino: “Perfect tracking control using a phase plane for a wheeled inverted pendulum under hardware constraints,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Robot, Automat., pp. 4377–4382, 2017.
- [4] 浅野文彦, 羅志偉: “半円足の転がり効果を利用した劣駆動仮想受動歩行”, 日本ロボット学会誌, vol. 25, no. 4, pp. 566–577, 2007.
- [5] 丸林央樹, 田原健二, 門崎正滉: “柔軟半球足を持つ二足歩行ロボットのバランス制御と歩容生成”, 日本機械学会 2016 年度年次大会講演論文集, G1500404, 福岡, Sep. 2016.
- [6] 丸林央樹, 田原健二: “柔軟半球足を持つ二足歩行ロボットの開発”, 第 17 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会予稿集, pp. 1595–1597, 札幌, Dec. 2016.
- [7] 杉原知道, 中村仁彦: “非駆動自由度の陰表現を含んだ重心ヤコビアンによる脚型ロボットの全身協調反力操作”, 日本ロボット学会誌, vol. 24, no. 2, pp. 222–231, 2006.

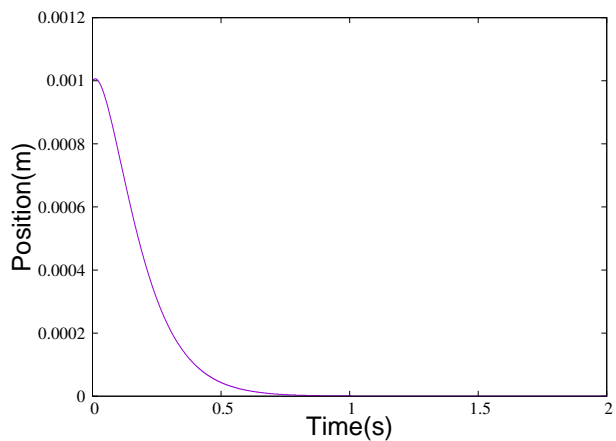


図3 片足支持期の倒立振り子モデルにおける重心位置の時間変化

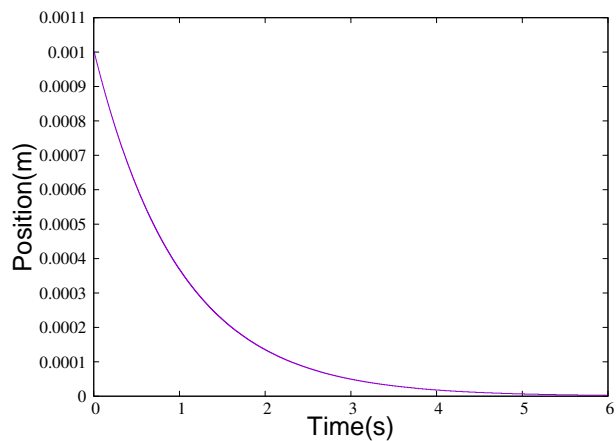


図5 両足支持期の倒立振り子モデルにおける重心位置の時間変化

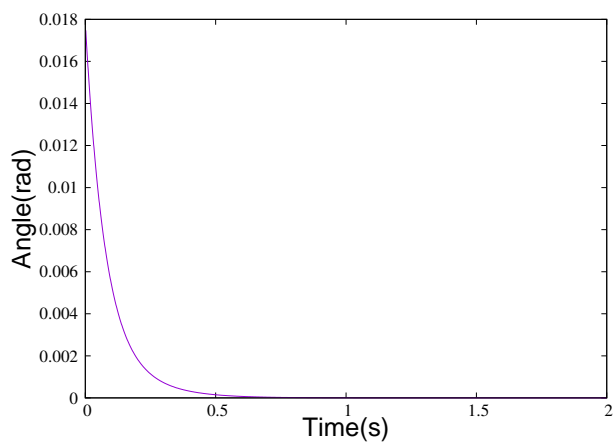


図4 片足支持期の倒立振り子モデルにおける足先半球角度の時間変化

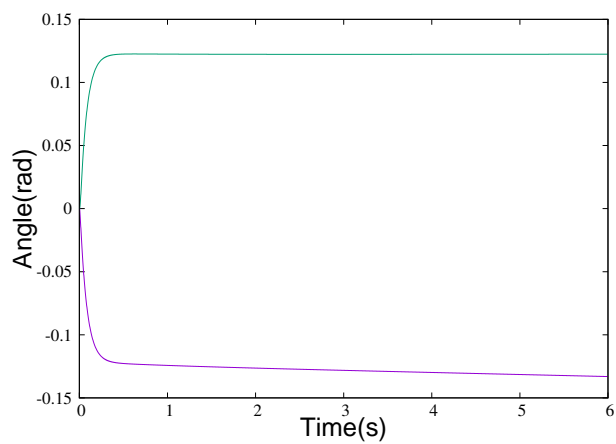


図6 両足支持期の倒立振り子モデルにおける各足先半球角度の時間変化