

# 扁平足を有した歩行モデルのリミットサイクル規範三次元歩行制御法の構築

## Limit Cycle Based Walk of a Powered 7DOF 3D Biped with Flat Feet

学 原田 譲 (都市大)      学 高橋 準 (都市大)  
正 金宮 好和 (都市大)    正 佐藤 大祐 (都市大)

Yuzuru HARADA, Tokyo City University

Jun TAKAHASHI, Tokyo City University, takahashi@rls.mse.tcu.ac.jp

Yoshikazu KANAMIYA (D. N. Nenchev), Tokyo City University

Daisuke SATO, Tokyo City University

Our ultimate goal is introducing energy-efficient walking patterns to actual humanoid robots. It is known that Limit Cycle based walking methods, e.g. Passive Dynamic Walking, have such a desired property. Unfortunately, the methods have been limited to simple planar biped models. In this paper, we propose a way of extending Limit Cycle based walking pattern generation to apply it to a 7DOF 3D biped with ankles, knees, an upper body and with flat feet. Our approach decouples roll and pitch motions in the frontal/sagittal planes, respectively. We derive the limit-cycle based walking pattern with the help of an extended planar model including ankles, knees and the upper body. Robustness of the motion is ensured via a feedback control method based on mechanical energy [1]. The performance of the walking pattern generator in 3D and the controller is confirmed via numerical simulations.

**Key Words:** 3D Biped, Flat Feet, Energy-efficient

### 1 緒言

リミットサイクル歩行の一つである受動歩行は、エネルギー効率の観点から見て最適な歩行運動である。しかし、平地では実現不可能なことやロバスト性に欠けることなど、制御の必要性がある。浅野らは、受動歩行の特性を残したまま平地での歩行を可能とした仮想受動歩行や、この特性を利用したロバスト性の高い制御法である目標エネルギー軌道追従制御を提案した [1]。しかし、これらは二次元のコンパス型ロボットで実現されたものである。一方、実機による三次元歩行の研究において、人間の歩行と同等のエネルギー効率が実現されている [2]。しかし、半円足など受動歩行に特化したロボットを用いており、歩行ロボットの汎用性が低い。そこで我々は、エネルギー効率の高い歩行パターンを人型ロボットへ適用することを目的とし、リミットサイクルを規範とした歩行制御法の生成に取り組んできた。過去の研究では、目標エネルギー軌道追従制御を用いた三次元モデルの歩行運動制御法を提案した [3]。三次元歩行運動においては、矢状面と前額面の運動の間に干渉が発生し、安定リミットサイクルの探索を困難なものとする [4][5]。この問題に対し、非干渉化制御を行った [3]。しかし、ここでは足首関節と腰関節を有した 3 自由度モデルを用いており、人型ロボットに適用するためにはモデルの拡張が必要である。本稿では、上半身と膝関節、扁平足を追加した 7 自由度モデルへ拡張し、歩行運動制御を行う。

### 2 三次元モデル

本稿では図 1 に示す三次元モデルを用いる。また、このモデルの物理パラメータを表 1 に示す。本モデルは上半身と膝関節、扁平足を有した 7 自由度モデルであり、両足の足首関節に 2 自由度 (関節 1, 2, 5, 6)、腰関節に 2 自由度

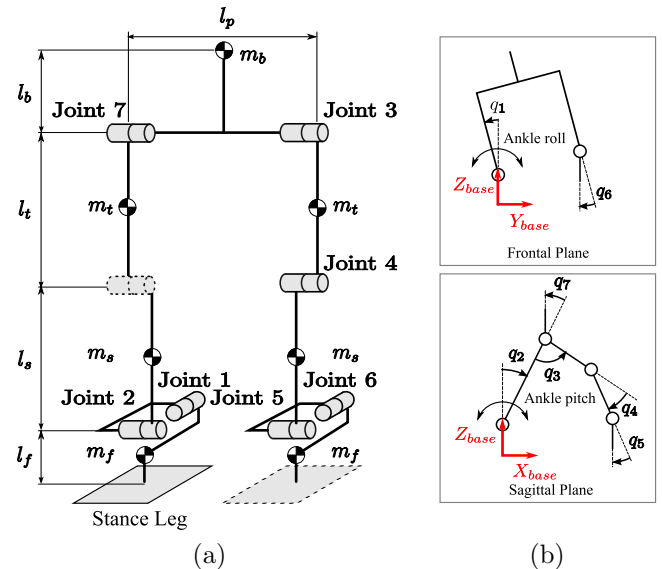


Fig. 1: 7DOF 3D biped model: (a) kinematic structure, (b) generalized coordinates of the model.

(関節 3, 関節 7), 遊脚膝関節に 1 自由度 (関節 4) を持つ。ただし、片足支持期には支持脚膝関節は可動しないように拘束される。また、関節の粘性摩擦とリンクの慣性モーメントは無視できると仮定する。ここで、関節角度ベクトル  $q = [q_1 \ q_2 \ q_3 \ q_4 \ q_5 \ q_6 \ q_7]^T$  を一般化座標とすると、このモデルの片脚支持期の運動は次の運動方程式で表される。

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau \quad (1)$$

ただし、式中の  $M(q) \in \mathbb{R}^{7 \times 7}$  は慣性行列,  $C(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^{7 \times 7}$  はコリオリ・遠心力に関する行列,  $g(q) \in \mathbb{R}^7$  は重力項,

Table 1: Physical parameters of the 7DOF 3D biped model.

Link name	Mass [kg]	Length [m]
Upper body/Pelvis	$m_b = 10.0$	$l_b = 0.5 / l_p = 0.3$
Thigh	$m_t = 2.5$	$l_t = 0.5$
Shank	$m_s = 2.5$	$l_s = 0.5$
Foot	$m_f = 1.0$	$l_f = 0.2$

$\tau \in \mathbb{R}^7$  は各関節に与えるトルクとする．また，本稿では足部と床面との衝突を完全非弾性衝突と仮定し，次式に示す角運動量保存則を用いて表現する．

$$Q^-(q^-)\dot{q}^- = Q^+(q^+)\dot{q}^+ - J_C^T \eta_C \quad (2)$$

ただし，式中の  $Q^-(q^-)\dot{q}^-$  は衝突前の角運動量， $Q^+(q^+)\dot{q}^+$  は衝突後の角運動量， $Q^-(q^-) \in \mathbb{R}^{7 \times 7}$  と  $Q^+(q^+) \in \mathbb{R}^{7 \times 7}$  は慣性行列とする．また  $J_C^T \eta_C$  は，腰関節や膝関節などの特別な関節をロックする際の拘束運動量とする．

### 3 歩行制御

#### 3.1 非干渉化制御

三次元歩行運動における矢状面と前額面の干渉問題を解決するために非干渉化制御を行う．非干渉化制御トルクは運動方程式から求めることができる．式 (1) の  $M(q)$  と  $C(q, \dot{q})$  の 2 列目から 5 列目と 7 列目は矢状面運動のための関節（関節 2, 3, 4, 5, 7）のモーメントに関する項であり，1 行目と 6 行目は前額面運動のための関節（関節 1, 6）のモーメントに関する項である．したがって，干渉成分は次のように表せる．

$$M^*(q) = \begin{bmatrix} 0 & M_{12} & M_{13} & M_{14} & M_{15} & 0 & M_{17} \\ M_{21} & 0 & \cdots & \cdots & 0 & M_{26} & 0 \\ M_{31} & \vdots & \ddots & & \vdots & M_{36} & \vdots \\ M_{41} & \vdots & & \ddots & \vdots & M_{46} & \vdots \\ M_{51} & 0 & \cdots & \cdots & 0 & M_{56} & 0 \\ 0 & M_{62} & M_{63} & M_{64} & M_{65} & 0 & M_{67} \\ M_{71} & 0 & \cdots & \cdots & 0 & M_{76} & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$C^*(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} 0 & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & 0 & C_{17} \\ C_{21} & 0 & \cdots & \cdots & 0 & C_{26} & 0 \\ C_{31} & \vdots & \ddots & & \vdots & C_{36} & \vdots \\ C_{41} & \vdots & & \ddots & \vdots & C_{46} & \vdots \\ C_{51} & 0 & \cdots & \cdots & 0 & C_{56} & 0 \\ 0 & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & 0 & C_{67} \\ C_{71} & 0 & \cdots & \cdots & 0 & C_{76} & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

この際，非干渉化制御トルクは次のように表せる．

$$\tau_{dcp} = M^*(q)\ddot{q}^* + C^*(q, \dot{q})\dot{q}^* \quad (5)$$

ここで， $\ddot{q}^*$  は 1 サンプル前の関節加速度ベクトルである．

#### 3.2 矢状面運動の歩行制御

非干渉化制御を行うことで，矢状面運動を平面運動として扱うことができる．本稿では，矢状面運動の歩行制御を行う

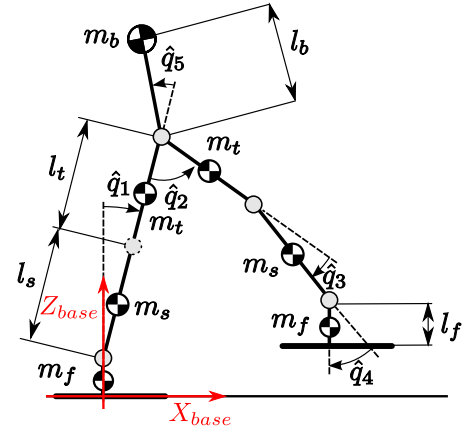


Fig. 2: Virtual 2D model.

ために，図 2 に示す 5 自由度の二次元モデルを用いる．ここで，関節角度ベクトル  $\hat{q} = [\hat{q}_1 \ \hat{q}_2 \ \hat{q}_3 \ \hat{q}_4 \ \hat{q}_5]^T$  を一般化座標とすると，三次元モデルと二次元モデルの一般化座標ベクトル  $q, \hat{q}$  の間には次のような関係がある．

$$\hat{q} = S q \quad (6)$$

$$S = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

矢状面運動のリミットサイクルを生成するために，目標エネルギー軌道追従制御を行う [1]．この制御法は，受動歩行のエネルギー回復メカニズムを模擬したもので，一般式は次のようになる．

$$\tau_e = \mu \frac{m_{tot} g \dot{r}_{Cx} \tan \phi - k_e (E - E_d(r_{Cx}))}{\mu^T \dot{q}} \quad (7)$$

ただし，式中の  $m_{tot}$  はロボットの質量 [kg]， $g$  は重力加速度 [m/s<sup>2</sup>]， $r_{Cx}$  は進行方向重心位置 [m]， $\phi$  は仮想斜面角度 [rad]， $E$  と  $E_d$  は現在と目標の力学的エネルギーの軌道 [J]， $k_e$  はフィードバックゲイン [s<sup>-1</sup>]， $\dot{q}$  は関節速度ベクトル [rad/s]， $\mu$  はトルク比とする．しかし，この式は二次元のコンパス型ロボットの制御法として提案されたものである．そのため，我々が用いる 5 自由度の二次元モデルに適した  $\mu$  と  $E_d$  を求める必要がある．

トルク比を求めるために二次元モデルを用いて，二つの仮想受動歩行のシミュレーションを行った．一つ目は，PID 制御によって遊脚膝関節を屈伸させた制御，二つ目は，仮想重力によって遊脚膝関節を屈伸させ，膝を伸ばしきった際に関節をロックする制御である．この際，遊脚足首リンクと上半身は，床に対して垂直となるように制御した．これらの拘束はラグランジュの未定乗数法を用いて次のように表す．

$$\hat{J}_M \dot{q} = 0 \quad (8)$$

$$\hat{J}_M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

シミュレーション結果を図 3, 4 に示す．図 3 は一つ目のシミュレーション，図 4 は二つ目のシミュレーションを示

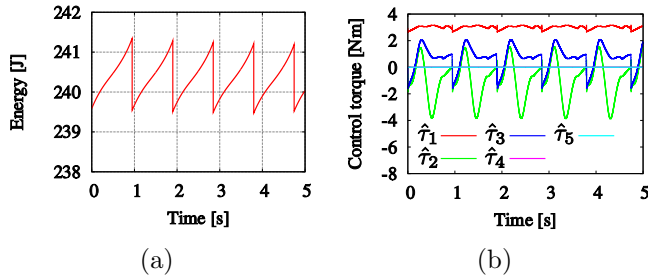


Fig. 3: PDW of the virtual 2D model with PID control of the knee joint with cubic sine reference trajectory and virtual slope angle  $\phi = 0.02$  rad.

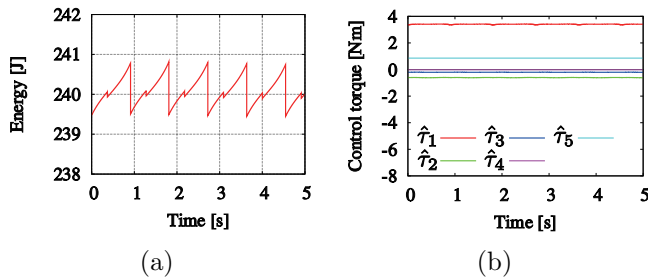


Fig. 4: PDW of the virtual 2D model with passive knee joint plus knee lock control and virtual slope angle  $\phi = 0.017$  rad.

しており、(a) は力学的エネルギー、(b) は各関節のトルクの時間変化を示している。図 3, 4 (a) から、力学的エネルギーの平衡状態が確認でき、二次元モデルを用いて生成された歩行パターンが定常的な歩行サイクルとなっていることがわかる。しかし、二つ目のシミュレーションでは、膝関節のロックによりエネルギーが散逸している。一方、図 3, 4 (b) から、一つ目のシミュレーションでは、遊脚膝関節と腰関節のトルクが激しく変動しているが、二つ目のシミュレーションでは、すべてのトルクがほぼ一定になっていることが確認できる。この結果から、仮想重力によって遊脚膝関節を屈伸させることで、制御式 (7) に用いるトルク比を定数ベクトルとして近似できることが分かる。

次に、式 (7) の  $E_d(r_{Cx})$  について考えていく。膝関節ロックによるエネルギー散逸を考慮し、目標エネルギーを次式から得る。

$$E_d(r_{Cx}) = m_{tot} g r_{Cx} \tan \phi + E_0 + E_{loss} \quad (9)$$

ただし、式中の  $E_0$  は力学的エネルギーの初期値 [J]、 $E_{loss}$  は膝関節ロックにより散逸する力学的エネルギー [J] とする。膝関節をロックする前は  $E_{loss} = 0$  J であり、ロック後は  $E_{loss} = E^+ - E^-$  [J] となる。ただし、式中の  $E^-$ 、 $E^+$  は膝関節ロック前後の力学的エネルギーとする。

目標エネルギー軌道追従制御のロバスト性を確認するために、二つのシミュレーションを行った。一つ目は、安定平衡点近傍の適当な初期状態からの歩行制御、二つ目は、制御入力で用いる質量を 10 % ずらした歩行制御である。このときの各パラメータは  $\phi = 0.013$  rad、 $\mu = \begin{bmatrix} 1 & -0.18 & -0.06 & 0 & 0.25 \end{bmatrix}^T$ 、 $k_e = 10 \text{ s}^{-1}$ 、 $E_0 = 240$  J

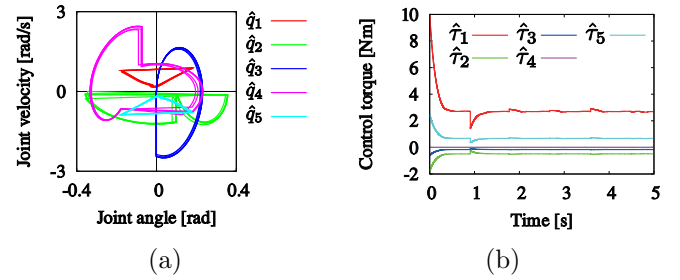


Fig. 5: Limit-cycle based walking with the virtual 2D model (perfect dynamic model) using energy feedback control.

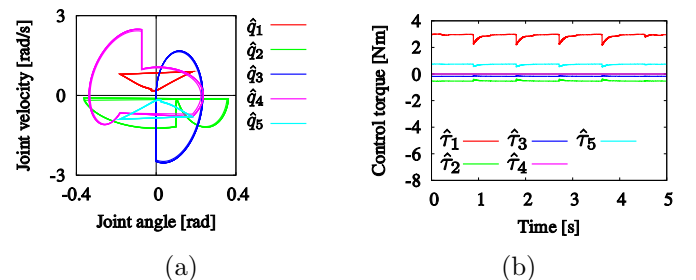


Fig. 6: Limit-cycle based walking with the virtual 2D model (imperfect dynamic model) using energy feedback control.

とした。シミュレーション結果を図 5, 6 に示す。図 5 は一つ目のシミュレーション、図 6 は二つ目のシミュレーションを示しており、(a) は位相図、(b) は各関節のトルクの時間変化を示している。図 5 より、歩行開始時の波形は乱れるものの、定常歩行に収束するにつれ、受動歩行本来の安定したトルクへと推移していることが確認できる。このことから、目標エネルギー軌道追従制御を用いることで、初期状態のずれに対応できることが分かる。また、図 6 より、定常的な歩行パターンが生成できていることが確認できる。このことから、目標エネルギー軌道追従制御を用いることで、比較的大きなレンジのモデル誤差に対応できることが分かる。しかし、図 6 (b) と図 4 (b) を比較すると、脚を切り替える際にトルクがジャンプしていることが確認できる。これは、モデル誤差によるもので、モデル誤差を大きくするにつれてトルクのジャンプも大きくなる。

### 3.3 三次元モデルへの適用

前節までに述べた二次元モデルのリミットサイクルを、三次元の歩行パターン生成に利用するために、次の三つの問題を解決しなければならない。一つ目は、三次元への変換である。二次元モデルで用いた制御トルクを三次元モデルの矢状面運動の歩行制御に用いるために、次のような変換を行う。

$$\tau_{e3D} = S^T \tau_e \quad (10)$$

ただし、式中の  $S$  は式 (6) と同じ行列である。二つ目は、重力環境の再構築であり、次のように表せる [3]。

$$\tau_g = g(q) - \hat{g}(\hat{q}) \quad (11)$$

ただし、式中の  $\hat{g}(\hat{q})$  は二次元モデルの重力トルクである．三つ目は、支持脚足首関節の前額面運動に関してである．非干渉化制御により、任意の軌道を設定することが可能であるが、どの軌道が最もエネルギー効率が良くなるかは明確ではない [3]．以上を踏まえて、我々が用いる 7 自由の三次元モデルの制御トルク  $\tau$  は次のようになる．

$$\tau = \tau_{dcp} + \tau_{e3D} + \tau_g + \tau_{roll} + J_M^T \lambda_C \quad (12)$$

ただし、式中の  $\tau_{roll}$  は前額面運動の安定化制御トルク、 $J_M^T \lambda_C$  は腰関節、遊脚膝関節、遊脚足首関節などの拘束トルクとする．

#### 4 三次元歩行シミュレーション

前章の制御法を用いて二つの前額面運動制御のシミュレーションを行った．一つ目は、五次補間法を用いて生成した軌道への追従制御、二つ目は、経験的に得られた軌道への追従制御である．その結果を図 7 に示す．(a) , (c) , (e) は一つ目のシミュレーション、(b) , (d) , (f) は二つ目のシミュレーションの結果を示しており、(a) , (b) は位相図、(c) , (d) は各関節のトルクの時間変化、(e) , (f) は支持脚の先端位置と ZMP の変位を示している．また、シミュレーションのパラメータは  $\phi = 0.013$  rad,  $E_0 = 240$  J,  $k_e = 100t$  s<sup>-1</sup> とした．ただし、式中の  $t$  は時間とする．また、 $k_e$  は足部と床面の衝突による過度の関節トルクを避けるために、衝突の直後に  $t$  をリセットするものとする．

図 7 (a) , (b) から、周期的な軌道を描いており、定常的な歩行パターンが生成できていることが分かる．一方、図 7 (c) , (d) から、経験的に得られた軌道を用いた方が関節トルクが小さいことが分かる．また、エネルギー消費を定量的に見積もるために次のような指標を用いる [6] ．

$$c_{mt} = \frac{(\text{energy used})}{(\text{weight}) \cdot (\text{distance traveled})} \quad (13)$$

一つ目のシミュレーションは  $c_{mt} \approx 0.95$ 、二つ目のシミュレーションは  $c_{mt} \approx 0.85$  であり、経験的に得られたエネルギー軌道を用いた方がエネルギー効率が良いことが分かる．また、HONDA の人型ロボット ASIMO の場合は  $c_{mt} \approx 1.6$  である [6] ．

さらに、図 7 (e) , (f) から、一つ目のシミュレーション結果は、二つ目のシミュレーション結果よりも ZMP の位置が大きく振動していることが分かる．このことから、経験則を含む方法を用いることで、より足の小さいロボットを設計できるという．

#### 5 結言

我々は、リミットサイクルを規範としたエネルギー効率の高い 2 足歩行制御を人型ロボットに適用することを目的として研究を行ってきた．そのために本稿では、上半身と扁平足を有した 7 自由度の三次元モデルの歩行運動制御を行い、数値シミュレーションを用いて定常的な歩行パターンが生成できたことを示した．また、目標エネルギー軌道追従制御

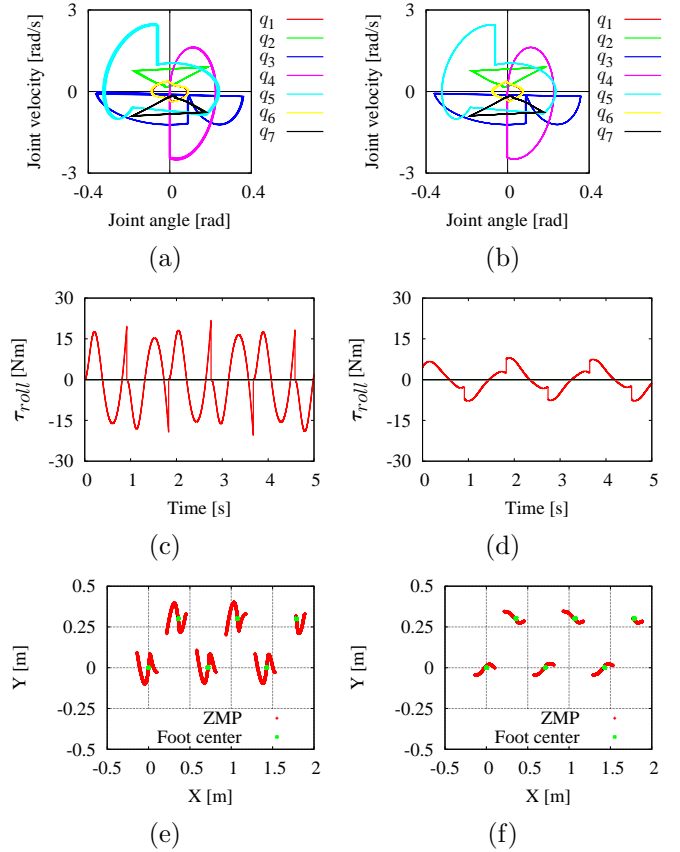


Fig. 7: Simulation results of Limit Cycle based walking of the 3D 7DOF biped model with two different desired trajectories for ankle roll.

のロバスト性を確認した．さらに、我々の歩行運動制御のエネルギー効率が、既存の人型ロボットに対して約 2 倍、効率的であることを示した．

今後の課題として、両足支持期の設計や自由度の拡張など、シミュレーションモデルの厳密化に取り組んでいく．

#### 文 献

- [1] F. Asano *et al.*, “Biped gait generation and control based on a unified property of passive dynamic walking,” *IEEE Trans. Robotics*, vol. 21, no. 4, pp. 754–762, 2005.
- [2] S. H. Collins *et al.*, “A bipedal walking robot with efficient and human-like gait,” *Proc. of the IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, Barcelona, Spain, 2005, pp. 1983–1988.
- [3] K. Miyahara *et al.*, “Three-dimensional limit cycle walking with joint actuation,” in *Proc. 2009 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robotics and Systems*, St. Louis, MO, USA, 2009, pp. 4445–4450.
- [4] A. Kuo, “Stabilization of lateral motion in passive dynamic walking,” *The Int. J. of Robotics Research*, vol. 18, no. 9, pp. 917–930, 1999.
- [5] M. Wisse *et al.*, “A 3D passive dynamic biped with yaw and roll compensation,” *Robotica*, vol. 19, pp. 275–284, 2001.
- [6] S. H. Collins *et al.*, “Efficient bipedal robots based on passive-dynamic walking,” *Science*, vol. 307, pp. 1082–1085, 2005.