

運動エネルギー吸収機構を持つ受動歩行機の安定性

Stability of Passive Dynamic Walking Model with Absorption Mechanism of Kinetic Energy

○菅野淳, 成瀬継太郎

○Jun Kanno, Keitaro Naruse

会津大学

University of Aizu

キーワード： 受動歩行 (Passive dynamic walking), 動吸振器 (Dynamic damper), 急坂 (Steep slope), 安定性 (Stability), 運動エネルギー (Kinetic Energy)

連絡先： 〒 965-8580 〒 965-8580 福島県会津若松市一箕町大字鶴賀上居合 90 会津大学大学院 コンピュータ理工学研究科 コンピュータ・情報システム学専攻 画像処理学講座
菅野淳, Tel.: 0242-37-2500, E-mail: m5161132@u-aizu.ac.jp

1. はじめに

受動歩行は初速度と重力を利用し、緩やかな坂を下る歩行手段で、McGeer¹⁾によって提唱された。受動歩行ロボットはコンパスのような二本の脚を持ち、脚を振り子のように振りながら歩行をする。また、基本的にアクチュエーターを用いないため、エネルギー効率のよい歩行が可能であり、今後のロボットの歩行研究に役立つと考えられている。受動歩行は脚と地面の接地で失う運動エネルギーを、重力の作用を利用して回復することで実現しているが、研究の多くは緩やかな下り坂で行われている。急坂では運動エネルギーの過剰供給によりモデルが転倒してしまうためである。しかし、受動歩行ロボットを実用化するためには避けられない問題である。そこで、この論文では運動エネルギーの過剰供給を防ぐために動吸振器を持つ受動歩行モデルを提案する。このモデルを緩やかな坂と急坂で

Simplest Walking Model²⁾と比較し、提案モデルの有用性を検証する。

2. 提案手法

2.1 手法

受動歩行ロボットが急坂を下ることが出来ない原因として、位置エネルギーが運動エネルギーに変換される際に運動エネルギーが過剰供給されるからと考えられる。この過剰供給される運動エネルギーを減らすために、動吸振器を両足に設置した受動歩行モデルを提案する。この動吸振器が振動し、運動エネルギーを吸収すると考えた。

2.2 動吸振器モデル

Fig.1 のモデルを本論文では動吸振器モデルと呼ぶ。地面に接している脚を支持脚と呼び、Z

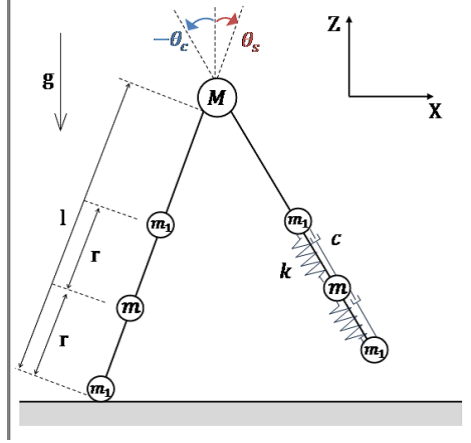


Fig. 1 動吸振器モデル

軸からの角度を θ_c とする。もう一方のスイングしている脚を遊脚と呼び、Z 軸からの角度を θ_s とする。遊脚が地面に接地した瞬間、遊脚と支持脚が入れ替わり次のステップが始まる。モデルの脚先から r の位置に動吸振器が付いており、2 点からバネで繋がっている。動吸振器の質量は m 、バネで繋がっている 2 点の質量は m_1 、股関節の質量は M 、バネ定数、粘性係数はそれぞれ k, c である。動吸振器は両足に付いているが、片方の動吸振器が動いているとき、もう片方の動吸振器はロックされ動かないとする (Fig.1 では遊脚の動吸振器を動かしているの、支持脚の動吸振器は動いていない)。また、ロックされている際の動吸振器の質点の位置は脚の上に固定される。遊脚の動吸振器を動かすときの動吸振器モデルの運動方程式を (1) 式、詳細を (2)～(24) 式で示す。

$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + g(\theta) = 0. \quad (1)$$

$$M(\theta) = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$g(\theta) = \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ G_3 \\ G_4 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

$$C(\theta, \dot{\theta}) = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

$$M_{11} = l^2(M + 4m_1) + r^2(m + 4m_1). \quad (5)$$

$$M_{12}, M_{21} = -4lm_1(l - r) \cos(\theta_c - \theta_s). \quad (6)$$

$$C_{11} = cl^2 \cos^2(\theta_c + \gamma) + cl^2. \quad (7)$$

$$C_{12} = -cl^2 \cos(\theta_c - \theta_s) - cl(l - 2r) \cos(\theta_c + \gamma) \cos(\theta_s + \gamma). \quad (8)$$

$$C_{13}, C_{31} = -2cl \cos(\theta_c + \gamma). \quad (9)$$

$$C_{14}, C_{41} = cl \sin(\theta_c + \gamma). \quad (10)$$

$$M_{22}, C_{22} = cl^2 + c(l - 2r)^2 \cos^2(\theta_s + \gamma). \quad (11)$$

$$C_{21} = 4lm_1(l - r)\dot{\theta}_c \sin(\theta_c - \theta_s) - cl(l - 2r) \cos(\theta_c + \gamma) \cos(\theta_s + \gamma) + l^2c \cos(\theta_c - \theta_s). \quad (12)$$

$$C_{23}, C_{32} = 2cl \cos(\theta_s + \gamma) - 2cr \cos(\theta_s + \gamma). \quad (13)$$

$$C_{24}, C_{42} = -cl \sin(\theta_s + \gamma). \quad (14)$$

$$M_{33}, M_{44} = m. \quad (15)$$

$$C_{33}, C_{44} = 2c. \quad (16)$$

$M(\theta)$ と $C(\theta, \dot{\theta})$ のその他の成分は 0.

$$G_1 = kl \left(\frac{(\sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2} - d)((l - 2r) \sin(\theta_c - \theta_s) - x_m \cos(\theta_c + \gamma) + z_m \sin(\theta_c + \gamma))}{\sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2}} + \frac{(\sqrt{\alpha_3^2 + \alpha_4^2} - d)(l \sin(\theta_c - \theta_s) - x_m \cos(\theta_c + \gamma) + z_m \sin(\theta_c + \gamma))}{\sqrt{\alpha_3^2 + \alpha_4^2}} \right) - g \sin(\theta_c + \gamma)(l(M + 4m_1) + r(m + 2m_1)). \quad (17)$$

$$G_2 = k \left(-\frac{l(\sqrt{\alpha_3^2 + \alpha_4^2} - d)}{\sqrt{\alpha_3^2 + \alpha_4^2}} - \frac{(\sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2} - d)(l - 2r)}{\sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2}} \right) (l \sin(\theta_c - \theta_s) - \frac{1}{2} x_m \cos(\theta_s + \gamma) + z_m \sin(\theta_s + \gamma)) + 4gm_1(l - r) \sin(\theta_s + \gamma). \quad (18)$$

$$G_3 = -k \left(\frac{\alpha_2(d - \sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2})}{\sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2}} + \frac{\alpha_4(d - \sqrt{\alpha_3^2 + \alpha_4^2})}{\sqrt{\alpha_3^2 + \alpha_4^2}} \right). \quad (19)$$

$$G_4 = -k \left(\frac{\alpha_1(d - \sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2})}{\sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2}} + \frac{\alpha_3(d - \sqrt{\alpha_3^2 + \alpha_4^2})}{\sqrt{\alpha_3^2 + \alpha_4^2}} \right) + gm. \quad (20)$$

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ の詳細は以下の式である

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= -l \cos(\theta_c + \gamma) \\ &+ (l - 2r) \cos(\gamma + \theta_s) + z_m. \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \alpha_2 &= -l \sin(\theta_c + \gamma) \\ &+ (l - 2r) \sin(\gamma + \theta_s) + x_m. \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \alpha_3 &= l(\cos(\gamma + \theta_s) - \cos(\theta_c + \gamma)) + z_m. \\ &\quad (23) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha_4 &= l(\sin(\gamma + \theta_s) - \sin(\theta_c + \gamma)) + x_m. \\ &\quad (24) \end{aligned}$$

$M(\theta)$ は慣性項、 $C(\theta, \dot{\theta})$ は非線形項、 $g(\theta)$ は重力とバネに関する項である。このモデルには制御は用いないため右辺は0である。スイングした遊脚が地面に接地したとき、遊脚と支持脚が入れ替わる。その時の角速度は角速度角運動量保存則から (25),(26) 式のように求めることができる。また、角度は (27),(28) 式の関係である。ここで上辺の $-$ は接地直前を意味し、 $+$ は接地直後を意味している。

$$\dot{\theta}_c^+ = (-E)\dot{\theta}_c^- + \frac{G(A\dot{\theta}_c^- + B\dot{\theta}_s^-)}{D} \frac{1}{-F + \frac{GC}{D}}. \quad (25)$$

$$\dot{\theta}_s^+ = \frac{-F\dot{\theta}_c^+ + E\dot{\theta}_c^-}{G}. \quad (26)$$

$$\theta_c^+ = -\theta_s^-. \quad (27)$$

$$\theta_s^+ = -\theta_c^-. \quad (28)$$

A～G の詳細は以下の式である。

$$\begin{aligned} A &= -l^2 M \cos 2\theta_c - 2lr(m + 2m_1) \cos 2\theta_c \\ &+ lr(m + 2m_1) - r^2(m + 4m_1). \end{aligned} \quad (29)$$

$$B = lr(m + 2m_1) - r^2(m + 4m_1). \quad (30)$$

$$\begin{aligned} C &= (m + 2m_1) \cos 2\theta_c (l^2 - lr) \\ &- l^2(m + M + 2m_1) - r^2(m + 4m_1). \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} D &= l^2(m + 2m_1) \cos 2\theta_c \\ &- l^2m - 2l^2m_1 - lr(m + 2m_1) \cos 2\theta_c \\ &+ 2lr(m + 2m_1) - r^2(m + 4m_1). \end{aligned} \quad (32)$$

$$E = lmr + 2lm_1r - mr^2 - 4m_1r^2. \quad (33)$$

$$\begin{aligned} F &= l(m + m_1) - r(m + 2m_1)(l \cos 2\theta_c \\ &- r \sin 2\theta_c) - lr(m + m_1) \\ &+ r^2(m + 2m_1). \end{aligned} \quad (34)$$

$$\begin{aligned} G &= -l^2(m + 2m_1) + 2lr(m + 2m_1) \\ &- r^2(m + 4m_1). \end{aligned} \quad (35)$$

動吸振器モデルの各パラメータは Table 1 の値を用いる。

Table 1: モデルのパラメータと初期状態

$M[kg]$	$m[kg]$	$m_1[kg]$	$r[m]$
10.0	0.3	0.35	0.45
$l[m]$	$g[m/s^2]$	$k[N/m]$	$c[Ns/m]$
1.0	9.8	80	1
$\theta_c[rad/s]$	$\theta_s[rad]$	$\dot{\theta}_c[rad/s]$	$\dot{\theta}_s[rad/s]$
-0.15	0.15	0.56	-0.477

3. 計算機実験

3.1 実験方法

本研究ではの3つの受動歩行モデルを用いてシミュレーションを行う。まず1つ目は遊脚の動吸振器を動作させた動吸振器モデル（遊脚動吸振器モデル）である。2つ目は支持脚の動吸振器を動作させた動吸振器モデル（支持脚動吸振器モデル）である。そして比較対象として3つめに Simplest Walking Model(SWM) を用いる。SWM は Gracial²⁾ らによって提案された受動歩行モデルで、Fig.2 のように非常に簡略化されている。それゆえ、運動の解析が行いやすい。これらのモデルを 0.001～0.1[rad] の坂で 10 秒間歩行させ、各モデルの歩数の違いと運動エネルギーの遷移を調査する。

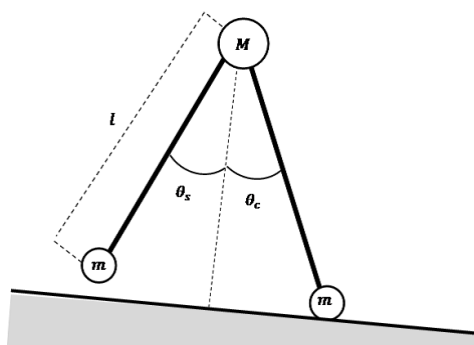


Fig. 2 Simplest Walking Model

3.2 動吸振器モデルの歩容

Fig.3,4 は $0.005[\text{rad}]$ の坂における遊脚動吸振器モデルと遊脚動吸振器の歩容である。脚の中心付近にある球が動吸振器を表している。どちらのモデルも動吸振器の効果でそれぞれの脚の速度は減少しているが、緩やかな坂では2つのモデルの歩容に大きな違いがないことがわかる。

3.3 粘性係数と歩数

Fig.5,6 は3つのモデルにそれぞれ $0.001 \sim 0.1$ $[\text{rad}]$ の坂を歩行させたもので Fig.5 は粘性係数が1である。SWM は $0.005[\text{rad}]$ 付近でしか歩行出来ていないが、動吸振器モデルはより急な傾斜で歩行が可能である。特に支持脚動吸振器モデルはより急な傾斜で歩行できていることがわかる。Fig.6 は粘性係数が3の場合で Fig.5 よりも動吸振器モデルの各脚の速度が減少している。その結果、支持脚動吸振器モデルはより急な傾斜の歩行が可能となっているが、遊脚動吸振器モデルは歩行可能な傾斜の範囲が狭まっている。これは遊脚動吸振器モデルが支持脚動吸振器モデルよりも粘性係数の影響を受けやすく、遊脚動吸振器モデルには粘性係数が大きすぎたからだと考えられる。遊脚動吸振器モデルの粘性係数が大きすぎると、遊脚が支持脚を追い越せずに転倒する。

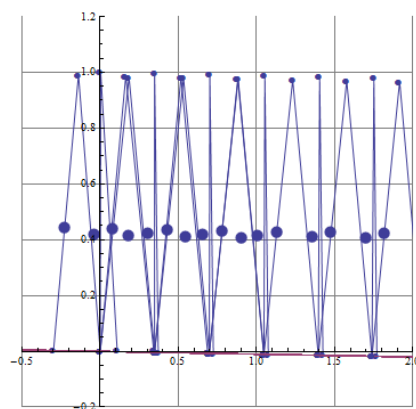


Fig. 3 遊脚動吸振器モデルの歩行の様子

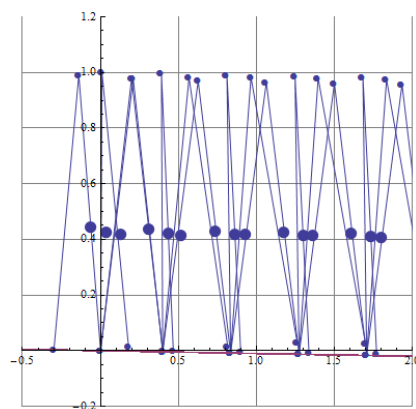


Fig. 4 支持脚動吸振器モデルの歩行の様子

3.4 運動エネルギーの遷移

Fig.7 は傾斜 $0.005[\text{rad}]$ における3つのモデルの運動エネルギーの遷移である。3モデルとも10秒間歩き続けていることがわかる。初期運動エネルギーはどのモデルもほぼ同じだが、数歩歩いて安定した時点で、一番少ない運動エネルギーで歩行しているのはSWMだとわかる。Fig.8 は傾斜 $0.01[\text{rad}]$ における3モデルの運動エネルギーの遷移である。SWMと遊脚動吸振器モデルは途中で運動エネルギーが非常に大きくなっているが、この地点で接地できずに転んでしまっている。一方、支持脚動吸振器モデルは10秒間安定した歩行を続けていることが見て取れるが、運動エネルギーの最大値は4付近で、他の2モデルと比較して大きい値となっている。このことから歩行を続けるには粘性係数を大きくして、運動エネルギーを大きく減らす

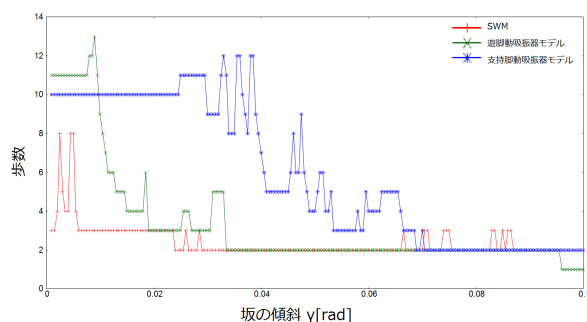


Fig. 5 粘性係数が1の時の歩数

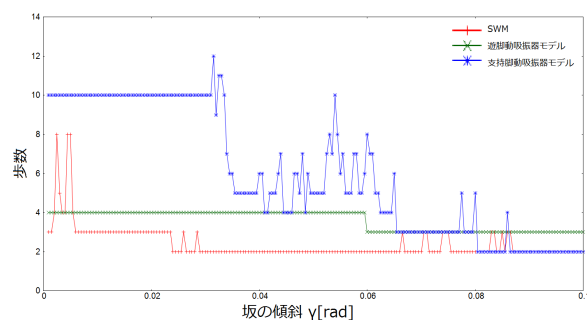


Fig. 6 粘性係数が3の時の歩数

ことが重要ではなく、一定の値で安定させることが重要だと言える。このことは遊脚動吸振器モデルの運動エネルギーの最大値が減りだすと歩行出来なくなっていることから言える。

4. おわりに

4.1 まとめ

本研究では両足に動吸振器を設置した受動歩行モデルを提案し、様々な傾斜で歩行実験を行った。その結果、動吸振器モデルはSWMと比較すると急な傾斜で歩行が可能だと示した。特に支持脚に動吸振器を設置したほうが効果大きいことがわかった。また、粘性係数大きくすることで運動エネルギーを減らすことができるが、安定した歩行のためには適切な粘性係数を設定する必要があることがわかった。

4.2 今後の課題

本研究ではモデルの初速度を固定し、坂の傾斜と粘性係数による安定性を調査したが、より

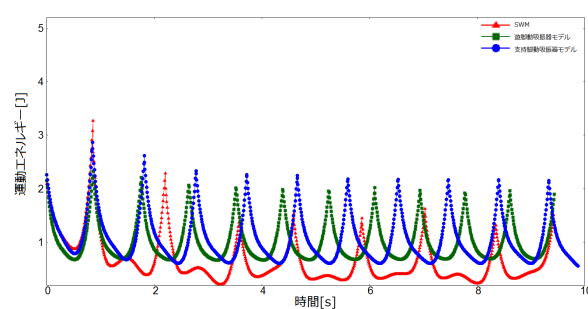


Fig. 7 傾斜 0.005[rad] の時の運動エネルギー

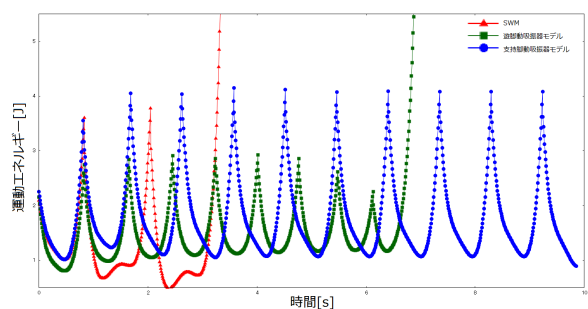


Fig. 8 傾斜 0.01[rad] の時の運動エネルギー

適切な初速度と粘性係数を設定することで更に急な坂を歩行できるはずである。さらに、動吸振器を設置する位置や、動吸振器の質量、両足の動吸振器を同時に動かした場合など、様々なパラメータで実験を行いたい。

参考文献

- 1) T. McGeer: Passive Dynamic Walking, The International Journal of Robotics, **9**-2, 62/82 (1990)
- 2) M.Garcia, A.Chatterjee, A.Ruina, and M.Coleman, The Simplest Walking Model: Stability, Complexity, and Scaling, Journal of Biomechanical Engineering, **120**, 281/288 (1998)
- 3) 今西 望, 井上 喜雄, 芝田 京子, 島崎 太一郎: ばねを有する受動歩行ロボットによる着地時の損失エネルギー低減および再利用, 日本 AEM 学会誌, **20**-1, 84/89 (2012)
- 4) 衣笠 哲也, 吉田 浩治, 小武 健一, 藤村 明, 田中 浩毅, 小川 浩平: バネ足首と偏平足による三次元受動歩行機, 日本ロボット学会誌, **27**-10, 1169/1172 (2009)
- 5) 浅野 文彦, 羅 志偉: パラメータ励振に基づく伸縮脚ロボットの動的歩行制御, 日本ロボット学会誌, **23**-7, 910/918 (2005)