

二足歩行の力学的エネルギー消費に関する近似モデルの提案 An approximate theory for mechanical energy consumption of bipedal locomotion

村山 蓮 (山梨大・生命環境) 島 弘幸 (山梨大院・総合)

Ren MURAYAMA, University of Yamanashi

Hiroyuki SHIMA, University of Yamanashi

TEL.055-220-8834, Email: hshima@yamanashi.ac.jp

There are few types of terrestrial animals that move by bipedal walking. Among them, the ostrich is famous as an animal that can move at high speed for a long time. A better understanding of the structure of the ostrich's leg and the locomotion mechanism, therefore, will open an avenue for the design of a high-speed, energy-efficient bipedal walking mechanism. This motivated us to develop a theoretical model that represents human bipedal walking and to calculate its energy efficiency, as a first step towards the long-term goal of the ostrich problem. The model led us to the conclusion that the amount of mechanical energy required for walking changes in a non-trivial manner with the step length and walking speed.

1. はじめに

陸上を二足歩行で移動する動物はあまり存在しない。哺乳類では、カンガルーが二足で跳躍しながら移動することを出くと、人間以外は二足歩行と呼べる運動をする動物はいない。いっぽう鳥類では、ダチョウやペンギンなどが陸上を二足歩行する「飛べない鳥」として有名である。特にダチョウは、天敵から逃げる時などは、平均速度約 60 km/h で 1 時間以上移動することが可能である。こうしたダチョウの脚の構造を理解することで、エネルギー効率の高い二足歩行機構の開発が期待できる。また、その結果を基に、より効率のよい義足やロボット開発への応用が期待できる。

そこで本研究では、ダチョウの脚の構造を理解するための前段階として、人間の歩行を記述する簡易モデルに基づく理論考察を行った。具体的には、脚の筋肉が体全体の重心を斜め上に押し上げる力と、脚を前後にスイングさせるための力に注目し、これらの動作に伴うエネルギー消費量を重心の移動速度および歩幅の関数として定式化した。さらに、得られた結果をグラフ化することで、人間の二足歩行の特徴を考察した。

2. 方法

2-1. 脚が体幹重心にする仕事とエネルギー消費

本研究は、Manoj Srinivasan¹⁾²⁾の理論手法を基に行った。以下の議論では、常に片方あるいは両方の足が地面に接する歩き方(Inverted pendulum walking)を前提とする。

Fig.1 は、歩行する人間の体の重心移動と、重心が脚から受ける力を表している。図に示した Push-off とは、両足が地面についた瞬間、後脚の筋肉が体の重心を前方斜め上に押し上げる力を指す(Fig.2 を参照)。また Heel-strike は、前脚のかかとが地面についた瞬間に、前脚が重心に対して与える後方斜め上向きの力を意味する。重心の質量を m 、Push-off 前後における重心の速度をそれぞれ v_i と v_m 、両足が地面についた瞬間に鉛直線と脚がなす角を α とすると、Push-off によって脚の筋肉が重心にする仕事 W_{hp} は以下の式となる。

$$W_{hp} = \frac{m(v_m^2 - v_i^2)}{2} = \frac{mv_i^2 \tan^2 \alpha}{2} \quad (1)$$

ここで角度 α が十分に小さいとすると、 $\tan \alpha \approx d_{\text{step}}/\ell$ かつ $v_i \approx v$ と近似できる。ただし d_{step} は歩幅、 ℓ は脚の長さ、 v は水平方向に沿う重心の平均速度を指す。この近似を用いると、式(1)は以下のように書き換えられる。

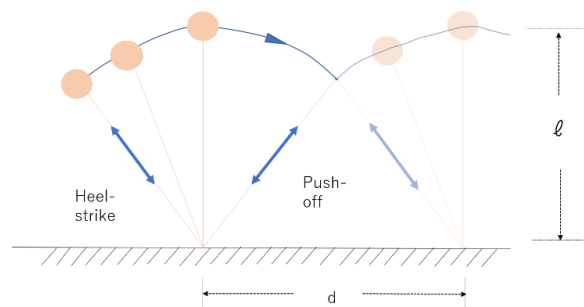


Fig.1 Model of human's bipedal walking driven by push-off and heel-strike. Circles indicate the positions of the center of mass.

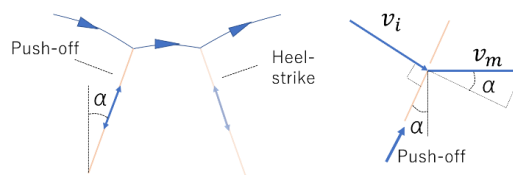


Fig.2 Enhanced view of the COM motion in the vicinity of push-off and heel-strike actions.

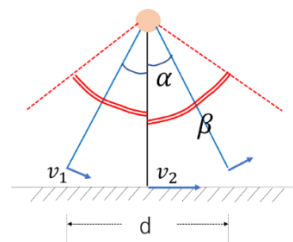


Fig.3 Definition of the angles α and β that characterizes the leg swing.

$$W_{hp} \approx \frac{mv^2 d_{\text{step}}^2}{8\ell^2} \quad (2)$$

同様に、Heel-strike によって脚の筋肉が重心にする仕事は $-W_{hp}$ である。これより Fig. 1 の動きに伴うエネルギー消費割合 C_{hp} が、次のように求まる。

$$C_{hp} = \frac{(b_1 + b_2)W_{hp}}{mg\ell} \cong \frac{b_1 + b_2}{8} v^2 D_{\text{step}}^2 \quad (3)$$

ここで $V^2 = v^2/(g\ell^2)$ 、 $D_{\text{step}} = d_{\text{step}}/\ell$ とし、エネルギー量を $mg\ell$ で規格化した。 b_1 と b_2 は脚の筋肉が生化学的に消費するエネルギーを表すための係数であり、Push-off 時には $b_1 W_{hp}$ 、Heel-strike 時には $(-b_2) \times (-W_{hp})$ が消費されるとみなす。ここでは係数の値を $b_1 + b_2 = 5$ と設定した³⁾。通常の力学では、物体 A が物体 B に負の仕事をした場合(つまり B に作用する力と B の変位が逆向きの場合)、物体 A のエネルギーは増加する。しかし筋肉のエネルギー収支を考える際には、筋肉内部での生理作用や体熱の放散に伴い、脚の筋肉が正負どちらの力学的仕事をした場合でも筋肉のエネルギーは減少する。上記の係数 b_1 と b_2 はこの事情を勘案するために導入された係数である。

2-2. 脚の前後スイングに伴うエネルギー消費

本研究では、脚の最大運動エネルギーが全て位置エネルギーに変換される地点(Fig.3 の角度 β)まで足を上げるのではなく、それより手前の地点(Fig.3 の角度 α)でスイングの向きを強制的に反転させる状況を想定した。このスイング反転に必要な仕事は

$$W_s = 2 \cdot \frac{1}{2} (I + m\ell^2) \omega_n^2 (\beta^2 - \alpha^2) = mg\ell(\beta^2 - \alpha^2) \quad (4)$$

と書ける。 ω_n は、脚が重力によって自由振り子のように振動したとき(つまりスイングの向きを強制的に反転させないとき)の、脚の固有振動数である。

式(4)右辺の β と α を、 d_{step} と v で表すために、まず脚の平均スイング速度 v_s を $v_s = (v_1 + v_2)/2$ と定義する。次に、エネルギー保存から得られる式

$$\frac{1}{2} m v_1^2 + mg\ell(1 - \cos \alpha) = mg\ell(1 - \cos \beta) = \frac{1}{2} m v_2^2 \quad (5)$$

および、1回のスイングに要する時間 T が、次の二つの式を満たすことを用いる。

$$T = \frac{2\ell\alpha}{v_s}, \quad v = \frac{d_{\text{step}}}{T}$$

さらに Fig. 3 より、 β と α はそれぞれ

$$\sin \alpha = \frac{d_{\text{step}}}{2\ell}, \quad \cos \beta = 1 - \frac{v_2^2}{2g\ell} \quad (6)$$

を満たす。以下では、角度 α と β がともに十分小さいとして、 $\sin \alpha \approx \alpha$ および $\cos \beta \approx 1 - (\beta^2/2)$ と近似する。

直前の段落で示した複数の式から、 β 、 α 、 v_1 、 v_2 、 v_s を消去すると

$$W_s = m \left(v^2 - \frac{g d_{\text{step}}^2}{8\ell} + \frac{g^2 d_{\text{step}}^4}{256\ell^2 v^2} \right) \quad (8)$$

を得る。これより、脚のスイングに伴うエネルギー消費割合 C_s は

$$C_s = \frac{W_s}{mg\ell} = V^2 - \frac{D_{\text{step}}^2}{8} + \frac{D_{\text{step}}^4}{256V^2} \quad (9)$$

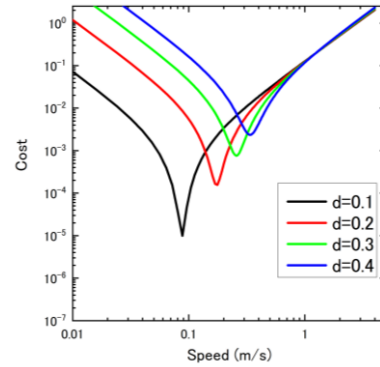


Fig.4 Energy cost for the human's bipedal walking as a function of the walking speed.

となる。式(3)、(9)を足し合わせることで、人間の二足歩行に伴うエネルギー消費割合 $C_{\text{all}} = C_{hp} + C_s$ を求めた。

3. エネルギー消費割合と歩行速度の関係

Fig.4 に示したグラフは、縦軸が Walking コスト C_{all} 、横軸が重心の移動速度 v で、両者とも対数スケールで表示されている。重力加速度 g は $9.8(\text{m/s}^2)$ 、足の長さ ℓ は $0.8(\text{m})$ で固定し、歩幅 d_{step} は $0.1(\text{m})$ 、 $0.2(\text{m})$ 、 $0.3(\text{m})$ 、 $0.4(\text{m})$ と変化させた。

グラフより、どの歩幅の場合でも、Walking コストを最小化する移動速度が存在することがわかる。また、歩幅が増加するにつれて、コストが最小となる速度も一様に増加する。

4. 考察と今後の課題

グラフ曲線を描画する前の時点では、人間の一般的な歩行速度である $v = 1.0 \sim 2.0 \text{ m/s}$ ($3.6 \sim 7.2 \text{ km/h}$) 付近で、エネルギーコストは最小値をとると予想していた。しかし計算結果は、この予想からかなり外れた結果となった。

考えられる理由の一つは、代入した歩幅の値が、一般的な歩幅の値よりも小さい点である。一般的な人間の歩幅はその身長によって異なるが、およそ 0.8 m 前後である。しかし今回の解析では、計算の便宜上、脚のスイング角 α 、 β がともに十分小さいと仮定した。これより角度が大きい場合、テイラー展開における高次の項を無視できなくなるため、式(9)に示した関数形が変化すると予想される。また、 C_{hp} を求める際にも、角度が十分小さいと仮定した。その影響もグラフに反映されたと考えられる。

そこで今後の改善策として、 α を大きくした場合の仕事の式を、楕円積分を用いて求め、より現実的なエネルギー消費割合を導出する予定である。

参考文献

- 1) M. Srinivasan: Why walk and run: Energetic costs and energetic optimality in simple mechanics-based models of a bipedal animal, PhD. Thesis, Cornell University, 2006.
- 2) M. Srinivasan: Computer optimization of a minimal biped model discovers walking and running, Nature, 439, pp.72-75, 2006.
- 3) R. Margaria: Biomechanics and Energetics of Muscular Exercise, Oxford University Press, pp76-77, 1976.