受動歩行の脚切換え現象に関する実験的研究*

池 俣 吉 人^{*1}, 佐 野 明 人^{*1}
久 世 雅 人^{*2}, 藤 本 英 雄^{*1}An Experimental Study for Leg-Exchange Phenomenon
of Passive WalkingYoshito IKEMATA^{*4}, Akihito SANO,
Masato KUZE and Hideo FUJIMOTO^{**} Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology,
Gokiso-cho, Syowa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 466-8555 Japan

A passive walker can walk down shallow slope in a natural gait and can exhibit a stable limit cycle. In our earlier work, we have demonstrated the physical structure which forms the fixed point and the mechanism of its stability. A collision phenomenon is essential to the leg-exchange which is one of the important factors determined the fixed point. In general, the collision is undesirable because it causes troubles of precision sensors and instruments. In many studies, the leg-exchange is modeled by some assumptions and the validity of that is not sufficiently evaluated. In this study, the general model is qualitatively and quantitatively evaluated by the experiments. By observing actual collision phenomenon through the high-speed camera, we realized that the legs are not instantaneously exchanged and the loss of angular momentum is caused by the impact force during the collision. Based on this fact, the accurate modified leg-exchange model is proposed.

Key Words: Legged Locomotion, Passive Walking, Leg-exchange, Collision, Modeling

1. 結 言

受動歩行⁽¹⁾では、脚のダイナミクスと環境との相互作用のみによって歩容が生成される。受動歩行は一種の力学現象と捉えることができ、人はその力学的原理を巧く利用して歩いているものと考えられる。このため、受動歩行は歩行ロボットの制御や歩行メカニズムの本質を理解するうえで重要な研究対象である⁽²⁾。最近では、受動歩行をベースとした歩行ロボットが開発され、エネルギー効率の高い歩行が実現されている⁽³⁾。

歩行は、非線形な脚の振り運動(連続ダイナミクス)および脚の切換え現象(離散事象)から成る。この一種のハイブリッドシステムから周期的な運動が生成される。受動歩行では、安定したリミットサイクル(閉軌道)が存在するという重要な特徴を持つ。状態がこのリミットサイクル上を遷移する限り、歩行の安定性は保証される。著者らは、受動歩行の平衡点(リミットサイクルの一断面の点)の力学的構造ならびにその安

定化構造を明らかにした⁽⁴⁾。なお、この平衡点は、エネルギーバランス、脚の振り運動および脚の切換え現象が絡む力学的構造の中から生成される。

一般的に、着地時の床面との衝突はセンサの障害や機器の振動などを引き起こすため、望ましくない現象と捉えられ、種々の衝撃緩和手段がとられている⁽⁵⁾。しかし、この衝突現象は、平衡点を決定する一つの重要な要素である脚切換えには不可欠である。これまで、ある仮定の基で脚の切換え現象がモデル化されてきたが^{(1)(4)(6)~(11)}、その妥当性について十分な評価がなされてこなかった。そこで、本研究では受動歩行機を模擬した簡単な実験機を用いて、一般的な脚切換えモデルを定性的・定量的に評価したうえで、実際の衝突現象の解析から、より厳密な脚切換えモデルを導出することを目的とする。

2章では、一般的な脚切換えモデルの導出および単純化を行う。3章では、実機を用いた実験から一般的な脚切換えモデルを評価する。4章では、観察された衝突現象を解析し、より厳密な修正モデルを導出してその妥当性を評価する。

2. 脚切換えモデル

2-1 仮定と導出 コンパス形の受動歩行モデル

* 原稿受付 2005 年 9 月 8 日。

^{*1} 正員、名古屋工業大学大学院工学研究科(〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)。^{*2} 名古屋工業大学大学院工学研究科。

E-mail: ikemata@vier.mech.nitech.ac.jp

を図1に示す。\$l\$は脚の長さである。また、腰と足先のみに質量を持ち、それぞれ \$M\$ と \$m\$ で表す。\$\gamma\$ はスロープ角度、\$g\$ は重力加速度を表す。また、\$\theta\$ および \$\phi\$ は、それぞれ支持脚および遊脚の角度である。ただし、\$\theta\$ はスロープに対する垂直面を基準とし、\$\phi\$ は支持脚を基準とする。なお、図1に示す角度の向きを正とした。

遊脚足先と床面との衝突によって、支持脚と遊脚の切換え現象が生じる。受動歩行の研究では、次のような仮定をおいて、脚切換えがモデル化される^{(1)(4)(6)~(11)}。

(1) 遊脚足先と床面との衝突は、完全非弾性衝突である。

(2) 脚の切換えは瞬間的に行われ、支持脚は床面から離れ遊脚となる。

上記の仮定が成り立つ場合、脚切換え(着地)前後において、腰まわりの支持脚の角運動量ならびに遊脚足先まわりの全角運動量が保存されるものとする⁽¹²⁾。これらの角運動量の保存則から、次のような関係式が得られる。

$$Q^+(\alpha)\dot{\theta}^+ = Q^-(\alpha)\dot{\theta}^- \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、

$$Q^+(\alpha) = \begin{bmatrix} ml^2(1-\cos\alpha) & -ml^2 \\ 2ml^2(1-\cos\alpha) + Ml^2 & -ml^2(1-\cos\alpha) \end{bmatrix}$$

$$Q^-(\alpha) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ Ml^2 \cos\alpha & 0 \end{bmatrix}$$

ここで、\$\theta = [\theta, \phi]^T\$ は脚の角度ベクトルを表す。また、\$-\$ は脚切換え直前の状態、\$+\$ は切換え直後の状態を示す。\$\alpha\$ は着地時の股角度 (\$\alpha > 0\$) であり、\$\alpha = -2\theta^+ = 2\theta^- = -\phi^+ = \phi^-\$ の関係式が成り立つ。式(1)から脚切換え直後の角速度ベクトル \$\dot{\theta}^+\$ は、次のように導出される。

$$\dot{\theta}^+ = [Q^+(\alpha)]^{-1} Q^-(\alpha) \dot{\theta}^- = H(\alpha) \dot{\theta}^- \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、

Fig.1 Compass-like biped model

$$H(\alpha) = \begin{bmatrix} \frac{M \cos \alpha}{M + m \sin^2 \alpha} & 0 \\ \frac{M(1 - \cos \alpha) \cos \alpha}{M + m \sin^2 \alpha} & 0 \end{bmatrix}$$

2・2 単純化と特徴 本研究では、解析を容易にするために、腰の質量 \$M\$ が足先の質量 \$m\$ に比べて十分大きい (\$M \gg m\$) ものとした。このモデルは、Simplest walking model と呼ばれ、最も簡単な歩行モデルである⁽⁷⁾。歩行のクラスは限定されるものの、本モデルでも安定したリミットサイクルが存在する。

\$M \gg m\$ であることから \$m/M \approx 0\$ とみなせるので、脚切換え式(2)は次のように単純化できる。

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}^+ \\ \dot{\phi}^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 \\ (1 - \cos \alpha) \cos \alpha & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}^- \\ \dot{\phi}^- \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (3)$$

行列式(3)から、切換え直後の支持脚の角速度は次のようになる。

$$\dot{\theta}^+ = \cos \alpha \dot{\theta}^- = e \dot{\theta}^- \quad \dots\dots\dots (4)$$

本研究では \$e\$ を損失係数と呼ぶことにする。なお、衝突におけるエネルギー残存率は、次に示すように \$e^2\$ に一致する。

$$\frac{\frac{1}{2} M l^2 \dot{\theta}^{+2}}{\frac{1}{2} M l^2 \dot{\theta}^{-2}} = \frac{e^2 \dot{\theta}^{-2}}{\dot{\theta}^{-2}} = e^2 \quad \dots\dots\dots (5)$$

式(4)からわかるように、損失係数 \$e\$ は支持脚の角速度 \$\dot{\theta}^-\$ およびスロープ角度 \$\gamma\$ には依存せず、着地時の股角度 \$\alpha\$ のみによって決まる。

3. 実験的検証

3・1 実験機および計測方法 本研究では、損失係数 \$e\$ が股角度 \$\alpha\$ のみに依存することを実験的に確認し、さらに脚切換え式(4)の妥当性を定量的に評価する。損失係数は \$e = \dot{\theta}^+ / \dot{\theta}^-\$ であるから、着地前後の支持脚の角速度を求めることになる(遊脚の動きは関係ない)。そこで、検証に適した実験機として、図2に示すような脚を腰部分で固定した実験機を用いる。これは、コンパス形の受動歩行機を一定の股角度で衝突させることになる。

実験機の諸元を表1に示す。腰と足先はカツラ材を用い、脚は軽く剛性の高い炭素棒を用いた。なお、腰の質量を足先・脚の質量よりも十分に大きくするために、腰の中心部分に真ちゅう製の円柱を埋め込んだ。一方、床面は厚さ15 mmのラワン合板を用いた。衝突時の合板のたわみおよび振動を防止するために、30×30 mmのL字アングルを裏打ちした。また、足先と床面の滑りを抑えるために、合板の表面に厚さ1 mmの合成ゴムを貼り付けた。

本実験では、遊脚足先を設定した高さから床面に衝突させた。なお、実験機が後方に倒れてしまう場合は、支持脚を重力方向にまっすぐにした状態から腰に水平力を加えて初期速度を与えた。計測方法に関しては、両方の足先と腰の中心に直径4 mmのマーカを付け、高速度カメラ(Photron製:Fastcam-512 PCI 32 K)を用いて、これら三つのマーカを同時に撮影した。撮影した脚切換えの様子を図3に示す。図3からわかるように、遊脚足先が床面と衝突することによって支持脚と遊脚が切替わる。なお、フレームサイズは512×512 pixels, 撮影速度は1 000 frame/sである。

得られた画像からマーカの中心の位置座標を抽出

Table 1 Values of parameter of machine

Length [cm]	Mass [g]
l	32.0
W	6.0
w	5.0
ϕD	6.0
ϕd	2.0
ϕd_L	0.6

Fig. 2 Experimental machine

し、各マーカの位置座標から支持脚の角度 θ を算出した。着地前後の微小時間では角度 θ の時間変化はほぼ線形となるため、その傾きから角速度 $\dot{\theta}$ を算出した。

3・2 評価結果 まず、股角度 α を 29.7 deg, スロープ角度 γ を 0 deg に設定し、着地前後の支持脚の角速度 $\dot{\theta}^-$ を変えた場合の実験を行った。図4(a)に実験結果を示す。横軸は角速度 $\dot{\theta}^-$, 縦軸は損失係数 e である。図4(a)からわかるように、支持脚の角速度 $\dot{\theta}^-$ の値によらず、損失係数 e はほぼ一定 ($e=0.72 \pm 0.03$) となった。また、 γ を 3 deg に変更し同様な実験を行った結果、 $e=0.73 \pm 0.03$ となった。以上のことから、損失係数 e は、支持脚の角速度 $\dot{\theta}^-$ およびスロープ角度 γ には依存しないといえる。

次に、 γ を 0 deg に固定し、股角度 α を変えた場合の実験を行った。 α は脚構造および足先の滑りを考慮して、15 deg から 35 deg の範囲に 7 通り設定した。図4(b)に実験結果を示す。横軸は股角度 α , 縦軸は損失係数 e である。各股角度に対して 7 回の実験を行い、その平均値および標準偏差を示した。なお、 e の解析値 [式(4)] を図中に併記した。図4(b)からわかるように、損失係数は着地時の股角度に依存しており、股角度が増大すると減少する特徴を持つことが実験的に確かめられた。しかし、実験値と解析値の間には誤差が見られ、股角度が大きくなるにつれてその差が大きくなる傾向にある。

以上のことから、2章で示した脚切換えモデルは定性的には合っているが、定量的には問題がある。

4. 厳密な脚切換えモデル

4・1 実際の衝突現象 3・2節で示した定量的なモデル化誤差は、モデル化に際して導入した二つの仮定によるものだと考え、実際の衝突現象をより詳細に観察することにした。具体的には、高速度カメラのフレームサイズを512×128 pixels, 撮影速度を8 000

Fig. 3 Leg-exchange phenomenon

(a) Angular velocity of support leg $\dot{\theta}^-$ (b) Inter-leg angle α Fig. 4 Variation of loss coefficient e

frame/s に設定して床面付近を撮影した。

図5は股角度 α を 22.9° とし、遊脚足先を 20 mm の高さから床面に衝突させたときの連続写真である。図5からわかるように、遊脚足先が床面に着地してから支持脚が床面から完全に離れるまでに、約 4 ms の時間がかかっている。したがって、2・1 節で述べた仮定のように脚の切換えは瞬間的には行われておらず、実際は次のように脚の切換えが行われていると考えることができる。

(1) 遊脚足先と床面との衝突は弾性衝突(完全非弾性衝突を含む)である。ただし、跳ね返りは微小である。

(2) 脚の切換えには微小時間がかかり、その間、支持脚足先まわりに衝突の衝撃によるトルクが発生し、角運動量が損失する。

4・2 角運動量の損失 本節では、4・1 節で述べた実際の現象に基づき、角運動量に関する式を導出する。まず、衝突(両脚が着地)している微小時間を Δt_d とする。図6に示すように、衝突の衝撃によって遊脚足先に衝撃力 F_{dy} (y 方向成分)が発生する。このとき、

Fig. 5 Collision phenomenon

Fig. 6 Model of collision phenomenon

支持脚足先まわりに発生するトルク T の総和は、次のように表すことができる。

$$\int_0^{\Delta t_d} T dt \approx 2\bar{F}_{dy}\Delta t_d l \sin \frac{\alpha}{2} \quad \cdots \cdots (6)$$

ここで、 $\bar{F}_{dy}$ は F_{dy} の平均値を表す。また、衝突における運動量保存則と跳ね返り式から次式が導かれる。

$$\begin{aligned} \bar{F}_{dy}\Delta t_d &= M(v_{dy}^+ - v_{dy}^-) \\ &= -M(c+1)v_{dy}^- \\ &= -Ml(c+1)\dot{\theta}^- \sin \frac{\alpha}{2} \quad \cdots \cdots (7) \end{aligned}$$

Fig. 7 Modified leg-exchange model

ここで、 v_{dy} および v_{dy}^+ は、衝突直前および直後の速度の y 方向成分を表す。また、 c は跳ね返り係数である。式(6)および式(7)から、衝突の衝撃によって発生するトルクの総和は、最終的に次のようになる。

$$\int_0^{dt_d} T dt \approx -2Ml^2(c+1)\dot{\theta}^- \sin^2 \frac{\alpha}{2} \quad \cdots \cdots (8)$$

衝突前後の角運動量は、次のような関係が成り立つ。

$$Ml^2\dot{\theta}_d^+ = Ml^2\dot{\theta}^- + \int_0^{dt_d} T dt \quad \cdots \cdots (9)$$

ここで、 $\dot{\theta}_d^+$ は衝突直後の支持脚の角速度である。脚切換えをモデル化する場合、式(9)に示す衝突の衝撃による角運動量の損失を考慮しなければならない。式(8)および式(9)から、 $\dot{\theta}_d^+$ は次のように与えられる。

$$\dot{\theta}_d^+ = \dot{\theta}^- - 2(c+1)\dot{\theta}^- \sin^2 \frac{\alpha}{2} \quad \cdots \cdots (10)$$

4.3 修正脚切換えモデル 本節では、4.2節の結果に基づき、より厳密な脚切換えモデルを導出する。衝突直後と脚切換え直後において、腰まわりの支持脚の角運動量ならびに遊脚足先まわりの全角運動量が保存されるものとする。これらの角運動量の保存則から、次式が得られる。

$$\dot{\theta}^+ = H(\alpha)\dot{\theta}_d^+ \quad \cdots \cdots (11)$$

ただし、 $\dot{\theta}_d^+ = [\dot{\theta}_d^+, \dot{\phi}_d^+]^T$ は、衝突直後の脚の角速度ベクトルを表す。式(11)から、脚切換え後の支持脚および遊脚の角速度 $\dot{\theta}^+$ および $\dot{\phi}^+$ は、次式のように導かれる。

$$\dot{\theta}^+ = \cos \alpha \dot{\theta}_d^+ \quad \cdots \cdots (12)$$

$$\begin{aligned} \dot{\phi}^+ &= \cos \alpha (1 - \cos \alpha) \dot{\theta}_d^+ \\ &= (1 - \cos \alpha) \dot{\theta}^+ \quad \cdots \cdots (13) \end{aligned}$$

式(13)からわかるように、脚切換え後の遊脚の角速度 $\dot{\phi}^+$ は、角速度 $\dot{\theta}^+$ に関係しない。

式(10)および式(12)から、脚切換え直後の支持脚の角速度は次のようになる。

$$\dot{\theta}^+ = \left[\cos \alpha - 2(c+1) \sin^2 \frac{\alpha}{2} \cos \alpha \right] \dot{\theta}^- \quad \cdots \cdots (14)$$

跳ね返り係数 c が十分に小さい ($c \approx 0$) のものとする、式(14)は次のように書き換えられる。

$$\dot{\theta}^+ = \left(\cos \alpha - 2 \sin^2 \frac{\alpha}{2} \cos \alpha \right) \dot{\theta}^- \quad \cdots \cdots (15)$$

なお、着地時の股角度 α が十分に小さい場合は、式(15)の右辺第2項を無視することができ、式(4)と一致する。

損失係数 e の実験値ならびに式(15)による解析値(実線)を図7に示す。図7からわかるように、式(15)は近似度が高く、修正脚切換えモデルは定量的にも妥当なモデルといえる。

5. 結 言

受動歩行の研究では、平衡点の生成ならびにその安定性あるいは安定化が非常に重要となっている⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。本研究では、平衡点生成に大きく関与している脚切換え現象について議論した。以下に得られた結果をまとめる。

(1) 受動歩行機を模擬した簡単な実験機を用いて、一般的な脚切換えモデルを定性的・定量的に評価した。その結果、定性的には合っているが、定量的には問題があることを示した。

(2) 脚切換えを引き起こす衝突現象は、実際、跳ね返りは小さいものの弾性衝突である。また微小時間、支持脚足先まわりに衝突の衝撃力によるトルクが発生し、角運動量が損失する。

(3) 力学的考察に基づいて定式化し、より厳密な脚切換えモデル [式(15)] を導出した。損失係数に関して高い近似度を示しており、修正モデルは定量的にも妥当なモデルといえる。

脚切換え直後の状態 $\dot{\theta}^+$ 、 $\dot{\phi}^+$ および α は、式(13)で表される状態に拘束される。この点の実験的検証は今後の課題である。

文 献

- (1) McGeer, T., Passive Dynamic Walking, *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 9, No. 2 (1990), pp. 62-82.
- (2) Osuka, K., Legged Robots and Control Scheme Based on a Sense of Passive Dynamic Walking, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol. 20, No. 3 (2002), pp. 233-236.
- (3) Collins, S. et al., Efficient Bipedal Robots Based on Passive-Dynamic Walkers, *Science*, Vol. 307 (2005), pp. 1082-1085.
- (4) Ikemata, Y. et al., A Structure of the Mechanism of Stability of Fixed Points in Passive Walking, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol. 23, No. 7 (2005),

- pp. 839-846.
- (5) Yamaguchi, J. et al., Stabilization of Biped Walking and Acquisition of Landing Surface Position Information Using Foot Mechanism with Shock Absorbing Material, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol. 14, No. 1 (1996), pp. 67-74.
 - (6) Coleman, M. J. et al., Motions of a Rimless Spoked Wheel: a Simple 3 D System with Impacts, *The International Journal of Dynamics and Stability of Systems*, Vol. 12, No. 3 (1997), pp. 139-160.
 - (7) Garcia, M. et al., The Simplest Walking Model: Stability, Complexity, and Scaling, *Transaction of the ASME. Journal of Biomechanical Engineering*, Vol. 120 (1998), pp. 281-288.
 - (8) Goswami, A. et al., A Study of the Passive Gait of a Compass-Like Biped Robot: Symmetry and Chaos, *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 17, No. 12 (1998), pp. 1282-1301.
 - (9) Asano, F. et al., Gait Generation and Control for Biped Robots Based on Passive Dynamic Walking, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol. 22, No. 1 (2004), pp. 130-139.
 - (10) Wisse, M. et al., How to Keep From Falling Forward : Elementary Swing Leg Action for Passive Dynamic Walkers, *IEEE Transaction on Robotics*, Vol. 21, No. 3 (2005), pp. 393-401.
 - (11) Spong, M. W. and Bullo, F., Controlled Symmetries and Passive Walking, *IEEE Transaction on Automatic Control*, Vol. 50, No. 7 (2005), pp. 1025-1031.
 - (12) Hurmuzlu, Y. and Chang, T., Rigid Body Collisions of a Special Class of Planar Kinematic Chains, *IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 22, No. 5 (1992), pp. 964-971.
 - (13) Ikemata, Y. et al., A Gait Based on the Stability Mechanism of Passive Walking—Generation of Fixed Point and Local Stabilization Method—, *Proceedings of 2005 JSME (The Japan Society of Mechanical Engineers) Annual Conference on Robotics and Mechatronics*, (2005-6), 1 P 1-S-045.
 - (14) Ikemata, Y. et al., A Gait Based on the Stability Mechanism of Passive Walking—Global Stabilization Method and Experimental Test—, *Proceedings of 2005 JSME (The Japan Society of Mechanical Engineers) Annual Conference on Robotics and Mechatronics*, (2005-6), 1 P 2-S-040.