

平衡点の大域的安定化原理に基づくロバストな受動歩行

池 俣 吉 人* 佐 野 明 人* 藤 本 英 雄*

Robust Passive Walking Based on a Global Stabilization Principle of Fixed Point

Yoshito Ikemata*, Akihito Sano* and Hideo Fujimoto*

A passive walker can walk down shallow slope. This gait, which results from the interaction between the nonlinear dynamic system and the environment, is really a physical phenomenon in itself. Though the passive walking is energy efficient and has natural gait like human being, it is fragile. It is extremely difficult for a walker with knees to walk for several steps and achieve high success rate in the real world. The passive walker is a sort of hybrid system and can exhibit a stable limit cycle. Therefore, a global stability around the fixed point is essential for achieving robust walking. We focus on the stability mechanism of fixed point. In this paper, first, a global stabilization principle is mathematically established. Based on this principle, a simple mechanism making the inter-leg angle at heel-strike constant was adopted in the developed walker. Finally, the improvement of robustness is confirmed by a dynamical walking experiment.

Key Words: Passive Walking, Fixed Point, Global Stability, Principle, Robustness

1. は じ め に

現在の歩行ロボットは、高精度なセンサ、高性能なアクチュエータおよび高度な制御からなる最先端テクノロジーの結晶である。その歩行制御の要になっているのが、ZMP (Zero Moment Point) である [1] [2]。ZMP は、姿勢安定性 (歩行時に限らない) に関する重要な指標であり、ZMP を支持多角形内の安定領域に設定し、転倒しないように「歩かせる」ことができる。最近では、ヒトに近い歩容が提案されている [3]。

一方、受動歩行は、あらかじめ決められた脚軌道を取ることなく、歩行機のもつダイナミクスと環境との相互作用のみによって歩容を生成する [4]。特に、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もつ。すなわち、ある状態から定常歩行に収束する一種の引き込み現象が見られる。ここで注目すべき点は、力学的原理により本質的に「歩ける」ことである [5]。また、受動歩行は自然でエネルギー効率が高いことで知られ [6]、ヒトの歩行に近いとも言われている [7]。

ZMP 規範の制御方式で極めてロバストな歩行が実際のロボットで実現されている中、やはり受動歩行機によるロバストな歩行の実現が不可欠と言える。しかし、受動歩行は力学現象 (物理現象) そのものであり、膝ありタイプの受動歩行機は数歩程度の歩行でも低い確率でしか実現できず、そのロバスト

性の低さが大きな問題となっている。その中で、Collins らは様々な工夫をこらした歩行機により比較的安定した受動歩行を実現した [8]。また、平地における三次元歩行を成功させた点は先駆的である。しかし、以下に示す平衡点の安定化原理を考慮したものではない。

歩行の原理を考える上で重要なのは「平衡点」である。平衡点とは、リミットサイクルの一断面の点であり、着地直後の状態といった離散的な状態であるが、この平衡点の安定性を見るだけで歩行全体の安定性が示せる。筆者らは、まず、第 1 報 [9] で平衡点の力学的構造ならびに安定メカニズムを明らかにし、安定条件式を導出した。次に、第 2 報 [10] で平衡点の生成ならびに平衡点の情報を陽に組み込んだ局所安定化法を提案した。これまで、平衡点を安定化する様々な制御手法 [11]~[13] が提案されているが、その多くが制御理論的な発想に基づいたものであるのに対して、第 2 報で提案した制御則は、平衡点の安定メカニズムの力学的構造から必然的に導かれたものである。しかし、これらの局所的な安定化制御は、必ずしも大域的な安定性の向上には繋がらない [14]。

受動歩行のロバスト性を高めるためには、やはり平衡点の大域的な安定化が不可欠である。第 1 報で一定の股角度になるように前方に倒れるだけで大域的安定性が保証されることを指摘した。しかしこの段階では、数学的証明が不十分であり、また実機開発への応用ならびに実験的検証には至っていなかった。そこで、本論文では、平衡点の大域的安定化原理を数学的により明確に示した上で、その原理に基づいて受動歩行のロバスト性を向上させることを目的とする [15]。2 章では、受動歩行の着地

原稿受付 2006 年 12 月 27 日

*名古屋工業大学大学院工学研究科

*Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology

■ 本論文は学術性で評価されました。

直後の状態を取り扱うために、足部を有する 2 リンクモデルに対して、簡単化された脚切り換えに関する式の導出を行う。3 章では、受動歩行システムの差分方程式を導出する。そして、着地時の股角度が一定になっていれば平衡点が唯一存在することを示し、さらに平衡点が大域的漸近安定となることを証明する。4 章では、その安定化原理に着眼を得て新たに開発した受動歩行機について説明する。そして、実機による動歩行実験について述べ、実現した受動歩行のロバスト性を示す。

2. 足部を有する受動歩行モデル

2.1 着地直後の2リンクモデル

膝ありタイプの受動歩行機を用いるのであれば、3リンクモデルに対する安定性の議論が不可欠のように思える。しかし、遊脚がほぼ真直ぐな状態で着地する場合、離散的な状態として着地直後の状態を選ぶことによって、2リンクモデルで安定性を議論することができる。すなわち、あえて複雑な3リンクモデルを使わずとも歩行全体の安定性を示せることが、平衡点の安定性を考えるメリットである。また、歩行中に接地点が円弧部分を移動したとしても、安定性の議論には影響しない。

足部を有する 2 リンクモデルを **Fig. 1** に示す。ただし、脚切り換え直後を表し、前脚が支持脚であり、後脚が遊脚である。また、前後脚共に同じ物理パラメータである。 l は脚長、 a はくるぶしから脚の重心までの距離、 b は同じく腰関節からの距離である。 M は腰の質量、 m は脚の質量、 I は脚の重心まわりの慣性モーメントである。 θ は支持脚の角度、 ϕ は遊脚の角度、 α は着地時の股角度を表す。また、 γ はスロープ角度、 g は重力加速度を表す。

足部に関しては、曲率半径を ρ 、円弧中心とくるぶしとを結ぶ直線と脚とのなす角度を δ とする。また、円弧中心と腰関節とを結ぶ直線の長さを d 、その直線と脚とのなす角度を ζ 、同じく脚の重心とを結ぶ直線の長さを d' 、その直線と脚とのなす角度を ζ' とする。なお、 d 、 d' および ζ 、 ζ' は従属変数であ

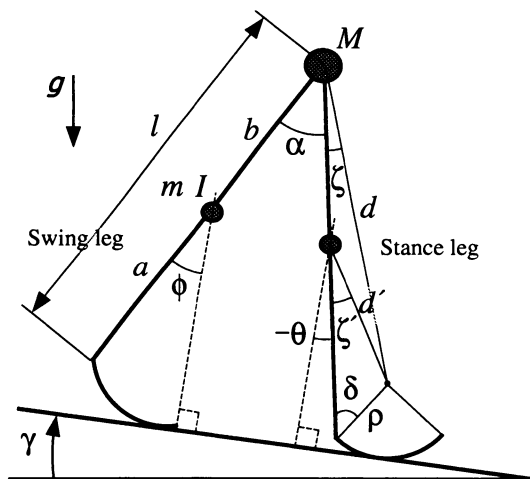


Fig. 1 2-link model with feet just after heel-strike

[†] 歩行実験でも脚切り換えはほぼ瞬間的に行われ、その間に接地点は移動しない。

り, ρ, δ 等により決まる (付録 A 参照).

2.2 脚の切り換え式

脚の切り換え現象に関しては、遊脚足部と床面との衝突現象は完全非弾性衝突、さらに着地の瞬間に支持脚が床面から離れると仮定する[†]。また、解析を簡単化するために、腰の質量 M が脚の質量 m に比べて十分に大きいものとする ($M \gg m$)。なお、モデル化誤差の影響は今後の課題としたい。

着地前後において遊脚（脚切り換え後は支持脚）接地点まわりの全角運動量ならびに腰関節まわりの支持脚の角運動量が保存される[16]。これらの角運動量の保存則から、着地前後では次のような関係式が得られる。

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

ただし、

$$\mathbf{Q}^+(\alpha) = \begin{bmatrix} \rho^2 + d^2 + 2\rho d \cos \frac{\alpha}{2} & 0 \\ bd \cos(\alpha + \zeta) + \rho b \cos \left(\frac{\alpha}{2} + \zeta \right) & -b^2 - \frac{I}{m} \end{bmatrix}$$

ここで、 $\theta = [\theta, \phi]^T$ は脚の角度ベクトルを表し、 $-$ は着地直前の状態、 $+$ は着地直後の状態を表す。式 (1) から着地直後の角速度ベクトルは、 $\dot{\theta}^+ = (Q^+(\alpha))^{-1} Q^-(\alpha) \dot{\theta}^-$ となり、股角度 α を使って書き表すことができる。

3. 平衡点の大域的な安定化原理

3.1 差分方程式

本研究では、離散的な状態として k 歩目における着地直後の状態 $\alpha_k, \theta_k^+, \phi_k^+$ に注目する．まず、本節では、着地時の股角度が一定となるときの差分方程式を導出する．1 歩区間を **Fig. 2** に示すように着地直後から次の着地直後までとする． k 歩目における着地直後の状態から、 $k+1$ 歩目における着地直前の状態へと脚の振り運動により遷移したとすると、エネルギー

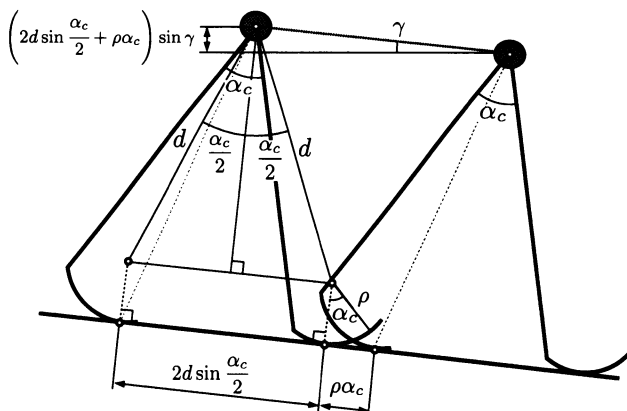


Fig. 2 Geometric model of one stride

保存則から次式が導出される．ただし，着地時の股角度は一定 ($\alpha_{k+1} = \alpha_k = \alpha_c$) とする．

$$\frac{1}{2} M l_c^2 \dot{\theta}_{k+1}^{-2} = \frac{1}{2} M l_c^2 \dot{\theta}_k^{+2} + M g \left(2d \sin \frac{\alpha_c}{2} + \rho \alpha_c \right) \sin \gamma \quad (2)$$

ただし，

$$l_c = \sqrt{\rho^2 + d^2 + 2\rho d \cos \frac{\alpha_c}{2}}$$

式 (2) から着地直前の支持脚の角速度 $\dot{\theta}_{k+1}^-$ は，次式のようになる．

$$\dot{\theta}_{k+1}^- = \sqrt{\dot{\theta}_k^{+2} + \frac{2g}{l_c^2} \left(2d \sin \frac{\alpha_c}{2} + \rho \alpha_c \right) \sin \gamma} \quad (3)$$

次に， $k+1$ 歩目の着地直前の状態から直後の状態へと脚切り換えによって遷移したとすると，式 (1) から次式が成り立つ．

$$\dot{\theta}_{k+1}^+ = \frac{\rho^2 + d^2 \cos \alpha_c + 2\rho d \cos \frac{\alpha_c}{2}}{\rho^2 + d^2 + 2\rho d \cos \frac{\alpha_c}{2}} \dot{\theta}_{k+1}^- = e_c \dot{\theta}_{k+1}^- \quad (4)$$

本研究では， e_c ($0 < e_c < 1$) を損失係数と呼ぶ．式 (3) および式 (4) を整理することにより，次のような差分方程式が得られる．

$$\dot{\theta}_{k+1}^+ = e_c \sqrt{\dot{\theta}_k^{+2} + \frac{2g}{l_c^2} \left(2d \sin \frac{\alpha_c}{2} + \rho \alpha_c \right) \sin \gamma} \quad (5)$$

Fig. 3 に足部の形状を規定する角度 δ ，半径 ρ を変化させた場合の損失係数 e_c を等高線で示す．ただし， α_c は 0.523 [rad] (約 30 [deg]) とした．点接地 ($\delta = 0$ [rad], $\rho = 0$ [mm]) の場合， e_c は 0.866 となり，4.1 節に示す受動歩行機 ($\delta = 0.436$ [rad], $\rho = 90$ [mm]) の場合， e_c は 0.920 となる (Fig. 3 中の○印)．したがって，円弧形状の足部を有するほうが，損失が小さいことが分かる．

3.2 平衡点の存在

本節では，着地時の股角度が一定となるとき，必ず一つの平衡点が生成されることを示す．差分方程式 (5) から， $\dot{\theta}_{k+1}^+ = \dot{\theta}_k^+$ となる支持脚の角速度 $\dot{\theta}_k^+$ は，次のように導かれる．

$$\dot{\theta}_k^+ = \sqrt{\frac{2e_c^2 g}{l_c^2 (1 - e_c^2)} \left(2d \sin \frac{\alpha_c}{2} + \rho \alpha_c \right) \sin \gamma} \quad (6)$$

また，脚切り換え式 (1) を展開し $\dot{\theta}_k^-$ を消去して整理すると，遊脚の角速度 $\dot{\phi}_k^+$ は次のようになる．

$$\dot{\phi}_k^+ = q(\alpha_c) \dot{\theta}_k^+ \quad (7)$$

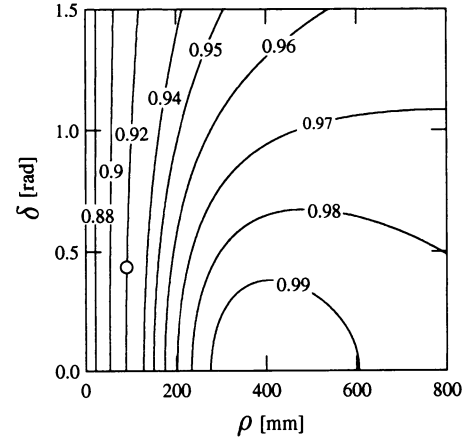


Fig. 3 Variation of the loss coefficient e_c

ただし，

$$q(\alpha_c) = \frac{1}{b^2 + I/m} \left\{ b d \cos(\alpha_c + \zeta) + \rho b \cos \left(\frac{\alpha_c}{2} + \zeta \right) - \frac{1}{e_c} \left(\rho b \cos \left(\frac{\alpha}{2} - \zeta \right) + b d' \cos \zeta' - \frac{I}{m} \right) \right\}$$

式 (7) から， $\dot{\theta}_{k+1}^+ = \dot{\theta}_k^+$ となるとき $\dot{\phi}_{k+1}^+ = \dot{\phi}_k^+$ が成立する．すなわち，着地直後の状態は，平衡点として一点に固定される (Fixed point)．

3.3 平衡点の大域的安定化

平衡点の大域的な安定性を議論する場合，Fig. 2 に示すように支持脚が前方に倒れて遊脚がその支持脚を振り抜き，次の着地直後の状態が存在することが前提となる．そこで，本研究では， $\dot{\theta}_k^+ > 0$ (前方に倒れるための必要条件) を満たす範囲の大域的安定性について議論するが，局所安定性のように平衡点近傍に限定されるものではない．

本節では，着地時の股角度が一定となるとき，平衡点が大域的に漸近安定となることを示す． $\dot{\phi}_k^+$ は $\dot{\theta}_k^+$ の従属変数となることから，状態量は $\dot{\theta}_k^+$ だけとなる．平衡点における支持脚の角速度 $\dot{\theta}_f^+$ は，式 (6) で表される．したがって， $\dot{\theta}_{k+1}^{+2} - \dot{\theta}_f^{+2}$ は次式のように与えられる．

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_{k+1}^{+2} - \dot{\theta}_f^{+2} &= e_c^2 \left\{ \dot{\theta}_k^{+2} + \frac{2g}{l_c^2} \left(2d \sin \frac{\alpha_c}{2} + \rho \alpha_c \right) \sin \gamma \right\} - \dot{\theta}_f^{+2} \\ &= e_c^2 (\dot{\theta}_k^{+2} - \dot{\theta}_f^{+2}) - (1 - e_c^2) \dot{\theta}_f^{+2} \\ &\quad + \frac{2e_c^2 g}{l_c^2} \left(2d \sin \frac{\alpha_c}{2} + \rho \alpha_c \right) \sin \gamma \\ &= e_c^2 (\dot{\theta}_k^{+2} - \dot{\theta}_f^{+2}) \end{aligned} \quad (8)$$

ここで， $0 < \alpha_c < \pi/2$ とすると $0 < e_c^2 < 1$ となり，次式が成り立つ．

$$|\dot{\theta}_{k+1}^{+2} - \dot{\theta}_f^{+2}| < |\dot{\theta}_k^{+2} - \dot{\theta}_f^{+2}| \quad (9)$$

式 (9) から, $\lim_{k \rightarrow \infty} |\dot{\theta}_k^{+2} - \dot{\theta}_f^{+2}| = 0$ が成り立つ. ここで, $\dot{\theta}_k^{+} > 0$ の場合, $\lim_{k \rightarrow \infty} \dot{\theta}_k^{+} = \dot{\theta}_f^{+}$ となる.

以上のことから, 着地時の股角度が一定[†] になっていれば, 唯一の平衡点が存在し, かつその平衡点は大域的漸近安定となる (大域的安定化原理).

4. 歩 行 実 験

4.1 膝ありタイプの受動歩行機

Fig. 4 に開発した膝ありタイプの受動歩行機を示す. 全長 0.42 [m], 全幅 0.15 [m] と比較的小型であり, 全質量 1.5 [kg] となっている. 同一の脚が 4 本あり, 内脚および外脚それぞれが 2 本ペアで同期して動く. このような構造を採ることによって, 左右バランスを確保し, かつ内脚・外脚のダイナミクスが等しくなる. Fig. 1 の物理パラメータに関しては, 脚長 l は 0.38 [m], 距離 a および b は, それぞれ 0.20 [m] および 0.18 [m] である. また, 足部は下腿部に固定されており, 円弧の曲率半径 ρ は 90 [mm], 角度 δ は 0.436 [rad] である.

本研究では, 3 章で示した大域的安定化原理に基づき, 着地時の股角度が常に一定となるようにする. ここで, サーボ機構により能動的に実現することも可能であるが, 本実験機では, Fig. 4 に示すように外脚の下腿部に「ロの字」の軽量フレーム (質量 0.03 [kg]) を取り付けした. この外脚フレームにより股角度

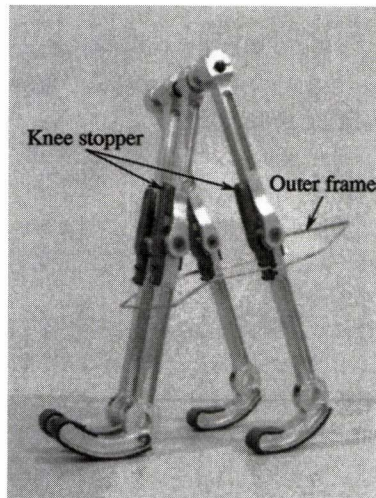
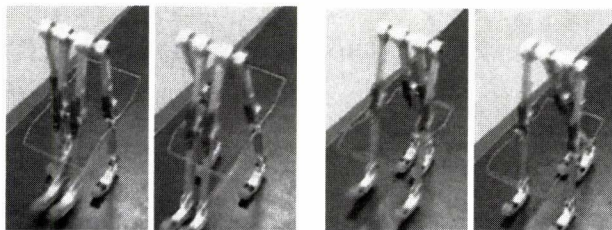


Fig. 4 Passive walker inspired by the global stabilization principle



(a) Inner legs (b) Outer legs

Fig. 5 Mechanism for making the inter-leg angle constant

が一定となる様子を **Fig. 5** に示す.

内脚が遊脚の場合は, 内脚の前面がフレームに当たり, 着地時の股角度がほぼ一定に拘束される (Fig. 5 (a) 参照). 外脚が遊脚の場合は, フレームが内脚 (支持脚) の背面に当たり, 股角度が同様に拘束される (Fig. 5 (b) 参照). また, このフレームが下腿部に固定されていることから, 外脚を完全に同期させることができる. なお, 内脚は膝部および足部で左右連結されている.

下腿部の膝付近に固定されたストッパーが, 衝撃吸収材 (ソルボセイン) が貼付された大腿部に衝突し, 基本的に真直ぐな状態となる. また, 足裏には 0.8 [mm] のシート状の衝撃吸収材 (PORON, H-48) の上に滑り止めシート (ノンスリップシート) が重ねて貼り付けてある. その他, 本機は次のような特色をもつ.

- ・ 中空腰軸で外脚同期とねじり剛性の確保
- ・ 面結合による容易に換装可能な足部
- ・ 最小限の部品構成で剛性・精度向上
- ・ 膝部をポイントとし H 断面脚での意匠統一

4.2 検証実験

本実験では, スロープとして厚さ 15 [mm] のラワン合板を用いた. 着地時の合板の振動およびたわみを抑制するために, 30 × 30 [mm] の L 字アングルを裏打ちした. 全長は 1.8 [m] で最大 8 歩の連続歩行が可能となっている. また, スロープ角度を 0.087 [rad] (約 5 [deg]) に設定した.

初期状態の与え方を以下に示す. 実験者が右手で腰部, 左手で内脚の足部を把持し持ち上げた状態から, まず外脚の踵をスロープに接地させる. 次に, 内脚の足部を浮かせた状態で一定の速度で前方に引き寄せる. このとき, 右手は全体の動きを妨げないようにサポートする. 内脚がフレームに接触したら, 同時に両手を離して歩行機をリリースする. なお, できる限り同一の初期状態になるように同一の実験者が行っている. また, 外脚フレームの長さを調整し, 着地時の股角度が 25 [deg] 付近で実験を行った.

Fig. 6 に歩行実験をそれぞれ 300 回行った際の歩数の頻度を示す. 横軸に達成した歩数, 縦軸にその頻度を示す. 図から分かるように, 着地時の股角度を一定としない (フレームなし) 場合は, 約 65% が 2 歩で転倒している. 一方, 股角度を一定と

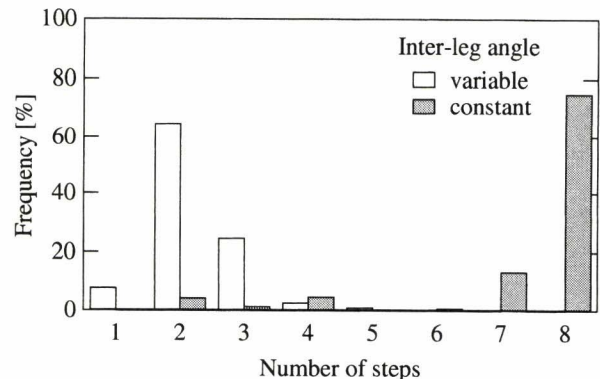


Fig. 6 Success rate in continuous passive walking

[†] 遊脚が真直ぐな状態で着地することから, 着地位置が一定と等価である.

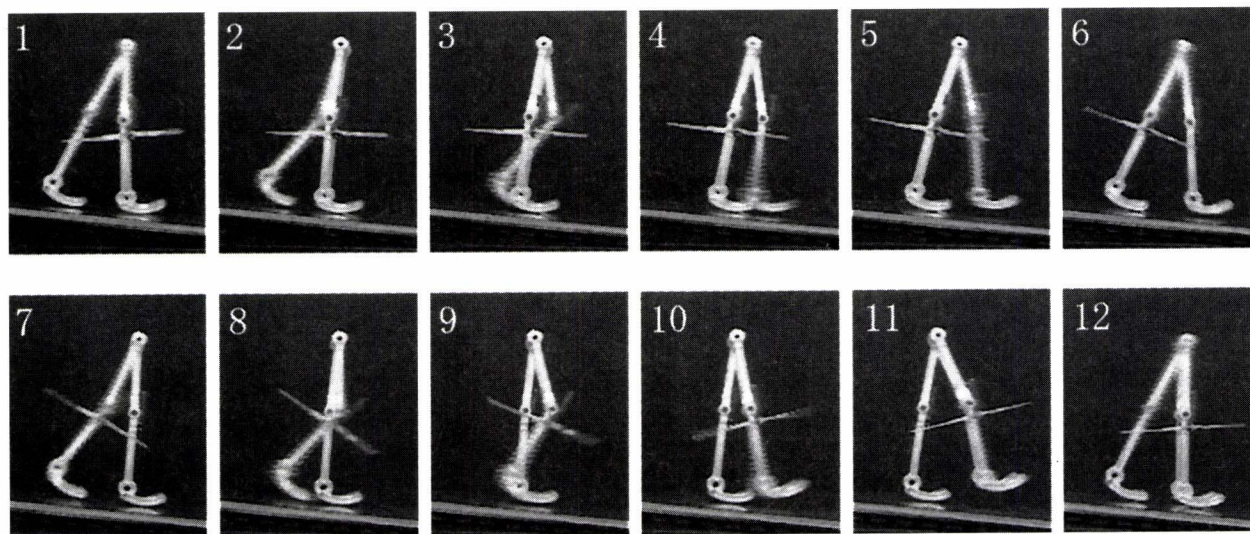


Fig. 7 A photographic playback of two complete strides

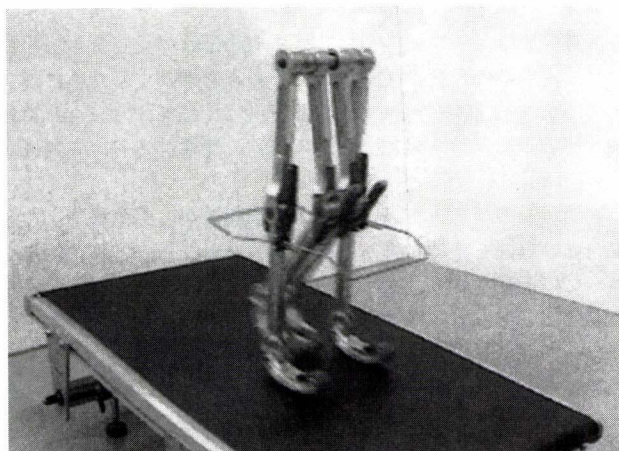


Fig. 8 Passive walking on downhill treadmill

した（フレームあり）場合は、最大歩数 8 歩での連続歩行を約 75%の成功率で達成した。なお、Fig. 7 に歩行の様子を示す。

4.3 歩行記録実験

定常歩行となった場合は周期運動となるので、数歩分の実験を行うことが一般的である。しかし、本研究では、歩行を自然が織りなす力学現象と捉えており、現象そのもののロバスト性の向上が大切だと考えている。そこで、Fig. 8 に示すトレッドミル（マルヤス機械、MMX2）を用いて歩行記録実験を行った。ベルトの長さおよび幅は、それぞれ 0.8 および 0.4 [m] である。また、スロープ角度は 0.12 [rad]（約 7 [deg]）に設定した。なお、ベルトの速度は一定とする。

着地時の股角度は、受動歩行の平衡点のものでなくてもよく、平衡点をある程度任意に設定できる。また、着地時の股角度は移動効率に影響しない（付録 B 参照）。予備実験においてフレーム長を調整し、 28 [deg] の股角度に設定した。実験の結果、連

続歩行記録として、4,010 歩の歩行（約 35 分の歩行時間）[†]を達成した。なお、最後は転倒したが、歩行機を調べてみたところ外脚フレームのゆるみが認められた。また、積極的な直進安定化を図っていないために、歩行面から転落することが多い。今後、直進安定性に関しても何らかの方策が必要であると考えている。

4.2 節および本節の実験結果から、平衡点の大域的安定化原理に裏付けされた着地時の股角度一定則が、受動歩行のロバスト性を飛躍的に向上させることを実証した。

5. 結 論

本研究では、受動歩行のロバスト性の向上を目的とし、受動歩行の力学的原理に基づいた大域的安定化手法を提案し、歩行実験によりその有効性を実証した。

まず、着地時の股角度が一定になっていれば平衡点が存在し、かつその平衡点は大域的漸近安定となることを数学的に証明した。これは、平衡点の大域的安定化原理と呼べるものである。次に、着地時の股角度を一定にする簡単な機構を導入し、開発した歩行機により歩行実験を行った。最大歩数 8 歩での連続歩行を約 75%の成功率（実験回数 300 回）で実現し、4,010 歩（歩行時間約 35 分）の連続歩行記録を樹立した。以上のように、受動歩行のロバスト性が飛躍的に向上することを歩行実験において実証した。

今後、足部の振り抜き問題を含んだ脚の振り運動の力学的解析を行い、脚が本来有している能力をダイナミクスレベルで最適化する [17]。

謝 辞 受動歩行機の試作ならびに製作にご協力頂いた竹内宣勝氏（名古屋工業大学大学院修了生）、（株）今仙技術研究所に感謝いたします。また、本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金平成 19 年度基盤研究（B）（課題番号：19360115）の援助を受けており、ここに謝意を表する。

[†]歩数はビデオテープからカウントした。ただし、テープが分かれてしまったために、実際の歩数はこれをわずかに上回る。

参 考 文 献

- [1] M. Vukobratovic and J. Stepanenko: "On the Stability of Anthropomorphic Systems," Mathematical Biosciences, vol.15, pp.1-37, 1972.
- [2] 梶田秀司: "ゼロモーメントポイント (ZMP) と歩行制御", 日本ロボット学会誌, vol.20, no.3, pp.229-232, 2002.
- [3] Y. Ogura, K. Shimomura, H. Kondo, A. Morishima, T. Okubo, S. Momoki, Hun-ok Lim and A. Takanishi: "Human-like Walking with Knee Stretched, Heel-contact and Toe-off Motion by a Humanoid Robot," Proc. of the 2006 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.3976-3981, 2006.
- [4] T. McGeer: "Passive Dynamic Walking," The Int. J. of Robotics Research, vol.9, no.2, pp.62-82, 1990.
- [5] 佐野明人, 池俣吉人, 藤本英雄: "歩行現象: 平衡点の安定メカニズム", システム制御情報学会誌, vol.49, no.10, pp.399-404, 2005.
- [6] 浅野文彦, 羅志偉, 山北昌毅: "受動歩行を規範とした2足ロボットの歩容生成と制御", 日本ロボット学会誌, vol.22, no.1, pp.130-139, 2004.
- [7] S.H. Collins, A. Ruina, R. Tedrake and M. Wisse: "Efficient Bipedal Robots Based on Passive Dynamic Walkers," Science, vol.307, pp.1082-1085, 2005.
- [8] S.H. Collins and A. Ruina: "A Bipedal Walking Robot with Efficient and Human-Like Gait," Proc. of the 2005 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1983-1988, 2005.
- [9] 池俣吉人, 佐野明人, 藤本英雄: "受動歩行における平衡点の安定メカニズムの構造", 日本ロボット学会誌, vol.23, no.7, pp.839-846, 2005.
- [10] 池俣吉人, 佐野明人, 藤本英雄: "受動歩行の安定メカニズムを規範とした平衡点生成と局所安定化", 日本ロボット学会誌, vol.24, no.5, pp.632-639, 2006.
- [11] S. Suzuki and K. Furuta: "Enhancement of Stabilization for Passive Walking by Chaos Control Approach," Proc. of IFAC World Congress, pp.133-138, 2002.
- [12] 平田健太郎, 小亀英己: "状態にジャンプを有する線形システムの周期運動-Compass Walking のモデリング, 安定解析, フィードバック制御", システム制御情報学会論文誌, vol.17, no.12, pp.553-560, 2004.
- [13] 杉本靖博, 大須賀公一: "遅延フィードバック制御に基づく準受動的歩行の安定化制御", システム制御情報学会論文誌, vol.18, no.7, pp.255-260, 2005.
- [14] A.L. Schwab and M. Wisse: "Basin of Attraction of the Simplest Walking Model," Proc. ASME Int. Conf. on Noise and Vibration, CD-ROM, 2001.
- [15] Y. Ikemata, A. Sano and H. Fujimoto: "A Principle of Gait Generation and its Stabilization from Mechanism of Fixed Point," Proc. of the 2006 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.836-841, 2006.
- [16] Y. Hurmuzlu and T. Chang: "Rigid Body Collisions of a Special Class of Planar Kinematic Chains," IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, vol.22, no.5, pp.964-971, 1992.
- [17] 池俣吉人, 安原潔志, 佐野明人, 藤本英雄: "受動歩行における脚の振り運動のメカニズムに関する研究", 第24回日本ロボット学会学術講演会予稿集 CD-ROM, 1F24, 2006.

付録 A. 従属変数 d , d' および ζ , ζ'

$$d = \sqrt{(\rho \sin \delta)^2 + (l - \rho \cos \delta)^2} \quad (\text{A.1})$$

$$d' = \sqrt{(\rho \sin \delta)^2 + (l - b - \rho \cos \delta)^2} \quad (\text{A.2})$$

$$\zeta = \tan^{-1} \left(\frac{\rho \sin \delta}{l - \rho \cos \delta} \right) \quad (\text{A.3})$$

$$\zeta' = \tan^{-1} \left(\frac{\rho \sin \delta}{l - b - \rho \cos \delta} \right) \quad (\text{A.4})$$

付録 B. 着地時の股角度と移動効率

移動効率 (Specific cost of transport) を表す一指標として無次元量 c_t (＝消費エネルギー/(重さ × 移動距離)) があり, Fig. 1 のモデルに対して次のように定義される [7].

$$c_t = \frac{Mg \left(2d \sin \frac{\alpha_c}{2} + \rho \alpha_c \right) \sin \gamma}{Mg \times \left(2d \sin \frac{\alpha_c}{2} + \rho \alpha_c \right)} = \sin \gamma \quad (\text{B.5})$$

式 (B.5) から分かるように, 移動効率 c_t はスローブ角度 γ のみによって決まり, 着地時の股角度 α_c には関係しない。



池俣吉人 (Yoshito Ikemata)

2006 年名古屋工業大学大学院工学研究科生産システム工学専攻博士後期課程修了。2006 年同大学中核的研究機関研究員。受動歩行に関する研究に従事。日本機械学会, システム制御情報学会の会員。博士 (工学)。(日本ロボット学会正会員)



藤本英雄 (Hideo Fujimoto)

1970 年名古屋大学工学部機械学科卒業。現在, 名古屋工業大学教授。ものづくりテクノセンター長。医学工学, 生産システム, ロボットなどの知能化, バーチャルリアリティ・感性の工学に興味を持つ。2000 年 Japan-USA Flexible Automation Symposium 最優秀論文賞受賞。第 6 回ロボティクス・シンポジウム優秀論文賞受賞。日本機械学会生産システム部門賞 (2002 年功績賞), 2004-2005 グッドデザイン賞を各々受賞。ASME 1998 Japan-USA Flexible Automation Symposium プログラム委員長。1997・1998 年 SICE 常務理事部門協議会議長。日本機械学会評議員, フェロー。スケジューリング学会会長。1991・1992 年本学会誌編集委員, 工学博士。(日本ロボット学会正会員)



佐野明人 (Akihito Sano)

1987 年 3 月岐阜大学大学院工学研究科精密工学専攻修士課程修了。現在, 名古屋工業大学大学院工学研究科機能工学専攻教授。受動歩行, 触覚テクノロジー, 人間-機械系の研究に従事。2004 年度日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門一般表彰 (ROBOMECH 表彰), 2005 年度計測自動制御学会論文賞・友田賞などを受賞。2004・2005 年度本学会評議員, 日本機械学会フェロー。計測自動制御学会, 日本バーチャルリアリティ学会などの会員。博士 (工学)。(日本ロボット学会正会員)