学術・技術論文

受動歩行の脚運動に対する円弧足の力学的効果

池 俣 吉 人* 佐 野 明 人* 安 原 潔 志* 藤 本 英 雄*

Dynamical Effects of Arc Foot for Leg Motion of Passive Walking

Yoshito Ikemata*, Akihito Sano*, Kiyoshi Yasuhara* *and* Hideo Fujimoto*

The passive walker with knees can naturally execute the leg motion, which is essential to take a step forward, by the dynamics of legs under the gravity only. On the other hand, an inadequate dynamics causes an undesirable leg motion, such that the stance leg bends at the knee joint, the swing leg unsuitably strikes its foot on the slope and the walker falls backward by the negative gravitational moment. Though an arc foot is very important for the leg motion, its dynamical effects and mechanism have never been clarified, and a useful design framework of its shape has never been established. In this study, for the sake of simplicity and clarity, the linearized simplest walking model is used. In this paper, the dynamical effects of the arc foot, which can keep the knee joint of stance leg straight only by the stopper and can enhance the flexion of knee joint of swing leg, are discussed. Also, its geometrical negative effect is examined. Furthermore, the forward-falling condition of the walker is derived based on the energy analysis. Finally, the desired arc foot is designed and the actual effects are confirmed by a walking experiment.

Key Words: Passive Walking, Leg Motion, Arc Foot, Dynamical Effect, Knee Torque/Moment

1. は じ め に

筆者らは，受動歩行における平衡点生成および安定化メカニズムの解析の過程で，平衡点の大域的安定化原理を導いた [1]．この原理は Rimless wheel と等価なものとなっている [2] [3]．膝ありタイプの受動歩行機に同原理を適用することによって，受動歩行による長連続歩行を実現させることに成功した [4]．この歩行機の膝機構はフリージョイントであり，膝の逆折れを防止する膝ストッパーだけが取り付けられている．遊脚期において，膝の屈曲および伸展が自然に起こり，脚の振り抜きが可能となっている [5]．その後，下腿部の膝付近に固定されたストッパーが，衝撃吸収材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り着地する．さらに，支持脚期では膝が折れ曲がらず，真直ぐな状態を保って前方に倒れることができる．これらが原理的に可能である点が，膝ありタイプの受動歩行で最も注目すべき特徴と言える．しかし，ロバスト性が低く，一般に実機により実現することは困難であった．

受動歩行機の特徴として，足裏形状が円弧の足（以後，円弧足と呼ぶことにする）を有していることが挙げられる [6] [7]．これまで，円弧足形状は直感的・試行錯誤的に決められることが多かった [8]〜[10]．近年，この円弧足に注目した研究が活発に行われている．円弧足には仮想的な足首トルクを発生させる働きがあることが示され [11]，仮想足首関節トルクを考慮した足裏形状の設計方法が提案されている [12]．足形状が着地時の損失エネルギー [3] [11] や歩行速度 [13] にどのような影響を及ぼすのか調べられている．また，円弧足が平衡点（リミットサイクルの一断面の点）の安定性にどのような影響を及ぼすのか，固有値の観点から詳細に調べられている [15]〜[17]．ただし，いずれの研究においても，円弧中心が脚上にある円弧足のみを扱っている．

受動歩行は，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．このとき，床面と接触する円弧足は幾何学的な要因でありながら，脚運動に大きく影響する．前述で述べたように，円弧足に関する研究が様々な観点から行われているが，円弧足が脚運動に対してどのような働きをもつのか十分に検討されていない．

前述の平衡点の安定化原理は，着地直後の状態が存在するという仮定のもとで導かれたが，支持脚の膝が折れ曲がったり，遊脚が支持脚を振り抜く際に床面に接触したり，さらに後方に倒れてしまう場合，この仮定は成立しない．脚運動は，転倒に至る現象に密接に関係しており，安定化原理を有効に働くようにするためには，脚運動を改善しなければならない．そこで，本研究では，受動歩行の脚運動に対する円弧足の力学的効果およびそのメカニズムを明らかにすることを目的とする．さらに，得られた知見に基づき具体的な設計手法を構築し，脚が本来有しているダイナミクスを最適化し，よりロバストな脚運動を実現

原稿受付 2008 年 3 月 31 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．

する．

2 章では，本研究で用いる両脚の膝と円弧足を有する 4 リンクの受動歩行モデルについて説明する．3 章では，支持脚の膝トルク式を導出し，膝伸展メカニズムを明らかにする．そして，円弧足の必要性と力学的効果を示す．4 章では，遊脚の膝の角加速度に注目し，円弧足による膝屈曲効果について示す．5 章では，エネルギー的な観点から，前進運動について議論する．6 章では，円弧足の具体的な設計手法を示し，歩行実験により脚運動に対する円弧足の力学的効果を実際に検証する．

2. 受動歩行モデル

2.1 モデルとパラメータ

本研究では，**Fig. 1** に示すような両脚の膝と円弧足を有する 4 リンクの歩行モデルを用いる†．ただし，前脚が支持脚であり，後脚が遊脚である．l_1 は大腿部の長さ，a_1 は膝関節から大腿部の重心までの距離，b_1 は同じく腰関節からの距離である．l_2 は下腿部の長さ，a_2 は踝から下腿部の重心までの距離，b_2 は同じく膝関節からの距離である．

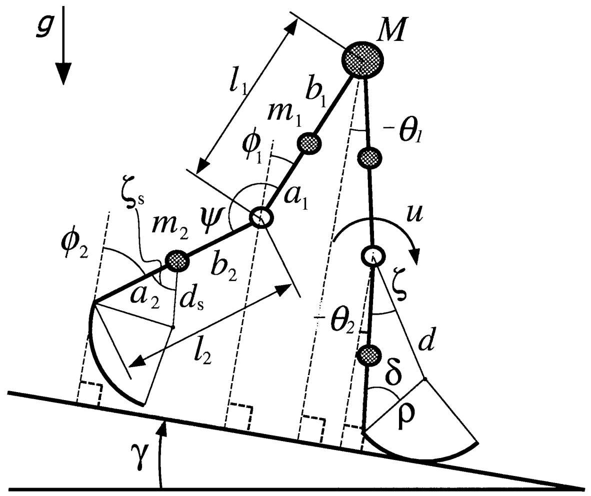


Fig. 1 4-link model of passive walker with knees and arc feet

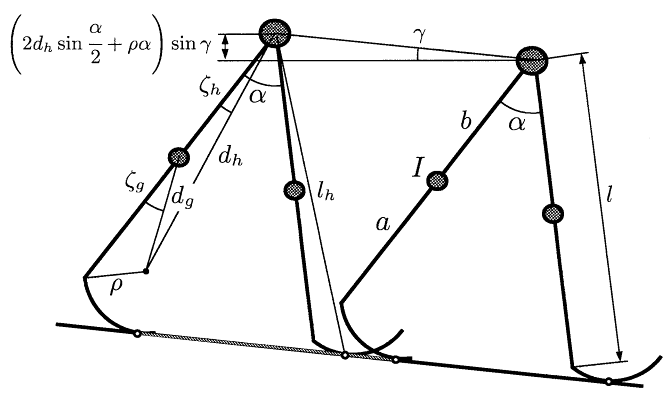


Fig. 2 Geometric model of one stride

†一般的に，支持脚は常に 1 リンクとしてモデル化される．

M は腰の質量，m_1 は大腿部の質量，m_2 は下腿部の質量である．また，θ_1 および θ_2 はそれぞれ支持脚の大腿部および下腿部の角度，ϕ_1 および ϕ_2 はそれぞれ遊脚の大腿部および下腿部の角度を表し，ψ は遊脚の膝の角度を表す．なお，γ はスロープ角度である．

円弧足に関しては，曲率半径を ρ，円弧中心と踝とを結ぶ直線と脚とのなす角度を δ（円弧足取付け角度）とする [7] [18]．なお，円弧中心は脚上に限定するものではない．また，円弧中心と膝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 とする．ただし，d および ζ は従属変数であり，ρ，δ 等により決まる（付録 A 参照）．

2.2 運動方程式

本論文では，受動歩行の脚運動に注目しており，その原理およびメカニズムはモデルの複雑さによらず共通しているものと考えられる．そこで，本研究では，次式のようにモデルを簡単化して脚運動を解析することにする．

$$M \gg m_1, \quad M \gg m_2, \quad M \gg m \tag{1}$$

以下に，この仮定を考慮した最終的な 4 リンクの運動方程式を示す．ただし，$\boldsymbol{\theta}$ (=$[\theta_1, \theta_2, \phi_1, \phi_2]^T$) を脚の角度ベクトルとする．

$$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{\theta})\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \boldsymbol{H}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) + \boldsymbol{G}(\boldsymbol{\theta}, \gamma) = \boldsymbol{\tau} \tag{2}$$

ただし，

$$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{\theta}) = \begin{bmatrix} \rho^2 + d^2 + 2\rho d\cos(\theta_1 - \zeta) & l_1\{\rho\cos\theta_2 + d\cos(\theta_1 - \theta_2 - \zeta)\} & 0 & 0 \\ l_1\{\rho\cos\theta_2 + d\cos(\theta_1 - \theta_2 - \zeta)\} & l_1^2 & 0 & 0 \\ -(b_1 + pl_1)\{\rho\cos\phi_1 + d\cos(\theta_1 - \phi_1 - \zeta)\} & -(b_1 + pl_1)l_1\cos(\theta_2 - \phi_1) & b_1^2 + pl_1^2 & pb_2l_1\cos(\phi_1 - \phi_2) \\ -b_2\{\rho\cos\phi_2 + d\cos(\theta_1 - \phi_2 - \zeta)\} & -b_2l_1\cos(\theta_2 - \phi_2) & b_2l_1\cos(\phi_1 - \phi_2) & b_2^2 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{H}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) = \begin{bmatrix} -\rho d\sin(\theta_1 - \zeta)\dot{\theta}_1^2 - l_1\{\rho\sin\theta_2 - d\sin(\theta_1 - \theta_2 - \zeta)\}\dot{\theta}_2^2 \\ -d\sin(\theta_1 - \theta_2 - \zeta)\dot{\theta}_1^2 \\ (b_1 + pl_1)d\sin(\theta_1 - \phi_1 - \zeta)\dot{\theta}_1^2 + (b_1 + pl_1)l_1\sin(\theta_2 - \phi_1)\dot{\theta}_2^2 + pb_2l_1\sin(\phi_1 - \phi_2)\dot{\phi}_2^2 \\ b_2d\sin(\theta_1 - \phi_2 - \zeta)\dot{\theta}_1^2 + b_1l_1\sin(\theta_2 - \phi_2)\dot{\theta}_2^2 - b_2l_1\sin(\phi_1 - \phi_2)\dot{\phi}_1^2 \end{bmatrix}$$

$$G(\boldsymbol{\theta},\gamma)=\begin{bmatrix}-\rho\sin\gamma-d\sin(\theta_1+\gamma-\zeta)\\-l_1\sin(\theta_2+\gamma)\\(b_1+pl_1)\sin(\phi_1+\gamma)\\b_2\sin(\phi_2+\gamma)\end{bmatrix}g$$

$$\boldsymbol{\tau}=[-\tau,\tau,0,0]^T=[-u/M,u/M,0,0]^T$$

ここで，u は支持脚の膝トルクを表す．g は重力加速度である．また，$p=m_2/m_1$ である．

3. 支持脚の膝伸展メカニズム

3.1 支持脚の膝トルク

本章では，支持脚の膝伸展メカニズムを明らかにする．まず，支持脚の膝を真直ぐに保持するために必要な膝トルク式を導出する．運動方程式（2）を線形化すると次式を得る．

$$\begin{bmatrix}(\rho+d)^2 & l_1(\rho+d) & 0 & 0\\ l_1(\rho+d) & l_1^2 & 0 & 0\\ -(b_1+pl_1)(\rho+d) & -(b_1+pl_1)l_1 & b_1^2+pl_1^2 & pb_2l_1\\ (\rho+d) & -l_1 & l_1 & b_2\end{bmatrix}$$
$$\times\begin{bmatrix}\ddot{\theta}_1\\\ddot{\theta}_2\\\ddot{\phi}_1\\\ddot{\phi}_2\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}-d(\theta_1+\gamma)+d\zeta-\rho\gamma\\-l_1(\theta_2+\gamma)\\(b_1+pl_1)(\phi_1+\gamma)\\(\phi_2+\gamma)\end{bmatrix}g=\begin{bmatrix}-\tau\\\tau\\0\\0\end{bmatrix} \tag{3}$$

この線形化モデルにおいても脚運動は発現し，その特性は損なわれない [5]．ここで，支持脚の膝が真直ぐな状態となるとき，$\theta_1=\theta_2=\theta$ および $\ddot{\theta}_1=\ddot{\theta}_2=\ddot{\theta}$ となる．このとき，支持脚の角加速度 $\ddot{\theta}$ は，式（3）から次式のようになる．

$$\ddot{\theta}=\frac{l_1+d}{(l_1+d+\rho)^2}(\theta+\gamma)g-\frac{d\zeta-\rho\gamma}{(l_1+d+\rho)^2}g \tag{4}$$

次に，支持脚の膝トルク τ[†]を導出すると，次式のようになる．

$$\tau=l_1(l_1+d+\rho)\ddot{\theta}-l_1(\theta+\gamma)g \tag{5}$$

ここで，右辺第 1 項は角加速度に依存した項であり，慣性による動的トルクとなる．一方，第 2 項は角度（姿勢）に依存した項であり，重力効果による静的トルクとなる．負のトルクは膝ストッパーにより生成され，支持脚の膝を真直ぐに保持することができる．逆に，正のトルクは生成不可能であり，膝が後方に折れ曲ってしまう．なお，特別な機構 [9] [18] [19] で膝を完全にロックすることも考えられるが，本研究ではあくまでも脚のダイナミクスを活用する．

θ に対する τ の変化量は，式（4）および（5）から次式のようになる．

$$\frac{d\tau}{d\theta}=-\frac{l_1(l_1+d)}{l_1+d+\rho}g-l_1g \tag{6}$$

式（6）から分かるように，$d\tau/d\theta$ は一定値となる．$\rho=0$（点形状）の場合，$d\tau/d\theta=0$ となり，膝トルク τ は一定値をとる．これに対して，$\rho\neq 0$（円弧足）の場合，$d\tau/d\theta<0$ の一定値をとり，τ は単調に減少する．したがって，支持脚の角度 θ が最小となる着地直後が，膝が最も折れやすい状態となる．

[†]正確には単位質量あたりのトルク．

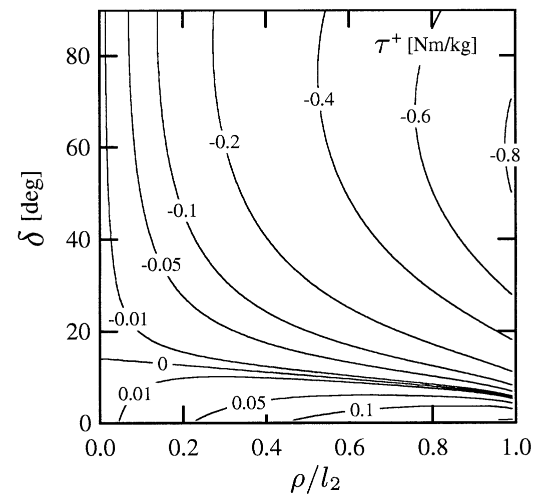


Fig. 3 Knee torque of stance leg just after leg-exchange

3.2 円弧足による支持脚の膝の伸展効果

Fig. 2 に示すように，1 歩区間を着地直後から次の着地直後までとする．ただし，大域的安定化のために着地時の股角度 α は一定とする．また，d_h は円弧中心と腰関節とを結ぶ直線の長さ，ζ_h はその直線と脚とのなす角度を表す（付録 A 参照）．このとき，着地直後の支持脚の角度 θ は $-\alpha/2+\zeta_h$（<0）となり，着地直後の膝トルク τ^+ は，式（4）および（5）から次式のように導かれる．なお，$+$ は着地直後の状態を表す．

$$\tau^+=-\frac{l_1}{l_1+d+\rho}\left\{\rho\left(\frac{\alpha}{2}-\zeta_h\right)+d\zeta\right\}g \tag{7}$$

式（7）から分かるように，足が点形状となる場合（$\rho=0$），$\tau^+=0$ となり τ は常に零となって支持脚の膝は不安定な状態となる．これに対して，円弧中心が $\rho(\alpha/2-\zeta_h)+d\zeta>0$ の条件を満たす脚前方の位置にある円弧足を用いれば，$\tau^+<0$ すなわち $\tau<0$ となり支持脚の膝を真直ぐに保持することができる．

また，着地後しばらくは動的トルクが大きく寄与することから，式（5）の右辺第 1 項の動的トルクを伸展側（$\tau<0$）にできるだけ大きくするためには，支持脚を減速（$\ddot{\theta}<0$）すなわち前進運動にブレーキを掛ければよいことになる．前述の $\rho(\alpha/2-\zeta_h)+d\zeta>0$ を満たしていれば，式（4）の右辺第 2 項は負値となってブレーキ作用が得られる．

$\rho=0$ の場合，$\zeta=0$ および $d=l_2$ となり，式（4）は $\ddot{\theta}=(\theta+\gamma)g/l$ となる．このとき，第 1 項の係数が $(l_1+d)/(l_1+d+\rho)^2<1/l$ となって，点形状に比べて姿勢による減速作用が抑制されてしまうが，全体として円弧足による高い減速効果が得られ，支持脚の膝の保持力が向上する．

Fig. 3 に，設計パラメータとして ρ を下腿部の長さ l_2 で正規化した ρ/l_2 および δ を変化させた場合のトルク τ^+ を等高

線で示す．ただし，リンクパラメータは $l = 0.38$，$l_1 = 0.18$，$l_2 = 0.2$ [m] とした．スロープ角度は $\gamma = 0.02$ [rad]，着地時の股角度は $\alpha = 0.49$ [rad] とした（以後の解析も同条件とする）．図から分かるように，ρ および δ が大きいほど，τ^+ は負側に大きくなる．

4. 遊脚の膝屈曲メカニズム

4.1 遊脚の膝の角加速度

本章では，円弧足が遊脚の膝運動にどのような影響を及ぼすのか明らかにする．まず，4 リンクの運動方程式（2）に支持脚が真直ぐな条件を代入し，3 リンクモデルとし線形化すると次式を得る．

$$\begin{bmatrix} (\rho+d_h)^2 & 0 & 0 \\ -(b_1+pl_1)(\rho+d_h) & b_1^2+pl_1^2 & pb_2l_1 \\ -b_2(\rho+d_h) & b_2l_1 & b_2^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{\phi}_1 \\ \ddot{\phi}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\rho\gamma - d_h(\theta+\gamma-\zeta_h) \\ (b_1+pl_1)(\phi_1+\gamma) \\ b_2(\phi_2+\gamma) \end{bmatrix} g = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{8}$$

式（8）から，遊脚の膝の角加速度は，次のように導かれる．

$$\ddot{\psi} = c_1(\phi_1+\gamma)g + c_2(\phi_2+\gamma)g + c_3(\theta+\gamma)g + c_4 g \tag{9}$$

ただし，

$$c_1 = -\frac{b_1(l_1+b_2)+pl_1(l_1+b_2)}{b_1^2 b_2}$$

$$c_2 = \frac{b_1^2+pl_1(l_1+b_2)}{b_1^2 b_2}$$

$$c_3 = \frac{d_h}{\rho+d_h}\frac{l_1-b_1+b_2}{b_1b_2}$$

$$c_4 = -\frac{1}{\rho+d_h}\frac{l_1-b_1+b_2}{b_1b_2}(d_h\zeta_h-\rho\gamma)$$

$\ddot{\psi} < 0$ の場合，遊脚の膝に重力効果による屈曲モーメントが働き，$\ddot{\psi} > 0$ の場合，伸展モーメントが働く [5]．

4.2 円弧足による遊脚の膝の屈曲効果

式（9）から分かるように，遊脚の大腿部および下腿部の角度（姿勢）によって決まる項（右辺第 1 項と第 2 項）は，円弧足の影響を受けない．$d_h\zeta_h - \rho\gamma > 0$ の場合，支持脚の円弧足の項（右辺第 4 項）は負値となる．このことから，円弧足はつねに遊脚の膝を屈曲させるように働く．ただし，右辺第 3 項の係数が，点形状の場合に比べて $d_h/(\rho+d_h)$ 倍されており，支持脚の姿勢による屈曲作用が抑制されてしまう．**Fig. 4** に $c_4 g$ を等高線で示す．図から分かるように，ρ および δ を大きくすると，遊脚の膝をより屈曲させる．

しかし，点形状と異なり円弧足であると，遊脚の膝の屈曲により真直ぐな状態から **Fig. 5** 右上に示す角度 ψ_c まで足先が下がってしまう．なお，ψ_c は幾何学的な関係から，次のように求まる．

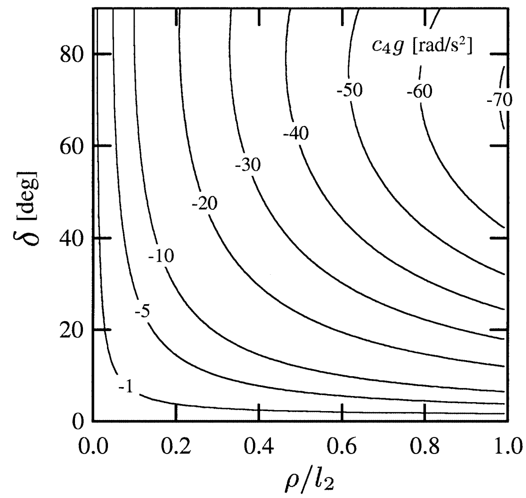


Fig. 4 Coefficient for knee angular acceleration of swing leg

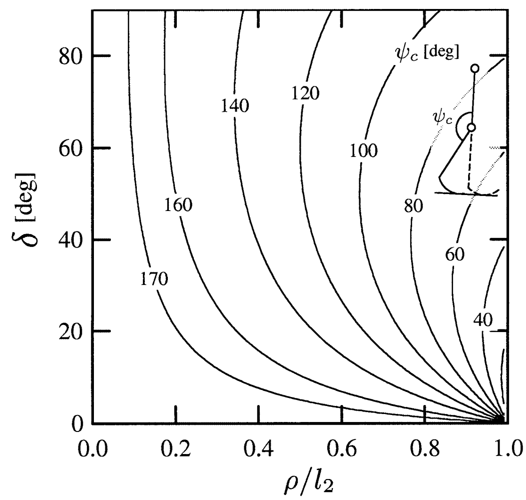


Fig. 5 Knee angle of the contacting arc foot on slope

$$\psi_c = \pi - 2\cos^{-1}\left(\frac{l_2-\rho\cos\delta}{\sqrt{l_2^2+\rho^2-2l_2\rho\cos\delta}}\right) \tag{10}$$

Fig. 5 に ψ_c を等高線で示す．図から分かるように，ρ と δ は小さいほうが ψ_c は大きくなり，足先の床面との接触リスクが低減する．

5. 前　進　運　動

5.1 前方に倒れるための条件

本章では，ブレーキ作用のある円弧足によって，支持脚が前方に倒れ難くなるのか調べる．まず，前方に倒れるためには，着地直後の運動エネルギーが，腰関節が最高点になるまでのポテンシャルエネルギーを上回る必要がある．簡単化モデルでは，支持脚の運動は遊脚の運動の影響を受けないので，当該の条件式は次のようになる．

$$\frac{1}{2}M(l_h\dot{\theta}^+)^2 > Mg\Delta h \tag{11}$$

ただし，

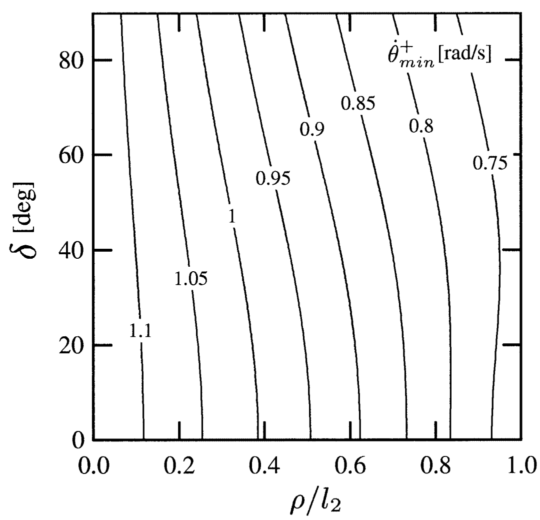
$$l_h = \sqrt{\rho^2 + d_h^2 + 2\rho d_h \cos\frac{\alpha}{2}}$$

$$\Delta h = -\rho\left(\frac{\alpha}{2} - \sin^{-1}\frac{\rho\sin\gamma}{d_h} - \gamma\right)\sin\gamma + \sqrt{d_h^2 - \rho^2\sin^2\gamma} - d_h\cos\left(\frac{\alpha}{2} - \gamma\right)$$

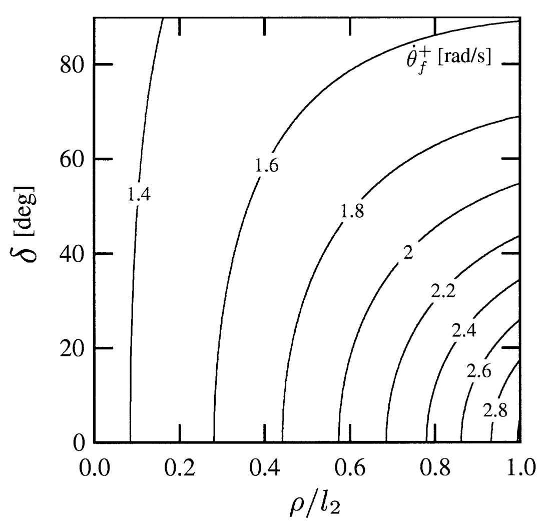
式（11）から，前方に倒れるために必要な着地直後の支持脚の最小角速度 $\dot{\theta}^+_{min}$ は，次のように導かれる．

$$\dot{\theta}^+_{min} = \frac{\sqrt{2g\Delta h}}{l_h} \tag{12}$$

Fig. 6 (a) に $\dot{\theta}^+_{min}$ を等高線で示す．図から分かるように，δ の影響は小さく，ρ が大きくなると $\dot{\theta}^+_{min}$ は小さくなり，支持脚は前方に倒れやすくなる．



(a) $\dot{\theta}^+_{min}$



(b) $\dot{\theta}^+_f$

Fig. 6 Forward-falling condition for angular velocity of stance leg just after leg-exchange

5.2 平衡点における支持脚の角速度

本節では，平衡点（定常歩行）における支持脚の着地直後の角速度を求める．k 歩目の着地直後から $k+1$ 歩目の着地直前まで遷移したとすると，エネルギー保存則から次式が導出される（Fig. 2 参照）．

$$\dot{\theta}^-_{k+1} = \sqrt{\dot{\theta}^{+2}_k + \frac{2g}{l_h^2}\left(2d_h\sin\frac{\alpha}{2} + \rho\alpha\right)\sin\gamma} \tag{13}$$

さらに，$k+1$ 歩目の着地直前から直後へと脚切り換えによって遷移したとすると，付録 B に示す脚の切り換え式（B.9）から次式が成り立つ．

$$\dot{\theta}^+_{k+1} = \frac{\rho^2 + d_h^2\cos\alpha + 2\rho d_h\cos\frac{\alpha}{2}}{\rho^2 + d_h^2 + 2\rho d_h\cos\frac{\alpha}{2}}\dot{\theta}^-_{k+1} = e\dot{\theta}^-_{k+1} \tag{14}$$

本研究では，e（$0 < e < 1$）を損失係数と呼ぶ．式（13）および（14）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．

$$\dot{\theta}^+_{k+1} = e\sqrt{\dot{\theta}^{+2}_k + \frac{2g}{l_h^2}\left(2d_h\sin\frac{\alpha}{2} + \rho\alpha\right)\sin\gamma} \tag{15}$$

差分方程式（15）から，平衡点（$\dot{\theta}^+_{k+1} = \dot{\theta}^+_k$）における支持脚の着地直後の角速度 $\dot{\theta}^+_f$ は，次のように導かれる．

$$\dot{\theta}^+_f = \sqrt{\frac{2e^2g}{l_h^2(1-e^2)}\left(2d_h\sin\frac{\alpha}{2} + \rho\alpha\right)\sin\gamma} \tag{16}$$

Fig. 6 (b) に $\dot{\theta}^+_f$ を等高線で示す．図から分かるように，全領域で $\dot{\theta}^+_f > \dot{\theta}^+_{min}$ となっており，前方に倒れるための必要条件を満たす．また，δ が小さく，ρ が大きいほど $\dot{\theta}^+_f$ は大きくなり，円弧足の方が前方に倒れやすくなっている．これは，式（14）に示す損失係数が 1 に近づく，すなわち着地時のエネルギー損失が小さくなることが一つの要因として挙げられる [4].

6. 歩 行 実 験

6.1 円弧足のパラメータ選定

Fig. 7 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] と小型であり，全質量 1.5 [kg] となっている．本歩行機では面結合により円弧足が容易に換装可能となっている．なお，着地時の股角度がほぼ一定（平衡点の大域的安定性を保証）となるように，外脚の下腿部に「ロの字」の軽量フレームを取り付けてある．

本研究では，歩行実験を通じて脚運動に対する円弧足の力学的効果を実際に検証する．まず，円弧足の力学的効果を示す Fig. 3, 4 および 5 を統合したパラメータ選定図を **Fig. 8** に示す．ただし，ハッチングは次の条件を満たす本研究で考える望ましいパ

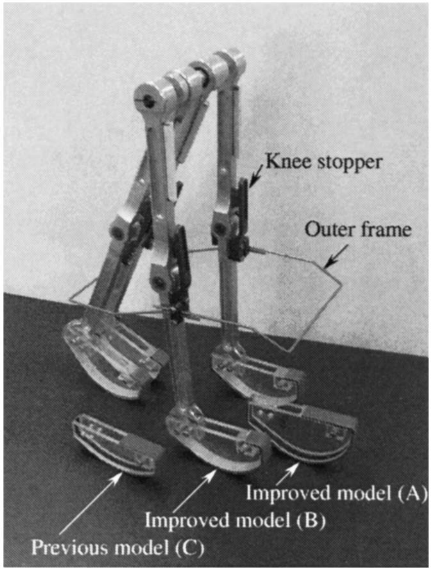


Fig. 7　Passive walker with improved arc feet

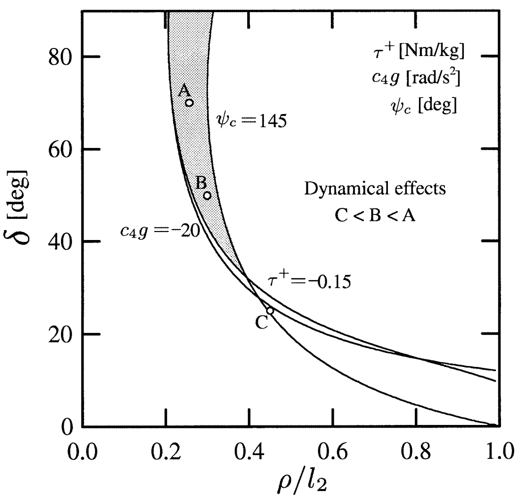
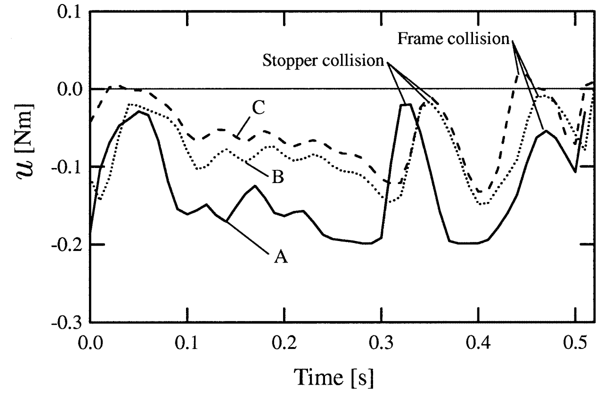
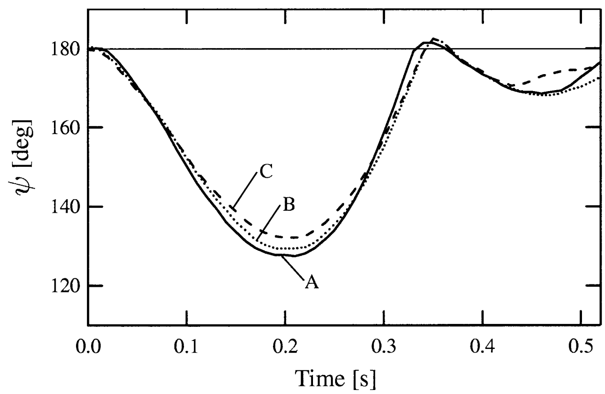


Fig. 8　Design map of arc foot considering leg motion



(a) Knee torque of stance leg



(b) Knee angle of swing leg

Fig. 9　Experimental results

ラメータ領域である．

$$\tau^+ < -0.15, \quad c_4g < -20, \quad \psi_c < 145$$

初期モデルはハッチング領域外 C に位置し，円弧足の力学的効果は小さい．ただし，曲率半径 $\rho = 90$ [mm]（$\rho/l_2 = 0.45$）および取り付け角度 $\delta = 25$ [deg] である．トレードオフを図りつつ，ハッチングの領域内 A の $\rho = 51.4$ [mm]（$\rho/l_2 = 0.257$），$\delta = 70$ [deg]，領域内 B の $\rho = 60$ [mm]（$\rho/l_2 = 0.3$），$\delta = 50$ [deg] の二つを選定した．なお，円弧足 A は円弧足 B よりも力学的効果は大きい．

Fig. 7 に示すように，力学的効果が小さい円弧足 C，中くらいの円弧足 B，大きい円弧足 A の 3 種類の円弧足を 3D プロッタを用いて加工した．ただし，材質はアクリル樹脂である．

6. 2　実験結果

スロープ角度を $\gamma = 0.075$ [rad]，着地時の股角度を $\alpha = 0.49$ [rad] に設定し，トレッドミル上を連続歩行させた．実験結果を **Fig. 9** に示す．Fig. 9 (a) および (b) は，それぞれ支持脚の膝トルクおよび遊脚の膝角度を示す．ただし，着地直後から次の着地直後までの一歩区間を示す．また，実線は力学的効果の大きい円弧足 A，点線は効果が中くらいの円弧足 B，破線は効果の小さい円弧足 C を示す．なお，膝トルクはストッパー根元部に貼付した半導体歪ゲージにより測定し，膝角度は関節軸に取り付けた小型ポテンショメータから求めた．

Fig. 9 (a) から分かるように，床面との衝突の衝撃等によって着地直後の膝トルクは負側に大きな値を取るが，すぐに零近傍の値となって支持脚の膝が折れ曲りやすい状態となる．その後，わずかに振動しながら徐々に負側に増加していくが，一時的に零に近づく．これは，タイミング的に遊脚側の膝ストッパーならびに外脚フレームの衝突の影響の現れと考えられる．以上のことから，衝突の影響を受けているが，3 章で示した支持脚の膝トルクの基本特性が確認できた．

また，Fig. 9 (b) から分かるように，遊脚の膝はいったん約 130 [deg] ほど屈曲してから伸展し，遊脚の膝ストッパーの衝突による跳ね返りによって遊脚の膝は屈曲しようとするが，外脚フレームの衝突によって伸展することとなる．

三つの円弧足を比較すると，支持脚の膝の伸展トルクおよび遊脚の膝の屈曲角度とも，円弧足 B は円弧足 C よりも大きく，円弧足 A は円弧足 B よりも大きくなっており，Fig. 8 に示す力学的効果と一致する．なお，最大屈曲角は両方とも $\psi_c = 145$ [deg] を大きく上回っている．

7. 結　論

受動歩行において，支持脚が折れ曲ったり，遊脚が床面に接触したり，後方に倒れるといった転倒に至る現象が存在する．本研究では，線形化した簡単化モデルを用いて，これらの現象の原因となる受動歩行の脚運動に対する円弧足の力学的効果およびそのメカニズムを明らかにした．

まず，支持脚の膝トルクは，動的および静的トルクから成る．膝トルクは支持脚の角度に対して単調に減少するため，着地直後に膝が最も折れやすい状態となる．また，着地後しばらく動的トルクが大きく寄与するため，この動的トルクを伸展側に大きくするには，支持脚を減速させる必要がある．このとき，中心が脚前方にある円弧足は，このブレーキ作用を簡単な機構で実現し，支持脚の膝の高い保持力を生む．さらに，円弧足はつねに遊脚の膝を屈曲させる作用を持っている．

一方，円弧足により足先が床面に接触しやすくなったり，円弧足のブレーキ作用が前進運動を抑制するといった負の効果がある．しかし，後者に関しては，着地時のエネルギー損失が小さくなるなどの理由から，結果的に点形状よりも前に倒れやすくなる．

歩行実験を通して，脚運動に対する円弧足の力学的効果を検証した．まず，円弧足の力学的効果を最大限に引き出す曲率半径 ρ および取り付け角度 δ を具体的な設計手法の基で選定した．そして，3 種類の円弧足について比較検討し，よりロバストな脚運動を実現した．また，衝突の影響を受けているものの基本的な力学的効果はモデルと合っており，簡単化モデルによる解析に問題はないものと思われる．

今後は，円弧足とヒトの足（母指球を含んだ）の共通する力学的効果について検討したいと考えている．

謝　辞　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．

参 考 文 献

[1] 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.
[2] M.J. Coleman: “A Stability Study of a Three-Dimensional Passive-Dynamic Model of Human Gait,” Ph. D. Thesis, Cornell University, 1998.
[3] 田崎勇一，井村順一：“平面受動 2 足歩行における足形状の省エネルギー効果の考察”，日本ロボット学会誌，vol.23, no.1, pp.131–138, 2005.
[4] 池俣吉人，佐野明人，藤本英雄：“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”，日本ロボット学会誌，vol.26, no.2, pp.178–183, 2008.
[5] 池俣吉人，佐野明人，藤本英雄：“受動歩行における脚の振り運動に関する基礎的研究”，日本機械学会論文集（C 編），vol.74, no.738, pp.365–371，2008.
[6] T. McGeer: “Passive Dynamic Walking,” The Int. J. of Robotics Research, vol.9, no.2, pp.62–82, 1990.
[7] T. McGeer: “Passive Walking with Knees,” Proc. of the 1990 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1640–1645, 1990.
[8] M. Wisse and J. van Frankenhuyzen: “Design and Construction of MIKE; a 2D autonomous biped based on passive dynamic walking,” Proc. of 2nd Int. Sym. on Adaptive Motion of Animals and Machines, WeP-I-1, 2003.
[9] 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.
[10] 兵頭和幸，三上貞芳，鈴木昭二：“受動歩行における倒れ込み現象を抑制した足裏形状の実現”，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 ’07 講演論文集，1P1-E05, 2007.
[11] 浅野文彦，羅志偉：“半円足の転がり効果を利用した劣駆動仮想受動歩行—（II）性能解析と冗長モデルへの拡張—”，日本ロボット学会誌，vol.25, no.4, pp.578–588, 2007.
[12] 佐々木裕丈，山北昌毅：“仮想足首関節トルクを考慮した足裏形状設計方法の提案”，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 ’08 講演論文集，1P1-B11, 2008.
[13] M. Kwan and M. Hubbard: “Optimal Foot Shape for a Passive Dynamic Biped,” J. Theoretical Biology, vol.248, pp.331–339, 2007.
[14] R. Tedrake, T.W. Zhang, M. Fong and H.S. Seung: “Actuating a Simple 3D Passive Dynamic Walker,” Proc. of the 2004 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.4656–4661, 2004.
[15] 衣笠哲也，C. Chevallereau，Y. Aoustin，吉田浩治：“伸縮脚と円弧足を有する 2 足歩行システムの Geometric Tracking 制御と安定解析–円弧足半径と安定性の関係に関する考察”，システム制御情報学会論文誌，vol.21, no.3, pp.75–82, 2008.
[16] S. Aoi, Y. Sato and K. Tsuchiya: “Investigation of the Effects on Stability of Foot Rolling Motion Based on a Simple Walking Model,” Proc. of the 2007 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Automation, pp.2987–2982, 2007.
[17] 野口慎，平田健太郎：“歩行安定性に対する円弧脚形状の効果～線形化ポアンカレ写像に基づく検討～”，第 8 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会予稿集，pp.263–264, 2007.
[18] M. Garcia, A. Chatterjee and A. Ruina: “Efficiency, Speed, and Scaling of Two-Dimensional Passive-Dynamic Walking,” Dynamics and Stability of Systems, vol.15, no.2, pp.75–99, 2000.
[19] 山北浩介，石村康生，和田充雄：“受動二足歩行のダイナミクスとその実機評価”，日本機械学会論文集（C 編），vol.71, no.705, pp.1669–1677, 2005.

付録 A．従属変数の定義

$$d = \sqrt{(\rho\sin\delta)^2 + (l_2 - \rho\cos\delta)^2} \tag{A.1}$$

$$d_h = \sqrt{(\rho\sin\delta)^2 + (l - \rho\cos\delta)^2} \tag{A.2}$$

$$d_g = \sqrt{(\rho\sin\delta)^2 + (l - b - \rho\cos\delta)^2} \tag{A.3}$$

$$d_s = \sqrt{(\rho\sin\delta)^2 + (l_2 - b_2 - \rho\cos\delta)^2} \tag{A.4}$$

$$\zeta = \tan^{-1}\left(\frac{\rho\sin\delta}{l_2 - \rho\cos\delta}\right) \tag{A.5}$$

$$\zeta_h = \tan^{-1}\left(\frac{\rho\sin\delta}{l - \rho\cos\delta}\right) \tag{A.6}$$

$$\zeta_g = \tan^{-1}\left(\frac{\rho\sin\delta}{l - b - \rho\cos\delta}\right) \tag{A.7}$$

$$\zeta_s = \tan^{-1}\left(\frac{\rho\sin\delta}{l_2 - b_2 - \rho\cos\delta}\right) \tag{A.8}$$

付録 B．脚の切り換え式

脚の切り換え現象に関しては，遊脚足先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，切り換え直前に遊脚の膝のロックが解除される．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．

$$\boldsymbol{Q}^{+}(\alpha)\dot{\boldsymbol{\theta}}_{K}^{+}=\boldsymbol{Q}^{-}(\alpha)\dot{\boldsymbol{\theta}}_{C}^{-} \tag{B.9}$$

ただし，

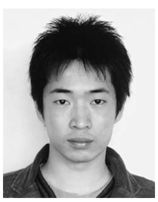
$$\boldsymbol{Q}^{+}(\alpha)=\begin{bmatrix} \rho^2+d_h^2+2\rho d_h\cos\alpha/2 & 0 & 0 \\ \{b_1+p(l_1+b_2)\}\{\rho\cos(\alpha/2+\zeta_h)+d\cos(\alpha+\zeta_h)\} & -b_1^2-pl_1(l_1+b_2) & -pb_2(l_1+b_2) \\ b_2\{\rho\cos(\alpha/2+\zeta_h)+d\cos(\alpha+\zeta_h)\} & -b_2l_1 & -b_2^2 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{Q}^{-}(\alpha)=\begin{bmatrix} \rho^2+d_h^2\cos\alpha+2\rho d_h\cos\alpha/2 & 0 \\ -(1+p)b\{\rho\cos(\alpha/2+\zeta_h)+d_g\cos\zeta_g\}+I/m_1 & 0 \\ b_2\{\rho\cos(\alpha/2+\zeta_h)+d_s\cos\zeta_s\} & 0 \end{bmatrix}$$

ここで，$-$ は着地直前の状態，$+$ は着地直後の状態を表す．また，$\boldsymbol{\theta}_K$ $(=[\theta,\ \phi_1,\ \phi_2]^T)$ は支持脚の膝が真直ぐな状態の脚の角度ベクトル，$\boldsymbol{\theta}_C$ $(=[\theta,\ \phi]^T)$ は遊脚の膝ロック後の角度ベクトルを表す．ただし，$b=\{m_1b_1+m_2(l_1+b_2)\}/(m_1+m_2)$, $I=m_1(b-b_1)^2+m_2(l-b-l_2+b_2)^2$ となる．なお，d_g は円弧中心と支持脚の重心とを結ぶ直線の長さ，ζ_g はその直線と脚とのなす角度，d_s は同じく下腿部の重心とを結ぶ直線の長さ，ζ_s はその直線と脚とのなす角度を表す（Fig. 1 および 2，付録 A 参照）．式（B.9）から，着地直後の角速度ベクトルは，$\dot{\boldsymbol{\theta}}_K^{+}=(\boldsymbol{Q}^{+}(\alpha))^{-1}\ \boldsymbol{Q}^{-}(\alpha)\ \dot{\boldsymbol{\theta}}_C^{-}$ となる．

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．現在，同大学トヨタロボティクス・ハプティクス研究所特任助教．受動歩行・走行，歩行アシストに関する研究に従事．日本機械学会の会員．博士（工学）．（日本ロボット学会正会員）



安原潔志（Kiyoshi Yasuhara）

2006 年名古屋工業大学工学部機械工学科卒業．2008 年同大学大学院工学研究科機能工学専攻博士前期課程修了．（日本ロボット学会学生会員）

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，人間–機械系，触覚テクノロジーの研究に従事．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（ROBOMEC 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）

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・シンポジア優秀論文賞受賞．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おのおの受賞．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）