

Title	足裏面の摺動を考慮した半円足をもつコンパス型2脚受動歩行ロボットのモデリングと解析
Author(s)	浅野, 文彦; 坂, 利昭; 原田, 祐志
Citation	第21回ロボティクスシンポジウム: 408-413
Issue Date	2016
Type	Conference Paper
Text version	publisher
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10119/13487">http://hdl.handle.net/10119/13487</a>
Rights	Copyright (C) 2016 日本ロボット学会. 浅野文彦, 坂利昭, 原田祐志, 第21回ロボティクスシンポジウム, 2016, pp.408-413. 本著作物は日本ロボット学会の許可のもとに掲載するものです。This material is posted here with permission of the Robotics Society of Japan.
Description	

# 足裏面の摺動を考慮した半円足をもつコンパス型2脚受動歩行 ロボットのモデリングと解析

浅野 文彦<sup>\*1</sup>, 坂利昭<sup>\*1</sup>, 原田 祐志<sup>\*2</sup>

## Modeling and Analysis of Semicircular-footed Compass-like Passive Bipedal Walker Considering Sliding Motion of Sole Surface

Fumihiko ASANO<sup>\*1</sup>, Toshiaki SAKA<sup>\*1</sup> and Yuji HARATA<sup>\*2</sup>

<sup>\*1</sup> School of Information Science, Japan Advanced Institute of Science and Technology  
1-1 Asahidai, Nomi, Ishikawa 923-1292, Japan

<sup>\*2</sup> Division of Mechanical Systems and Applied Mechanics, Faculty of Engineering, Hiroshima University  
1-4-1, Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, Hiroshima 739-8527, Japan

The authors investigated the effect of semicircular feet on the 3-DOF passive compass gait sliding on slippery downhill, and released an inaccurate report on the mathematical model and analysis results. This paper then reconsiders the same issue and analyzes the gait properties using the corrected robot mathematical model. First, we explain the background to the inaccurate report, and redevelop the accurate robot equation. Second, we mathematically discuss the energy-dissipating mechanism in the presence of frictional force effect to systematically determine the friction coefficient. Furthermore, we numerically analyze the fundamental gait properties using the accurate model redeveloped.

**Key Words** : Passive dynamic walking, Semicircular feet, Sliding contact

### 1. はじめに

筆者らは自然で高効率な歩行運動を実現する本質的必要条件を支持脚接地点の拘束条件緩和の観点から再考し、基礎的な歩行モデルの解析を通して主に以下の結果を得た。受動および劣駆動リムレスホイール、上体付き劣駆動2脚ロボットなどの衝突姿勢拘束を達成する(1自由度の剛体として同じ姿勢で倒れ込む)歩行運動における支持脚接地点の床面に対する接線方向の拘束条件を外し、滑りながらの受動・劣駆動歩行運動が生成可能であることを示した<sup>(1)(2)</sup>。また、衝突姿勢拘束を達成しないコンパス型2脚ロボットの受動歩行においても、安定歩容生成が可能であることを示した<sup>(3)</sup>。これらの結果は、安定なりミットサイクル型歩行運動を実現する上で支持脚接地点が床面の接線方向に滑らないという仮定が必ずしも必要ではないこと、接地点の摺動が生むプラス1自由度が致命的な問題とはならないことを意味するものである。一方で、拘束条件数が少ない意味で、McGeerの受動歩行<sup>(4)(5)</sup>よりもリラックスした歩行運動が存在することを示したと捉えることもできよう。

支持脚接地点が滑らない条件下で生成されるコンパス型2脚ロボットの受動歩行運動は2自由度であるので<sup>(6)</sup>、接地点の摺動を考慮すれば3自由度運動となる。その歩行特性の解析を通して、この1自由度が追加される(拘束条件が緩和される)代償に安定歩容生成可能領域が縮小するという問題点も露呈した。その解決手段として筆者らは、半円形状をした足部(半円足)<sup>(7)(8)</sup>の利用を提案し、基礎的考察を行った。しかしながら、第3章で述べるモデリングに関する誤解に基づく不正確な報告をした<sup>(9)</sup>。本論文では、この誤解を生む背景について述べるとともに、正確なモデリングおよび足裏半径に対する歩行特性の解析結果について報告する。

### 2. コンパス型2脚ロボットのモデリング

**2.1 運動方程式** Fig. 1に本論文で扱うコンパス型2脚ロボットのモデルを示す。本モデルは2リンク・3質点からなり、各重心回りの慣性モーメントおよび股関節の摩擦は無視できるものとする。 $(x, z)$ を支持脚先端位置、 $\theta_1$ を支持脚の絶対角度、 $\theta_2$ を遊脚の絶対角度とする。一般化座標ベクトルを $\mathbf{q} = [x \ z \ \theta_1 \ \theta_2]^T$ とすると、ロボットの運動方程式は

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{J}(\mathbf{q})^T \boldsymbol{\lambda} + \mathbf{J}_\mu(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})^T \boldsymbol{\lambda} \quad (1)$$

<sup>\*1</sup> 北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科 (〒 923-1292 石川県能美市旭台 1-1) {fasano.toshi1106}@jaist.ac.jp

<sup>\*2</sup> 広島大学大学院工学研究院機械システム・応用力学部門 (〒 739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1)

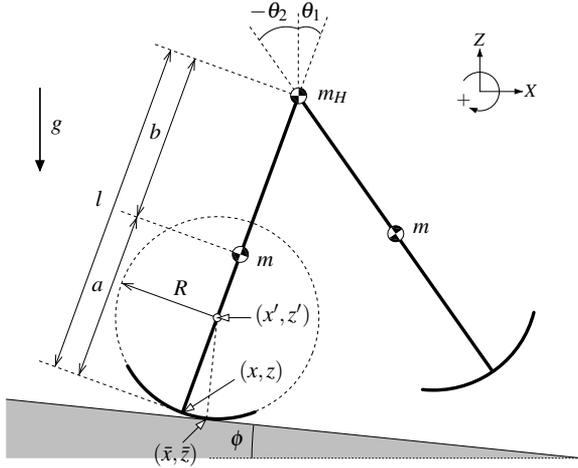


Fig. 1 Model of passive compass-like biped robot with semicircular feet

となる．左辺の各項の詳細については過去の文献<sup>(3)</sup>を参照されたい．また本論文では，半円足の中心点位置  $(x', z')$  は Fig. 1 に示すように脚リンク上に位置するものとする．

右辺第一項（ホロノミック拘束力項）の詳細について以下に述べる．Fig. 2 に示すように， $(\bar{x}, \bar{z})$  を足裏と斜面の接触点位置とする．このとき，支持脚足裏の接触点が斜面に沿って滑る速度拘束条件は

$$\dot{\bar{z}} = -\tan \phi \cdot \dot{\bar{x}} \quad (2)$$

で定まる．接触点位置座標は

$$\begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x' - R \sin \phi \\ z' - R \cos \phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x + R \sin \theta_1 - R \sin \phi \\ z + R \cos \theta_1 - R \cos \phi \end{bmatrix} \quad (3)$$

であるので，これを時間微分すると

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{z} \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x} + R \dot{\theta}_1 \cos \theta_1 \\ \dot{z} - R \dot{\theta}_1 \sin \theta_1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

となる．これを式 (2) に代入することでホロノミック拘束のヤコビアンが

$$\begin{aligned} \mathbf{J}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} &= \dot{x} \tan \phi + \dot{z} + R \dot{\theta}_1 (\cos \theta_1 \tan \phi - \sin \theta_1) \\ &= \begin{bmatrix} \tan \phi & 1 & R (\cos \theta_1 \tan \phi - \sin \theta_1) & 0 \end{bmatrix} \dot{\mathbf{q}} = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

と求まる．式 (5) を時間微分すると

$$\mathbf{J}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \dot{\mathbf{J}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} = 0 \quad (6)$$

となるので，式 (1)(6) より未定乗数  $\lambda$  が

$$\lambda = \mathbf{X}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})^{-1} (\mathbf{J}(\mathbf{q})\mathbf{M}(\mathbf{q})^{-1}\mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - \dot{\mathbf{J}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}) \quad (7)$$

と求まる．ただし，

$$\begin{aligned} \mathbf{X}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) &:= \mathbf{J}(\mathbf{q})\mathbf{M}(\mathbf{q})^{-1}\dot{\mathbf{J}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})^T, \\ \dot{\mathbf{J}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) &:= \mathbf{J}(\mathbf{q}) + \mathbf{J}_\mu(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \end{aligned}$$

とおいた． $\lambda$  は後述するように鉛直方向の床反力を表す．本論文では常に  $\lambda$  の値が正であることを安定な歩

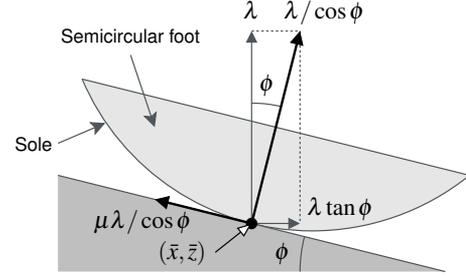


Fig. 2 Geometric relationship between ground reaction and sliding friction forces

行運動の成立条件とする．

**2.2 衝突方程式** 以下，上付文字“−”，“+”は衝突直前・直後を表すものとする．遊脚の足裏が床面と衝突する際にも斜面に対する法線方向のみに拘束力を受けるものと仮定すると，衝突方程式は

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}^+ = \mathbf{M}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}^- + \mathbf{J}_I(\mathbf{q})^T \lambda_I \quad (8)$$

$$\mathbf{J}_I(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}^+ = 0 \quad (9)$$

で与えられる．ただし，式 (8)(9) の中では支持脚交換を考慮していない（前脚・後脚として区別している）ため， $\mathbf{q} = \mathbf{q}^- = \mathbf{q}^+$  であることに注意されたい．以下の  $\dot{\mathbf{q}}^+$  の導出課程においては，衝突時の位置（一般化座標）ベクトルを簡単に  $\mathbf{q}$  と標記し，その各成分の上付文字を省略する．衝突直後に前脚（次の支持脚）の足裏の接触点が斜面に沿って滑る速度拘束条件は

$$\dot{\bar{z}}^+ = -\tan \phi \cdot \dot{\bar{x}}^+ \quad (10)$$

で定まる．その位置座標  $(\bar{x}^+, \bar{z}^+)$  は

$$\begin{bmatrix} \bar{x}^+ \\ \bar{z}^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x + l \sin \theta_1 - (l - R) \sin \theta_2 - R \sin \phi \\ z + l \cos \theta_1 - (l - R) \cos \theta_2 - R \cos \phi \end{bmatrix} \quad (11)$$

で定まるので，これを時間微分して

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \bar{x}^+ \\ \bar{z}^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x}^+ + l \dot{\theta}_1^+ \cos \theta_1 - (l - R) \dot{\theta}_2^+ \cos \theta_2 \\ \dot{z}^+ - l \dot{\theta}_1^+ \sin \theta_1 + (l - R) \dot{\theta}_2^+ \sin \theta_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

を得る．これを式 (10) に代入すると

$$\begin{aligned} & -(\dot{x}^+ + l \dot{\theta}_1^+ \cos \theta_1 - (l - R) \dot{\theta}_2^+ \cos \theta_2) \tan \phi \\ & = \dot{z}^+ - l \dot{\theta}_1^+ \sin \theta_1 + (l - R) \dot{\theta}_2^+ \sin \theta_2 \end{aligned}$$

を得るので，衝突方程式のヤコビアンが

$$\mathbf{J}_I(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}^+ = \begin{bmatrix} \tan \phi \\ 1 \\ l (\cos \theta_1 \tan \phi - \sin \theta_1) \\ -(l - R) (\cos \theta_2 \tan \phi - \sin \theta_2) \end{bmatrix}^T \dot{\mathbf{q}}^+ = 0 \quad (13)$$

と求まる．式 (8)(9) より衝突時の力積が

$$\lambda_I = -\mathbf{X}_I(\mathbf{q})^{-1} \mathbf{J}_I(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}^-, \quad \mathbf{X}_I(\mathbf{q}) := \mathbf{J}_I(\mathbf{q})\mathbf{M}(\mathbf{q})^{-1} \mathbf{J}_I(\mathbf{q})^T \quad (14)$$

と求まる. 式 (14) を式 (8) に代入して整理することで, 衝突直後の速度ベクトルが

$$\dot{\mathbf{q}}^+ = (\mathbf{I}_4 - \mathbf{X}_I(\mathbf{q})^{-1} \mathbf{M}(\mathbf{q})^{-1} \mathbf{J}_I(\mathbf{q})^T \mathbf{J}_I(\mathbf{q})) \dot{\mathbf{q}}^- \quad (15)$$

と求まる. 最後に, 式 (15) の各成分を支持脚交換を考慮して

$$\dot{\mathbf{q}}^+ = \begin{bmatrix} \dot{x}^+ + l\dot{\theta}_1^+ \cos \theta_1^\pm - l\dot{\theta}_2^+ \cos \theta_2^\pm \\ \dot{z}^+ - l\dot{\theta}_1^+ \sin \theta_1^\pm + l\dot{\theta}_2^+ \sin \theta_2^\pm \\ \dot{\theta}_2^+ \\ \dot{\theta}_1^+ \end{bmatrix} \quad (16)$$

とおき直す. これに併せて, 衝突直後の位置ベクトルも

$$\mathbf{q}^+ = \begin{bmatrix} x^- + l \sin \theta_1^- - l \sin \theta_2^- \\ z^- + l \cos \theta_1^- - l \cos \theta_2^- \\ \theta_2^- \\ \theta_1^- \end{bmatrix} \quad (17)$$

とおき直す. 以上で支持脚交換が完了する.

式 (5)(13) から分かるように, ロボットは単脚支持期・両脚支持期ともに 1 自由度の拘束をもつ. これより生成される運動は常に 3 自由度のものとなる<sup>(3)</sup>.

### 3. 動摩擦力のモデリングに関する問題点およびエネルギー消散との関係

**3.1 ヤコビアンを用いた変換における問題点** まず動摩擦力の影響を一般化座標空間に変換する際に生じる問題について述べる.  $X$ - $Z$  平面内における動摩擦力ベクトルは

$$\begin{bmatrix} \cos \phi \\ -\sin \phi \end{bmatrix} \frac{\mu \lambda}{\cos \phi} = \begin{bmatrix} \mu \\ -\mu \tan \phi \end{bmatrix} \lambda \quad (18)$$

与えられる. この並進力を一般化座標空間に変換するためのヤコビアンを式 (4) から求めると,

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{z} \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & R \cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & -R \sin \theta_1 & 0 \end{bmatrix} \dot{\mathbf{q}} \quad (19)$$

となる. 式 (18)(19) より, 式 (1) の右辺第二項が次のように求まる.

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ R \cos \theta_1 & -R \sin \theta_1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu \\ -\mu \tan \phi \end{bmatrix} \lambda \\ &= \begin{bmatrix} \mu \\ -\mu \tan \phi \\ \mu R (\cos \theta_1 + \sin \theta_1 \tan \phi) \\ 0 \end{bmatrix} \lambda =: \mathbf{J}_\mu(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})^T \lambda \quad (20) \end{aligned}$$

しかしながら, この  $\mathbf{J}_\mu(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$  の第三成分には半円足の回転運動による滑り運動を記述していないという誤りが含まれている. この誤りは, 式 (19) が記述しているように,  $(\bar{x}, \bar{z})$  の時間微分が  $(x', z')$  のそれと等しくな

ることに起因するものである. この結果, 実際には足裏の接触点に作用している動摩擦力が, 半円足の中心点位置に作用するそれとして誤認識される.  $\theta_1$  に対応した外力 (回転トルク) としては, 正しいそれとは逆方向のものとなるため, 歩行解析結果も大きな誤りを含むこととなる<sup>(9)</sup>. 本問題の解決策として, 本論文では次節に述べる計算方法を考える.

**3.2 外積ベクトルを用いた変換** 式 (18) の動摩擦力ベクトルを三次元空間におけるそれへと拡張すると

$$\begin{bmatrix} \cos \phi \\ 0 \\ -\sin \phi \end{bmatrix} \frac{\mu \lambda}{\cos \phi} = \begin{bmatrix} \mu \\ 0 \\ -\mu \tan \phi \end{bmatrix} \lambda \quad (21)$$

となる.  $(x, z)$  から見た  $(\bar{x}, \bar{z})$  の相対位置ベクトルは

$$\begin{bmatrix} \bar{x} - x \\ 0 \\ \bar{z} - z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R \sin \theta_1 - R \sin \phi \\ 0 \\ R \cos \theta_1 - R \cos \phi \end{bmatrix} \quad (22)$$

となるので, 動摩擦力が生成する一般化座標空間への作用は

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} R \sin \theta_1 - R \sin \phi \\ 0 \\ R \cos \theta_1 - R \cos \phi \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \mu \\ 0 \\ -\mu \tan \phi \end{bmatrix} \lambda \\ &= \begin{bmatrix} 0 \\ \mu R (\cos(\phi - \theta_1) - 1) / \cos \phi \\ 0 \end{bmatrix} \lambda \quad (23) \end{aligned}$$

となる. 式 (21)(23) をまとめることで, 動摩擦力項が

$$\mathbf{J}_\mu(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})^T \lambda = \begin{bmatrix} \mu \\ -\mu \tan \phi \\ \mu R (\cos(\phi - \theta_1) - 1) / \cos \phi \\ 0 \end{bmatrix} \lambda \quad (24)$$

と正しく求まる.

**3.3 動摩擦係数の決定およびエネルギー消散との関係** ロボットの全力的エネルギーは, 運動エネルギーと位置エネルギーの和として定まる. すなわち,

$$E = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{M}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} + P(\mathbf{q}) \quad (25)$$

である. ただし  $P(\mathbf{q})$  は位置エネルギーである.  $E$  の時間微分は次の関係式を満たす.

$$\begin{aligned} \dot{E} &= \dot{\mathbf{q}}^T \dot{\mathbf{J}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})^T \lambda + \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{J}_\mu(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})^T \lambda \\ &= \mu \lambda (\dot{x} - \dot{z} \tan \phi + R \dot{\theta}_1 (\cos(\phi - \theta_1) - 1) / \cos \phi) \\ &= \frac{\mu \lambda}{\cos \phi} \left( \frac{\dot{x} + R \dot{\theta}_1 \cos \theta_1}{\cos \phi} - R \dot{\theta}_1 \right) \\ &= \frac{\mu \lambda}{\cos \phi} \left( \frac{\dot{x}}{\cos \phi} - R \dot{\theta}_1 \right) \quad (26) \end{aligned}$$

ここで  $\dot{x} / \cos \phi$  [m/s] は支持脚の並進運動により生じる接触点の接線方向の速度,  $R \dot{\theta}_1$  [m/s] は支持脚の回転運

動により生じるそれである。接触点の滑り速度は両者の相対速度から決定されなければならない。この相対速度は式 (26) の中には現れている（つまり式 (24) の  $J_\mu(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$  の第三項はこの意味を含んでいる）が、式 (20) の  $J_\mu(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$  の第三項には現れていない。後者は  $\dot{x} = 0$  である場合に支持脚の回転により生じる動摩擦力を記述できていないということである。

正しい動摩擦係数は以下の論理に従い決定することができる。全エネルギーは動摩擦力により常に単調減少を続けなければならない。これより動摩擦力の最大絶対値を決定する正定数を  $\mu_0$  として、動摩擦係数を

$$\mu = -\mu_0 \text{sign} \left( \frac{\dot{x}}{\cos \phi} - R\dot{\theta}_1 \right) \quad (27)$$

とすれば、式 (26) は

$$\begin{aligned} \dot{E} &= -\frac{\mu_0 \lambda}{\cos \phi} \left( \frac{\dot{x}}{\cos \phi} - R\dot{\theta}_1 \right) \text{sign} \left( \frac{\dot{x}}{\cos \phi} - R\dot{\theta}_1 \right) \\ &= -\frac{\mu_0 \lambda}{\cos \phi} \left| \frac{\dot{x}}{\cos \phi} - R\dot{\theta}_1 \right| \leq 0 \end{aligned} \quad (28)$$

となり、力学的エネルギーは単調減少するという結論が導かれる。ただし、 $\lambda$  が正であること、および任意の  $x \in \mathbb{R}$  について次の関係が成り立つことを使った。

$$x \cdot \text{sign}(x) = |x|$$

不等式 (28) の等号成立条件は

$$\frac{\dot{x}}{\cos \phi} - R\dot{\theta}_1 = 0 \quad (29)$$

であり、これは足裏と斜面との間に成り立つ転がり拘束条件（ホロノミック拘束条件）に他ならない。更に式 (26) と (29) を照合すれば

$$J_\mu(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} = 0 \quad (30)$$

は転がり拘束条件を表す等式であることが分かる。これを考慮すると、式 (28) は次のように表現することができる。

$$\begin{aligned} \dot{E} &= J_\mu(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}\lambda \\ &= -\mu_0 \lambda (J_\mu(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}) \text{sign} (J_\mu(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}) \\ &= -\mu_0 \lambda |J_\mu(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}| \leq 0 \end{aligned} \quad (31)$$

式 (31) は、ホロノミック拘束条件が成り立たない場合は、摩擦力により力学的エネルギーが減少し続けなければならないことを表すものである。

本論文では式 (29) または (30) の周りでのチャタリング防止策として、 $\tanh$  を平滑関数として式 (27) に適用する。すなわち

$$\mu = -\mu_0 \tanh \left( c \left( \frac{\dot{x}}{\cos \phi} - R\dot{\theta}_1 \right) \right) \quad (32)$$

とする。ただし、 $c$  は  $\tanh$  の切れ味を調整するための正定数である。なお、式 (32) の摩擦モデルを用いる場

合も、任意の  $x \in \mathbb{R}$  について次の不等式

$$0 \leq x \cdot \tanh(x) \leq |x|$$

が成り立つことから  $\dot{E} \leq 0$  が示される。

## 4. 歩行解析

**4.1 典型的歩容** Fig. 3 に 3 自由度受動歩行の数値シミュレーション結果を示す。システムパラメータは Table 1 の値に設定した。結果より、動摩擦力が生むグリップ効果により足裏面の摺動が支持脚交換後の短期間においてほぼ停止していること、全力学的エネルギーはこの短期間に急速に減少していること、その後は 2 自由度受動歩行<sup>(6)</sup>と同様の軌道が生成されていることなどが分かる。

Fig. 4 は Fig. 3 の支持脚と遊脚の軌道を位相平面上にプロットしたものである。支持脚は  $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D$  の順に、遊脚は  $E \rightarrow F \rightarrow G$  の順に時間発展する。2 自由度受動歩行<sup>(6)</sup>との唯一の違いは支持脚の軌道の  $A \rightarrow B$  に見られる変化である。支持脚の角速度は支持脚交換直前（図中 D 点）から直後（図中 A 点）へ遷移する際に大きく減少し、ほぼゼロとなる。これは斜面に対する接線方向に拘束をもたないことに起因する現象である。この結果、支持脚の回転運動は瞬間的に停止状態となるが、接地点にグリップ効果が作用することで、図中 B 点まで急速に加速する。その後、B 点から C 点を経由して D 点へ至る軌道は、2 自由度受動歩行のそれに非常に近い。B 点において  $\mu$  の値が  $-\mu_0$  から（ほぼ）ゼロに切り替わることで運動特性が大きく変わる結果である。

**4.2 性能指標** 歩行性能の指標となる歩容パラメータを定義しておく。まず  $T$  [s] を歩行周期（支持脚交換の衝突から次のそれまでの期間）とする。歩幅  $\Delta X$  [m] を衝突直前（直後）から次のそれまでの支持脚先端位置の斜面に沿った移動距離として

$$\Delta X := \int_{0^\pm}^{T^\pm} \frac{\dot{x}}{\cos \phi} dt = \int_{0^+}^{T^-} \frac{\dot{x}}{\cos \phi} dt + 2l \sin \alpha$$

で定める。ただし、 $\alpha$  [rad] は衝突時の股関節の半角

$$\alpha := \frac{\theta_1^- - \theta_2^-}{2} = \frac{-\theta_1^+ + \theta_2^+}{2} > 0$$

である。以上より歩行速度  $V$  [m/s] を

$$V := \frac{\Delta X}{T}$$

と定義する。また、単脚支持期における消散エネルギー  $\Delta E$  [J] を

$$\Delta E := \int_{0^+}^{T^-} \dot{E} dt$$

と定義する。前述のように、この値は常に負となる。

**4.3 計算手順** 本章では以下の計算手順に従って歩容パラメータの値を求める。

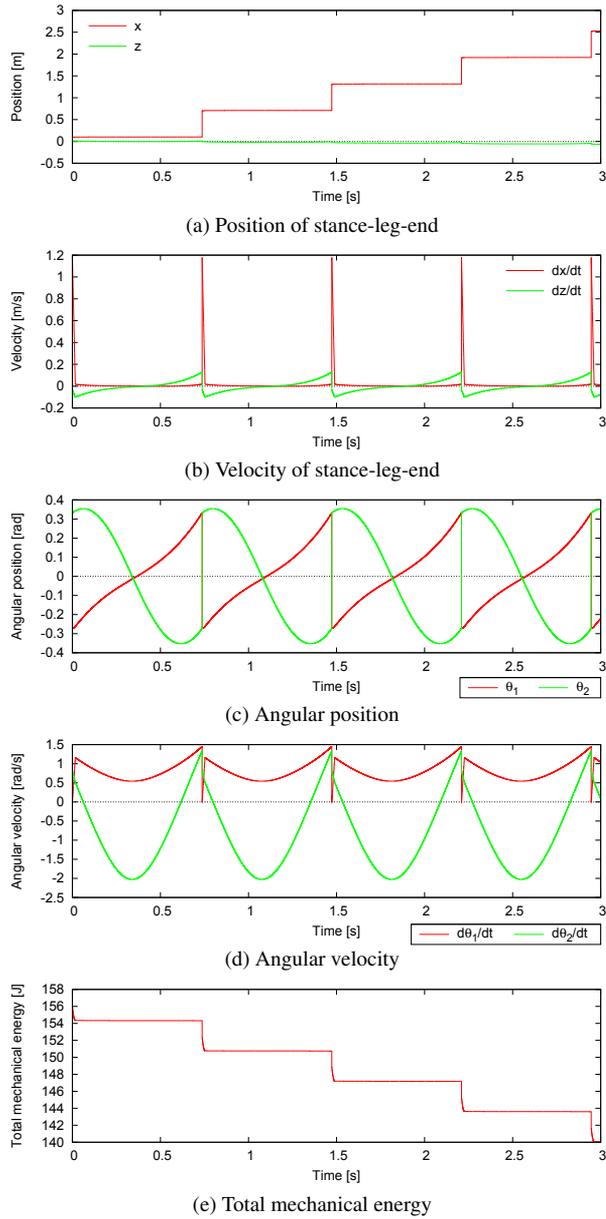


Fig. 3 Simulation results of 3-DOF passive compass gait with semicircular feet

Table 1 Parameter settings

$m$	5.0	kg		
$m_H$	10.0	kg		
$a$	0.5	m	$\phi$	0.03 rad
$b$	0.5	m	$\mu_0$	0.40 -
$l$	1.0	m	$c$	100 -
$R$	0.3	m		

(P1)  $R$ ,  $\phi$ ,  $\mu_0$  以外のシステムパラメータを Table 1 の値に設定する。

(P2)  $R$  をゼロに,  $\phi$  および  $\mu_0$  を Table 2 に示す三通りの値に設定する。

(P3) 受動歩行の数値シミュレーションを開始し, 100 秒経過後の 20 歩分の歩容パラメータを保存する。

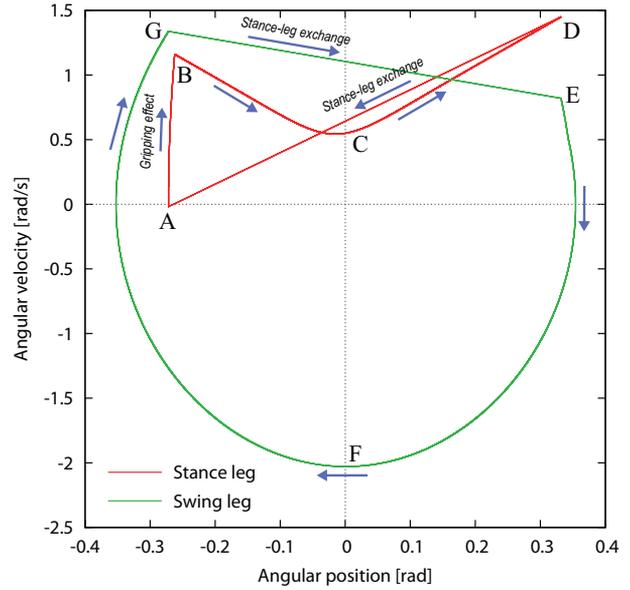


Fig. 4 Phase-plane plot of 3-DOF passive compass gait in Fig. 3

Table 2 Three cases for  $\phi$  and  $\mu_0$

	$\phi$ [rad]	$\mu_0$ [-]
Case 1	0.03	0.40
Case 2	0.04	0.44
Case 3	0.05	0.48

(P4) (P3) における最後の衝突直前の状態量を保存する。  
(P5)  $R$  を  $R + 0.02$  に変更し, (P4) で保存した状態量を次の初期状態とする。  
(P6) 安定歩容生成が可能である限り, (P3) から繰り返す。

なお, 安定歩容が生成されたと判断する条件には, 前述のように床反力  $\lambda$  が常に正値であることも含まれている。

**4.4 解析結果** Fig. 5 に解析結果を示す。  $R$  の増大により歩行周期, 歩行速度, 歩幅の全てが単調増加していることが分かる。歩行速度の増大は, 歩行周期の増加率以上に歩幅のそれが大きいことを意味するものである。また歩幅の増大は, 足裏の摺動と半円足がもつ作用 (復元力<sup>(7)</sup>と衝撃緩和<sup>(8)</sup>) の相乗効果によるものと考えられる。各々の効果の独立した解析は今後の課題である。一方,  $R$  の増大により消散エネルギーも (負の方向に) 増大していることが分かる。これは歩幅の増大につれて滑り距離も増大する (より大きなグリップ効果が作用する) ためである。

## 5. まとめと今後の課題

本論文では, 足裏面の摺動を考慮した半円足をもつコンパス型2脚ロボットモデリングおよび数値シミュレーションによる受動歩行解析を行い, 半円足が3自

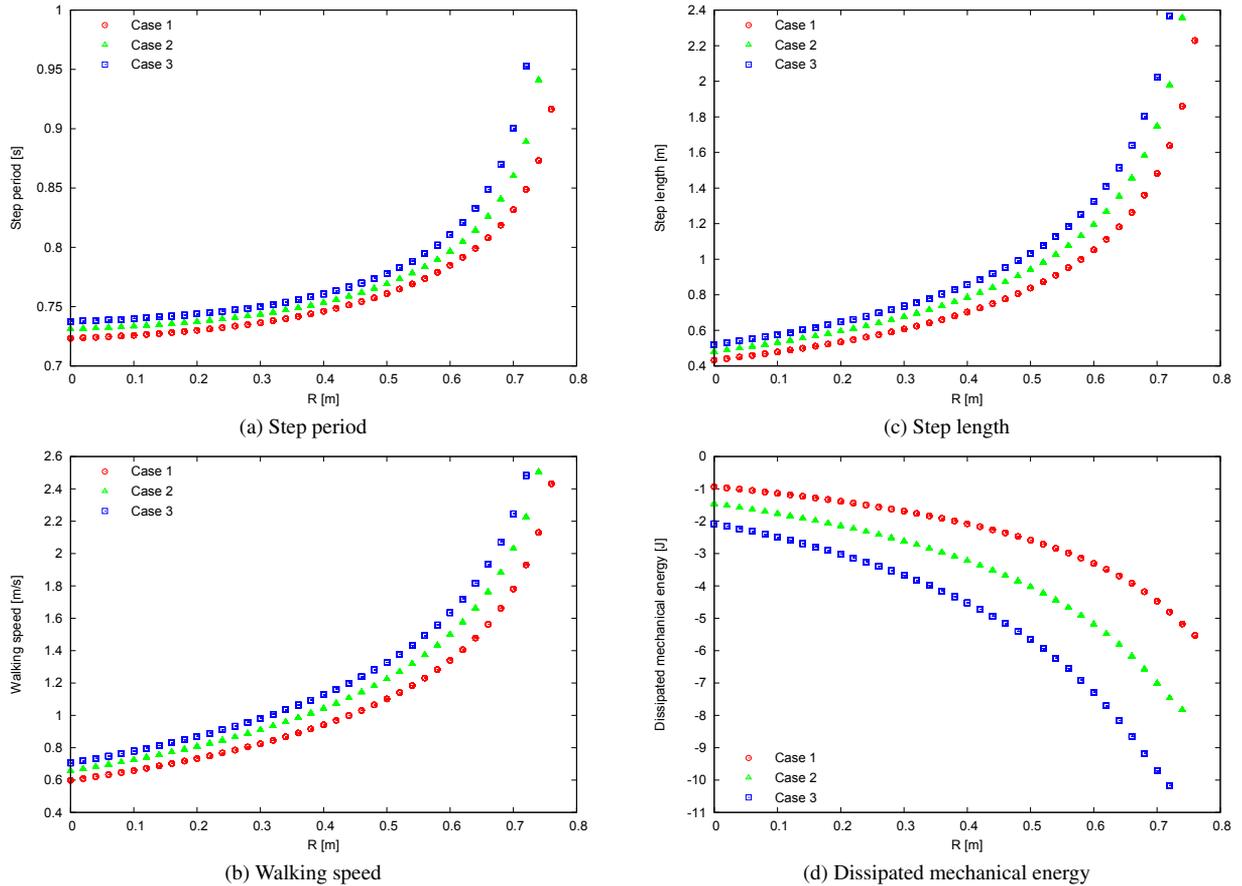


Fig. 5 Simulation results of 3-DOF passive compass gait with semicircular feet

由度受動歩行の性能向上に大きな効果をもつことを明らかにした。また、半円足と斜面との複雑な接触条件の考察を通して次の知見を得た。ホロノミック拘束力はシステムの全力学的エネルギーを変化させない（仕事をしない）という条件から統一的に定式化することができる。これに対し動摩擦力項は、ホロノミック拘束（転がり拘束）条件式が成り立たない限り力学的エネルギーは減少し続けるという条件から統一的定式化を行うことができる。将来、曲率が一定でない足裏形状へと解析を進めて行く上で、この知見は大いに役立つものと筆者らは考えている。当面の課題は  $J_{\mu}(q, \dot{q})$  がもつ  $R$  の関数としての力学的意味の理解である。

#### 参考文献

- (1) F. Asano, Y. Kikuchi and M. Shibata, “Modeling, control and analysis of limit cycle walking on slippery road surface,” *Int. J. of Dynamics and Control*, Vol. 2, Iss. 4, pp. 463–473, 2014.
- (2) X. Xiao, Y. Kikuchi, F. Asano and T. Fujimoto, “Limit cycle walking of underactuated bipedal humanoid on slippery road surface,” *Proc. of the 14th IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots*, pp. 622–627, 2014.
- (3) F. Asano, T. Saka and T. Fujimoto, “Passive dynamic walking of compass-like biped robot on slippery downhill,” *Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 4113–4118, 2015.
- (4) T. McGeer, “Passive dynamic walking,” *Int. J. of Robotics Research*, Vol. 9, No. 2, pp. 62–82, 1990.
- (5) T. McGeer, “Passive walking with knees,” *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1640–1645, 1990.
- (6) A. Goswami, B. Thuijlt and B. Espiau, “A study of the passive gait of a compass-like biped robot: symmetry and chaos,” *Int. J. of Robotics Research*, Vol. 17, No. 12, pp. 1282–1301, 1998.
- (7) 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-(I) コンパス型モデルの駆動力学”, 日本ロボット学会誌, Vol. 25, No. 4, pp. 566–577, 2007.
- (8) 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.
- (9) 浅野文彦, 坂利昭, “半円足をもつコンパス型 2 脚ロボットの 3 自由度受動歩行”, 第 33 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 312-05, 2015.