第12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にて発表 [2011.12.23]
第3章中の数値解析結果を差し替え，説明文を修正 [2012.1.12]

上体と粘弾性脚を持つ能動リムレスホイールの平地歩行

○ 河本 隼治 （北陸先端大），浅野 文彦 （北陸先端大）

Level Walking of Active Rimless Wheel with Upper Body and Viscoelastic Legs

○ Junji KAWAMOTO (JAIST), and Fumihiko ASANO (JAIST)

Abstract: This paper investigates level dynamic walking of an active rimless wheel with an upper body and viscoelastic legs. Our model achieves stable walking on level ground only by a simple control for maintaining the upper body angle. We then analyze the gait properties with respect to the physical parameters of the upper body through numerical simulations. Furthermore, adaptation ability to uneven terrain is discussed.

1. はじめに

受動歩行 [1] をはじめとするリミットサイクル型の歩行運動は，衝突現象（状態のジャンプ）を含む非線形ハイブリッドシステムとしてモデル化されるのが一般的であり，その運動方程式は単脚支持状態（Single-limb support；以下 SLS）のみを考慮したものとなっていた．しかし，このモデルでは堅い路面上でしか歩行を生成できず，砂地や泥地といった不整地に対する適応性に問題があった．これに対して ZMP を規範とした 2 足ヒューマノイドは，両脚支持状態（Double-limb support；以下 DLS）を有効に利用することで歩行（姿勢）安定性を保持している．また，人間の歩行は約 65 %の立脚相と約 35 %の遊脚相から形成されており，このサイクルの中で DLS は約 10 %を占めることが知られている [2][3][4]．すなわち DLS を含む歩行は，これまでのモデルが弱点としていた不整地踏破を可能にするという期待が持てる．

筆者らは先行研究 [5] において，粘弾性脚を持つ Rimless wheel（以下 RW）を受動歩行させることによって，DLS を含む安定な歩行が生成可能であることを示し，その基本的特性を解析した．

本稿では，粘弾性脚を持つ RW に上体を付加し，支持脚との間に制御トルクを印加することで，重力による進行方向へ推進力が得られない平地での歩行の実現を試みる．そして，上体の物理パラメータに対する運動特性の変化を解析する．更に，脚の順応性を利用した不整地踏破の能力の基礎的考察として，段差の乗り越え問題について検討する．粘弾性脚および剛体脚それぞれが踏破可能な最大値を解析する．

2. モデリング

2·1 仕様

本研究では Fig.1 に示す上体と粘弾性脚を持つ 8 脚平面 RW を扱う．上体と支持脚（DLS においては前脚）との間に制御トルクを印加することが可能となっており，上体の角度を一定値で維持するように制御を行うことによって RW に推進力を与え，歩行を生成する．数値シミュレーションにおいて，以下の仮定をおく．

- 脚フレームの直動関節には粘弾性要素を持つ．
- 脚フレームと地面との接地点は滑らない．
- 脚フレームの質量を m [kg]，本体の質量を m_H [kg]，上体の質量を m_T [kg] とする．
- 全ての隣り合う脚フレーム間の相対角度を $\alpha = \pi/4$ [rad] とする（対称形状）．
- 両脚支持状態における前脚を Leg 1，後脚を Leg 2 と呼ぶ．
- 伸縮運動は Leg 1，2 のみ行い，他の 6 脚は弾性力によりストッパーに固定されたまま動かない．また，このときの長さを L_0 [m] とする．
- 上体と Leg 1 の間に印加する制御トルクを u とする．

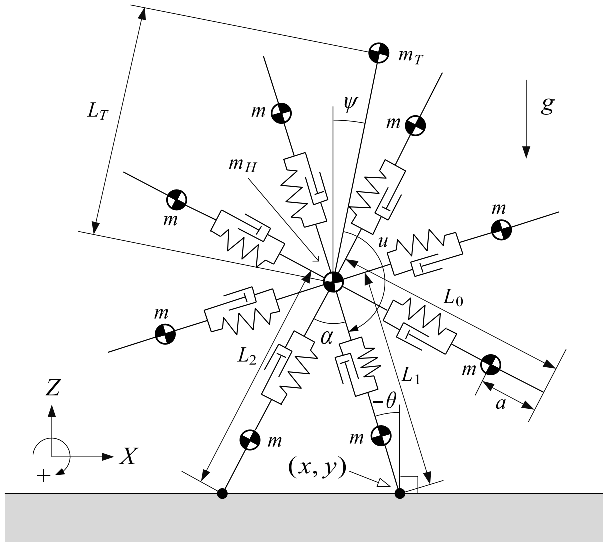


Fig.1 Model of active rimless wheel with upper body and viscoelastic legs

2·2 運動方程式

一般化座標ベクトルを $\boldsymbol{q}^{\mathrm{T}} = [\ x\ z\ \theta\ \psi\ L_1\ L_2\ ]$ とすると，ラグランジュ方程式により RW の運動方程式は以下のように表される．

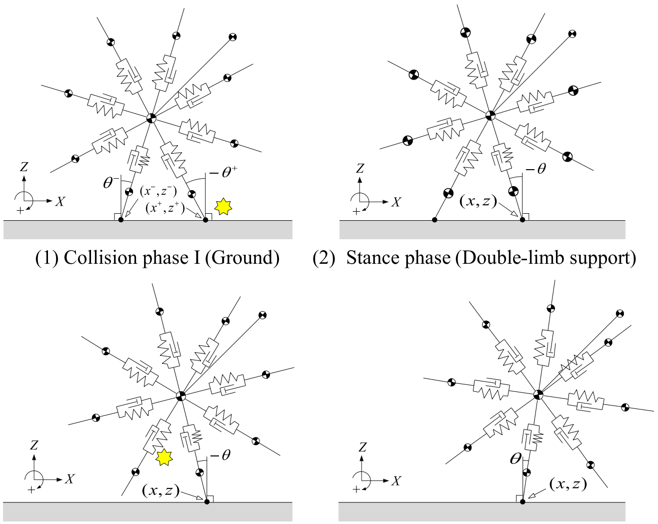
$$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{h}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}) = \boldsymbol{S}u + \boldsymbol{\tau}_{ve}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}) + \boldsymbol{J}(\boldsymbol{q})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\lambda} \quad (1)$$

$$\boldsymbol{J}(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{q}} = \boldsymbol{0} \quad (2)$$

ただし，

$$\boldsymbol{S}u = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} u \quad (3)$$

は制御入力ベクトルであり，$\boldsymbol{\tau}_{ve}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}) \in \mathbb{R}^6$ は Leg 1 と Leg 2 に作用する粘弾性力，$\boldsymbol{J}(\boldsymbol{q})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\lambda} \in \mathbb{R}^6$ はホロノミック拘束力である．式 (2) はホロノミック拘束の速度拘束条件式であり，ヤコビアン $\boldsymbol{J}(\boldsymbol{q})$ は状況に応じて切り替わるもの



(1) Collision phase I (Ground)　(2) Stance phase (Double-limb support)

(3) Collision phase II (Stopper)　(4) Stance phase (Single-limb support II)

Fig.2 Phase sequence

である．式 (1)(2) から未定乗数ベクトル $\boldsymbol{\lambda}$ を消去すると，次のように整理される．

$$\begin{aligned} \boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}} =& \boldsymbol{Y}(\boldsymbol{q})(\boldsymbol{S}u + \boldsymbol{\tau}_{ve}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}}) - \boldsymbol{h}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})) \\ &- \boldsymbol{J}(\boldsymbol{q})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{X}(\boldsymbol{q})^{-1}\dot{\boldsymbol{J}}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}} \end{aligned} \tag{4}$$

$$\boldsymbol{Y}(\boldsymbol{q}) := \boldsymbol{I}_6 - \boldsymbol{J}(\boldsymbol{q})^T\boldsymbol{X}(\boldsymbol{q})^{-1}\boldsymbol{J}(\boldsymbol{q})\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})^{-1} \tag{5}$$

ここで，$\boldsymbol{X}(\boldsymbol{q}) := \boldsymbol{J}(\boldsymbol{q})\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})^{-1}\boldsymbol{J}(\boldsymbol{q})^{\mathrm{T}}$ であり，粘弾性力 $\boldsymbol{\tau}_{ve}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})$ は次式で定まるものである．

$$\boldsymbol{\tau}_{ve}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}}) = \begin{bmatrix} \boldsymbol{0}_{4\times1} \\ -k(L_1 - L^*) - c\dot{L}_1 \\ -k(L_2 - L^*) - c\dot{L}_2 \end{bmatrix} \tag{6}$$

ただし，k [N/m] は弾性係数，c [N·s/m] は粘性係数，L^* [m] はバネの自然長である．

2·3　立脚相における拘束条件式

粘弾性脚を持つ RW の歩行運動は，次の 5 つの相から構成される（Fig.2 参照）．

1. 衝突相 I（Leg 1 と床面との衝突）
2. 立脚相・両脚支持期（2 自由度）
3. 立脚相・単脚支持期 I（4 自由度）
4. 衝突相 II（Leg 2 のストッパーへの衝突）
5. 立脚相・単脚支持期 II（3 自由度）

なお，数値シミュレーションにおいて，この 1〜5 の順序で遷移しない歩行は全て歩行不成立とみなした（整定条件）．

立脚相における各拘束条件式の詳細を以下に述べる．

2·3.1　両脚支持期

次の 2 条件：

(A) Leg 1 の先端位置が床面に滑らずに接している
(B) Leg 2 の先端位置が床面に滑らずに接している

から 4 つの速度拘束条件式が導かれ，これらをまとめるとヤコビアンが

$$\boldsymbol{J}(\boldsymbol{q}) = \begin{bmatrix} \boldsymbol{J}_1 \\ \boldsymbol{J}_2 \\ \boldsymbol{J}_3(\boldsymbol{q}) \\ \boldsymbol{J}_4(\boldsymbol{q}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & J_{33} & 0 & \sin\theta & J_{36} \\ 0 & 1 & J_{43} & 0 & \cos\theta & J_{46} \end{bmatrix} \tag{7}$$

と求まる．ただし，

$$J_{33} = L_1\cos\theta - L_2\cos(\theta+\alpha),\quad J_{36} = -\sin(\theta+\alpha)$$
$$J_{43} = -L_1\sin\theta - L_2\sin(\theta+\alpha),\quad J_{46} = -\cos(\theta+\alpha)$$

である．

ホロノミック拘束力は

$$\boldsymbol{J}(\boldsymbol{q})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\lambda} = \boldsymbol{J}_1^{\mathrm{T}}\lambda_1 + \boldsymbol{J}_2^{\mathrm{T}}\lambda_2 + \boldsymbol{J}_3(\boldsymbol{q})^{\mathrm{T}}\lambda_3 + \boldsymbol{J}_4(\boldsymbol{q})^{\mathrm{T}}\lambda_4 \tag{8}$$

と分解される．Leg 1 の脚先に作用する床反力の斜面に垂直な方向成分は λ_2，Leg 2 のそれは λ_4 となる．Leg 2 が床面から浮上する瞬間は，λ_4 の符号を観測することで検知することができる．

2·3.2　単脚支持期 I

ここでは条件 (A) のみが作用するため，ヤコビアンは

$$\boldsymbol{J} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{J}_1 \\ \boldsymbol{J}_2 \end{bmatrix} \tag{9}$$

となる．

2·3.3　単脚支持期 II

ここでは

(C) 弾性力により Leg 2 が伸び切ったまま動かない

という条件が付加される．これは数学的に $\dot{L}_2 = 0$ で与えられるため，ヤコビアンは式 (9) にこの条件を加えた次式となる．

$$\boldsymbol{J} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{J}_1 \\ \boldsymbol{J}_2 \\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1 \end{bmatrix} \tag{10}$$

2·4　衝突方程式

2·4.1　Leg 1 の床面との衝突

非弾性衝突モデルを解く前に衝突直前の状態量 $\boldsymbol{q}^-$，$\dot{\boldsymbol{q}}^-$ を，Leg 1 と Leg 2 を次のそれへと置き換えた $\boldsymbol{q}^\dagger$，$\dot{\boldsymbol{q}}^\dagger$ に修正する必要がある．具体的には以下のように定まる．

$$\boldsymbol{q}^\dagger = \begin{bmatrix} \boldsymbol{0}_{2\times1} \\ \theta^- - \alpha \\ \psi^- \\ L_0 \\ L_1^- \end{bmatrix},\quad \dot{\boldsymbol{q}}^\dagger = \begin{bmatrix} \dot{x}^\dagger \\ \dot{z}^\dagger \\ \dot{\theta}^- \\ \dot{\psi}^- \\ 0 \\ \dot{L}_1^- \end{bmatrix} \tag{11}$$

$$\begin{aligned} \dot{x}^\dagger =& \dot{x}^- + \left(L_1^-\cos\theta^- - L_0\cos(\alpha-\theta^-)\right)\dot{\theta}^- \\ &+ \dot{L}_1\sin\theta^- \end{aligned} \tag{12}$$

$$\begin{aligned} \dot{z}^\dagger =& \dot{z}^- - \left(L_1^-\sin\theta^- + L_0\sin(\alpha-\theta^-)\right)\dot{\theta}^- \\ &+ \dot{L}_1\cos\theta^- \end{aligned} \tag{13}$$

次の仮定

(D) Leg 1 は非弾性衝突により接地するが Leg 2 も離陸せず床面上に留まる

の下で，以下の非弾性衝突モデルを適用する．

$$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q}^\dagger)\dot{\boldsymbol{q}}^+ = \boldsymbol{M}(\boldsymbol{q}^\dagger)\dot{\boldsymbol{q}}^\dagger - \boldsymbol{J}_I(\boldsymbol{q}^\dagger)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\lambda}_I \tag{14}$$

$$\boldsymbol{J}_I(\boldsymbol{q}^\dagger)\dot{\boldsymbol{q}}^+ = \boldsymbol{0}_{4\times1} \tag{15}$$

この場合の拘束条件は (A)(B) の二つであるので，$\boldsymbol{J}_I(\boldsymbol{q}^\dagger) \in \mathbb{R}^{4\times6}$ は式 (7) のそれに等しい．式 (14)(15) を解くことで，

衝突直後の速度ベクトルが次のように求まる．

$$\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{q}}^{+} &= \left(\boldsymbol{I}_6 - \boldsymbol{M}(\boldsymbol{q}^{\dagger})^{-1}\boldsymbol{J}_I(\boldsymbol{q}^{\dagger})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{X}_I(\boldsymbol{q}^{\dagger})^{-1}\right.\\ &\quad \left.\times \boldsymbol{J}_I(\boldsymbol{q}^{\dagger})\right)\dot{\boldsymbol{q}}^{\dagger} \qquad (16)\end{aligned}$$

$$\boldsymbol{X}_I(\boldsymbol{q}^{\dagger}) := \boldsymbol{J}_I(\boldsymbol{q}^{\dagger})\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q}^{\dagger})^{-1}\boldsymbol{J}_I(\boldsymbol{q}^{\dagger})^{\mathrm{T}} \qquad (17)$$

2·4.2　Leg 2 のストッパーへの衝突

拘束条件 (C) が衝突直後に成り立つという仮定の下で，非弾性衝突モデルが次のように与えられる．ただし，この瞬間の状態量を $\boldsymbol{q}_s$，$\dot{\boldsymbol{q}}_s$ とした．

$$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q}_s)\dot{\boldsymbol{q}}_s^{+} = \boldsymbol{M}(\boldsymbol{q}_s)\dot{\boldsymbol{q}}_s^{-} - \boldsymbol{J}_s^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\lambda}_s \qquad (18)$$

$$\boldsymbol{J}_s\dot{\boldsymbol{q}}_s^{+} = \boldsymbol{0}_{3\times1} \qquad (19)$$

この衝突は単脚支持期に起こることを仮定しているため，ヤコビアン $\boldsymbol{J}_s \in \mathbb{R}^{3\times6}$ は式 (10) のそれと同一になる．式 (18)(19) を解くことで，衝突直後の速度ベクトルが以下のように求まる．

$$\dot{\boldsymbol{q}}_s^{+} = \left(\boldsymbol{I}_6 - \boldsymbol{M}(\boldsymbol{q}_s)^{-1}\boldsymbol{J}_s^{\mathrm{T}}\boldsymbol{X}_s(\boldsymbol{q}_s)^{-1}\boldsymbol{J}_s\right)\dot{\boldsymbol{q}}_s^{-} \qquad (20)$$

$$\boldsymbol{X}_s(\boldsymbol{q}_s) := \boldsymbol{J}_s\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q}_s)^{-1}\boldsymbol{J}_s^{\mathrm{T}} \qquad (21)$$

なお，この衝突が起こるための必要条件として，バネの自然長 L^* が脚長の基本値 L_0 よりも大きいことが必要である．

2·5　制御入力

制御量として上体の絶対角度 ψ [rad] をとり，それを一定値 ψ_d [rad] で維持するように出力追従制御を行う．ψ の 2 階微分は，式 (4) を代入して以下のように表される．

$$\ddot{\psi} = \boldsymbol{C}\ddot{\boldsymbol{q}} = \begin{bmatrix}0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0\end{bmatrix}\ddot{\boldsymbol{q}} = Au - B \qquad (22)$$

ただし，

$$A := \boldsymbol{C}\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})^{-1}\boldsymbol{Y}(\boldsymbol{q})\boldsymbol{S} \qquad (23)$$

$$\begin{aligned}B &:= \boldsymbol{C}\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})^{-1}\left(\boldsymbol{Y}(\boldsymbol{q})(\boldsymbol{h}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}}) - \boldsymbol{\tau}_{ve})\right.\\ &\quad \left.+\boldsymbol{J}(\boldsymbol{q})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{X}(\boldsymbol{q})^{-1}\dot{\boldsymbol{J}}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}}\right) \qquad (24)\end{aligned}$$

である．$\psi \to \psi_d$ を達成するために，制御入力 u は式 (22) より以下のように表される．

$$u = A^{-1}(v + B) \qquad (25)$$

$$v = -K_D\dot{\psi} + K_P(\psi_d - \psi) \qquad (26)$$

ただし，K_D，K_P はそれぞれ，微分ゲインと比例ゲイン（正定数）である．

3.　数値シミュレーション

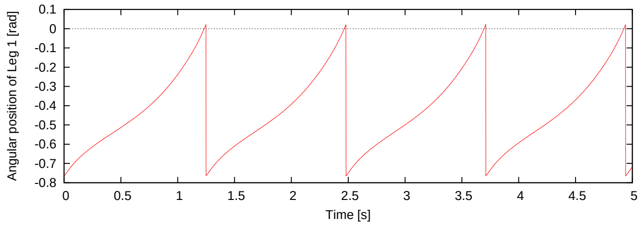
上体角度の目標値 ψ_d を $\pi/4$ [rad]（45 [deg]）に設定したときの平地歩行におけるシミュレーション結果を Fig. 3 に示す．RW の物理パラメータは Table 1 のように設定した．Fig.4 は Leg 1，Leg 2 および上体のスティック線図である．

Fig.3 はそれぞれ，(a) が Leg 1 の角度の，(b) が Leg 1・Leg 2 の長さの，(c) が Leg 1・Leg 2 の床反力の，(d) が Leg 2 の脚先端位置の，(e) が上体角度の時間変化を示している．(a)(b) より，1 周期の定常歩行が生成できていることが確認できる．また，Leg 2 がストッパーの働きによって $L_0 = 1.0$ [m] で固定されていることも確認できる．(c) より，Leg 1，Leg 2 の両脚に床反力が働いている区間がある．この区間は歩行における DLS であり，Leg 2 から Leg 1 へシフトしている．そして (d) より，DLS から SLS へ移行後，Leg 2 の脚先端位置は単調に上昇している．つまり，Fig.2 の状態遷移で歩行が生成できていることが確認できる．(e) より，上体の角度は支持脚交換の衝突時に少し変動するものの，$\pi/4$ [rad] で維持されていることが確認できる．これらの結果から，上体の角度を一定値で維持するように制御することにより，平地において DLS を含む安定な定常歩行が実現できることが分かる．

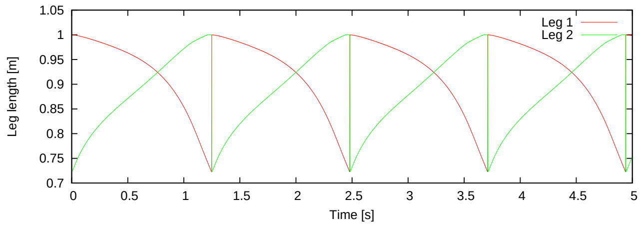
Fig.5 は五通りの上体長さ L_T に対して，目標角度 ψ_d を 5 [deg] ずつ変化させ，定常歩行が生成できたときの歩行

Table 1 Physical parameter setting

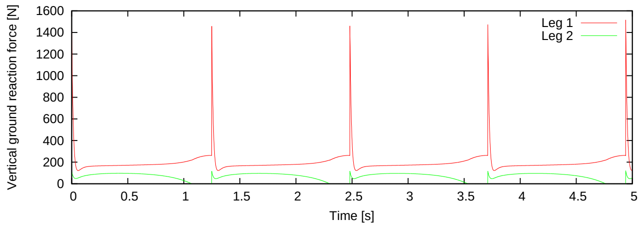
m_T	10.0	kg	L_T	1.0	m
m_H	10.0	kg	L_0	1.0	m
m	1.0	kg	L^*	1.02	m
α	$\pi/4$	rad	k	500	N/m
a	0.3	m	c	200	N·s/m



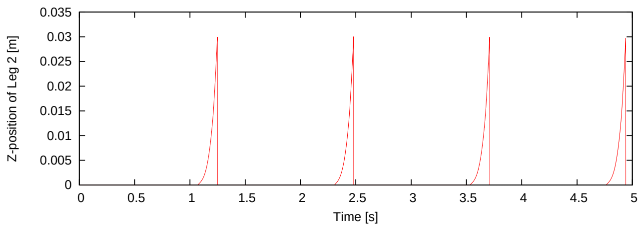
(a) Angular position of Leg 1



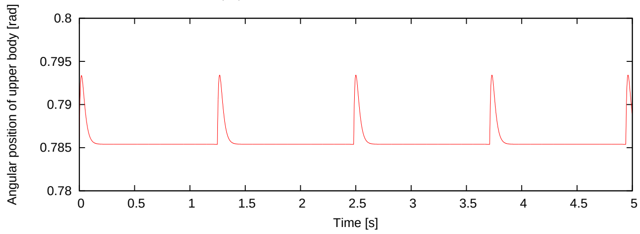
(b) Leg length



(c) Vertical ground reaction force



(d) Z-position of Leg 2



(e) Angular position of Upper body

Fig.3 Simulation results of level dynamic walking

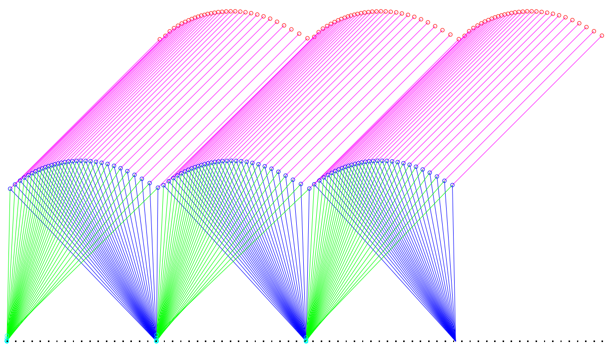


Fig.4 Stick diagram of steady gait

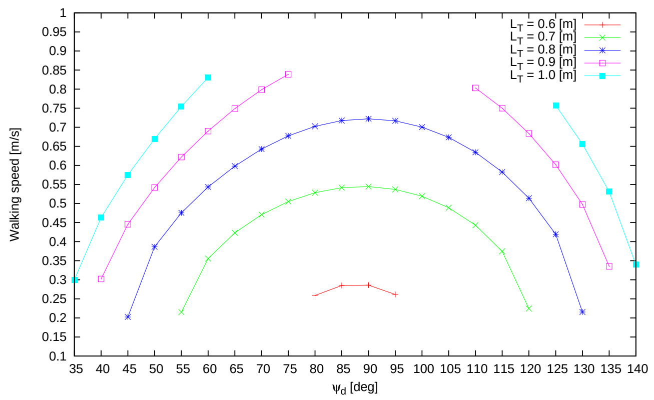


Fig.5 Walking speed with respect to ψ_d for five values of L_T

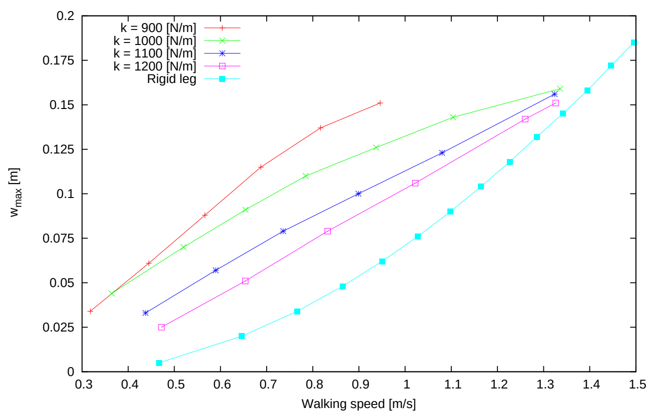


Fig.6 $w_{\max}$ with respect to walking speed for four values of k and rigid-legged model

速度を示している．$L_T = 0.9$ [m] のときの $\psi_d = 75$〜110 [deg] および，$L_T = 1.0$ [m] のときの $\psi_d = 60$〜125 [deg] の範囲において定常歩行が生成できていないのは，歩行速度が速くなることで「ストッパー衝突後に支持脚交換の衝突が起こる」という整定条件を満たさなくなるためである．その他で定常歩行が生成できていないのは，支持脚交換の衝突直後からの DLS において，床反力が Leg 2 から Leg 1 へ移行しないことによって歩行が継続しなかったためである．Fig.5 から確認できることは，上体の長さが大きくなるにつれて歩行速度が速くなっていることである．また，目標角度が 90 [deg] に近づくにつれて歩行速度が速くなっていることも確認できる．つまり，モーメントを大きくすることによって歩行速度は速くなることが分かる．

Fig.6 は，四通りの弾性係数 k と剛体脚に対して歩行速度を変化させたときに，踏破することのできた段差の最大値 $w_{\max}$ を示している．歩行速度は定常歩行時の速度であり，ψ_d を変化させることで調節した．なお，定常歩行時や段差踏破時にパンチング現象が見られたが，これを無視した．しかし，整定条件を満たさない歩行については歩行不成立と見なした．Fig.6 から分かることは，歩行が生成できた範囲においては粘弾性脚が剛体脚よりも段差踏破には有利になるということである．また，弾性係数が小さいほど踏破可能な最大段差が大きくなっていることも分かる．この解析においては，弾性係数が小さい場合には整定条件を満たさなくなるため $k = 900$ [N/m] 以下は解析を行っていないが，整定条件を無視して解析を行うと，踏破可能な最大段差が更に大きくなる可能性がある．

4. まとめと今後の課題

本稿では，上体と粘弾性脚を持つリムレスホイールを用いて，数値シミュレーションによる平地歩行の解析を行った．上体の前傾姿勢を維持するように制御を行うことで，安定な平地歩行が生成できることを示した．また，解析を通して以下の知見が得られた．

- 上体の長さを大きくするほど歩行速度は上昇する．
- 上体の維持角度 ψ_d を 90 [deg]（$\pi/4$ [rad]）へ近づけるほど歩行速度は上昇する．
- 段差踏破において，粘弾性脚は剛体脚よりも有利である．

今後の課題として，以下の点が挙げられる．

不整地への適応可能性の検討

脚の順応性を活かすことにより，泥地・砂地・雪道などの不整地踏破への期待が持てる．

上体が持つ力学的効果の制御応用

上体の角度を歩行に応じて順応的に制御することにより，歩行の開始および停止を実現できる可能性がある．

2 脚歩行モデルへの拡張

本稿では最も簡単な歩行モデルである RW のモデルを採用しているが，人間の歩行形態である 2 脚歩行モデルへと拡張する必要がある．

参考文献

[1] T. McGeer: “Passive dynamic walking,” Int. J. of Robotics Research, vol. 9, no. 2, pp. 62–82, 1990.

[2] M. W. Whittle: Gait analysis: an introduction, Butterworth-Heinemann, 2001.

[3] M. P. Murray, A. B. Drought and R. C. Kory: “Walking patterns of normal men,” The J. of Bone and Joint Surgery, vol. 46, no. 2, pp. 335–360, 1964.

[4] M. Bouysset, Y. Tourné and K. Tillmann: Foot and ankle in rheumatoid arthritis, Springer, 2005.

[5] 浅野，河本：“粘弾性脚を持つリムレスホイールの受動歩行”，第 29 回日本ロボット学会学術講演会，3J1-5，2011.