

Title	連結型Rimless Wheelの受動歩行とその性能解析 : 前後脚間の位相差の調節による高速化
Author(s)	浅野, 文彦; 井上, 遼祐; 田中, 大樹; 徳田, 功
Citation	日本ロボット学会誌, 30(1): 107-116
Issue Date	2012
Type	Journal Article
Text version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/10119/10668
Rights	Copyright (C) 2012 日本ロボット学会. 浅野文彦, 井上遼祐, 田中大樹, 徳田功, 日本ロボット学会誌, 30(1), 2012, 107-116.
Description	

連結型 Rimless Wheel の受動歩行とその性能解析

—前後脚間の位相差の調節による高速化—

浅野文彦*¹ 井上遼祐*² 田中大樹*¹ 徳田 功*³

Passive Dynamic Walking of Combined Rimless Wheel and Its Efficiency Analysis

—Speeding-up by Adjustment of Phase Difference between Fore and Rear Legs—

Fumihiko Asano*¹, Ryosuke Inoue*², Daiki Tanaka*¹ and Isao Tokuda*³

This paper investigates passive dynamic walking and its efficiency of a combined rimless wheel (CRW) that consists of two identical 8-legged rimless wheels. First, we introduce a mathematical model of the CRW and develop the system equations. We then numerically show that stable passive-dynamic gaits can be generated regardless of the phase difference between the fore and rear legs. Second, we show that the walking speed is maximized when the phase difference is nearly equal to the half inter-leg angle through numerical analysis, and experimentally verify the validity using our prototype CRW machine. Furthermore, we discuss the inherent speeding-up mechanism from the potential barrier point of view.

Key Words: Combined Rimless Wheel, Passive Dynamic Walking, Efficiency, Phase Difference, Potential Barrier

1. はじめに

Rimless wheel (以下 RW と略記) は最も簡単な受動歩行モデルとして知られ, そのダイナミクスや安定性はこれまでに広く研究されてきた [1]. 下り斜面上で受動歩行をする場合には, 常に同一の姿勢で 1 自由度の剛体として衝突する (衝突姿勢拘束), 一歩当たりの回復エネルギーを一定値に保つ (回復エネルギー拘束) という二条件が満たされるため, 生成される歩容は必ず 1 周期かつ漸近安定性となることが知られている [2]. また, RW は多数の脚フレームからなる身体構造でありながら, その運動が複数の脚による支持状態を含まないものとなるため, 2 脚モデルの受動歩行と多脚のそれとの中間的な意味合いを有しているとも捉えられる. さらに工学的観点からは, 車輪が持つ高速移動能力と脚移動の環境適応能力を同時に備えた機構とも考えられ, 近年ではその特性に着目した新しい移動ロボットも開発されるようになってきている [3] [4]. RW に潜在する力学特性を最大限に引き出す, あるいは最適化することで, より高

性能な移動ロボットの出現が今後も期待されよう.

本論文の趣旨は, RW が生来的に持つ脚移動ロボットとしての性能のさらなる向上を, 複数台の連結 (協調) の観点から模索することである. 特に受動歩行を手段として, 前後脚間の位相差が生み出す幾何学的・力学的特性を理論的に明らかにすることである. 受動歩行は当初 2 脚モデルに関してのみ, その存在が確認されていたが [1], Smith ら [5], Remy ら [6], Nakatani ら [7] の研究により, 4 脚以上のモデルでも受動歩行が発現することが明らかにされてきた. 最近では, 多脚受動歩行と生物との関係についても考察が進められている [8]. しかしながら, RW を連結した多脚受動歩行モデルは最小自由度でありながら, これまでほとんど研究例がなく, その特性も十分に知られていない. 受動歩行運動の本質を追求することで, そのモデルが単体の RW へと還元されていったように, 多脚受動歩行運動の本質を知る第一歩として複数台の RW を連結したモデルを扱うことは有意義であると筆者らは考える.

以上の観点から本論文では, 多脚受動歩行およびその最適歩容生成原理に関する基礎研究として, **Fig. 1** に示す 2 台の 8 脚 RW を結合した連結型 RW (Combined rimless wheel; 以下 CRW と略記) の運動特性を考察する. Smith らの研究では数学モデルの導出過程で多くの近似線形化を用いていたが [5], 本論文ではこれを行わず, 非線形モデルのままの特性を解析する. 特に前後の RW 間の位相差に着目し, その歩行速度に対する影響を考察する. 数値シミュレーションを通して, 位相差が RW の股角度の半角付近になるときに歩行速度が最大化されること

原 2011 年 6 月 20 日

*¹北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科

*²株式会社山武

*³立命館大学理工学部マイクロ機械システム工学科

*¹School of Information Science, Japan Advanced Institute of Science and Technology

*²Yamatake Corporation

*³Department of Micro System Technology, Faculty of Science and Engineering, Ritsumeikan University

■ 本論文は学術性で評価されました.

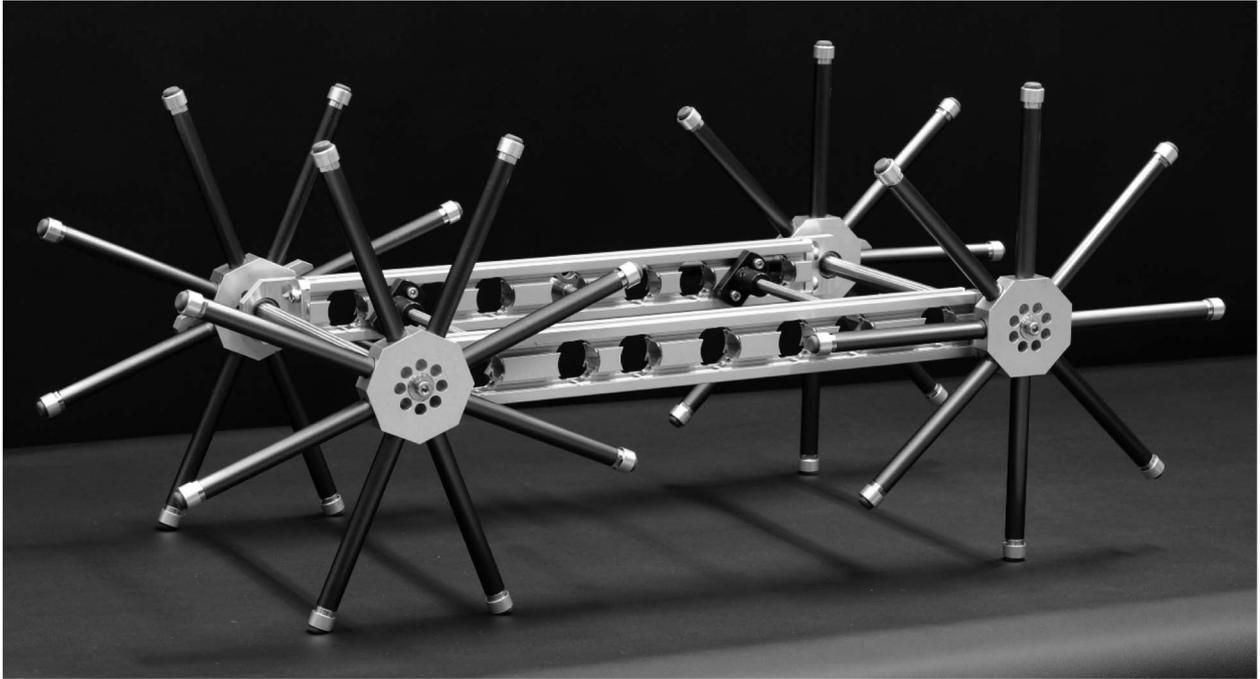


Fig. 1 Overview of experimental combined rimless wheel

を示す。また、Fig. 1の試作実験器を用いて、数値的に得られた結果の妥当性を検証する。さらには、位相差の調節による歩行速度の向上の要因を、ポテンシャル・バリア (Potential barrier; 以下PBと略記) の観点から考察する。

本論文は次の構成からなる。まず第2章でCRWの数学モデルについてまとめ、位相差によらず安定な受動歩行運動が生成可能であることを数値シミュレーションにより確認する。第3章では歩行速度を性能指標として、前後のRW間の位相差に伴うその変化を解析する。第4章では実験結果についてまとめる。第5章では、位相差の効果をPBの観点から考察する。最後に第6章で本論文をまとめ、今後の研究の方向性について述べる。

2. 連結型 Rimless Wheel のモデリングと受動歩行

2.1 運動方程式

CRWの数学モデルをFig. 2に示す。進行方向に対し後方のRWをRW1、前方のそれをRW2と呼ぶことにする。また簡単のため、各RWの床面に接している脚フレームを「支持脚」、前後のRWを連結するフレームを「胴体部」と呼ぶことにする。RW j ($j = 1, 2$)の隣り合う脚フレーム間の相対角度を $2\alpha_j$ [deg]とし、これを簡単に「股角度」と呼ぶことにする。本モデルは8脚のRWを連結したものであるため、 $\alpha_1 = \alpha_2 = 22.5$ [deg]である。このモデルの力学方程式を以下に導出する。

RW1, RW2 および胴体部の一般化座標ベクトルをそれぞれ

$$\mathbf{q}_1 = \begin{bmatrix} x_1 \\ z_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{q}_2 = \begin{bmatrix} x_2 \\ z_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{q}_3 = \begin{bmatrix} x_3 \\ z_3 \\ \theta_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

とする。ただし、 (x_j, z_j) ($j = 1, 2$) はRW j の支持脚端点位

置座標、 (x_3, z_3) は胴体部の重心位置座標、 θ_j ($j = 1, 2, 3$)は各リンクの絶対角度 (θ_3 は水平方向に対する角度) である。系全体の一般化座標ベクトルを $\mathbf{q}^T := [\mathbf{q}_1^T \quad \mathbf{q}_2^T \quad \mathbf{q}_3^T]$ とおくと、立脚期の運動方程式は次式で表される。

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = -\mathbf{J}(\mathbf{q})^T \boldsymbol{\lambda} \quad (2)$$

ただし、右辺は各リンクを結合するためのホロノミック拘束力ベクトルである (詳細は後述する)。左辺の詳細は以下のとおりである。

$$\mathbf{M}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_1(\mathbf{q}_1) & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{M}_2(\mathbf{q}_2) & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{M}_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_1(\mathbf{q}_1, \dot{\mathbf{q}}_1) \\ \mathbf{h}_2(\mathbf{q}_2, \dot{\mathbf{q}}_2) \\ \mathbf{h}_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$\mathbf{M}_1(\mathbf{q}_1)$, $\mathbf{M}_2(\mathbf{q}_2)$, $\mathbf{M}_3(\mathbf{q}_3)$ は各質点の慣性行列であり、 $\mathbf{h}_1(\mathbf{q}_1, \dot{\mathbf{q}}_1)$, $\mathbf{h}_2(\mathbf{q}_2, \dot{\mathbf{q}}_2)$, \mathbf{h}_3 は各質点のコリオリ力・中心力項に重力項を加えたベクトルである。詳細は以下のとおりである。

$$\mathbf{M}_1(\mathbf{q}_1) = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & m_1 l_1 C_1 \\ 0 & m_1 & -m_1 l_1 S_1 \\ m_1 l_1 C_1 & -m_1 l_1 S_1 & m_1 l_1^2 + I_1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{M}_2(\mathbf{q}_2) = \begin{bmatrix} m_2 & 0 & m_2 l_2 C_2 \\ 0 & m_2 & -m_2 l_2 S_2 \\ m_2 l_2 C_2 & -m_2 l_2 S_2 & m_2 l_2^2 + I_2 \end{bmatrix}$$

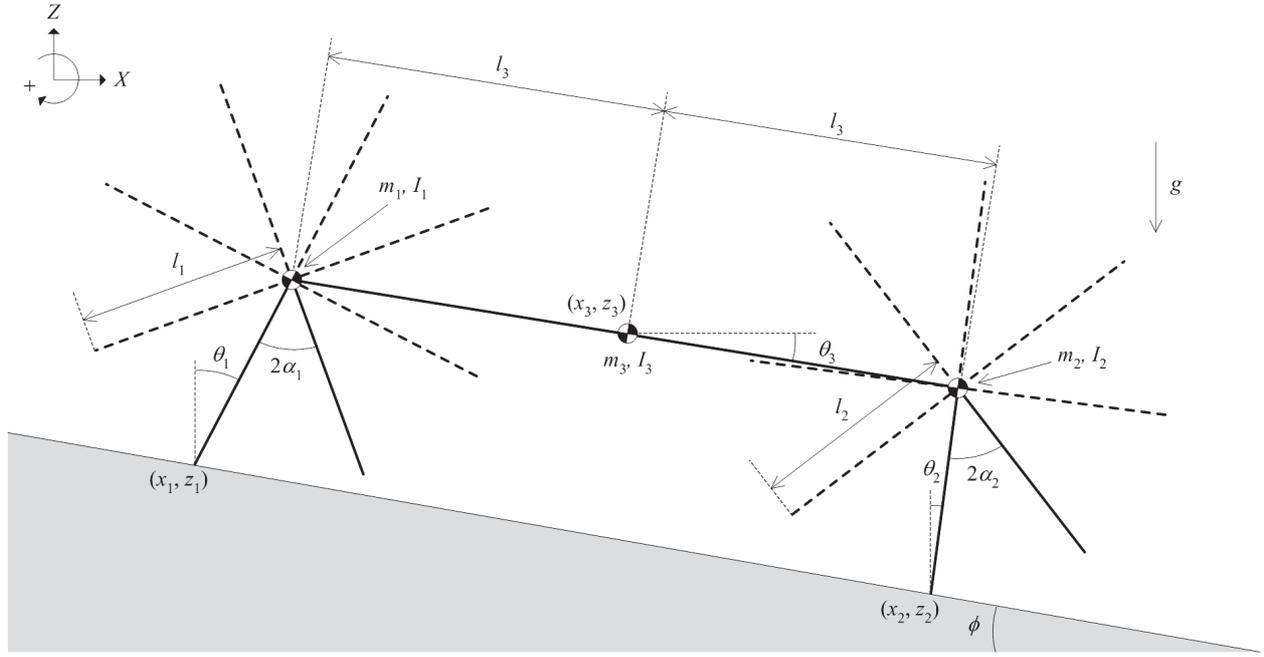


Fig. 2 Model of combined rimless wheel

$$\begin{aligned}
 \mathbf{M}_3 &= \begin{bmatrix} m_3 & 0 & 0 \\ 0 & m_3 & 0 \\ 0 & 0 & I_3 \end{bmatrix} \\
 \mathbf{h}_1(\mathbf{q}_1, \dot{\mathbf{q}}_1) &= \begin{bmatrix} -m_1 \dot{\theta}_1^2 l_1 S_1 \\ -m_1 \dot{\theta}_1^2 l_1 C_1 + m_1 g \\ -m_1 g l_1 S_1 \end{bmatrix} \\
 \mathbf{h}_2(\mathbf{q}_2, \dot{\mathbf{q}}_2) &= \begin{bmatrix} -m_2 \dot{\theta}_2^2 l_2 S_2 \\ -m_2 \dot{\theta}_2^2 l_2 C_2 + m_2 g \\ -m_2 g l_2 S_2 \end{bmatrix} \\
 \mathbf{h}_3 &= \begin{bmatrix} 0 \\ m_3 g \\ 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

ただし、 m_j [kg] と I_j [kg·m²] は各リンクの質量と重心回りの慣性モーメントである。また、 $C_j := \cos \theta_j$ 、 $S_j := \sin \theta_j$ と略記した。

次に右辺の詳細を述べる。ホロノミック拘束の速度拘束条件式は次式のようにまとめられる。

$$\mathbf{J}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{0}_{8 \times 1} \quad (5)$$

このヤコビアン $\mathbf{J}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{8 \times 9}$ は

- 支持脚と地面との接点は滑らない。
 - (x_1, z_1) の関数として記述される後方の歩行器の腰位置は、 (x_3, z_3) の関数として記述される胴体部の先端位置と等しい。
 - (x_2, z_2) の関数として記述される前方の歩行器の腰位置は、 (x_3, z_3) の関数として記述される胴体部の先端位置と等しい。
- という幾何学的条件から次のように定まる。

$$\mathbf{J}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & l_1 C_1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -l_3 S_3 \\ 0 & 1 & -l_1 S_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -l_3 C_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & l_2 C_2 & -1 & 0 & l_3 S_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -l_2 S_2 & 0 & -1 & l_3 C_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

第1・2行はRW1の支持脚と床面との拘束を、第3・4行はRW2の支持脚と床面との拘束をそれぞれを表す。また、第5・6行はRW1と胴体部の拘束を、第7・8行はRW2と胴体部の拘束をそれぞれ表す。

2.2 PD フィードバックによる誤差の修正

幾何学的条件によって一意に定まる支持脚接地点の位置座標を (\bar{x}_1, \bar{z}_1) 、 (\bar{x}_2, \bar{z}_2) とするとき、次の等式

$$\boldsymbol{\xi} := \begin{bmatrix} x_1 - \bar{x}_1 \\ z_1 - \bar{z}_1 \\ x_2 - \bar{x}_2 \\ z_2 - \bar{z}_2 \\ x_1 + l_1 S_1 - x_3 + l_3 C_3 \\ z_1 + l_1 C_1 - z_3 - l_3 S_3 \\ x_2 + l_2 S_2 - x_3 - l_3 C_3 \\ z_2 + l_2 C_2 - z_3 + l_3 S_3 \end{bmatrix} = \mathbf{0}_{8 \times 1} \quad (7)$$

が成り立つ。速度拘束条件式 (5) は、これを時間微分したものである。しかし微分方程式を解く際、数値積分間隔に起因する衝突検知のわずかな遅れ等の数値誤差により、衝突時に胴体部と歩行器の間にごく小さい位置のズレが発生することがある。これが長時間の歩行解析に支障をきたすため、式 (7) に示した誤差ベクトル $\boldsymbol{\xi}$ に、以下に述べるPDフィードバックを適用す

ることでその誤差を修正した。

まず、 ξ の時間微分は前述のように次の関係式

$$\dot{\xi} = \mathbf{J}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{0}_{8 \times 1} \quad (8)$$

を満たすので、これをさらに時間微分すると

$$\ddot{\xi} = \mathbf{J}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \dot{\mathbf{J}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} \quad (9)$$

を得る。これより、 ξ が二次の減衰振動系

$$\ddot{\xi} + \mathbf{K}_D \dot{\xi} + \mathbf{K}_P \xi = \mathbf{0}_{8 \times 1} \quad (10)$$

となるように制御入力を決定すればよい。ただし、 $\mathbf{K}_P = 2,500\mathbf{I}_8$ 、 $\mathbf{K}_D = 100\mathbf{I}_8$ は PD ゲイン行列である。以上の設定により、未定乗数ベクトル $\lambda \in \mathbb{R}^8$ が次式のように求まる。

$$\lambda = \mathbf{X}(\mathbf{q})^{-1} \left(\dot{\mathbf{J}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} - \mathbf{J}(\mathbf{q})\mathbf{M}(\mathbf{q})^{-1}\mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{K}_D \dot{\xi} + \mathbf{K}_P \xi \right) \quad (11)$$

$$\mathbf{X}(\mathbf{q}) := \mathbf{J}(\mathbf{q})\mathbf{M}(\mathbf{q})^{-1}\mathbf{J}(\mathbf{q})^T \quad (12)$$

2.3 衝突方程式

速度の更新則から述べる。各 RW の支持脚交換の衝突には、以下の非弾性衝突モデルを用いる。

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}^+ = \mathbf{M}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}^- - \mathbf{J}_I(\mathbf{q})^T \lambda_I \quad (13)$$

$$\mathbf{J}_I(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}^+ = \mathbf{0}_{8 \times 1} \quad (14)$$

ここで、 $\dot{\mathbf{q}}^-$ は衝突直前の速度ベクトルを、 $\dot{\mathbf{q}}^+$ は衝突直後のそれを表す。この式中では位置の更新については考えないので、位置ベクトルに関しては $\mathbf{q} = \mathbf{q}^+ = \mathbf{q}^-$ である。また、 $\mathbf{J}_I(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{8 \times 9}$ は衝突時の速度拘束から導かれるヤコビアンであり、RW1 が衝突した場合、RW2 が衝突した場合、両 RW が同時に衝突した場合の三とおりに対して個別に決定されるものである。RW1 が衝突した場合は式 (6) における第 1・2 行が

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & l_1 C_1 - l_1 \cos(2\alpha_1 - \theta_1) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -l_1 S_1 - l_1 \sin(2\alpha_1 - \theta_1) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

に置き換えられる。RW2 が衝突した場合は第 3・4 行めが

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & l_2 C_2 - l_2 \cos(2\alpha_2 - \theta_2) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -l_2 S_2 - l_2 \sin(2\alpha_2 - \theta_2) & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

に置き換えられる。二つの RW が同時に衝突した場合は、上記の二つが同時に置き換えられる。また、式 (13) の $\lambda_I \in \mathbb{R}^8$ も同様に、各衝突に対応して決定される。

次に位置の更新則であるが、同時衝突の場合の \mathbf{q}^+ の各成分を以下に示す。

$$x_1^+ = x_1^- + l_1 \sin(\alpha_1 + \phi) + l_1 \sin(\alpha_1 - \phi) \quad (17)$$

$$z_1^+ = z_1^- + l_1 \cos(\alpha_1 + \phi) - l_1 \cos(\alpha_1 - \phi) \quad (18)$$

$$\theta_1^+ = -\alpha_1 + \phi \quad (19)$$

Table 1 Physical parameters for combined rimless wheel model

m_1	1.0	kg	α_1	22.5	deg
m_2	1.0	kg	α_2	22.5	deg
m_3	1.0	kg	I_1	1.0×10^{-4}	kg·m ²
l_1	1.0	m	I_2	1.0×10^{-4}	kg·m ²
l_2	1.0	m	I_3	1.0×10^{-4}	kg·m ²
l_3	1.0	m			

$$x_2^+ = x_2^- + l_2 \sin(\alpha_2 + \phi) + l_2 \sin(\alpha_2 - \phi) \quad (20)$$

$$z_2^+ = z_2^- + l_2 \cos(\alpha_2 + \phi) - l_2 \cos(\alpha_2 - \phi) \quad (21)$$

$$\theta_2^+ = -\alpha_2 + \phi \quad (22)$$

$$x_3^+ = x_3^- \quad (23)$$

$$z_3^+ = z_3^- \quad (24)$$

$$\theta_3^+ = \theta_3^- \quad (25)$$

胴体部の位置座標はいずれの衝突においても直前のそれと変わらないので、式 (23) (24) (25) のように値が引き継がれる。RW1 のみの衝突では式 (20) (21) (22) が胴体部と同じく衝突直前の値を引き継ぐ式に、RW2 のみの衝突では式 (17) (18) (19) が直前の値を引き継ぐ式にそれぞれ変更される。

2.4 定常歩容生成

次に、上記の数学モデルを用いた数値シミュレーションを行い、基礎的な受動歩行運動を観察する。ただし、CRW の物理パラメータは **Table 1** のように設定した。また、傾斜角度を 5.0 [deg] とした。なお、位相差の厳密な定義については次章にて行う。

2.4.1 位相差がゼロの場合

RW1 と RW2 を同一の初期状態から歩行を開始させた場合の数値シミュレーション結果を **Fig. 3** に示す。ただし、歩容が完全に収束した 97~100 [s] の軌道をプロットした。結果 (a)(b) より、両 RW の支持脚角度の軌道が完全に一致しており、系全体が RW 単体と等価な運動をしていることが分かる。また、(c) より胴体角度 θ_3 が常に斜面角度に等しい挙動を示していることも分かる。両 RW が完全に同期する場合には、これらと胴体部と床面とで常に平行四辺形を描きながら運動を行うということである。

2.4.2 位相差を持つ場合

次に RW1 と RW2 を異なる角度から歩行を開始させた（位相差を持つ）場合の数値シミュレーションを行う。なお、この場合は各リンクの初速度の決定が困難であるため、本論文では以下の手順で数値シミュレーションを実行した。

- (1) RW1 の衝突判定に用いる股角度の半角を $\alpha_1 = 22.50$ [deg] に、RW2 のそれを $0 < \alpha_2 < 22.50$ [deg] に設定する。
- (2) すべてのリンクの角速度をゼロ（静止状態）、両 RW の角度を $0 < \theta_1 = \theta_2 \leq \phi$ [deg] とする。このとき胴体部の角度 θ_3 は必ず ϕ [deg] となり、CRW と床面とで平行四辺形が形成される。この設定により、CRW は $\theta_1 = \theta_2$ なる関係を保ちながら静止状態から緩やかに前方への倒れ込みを開始する。
- (3) $\alpha_2 < \alpha_1$ の設定により、RW2 が最初に衝突する。
- (4) (3) の衝突直後の状態量を初期状態（衝突直後の意味では

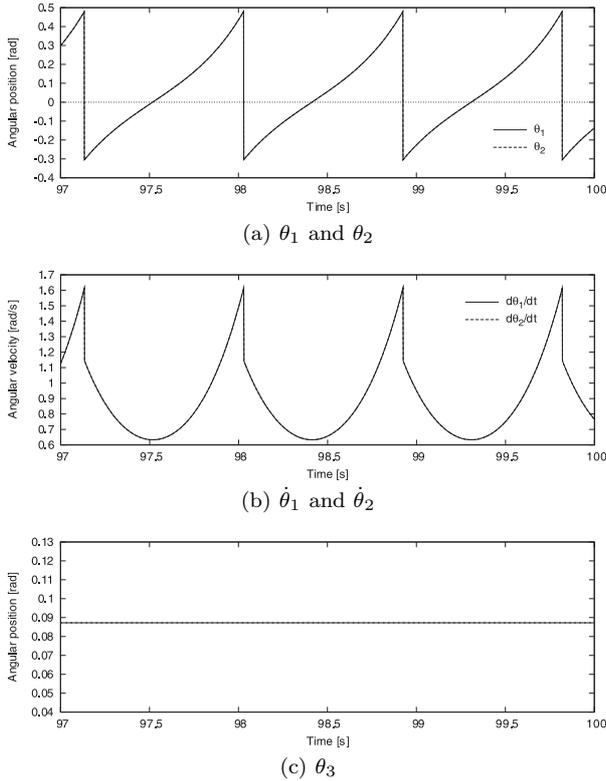


Fig. 3 Simulation results of passive dynamic walking where phase difference is 0 [rad]

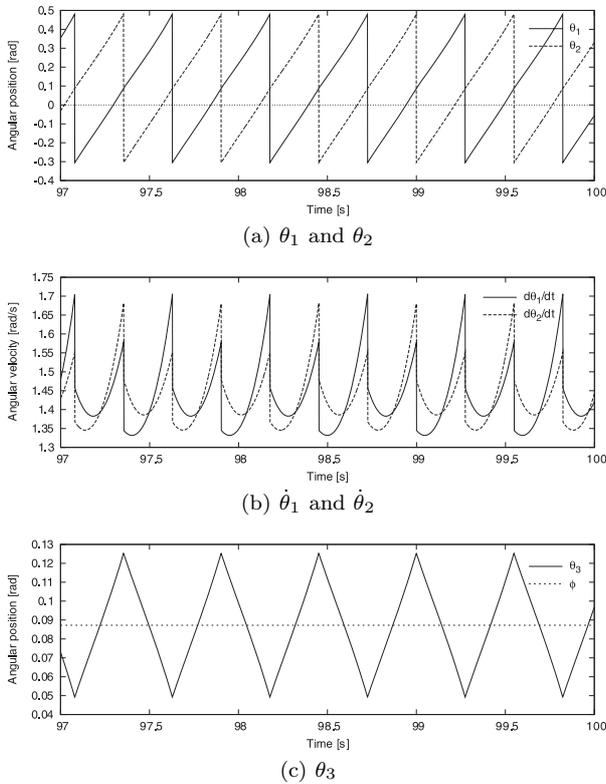


Fig. 4 Simulation results of passive dynamic walking where phase difference is 22.52 [deg]

ないことに注意)として時刻をリセット, α_2 を 22.50 [deg] に設定し直して数値積分を再スタートさせる.

(5) (1)に戻り, α_2 を変化させて同様の手順を繰り返す. 上記の手順により, 位相差を精密に 22.50 [deg] とすることが不可能となっている. この理由から, 以降の数値解析では位相差が 22.50 [deg] に最も近い 22.52 [deg] の結果を示すこととする.

Fig. 4 に位相差が 22.52 [deg] の定常歩容を示す. この場合も定常歩容に収束した 97 [s] からの 3 秒間の軌道をプロットした. (b) の角速度を見ると, いずれかの RW が衝突する瞬間に, もう一方の RW の角速度も不連続に減少しており, 互いに影響を及ぼし合いながら歩行していることを確認できる. また, Fig. 3 (b) と比較すると, その値域が高い範囲にあることが分かる. これは位相差がゼロの場合よりも高速化していることを意味するものであるが, その理由を次章以降に深く考察していく.

3. 前後脚間の位相差の調節による高速化

本章では, 前後の RW 間の位相差が歩行速度に与える影響を数値シミュレーションを通して解析する.

3.1 位相差の定義

位相差が歩行速度に与える影響を調べるために, まず位相差を「RW1 が衝突姿勢にある状態から次に RW2 が衝突姿勢となるまでに両者が回転する角度」と定義する. Fig. 2 の CRW において RW1 が衝突した場合, その位相差 $\Delta\theta$ [deg] は

$$\Delta\theta = \alpha + \phi - \theta_2 \quad (26)$$

と表すことができる. ただし同一の RW であるので $\alpha = \alpha_1 = \alpha_2$ であり, この場合の θ_2 は RW1 の衝突時の RW2 の支持脚角度とする.

3.2 位相差に伴う歩行速度の変化

RW2 が衝突してから RW1 が衝突するまでの時間を T_1 [s], RW1 が衝突してから RW2 が衝突するまでの時間を T_2 [s] とおくと, システム全体としては $T_1 + T_2$ [s] の 1 周期歩行をしていると捉えることができる (これを 1 サイクルと呼ぶこととする). このとき, 1 サイクルの平均移動速度 v [m/s] は以下の式で表される.

$$v = \frac{\Delta X_g}{T_1 + T_2}, \quad \Delta X_g = 2l \sin \alpha \quad (27)$$

ΔX_g [m] は 1 サイクル分の全重心の斜面方向の移動距離であるが, これが位相差の有無によらず上記の値で一定となることは, Fig. 5 に示す幾何学的関係から直ちに理解できよう.

両 RW の初期角度を調整し, 衝突時の位相差 $\Delta\theta$ を 0 [deg] から $2\alpha = 45$ [deg] まで変化させると, その平均移動速度 v は Fig. 6 のように変化した. なお, “■” は位相差ゼロかつ二つの RW が同時に衝突した場合 (これを同時衝突と呼ぶ), “□” は位相差ゼロで RW1 が衝突した直後に RW2 が衝突した場合, “○” は位相差ゼロで RW2 が衝突した直後に RW1 が衝突した場合, “●” はそれ以外の場合である. 以下の特徴が見られた. (A) 位相差が 0 [deg] のとき, つまり両 RW の運動が完全に同期しながら運動するとき, 移動速度は最小となる.

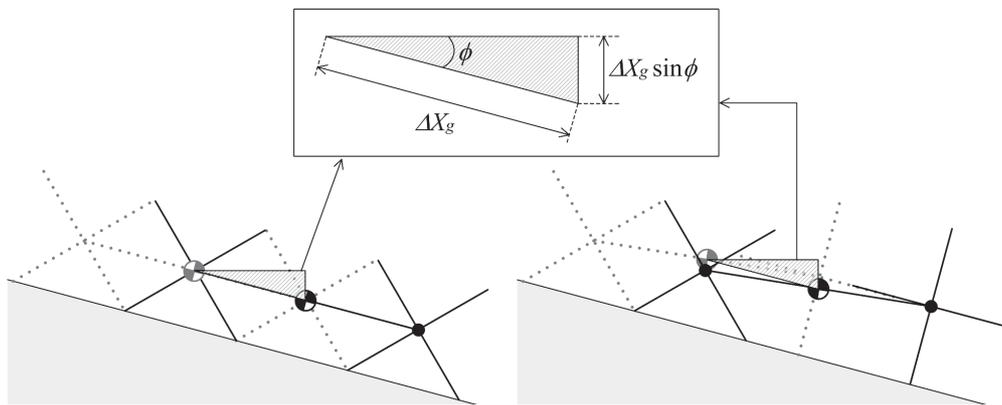


Fig. 5 Equivalence of restored mechanical energy by gravity effect per cycle

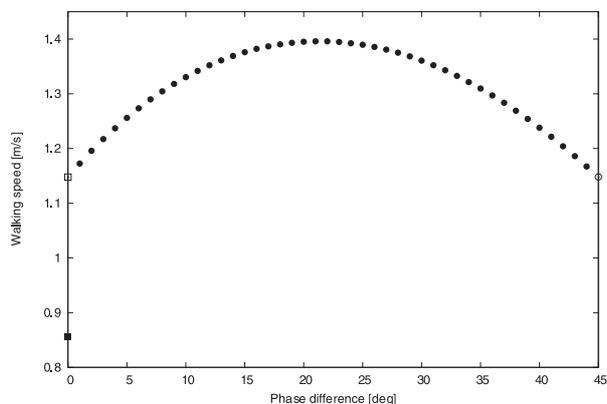


Fig. 6 Walking speed versus phase difference

- (B) 位相差が 22.5 [deg] (股関節の半角) 付近において、移動速度は最大となる。ただし、最大移動速度は厳密には 22.5 [deg] の位置になく、1 [deg] ほどずれた 21.54 [deg] のときに観測された。($\Delta\theta = 22.52:1.3956$ [m/s], $\Delta\theta = 21.54:1.3960$ [m/s])
- (C) 位相差が完全に 0 [deg] である場合とわずかにでも位相差が存在する場合との間にはギャップが存在する (歩行速度が連続的に変化しない)。

CRW の前後対称性から、歩行速度の極値が位相差が α [deg] 付近に現れるという (B) の結果は自然なものと言えよう。このときの位相差が正確に α [deg] に一致しない理由は、傾斜角度が影響しているものと考えられる。単純な駆動力 (インパルス力など) により平地歩行を行う場合などは、位相差が正確に最大となるときに極値が現れるのではないかと筆者らは予想している。

(C) の結果は、両 RW の同時衝突におけるヤコビアン $J_I(\mathbf{q})$ と、2 回の連続的な RW 単体の衝突 (これを連続衝突と呼ぶ) におけるそれとが異なることに起因しているものと考えられる。その数理的考察を以下に行う。

3.3 同時衝突と連続衝突の差異について

連続衝突直後の速度ベクトルを以下の手順に従って導出する。

- (1) 位相差ゼロの衝突直前の状態を設定する。すなわち、両 RW の角度を $\theta_1^- = \theta_2^- = \alpha + \phi$ 、角速度を $\dot{\theta}_1^- = \dot{\theta}_2^- > 0$ 、胴

体部の角度を $\theta_3^- = \phi$ 、角速度を 0 とする。

- (2) RW1 のみが衝突したとして、その衝突直後の速度ベクトル $\dot{\mathbf{q}}^+$ を求める。また、この瞬間の位置ベクトルを \mathbf{q}^+ とする。
- (3) \mathbf{q}^+ 中の θ_1^+ を $-\alpha + \phi$ に、 $\dot{\mathbf{q}}^+$ 中の \dot{x}_1^+ と \dot{z}_1^+ をゼロにリセットする。
- (4) RW2 のみが衝突したとして、その衝突直後の速度ベクトル $\dot{\mathbf{q}}^+$ を \mathbf{q}^+ 、 $\dot{\mathbf{q}}^+$ から求める。
- これより、次の計算結果を得る。

$$\dot{\theta}_1^+ = \dot{\theta}_2^+ = \frac{(4I + 2Ml^2 \cos^2 \alpha)}{2(2I + Ml^2)F} \dot{\theta}_1^- \quad (28)$$

$$F := 4(I + ml^2) + 2I_3 \sin^2 \alpha + 2m_3 l^2 \cos^2 \alpha > 0$$

また、 $\dot{\theta}_3^+ = 0$ となる。ただし、 $l_1 = l_2 = l_3 = l$ 、 $I_1 = I_2 = I$ とした。この結果は、RW2 が先に衝突した場合のそれに一致することを付記しておく。一方、同時衝突の場合は

$$\dot{\theta}_1^+ = \dot{\theta}_2^+ = \frac{2I + Ml^2 \cos^2 \alpha}{2I + Ml^2} \dot{\theta}_1^- \quad (29)$$

かつ $\dot{\theta}_3^+ = 0$ となる。本論文では慣性モーメント I 、 I_3 が十分に小さいと仮定しているが、さらに $I \rightarrow 0$ 、 $I_3 \rightarrow 0$ として式 (28) から式 (29) を引くと

$$\frac{(2m \sin^2 \alpha + m_3 \cos^2 \alpha) \sin^2 \alpha}{2m + m_3 \cos^2 \alpha} \dot{\theta}_1^- > 0 \quad (30)$$

を得る。これより、慣性モーメントが十分に小さい場合には、物理パラメータによらず同時衝突の方が減速される (多くの運動エネルギーを損失する) ことが分かる。

4. 実験的検証

4.1 実験器の仕様

本章では Fig. 1 の実験器を用いた検証結果を報告する。実験器の物理パラメータは Table 2 に示したとおりである。ただし、質量と慣性モーメントは実測値ではなく、CAD データから算出したものである。

開発当初は Fig. 7 (a) に示すウレタン製の脚先パーツを取り付けていたが、脚先が床面と衝突する際に跳ねてしまい、歩行開始時に設定した位相差がズレるという問題が生じた。そこで、衝撃緩和をはかるため Fig. 7 (b) に示すジェル状のパーツへと

Table 2 Physical parameters of experimental combined rimless wheel

m_1	0.8	kg	α_1	22.5	deg
m_2	0.8	kg	α_2	22.5	deg
m_3	1.3	kg	I_1	1.3×10^{-2}	$\text{kg}\cdot\text{m}^2$
l_1	0.149	m	I_2	1.3×10^{-2}	$\text{kg}\cdot\text{m}^2$
l_2	0.149	m	I_3	2.7×10^{-2}	$\text{kg}\cdot\text{m}^2$
l_3	0.200	m			

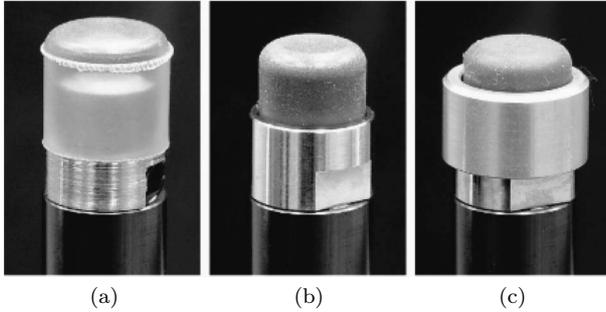


Fig. 7 Foot parts for shock absorbing

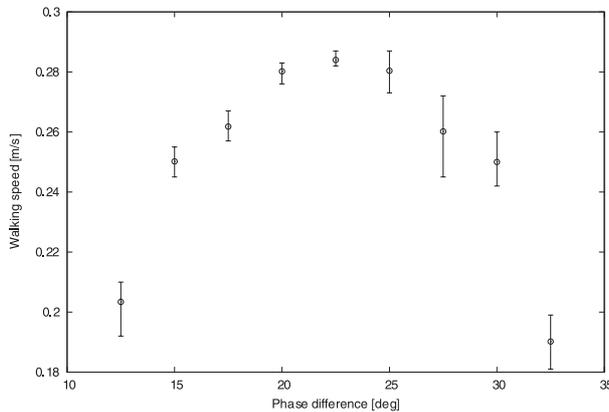


Fig. 8 Experimental result of walking speed versus phase difference

変更したが、この場合は跳ね返りを抑えられるものの、ジェルの過度な変形により位相差のズレを十分に抑制できないという問題が新たに浮上した。そこでさらに、Fig. 7 (c) に示すキャップを製作して接着により取り付けたところ、ズレの傾向が大きく改善された。

4.2 実験結果

トレッドミルの傾斜角は 1.6 [deg] ($= 0.027$ [rad]) とした。傾斜角を急にして高速歩行にすると衝突の際の跳ね返りの影響が大きくなるため、十分に緩やかな斜面とした。このため、位相差が 12.5 [deg] 未満、あるいは 32.5 [deg] より大きい範囲では歩行速度の低下が著しく、安定な歩容生成は不可能となった。歩行が可能な範囲内で以下の手順に従いデータを取得した。

- (1) トレッドミル上で目標の位相差を静止状態で設定し、歩行を開始する。
- (2) CRW の運動が定常歩容に収束したと判断された時点でトレッドミルの送り速度を計測する。
- (3) トレッドミルを停止した際に再度位相差を計測、歩行開始時に設定した目標位相差との誤差が 1 [deg] 以下である場

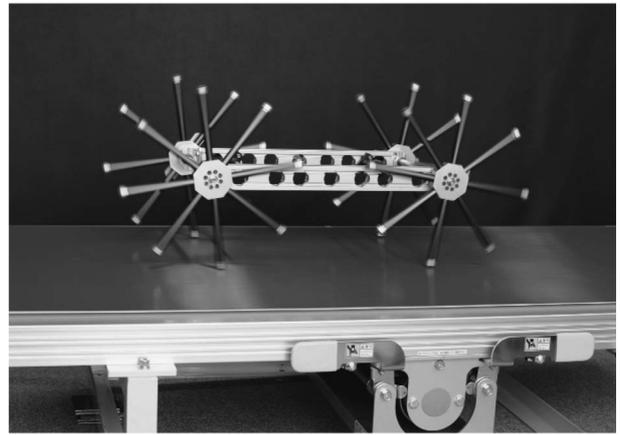


Fig. 9 Snapshot of walking experiment

合を実験成功と判断し、送り速度を保存する。

Fig. 8 に実験結果を、Fig. 9 に歩行実験の様子を示す。データは各位相差につき 5 回分取得した。位相差が 22.5 [deg] に近いほど歩行速度が上昇していることが分かる。これは数値シミュレーションの結果と合致しており、前章までに得られた結果が妥当であることを裏付けるものである。

5. 位相差とポテンシャル・バリアの関係について

リミットサイクル型歩行において、重心の効果的な推進を妨げる最大の要因は、立脚中期に現れる PB の存在である。筆者のうちの一人は、衝突姿勢を前後非対称化するよう脚伸縮制御を行うことで、PB の確実な突破を保証すると同時に、非常に高速な平地歩行が実現可能であることを示した [9]。

前章までに得られた歩行速度の向上の理由も、同じく PB の挙動の変化によるものであると考えられる。位相差がゼロの場合、衝突直後からの次の衝突までの全重心位置の軌道は Fig. 10 左のようになり、2 の姿勢で PB に到達する。これは RW 単体の重心位置の軌道に等しい。これに対して、位相差がある場合は Fig. 10 右のようになる。位相差を与えることで、衝突から次の衝突までの全重心位置の移動距離が短くなること、同時にその上下運動が抑制され、よりフラットな軌道となることが分かる。Fig. 11 は全重心位置の軌道の数値シミュレーション結果を比較してプロットしたものである。上述の差異が顕著に現れている。

この幾何学的性質を、より詳しく解析しよう。床面も一つのリンクと見なせば、系は平面四節リンク機構と考えることができる。RW1 の接地点を原点 $(x_1, z_1) = (0, 0)$ として Fig. 12 のように座標系を設定すると、RW1 と胴体部のジョイント位置は $(\bar{x}_1, \bar{z}_1) = (lS_1, lC_1)$ であり、RW2 と胴体部のそれ (\bar{x}_2, \bar{z}_2) は次の二つの円

$$\begin{aligned} (x - \bar{x}_1)^2 + (z - \bar{z}_1)^2 &= 4l^2 \\ (x - x_2)^2 + z^2 &= l^2 \end{aligned}$$

の交点のうち、 $z > 0$ であるものとして求まる。 $l = 1.0$ を代入して整理すると、 θ_1 の関数として以下のように導出される。

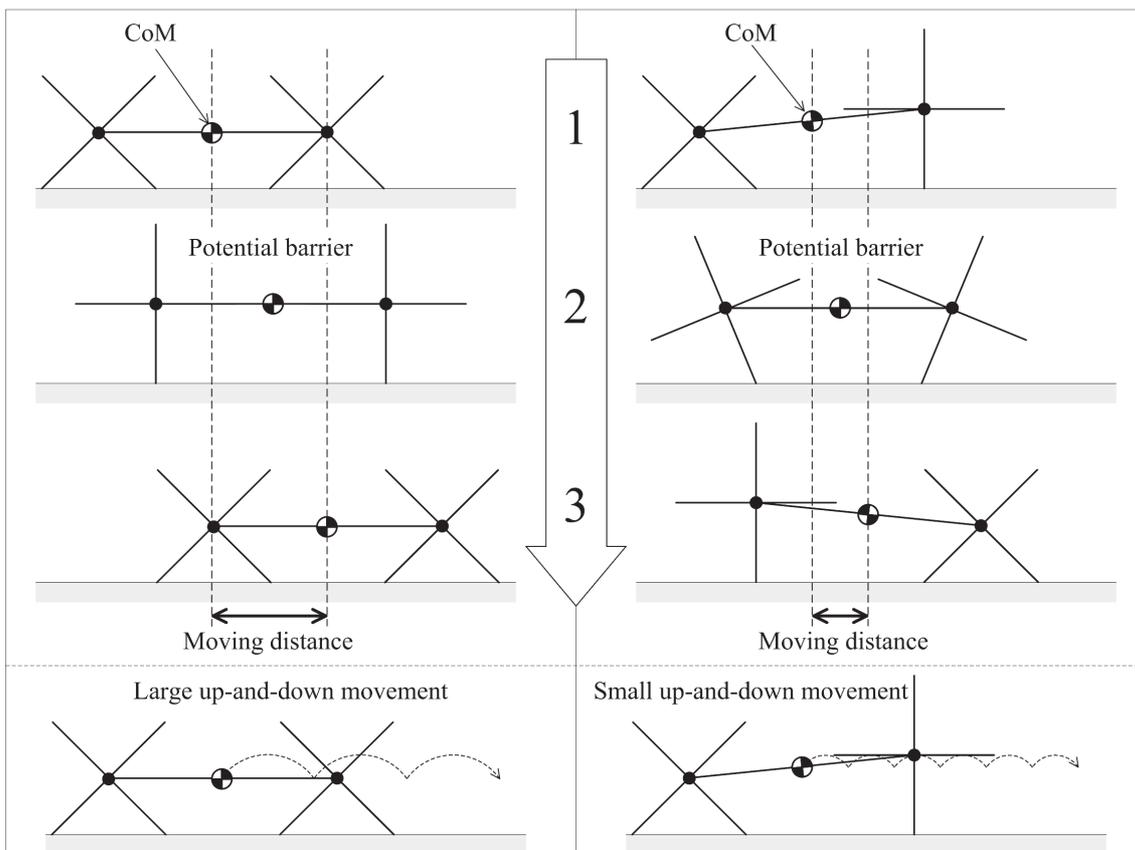
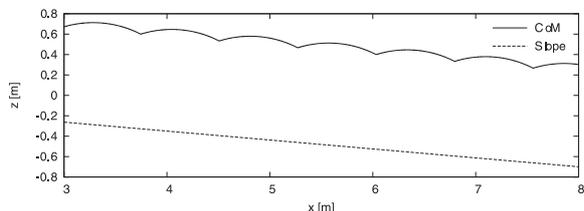
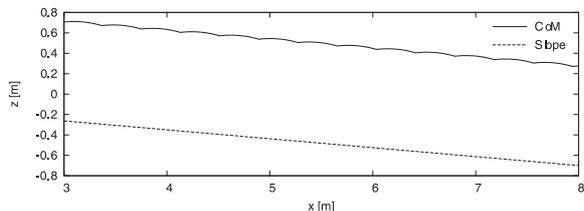


Fig. 10 Different movements of whole center of mass according to phase differences



(a) Where phase difference is 0 [deg]



(b) Where phase difference is 22.52 [deg]

Fig. 11 Trajectories of whole center of mass for two values of phase difference

$$\bar{x}_2 = \frac{3x_2 + x_2^3 + x_2 \cos(2\theta_1) - (2 + x_2^2)S_1 + \sqrt{G}}{2(x_2^2 + 1 - 2x_2S_1)}$$

$$\bar{z}_2 = \frac{(x_2^2 - 2 - 2x_2S_1)C_1 + (x_2 \sec \theta_1 - \tan \theta_1)\sqrt{G}}{2(x_2^2 + 1 - 2x_2S_1)}$$

$$G := x_2C_1^2(x_2(6 - x_2^2 + 2\cos(2\theta_1)) + 4(x_2^2 - 4)S_1)$$

以上より、重心座標が $x_3 = (\bar{x}_1 + \bar{x}_2)/2$, $z_3 = (\bar{z}_1 + \bar{z}_2)/2$ と

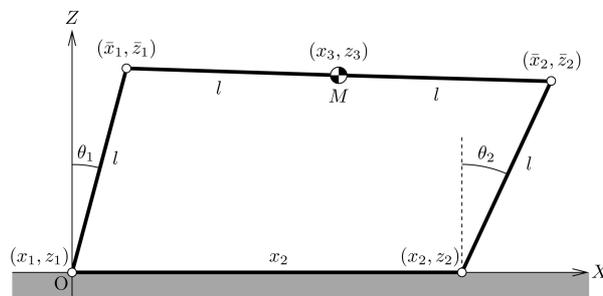


Fig. 12 Planar four-bar linkage and its coordinate

して求める。

Fig. 13 は $X-Z$ 平面における重心の軌道を四とおりの位相差についてプロットしたものである。位相差がゼロの場合は Z 方向の移動距離が最大になっていること、22.5 [deg] の場合は大幅にこの距離が抑制されていることが分かる。なお、位相差ゼロの曲線は、単体 RW の重心が描く円軌道に等価である。これ以外の場合は、上に凸な曲線軌道を 1 サイクル中に 2 回描くが、この軌道はいずれも Z 軸に平行な対称軸を持つものである。したがって、最下点から PB 到達までに必要な X 方向の移動距離は、位相差により細分化・短縮されるが、1 サイクル当たりの平均値は一定となる。これに対して、 Z 方向のそれを位相差に対してプロットしたものが Fig. 14 である。位相差 22.5 [deg] を対称軸として下に凸な曲線を描いている。以上より、前後脚

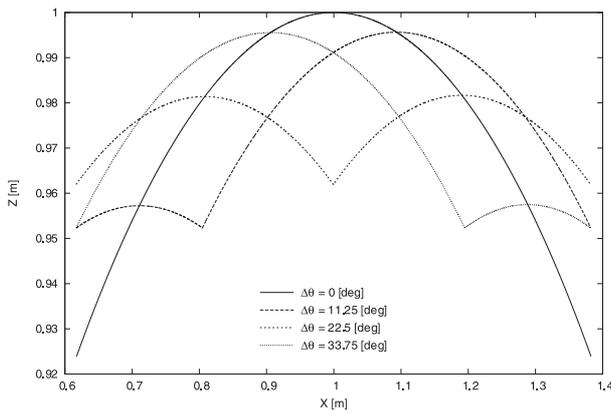


Fig. 13 Trajectories of whole center of mass for four values of phase difference

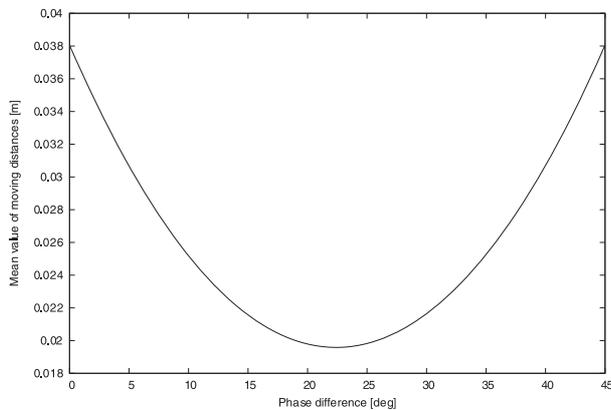


Fig. 14 Mean value of moving distances of whole center of mass in Z-direction with respect to phase difference

間の位相差はPBの突破において、その $X \cdot Z$ 方向の移動距離を調節する機能を持ち、特に股角度の半角となるとき双方を同時に最小化する、とまとめられる。前進に必要な重心移動の負荷が軽減されるという観点から、前章までの高速化にする結果を理解することができる。また、単体RWでは成し得ないPB突破条件の緩和が連結により達成されたという事実の中に、複数台による協調運動の意義を認めることもできる。

6. まとめと今後の課題

本論文では2台の8脚RWからなるCRWの受動歩行の性能解析を行い、前後脚間の位相差が股角度の半角となる付近で

最高速度に到達する特性を数値シミュレーションと実験の両面から示した。また、位相差が1サイクル当たりの重心の上下動距離を調節する働きを持つことも、四節リンク機構の解析を通して明らかにした。

今後の課題として、準受動歩行をはじめとする能動歩行の実現、およびその歩容における位相差の特性解析が挙げられる。最適な位相差は、制御器や作業内容に応じて変化する可能性がある。また、胴体部の関節や遊脚自由度を加えたモデルなども、力学系として興味深い対象である。

重心が1自由度の運動を行う点で単体RWとCRWは共通性を持つが、CRWは機構設計の段階においてその運動特性を改善する自由度を有していると言える。動力学と機構学の双方からの解析・設計を要するCRWの探求は、新しい受動歩行研究(ダイナミクスと幾何学の融合)の開拓に繋がるものと筆者らは考えている。

謝辞 実験器の設計と製作には、株式会社小野電機製作所にご協力いただきました。ここに記して心からの謝意を表します。

参考文献

- [1] T. McGeer: "Passive dynamic walking," Int. J. of Robotics Research, vol.9, no.2, pp.62-82, 1990.
- [2] 浅野, 羅, 山北: "Rimless Wheelの安定原理に基づくコンパス型2足ロボットの漸近安定歩容生成", 日本ロボット学会誌, vol.26, no.4, pp.351-362, 2008.
- [3] 荒井, 内田, 鈴木, 岡田: "情報収集ロボットのための展開脚車輪の開発", ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, pp.1A2-J02(1)-1A2-J02(2), 2011.
- [4] 石川, 永谷, 砂長, 須藤, 吉田: "スポーク車輪を有する軟弱地盤移動ロボットの構築と走行性能の評価", ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, pp.1A2-K09(1)-1A2-K09(4), 2011.
- [5] A.C. Smith and M.D. Berkemeier: "Passive dynamic quadrupedal walking," Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.34-39, 1997.
- [6] C.D. Remy, K.W. Buffinton and R. Siegwart: "Stability analysis of passive dynamic walking of quadrupeds," Int. J. of Robotics Research, vol.29, no.9, pp.1173-1185, 2010.
- [7] K. Nakatani, Y. Sugimoto and K. Osuka: "Demonstration and analysis of quadrupedal passive dynamic walking," Advanced Robotics, vol.23, no.5, pp.483-501, 2009.
- [8] 狐塚, 杉本, 大須賀: "膝関節を有した四脚受動的動歩行の実現", 第10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講演論文集, 2N1-4, pp.1331-1334, 2009.
- [9] 浅野: "伸縮脚を用いた衝突姿勢の非対称化に基づく高速動的歩容生成", 日本ロボット学会誌, vol.29, no.1, pp.99-110, 2011.
- [10] 井上, 浅野: "連結型コンパス歩行器の受動歩行", 第11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講演論文集, 1K1-4, pp.711-714, 2010.



浅野文彦 (Fumihiko Asano)

2002年東京工業大学大学院理工学研究科制御工学専攻博士後期課程修了。同年理化学研究所バイオ・ミメティックコントロール研究センター環境適応ロボットシステム研究チーム研究員。2008年10月より北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科准教授。現在に至る。博士(工学)。ロボティクス、制御工学の研究に従事。計測自動制御学会、システム制御情報学会、IEEEの会員。
(日本ロボット学会正会員)



田中大樹 (Daiki Tanaka)

2010年崇城大学工学部宇宙航空システム工学科卒業。同年北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科修士課程入学。多脚受動歩行の力学原理と制御応用に関心を持つ。
(日本ロボット学会学生会員)



井上遼祐 (Ryosuke Inoue)

2011年北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科修士課程修了。現在株式会社山武に勤務。在学中は多脚受動歩行の研究を行っていた。
(日本ロボット学会正会員)



徳田 功 (Isao Tokuda)

1994年筑波大学大学院理工学研究科修士課程修了。博士(工学)。2003年より室蘭工業大学工学部情報工学科助教授。2005年より北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科助教授(2007年より准教授に呼称変更)。2011年より立命館大学理工学部マイクロ機械システム工学科准教授。現在に至る。非線形動力学の研究に従事。電子情報通信学会、日本音響学会の会員。