JAIST Repository

https://dspace.jaist.ac.jp/

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
Туре	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	



Japan Advanced Institute of Science and Technology

学術・技術論文

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

原 2011年6月20日

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となるときに歩行速度が最大化されること

^{*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

^{*&}lt;sup>1</sup>School of Information Science, Japan Advanced Institute of Science and Technology

 $^{^{*2}}$ Yamatake Corporation

^{*&}lt;sup>3</sup>Department 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

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

とする. ただし, (x_j, z_j) (j = 1, 2) は RWj 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 $(\theta_3$ 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 $q^{\mathrm{T}} := \begin{bmatrix} q_1^{\mathrm{T}} & q_2^{\mathrm{T}} & q_3^{\mathrm{T}} \end{bmatrix}$ とおく と、立脚期の運動方程式は次式で表される.

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

$$M(q) = \begin{bmatrix} M_1(q_1) & \mathbf{0}_{3\times 3} & \mathbf{0}_{3\times 3} \\ \mathbf{0}_{3\times 3} & M_2(q_2) & \mathbf{0}_{3\times 3} \\ \mathbf{0}_{3\times 3} & \mathbf{0}_{3\times 3} & M_3 \end{bmatrix}$$
(3)
$$h(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} h_1(q_1, \dot{q}_1) \\ h_2(q_2, \dot{q}_2) \\ h_3 \end{bmatrix}$$
(4)

 $M_1(q_1)$, $M_2(q_2)$, $M_3(q_3)$ は各質点の慣性行列であり, $h_1(q_1, \dot{q}_1)$, $h_2(q_2, \dot{q}_2)$, 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.

$$\boldsymbol{M}_{1}(\boldsymbol{q}_{1}) = \begin{bmatrix} m_{1} & 0 & m_{1}l_{1}C_{1} \\ 0 & m_{1} & -m_{1}l_{1}S_{1} \\ m_{1}l_{1}C_{1} & -m_{1}l_{1}S_{1} & m_{1}l_{1}^{2} + I_{1} \end{bmatrix}$$
$$\boldsymbol{M}_{2}(\boldsymbol{q}_{2}) = \begin{bmatrix} m_{2} & 0 & m_{2}l_{2}C_{2} \\ 0 & m_{2} & -m_{2}l_{2}S_{2} \\ m_{2}l_{2}C_{2} & -m_{2}l_{2}S_{2} & m_{2}l_{2}^{2} + I_{2} \end{bmatrix}$$



Fig. 2 Model of combined rimless wheel

$$M_{3} = \begin{bmatrix} m_{3} & 0 & 0 \\ 0 & m_{3} & 0 \\ 0 & 0 & I_{3} \end{bmatrix}$$
$$h_{1}(\boldsymbol{q}_{1}, \dot{\boldsymbol{q}}_{1}) = \begin{bmatrix} -m_{1}\dot{\theta_{1}}^{2}l_{1}S_{1} \\ -m_{1}\dot{\theta_{1}}^{2}l_{1}C_{1} + m_{1}g \\ -m_{1}gl_{1}S_{1} \end{bmatrix}$$
$$h_{2}(\boldsymbol{q}_{2}, \dot{\boldsymbol{q}}_{2}) = \begin{bmatrix} -m_{2}\dot{\theta_{2}}^{2}l_{2}S_{2} \\ -m_{2}\dot{\theta_{2}}^{2}l_{2}C_{2} + m_{2}g \\ -m_{2}gl_{2}S_{2} \end{bmatrix}$$
$$h_{3} = \begin{bmatrix} 0 \\ m_{3}g \\ 0 \end{bmatrix}$$

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.

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

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

- •支持脚と地面との接点は滑らない.
- (x1, z1)の関数として記述される後方の歩行器の腰位置は、 (x3, z3)の関数として記述される胴体部の先端位置と等しい.
- (x2, z2)の関数として記述される前方の歩行器の腰位置は, (x3, z3)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.

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

$$\boldsymbol{\xi} := \begin{bmatrix} x_1 - \bar{x}_1 \\ z_1 - \bar{z}_1 \\ x_2 - \bar{x}_2 \\ z_2 - \bar{z}_2 \\ x_1 + l_1 S_1 - x_3 + l_3 C_3 \\ z_1 + l_1 C_1 - z_3 - l_3 S_3 \\ x_2 + l_2 S_2 - x_3 - l_3 C_3 \\ z_2 + l_2 C_2 - z_3 + l_3 S_3 \end{bmatrix} = \mathbf{0}_{8 \times 1}$$
(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 と歩行器と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 *ξ*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、 & の時間微分は前述のように次の関係式

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

を満たすので、これをさらに時間微分すると

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

を得る. これより, **ξ** が二次の減衰振動系

$$\ddot{\boldsymbol{\xi}} + \boldsymbol{K}_D \dot{\boldsymbol{\xi}} + \boldsymbol{K}_P \boldsymbol{\xi} = \boldsymbol{0}_{8 \times 1} \tag{10}$$

となるように制御入力を決定すればよい.ただし, $K_P = 2,500I_8$, $K_D = 100I_8$ 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.

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

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

$$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{q}}^{+} = \boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{q}}^{-} - \boldsymbol{J}_{I}(\boldsymbol{q})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\lambda}_{I}$$
(13)

$$\boldsymbol{J}_{I}(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{q}}^{+} = \boldsymbol{0}_{8\times 1} \tag{14}$$

ここで、 \dot{q}^- は衝突直前の速度ベクトルを、 \dot{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 $q = q^+ = q^-$ である.また、 $J_I(q) \in \mathbb{R}^{8\times9}$ 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

に置き換えられる. RW2 が衝突した場合は第3・4 行めが

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & l_2C_2 - l_2\cos(2\alpha_2 - \theta_2) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -l_2S_2 - l_2\sin(2\alpha_2 - \theta_2) & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$
(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 q⁺の各成分 を以下に示す.

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

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

$$\theta_1^+ = -\alpha_1 + \phi \tag{19}$$

Table 1 Physical parameters for combined rimless wheel model

m_1	1.0	ka
101	1.0	18
m_2	1.0	kg
m_{2}	1.0	kø
, ,	1.0	1.8
l_1	1.0	m
12	1.0	m
1	1.0	
l_3	1.0	m

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

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

$$\theta_2^+ = -\alpha_2 + \phi \tag{22}$$

$$x_3^+ = x_3^- \tag{23}$$

$$z_3^+ = z_3^- \tag{24}$$

$$\theta_3^+ = \theta_3^- \tag{25}$$

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.

- RW1の衝突判定に用いる股角度の半角を α₁ = 22.50 [deg]
 に, RW2 のそれを 0 < α₂ < 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 $0 < \theta_1 = \theta_2 \le \phi[\deg]$ とする.このとき胴体部の角 度 θ_3 は必ず $\phi[\deg]$ 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 $\dot{\theta}_1 = \dot{\theta}_2$ 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) *α*₂ < *α*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, α₂ 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, α2 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

$$\Delta \theta = \alpha + \phi - \theta_2 \tag{26}$$

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.

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

 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 $\Delta \theta \ge 0$ [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, "〇"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. (Δθ = 22.52:1.3956 [m/s], Δθ = 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 $J_I(q)$ 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 *q*[†] を求める.また、この瞬間の位置ベクトルを *q*[†] とする.
- (3) \boldsymbol{q}^{\dagger} の中の θ_{1}^{\dagger} を $-\alpha + \phi$ に, $\dot{\boldsymbol{q}}^{\dagger}$ の中の \dot{x}_{1}^{\dagger} と \dot{z}_{1}^{\dagger} 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 *q*⁺ を *q*[†], *q*[†] から求める。
- これより、次の計算結果を得る.

F

$$\dot{\theta}_1^+ = \dot{\theta}_2^+ = \frac{\left(4I + 2Ml^2 \cos^2 \alpha\right)^2}{2(2I + Ml^2)F} \dot{\theta}_1^- \qquad (28)$$
$$:= 4(I + ml^2) + 2I_3 \sin^2 \alpha + 2m_3 l^2 \cos^2 \alpha > 0$$

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

$$\dot{\theta}_1^+ = \dot{\theta}_2^+ = \frac{2I + Ml^2 \cos^2 \alpha}{2I + Ml^2} \dot{\theta}_1^-$$
(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* → 0, *I*₃ → 0 として式 (28)から式 (29)を引くと

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

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	0/1	22.5	der
m_2	0.8	kg	α1	22.5	ueg
m_{2}	1.3	kø	α_2	22.5	deg
1103	0 1 40	8	I_1	1.3×10^{-2}	kg∙m²
ι_1	0.149	m	In	1.3×10^{-2}	kg.m ²
l_2	0.149	m	12	2.7×10^{-2}	1.8 m2
12	0.200	m	13	2.7×10^{-5}	кg∙ш-





 $\label{eq:Fig.8} {\bf Fig.8} \quad {\rm Experimental result of walking speed versus phase difference}$

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動歩行において,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 に高速な平地動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

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

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



(b) Where phase difference is 22.52 [deg]



$$\bar{x}_2 = \frac{3x_2 + x_2^3 + x_2\cos(2\theta_1) - (2 + x_2^2)S_1 + \sqrt{G}}{2(x_2^2 + 1 - 2x_2S_1)}$$
$$\bar{z}_2 = \frac{(x_2^2 - 2 - 2x_2S_1)C_1 + (x_2\sec\theta_1 - \tan\theta_1)\sqrt{G}}{2(x_2^2 + 1 - 2x_2S_1)}$$
$$G := x_2C_1^2\left(x_2(6 - x_2^2 + 2\cos(2\theta_1)) + 4(x_2^2 - 4)S_1\right)$$

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

して求まる.

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・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

- 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.