

Title	揺動質量を持つ連結型リムレスホイールの歩行解析と性能向上の検討
Author(s)	田中, 大樹
Citation	
Issue Date	2012-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/10433
Rights	
Description	Supervisor:浅野 文彦, 情報科学研究科, 修士

修 士 論 文

揺動質量を持つ連結型リムレスホイールの
歩行解析と性能向上の検討

北陸先端科学技術大学院大学
情報科学研究科情報科学専攻

田中 大樹

2012年3月

修士論文

揺動質量を持つ連結型リムレスホイールの 歩行解析と性能向上の検討

指導教官 浅野 文彦 准教授

審査委員主査 浅野 文彦 准教授
審査委員 丁 洛榮 教授
審査委員 松澤 照男 教授

北陸先端科学技術大学院大学
情報科学研究科情報科学専攻

1010041 田中 大樹

提出年月: 2012年2月

概要

本論文では、多脚受動歩行器の1つである連結型リムレスホイールの歩行性能を向上させる手法について検討した。胴体中央部に自由に上下動できる揺動質量を追加することにより、歩行速度が向上することを示した。更に、揺動質量を加えることで歩行可能な領域が増加することを示した。

目次

第1章	序論	1
1.1	研究の背景	1
1.2	研究の目的	2
1.3	本論文の構成	2
第2章	連結型リムレスホイールのモデリング	3
2.1	概要	3
2.2	運動方程式	3
2.3	PD フィードバックによる誤差の修正	6
2.4	衝突方程式	7
第3章	歩行解析	9
3.1	揺動質量を固定する場合	9
3.2	バネによる接続	9
3.3	バネおよびダンパーによる接続	15
3.4	振動数の関係	19
3.5	位相差を与える場合	24
3.6	段差の乗り越え	28
3.7	初期値による影響	36
3.8	ヒステリシス現象	40
第4章	実験的検証	43
4.1	実験器の概要	43
4.2	実験結果	45
第5章	まとめと今後の課題	50
	謝辞	52

第1章 序論

1.1 研究の背景

1990年にMcGeer[1]によって受動歩行が提唱されて以来、現在に至るまで様々な受動歩行に関する研究が世界中で盛んに行われてきた。受動歩行は重力の作用のみで斜面を歩き下るという原理上、非常に効率の良い歩行パターンであり、これまでの受動歩行研究は2脚歩行器についてのものが主であった。しかし、近年では多脚歩行器に関する研究も行われるようになってきた。Smithらは2つの受動歩行器を連結したモデルについて解析を行ったが、そのモデル化には線形化などの近似が多く用いられ、数値解析結果の厳密さには欠けるものであった[2]。またRemyらはコンパス型歩行器を2台連結したものについて解析を行い、2つの歩行器すなわち前後脚が次第にシンクロしていくことを示した[3]。さらに吉兼らは、4脚受動歩行器の胴体リンク部に粘弾性を与えたモデル“Jenka”について解析を行い、胴体要素が歩容に及ぼす影響について検証した[4]。これらの研究に加えて、井上らは2つの同一な8脚リムレスホイール(Rimless wheel; 以下RW)を連結した連結型リムレスホイール(Combined rimless wheel; 以下CRW)について解析と実機による実験的検証を行い、前後の脚の間に適切な位相差を与えることで歩行速度が向上することを示した[5]。その要因として位相差を与えることによりポテンシャル・バリア(Potential barrier; 以下PB)の挙動が変化したこと、衝突時の速度拘束やコピアンが切り替わることの2つが挙げられる。[5]ではPB到達までの全重心の移動距離、あるいは上下動を最小化することが、歩行速度向上の一因であるのではないかと考察した。PBは歩行器の一步行周期中に位置エネルギーが最大となる姿勢のことを言う。井上らは、CRWの前後脚間に与える位相差が、RWの股角度の半角に近い値となったとき、歩行速度が最大になることを示した。また、この場合のCRWの全重心軌跡は、最も平坦なものとなっており、全重心軌跡の平坦化が歩行器の高速化に繋がることが示唆された。単体のRWの場合はPBを変化させることはできないが、CRWにおいては前後の脚間に位相差を与えることによりPBを変化させることが可能である。位相差を与えることによる高速化は、歩行器に駆動力を付加する必要が無いという利点を有している。

以上の先行研究から、本論文では全重心軌跡の平坦化を図る位相差以外の手法として揺動質量を用いることを考える。CRWの歩行によって生じる重心の上下動に対し、揺動質量がそれを打ち消すような適切な振動をするならば全重心軌跡の平坦化が期待できる。以下に、揺動質量を扱った関連研究を紹介する。Alexanderは走行中の犬の臓器が、呼吸を補助するように体内で振動すると考察した[6]。犬の体内の臓器を内蔵型の揺動質量と

して捉え、走行にともなう生じる振動が横隔膜の上下動を促進し、呼吸器の吸排気を補う効果を持つことを実験によって示した。Romeらは、歩行に際して人間の胴体が上下動することを利用し発電を行う、サスペンデッドロードバックパック (Suspended load backpack; 以下 SLB) を開発した [7]。SLB は背負いのフレーム部と、複数のバネによってフレーム部と接続される荷重部の、大きく分けて 2 つの要素で構成されている。SLB を背負って歩く人間の歩行にともなう胴体の上下動を利用し、荷重部の揺動によって生じた運動エネルギーを電気エネルギーへと変換するシステムとなっている。また、SLB から発電機能をオミットした改良型を用いて実験を行い、荷重が固定されている場合よりも、荷重が揺動する場合の方がピーク時に掛かる力および歩行運動に必要なコストを減少させることを示した [8]。また、中西らは胴体内部を左右に行き来するアクティブな揺動質量を内蔵した準受動歩行ロボットを開発した [9]。木林らはアクティブな揺動質量を 4 脚受動歩行ロボットの胴体部に設置し、揺動質量に対してのみ入力を加えることで平地歩行が実現できるかどうか検証した [10]。これらの研究において、揺動質量は歩容の生成に対して効果的に機能していることが示されたが、運動中の全重心軌跡に着目した研究は無い。本論文ではこの全重心軌跡の観点から見た、揺動質量が CRW の歩容生成に与える影響について検討する。

1.2 研究の目的

本論文では、揺動質量を持つ CRW の受動歩行特性の解析、および歩行性能の向上を目的とし、数値シミュレーションによる歩行解析および実験器による実験的検証を行う。先行研究において示唆された PB の変化による高速化に注目し、胴体部に自由に上下動する揺動質量を付加することにより、同様の効果が得られるかどうかを検証する。

1.3 本論文の構成

本論文は以下の構成から成る。まず第 2 章で、本論文で扱う CRW のモデル化を行い運動方程式を導出する。続く第 3 章ではモデリングした CRW を用いて数値シミュレーションを行い、揺動質量の付加による歩行特性の変化について検証した。さらに第 4 章では揺動質量を付加した実験器を用いて実験的検証を行い、シミュレーションの結果を検証した。最後に第 5 章で本研究で得られた結果をまとめ、今後の課題について述べる。

第2章 連結型リムレスホイールのモデリング

2.1 概要

まず本研究で用いるシミュレーションモデルについて述べる．CRW は同一の RW2 つを胴体リンクにより接続したモデルである．一般的に，RW は最も単純な 2 脚受動歩行器と考えられるため，2 台の連結により構成される CRW もまた，最も単純な多脚受動歩行器と考えられる．より自由度の高いモデルへ拡張するための前段階として，CRW を用いた受動歩行の数値シミュレーションを行う．この CRW の重心軌跡を平坦化する手法として，胴体リンクの中央部に揺動質量を追加する．揺動質量と胴体リンクの接続部はバネおよびダンパーで構成され，自由に上下動することが可能である．この揺動質量が適切に振動すれば，位相差を与えることなく全重心軌跡を平坦化でき，先行研究によれば歩行速度の向上が期待できる．実際の実験器を図 2.1，数値シミュレーションモデルを図 2.2 に示す．便宜上進行方向に対し後方の RW を RW1，前方の RW を RW2 と呼ぶことにする．また，揺動質量の位置座標を x_c および z_c で表すこととする．

2.2 運動方程式

RW1，RW2 および胴体リンク中央の一般化座標ベクトルをそれぞれ $\mathbf{q}_1 = [x_1 \quad z_1 \quad \theta_1]^T$ ， $\mathbf{q}_2 = [x_2 \quad z_2 \quad \theta_2]^T$ ， $\mathbf{q}_3 = [x_3 \quad z_3 \quad \theta_3]^T$ とおく．下向きを正として胴体リンク中央からの揺動質量の長さを L_c とおくと，システム全体の一般化座標ベクトルは $\mathbf{q} = [\mathbf{q}_1^T \quad \mathbf{q}_2^T \quad \mathbf{q}_3^T \quad L_c]^T \in \mathbb{R}^{10}$ となる．両 RW が立脚期の運動方程式は次の式で表される．

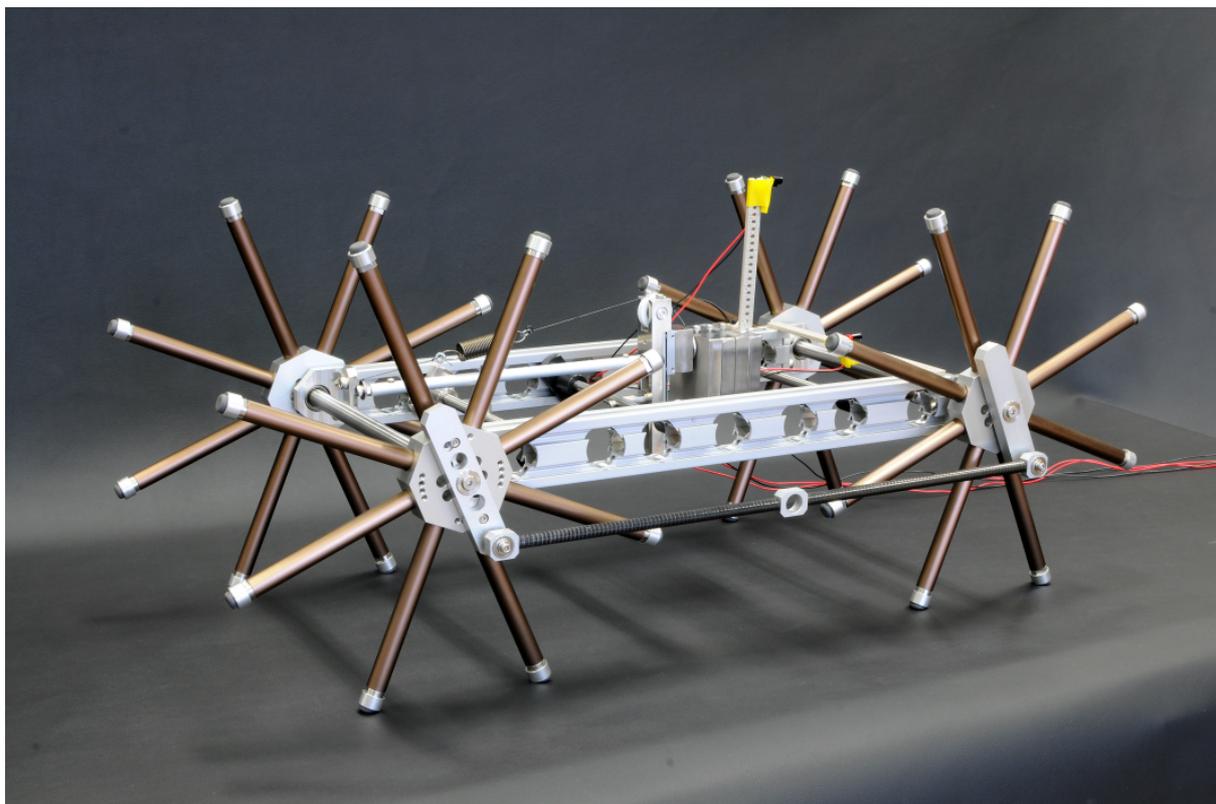


図 2.1: 揺動質量を持つ連結型リムレスホイール

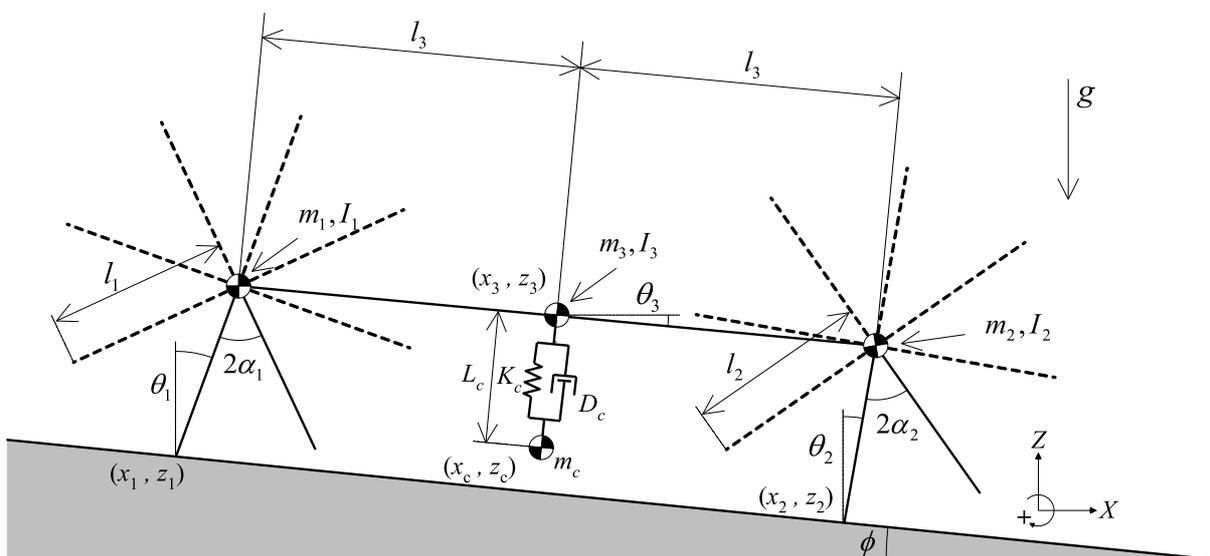


図 2.2: 揺動質量を持つ連結型リムレスホイールのシミュレーションモデル

$$M(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = -\mathbf{J}(\mathbf{q})^T \boldsymbol{\lambda} \quad (2.1)$$

ここで

$$M(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_1(\mathbf{q}_1) & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 4} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{M}_2(\mathbf{q}_2) & \mathbf{0}_{3 \times 4} \\ \mathbf{0}_{4 \times 3} & \mathbf{0}_{4 \times 3} & \mathbf{M}_3(\mathbf{q}_3) \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_1(\mathbf{q}_1) &= \begin{bmatrix} m_1 & 0 & l_1 m_1 \cos \theta_1 \\ 0 & m_1 & -l_1 m_1 \sin \theta_1 \\ l_1 m_1 \cos \theta_1 & -l_1 m_1 \sin \theta_1 & I_1 + l_1^2 m_1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{M}_2(\mathbf{q}_2) &= \begin{bmatrix} m_2 & 0 & l_2 m_2 \cos \theta_2 \\ 0 & m_2 & -l_2 m_2 \sin \theta_2 \\ l_2 m_2 \cos \theta_2 & -l_2 m_2 \sin \theta_2 & I_2 + l_2^2 m_2 \end{bmatrix} \\ \mathbf{M}_3(\mathbf{q}_3) &= \begin{bmatrix} m_3 + m_c & 0 & -L_c m_c \cos \theta_3 & -m_c \sin \theta_3 \\ 0 & m_3 + m_c & L_c m_c \sin \theta_3 & -m_c \cos \theta_3 \\ -L_c m_c \cos \theta_3 & L_c m_c \sin \theta_3 & I_3 + L_c^2 m_c & 0 \\ -m_c \sin \theta_3 & -m_c \cos \theta_3 & 0 & m_c \end{bmatrix} \end{aligned}$$

および

$$\mathbf{h}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_1(\mathbf{q}_1, \dot{\mathbf{q}}_1) \\ \mathbf{h}_2(\mathbf{q}_2, \dot{\mathbf{q}}_2) \\ \mathbf{h}_3(\mathbf{q}_3, \dot{\mathbf{q}}_3) \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{h}_1(\mathbf{q}_1, \dot{\mathbf{q}}_1) &= \begin{bmatrix} -\dot{\theta}_1^2 l_1 m_1 \sin \theta_1 \\ m_1(g - \dot{\theta}_1^2 l_1 \cos \theta_1) \\ -gl_1 m_1 \sin \theta_1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{h}_2(\mathbf{q}_2, \dot{\mathbf{q}}_2) &= \begin{bmatrix} -\dot{\theta}_2^2 l_2 m_2 \sin \theta_2 \\ m_2(g - \dot{\theta}_2^2 l_2 \cos \theta_2) \\ -gl_2 m_2 \sin \theta_2 \end{bmatrix} \\ \mathbf{h}_3(\mathbf{q}_3, \dot{\mathbf{q}}_3) &= \begin{bmatrix} \dot{\theta}_3 m_c (-2\dot{L}_c \cos \theta_3 + \dot{\theta}_3 L_c \sin \theta_3) \\ g(m_3 + m_c) + \dot{\theta}_3 m_c (\dot{\theta}_3 L_c \cos \theta_3 + 2\dot{L}_c \sin \theta_3) \\ L_c m_c (2\dot{L}_c \dot{\theta}_3 + g \sin \theta_3) \\ -m_c (\dot{\theta}_3 L_c + g \cos \theta_3) + K_c (L_c + \cos \phi \frac{gm_c}{K_c}) + D_c \dot{L}_c \end{bmatrix} \end{aligned}$$

である．式(2.1)左辺の $M(\mathbf{q})$ は慣性行列を， $\mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ は中心力・コリオリ力項および，重力項を表している．各行列の添え字 $i (i = 1, 2, 3)$ はそれぞれ RW1，RW2 および胴体リンクと揺動質量長さに関するものである．

また，ホロノミック拘束の速度拘束条件は次の式により求められる．

$$\mathbf{J}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{0}_{8 \times 1} \quad (2.4)$$

式中のヤコビアン行列 $\mathbf{J}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{8 \times 10}$ は以下の 3 条件

- 各 RW の支持脚先端と床面とが滑らない．
- (x_1, z_1) の関数として表される RW1 の胴体リンクとの接続点位置座標と， (x_3, z_3) の関数として表される胴体リンク先端の RW1 との接続点位置座標が等しい．
- (x_2, z_2) の関数として表される RW2 の胴体リンクとの接続点位置座標と， (x_3, z_3) の関数として表される胴体リンク先端の RW2 との接続点位置座標が等しい．

より，次のように表される．

$$\mathbf{J}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & l_1 \cos \theta_1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -l_3 \sin \theta_3 & 0 \\ 0 & 1 & -l_1 \sin \theta_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -l_3 \cos \theta_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & l_1 \cos \theta_2 & -1 & 0 & l_3 \sin \theta_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -l_1 \sin \theta_2 & 0 & -1 & l_3 \cos \theta_3 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

第 1・2 行は RW1 の支持脚先端位置と床面との拘束を，第 3・4 行は RW2 の支持脚先端位置と床面との拘束を表している．また，第 5・6 行は RW1 と胴体リンクが接続されていることを，第 7・8 行は RW2 と胴体リンクが接続されていることを表している．

2.3 PD フィードバックによる誤差の修正

式 (2.5) が正確に反映された場合，次のような関係が成り立つ．ただし， $\bar{x}_1, \bar{z}_1, \bar{x}_2, \bar{z}_2$ は幾何学的条件から一意に定まる支持脚接地点の位置座標である．

$$\boldsymbol{\xi} := \begin{bmatrix} x_1 - \bar{x}_1 \\ z_1 - \bar{z}_1 \\ x_2 - \bar{x}_2 \\ z_2 - \bar{z}_2 \\ x_1 + l_1 \sin \theta_1 - x_3 + l_3 \cos \theta_3 \\ z_1 + l_1 \cos \theta_1 - z_3 - l_3 \sin \theta_3 \\ x_2 + l_2 \sin \theta_2 - x_3 - l_3 \cos \theta_3 \\ z_2 + l_2 \cos \theta_2 - z_3 + l_3 \sin \theta_3 \end{bmatrix} = \mathbf{0}_{8 \times 1} \quad (2.6)$$

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僅かな遅れ等の数値誤差により，衝突時に胴体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．これでは長時間の歩行解析に支障をきたすため，式 (2.6) に示したエラーベクトル ξ に，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．

ξ は次の関係式を満たす．

$$\dot{\xi} = J(q)\dot{q} = \mathbf{0}_{8 \times 1} \quad (2.7)$$

これを時間積分すると，

$$\ddot{\xi} = J(q)\ddot{q} + \dot{J}(q, \dot{q})\dot{q} \quad (2.8)$$

を得る．ただし，

$$J(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\dot{\theta}_1 l_1 \sin \theta_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\dot{\theta}_1 l_1 \cos \theta_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\dot{\theta}_2 l_2 \sin \theta_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\dot{\theta}_2 l_2 \cos \theta_2 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

である．ここで， ξ の 2 次の減衰振動系の式である

$$\ddot{\xi} + K_D \dot{\xi} + K_P \xi = \mathbf{0}_{8 \times 1} \quad (2.10)$$

に式 (2.7) および式 (2.8) を代入し，式 (2.6) と連立して解くことによりシステムの運動を求めた． K_D ， K_P はフィードバックゲインを表している行列である．今回は ξ の 1 行目から 4 行目まで，つまり支持脚の接地点に対して位置フィードバックは行わず， $K_P = \text{diag}(0, 0, 0, 0, K_P, K_P, K_P, K_P)$ である対角行列を用いた．また $K_D = K_D I_8$ である．ラグランジュの未定乗数である $\lambda \in \mathbb{R}^8$ は次式のように求まる．

$$\lambda = (J(q)M(q)^{-1}J(q)^T)^{-1} (-J(q)M(q)^{-1}h(q, \dot{q}) + \dot{J}(q, \dot{q})\dot{q} + K_D J(q)\dot{q} + K_P \xi). \quad (2.11)$$

2.4 衝突方程式

各 RW の支持脚交換における衝突については完全非弾性衝突であり，支持脚の交換は瞬時に行われるものと仮定する．衝突方程式は次のように表される．

$$M(q)\dot{q}^+ = M(q)\dot{q}^- - J_I(q)^T \lambda_I \quad (2.12)$$

ここで“ q^+ ”は衝突直後の状態量を，“ q^- ”は衝突直前の状態量を表している．衝突時の速度拘束条件式は次のように表される．

$$J_I(q)\dot{q}^+ = \mathbf{0}_{8 \times 1} \quad (2.13)$$

$J_I(q)$ は，衝突時の速度拘束から導かれるヤコビアンである．このヤコビアン行列 $J_I(q)$ は式 (2.5) の 1 行目から 4 行目までを置き換えて使用する．この置き換えは

- RW1 のみが床面と衝突する．
- RW2 のみが床面と衝突する．
- 両 RW が同時に床面と衝突する．

以上 3 つの場合についてそれぞれ異なり，RW1 のみが衝突する場合は第 1・2 行を，RW2 のみが衝突する場合は第 3・4 行を，両 RW が同時に衝突する場合は第 1・2・3・4 行が置き換えられる．

第3章 歩行解析

第2章で述べたモデルを用いて，受動歩行の数値シミュレーションを行った．シミュレーションに用いた物理パラメータは表3.1に示す通りである．また，シミュレーションの初期値は，すべて自然な倒れ込みを開始するように初期角速度をゼロとし，小さい初期角度を与えている．各シミュレーションにおいても特に断りがない場合は，同様の物理パラメータおよび初期値を用いている．以降の節でその結果を述べる．

表 3.1: 物理パラメータ

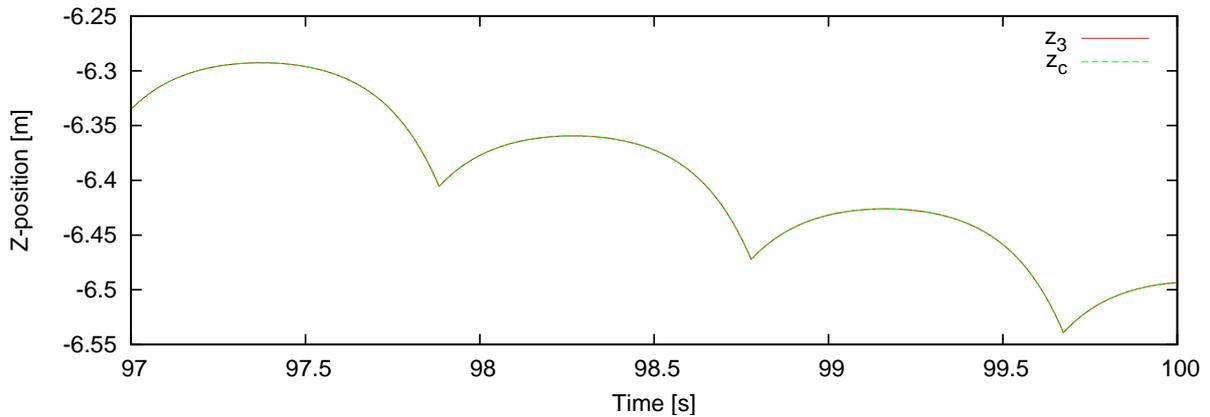
m_1	1.0	kg	α_1	22.5	deg
m_2	1.0	kg	α_2	22.5	deg
m_3	1.0	kg	I_1	1.0×10^{-4}	kg·m ²
m_c	3.0	kg	I_2	1.0×10^{-4}	kg·m ²
l_1	1.0	m	I_3	1.0×10^{-4}	kg·m ²
l_2	1.0	m	ϕ	5.0	deg
l_3	1.0	m	g	9.81	m·s ⁻²

3.1 揺動質量を固定する場合

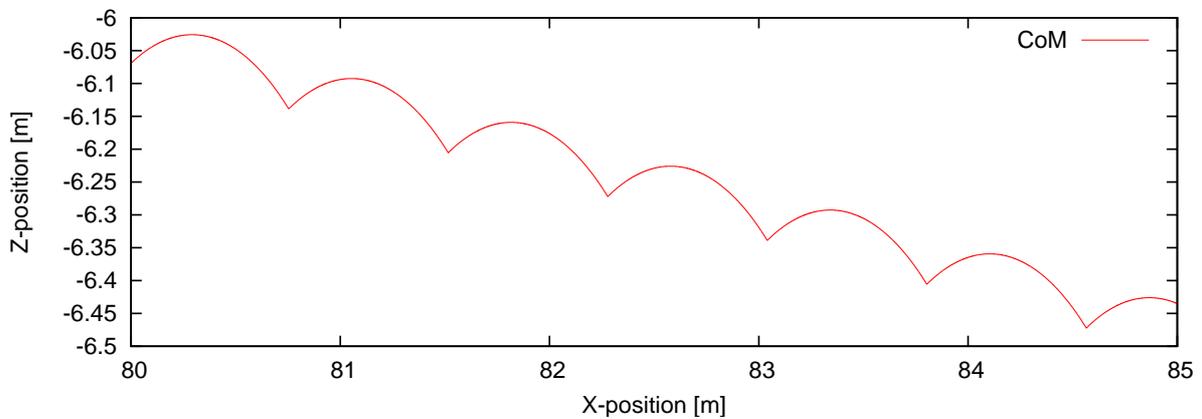
まず，揺動質量を胴体リンクに固定した場合の歩行シミュレーションを行った．図3.1にその結果を示す．図3.1(a)より，胴体リンクと揺動質量の位置座標が完全に重なった状態で歩行しており，揺動質量がしっかりと固定されていることがわかる．また，このときの全重心軌跡は通常のCRWと変わらず大きく上下している．

3.2 バネによる接続

揺動質量をバネのみで胴体リンクと接続し，バネの弾性係数 K_c を $1 - 1000$ [N/m] の間で 1 [N/m] 刻みで変化させ，RW1 および RW2 間の位相差をゼロとして歩行シミュレーションを行った． 100 [s] 間の歩行継続を各弾性係数における歩行成立として，その歩行速度をプロットしたものが図3.2である．歩行の最終値周辺から 10 個のデータを取得し



(a) Z 軸方向の絶対変位



(b) 全重心軌跡

図 3.1: 揺動質量を固定した場合のシミュレーション結果

てプロットしている．歩行速度がプロットされていない弾性係数においては，支持脚先端の床反力が負になる場合と揺動質量の上下動が激化して床面に衝突する場合の2つが見られた．

図中の赤色の“ ”は揺動質量を自由に上下動させた場合の歩行速度，破線は揺動質量を胴体リンクに固定した場合の歩行速度をそれぞれ表している．赤色の“ ”は全弾性係数領域で破線より上にあり，揺動質量を振動させる場合の方が歩行速度が向上していることがわかる．また，歩行が成立した弾性係数領域は大きく2つに分けることができ，前半の速度分布領域の方が速度が速くなっている．以降で，速度分布領域を前半と後半に分けてそれぞれの速度向上要因について考察する．

弾性係数が小さい領域 弾性係数が小さい場合には1周期の歩行となっているが，弾性係数の増加に伴って歩行速度が分散し不安定化している． $K_c = 30$ [N/m] の場合の揺動質量と胴体リンクのZ 軸方向の変位量の時間変化をプロットしたものを図 3.3 (a) と図 3.3 (b)

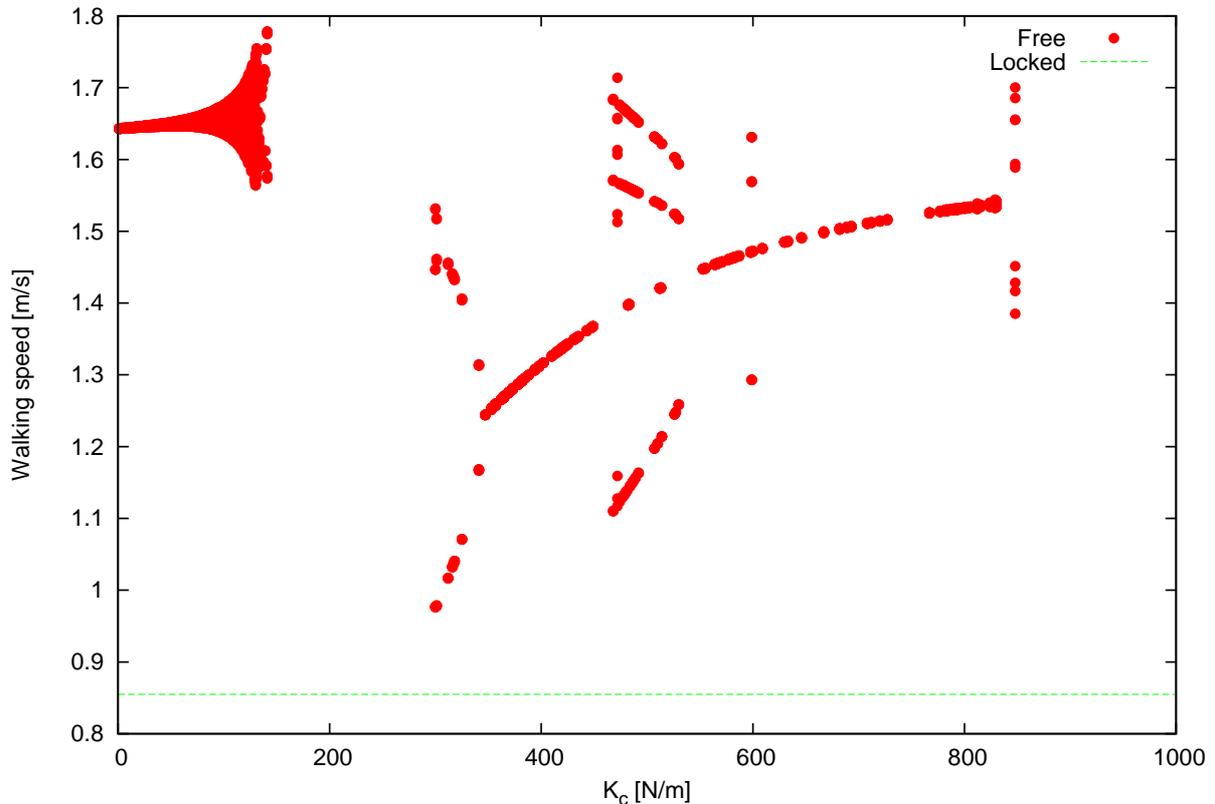
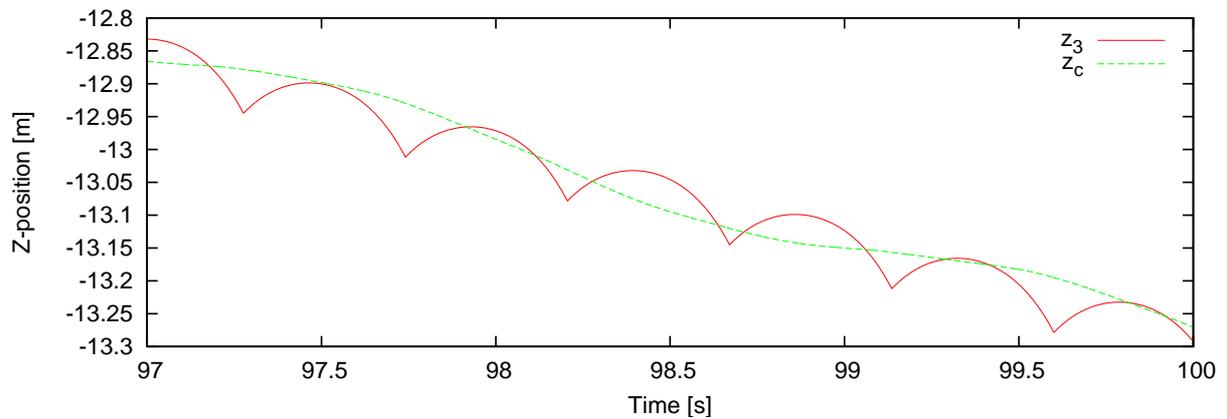


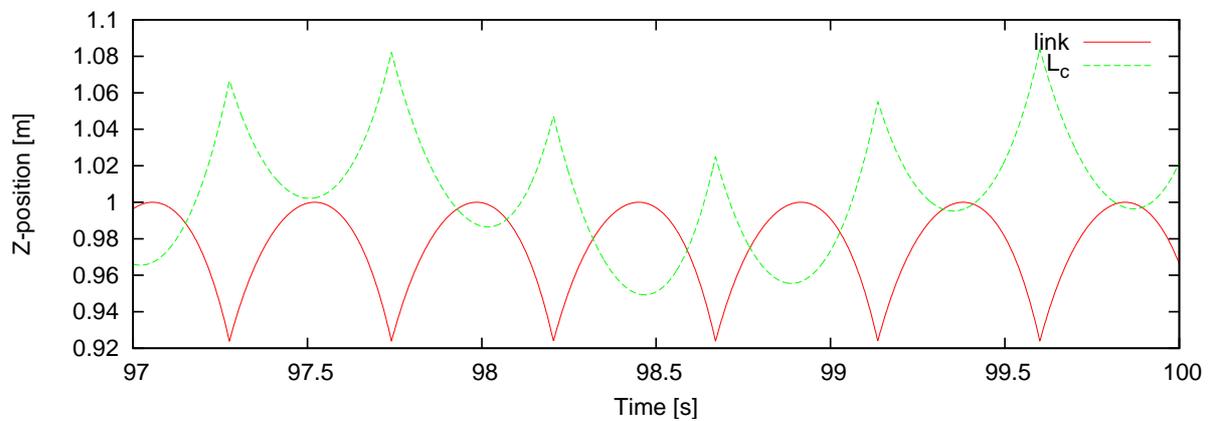
図 3.2: 弾性係数と歩行速度の関係

に示す．図 3.3 (b) の凡例“ link ”は $l \cos(\theta_1 - \phi)$ で計算される値であり，揺動質量と胴体リンクの相対変位を表すためのものである．この相対変位に注目すると，胴体リンクの上下動に対して揺動質量が逆位相で変位していることがわかる．この時の全重心軌跡を図 3.3 (c) に示す．図 3.1 (b) と比べれば明らかなように，揺動質量の振動によって軌跡が平坦化している．PB の観点から見て，この領域での歩行速度向上の一因は，重心軌跡の平坦化によるものと言える．

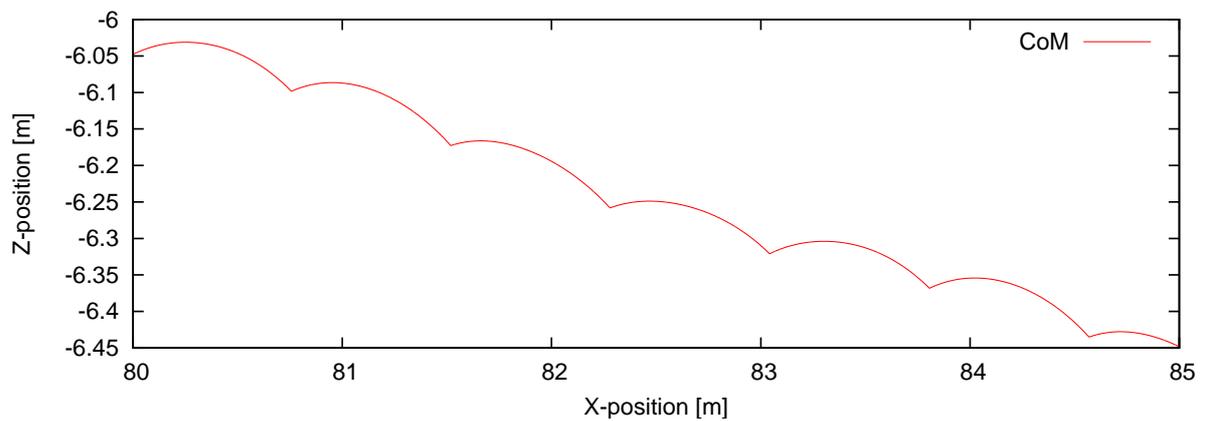
弾性係数が大きい領域 弾性係数が大きい場合には 1 周期の歩行と多周期の歩行が存在している． $K_c = 372$ [N/m] の場合の揺動質量と胴体リンクの Z 軸方向の変位量の時間変化をプロットしたものを図 3.4 (a) と図 3.4 (b) に示す．相対変位に注目すると，胴体リンクの上下動に対して揺動質量が同位相で変位していることがわかる．この時の全重心軌跡を図 3.4 (c) に示す．図 3.1 (b) と比べれば明らかなように，揺動質量の振動によって全重心の上下動が激化している．PB の観点から考えると，全重心軌跡がより激化しているにも関わらず歩行速度が向上しているのは矛盾である．ここで揺動質量の運動に注目する．図 3.4 (b) を見ると，CRW が衝突直後の姿勢から PB に達するまでの間は揺動質量が上方向



(a) Z 軸方向の絶対変位



(b) Z 軸方向の相対変位

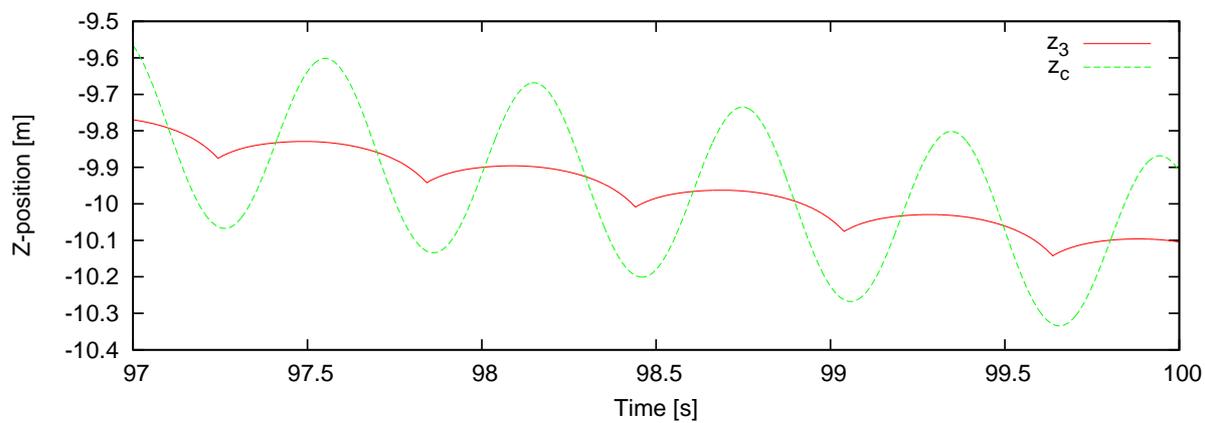


(c) 全重心軌跡

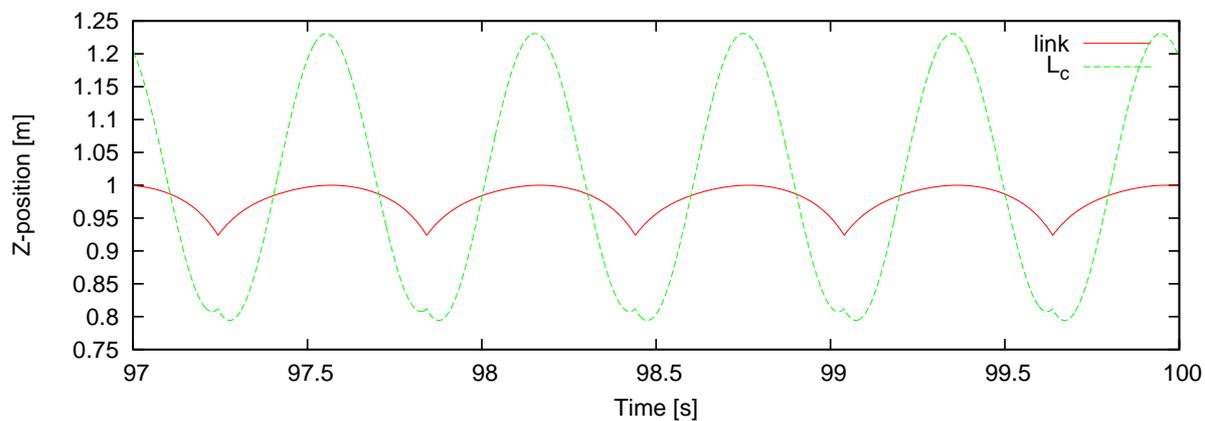
図 3.3: $K_c = 30$ [N/m] のシミュレーション結果

に大きく運動し，PB 到達後は下方方向に大きく運動している．総合的に見れば，揺動質量が RW の回転運動を助長するように運動していると考えることができ，速度向上の一因

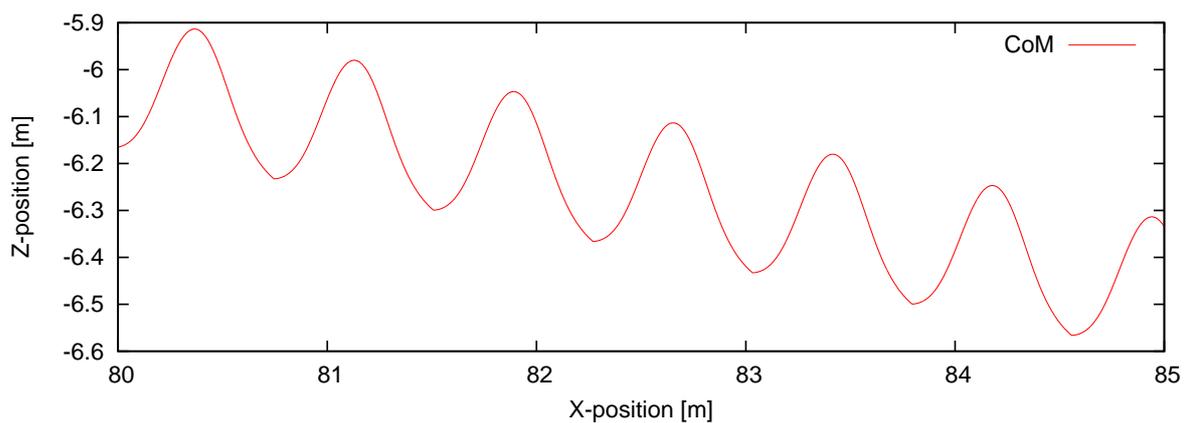
もこれにあると考えられる (図 3.5) .



(a) Z 軸方向の絶対変位



(b) Z 軸方向の相対変位



(c) 全重心軌跡

図 3.4: $K_c = 372$ [N/m] のシミュレーション結果

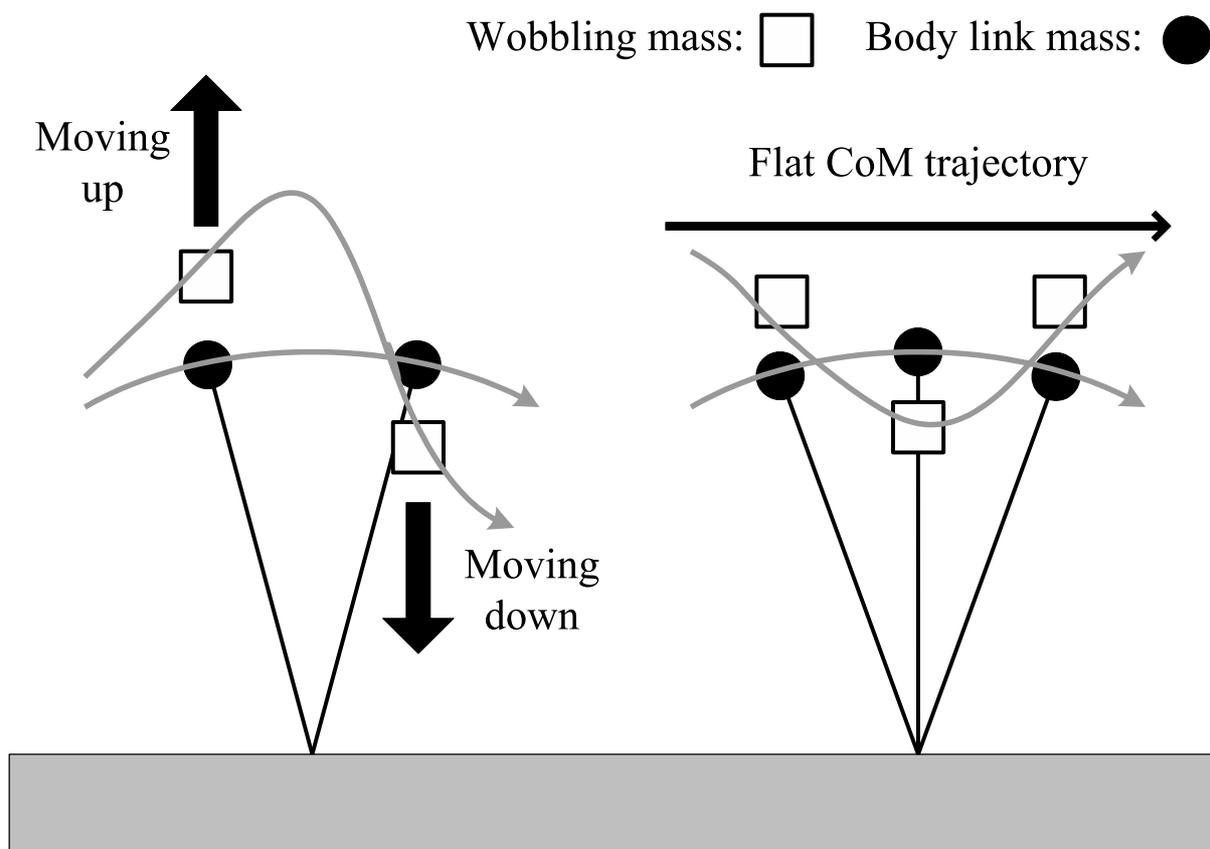


図 3.5: 揺動質量と RW の運動

3.3 バネおよびダンパーによる接続

バネおよびダンパーによって揺動質量を胴体リンクに接続した．粘性係数 D_c を 5, 10, 15 [N・s/m] の 3 パターンに設定し, K_c を 1 – 1000 [N/m] の間で 1 [N/m] 刻みで変化させ, RW1 および RW2 間の位相差をゼロとして歩行シミュレーションを行った．100 [s] 間の歩行継続を各弾性係数における歩行成立として, その歩行速度をプロットしたのが図 3.6 である．

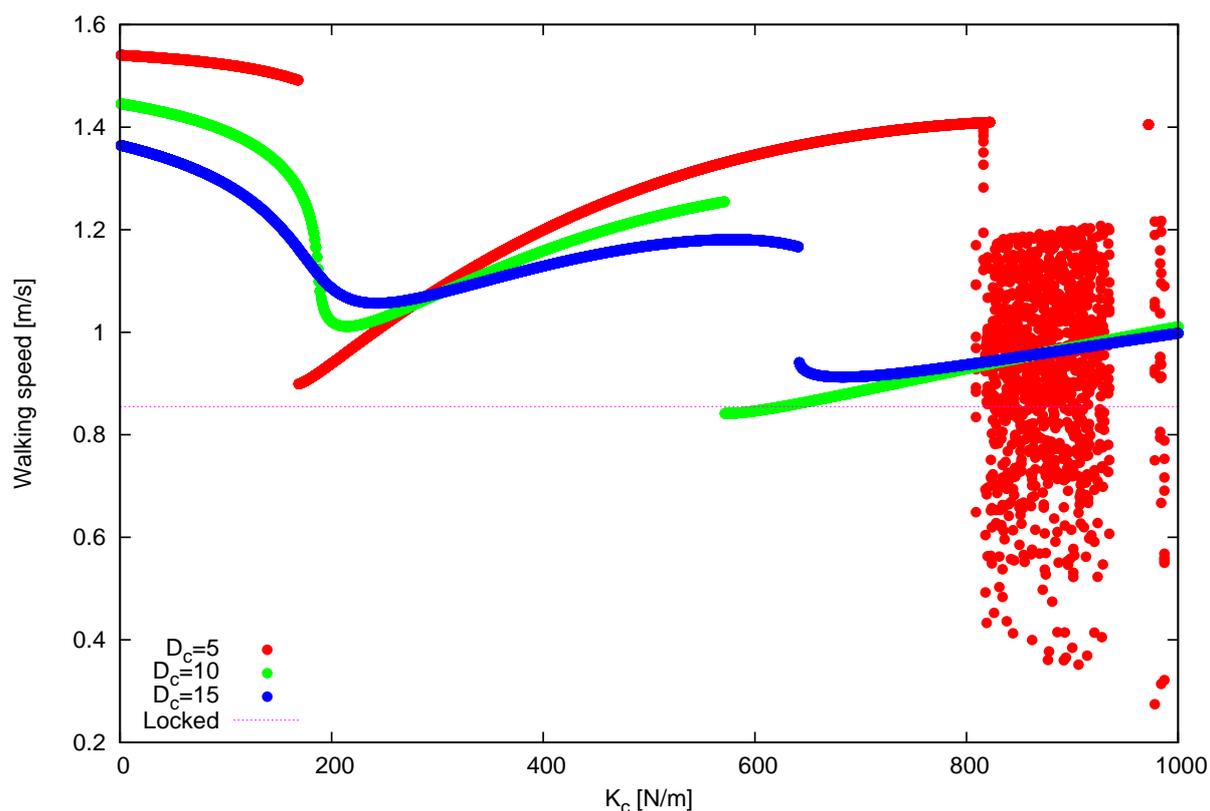


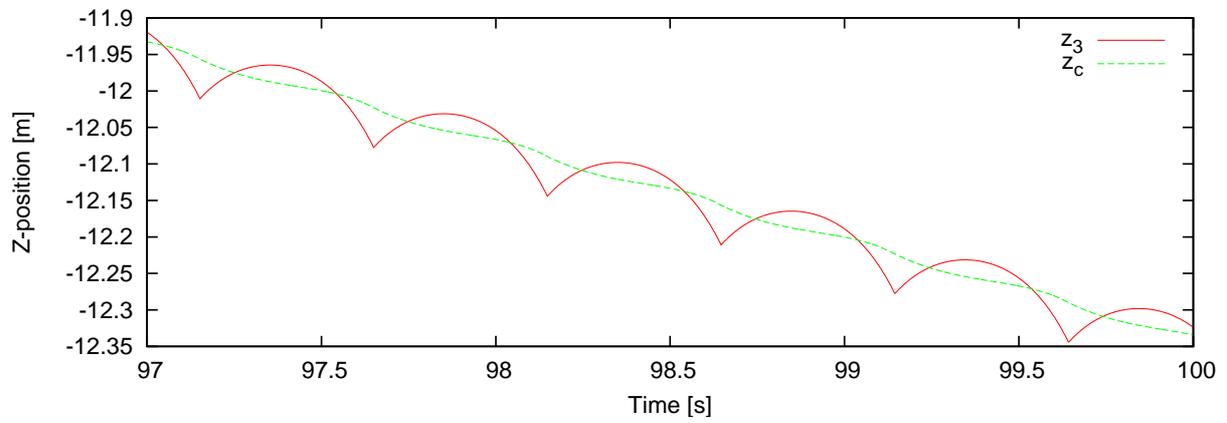
図 3.6: 弾性係数および粘性係数と歩行速度の関係

図中の赤, 緑, 青色の“ ”は, それぞれ D_c を 5, 10, 15 [N・s/m] に設定し, 揺動質量を自由に上下動させた場合の歩行速度を表している．鎖線は揺動質量を胴体リンクに固定した場合の歩行速度をそれぞれ表している．ほとんどの弾性係数領域で 3 色の“ ”は鎖線より上にあり, 揺動質量を振動させる場合の方が歩行速度が向上していることがわかる．また, 図 3.2 と比較するとダンパーの減衰効果によって歩行速度は低下しているが, 歩行が成立する領域は増加していることがわかる．歩行成立領域についても歩行周期は 1 周期となっており, バネの不安定な振動が抑えられた結果と考えられる．その一方で, バネのみの場合では歩行が成立しなかった領域では, 急激な歩行速度の低下やジャンプが発生し

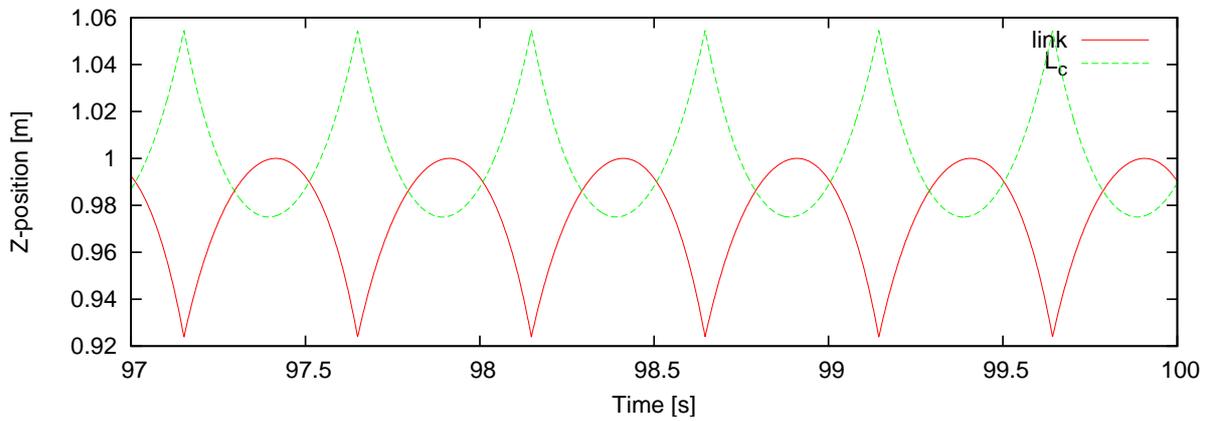
ている．以降で $D_c = 5$ [N・s/m] の場合を例にとり，歩行速度の急減前後に分けてそれぞれの速度向上要因について考察する．

速度ジャンプ前の領域 弾性係数が小さい場合には1周期の歩行となっているが，弾性係数の増加に伴って歩行速度が徐々に低下している． $K_c = 30$ [N/m] の場合の揺動質量と胴体リンクのZ軸方向の変位量の時間変化をプロットしたものを図3.7 (a)と図3.7 (b)に示す．相対変位に注目すると，胴体リンクの上下動に対して揺動質量が逆位相で変位していることがわかる．この時の全重心軌跡を図3.7 (c)に示す．図3.1と比べれば明らかなように，揺動質量の振動によって軌跡が平坦化している．PBの観点から見て，この領域での歩行速度向上の一因は，重心軌跡の平坦化によるものと言える．

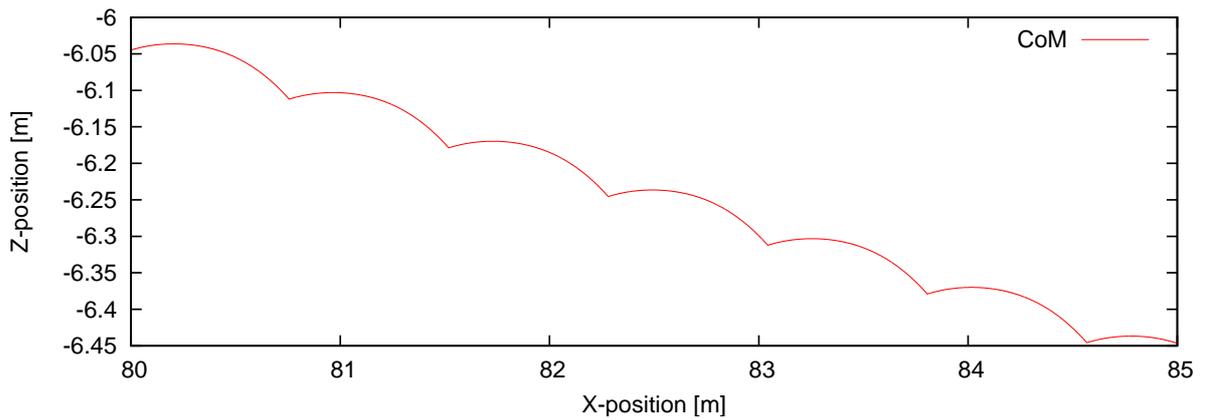
速度ジャンプ後の領域 バネのみの場合とは異なりほぼ全域で1周期の歩行となっている． $K_c = 372$ [N/m] の場合の揺動質量と胴体リンクのZ軸方向の変位量の時間変化をプロットしたものを図3.8 (a)と図3.8 (b)に示す．相対変位に注目すると，胴体リンクの上下動に対して揺動質量が同位相で変位していることがわかる．この時の全重心軌跡を図3.8 (c)に示す．バネのみの場合と同様に，揺動質量がRWの回転運動を助長するように振動していると考えることができ，速度向上の一因もこれにあると考えられる．



(a) Z 軸方向の絶対変位

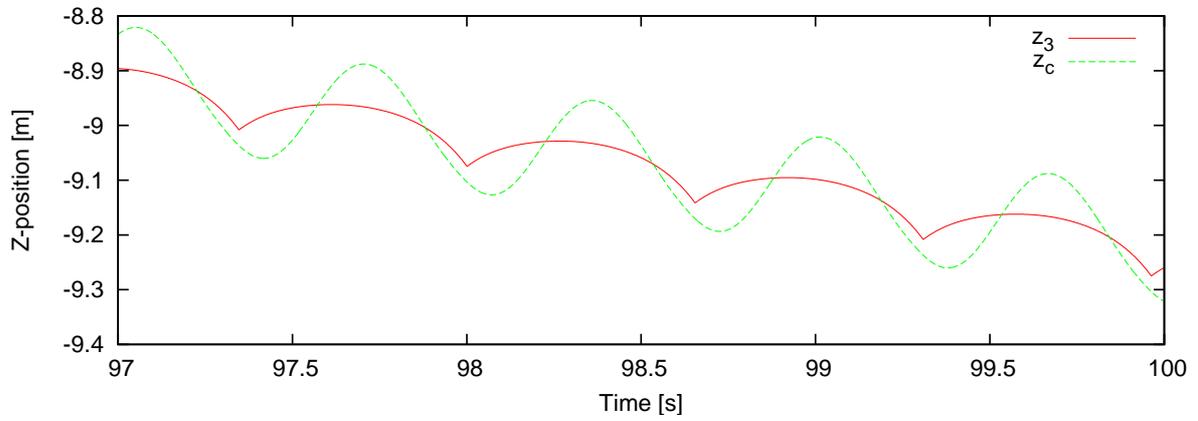


(b) Z 軸方向の相対変位

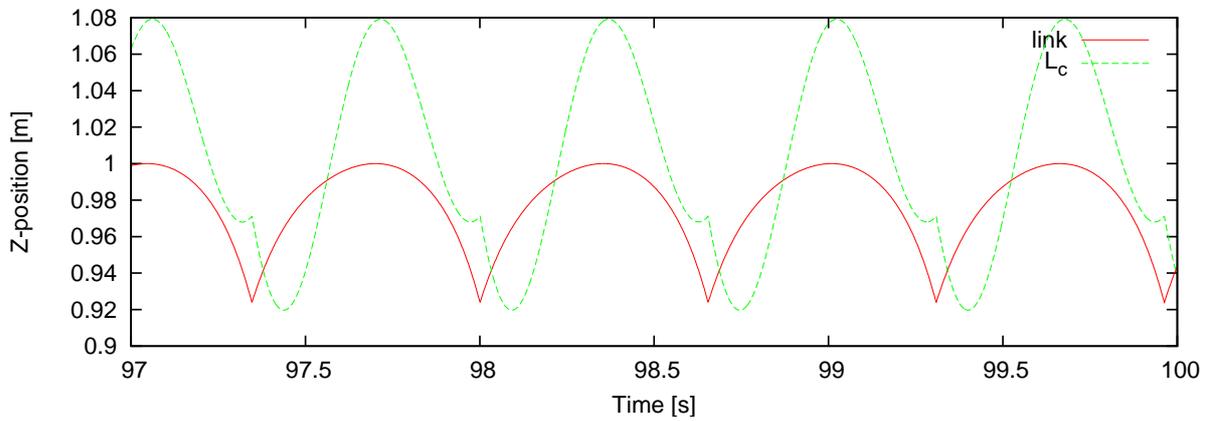


(c) 全重心軌跡

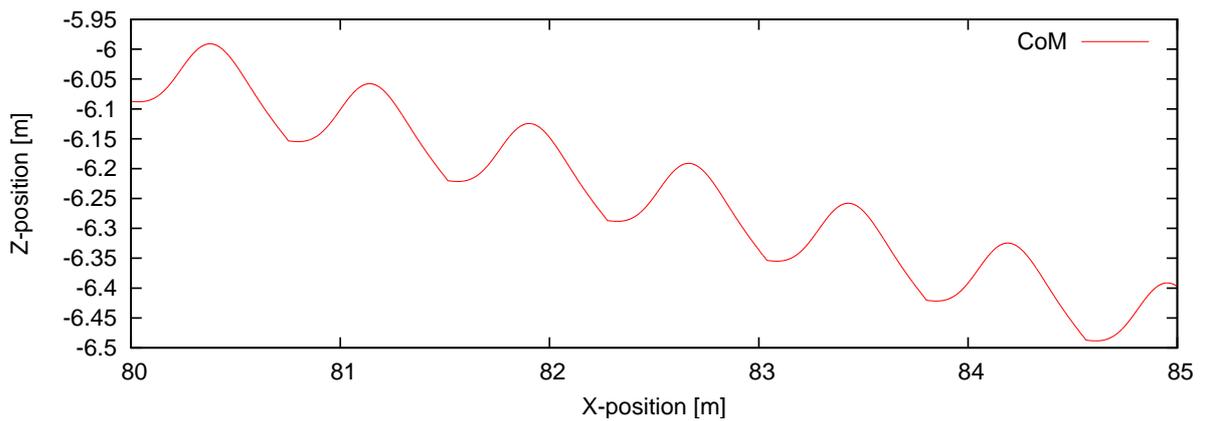
図 3.7: $K_c = 30$ [N/m] , $D_c = 5$ [N · s/m] のシミュレーション結果



(a) Z 軸方向の絶対変位



(b) Z 軸方向の相対変位



(c) 全重心軌跡

図 3.8: $K_c = 372$ [N/m] , $D_c = 5$ [N · s/m] のシミュレーション結果

3.4 振動数の関係

CRW の歩行の振動数 f_w [Hz] と揺動質量の固有振動数 f_c [Hz] は次式により求められる．式中の T [s] は CRW の歩行周期を表している．

$$f_w = \frac{1}{T} \quad (3.1)$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_c}{m_c}} \quad (3.2)$$

第 3.2 節の結果を，上式を用いて振動数の関係で表すと図 3.9 のようになる．逆位相領域と同位相領域が入れ替わると同時に，CRW の歩行の振動数と揺動質量の振動数の大小関係が入れ替わっている．逆位相領域では歩行の振動数の方が大きくなっており，CRW の歩行に引っ張られる形で揺動質量が振動していることが分かる．一方の同位相領域では揺動質量の振動数の方が大きく，揺動質量の振動に CRW の歩行が引き込まれていることが分かる．この同位相領域においては，弾性係数が小さくなればなるほど f_w と f_c が同じ値に近づいており，第 3.2 節で歩行が成立しなかった $K_c = 150 - 300$ [N/m] の領域で 2 つの値が重なっていると推測される．従って，この領域で歩行が成立しない原因は，CRW と揺動質量の共振によるものであると言える．

第 3.3 節の結果も同様に振動数の関係で表せば図 3.10 のようになる． $D_c = 5$ [N・s/m] の場合を表す赤色の“ ”に注目すると，ちょうど歩行速度のジャンプが生じた K_c を境に歩行の振動数と揺動質量の振動数の大小関係が逆転している．この時の胴体リンクと揺動質量の Z 軸方向の変位量を図 3.11 および図 3.12 に示す．速度ジャンプ前の $K_c = 168$ [N/m] とジャンプ後の 169 [N/m] の胴体リンクと揺動質量の変位の関係は，それぞれ逆位相と同位相になっている．この結果からも，歩行と揺動質量の振動数の大小関係が，歩行速度に大きな影響を与えるパラメータとなっていることが分かる．

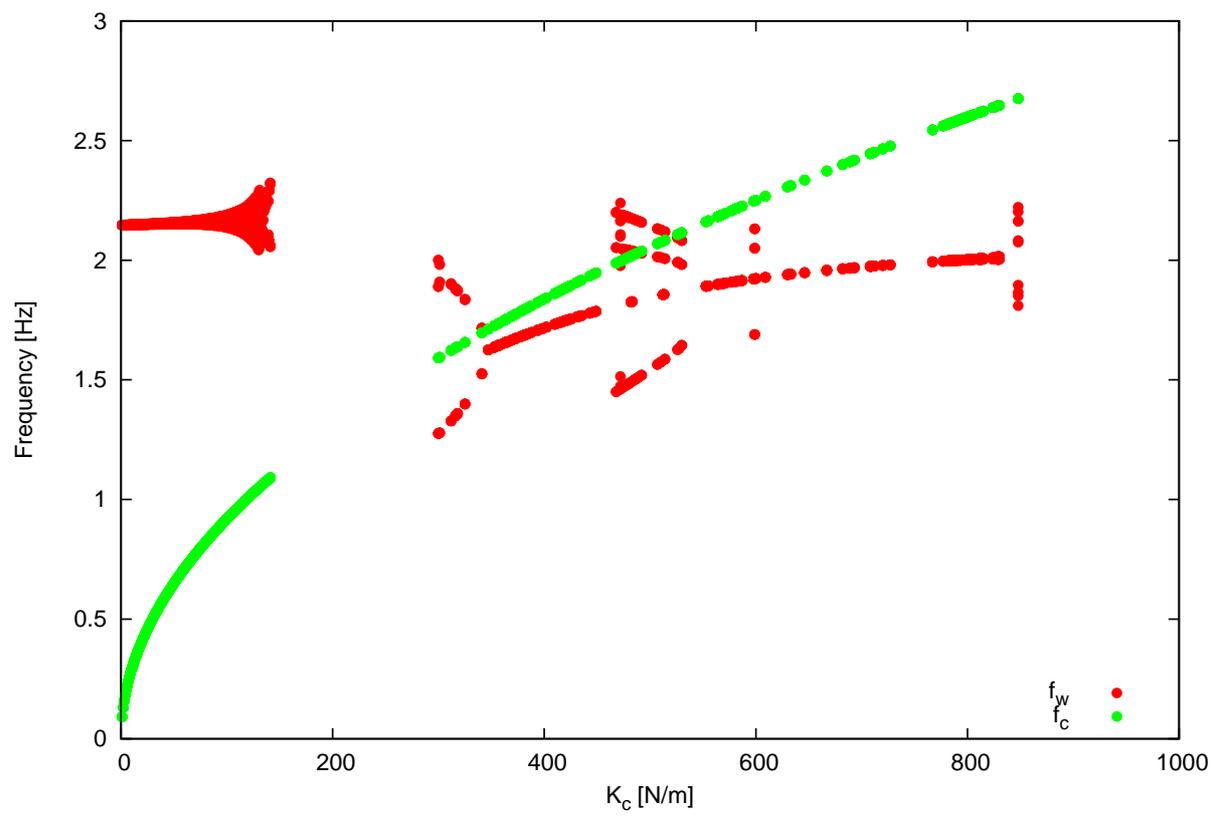


図 3.9: 振動数の関係 (バネのみによる接続)

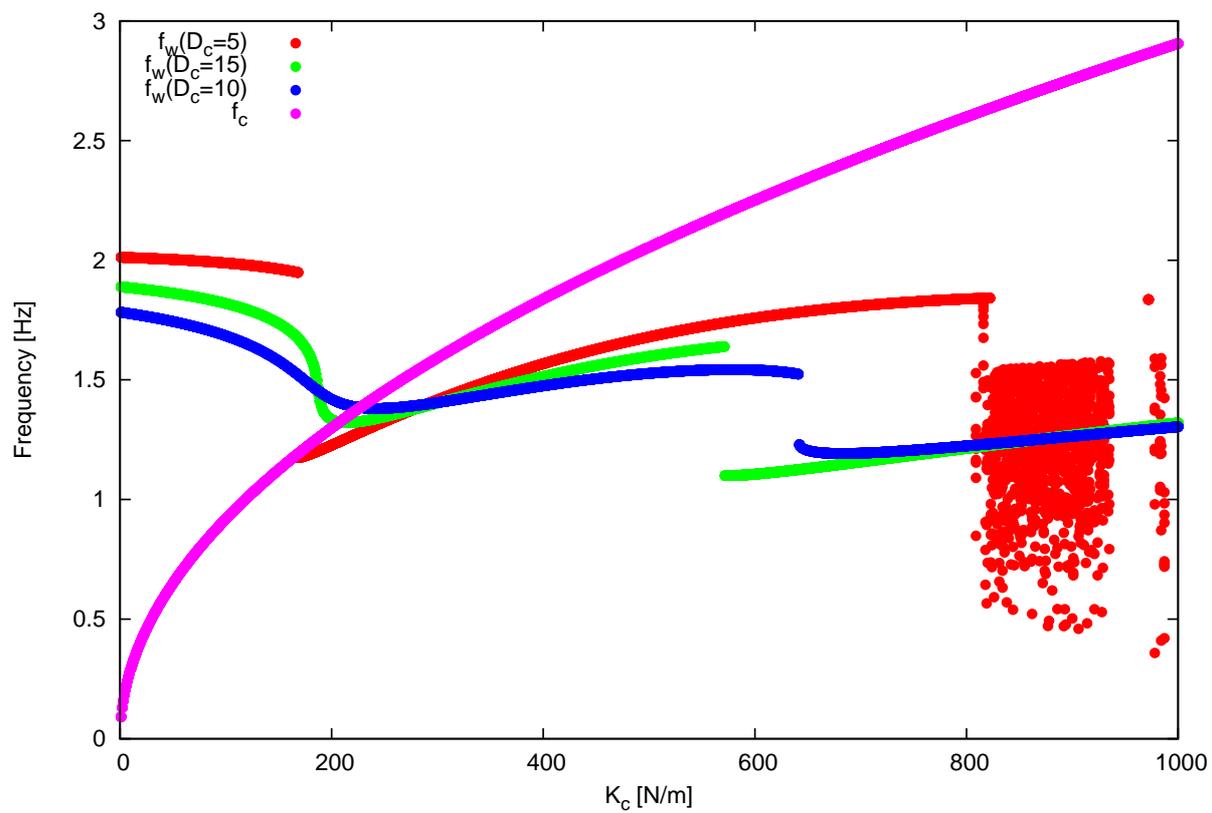
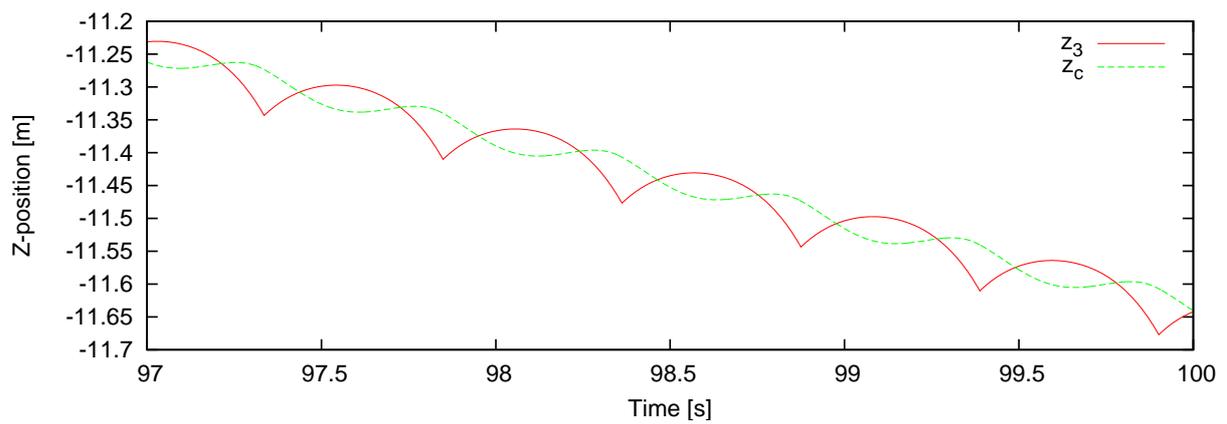
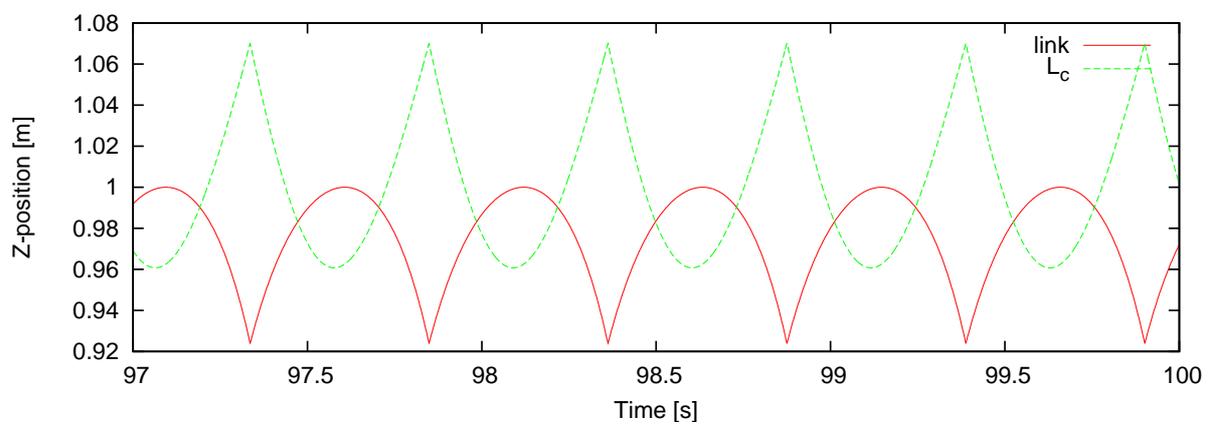


図 3.10: 振動数の関係 (バネおよびダンパーによる接続)

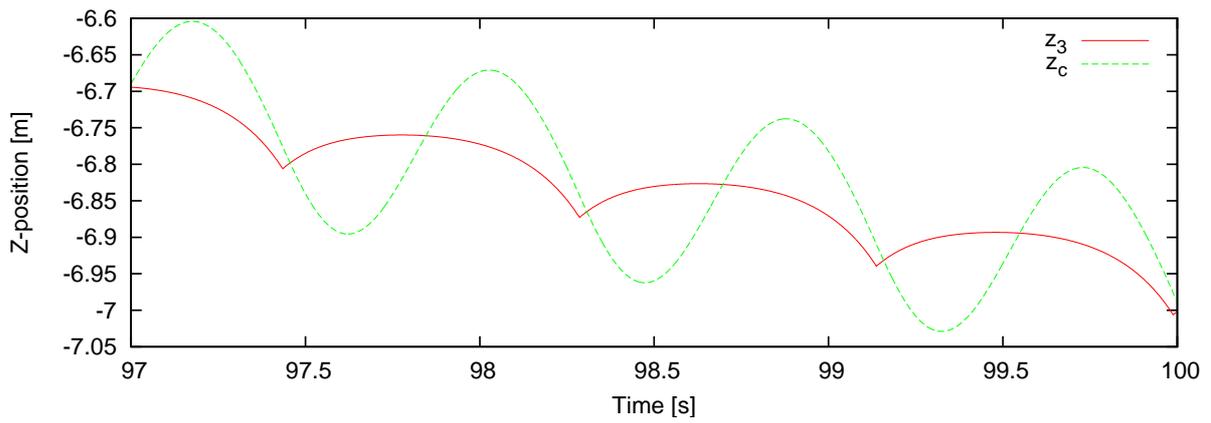


(a) Z 軸方向の絶対変位

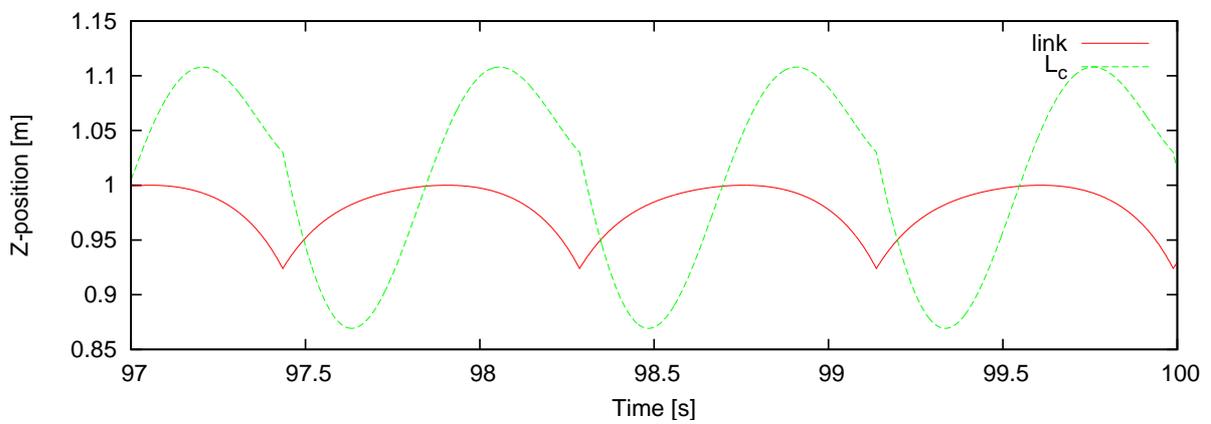


(b) Z 軸方向の相対変位

図 3.11: 速度ジャンプ前のシミュレーション結果 ($K_c = 168$ [N/m]), $D_c = 5$ [N · s/m])



(a) Z 軸方向の絶対変位



(b) Z 軸方向の相対変位

図 3.12: 速度ジャンプ後のシミュレーション結果 ($K_c = 169$ [N/m] , $D_c = 5$ [N · s/m])

3.5 位相差を与える場合

第 3.4 節の結果より， f_w と f_c の大小関係が $f_w > f_c$ であるときに，揺動質量と胴体リンクの上下振動が逆位相となり，同位相の場合よりも高速な歩行が実現できている． f_c の値を調節する方法として，揺動質量の大きさ，および接続に用いるばねの弾性係数を調節することが挙げられる．式 3.2 より，質量を増加させる，あるいは弾性係数を小さくすることで f_c を小さい値にすることができる．一方 f_w の値は歩行速度および CRW の物理パラメータによるところが大きい．特に受動歩行をさせる場合，歩行速度を調整する手段としては斜面角度に緩急を与える以外に方法がない．

前後の RW 間に位相差を与える場合 [5]，歩行速度が向上すると共に歩行周期も短縮される，この歩行周期の短縮に着目し，CRW および揺動質量の物理パラメータを変更する以外の方法で逆位相領域を拡大する手法として，初期値として与える両 RW の支持脚角度に約 22.5 [deg] の位相差を与えて，50 [s] 間の歩行シミュレーションを行った．それ以外の初期条件は第 3.2 節と同一である．その結果を図 3.13 に示す．

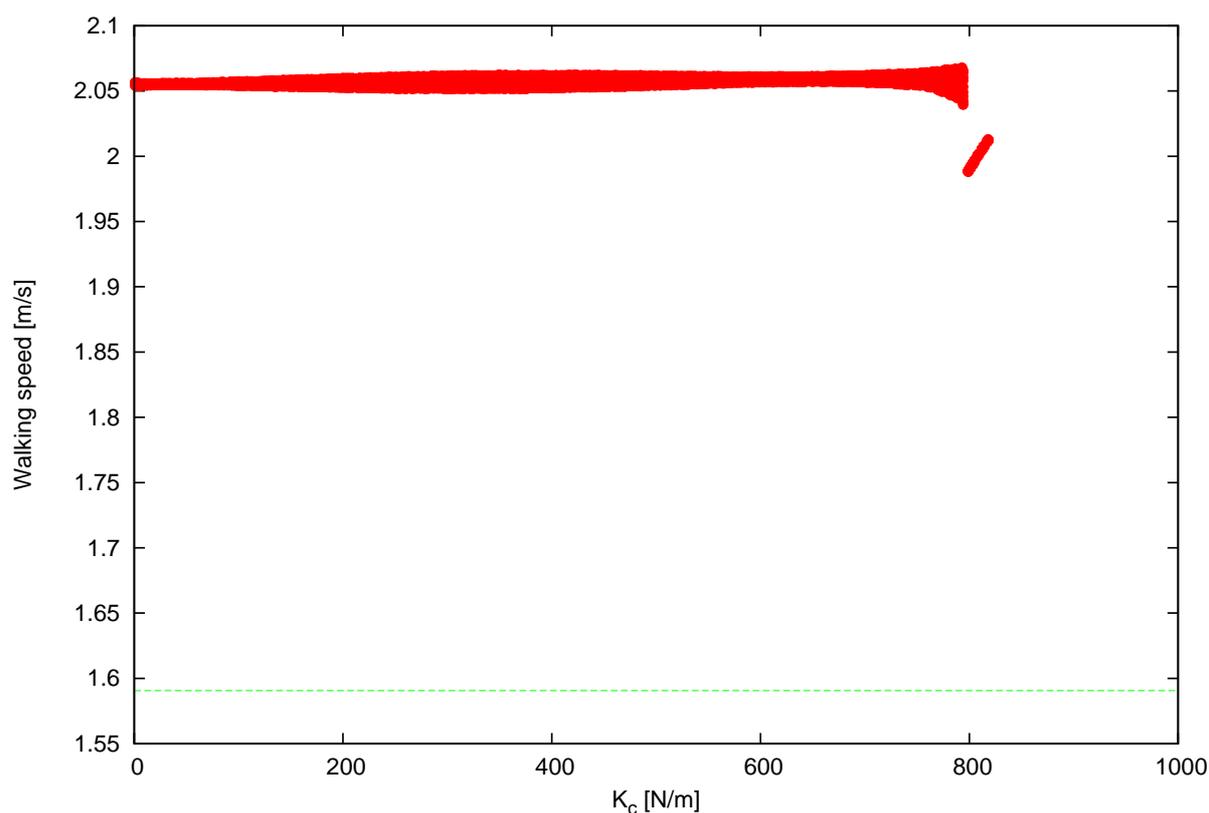


図 3.13: 位相差を与えた場合の弾性係数と歩行速度の関係

第 3.2 節よりもさらに，歩行速度が向上している．これは，[5] および第 1.1 節でも述べたように，PB 以外のもう一つの高速化要因として考察した衝突時の速度拘束条件の切り

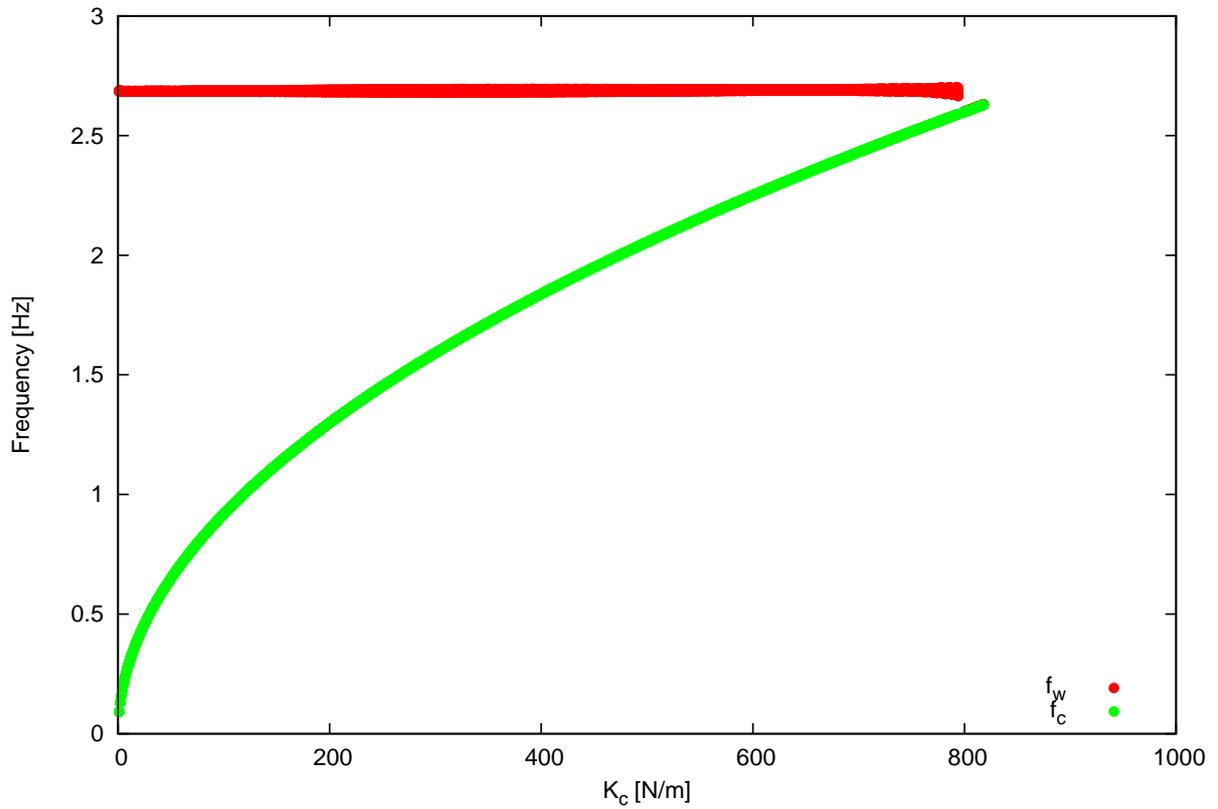


図 3.14: 位相差を与えた場合の振動数の関係（バネによる接続）

替えが加わったことによると考えられる．この時の振動数の関係を図 3.14 に示す．歩行周期の短縮により， $f_c > f_w$ となる弾性係数領域が増加していることが分かり，物理パラメータに依らない歩行速度の高速化が達成されていることが分かる．揺動質量の接続をバネおよびダンパーに設定した場合も同様の結果が得られた．図 3.15 および図 3.16 にその結果を示す．

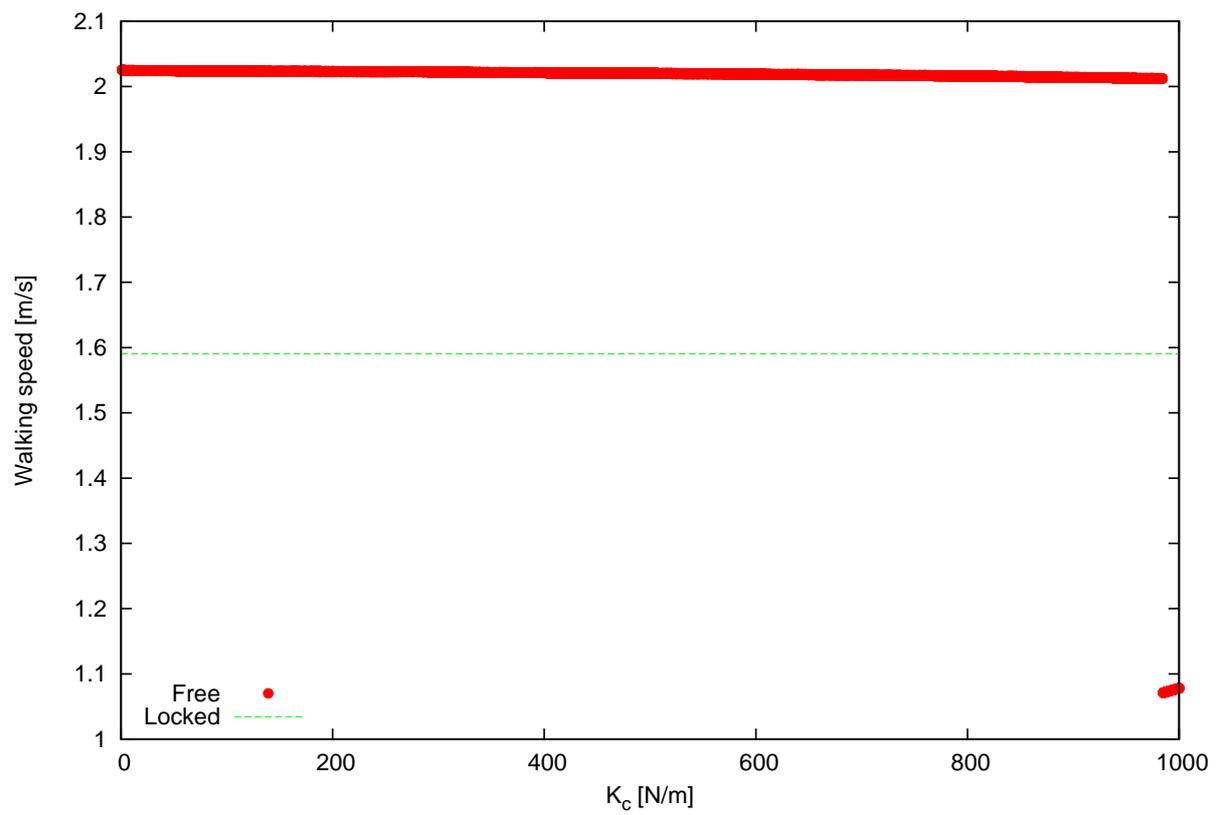


図 3.15: 位相差を与えた場合の弾性係数および粘性係数と歩行速度の関係 ($D_c = 5$ [N · s/m])

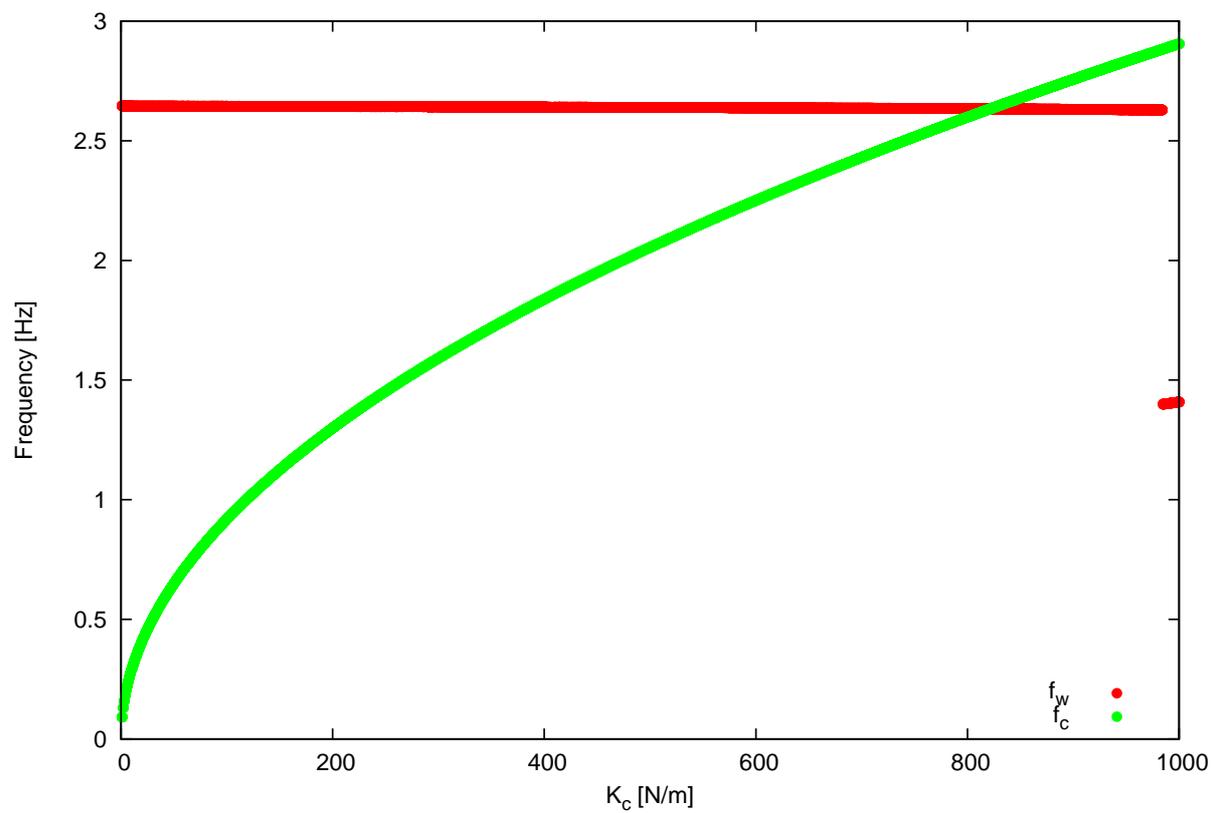


図 3.16: 位相差を与えた場合の振動数の関係 ($D_c = 5$ [N · s/m])

3.6 段差の乗り越え

歩行速度以外の性能指標として，平坦でない床面を歩行する場合を考える．まず，両 RW が同時に段差高さ h [m] を乗り越える場合の歩行シミュレーションを行った．RW1 に一定トルクを入力することにより平地歩行を行い， h を 0.05, 0.10, 0.15, 0.20 [m] の 4 パターンに設定し，段差の乗り越えが可能かどうかを判定したものを図 3.17 に示す．段差が高くなるにつれて歩行可能な弾性係数領域が減少していることが分かる．また，同位相領域と逆位相領域では，逆位相領域の方が歩行可能な弾性係数領域が増大している．

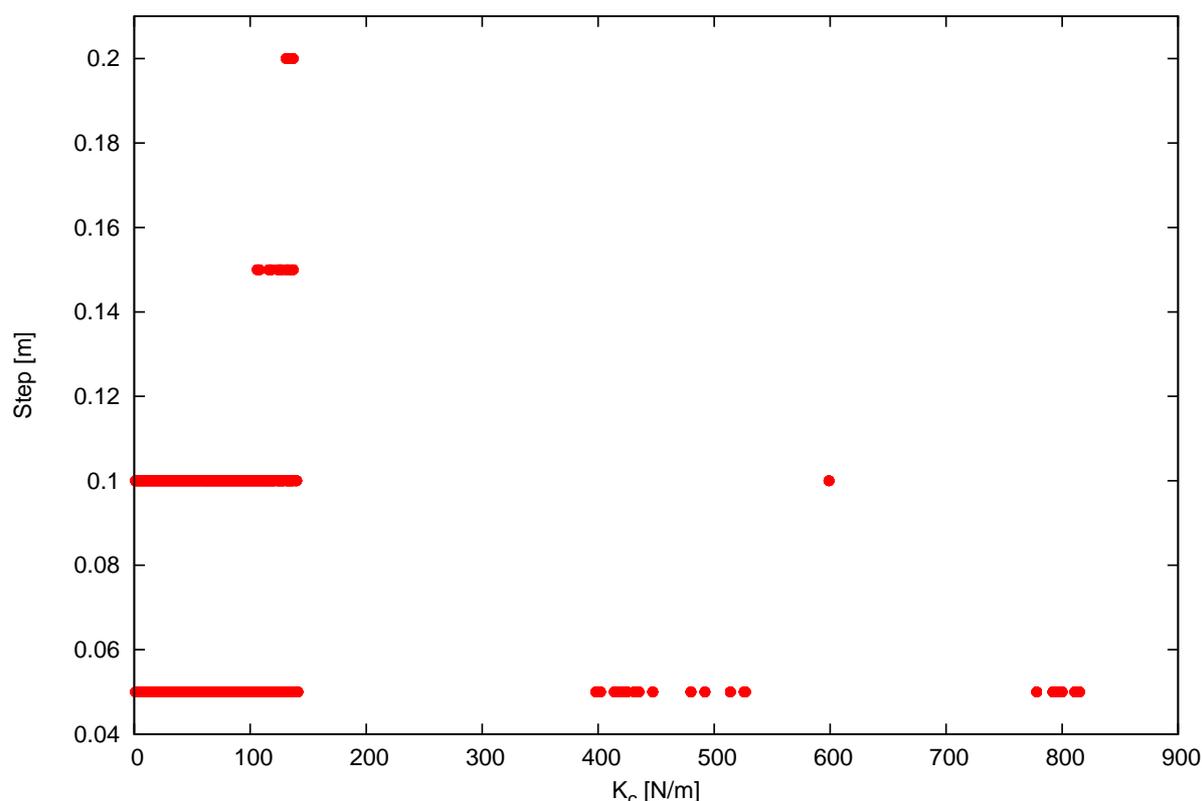
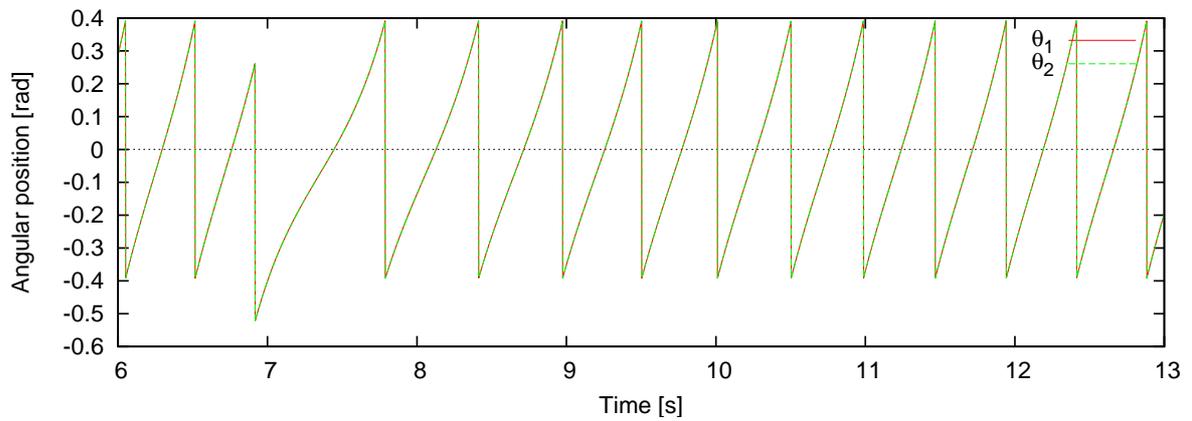
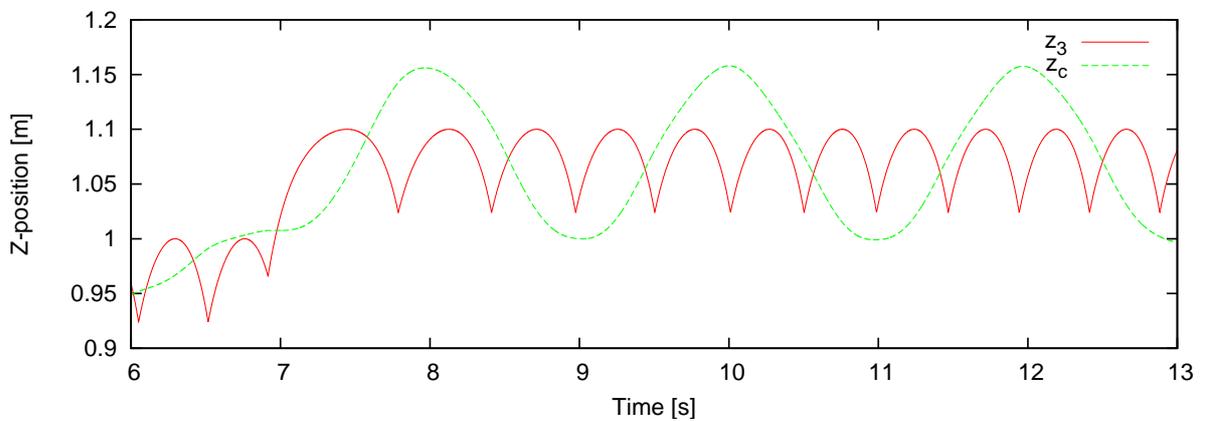


図 3.17: 乗り越え可能段差（バネによる接続）

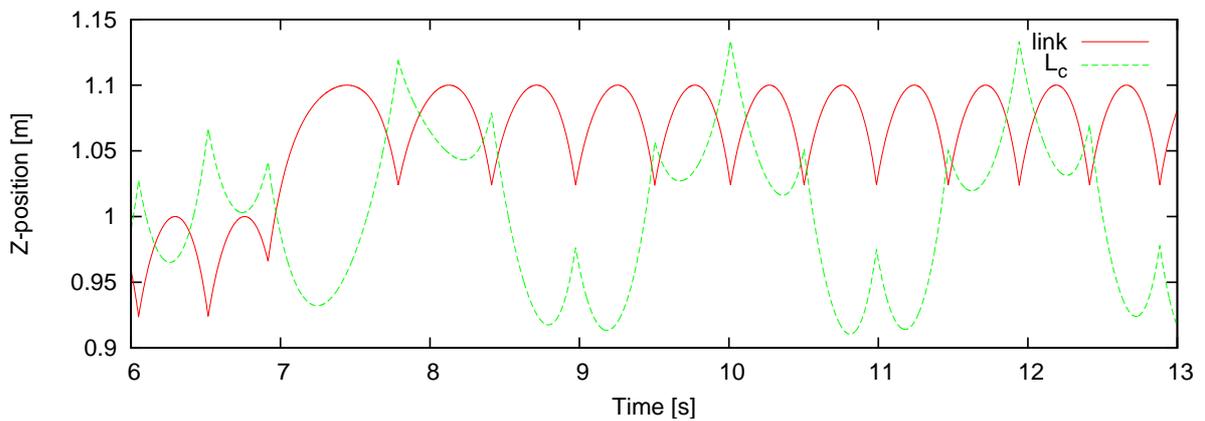
段差乗り越え前後の CRW の様子を示したものが図 3.18 である．まず，図 3.18 (a) を見ると段差を乗り越える際の支持脚交換が，通常よりも浅い支持脚角度で行われていることが分かる．これはシミュレーション上で確実に段差を乗り越えていることを示すものである．また，段差乗り越えの前後で揺動質量と胴体リンクの上下動の関係が変化していることがわかる．段差乗り越えの前後で位相の関係は変わっていないが，その振幅は大きく変化している．一定周期で歩行していた CRW の回転運動に乱れが生じ，バネのみではその乱れを吸収することができないためだと考えられる．



(a) 支持脚角度の変化



(b) Z 軸方向の絶対変位



(c) Z 軸方向の相対変位

図 3.18: 段差乗り越え前後のシミュレーション結果 ($K_c = 30$ [N/m])

次に、揺動質量をバネおよびダンパーで接続する場合のシミュレーションを行った。RW1 に一定トルクを入力することにより平地歩行を行い、 h を 0.05, 0.10, 0.15, 0.20 [m] の 4 パ

ターンに設定し，段差の乗り越えが可能かどうかを判定したものを図 3.19 に示す．バネのみの場合と比べると，歩行が成立する弾性領域は増加しているが，乗り越え可能な段差高さは減少している．ダンパーの付加による減衰効果で歩行速度が低下したことによると考えられる．

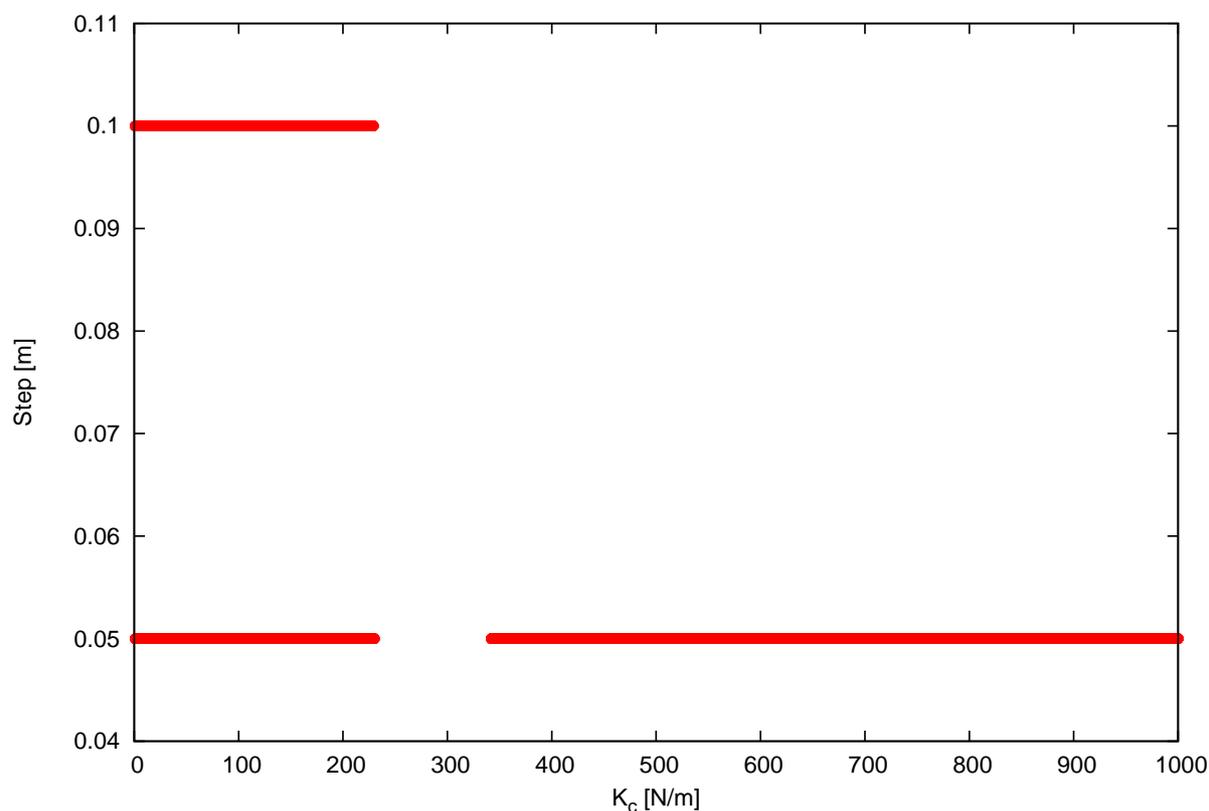
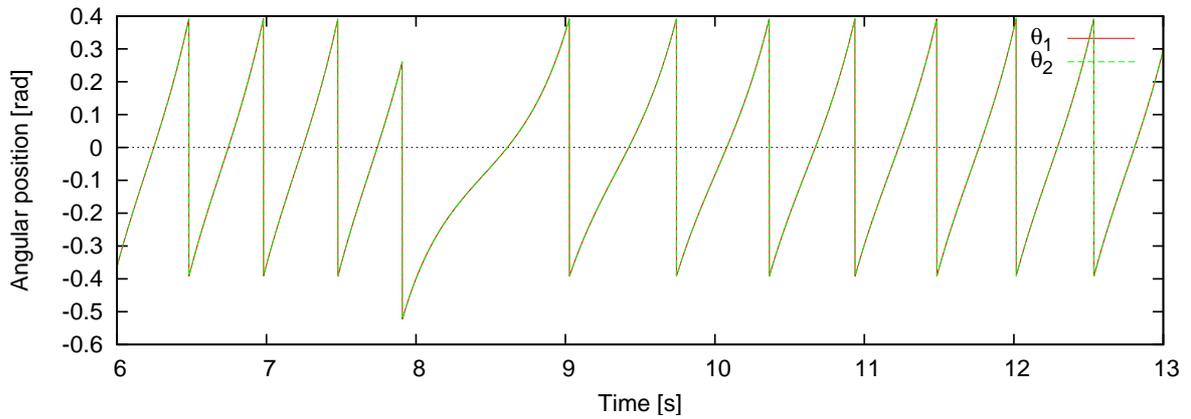


図 3.19: 乗り越え可能段差（バネおよびダンパーによる接続）

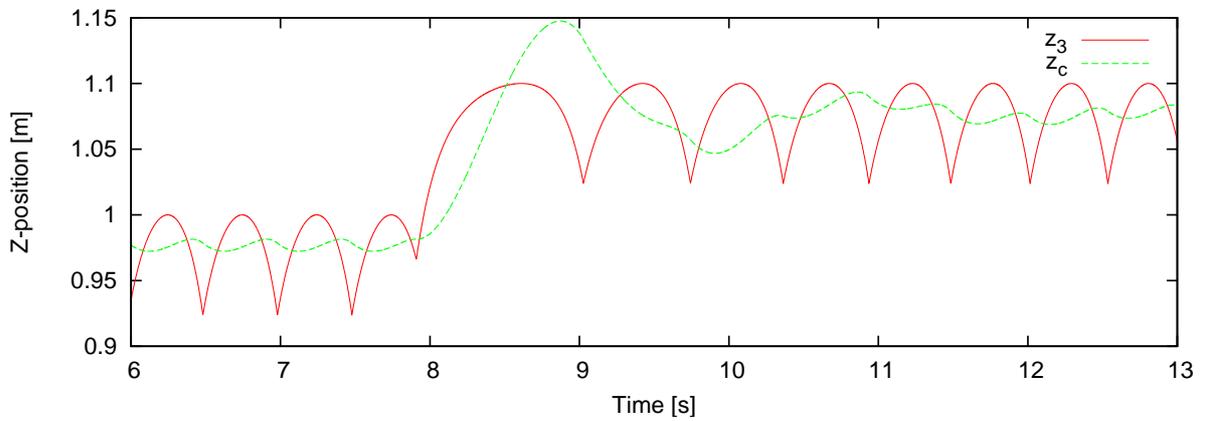
段差乗り越え前後の CRW の様子を示したものが図 3.20 である．バネのみの場合と同様に角度の時間変化をみると，段差乗り越えが確実に行われていることが分かる．一方段差乗り越えの前後で，揺動質量と胴体リンクの上下動の関係はほとんど変化していない．段差乗り越え直後に乱れた振幅も，衝突後の数歩の間に整っていることが分かる．ダンパーの減衰効果によるものと考えられる．

次に，RW1 および RW2 のどちらか一方のみが段差を乗り越えるシミュレーションを行った． h を 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30 [m] の 6 パターンに設定し，段差の乗り越えが可能かどうかを判定したものを図 3.21 に示す．両 RW が同時に段差を乗り越える場合に比べて，乗り越え可能な段差高さが向上していることが分かる．

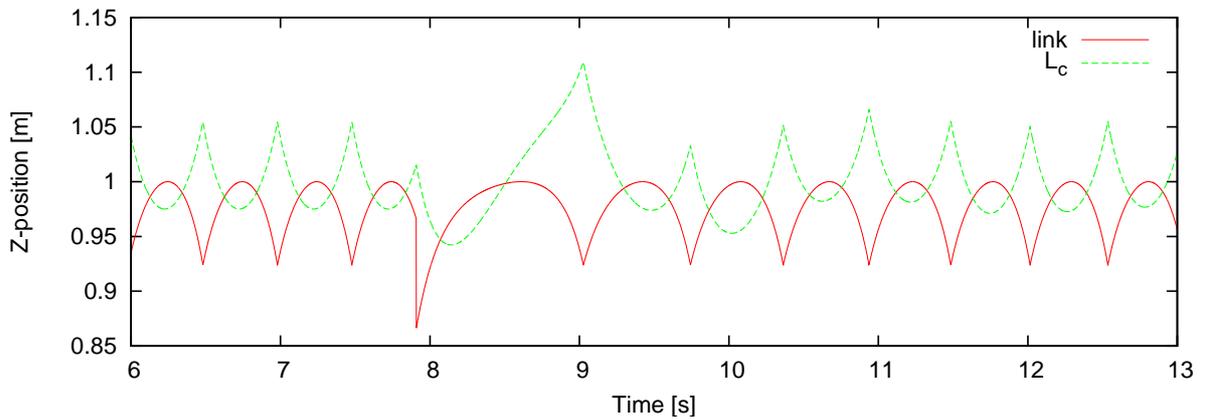
段差乗り越え前後の CRW の様子を表したものを図 3.22 および図 3.23 に示す．前後どちらの RW から乗り上げる場合でも，段差を乗り越える側の RW の方が浅い支持脚角度



(a) 支持脚角度の変化



(b) Z 軸方向の絶対変位



(c) Z 軸方向の相対変位

図 3.20: 段差乗り越え前後のシミュレーション結果 ($K_c = 30$ [N/m], $D_c = 5$ [N · s/m])

で脚交換が行われている。また、浅い支持脚角度で脚交換が行われた次の脚交換時には、段差を乗り越えた RW の支持脚角度が深くなっており、段差の乗り越えがシミュレシヨ

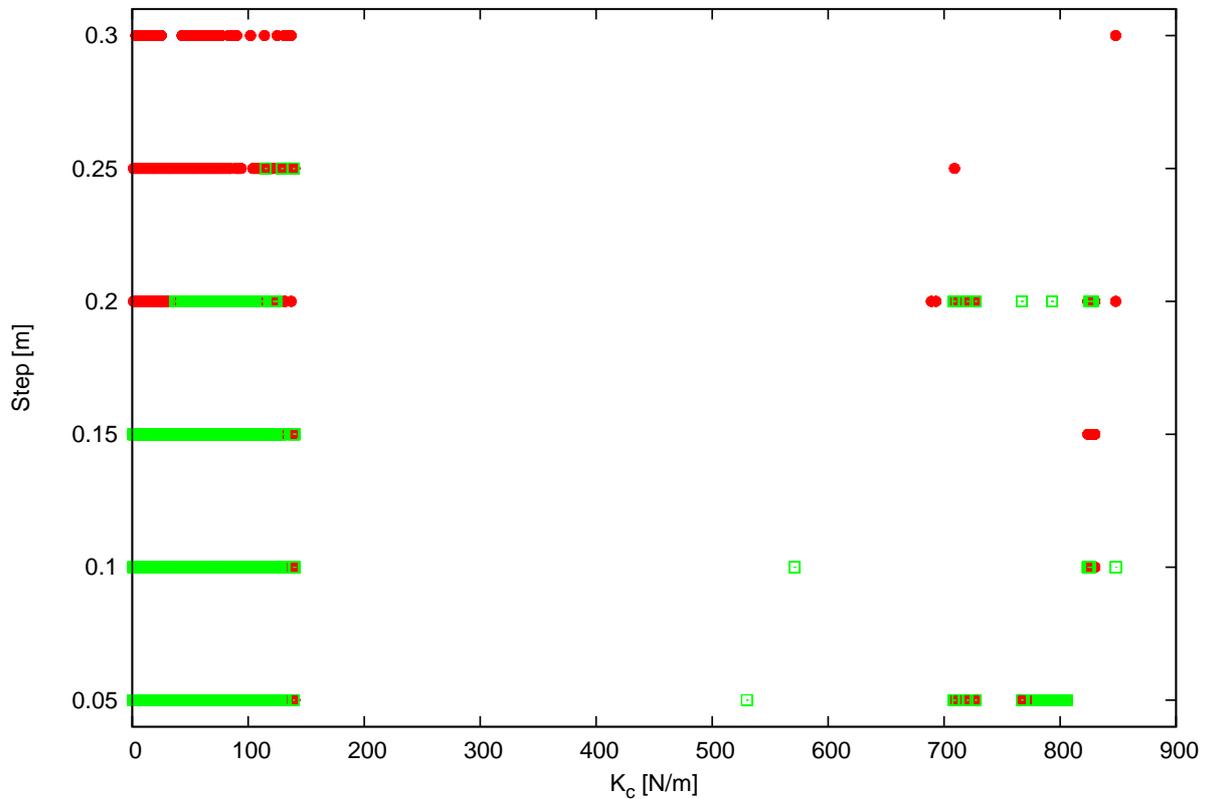
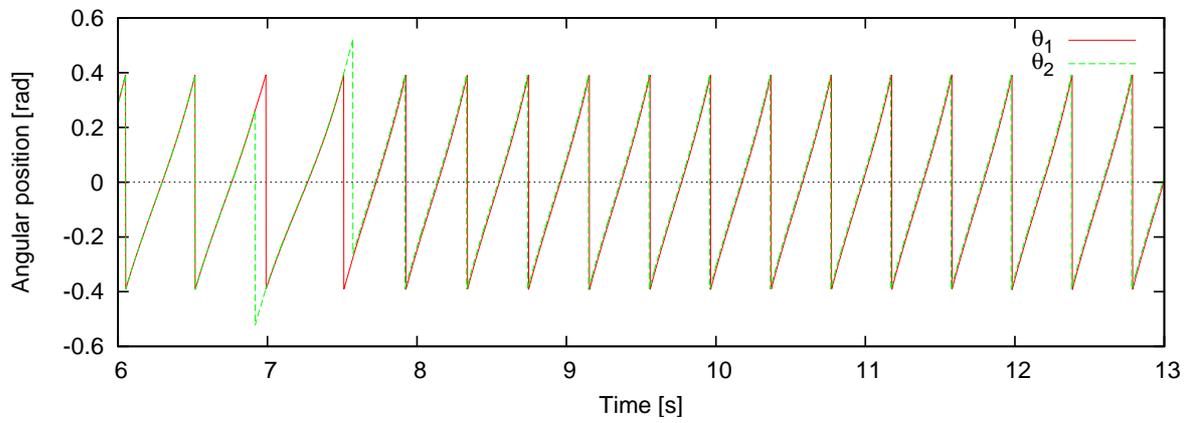
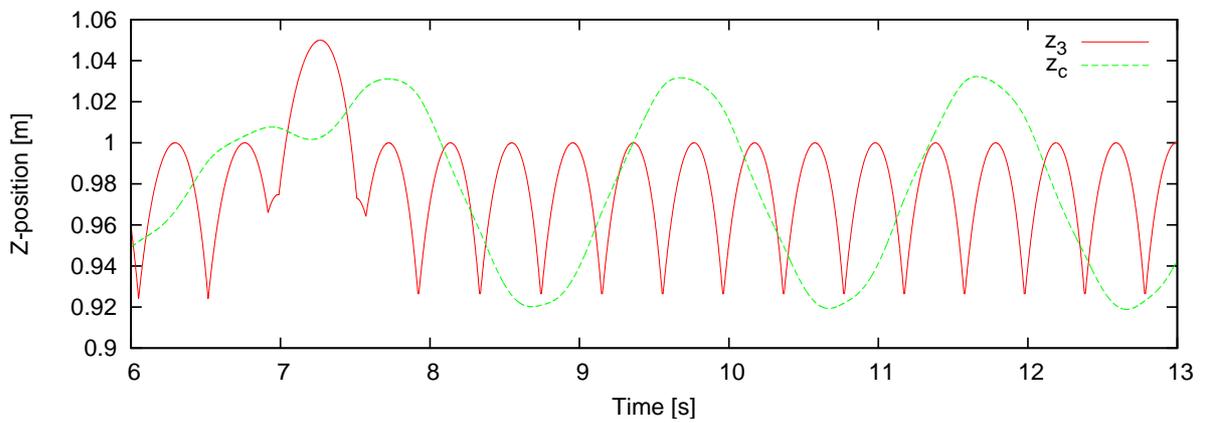


図 3.21: 乗り越え可能段差 (バネによる接続)

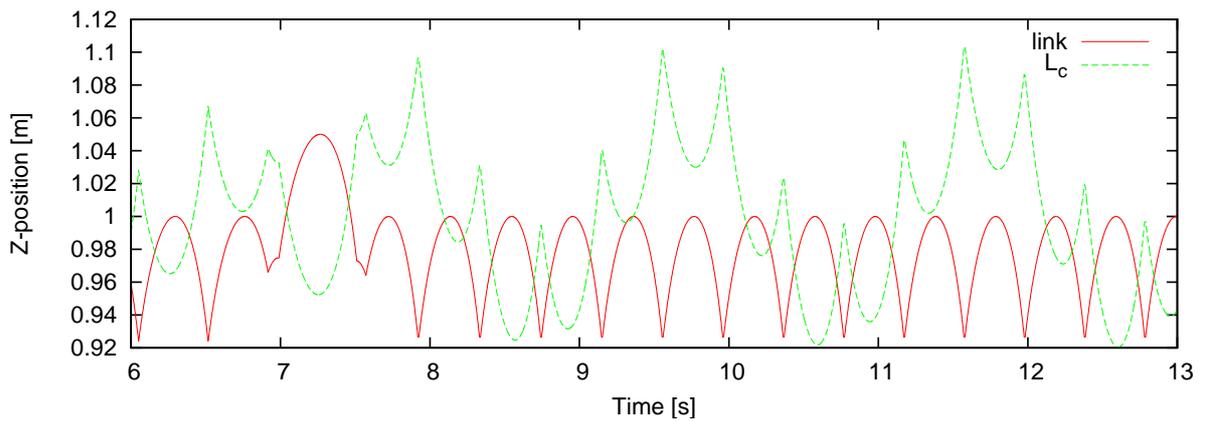
ン上で確実に行われていることがわかる．さらに片方の RW のみが段差を乗り越えることによって，前後の RW 間に位相差が与えられている．段差を乗り越えることで生じた位相差が原因で，大幅な高速化が達成されていると考えられる．揺動質量と胴体リンクの接続をバネおよびダンパーにした場合にも同様の結果が得られた．図 3.24 にその結果を示す．乗り越え可能な段差高さは減少したが，両 RW が段差を乗り越える場合と同じくダンパーの減衰効果によるものと考えられる．



(a) 支持脚角度の変化

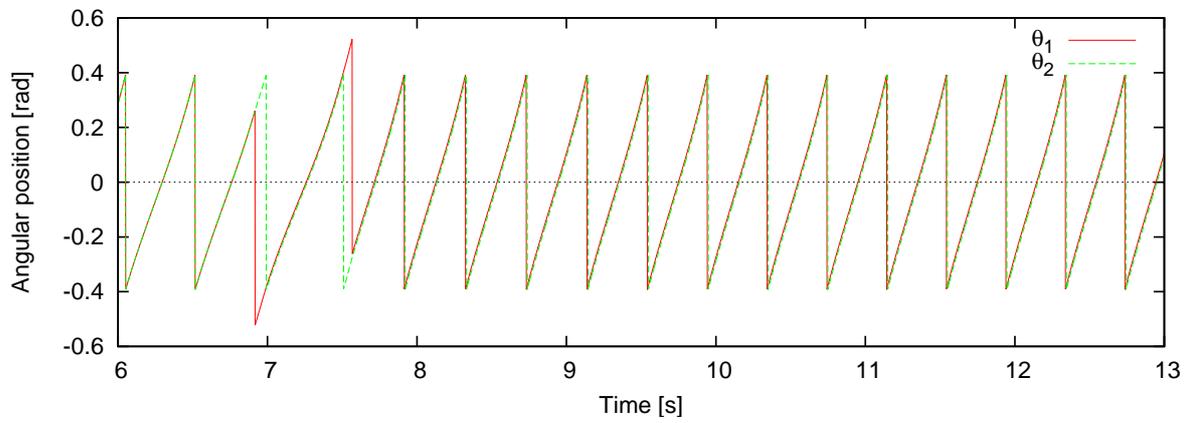


(b) Z 軸方向の絶対変位

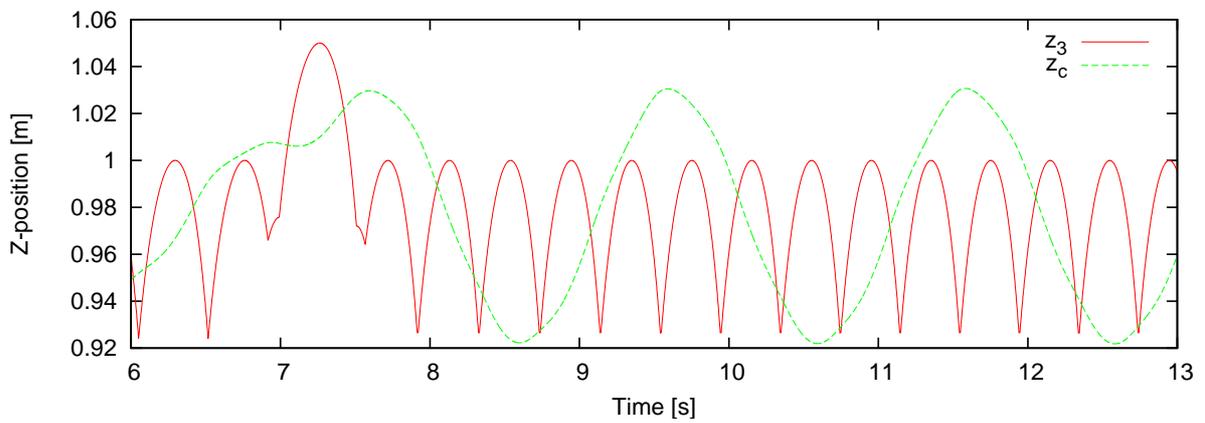


(c) Z 軸方向の相対変位

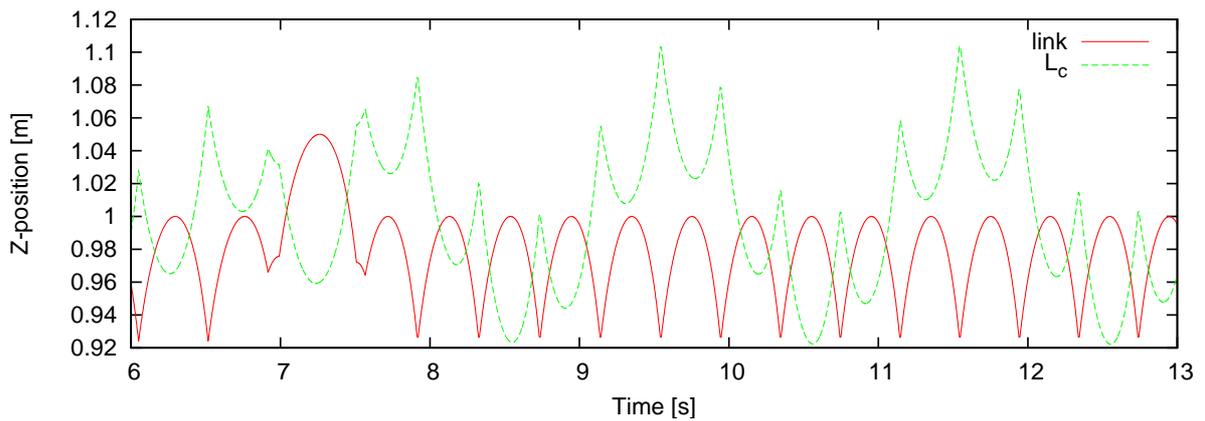
図 3.22: 段差乗り越え前後のシミュレーション結果 (RW2, $K_c = 30$ [N/m])



(a) 支持脚角度の変化



(b) Z 軸方向の絶対変位



(c) Z 軸方向の相対変位

図 3.23: 段差乗り越え前後のシミュレーション結果 (RW1, $K_c = 30$ [N/m])

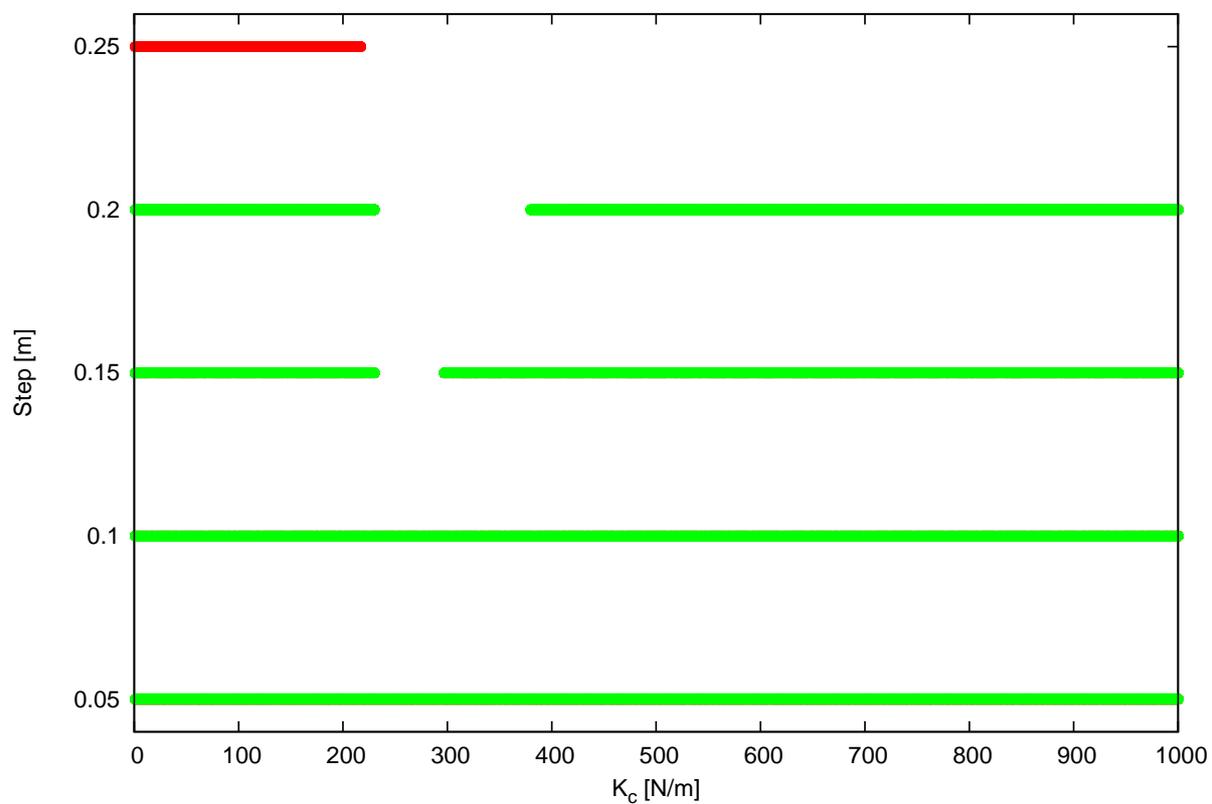
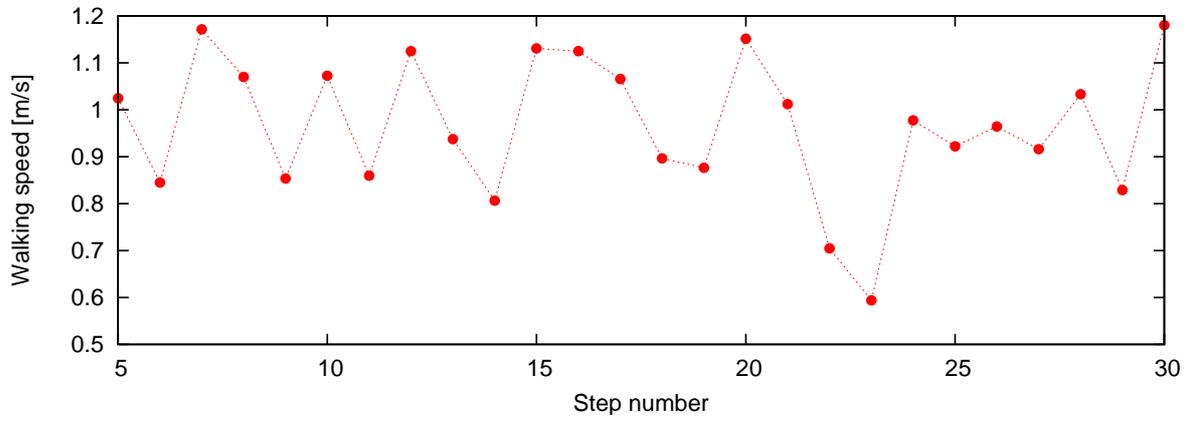


図 3.24: 乗り越え可能段差 (バネおよびダンパーによる接続)

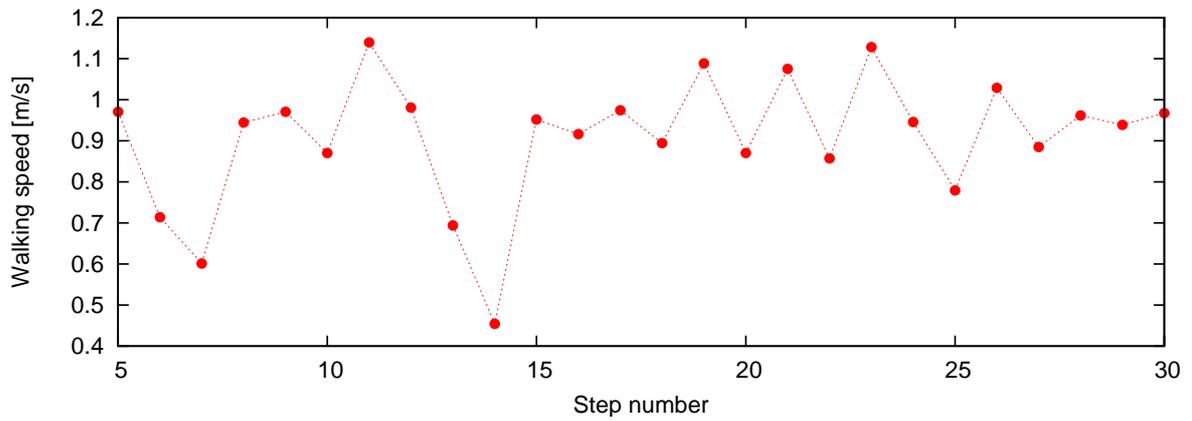
3.7 初期値による影響

前節までのシミュレーションの初期値は、すべて自然な倒れ込みを開始するように、初期角速度をゼロとし小さい初期角度を与えていた。本節では、初期値として角速度を与えた場合にどのような結果を得られるか検証した。第3.3節において、ダンパーの粘性係数 $D_c = 5$ [N・s/m] の場合、弾性係数 K_c が大きい領域において1周期に収束しない歩容がみられていた。この領域にあたる弾性係数について、CRWの支持脚角度 θ_1 および θ_2 に与える角速度 $\dot{\theta}$ には $0.1 - 2.0$ [rad/s] の範囲内で 0.1 [rad/s] 刻みで変化させた値を、胴体リンク角度 θ_3 は計算によって算出した値を初期値とし、歩行シミュレーションを実行した。検証を行った弾性係数の内、 $K_c = 830$ [N/m] の場合についてのシミュレーション結果を図3.25に示す。初期値として与える $\dot{\theta}$ が 1.2 [rad/s] 以上になると、1周期の歩行となった。それ以下の $\dot{\theta}$ では1周期の歩行には収束しなかったが、与える角速度が大きくなるにつれて歩行速度のバラつきは小さくなった。

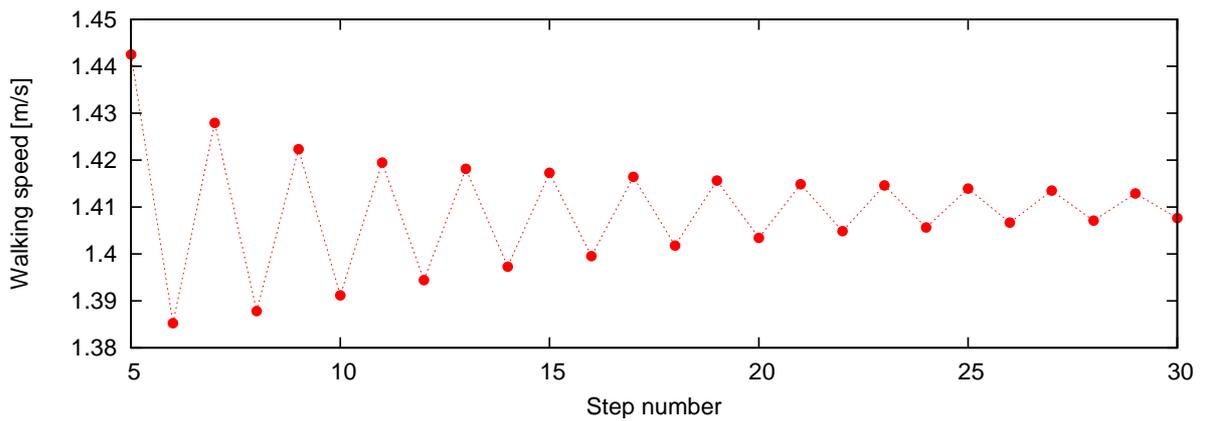
以上の結果を踏まえ、第3.3節と同様に $K_c = 1 - 1000$ [N/m] の全弾性係数領域について、 $\dot{\theta}$ として 1.5 [rad/s] を与えてシミュレーションを実行した。その結果を図3.26および図3.27に示す。初期角速度を与えない場合の図3.6と比べると、歩行周期が不安定だった弾性係数領域について1周期の歩行が現れていることに加え、速度がジャンプする境界の弾性係数が大きくなっていることがわかる。



(a) $\dot{\theta} = 0.5$ [rad/s]



(b) $\dot{\theta} = 1.0$ [rad/s]



(c) $\dot{\theta} = 1.5$ [rad/s]

図 3.25: 角速度を与えた場合の歩行速度 ($K_c = 830$ [N/m])

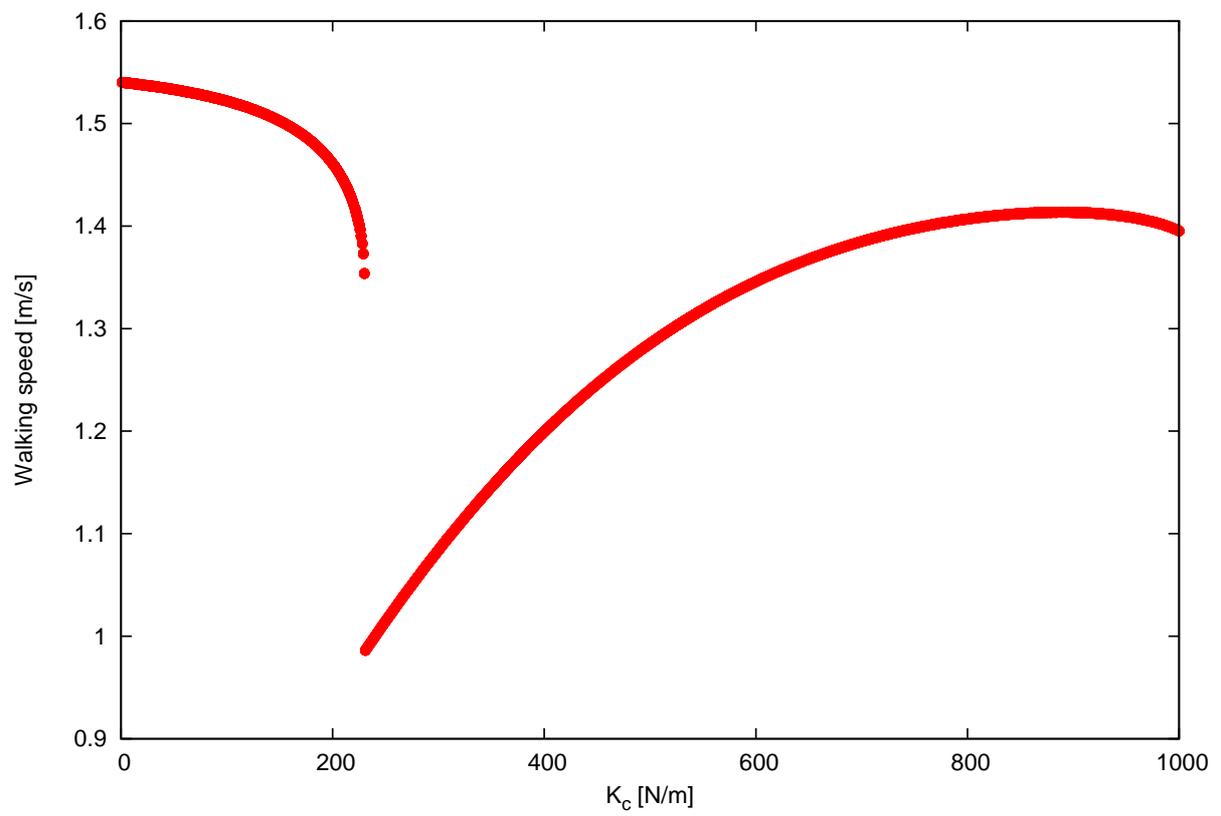


図 3.26: 角速度を与えた場合の弾性係数および粘性係数と歩行速度の関係

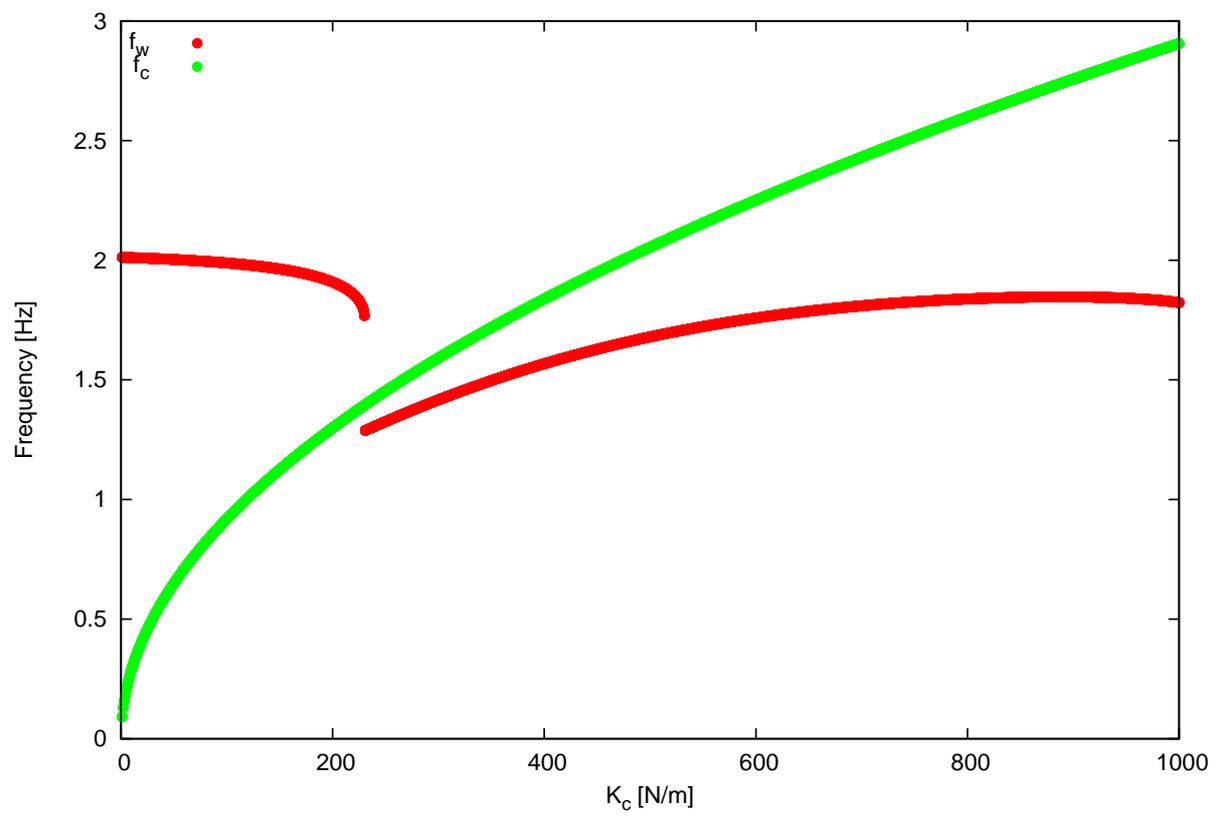


図 3.27: 角速度を与えた場合の振動数の関係

3.8 ヒステリシス現象

第 3.7 節での結果より，ある弾性係数領域では 2 つ以上の安定な解が存在する可能性があることがわかった．本節ではこの複数の安定な解を生じる領域を確認するために，初期値として与える値を以下のように設定して歩行シミュレーションを行った．

- 弾性係数 $K_c = 1$ [N/m] のシミュレーションを実行する
- 次のシミュレーションの初期値として $K_c = 1$ [N/m] 時の衝突直後の定常状態量を与える
- 以降のシミュレーションも同様に行い，常に 1 つ前の結果を初期値とする

初期の弾性係数 K_c の値は 1 および 1000 [N/m] とし，それぞれ K_c を 1 [N/m] ずつ増減させてシミュレーションを行った結果を図 3.28 に示す．赤色の“ ”が $K_c = 1$ [N/m] から出発した場合，緑色の“ ”が $K_c = 1000$ [N/m] から出発した場合の歩行速度をそれぞれ意味する．図 3.28 において $K_c = 1$ [N/m] より出発した場合は $K_c = 300$ [N/m] 付近で速度のジャンプが生じているのに対し， $K_c = 1000$ [N/m] より出発した場合には $K_c = 180$ [N/m] 付近でジャンプが生じており， $K_c = 180 - 300$ [N/m] の弾性係数領域で 2 つの安定な解が存在することがわかる．この双安定な領域に含まれる $K_c = 250$ [N/m] の場合について，それぞれの方向から出発した場合の胴体リンクと揺動質量の Z 軸方向の相対変位量を表したものが図 3.29 である．図より明らかなように，同じ弾性係数であるが胴体リンクと揺動質量の上下動はそれぞれ逆位相と同位相となっており，図 3.28 より明らかなように歩行速度にも大きな差が生じている．以上の結果から初期値によって収束する歩行速度が変化するヒステリシスの存在が確認できた．

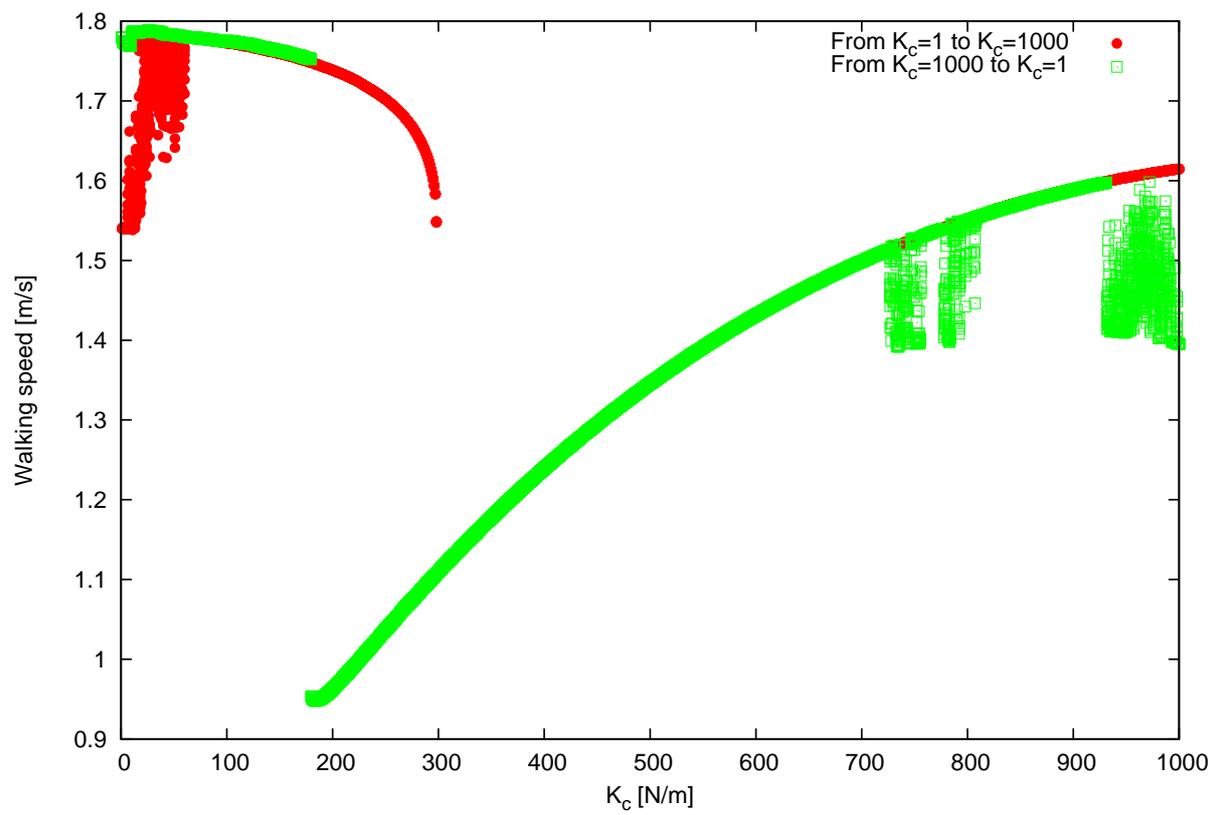
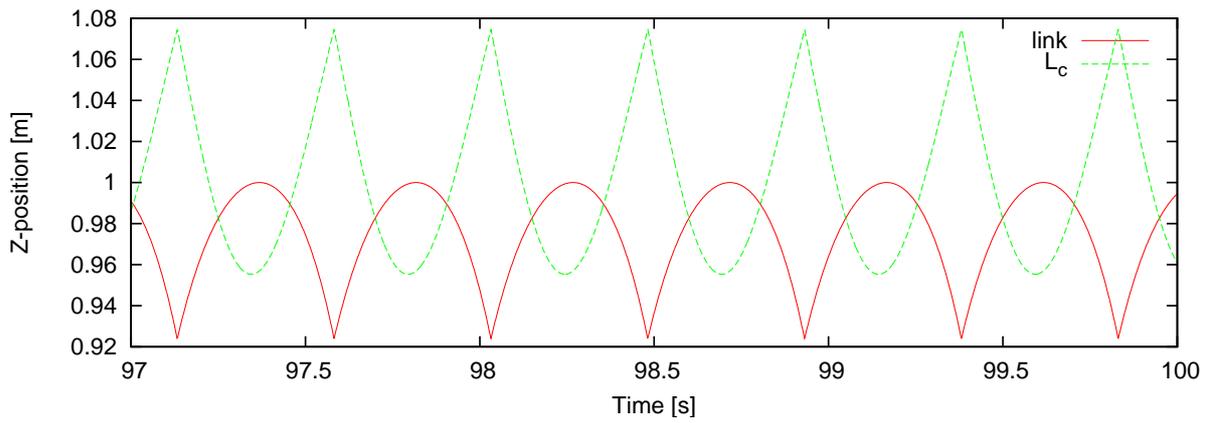
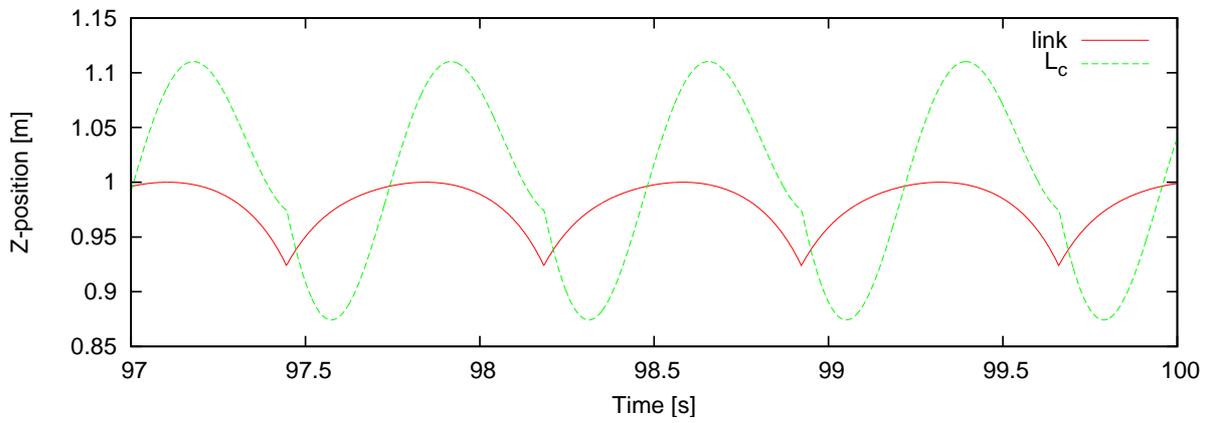


図 3.28: 歩行速度とヒステリシス ($D_c = 5$ [N · s/m])



(a) $K_c = 1$ [N/m] より出発した場合



(b) $K_c = 1000$ [N/m] より出発した場合

図 3.29: $K_c = 250$ [N/m], $D_c = 5$ [N/m] の Z 軸方向の相対変位

第4章 実験的検証

4.1 実験器の概要

第3章で得られたシミュレーション結果を検証すべく、実験による検証を行った。図4.1に揺動質量を取り付けたCRW実験器の概観を示す。先行研究[5]において開発した実験器の胴体リンク中央部分に実験用の揺動質量ユニットを取り付けたものである。胴体リンクに対して垂直を成すようにレールを取り付け、レールに沿って上下動するガイドに重りを取り付けることで運動を上下方向に制限している。また、図2.2のシミュレーションモデルとはバネの取り付け位置が異なるが、これは単純に構造上の問題である。弾性係数が小さいバネは非常に柔らかいため、非常に長い自然長を持つバネを使用しなければならない。モデルに忠実な再現を行おうとする場合、鉛直方向に極端に長いユニットとなってしまう恐れがある。この問題を解消するため、プーリを介してバネの取り付け方向を変更している。実験器の物理パラメータは表4.1に示した通りである。

表 4.1: 物理パラメータ

m_1	0.8	kg	m_c	0.913	kg
m_2	0.8	kg	α_1	22.5	deg
m_3	1.3	kg	α_2	22.5	deg
l_1	0.149	m	I_1	1.3×10^{-3}	kg·m ²
l_2	0.149	m	I_2	1.3×10^{-3}	kg·m ²
l_3	0.200	m	I_3	2.7×10^{-3}	kg·m ²

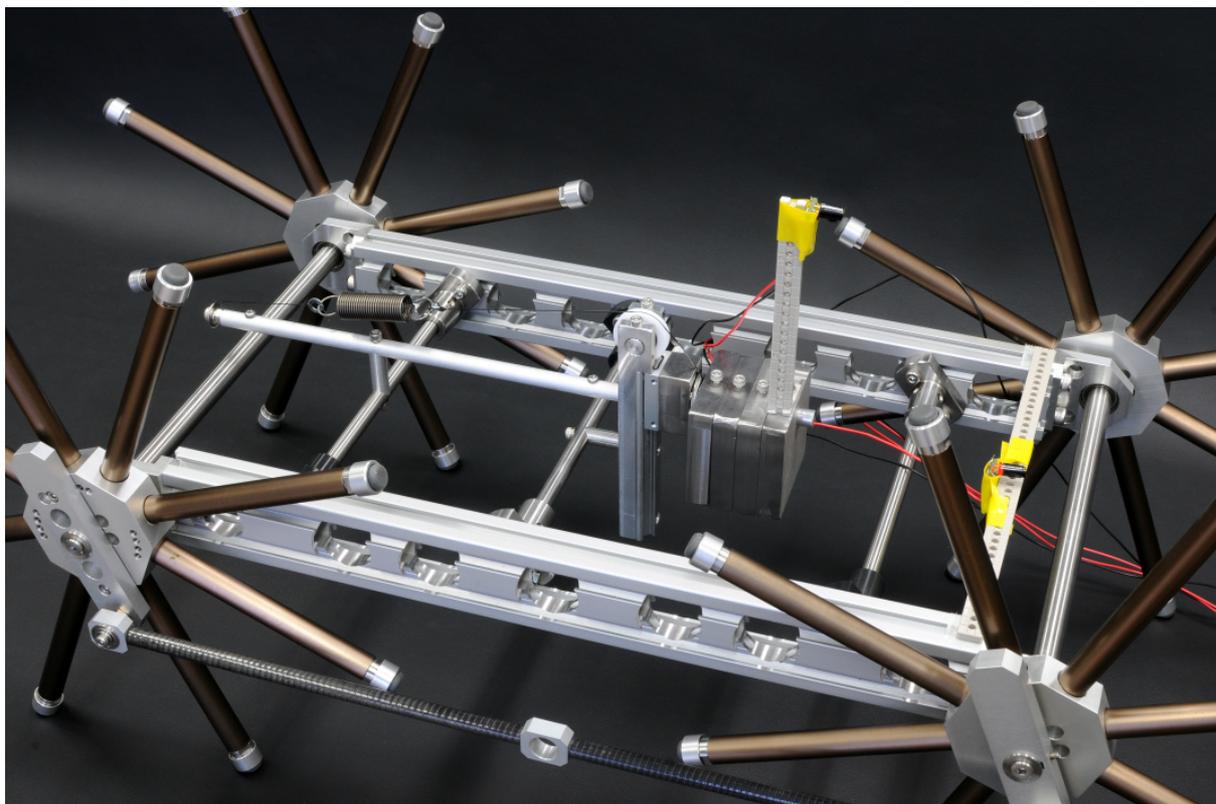


図 4.1: 揺動質量を持つ連結型リムレスホイール実験器

4.2 実験結果

弾性係数 K_c が 216.6, 237.2 および 401.6 [N/m] の 3 種類のバネを用い, 斜面角度 ϕ を 3.0, 3.5, 3.9 および 4.2 [deg] の 4 パターンに設定して歩行速度を測定した. データの取得手順は以下の通りである.

- トレッドミル上に CRW 実験器を置き, バネを自然長に保った状態からスタートさせる
- 歩行が安定した時点でトレッドミルの速度を取得する
- バネを付け替えて手順を繰り返す

データの取得は各斜面角度および弾性係数について, それぞれ 5 回ずつ行っている. 一部の斜面角度においては, 揺動質量の振動が激化するなどの理由でデータの修得ができなかった. データの取得と併せて胴体リンクと揺動質量の位相を確認するため, 図 4.2 に示すように揺動質量と CRW 実験器の胴体部に LED を取り付け, 60 [枚/s] の高速撮影により, 揺動質量と胴体リンクがどのような位相関係で上下動しているかを確認した. 以下, 表 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 および図 4.3 に実験の結果を示す.

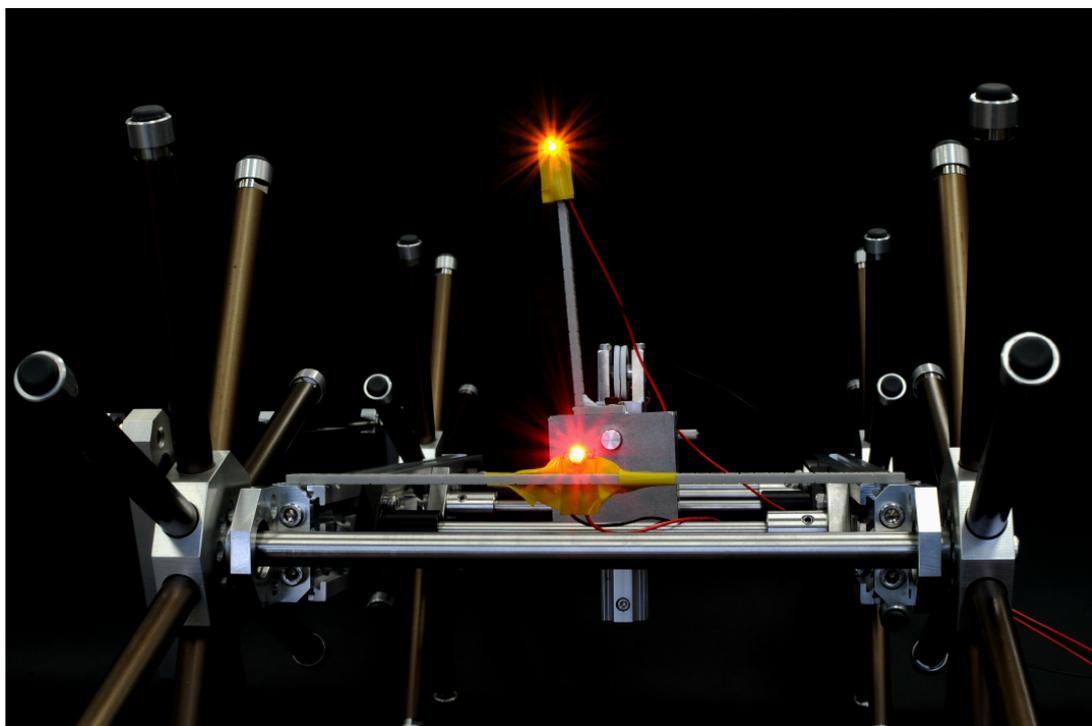


図 4.2: LED を点灯させた状態

表 4.2: 実験結果 ($\phi = 3.0$ [deg])

弾性係数 [N/m]	実験回数					平均
	1	2	3	4	5	
401.6	0.340	0.332	0.327	0.335	0.332	0.2968

表 4.3: 実験結果 ($\phi = 3.5$ [deg])

弾性係数 [N/m]	実験回数					平均
	1	2	3	4	5	
固定	0.276	0.276	0.264	0.264	0.260	0.268
216.6	0.374	0.378	0.380	0.384	0.386	0.3804
237.3	0.381	0.379	0.385	0.384	0.372	0.3802
401.6	0.340	0.332	0.327	0.335	0.332	0.3332

表 4.4: 実験結果 ($\phi = 3.9$ [deg])

弾性係数 [N/m]	実験回数					平均
	1	2	3	4	5	
固定	0.333	0.308	0.326	0.319	0.315	0.3202
216.6	0.415	0.408	0.408	0.407	0.415	0.4106
237.3	0.422	0.418	0.418	0.412	0.411	0.4162

表 4.5: 実験結果 ($\phi = 4.2$ [deg])

弾性係数 [N/m]	実験回数					平均
	1	2	3	4	5	
固定	0.335	0.338	0.339	0.336	0.335	0.336
216.6	0.476	0.463	0.445	0.442	0.447	0.4546
237.3	0.448	0.453	0.456	0.447	0.444	0.4496

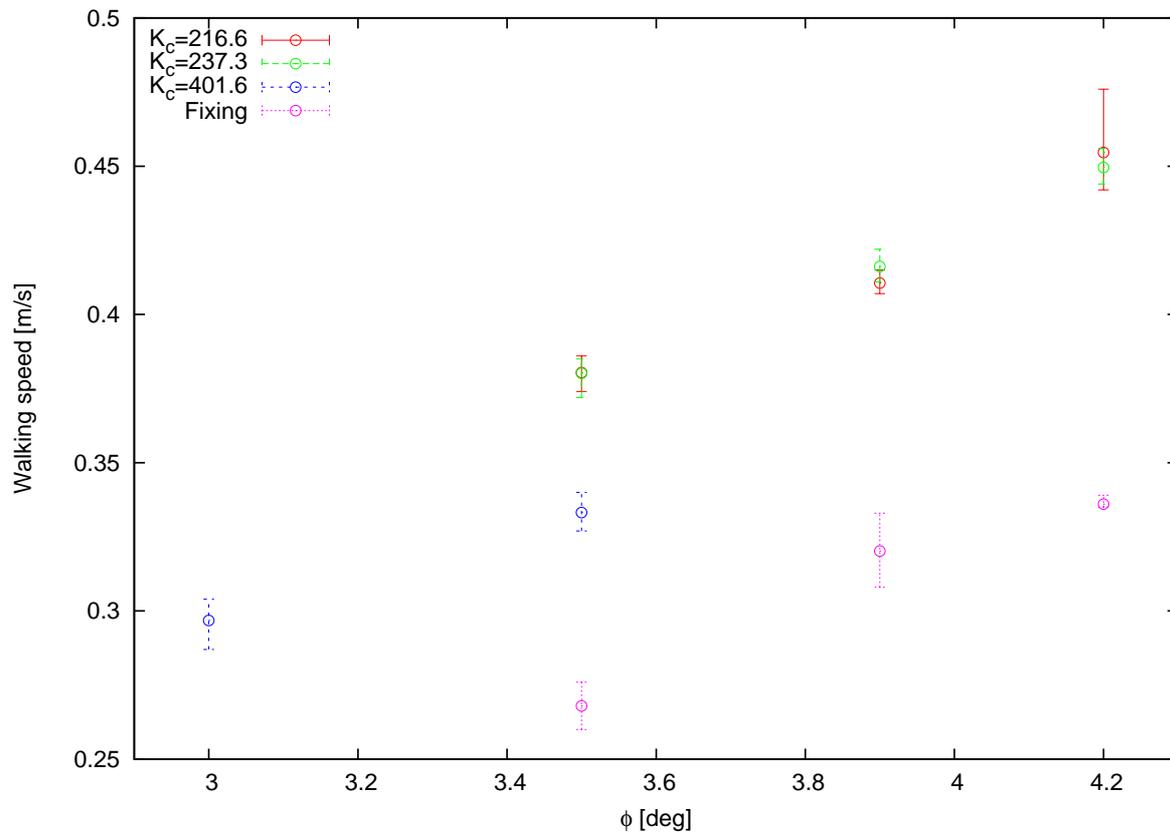


図 4.3: 実験結果のまとめ

図 4.3 より、全ての斜面角度において揺動質量を胴体に固定する場合よりも、自由に上下動させる場合の方が歩行速度が向上していることがわかる。最も斜面角度が緩やかな表 4.2 の場合については質量固定時のデータが無いが、斜面が緩やか過ぎて受動歩行が成立しなかったためである。また、3 種類のバネの内、弾性係数が 401.6 [N/m] の場合は他の 2 つのバネに比べて歩行速度が遅くなっている。表 4.3 を例にとり、式 (3.2) および (3.2) を用いて歩行と揺動質量の振動数を計算すると以下ようになる。

$$\bullet K_c = 216.6 \text{ [N/m]}$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{216.6}{0.913}} = 2.4514 \text{ [Hz]} \quad (4.1)$$

$$f_w = \frac{0.3804}{D} = 3.3368 \text{ [Hz]} \quad (4.2)$$

$$\bullet K_c = 237.3 \text{ [N/m]}$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{237.3}{0.913}} = 2.5659 \text{ [Hz]} \quad (4.3)$$

$$f_w = \frac{0.3802}{D} = 3.3351 \text{ [Hz]} \quad (4.4)$$

$$\bullet K_c = 401.6 \text{ [N/m]}$$

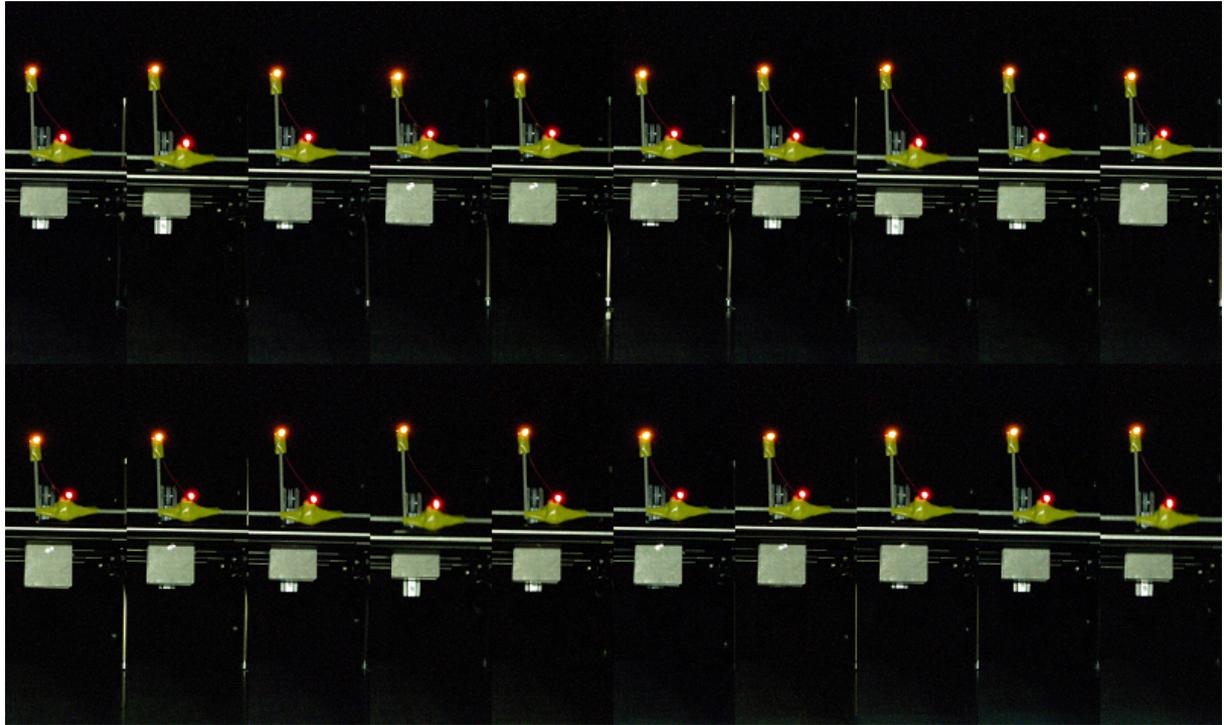
$$f_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{401.6}{0.913}} = 3.338 \text{ [Hz]} \quad (4.5)$$

$$f_w = \frac{0.3332}{D} = 2.9282 \text{ [Hz]} \quad (4.6)$$

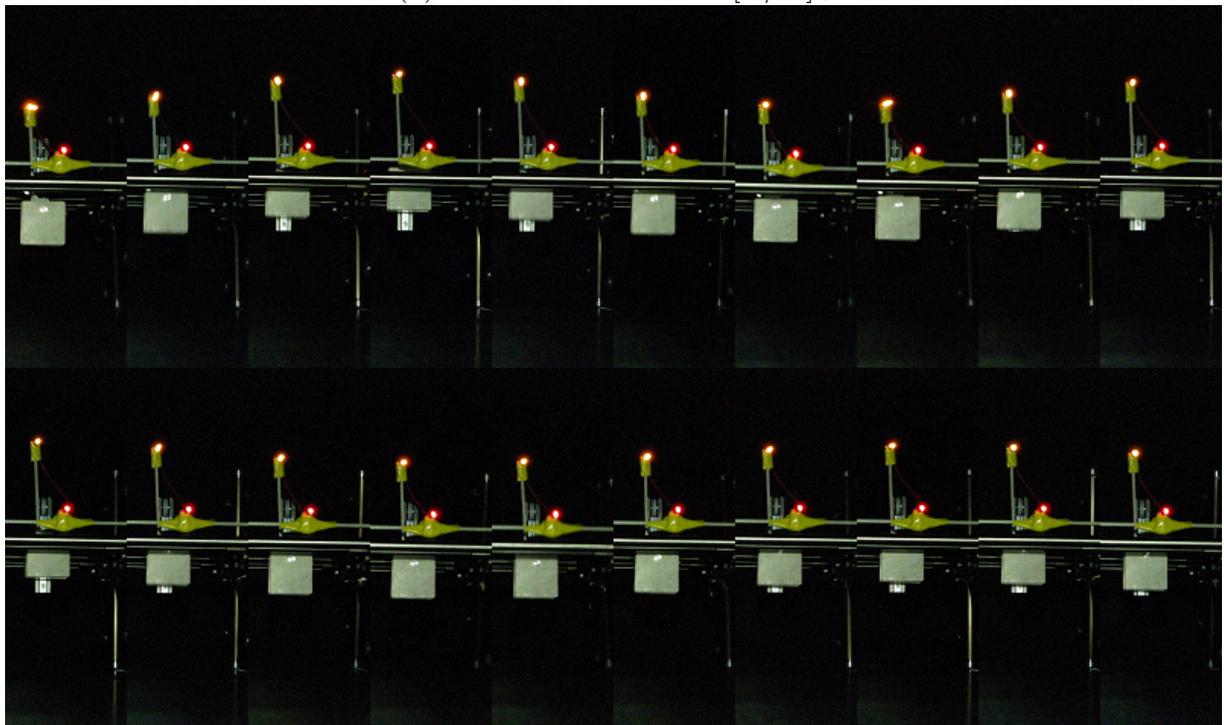
ただし， D [m] は CRW 実験器が一步あたりに移動する距離であり次式で算出される．

$$D = 2l \sin \alpha \quad (4.7)$$

式中の l および α は，CRW 実験器の脚長および股角度を表す．各弾性係数における揺動質量の振動数 f_c [Hz] と歩行の振動数 f_w [Hz] を比べると， $K_c = 401.6$ [N/m] の場合のみ両者の関係が $f_c > f_w$ となっている．また，このときの歩行速度は他の弾性係数を持つバネの場合よりも遅くなっている．一方，残りの2つのバネの場合は振動数の関係が $f_c < f_w$ となっており，大小関係が逆転している．第3章第3.4節の結果より，振動数の関係と歩行速度の関係を示すシミュレーション結果を裏付ける結果を得ることができた．図4.4に，実験器の揺動質量と胴体リンクの上下動を連続撮影したものを示す．どちらの図も時系列は左上から横に流れていくようになっている．図4.4 (a) は $K_c = 216.6$ [N/m] の場合を撮影したものである．胴体リンクの上下動に対して揺動質量が逆位相で上下動していることが見てわかる．図4.4 (b) は $K_c = 401.6$ [N/m] の場合を撮影したものである．こちらは揺動質量と胴体リンクの上下動が同位相になっており，それぞれの弾性係数における高速化要因が異なることは明らかである．



(a) 逆位相 ($K_c = 216.6$ [N/m])



(b) 同位相 ($K_c = 401.6$ [N/m])

図 4.4: 連続撮影写真

第5章 まとめと今後の課題

本論文では揺動質量を取り付けた CRW について数値シミュレーションおよび実験的検証を行った結果を報告し、揺動質量が歩行速度の向上に寄与することを示した。

揺動質量を胴体リンクに接続するバネの弾性係数によって歩行速度の分布が分割され、それぞれの領域で揺動質量が異なる影響を及ぼし歩行速度が向上することがわかった。前半の速度分布領域では、位相差に起因するヤコビアン¹の切り替えが無いにも関わらず大幅な高速化を実現することができ、全重心軌跡の平坦化の影響が大きいことを示した。一方、後半の速度分布領域においては、全重心軌跡の上下動が激化するように揺動質量が振動するが、RW の回転運動を助長することで歩行の高速化につながることを示した。さらに粘弾性を与えることで歩行の成立する領域が拡大することを示した。この場合、弾性のみを与えるよりも歩行速度は減少するが、分岐が見られなくなり安定な歩行が可能となる。

また、振動数の大小関係によって、CRW と揺動質量の位相関係が決定されることを示した。CRW の歩行の振動数 f_w が揺動質量の持つ振動数 f_c よりも大きい場合に、互いの上下動が逆位相となっている。さらに、前後の RW 間に位相差を与えることで f_w を増大させ、逆位相となる弾性係数領域の拡大と歩行速度の向上が可能であることを示した。加えて、歩行速度以外の性能評価方法として段差の乗り越えが可能かどうかを検証し、揺動質量を持つ CRW の方が段差乗り越えの面でも優れていることを示した。その一方で、シミュレーションの初期条件によって収束する歩行速度が変化するヒステリシス現象も見られた。

今後の課題としては、構造および制御入力²の工夫による効率的な高速化手法について検討することや、ヒステリシスなどの歩行速度が分岐する現象の解析などが挙げられる。

参考文献

- [1] T. McGeer, “Passive dynamic walking”, *Int. J. of Robotics Research*, Vol. 9, No. 2, pp.62-82, 1990.
- [2] A. C. Smith and M. D. Berkemeier, “Passive dynamic quadruped walking”, *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.34-39, 1997.
- [3] C. D. Remy, K. Buffinton and R. Siegwart, “Stability Analysis of Passive Dynamic Walking of Quadrupeds”, *The International Journal of Robotics Research*, pp.1173-1185, 2010.
- [4] 吉兼匡昭, 杉本靖博, 大須賀公一, “四脚受動的歩行における胴体要素の影響に関する研究”, *ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集*, pp.1173-1185, 2010.
- [5] R. Inoue, F. Asano, D. Tanaka and I. Tokuda, “Passive dynamic walking of combined rimless wheel and its speeding-up by adjustment of phase difference”, *Proc. of the 2011 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp.2747-2752, 2011.
- [6] R. M. Alexander, “Breathing While Trotting”, *Science*, Vol. 9, No. 5131, pp.196-197, 1993.
- [7] L. C. Rome, L. Flynn, E. M. Goldman and T. D. Yoo, “Generating Electricity While Walking with Loads”, *Science*, Vol. 309, No. 5741, pp.1725-1728, 2005.
- [8] L. C. Rome, L. Flynn and T. D. Yoo, “Biomechanics: Rubber bands reduce the cost of carrying loads”, *Nature*, Vol. 444, No. 7122, pp.1023-1024, 2006.
- [9] 中西大輔, 杉本靖博, 大須賀公一, 山海嘉之, “揺動現象に着目した三次元準受動的動歩行の発現”, *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概要集*, pp.1190-1191, 2011.
- [10] 木林傑, 杉本靖博, 大須賀公一, “揺動を用いた四脚準受動的動歩行ロボットの開発”, *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概要集*, pp.1192-1193, 2011.

謝辞

本研究を進めるにあたり，熱心かつ丁寧な御指導を賜りました浅野文彦准教授に心より感謝致します．実験器の開発にご協力頂くと共に，研究に関する御助言を頂いた徳田功准教授に深く感謝致します．ロボティクスの観点から，鋭い御指摘を頂いた丁洛榮准教授に深く感謝致します．実験器の設計と開発にご協力していただいた，ナノマテリアルテクノロジーセンター工作室の仲林祐司氏に深く感謝致します．最後に，多忙な中実験にご協力頂くと共に，日々の研究生活を支えてくださった浅野文彦研究室の河本隼治氏，大島正嵩氏，安田芳樹氏および肖軒氏に深く感謝致します．