

Title	脚部に動吸振器を持つ2脚ロボットの高速かつロバストな歩容生成に関する研究
Author(s)	阿久津, 行裕
Citation	
Issue Date	2014-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/12016
Rights	
Description	Supervisor:浅野 文彦, 情報科学研究科, 修士

修 士 論 文

脚部に動吸振器を持つ2脚ロボットの高速かつ
ロバストな歩容生成に関する研究

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

阿久津 行裕

2014年3月

修士論文

脚部に動吸振器を持つ2脚ロボットの高速かつ ロバストな歩容生成に関する研究

主指導教員 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 前園 涼 准教授

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

1210002 阿久津 行裕

提出年月: 2014年2月

概要

本論文では，剛体脚と粘弾性脚の両者の性質を持つ脚フレームとして動吸振器を搭載した剛体脚を提案し，それによる高速かつロバストな歩容生成について議論する．また，受動歩行，平地歩行を通して提案する脚フレームの持つ力学的特性を明らかにする．

目次

第1章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究目的	2
1.3	本論文の構成	2
第2章	脚部に動吸振器を持つコンパス型ロボットの受動歩行	3
2.1	仕様	3
2.2	運動方程式	4
2.3	衝突方程式	5
2.4	数値シミュレーション	7
2.4.1	解析の準備と評価指標	7
2.4.2	解析結果	9
第3章	分岐現象	14
3.1	ダンパ定数が小さいときの受動歩行	14
3.1.1	数値シミュレーション手順	14
3.1.2	解析結果	14
3.2	入出力線形化	18
3.2.1	制御系設計	18
3.2.2	解析結果	19
第4章	脚部に動吸振器を持つ劣駆動コンパス型ロボットの平地歩行	21
4.1	仕様	21
4.2	運動方程式	22
4.3	衝突方程式	23
4.4	制御系設計	24
4.5	数値シミュレーション	25
4.5.1	解析の準備と評価指標	25
4.5.2	ダンパ定数 c を変化させたときの解析結果	28
4.5.3	足裏半径 R を変化させたときの解析結果	32

第 5 章	不整地歩行	34
5.1	単一段差乗り越え	34
5.1.1	段差モデルと評価指標	34
5.1.2	解析結果	35
5.2	不整地歩行	37
5.2.1	段差モデルと評価指標	37
5.2.2	解析結果	38
第 6 章	結論	40
6.1	結論	40
6.2	今後の予定	40
付録 A	運動方程式の詳細	43

第1章 序論

1.1 研究背景

受動歩行器をはじめとするリミットサイクル規範の歩行ロボットは、身体に生来的に備わった動特性を積極的に利用することで高効率な歩容を生成することが知られている [1]。近年、受動歩行の研究において、人や動物の持つ身体の柔軟さに着目した研究が成されている。河本らは直動方向に伸縮可能な粘弾性脚を持つリムレスホイール (Rimless wheel: 以下 RW) を用いて、柔軟な脚の持つ不整地適応能力について考察した [2]。数値解析と実験から、粘弾性脚 RW は段差や柔軟路面などの不整地に侵入した場合、歩行速度の変化が少なく安定して歩行が継続可能であることを明らかにした。また、剛体脚 RW は不整地適応能力では劣るが、整地での歩行速度では粘弾性脚 RW よりも優れることを明らかにした。粘弾性脚は脚の伸縮による順応性から歩容中に瞬間的でない両脚支持期を生成する。このことが整地での歩行速度を低下させる要因であるが、一方で、脚の柔軟性から全重心軌道 (Center of mass: 以下 CoM) の変化を低減し、ロボットがポテンシャル・バリアを乗り越えやすくなるということも知られている。これと同様の結果は田中らによっても報告されている [3]。つまり、粘弾性脚は歩行速度低下と引き替えに、不整地適応能力が高いという特性をもつといえる。このように剛体脚と粘弾性脚は、整地での高い歩行速度と不整地適応能力という二つの異なる歩容の性質を持つ。これら二つの性能は脚移動ロボットの實用においてどちらも必要不可欠といえるが、脚フレームの構造および機械インピーダンスに依存し、互いにトレードオフの関係にあるため、脚フレームの交換・調節無しに両者を実現することは困難である。

ここで我々人間の脚構造に着目すると、骨格という硬い部位の周囲を筋肉や脂肪などの柔らかい部位が包むという構造になっている。脚部に硬さと柔らかさの双方を併せ持つことで、人間は高速かつ不整地適応能力を持つ歩容を容易に生成可能なのではないか。そこで、人間の持つ脚構造をロボットの脚フレームに利用することを考える。

以上のことから、本研究では人や動物の柔軟性を模した特性を持つ機械的要素として、動吸振器に着目する。剛体脚をベースにすることで瞬間的でない両脚支持期の発現を抑制し、かつ剛体脚に搭載した動吸振器によって、粘弾性脚の持つ柔軟性を間接的に付与することがねらいである。動吸振器は質量、バネ、ダンパで構成され一般的に機械振動抑制を目的として用いられるが、本研究では構成が同一であることから動吸振器という名称を用いることにする。また、付加する質量としてバッテリーや電子回路などのロボットが生来的に持つ質量を利用することで、ロボット全体の重量を増やすことなく提案する脚フレー

ムを実現できる．

脚移動ロボットに対して動吸振器のような要素を加えることで，高性能な歩容生成を行う研究は，近年盛んに行われている．花澤，林らは，リミットサイクル型2脚歩行ロボットの上体に能動的上下動を行う質量を付加することで，整地での歩行高速化を達成した[4]．彼らは，同様のモデルを用いて不整地における歩行解析を行い，不整地踏破性能が向上することも示した[5]．Ackermanらは，6脚ロボットに対してElastically Suspended Loadを付加し，そのバネ定数を調節することで，ロボットに負荷を固定して取り付けした場合より，脚移動における消費エネルギーを24%削減できることを実機実験から示した[6]．しかしながら，これらの研究では動吸振器は胴体にのみ接続されており，脚ロボットの両脚に動吸振器を搭載するような研究は成されていない．また，動吸振器が歩容に与える影響も未だ明らかとなっていない点が多い．

以上を踏まえ，本論文では剛体脚と粘弾性脚の両者の性質を持つ脚フレームとして動吸振器を搭載した剛体脚を提案し，それによる高速かつロバストな歩容生成について議論する．また，受動歩行・平地歩行解析を通して提案する脚フレームの持つ力学的特性を明らかにする．

1.2 研究目的

本研究の目的は，剛体脚と粘弾性脚の両者の性質を持つ脚フレームとして動吸振器を搭載した剛体脚を提案し，それによる高速かつロバストな歩容生成を実現することである．本研究で目指す「高速かつロバストな歩容」とは「整地において高い歩行速度をもち，かつ不整地において転倒せず歩行を継続できる歩容」を指す．また，歩行解析を通して提案する脚フレームの持つ力学的特性を明らかにすることも目的とする．

1.3 本論文の構成

本論文は，本章を含め6つの章から構成される．第2章では脚部に動吸振器を持つコンパス型ロボットの受動歩行解析を行い，動吸振器の効果により剛体脚よりも高速な歩容が生成可能であることを示す．第3章では，動吸振器の粘弾性係数を変化させることで分岐現象が発現することを示す．第4章では提案する脚フレームを持つ劣駆動コンパス型2脚ロボットの平地歩行解析を通して，歩行速度・脚移動効率の観点から歩行性能の評価を行う．第5章では，第4章で用いた平地歩行モデルを使用し不整地での歩行性能について検討する．最後に第6章において，本論文で述べる研究内容とその成果を総括し，残された今後の研究課題についても述べる．

第2章 脚部に動吸振器を持つコンパス型ロボットの受動歩行

本章では脚部に動吸振器を持つコンパス型受動歩行ロボットを解析対象とし、動吸振器が歩容に対して与える影響を数値シミュレーションを通して明らかにする。なお、本研究で使用するシミュレータの開発環境はすべてMATLABを用いている。

2.1 仕様

本章で扱うロボットの数学モデルを図2.1に示す。ロボットは平面2リンクのコンパス型受動歩行ロボット [7] であり、脚に動吸振器を備える。まず、動吸振器について次の仮定をおく。

- 動吸振器は質量、バネ、ダンパで構成され、質量はバネとダンパを介して脚リンクに平行に接続される。また、脚に対して垂直方向のオフセットはなく、動吸振器の質量中心は常に脚に重なっている。
- 動吸振器は機械的拘束を加えることが可能であり、その際の質量は脚リンクのそれと一致させるものとする。
- 動吸振器は脚に平行な方向に直動運動し、脚と共に回転運動する。

次に、図2.1に示すモデルに対し次の仮定をおく。

- 支持脚を Leg 1、遊脚を Leg 2 と呼ぶ。
- 歩行中 Leg 2 が床面に擦れる現象はシミュレーションの簡単化のため無視する。
- Leg 2 は床面と完全非弾性衝突する。
- Leg 1 の脚先端と床面は滑らず接地している。
- Leg 1 は Leg 2 の接地と同時に速やかに離陸する。

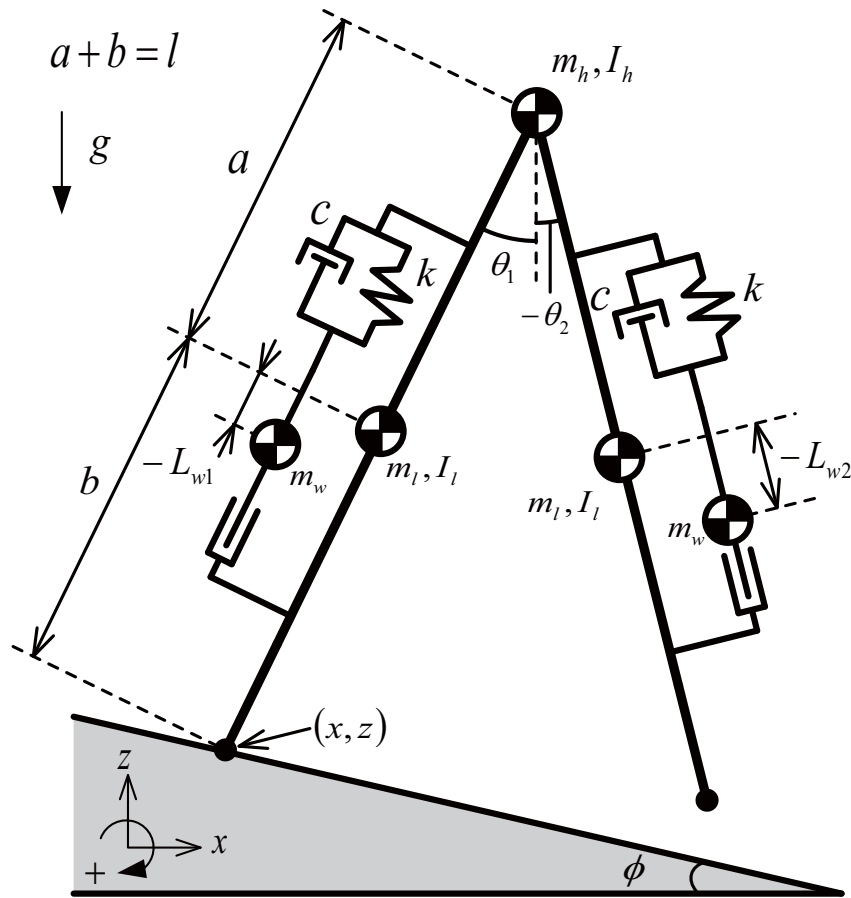


図 2.1: 脚部に動吸振器を持つコンパス型受動歩行ロボットの数学モデル

2.2 運動方程式

ロボットの運動方程式は Lagrange 方程式を用いて導出する．一般化座標ベクトルを

$$\mathbf{q} = [x \quad z \quad \theta_1 \quad \theta_2 \quad L_{w1} \quad L_{w2}]^T$$

とすると，運動方程式は次式で表される．

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

$$\mathbf{J}\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{0} \quad (2.2)$$

式 (2.1) 中の $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ は慣性行列， $\mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ はコリオリ力・中心力項に重力項を加えたベクトルである． $\mathbf{f}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ はバネとダンパによる力， \mathbf{S} は駆動行列である． $\mathbf{f}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$, \mathbf{S} の詳細を次式

に示す．

$$S = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$f(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} -k \left(L_{w1} - \frac{m_w g}{k} \right) - c \dot{L}_{w1} \\ -k \left(L_{w2} - \frac{m_w g}{k} \right) - c \dot{L}_{w2} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

なお， $\theta_1 = 0$ の姿勢でロボットが静止している時，動吸振器質量とバネの釣り合い位置が脚質量中心と一致するようにモデリングを行っている．Leg 2の動吸振器についても同様である．式(2.2)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 $J \in \mathbb{R}^{2 \times 6}$ は， $\dot{x} = 0$ ， $\dot{z} = 0$ の速度拘束条件から次のように求まる．

$$J = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

動吸振器を固定した場合，速度拘束条件に $\dot{L}_{w1} = 0$ ， $\dot{L}_{w2} = 0$ の条件が加わるため，ヤコビアン $J \in \mathbb{R}^{4 \times 6}$ は次のように求まる．

$$J = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

式(2.1)，(2.2)より λ を消去することで次式を得る．

$$M(q)\ddot{q} = Y(q)(Sf(q, \dot{q}) - h(q, \dot{q})) \quad (2.7)$$

$$X(q) := JM(q)^{-1}J^T$$

$$Y(q) := I_6 - J^T X(q)^{-1}JM(q)^{-1}$$

2.3 衝突方程式

仮定から，支持脚交換における衝突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ため，衝突方程式と衝突時の速度拘束条件は次式で表される．

$$M(q)\dot{q}^+ = M(q)\dot{q}^- - J_I(q)^T \lambda_I \quad (2.8)$$

$$J_I(q)\dot{q}^+ = 0 \quad (2.9)$$

ここで，“ \dot{q}^+ ”は衝突直後の速度ベクトルを表し，“ \dot{q}^- ”は衝突直前の速度ベクトルを表す．衝突時のヤコビアン $J_I(q) \in \mathbb{R}^{2 \times 6}$ は以下のようになる．

$$J_I(q) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & l \cos \theta_1 & -l \cos \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -l \sin \theta_1 & l \sin \theta_2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

動吸振器を固定した場合，衝突時のヤコビアン $J_I(q) \in \mathbb{R}^{4 \times 6}$ は以下のようになる．

$$J_I(q) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & l \cos \theta_1 & -l \cos \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -l \sin \theta_1 & l \sin \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

式 (2.8) , (2.9) から衝突直後の速度ベクトル \dot{q}^+ は次のように求まる．

$$\begin{aligned} \dot{q}^+ &= \left(I_6 - M(q)^{-1} J_I(q)^T X_I(q)^{-1} J_I(q) \right) \dot{q}^- \\ X_I(q) &:= J_I(q) M(q)^{-1} J_I(q)^T \end{aligned} \quad (2.12)$$

脚衝突ごとに Leg 1 と Leg 2 は入れ替わるため，それぞれの状態量を交換する必要がある．位置の更新式は次のように定まる．

$$x^+ = x^- + l \sin \theta_1^- - l \sin \theta_2^- \quad (2.13)$$

$$z^+ = z^- + l \cos \theta_1^- - l \cos \theta_2^- \quad (2.14)$$

$$\theta_1^+ = \theta_2^- \quad (2.15)$$

$$\theta_2^+ = \theta_1^- \quad (2.16)$$

$$L_{w1}^+ = L_{w2}^- \quad (2.17)$$

$$L_{w2}^+ = L_{w1}^- \quad (2.18)$$

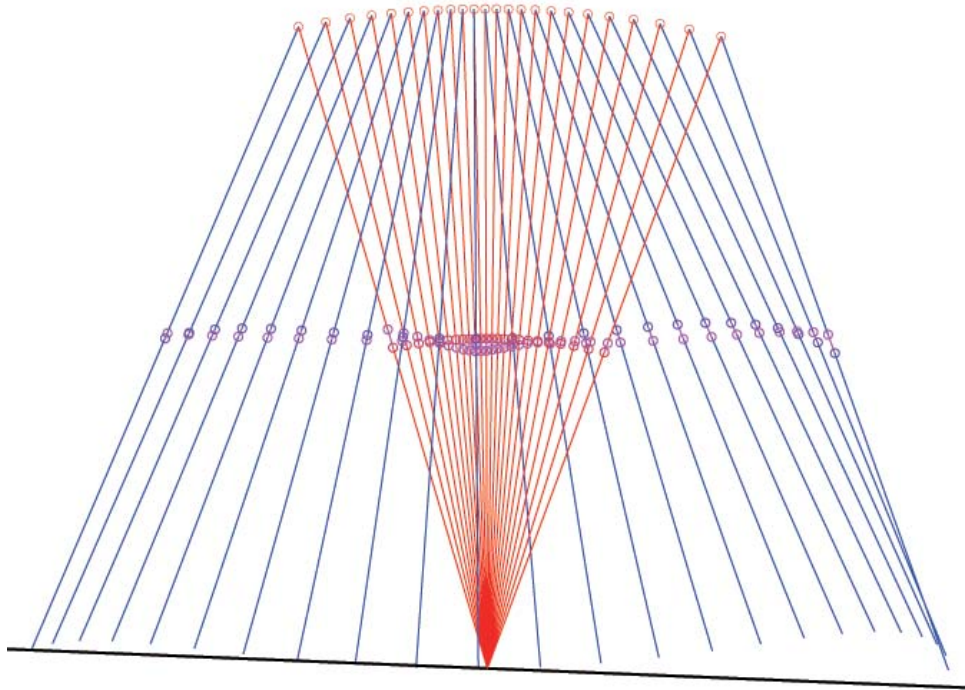


図 2.2: 定常歩行時のスティック線図 ($k = 50$ [N/m], $c = 10$ [N·s/m])

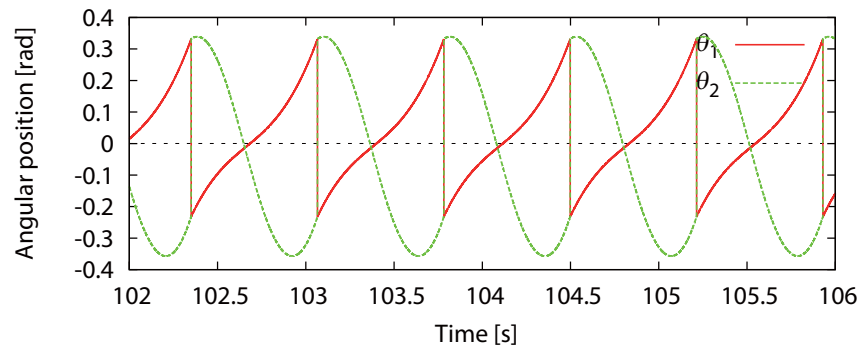
2.4 数値シミュレーション

2.4.1 解析の準備と評価指標

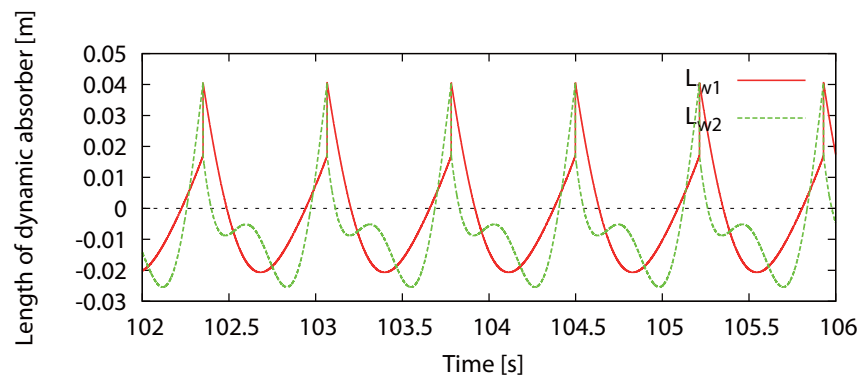
数値シミュレーションによるロボットの受動歩行解析を行った．数値シミュレーションで用いた物理パラメータを表 2.1 に示す．図 2.2 にロボットの定常歩行時のスティック線図を示す．また，図 2.3 に $k = 100$ [N/m]， $c = 10$ [N·s/m] の数値シミュレーション結果を示す．図 2.3(a)，図 2.3(b) にロボットの状態量 θ_1 ， θ_2 ， L_{w1} ， L_{w2} の時間変化をプロットした．さらに図 2.3(c) に θ_1 の位相平面図を示す．図 2.3(b)，図 2.2 から，ロボットの歩行に合わせて動吸振器が運動していることが分かる．また，図 2.3(c) から歩容が 1 周期のリミットサイクルを描くことも分かる．

バネ定数 k とダンパ定数 c を変化させて数値シミュレーションを行う．シミュレーションは以下の手順で行った．

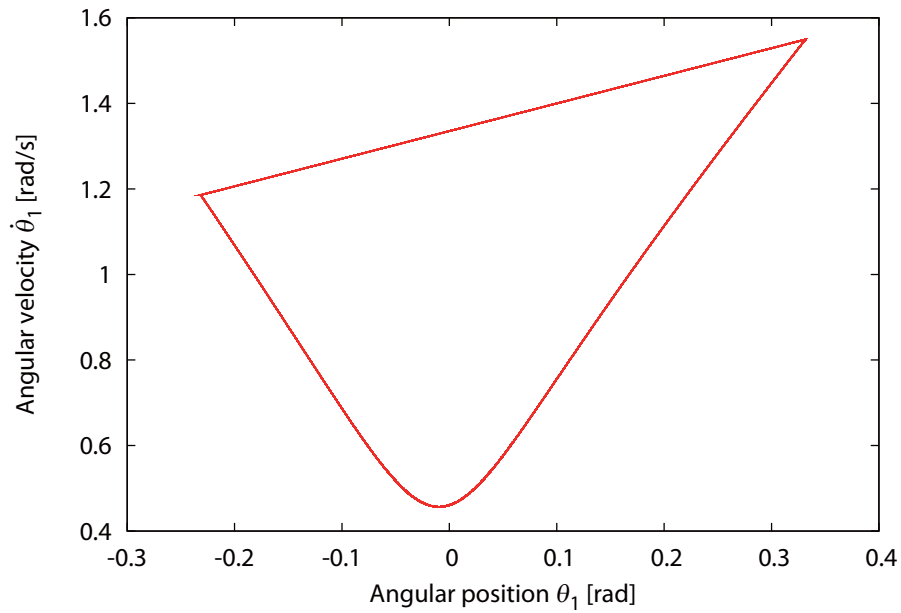
- 1) バネ定数 k を 10 [N/m] に設定し，初期値を与えてシミュレーションを開始する．初期値を表 2.2 に示す．
- 2) Leg 1 の Z 軸方向の床反力 λ_2 の符号が負になった場合は，ロボットが浮上したとみなして歩行不成立とし，シミュレーションを終了する．動吸振器の変位 L_{w1} ， L_{w2} の絶対値が， a ， b よりも大きくなった場合もシミュレーションを終了する．



(a) Leg 1 , Leg 2 の絶対角度



(b) Leg 1 , Leg 2 の動吸振器変位



(c) θ_1 の位相平面図

図 2.3: $k = 100$ [N/m] , $c = 10$ [N·s/m] の数値シミュレーション結果

表 2.1: 物理パラメータ

m_h	10.0	kg
$m_l (= m_w)$	2.5	kg
l	1.0	m
$a (= b)$	0.5	m
I_h	1.0×10^{-3}	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
I_l	1.0×10^{-3}	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
ϕ	0.05	rad

表 2.2: 数値シミュレーションの初期値

$x (= z)$	0.0	m
$\dot{x} (= \dot{z})$	0.0	m/s
θ_1	$-0.3 + \phi$	rad
θ_2	$0.3 + \phi$	rad
$\dot{\theta}_1$	1.21	rad/s
$\dot{\theta}_2$	1.20	rad/s
$L_{w1} (= L_{w2})$	0.0	m
$\dot{L}_{w1} (= \dot{L}_{w2})$	0.0	m/s

- 3) 100 秒間の歩行継続を歩行成立と見なし、それ以降から 20 歩分の歩行データを保存する。
- 4) k を 10 [N/m] だけ増加させ、1) に戻る。
- 5) k が 1000 [N/m] になるまで 1) から 4) を繰り返す。

また、評価指標として歩行速度 V [m/s] を次のように定義した。

$$V = \frac{\Delta L}{T} = \Delta L \cdot f_w \quad (2.19)$$

ΔL [m] は歩幅であり、脚衝突時の Leg 1 の先端から Leg 2 の先端までの距離である。 f_w [Hz] は歩行率を表し、以下のように歩行周期 T [s] の逆数で定義する。

$$f_w = \frac{1}{T}$$

2.4.2 解析結果

図 2.4, 図 2.5, 図 2.6 にバネ定数 k に対する歩行速度, 歩行率, 歩幅の解析結果を示す。それぞれのグラフには、ダンパ定数 c を 10, 20, 30 [N·s/m] に設定した結果を赤, 緑, 青の“○”でプロットし、動吸振器を固定した場合の結果を破線でプロットした。グラフ中で空白になっている部分は、表 2.2 で与えた初期値ではリミットサイクルが生成されず、転倒や浮上などにより歩行不成立であることを表している。また、動吸振器を固定した場合のロボットのモデルは、従来の剛体脚モデルと等価となる。

図 2.4 より、ほとんどの場合で動吸振器を固定した場合より歩行速度が上昇していることが分かる。 $c = 10$ [N·s/m] の結果では k に対して歩行速度が振動的になり、 $k \geq 630$ [N/m] では動吸振器を固定した場合よりも歩行速度は低下した。 c を増加させると歩行速度

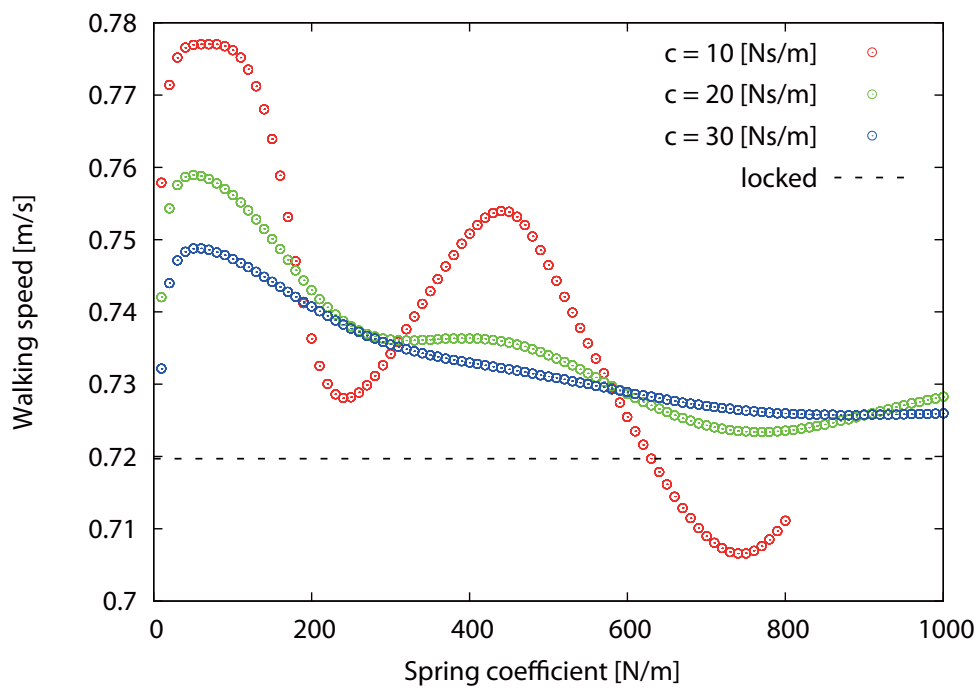


図 2.4: k に対する歩行速度 V

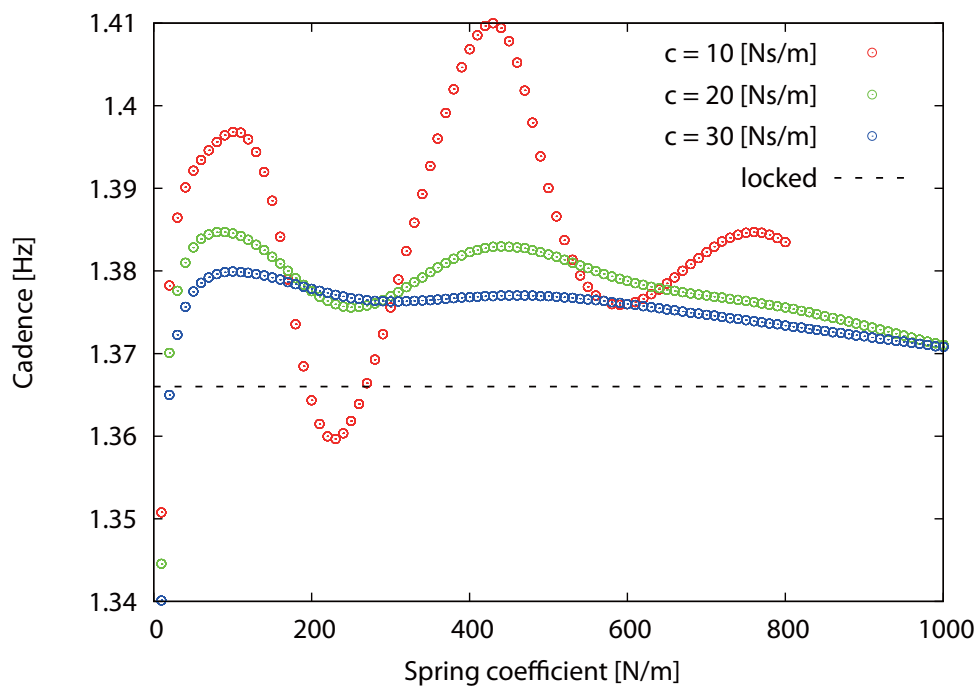


図 2.5: k に対する歩行率 f_w

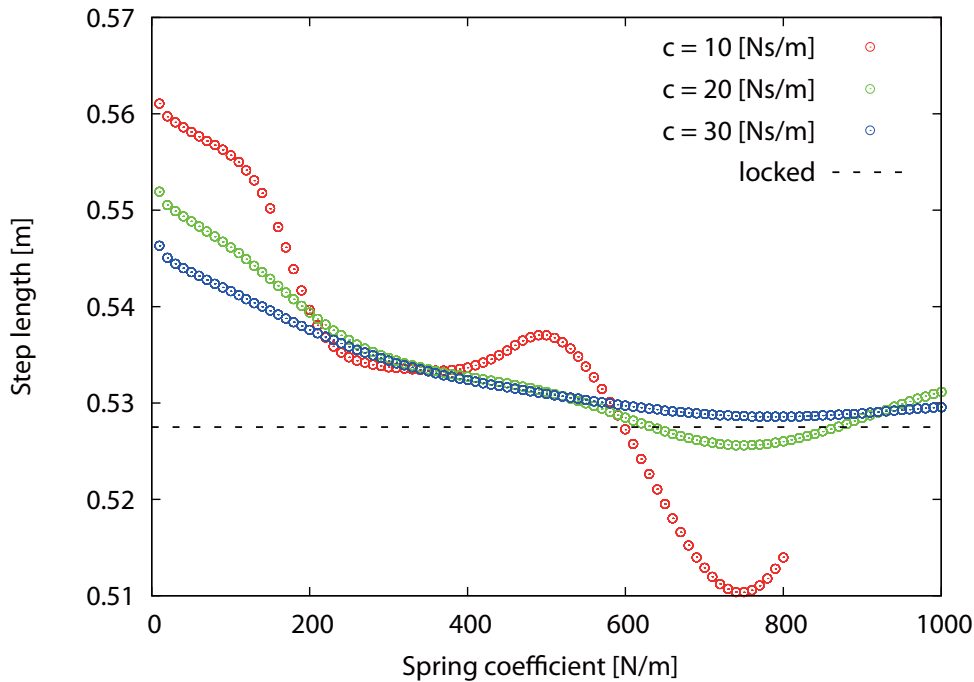


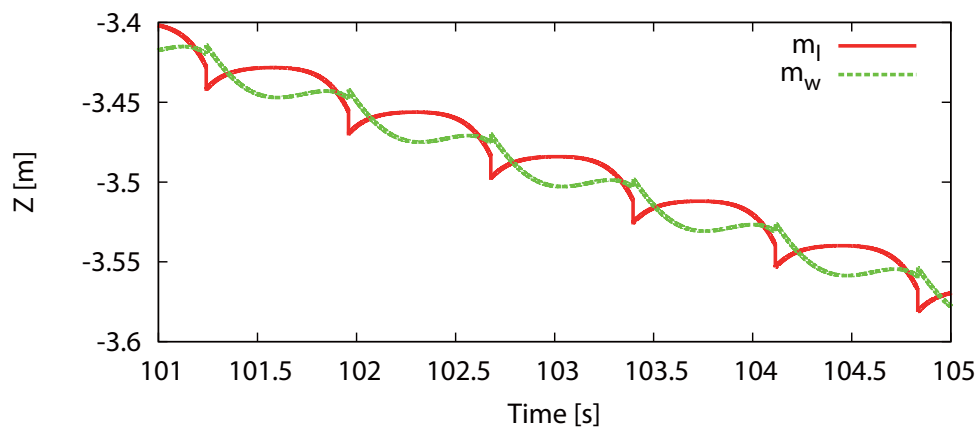
図 2.6: k に対する歩幅 ΔL

の変化は小さくなり，歩行速度の低下も見られなくなる．この傾向は図 2.5，図 2.6 においても同様に見られる．

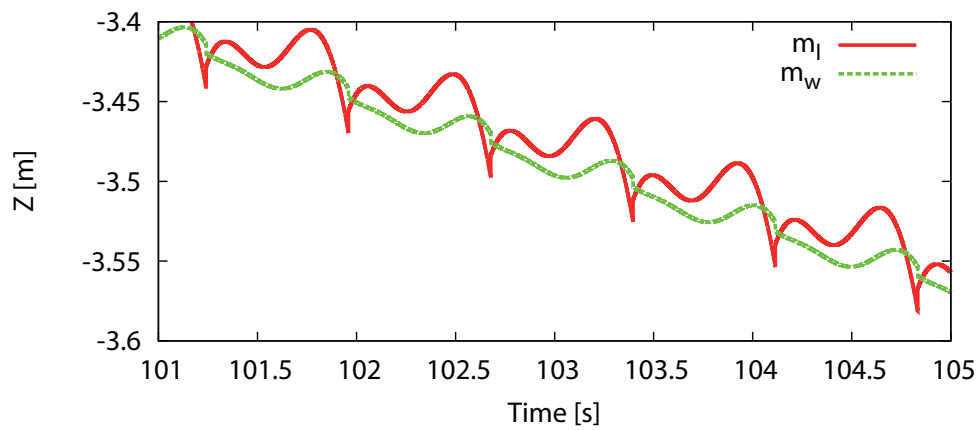
歩行速度向上の要因として，田中らの示した全重心軌道の平坦化による高速化が考えられる [3]．図 2.7 に $k = 50$ [N/m]， $c = 10$ [N·s/m] としたときのシミュレーション結果を示す．比較のため図 2.8 に，動吸振器を固定したときのシミュレーション結果を示す．図 2.7(c) と図 2.8(c) を比較すると，動吸振器を固定したときに比べて，全重心軌道が平坦化されていることが分かる．

さらにそれぞれの脚について詳しく見ると，図 2.7(a) から明らかなように，Leg 1 の脚質量の上下運動に対して動吸振器がそれを打ち消すように逆位相で振動していると分かる．これにより Leg 1 は重心軌道が平坦化し，スムーズなポテンシャル・バリアの突破が達成できていると考えられる．

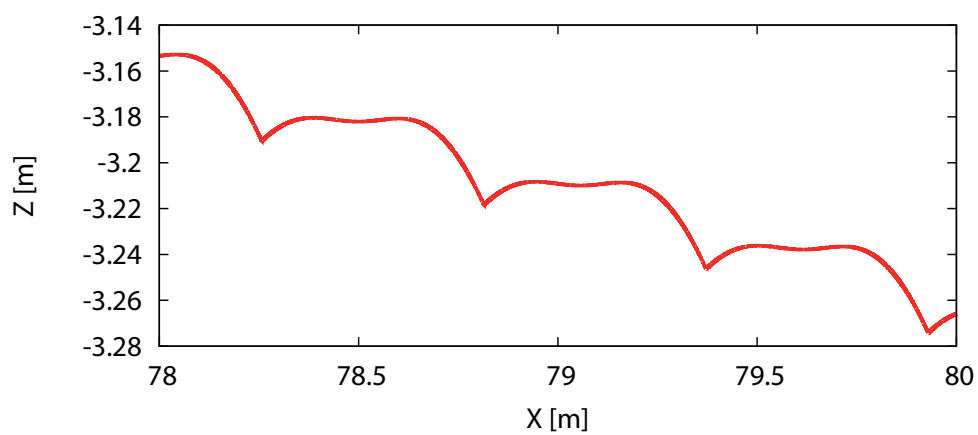
Leg 2 は，歩行のため前方へ振り出すという性質上，既に歩行の上下運動に対してそれを打ち消すような運動を達成していると言える．しかし，図 2.8(b) を見ると脚交換直後と脚衝突直前の 2 点で，Leg 2 が上方に運動していると分かる．それに対し図 2.7(b) を見ると，脚質量に対して動吸振器は下方に位置しながら運動していると分かる．これにより Leg 2 の上方への運動が抑制され，脚交換直後に Leg 2 が大きく振り上がることなく速やかに振り出される．このように，Leg 2 については上方への運動を抑制することから，重心軌道の平坦化が達成されていると考えられる．



(a) Leg 1 の m_l , m_w の Z 軸方向変位



(b) Leg 2 の m_l , m_w の Z 軸方向変位



(c) 全重心軌道

図 2.7: $k = 50$ [N/m] , $c = 10$ [N·s/m] の数値シミュレーション結果

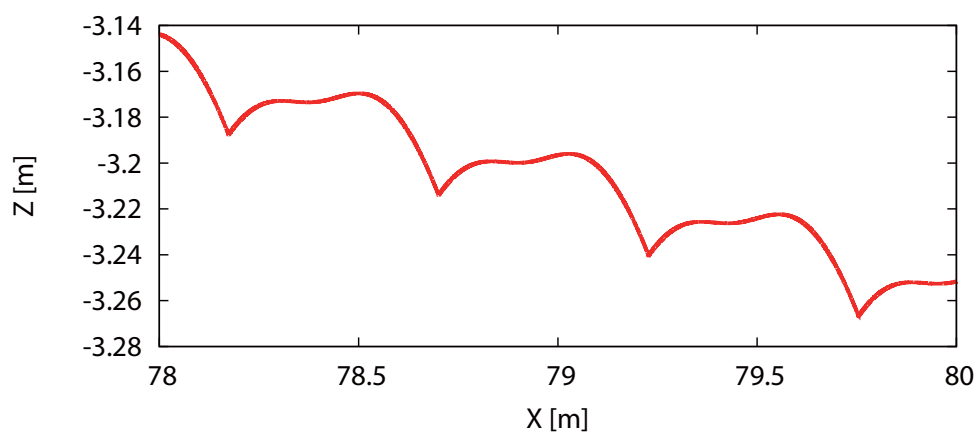
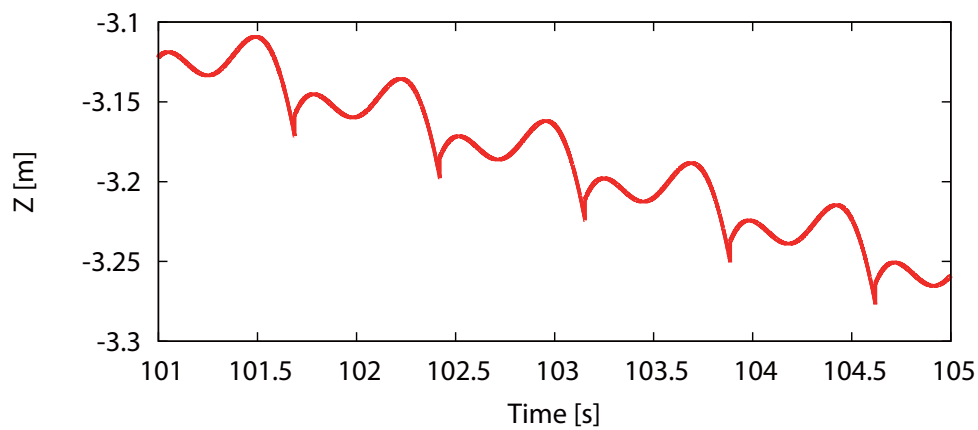
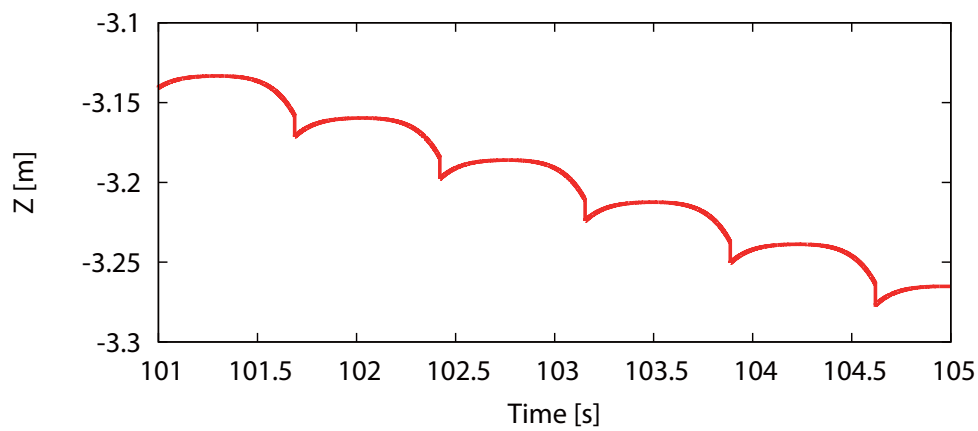


図 2.8: 動吸振器を固定したときの数値シミュレーション結果

第3章 分岐現象

本章では，前章で用いたモデルにおいてダンパの影響が小さいとき，歩容が2周期や多周期に収束する分岐現象が発生することを示す．また，動吸振器に対し入出力線形化を行い，立脚相におけるロボットから動吸振器への影響をキャンセルすることを試みる．

3.1 ダンパ定数が小さいときの受動歩行

3.1.1 数値シミュレーション手順

図 2.1 に示したモデルを用いて，ダンパ定数を $c = 5$ [N·s/m] と設定し受動歩行解析を行う．物理パラメータは前章と同じく，表 2.1 に示す値を使用する．数値シミュレーション手順を以下に示す．

- 1) $k = 1200$ [N/m]，表 2.2 の値を初期値に設定する．
- 2) 受動歩行シミュレーションを開始する．
- 3) 100 [s] 歩行が継続した場合，歩行が成立したと見なしてその時点から 20 歩分の歩行データを保存する．次回のシミュレーションでは，ここで保存した歩行データを初期値として与える．
- 4) k を 10 [N/m] 増加させ，2) に戻る．
- 5) $k = 2200$ [N/m] まで，2) から 4) を繰り返す．

ただし，転倒した場合は歩行データを保存しないので，次回の初期値には最後に歩行が成立した歩行データを与えてシミュレーションを行う．

3.1.2 解析結果

図 3.1，図 3.2，図 3.3 に $c = 5$ [N·s/m] と設定したときのバネ定数 k に対する歩行速度，歩行率，歩幅の解析結果を示す．それぞれのグラフには k に対応する 20 歩分の解析結果を赤い“+”でプロットし，20 歩の平均値を緑の“x”でプロットしている．また，前章と同様に動吸振器を固定した場合の結果を破線でプロットした．

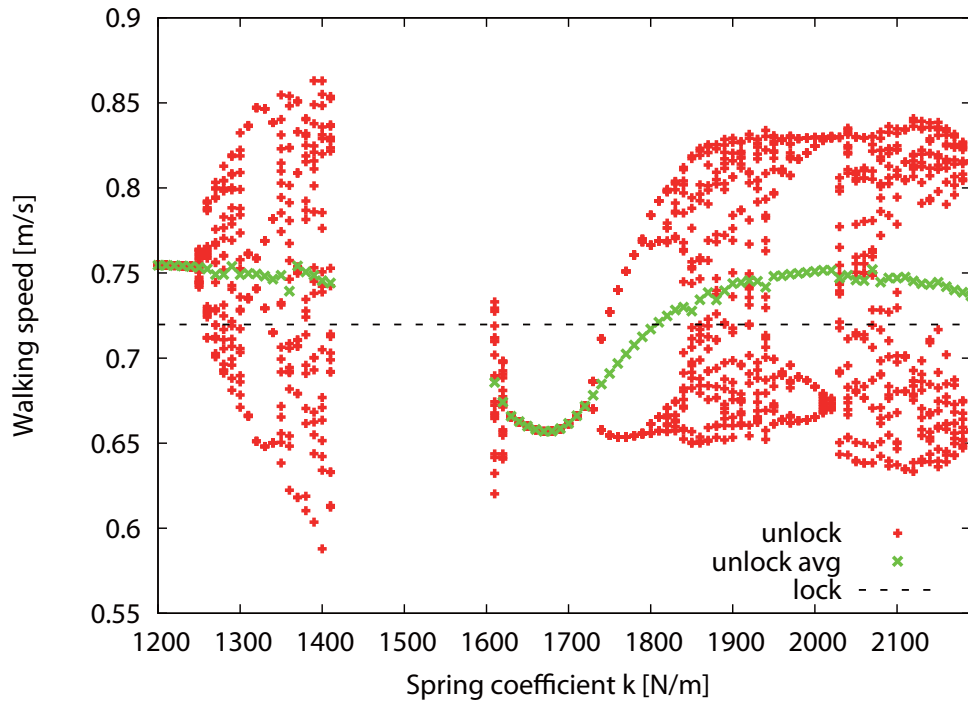


図 3.1: $c = 5$ [N·s/m] と設定した場合の k に対する歩行速度

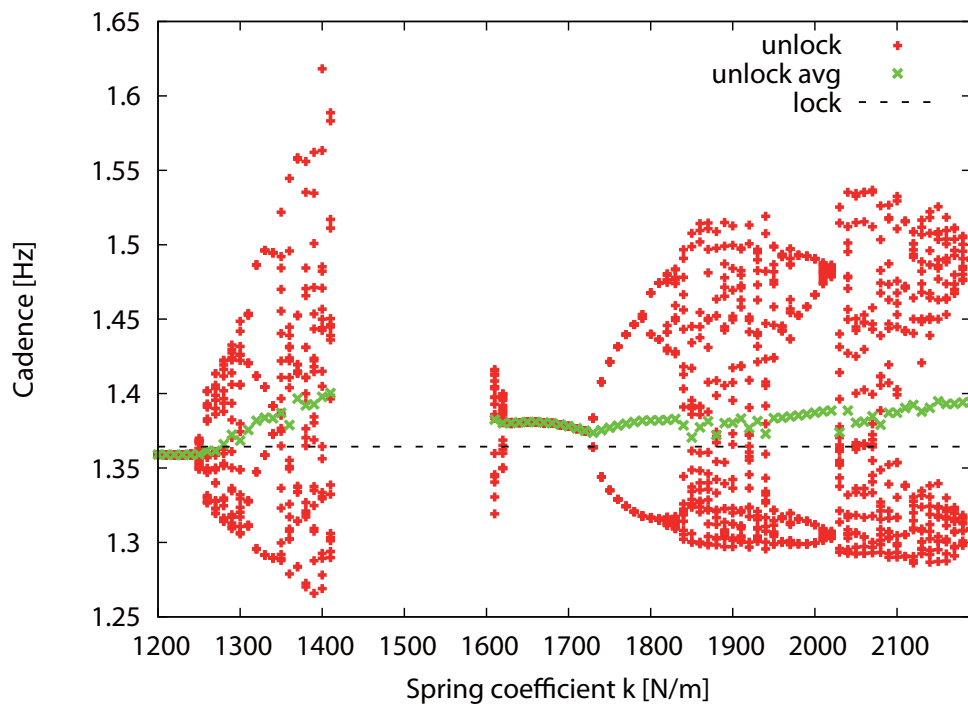


図 3.2: $c = 5$ [N·s/m] と設定した場合の k に対する歩行率

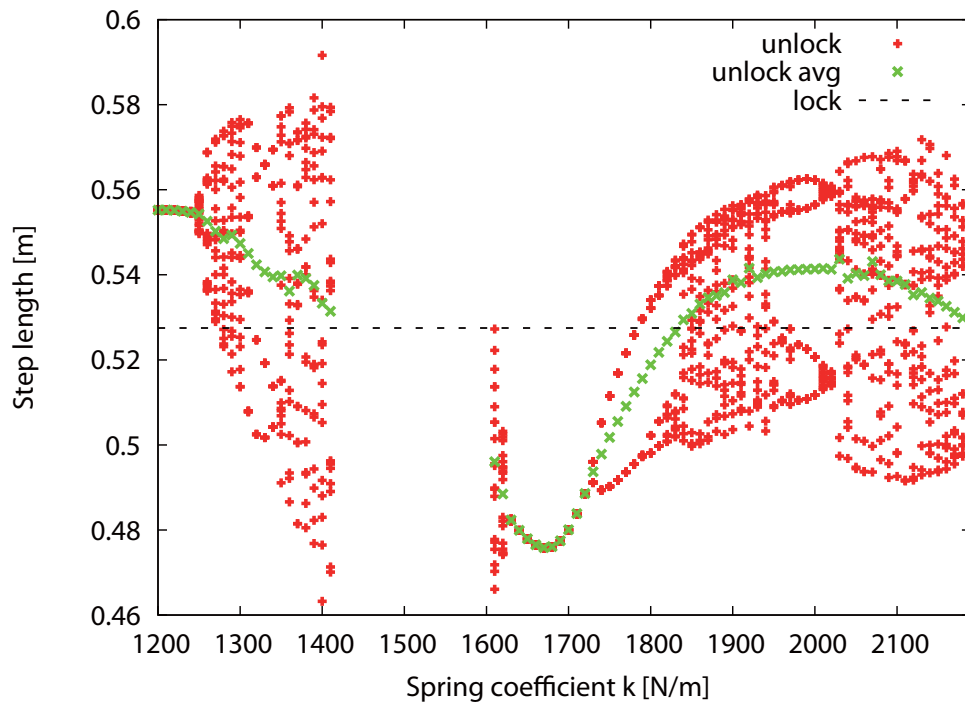
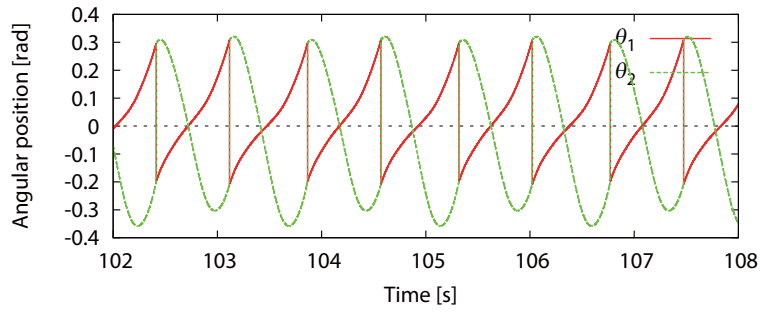


図 3.3: $c = 5$ [N·s/m] と設定した場合の k に対する歩幅

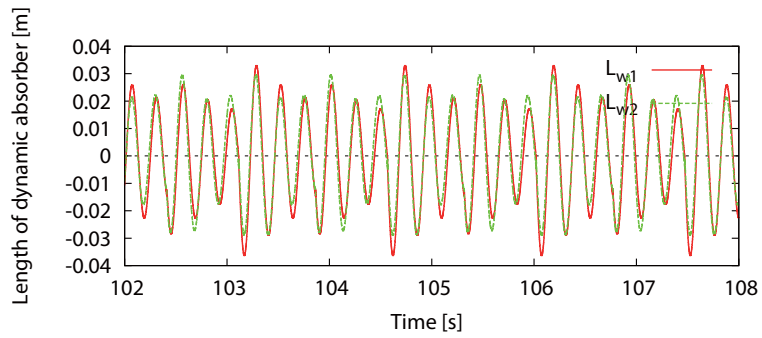
図 3.1 から、歩容が 1 周期に収束せず周期倍分岐現象の起こっていることが分かる。 $k = 1400$ から 1600 [N/m] の間では転倒などにより定常歩行が生成されなかった。図 3.2 と図 3.3 を比較すると、歩幅の平均値が k に対して比較的大きく変化しているのに対し、歩行率の平均値はほとんど一定になっていることが分かる。

こうした分岐現象は非線形力学においてみられる現象であり、脚移動ロボットの研究においては、動吸振器のようなロボットの歩行周波数以外に固有周波数を持つ要素が存在する場合に、発生することが報告されている [8]。

図 3.4 に $k = 1750$ [N/m] と設定した場合の解析結果を、図 3.5 に $k = 1380$ [N/m] と設定した場合の解析結果を示す。図 3.4 (a)、図 3.5 (a) から歩容が 1 周期ではなく、2 周期や複雑な周期の歩容となっていることが分かる。また動吸振器の運動もそれぞれの歩容の特性に従っていることが分かる。動吸振器の振幅は脚長 L に対して小さく、 $\pm 3\%$ 程度である。また動吸振器が非常に激しく振動していることもわかる。

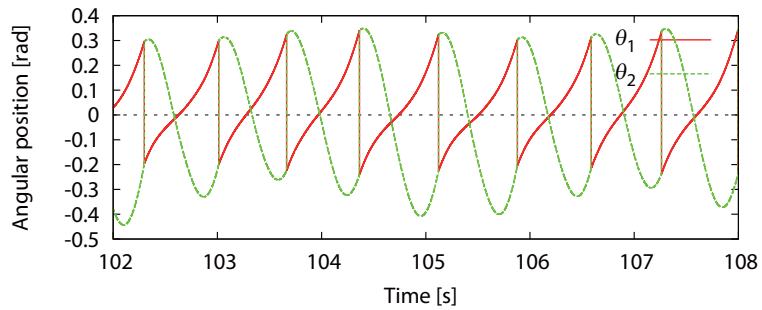


(a) Leg 1, Leg 2 の絶対角度 θ_1 , θ_2 の時間変化

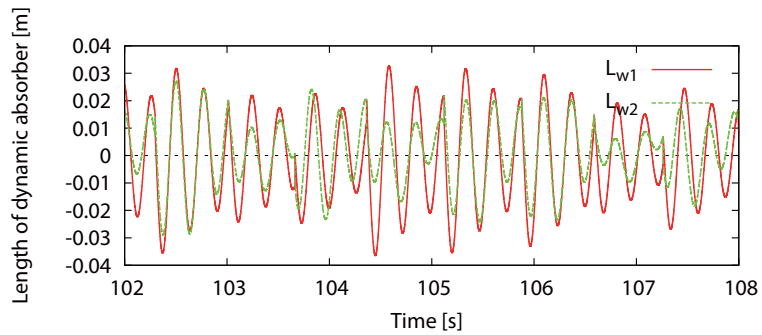


(b) 動吸振器変位 L_{w1} , L_{w2} の時間変化

図 3.4: 2 周期歩容の解析結果 ($k = 1750$ [N/m], $c = 5$ [N·s/m])



(a) Leg 1, Leg 2 の絶対角度 θ_1 , θ_2 の時間変化



(b) 動吸振器変位 L_{w1} , L_{w2} の時間変化

図 3.5: 多周期歩容の解析結果 ($k = 1380$ [N/m], $c = 5$ [N·s/m])

3.2 入出力線形化

ダンパ定数が小さいとき，非常に複雑な歩容が生成されることを前節で示した．その要因が動吸振器の揺動であることは明らかだが，動吸振器は歩行の影響を受けて振動するため，ロボットと動吸振器のどちらが支配的要因なのかは不明瞭である．

そこで本節では動吸振器が立脚相で受ける影響をキャンセルし，動吸振器が歩行中に受ける影響を脚衝突時の衝撃力のみにするを考える．動吸振器に対して入出力線形化を行い，脚の振り運動から独立した振動を実現する．

3.2.1 制御系設計

動吸振器に対して入力を加えるため，運動方程式は次のようになる．

$$M(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) = Su + J^T \lambda \quad (3.1)$$

$$J\dot{q} = \mathbf{0}_{2 \times 1} \quad (3.2)$$

ただし制御入力 $u = [u_1 \ u_2]^T$ である． u 以外の項は式 (2.1) 中で用いているものと同じである．式 (3.1), (3.2) より λ を消去することで \ddot{q} を得る．

$$\begin{aligned} \ddot{q} &= M(q)^{-1} Y(q) (Su - h(q, \dot{q})) \quad (3.3) \\ X(q) &:= JM(q)^{-1} J^T \\ Y(q) &:= I_6 - J^T X(q)^{-1} JM(q)^{-1} \end{aligned}$$

制御出力を $y = [L_{w1} \ L_{w2}]^T$ とおくと，その二階微分である \ddot{y} は，式 (3.3) より

$$\begin{aligned} \ddot{y} &= S^T \ddot{q} = S^T M(q)^{-1} Y(q) (Su - h(q, \dot{q})) \\ &= A(q)u + B(q, \dot{q}) \quad (3.4) \end{aligned}$$

となる．ただし

$$\begin{aligned} A(q) &:= S^T M(q)^{-1} Y(q) S \\ B(q, \dot{q}) &:= -S^T M(q)^{-1} Y(q) h(q, \dot{q}) \end{aligned}$$

である． $\ddot{y} = v$ を達成する制御入力 u は次のように求まる．

$$u = A(q)^{-1} (v - B(q, \dot{q})) \quad (3.5)$$

$$v = -K_P L_{w1} - K_D \dot{L}_{w1} \quad (3.6)$$

ここで， K_P, K_D は PD フィードバックゲインを表す正の対角行列であり， $K_P = K_P I_2$ ， $K_D = K_D I_2$ である．このとき制御出力のダイナミクスは

$$\ddot{y} + K_D \dot{y} + K_P y = \mathbf{0}_{2 \times 1}$$

となるので，動吸振器は脚の振り運動から独立した振動となる．

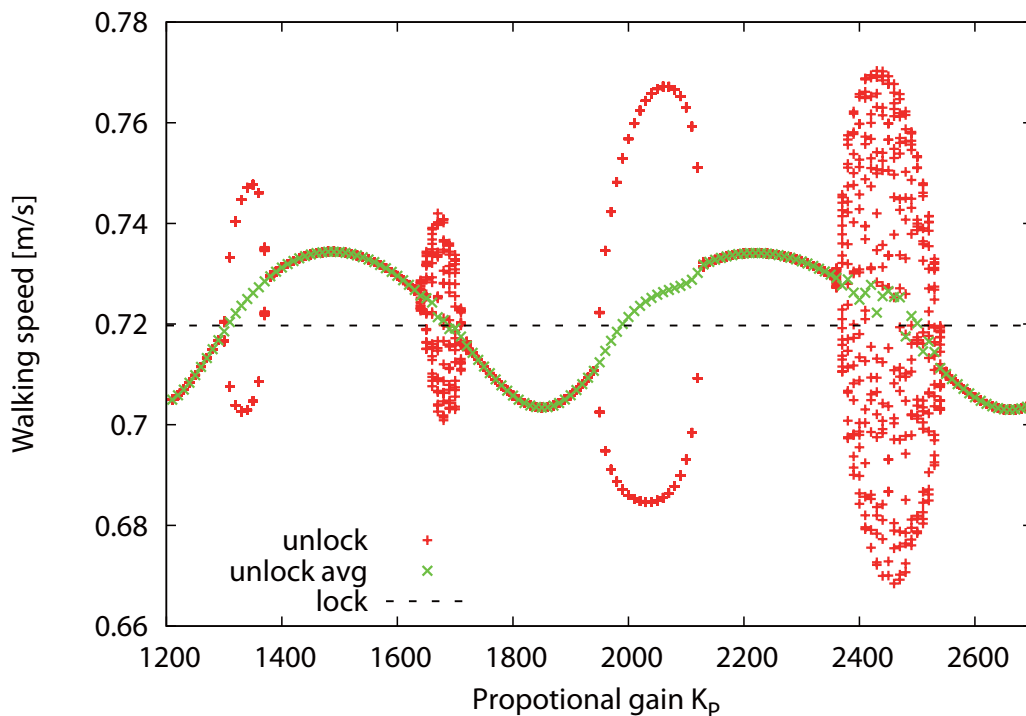


図 3.6: 動吸振器の影響が支配的な場合の歩行速度

3.2.2 解析結果

3.1.1 節と同様に数値シミュレーションを行った。ただし $K_p = 1200$ での初期値は、表 2.2 に示す値とは異なる。図 3.6, 図 3.7, 図 3.8 に歩行速度, 歩行率, 歩幅を示す。それぞれのグラフは 3.1.2 節と同様に 20 歩分の平均値と動吸振器を固定した場合の結果もプロットしている。

図 3.6 から k が大きくなるにつれて 2 周期歩容と多周期歩容が交互に現れていることが分かる。図 3.1 の結果と異なり $k = 1400$ から 1600 [N/m] の間でも歩行が成立した。また 20 歩中の歩行速度のばらつきも小さくなっている。図 3.7 と図 3.8 の平均値に注目すると、図 3.2, 図 3.3 と同じ傾向を示していることがわかる。即ち、歩幅は k に対して大きく変化するが、歩行率はほとんど変化せず固定した場合の値近くで一定となるということである。このことから、 k が十分大きく c が小さいとき動吸振器の運動は特に歩幅に対して大きく影響すると考えられる。

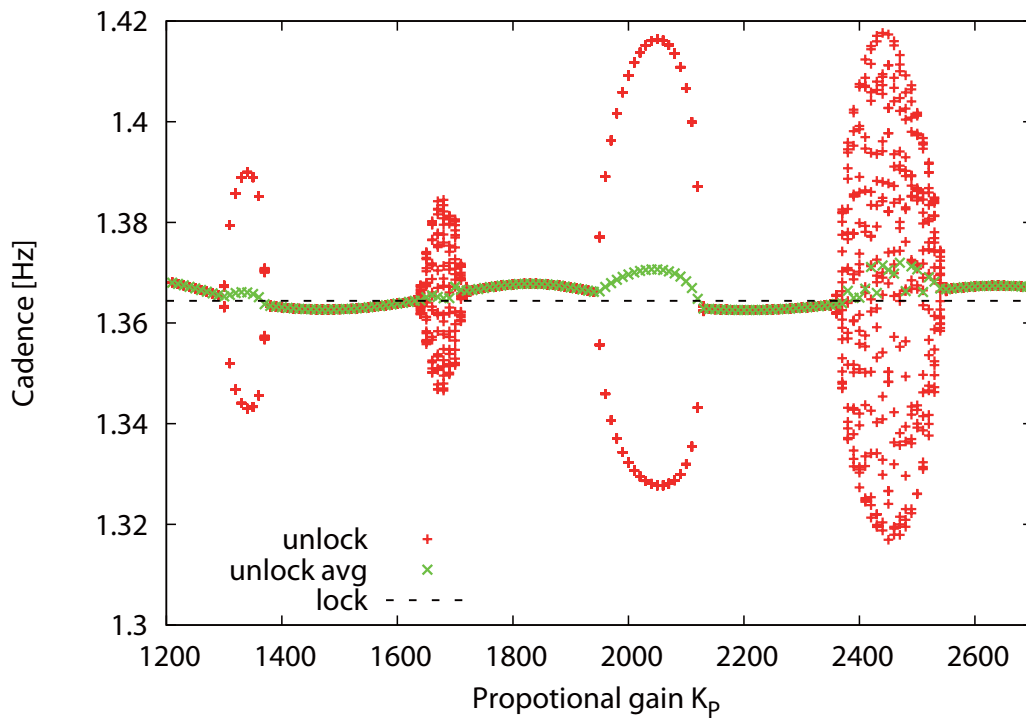


図 3.7: 動吸振器の影響が支配的な場合の歩行率

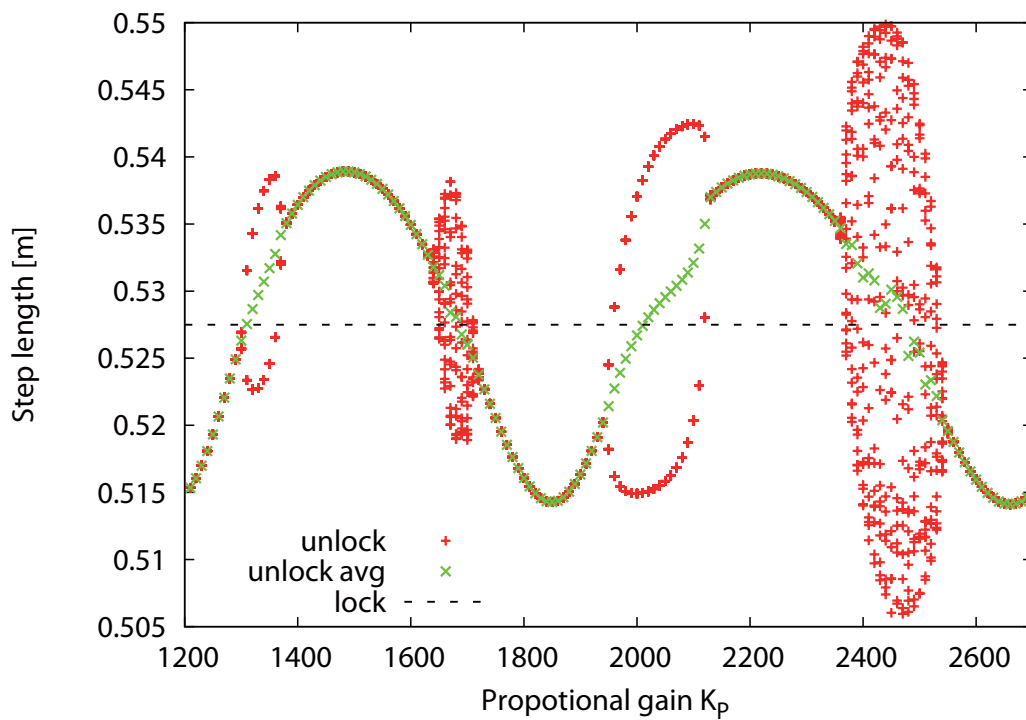


図 3.8: 動吸振器の影響が支配的な場合の歩幅

第4章 脚部に動吸振器を持つ劣駆動コンパス型ロボットの平地歩行

本章では前章で述べた受動歩行モデルを拡張し平地歩行を行う．提案する脚フレームにより，剛体脚フレームよりも高効率な歩容生成が可能であることを数値シミュレーションから明らかにする．

4.1 仕様

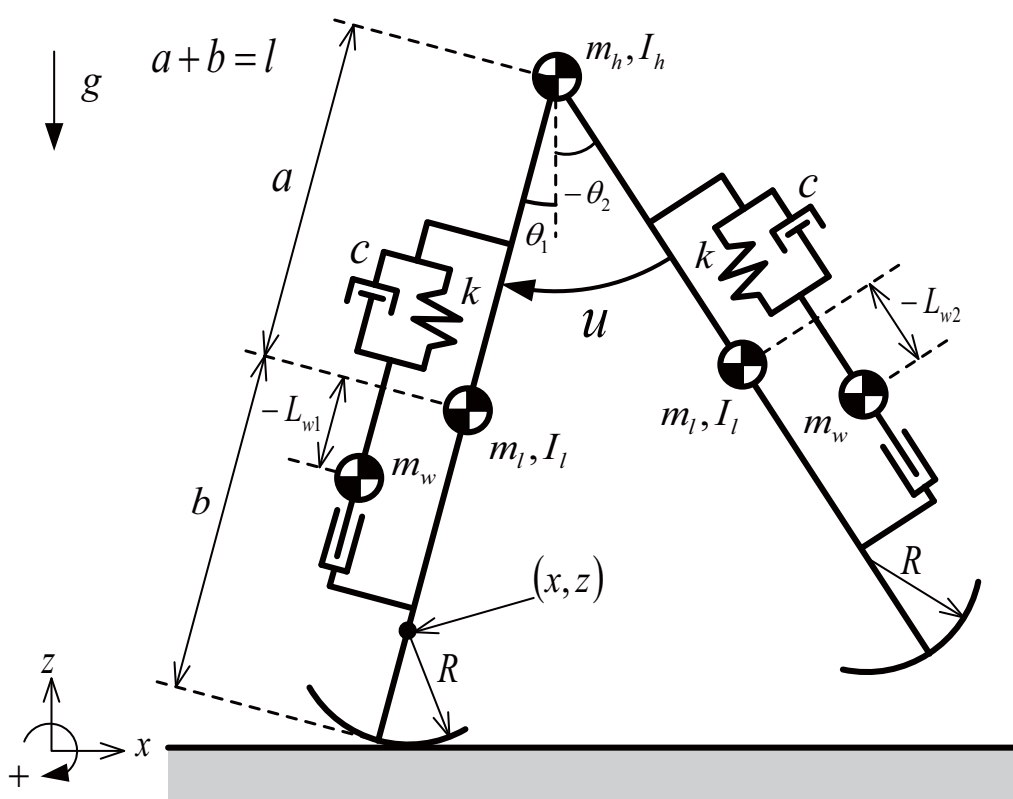


図 4.1: 脚部に動吸振器を持つ劣駆動コンパス型 2 脚ロボットの数学モデル

図 4.1 に，本章で扱うロボットの数学モデルを示す．ロボットは平面 2 リンクの劣駆動コンパス型 2 脚ロボットであり，脚部に動吸振器を備える．動吸振器の仕様は第 2 章と同

様である．図4.1に示すモデルに対し次の仮定をおく．

- 股関節にトルク u を印加可能とする．
- 足部に半径 R の半円足を持つ．
- 支持脚を Leg 1，遊脚を Leg 2 と呼ぶ．
- 歩行中 Leg 2 が床面に擦れる現象はシミュレーションの簡単化のため無視する．
- Leg 2 は床面と完全非弾性衝突する．
- Leg 1 の足裏は床面と滑らず転がりながら接地している．
- Leg 1 は Leg 2 の接地と同時に速やかに離陸する．

4.2 運動方程式

ロボットの運動方程式は Lagrange 方程式を用いて導出する．前章と同様に一般化座標ベクトルを

$$\mathbf{q} = \left[x \quad z \quad \theta_1 \quad \theta_2 \quad L_{w1} \quad L_{w2} \right]^T$$

とすると，運動方程式は次式で表される．

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{S}_1 \mathbf{f}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{S}_2 \mathbf{u} + \mathbf{J}^T \boldsymbol{\lambda} \quad (4.1)$$

$$\mathbf{J} \dot{\mathbf{q}} = \mathbf{0} \quad (4.2)$$

式(4.1)中の $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ は慣性行列， $\mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ はコリオリ力・中心力項に重力項を加えたベクトルである． $\mathbf{f}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ はバネとダンパによる力， \mathbf{u} は股関節に加えるトルク， $\mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2$ は駆動行列である． $\mathbf{S}_1, \mathbf{f}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ は式(2.3)，式(2.4)を用いる．式(4.2)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 $\mathbf{J} \in \mathbb{R}^{2 \times 6}$ は， $\dot{x} = R \dot{\theta}_1$ ， $\dot{z} = 0$ の速度拘束条件から次のように求まる．

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -R & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

動吸振器を固定した場合，速度拘束条件に $\dot{L}_{w1} = 0$ ， $\dot{L}_{w2} = 0$ の条件が加わるため，ヤコビアン $\mathbf{J} \in \mathbb{R}^{4 \times 6}$ は次のように求まる．

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -R & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

式(4.1), (4.2)より λ を消去することで \ddot{q} を得る.

$$\begin{aligned} M(q)\ddot{q} &= Y(q)(S_1 f(q, \dot{q}) + S_2 u - h(q, \dot{q})) \\ X(q) &:= JM(q)^{-1}J^T \\ Y(q) &:= I_6 - J^T X(q)^{-1}JM(q)^{-1} \end{aligned} \quad (4.5)$$

4.3 衝突方程式

モデルの仮定から, 支持脚交換における衝突は完全非弾性衝突であり脚交換は瞬時に行われるため, 衝突方程式と衝突時の速度拘束条件は次式で表される.

$$M(q)\dot{q}^+ = M(q)\dot{q}^- - J_I(q)^T \lambda_I \quad (4.6)$$

$$J_I(q)\dot{q}^+ = 0 \quad (4.7)$$

ここで, “ \dot{q}^+ ”は衝突直後の速度ベクトルを表し, “ \dot{q}^- ”は衝突直前の速度ベクトルを表す. 衝突時のヤコビアン $J_I(q) \in \mathbb{R}^{2 \times 6}$ は以下ようになる.

$$J_I(q) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & J_{13} & J_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & J_{23} & J_{24} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

ただし,

$$J_{13} = (l - R) \cos \theta_1^- - R, \quad J_{14} = -(l - R) \cos \theta_2^-, \quad J_{23} = -(l - R) \sin \theta_1^-, \quad J_{24} = (l - R) \sin \theta_2^-$$

である. 動吸振器を固定した場合, 衝突時のヤコビアン $J_I(q) \in \mathbb{R}^{4 \times 6}$ は以下ようになる.

$$J_I(q) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & J_{13} & J_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & J_{23} & J_{24} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

式(4.6), (4.7)から衝突直後の速度ベクトル \dot{q}^+ は次のように求まる.

$$\dot{q}^+ = (I_6 - M(q)^{-1}J_I(q)^T X_I(q)^{-1}J_I(q)) \dot{q}^- \quad (4.10)$$

$$X_I(q) := J_I(q)M(q)^{-1}J_I(q)^T$$

衝突時の幾何学的関係から位置の更新式は次のように求まる.

$$x^+ = x^- + (l - R) \sin \theta_1^- - (l - R) \sin \theta_2^- \quad (4.11)$$

$$z^+ = z^- + (l - R) \cos \theta_1^- - (l - R) \cos \theta_2^- \quad (4.12)$$

$$\theta_1^+ = \theta_2^- \quad (4.13)$$

$$\theta_2^+ = \theta_1^- \quad (4.14)$$

$$L_{w1}^+ = L_{w2}^- \quad (4.15)$$

$$L_{w2}^+ = L_{w1}^- \quad (4.16)$$

4.4 制御系設計

平地歩容生成のため Leg 2 を前方へ振り出す制御として，股関節角度に対して出力追従制御を行う．制御出力を $\theta_H = \theta_1 - \theta_2$ とすると，この二階微分は式 (4.5) を用いて

$$\begin{aligned}\ddot{\theta}_H &= \mathbf{S}_2^T \ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{S}_2^T \mathbf{M}(\mathbf{q})^{-1} \mathbf{Y}(\mathbf{q}) (\mathbf{S}_1 \mathbf{f}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{S}_2 u - \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})) \\ &= \mathbf{A}(\mathbf{q}) u + \mathbf{B}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\end{aligned}\quad (4.17)$$

となる．ただし，

$$\begin{aligned}\mathbf{A}(\mathbf{q}) &:= \mathbf{S}_2^T \mathbf{M}(\mathbf{q})^{-1} \mathbf{Y}(\mathbf{q}) \mathbf{S}_2 \\ \mathbf{B}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) &:= \mathbf{S}_2^T \mathbf{M}(\mathbf{q})^{-1} \mathbf{Y}(\mathbf{q}) (\mathbf{S}_1 \mathbf{f}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})) \\ \mathbf{S}_2 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T\end{aligned}$$

である． $\ddot{\theta}_H = v$ を達成する制御入力は

$$u = \mathbf{A}(\mathbf{q})^{-1} (v - \mathbf{B}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})) \quad (4.18)$$

で定まり， v を

$$v = \ddot{\theta}_{Hd}(t) + K_D(\dot{\theta}_{Hd}(t) - \dot{\theta}_H) + K_P(\theta_{Hd}(t) - \theta_H) \quad (4.19)$$

とすれば $\theta_H \rightarrow \theta_{Hd}(t)$ を達成することができる．ただし， K_P ， K_D は PD フィードバックゲインを表す正定数である．目標時間軌道 $\theta_{Hd}(t)$ については，5 次の目標時間軌道 $\theta_{Hd}(t) = a_5 t^5 + a_4 t^4 + a_3 t^3 + a_2 t^2 + a_1 t + a_0$ で内挿する．脚衝突直後を $t = 0$ [s] とおき，境界条件として

$$\theta_{Hd}(0) = \alpha', \quad \theta_{Hd}(T_{\text{set}}) = \alpha, \quad \dot{\theta}_{Hd}(0) = \dot{\theta}_{Hd}(T_{\text{set}}) = \ddot{\theta}_{Hd}(0) = \ddot{\theta}_{Hd}(T_{\text{set}}) = 0$$

を与えると，各係数は以下のように定まる．

$$a_5 = \frac{6(\alpha - \alpha')}{T_{\text{set}}^5}, \quad a_4 = -\frac{15(\alpha - \alpha')}{T_{\text{set}}^4}, \quad a_3 = \frac{10(\alpha - \alpha')}{T_{\text{set}}^3}, \quad a_2 = a_1 = 0, \quad a_0 = \alpha'$$

ただし， α [rad] は目標股角度， α' [rad] は $t = 0$ [s] における初期股角度， T_{set} [s] は目標整定時間である．

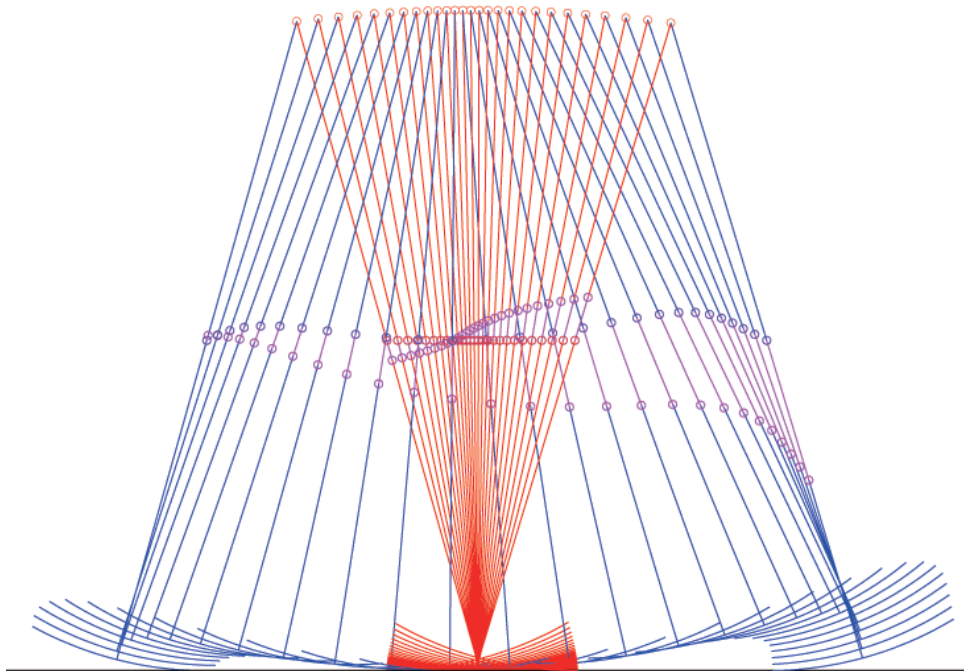


図 4.2: 定常歩行時のスティック線図 ($k = 50$ [N/m], $c = 10$ [N·s/m])

4.5 数値シミュレーション

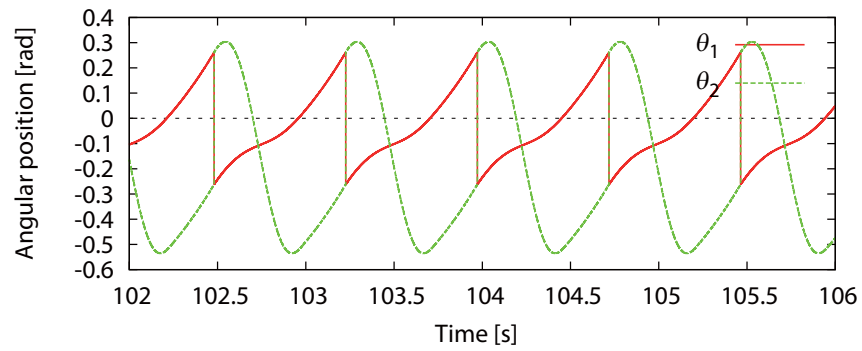
4.5.1 解析の準備と評価指標

数値シミュレーションによるロボットの平地動歩行解析を行った．数値シミュレーションで用いたパラメータを表 4.1 に示す．図 4.2 にロボットの定常歩行時のスティック線図を示す．また，図 4.3 に $k = 100$ [N/m], $c = 10$ [N·s/m] での解析結果を示す．(a), (b) にロボットの状態量 $\theta_1, \theta_2, L_{w1}, L_{w2}$ の時間変化をプロットした．さらに，図 4.3(c) に θ_1 の位相平面図を示す．

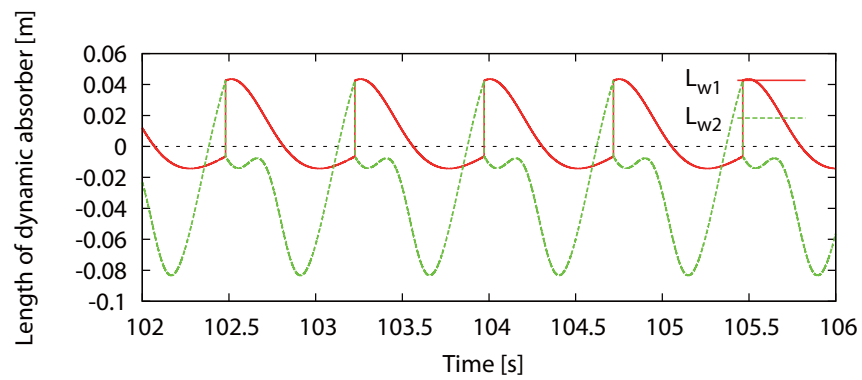
図 4.2 から，Leg 2 が脚衝突までに目標股角度まで整定され，そのまま衝突姿勢を維持できていることが分かる．また，図 4.3 から， L_{w1} に比べて L_{w2} は大きく運動し，受動歩行に比べ Leg 2 の振り運動の影響が大きいことが分かる．また，図 4.3(c) から 1 周期のリミットサイクルに収束していると分かる．

バネ定数 k とダンパ定数 c を変化させて数値シミュレーションを行う．シミュレーションは以下の手順で行った．

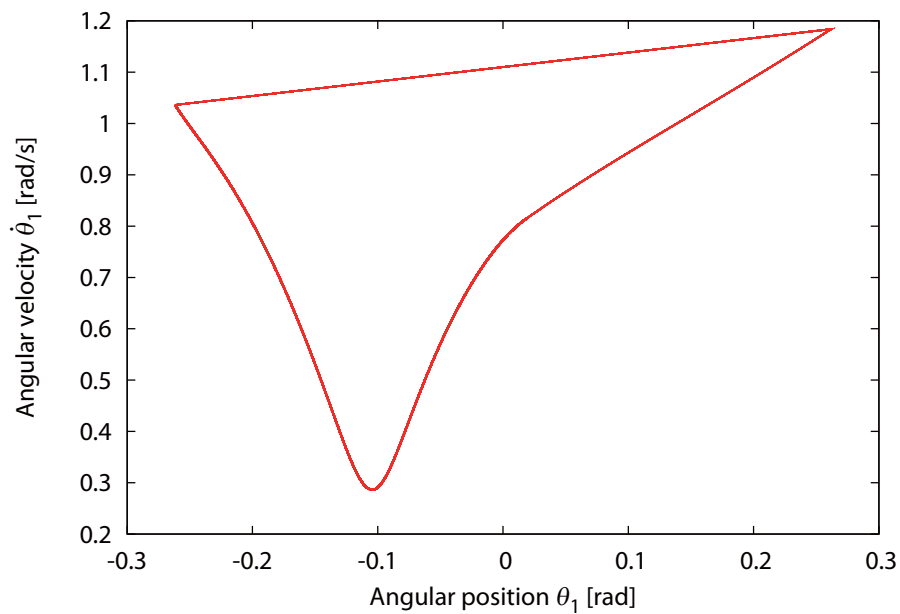
- 1) バネ定数 k を 10 [N/m] として，表 4.2 に示す初期値を与えて歩行を開始する．
- 2) Leg 1 の Z 軸方向の床反力 λ_2 の符号が負になった場合は，ロボットが浮上または転倒したとみなして歩行不成立とし，シミュレーションを終了する．動吸振器の変位 L_{w1}, L_{w2} の絶対値が a, b よりも大きくなった場合も同様とする．



(a) Leg 1 , Leg 2 の絶対角度



(b) Leg 1 , Leg 2 の動吸振器変位



(c) 定常歩行時の θ_1 の位相平面図

図 4.3: $k = 100$ [N/m] , $c = 10$ [N·s/m] の平地歩行シミュレーション結果

表 4.1: 物理パラメータと制御パラメータ

m_h	10.0	kg
$m_l (= m_w)$	2.5	kg
l	1.0	m
$a (= b)$	0.5	m
I_h	1.0×10^{-3}	kg · m ²
I_l	1.0×10^{-3}	kg · m ²
R	0.5	m
α	$\pi/6$	rad
T_{set}	0.5	s
K_D	100	-
K_P	2500	-

表 4.2: 数値シミュレーションの初期値

$x (= z)$	0.0	m
$\dot{x} (= \dot{z})$	0.0	m/s
θ_1	0.0	rad
θ_2	$-\alpha$	rad
$\dot{\theta}_1 (= \dot{\theta}_2)$	1.21	rad/s
$L_{w1} (= L_{w2})$	0.0	m
$\dot{L}_{w1} (= \dot{L}_{w2})$	0.0	m/s

- 3) 100 秒間の歩行継続を歩行成立と見なし、それ以降から 20 歩分の歩行データを保存する。
- 4) k を 10 [N/m] だけ増加させ、1) に戻る。
- 5) k が 1000 [N/m] になるまで 1) から 4) を繰り返す。

歩行性能の指標として、本章では歩行速度と Specific resistance（以下 SR）を用いる。歩行速度 V [m/s] は次のように定義した。

$$V = \frac{\Delta L}{T} = \Delta L \cdot f_w \quad (4.20)$$

ΔL [m] は歩幅であり、一步前の衝突地点から現在の衝突地点までの距離である。前章とは異なりこのように定義するのは、半円足の転がりにより、支持脚接地点が移動するためである。出力追従制御により常に同じ目標衝突姿勢に整定されるため、歩幅は一定である。 f_w [Hz] は歩行率を表し、歩行周期 T [s] の逆数で定義する。SR は次のように与えられる。

$$\text{SR} := \frac{p}{MgV} \quad (4.21)$$

M [kg] はロボットの全質量、 g [m/s²] は重力加速度、 V [m/s] は前述したロボットの平均歩行速度である。 p [J/s] は平均入力パワーであり、次式で定義する。

$$p := \frac{1}{T} \int_0^T |u(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2)| dt \quad (4.22)$$

SR は 1.0 [kg] の質量を 1.0 [m] 移動させるのに必要なエネルギー消費量を表す無次元量であり、この値が小さいほど移動効率に優れることを意味する。

4.5.2 ダンパ定数 c を変化させたときの解析結果

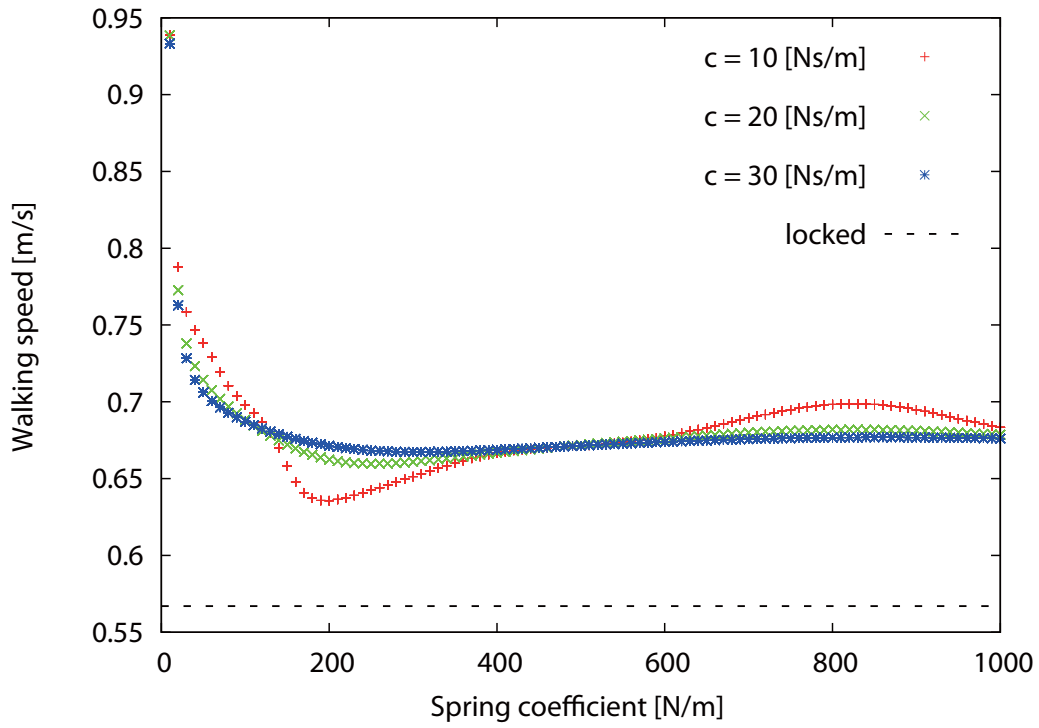
図 4.4, 図 4.5 にバネ定数 k に対する歩行速度, SR の解析結果を示す. (a) には $k = 10 - 1000$ [N/m] の間の解析結果をプロットし, (b) に $k = 0 - 25$ [N/m] の間で (a) を拡大したグラフを示す. それぞれのグラフには, ダンパ定数 c を 10, 20, 30 [N·s/m] に設定した結果をプロットし, 動吸振器を固定した結果を破線でプロットした. 前述した通り, 歩幅が一定となることから, 歩行速度のみ図示している. なお, 歩幅 ΔL は粘弾性係数に関係なくおよそ 0.52 [m] で一定となった.

図 4.4(a) から分かるように, 動吸振器を固定した場合より歩行速度が上昇していることがわかる. また, 第 2 章とは異なり歩行速度が固定した場合より減少することはなかった. どのダンパ定数の場合でもおよそ $k = 10$ [N/m] のとき歩行速度が最大となり, k が増加するにつれて急速に歩行速度が減少している. c を増加させると歩行速度は k に対して変化が少なくほぼ一定値となる.

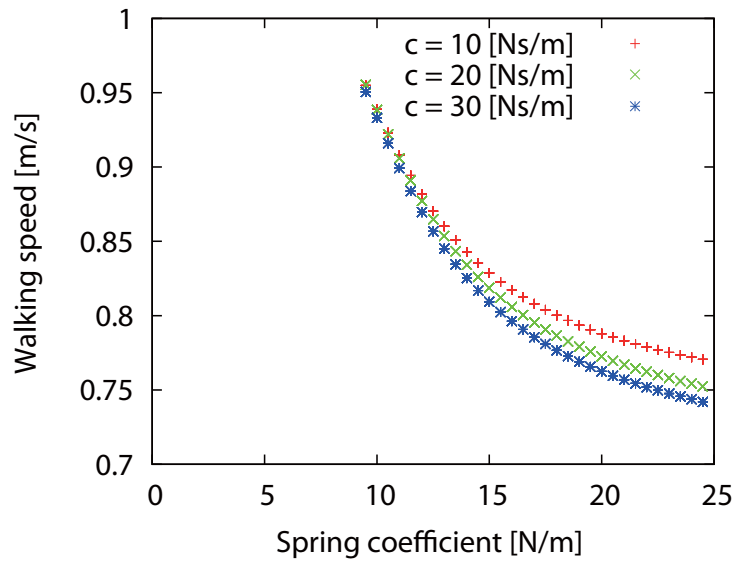
高速化の要因として前章と同様に全重心軌道の平坦化が考えられる [3]. 図 4.6 にロボットの全重心軌道を示す. (a), (b) を比較すると動吸振器を固定した場合よりも重心の上下動が小さくなっていることが分かる. これは脚・腰質量の上下動に対して動吸振器質量が逆向きに運動するためである. 図 4.7 に Leg 2 の Z 座標の時間変化を示す. 脚質量の座標を赤, 動吸振器質量の座標を緑でプロットした. グラフから, 動吸振器質量が Leg 2 の運動に対して逆向きに運動していることが分かる. 特に, Leg 2 を振り上げる際に下方へ大きく運動することで, 立脚相の後半の CoM の上下動が大幅に抑えられているといえる.

図 4.5(a) から, SR もほとんどの k で動吸振器を固定した場合より向上していることがわかる. しかし, $k = 10$ [N/m] では SR の値が増大し, 脚移動効率は悪化している. これは図 4.5(b) から明らかで, およそ $k \leq 15$ [N/m] ではどのダンパ定数の結果も, 動吸振器を固定した場合より SR が増大している. $k \leq 15$ [N/m] の場合は歩行速度が大幅に向上されているが, SR は悪化しているため, 高い歩行性能が得られたのは $k = 20 - 100$ [N/m] 付近であるといえる.

c を大きくすると動吸振器の振動が抑制され, k に応じた歩行速度の変化は小さくなるが, SR は多少悪化する. しかし固定した場合と比較すると c によって歩行性能の悪化している場合は見られないため, 設計で重要となるのはバネ定数 k であるといえる. ただし, 動吸振器同士の共振を避けるためダンパ要素は必要である.

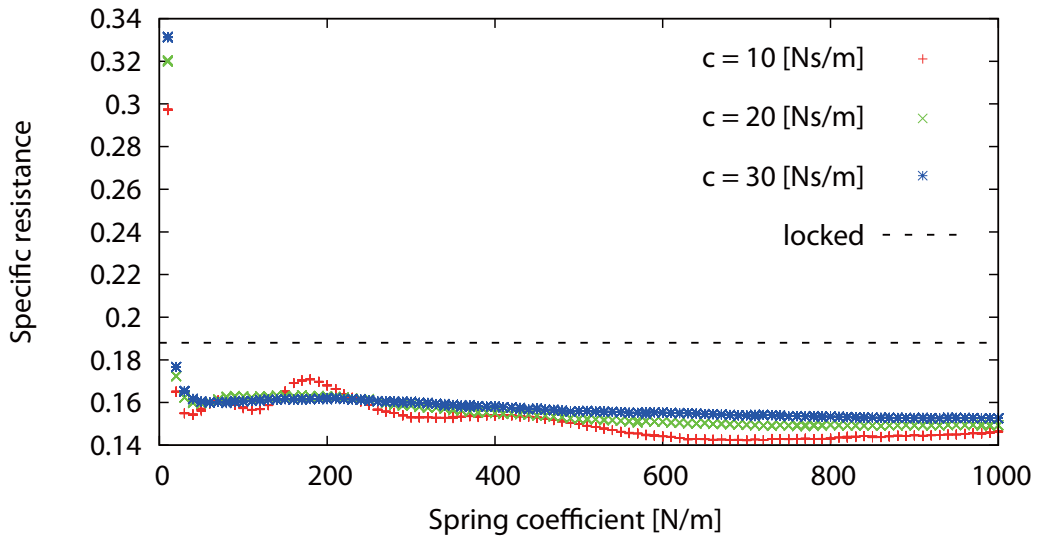


(a) バネ定数 k に対する平地歩行速度

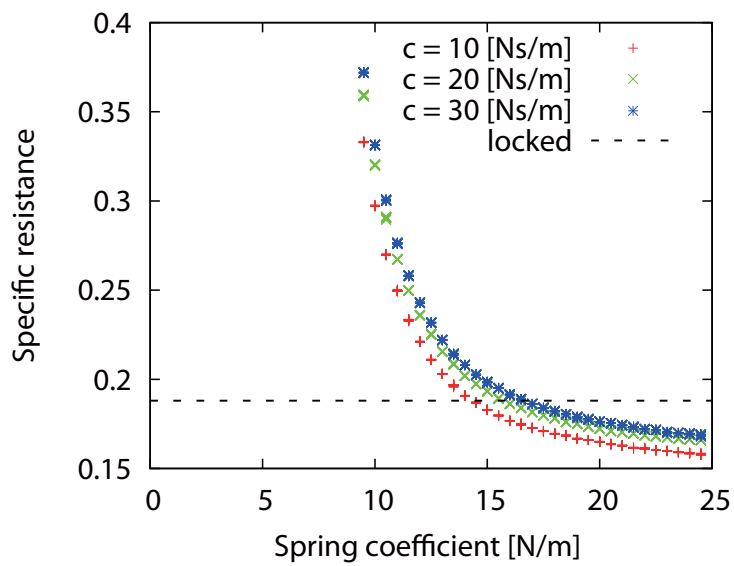


(b) (a) の拡大図 ($k = 0 - 25$ [N/m])

図 4.4: ダンパ定数 c を変化させたときの歩行速度

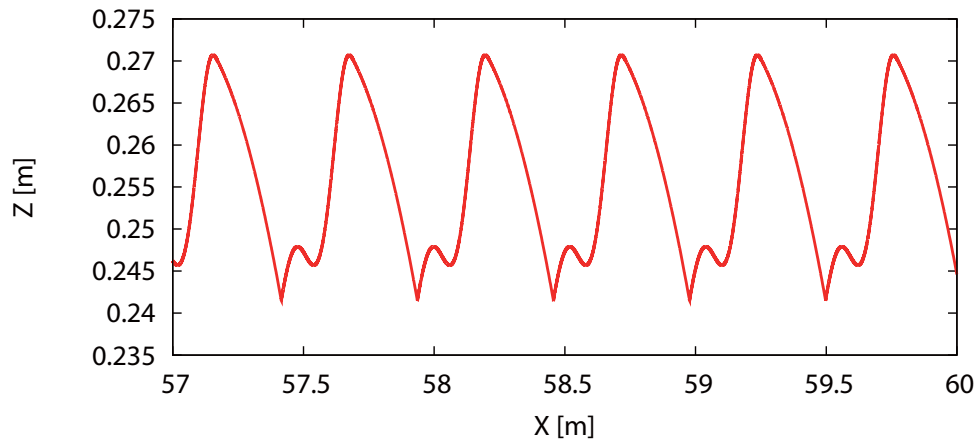


(a) Specific resistance

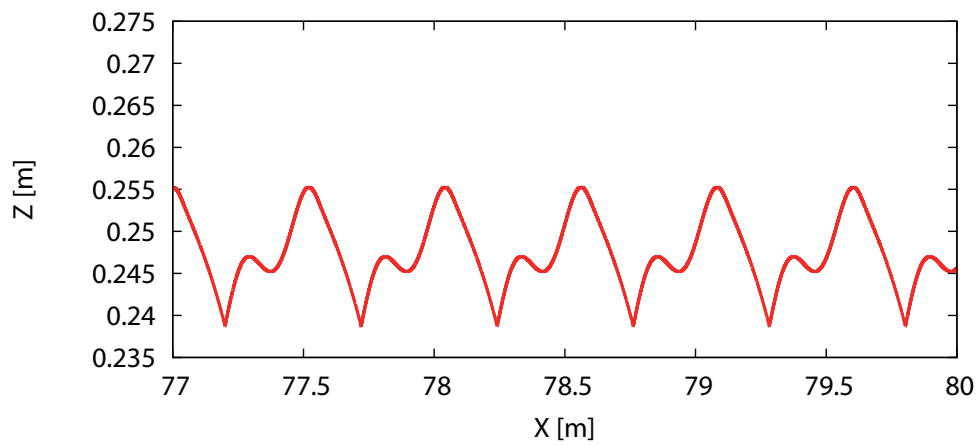


(b) (a) の拡大図 ($k = 0 - 25$ [N/m])

図 4.5: ダンパ定数 c を変化させたときの Specific resistance



(a) 動吸振器を固定した場合



(b) $k = 50$ [N/m] , $c = 10$ [N·s/m] と設定した場合

図 4.6: 平地歩行における全重心軌道

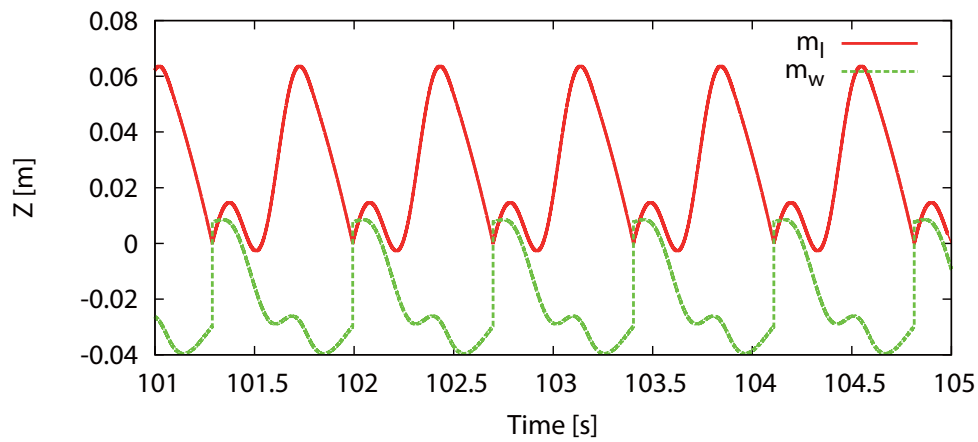


図 4.7: Leg 2 の z 座標変位 ($k = 50$ [N/m] , $c = 10$ [N·s/m])

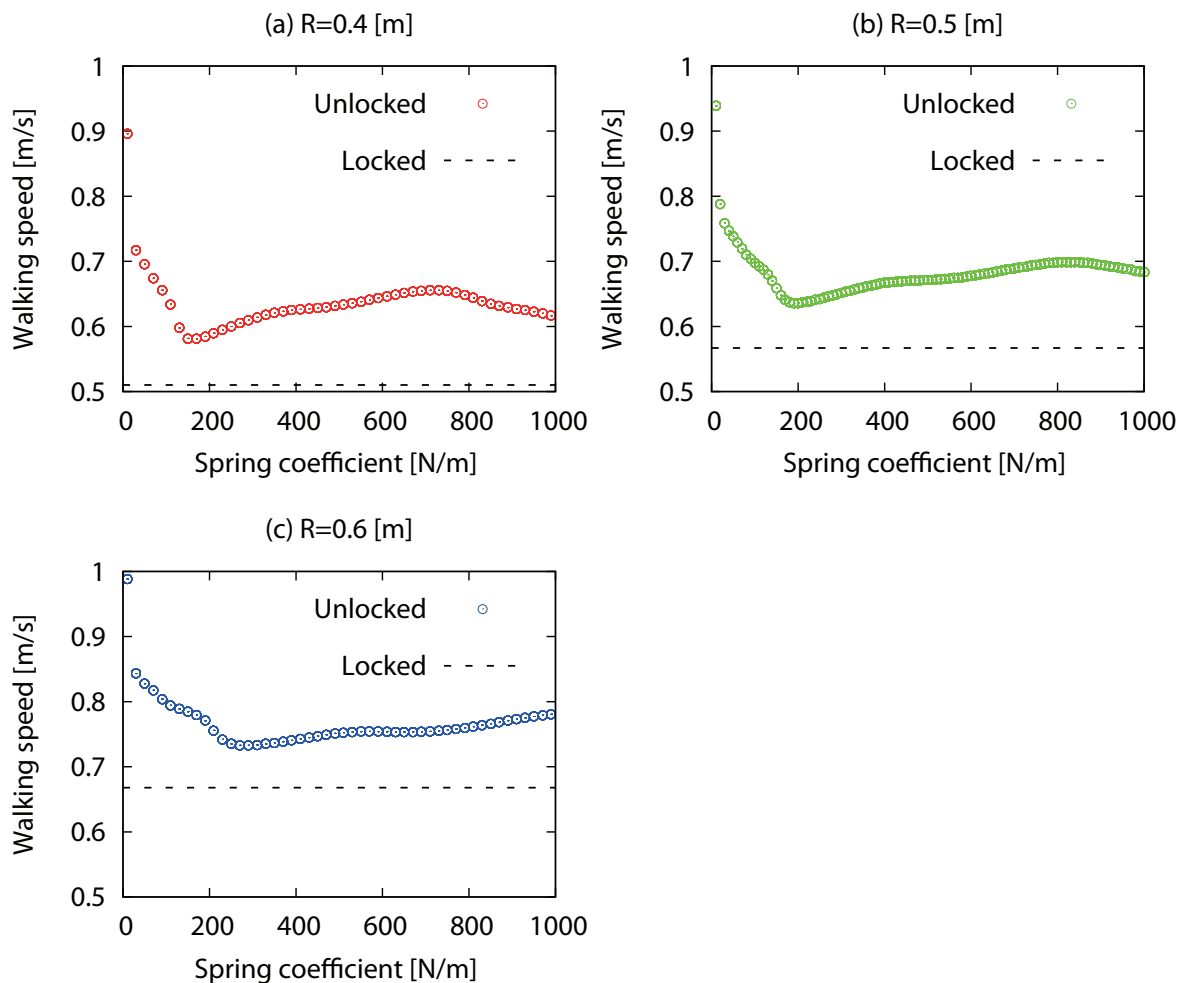


図 4.8: 足裏半径 R を変化させたときの歩行速度

4.5.3 足裏半径 R を変化させたときの解析結果

脚移動ロボットにおいて半円足には衝撃吸収効果があることが知られている [9]．脚交換における衝突のエネルギー損失が抑制されることで，結果として高速化が達成されるというメカニズムである．そこで動吸振器による高速化と足裏半径を増加させることによる高速化の関係性を明らかにするため， $c = 10$ [N·s/m] に固定し，足裏半径 R を変化させて数値シミュレーションを行った．なお R 以外のパラメータは前節と同じである．

図 4.8，図 4.9 に歩行速度，SR を示す．ただし， $R = 0.5$ [m] の結果は図 4.4，図 4.5 の $c = 10$ [N·s/m] の結果と同じである．また， $R = 0.4, 0.6$ [m] の結果は k を 10 - 990 [N/m] の間で 20 [N/m] ずつ変化させているので注意されたい．(a)，(b)，(c) に $R = 0.4, 0.5, 0.6$ [m] に設定したときの解析結果をプロットし，動吸振器を固定した場合の結果を破線でプロットしている．

図 4.8 から， R を大きくしていくことで動吸振器を固定した場合の歩行速度が上昇していると分かる．同時に提案する脚フレームの歩行速度は図 4.4 と同様に常にそれを上回っ

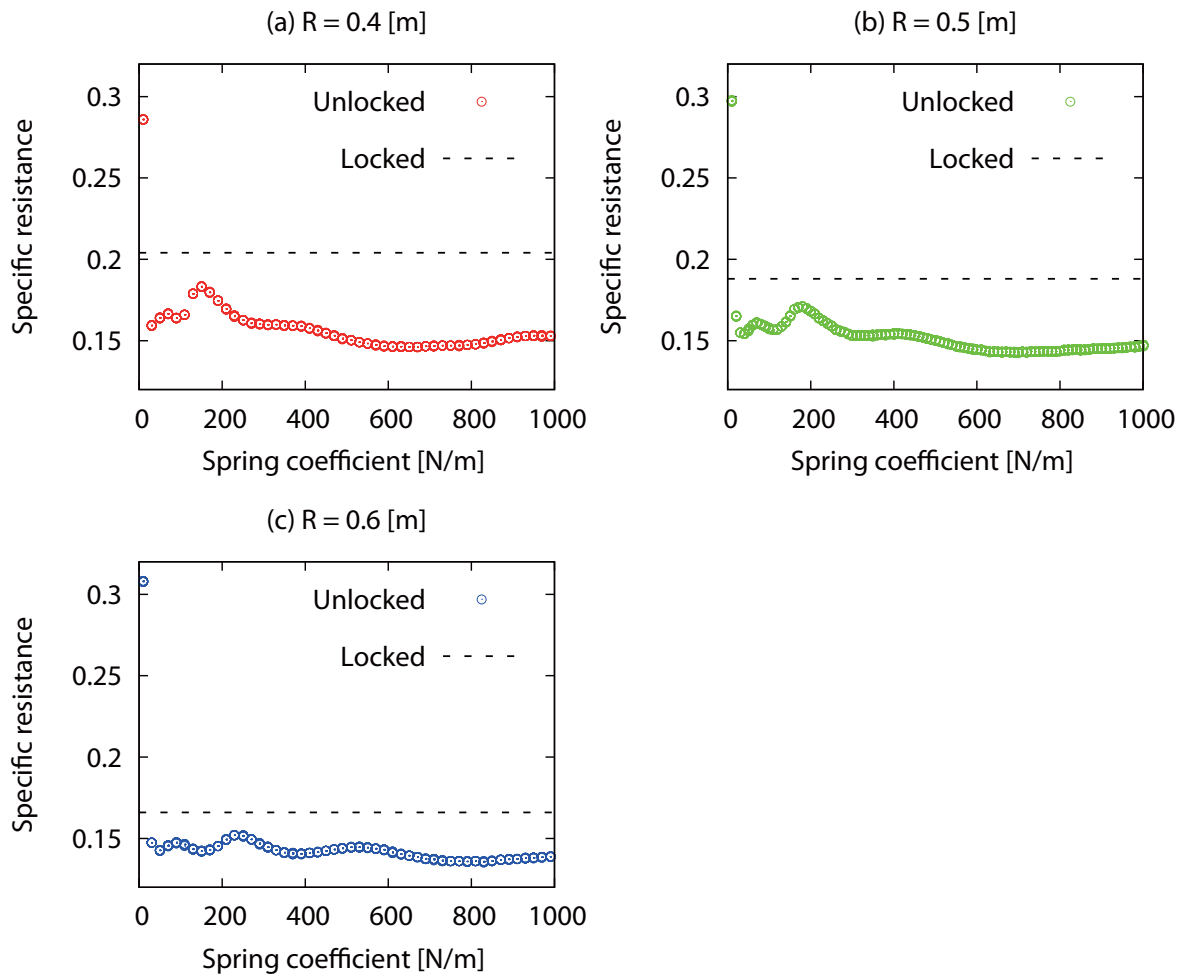


図 4.9: 足裏半径 R を変化させたときの Specific resistance

ていることも分かる．また図 4.9 から同様に比較すると，やはり図 4.5 のように $k = 10$ [N/m] の場合を除いて固定した場合よりも SR は改善されていると分かる．このことから，足裏半径を変化させても動吸振器による歩行性能向上の傾向そのものは変化が少ないことが分かる．つまり，動吸振器による高速化と半円足による高速化の 2 つの効果は，干渉しあうものではなくどちらもほぼ独立に歩行性能向上に寄与するものと考えられる．

足裏半径を大きくすると床面と転がり拘束を受けるために最低限必要な足部長も増加する．実際の 2 脚ロボットの設計を考えると，足部長を自由に設定することは難しく，ある程度制約を受けることになる．動吸振器を用いることで，ロボットの身体形状による制約をあまり受けず歩行性能を向上させることが可能であると考えられる．

第5章 不整地歩行

本章では，前章で用いた平地歩行モデルを使用し不整地路面での歩行を試みる．提案する脚フレームを適用することで不整地踏破性能が向上することを数値シミュレーションから示す．

5.1 単一段差乗り越え

5.1.1 段差モデルと評価指標

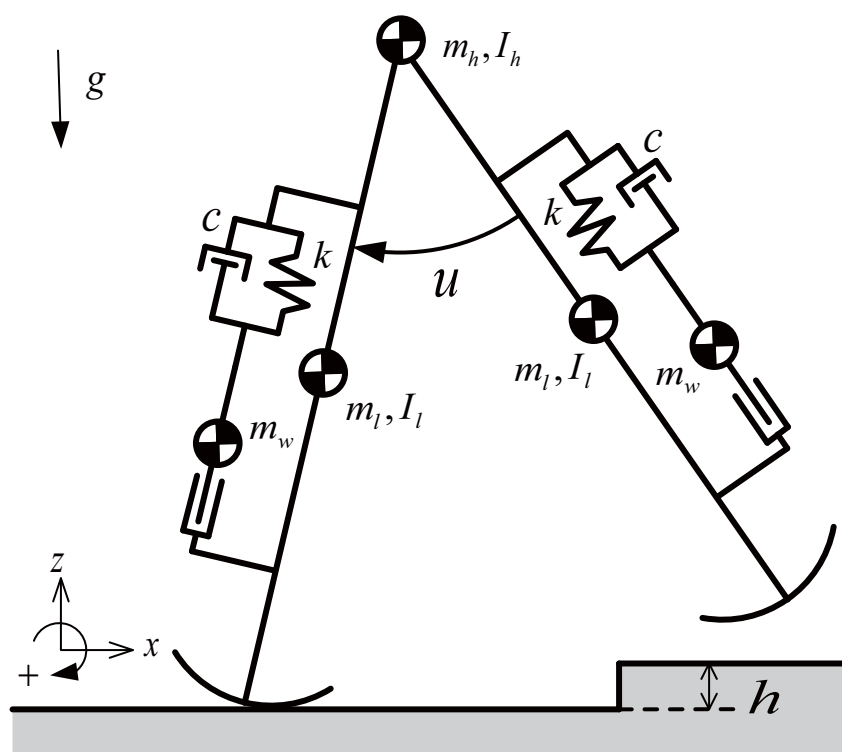


図 5.1: 不整地歩行モデル

本章では，提案する脚フレームによる不整地踏破性能の評価を行う．ここで，不整地踏破性能とは「不整地において転倒せず歩行を継続できる」性能を指すこととする．図 5.1 に，本章で扱う不整地歩行モデルを示す．ロボットのモデルは前章 4.1 節で定義した，脚

部に動吸振器を持つ劣駆動コンパス型ロボットを用いる．動吸振器・モデルに対する仮定は第4章と同じである．数値シミュレーションで使用するパラメータは表4.1に示したものをを用いる．

はじめに，簡単な不整地モデルとして単一段差を考える．シミュレーション手順を以下にまとめる．

- 1) バネ定数 k を 10 [N/m] に設定し，前章で保存した定常歩行データを初期値として与える．
- 2) シミュレーションを開始し，10 歩後単一段差 h に到達する．
- 3) 歩行を継続出来なかった場合はその時点でシミュレーションを終了し，段差を乗り越え歩行が継続した場合は，10 歩後にシミュレーションを終了する．シミュレーション終了後，歩行データを保存する．
- 4) k を 20 [N/m] 増加させ，そのときの定常歩行データを初期値に設定し，2) に戻る．
- 5) $k = 990$ [N/m] まで 2) から 4) を繰り返す．

単一段差 h は 10 [mm] から 35 [mm] まで 5 [mm] 刻みに 6 通り設定した．また，乗り越えの際に Leg 2 が段差に衝突する現象は，シミュレーションの簡単化のため無視する．本節では評価指標として，乗り越えることが可能な最大の単一段差 h_{max} を用いる．即ち，より高い段差を乗り越えることが可能ならば，不整地踏破能力もより高いと評価する．

5.1.2 解析結果

図 5.2 に k に対する h_{max} を示す．ダンパ定数 c を 10, 20, 30 [N/m] の 3 通りに設定し，それぞれの c でのシミュレーション結果を図 5.2(a)，図 5.2(b)，図 5.2 (c) に示す．また，動吸振器を固定した場合の h_{max} を破線でプロットしている．

図 5.2 から動吸振器を固定した場合よりも h_{max} が増加していることが分かる．しかし，図 5.2 と図 4.4 を比較すると，グラフの傾向が一致していると分かる．このことから， h_{max} が上昇した要因は，高い歩行速度で段差に到達したことであると考えられる．高い歩行速度であれば，ロボットがより多くの運動エネルギーを持っているということなので，このことからこの結果は妥当であると言える．

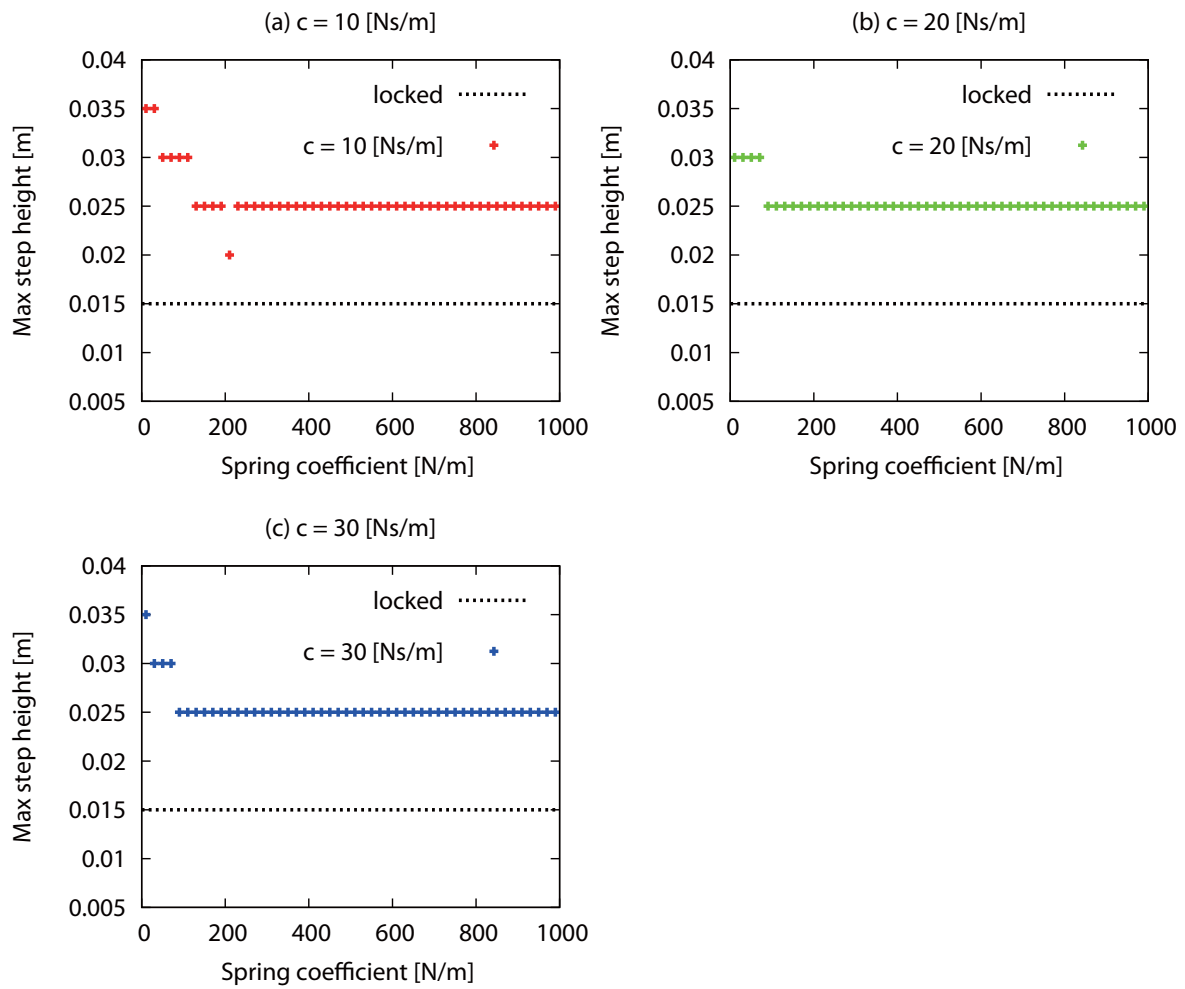


図 5.2: 単一段差乗り越えの解析結果

5.2 不整地歩行

5.2.1 段差モデルと評価指標

次に，段差モデルをより一般的なモデルへと拡張し，一步ごとに床面高さ h が変動する路面での歩行を考える．床面高さはガウス分布に従う乱数を用いて変化させる [10], [11]．

ガウス分布は平均 μ ，標準偏差 σ の二つのパラメータで表現される．確率変数 χ がガウス分布に従うとき， $\pm 2\sigma$ 以下の範囲に χ が含まれる確率は 95.45% であることが知られている．例えば，平均 $\mu = 0$ [mm]，標準偏差 $\sigma = 1$ [mm] のガウス分布に従う乱数で h を変化させる場合， h が ± 2 [mm] 以下に含まれる確率は 95.45% ということになる．このような不整地モデルを用いることで，段差の乗り越え，乗り降りを含んだ不整地歩行を行うことができる．ガウス分布の確率密度関数は次式で表される．

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5.1)$$

シミュレーション手順を以下にまとめる．

- 1) バネ定数 k を設定し，前章で保存した定常歩行データを初期値として与え，シミュレーションを開始する．
- 2) 一步ごとにロボットの支持脚接地点位置からの相対高さ h をガウス分布に従う乱数で変化させる．
- 3) 歩行を継続出来なかった場合はその時点でシミュレーションを終了し，歩数を記録する．歩数上限まで不整地歩行を継続した場合はそれ以降のシミュレーションを行わずシミュレーションを終了する．
- 4) 1) に戻り同様のシミュレーションを 100 回繰り返す．

数値シミュレーションは動吸振器を固定した場合，バネ定数 k を 10, 110, 210, 310, 410, 510, 610 [N/m] と設定した場合を行った．ダンパ定数は $c = 10$ [N/m] に設定し，ガウス分布のパラメータは平均 $\mu = 0$ [mm]，標準偏差 $\sigma = 7.5$ [mm] に設定した．また歩数上限は 200 歩とした．

評価指標として，歩数上限到達回数と平均歩数を用いる．歩数上限達成回数は 100 回の不整地歩行において歩数上限に到達した回数を表す．平均歩数は歩数上限に到達出来ずに転倒してしまった場合の歩数の平均である．歩数上限到達回数と平均歩数はどちらも値の大きい方が不整地踏破性能が高いと評価する．

表 5.1: 不整地での歩行解析結果

	歩数上限到達回数	平均歩数 [歩]
固定	0 回	40.62
$k = 10$ [N/m]	0 回	12.27
$k = 110$ [N/m]	8 回	56.66
$k = 210$ [N/m]	6 回	66.41
$k = 310$ [N/m]	4 回	55.55
$k = 410$ [N/m]	3 回	53.51
$k = 510$ [N/m]	1 回	53.50
$k = 610$ [N/m]	7 回	49.54

5.2.2 解析結果

表 5.1 に不整地歩行の解析結果をまとめる．また，平均歩数は図 5.3 に棒グラフで結果を図示する．ただし，図 5.3 において動吸振器を固定した場合の結果は点線でプロットしている．

表 5.1 から，動吸振器を固定した場合では歩数上限到達回数が 0 回であったが， $k = 10$ [N/m] の場合を除いて提案する脚フレームを用いた場合は歩数上限に到達出来ていることが分かる．また表 5.1，図 5.3 から，平均歩数でも同様に $k = 10$ [N/m] の場合を除いて提案する脚フレームを用いた場合の方が，動吸振器を固定した場合よりも平均歩数が増加していると分かる．以上のことから脚部に動吸振器を搭載することで，不整地踏破性能が剛体脚に比べ向上しているといえる．

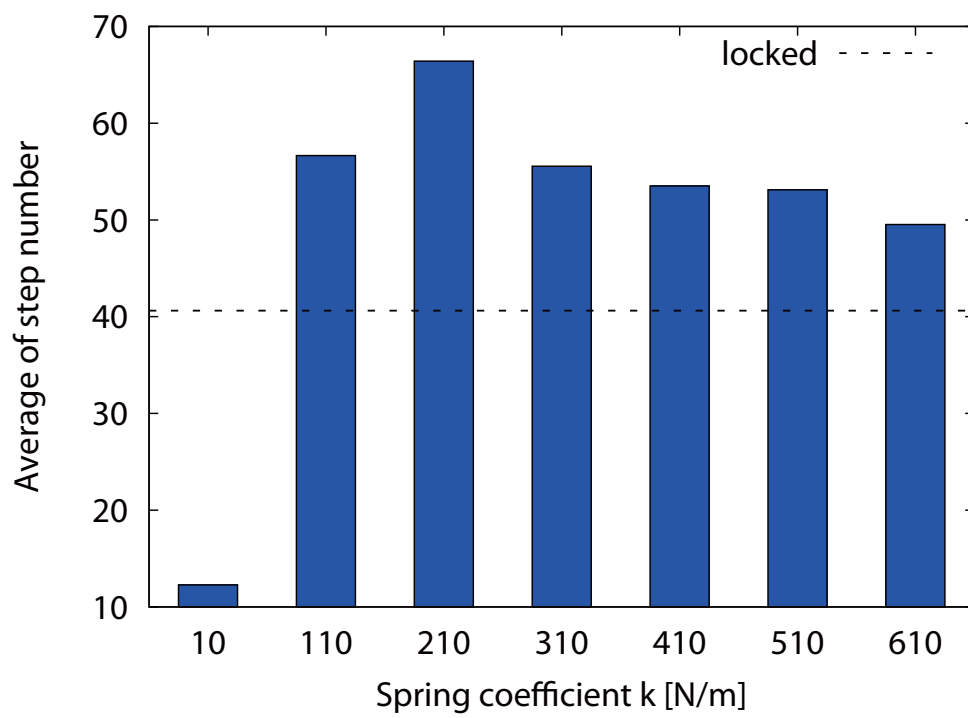


図 5.3: 各バネ定数 k での平均歩数

第6章 結論

6.1 結論

本論文では，剛体脚と粘弾性脚の両者の性質を持つ脚フレームとして動吸振器を搭載した剛体脚を提案し，それによる高速かつロバストな歩容生成について検討した．また，提案する脚フレームを持つ2脚ロボットの数学モデルを構築し，数値シミュレーションを通して提案する脚フレームの持つ力学的特性を解析した．

以下に本研究により明らかになった知見を総括する．

- 提案する脚フレームをコンパス型受動歩行ロボットに適用することで，剛体脚フレームを適用した場合より歩行速度が上昇する．
- 歩行速度上昇の要因として重心軌道の平坦化の可能性を示唆した．
- 動吸振器の粘弾性係数の値によっては歩容が著しく複雑化し周期倍分岐現象や，カオス的な歩容が生成される．
- 平地歩行においても提案する脚フレームを適用することで歩行速度が上昇する．また，脚移動効率も向上する．
- 剛体脚よりも提案する脚フレームの不整地踏破性能は向上する．
- 動吸振器の粘弾性係数の設定値によっては，提案する脚フレームの脚移動効率・不整地踏破性能は剛体脚よりも低下する．

6.2 今後の予定

今後の課題として，不整地踏破性能が向上した要因についてさらに解析を行うことが挙げられる．また，動吸振器の粘弾性係数の設計法についても併せて検討する必要がある．最後に，実機実験による提案する脚フレームの有効性検証を目指し，本研究で用いたコンパス型モデルから，膝付きモデルに対して提案する脚フレームを適用し，歩行解析を行うことが挙げられる．

謝辞

本研究にあたり，熱心に指導して頂いた浅野文彦准教授に心より感謝致します．ロボティクスの観点から鋭いご指摘を頂いた丁洛榮教授に感謝致します．非線形力学の観点から様々なお助言を頂いた立命館大学徳田功教授に感謝致します．学会活動中に鋭いご指摘を頂き，多くの質問に回答して下さった広島大学原田祐志助教および九州工業大学花澤雄太助教に感謝致します．浅野文彦研究室のメンバーであり，討論・論文作成において貴重な意見・助言を頂いた肖軒氏，菊地保公氏，田村和希氏，寺田夕貴氏に感謝致します．最後に，ここまで私を育て見守ってくれた両親に深く感謝します．

参考文献

- [1] T. McGeer, "Passive dynamic walking," *Int. J. of Robotics Research*, Vol. 9, No. 2, pp.62-82, 1990.
- [2] J. Kawamoto and F. Asano, "Active viscoelastic-legged rimless wheel with upper body and its adaptability to irregular terrain," *Proc. of the 2012 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp.157-162, 2012.
- [3] D. Tanaka, F. Asano and I. Tokuda: "Gait analysis and efficiency improvement of passive dynamic walking of combined rimless wheel with wobbling mass," *Proc. of the 2012 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp.151-156, 2012.
- [4] Y. Hanazawa, T. Hayashi, M. Yamakita and F. Asano, "High-speed limit cycle walking for biped robots using active up-and-down motion control of wobbling mass," *Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 2013.
- [5] 林, 山北, 花澤, 浅野: "揺動質量の能動的上下動による2足歩行ロボットの不整地に対する踏破性能向上", 第14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, 3H2-2, 2013.
- [6] J. Ackerman and J. Seipel, "Energy Efficiency of Legged Robot Locomotion With Elastically Suspended Loads," *IEEE Trans. Robot.*, Vol. 29, No. 2, pp.321-330, Apr. 2013.
- [7] A. Goswami, B. Espiau, "A study of the passive gait of a compass-like biped robot: symmetry and chaos," *Int. J. of Robotics Research*, Vol. 17, No. 12, pp. 1282-1301, 1998.
- [8] F. Asano, T. Sogawa, K. Tamura and Y. Akutsu, "Passive Dynamic Walking of Rimless Wheel with 2-DOF Wobbling Mass," *Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 2013.
- [9] 浅野, 羅: "半円足の転がり効果を利用した劣駆動仮想受動歩行 - (II) 性能解析と冗長モデルへの拡張 -", *日本ロボット学会誌*, 25-4, 578/588 (2007)
- [10] D. G. E. Hobbelen and M. Wisse, "A Disturbance Rejection Measure for Limit Cycle Walkers: The Gait Sensitivity Norm," *IEEE Trans. Robot.*, Vol. 23, No. 6, pp.1213-1224, Dec. 2007.
- [11] D. G. E. Hobbelen and M. Wisse, "Swing-Leg Retraction for Limit Cycle Walkers Improves Disturbance Rejection," *IEEE Trans. Robot.*, Vol. 24, No. 2, pp.377-388, Apr. 2008.

付録A 運動方程式の詳細

第2章式(2.1)における慣性行列 $M(q)$ と非線形項 $h(q, \dot{q})$ の詳細な項について述べる。
 $M(q)$ を

$$M(q) = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} & M_{15} & M_{16} \\ & M_{22} & M_{23} & M_{24} & M_{25} & M_{26} \\ & & M_{33} & M_{34} & M_{35} & M_{36} \\ & & & M_{44} & M_{45} & M_{46} \\ & & & & M_{55} & M_{56} \\ \text{Sym.} & & & & & M_{66} \end{bmatrix} \quad (\text{A.1})$$

とおくと、各要素は

$$\begin{aligned} M_{11} &= m_h + 2(m_l + m_w) \\ M_{12} &= 0 \\ M_{13} &= (L_{w1}m_w + b(m_l + m_w) + l(m_l + m_w + m_h)) \cos \theta_1 \\ M_{14} &= (L_{w2}m_w - a(m_l + m_w)) \cos \theta_2 \\ M_{15} &= m_w \sin \theta_1 \\ M_{16} &= m_w \sin \theta_2 \\ M_{22} &= 2(m_l + m_w) + m_h \\ M_{23} &= -(L_{w1}m_w + b(m_l + m_w) + l(m_l + m_w + m_h)) \sin \theta_1 \\ M_{24} &= (-L_{w2}m_w + a(m_l + m_w)) \sin \theta_2 \\ M_{25} &= m_w \cos \theta_1 \\ M_{26} &= m_w \cos \theta_2 \\ M_{33} &= I_0 + I_h + b^2m_l + (b + L_{w1})^2m_w + l^2(m_l + m_w + m_h) \\ M_{34} &= l(L_{w2}m_w - a(m_l + m_w)) \cos(\theta_1 - \theta_2) \\ M_{35} &= 0 \\ M_{36} &= -lm_w \sin(\theta_1 - \theta_2) \\ M_{44} &= I_0 + a^2m_l + (a - L_{w2})^2m_w \\ M_{45} &= 0 \\ M_{46} &= 0 \\ M_{55} &= m_w \\ M_{56} &= 0 \\ M_{66} &= m_w \end{aligned}$$

となる． $h(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ についても同様に，

$$\mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ h_4 \\ h_5 \\ h_6 \end{bmatrix} \quad (\text{A.2})$$

とおいたとき，各要素は

$$\begin{aligned} h_1 &= 2L_{w1}\dot{\theta}_1 m_w \cos \theta_1 + 2L_{w2}\dot{\theta}_2 m_w \cos \theta_2 \\ &\quad -\dot{\theta}_1^2 (L_{w1}m_w + b(m_l + m_w) + l(m_l + m_w + m_h)) \sin \theta_1 \\ &\quad +\dot{\theta}_2^2 (-L_{w2}m_w + a(m_l + m_w)) \sin \theta_2 \\ h_2 &= g(2(m_l + m_w) + m_h) - \dot{\theta}_1^2 (L_{w1}m_w + b(m_l + m_w) + l(m_l + m_w + m_h)) \cos \theta_1 \\ &\quad +\dot{\theta}_2^2 (-L_{w2}m_w + a(m_l + m_w)) \cos \theta_2 \\ &\quad -2m_w (L_{w1}\dot{\theta}_1 \sin \theta_1 + L_{w2}\dot{\theta}_2 \sin \theta_2) \\ h_3 &= 2L_{w1}\dot{\theta}_1 m_w (b + L_{w1}) + 2L_{w2}\dot{\theta}_2 l m_w \cos(\theta_1 - \theta_2) \\ &\quad -g(L_{w1}m_w + b(m_l + m_w) + l(m_l + m_w + m_h)) \sin \theta_1 \\ &\quad -\dot{\theta}_2^2 l (-L_{w2}m_w + a(m_l + m_w)) \sin(\theta_1 - \theta_2) \\ h_4 &= 2L_{w2}\dot{\theta}_2 m_w (-a + L_{w2}) + (-L_{w2}m_w + a(m_l + m_w)) (\dot{\theta}_1^2 l \sin(\theta_1 - \theta_2) + g \sin \theta_2) \\ h_5 &= -m_w \dot{\theta}_1^2 (b + L_{w1}) + g m_w \cos \theta_1 \\ h_6 &= m_w (\dot{\theta}_2^2 (a - L_{w2}) - \dot{\theta}_1^2 l \cos(\theta_1 - \theta_2) + g \cos \theta_2) \end{aligned}$$

となる．

次に，第 4 章式 (4.1) における慣性行列 $M(q)$ と非線形項 $h(q, \dot{q})$ の詳細な項について述べる． $M(q)$ ， $h(q, \dot{q})$ のサイズは第 2 章のそれと同じであるため， $M(q)$ の各要素は

$$\begin{aligned}
M_{11} &= m_h + 2(m_l + m_w) \\
M_{12} &= 0 \\
M_{13} &= (L_{w1}m_w + b(m_l + m_w) + l(m_l + m_w + m_h) - (m_h + 2(m_l + m_w))R) \cos \theta_1 \\
M_{14} &= (L_{w2}m_w - a(m_l + m_w)) \cos \theta_2 \\
M_{15} &= m_w \sin \theta_1 \\
M_{16} &= m_w \sin \theta_2 \\
M_{22} &= 2(m_l + m_w) + m_h \\
M_{23} &= -(L_{w1}m_w + b(m_l + m_w) + l(m_l + m_w + m_h) - (m_h + 2(m_l + m_w))R) \sin \theta_1 \\
M_{24} &= (-L_{w2}m_w + a(m_l + m_w)) \sin \theta_2 \\
M_{25} &= m_w \cos \theta_1 \\
M_{26} &= m_w \cos \theta_2 \\
M_{33} &= I_0 + I_h + (2b + L_{w1})L_{w1}m_w + b^2(m_l + m_w) + l^2(m_h + m_l + m_w) - 2l(m_h + m_l + m_w)R \\
&\quad - 2(L_{w1}m_w + b(m_l + m_w))R + (m_h + 2(m_l + m_w))R^2 \\
M_{34} &= (l - R)(L_{w2}m_w - a(m_l + m_w)) \cos(\theta_1 - \theta_2) \\
M_{35} &= 0 \\
M_{36} &= -(l - R)m_w \sin(\theta_1 - \theta_2) \\
M_{44} &= I_0 + a^2m_l + (a - L_{w2})^2m_w \\
M_{45} &= 0 \\
M_{46} &= 0 \\
M_{55} &= m_w \\
M_{56} &= 0 \\
M_{66} &= m_w
\end{aligned}$$

となり， $h(q, \dot{q})$ の各要素は

$$\begin{aligned}
h_1 &= 2\dot{L}_{w1}\dot{\theta}_1m_w \cos \theta_1 + 2L_{w2}\dot{\theta}_2m_w \cos \theta_2 + \dot{\theta}_2^2(-L_{w2}m_w + a(m_l + m_w)) \sin \theta_2 \\
&\quad - \dot{\theta}_1^2(L_{w1}m_w + b(m_l + m_w) + l(m_l + m_w + m_h) - (m_h + 2(m_l + m_w))R) \sin \theta_1 \\
h_2 &= g(2(m_l + m_w) + m_h) - \dot{\theta}_1^2(L_{w1}m_w + b(m_l + m_w) + l(m_l + m_w + m_h) - (m_h + 2(m_l + m_w))R) \cos \theta_1 \\
&\quad + \dot{\theta}_2^2(-L_{w2}m_w + a(m_l + m_w)) \cos \theta_2 - 2m_w(L_{w1}\dot{\theta}_1 \sin \theta_1 + L_{w2}\dot{\theta}_2 \sin \theta_2) \\
h_3 &= 2L_{w1}\dot{\theta}_1m_w(b + L_{w1} - R) + 2L_{w2}\dot{\theta}_2(l - R)m_w \cos(\theta_1 - \theta_2) \\
&\quad - g(L_{w1}m_w + b(m_l + m_w) + l(m_l + m_w + m_h) - (m_h + 2(m_l + m_w))R) \sin \theta_1 \\
&\quad - \dot{\theta}_2^2(l - R)(-L_{w2}m_w + a(m_l + m_w)) \sin(\theta_1 - \theta_2) \\
h_4 &= 2L_{w2}\dot{\theta}_2m_w(-a + L_{w2}) + (-L_{w2}m_w + a(m_l + m_w))(\dot{\theta}_1^2(l - R) \sin(\theta_1 - \theta_2) + g \sin \theta_2) \\
h_5 &= -m_w\dot{\theta}_1^2(b + L_{w1} - R) + gm_w \cos \theta_1 \\
h_6 &= m_w(\dot{\theta}_2^2(a - L_{w2}) - \dot{\theta}_1^2(l - R) \cos(\theta_1 - \theta_2) + g \cos \theta_2)
\end{aligned}$$

となる．