

Title	接地点の摺動特性を考慮した衝突姿勢の前後非対称化に基づく2脚ロボットの安定歩容生成
Author(s)	JUNG, DONGGYUN
Citation	
Issue Date	2021-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/17102
Rights	
Description	Supervisor: 浅野 文彦, 先端科学技術研究科, 修士 (情報科学)

修士論文

接地点の摺動特性を考慮した衝突姿勢の前後非対称化に基づく
2脚ロボットの安定歩容生成

1910117 JUNG DONGGYUN

主指導教員 浅野 文彦
審査委員主審 浅野 文彦
審査委員 緒方 和博
池 勇勲
平石 邦彦

北陸先端科学技術大学院大学
先端科学技術研究科
(情報科学)

令和3年3月

概要

本論文では、伸縮脚を用いた2脚ロボットの衝突姿勢の前後非対称化に基づく、摩擦路面上の安定歩容生成の実現を目的とする。はじめに、伸縮脚を利用し、衝突姿勢による低摩擦路面上の安定歩容生成の可能性を検討し、そのモデルの運動を数值的に解析する。次に、上半身を追加し、摩擦係数が一定でない路面への安定歩容生成を実現し、運動を数值的に解析する。最後に、この研究の問題点や将来の課題について述べる。

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	伸縮脚を用いた2脚ロボットの低摩擦路面上の安定歩容生成	4
2.1	数学モデルの導出	4
2.1.1	運動方程式	4
2.1.2	制御系設計	7
2.1.3	衝突方程式	9
2.2	安定歩容生成可能条件	10
2.3	歩行解析	14
2.3.1	歩行評価	15
2.3.2	衝突姿勢による歩行性能変化	15
2.4	本章のまとめ	24
第3章	上体を持つ伸縮脚モデルの高摩擦路面上の安定歩容生成	26
3.1	数学モデルの導出	26
3.1.1	運動方程式	26
3.1.2	制御系設計	29
3.1.3	衝突方程式	31
3.2	安定歩容生成可能条件	31
3.3	歩行解析	36
3.4	本章のまとめ	43
第4章	上体を持つ伸縮脚モデルの摩擦係数が一定でない路面上の安定歩容生成	44
4.1	安定歩容生成可能条件	44
4.2	歩行解析	50
4.3	本章のまとめ	56
第5章	結論	57
5.1	結論	57

5.2 将来の課題	57
---------------------	----

目 次

2.1	伸縮脚を用いた2脚ロボットモデル	5
2.2	sign 関数と tanh 関数の比較	7
2.3	歩容生成可能条件 $T_{\text{set1}} = 0.3$ [s]	11
2.4	歩容生成可能条件 $T_{\text{set1}} = 0.43$ [s]	11
2.5	歩容生成可能条件 $T_{\text{set1}} = 1.0$ [s]	12
2.6	歩容生成可能条件 $T_{\text{set1}} = 0.43$ [s]	14
2.7	脚のみモデルの制御パラメータの時間に対する変化	16
2.8	脚のみモデルの床反力の時間に対する変化	17
2.9	脚のみモデルの1周期の位相平面図	18
2.10	脚のみモデルの重心の水平方向速度	18
2.11	脚のみモデルのエネルギーの時間に対する変化	19
2.12	α の変化に対する歩行性能 ($\phi = 88.6^\circ$)	20
2.13	ϕ の変化に対する歩行性能 ($\alpha = 38.6^\circ$)	21
2.14	スティック線図の比較 ($\alpha = 37.8^\circ$)	23
2.15	スティック線図の比較 ($\phi = 88.6^\circ$)	24
3.1	上体を持つ伸縮脚モデル	27
3.2	高摩擦路面上の安定歩容生成可能条件 ($m_{up} = 3.0$ [kg])	32
3.3	高摩擦路面上の安定歩容生成可能条件 ($m_{up} = 4.0$ [kg])	33
3.4	高摩擦路面上の安定歩容生成可能条件 ($m_{up} = 5.0$ [kg])	34
3.5	高摩擦路面上の安定歩容生成可能条件 ($m_{up} = 6.0$ [kg])	35
3.6	上体を持つモデルの高摩擦路面上の制御パラメータの時間に対する変化 (脚)	37
3.7	上体を持つモデルの高摩擦路面上の制御パラメータの時間に対する変化 (上体)	38
3.8	上体を持つモデルの高摩擦路面上の床反力の時間に対する変化	39
3.9	上体を持つモデルの高摩擦路面上の1周期の位相平面図	40
3.10	上体を持つモデルの高摩擦路面上の重心の水平方向速度	40
3.11	上体を持つモデルの高摩擦路面上のエネルギーの時間に対する変化	41
3.12	上体を持つモデルの高摩擦路面上のスティック線図	41
3.13	重心の加速度比較	42
3.14	支持脚の絶対角度比較	43

4.1	摩擦係数が一定でない路面上の安定歩容生成可能条件 ($m_{up} = 3.0$ [kg])	46
4.2	摩擦係数が一定でない路面上の安定歩容生成可能条件 ($m_{up} = 4.0$ [kg])	47
4.3	摩擦係数が一定でない路面上の安定歩容生成可能条件 ($m_{up} = 5.0$ [kg])	48
4.4	摩擦係数が一定でない路面上の安定歩容生成可能条件 ($m_{up} = 6.0$ [kg])	49
4.5	歩数による摩擦係数変化	50
4.6	摩擦係数が一定でない路面上の制御パラメータの時間に対する変化 (脚)	51
4.7	摩擦係数が一定でない路面上の制御パラメータの時間に対する変化 (上体)	52
4.8	摩擦係数が一定でない路面上の床反力の時間に対する変化	53
4.9	摩擦係数が一定でない路面上の 25 秒間の位相平面図	54
4.10	摩擦係数が一定でない路面上の重心の水平方向速度	54
4.11	摩擦係数が一定でない路面上のエネルギーの時間に対する変化	55
4.12	上体を持つモデルの摩擦係数が一定でない路面上のスティック線図	55

表 目 次

2.1	脚のみモデルの物理・制御パラメータ	12
3.1	上体を持つモデルの高摩擦路面上の物理・制御パラメータ	36
4.1	摩擦係数が一定でない路面上の物理・制御パラメータ	50

第1章 序論

1.1 研究背景

歩行ロボットにおいて、倒れずに安定して長時間歩行することは非常に重要な能力である。特に、不整地路面では、安定した歩容生成は困難となり、不整地路面上の歩行ロボットの安定歩容生成研究は必要となり、非常に重要な研究だと考えられる。その中でも、氷のような低摩擦路面は代表的な不整地路面であり、低摩擦路面上の歩行ロボットの安定歩容生成に関する研究は活発に研究が行われている。先行研究では、摩擦係数がゼロの路面でもリムレスホイールモデルを利用し、安定して歩行することができた [1]。また、2脚歩行ロボットも摩擦係数がゼロの路面で安定して歩行が可能であることが示された [2]。これらの研究はステルス歩行と呼ばれている。この他にも、単純なばね-質量系で足が摩擦路面で滑る現象を解析した研究もあった [3]。滑りを利用し、歩容生成ができた研究もあった。W. Ma は AMBER-3M というロボットを利用し、滑りながら歩くことができた [4]。また、揺動質量とリアクションホイールを利用し、滑ることで移動するロボットを実現した [5]。また、人が低摩擦路面上で歩く際に、空間的・時間的な変数を考慮し、RCOF（必要摩擦係数）を減らすことで歩けることにインスピレーションを受け、歩行パラメータにより変化する RCOF を計算し、RCOF の値を維持しながら歩くことで、48 自由度ロボットの安定歩容生成を実現した [6]。先行研究では、ZMP (Zero Moment Point) というものを 2 脚歩行ロボットの足の回転を示す指標として紹介した [7]。Majid は MPC アプローチを利用し、歩行速度追従、ZMP 調整、RCOF の 3 つの主要な要素を調律することで、滑りやすい路面で 2 脚歩行ロボットの安定歩容生成を実現した [8]。

低摩擦路面上の 2 脚歩行ロボットの適応性に関する先行研究で、摩擦路面上の 2 脚歩行ロボットの適応性は衝突直後の鉛直床反力と水平床反力の比で決まり、水平床反力が小さく、鉛直床反力が大きくなるほど摩擦係数がより小さい路面でも適応して安定歩容生成が可能になる傾向があることが明らかにされた [9]。先行研究では、伸縮脚を用いて衝突姿勢の前後非対称化による 2 脚歩行ロボットの高速歩行を実現することができた [10]。このモデルを利用すれば、衝突姿勢の前後非対称化に伴う衝突直後の床反力の調整により、水平床反力の最小化、鉛直床反力の最小化が実現でき、低摩擦路面上の 2 脚歩行ロボットの安定歩容生成ができると期待される。

しかし、このような摩擦係数が一定である低摩擦路面は現実的には存在しない。

現実的には、氷、泥、砂のような様々な要因によって摩擦係数が一定でない路面が一般的である。そのため、高摩擦路面でも、低摩擦路面でも安定歩容生成ができる歩行モデルが必要である。そして、現在活発に研究されていない課題であるが高摩擦路面上の2脚歩行ロボットの安定歩容生成に関する研究は必要である。

クーロン摩擦モデルでは、硬い棒と硬い路面との滑り接触が高摩擦路面上では、棒が路面から跳ね上がる Painlevé paradox という現象が起きる [11]。この現象は、Point-foot 2脚歩行ロボットの場合、衝突直前の脚と路面との間の角度が小さく、路面の摩擦係数が大きいほど起きる可能性が高くなる傾向がある [12]。2脚歩行ロボットが摩擦路面を歩く際に、Painlevé paradox 現象が起きると、支持脚の鉛直床反力がゼロより小さくなり、支持脚が路面から離れ、歩容生成が不可能になる。そのため、Painlevé paradox 現象は摩擦係数が一定でない路面上への2脚歩行ロボットの安定歩容生成に関する研究では、必ず避けるべき現象である。

そして、この伸縮脚モデルを利用すれば、衝突直前の足と路面の角度を90度近くにすることで Painlevé paradox 現象を避け、高摩擦路面上で安定歩容生成ができ、衝突姿勢の前後非対称化により衝突直後の水平床反力を小さく、鉛直床反力を大きくして低摩擦路面上でも安定歩容生成が可能になると期待される。

1.2 研究目的

本研究は、2脚歩行ロボットの摩擦係数が一定でない路面への安定歩容生成の実現を目的とする。低摩擦路面では衝突直後の水平床反力を小さく、鉛直床反力を大きくすれば、安定歩容生成が可能になる [9]。まあ、高摩擦路面上では Painlevé paradox 現象を避けるために、衝突直前の足と路面の間の角度を大きくする必要がある [12]。そのため、筆者は伸縮脚モデルを導入し、衝突姿勢を前に傾くことで、衝突直前の足と路面の間の角度を大きくし、衝突姿勢の前後非対称化による床反力調整によって衝突直後の水平床反力の最小化、鉛直床反力の最大化を実現し、低摩擦路面上でも、高摩擦路面上でも安定して歩ける歩行モデルの開発を目指す。このモデルは加速度が非常に大きく、高摩擦路面上では速すぎて歩容生成が不可能になる。そのため、本研究では、この問題を解決するために上体を追加し、減速することで高摩擦路面上でも安定して歩けるように制御系を設計し、摩擦係数が一定でない路面上の安定歩容生成を実現させる。

1.3 本論文の構成

本論文は、本性を含む全5章から構成される。第2章では、伸縮脚を利用した2脚歩行ロボットの低摩擦路面上の安定歩容生成について述べる。2章のはじめには数学モデルについて説明し、次に衝突姿勢による安定歩容生成可能条件について議論し、最後に歩行解析を数值的に行う。2章のモデルは、加速度が大きすぎ、高

摩擦路面上では安定歩容生成が不可能になったため、3章では上体を追加し、減速できるように制御系を設計する。そして、3章では、上体を持つ伸縮脚モデルの高摩擦路面上の安定歩容可能条件を数値シミュレーションを通じて調べる。そのために、はじめには数学モデルを導入し、制御パラメータにちよる安定歩容生成可能条件を調査する。そして、歩行解析を行う。その後、4章では3章のモデルを利用し、摩擦係数が一定でない路面上の安定歩容生成について調査する。4章では、数学モデルの導出は省略し、制御パラメータによる安定歩容生成可能条件を調べる。その後、歩行解析を行う。最後に、5章では本論文の結論と将来の課題について述べる。

第2章 伸縮脚を用いた2脚ロボットの 低摩擦路面上の安定歩容生成

本章では、伸縮脚を用いた2脚歩行ロボットの低摩擦路面上の安定歩容生成について説明する。該当歩行モデルは両脚が伸縮する8自由度モデルに設定した。このモデルは、支持脚は歩行中に伸び、遊脚は縮んで歩く。このモデルを利用し、衝突姿勢の前後非対称化による衝突直後の水平床反力の最小化、鉛直床反力の最大化を実現することで低摩擦路面上の安定歩容生成の可能性を検討する。まず、該当歩行モデルの概要について説明し、数学モデルと制御系設計について説明する。その後、衝突姿勢による安定歩容生成可能条件について説明し、歩行の二つのパターンについて詳しく解析する。

2.1 数学モデルの導出

本章で扱う歩行モデルを図2.1に示す。各脚の質量は m [kg]、股の質量は m_H [kg]、脚の脚先から重心までの長さは a [m]、脚の重心から股関節までの長さは支持脚は b_1 [m]、遊脚は b_2 [m] と置く。また、支持脚の鉛直方向から絶対角度を θ_1 [rad]、遊脚の鉛直方向から絶対角度を θ_2 [rad] と置く。なお、衝突直前の足と路面の間の角度を ϕ [deg]、衝突直前の股角度を α [deg] とする。支持脚の脚先の座標は (x_1, z_1) 、遊脚の脚先の座標は (x_2, z_2) とする。支持脚の長さである b_1 の制御入力 u_1 [N]、遊脚の長さである b_2 の制御入力は u_2 [N]、股角度の制御トルクは u_H [N・m] と置く。

2.1.1 運動方程式

一般化座標ベクトルは $\mathbf{q} = \begin{bmatrix} \mathbf{q}_1^T & \mathbf{q}_2^T \end{bmatrix}^T$ とする。ここで、 $\mathbf{q}_1$ と $\mathbf{q}_2$ の詳細は $\mathbf{q}_i = \begin{bmatrix} x_i & z_i & \theta_i & b_i \end{bmatrix}^T$ である。そして、本章で扱う歩行モデルの運動方程式は

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

$$\mathbf{J}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{0}_{3 \times 1} \quad (2.2)$$

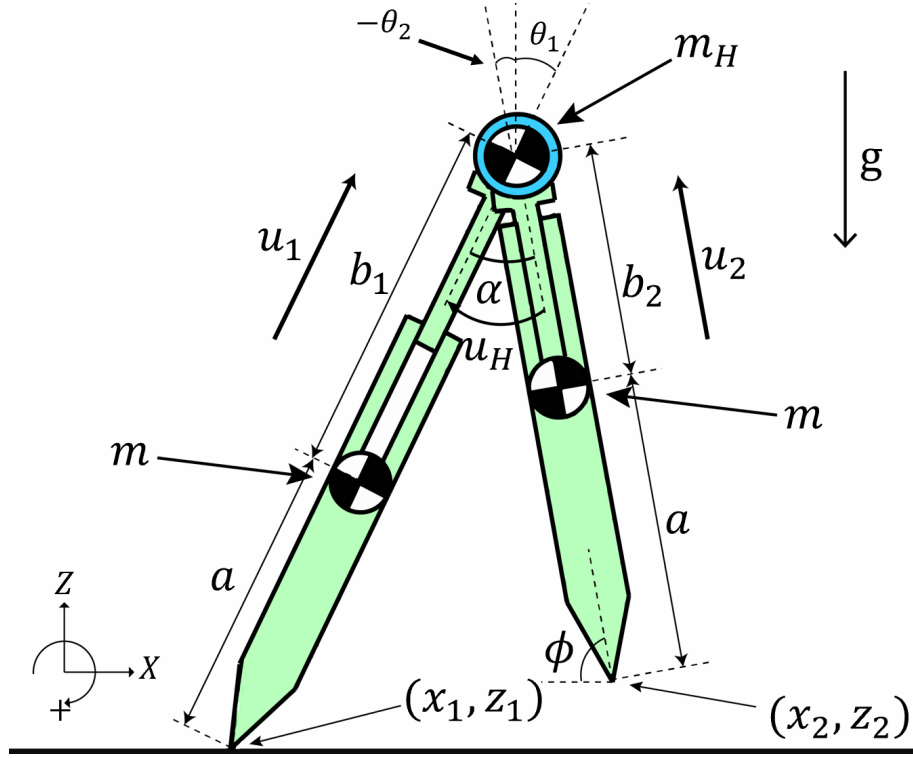


図 2.1: 伸縮脚を用いた2脚ロボットモデル

となる．ここで， $M(q)$ は慣性行列， $h(q, \dot{q})$ は中心力・コリオリ力と重力項の組み合わせを表す．また， Su は制御入力項， $J(q)^T \lambda$ は拘束条件項， $J_\mu(\dot{q})^T \lambda$ は摩擦力項である．

左辺の慣性行列の詳細は，

$$M(q) = \begin{pmatrix} M_1(q_1) & \mathbf{0}_{4 \times 4} \\ \mathbf{0}_{4 \times 4} & M_2(q_2) \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

$$M_i(q_i) = \begin{pmatrix} m + \frac{m_H}{2} & 0 & (ma + \frac{m_H}{2}(a + b_i)) \cos \theta_i & \frac{m_H}{2} \sin \theta_i \\ & m + \frac{m_H}{2} & -(ma + \frac{m_H}{2}(a + b_i)) \sin \theta_i & \frac{m_H}{2} \cos \theta_i \\ & & ma^2 + \frac{m_H}{2}(a + b_i)^2 & 0 \\ Sym. & & & \frac{m_H}{2} \end{pmatrix}$$

である．なお，中心力・コリオリ力と重力項の詳細は，

$$h(q, \dot{q}) = \begin{pmatrix} h_1(q_1, \dot{q}_1) \\ h_2(q_2, \dot{q}_2) \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

$$h_i(q_i, \dot{q}_i) = \begin{pmatrix} \dot{\theta}_i(m_H \dot{b}_i \cos \theta_i - (ma + \frac{m_H}{2}(a + b_i)) \dot{\theta}_i \sin \theta_i) \\ -\dot{\theta}_i(m_H \dot{b}_i \sin \theta_i - (ma + \frac{m_H}{2}(a + b_i)) \dot{\theta}_i \cos \theta_i) + (m + \frac{m_H}{2})g \\ m_H \dot{\theta}_i \dot{b}_i (a + b_i) - (ma + \frac{m_H}{2}(a + b_i))g \sin \theta_i \\ -\frac{m_H}{2} \dot{\theta}_i^2 (a + b_i) + \frac{m_H}{2} g \cos \theta_i \end{pmatrix}$$

である。

右辺の拘束条件の詳細は

$$\mathbf{J} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & J_{13} & J_{14} & -1 & 0 & J_{17} & J_{18} \\ 0 & 1 & J_{23} & J_{24} & 0 & -1 & J_{27} & J_{28} \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

である。ここで、

$$\begin{aligned} J_{13} &= (b_1 + a) \cos \theta_1, & J_{14} &= \sin \theta_1 \\ J_{17} &= -(b_2 + a) \cos \theta_2, & J_{18} &= -\sin \theta_2 \\ J_{23} &= -(b_1 + a) \sin \theta_1, & J_{24} &= \cos \theta_1 \\ J_{27} &= (b_2 + a) \sin \theta_2, & J_{28} &= -\cos \theta_2 \end{aligned}$$

と置いた。摩擦力項の詳細は

$$\mathbf{J}_\mu = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

である。また、制御入力項は

$$\mathbf{S}\mathbf{u} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_H \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

である。

ここで、クーロン摩擦モデルを採用しており、 μ は以下のように示される。

$$\mu = -\mu_0 \text{sign}(\dot{x}_1) \quad (2.8)$$

μ_0 は素材特性などで決められる正の定数である。また、 $\dot{x}_1 = 0$ 近傍でチャタリング現象を避けるために、 $\tanh$ 関数を導入すると、式 (2.8) は以下の通りになる。

$$\mu = -\mu_0 \tanh c\dot{x}_1 \quad (2.9)$$

c は正の定数であり、 $\dot{x}_1 = 0$ 近傍の切れ味を調整するものである。式 (2.8) と式 (2.9) の違いは図 2.2 のようになる。

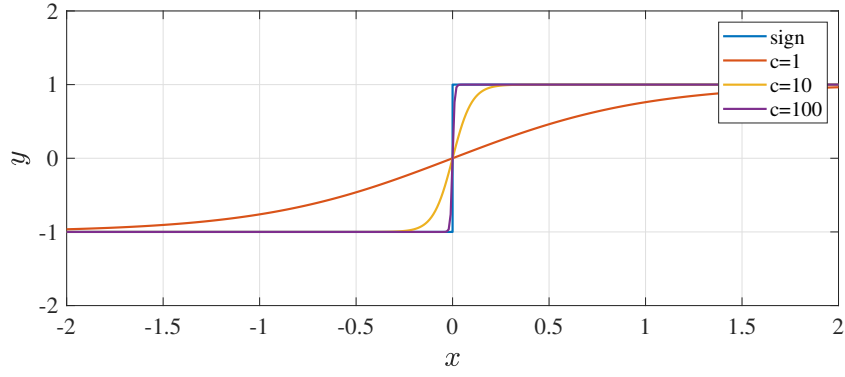


図 2.2: sign 関数と tanh 関数の比較

そして、式 (2.1) と (2.2) の運動方程式を解いて $\ddot{\mathbf{q}}$ が求められる。まず、式 (2.2) を 2 段微分すると、

$$\mathbf{J}\ddot{\mathbf{q}} = -\dot{\mathbf{J}}\dot{\mathbf{q}}$$

になる。また、式 (2.1) の両辺に $\mathbf{J}\mathbf{M}^{-1}$ をかけると、

$$\mathbf{J}_h := \mathbf{J} + \mathbf{J}_\mu$$

$$\mathbf{J}\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}\mathbf{M}^{-1}(\mathbf{S}\mathbf{u} - \mathbf{h} + \mathbf{J}_h^T \boldsymbol{\lambda}) = -\dot{\mathbf{J}}\dot{\mathbf{q}} \quad (2.10)$$

になる。式 (2.10) から $\boldsymbol{\lambda}$ が求められる。

$$\mathbf{X} := \mathbf{J}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{J}_h^T$$

$$\boldsymbol{\lambda} = -\mathbf{X}^{-1}(\mathbf{J}\mathbf{M}^{-1}(\mathbf{S}\mathbf{u} - \mathbf{h}) + \dot{\mathbf{J}}\dot{\mathbf{q}}) \quad (2.11)$$

また、式 (2.11) を式 (2.1) に代入し、 $\mathbf{M}^{-1}$ をかけ、 $\ddot{\mathbf{q}}$ について整理すると、

$$\mathbf{Y} := \mathbf{I}_8 - \mathbf{J}_h^T \mathbf{X}^{-1} \mathbf{J}\mathbf{M}^{-1}$$

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{Y}(\mathbf{S}\mathbf{u} - \mathbf{h}) - \mathbf{J}_h^T \mathbf{X}^{-1} \dot{\mathbf{J}}\dot{\mathbf{q}}) \quad (2.12)$$

と求められる。

2.1.2 制御系設計

このモデルは両脚の長さや股角度を制御するため、 b_1 , b_2 , $\theta_H = \theta_1 - \theta_2$ を制御出力とする。

$$\mathbf{y} = \mathbf{S}^T \mathbf{q} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \theta_H \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

このモデルは出力追従制御を使う．制御出力を時間で2段微分すると

$$\ddot{\mathbf{y}} = \mathbf{S}^T \ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{S}^T \mathbf{M}^{-1} (\mathbf{Y}(\mathbf{S}\mathbf{u} - \mathbf{h}) - \mathbf{J}_h^T \mathbf{X}^{-1} \dot{\mathbf{J}} \dot{\mathbf{q}}) \quad (2.14)$$

となる．そして，制御出力 $\mathbf{y}$ を目標軌道である $\mathbf{y}_d$ に追従させるために， $\ddot{\mathbf{y}} = \mathbf{v}$ と置く．ただし， $\mathbf{v}$ は加速度指令値である． $\mathbf{y} \rightarrow \mathbf{y}_d$ を達成する制御入力 $\mathbf{u}$ は次のように決定できる．

$$\mathbf{u} = \mathbf{A}^{-1}(\mathbf{v} + \mathbf{B}) \quad (2.15)$$

$$\mathbf{A}(\mathbf{q}) := \mathbf{S}^T \mathbf{M}^{-1} \mathbf{Y} \mathbf{S}$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) := \mathbf{S}^T \mathbf{M}^{-1} (\mathbf{Y} \mathbf{h} + \mathbf{J}^T \mathbf{X}^{-1} \dot{\mathbf{J}} \dot{\mathbf{q}})$$

$$\mathbf{v} = \ddot{\mathbf{y}}_d + K_D(\dot{\mathbf{y}}_d - \dot{\mathbf{y}}) + K_P(\mathbf{y}_d - \mathbf{y}) \quad (2.16)$$

ここで， $K_D [s^{-1}]$ ， $K_P [s^{-2}]$ はPDゲインである．

スムーズな両脚の伸縮運動と股関節の回転運動を実現するために，本論文では5次の時間関数を目標軌道として使う．

$$\begin{aligned} b_{1d}(t) &= \begin{cases} \sum_{k=0}^5 a_k t^k & (0 \leq t < T_{\text{set1}}) \\ b_l & (t \geq T_{\text{set1}}) \end{cases} \\ b_{2d}(t) &= \begin{cases} \sum_{k=0}^5 b_k t^k & (0 \leq t < T_{\text{set2}}) \\ b_s & (t \geq T_{\text{set2}}) \end{cases} \\ \theta_{Hd}(t) &= \begin{cases} \sum_{k=0}^5 c_k t^k & (0 \leq t < T_{\text{set3}}) \\ \alpha & (t \geq T_{\text{set3}}) \end{cases} \end{aligned}$$

初期状態と終端状態で各制御出力の速度と加速度をゼロにする．また，支持脚は脚長さの最小値である b_s から最大値である b_l まで伸び，遊脚は b_l から b_s まで縮む．股関節角度は $-\alpha$ から α まで変化するように制御する．これらの条件を満足する境界条件は

$$\begin{aligned} b_{1d}(0) &= b_s, \quad \dot{b}_{1d}(0) = 0, \quad \ddot{b}_{1d}(0) = 0 \\ b_{1d}(T_{\text{set1}}) &= b_l, \quad \dot{b}_{1d}(T_{\text{set1}}) = 0, \quad \ddot{b}_{1d}(T_{\text{set1}}) = 0 \\ b_{2d}(0) &= b_l, \quad \dot{b}_{2d}(0) = 0, \quad \ddot{b}_{2d}(0) = 0 \\ b_{2d}(T_{\text{set2}}) &= b_s, \quad \dot{b}_{2d}(T_{\text{set2}}) = 0, \quad \ddot{b}_{2d}(T_{\text{set2}}) = 0 \\ \theta_{Hd}(0) &= -\alpha, \quad \dot{\theta}_{Hd}(0) = 0, \quad \ddot{\theta}_{Hd}(0) = 0 \\ \theta_{Hd}(T_{\text{set3}}) &= \alpha, \quad \dot{\theta}_{Hd}(T_{\text{set3}}) = 0, \quad \ddot{\theta}_{Hd}(T_{\text{set3}}) = 0 \end{aligned}$$

となる．ここで， T_{set1} は支持脚， T_{set2} は遊脚， T_{set3} は股角度の制御目標時間であり， b_s は短い脚の長さ ($b_s = b_0 - \Delta b$)， b_l は長い脚の長さ ($b_l = b_0 + \Delta b$) である．これらの境界条件を満足する目標軌道の係数は，

$$a_5 = \frac{6(b_l - b_s)}{T_{\text{set1}}^5}, \quad a_4 = \frac{-15(b_l - b_s)}{T_{\text{set1}}^4}, \quad a_3 = \frac{10(b_l - b_s)}{T_{\text{set1}}^3}, \quad a_2 = 0, \quad a_1 = 0, \quad a_0 = b_s$$

$$b_5 = \frac{6(b_s - b_l)}{T_{\text{set2}}^5}, \quad b_4 = \frac{-15(b_s - b_l)}{T_{\text{set2}}^4}, \quad b_3 = \frac{10(b_s - b_l)}{T_{\text{set2}}^3}, \quad b_2 = 0, \quad b_1 = 0, \quad b_0 = b_l$$

$$c_5 = \frac{12\alpha}{T_{\text{set3}}^5}, \quad c_4 = \frac{-30\alpha}{T_{\text{set3}}^4}, \quad c_3 = \frac{20\alpha}{T_{\text{set3}}^3}, \quad c_2 = 0, \quad c_1 = 0, \quad c_0 = -\alpha$$

となる。

2.1.3 衝突方程式

遊脚が路面に衝突すると、遊脚が支持脚になり、支持脚は路面から離れ、遊脚になると仮定する。ここで、両脚の位置は非連続的に変化しないため、両脚の位置座標を次のようにそのまま交換して更新させる。

$$x_1^+ = x_2^-, \quad x_2^+ = x_1^-, \quad z_1^+ = z_2^-, \quad z_2^+ = z_1^-$$

$$\theta_1^+ = \theta_2^-, \quad \theta_2^+ = \theta_1^-, \quad b_1^+ = b_2^-, \quad b_2^+ = b_1^-$$

ここで、“ $-$ ”と“ $+$ ”は衝突直前と直後を示す。また、衝突直後の速度は衝撃力の影響で非連続的に変化するため、衝突方程式から衝突直後の速度を求める必要がある。本論文では、非弾性モデルを採用しており、前脚が着地後に床面上に拘束されると仮定する。そして、衝突方程式は以下の式ようになる。

$$M(q)\dot{q}^+ = M(q)\dot{q}^- - J_I(q)^T \lambda_I \quad (2.17)$$

$$J_I(q)\dot{q}^+ = \mathbf{0}_{6 \times 1} \quad (2.18)$$

遊脚は衝突直後、支持脚になり、路面から離れないと仮定すれば、

$$\dot{z}_2^+ = 0 \quad (2.19)$$

となる。また、衝突する際には両脚の長さ、股角度は固定しているため、衝突直後の両脚の長さ、股角度も固定すると仮定すれば、

$$\dot{b}_1^+ = 0, \quad \dot{b}_2^+ = 0, \quad \dot{\theta}_H^+ = 0 \quad (2.20)$$

となる。両脚は股関節で固定されているので、両脚の股の x 座標と z 座標を同じように拘束すれば、

$$\begin{aligned} & \dot{x}_1^+ + (a + b_1)\dot{\theta}_1^+ \cos \theta_1 + \dot{b}_1^+ \sin \theta_1 \\ &= \dot{x}_2^+ + (a + b_2)\dot{\theta}_2^+ \cos \theta_2 + \dot{b}_2^+ \sin \theta_2 \end{aligned} \quad (2.21)$$

$$\begin{aligned} & \dot{z}_1^+ - (a + b_1)\dot{\theta}_1^+ \sin \theta_1 + \dot{b}_1^+ \cos \theta_1 \\ &= \dot{z}_2^+ - (a + b_2)\dot{\theta}_2^+ \sin \theta_2 + \dot{b}_2^+ \cos \theta_2 \end{aligned} \quad (2.22)$$

が成り立つ。式 (2.19), (2.20), (2.21), (2.22) の拘束条件を満足するヤコビ行列は

$$\mathbf{J}_I = \begin{pmatrix} 1 & 0 & J_{13} & J_{14} & -1 & 0 & J_{17} & J_{18} \\ 0 & 1 & J_{23} & J_{24} & 0 & -1 & J_{27} & J_{28} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \quad (2.23)$$

となる。そして、衝突方程式である式 (2.17), (2.18) の連立方程式を解いて $\dot{\mathbf{q}}^+$ 求めると、

$$\mathbf{X}_I := \mathbf{J}_I \mathbf{M}^{-1} \mathbf{J}_I^T \quad (2.24)$$

$$\dot{\mathbf{q}}^+ = (\mathbf{I}_8 - \mathbf{M}^{-1} \mathbf{J}_I^T \mathbf{X}_I^{-1} \mathbf{J}_I) \dot{\mathbf{q}}^- \quad (2.25)$$

となる。

2.2 安定歩容生成可能条件

ここでは、伸縮脚を用いた8自由度歩行ロボットモデルの低摩擦路面上の安定歩容生成可能条件に関する数値シミュレーションを紹介する。まずは、 T_{set1} , T_{set2} , T_{set3} の関連性を調査した。調査した結果、遊脚先端が床面を削ることを避けるために遊脚の目標時間である T_{set2} は T_{set1} より小さくする必要があり、 T_{set1} は T_{set2} と同じ値でいいと判断した。そして、 $T_{\text{set1}}=T_{\text{set3}}$, $T_{\text{set2}}=0.65T_{\text{set1}}$ と設定した。

そして、この結果を利用し、衝突姿勢による安定歩容生成の可能性を検討する。衝突姿勢は ϕ と α の値で決められる。そして、 α , ϕ , T_{set1} を変化させ、その条件による安定歩容生成可能性を調査する。 α は 30° から 36° まで 0.2° ずつ、 ϕ は 85° から 90° まで 0.2° ずつ変化させる。また、 T_{set1} は 0.2 [s] から 1.0 [s] まで 0.01 [s] ずつ変化させて数値シミュレーションを行った。その中で、現在の歩行周期と直前の歩行周期の差が 0.0001 [s] より小さくなった場合、収束できたと判断し、その条件を安定歩容生成可能条件として判断した。数値シミュレーションで設定した物理・制御パラメータは表 2.1 に示されている。ここで、 b_0 は両脚の変化する前の長さである。その結果の一部が図 2.3, 2.4, 2.5 に示されている。赤い点が安定歩容生成できた条件である。

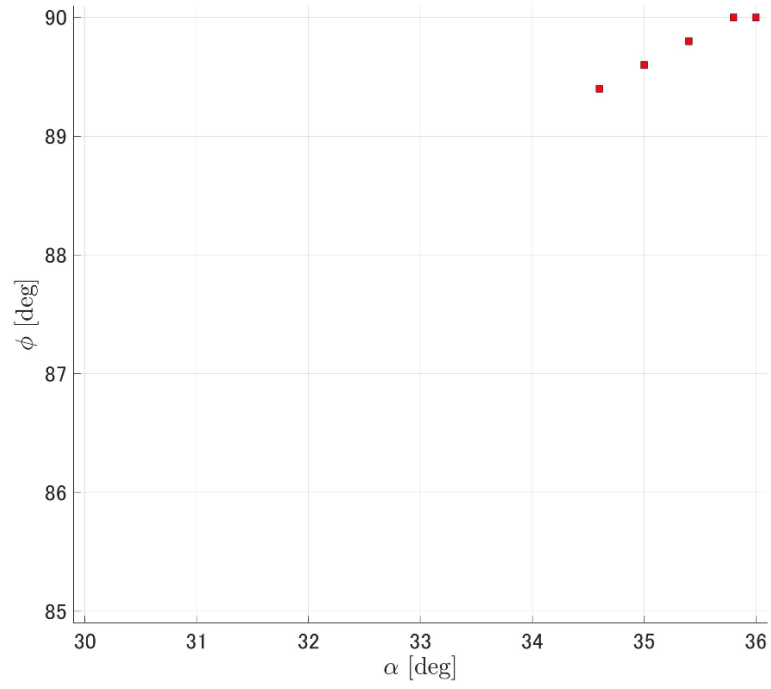


图 2.3: 步容生成可能条件 $T_{\text{set1}} = 0.3$ [s]

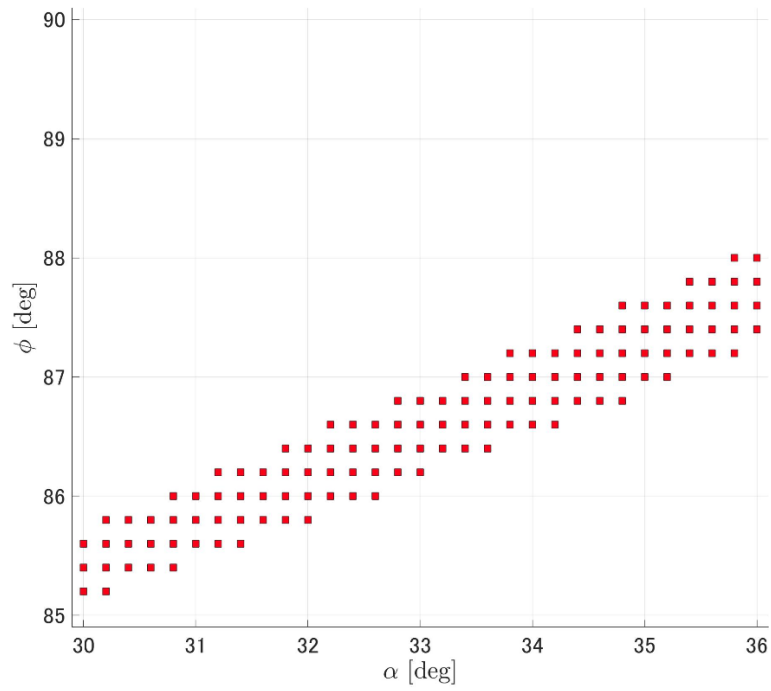


图 2.4: 步容生成可能条件 $T_{\text{set1}} = 0.43$ [s]

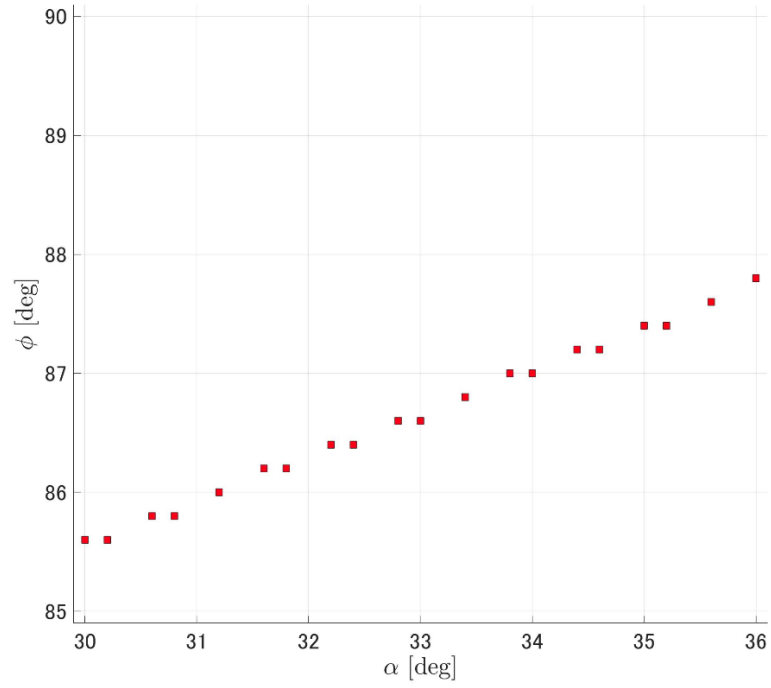


図 2.5: 歩容生成可能条件 $T_{\text{set1}} = 1.0$ [s]

表 2.1: 脚のみモデルの物理・制御パラメータ

m_H	10	kg	K_D	400	s^{-2}
m	5	kg	K_P	100	s^{-1}
a	0.5	m	μ_0	0.1	-
b_0	0.5	m	c	100	-
g	9.81	m/s^2			

数値シミュレーションの結果，図 2.3，2.4，2.5 のように目標時間が増加すると安定歩容生成可能条件が $T_{\text{set1}} = 0.43$ [s] までは増えることが分かる．また，目標時間が 0.3 [s] 未満の値では安定歩容生成ができた条件が一つもなかった．目標時間をより増加させると安定歩容生成可能条件が減ることが分かった．

なお，図 2.3 では， $\alpha = 36.0^\circ$ の値で $\phi = 90.0^\circ$ の値しか安定歩容生成ができなかった．しかし，図 2.4 では， $\alpha = 36.0^\circ$ の値で ϕ の値が 87.4° から 88.0° まで安定歩容生成ができ，目標時間の値が大きくなれば ϕ の値が小さくても安定歩容生成が可能になることが分かった．

ここで，安定歩容生成可能条件が最も多かった目標時間である $T_{\text{set1}} = 0.43$ [s] の値で α と ϕ をより幅広い条件で調べ， α と ϕ による安定歩容生成可能性をより詳しく調べる．そして， α を 25° から 40° まで変化させ， ϕ を 80° から 90° まで変化させて α と ϕ の影響を調べる．その結果が図 2.6 に示されている．

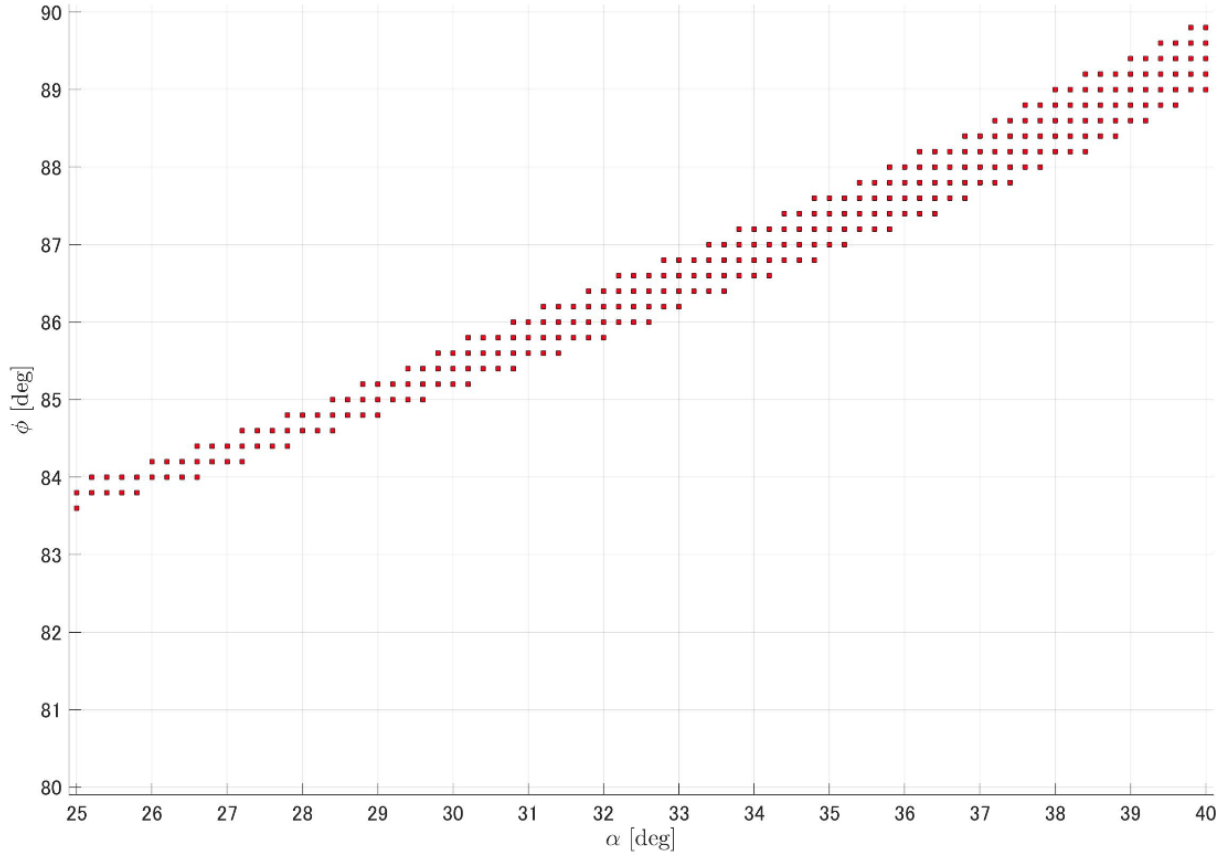


図 2.6: 歩容生成可能条件 $T_{\text{set1}} = 0.43$ [s]

図 2.6 を見ると、 α の値が大きくなると ϕ の値が大きくなると安定歩容生成が不可能になることが分かる。また、 α と ϕ の値が大きくなれば大きくなるほど安定歩容生成可能条件が増える。例えば、 $\phi = 84.0^\circ$ では、 α の値が 25.2° から 26.6° まで安定歩容生成ができたが $\phi = 88.8^\circ$ では、 α の値が 37.6° から 38.6° まで安定歩容生成ができ、 ϕ の値が大きくなれば安定歩容生成可能条件が増えた。また、 α の値が 25° に近く、小さな値では、安定歩容生成が可能な条件が 2 つか 3 つしかなかったが、 α の値が 40° に近く、大きな値では、安定歩容生成が可能な条件が 5 つか 6 つあり、より多い条件で安定歩容生成が可能になった。これらの結果を利用し、上体を持つモデルの安定歩容生成可能条件を調べる。

2.3 歩行解析

ここでは、まず、2.2 章で調べた安定歩容生成可能条件の中で 1 つである $\alpha = 38.0^\circ$ 、 $\phi = 88.6^\circ$ 、 $T_{\text{set1}} = 0.43$ [s] の条件で作られた歩行について評価する。その後、衝突姿勢による歩行性能変化について調べる。歩行性能が急変する区間はより詳しく調べる。

2.3.1 歩行評価

ここでは、 $\alpha = 38.0^\circ$, $\phi = 88.6^\circ$, $T_{\text{set1}} = 0.43$ [s] の条件で作られた歩行を評価する。角度の時間に対する変化、制御する b_1 , b_2 , $\theta_1 - \theta_2$ の時間に対する変化を見る。また、支持脚と遊脚の位相平面図から運動の様子を観察する。なお、水平床反力と鉛直床反力の時間変化、ロボットの重心の速度の様子を見る。その結果を図 2.7 から図 2.11 に示す。

図 2.9 の位相平面図から、歩行が一周期で安定して歩いていることが確認できた。また、図 2.10 を見ると、ロボットの速度が 1.65 [m/s] まで上がり、人間の平均歩行速度である 1.367 [m/s] より速く歩いた [13]。また、両脚の長さや絶対角度は上手く追従し、制御できた。

2.3.2 衝突姿勢による歩行性能変化

ここでは、衝突姿勢による歩行性能変化について説明する。まず、図 2.6 にある歩行生成可能条件の中で、 $\alpha = 37.8^\circ$, $\phi = 88.6^\circ$ と近い条件で安定歩容生成ができる条件が多かった。そのため、 $\alpha = 37.8^\circ$ と固定し、 ϕ の値を変化させ、シミュレーションを行い、 $\phi = 88.6^\circ$ と固定し、 α の値を変化させ、シミュレーションを行った。また、ここでは、前段階の収束した初期状態を次の段階の初期条件に入れて、シミュレーションを行う。

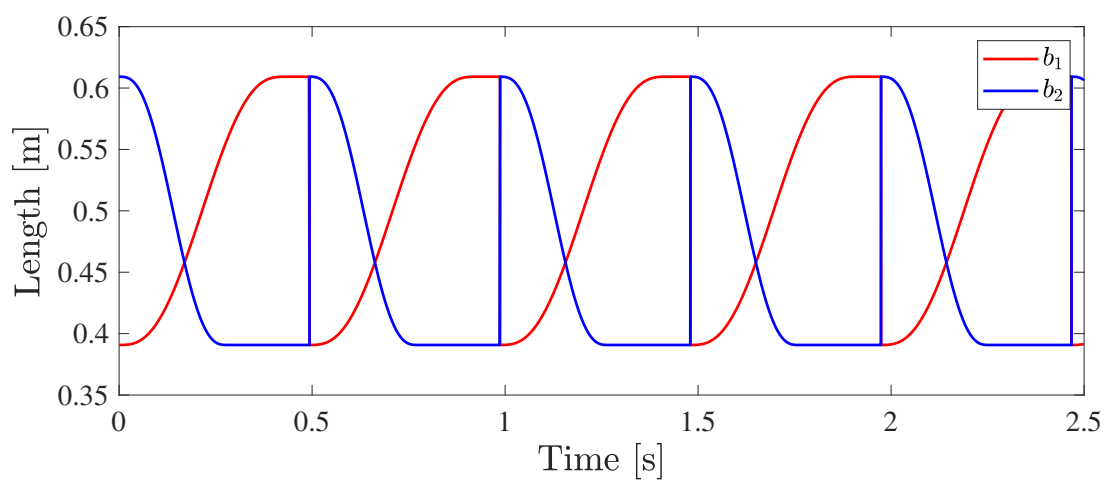
$\alpha = 37.8^\circ$ の場合、 ϕ を 87.1° から 90.1° まで変化させる。また、 $\phi = 88.6^\circ$ の場合、 ϕ を 36.3° から 40.8° まで変化させる。両方全部 0.1° ずつ変化させた。評価する歩行性能は歩行周期、平均速度、Specific Resistance である。SR は歩行ロボットのエネルギー効率を評価するものである、以下のように定義される。

$$\text{Specific Resistance} := \frac{p}{Mgv} \quad (2.26)$$

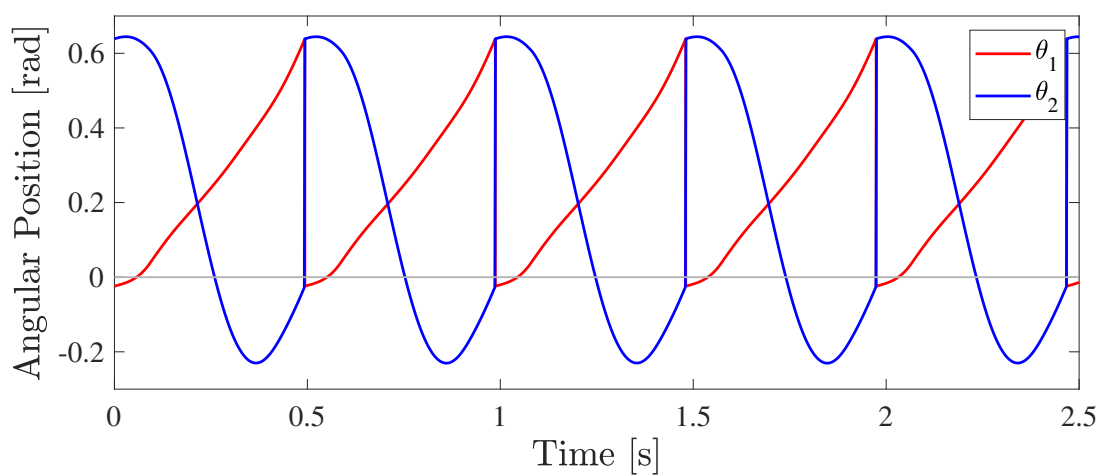
ここで、 v は平均速度、 M は全質量、 g は重力、 p は平均入力パワーである。SR の値は無次元数であり、ロボットを動かすために必要なエネルギーの意味である。平均入力パワーである p は以下の式で定まる。

$$p := \frac{1}{T} \int_{0+}^{T-} \left(|\dot{b}_1 u_1| + |\dot{b}_2 u_2| + |(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) u_H| \right) dt \quad (2.27)$$

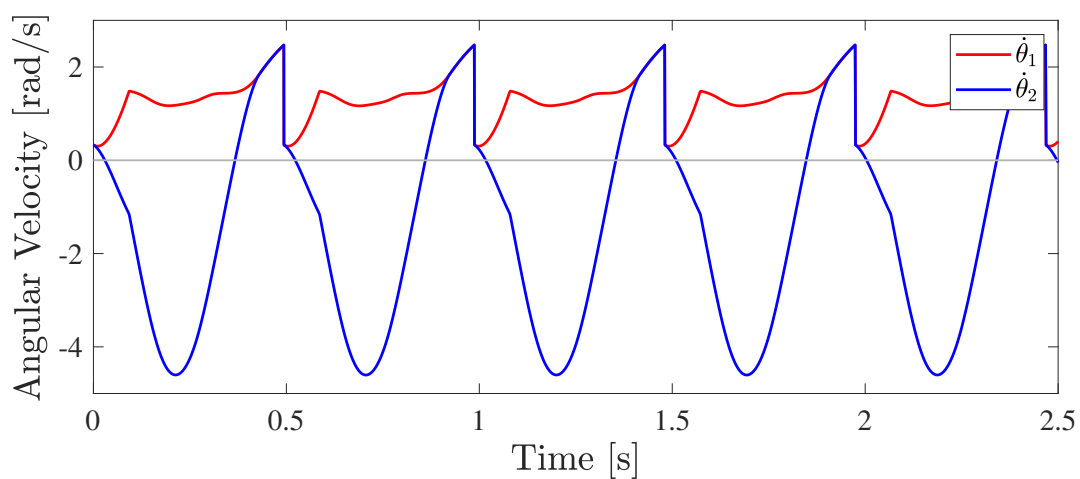
ここで、 T は歩行周期である。そして、ここでは Specific Resistance は収束した歩行周期から求められる。その結果を図 2.12, 2.13 に示す。



(a) 両脚の長さ

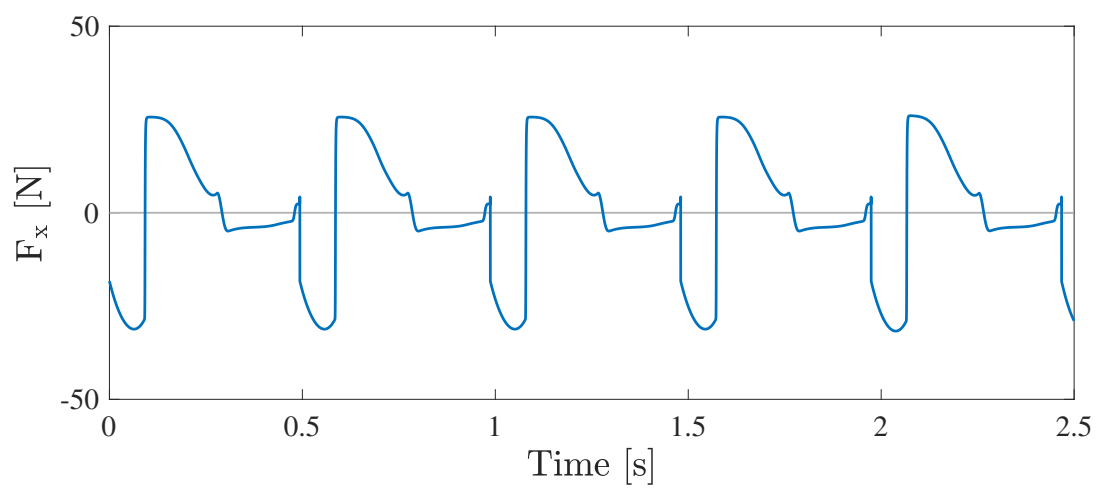


(b) 両脚の絶対角度

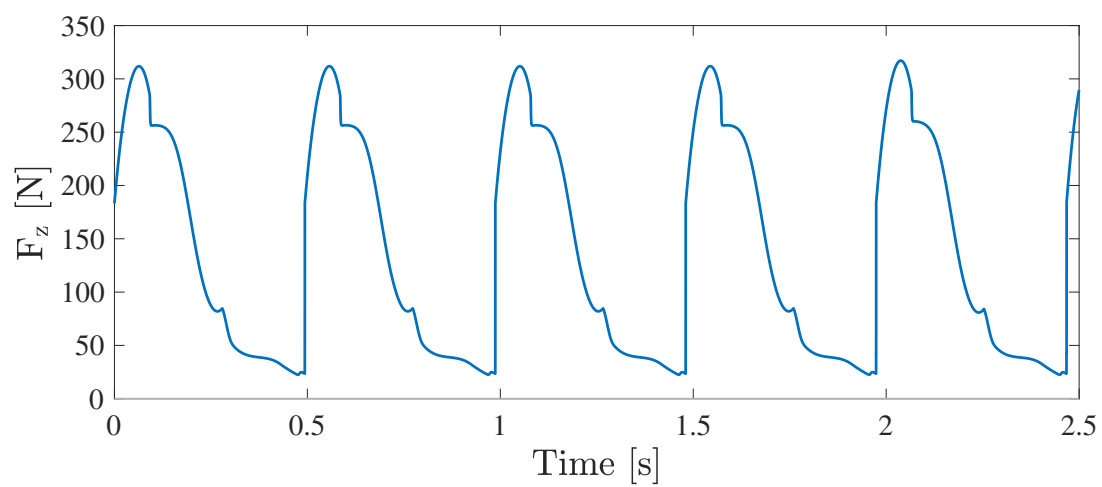


(c) 両脚の角速度

図 2.7: 脚のみモデルの制御パラメータの時間に対する変化



(a) 水平床反力



(b) 鉛直床反力

図 2.8: 脚のみモデルの床反力の時間に対する変化

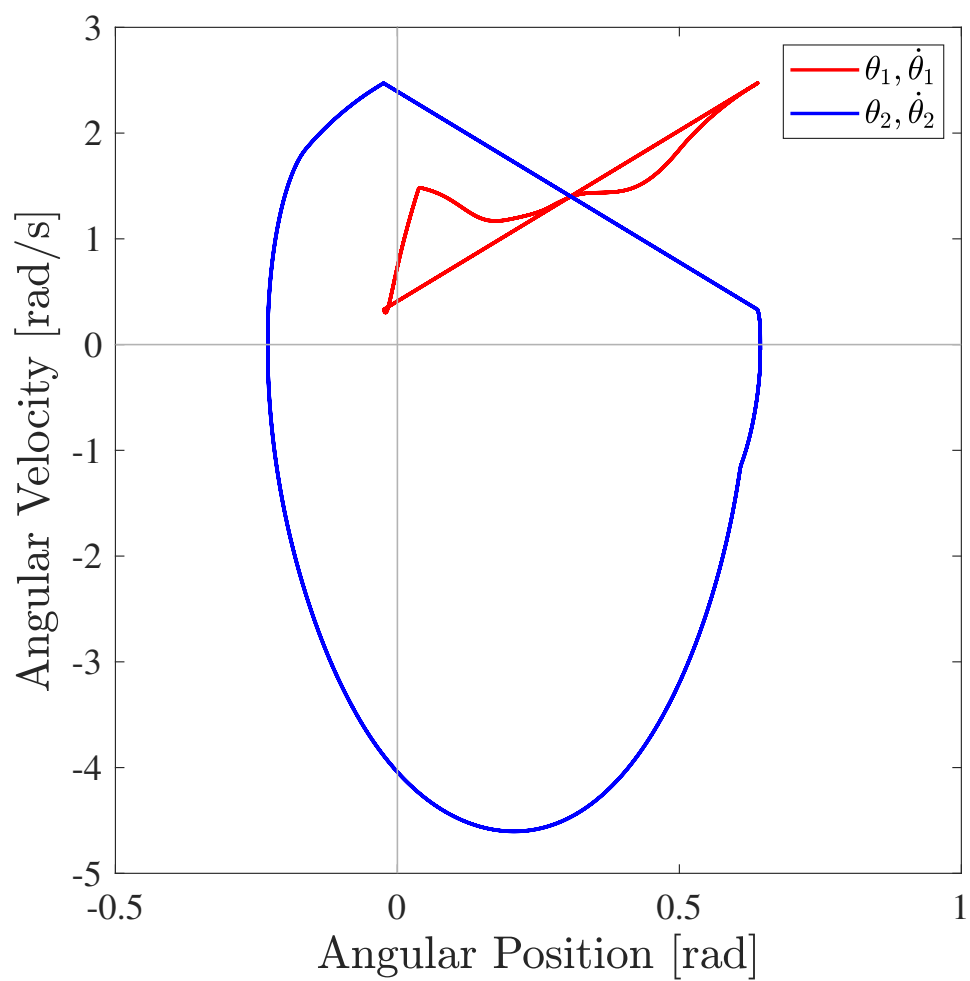


図 2.9: 脚のみモデルの1周期の位相平面図

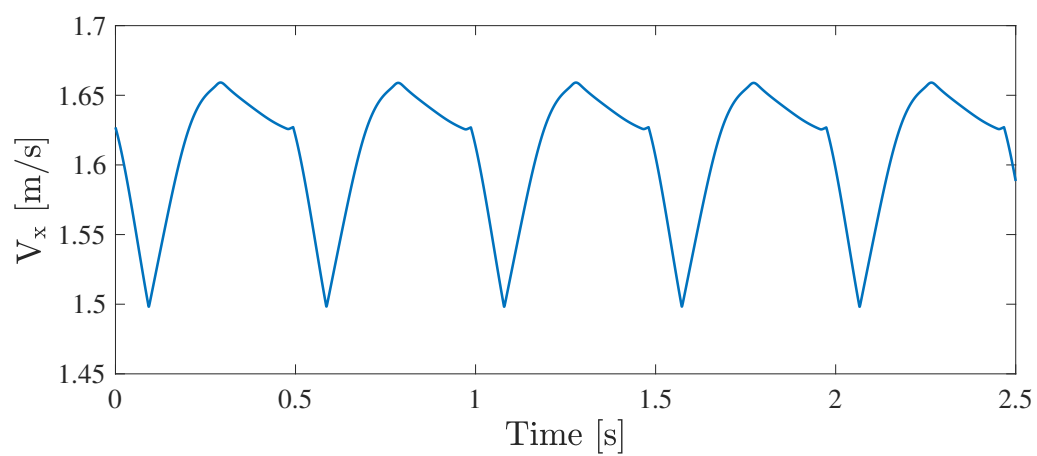


図 2.10: 脚のみモデルの重心の水平方向速度

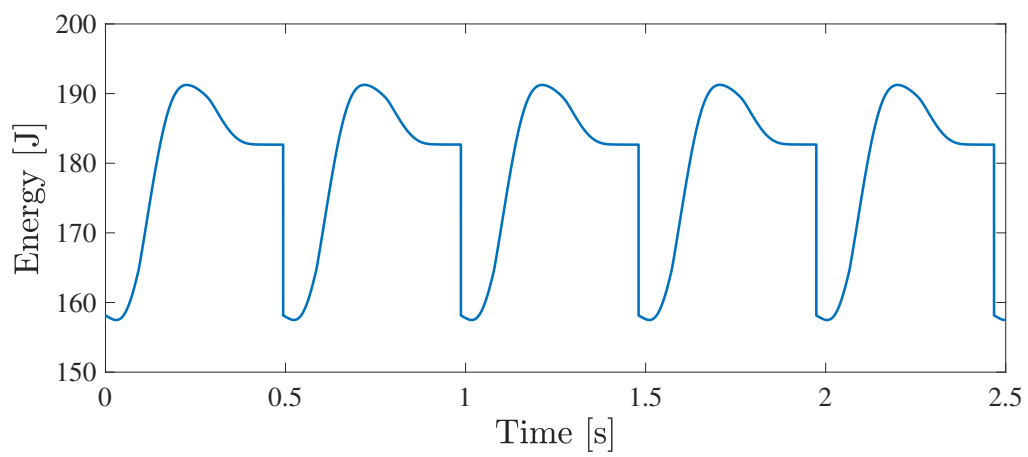
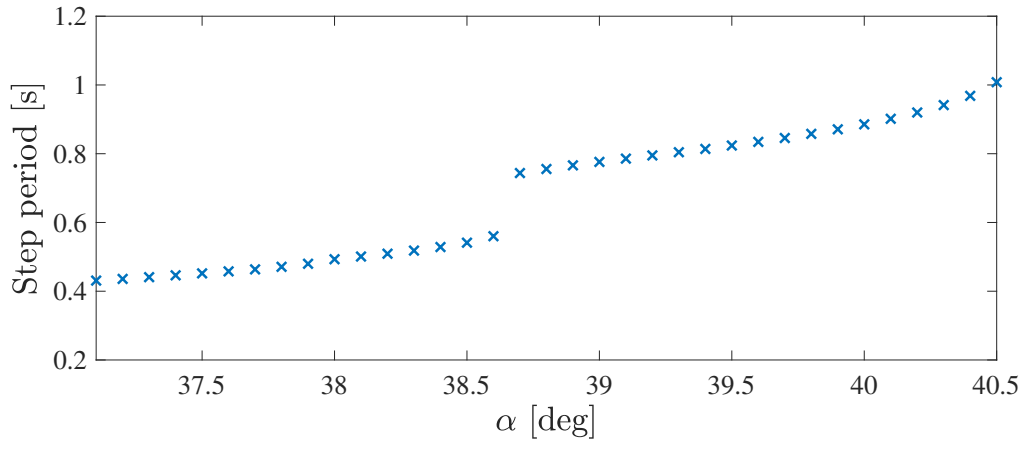
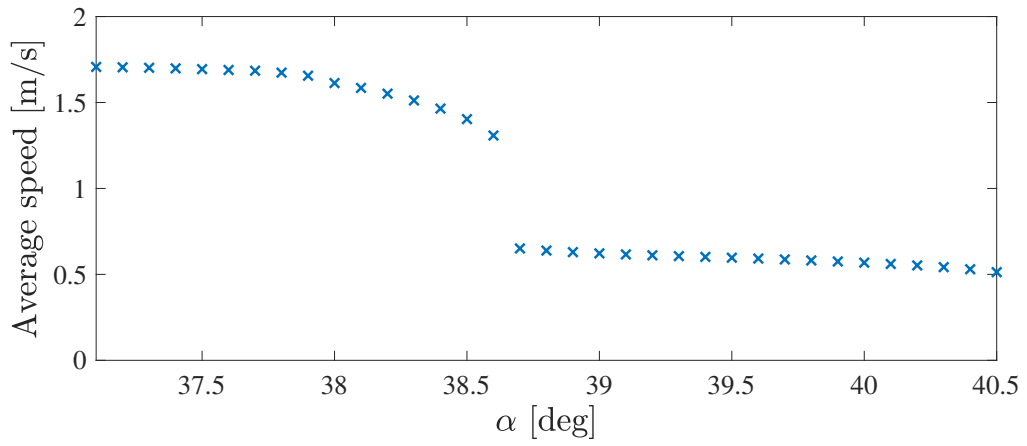


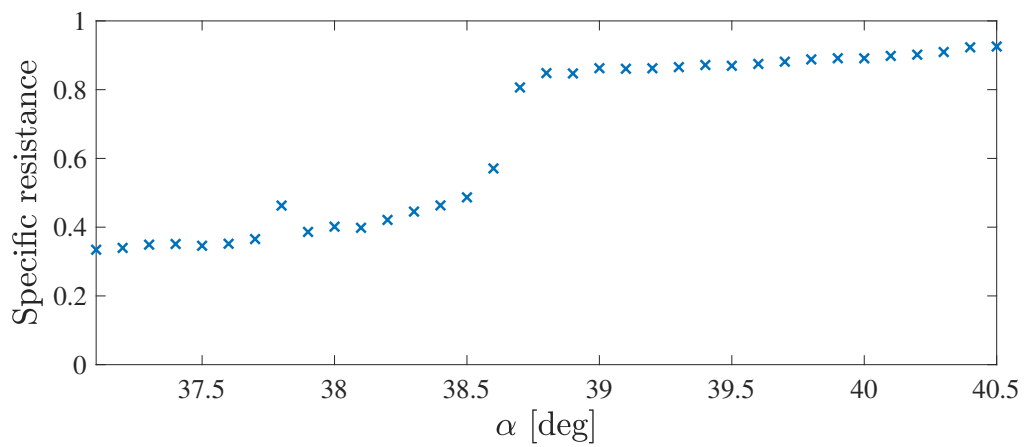
図 2.11: 脚のみモデルのエネルギーの時間に対する変化



(a) 歩行周期

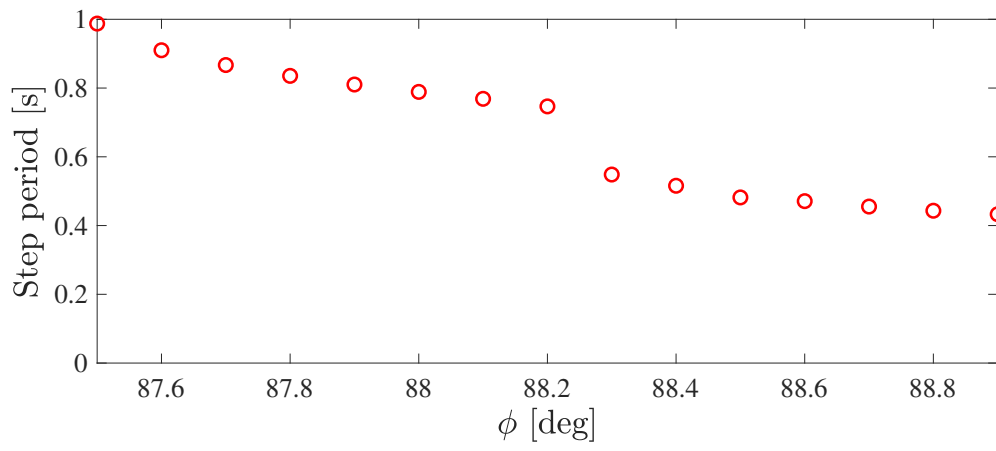


(b) 平均速度

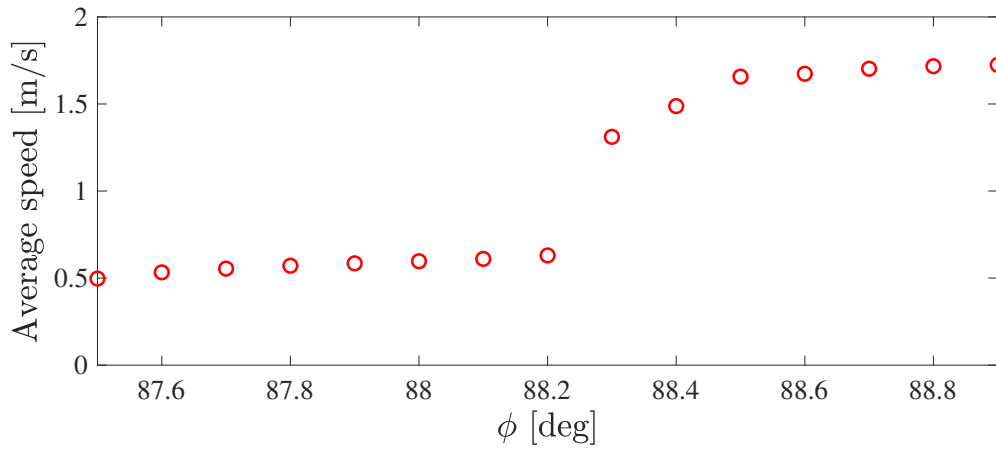


(c) Specific resistance

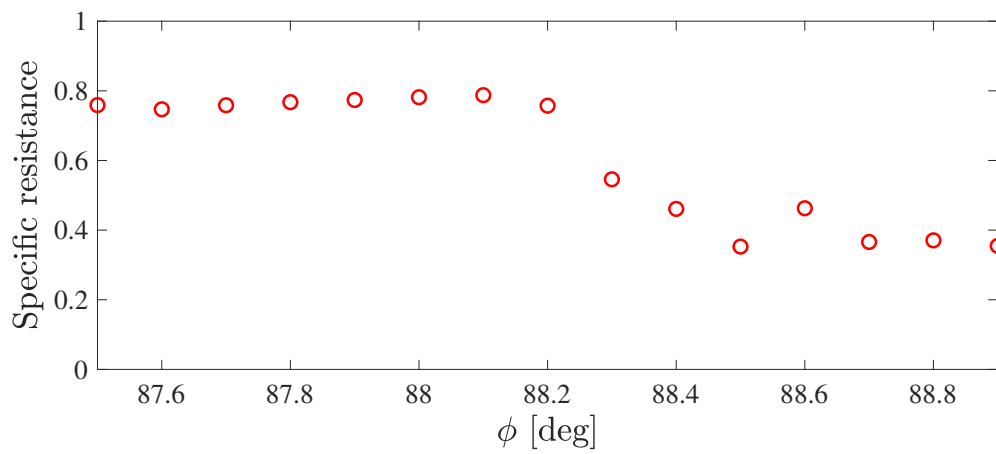
図 2.12: α の変化に対する歩行性能 ($\phi = 88.6^\circ$)



(a) 歩行周期



(b) 平均速度



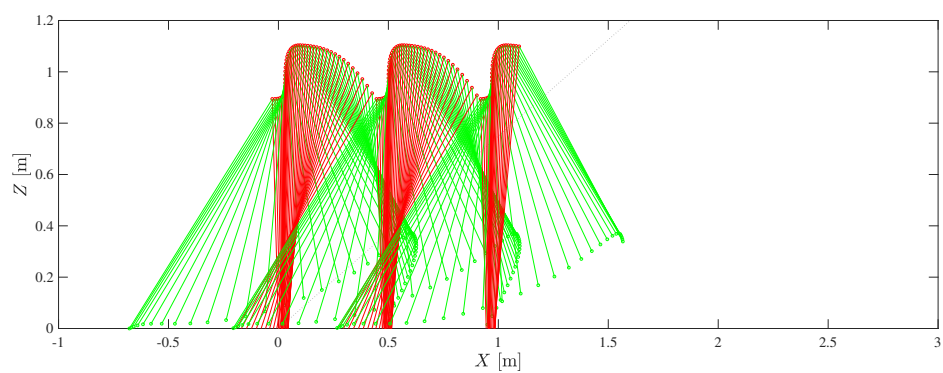
(c) Specific resistance

図 2.13: ϕ の変化に対する歩行性能 ($\alpha = 38.6^\circ$)

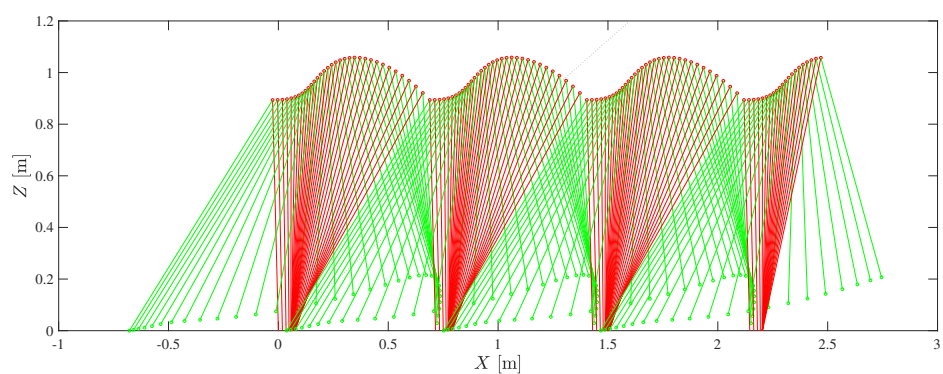
筆者は、 ϕ と α の値による歩行性能変化を調べるために ϕ と α の値をそれぞれ 87.1° から 90.1° まで、 36.3° から 40.8° まで変化させ、シミュレーションを行った。すべての値は収束した後の値である。

図 2.12 から α が歩行性能に及ぼす影響がわかる。 α の値が小さくなれば、制御する長さが短くなり、入力エネルギーは減るのに、歩行速度は速くなり、歩行効率は良くなる。 α の値が大きくなれば、制御する長さが長くなり、入力エネルギーは増加するのに、歩行速度は遅くなり、歩行効率は悪くなる。

図 2.13 から ϕ が歩行性能に及ぼす影響がわかる。 ϕ の値が小さければ制御する長さが短くなり、入力エネルギーは減るのに、歩行速度も一緒に遅くなり、歩行効率の有意義な変化はない。また、 ϕ の値が大きければ、制御する長さは長くなり、入力エネルギーも増加するが歩行速度も一緒に速くなり、歩行効率は変化しない。

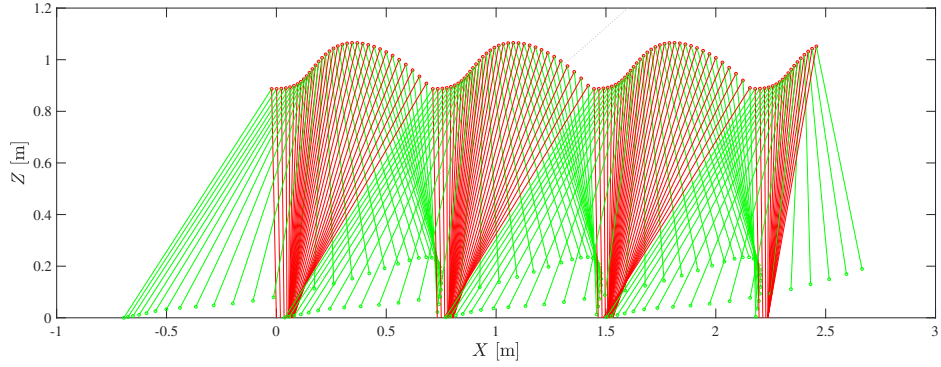


(a) $\phi = 88.2^\circ$

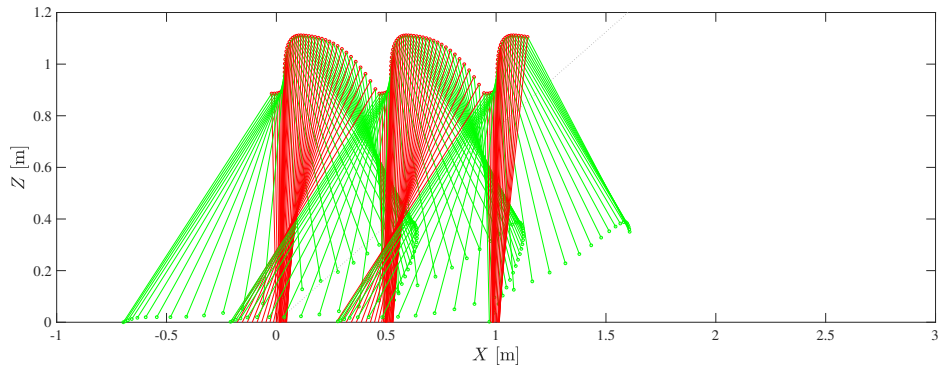


(b) $\phi = 88.3^\circ$

図 2.14: スティック線図の比較 ($\alpha = 37.8^\circ$)



(a) $\alpha = 38.6^\circ$



(b) $\alpha = 38.7^\circ$

図 2.15: スティック線図の比較 ($\phi = 88.6^\circ$)

しかし、 α が変化するシミュレーションでも、 ϕ が変化するシミュレーションでも、歩行性能が急変する区間がある． α の値が 38.6° から 38.7° になる区間と、 ϕ の値が 88.2° から 88.3° になる区間である．その理由を調べるためにスティック線図を描き、2つのケースで運動の様子を見た．その結果が図 2.14, 2.15 に表れている．図 2.14 で、 ϕ が 88.2° の場合、歩行中に支持脚が後ろに滑り、歩行速度が遅くなることがわかる．しかし、 88.3° の場合、歩行中に支持脚が後ろに滑らなく、速く歩けるので、ここで歩行性能が急変するとわかった．また、図 2.15 で、 α の値が 38.6° の場合、支持脚が後ろに滑らなく、速く歩く．しかし、 α の値が 38.7° になると、支持脚が後ろに滑り、歩行速度が遅くなり、歩行性能が急変するとわかった．

2.4 本章のまとめ

本章では、伸縮脚を用いた2脚ロボットの低摩擦路面上安定歩容生成について調査した．まずは、制御パラメータによる安定歩容生成可能条件を調査した．その後、歩行解析として歩行性能を数値シミュレーションを通じて調べた．また、衝突姿勢による歩行性能変化も調べた．Specific Resistance は姿勢により、0.4 まで

減ることができたが、これは人間の歩行効率が0.2であることに比べると、効率が良くないことである [14].

低摩擦路面上では、支持脚が衝突直後に滑り、ポテンシャルバリアを越えなく倒れるため、安定歩容生成が困難となっている．そのため、本章では、伸縮脚を利用し、前傾姿勢を作り出すことで、衝突直後に支持脚が滑ってもポテンシャルバリアを越えることができた．しかし、高摩擦路面上では、衝突直後に支持脚が滑らないため、ポテンシャルバリアを速く突破してしまい、前方向に倒れる． $\phi = 88.6^\circ$ の場合、 $\alpha = 37.1^\circ$ に設定すれば、 $\mu_0 = 0.11$ を超えると倒れる．また、 $\alpha = 40.5^\circ$ に設定すれば $\mu_0 = 0.45$ を超えると倒れる．そのため、 $\mu_0 = 0.45$ 以上の高摩擦路面上では、違う方法を考えないと安定歩容生成が不可能になる．これらの結果を踏まえて3章では、上体を持つ伸縮脚モデルの高摩擦路面上の安定歩容生成を実現する．

第3章 上体を持つ伸縮脚モデルの高摩擦路面上の安定歩容生成

本章では、2章の状態を持つ伸縮脚モデルの高摩擦路面上の安定歩容生成について説明する。該当歩行モデルは両脚が伸縮し、上体を持つ9自由度モデルに設定した。上体の制御は2段階に分け、1段階では、 $\theta_3 - \theta_1$ を制御し、2段階では、 θ_3 を制御する。1段階制御が終わった後、制御入力を切り替え、2段階に入る。2章のモデルは速度が速すぎ、高摩擦路面上では安定歩容生成が不可能になったため、本章では、このような制御法を利用し、減速することで安定歩容生成を実現する。2章のモデルでは、 $\phi = 88.6^\circ$ の場合、 $\alpha = 40.5^\circ$ に設定しても $\mu_0 = 0.45$ 以上の高摩擦路面上では安定歩容生成が不可能になったため、ここではそれより摩擦係数が大きな $\mu_0 = 0.7$ の高摩擦路面を想定してシミュレーションを行った。本章では、まず、該当歩行モデルの概要について説明し、数学モデルと制御系設計について説明する。その後、このモデルの歩行を数値シミュレーションを通じて解析する。

3.1 数学モデルの導出

本章で扱う歩行モデルを図3.1に示す。ここで、衝突する直前の姿であり、後ろにある脚が支持脚、前にある脚が遊脚と想定した。脚のパラメータは2章と同じである。上体は支持脚に付いていると仮定した。上体の質量は m_{up} 、鉛直方向から絶対角度は θ_3 と置く。また、股関節から上体の重心までの距離は L と置く。なお、上体制御の1段階である $\theta_3 - \theta_1$ の制御入力は u_{31} とし、2段階である θ_3 の制御入力は u_3 とする。

3.1.1 運動方程式

一般化座標ベクトルを $\mathbf{q} = \begin{bmatrix} x_1 & z_1 & \theta_1 & b_1 & \theta_3 & x_2 & z_2 & \theta_2 & b_2 \end{bmatrix}^T$ とする。本章で扱う歩行モデルは2章と同じである。

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{S}\mathbf{u} + \mathbf{J}(\mathbf{q})^T\boldsymbol{\lambda} + \mathbf{J}_\mu(\dot{\mathbf{q}})^T\boldsymbol{\lambda} \quad (3.1)$$

$$\mathbf{J}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{0}_{3 \times 1} \quad (3.2)$$

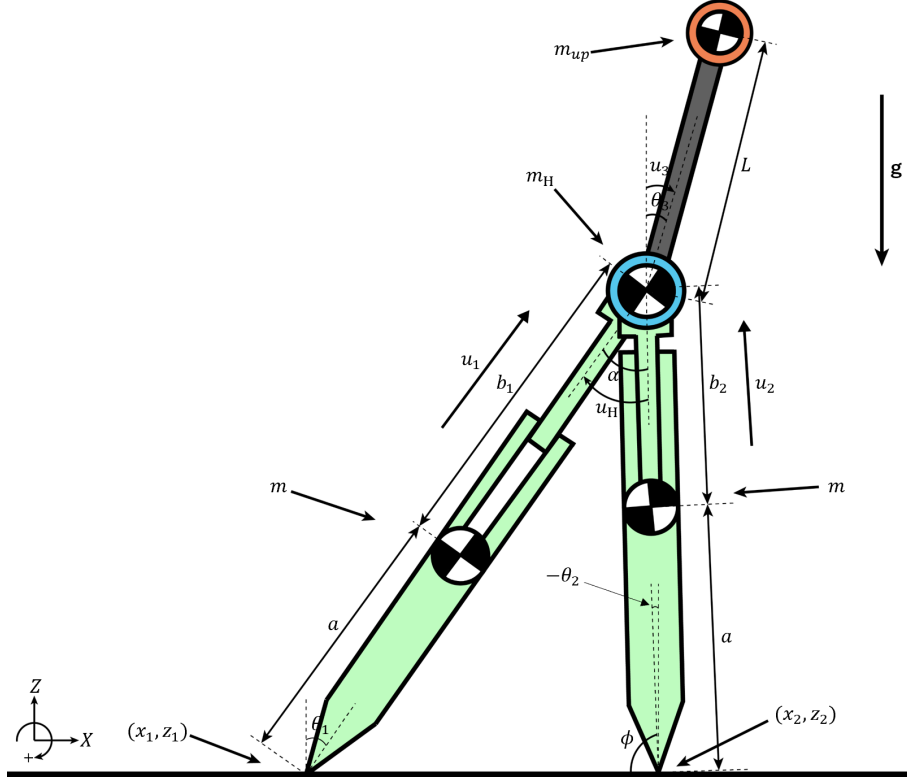


図 3.1: 上体を持つ伸縮脚モデル

本モデルは、支持脚に上体が付いており、左辺の慣性行列の詳細は、

$$M(q) = \begin{pmatrix} M_1(q_1) & \mathbf{0}_{4 \times 5} \\ \mathbf{0}_{5 \times 4} & M_2(q_2) \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

$$M_1(q_1) = \begin{pmatrix} M_{11} & 0 & M_{13} & M_{14} & M_{15} \\ & M_{22} & M_{23} & M_{24} & M_{25} \\ & & M_{33} & 0 & M_{35} \\ & & & M_{44} & M_{45} \\ Sym. & & & & M_{55} \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} M_{11} &= m + \frac{m_H}{2} + m_{up}, & M_{13} &= (ma + \frac{m_H}{2}(a + b_1) + m_{up}(a + b_1)) \cos \theta_1 \\ M_{14} &= (\frac{m_H}{2} + m_{up}) \sin \theta_1, & M_{15} &= Lm_{up} \cos \theta_3 \\ M_{22} &= m + \frac{m_H}{2} + m_{up}, & M_{23} &= -(ma + \frac{m_H}{2}(a + b_1) + m_{up}(a + b_1)) \sin \theta_1 \\ M_{24} &= (\frac{m_H}{2} + m_{up}) \cos \theta_1, & M_{25} &= -Lm_{up} \sin \theta_3 \\ M_{33} &= ma^2 + (\frac{m_H}{2} + m_{up})(a + b_1)^2, & M_{35} &= -(a + b_1)Lm_{up} \cos (\theta_1 - \theta_3) \\ M_{44} &= \frac{m_H}{2} + m_{up}, & M_{45} &= Lm_{up} \sin (\theta_1 - \theta_3), & M_{55} &= m_{up}L^2 \end{aligned}$$

$$\mathbf{M}_2(\mathbf{q}_2) = \begin{pmatrix} m + \frac{m_H}{2} & 0 & (ma + \frac{m_H}{2}(a + b_2)) \cos \theta_2 & \frac{m_H}{2} \sin \theta_2 \\ & m + \frac{m_H}{2} & -(ma + \frac{m_H}{2}(a + b_2)) \sin \theta_2 & \frac{m_H}{2} \cos \theta_2 \\ & & ma^2 + \frac{m_H}{2}(a + b_2)^2 & 0 \\ \text{Sym.} & & & \frac{m_H}{2} \end{pmatrix}$$

である．なお，中心力・コリオリ力と重力項の詳細は，

$$\mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \begin{pmatrix} \mathbf{h}_1(\mathbf{q}_1, \dot{\mathbf{q}}_1) \\ \mathbf{h}_2(\mathbf{q}_2, \dot{\mathbf{q}}_2) \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

$$\mathbf{h}_1(\mathbf{q}_1, \dot{\mathbf{q}}_1) = \begin{pmatrix} h_{11} \\ h_{12} \\ h_{13} \\ h_{14} \\ h_{15} \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} h_{11} &= \dot{b}_1 \dot{\theta}_1 (m_H + 2m_{up}) \cos \theta_1 - \dot{\theta}_1^2 (ma + (\frac{m_H}{2} + m_{up})(a + b_1)) \sin \theta_1 - \dot{\theta}_3^2 L m_{up} \sin \theta_3 \\ h_{12} &= g(m + m_{up} + \frac{m_H}{2}) - \dot{\theta}_1^2 (ma + (a + b_1)(\frac{m_H}{2} + m_{up})) \cos \theta_1 \\ &\quad - \dot{\theta}_3^2 L m_{up} \cos \theta_3 - 2\dot{b}_1 \dot{\theta}_1 (\frac{m_H}{2} + m_{up}) \sin \theta_1 \\ h_{13} &= -g(ma + (a + b_1)(\frac{m_H}{2} + m_{up})) \sin \theta_1 + (a + b_1)(\dot{\theta}_1 \dot{b}_1 (m_H + 2m_{up}) + \dot{\theta}_3 L m_{up} \sin(\theta_1 - \theta_3)) \\ h_{14} &= (\frac{m_H}{2} + m_{up})(-(a + b_1)\dot{\theta}_1^2 + g \cos \theta_1) - \dot{\theta}_3^2 L m_{up} \cos(\theta_1 - \theta_3) \\ h_{15} &= L m_{up}(2\dot{b}_1 \dot{\theta}_1 \cos(\theta_1 - \theta_3) - (a + b_1)\dot{\theta}_1^2 \sin(\theta_1 - \theta_3) - g \sin \theta_3) \end{aligned}$$

$$\mathbf{h}_2(\mathbf{q}_2, \dot{\mathbf{q}}_2) = \begin{pmatrix} \dot{\theta}_2(m_H \dot{b}_2 \cos \theta_2 - (ma + \frac{m_H}{2}(a + b_2))\dot{\theta}_2 \sin \theta_2) \\ -\dot{\theta}_2(m_H \dot{b}_2 \sin \theta_2 - (ma + \frac{m_H}{2}(a + b_2))\dot{\theta}_2 \cos \theta_2) + (m + \frac{m_H}{2})g \\ m_H \dot{\theta}_2 \dot{b}_2 (a + b_2) - (ma + \frac{m_H}{2}(a + b_2))g \sin \theta_2 \\ -\frac{m_H}{2} \dot{\theta}_2^2 (a + b_2) + \frac{m_H}{2} g \cos \theta_2 \end{pmatrix}$$

である．また，拘束条件と摩擦力項は2章と同じである．1段階の制御入力項は

$$\mathbf{S}\mathbf{u} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_H \\ u_{31} \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

であり、2段階の制御入力項は

$$\mathbf{S}\mathbf{u} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_H \\ u_3 \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

である．また、摩擦モデルも2章と同じで、クーロン摩擦モデルを採用した．そして、式(3.1)と(3.2)の運動方程式を2章と同じ手順で解くと、 $\dot{\mathbf{q}}$ が求められる．

$$\begin{aligned} \mathbf{J}_h &:= \mathbf{J} + \mathbf{J}_\mu \\ \mathbf{X} &:= \mathbf{J}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{J}_h^T \\ \mathbf{Y} &:= \mathbf{I}_9 - \mathbf{J}_h^T\mathbf{X}^{-1}\mathbf{J}\mathbf{M}^{-1} \\ \ddot{\mathbf{q}} &= \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{Y}(\mathbf{S}\mathbf{u} - \mathbf{h}) - \mathbf{J}_h^T\mathbf{X}^{-1}\dot{\mathbf{J}}\dot{\mathbf{q}}) \end{aligned} \quad (3.7)$$

3.1.2 制御系設計

制御入力 $\mathbf{u}$ の決め方や両脚の目標軌道は2章と同じなので、ここでは省略する．ここでは上体の制御方法について説明する．

本章では、上体を利用し、減速するために制御系を設計する．1段階では支持脚が前に速く倒れることを防止するために、 $\theta_3 - \theta_1$ を制御する．また、2段階では、動いた上体を元に戻すために、 θ_3 を制御する．ここで、2段階で後ろに戻す方が歩行の後半に減速できるため、1段階では上体が前に動くように制御する．また、1段階で上体が大幅に動くと、2段階で戻すことができなくなる可能性があるため、1段階では大幅に動かないように制御する．そのために、以下の通りに制御系を設定した．上体も、5次時間関数を目標軌道として使い、スムーズに制御する．

$$\begin{aligned} \theta_{31d}(t) &= \begin{cases} \sum_{k=0}^5 d_k t^k & (0 \leq t < T_{\text{set4}}) \\ \theta_{31\text{end}} & (t \geq T_{\text{set4}}) \end{cases} \\ \theta_{3d}(t) &= \begin{cases} \sum_{k=0}^5 e_k t^k & (0 \leq t < T_{\text{set5}}) \\ 0 & (t \geq T_{\text{set5}}) \end{cases} \end{aligned}$$

ここで、 T_{set4} は1段階制御の目標時間であり、 T_{set5} は2段階制御の目標時間である．本章で扱う歩行モデルは初期状態がゼロではないため、衝突直後の初期状態を目標軌道の初期状態に入れる．ただし、目標軌道の初期状態の加速度はゼロに

追従する． $\theta_3 - \theta_1$ の終端状態は θ_{31end} に追従し，終端状態の速度と加速度はゼロに追従する．また，上体を元に戻すために， θ_3 の終端状態は 0 [deg] に追従し，終端状態の速度と加速度はゼロに追従する．これらの条件を満足する境界条件は，

$$\begin{aligned}\theta_{31d}(0) &= \theta_{31start}, \quad \dot{\theta}_{31d}(0) = \dot{\theta}_{31start}, \quad \ddot{\theta}_{31d}(0) = 0 \\ \theta_{31d}(T_{set4}) &= \theta_{31end}, \quad \dot{\theta}_{31d}(T_{set4}) = 0, \quad \ddot{\theta}_{31d}(T_{set4}) = 0\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\theta_{3d}(0) &= \theta_{3start}, \quad \dot{\theta}_{3d}(0) = \dot{\theta}_{3start}, \quad \ddot{\theta}_{3d}(0) = 0 \\ \theta_{3d}(T_{set5}) &= 0, \quad \dot{\theta}_{3d}(T_{set5}) = 0, \quad \ddot{\theta}_{3d}(T_{set5}) = 0\end{aligned}$$

である．ここで， $\theta_{31start}$ は $\theta_3 - \theta_1$ の初期状態であり， $\dot{\theta}_{31end}$ は $\dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_1$ の初期状態である．また， θ_{31end} は $\theta_3 - \theta_1$ の終端状態である． θ_{3start} は θ_3 の初期状態， $\dot{\theta}_{3start}$ は $\dot{\theta}_3$ の初期状態とする．そして，これらの境界条件を満足する目標軌道の係数は，

$$\begin{aligned}d_5 &= -\frac{1}{T_{set4}^5}(6(\theta_{31start} - \theta_{31end}) + 3\dot{\theta}_{31start}T_{set4}) \\ d_4 &= \frac{1}{T_{set4}^4}(15(\theta_{31start} - \theta_{31end}) + 8\dot{\theta}_{31start}T_{set4}) \\ d_3 &= -\frac{1}{T_{set4}^3}(10(\theta_{31start} - \theta_{31end}) + 6\dot{\theta}_{31start}T_{set4}) \\ d_2 &= 0, \quad d_1 = \dot{\theta}_{31start}, \quad d_0 = \theta_{31start} \\ e_5 &= -\frac{1}{T_{set5}^5}(6\theta_{3start} + 3\dot{\theta}_{3start}T_{set5}) \\ e_4 &= \frac{1}{T_{set5}^4}(15\theta_{3start} + 8\dot{\theta}_{3start}T_{set5}) \\ e_3 &= -\frac{1}{T_{set5}^3}(10\theta_{3start} + 6\dot{\theta}_{3start}T_{set5}) \\ e_2 &= 0, \quad e_1 = \dot{\theta}_{3start}, \quad e_0 = \theta_{3start}\end{aligned}$$

となる．

3.1.3 衝突方程式

衝突方程式は2章と同じで拘束条件も2章と同じである．そして，拘束条件は，

$$\mathbf{J}_I = \begin{pmatrix} 1 & 0 & J_{13} & J_{14} & 0 & -1 & 0 & J_{17} & J_{18} \\ 0 & 1 & J_{23} & J_{24} & 0 & 0 & -1 & J_{27} & J_{28} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

とする．衝突方程式を解くと，

$$\mathbf{X}_I := \mathbf{J}_I \mathbf{M}^{-1} \mathbf{J}_I^T \quad (3.9)$$

$$\dot{\mathbf{q}}^+ = (\mathbf{I}_9 - \mathbf{M}^{-1} \mathbf{J}_I^T \mathbf{X}_I^{-1} \mathbf{J}_I) \dot{\mathbf{q}}^- \quad (3.10)$$

のように衝突直後の一般化速度が求められる．

3.2 安定歩容生成可能条件

ここでは，上体を持つ伸縮脚モデルの高摩擦路面上の安定歩容生成可能条件について紹介する．上体を利用し，支持脚がポテンシャルバリアを速く突破することを防止すれば，低摩擦路面上では安定歩容生成が難しくなるため，ポテンシャルバリアを最も速く突破した $\phi = 88.6^\circ$ ， $\alpha = 37.1^\circ$ に設定し， $T_{\text{set1}} = 0.43$ [s] に設定した．また，脚の重さは2章と違い，10 [kg] に設定した．脚が軽いと支持脚の鉛直床反力が負の数になり，支持脚が床から離れるため，脚の重さを増加した．しかし，股関節の重さは2章と同じで，10 [kg] に設定した．他の物理・制御パラメータは2章と同じである．変数は上体の重さである m_{up} ，股関節から上体の重心までの長さである L ，1段階制御の θ_{31} の終端状態である $\theta_{31\text{end}}$ ，最後に，目標時間である T_{set4} と T_{set5} の5つである．しかし， $T_{\text{set1}} = T_{\text{set4}} + T_{\text{set5}}$ とし， T_{set4} により T_{set5} が決められるため，変数は4つになる．これらの変数を L は 1.0 [m] から 1.5 [m] まで， m_{up} は 3.0 [kg] から 6.0 [kg] まで， $\theta_{31\text{end}}$ は -5.0 [rad] から 15.0 [rad] まで， T_{set4} は 0.05 [s] から 0.20 [s] まで変化させた．ここで，同じ m_{up} に対して安定歩容生成可能条件が最も多い L の条件と最も少ない条件の図を表せる． m_{up} が 3 [kg] の場合， $L = 1.0$ [m] の条件でも安定歩容生成可能条件が多かったため， $L = 0.7$ [m] の条件を追加し，シミュレーションを行った．また， m_{up} が 4 [kg] の場合も $L = 1.0$ [m] の条件でも安定歩容生成可能条件が多かったため， $L = 0.8$ [m] の条件を追加し，シミュレーションを行った．その結果が図 3.2 から図 3.5 まで表れている．ここで，黄色の点は支持脚の鉛直床反力が負の数になった条件である，緑色の点は安定歩容生成ができた条件である．

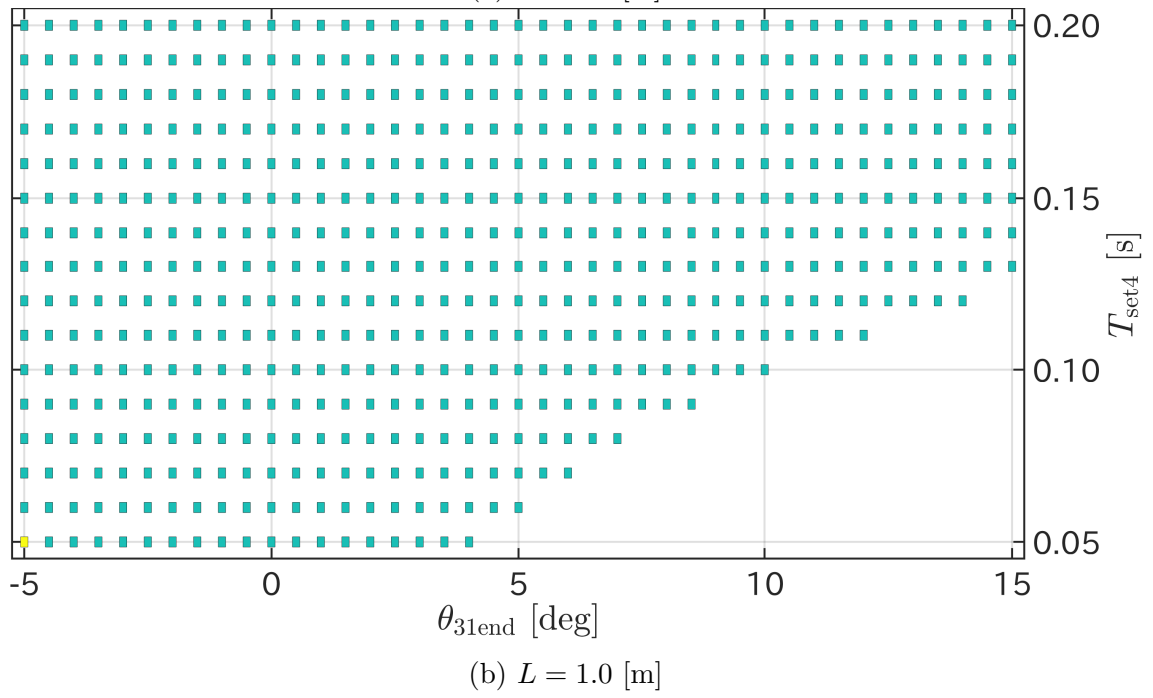
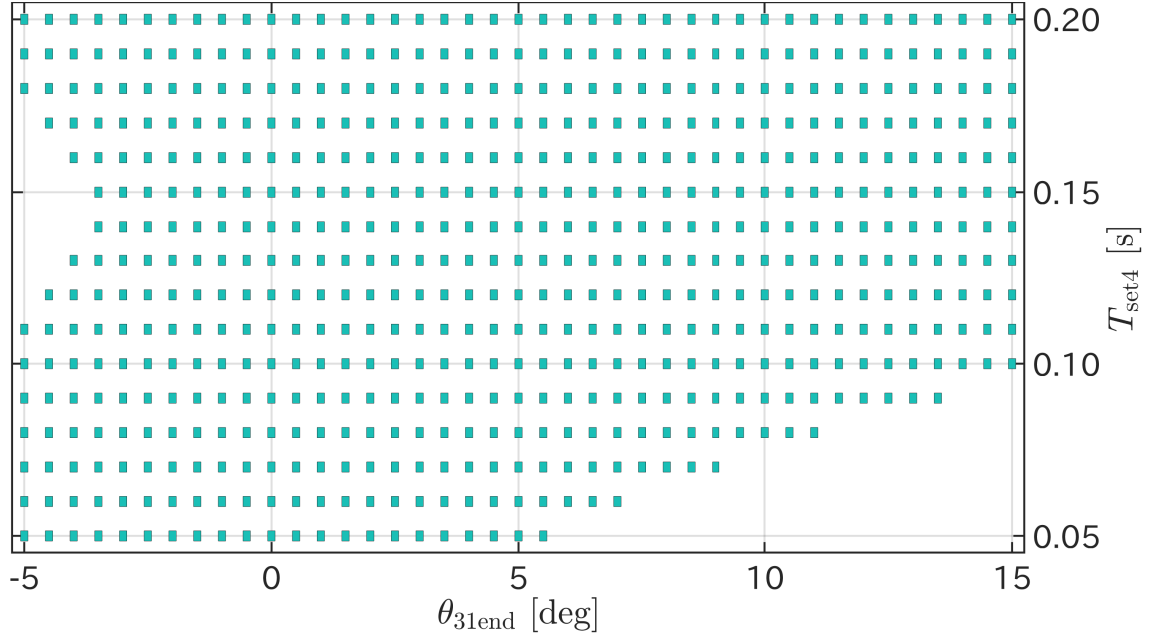


図 3.2: 高摩擦路面上の安定歩容生成可能条件 ($m_{up} = 3.0$ [kg])

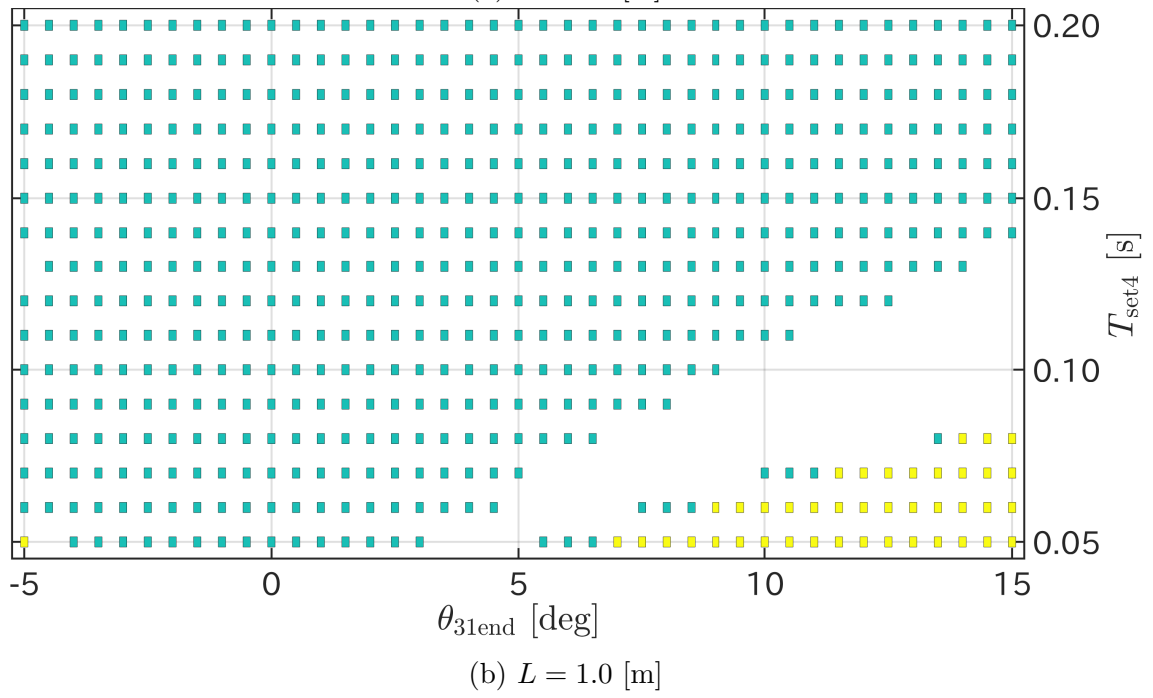
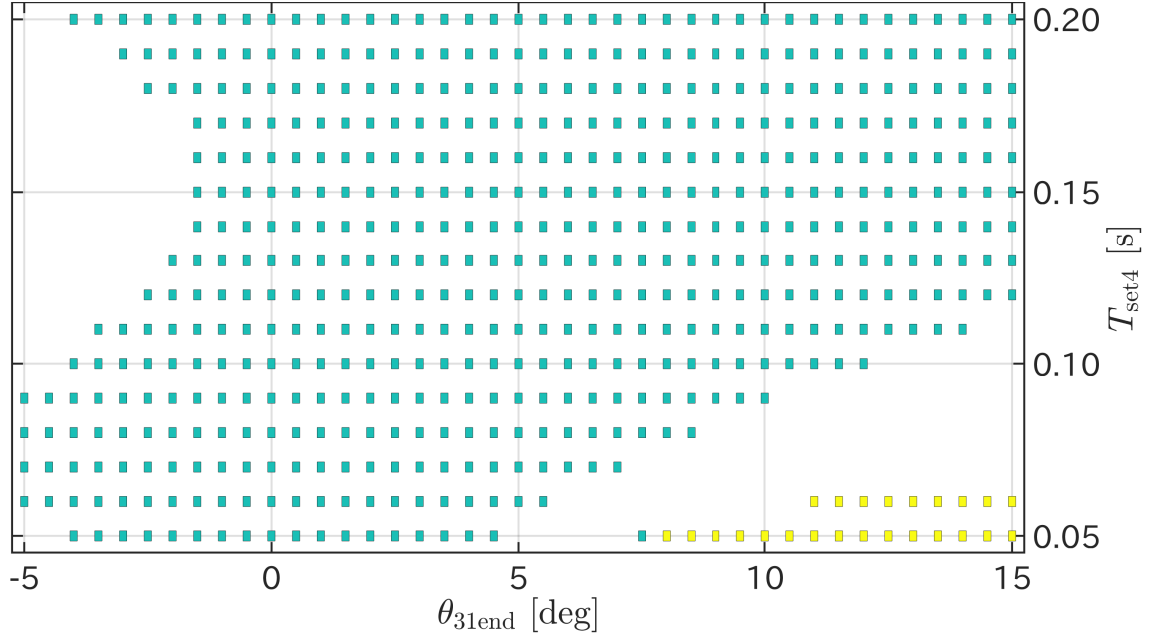
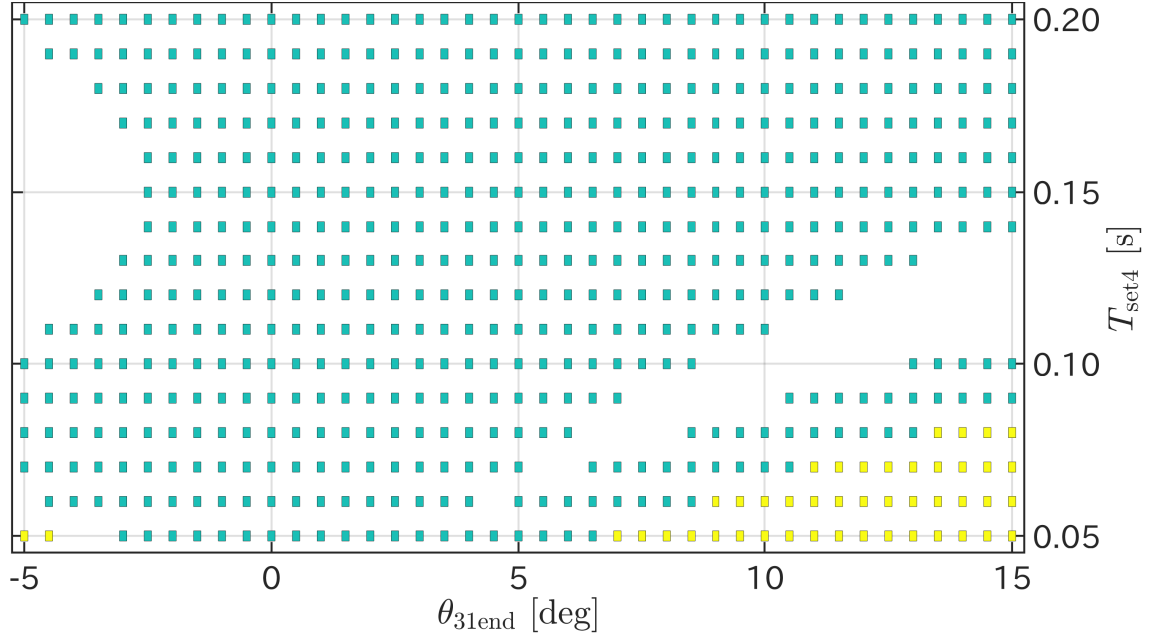
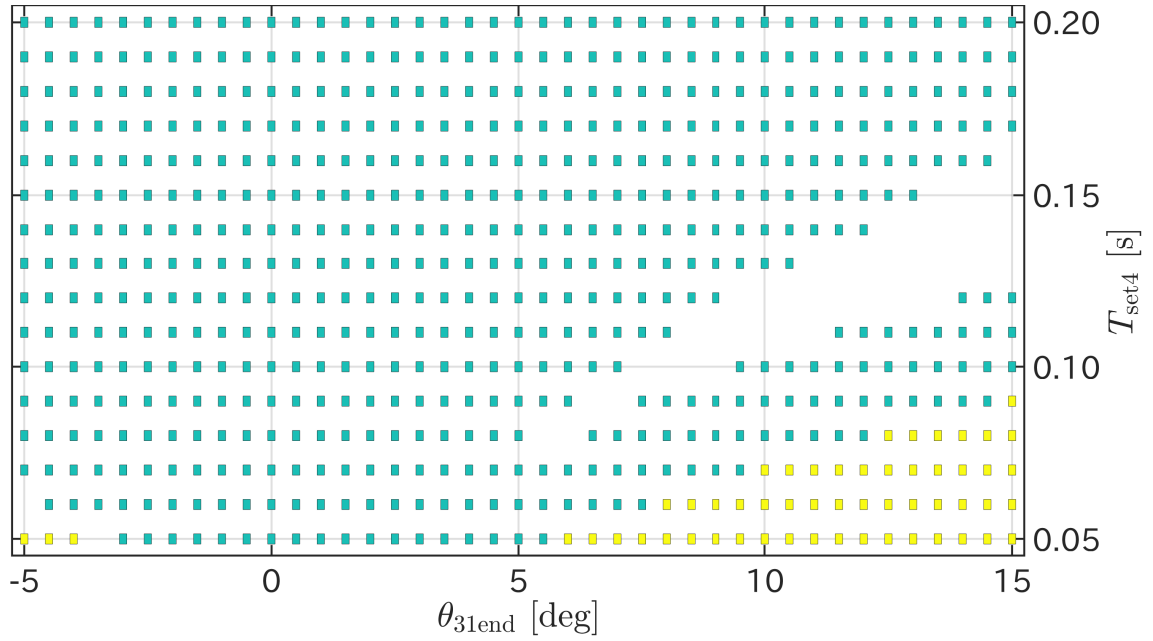


図 3.3: 高摩擦路面上の安定歩容生成可能条件 ($m_{up} = 4.0$ [kg])

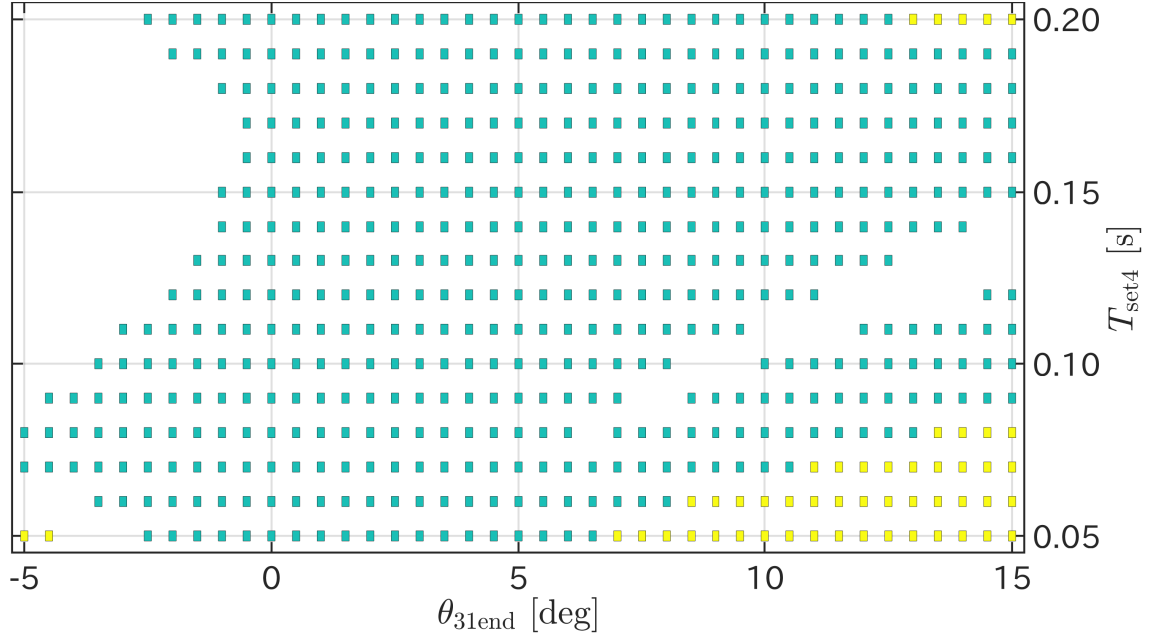


(a) $L = 1.0$ [m]

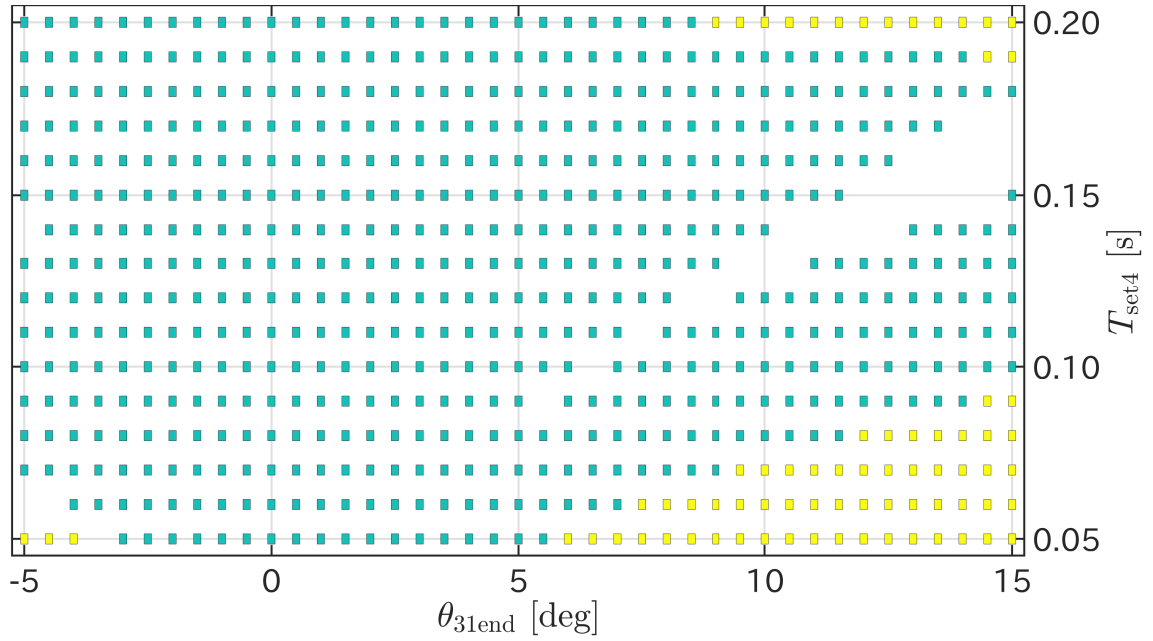


(b) $L = 1.2$ [m]

図 3.4: 高摩擦路面上の安定歩容生成可能条件 ($m_{up} = 5.0$ [kg])



(a) $L = 1.0$ [m]



(b) $L = 1.3$ [m]

図 3.5: 高摩擦路面上の安定歩容生成可能条件 ($m_{up} = 6.0$ [kg])

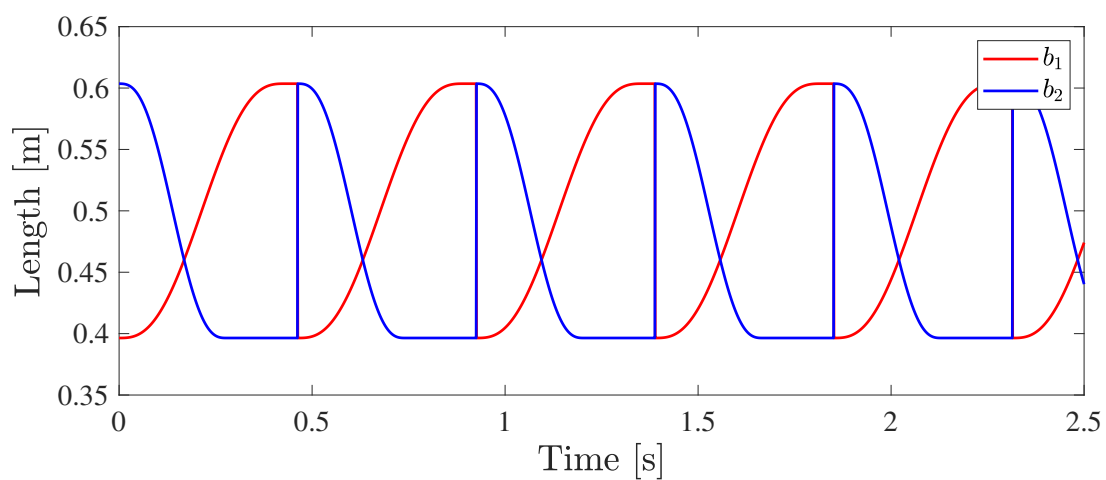
図 3.2 から図 3.5 までの傾向を見ると、 m_{up} の値が小さい場合が大きい場合より上体が短くても安定歩容生成可能条件が多くなった。図 3.2 から図 3.5 までの (a) で安定歩容生成が不可能になった領域の中で左側は上体の制御の影響が小さく、減速できずに倒れる領域である。また、右の下では θ_{31end} が大きくなり、支持脚が動かなくて遊脚が速く前に進んでしまい、遊脚が床面を削ってしまい、倒れる領域もあった。しかし、 θ_{31end} が更に大きくなれば、上体が大幅に前に進んでポテンシャルバリアを突破しやすくなり、安定歩容が可能になった。 θ_{31end} が大きすぎると、制御入力が大きすぎ、支持脚が床面から離れてしまい、倒れる領域も存在する。また、 T_{set4} が短すぎると制御入力が大きすぎ、支持脚の鉛直床反力が負になり、倒れる領域もあった。また、 T_{set4} の値が大きく θ_{31end} の値も大きい場合は、歩行の後半に下方向に大きな加速度を受けて支持脚の鉛直床反力が負になった。

3.3 歩行解析

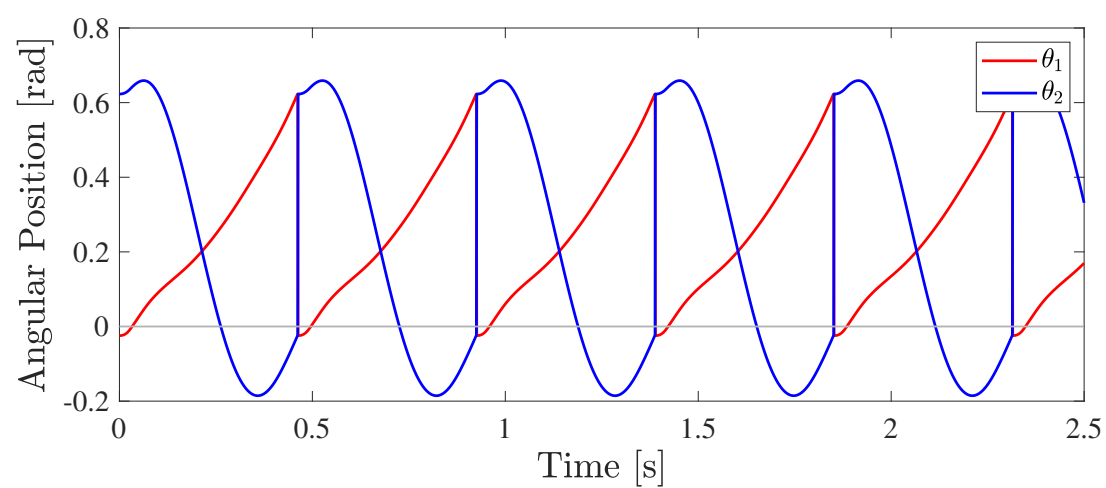
ここでは、3.2 章で作られた歩行の中で、1 つの歩行パターンを選び、その歩行を数値シミュレーションを通じて解析する。使われた歩行ロボットモデルの物理・制御パラメータは表 3.1 に示されている。また、ここでは、 α の値は 37.1° に設定し、 ϕ の値は 88.6° に設定した。2 章で確認した角度の時間に対する変化、制御する b_1 、 b_2 、 $\theta_1 - \theta_2$ の時間に対する変化、支持脚と遊脚と上体の位相平面図、水平床反力と鉛直床反力の時間変化、ロボットの重心の速度をもう一度確認する。加えて、 $\theta_3 - \theta_1$ を確認することで、制御がしっかりできているのか確認する。また、 θ_3 と $\dot{\theta}_3$ も確認する。最後に、スティック線図から動きを見る。その結果を図 3.6 から図 3.14 に示す。

表 3.1: 上体を持つモデルの高摩擦路面上の物理・制御パラメータ

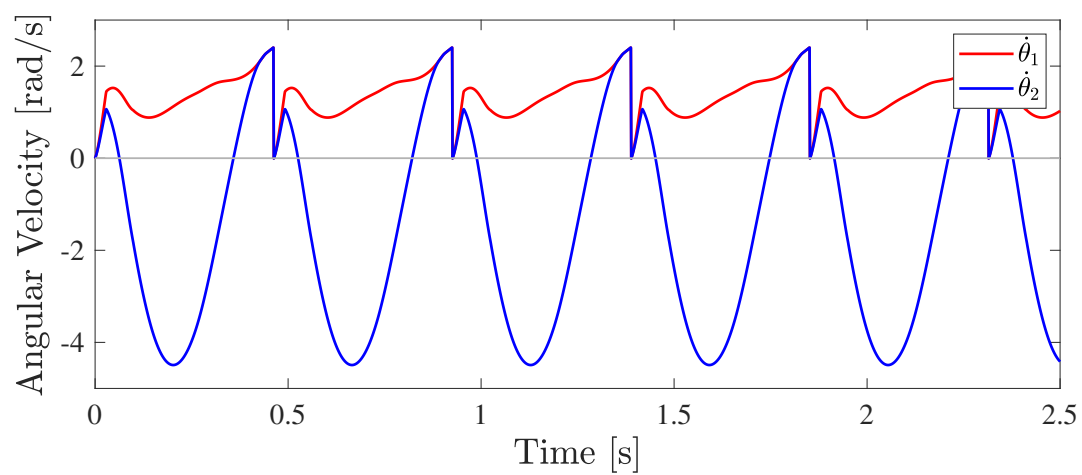
m_H	10	kg	K_D	400	s^{-2}
m	10	kg	K_P	100	s^{-1}
a	0.5	m	μ_0	0.7	-
b_0	0.5	m	c	100	-
g	9.81	m/s^2	m_{up}	5	kg
L	1.0	m	T_{set4}	0.10	s
θ_{31end}	0	deg	T_{set5}	0.33	s
T_{set1}	0.43	s	T_{set2}	0.43×0.65	s



(a) 両脚の長さ

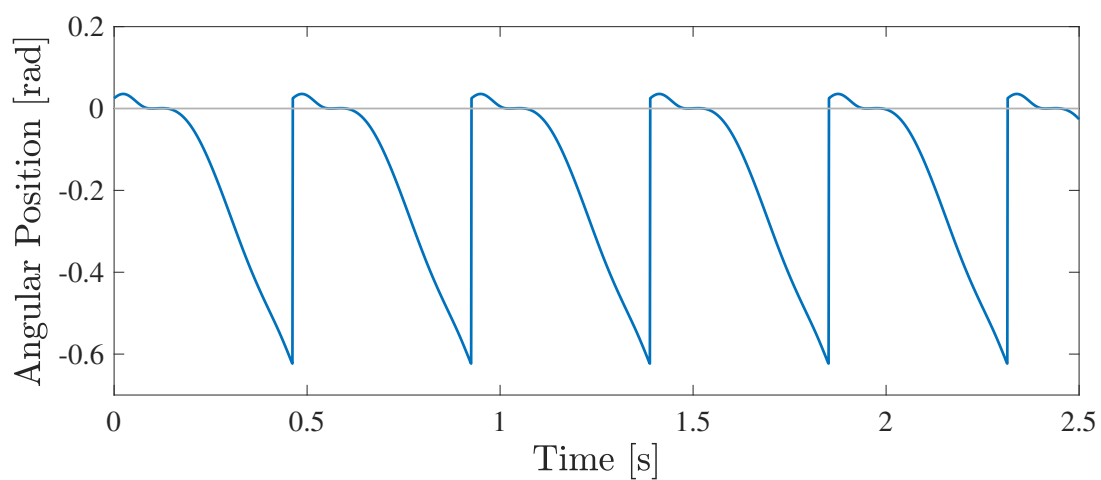


(b) 両脚の絶対角度

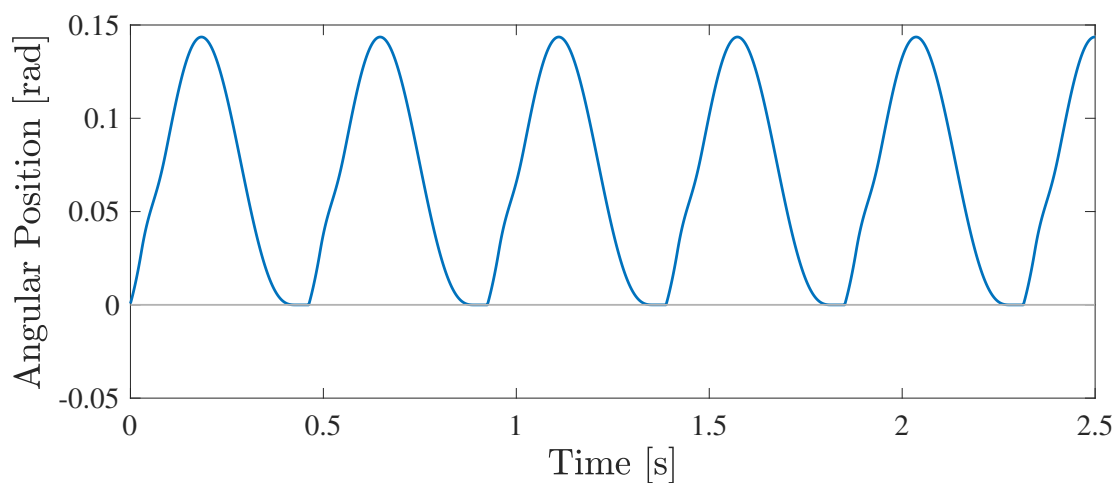


(c) 両脚の角速度

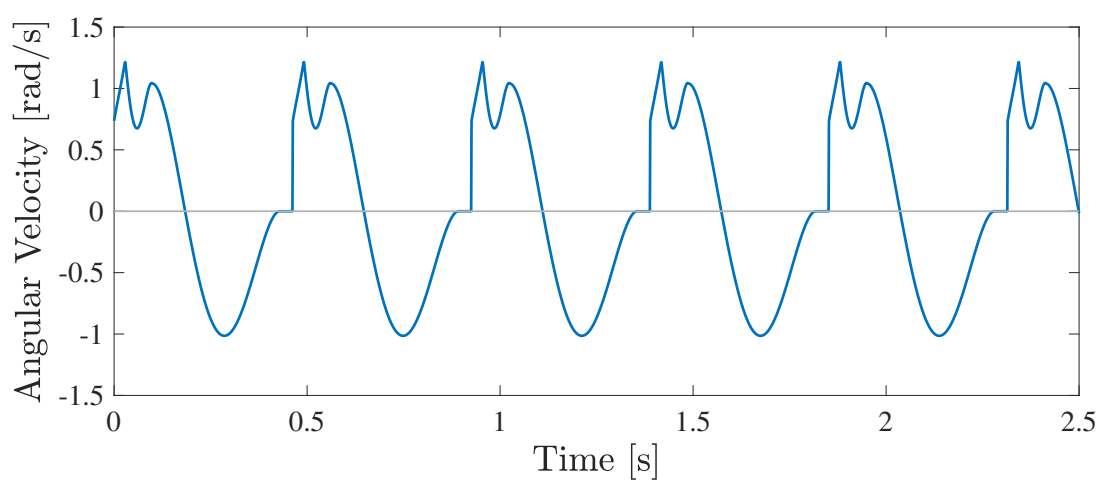
図 3.6: 上体を持つモデルの高摩擦路面上の制御パラメータの時間に対する変化 (脚)



(a) $\theta_3 - \theta_1$

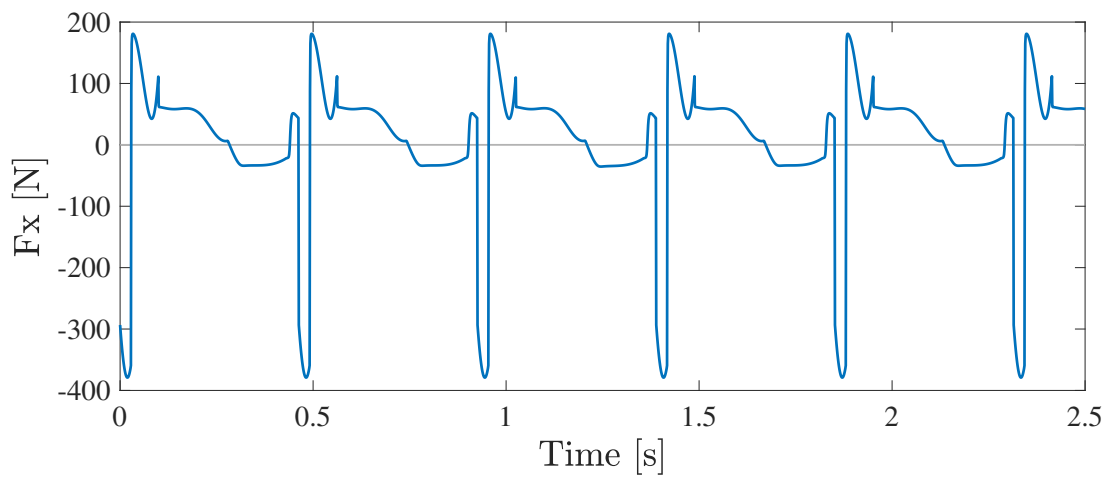


(b) 上体の絶対角度

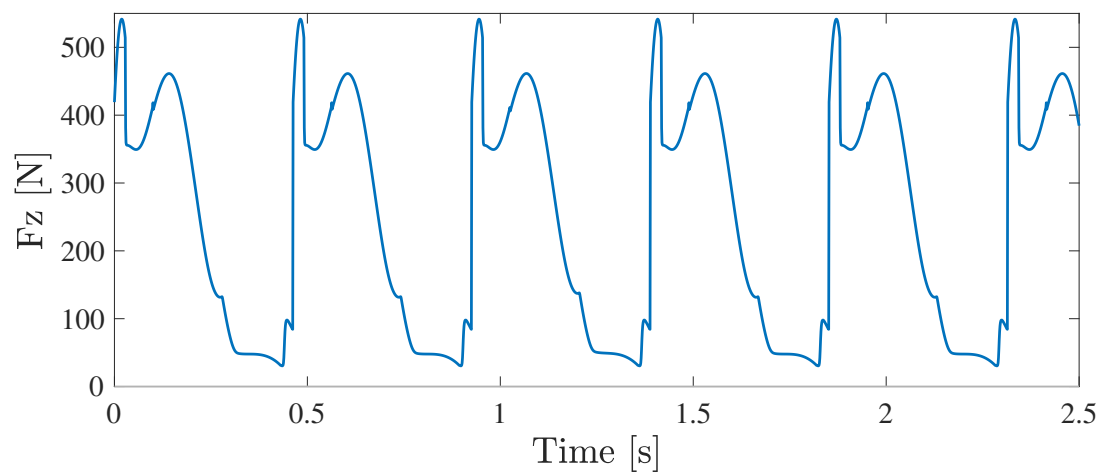


(c) 上体の角速度

図 3.7: 上体を持つモデルの高摩擦路面上の制御パラメータの時間に対する変化 (上体)



(a) 水平床反力



(b) 鉛直床反力

図 3.8: 上体を持つモデルの高摩擦路面上の床反力の時間に対する変化

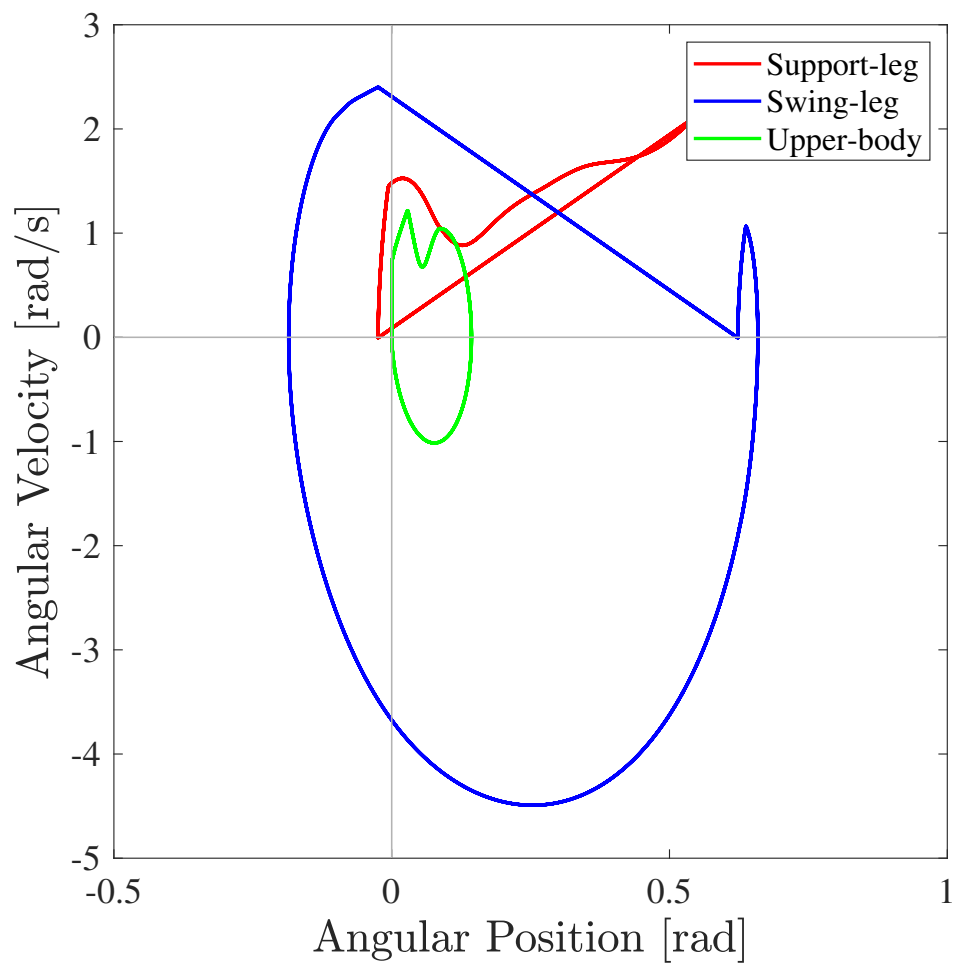


図 3.9: 上体を持つモデルの高摩擦路面上の1周期の位相平面図

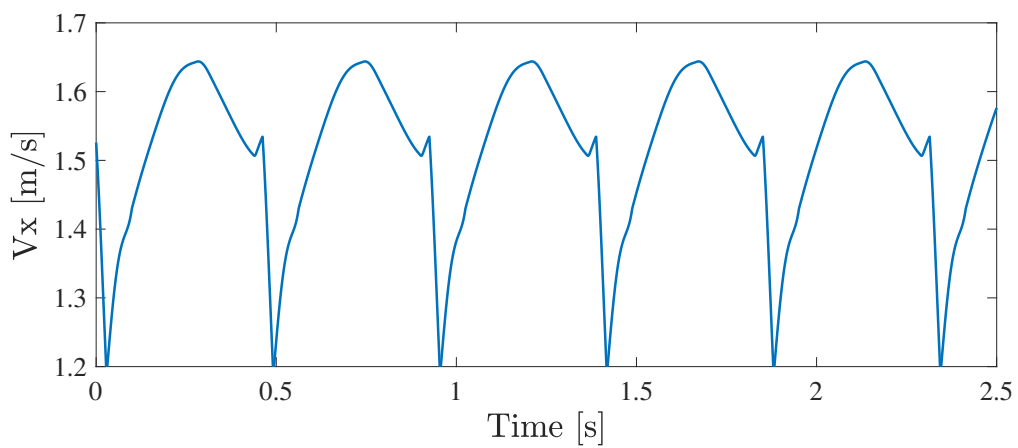


図 3.10: 上体を持つモデルの高摩擦路面上の重心の水平方向速度

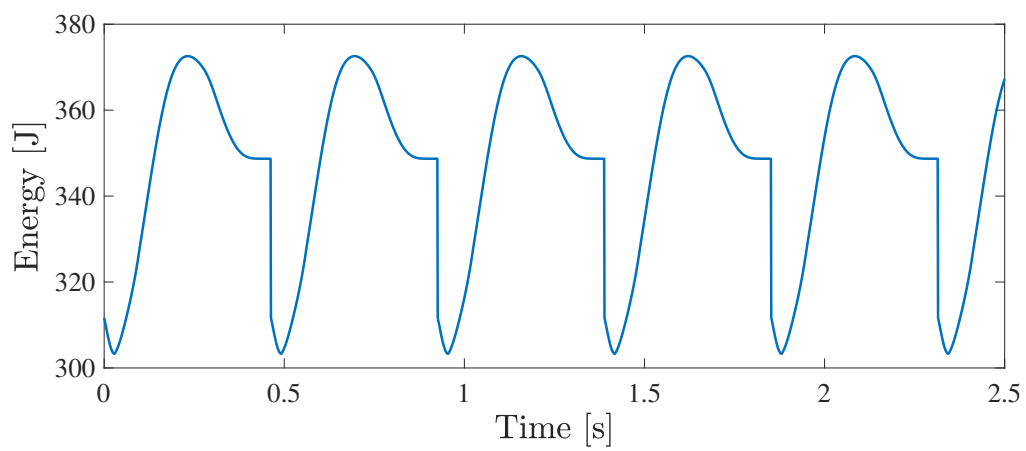


図 3.11: 上体を持つモデルの高摩擦路面上のエネルギーの時間に対する変化

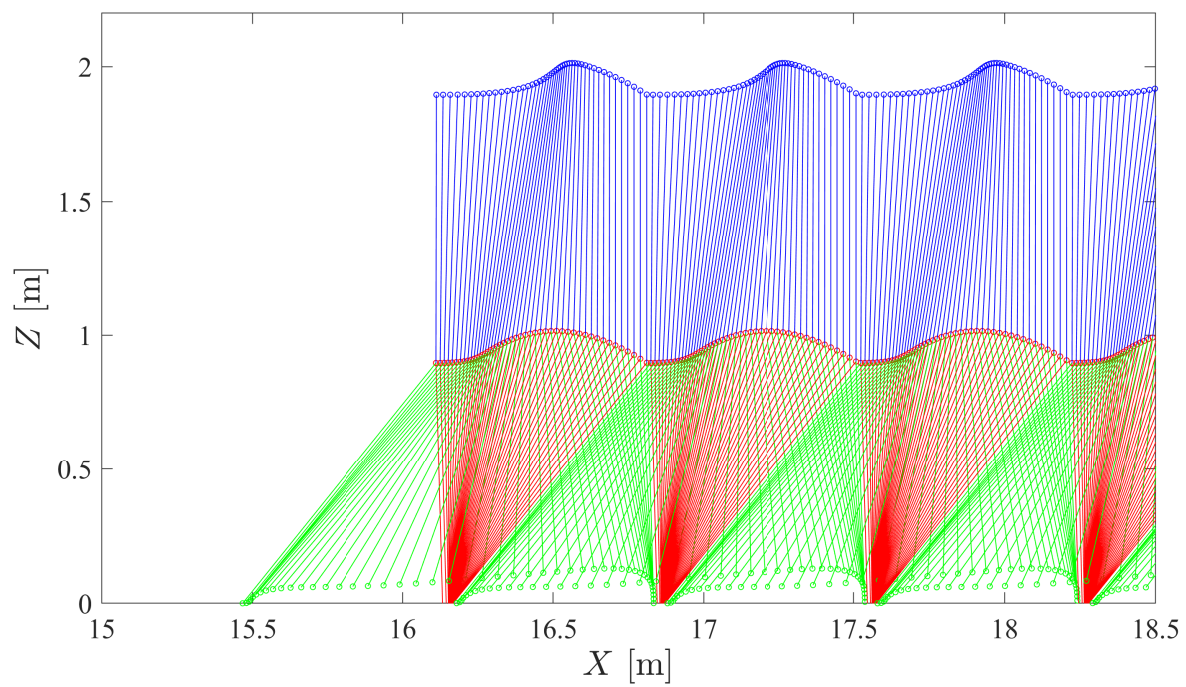
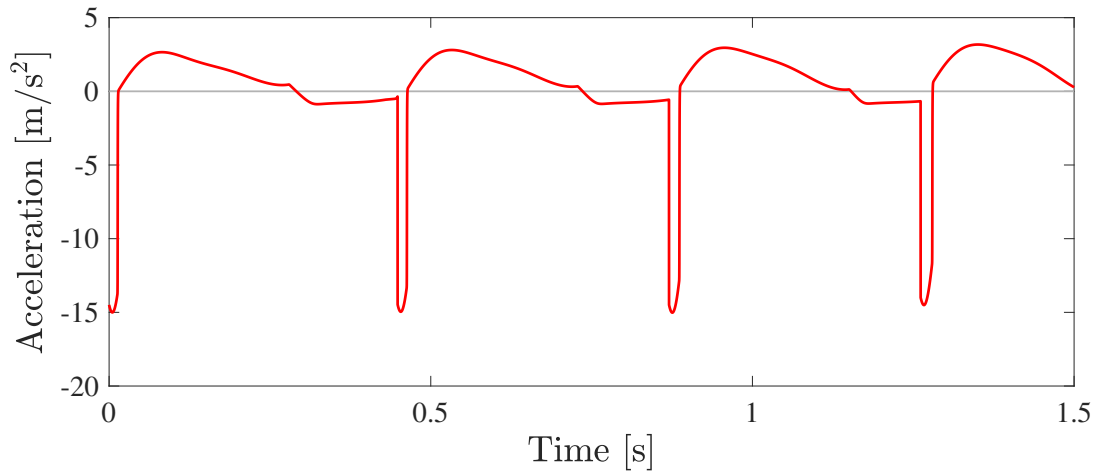
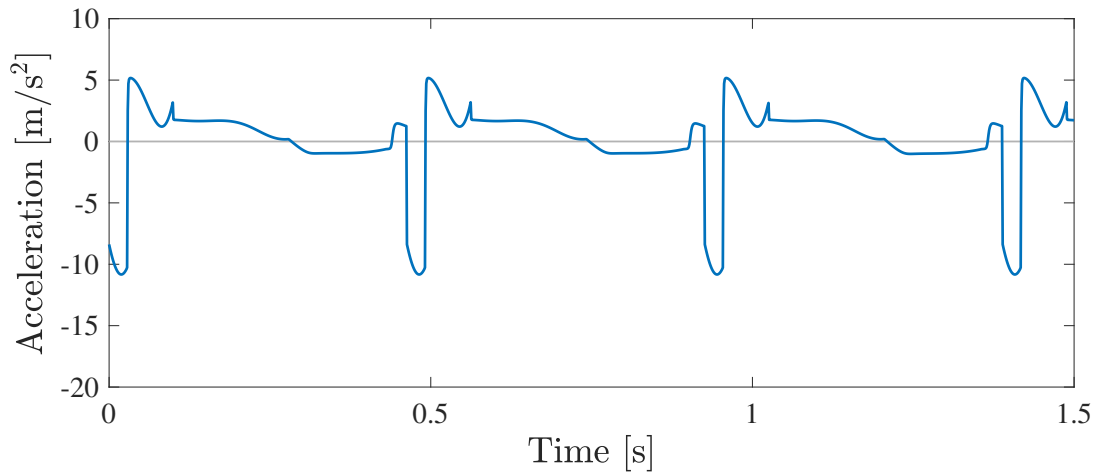


図 3.12: 上体を持つモデルの高摩擦路面上のスティック線図



(a) 脚のみモデル



(b) 上体を持つモデル

図 3.13: 重心の加速度比較

図 3.9 から，歩行が 1 周期で収束し，安定して歩くことが確認できた．また，ロボットの速度が約 1.6 [m/s] まで上がり，2 章の脚のみモデルより遅くなった．また，図 3.6 と図 3.7 を見ると，各制御パラメータが上手く追従し，安定に歩容生成ができていることが確認できる．

ここで，上体を持つモデルと 2 章の脚のみモデルの重心の加速度を比較し，2 章と 3 章の違いを調べる．その結果が図 3.13 に表れている．衝突直後の加速度を見ると，上体を持つモデルは 1 段階の制御の影響で減速し，最初の過度な加速を抑えた．上体を持つモデルが脚のみモデルより最大加速度は大きくても，衝突直後に減速することで全体的には速度を抑えることが可能になった．

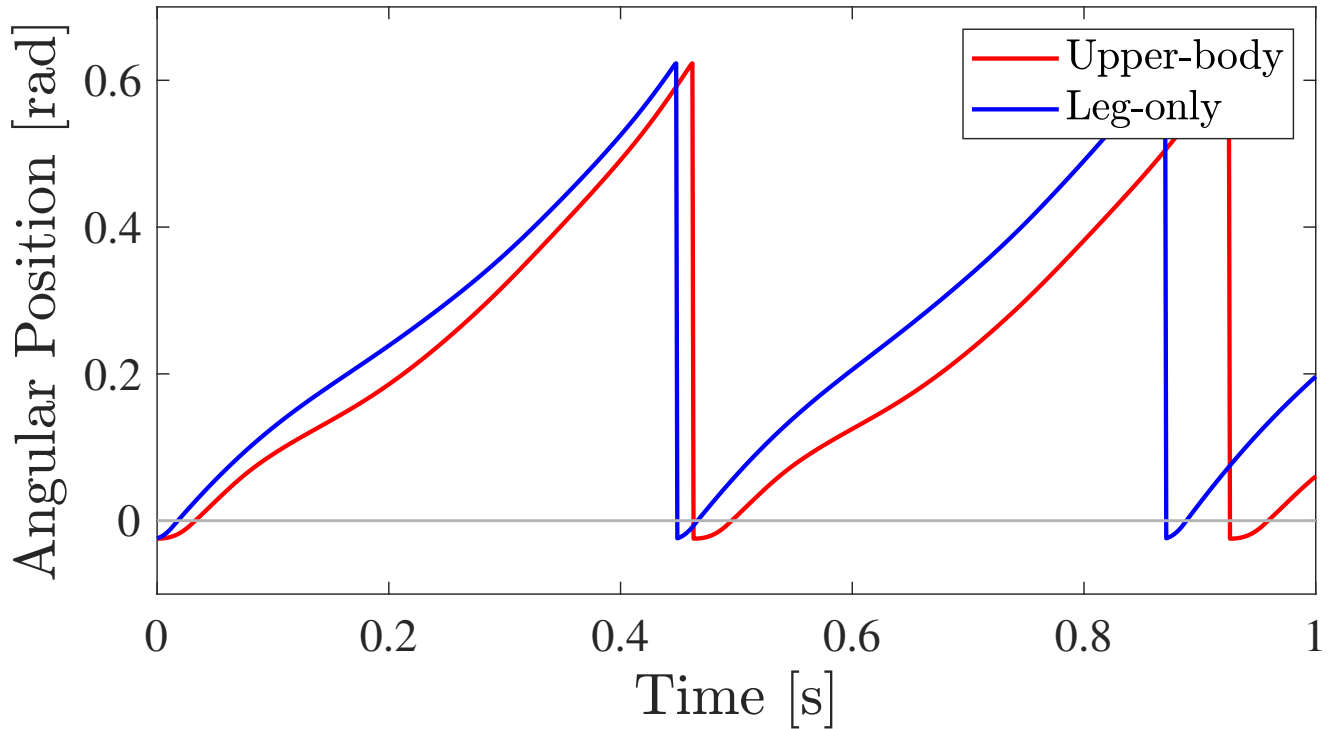


図 3.14: 支持脚の絶対角度比較

高摩擦路面上で支持脚の絶対角度の動きを調査した．その結果，脚のみモデルより上体を持つモデルが支持脚の絶対角度の変化が遅くなっていた．そして，ポテンシャルバリアを突破しすぎ，倒れることを防止することが可能になった．

3.4 本章のまとめ

本章では，上体を持ち，減速することで高摩擦路面上で収束して歩けることが確認できた．まずはロボットを減速するために制御系を設計し，数学モデルを導出した．その後，上体の制御パラメータによる安定歩容生成可能条件を調べた．その結果，上体を持つ伸縮脚モデルなら高摩擦路面上で安定歩容生成が可能であることが確認できた．また，数値シミュレーションを通じて歩行解析を行った．その結果，歩行の後半で減速し，歩行速度が収束できることが確認できた．また，本論文では触れなかったが，低摩擦路面上でも，3章のモデルが安定歩容生成が可能になったことを確認できた．しかし，低摩擦路面上の脚のみモデルはSRが0.3343だったことに比べて本章のモデルは低摩擦路面上では0.3817，高摩擦路面上では0.4317になり，上体の制御入力のせいで効率が悪くなった．そして，本章で使われたモデルを使い，4章では摩擦係数が一定でない路面上の安定歩容生成可能性を検討する．

第4章 上体を持つ伸縮脚モデルの摩擦係数が一定でない路面上の安定歩容生成

本章では、3章で使われた上体を持つ伸縮脚モデルの摩擦係数が一定でない路面上の安定歩容生成可能性について説明する。本章で使われるモデルは全て3章と同じなので数学モデルの導出は省略する。しかし、本章では摩擦係数が一定ではなく、一歩ずつ摩擦係数が変わる路面を想定し、数値シミュレーションを行う。また、ここでは、 $\mu_0 = 0.05$ の低摩擦路面から $\mu_0 = 1.0$ の高摩擦路面までランダムに変わる状況を想定した。安定歩容生成可能条件を調べた後、その中で一つの条件を選べ、歩行解析を行う。

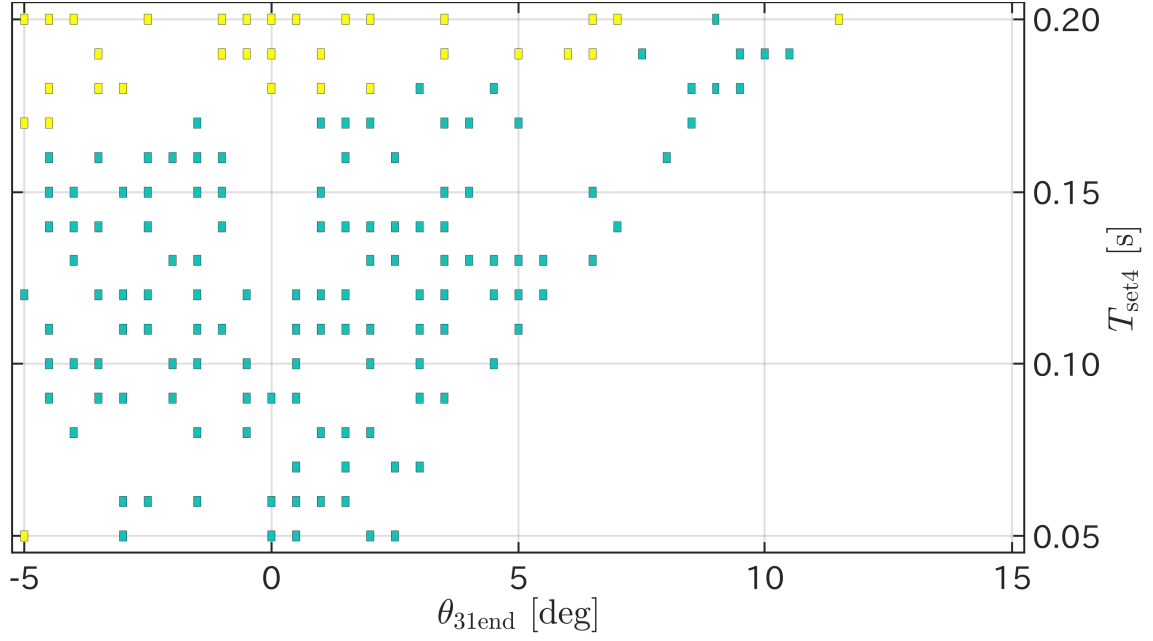
4.1 安定歩容生成可能条件

ここでは、上体を持つ伸縮脚モデルの摩擦係数が一定でない路面上の安定歩容生成可能条件を調査する。摩擦係数が一歩ずつランダムに変わる状況なので、毎回、可能条件は変わると考えられる。そのため、ここでは傾向だけわかることを目的とする。また、摩擦係数が一定でないため、一歩ずつ歩行様子が変わり、歩行が収束しない。そして、ここでは100歩まで歩けば、安定歩容生成が可能になったと判断する。また、衝突姿勢は固定し、上体の制御パラメータを調整し、上体の制御パラメータによる安定歩容生成可能性を調べる。まず、衝突姿勢は $\alpha = 37.1^\circ$, $\phi = 88.6^\circ$ に設定する。上体の制御パラメータは股関節から上体の重心までの長さである L は 1.0 [m] から 1.4 [m] まで 0.1 [m] ずつ変化させる。しかし、 $m_{up} = 3.0$ の場合は $L = 0.7$ [m] から $L = 1.2$ [m] まで、 $m_{up} = 4.0$ は $L = 0.8$ [m] から $L = 1.3$ [m] まで変化させた。また、上体の重さである m_{up} は 3.0 [kg] から 6.0 [kg] まで 1.0 [kg] ずつ変化させる。上体の制御パラメータは、終端状態は -5° から 15° まで 0.5° ずつ変化させ、目標時間である T_{set4} は 0.05 [s] から 0.20 [s] まで 0.01 [s] ずつ変化させ、シミュレーションを行う。

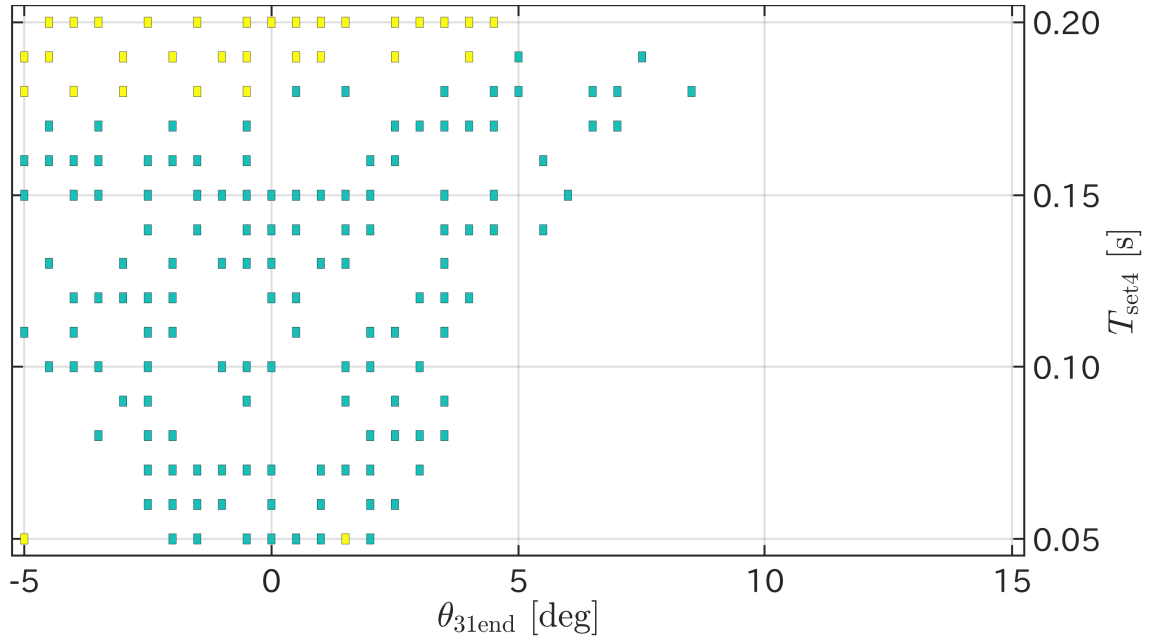
また、摩擦係数が一定でない路面なので、毎回シミュレーション結果が違い、本章では、シミュレーションを4回行い、4回も安定歩容生成が可能になった条件だけ安定歩容生成可能条件とする。また、1回だけでも支持脚の鉛直床反力が負に

なった条件は支持脚の鉛直床反力が負になった条件とした．そして，すべての m_{up} の条件の中で $L = 1.0$ [m] を表わせ，また，安定歩容生成可能条件が最も多かった条件を表す．ここで，黄色の点は支持脚の鉛直床反力が 0 以下になった条件であり，緑色の点は安定歩容生成可能条件である．

摩擦係数がランダムに変わるため，安定歩容生成可能領域の中でも倒れてしまった条件があった．3 章の安定歩容生成可能領域と傾向は似ていたが領域が小さくなった．すべての条件で L が長くなると，4 回も安定歩容生成が可能になった条件が増えた．また，上体が重い条件が軽い条件より安定に安定歩容生成可能領域の中で歩けなかった条件が少ない．しかし，同時に安定歩容生成可能領域の外では支持脚の鉛直床反力が負になり，倒れる可能性も高かった．

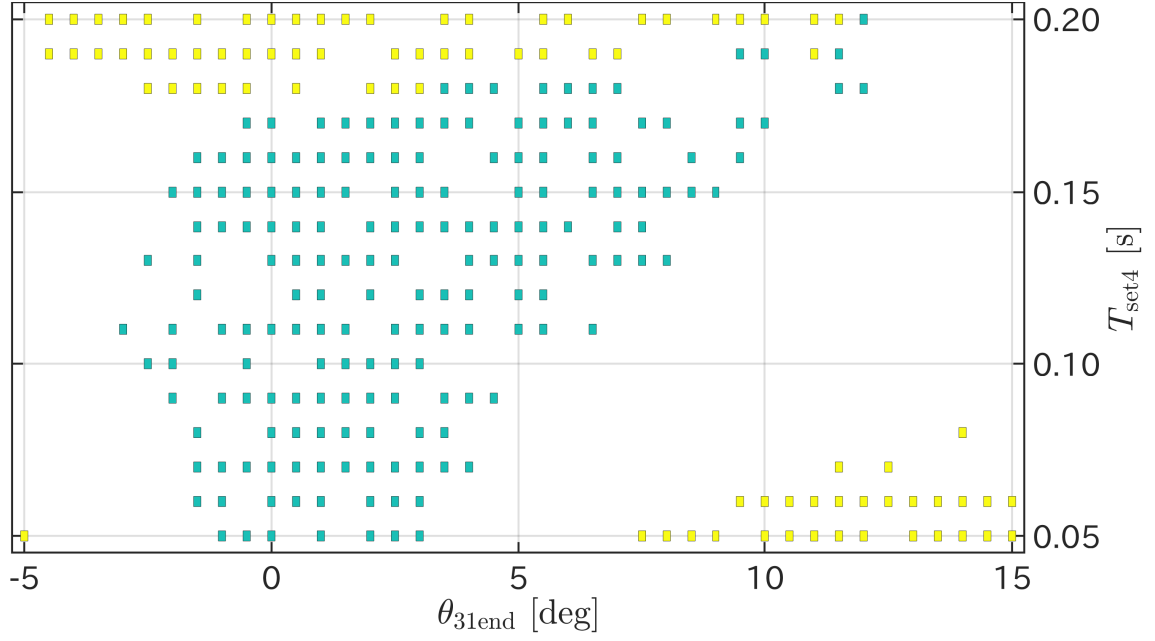


(a) $L = 1.0$ [m]

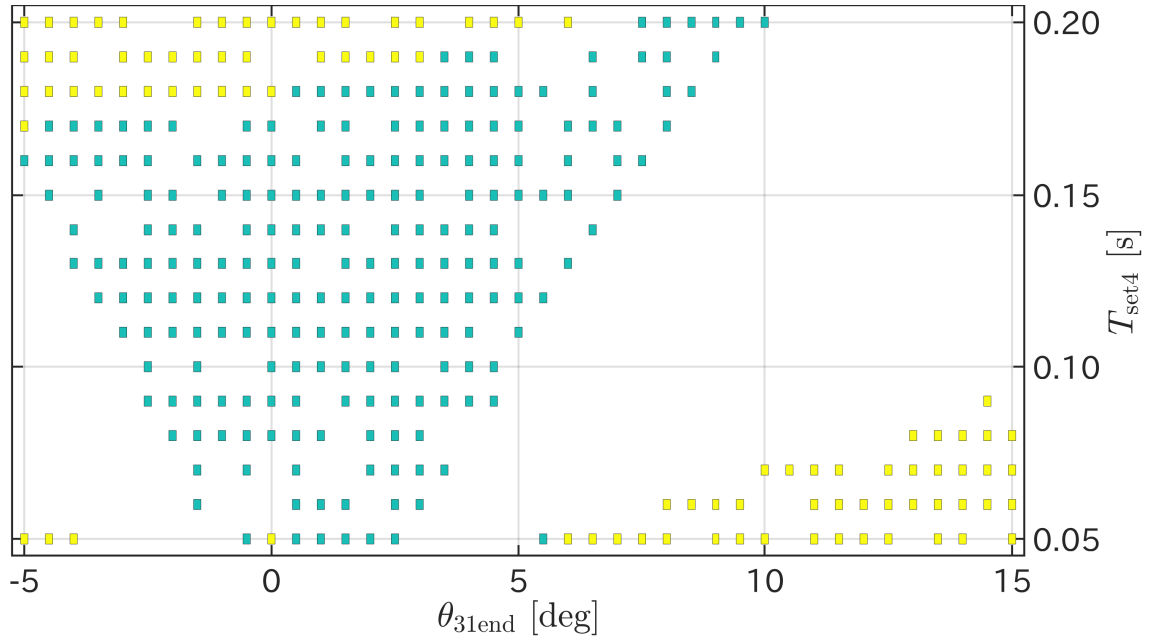


(b) $L = 1.2$ [m]

図 4.1: 摩擦係数が一定でない路面上の安定歩容生成可能条件 ($m_{up} = 3.0$ [kg])

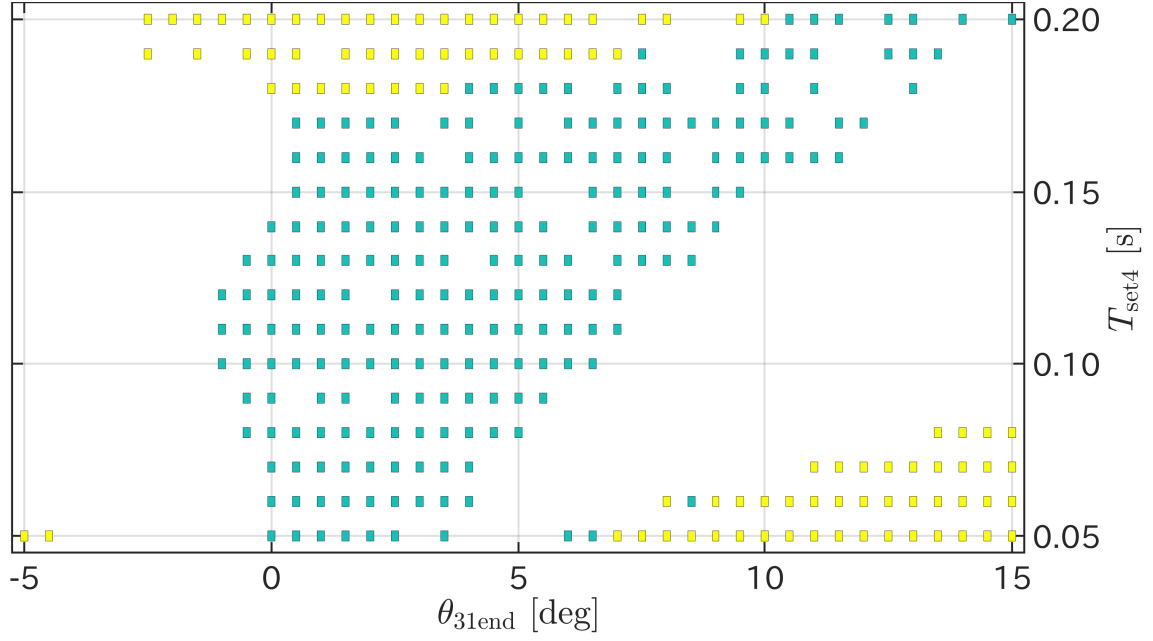


(a) $L = 1.0$ [m]

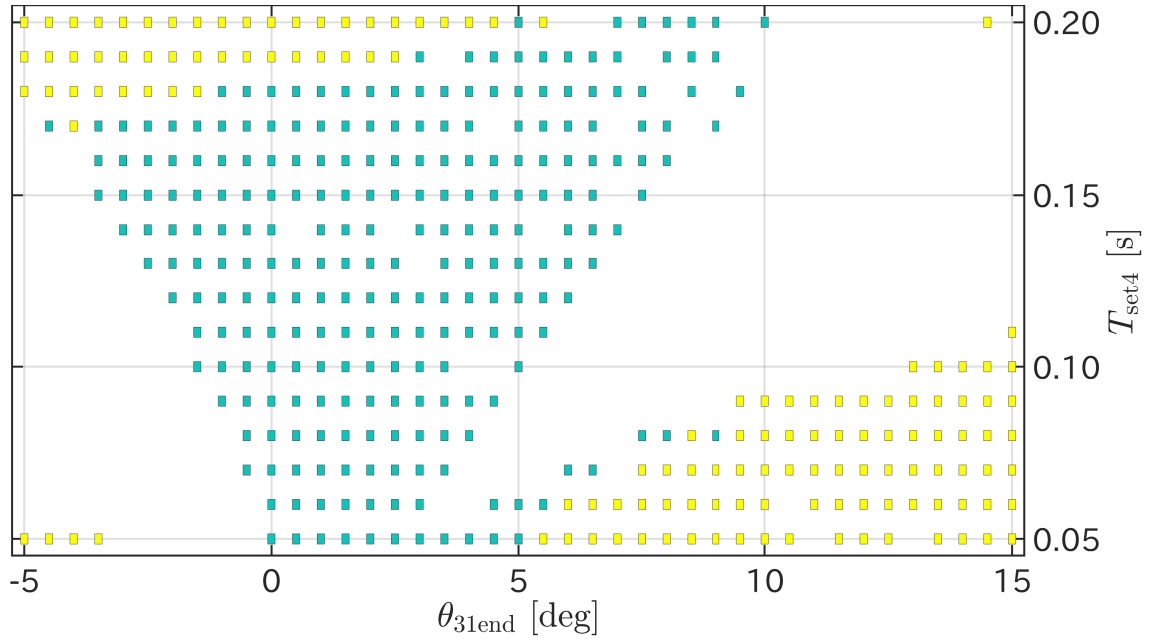


(b) $L = 1.3$ [m]

図 4.2: 摩擦係数が一定でない路面上の安定歩容生成可能条件 ($m_{up} = 4.0$ [kg])

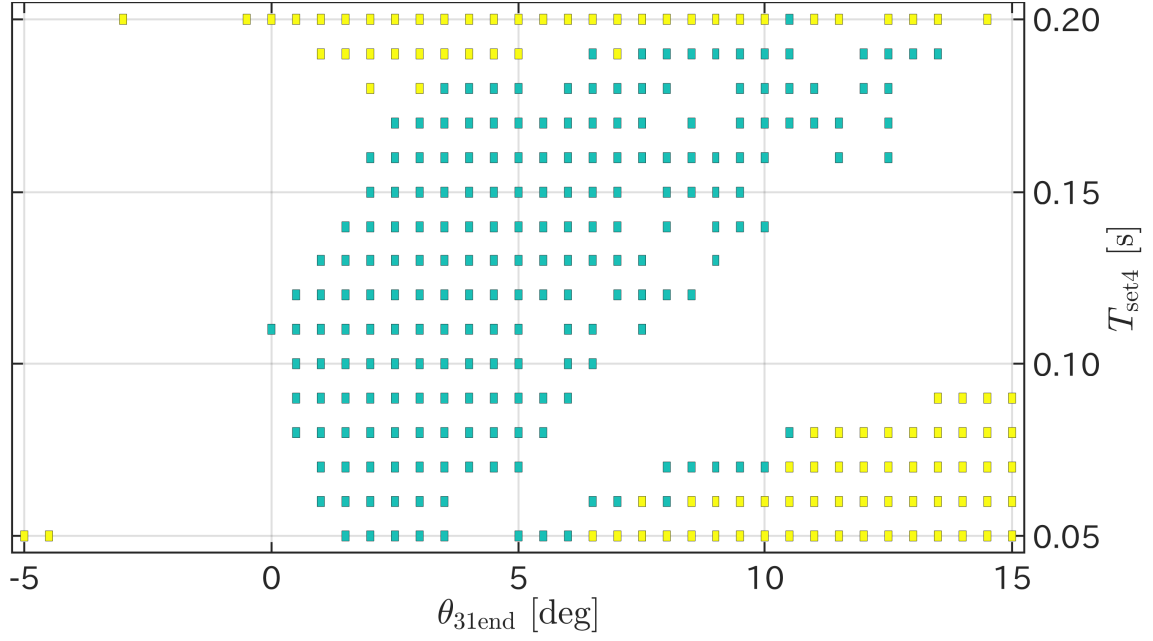


(a) $L = 1.0$ [m]

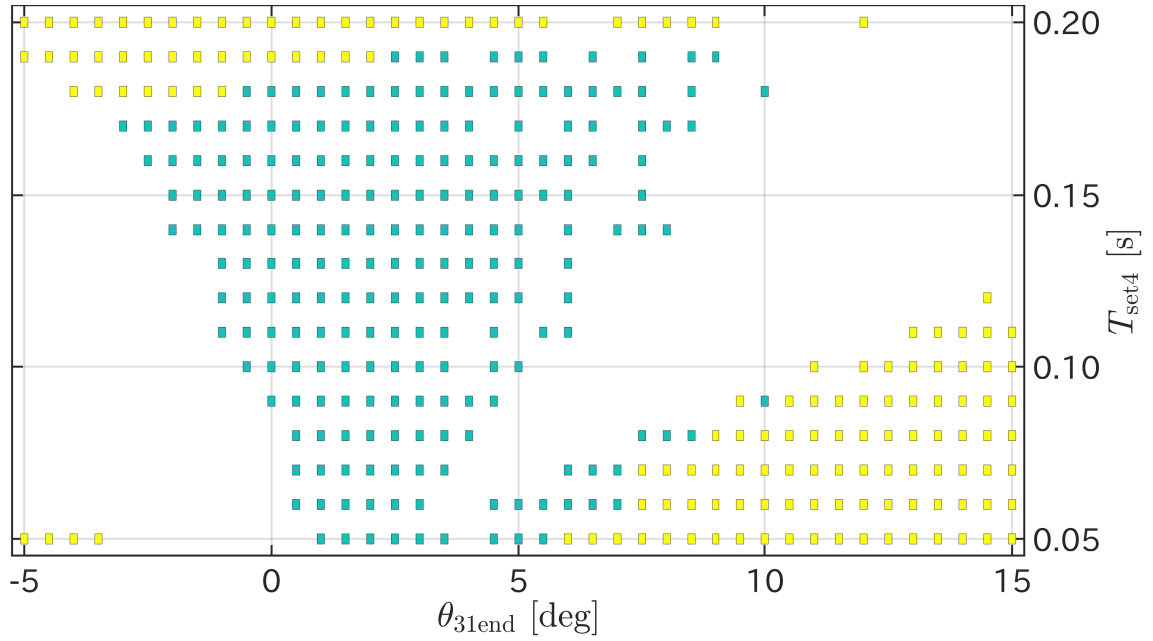


(b) $L = 1.4$ [m]

図 4.3: 摩擦係数が一定でない路面上の安定歩容生成可能条件 ($m_{up} = 5.0$ [kg])



(a) $L = 1.0$ [m]



(b) $L = 1.4$ [m]

図 4.4: 摩擦係数が一定でない路面上の安定歩容生成可能条件 ($m_{up} = 6.0$ [kg])

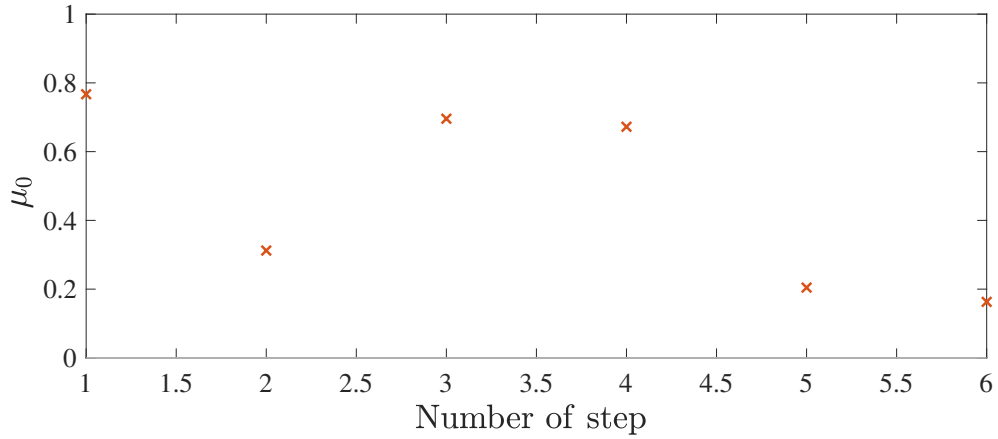


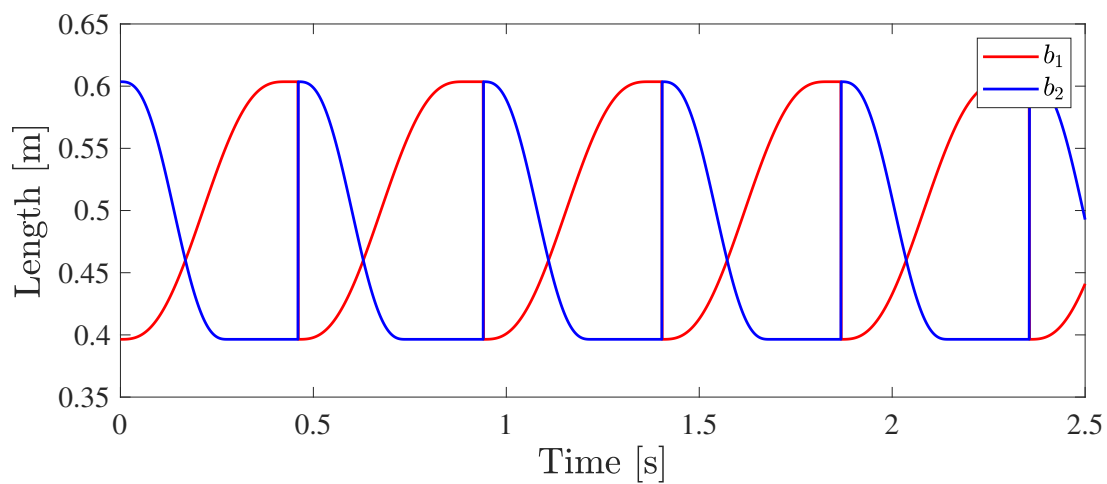
図 4.5: 歩数による摩擦係数変化

4.2 歩行解析

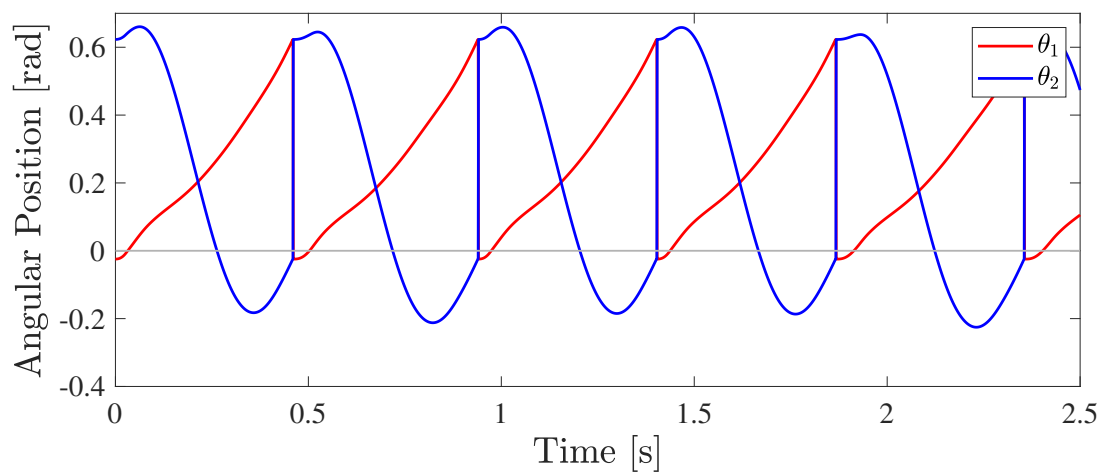
ここでは、4.1 章で作られた歩行の中で $L = 1.0$ [m], $\theta_{31end} = 0.0^\circ$, $m_{up} = 5.0$ [kg], $T_{set4} = 0.10$ [s] の条件を選び、数値シミュレーションを行った。そして、その中でも 2.5 秒間、6 歩数間歩いた結果について数値的に解析する。ランダムに生成される摩擦係数に関するシミュレーションなので、傾向だけ見る。ただし、ここで位相平面図は 2.5 秒間の結果ではなく、25 秒間の結果で、より幅広い区間で収束の可能性を検討する。図 4.5 は歩数による摩擦係数の変化であり、ここでは約 0.2 から 0.8 まで幅広く変化した。歩行解析で選ばれた物理・制御パラメータは表 4.1 に示されている。そして、その結果は図 4.6 から 4.12 まで表している。

表 4.1: 摩擦係数が一定でない路面上の物理・制御パラメータ

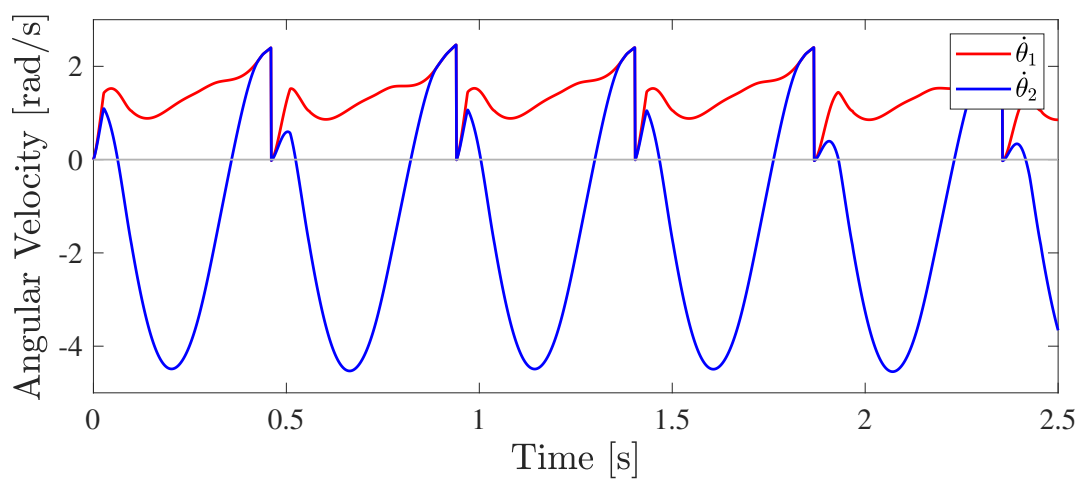
m_H	10	kg	K_D	400	s^{-2}
m	10	kg	K_P	100	s^{-1}
a	0.5	m	T_{set2}	0.43×0.65	s
b_0	0.5	m	c	100	-
g	9.81	m/s^2	m_{up}	5	kg
L	1.0	m	T_{set4}	0.10	s
θ_{31end}	0	deg	T_{set5}	0.33	s
T_{set1}	0.43	s			



(a) 両脚の長さ

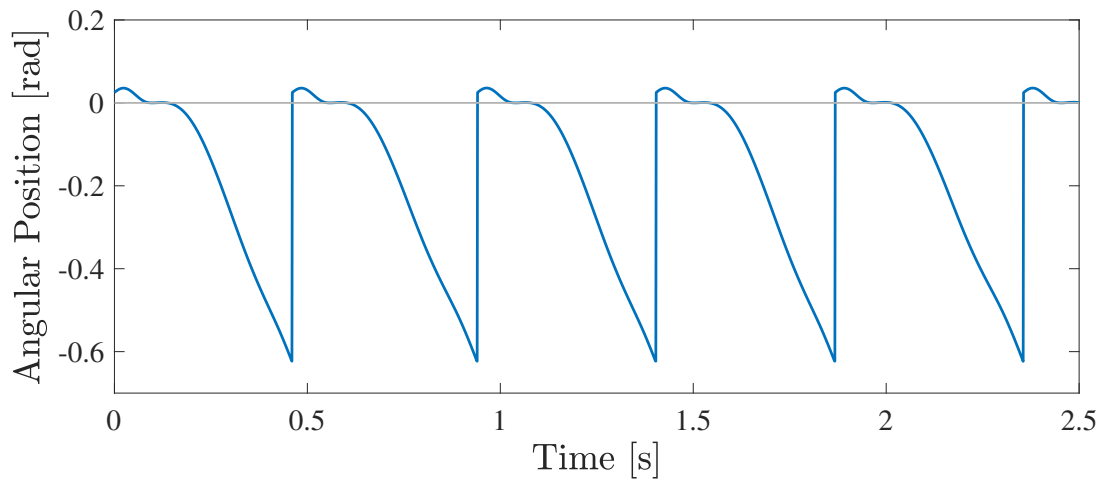


(b) 両脚の絶対角度

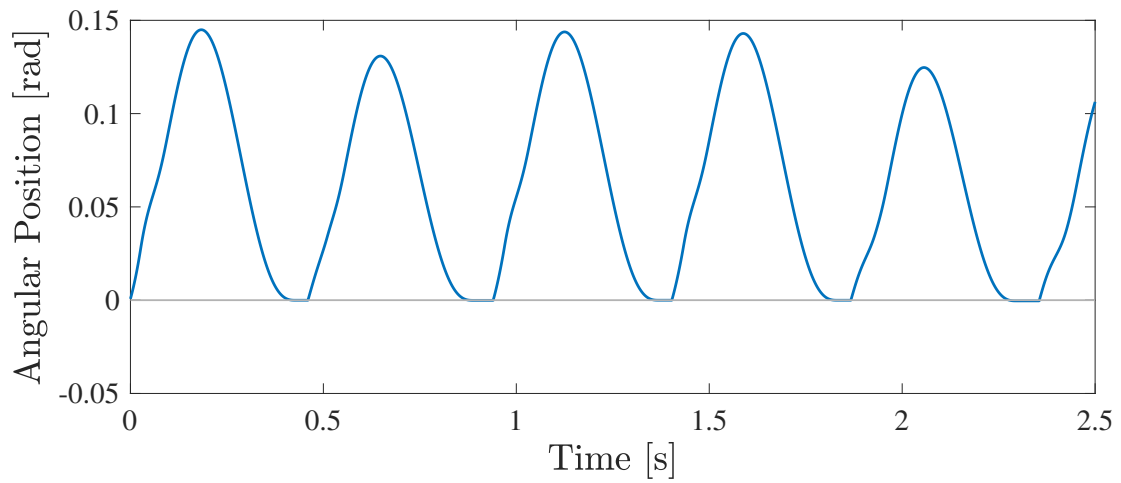


(c) 両脚の角速度

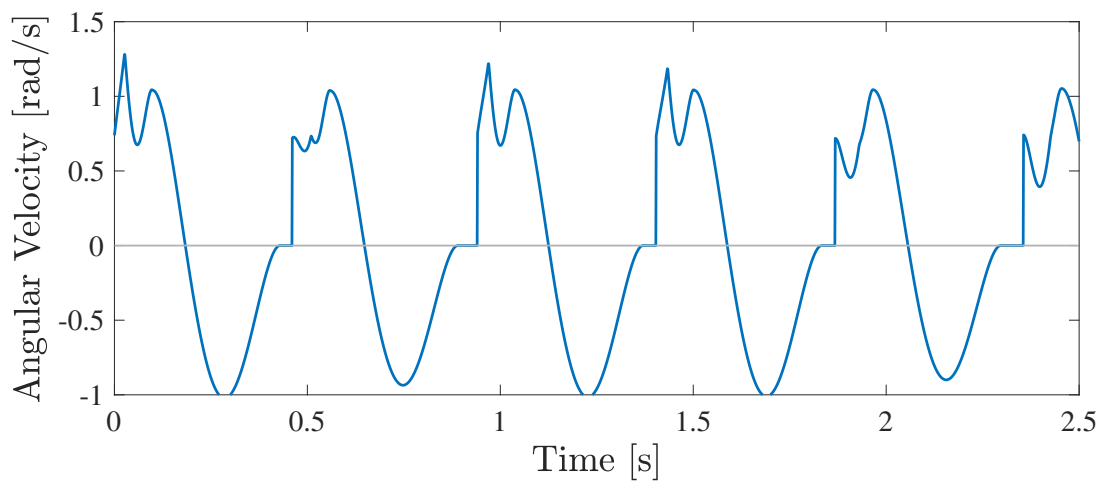
図 4.6: 摩擦係数が一定でない路面上の制御パラメータの時間に対する変化 (脚)



(a) $\theta_3 - \theta_1$

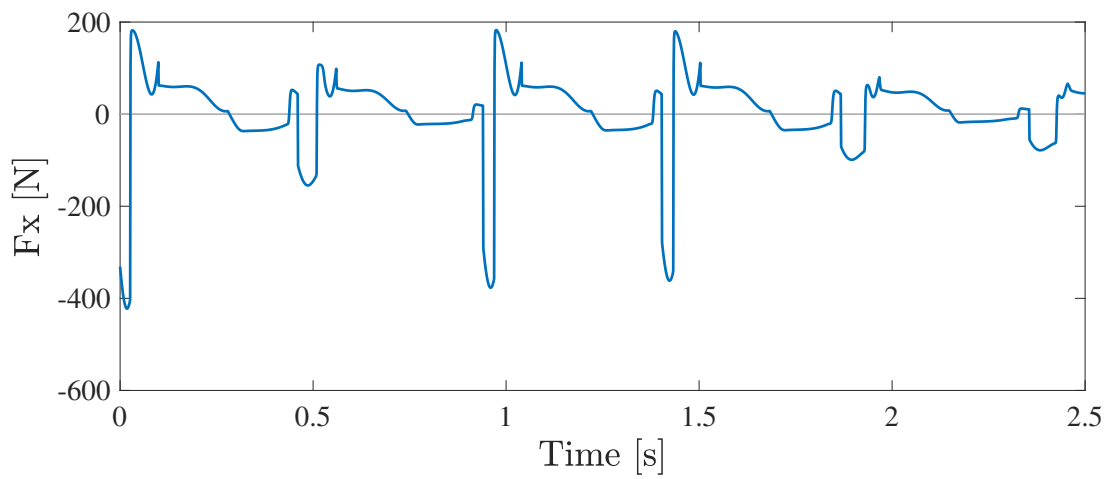


(b) 上体の絶対角度

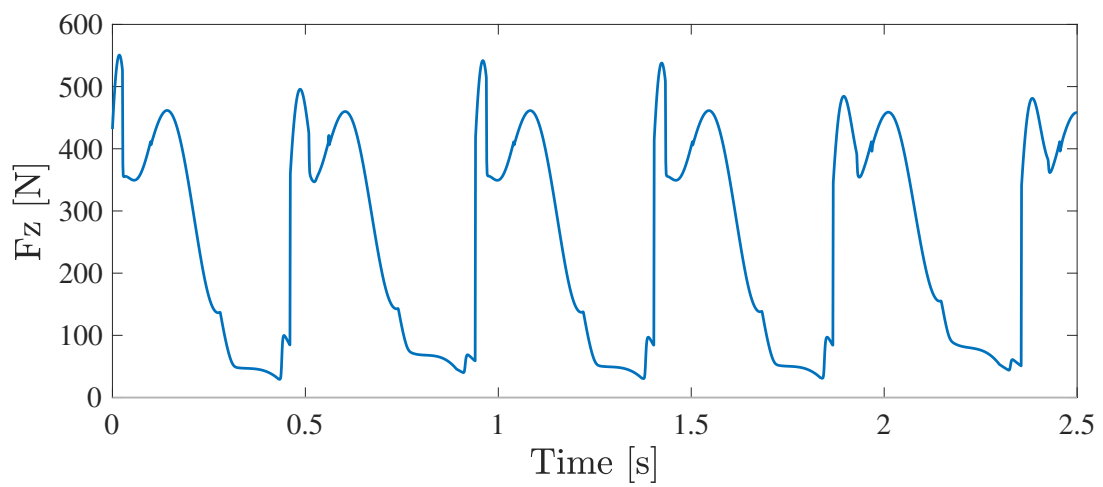


(c) 上体の角速度

図 4.7: 摩擦係数が一定でない路面上の制御パラメータの時間に対する変化 (上体)



(a) 水平床反力



(b) 鉛直床反力

図 4.8: 摩擦係数が一定でない路面上の床反力の時間に対する変化

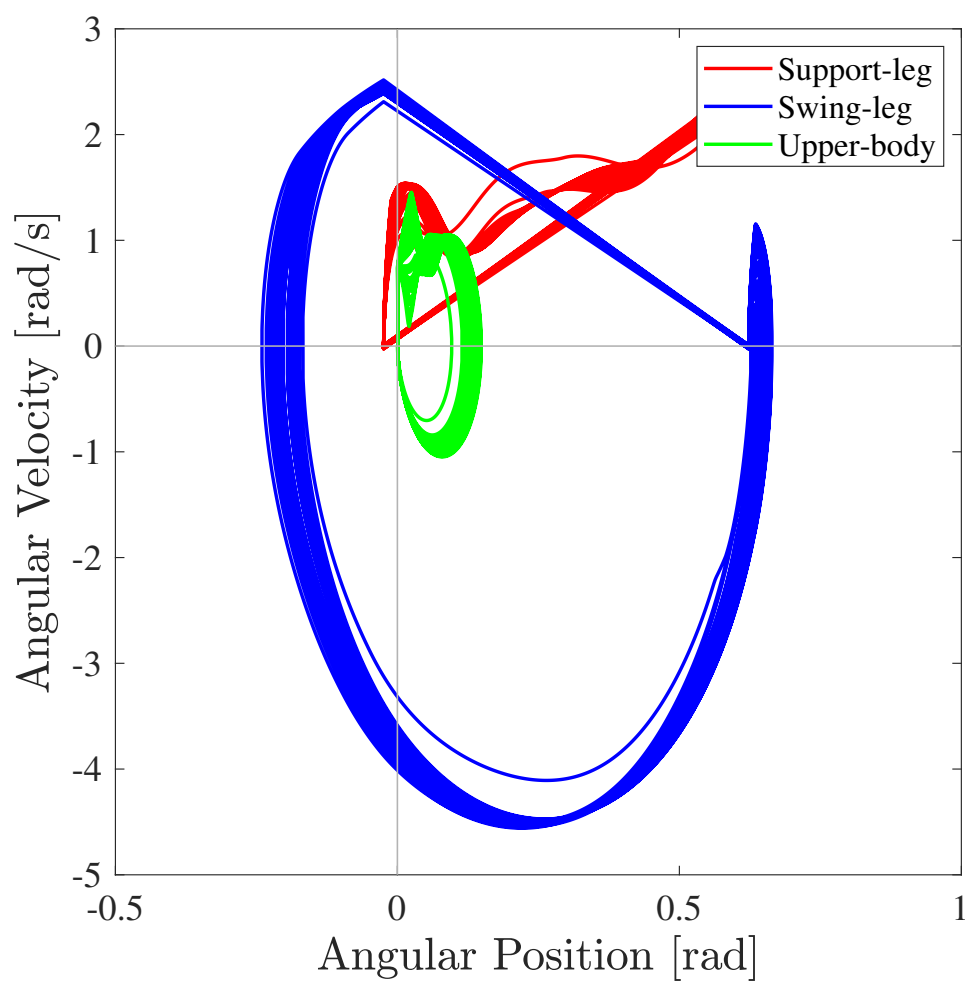


図 4.9: 摩擦係数が一定でない路面上の 25 秒間の位相平面図

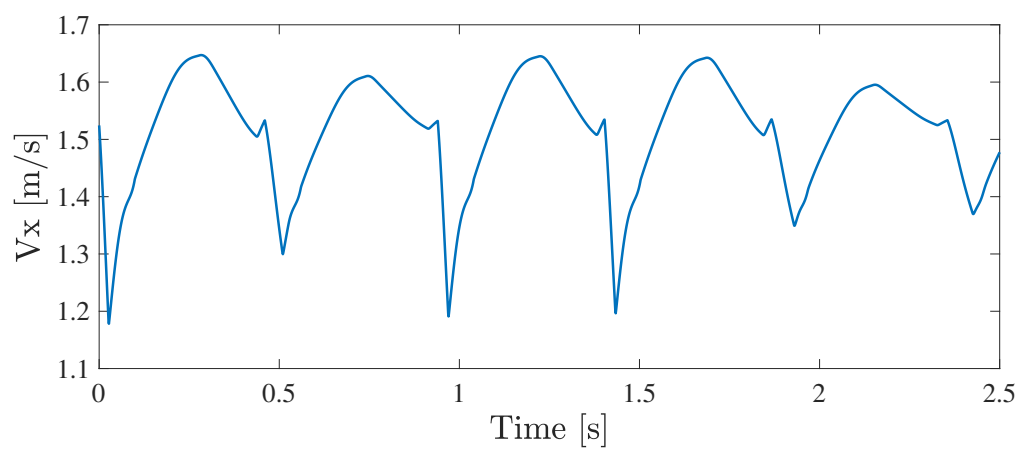


図 4.10: 摩擦係数が一定でない路面上の重心の水平方向速度

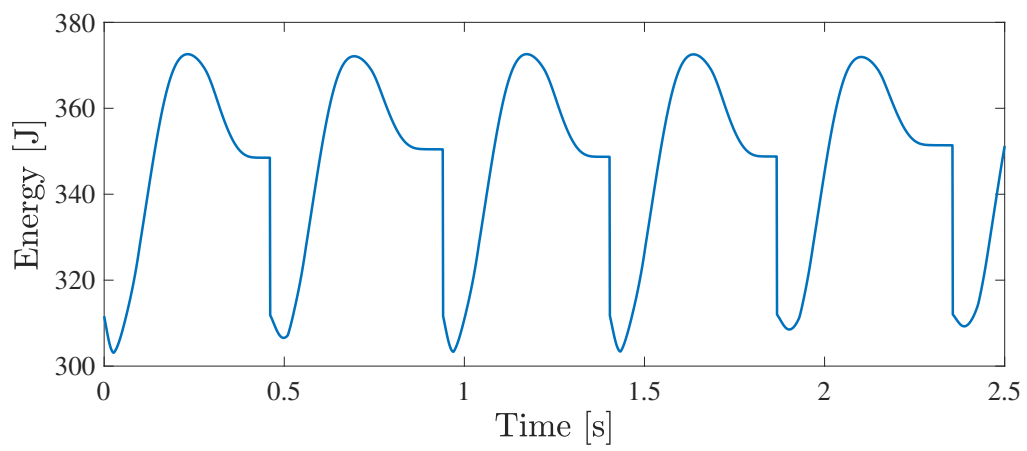


図 4.11: 摩擦係数が一定でない路面上のエネルギーの時間に対する変化

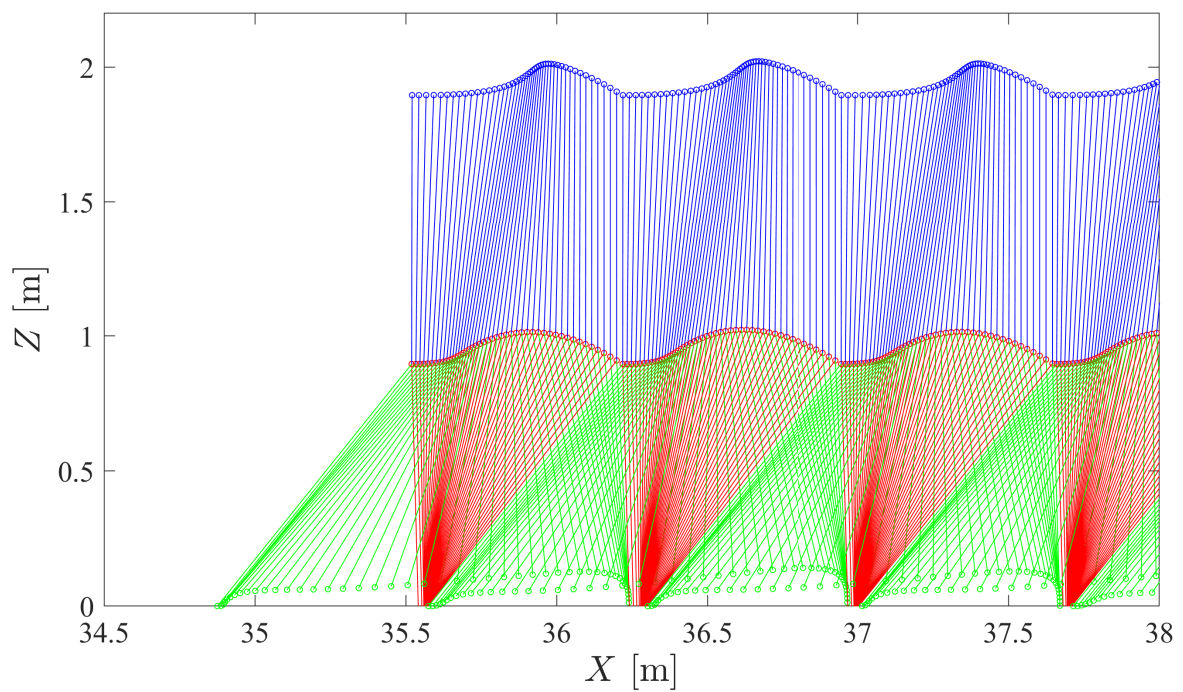


図 4.12: 上体を持つモデルの摩擦係数が一定でない路面上のスティック線図

図 4.6.(a) の両脚の長さ以外は一步ずつ様子が変わった．そして，図 4.9 の位相平面図を見ると，収束できずに歩いていることが確認できる．しかし，ある程度の範囲内で歩いた．また，図 4.10 を見ると，歩行速度が大幅に変化しなく，速くても約 1.65 [m/s]，遅くても約 1.2 [m/s] で脚のみモデルより遅く歩いた．しかし，摩擦係数によって違い，50 秒の歩行の中では，歩行速度が 1.15 [m/s] まで遅くなり，1.654 [m/s] まで速くなった．また，図 4.5 と図 4.8 と図 4.10 を見ると，摩擦係数が小さい場合は衝突直後に減速し歩行の前半に少しだけ加速した．しかし，摩擦係数が大きい場合は歩行の前半に大幅に加速した．

4.3 本章のまとめ

本章では，上体を持つ伸縮脚モデルの摩擦係数が一定でない路面上の安定歩容生成可能性を調査した．まずは，上体の制御パラメータによる安定歩容生成可能条件を調べた．摩擦係数が一定でない路面上の安定歩容生成可能性を調査したため，安定歩容生成可能条件を満たしていても，摩擦係数により安定歩容生成が不可能になることもあった．そして，その中で一つの条件を選び，歩行解析を行った．その結果，ランダムに摩擦係数が変わる状況なので，収束できずに歩いていたが，ある程度の範囲内で歩容生成ができることが確認できた．

第5章 結論

5.1 結論

本論文では、接地点の撓動特性を考慮し、伸縮脚を利用した衝突姿勢の前後非対称に基づく2脚ロボットの安定歩容生成の可能性を検討した。まず、2章では低摩擦路面上の安定歩容生成の可能性を調べた。そのために、数学モデルを構築し、数値シミュレーションを通じて安定歩容生成可能条件や歩行性能、歩行パターンを調査した。3章では、2章のモデルを発展させ、上体を追加し、減速することで高摩擦路面上の安定歩容生成を実現した。そして、数値シミュレーションを通じて高摩擦路面上の安定歩容生成可能条件を調べ、歩行解析を行った。4章では、3章のモデルを利用し、摩擦係数が一定でない路面を想定し、安定歩容生成の可能性を調査した。その結果、 $\mu_0 = 0.05$ から $\mu_0 = 1.0$ まで一歩ずつランダムに変化する状況では安定して歩けることが確認できた。

5.2 将来の課題

本論文では、上体を追加し、 $\theta_3 - \theta_1$ を制御することで、摩擦係数が一定でない路面上への安定歩容生成が可能になった。しかし、この制御法は衝突直後に支持脚が上体に引っ張られ、鉛直床反力の値が負の数になり、支持脚が路面から離れ、倒れる可能性がある問題点があった。そのため、この問題を解決できる制御法を開発することが将来の課題として残っている。また、本研究では、数値シミュレーションを通じて安定歩容生成可能性を検討したため、数学的な解析が未だにできてない。そして、将来にはこのモデルを数学的に解析する必要がある。また、本研究では、平らな硬い路面を想定したが、現実には、平らな硬い路面は珍しい。そして、路面の高さが変わり [15]、柔らかい路面上の研究 [16] を参考にし、当該モデルが柔らかく、高さが変わる路面上であれとも、安定歩容生成可能性があるのか確認することは将来の課題として残っている。また、より自然な動きを生成するために、人間の歩行で一周期 10 パーセント以上を占める両脚支持期を考慮する [17]。そして、衝突直後の両脚の鉛直床反力を両脚支持期を判断する指標として使った先行研究 [18] を参考にし、当該モデルの両脚支持期を実現することも将来の課題である。また、本研究では、摩擦係数が一定でない路面上でも摩擦係数の値を知っていることを前提としたが、現実的には、すべての摩擦係数を分かることは不可

能なので摩擦係数を知らない条件も将来には考慮する.

謝辞

研究を進めるに当たり熱心にご指導していただいた浅野文彦准教授に心より感謝申し上げます。また、副テーマでモノづくりの知識を教えていただいた Ho Anh-Van 准教授，同じロボティクスの分野から助言を賜りました池勇勲准教授，他分野ながら貴重なご意見をいただいた緒方和博教授，平石邦彦教授にも心より感謝申し上げます。研究生活や日々の生活においてご助力していただいた顔聡氏他浅野研究室の学生皆にも感謝致します。最後に，ここまで私を育てて下さった家族と支えてくれた友人に深く感謝します。

参考文献

- [1] F. Asano. “Generation of stealth walking gait on low-friction road surface,” 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 8464–8469 (2019)
- [2] F. Asano. “Stealth walking of 3-link planar underactuated biped,” 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 4118–4124 (2017)
- [3] Y. Or and M. Moravia. “Analysis of foot slippage effects on an actuated spring-mass model of dynamic legged locomotion,” International Journal of Advanced Robotic Systems, March 2016 (2016)
- [4] W. Ma, Y. Or and A. D. Ames. “Dynamic Walking on Slippery Surfaces : Demonstrating Stable Bipedal Gaits with Planned Ground Slippage*,” 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 3705–3711 (2019)
- [5] M. Nishihara, L. Li and F. Asano. “High-speed crawling-like locomotion robot using wobbling mass and reaction wheel,” Artificial Life and Robotics, pp. 624–632, vol. 25 (2020)
- [6] M. Brandão, K. Hashimoto, J. Santos-Victor and A. Takanishi. “Gait planning for biped locomotion on slippery terrain,” 2014 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, pp. 303–308 (2014)
- [7] M. Vukobratovi and J. Stepanenko. “On the stability of anthropomorphic systems,” Mathematical Biosciences, pp. 1–37, issues 1–2, vol. 15 (1972)
- [8] M. Khadiv, S. A. A. Moosavian, A. Herzog and L. Righeni. “Pattern generation for walking on slippery terrains,” 2017 5th RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM), pp. 120–125 (2017)
- [9] S. Kajita, K. Kaneko, K. Harada, F. Kanehiro, K. Fujiwara and H. Hirukawa. “Biped walking on a low friction floor,” 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 3546–3552, vol.4 (2004)

- [10] F. Asano. “High-speed dynamic gait generation for limit cycle walkers based on forward-tilting impact posture,” *Multibody System Dynamics* 30, pp. 287–310 (2013)
- [11] Y. Kuang and Y. Shen. “Painlevé paradox and dynamic self-locking during passive walking of bipedal robot,” *European Journal of Mechanics - A/Solids*, vol. 77 (2019)
- [12] Y. Shen and W.J. Stronge. “Painlevé paradox during oblique impact with friction,” *European Journal of Mechanics - A/Solids*, pp.457–467, issue 4, vol. 30 (2011)
- [13] J. Perry. “Gait analysis : Normal and pathological function,” SLACK Inc. (1992)
- [14] S. Collins, A. Ruina, R. Tedrake and M. Wisse. “Efficient bipedal robots based on passive-dynamic walkers,” *Science*, pp. 1082–1085, Issue 5712, vol. 307 (2005)
- [15] K. Hauser, T. Bretl, J.C. Latombe, K. Harada, B. Wilcox. “Motion planning for legged robots on varied terrain,” *The International Journal of Robotics Research*, pp. 1325–1349, Issue 11-12, vol. 27 (2008)
- [16] M. Komuta, Y. Abe and S. Katsura. “Walking control of bipedal robot on soft ground considering ground reaction force,” 2017 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), pp. 318–323 (2017)
- [17] M.W. Whittle. “Gait Analysis: an Introduction,” Butterworth-Heinemann (2001)
- [18] F. Asano and J. Kawamoto. “Modeling and analysis of passive viscoelastic-legged rimless wheel that generates measurable period of double-limb support,” *Multibody System Dynamics*, pp. 111–126, vol. 31 (2014)