

Title	鉛直床反力の制御に基づく2脚ロボットの高速ステルス歩容生成とその応用
Author(s)	, 潤雨
Citation	
Issue Date	2022-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/17649
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

鉛直床反力の制御に基づく2脚ロボットの高速ステルス歩容生成とその応用

2010229 LIU Runyu

主指導教員 浅野 文彦
審査委員主査 浅野 文彦
審査委員 平石 邦彦
白井 清昭
郷右近 英臣

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2月

概 要

本研究では、伸縮する上体リンクとフライホイールを有する劣駆動2脚ロボットの高速ステルス歩行運動の実現方法、およびその応用について議論する。リムレスホイール型の歩行モデルに関しては、既に超高速ステルス歩容生成が可能であることが示されている。本論文ではまず遊脚自由度を追加した2脚ロボットでも同様の歩容生成が可能であることを示す。そして、過酷な環境における高速ステルス歩容生成の基礎研究として、振動的な床面のモデルを導入し、出力追従制御に基づく床面を含めた拡大系の安定化を試みる。また、振動的な床面を媒体とした群集ダイナミクスの基礎研究として、ステルス歩行ロボットを駆動源とした受動歩行ロボットの同期・安定化についても議論する。

目次

第1章	緒言	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	鉛直床反力制御に基づく高速ステルス歩容生成	3
2.1	数学モデルの導出	3
2.1.1	運動方程式	3
2.1.2	制御系設計	5
2.2	上体の目標軌道の振幅 A_m の最適化	6
2.3	シミュレーション結果	9
第3章	低摩擦路面上の高速ステルス歩容生成	13
3.1	数学モデルの導出	13
3.1.1	運動方程式	13
3.1.2	制御系設計	13
3.2	初期状態の導出	15
3.3	シミュレーション結果	16
3.4	ロボットのエネルギー効率	20
第4章	振動的な低摩擦路面上の高速ステルス歩容生成	22
4.1	数学モデルの導出	22
4.1.1	運動方程式	22
4.1.2	制御系設計	24
4.2	シミュレーション結果	25
第5章	2脚ロボットを駆動源とした2台の歩行ロボットの同期制御	31
5.1	数学モデルの導出	31
5.1.1	運動方程式	31
5.1.2	衝突方程式	33
5.1.3	制御入力	34
5.2	シミュレーション結果	34
5.2.1	粘性係数の同期制御における影響	35

5.2.2	制御入力の同期制御における影響	39
第 6 章	鉛直方向の床反力の制御に基づく 2 台の歩行ロボットの同期制御	43
6.1	数学モデルの導出	43
6.1.1	運動方程式	43
6.1.2	衝突方程式	46
6.1.3	制御系設計	47
6.2	シミュレーション結果	49
第 7 章	結言	56
7.1	結論	56
7.2	今後の課題	56

目 次

2.1	伸縮上体とフライホイールを有する 2 脚ロボット	4
2.2	重心の X 座標	8
2.3	水平方向の床反力	8
2.4	滑らない路面上の支持脚と遊脚の角度の時間発展	10
2.5	滑らない路面上の上半身とフライホイールの角度の時間発展	10
2.6	滑らない路面上の上半身の長さの時間発展	11
2.7	滑らない路面での位相図	11
2.8	滑らない路面での床反力の時間発展	12
3.1	低摩擦路面上の伸縮上体とフライホイールを有する 2 脚ロボット	14
3.2	低摩擦路面上の初期角速度と歩行周期の関係	16
3.3	低摩擦路面上の支持脚と遊脚の角度の時間発展	17
3.4	低摩擦路面上の上半身とフライホイールの角度の時間発展	17
3.5	低摩擦路面上の上半身の長さの時間発展	18
3.6	低摩擦路面上の位相図	18
3.7	低摩擦路面上の重心の X 方向の変化	19
3.8	低摩擦路面上の床反力	19
3.9	低摩擦路面上のロボットのエネルギー効率と歩行周期の関係	21
4.1	振動的な低摩擦路面上の伸縮上体とフライホイールを有する 2 脚ロボット	23
4.2	振動的な低摩擦路面上の支持脚と遊脚の角度変化	26
4.3	振動的な低摩擦路面上の上半身とフライホイールの角度変化	27
4.4	振動的な低摩擦路面上の 20 秒後の $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ の位相図	27
4.5	振動的な低摩擦路面上の 20 秒後の θ_4 の位相図	28
4.6	振動的な低摩擦路面上のロボットの重心の変化	28
4.7	振動的な低摩擦路面上の床反力	29
4.8	振動的な低摩擦路面上の Z 座標の変化と粘性係数の関係	29
4.9	振動的な低摩擦路面上の Z 座標の位相図	30
4.10	振動的な低摩擦路面上の上半身の長さの変化と粘性係数の関係	30
5.1	受動的な振動斜面上の能動と受動的なコンパスロボット	32
5.2	振動的な下り斜面上の 2 台のコンパス型ロボットの歩行周期	36

5.3	振動的な下り斜面上の2台のコンパス型ロボットの歩行周期の差 . . .	36
5.4	振動的な下り斜面上の2台のコンパス型ロボットの歩幅	37
5.5	振動的な下り斜面上の2台のコンパス型ロボットの歩幅の差	37
5.6	振動的な下り斜面上のロボットの歩行周期の差と粘性係数の関係, $A_m=0.7$	38
5.7	振動的な下り斜面上のロボットの歩行周期の差と粘性係数の関係, $A_m=0.6$	38
5.8	振動的な下り斜面上の2台のコンパス型ロボットの同期範囲, $A_m=0.7$	40
5.9	振動的な下り斜面上の2台のコンパス型ロボットの同期範囲, $A_m=0.6$	41
5.10	振動的な下り斜面上の2台のコンパス型ロボットの同期範囲, $A_m=0.5$	41
5.11	振動的な下り斜面上の2台のコンパス型ロボットの同期範囲, $A_m=0.4$	42
6.1	受動的な振動斜面上の伸縮上体とフライホイールを有する2脚ロボッ トと受動的なコンパスロボット	44
6.2	振動的な下り斜面上のロボット1とロボット2の歩行周期	50
6.3	振動的な下り斜面上のロボット1とロボット2の歩行周期の差	51
6.4	振動的な下り斜面上のロボット1とロボット2の歩幅	51
6.5	振動的な下り斜面上のロボット1とロボット2の歩幅の差	52
6.6	振動的な下り斜面上のロボット1のZ方向の床反力	52
6.7	振動的な下り斜面上のロボット1のZ方向の重心位置	53
6.8	振動的な下り斜面上のロボット1とロボット2の歩行周期, $A = 0.1$	53
6.9	振動的な下り斜面上のロボット1とロボット2の歩行周期, $A = 0.5$	54
6.10	振動的な下り斜面上のロボット1とロボット2の歩行周期, $A = 1.0$	54
6.11	振動的な下り斜面上のロボット1とロボット2の同期範囲	55

表 目 次

2.1	7自由度伸縮関節をもつ上半身とフライホイールを有するロボットの物理パラメータ	7
4.1	7自由度伸縮関節をもつ上半身とフライホイールを有するロボットと振動地面の物理パラメータ	25
5.1	4自由度コンパス型ロボットと振動斜面の物理パラメータ	35
6.1	7自由度伸縮関節をもつ上半身とフライホイールを有するロボットと4自由度コンパス型ロボット及および振動斜面の物理パラメータ	49

第1章 緒言

1.1 研究背景

近年、ロボティクス領域において、不整地や悪路面に対する適応性を高める歩行ロボットの開発に関する研究が多く行われている。従来の2足ロボットと比べて、コンパス型ロボットは歩行の安定性と効率が高いと指摘された [1]。このような劣駆動2脚ロボットは簡単な入力によって安定性が高いリミットサイクル歩行が実現できる一方、初期状態に依存され、任意瞬間の歩行の停止および歩行周期のコントロールが困難となる。そして、シンプルな制御により悪路面に対する適応力が低いと指摘される [2,3]。これに対して、ステルス歩行という新たな歩行方式が提案された。通常の歩行は、ロボットの遊脚と地面との衝突により、衝突前後の運動状態が不連続になれ、これは不安定につながる原因である [4,5]。しかし、ステルス歩行は遊脚と地面が衝突する際に、遊脚先端位置の鉛直方向の速度をゼロに制御するにより、衝突を回避することが可能になる [6-10]。これによって、ロボットの安定性が高まり、運動の停止も容易になる。そして、地面との衝撃を回避することによって、がれきなど不安定な足場での乗り越えも可能になる。また、振動路面と低摩擦路面に対して、床反力と角運動量の制御を通して安定な歩行が実現できるということを示した [11,12]。さらに、角運動量に基づくロボットの運動生成に関して、厳密な軌道追従が不可欠であり、上半身にフライホイールを追加によって容易に実現できる [13,14]。これらを踏まえて、本研究では悪環境への適応性を高めるために、鉛直方向の床反力の制御により、低摩擦路面または振動的な低摩擦路面上の高速ステルス歩行の実現と解析を取り組む。そして、逆に、床反力の制御を通して地面の振動における制御も可能になる。通常のロボットは振動的な路面上で歩行をするとき、歩容は地面の振動に大きく影響されることが分かる。例えば、歩行橋のような場所が路面の振動により、群体の歩行周期の同期現象を引き起こし、橋の揺れるおよび崩すことが発生することが指摘された [15-17]。ステルス歩行は歩行周期を一定に維持する歩行によって、地面の床反力の制御によって、他の受動および簡単な制御を持つロボットの歩行周期を自分と同期させることも実現できると考える。それを利用して、橋の上同期現象が発生するときステルス歩行と床反力の制御を通して、同期運動の周波数を橋の固有周波数と違う周波数に制御させて、橋の崩壊を防止も本モデルの一つの応用となる。そこで、本研究について、ステルスという意識している慎重な歩行を通して、振動的な路面上の群ロボットの同期制御の方法も探索する。

1.2 研究目的

本研究では, [18] に扱った伸縮関節をもつ上半身とフライホイールを有するリムレスホイールを2脚ロボットに拡張して, 一般路面と低摩擦路面および振動的な路面上の高速ステルス歩行の実現を目標とする. まず, 鉛直方向の床反力を正に制御するにより, ロボットの飛び出すことを避ける. そして, 水平方向の床反力を常にゼロに維持し続けるような制御則を適用することで, 低摩擦路面に対する適応性を高める. また, 振動的な路面に対する適応性を探索する. さらに, このモデルを駆動源用として, 振動路面上の受動的な群ロボットの同期制御に向けて, 基礎研究を行う.

1.3 本論文の構成

本論文は, 本章を含む全7章に構成される. 第2章では, 伸縮関節をもつ上半身とフライホイールを有する2脚ロボットというモデルを用いて, 鉛直方向の床反力の制御により, 一般路面上の高速ステルス歩容の生成と水平方向の床反力の最小化する方法について紹介する. 第3章では, 水平方向の床反力制御を追加して, 低摩擦路面上の高速ステルス歩行の生成とゼロダイナミクス安定化およびエネルギー効率について述べる. 第4章では, 第3章を踏まえて振動的な路面上拡張して, ロボットと路面の全体の数学モデルを構築し, 高速ステルス歩行の歩容について議論する. 第5章は振動的な斜面上で, 1台の簡単な入力を持つコンパス型ロボットを駆動源として, もう1台の同一のコンパス型ロボットとの同期制御を目標として, 数学モデルとシミュレーションを通して解析を行う. 第6章は第5章の基礎に沿って, 第2章のロボットを駆動源として扱い, 鉛直方向の床反力の制御によってもう1台のコンパス型ロボットとの同期制御を行う. 第7章では, 本研究の内容をまとめるとともに, 未解決の問題と将来の課題について述べる.

第2章 鉛直床反力制御に基づく高速 ステルス歩容生成

本章では伸縮上体とフライホイールをもつ2脚ロボットの歩容生成を紹介する、当該モデルは7自由度のモデルであり摩擦係数の大きな滑らない路面上で高速ステルス歩行を行う。まず、本章で用いるロボットの概要を説明する。そして、ロボットの数学モデルの導出と制御系の設計手法について述べる。また、ゼロダイナミクスを安定化させる初期状態の導出アルゴリズムを紹介する。さらに、水平歩行の床反力の最小化する手法について議論を行う。最後、ロボットの歩容を解析する。

2.1 数学モデルの導出

図2.1に本章で扱う伸縮上体とフライホイールを有する2脚ロボットのモデルが示されている。ロボットは3リンクの脚ロボット。上半身は伸縮関節とフライホイールで構築されており、支持脚は地面と1点で接続しなみ離れないと仮定する。 x と z は支持脚が地面と接続する位置であり、 θ_1 と θ_2 [rad]は支持脚と遊脚の垂直方向からの角度であり、 θ_3 [rad]は上半身の垂直方向からの角度であり、 θ_4 [rad]はフライホイールの水平方向からの角度であり、 L_3 [m]を上半身の重心からロボットの腰ばでの長さである。支持脚と遊脚の質量を m_1 と m_2 [kg]、フライホイールと上半身の合計質量を m_3 [kg]、フライホイールの慣性モーメントを I [kg·m²]とする。そして、支持脚と遊脚の長さは L_1 と L_2 [m]である。支持脚と上半身の間に制御トルク u_1 [N·m]、遊脚と上半身の間に制御トルク u_2 [N·m]、上半身とフライホイールの間に制御トルク u_3 [N·m]、上半身の伸縮関節に u_4 [N·m]をそれぞれ印加する。

2.1.1 運動方程式

一般化座標ベクトルを $\mathbf{q} = [x \ z \ \theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ \theta_4 \ L_3]^T$ とすると、ロボットの運動方程式は次のようになる。

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

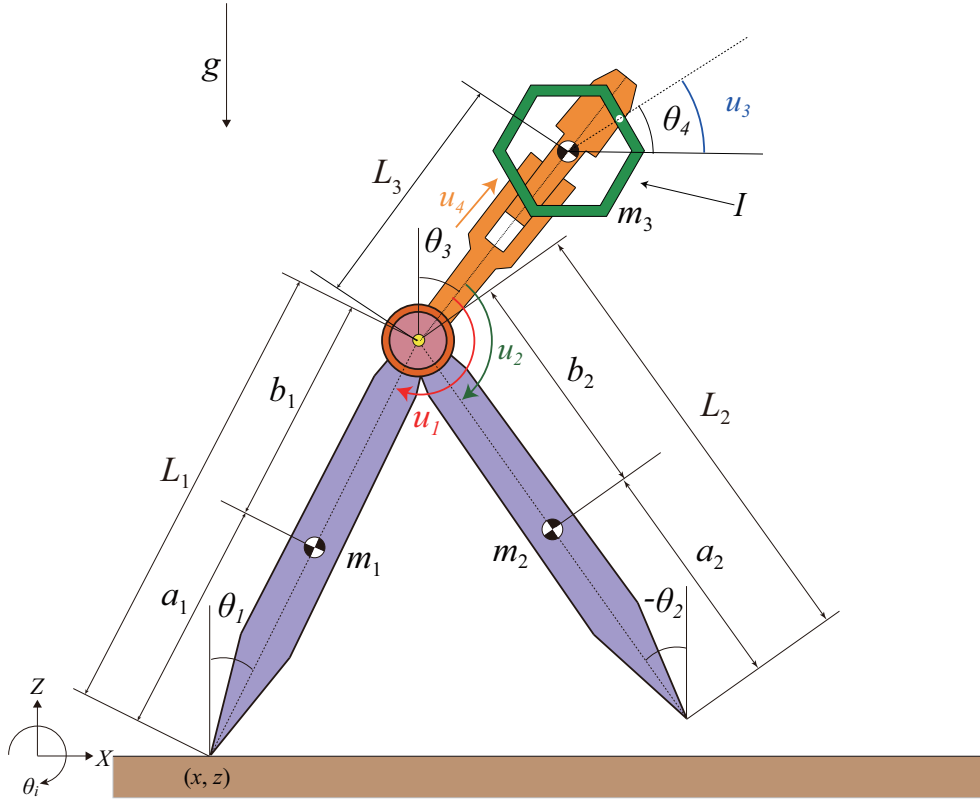


図 2.1: 伸縮上体とフライホイールを有する 2 脚ロボット

$$\mathbf{J}\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{0}_{2 \times 1} \quad (2.2)$$

ここで、 \mathbf{M} は慣性力項、 \mathbf{h} は中心力・コリオリ力と重力項であり、 $\mathbf{J}^T \boldsymbol{\lambda}$ は拘束力項、 $\mathbf{S}\mathbf{u}$ は制御入力項である。また、

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

は駆動ベクトルである。本章で扱うモデルは平面上で滑らないと仮定するために、支持脚と地面の接続点の速度の拘束条件以下の通りである。

$$\dot{x} = 0, \dot{z} = 0 \quad (2.4)$$

これによりヤコビアン \mathbf{J} は次のようになる。

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

式(2.1)と(2.2)により、床反力ベクトル λ が

$$\lambda = -\mathbf{X}^{-1}\mathbf{J}\mathbf{M}^{-1}(\mathbf{S}\mathbf{u} - \mathbf{h}) \quad (2.6)$$

と求まる。ただし、

$$\mathbf{X} = \mathbf{J}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{J}^T \quad (2.7)$$

である。式(2.6)を式(2.1)に代入して整理すると次の式を得る。

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{Y}(\mathbf{S}\mathbf{u} - \mathbf{h}) \quad (2.8)$$

ここで、 $\mathbf{Y} = \mathbf{I}_7 - \mathbf{J}^T\mathbf{X}^{-1}\mathbf{J}\mathbf{M}^{-1}$ である。

2.1.2 制御系設計

ロボットの重心の X 座標と Z 座標を

$$X_{\text{com}} = \sum_{i=1}^3 \frac{m_i X_i}{m}, \quad Z_{\text{com}} = \sum_{i=1}^3 \frac{m_i Z_i}{m} \quad (2.9)$$

と定義する。ここで、 X_i と Z_i は質点 m_i の X と Z 座標で、 $m (= m_1 + m_2 + m_3)$ はロボット全体の質量である。

支持脚の角度 θ_1 と股間角度 θ_H および上半身の角度 θ_3 を制御出力とする。ここで、

$$\theta_1 = \mathbf{C}_1 \mathbf{q} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{q} \quad (2.10)$$

$$\theta_H = \mathbf{C}_2 \mathbf{q} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{q} \quad (2.11)$$

$$\theta_3 = \mathbf{C}_3 \mathbf{q} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{q} \quad (2.12)$$

である。遊脚の先端位置は θ_1 と θ_H によって幾何学的に求められるため、 θ_1 と θ_H の時間軌道を次の境界条件を満たす目標時間軌道に設定すれば、ステルス歩行が達成できる。

$$\theta_1(0) = -\alpha, \quad \theta_1(T_{\text{set}}) = \alpha, \quad \theta_H(0) = -2\alpha, \quad \theta_H(T_{\text{set}}) = 2\alpha$$

$$\dot{\theta}_1(0) = 0, \quad \dot{\theta}_1(T_{\text{set}}) = 0, \quad \dot{\theta}_H(0) = 0, \quad \dot{\theta}_H(T_{\text{set}}) = 0$$

$$\ddot{\theta}_1(0) = 0, \quad \ddot{\theta}_1(T_{\text{set}}) = 0, \quad \ddot{\theta}_H(0) = 0, \quad \ddot{\theta}_H(T_{\text{set}}) = 0$$

上記の境界条件を満たす θ_1 と θ_H の目標時間軌道を

$$\theta_{1d}(t) = -\alpha \cos\left(\frac{\pi t}{T_{\text{set}}}\right) \quad (2.13)$$

$$\theta_{2d}(t) = 4\alpha \left(\frac{6t^5}{T_{\text{set}}^5} - \frac{15t^4}{T_{\text{set}}^4} + \frac{10t^3}{T_{\text{set}}^3} \right) - 2\alpha \quad (2.14)$$

とする。これによって、ステルス歩行条件を満足する。上半身は Z 歩行の床反力を制御するため、 θ_3 の目標時間軌道を

$$\theta_{3d}(t) = A_m \sin\left(\frac{2\pi t}{T_{\text{set}}}\right) \quad (2.15)$$

とする。ロボットが高速で歩行するとき、地面から飛び出すことを回避するため、垂直方向の床反力 F_z を正に制御する必要がある。こちらは

$$m\ddot{Z}_{\text{com}} = F_z - mg \equiv 0 \quad (2.16)$$

を条件として簡単に制御目標を設計する。式 (2.16) の条件は

$$\ddot{Z}_{\text{com}} = \mathbf{J}_{Z\text{com}}\ddot{\mathbf{q}} + \dot{\mathbf{J}}_{Z\text{com}}\dot{\mathbf{q}} \equiv 0 \quad (2.17)$$

と記述する。式 (2.13), (2.14), (2.15) と (2.17) の条件は

$$\Phi\ddot{\mathbf{q}} = \Gamma \quad (2.18)$$

とまとまる。ただし、

$$\Phi = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_1 \\ \mathbf{C}_2 \\ \mathbf{C}_3 \\ \mathbf{J}_{Z\text{com}} \end{bmatrix}, \Gamma = \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_{1d}(t) \\ \ddot{\theta}_{2d}(t) \\ \ddot{\theta}_{3d}(t) \\ -\dot{\mathbf{J}}_{Z\text{com}}\dot{\mathbf{q}} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

である。式 (2.8) と (2.18) より、制御入力

$$\mathbf{u} = (\Phi\mathbf{M}^{-1}\mathbf{Y}\mathbf{S})^{-1}(\Phi\mathbf{M}^{-1}\mathbf{Y}\mathbf{h} + \Gamma) \quad (2.20)$$

と求まる。

2.2 上体の目標軌道の振幅 A_m の最適化

最も滑りステルス歩行を実現するため、評価関数

$$J = \int_0^{T_{\text{set}}} |F_x| dt \quad (2.21)$$

を最小化する上体目標軌道の振幅 A_m をアルゴリズム 1 によって求まる。

$$\mathbf{q}(0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\alpha & \alpha & 0 & 0 & L_3(0) \end{bmatrix}^T \quad (2.22)$$

$$\dot{\mathbf{q}}(0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2\pi A_m}{T_{\text{set}}} & \dot{\theta}_4(0) & 0 \end{bmatrix}^T \quad (2.23)$$

ロボットの物理と制御パラメータを表 2.1 に示す。式 (2.22)(2.23) の初期状態を利用して、アルゴリズム 1 によって、 $A_m = 0.19$ [rad] が最適値として求まった。図 2.2 と図 2.3 に 5 個の A_m を用いて X_{com} と F_x のシミュレーション結果を示す。 A_m が大きくなるほど X_{com} の軌道は直線的になっている。

表 2.1: 7自由度伸縮関節をもつ上半身とフライホイールを有するロボットの物理パラメータ

$m_1 = m_2$	1	kg	$L_1 = L_2$	1	m
m_3	1	kg	$L_3(0)$	0.7	m
$a_1 = a_2$	0.5	m	α	0.2	rad
$b_1 = b_2$	0.5	m	T_{set}	0.25	s

Algorithm 1 Calculate optimal A_m

Require: The optimal amplitude A_m of the input of upper body

Input: Initial state $\mathbf{q}(0)$, $\dot{\mathbf{q}}(0)$ and T_{set}

Output: A_m

- 1: **Initialization** $A_m = 0$, $i = 1$ and e to a positive value
 - 2: **while** $e > 0$ **do**
 - 3: Run the numerical simulation for one step, and save the J calculated.
 - 4: $J_i = J$
 - 5: $e = J_{i-1} - J_i$
 - 6: $A_m = A_m + 0.01$
 - 7: $i = i + 1$
 - 8: **end while**
 - 9: **Return** A_m
-

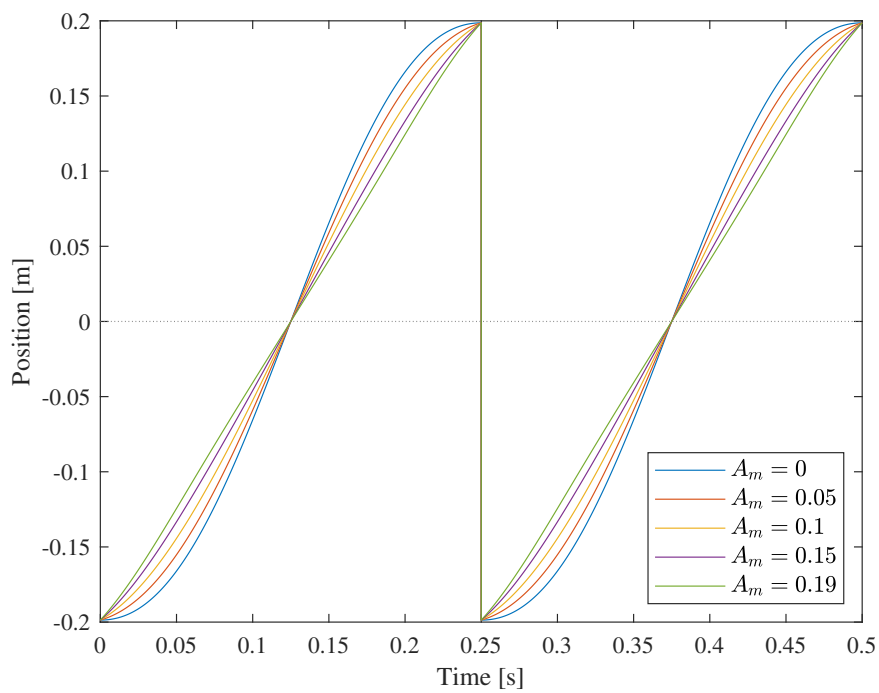


図 2.2: 重心の X 座標

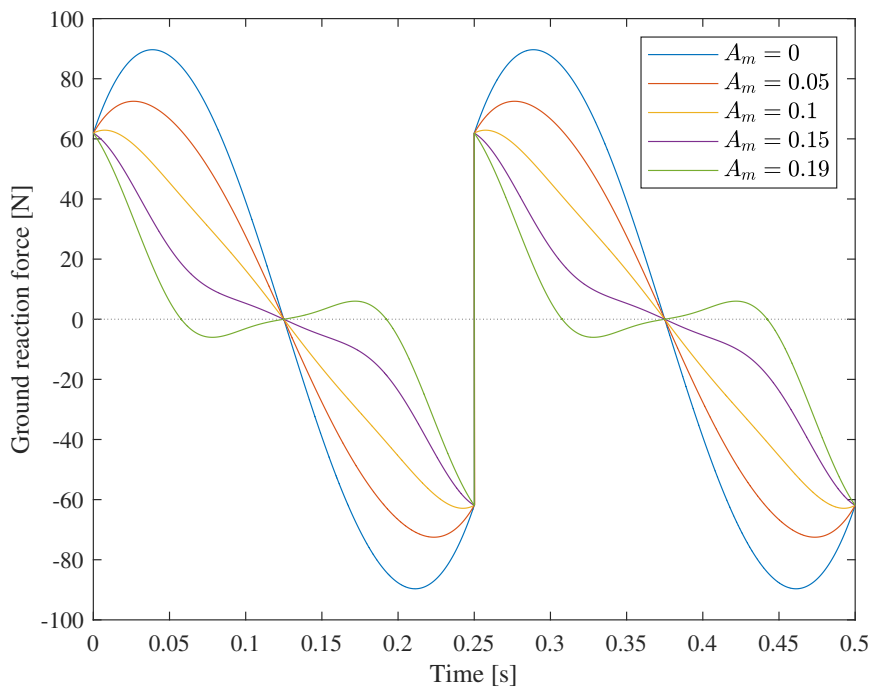


図 2.3: 水平方向の床反力

2.3 シミュレーション結果

アルゴリズムにより求めた最適な $A_m = 0.19$ [rad], アルゴリズム 2 に示す二分探索法により求めたフライホイールの初期角速度 $\dot{\theta}_4(0) = -1.100628869742558$ [rad/s] を用いて, 数値シミュレーションを行った. 数値シミュレーションにて使用した物理パラメータを表 2.1 に示す.

図 2.4 ~ 図 2.8 が数値シミュレーション結果を表示する. 図 2.4 によに, ロボットの支持脚と遊脚の角速度は着地するときゼロになって, 地面との衝突がないことが分かる. 図 2.5 はゼロダイナミクスとなるフライホイールを適切な初期状態を設定するにより安定化されたことを示した. 図 2.7 は図 2.4 と図 2.5 の歩容の位相平面図である. 図 2.8 によって, Z 方向の床反力は常にゼロに維持している. しかし, 一歩の中床反力により計算した最大の滑り摩擦係数は 2.1035 で, かなり大きいと考える. これによって, 環境への適応性を考慮して低摩擦路面の高速ステルス歩行の方法を考える. 次章はこれについて述べる.

Algorithm 2 Calculate target $\dot{\theta}_4(0)$

Require: The target initial angular velocity

Input: Initial state $\mathbf{q}(0)$, $\dot{\mathbf{q}}(0)$ and T_{set}

Output: $\dot{\theta}_4(0)$

- 1: **Initialization** $\dot{\theta}_{4 \text{ max}}(0)$ and $\dot{\theta}_{4 \text{ min}}(0)$ to values larger and smaller than the initial value of $\dot{\theta}_4(0)$ and e to a positive value
 - 2: **while** $e > 0$ **do**
 - 3: Run the numerical simulation for one step, and save the $\dot{\theta}_4(T_{\text{set}})$ calculated.
 - 4: **if** $\dot{\theta}_4(T_{\text{set}}) < 0$ **then**
 - 5: $\dot{\theta}_{4 \text{ min}}(0) = \frac{\dot{\theta}_{4 \text{ max}}(0) + \dot{\theta}_{4 \text{ min}}(0)}{2}$
 - 6: **else**
 - 7: $\dot{\theta}_{4 \text{ max}}(0) = \frac{\dot{\theta}_{4 \text{ max}}(0) + \dot{\theta}_{4 \text{ min}}(0)}{2}$
 - 8: **end**
 - 9: $e = |\dot{\theta}_4(0) - \frac{\dot{\theta}_{4 \text{ max}}(0) + \dot{\theta}_{4 \text{ min}}(0)}{2}|$
 - 10: $\dot{\theta}_4(0) = \frac{\dot{\theta}_{4 \text{ max}}(0) + \dot{\theta}_{4 \text{ min}}(0)}{2}$
 - 11: **end while**
 - 12: **Return** $\dot{\theta}_4(0)$
-

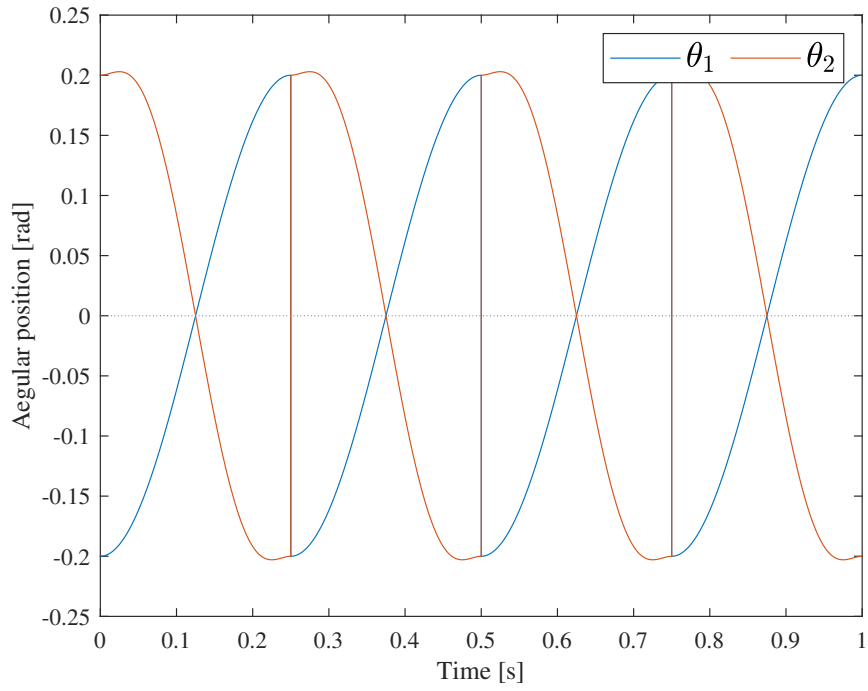


図 2.4: 滑らない路面上の支持脚と遊脚の角度の時間発展

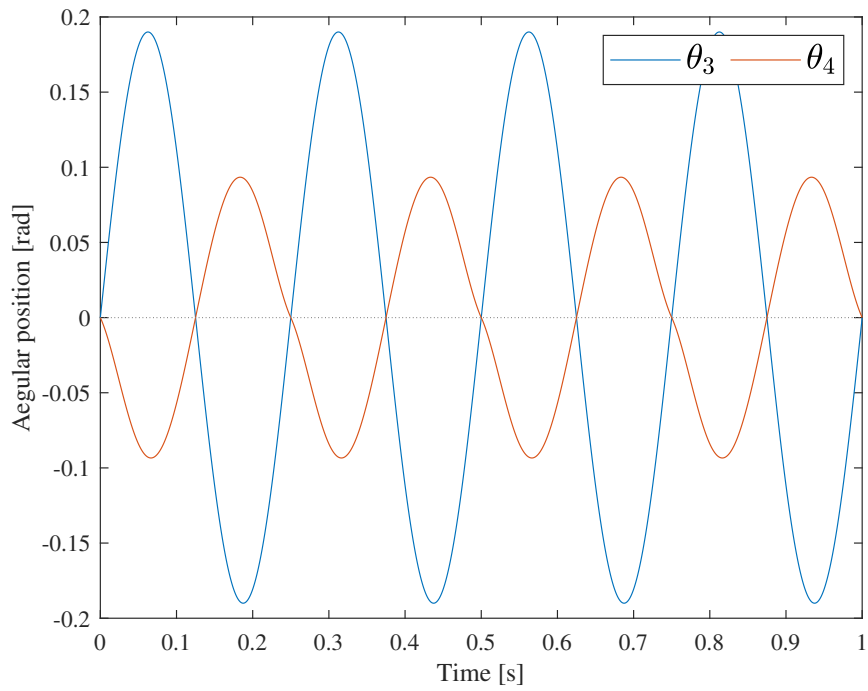


図 2.5: 滑らない路面上の上半身とフライホイールの角度の時間発展

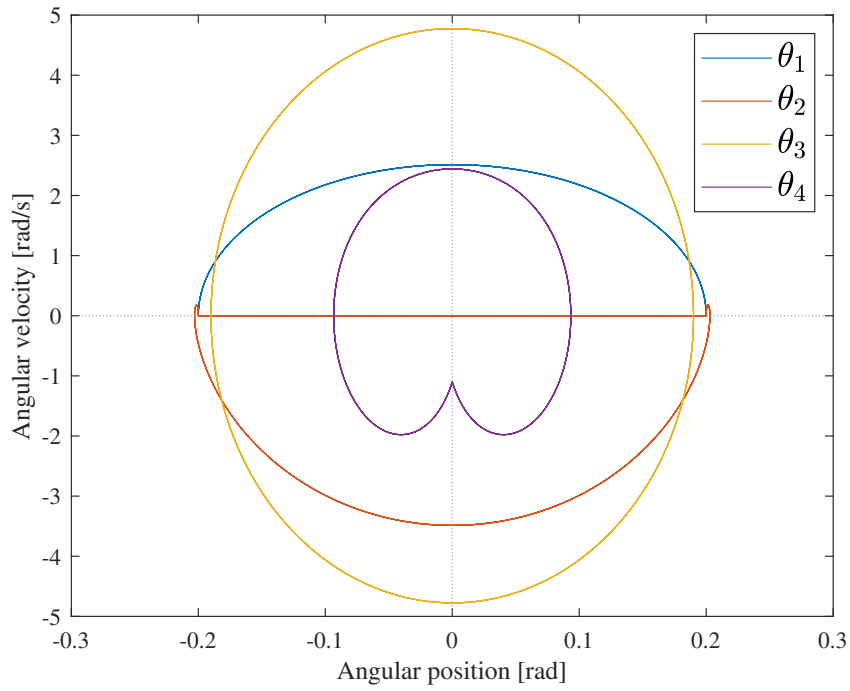


図 2.6: 滑らない路面上の上半身の長さの時間発展

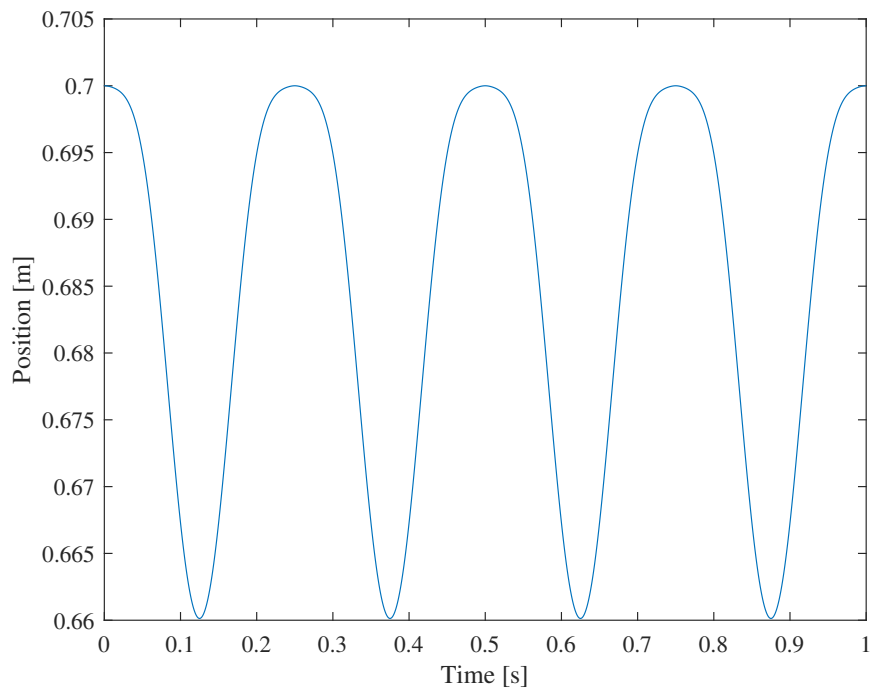


図 2.7: 滑らない路面での位相図

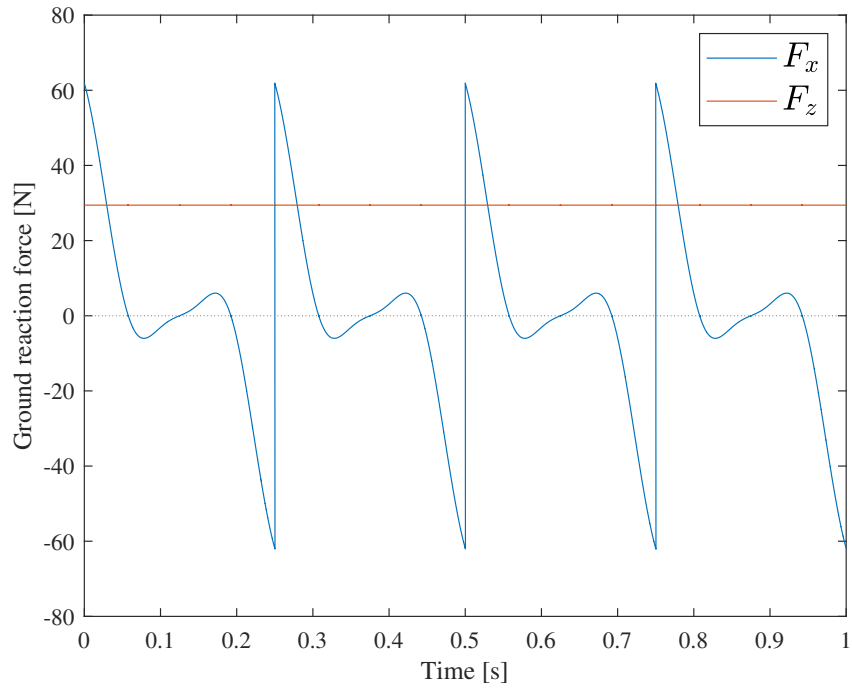


図 2.8: 滑らない路面での床反力の時間発展

第3章 低摩擦路面上の高速ステルス歩容生成

前章では伸縮上体とフライホイールをもつ2脚ロボットにより、摩擦係数の大きな滑らない路面上で高速ステルス歩容を生成した。しかし、上半身の入力を最適化しても、水平歩行の床反力はかなり大きいので、ステルス歩行の利点である路面環境への適応性を十分に発揮できていないと考える。

本章では前章が紹介した7自由度のモデルを利用して低摩擦路面上で高速ステルス歩行を行う。まず、ロボットの数学モデルの導出と制御系の設計手法について述べる。そして、ゼロダイナミクスを安定化させる初期状態の導出アルゴリズムを紹介する。また、ロボットの歩容とエネルギー効率を解析する。

3.1 数学モデルの導出

図3.1に本章で扱うモデルが示されている。ロボットは前章と同じ構造となる、前章と区別するのは歩行の路面は滑りなしの高摩擦路面から摩擦なしの低摩擦路面に変化した。本章はロボットの支持脚が地面と接続したまま離れないと仮定し、水平歩行の床反力がゼロになると滑りなしと判定する。

3.1.1 運動方程式

本章の運動方程式と拘束条件の詳細は2.1.1節に示したものと同一であって、そちらを参照されたい。

3.1.2 制御系設計

ロボットの重心の X 座標と Z 座標を X_{com} と Z_{com} にする。詳細については式(2.9)を参照されたい。

支持脚の角度 θ_1 と股間角度 θ_H を制御出力とする。ここで、

$$\theta_1 = \mathbf{C}_1 \mathbf{q} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{q} \quad (3.1)$$

$$\theta_H = \mathbf{C}_2 \mathbf{q} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{q} \quad (3.2)$$

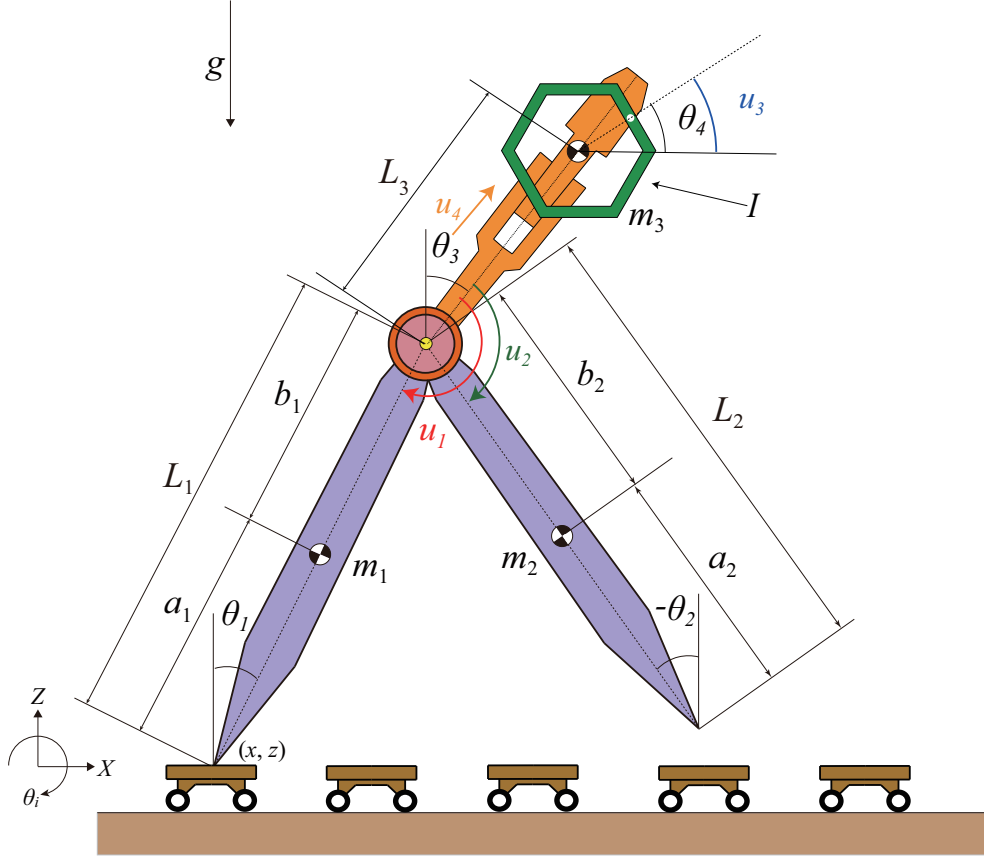


図 3.1: 低摩擦路面上の伸縮上体とフライホイールを有する 2 脚ロボット

である．ステルス歩行を達成するため， θ_1 と θ_H の目標時間軌道を

$$\theta_{1d}(t) = -\alpha \cos\left(\frac{\pi t}{T_{\text{set}}}\right) \quad (3.3)$$

$$\theta_{2d}(t) = 4\alpha \left(\frac{6t^5}{T_{\text{set}}^5} - \frac{15t^4}{T_{\text{set}}^4} + \frac{10t^3}{T_{\text{set}}^3} \right) - 2\alpha \quad (3.4)$$

とする．そして，運動中の浮上を回避するため，垂直方向の床反力 F_z を正に制御する必要がある．これは

$$m\ddot{Z}_{\text{com}} = F_z - mg \equiv 0 \quad (3.5)$$

を条件として簡単で制御目標を設計する．式 (3.6) の条件を

$$\ddot{Z}_{\text{com}} = \mathbf{J}_{Z\text{com}}\ddot{\mathbf{q}} + \dot{\mathbf{J}}_{Z\text{com}}\dot{\mathbf{q}} \equiv 0 \quad (3.6)$$

と記述する．また，以下の条件を満たせば角運動量をゼロに制御できる [11]．

$$m\ddot{X}_{\text{com}} \equiv 0 \quad (3.7)$$

これにより滑りなしの歩行が達成できる．この条件を

$$\ddot{X}_{\text{com}} = \mathbf{J}_{X\text{com}}\ddot{\mathbf{q}} + \dot{\mathbf{J}}_{X\text{com}}\dot{\mathbf{q}} \equiv 0 \quad (3.8)$$

と記述する．式 (3.3), (3.4), (3.6) と (3.8) の条件を

$$\Phi \ddot{\mathbf{q}} = \Gamma \quad (3.9)$$

ともとめる．ただし，

$$\Phi = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_1 \\ \mathbf{C}_2 \\ \mathbf{J}_{X\text{com}} \\ \mathbf{J}_{Z\text{com}} \end{bmatrix}, \Gamma = \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_{1d}(t) \\ \ddot{\theta}_{2d}(t) \\ -\dot{\mathbf{J}}_{X\text{com}} \dot{\mathbf{q}} \\ -\dot{\mathbf{J}}_{Z\text{com}} \dot{\mathbf{q}} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

である．式 (2.8) と (2.18) より，制御入力

$$\mathbf{u} = (\Phi \mathbf{M}^{-1} \mathbf{Y} \mathbf{S})^{-1} (\Phi \mathbf{M}^{-1} \mathbf{Y} \mathbf{h} + \Gamma) \quad (3.11)$$

と求まる．

3.2 初期状態の導出

ロボットの物理と制御パラメータは前章の表 2.1 と同じにする．初期状態を以下のように設定する．

$$\mathbf{q}(0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\alpha & \alpha & 0 & 0 & L_3(0) \end{bmatrix}^T \quad (3.12)$$

$$\dot{\mathbf{q}}(0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{\theta}_3(0) & \dot{\theta}_4(0) & 0 \end{bmatrix}^T \quad (3.13)$$

制御出力によって，上半身とフライホイールはゼロダイナミクスとなる．これを安定化するため，適切な初期状態を設定すべく．式 (3.8) により，ロボットの重心の X 方向の速度を定数に維持し，初期状態に決まる．この速度 V と上半身の初期角速度の関係は以下に示す．

$$V = \frac{2L_1 \sin \alpha}{T_{\text{set}}} = \dot{X}_{\text{com}}(0) = \frac{\mathbf{J}_{X\text{com}}(0) \dot{\mathbf{q}}(0)}{m} = \frac{m_3 L_3(0) \dot{\theta}_3(0)}{m} \quad (3.14)$$

式 (3.14) を解くと上半身の初期角速度 $\dot{\theta}_3(0)$ [rad/s] 次のようになる．

$$\dot{\theta}_3(0) = \frac{2mL_1 \sin \alpha}{m_3 L_3(0) T_{\text{set}}} = \frac{1.702879}{T_{\text{set}}} \quad (3.15)$$

これによって求めた $\dot{\theta}_3(0)$ を式 (3.13) に代入し，式 (3.12) と式 (3.13) の初期状態を用いて，前章のアルゴリズム 2 を利用して，フライホイールの初期角速度 $\dot{\theta}_4(0)$ [rad/s] が導出できる．図 3.2 にロボットの歩行周期と上半身およびフライホイールの初期角速度 $\dot{\theta}_3(0)$ および $\dot{\theta}_4(0)$ の関係を示す． $\dot{\theta}_3(0)$ は T_{set} の増大に伴って正の

値から減少していて、正の値に収束していて、同時に、 $\dot{\theta}_3(0)$ が T_{set} の増大に伴って負の値から増大していて、ゼロに近づく正の値に収束している。

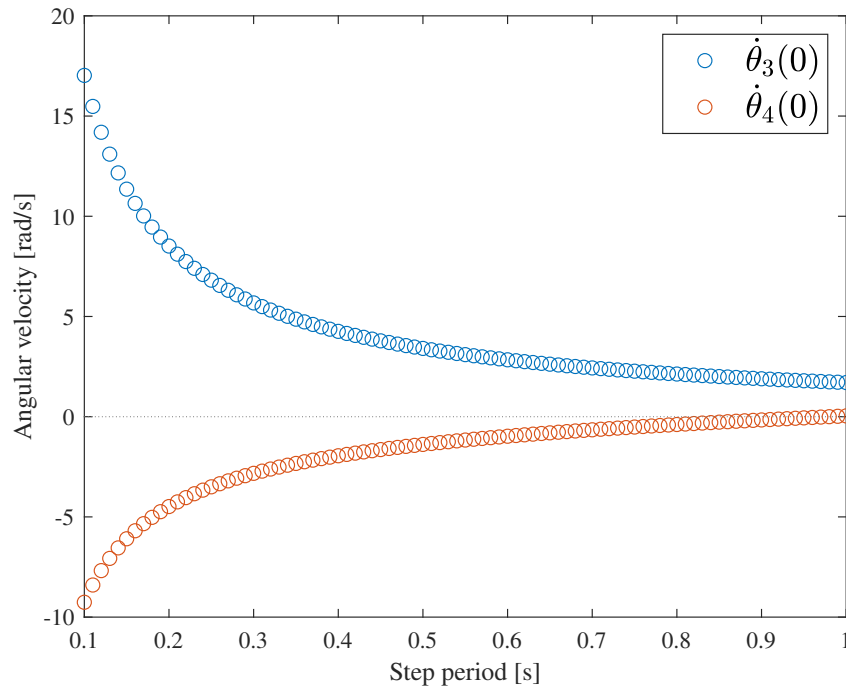


図 3.2: 低摩擦路面上の初期角速度と歩行周期の関係

3.3 シミュレーション結果

表 2.1 のパラメータを用いて、図 3.2 によって、上半身の初期角速度 $\dot{\theta}_3(0) = 6.8115199129$ [rad/s] とフライホイールの初期角速度 $\dot{\theta}_4(0) = -3.4989772058$ [rad/s] が分かる。この初期状態を利用して、シミュレーションを行った、ロボットの歩容が生成した。図 3.3 ~ 図 3.8 がシミュレーションの結果を表示する。図 3.4 はゼロダイナミクスとなる上半身のとフライホイールを適切な初期状態が安定化することを示した。図 3.5 を見ると、上半身の伸縮関節の変化は前章の正弦軌道と違った時間軌道に従う。図 3.6 は図 3.3 と図 3.4 の歩容の位相平面図である。図 3.7 から、 X_{com} の時間軌道は直線となって、ロボットの重心の水平方向の加速度がゼロであることが分かる。図 3.8 によって、水平方向の床反力は常にゼロに維持していて、鉛直方向の床反力はロボットが受けた重力と同じ大きさ定数にたもっている。

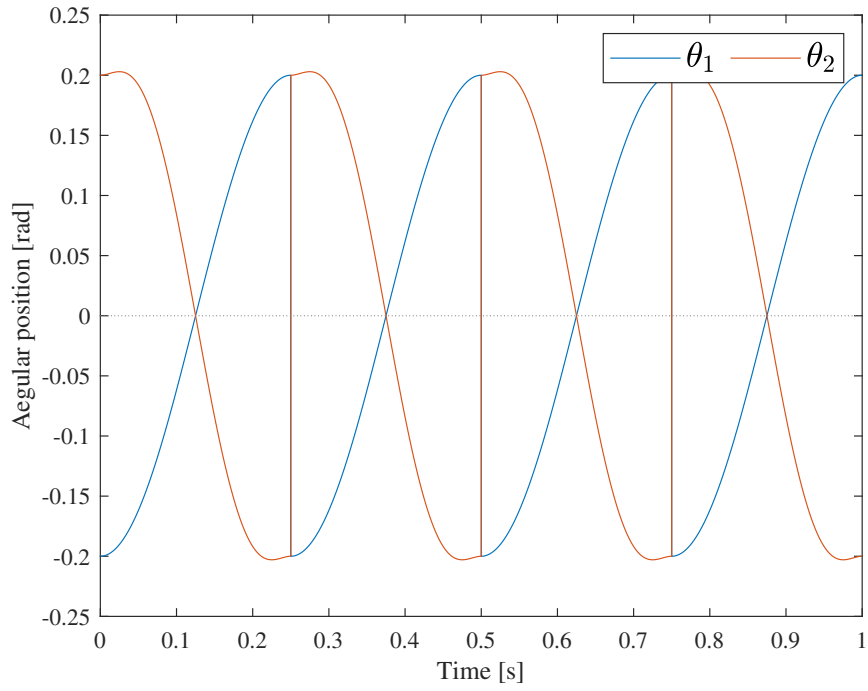


図 3.3: 低摩擦路面上の支持脚と遊脚の角度の時間発展

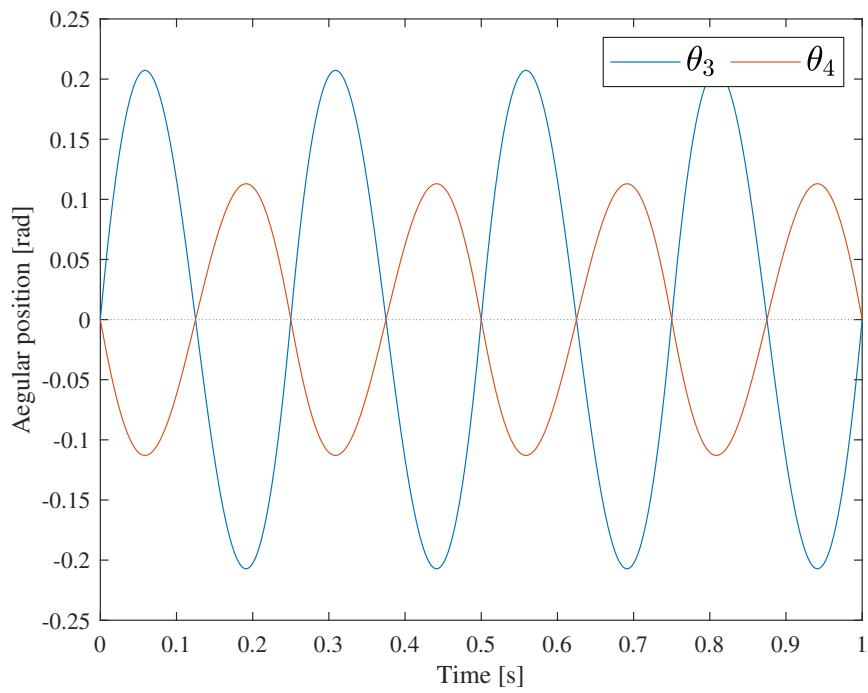


図 3.4: 低摩擦路面上の上半身とフライホイールの角度の時間発展

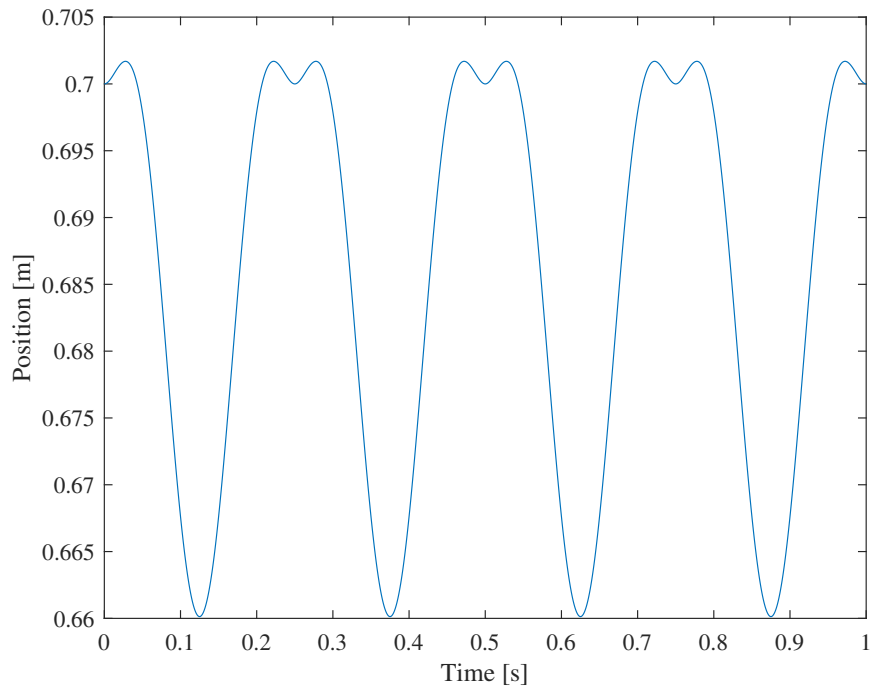


図 3.5: 低摩擦路面上の上半身の長さの時間発展

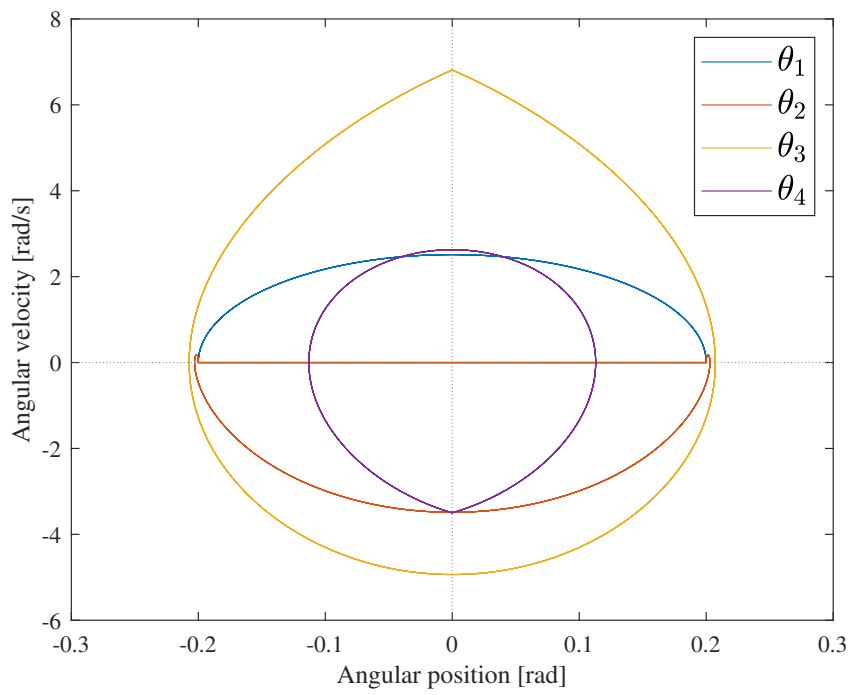


図 3.6: 低摩擦路面上の位相図

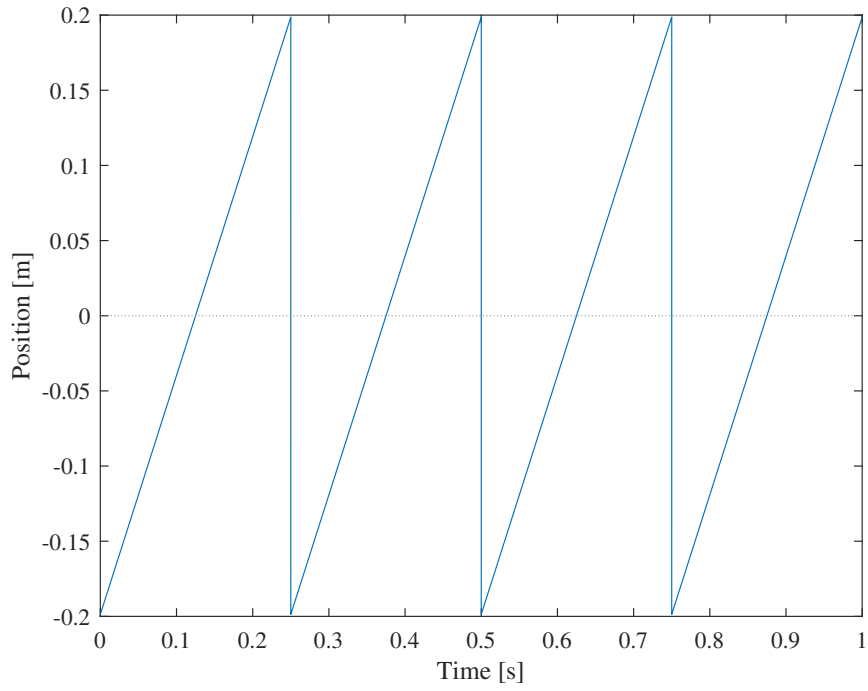


図 3.7: 低摩擦路面上の重心の X 方向の変化

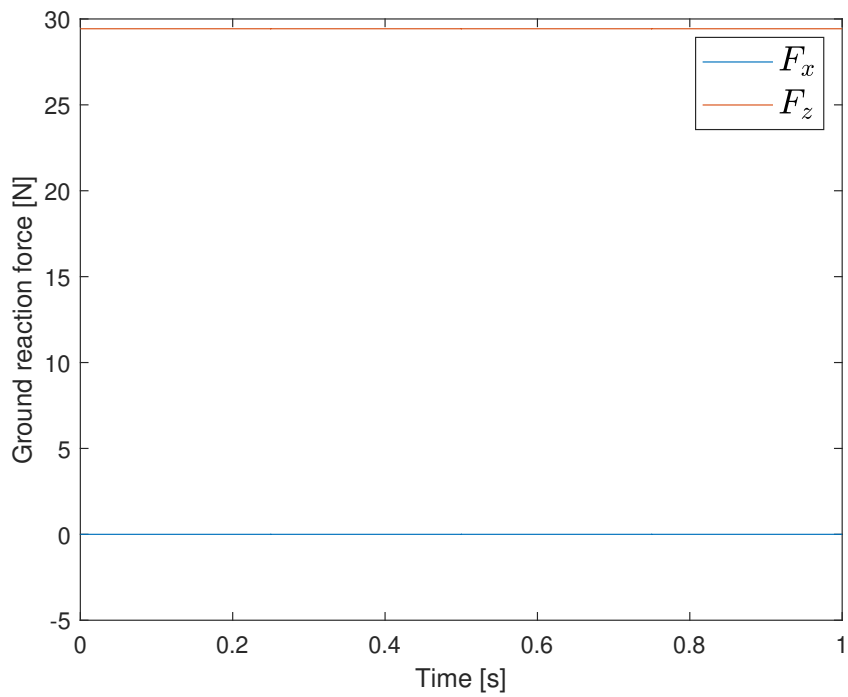


図 3.8: 低摩擦路面上の床反力

3.4 ロボットのエネルギー効率

ロボットの歩行性能を評価するためにエネルギーを計算する．エネルギーの評価指標として本論文では Specific Resistance(以下は SR) を導入する [9, 11, 18]．本モデルにおける SR は以下の式によって計算する．

$$\text{SR} = \frac{\Delta E}{mg\Delta X} \quad (3.16)$$

$$\Delta E = \int_0^{T_{\text{set}}} (|\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_3|u_1 + |\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_3|u_2 + |\dot{\theta}_4 - \dot{\theta}_3|u_3 + |\dot{L}_3 u_4|) dt \quad (3.17)$$

$$\Delta X = 2L_1 \sin\alpha \quad (3.18)$$

ここで、 ΔE [J] はロボットが一步を移動する消費したエネルギーであり、 ΔX はロボット一步の移動距離であり、 T_{set} [s] はロボットの歩行周期である．本モデルにおける $T_{\text{set}} = 0.25$ [s] の場合計算した SR は 5.54726 であって、エネルギー効率は人間と比べるとかなり悪い．ロボットのエネルギー効率 SR と歩行周期 T_{set} の関係が図 3.9 に示す．図 3.9 より、SR 値は T_{set} の増大により減少し、 $T_{\text{set}} = 1$ [s] のとき SR が 0.378 となる．ステルス歩行は慎重な歩行運動であり、人間の歩行と比べてエネルギー効率が悪いの原因となる．本章は低摩擦路面上の高速ステルス歩行歩容を生成できて、前章より良い環境への適応性を示した．しかし、このモデルはただ硬い路面上の滑りなしの高速ステルス歩行を実現できて、不安定地面における適応性はまだ分からない．次章はこのモデルを低摩擦の振動的な路面上の高速ステルス歩行の実現について議論する．

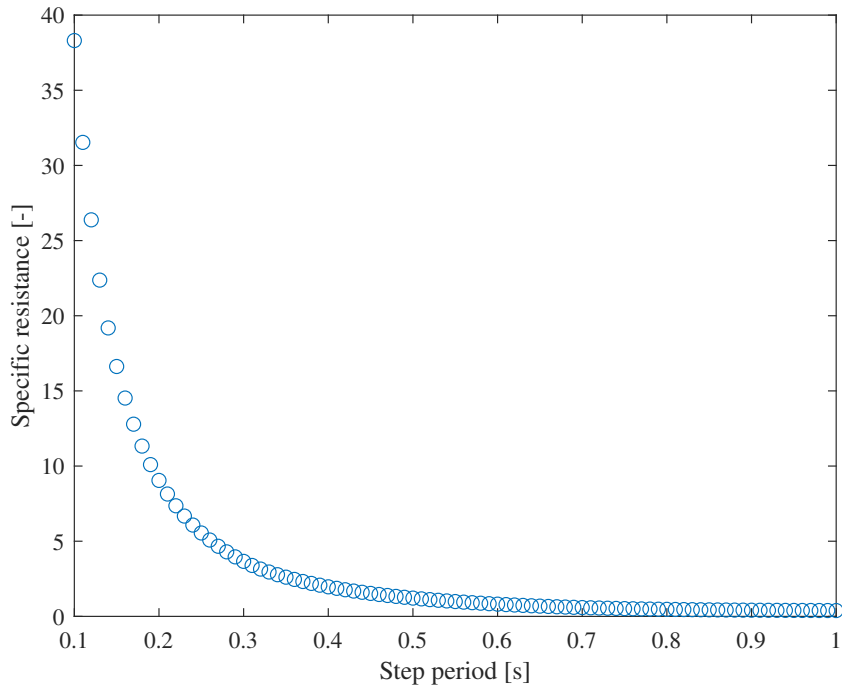


図 3.9: 低摩擦路面上のロボットのエネルギー効率と歩行周期の関係

第4章 振動的な低摩擦路面上の高速 ステルス歩容生成

前章では伸縮上体とフライホイールをもつ2脚ロボットにより、低摩擦路面上の高速ステルス歩容を生成した。しかし、前章もモデルを用いた地面は安定的な硬い地面であり、ロボットの不安定地面に対する適応性はまだ分からないことである。慎重的早めに不安定地面を通過し、床に対する影響を最小化することはこの問題を解決する対策と考える。そこで本章では、振動的な低摩擦路面上の高速ステルス歩容生成を検討する。本章では1自由度の地面のモデルを導入し、第2章が紹介した7自由度のロボットのモデルを利用して振動的な低摩擦路面上の高速ステルス歩行を行う。まず、ロボットと地面の数学モデルの導出とロボットの制御系の設計手法について述べる。そして、ロボットの歩容を解析する。

4.1 数学モデルの導出

図4.1に本章で扱うモデルが示されている。ロボットは前章と同じ構造とさせ、前章と区別するのは歩行の路面は低摩擦な路面から振動的な低摩擦路面に変化した。質量・バネ・ダンパ系モデルを用いて振動的な路面を再現する。ここで、 m_f [kg] は地面の質量であり、 k_f [N/m] は地面の弾性係数であり、 c_f [N·s/m] を地面の粘性係数である。 z_f [m] はの地面のZ方向の位置を表す。実際の地面のモデルではだバネ・ダンパー各一本が存在する。図4.1とはバネ・ダンパーを明らかにイメージするため複雑なを描いた。本章はロボットの支持脚が地面と接続したまま離れないと仮定し、水平歩行の床反力がゼロになると滑りなしと判定する。

4.1.1 運動方程式

一般化座標ベクトルを $\mathbf{q} = [x \ z \ \theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ \theta_4 \ L_3]^T$ とすると、ロボットの運動方程式は次のようになる。

$$M\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{h} = \mathbf{S}\mathbf{u} \quad (4.1)$$

1自由度のバネダンパーモデルを使って地面のダイナミクスとする。地面の運動方程式は

$$m_f \ddot{z}_f = -c_f \dot{z}_f - k_f (z_f - z_0) - m_f g \quad (4.2)$$

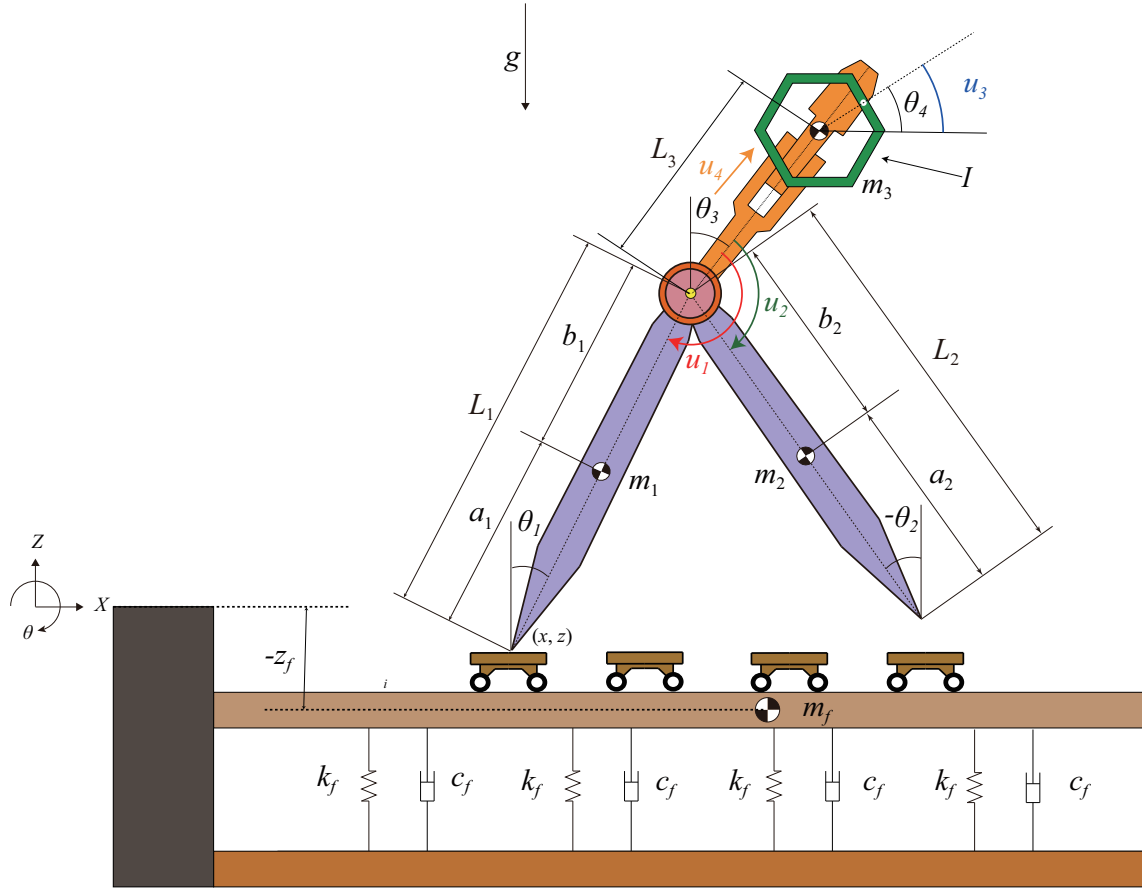


図 4.1: 振動的な低摩擦路面上の伸縮上体とフライホイールを有する 2 脚ロボット

とする．ここで， $z_0 = m_f g / k_f$ [m] はバネの自然長である．バネは重力によって z_0 [m] 圧縮された後の位置を座標系の原点とする．バネの上部の元の位置は z_0 となる．システム全体の一般化座標ベクトルが $\bar{\mathbf{q}} = [\mathbf{q}^T \ z_f]^T$ になる．

本章のモデルはロボットの支持脚が地面と接続したまま離れないと仮定し，接続点の速度の拘束条件以下の通りである．

$$\dot{x} = 0, \quad \dot{z} = z_f \quad (4.3)$$

システム全体の運動方程式と拘束条件は

$$\bar{\mathbf{M}} \ddot{\bar{\mathbf{q}}} + \bar{\mathbf{h}} = \mathbf{J}^T \boldsymbol{\lambda} + \bar{\mathbf{S}} \mathbf{u} \quad (4.4)$$

$$\mathbf{J} \dot{\bar{\mathbf{q}}} = \mathbf{0}_{2 \times 1} \quad (4.5)$$

のようになる．式(4.4)の各項は以下のように示す．

$$\bar{\mathbf{M}} = \begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{0}_{7 \times 1} \\ \mathbf{0}_{1 \times 7} & m_f \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

$$\bar{\mathbf{h}} = \begin{bmatrix} \mathbf{h} \\ c_f \dot{z}_f + k_f (z_f - z_0) + m_f g \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

$$\bar{\mathbf{S}} = \begin{bmatrix} \mathbf{S} \\ \mathbf{0}_{1 \times 4} \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

式(4.4)と(4.5)によに，床反力ベクトル $\boldsymbol{\lambda}$ が

$$\boldsymbol{\lambda} = -\mathbf{X}^{-1} \mathbf{J} \bar{\mathbf{M}}^{-1} (\bar{\mathbf{S}} \mathbf{u} - \bar{\mathbf{h}}) \quad (4.10)$$

と求まる．ただし，

$$\mathbf{X} = \mathbf{J} \bar{\mathbf{M}}^{-1} \mathbf{J}^T \quad (4.11)$$

である．式(4.10)を式(4.4)に代入して整理すると次式を得る．

$$\ddot{\bar{\mathbf{q}}} = \bar{\mathbf{M}}^{-1} \mathbf{Y} (\bar{\mathbf{S}} \mathbf{u} - \bar{\mathbf{h}}) \quad (4.12)$$

ここで， $\mathbf{Y} = \mathbf{I}_8 - \mathbf{J}^T \mathbf{X}^{-1} \mathbf{J} \bar{\mathbf{M}}^{-1}$ である．

4.1.2 制御系設計

ロボットの重心の X 座標と Z 座標を X_{com} と Z_{com} にする．具体的な定義が式(2.9)を参照されたい．

支持脚の角度 θ_1 と股間角度 θ_H を制御出力とする．ここで，

$$\theta_1 = \mathbf{C}_1 \bar{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \bar{\mathbf{q}} \quad (4.13)$$

$$\theta_H = \mathbf{C}_2 \bar{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \bar{\mathbf{q}} \quad (4.14)$$

である．ステルス歩行を達成するため， θ_1 と θ_H の目標時間軌道を

$$\theta_{1d}(t) = -\alpha \cos\left(\frac{\pi t}{T_{\text{set}}}\right) \quad (4.15)$$

$$\theta_{2d}(t) = 4\alpha \left(\frac{6t^5}{T_{\text{set}}^5} - \frac{15t^4}{T_{\text{set}}^4} + \frac{10t^3}{T_{\text{set}}^3} \right) - 2\alpha \quad (4.16)$$

とする.そして,地面に対する影響を最小化および地面から飛び出すことを回避するため,鉛直方向の床反力を正の定数に制御する必要がある.前章によって制御目標を(4.17)のように記述する.

$$m\ddot{Z}_{\text{com}} = F_z - mg \equiv 0 \quad (4.17)$$

$$\ddot{Z}_{\text{com}} = \mathbf{J}_{Z\text{com}}\ddot{\mathbf{q}} + \dot{\mathbf{J}}_{Z\text{com}}\dot{\mathbf{q}} \equiv 0 \quad (4.18)$$

また,滑りなしな歩行をするための条件を以下のように示す.

$$m\ddot{X}_{\text{com}} \equiv 0 \quad (4.19)$$

$$\ddot{X}_{\text{com}} = \mathbf{J}_{X\text{com}}\ddot{\mathbf{q}} + \dot{\mathbf{J}}_{X\text{com}}\dot{\mathbf{q}} \equiv 0 \quad (4.20)$$

式(4.15), (4.16), (4.18)と(4.20)の条件を

$$\Phi\ddot{\mathbf{q}} = \Gamma \quad (4.21)$$

とまとめる.ただし,

$$\Phi = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_1 \\ \mathbf{C}_2 \\ \mathbf{J}_{X\text{com}} \\ \mathbf{J}_{Z\text{com}} \end{bmatrix}, \Gamma = \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_{1d}(t) \\ \ddot{\theta}_{2d}(t) \\ -\dot{\mathbf{J}}_{X\text{com}}\dot{\mathbf{q}} \\ -\dot{\mathbf{J}}_{Z\text{com}}\dot{\mathbf{q}} \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

である.式(4.12)と(4.21)より,制御入力

$$\mathbf{u} = (\Phi\bar{\mathbf{M}}^{-1}\mathbf{Y}\bar{\mathbf{S}})^{-1}(\Phi\bar{\mathbf{M}}^{-1}\mathbf{Y}\bar{\mathbf{h}} + \Gamma) \quad (4.23)$$

と求まる.

4.2 シミュレーション結果

$$\mathbf{q}(0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\alpha & \alpha & 0 & 0 & L_3(0) & 0 \end{bmatrix}^T \quad (4.24)$$

$$\dot{\mathbf{q}}(0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{\theta}_3(0) & \dot{\theta}_4(0) & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (4.25)$$

表 4.1: 7自由度伸縮関節をもつ上半身とフライホイールを有するロボットと振動地面の物理パラメータ

$m_1 = m_2$	1	kg	α	0.2	rad
m_3	1	kg	T_{set}	0.25	s
$a_1 = a_2$	0.5	m	m_f	10	kg
$b_1 = b_2$	0.5	m	k_f	5000	N/m
$L_1 = L_2$	1	m	c_f	100	N·s/m
$L_3(0)$	0.7	m			

本章は前章と同じ制御系を用いることによって、上半身とフライホイールはゼロダイナミクスとなる。そして、ロボットの物理パラメータは第3章と同じにする。また、前章の上半身の初期角速度 6.8115199129 [rad/s] とフライホイールの初期角速度 -3.4989772058 [rad/s] を用いて式 (4.25) の $\dot{\theta}_3(0)$ および $\dot{\theta}_4(0)$ [rad/s] とする。表 4.1 の物理と制御パラメータと式 (4.24)(4.25) の初期状態を用いて数値シミュレーションを行った結果を図 4.2 ~ 4.10 に示す。図 4.3 ~ 4.5 から、ゼロダイナミクスとなる上半身が安定して前章と違った位相平面に収束したが、フライホイールは安定しない。フライホイールの角度は地面の不安定により発散すると考える。図 4.6 から、 X_{com} の時間軌道は直線となって、ロボットの重心の水平方向の加速度がゼロであることが分かる。図 4.7 によって、水平方向の床反力は常にゼロに維持し、滑りなが発生しない。そして、鉛直方向の床反力はロボットがロボットが受ける重力と同じく正の定数にたもっていることが分かる。図 4.8 から、粘性係数 $c_f = 0$ のとき地面の運動はただ単振動になっている。 $c_f = 10$ と $c_f = 100$ のとき地面の振動は収束していて、 c_f の増大により収束が速くなることが分かる。図 4.9 に地面粘性係数が大きくなると振動の減衰が速くなることが分かる。図 4.10 によりロボットの上半身の伸縮関節が収束できるかどうかは地面の振動に決まる。本章は前章の低摩擦路面上の高速ステルス歩行を振動的な不安定地面に拡張して歩容を生成できた。しかし、フライホイールは発散問題はまだ解決していない。これを解決するため新しい制御方法を考えなければならないので、将来の課題とする。

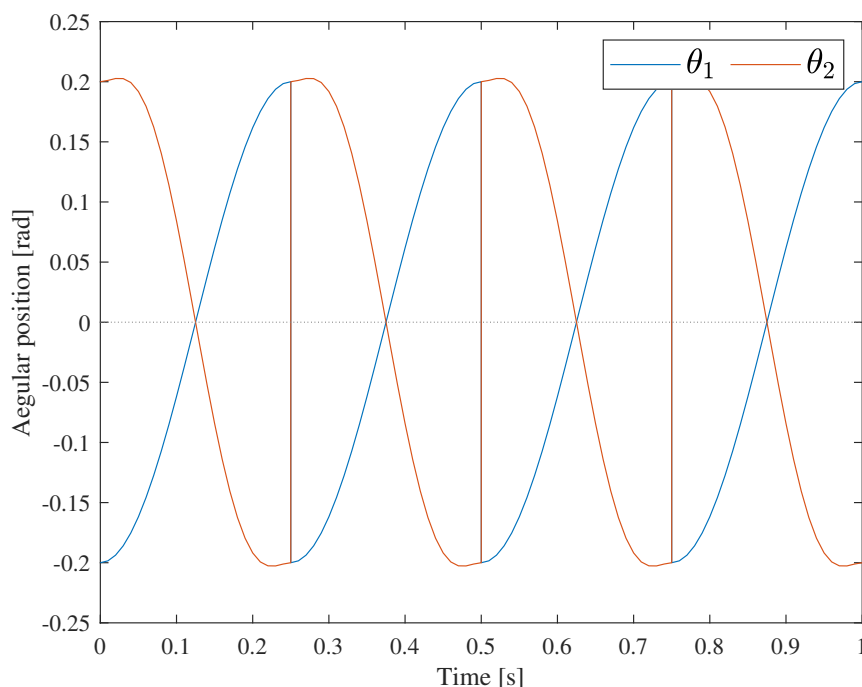


図 4.2: 振動的な低摩擦路面上の支持脚と遊脚の角度変化

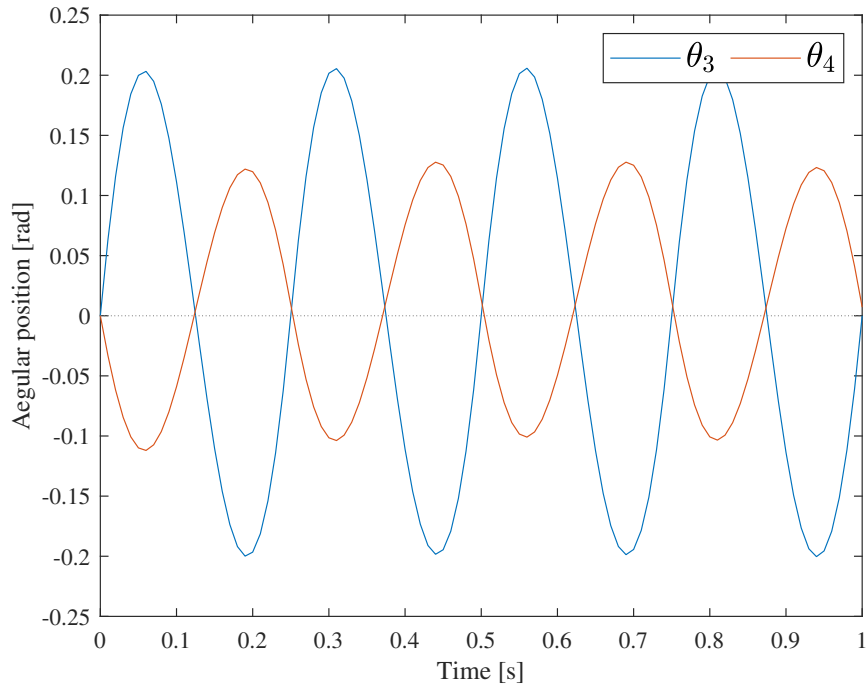


図 4.3: 振動的な低摩擦路面上の上半身とフライホイールの角度変化

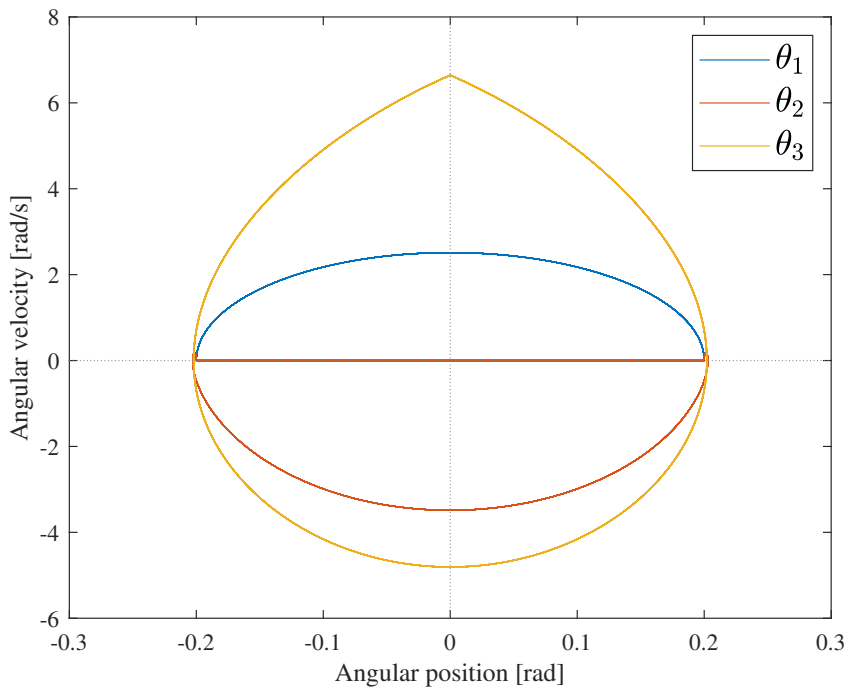


図 4.4: 振動的な低摩擦路面上の 20 秒後の θ_1 , θ_2 , θ_3 の位相図

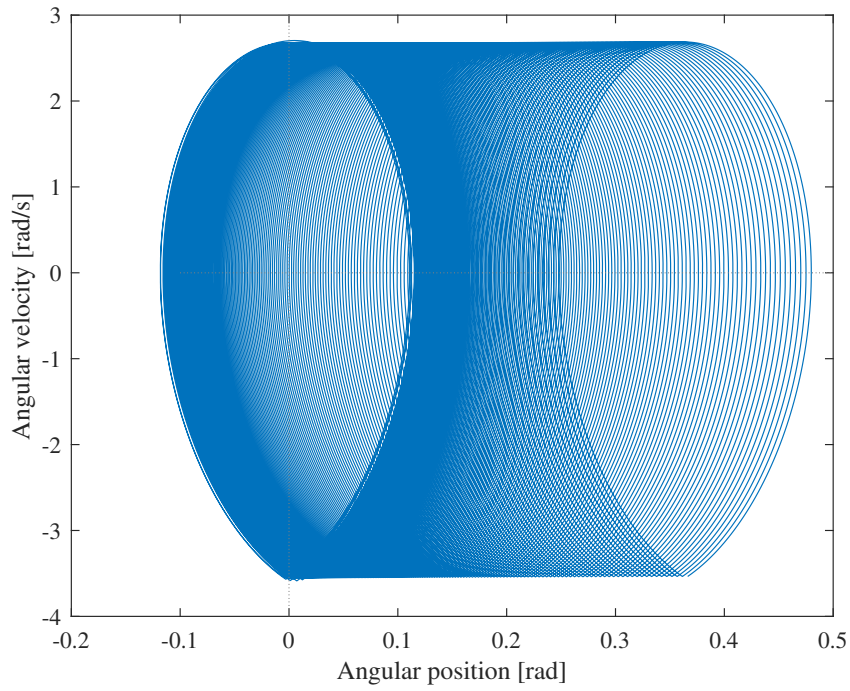


図 4.5: 振動的な低摩擦路面上の 20 秒後の θ_4 の位相図

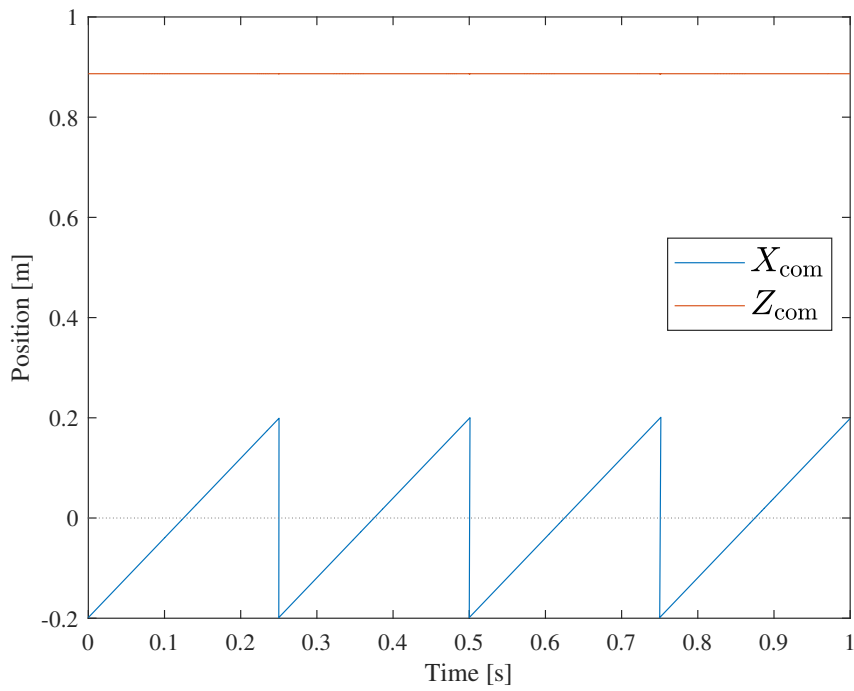


図 4.6: 振動的な低摩擦路面上のロボットの重心の変化

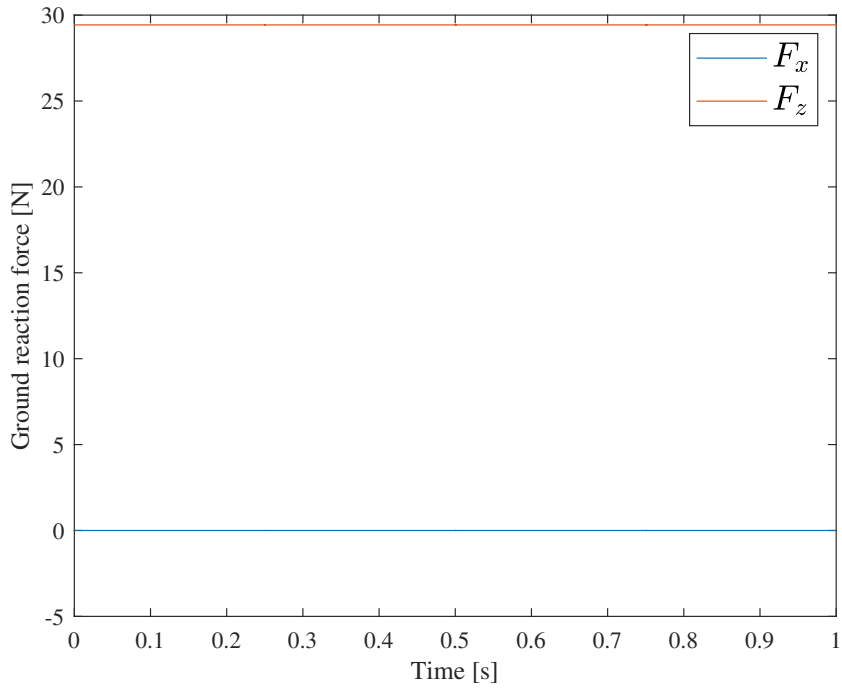


図 4.7: 振動的な低摩擦路面上の床反力

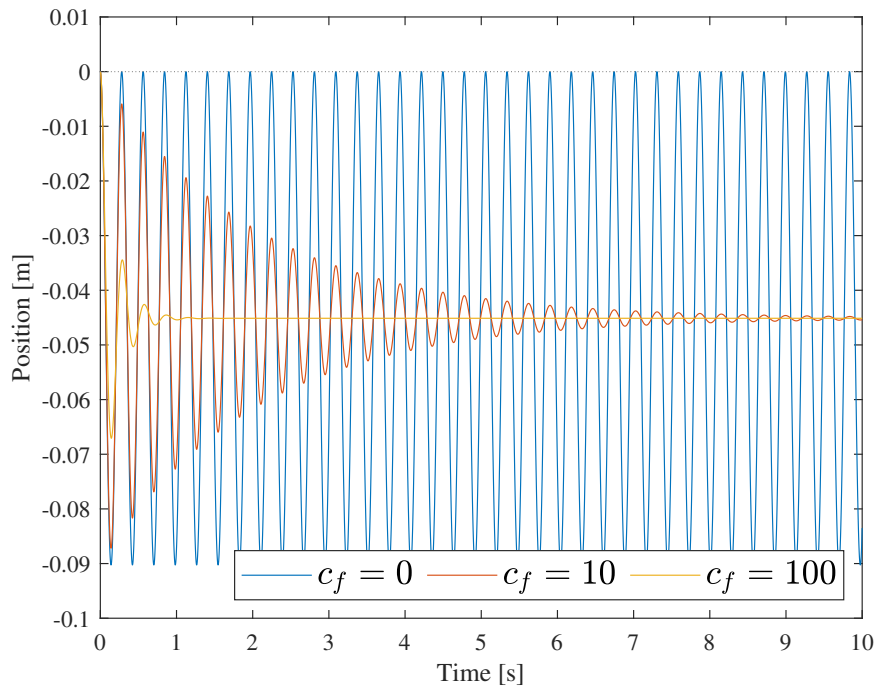


図 4.8: 振動的な低摩擦路面上の Z 座標の変化と粘性係数の関係

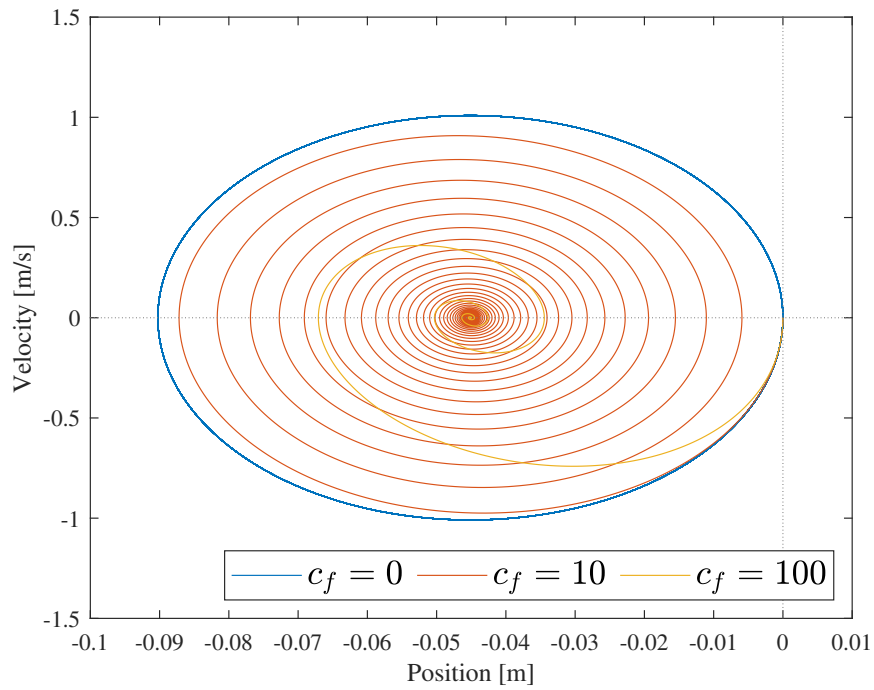


図 4.9: 振動的な低摩擦路面上の Z 座標の位相図

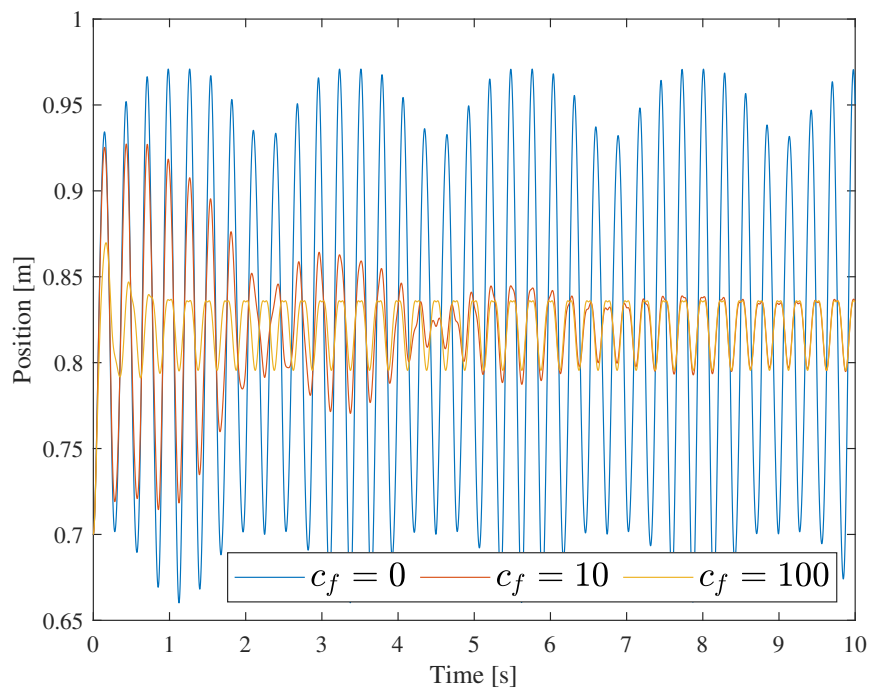


図 4.10: 振動的な低摩擦路面上の上半身の長さの変化と粘性係数の関係

第5章 2脚ロボットを駆動源とした2台の歩行ロボットの同期制御

本章では、振動的な床面を媒体とした群集ダイナミクスの基礎研究として、2脚ロボットを駆動源とした2台の歩行ロボットの同期制御を検討する。まずは、受動的な滑りなし振動斜面上で2台の同一コンパス型ロボットを有するシステムの数学モデルを導出する。次に、1台の股間に正弦波入力を持つコンパス型ロボットを駆動源として、2台のロボットが生成した歩容を解析する。また、地面の粘性係数がロボットの同期制御に対する影響を分析する。さらに、入力の正弦波の振幅が同期制御における影響を議論する。

5.1 数学モデルの導出

図5.1に本章で扱う2台の同一のコンパス型ロボットと振動的な斜面により構成されるモデルが示す。2台のロボットは物理パラメータが全部同じである。この二つのロボットの唯一相違点は一つのロボットは股間に入力トルクが設置される。入力を持つ前方を歩行するロボットをロボット1で、後方の入力なしの歩行するロボットはロボット2とする。X-Z座標系は斜面に沿って設置される。各ロボットの支持脚と遊脚の質量は m_1 [kg] と m_2 [kg]、腰部の質量は m_3 [kg] である。支持脚と遊脚の長さとはともに L [m] である。ロボット1の支持脚と遊脚の間に制御トルク u [N·m] を印加する。斜面は質量・バネ・ダンパ系のモデルを用いて再現する。斜面の質量は m_f [kg] であり、傾斜角度は ϕ [rad] であり、弾性係数は k_f [N/m] であり、粘性係数は c_f [N·s/m] である。

5.1.1 運動方程式

ロボット i の一般化座標ベクトルを $\mathbf{q}_i = [x_i \ z_i \ \theta_{i1} \ \theta_{i2}]^T$ とする。ここで、ロボット i が地面と接続する位置は (x_i, z_i) はである。そして、 θ_{i1} と θ_{i2} [rad] はロボット i の支持脚と遊脚のZ方向からの角度を表す。ロボット1とロボット2の運動方程式は以下のようなになる。

$$\mathbf{M}_1 \ddot{\mathbf{q}}_1 + \mathbf{h}_1 = \mathbf{S}_1 \mathbf{u} \quad (5.1)$$

$$\mathbf{M}_2 \ddot{\mathbf{q}}_2 + \mathbf{h}_2 = \mathbf{0}_{4 \times 1} \quad (5.2)$$

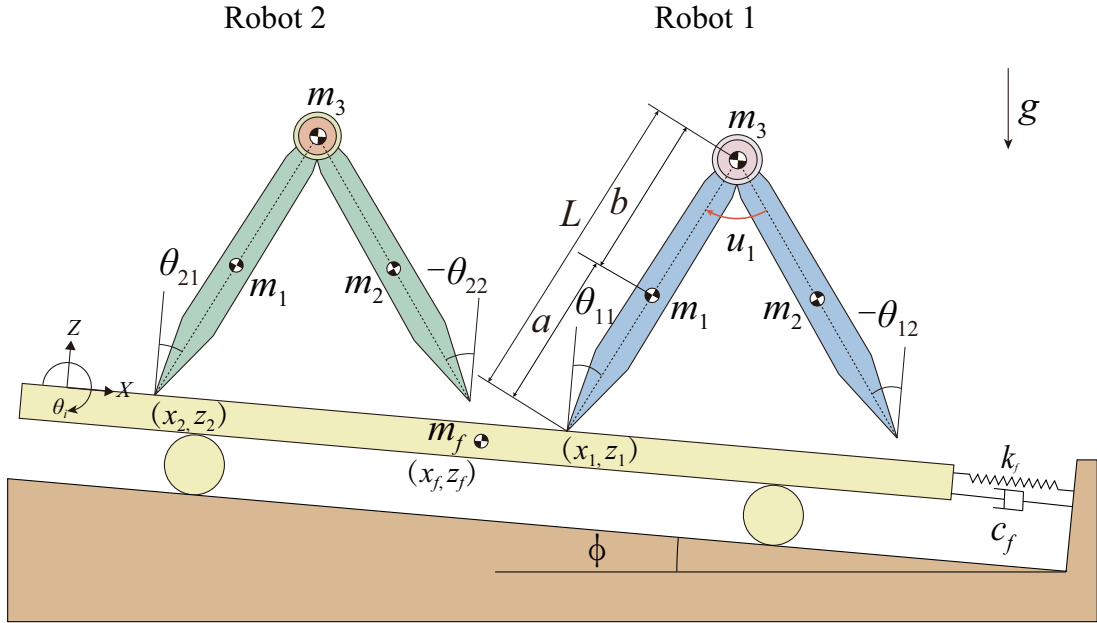


図 5.1: 受動的な振動斜面上の能動と受動的なコンパスロボット

1 自由度の質量・バネ・ダンパ系を使って振動的な斜面を再現する．斜面は X 方向に沿って振動している．斜面の運動方程式は

$$m_f \ddot{x}_f = -c_f \dot{x}_f - k_f (x_f - x_0) + m_f g \sin \phi \quad (5.3)$$

とする．ここで， $x_0 = -m_f g \sin \phi / k_f$ [m] はバネの自然長と定義する．バネ上部が重力の X 方向の分量によって $|x_0|$ [m] 右に向けて圧縮されてバランスを取るところを X 座標の零点とする． x_0 はバネが圧縮する前の X 座標となる．システム全体の一般化座標ベクトルが $\mathbf{q} = [\mathbf{q}_1^T \ \mathbf{q}_2^T \ x_f]^T$ になる．各ロボットの支持脚が地面と接続したまま離れないと仮定し，接続点の速度の拘束条件以下の通りである．

$$\dot{x}_1 = \dot{x}_f, \dot{z}_1 = 0 \quad (5.4)$$

$$\dot{x}_2 = \dot{x}_f, \dot{z}_2 = 0 \quad (5.5)$$

システム全体の運動方程式と拘束条件は

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{h} = \mathbf{J}^T \boldsymbol{\lambda} + \mathbf{S} \mathbf{u} \quad (5.6)$$

$$\mathbf{J} \dot{\mathbf{q}} = \mathbf{0}_{4 \times 1} \quad (5.7)$$

のようにまとまる．式 (5.6) と (5.7) の各項は以下のように示す．

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_1 & \mathbf{0}_{4 \times 4} & \mathbf{0}_{4 \times 1} \\ \mathbf{0}_{4 \times 4} & \mathbf{M}_2 & \mathbf{0}_{4 \times 1} \\ \mathbf{0}_{1 \times 4} & \mathbf{0}_{1 \times 4} & m_f \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

$$\mathbf{h} = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_1 \\ \mathbf{h}_2 \\ c_f \dot{x}_f + k_f (x_f - x_0) - m_f g \sin \phi \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_1 \\ \mathbf{0}_{4 \times 1} \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{S}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

式 (5.6) と (5.7) により，床反力ベクトル $\boldsymbol{\lambda}$ が

$$\boldsymbol{\lambda} = -\mathbf{X}^{-1} \mathbf{J} \mathbf{M}^{-1} (\mathbf{S} \mathbf{u} - \mathbf{h}) \quad (5.12)$$

と求まる．ただし，

$$\mathbf{X} = \mathbf{J} \mathbf{M}^{-1} \mathbf{J}^T \quad (5.13)$$

である．式 (5.12) を (5.6) に代入して整理すると次の式を得る．

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{Y} (\mathbf{S} \mathbf{u} - \mathbf{h}) \quad (5.14)$$

ここで， $\mathbf{Y} = \mathbf{I}_9 - \mathbf{J}^T \mathbf{X}^{-1} \mathbf{J} \mathbf{M}^{-1}$ である．

5.1.2 衝突方程式

ロボット i が斜面と衝突するとき接地点が滑らないと仮定する．ロボット 1 とロボット 2 の衝突条件は以下のようなになる．

$$\frac{d}{dt} (x_1 + L \sin \theta_{11} - L \sin \theta_{12})^+ = \dot{x}_f^+ \quad (5.15)$$

$$\frac{d}{dt} (z_1 + L \cos \theta_{11} - L \cos \theta_{12})^+ = 0 \quad (5.16)$$

$$\frac{d}{dt} (x_2 + L \sin \theta_{21} - L \sin \theta_{22})^+ = \dot{x}_f^+ \quad (5.17)$$

$$\frac{d}{dt} (z_2 + L \cos \theta_{21} - L \cos \theta_{22})^+ = 0 \quad (5.18)$$

ロボット i の遊脚が斜面と衝突する際の完全非弾性衝突の方程式と拘束式は次のように定まる.

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{q}}^+ = \mathbf{M}\dot{\mathbf{q}}^- + \mathbf{J}_{Ii}^T \boldsymbol{\lambda}_{Ii} \quad (5.19)$$

$$\mathbf{J}_{Ii} \dot{\mathbf{q}}^+ = \mathbf{0}_{4 \times 1} \quad (5.20)$$

ヤコビアン \mathbf{J}_{I1} と \mathbf{J}_{I2} は以下のように示す.

$$\mathbf{J}_{I1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & L\cos\theta_{11} & -L\cos\theta_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -L\sin\theta_{11} & L\sin\theta_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.21)$$

$$\mathbf{J}_{I2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & L\cos\theta_{21} & -L\cos\theta_{22} & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -L\sin\theta_{21} & L\sin\theta_{22} & 0 \end{bmatrix} \quad (5.22)$$

式 (5.19)(5.20) より, 力積 $\boldsymbol{\lambda}_{Ii}$ が

$$\boldsymbol{\lambda}_{Ii} = -\mathbf{X}_{Ii}^{-1} \mathbf{J}_{Ii} \dot{\mathbf{q}}^- \quad (5.23)$$

と求まる. ここで,

$$\mathbf{X}_{Ii} = \mathbf{J}_{Ii} \mathbf{M}^{-1} \mathbf{J}_{Ii}^T \quad (5.24)$$

である. これを式 (5.19) に代入して, 衝突後の速度ベクトルが以下のように求まる.

$$\dot{\mathbf{q}}^+ = (\mathbf{I}_9 - \mathbf{M}^{-1} \mathbf{J}_{Ii}^T \mathbf{X}_{Ii}^{-1} \mathbf{J}_{Ii}) \dot{\mathbf{q}}^- \quad (5.25)$$

5.1.3 制御入力

本章では, フィードバック制御を行わない. ロボットのダイナミクスにスムーズに影響を与えるために, 以下のように指定された正弦波信号を入力として股間のトルクを制御する.

$$u = A_m \sin\left(\frac{2\pi t}{T_{\text{set}}}\right) \quad (5.26)$$

ここで, 入力信号の振幅は A_m [N·m] であり, 周期は T_{set} [s] である.

5.2 シミュレーション結果

表 5.1 の物理と制御パラメータおよび式 (5.27) と式 (5.28) の初期状態を用いて, 数値シミュレーションを行った結果を図 5.2~5.11 に示す.

$$\mathbf{q}(0) = [0 \ 0 \ -0.23 \ 0.23 \ 0 \ 0 \ -0.22 \ 0.22 \ 0]^T \quad (5.27)$$

$$\dot{\mathbf{q}}(0) = [0 \ 0 \ 1 \ 0.9 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0.75 \ 0]^T \quad (5.28)$$

表 5.1: 4 自由度コンパス型ロボットと振動斜面の物理パラメータ

$m_1 = m_2$	0.5	kg	ϕ	0.03	rad
m_3	1	kg	m_f	10	kg
a	0.5	m	k_f	5000	N/m
b	0.5	m	x_0	$-m_f g \sin \phi / k_f$	m
$L = (a + b)$	1	m	T_{set}	0.715	s

ここで，ロボット i 第 j 歩の歩行周期を T_{ij} と定義する．ロボット 1 とロボット 2 第 j 歩の歩行周期の差を

$$\Delta T_{ij} = T_{1j} - T_{2j} \quad (5.29)$$

と定義する．ロボット i 第 j 歩の歩幅は

$$\Delta x_{ij} = 2L \sin \theta_{i1}^- \quad (5.30)$$

となる．ロボット 1 とロボット 2 第 j 歩の歩幅の差を

$$\Delta x_j = \Delta x_{1j} - \Delta x_{2j}. \quad (5.31)$$

と定義する．

5.2.1 粘性係数の同期制御における影響

図 5.2~ 図 5.5 に両ロボットの歩容を示す．図 5.2 は両ロボットの一步ごとの歩行周期であり，図 5.2 は両ロボットの一步ごとの歩行周期の差である．図 5.2 と図 5.3 から，両ロボットはおよそ 250 歩後同期することが分かる．そして，両ロボットの歩行周期がロボット 1 の入力周期 0.715 に収束した．図 5.4 は両ロボットの一步ごとの歩幅であり，図 5.5 は両ロボットの一步ごとの歩幅の差である．図 5.2 と図 5.3 により，両ロボットの歩行周期が同期しても，歩幅は相違の値に収束したことが分かる．図 5.6 は振動斜面の粘性係数が 150 より小さいうちは，粘性係数の減少によって，同期するためかかる時間が長くなることを示す．そして，粘性係数が 200 以上になると，両ロボットが同期できないことも分かる．これは，粘性係数が大きくなると両ロボットの間の影響が低下し，振動的な斜面が硬い路面のようになると考える．図 5.7 より，入力の振幅 $A_m = 0.6$ [N·m] が図 5.6 より小さい場合，両ロボットの同期が早く取れることが分かる．また，図 5.6 のように斜面の粘性係数が 200 を超えると同期がとれなくなる．

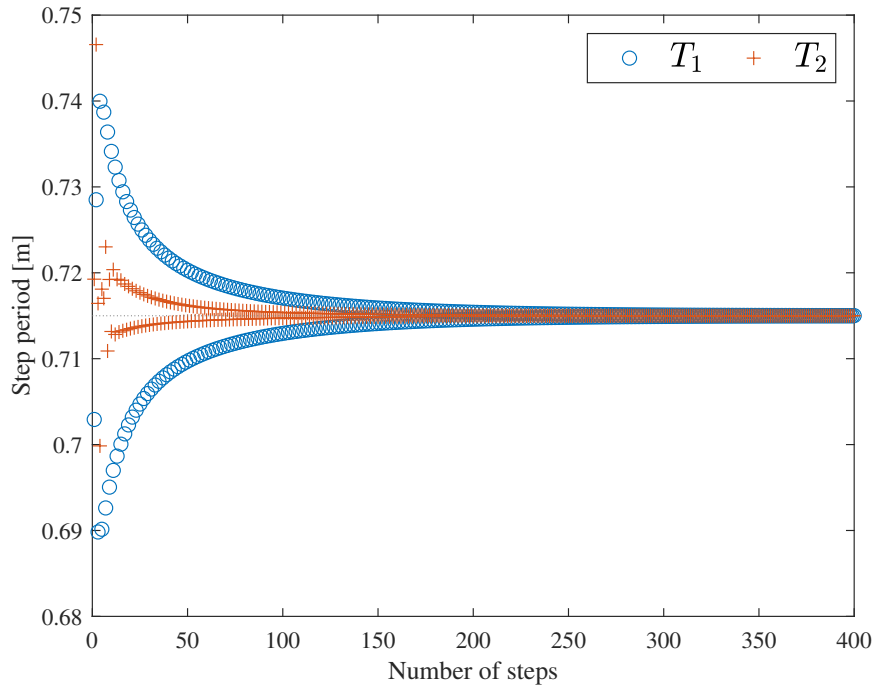


図 5.2: 振動的な下り斜面上の 2 台のコンパス型ロボットの歩行周期

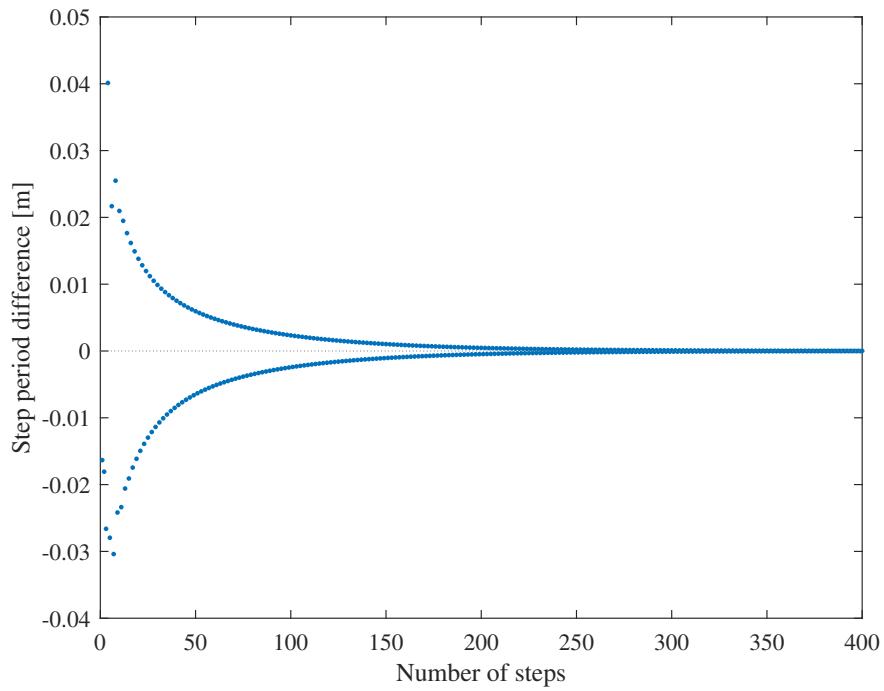


図 5.3: 振動的な下り斜面上の 2 台のコンパス型ロボットの歩行周期の差

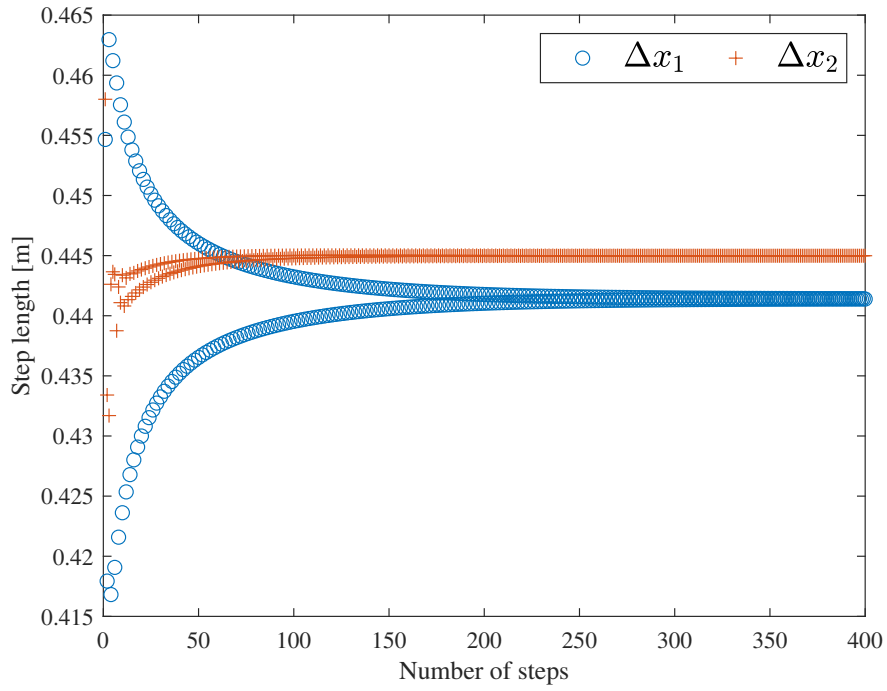


図 5.4: 振動的な下り斜面上の 2 台のコンパス型ロボットの歩幅

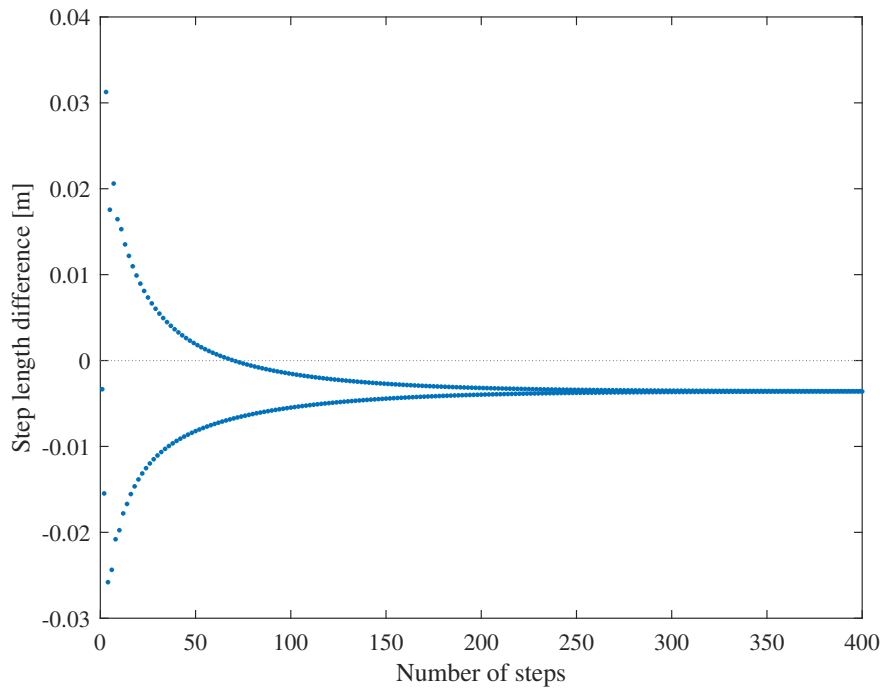


図 5.5: 振動的な下り斜面上の 2 台のコンパス型ロボットの歩幅の差

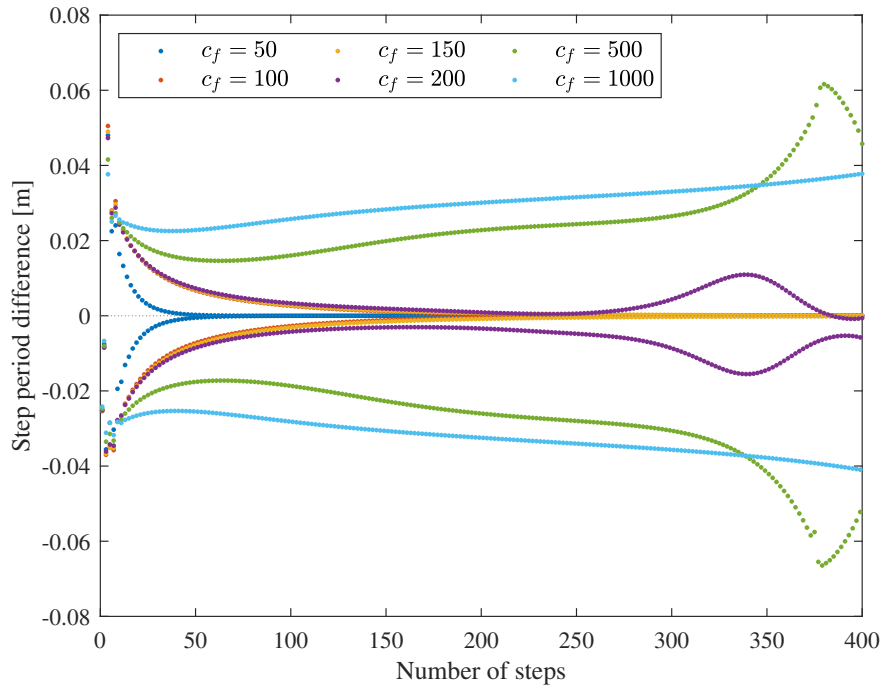


図 5.6: 振動的な下り斜面上のロボットの歩行周期の差と粘性係数の関係, $A_m=0.7$

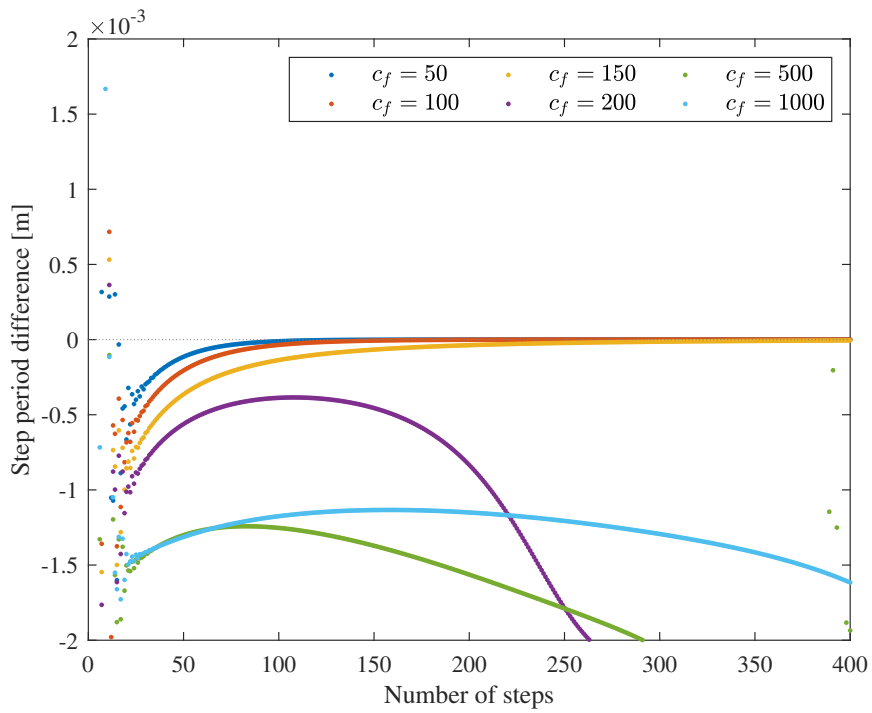


図 5.7: 振動的な下り斜面上のロボットの歩行周期の差と粘性係数の関係, $A_m=0.6$

5.2.2 制御入力の同期制御における影響

ロボット1の入力信号振幅が同期制御に対する影響を解析するために、ロボット1に入力された正弦波の振幅 A_m と T_{set} を用いて、アルゴリズム3を利用して数値シミュレーションを行い、入力の振幅が両ロボットの同期範囲に対する影響を議論する。

Algorithm 3 Calculate T_1 and T_2

Require: The step period T_1 and T_2 of Robot 1 and Robot 2 when they get stabilized

Input: Initial state $\mathbf{q}(0)$, $\dot{\mathbf{q}}(0)$, A_m and T_{set}

Output: Step period T_1 and T_2 of the next 30 steps after 300 steps

```
1: Initialization  $T_1[l][m][30] = 0$ ,  $T_2[l][m][30] = 0$ 
2: for  $i = 1; i \leq l : i++$  do
3:   for  $j = 1; j \leq m : j++$  do
4:     Run simulation for 330 steps.
5:     Save the last 30 step periods to  $t_1$  and  $t_2$ 
6:      $T_1[i][j] = t_1$ 
7:      $T_2[i][j] = t_2$ 
8:      $T_{\text{set}} = T_{\text{set}} - 0.0005$ 
9:   end
10:  $A_m = A_m - 0.1$ 
11: end
12: Return  $T_1$  and  $T_2$ 
```

図5.8~図5.11に四つの振幅 A_m を用いて両ロボットの歩行が安定した後の歩行周期は入力信号の周期 T_{set} との関係を示す。図5.8より、入力の振幅 $A_m = 0.7$ [N·m] のとき、両ロボットを同期させることができる入力の周期の範囲は、 $T_{\text{set}} = 0.7145$ [s] から $T_{\text{set}} = 0.7150$ [s] までであることが分かる。図5.9から、 $A_m = 0.6$ [N·m] の場合、両ロボットが同期する入力範囲は $T_{\text{set}} = 0.7145$ [s] から $T_{\text{set}} = 0.7190$ [s] までとなり $A_m = 0.7$ [N·m] の場合 と比べて大幅に拡大したことが確認できる。しかし、図5.10と図5.11に示すように、 A_m の値を 0.6 [N·m] より小さくにしても同期範囲が大きくなれなく、逆に少し小さくなった。このことから、両ロボットの同期範囲は正弦波の振幅に影響され、 $T_{\text{set}} = 0.7145$ [s] から $T_{\text{set}} = 0.7190$ [s] まで最大の同期範囲が得られることがわかる。同期範囲が小さいの原因がロボット2は受動ロボットであると考えられる。受動ロボットは傾斜角度が一定の斜面上ある同期範囲しか歩行することができないと思う。本章は簡単な入力を持つロボットを駆動源として、傾斜斜面上での2台のロボットの同期制御を実現できた。しかし、ロボット1の制御入力が簡単であり、より意識している歩行を再現する必要がある。そこで、次章は第2章の伸縮関節をもつ上半身とフライホイールを有す

る2脚ロボットを駆動源として床反力の制御によりコンパス型ロボットとの同期制御を行う。床反力の制御によって、より意識している歩行を模倣する。

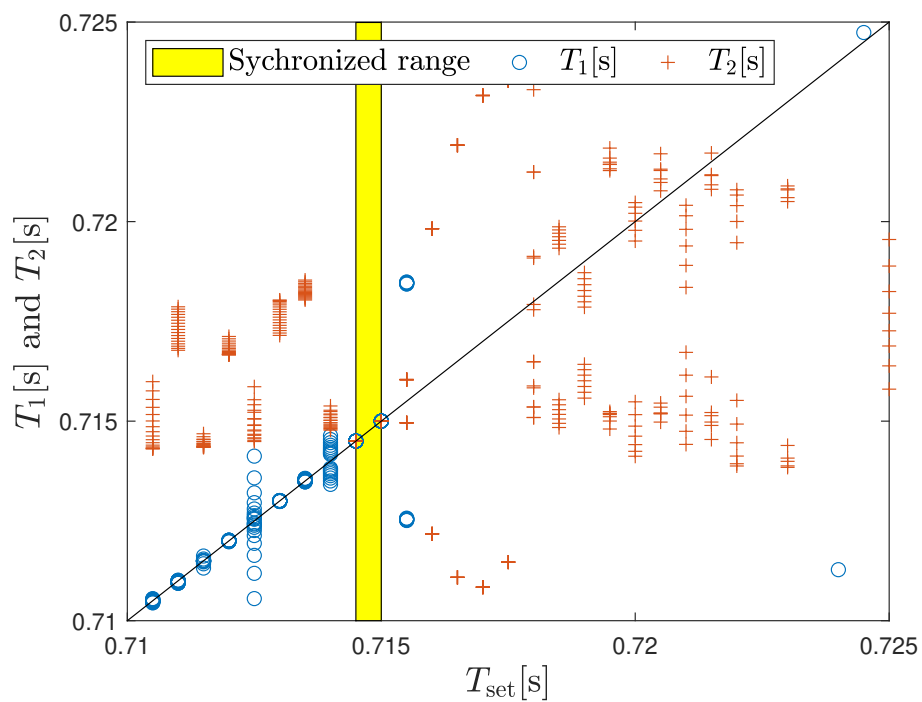


図 5.8: 振動的な下り斜面上の2台のコンパス型ロボットの同期範囲, $A_m=0.7$

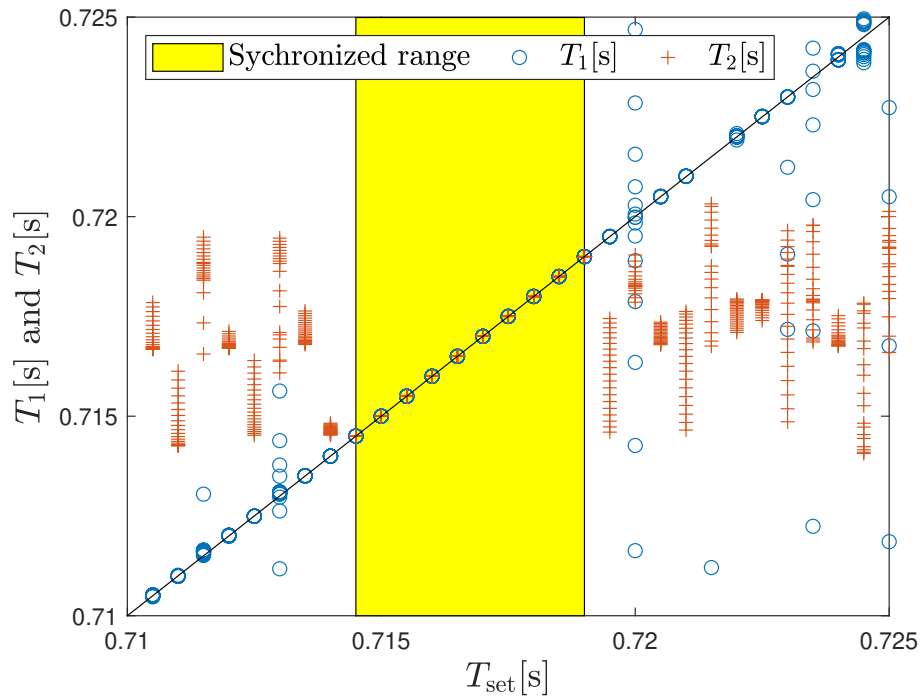


図 5.9: 振動的な下り斜面上の 2 台のコンパス型ロボットの同期範囲, $A_m=0.6$

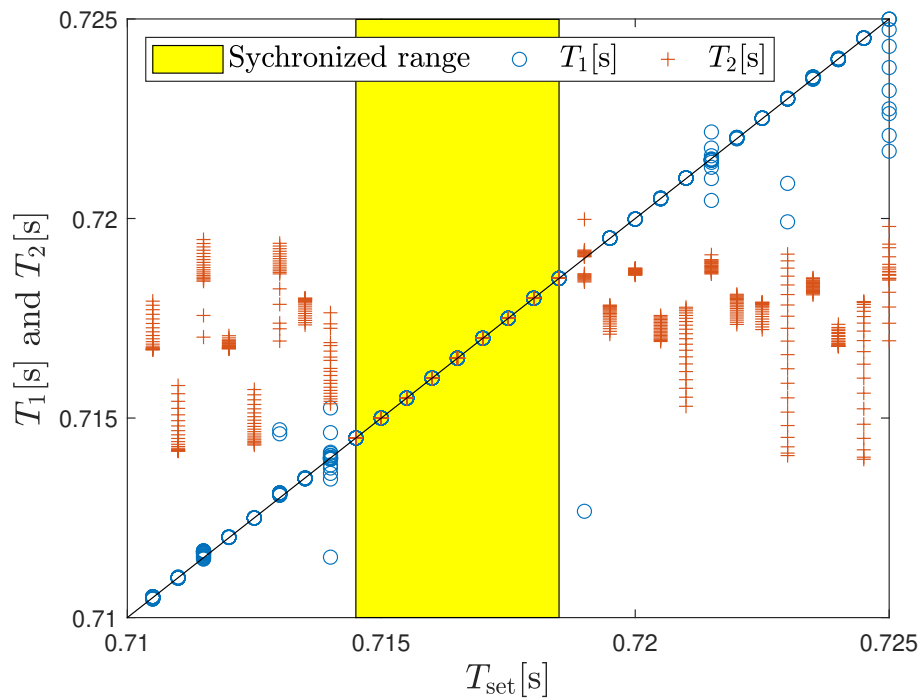


図 5.10: 振動的な下り斜面上の 2 台のコンパス型ロボットの同期範囲, $A_m=0.5$

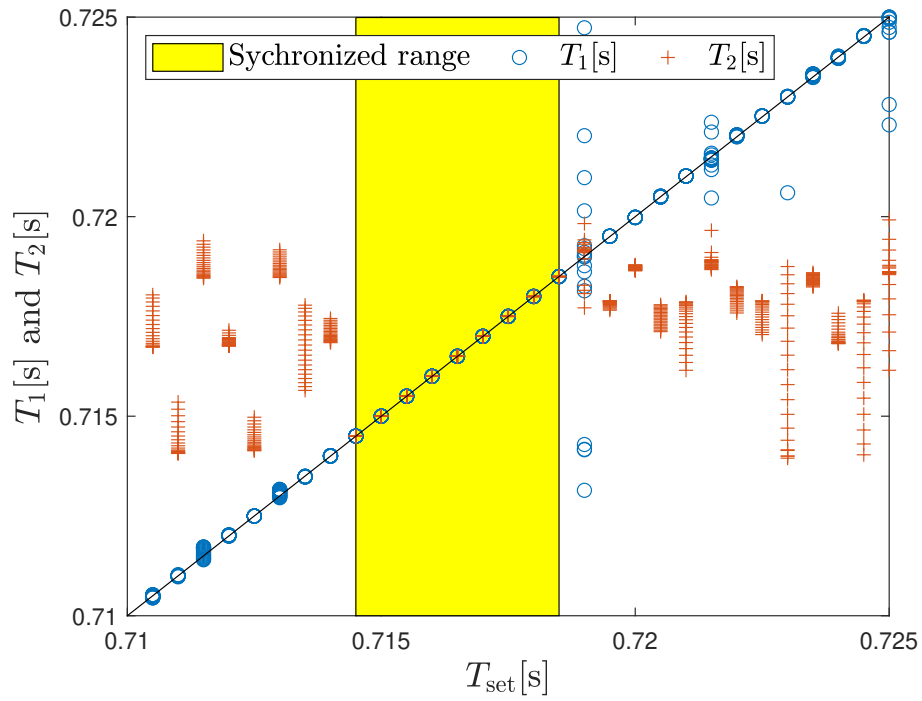


図 5.11: 振動的な下り斜面上の 2 台のコンパス型ロボットの同期範囲, $A_m=0.4$

第6章 鉛直方向の床反力の制御に基づく2台の歩行ロボットの同期制御

前章は簡単な入力を持つロボットを駆動源として、傾斜斜面上の2台のロボットの同期制御を実現できた。本章は第2章の伸縮関節をもつ上半身とフライホイール有する2脚ロボットを駆動源として受動的なコンパス型ロボットとの同期制御を行う。前章より複雑な制御により更に意識を持つ人間の歩行運動を模倣する。

6.1 数学モデルの導出

図6.1に本章で扱う2台のロボットと振動的な斜面により構成されるモデルが示す。前方のロボット1は第2章の伸縮関節をもつ上半身とフライホイールを有する2脚ロボットと同じで、後方のロボット2は前章のコンパス型ロボットと同じである。X-Z座標系は斜面に沿って設置される。ロボット1の支持脚と遊脚の質量は m_{11} [kg] と m_{12} [kg] であり、フライホイールと上半身の合計質量は m_{13} [kg] であり、フライホイールの慣性モーメントは I [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$] である。ロボット1の支持脚と上半身の間に制御トルク u_1 [$\text{N}\cdot\text{m}$]、遊脚と上半身の間に制御トルク u_2 [$\text{N}\cdot\text{m}$]、上半身とフライホイールの間に制御トルク u_3 [$\text{N}\cdot\text{m}$]、上半身の伸縮関節に u_4 [$\text{N}\cdot\text{m}$] をそれぞれ印加する。ロボット2の支持脚と遊脚の質量は m_{21} [kg] と m_{22} [kg]、腰部の質量は m_{23} [kg] である。両ロボットの支持脚と遊脚の長さはともに L [m] である。斜面は質量・バネ・ダンパ系のモデルを用いて再現する。斜面の質量は m_f [kg] であり、傾斜角度は ϕ [rad] であり、弾性係数は k_f [N/m] であり、粘性係数は c_f [N·m] である。

6.1.1 運動方程式

ロボット1の一般化座標ベクトルを $\mathbf{q}_1 = [x_1 \ z_1 \ \theta_{11} \ \theta_{12} \ \theta_{13} \ \theta_{14} \ L_t]^T$ とする。 x と z は支持脚が地面と接続する位置であり、 θ_1 と θ_2 [rad] は支持脚と遊脚のZからの角度であり、 θ_3 [rad] は上半身のZ方向からの角度であり、 θ_4 [rad] はフライホ

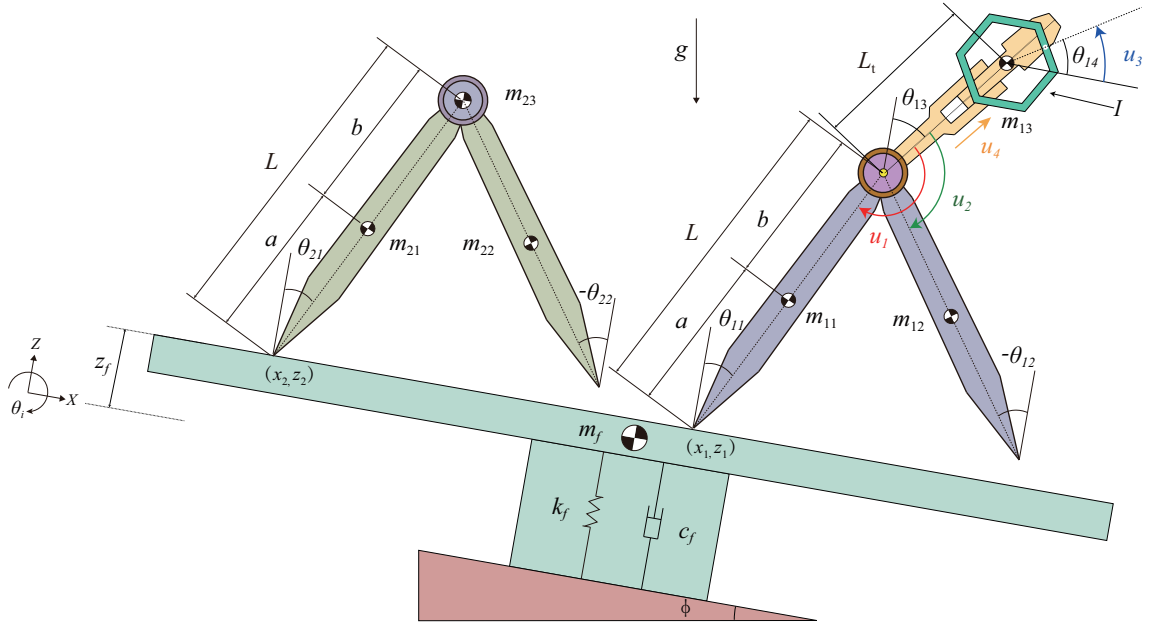


図 6.1: 受動的な振動斜面上の伸縮上体とフライホイールを有する2脚ロボットと受動的なコンパスロボット

イールの X 方向からの角度であり，を上半身の重心からロボットの腰ばでの長さである．ロボット1の運動方程式は以下ようになる．

$$\mathbf{M}_1 \ddot{\mathbf{q}}_1 + \mathbf{h}_1 = \mathbf{S}_1 \mathbf{u} \quad (6.1)$$

ロボット2の一般化座標ベクトルを $\mathbf{q}_2 = [x_2 \ z_2 \ \theta_{21} \ \theta_{22}]^T$ とする．ここで，ロボット2が地面と接続する位置は (x_2, z_2) はであり， θ_{21} と θ_{22} はロボット2の支持脚と遊脚の Z 方向からの角度である．ロボット2の運動方程式は以下ようになる．

$$\mathbf{M}_2 \ddot{\mathbf{q}}_2 + \mathbf{h}_2 = \mathbf{0}_{4 \times 1} \quad (6.2)$$

1自由度の質量・バネ・ダンパ系を使って振動的な斜面を再現する．斜面は Z 方向に沿って振動している．斜面の運動方程式は

$$m_f \ddot{z}_f = -c_f \dot{z}_f - k_f (z_f - z_0) - m_f g \cos \phi \quad (6.3)$$

とする．ここで， $z_0 = m_f g \cos \phi / k_f$ [m] はバネの自然長である．バネ上部が重力の Z 方向の分量によって z_0 [m] 圧縮されてバランスを取るところを Z 座標の零点とする． z_0 はバネが圧縮する前の Z 座標となる．システム全体の一般化座標ベクトルが $\mathbf{q} = [\mathbf{q}_1^T \ \mathbf{q}_2^T \ x_f]^T$ になる．各ロボットの支持脚が地面と接続したまま離れないと仮定し，接続点の速度の拘束条件以下の通りである．

$$\dot{x}_1 = 0, \dot{z}_1 = \dot{z}_f \quad (6.4)$$

$$\dot{x}_2 = 0, \dot{z}_2 = \dot{z}_f \quad (6.5)$$

システム全体の運動方程式と拘束条件は

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{h} = \mathbf{J}^T \boldsymbol{\lambda} + \mathbf{S}\mathbf{u} \quad (6.6)$$

$$\mathbf{J}\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{0}_{4 \times 1} \quad (6.7)$$

のようにまとまる．式 (6.6) と (6.7) の各項の詳細は以下の通りである．

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_1 & \mathbf{0}_{7 \times 4} & \mathbf{0}_{7 \times 1} \\ \mathbf{0}_{4 \times 7} & \mathbf{M}_2 & \mathbf{0}_{4 \times 1} \\ \mathbf{0}_{1 \times 7} & \mathbf{0}_{1 \times 4} & m_f \end{bmatrix} \quad (6.8)$$

$$\mathbf{h} = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_1 \\ \mathbf{h}_2 \\ c_f \dot{z}_f + k_f (z_f - z_0) + m_f g \cos \phi \end{bmatrix} \quad (6.9)$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_1 \\ \mathbf{0}_{4 \times 1} \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{S}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.10)$$

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6.11)$$

式 (6.6) と (6.7) により，床反力ベクトル $\boldsymbol{\lambda}$ が

$$\boldsymbol{\lambda} = -\mathbf{X}^{-1} \mathbf{J} \mathbf{M}^{-1} (\mathbf{S}\mathbf{u} - \mathbf{h}) \quad (6.12)$$

と求まる．ただし，

$$\mathbf{X} = \mathbf{J} \mathbf{M}^{-1} \mathbf{J}^T \quad (6.13)$$

である．式 (6.12) を式 (6.6) に代入して整理すると次の式を得る．

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{Y}(\mathbf{S}\mathbf{u} - \mathbf{h}) \quad (6.14)$$

ここで， $\mathbf{Y} = \mathbf{I}_{12} - \mathbf{J}^T \mathbf{X}^{-1} \mathbf{J} \mathbf{M}^{-1}$ である．

6.1.2 衝突方程式

ロボット i が斜面と衝突するとき接地点が滑らないと仮定する。ロボット 1 とロボット 2 の衝突条件は以下ようになる。

$$\frac{d}{dt}(x_1 + L\sin\theta_{11} - L\sin\theta_{12})^+ = 0 \quad (6.15)$$

$$\frac{d}{dt}(z_1 + L\cos\theta_{11} - L\cos\theta_{12})^+ = \dot{z}_f^+ \quad (6.16)$$

$$\frac{d}{dt}(x_2 + L\sin\theta_{21} - L\sin\theta_{22})^+ = 0 \quad (6.17)$$

$$\frac{d}{dt}(z_2 + L\cos\theta_{21} - L\cos\theta_{22})^+ = \dot{z}_f^+ \quad (6.18)$$

ロボット i の遊脚が斜面と衝突する際の完全非弾性衝突の方程式と拘束式は次のように定まる。

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{q}}^+ = \mathbf{M}\dot{\mathbf{q}}^- + \mathbf{J}_{Ii}^T \boldsymbol{\lambda}_{Ii} \quad (6.19)$$

$$\mathbf{J}_{Ii} \dot{\mathbf{q}}^+ = \mathbf{0}_{4 \times 1} \quad (6.20)$$

ヤコビアン \mathbf{J}_{I1} と \mathbf{J}_{I2} は以下のように示す。

$$\mathbf{J}_{I1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & L\cos\theta_{11} & -L\cos\theta_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -L\sin\theta_{11} & L\sin\theta_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (6.21)$$

$$\mathbf{J}_{I2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & L\cos\theta_{21} & -L\cos\theta_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -L\sin\theta_{21} & L\sin\theta_{22} & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6.22)$$

式 (6.19)(6.20) より、力積 $\boldsymbol{\lambda}_{Ii}$ が

$$\boldsymbol{\lambda}_{Ii} = -\mathbf{X}_{Ii}^{-1} \mathbf{J}_{Ii} \dot{\mathbf{q}}^- \quad (6.23)$$

と求まる。ここで、

$$\mathbf{X}_{Ii} = \mathbf{J}_{Ii} \mathbf{M}^{-1} \mathbf{J}_{Ii}^T. \quad (6.24)$$

である。これを式 (6.19) に代入して、衝突後の速度ベクトルが以下のように求まる。

$$\dot{\mathbf{q}}^+ = (\mathbf{I}_9 - \mathbf{M}^{-1} \mathbf{J}_{Ii}^T \mathbf{X}_{Ii}^{-1} \mathbf{J}_{Ii}) \dot{\mathbf{q}}^-. \quad (6.25)$$

6.1.3 制御系設計

ロボット1の重心の X 座標と Z 座標を

$$X_{1\text{com}} = \sum_{i=1}^3 \frac{m_{1i} X_{1i}}{m_1}, \quad Z_{1\text{com}} = \sum_{i=1}^3 \frac{m_{1i} Z_{1i}}{m_1} \quad (6.26)$$

と定義する．ここで、 X_{1i} と Z_{1i} は質点 m_{1i} の X と Z 座標で、 $m_1 (= m_{11} + m_{12} + m_{13})$ [m] はロボット全体の質量である．ロボット1の支持脚の角度 θ_{11} と股間角度 θ_{1H} および上半身の角度 θ_{13} を制御出力とする．ここで、

$$\theta_1 = \mathbf{C}_1 \mathbf{q} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{q} \quad (6.27)$$

$$\theta_H = \mathbf{C}_2 \mathbf{q} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{q} \quad (6.28)$$

$$\theta_3 = \mathbf{C}_3 \mathbf{q} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{q} \quad (6.29)$$

である．ステルス歩行を達成するため、 θ_1 と θ_H の目標時間軌道を

$$\theta_{1d}(t) = -\alpha \cos\left(\frac{\pi t}{T_{\text{set}}}\right) \quad (6.30)$$

$$\theta_{2d}(t) = 4\alpha \left(\frac{6t^5}{T_{\text{set}}^5} - \frac{15t^4}{T_{\text{set}}^4} + \frac{10t^3}{T_{\text{set}}^3} \right) - 2\alpha \quad (6.31)$$

とする．上半身は鉛直方向の床反力を制御する際に Z 方向に沿って直立という姿に維持する．これによって θ_3 の目標時間軌道を

$$\theta_{3d}(t) = 0 \quad (6.32)$$

とする．そして、地面から飛び出すことを回避するため、ロボット1の Z 方向の床反力 F_{1z} を正に制御する必要がある．そして Z 方向の重心加速度と床反力は以下のような関係が存在する．

$$m\ddot{Z}_{1\text{com}} = F_{1z} - m_1g \quad (6.33)$$

また、

$$\ddot{Z}_{1\text{com}} = \mathbf{J}_{1Z\text{com}} \ddot{\mathbf{q}} + \dot{\mathbf{J}}_{1Z\text{com}} \dot{\mathbf{q}} \quad (6.34)$$

という式で $\ddot{Z}_{1\text{com}}$ を求める．伸縮関節をもつ上半身の長さ L_t を安定化させるため、鉛直方向の床反力の平均値をロボット自身が受ける重力と同じ値に保つ必要がある．第2章はただ簡単で鉛直方向の床反力を重力と同じ値に制御したが、本章はこれよりさらに複雑な正弦軌道を用いる．これによって、床反力 F_{1z} を次のような目標時間軌道に沿って厳密に制御する．

$$F_{1zd}(t) = m_1g \left(1 + A \sin\left(\frac{2\pi t}{T_{\text{set}}}\right) \right) \quad (6.35)$$

ここで、 A は比例係数であり、鉛直方向の床反力の変化範囲を表す。これによって、鉛直方向の床反力 F_{1z} は $(1+A)mg$ [N] から $(1-A)mg$ [N] まで周期的に制御することができる。 Z 方向の床反力は正に保つため、 $A \in (-1, 1)$ のときだけ意義がある。三角関数の性質により、本章の A は全部を正の値にする場合を議論する。式 (6.33) と (6.35) により、ロボット 1 の $Z_{1\text{com}}$ 方向の重心は以下のような目標条件を満足すべく、

$$\ddot{Z}_{1d}(t) = Ag \sin\left(\frac{2\pi t}{T_{\text{set}}}\right) \quad (6.36)$$

$$\dot{Z}_{1d}(t) = -Ag \left(\frac{T_{\text{set}}}{2\pi}\right) \cos\left(\frac{2\pi t}{T_{\text{set}}}\right) \quad (6.37)$$

$$Z_{1d}(t) = Z_{1\text{com}}(0) - Ag \left(\frac{T_{\text{set}}}{2\pi}\right)^2 \sin\left(\frac{2\pi t}{T_{\text{set}}}\right) \quad (6.38)$$

PID 制御を用いて、式 (6.36)~(6.38) を (6.33) に代入して、 $Z_{1\text{com}}$ の制御は以下のようなになる。

$$\ddot{Z}_{1\text{com}} = \mathbf{J}_{1Z\text{com}} \ddot{\mathbf{q}} + \dot{\mathbf{J}}_{1Z\text{com}} \dot{\mathbf{q}} = \ddot{Z}_d(t) + K_D \dot{Z}_e(t) + K_P Z_e(t) \quad (6.39)$$

ただし、

$$\dot{Z}_e(t) = \dot{Z}_{1d}(t) - \dot{Z}_{1\text{com}}, Z_e(t) = Z_{1d}(t) - Z_{1\text{com}}(t) \quad (6.40)$$

である。式 (6.30)~(6.32) と (6.39) の条件は

$$\Phi \ddot{\mathbf{q}} = \Gamma \quad (6.41)$$

とまとまる。ただし、

$$\Phi = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_1 \\ \mathbf{C}_2 \\ \mathbf{C}_3 \\ \mathbf{J}_{1Z\text{com}} \end{bmatrix} \quad (6.42)$$

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_{1d}(t) + K_D(\dot{\theta}_{1d}(t) - \dot{\theta}_1(t)) + K_P(\theta_{1d}(t) - \theta_1(t)) \\ \ddot{\theta}_{2d}(t) + K_D(\dot{\theta}_{2d}(t) - \dot{\theta}_2(t)) + K_P(\theta_{2d}(t) - \theta_2(t)) \\ \ddot{\theta}_{3d}(t) + K_D(\dot{\theta}_{3d}(t) - \dot{\theta}_3(t)) + K_P(\theta_{3d}(t) - \theta_3(t)) \\ -\dot{\mathbf{J}}_{1Z\text{com}} \dot{\mathbf{q}} + \ddot{Z}_{1d}(t) + K_D \dot{Z}_e(t) + K_P Z_e(t) \end{bmatrix} \quad (6.43)$$

である。式 (6.14) と (6.41) より、制御入力

$$\mathbf{u} = (\Phi \mathbf{M}^{-1} \mathbf{Y} \mathbf{S})^{-1} (\Phi \mathbf{M}^{-1} \mathbf{Y} \mathbf{h} + \Gamma) \quad (6.44)$$

と求まる。

表 6.1: 7自由度伸縮関節をもつ上半身とフライホイールを有するロボットと4自由度コンパス型ロボット及および振動斜面の物理パラメータ

$m_1 = m_2$	0.5	kg	ϕ	0.2	rad
m_3	1	kg	ϕ	0.03	rad
a	0.5	m	m_f	10	kg
b	0.5	m	k_f	5000	N/m
$L = (a + b)$	1	m	z_0	$m_f g \cos \phi / k_f$	m
T_{set}	0.715	s	K_P	400	-
A	0.5	-	K_D	40	-

6.2 シミュレーション結果

表 6.1 の物理と制御パラメータおよび式 (6.44) と式 (6.45) の初期状態を用いて、数値シミュレーションを行った結果を図 6.2~6.11 に示す。

$$\mathbf{q}(0) = [0 \ 0 \ -\alpha \ \alpha \ 0 \ 0 \ L_3(0) \ 0 \ 0 \ -0.22 \ 0.22 \ 0]^T \quad (6.45)$$

$$\dot{\mathbf{q}}(0) = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ \dot{\theta}_3(0) \ \dot{\theta}_4(0) \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0.75 \ 0]^T \quad (6.46)$$

ここで、ロボット i 第 j 歩の歩行周期を T_{ij} と定義する。ロボット 1 とロボット 2 第 j 歩の歩行周期の差を

$$\Delta T_{ij} = T_{1j} - T_{2j} \quad (6.47)$$

と定義する。ロボット i 第 j 歩の歩幅は

$$\Delta x_{ij} = 2L \sin \theta_{i1}^- \quad (6.48)$$

となる。ロボット 1 とロボット 2 第 j 歩の歩幅の差を

$$\Delta x_j = \Delta x_{1j} - \Delta x_{2j}. \quad (6.49)$$

と定義する。

図 6.2~図 6.5 に両ロボットの歩容を示す。図 6.2 は両ロボットの一步ごとの歩行周期であり、図 6.3 は両ロボットの一步ごとの歩行周期の差である。図 6.2 と図 6.3 から、両ロボットはおよそ 50 歩後同期することが分かる。そして、両ロボットの歩行周期がロボット 1 の入力周期 0.715 [s] に収束した。図 6.4 は両ロボットの一步ごとの歩幅であり、図 6.5 は両ロボットの一步ごとの歩幅の差である。図 6.4 と図 6.5 により、両ロボットの歩行周期が同期しても、歩幅は相違の値に収束したことが分かる。図 6.6 と図 6.7 より、比例係数 A を三つの値を用いて得られたロボット 1 の Z 方向の床反力と重心位置である。これから見ると、ロボット 1 の Z 方向の床反力とは重心位置は目標時間軌道に沿って大体追跡したが、ロボット 2 と地面の衝突により軌道から外したときが存在する。図 6.8~図 6.10 に三つの比例係

数 A を用いて両ロボットの歩行が安定した後の歩行周期は入力信号の周期 T_{set} との関係を示す。図 6.8 より、比例係数 $A = 0.1$ のとき、両ロボットを同期させることができる入力の周期の範囲は、 $T_{\text{set}} = 0.7125$ [s] から $T_{\text{set}} = 0.7175$ [s] までであることが分かる。図 6.9 から、 $A = 0.5$ の場合、両ロボットが同期する入力範囲は $T_{\text{set}} = 0.6975$ [s] から $T_{\text{set}} = 0.7275$ [s] までとなり、 $A = 0.1$ の場合と比べて大幅に拡大したことが確認できる。しかし、図 6.10 に示すように、 A の値を 1 に増加しても同期範囲が大きくなれなく、逆に少し小さくなった。このことから、両ロボットの同期範囲はロボット 1 の Z の方向の床反力の制御に影響されることがわかる。図 6.11 は比例係数 A を 0.1 から 1 まで増加するにより両ロボットの同期範囲の変化を示す。この図によると比例係数 $A = 0.8$ のとき、両ロボットの同期範囲が一番大きくなっていることが分かる。

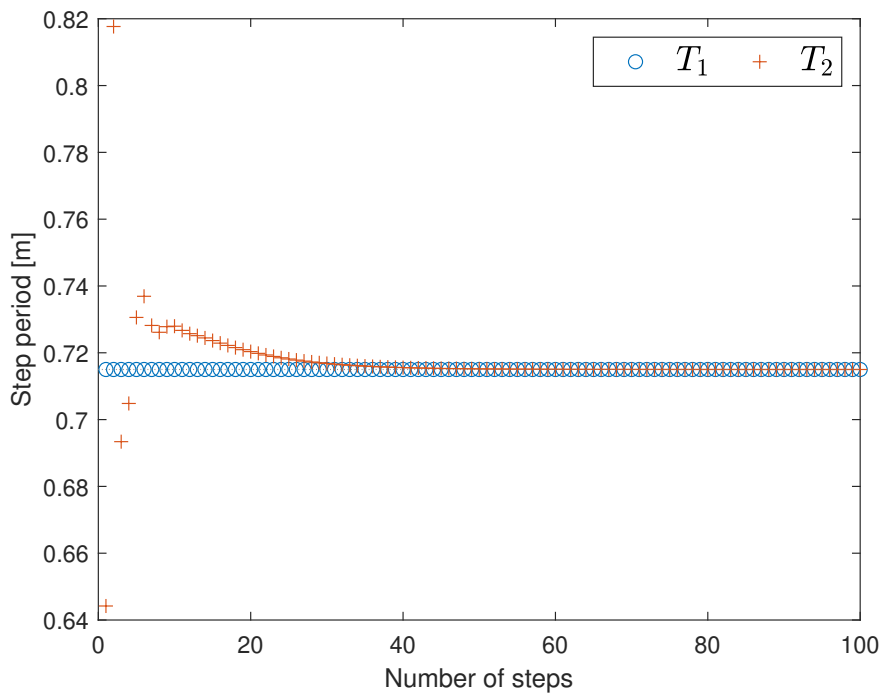


図 6.2: 振動的な下り斜面上のロボット 1 とロボット 2 の歩行周期

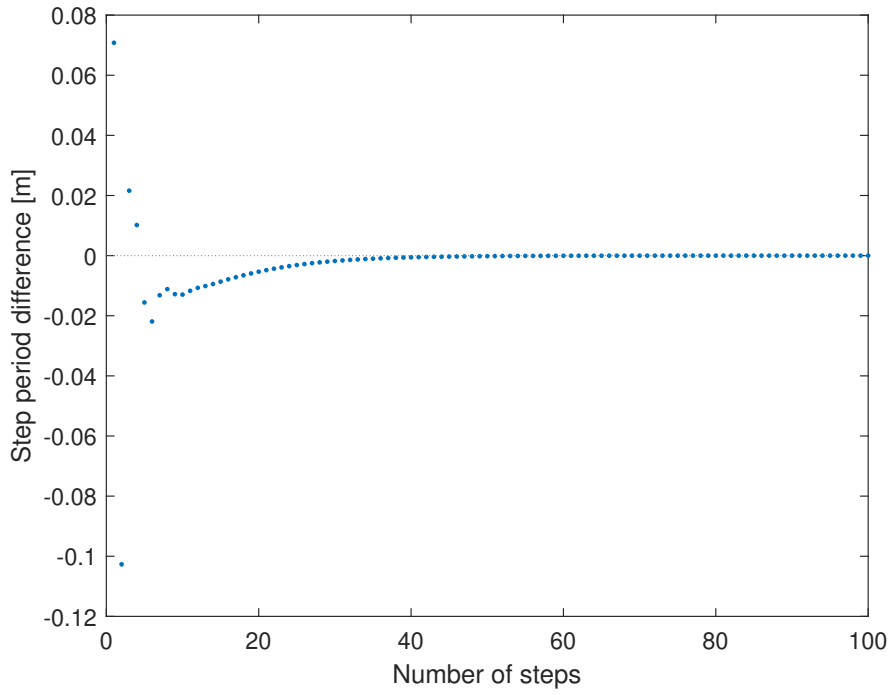


図 6.3: 振動的な下り斜面上のロボット 1 とロボット 2 の歩行周期の差

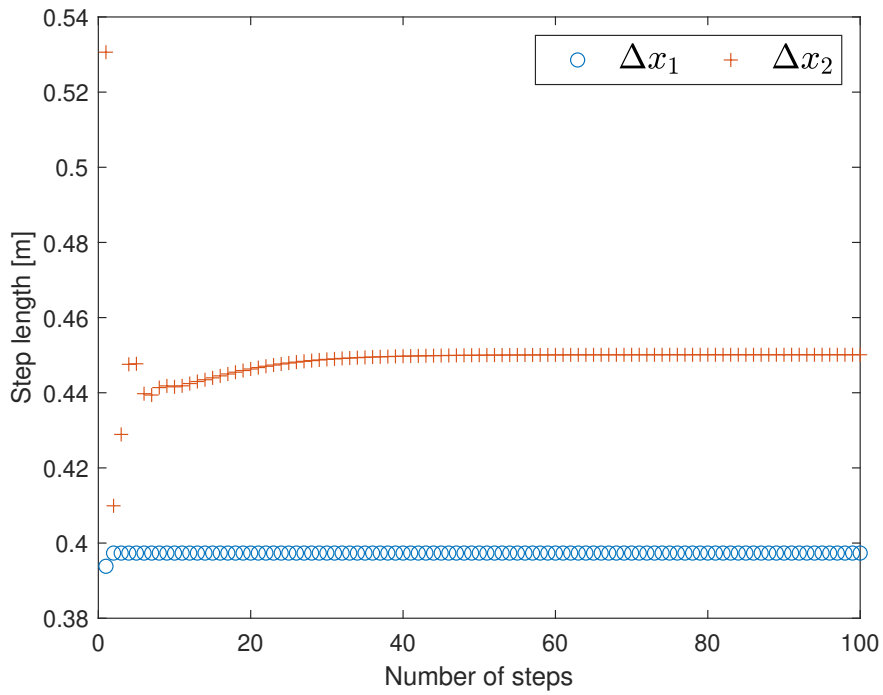


図 6.4: 振動的な下り斜面上のロボット 1 とロボット 2 の歩幅

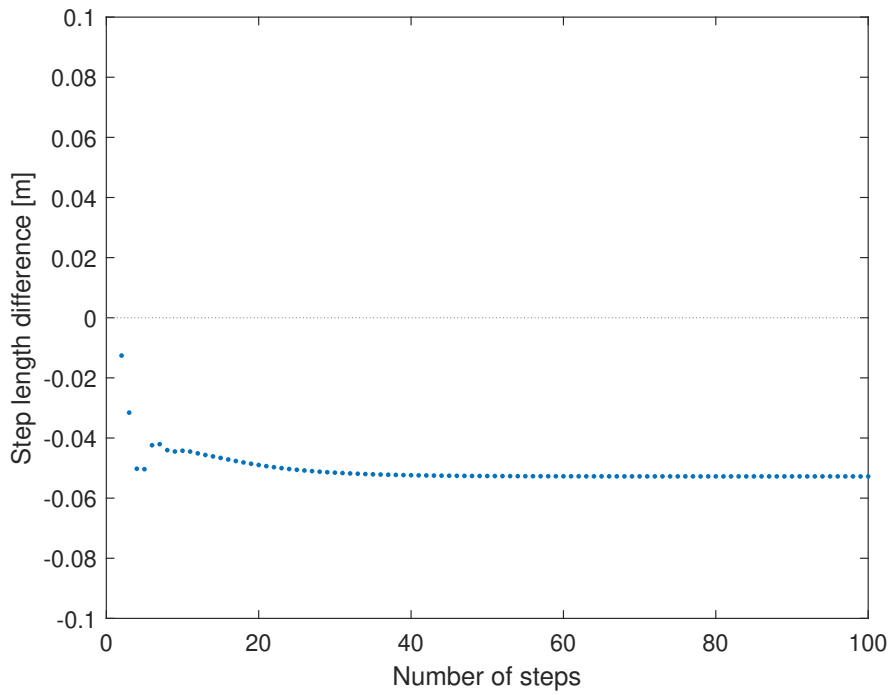


図 6.5: 振動的な下り斜面上のロボット 1 とロボット 2 の歩幅の差

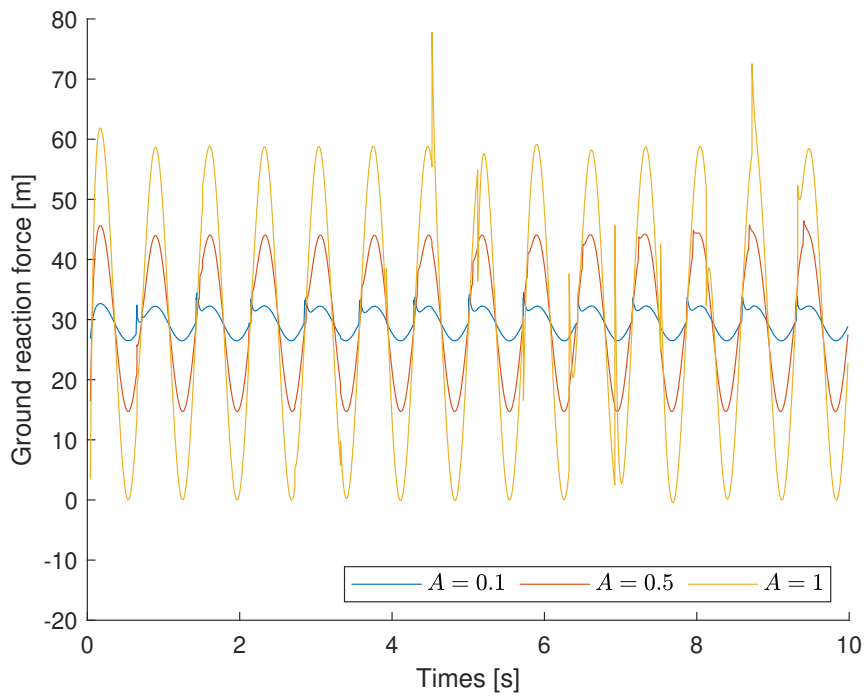


図 6.6: 振動的な下り斜面上のロボット 1 の Z 方向の床反力

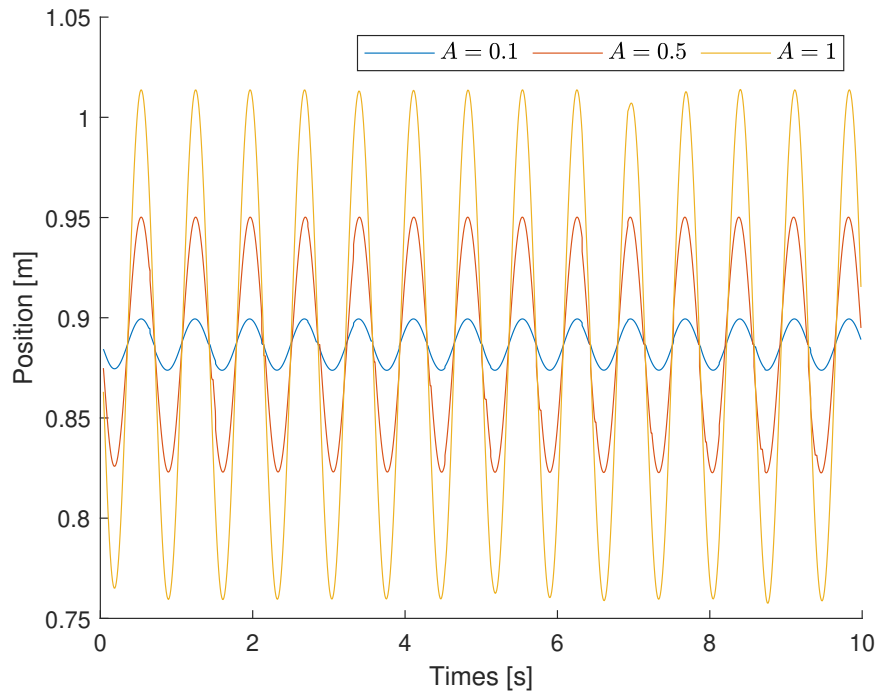


図 6.7: 振動的な下り斜面上のロボット 1 の Z 方向の重心位置

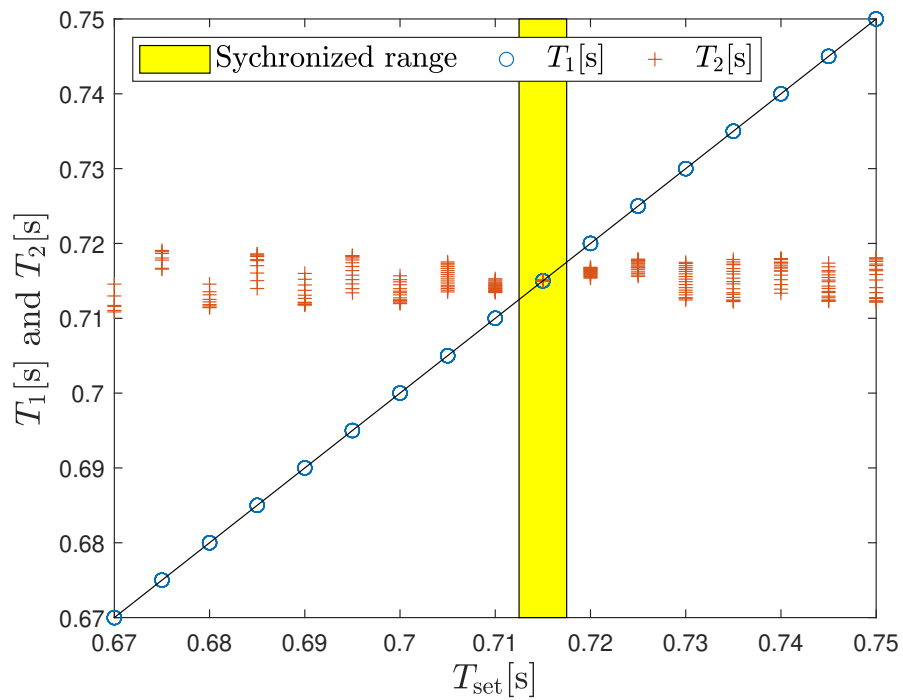


図 6.8: 振動的な下り斜面上のロボット 1 とロボット 2 の歩行周期, $A = 0.1$

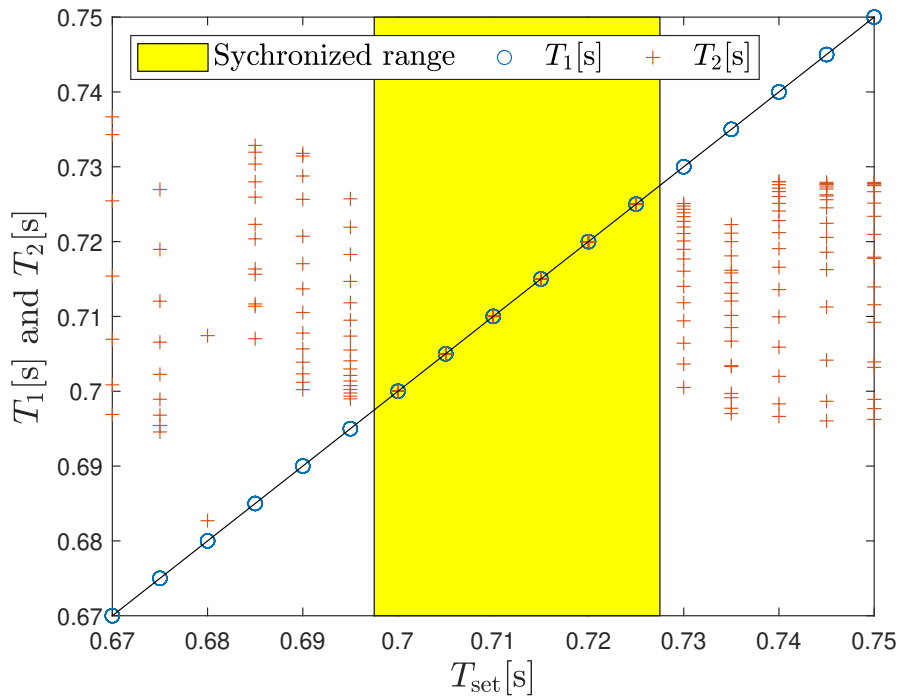


図 6.9: 振動的な下り斜面上のロボット 1 とロボット 2 の歩行周期, $A = 0.5$

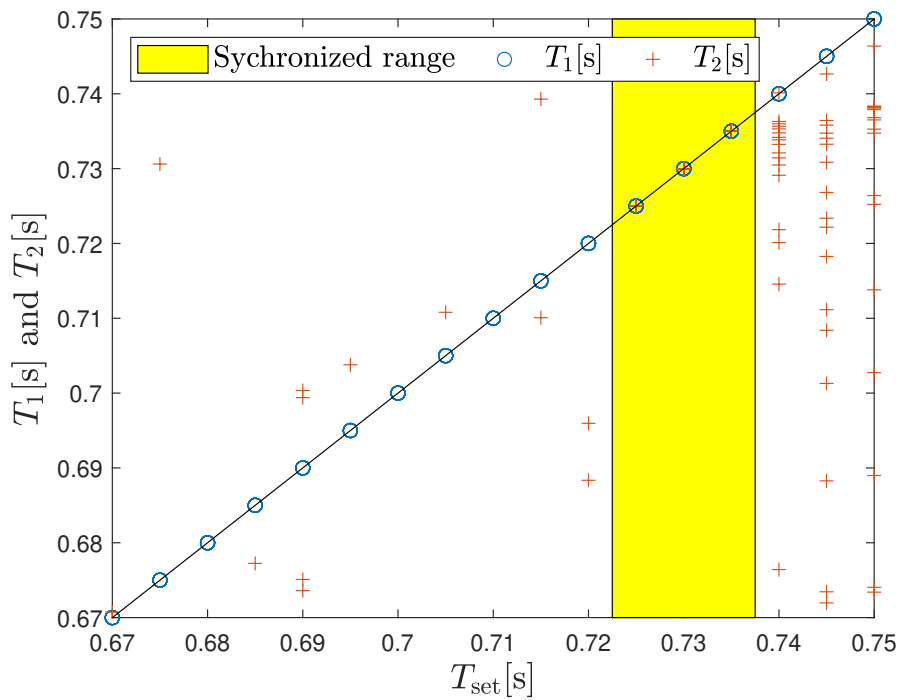


図 6.10: 振動的な下り斜面上のロボット 1 とロボット 2 の歩行周期, $A = 1.0$

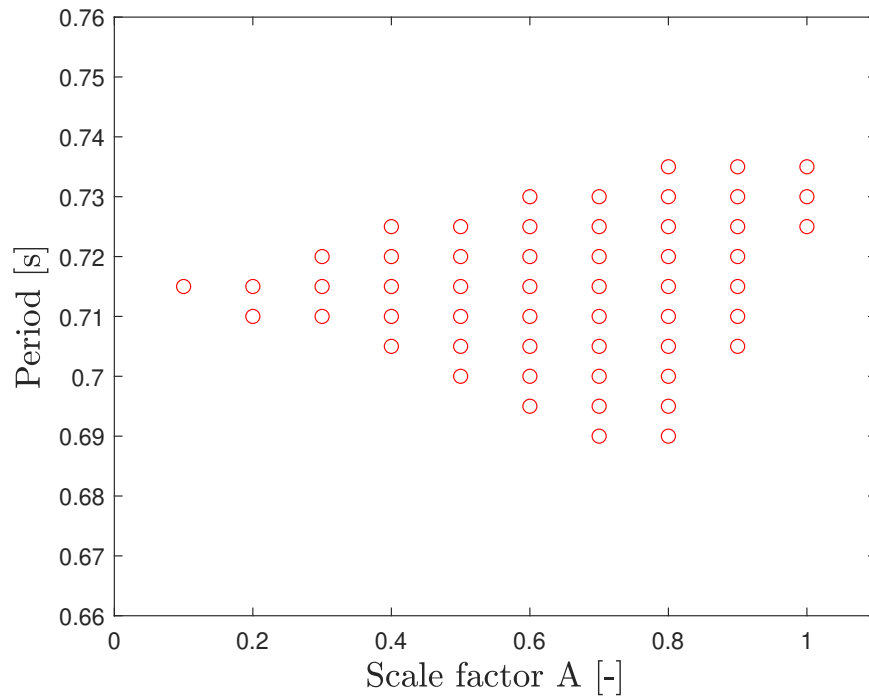


図 6.11: 振動的な下り斜面上のロボット 1 とロボット 2 の同期範囲

第7章 結言

7.1 結論

本論文では、伸縮関節をもつ上半身とフライホイールを有する2脚ロボットの数学モデルを構築した。数値シミュレーションを通して、このロボットの普通路面と低摩擦路面および振動的な低摩擦路面上でのステルス歩行について解析した。鉛直方向の床反力を定数に保つことによって、ロボットが一定な歩幅で任意周期のステルス歩行を実現でき、超高速ステルス歩行が達成した。そして、水平方向の床反力をゼロに制御するにより、低摩擦路面上および振動的な低摩擦路面上での高速ステルス歩行が実現した。また、ロボットの歩行効率は歩行周期の減少によって増大することが分かった。さらに、振動的な斜面上で股間に入力を持つ1台のコンパス型ロボットを駆動源として2台のコンパス型ロボット同期制御を行い、路面の粘性係数および入力周期と振幅が同期制御における影響を分析した。最後に、伸縮関節をもつ上半身とフライホイールを有する2脚ロボットを駆動源として、斜面上で鉛直方向の床反力を正弦波のように制御することで、コンパス型ロボットとの同期制御が実現できることを示した。簡単な入力を持つコンパス型ロボットとくらべて、本論文が提案する鉛直方向の床反力の制御を利用するロボットの方が、より速く2台のロボットを同期させること、同期可能な歩行周期の領域を拡大することが分かった。

7.2 今後の課題

振動的な路面上でロボットのゼロダイナミクスとなるフライホイールが適切な初期状態を設置するしても安定することができなかった、振動的な路面に対して、新たな制御方法を考慮する必要がある。ロボットが高速ステルス歩行をするときの歩行効率の改善も重要な課題となる。また、本論文はただ1台のロボットを駆動源としてもう1台の受動ロボットとの同期制御を行った。将来、受動ロボットの数を2台以上に増加して、群ロボットの同期制御を試す。実際のロボットへの応用も考慮すると、任意な初期状態でゼロダイナミクスが安定できる制御則を構築することは重要であると考えられる。

謝辞

本研究を進めるにあたり，私に熱心なご指導に加えて日々の生活についてもサポートして頂いた浅野文彦先生に心より感謝致します．研究内容について私に貴重な意見を頂いた郷右近英臣先生，平石邦彦先生，白井清昭先生に心より感謝致します．研究や生活において助けてくれた浅野研究室の博士鄭彦秋先輩，顔聡先輩と同僚生の何ゲツトウさん，陳皓嵩さんに心より感謝致します．特に最初から丁寧に指導して頂いた顔聡先輩に感謝致します．素晴らしい研究条件を提供してくれた北陸先端科学技術大学院大学に感謝致します．JAISTで貴重な知識を教えてくださいました先生の方に感謝致します．特に，解析力学を教えてくださいましたHO Anh-Van先生に心より感謝致します．また，日々の勉強や生活サポートしてくれた学校のスタッフの方々にも感謝を致します．最後にこれまで支えてくれた家族と友人にも感謝致します．

参考文献

- [1] T. McGeer. “Passive dynamic walking,” *The International Journal of Robotics Research*, vol. 9, no. 2, pp.62–82(1990)
- [2] WL. Ma, Y. Or, AD. Ames, “Dynamic walking on slippery surfaces: Demonstrating stable bipedal gaits with planned ground slippage,” *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.3705–3711(2019)
- [3] K. Kaneko, F. Kanehiro, S. Kajita. “Slip observer for walking on a low friction floor,” *Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp.634-640(2005)
- [4] S. Collins, A. Ruina, R. Tedrake, and M. Wisse. “Efficient bipedal robots based on passive-dynamic walkers,” *Science (New York, N.Y.)*, vol.307, no.5712, pp.1082–1085(2005)
- [5] E. R. Dunn and R. D. Howe, “Towards smooth bipedal walking,” *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.2489–2494(1994)
- [6] C. K. Reddy and R. Pratap. “A passive hopper with lossless collisions,” *IUTAM Symposium on Nonlinearity and Stochastic Structural Dynamics*, pp.209–220(2001)
- [7] A.Chatterjee, R. Pratap, C. Reddy, and A. Ruina. “Persistent passive hopping and juggling is possible even with plastic collisions,” *The International Journal of Robotics Research*, vol. 21, no. 7, pp.621–634(2002)
- [8] M.W. Gomes and K. Ahlin. “Quiet (nearly collisionless) robotic walking,” *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.5761–5766(2015)
- [9] F. Asano, Y. Zheng and X. Xiao. “Generation of Underactuated Bipedal Gait Completing in One Step,” *Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp.2050–2055(2016)
- [10] Gomes M and Ruina A. “Walking model with no energy cost,” *Physical Review E*, vol. 83, no. 3, 032901(2011)

- [11] H. Shibata and F. Asano. “Strict stealth walking gait generation for 3-link underactuated biped robots,” *Artificial Life and Robotics*, vol. 25, no. 4 pp.603–611(2020)
- [12] F. Asano. “Modeling and Control of Stable Limit Cycle Walking on Floating Island,” *Proc. of 2021 IEEE/ICM International Conference on Mechatronics*, pp.1–6(2021)
- [13] T. Chyou, GF. Liddell and MG. Paulin. “An upper-body can improve the stability and efficiency of passive dynamic walking,” *Journal of theoretical biology*, vol. 285, no. 1, pp. 126–135(2011)
- [14] T. L. Brown and J. P. Schmiedeler. “Reaction wheel actuation for improving planar biped walking efficiency,” *IEEE transactions on robotics*, Vol. 32, No. 5, pp. 1290–1297(2016)
- [15] P. Dallard, A. J. Fitzpatrick, A. Flint, S. Le Bourva, A. Low, R. M. Ridsdill Smith and M. Willford. “The London millennium footbridges,” *Structural Engineer*, vol. 79, no. 22, pp. 17–21, (2001)
- [16] Y. Fujino, BM .Pacheco, SI. Nakamura and P. Warnitchai. “Synchronization of human walking observed during lateral vibration of a congested pedestrian bridge,” *Earthquake engineering & structural dynamics*, vol. 22, no. 9, pp. 741–758(1993)
- [17] S. H. Strogatz, D. M. Abrams, A. McRobie, B. Eckhardt and E. Ott. “Crowd synchrony on the Millennium Bridge,” *Nature*, vol. 438, no. 7064, pp. 43–44(2005)
- [18] F. Asano and R. Liu. “Ultrahigh-speed strict stealth walking based on simultaneous control of horizontal and vertical ground reaction forces,” *Proc. of the 20th IEEE/ICAR Int. Conf. on Advanced Robotics*, pp.416–421(2021)