修士論文

揺動質量と脚運動の最適化に基づく連結型リムレスホイールの低摩擦路面上の安定歩容生成

2010128　CHEN Haosong

主指導教員　浅野　文彦
審査委員主審　浅野　文彦
審査委員　ホ アン ヴァン
平石　邦彦
白井　清昭

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４年５月

概要

本論文では，連結型リムレスホイールの前後脚を同期させ，胴体に前後揺動を取り付けることで，接地点まわり回転トルクと前後方向の並進力を互いに少ない干渉で作用させることが可能となる．ホイールの回転トルクは支持脚角度を制御するために，揺動の並進力は滑り運動を制御するために，それぞれを用いられる．支持脚角度の運動は出力追従制御で確実に生成できるが，滑り運動を制御する揺動質量はゼロダイナミクスとして振る舞うため，その状態が発散する可能性がある．これを如何に安定化するかという点に難しさがあり，その克服は容易でないと予想される．また前後脚・床面・胴体により平行四辺形の閉リンクが構成されるため，ホイールと胴体との間に印加する回転トルクは，接地点まわりの足首関節トルクとして機能できる．これは，Sliding limit cycle walking の実現における足首関節トルクの重要性を検討する初の試みである．以上の問題の検討を通して，脚式ロボット技術の発展に貢献する．

目 次

図 目 次

表 目 次

第1章　序論

1.1　研究背景

近年，高い適応能力をもつ脚移動ロボットの研究が盛んである．連結型リムレスホイールは従来に高い安定性を有しており，凍結した低摩擦路面上でも安定な歩行運動を継続できる頑健な脚式ロボットとして注目されている．さらに，その身体内部に取り付けられた能動的な揺動質量の間接励起を利用することで，歩行速度の制御が可能となることが示された．この揺動質量に潜在する力学的効果をさらに引き出すことで，より多機能かつ高性能な歩行運動を実現しようとする新しい試みが行われてきている．また，目標軌道を用いない周期性入力が歩行系に与える力学効果も注目されている．4 足歩行ロボットは，ほかの歩行ロボットシステムと比較して，より高速，頑健な歩容生成が可能であり，多くの研究者が 4 足歩行ロボットに注目されている．BigDog [1] は様々な動きをこなすことで，不整地で高い適応力を獲得している．また，ANYmal [2] による複雑な環境で，短い時間で次の着陸姿勢を計算され，多くの歩行パターンを生成できた．しかし，これらの試験では，エネルギー効率が大きな問題になる [3,4]．また，高速性とエネルギー効率を同時に保証することが困難であることを示された．4 足歩行ロボットに啓発され，リミットサイクルは脚式ロボットの効率的な運動方法と知られて，さまざまなリミットサイクル歩行器，2 足ロボット [5,6]，4 足ロボットと多足ロボットが開発され [7,8]，研究された．受動歩行では，ポテンシャルエネルギーがロボット前進のエネルギーを提供し，定常歩行が生成されることを示され，効率的な歩行パターンと認められた [9,10]．リミットサイクルウォークを生成することは難しくないが，それを実現するために必要なメカニズムは，まだ解明されていない．浅野，李，田中らの研究では連結リムレスホイール（Combined rimless wheel）受動歩行の歩行解析を行い，定常歩行が生成されることを示した [11–13]．ロボット内の揺動を改善することで，さらなる歩行速度の上昇とエネルギー効率の改善可能であることが示されている．リミットサイクル歩行における歩容の制御を目的として，身体内部に取り付けられた揺動質量の能動的な駆動による間接励起を利用する方法が新たに提案された [14,15]．この方法の利点の一つは，実装の容易さであり，多様な移動システムに適用の可能な点である．この歩行器の歩行周波数は，能動的な揺動質量の上下振動周波数に応じて変化する [16,17]．これまでの研究ではシミュレーションが中心に行われているのに対して，結果を実験的に検証することが重要な課題として残されていた．これまでの CRW モデルは滑らない路面

上の安定歩容生成を実現しており，低摩擦路面上の揺動質量を用いた連結型リムレスホイールの歩行試験をはまだ十分に検討されていない．本稿では，前後脚を同期した連結型リムレスホイール，胴体リンク，揺動質量から構成される CRW を対象として，数学モデルを導き，数値シミュレーションを行う．揺動による間接励起を利用した歩容生成について検討し，低摩擦路面上での揺動質量の運動軌跡及び地面の摩擦係数とそれに適した歩容生成について議論する．

1.2 研究目的

2 台の 8 脚リムレスホイールを胴体リンクで結合した連結型リムレスホイールを対象として，以下の問題に取り組む．モデル-1 として胴体リンクと鉛直方向上に沿って動作可能な能動的な揺動質量を二つを取り付け，前後ホイールが同期して，低摩擦路面上の歩容生成を実現し，そして，揺動質量の入力周期とロボットの周期の引き込み現象を解析し，説明する．モデル-2 として胴体リンク上に動作可能な能動的な揺動質量を取り付ける．このモデルでは，揺動質量とリンクの相対角度を変更できる．前後のホイールと胴体リンクは駆動力を印加できる回転関節で結合されており，これらと床面を併せて平行四辺形の閉リンク構造を構成可能である．前後のホイール（支持脚）の絶対角度が同期しているため胴体リンクはつねに水平状態に保たれる．この性質から，全体の水平方向の推進力あるいは重心位置を制御するために，さらにはシステム全体の励起を目的として，揺動質量を独立して利用することができる．またホイールの駆動力は脚リンクの回転運動を生成するために用いられる．揺動の並進運動と脚の回転運動を互いに少ない干渉で制御することで，低摩擦路面上のロバストな歩容生成を目指す．

1.3 本論文の構成

本論文では，本章を含む全 6 章から構成される．第 2 章では，二つの揺動質量を用いたの連結型リムレスホイール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．第 2 章のはじめには数学モデルを説明し，次に低摩擦路面上の歩容生成が可能な範囲を探す．適応力が高い入力と摩擦係数を見つけて，そのときのパラメータ下の引き込み現象と制御効果について説明した．第 3 章は第 2 章で発見した問題に対して，低摩擦路面上の歩容生成のとき，地面から離れない新しいモデルに取り組む．重心制御と支持脚の目標軌道追従を利用して，安定歩容生成の可能性を検討する．第 4 章は 1 つの 2 自由度の揺動質量を使て，ホイール間の回転トルクを駆動力として用いて，安定歩容生成可能条件を分析し，その入力下の歩行特性，リミットサイクルとエネルギー効率ついて議論する．次に，4 章のモデルを使って、低摩擦路面上の Ultrahigh-speed Stealth Walking(以下，USSW) を生成して、その制御方法を説明して、最後に歩行解析を数値的に行う．第 5 章

は，第 4 章の内容に基づいて，制御方法を変更し，USSW 歩容を生成する．最後に，第 6 章は本論文の結論と本モデルについて将来の課題を述べる．

第2章　CRWモデルの歩容生成1

2.1　数学モデルの導出

本章に扱う連結型リムレスホイールの数学モデルを図 (2.1) に示す．前後リムレスホイールについて，質量は $m_1[kg]$ と m_2[kg]，足の長さは l_1[m] と置く．前輪の中心点から後輪の中心点まで，連結リンクがあり，質量は m_3[m] と置く，前輪中心点からリンク後輪中心点まで長さは l_2[m] とする．また，後輪のリムレスホイールの支持脚の鉛直方向から絶対角度を θ_1[rad]，前輪のリムレスホイールの支持脚の鉛直方向から絶対角度を θ_2[rad] と置く．後輪のリムレスホイールの接地点座標は (x_1, z_1)，前輪のリムレスホイールの接地点座標は (x_2, z_2)，リンク中心点の座標は (x_3, z_3) とする．連結リンクと水平方向の絶対角度は θ_3[rad] とする．リンクの中心点に揺動質量が 2 つあり，揺動質量の重さは m_4[kg]，水平方向の揺動質量と連結型リムレスホイールの相対変位は l_3[m]，入力 u_1[N] は l_3 の長さを制御し，鉛直方向の揺動質量の重さは m_5[kg] であり，鉛直方向の揺動質量と連結型リムレスホイールの相対変位は l_4，入力 u_2[N] は l_4 の長さを制御する．

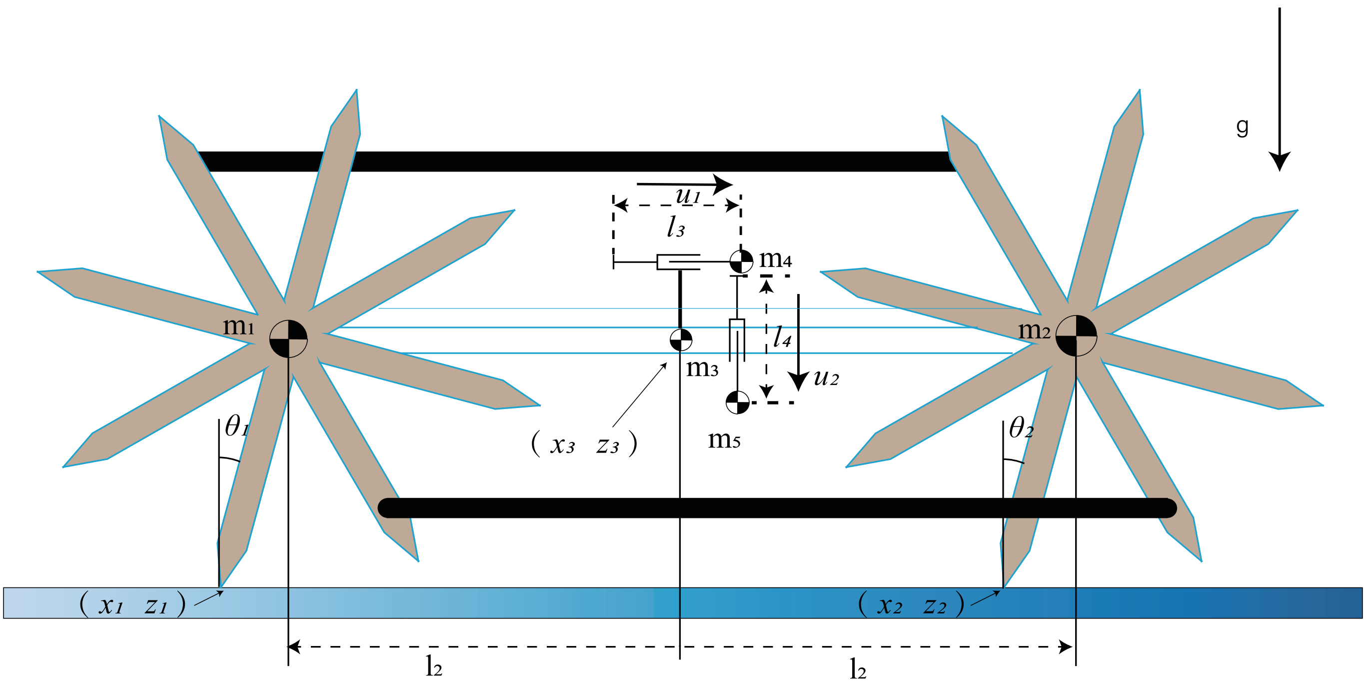

図 2.1: 2 つの揺動質量の入力-RW モデル

全体の一般化座標ベクトルを $\boldsymbol{q}=\left[\begin{array}{ccccccccccc} x_1 & z_1 & \theta_1 & x_2 & z_2 & \theta_2 & x_3 & z_3 & \theta_3 & l_3 & l_4 \end{array}\right]^{\mathrm{T}}$ とすると，前後輪のリムレスホイールを同期運動と仮定する．そして，モデル運動方程式は

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{h} = \boldsymbol{S}\boldsymbol{u} + \boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\lambda} + \boldsymbol{J}_{\mu}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\lambda} \tag{2.1}$$

$$\boldsymbol{J}\dot{\boldsymbol{q}} = \boldsymbol{0} \tag{2.2}$$

となる．ここで，$\boldsymbol{M}$ は慣性行列，$\boldsymbol{h}$ はコリオリ力と重力項の組み合わせ，中心力を表す．また，$\boldsymbol{S}u$ は制御入力項，$\boldsymbol{J}$ は拘束条件項，$\boldsymbol{J}_{\mu}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\lambda}$ は摩擦力項である．$\boldsymbol{M}$ 行列の詳細は，

$$\boldsymbol{M} = \begin{bmatrix} M_1 & \boldsymbol{0}_{3\times3} & \boldsymbol{0}_{3\times3} & \boldsymbol{0}_{1\times3} & \boldsymbol{0}_{1\times3} \\ \boldsymbol{0}_{3\times3} & M_2 & \boldsymbol{0}_{3\times3} & \boldsymbol{0}_{1\times3} & \boldsymbol{0}_{1\times3} \\ \boldsymbol{0}_{3\times3} & \boldsymbol{0}_{3\times3} & M_3 & \boldsymbol{0}_{1\times3} & \boldsymbol{0}_{1\times3} \\ \boldsymbol{0}_{3\times1} & \boldsymbol{0}_{3\times1} & \boldsymbol{0}_{3\times1} & m_x & 0 \\ \boldsymbol{0}_{3\times1} & \boldsymbol{0}_{3\times1} & \boldsymbol{0}_{3\times1} & 0 & m_z \end{bmatrix} \tag{2.3}$$

その中で、M_1, M_2, M_3 は質量 m_1, m_2, m_3 の慣性行列である．本章のモデルには，$\theta_1 = \theta_2$，θ_3 は連結リンクと水平方向の角度である．簡単化の一般化座標ベクトル $\boldsymbol{q}=\left[\begin{array}{ccccccc} x & z & \theta_1 & \theta_2 & \theta_3 & l_3 & l_4 \end{array}\right]^{\mathrm{T}}$ になる．そして、M 行列は
$\boldsymbol{M}=$

$$\begin{bmatrix} m_{all} & 0 & l_1 m_{all}\cos\theta_1 & 0 & M_{51} & m_4\cos\theta_3 & m_5\sin\theta_3 \\ 0 & m_{all} & -l_1 m_{all}\sin\theta_1 & 0 & M_{52} & m_4\sin\theta_3 & m_5\cos\theta_3 \\ l_1 m_{all}\cos\theta_1 & -l_1 m_{all}\sin\theta_1 & i_1 + l_1^2 m_{all} & 0 & M_{53} & l_1 m_4 C_{1+3} & -l_1 m_5 S_{1-3} \\ 0 & 0 & 0 & i_1 & 0 & 0 & 0 \\ M_{15} & M_{25} & M_{35} & 0 & M_{55} & 0 & l_2 m_5\cos 2\theta_3 \\ m_4\cos\theta_3 & m_4\sin\theta_3 & l_1 m_4 C_{1+3} & 0 & 0 & m_4 & 0 \\ m_5\sin\theta_3 & m_5\cos\theta_3 & -l_1 m_5 S_{1-3} & 0 & l_2 m_5\cos 2\theta_3 & 0 & m_5 \end{bmatrix} \tag{2.4}$$

$S_{1+3} = \sin(\theta_1 + \theta_3)$.
$S_{1-3} = \sin(\theta_1 - \theta_3)$.
$C_{1+3} = \cos(\theta_1 + \theta_3)$.
$C_{1-3} = \cos(\theta_1 - \theta_3)$.
m_{all}=m_1+m_2+m_3+m_4+m_5.
$m_6 = l_3 m_4 + l_2(2m_2 + m_3 + m_4 + m_5)$.
$m_7 = 2m_2 + m_3 + m_4 + m_5$.
$M_{55} = i_2 + 2l_2 l_3 m_4 + l_3^2 m_4 + l_4^2 m_5 + l_2^2 m_{234} - 4l_2 l_4 m_5 \cos\theta_3 \sin\theta_3$.
$M_{51} = M_{15} = l_4 m_5 \cos\theta_3 - m_6 \sin\theta_3$.
$M_{52} = M_{25} = m_6 \cos\theta_3 - l_4 m_5 \sin\theta_3$.
$M_{53} = M_{35} = l_1 l_4 m_5 C_{1-3} - l_1 m_6 S_{1+3}$.

である．なお，中心力・コリオリ力と重力項の詳細は

$$
\boldsymbol{h} = \begin{bmatrix}
-\dot{\theta}_3(\dot{\theta}_3 l_3 m_4 - 2\dot{l}_4 m_5 + \dot{\theta}_3 l_2 m_7)\cos\theta_3 - \dot{\theta}_1^2 l_1 m_{all}\sin\theta_1 - \dot{\theta}_3 m_8 \sin\theta_3 \\
m_{all}(g - \dot{\theta}_1^2 l_1 \cos\theta_1) + \dot{\theta}_3 m_8 \cos\theta_3 - \dot{\theta}_3(\dot{\theta}_3 l_3 m_4 + 2\dot{l}_4 m_5 + \dot{\theta}_3 l_2 m_7)\sin\theta_3 \\
-l_1(-2\dot{l}_4\dot{\theta}_3 m_5 C_{1-3} + \dot{\theta}_3^2 m_6 C_{1+3} + g m_{all}\sin\theta_1 + \dot{\theta}_3 m_8 \cos\theta_3 \sin\theta_1 + \dot{\theta}_3 m_8 \cos\theta_1 \sin\theta_3) \\
0 \\
H_{15} \\
m_4(\dot{\theta}_3^2(l_2 + l_3) - g\sin\theta_3 + \dot{\theta}_1^2 l_1 S_{1+3}) \\
-m_5(\dot{\theta}_1^2 l_1 C_{1-3} - g\cos\theta_3 + \dot{\theta}_3(l_4 + l_2 \sin 2\theta_3))
\end{bmatrix} \tag{2.5}
$$

$m_8 = 2\dot{l}_3 m_4 + \dot{\theta}_3 l_4 m_5$.
$H_{15} = 2\dot{\theta}_3(\dot{l}_3(l_2+l_3)m_4 + \dot{l}_4 l_4 m_5) + g m_6 \cos\theta_3 - 2\dot{\theta}_3^2 l_2 l_4 m_5 \cos 2\theta_3 - 2\dot{\theta}_1^2 l_1 l_2 m_2 C_{1+3} - \dot{\theta}_1^2 l_1 l_2 m_3 C_{1+3} - \dot{\theta}_1^2 l_1 l_2 m_4 C_{1+3} - \dot{\theta}_1^2 l_1 l_3 m_4 C_{1+3} - \dot{\theta}_1^2 l_1 l_4 m_5 S_{1-3} - g l_4 m_5 \sin\theta_3 - 2\dot{l}_4\dot{\theta}_3 l_2 m_5 \sin 2\theta_3$.
である．低摩擦路面に歩行するとき，水平方向に滑りが発生する，拘束条件は

$$
\dot{z} = 0, \dot{z}_2 = 0, \dot{x}_1 = \dot{x}_2. \tag{2.6}
$$

と記述される．拘束ヤコビ行列は

$$
\boldsymbol{J} = \begin{bmatrix}
0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 1 & -l_1\sin\theta_1 & l_1\sin\theta_2 & l_2\cos\theta_3 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0
\end{bmatrix} \tag{2.7}
$$

である．摩擦力ヤコビ行列は

$$
\boldsymbol{J}_\mu = \begin{bmatrix}
\mu_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\mu_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0
\end{bmatrix} \tag{2.8}
$$

と置いた．制御入力項の詳細は

$$
\boldsymbol{Su} = \begin{bmatrix}
0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1
\end{bmatrix}
\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \tag{2.9}
$$

である．本研究では，クーロン摩擦モデルを使用しており μ は次のように表示する．

$$
\mu_i = -\mu \tanh(c\dot{x}_i) \tag{2.10}
$$

c は正の定数でおり，$\dot{x}$=0 の近くに摩擦係数をゼロに調整し，シミュレーションを行う．式 (2.2) を 2 階微分すると，

$$\boldsymbol{J}\ddot{\boldsymbol{q}} = -\dot{\boldsymbol{J}}\dot{\boldsymbol{q}} \tag{2.11}$$

になる．そして，式 (2.1) の運動方程式を解いて $\ddot{\boldsymbol{q}}$ を求めて，次のように表示する．

$$\ddot{\boldsymbol{q}} = \boldsymbol{M}^{-1}(\boldsymbol{S}\boldsymbol{u} + \boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\lambda} + \boldsymbol{J}_{\mu}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\lambda} - \boldsymbol{h}) \tag{2.12}$$

式 (2.12) を (2.11) に代入すると，$\boldsymbol{\lambda}$ は以下のように表示される．

$$\begin{aligned} \boldsymbol{J}_h &:= \boldsymbol{J} + \boldsymbol{J}_{\mu} \\ \boldsymbol{X} &:= \boldsymbol{J}\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{J}_h^{\mathrm{T}} \\ \boldsymbol{\lambda} &= -\boldsymbol{X}^{-1}(\boldsymbol{J}\boldsymbol{M}^{-1}(\boldsymbol{S}\boldsymbol{u} - \boldsymbol{h}) - \dot{\boldsymbol{J}}\dot{\boldsymbol{q}}) \end{aligned} \tag{2.13}$$

また，式 (2.13) を式 (2.1) に代入すると，$\boldsymbol{M}^{-1}$ をかけ，$\ddot{\boldsymbol{q}}$ について整理して，次のようになる．

$$\begin{aligned} \boldsymbol{Y} &:= \boldsymbol{I}_4 - \boldsymbol{J}_h^{\mathrm{T}}\boldsymbol{X}^{-1}\boldsymbol{J}\boldsymbol{M}^{-1} \\ \ddot{\boldsymbol{q}} &= \boldsymbol{M}^{-1}(\boldsymbol{Y}(\boldsymbol{S}\boldsymbol{u} - \boldsymbol{h}) - \boldsymbol{J}_h^{\mathrm{T}}\boldsymbol{X}^{-1}\dot{\boldsymbol{J}}\dot{\boldsymbol{q}}) \end{aligned} \tag{2.14}$$

2.2 制御系設計

$L_x[m]$ と $L_z[m]$ が制御出力を仮定する．これは，次のように書くことができる．

$$L_x = \boldsymbol{S}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{q}, L_z = \boldsymbol{S}_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{q} \tag{2.15}$$

$\boldsymbol{S}_1, \boldsymbol{S}_2$ の詳細は

$$\boldsymbol{S} = \begin{bmatrix}\boldsymbol{S}_1 & \boldsymbol{S}_2\end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.16}$$

水平方向の揺動質量の軌跡を時間に対しての 2 階微分は次のようになる．

$$\begin{aligned} \ddot{L}_x &= \boldsymbol{S}_1^{\mathrm{T}}\ddot{\boldsymbol{q}} \\ &= \boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{Y}(\boldsymbol{S}_1 u_1 - \boldsymbol{h}) - \boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{J}^{T}\boldsymbol{X}^{-1}\dot{\boldsymbol{J}}\dot{\boldsymbol{q}} \\ &= A_1(l_x)u_1 + B_1(l_x,\dot{l}_x) \end{aligned} \tag{2.17}$$

$$\begin{aligned} \ddot{L}_z &= \boldsymbol{S}_2^{\mathrm{T}}\ddot{\boldsymbol{q}} \\ &= \boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{Y}(\boldsymbol{S}_2 u_2 - \boldsymbol{h}) - \boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{J}^{T}\boldsymbol{X}^{-1}\dot{\boldsymbol{J}}\dot{\boldsymbol{q}} \\ &= A_2(l_z)u_2 + B_2(l_z,\dot{l}_z) \end{aligned} \tag{2.18}$$

そして，L_x と L_z は次の軌道 L_{xd} と L_{zd} を厳密に追跡する．

$$\begin{aligned} L_{xd}(t) &= A_{m1}\sin(2\pi f_c t) \\ L_{zd}(t) &= A_{m2}\sin(2\pi f_c t) \end{aligned} \tag{2.19}$$

ここで，K_P と K_D は PD 制御の係数であり，正の定数と置いた．L_{xd} と L_{zd} は L_x と L_z の時間に関する目標追跡関数である．詳しくは

$$\begin{aligned} u_1 &= A_1(l_x)^{-1}(v_1 - B_1(l_x,\dot{l_x})) \\ v_1 &= \ddot{l}_{xd}(t) + K_D(\dot{l}_{xd}(t) - \dot{l}_x) + K_P(l_{xd}(t) - l_x) \end{aligned} \tag{2.20}$$

$$\begin{aligned} u_2 &= A_2(l_z)^{-1}(v_2 - B_2(l_z,\dot{l_z})) \\ v_2 &= \ddot{l}_{zd}(t) + K_D(\dot{l}_{zd}(t) - \dot{l}_z) + K_P(l_{zd}(t) - l_x) \end{aligned} \tag{2.21}$$

となる．

2.3 衝突方程式

ロボットの遊脚が地面と衝突したとき，接地点は地面から浮上しないと仮定する．

$$\dot{z}^+ = 0 \tag{2.22}$$

ロボットの遊脚が地面と衝突する際に非弾性衝突の方程式と拘束条件は次のように記述される．

$$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{q}}^+ = \boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{q}}^- - \boldsymbol{J}_I(\boldsymbol{q})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\lambda}_I \tag{2.23}$$

$$\boldsymbol{J_I}(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{q}}^+ = 0 \tag{2.24}$$

拘束条件のヤコビ行列 $\boldsymbol{J_I}$ は

$$\boldsymbol{J}_I = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -l_1\sin\theta_1 - l_1\sin(\alpha-\theta_1) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -l_1\sin\theta_1 & -l_1\sin(\alpha-\theta_2) & -l_2\cos\theta_3 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{2.25}$$

となる．式 (2.22)(2.23) を連立して衝突後のスピード $\dot{\boldsymbol{q}}^+$ が求められる．

$$\dot{\boldsymbol{q}}^+ := (\boldsymbol{I}_4 - \boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{J}_I^{\mathrm{T}}\boldsymbol{X}_I^{-1}\boldsymbol{J}_I)\dot{\boldsymbol{q}}^- \tag{2.26}$$

ただし，

$$\boldsymbol{X}_I := \boldsymbol{J}_I\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{J}_I^{\mathrm{T}} \tag{2.27}$$

である．

2.4 シミュレーションの結果

2.4.1 数値シミュレーション方法

本章のシミュレーションのパラメータは表 (2.1) にされ，初期状態は式 (2.28)(2.29) に示す．シミュレーションの方法はアルゴリズム 1 に表示される．

表 2.1: RW ロボットのパラメータ

$m_1 = m_2$	1	kg
m_3	2	kg
m_4	0.5	kg
m_5	1	kg
$L_1 = L_2$	0.5	m
α	0.78	rad
Kd	20	
Kp	400	

$$\boldsymbol{q}(0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{\alpha}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{2.28}$$

$$\dot{\boldsymbol{q}}(0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{2.29}$$

2.4.2 シミュレーションの結果

図 (2.2) は，μ=0.5 のとき，$T_{\mathrm{set}} = 0.1$[s]，Am_1, Am_2 は 0.1[m] から 1[m] まで，0.05[m] づつ変化させ，歩行成功な範囲を表示する．横軸は Am_1，縦軸は Am_2，安定な歩容が成功と判断すれば，“∘”でプロットする．μ=0.5 の場合，T_{set} は 0.1[s] から、1[s] まで，0.1[s] づつ増加し，図（2.2）ような図が 10 個を生成した，図 (2.2)∼図 (2.8) は μ=0.5 得られた図である．その次，摩擦係数を 0.1,0.3,0.5,0.7 歩容が成功したパターンをとき，10 個の図を重ねて，同じ位置に現れた点の数を数え，図 (2.9) が得る．同じ方法を使って，図 (2.10)∼(2.12) を表示する。

Algorithm 1 Calculate amplitude Am_1 and A_{m2}

Require: Which A_{m1}, A_{m2} have the posibility to generate limit cycle walking
Input: Initial state $\boldsymbol{q}(0)$, $\dot{\boldsymbol{q}}(0)$, A_{m1}, A_{m2} and T_{set}
Output: Whether the robot could instant walk after 30 seconds

Initialization $Can[19][19][10] = 1$, $A_{m1} = A_{m2} = 0.1$ and $T_{\mathrm{set}} = 0.1$
for $i = 1; i <= 19 : i++$ **do**
    for $j = 1; j <= 19 : j++$ **do**
        for $k = 1; k <= 10 : k++$ **do**
            Run simulation for 30 seconds.
            if Robot falldown
                $Can[i][j][k] = 0$
            end
            $A_{m2} = A_{m2} + 0.05$
        end
        $A_{m1} = A_{m1} +_0 .05$
    end
    $T_{\mathrm{set}} = T_{\mathrm{set}} + 0.1$
end
Return Can

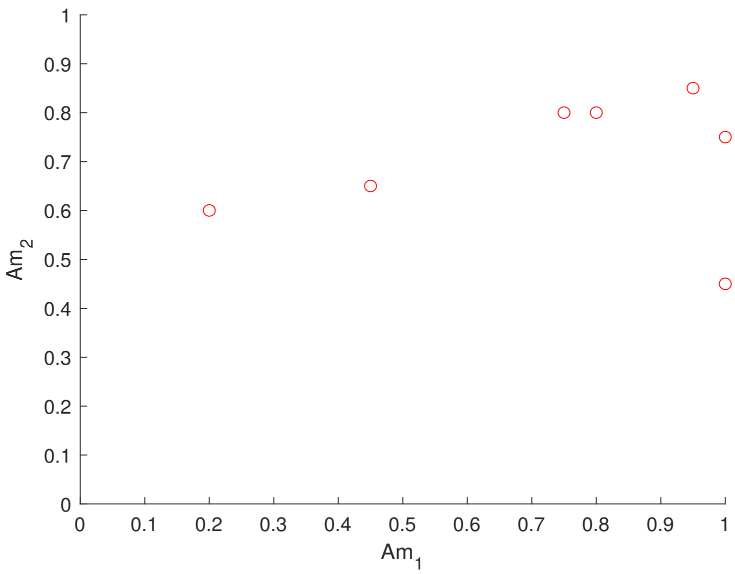

図 2.2: $\mu = 0.5$，T_{set}=0.1

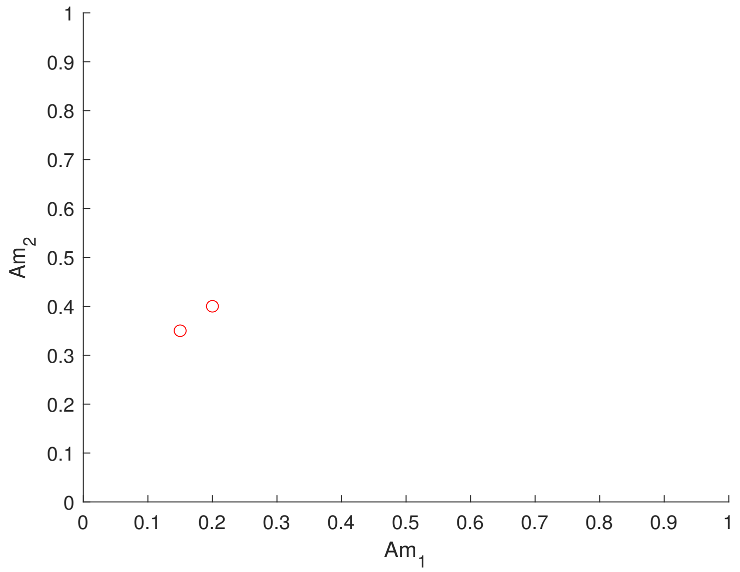

図 2.3: $\mu = 0.5$，T_{set}=0.3

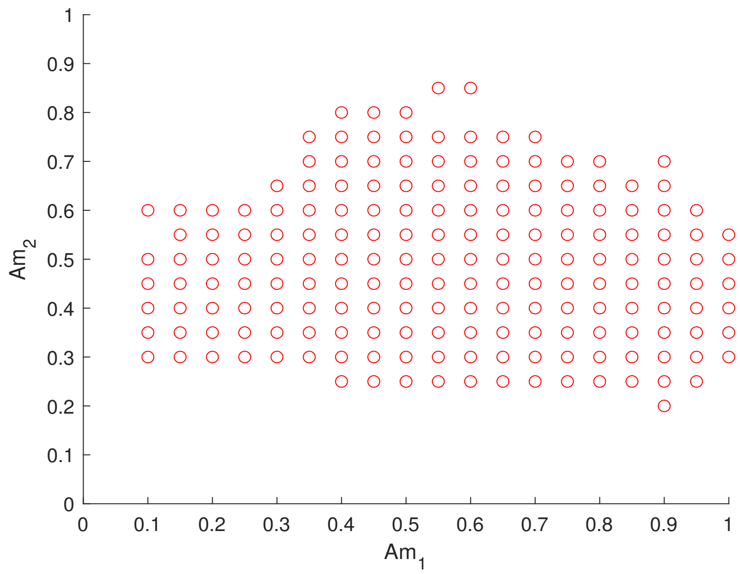

図 2.4: $\mu = 0.5$，T_{set}=0.4

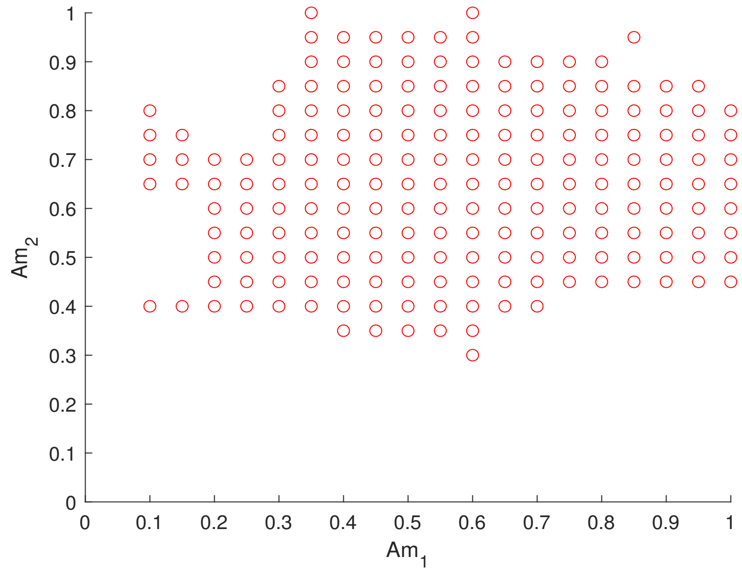

図 2.5: $\mu = 0.5$,T_{set}=0.5

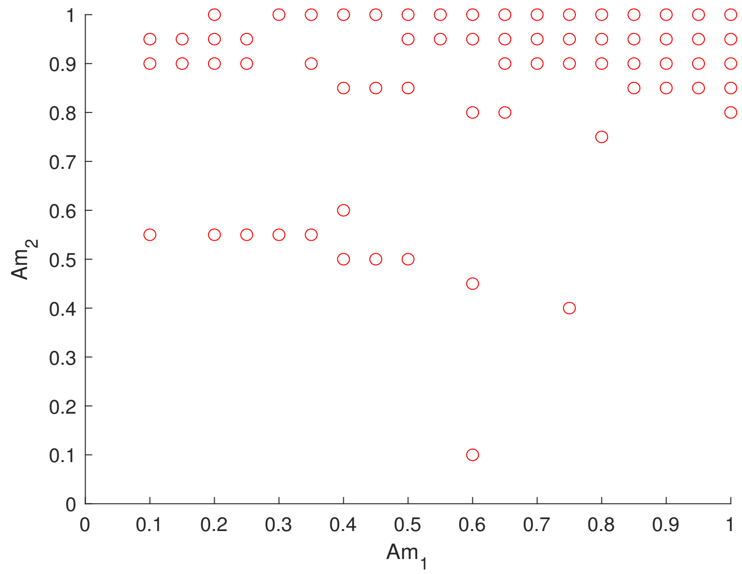

図 2.6: μ=0.5,T_{set}=0.6

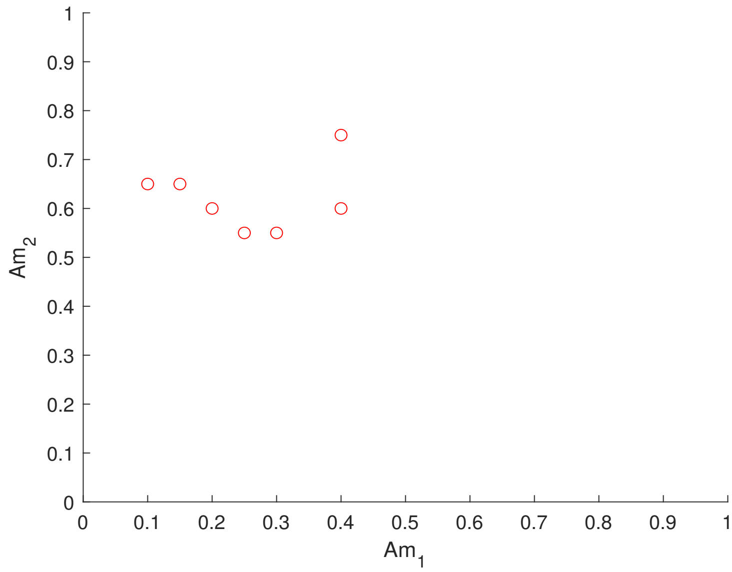

図 2.7: μ=0.5,T_{set}=0.7

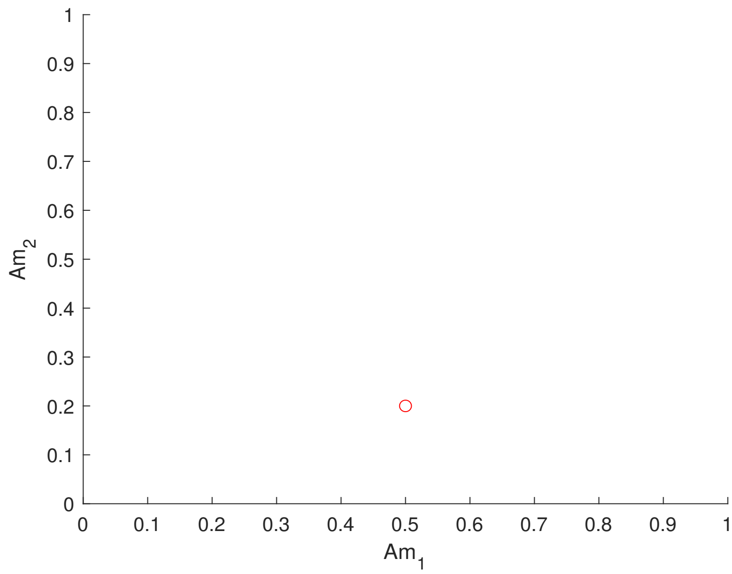

図 2.8: $\mu = 0.5$,T_{set}=0.9

図 (2.9)，(2.10)，(2.11)，(2.12) は μ=0.1，0.3，0.5，0.7 のとき，歩行可能な点の数を表現する図である，縦軸 times は T_{set} が 0.1∼1 中で現れた回数であり，高いほど，当入力（A_{m1}, A_{m2}）の場合，歩行成功した回数が多い．ここで，最も高い点が典型的な入力と考える．その次，典型的な点をまとめて，引き込み効果を分析する．

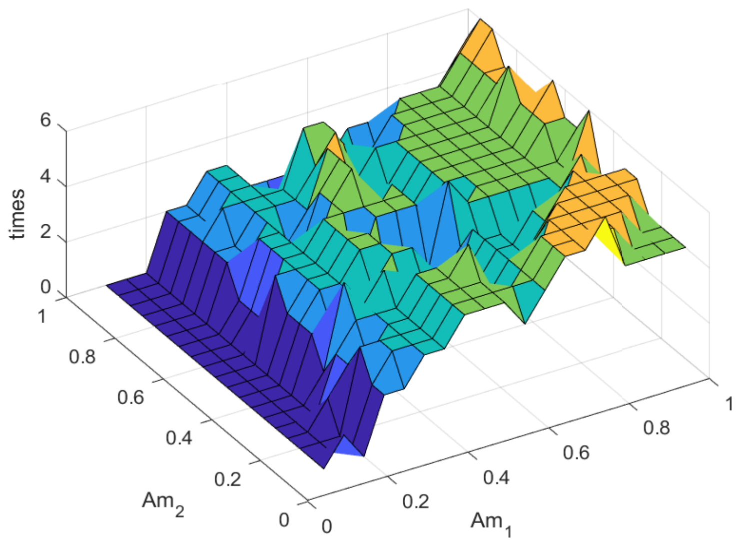

図 2.9: μ=0.1，各入力歩行成功の回数

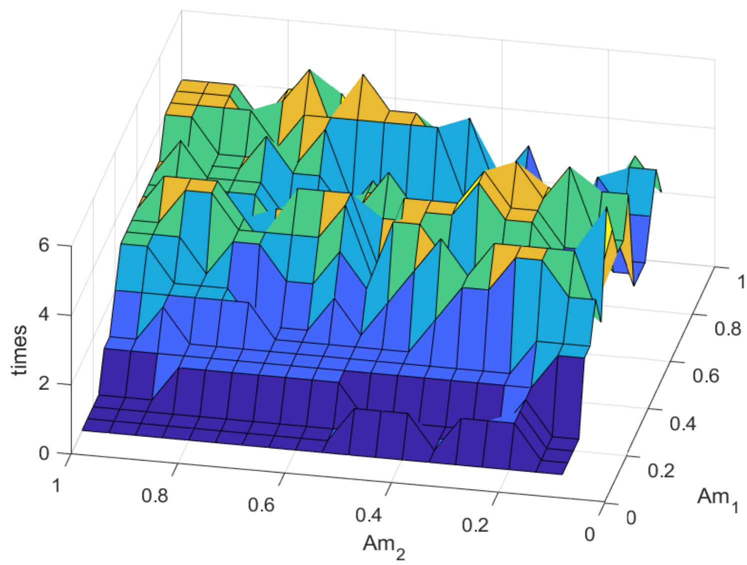

図 2.10: μ=0.3，各入力歩行成功の回数

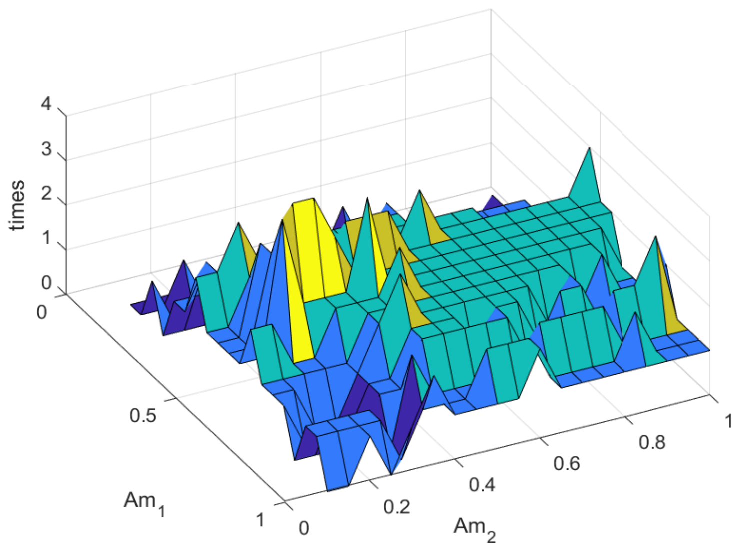

図 2.11: μ=0.5，各入力歩行成功の回数

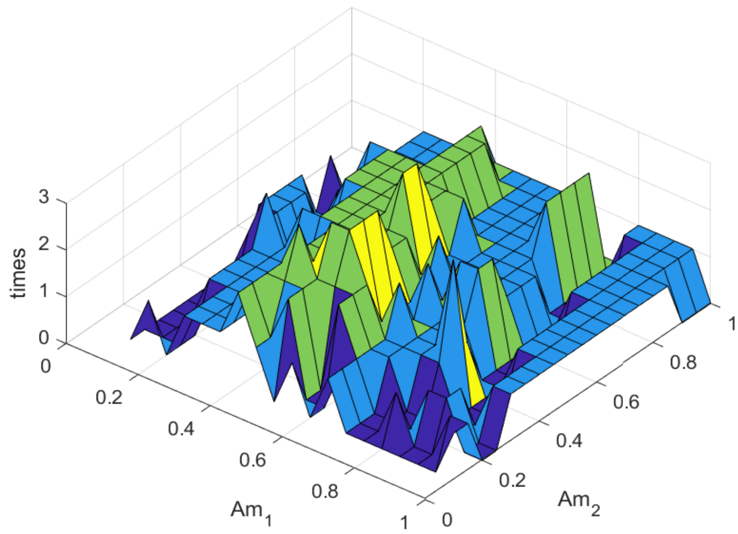

図 2.12: μ=0.7，各入力歩行成功の回数

その中で，典型的な入力は表 2.2～表 2.6 に示した．

表 2.2: μ=0.1 典型的な入力

Am_1	Am_2	times
0.8	0.1	6
0.95	0.75	6

表 2.3: μ=0.3 典型的な入力

Am_1	Am_2	times
0.5	0.1	5
0.55	0.35	5
0.6	0.35	5
0.65	0.2	5
0.65	0.3	5
0.95	0.65	5
0.95	0.75	5

表 2.4: μ=0．5 典型的な入力

Am_1	Am_2	times
0.55	0.25	4
0.55	0.3	4
0.6	0.2	4
0.6	0.4	4

表 2.5: μ=0．7 典型的な入力

Am_1	Am_2	times
0.45	0.25	3
0.5	0.3	3
0.5	0.6	3
0.55	0.3	3
0.55	0.35	3
0.55	0.4	3
0.8	0.35	3

2.4.3 周波数の同期

入力の目標周期と得られた歩行周期の関係は図 (2.13)~(2.18) に示す．各歩行周波数は安定後 10 歩の 1 歩当たりの時間を表示し，図の中に，重ねていた"∘"は 10 歩の周期が完全に同じと示す．黒線と重ねていた部分は引き込み現象を発生する区域であり，白いエリアは歩容生成失敗と考えられる．各典型的な入力は引き込み能力をもち，T_{set} が 0.4~0.6 の間に，歩行周期と入力周期が同期していることが分かった．

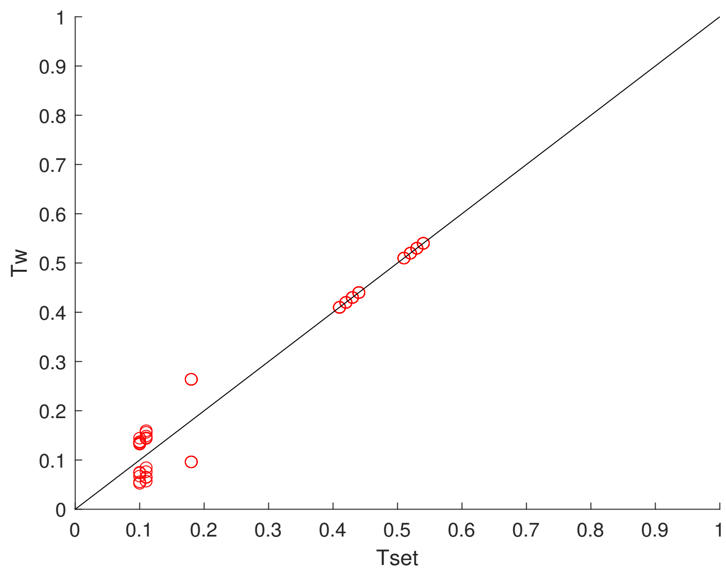

図 2.13: μ=0.1,$Am_1 = 0.95, Am_2 = 0.75$

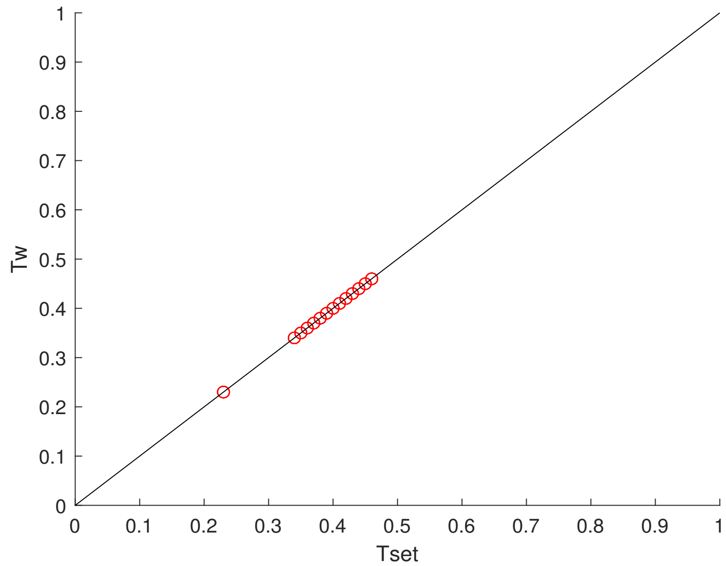

図 2.14: μ=0.3,$Am_1 = 0.55, Am_2 = 0.35$

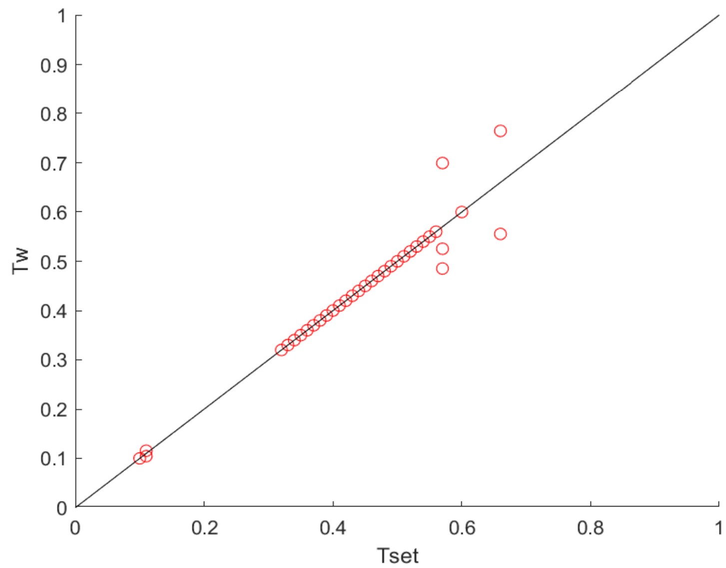

図 2.15: μ=0.3,$Am_1 = 0.95, Am_2 = 0.75$

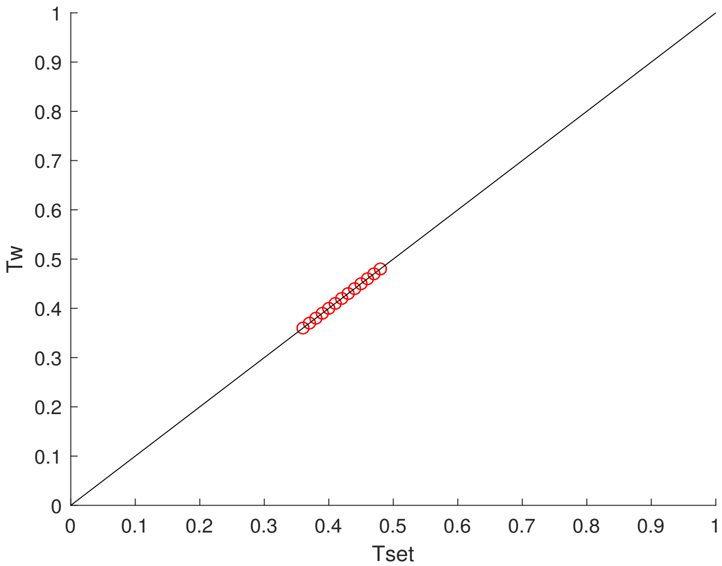

図 2.16: μ=0.5,$Am_1 = 0.55, Am_2 = 0.3$

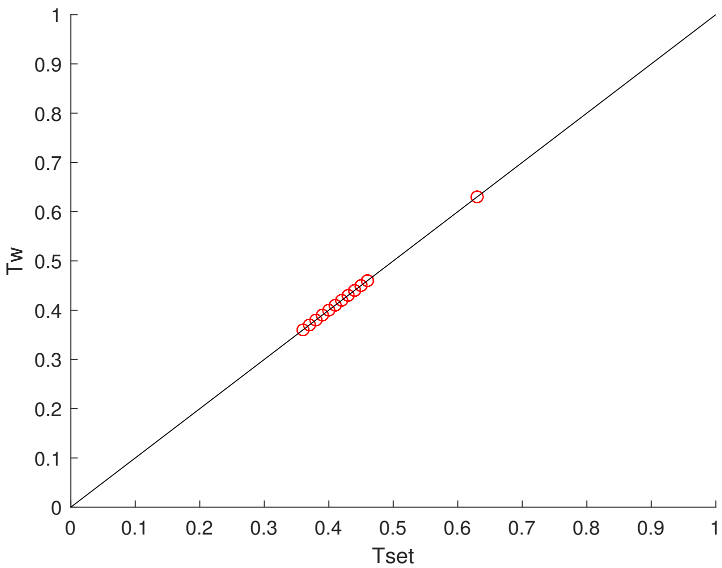

図 2.17: μ=0.7,$Am_1 = 0.55, Am_2 = 0.3$

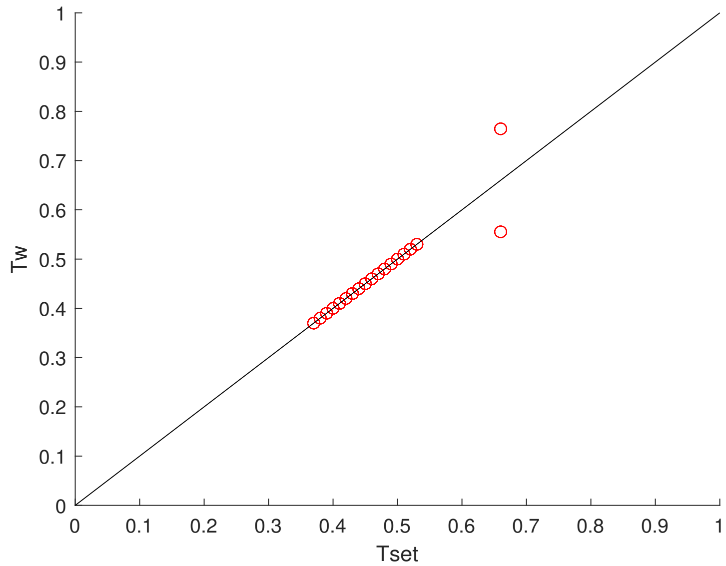

図 2.18: μ=0.7,$Am_1 = 0.55, Am_2 = 0.35$

2.4.4 エネルギー効率

Specific Resistance（以下は SR）はロボットの歩行効率を評価方法として，よく使われる．ここで，$\triangle E$[J] はホイールが一歩を歩くときに，消費したエネルギーであり，$\triangle X$ はホイール一歩の移動距離であり，T_{set} はホイールの歩行周期である．本章のモデルに置く，SR は下のように計算する．

$$SR = \frac{\triangle E}{mg \triangle X} \tag{2.30}$$

$$\triangle E = \int_0^{\mathrm{T_{set}}} (|\dot{\theta} u_1| + |\dot{l}_c u_2|) dt \tag{2.31}$$

$$\triangle X = 2L_1 \sin\frac{\alpha}{2} \tag{2.32}$$

図 (2.9) から (2.12) は典型的な入力から選んだ重複率が最も高い点の SR 計算したものであり，ここで，SR 値が 2.0 以上のときは人間の歩行と比べてエネルギー効率が悪いため，解析結果が外した．図 (2.19)，(2.20) より，μ が 0.3 以下のとき Step period==0.6[s] 付近でエネルギー効率が高くなり，図 (2.21),(2.22) より μ が 0.5 以上のとき step　period=0.4[s] 付近でエネルギー効率が高くなっていることが確認できた．

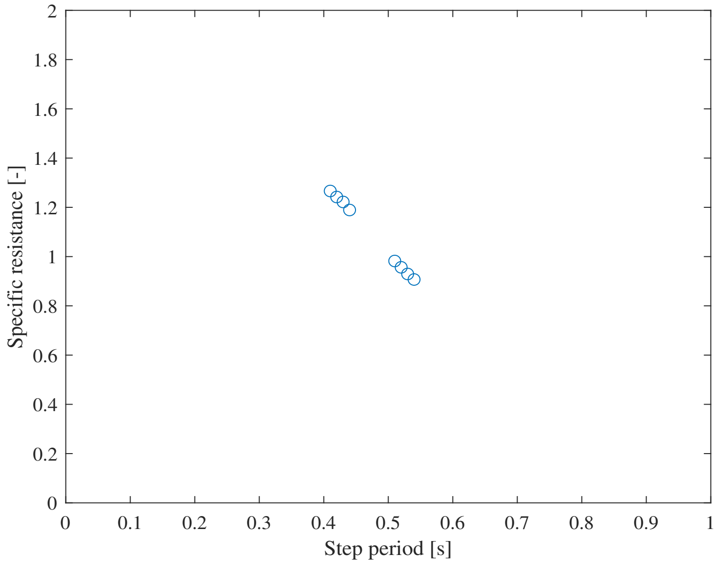

図 2.19: μ=0.1,$Am_1 = 0.95, Am_2 = 0.75$．SR と T_{set} の関係

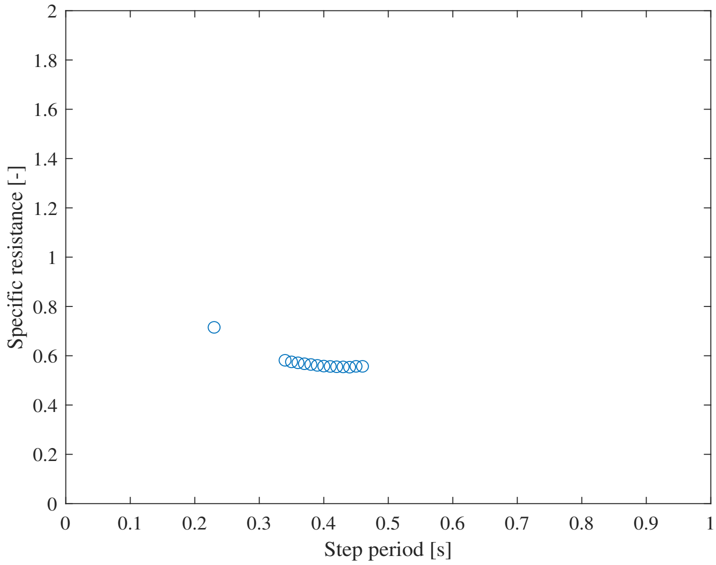

図 2.20: μ=0.3,$Am_1 = 0.55, Am_2 = 0.35$．SR と T_{set} の関係

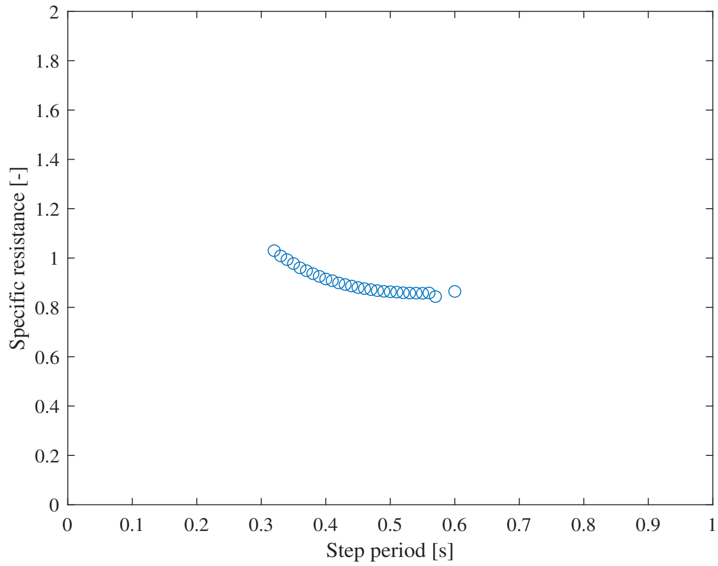

図 2.21: μ=0.3,$Am_1 = 0.95, Am_2 = 0.75$．SR と T_{set} の関係

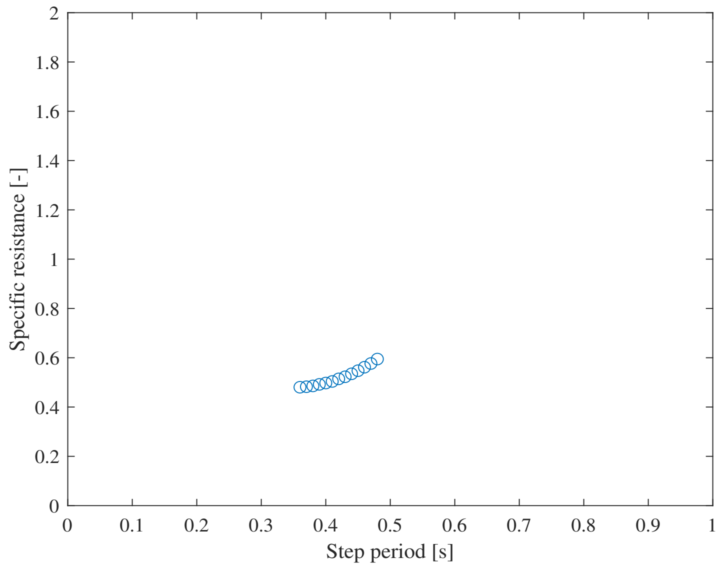

図 2.22: μ=0.5,$Am_1 = 0.55, Am_2 = 0, 3$．SR と T_{set} の関係

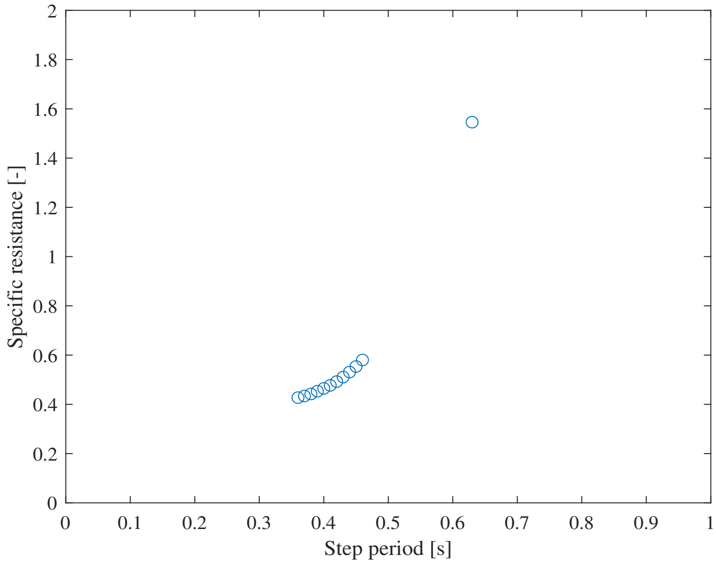

図 2.23: μ=0.7,$Am_1 = 0.55, Am_2 = 0.3$．SR と T_{set} の関係

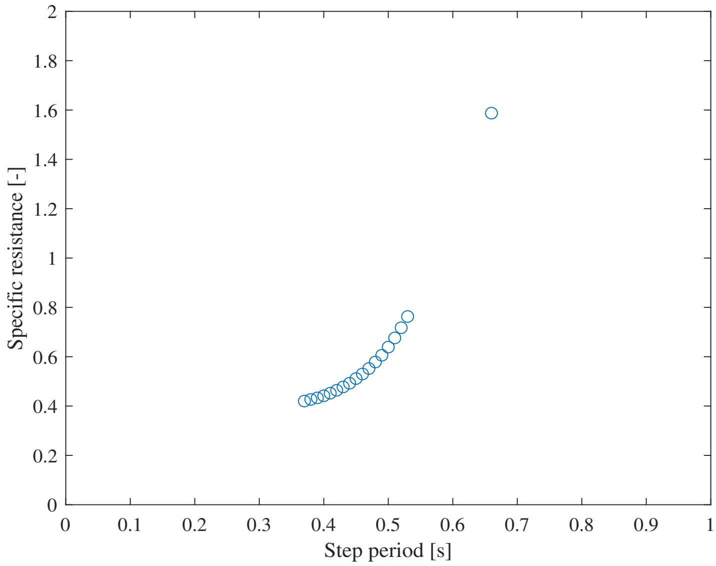

図 2.24: μ=0.7,$Am_1 = 0.55$, $Am_2 = 0.35$．SR と T_{set} の関係

本章では，水平方向と鉛直方向のそれぞれの揺動質量を用いた CRW を利用して，低摩擦路面上で安定な歩容を生成した．数値シミュレーションで，典型的な入力を見つけて，歩行効率について議論した．本章のモデルにおいて，入力を 0.35 か 0.6 の間に，入力波の周波数による，ロボットの歩行周期を入力周期により制御が可能になる．しかし，本章議論したロボットは，偶に鉛直方向の床反力がマイナスの場合もある，すなわち，地面から離れることがある，以上の制御は現実環

境には使えないことが分かった．3 章では，本章のモデルを使って，重心制御を用いて，安定な歩行生成を検討する．

第3章　CRWモデルの歩容生成2

3.1　数学モデルの導出

本章では、2章のモデルを使って、ステルスウオーキングの生成を目的として行う．2章のモデルでは，低摩擦路面上の歩容生成のとき、地面から浮上する場合が発生する，その問題点を対して、二つの入力で重心位置を制御して、低摩擦路面上の安定な歩容生成の可能性を検討する．本章のモデルは2章のモデルを使う．ここで，モデルのの解説は紙面の都合上省略する．本章のシミュレーションでは、まず、高摩擦路面上の歩容を生成して、低摩擦路面上の試みを行う．すなわち、地面からの拘束ヤコビ行列は

$$\boldsymbol{J} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & l_1\cos\theta_1 & -l_1\cos\theta_2 & -l_2\sin\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -l_1\sin\theta_1 & l_1\sin\theta_2 & l_2\cos\theta_3 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{3.1}$$

である．

3.2　制御系設計

本章は三つの入力を使って，$\ddot{X}_{com} = 0, \ddot{Z}_{com} = 0, \theta_d$ を制御する．ロボット中心質点位置 X_{com} と Z_{com} は以下のように表示する．

$$X_{com} = \sum_{i=1}^{4} \frac{m_i X_i}{m} \tag{3.2}$$

$$Z_{com} = \sum_{i=1}^{4} \frac{m_i Z_i}{m} \tag{3.3}$$

X_i は m_i の X 位置，Z_i は m_i の Z 位置，m[kg] は連結型リムレスホイールの全質量．X 方向と Z 方向の制御目標は次のように表示する．

$$m\ddot{X} = F_{xfore} + F_{xrear} \equiv 0 \tag{3.4}$$

$$m\ddot{Z} = F_{zfore} + F_{zrear} - mg \equiv 0 \tag{3.5}$$

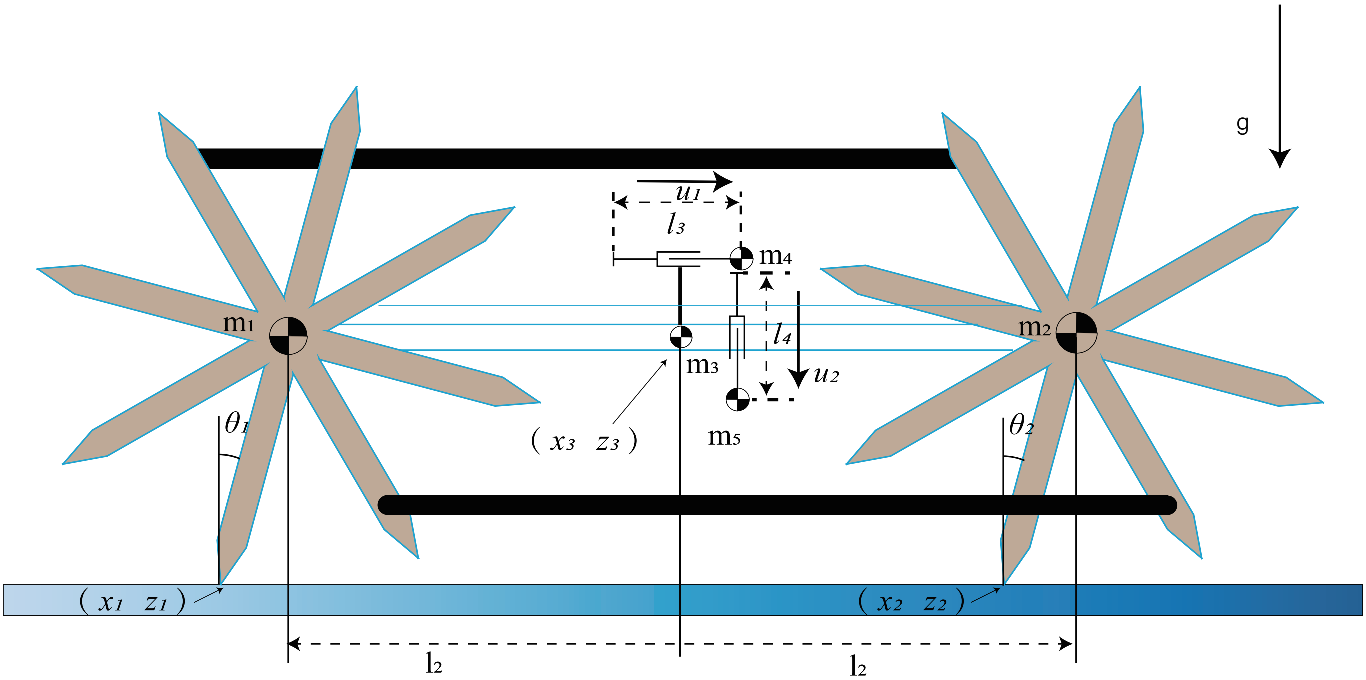

図 3.1: 2 つの揺動質量の入力-RW モデル

ここで F_x は水平方向の床反力である．F_z は鉛直方向の方向の床反力である．走行中にロボットが滑らないようにするため，水平方向の力は一定とする．次のように表示する．

$$\ddot{X}_{com} = \boldsymbol{J}_{Xcom}\ddot{\boldsymbol{q}} + \dot{\boldsymbol{J}}_{Xcom}\dot{\boldsymbol{q}} \tag{3.6}$$

歩容生成のとき，支持脚が地面から飛ぶことを回避するため，鉛直方向の床反力 F_z を正に保つ必要がある，(2.37) の条件を

$$\ddot{Z}_{com} = \boldsymbol{J}_{Zcom}\ddot{\boldsymbol{q}} + \dot{\boldsymbol{J}}_{Zcom}\dot{\boldsymbol{q}} \tag{3.7}$$

と表示する．ここで θ=$\boldsymbol{S}_1q$，θ は制御出力と記述した．接地脚と地面の角度が $-\frac{\alpha}{2}$ から，$\frac{\alpha}{2}$ まで変換させ，五次関数を使う．

$$\theta_d(t) = \frac{\alpha}{2}\left(\frac{6t^5}{T_{\mathrm{set}}^5} - \frac{15t^4}{T_{\mathrm{set}}^4} + \frac{10t^3}{T_{\mathrm{set}}^3}\right) - \frac{\alpha}{2} \tag{3.8}$$

3.2.1 出力は θ，X_{com} の場合

式 (2.36)(2.38) すべての出力目標 の条件は，次のようにまとめられる．詳細は

$$\boldsymbol{\Phi}_1\ddot{\boldsymbol{q}} = \boldsymbol{\Gamma}_1 \tag{3.9}$$

$$\boldsymbol{\Phi}_1 = \begin{bmatrix} \boldsymbol{S}_1 \\ \boldsymbol{J}_{Xcom} \end{bmatrix}, \boldsymbol{\Gamma} = \begin{bmatrix} \ddot{\boldsymbol{\theta}}_d \\ -\dot{\boldsymbol{J}}_{Xcom}\dot{\boldsymbol{q}} \end{bmatrix} \tag{3.10}$$

式 (2.38) を式 (2.1) に代入すると，制御入力が計算された．

$$\boldsymbol{u} = (\boldsymbol{\Phi_1} \boldsymbol{M}^{-1} \boldsymbol{Y} \boldsymbol{S})^{-1} (\boldsymbol{\Phi_1} \boldsymbol{M}^{-1} \boldsymbol{Y} \boldsymbol{h} + \boldsymbol{\Gamma}_1) \tag{3.11}$$

3.2.2 初期状態の導出

ロボットの制御パラメータと物理パラメータは表 (2.1) に記載され、初期状態を次のように設定する．

$$\boldsymbol{q}(0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{\alpha}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{3.12}$$

$$\dot{\boldsymbol{q}}(0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{l}_3(0) & 0 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{3.13}$$

制御出力により，ロボットの揺動質量はゼロダイナミクスとに振る舞う．ロボットの安定化を実現するため，適切な初期状態を設定すべく．式 (2.38) により，ロボットの X_{com} の X 方向の速度をゼロに維持する，初期状態に決まる．X 方向の重心速度 V と揺動質量の初期速度の関係は次に示す．

$$V = \frac{2L_1 \sin\alpha}{T_{\mathrm{set}}} = \dot{\boldsymbol{X}}_{com}(0) = \frac{\boldsymbol{J}_{Xcom}(0)\dot{\boldsymbol{q}}(0)}{m_{all}} = \frac{\dot{l}_3(0) m_4}{m_{all}} \tag{3.14}$$

式 (3.21) を解くと，揺動質量の初期速度 $\dot{l}_c$[m/s] 以下のようになる．

$$\dot{l}_3(0) = \frac{2L_1 \sin\frac{\alpha}{2}}{T_{\mathrm{set}}} \times \frac{m_4}{m_{all}} \tag{3.15}$$

3.2.3 シミュレーションの結果

図（2.25）は CRW ロボットの前後輪の X 方向床反力を表示し，前後輪のホイールの X 方向床反力の合力はゼロを示す．図 (2.27) から、CRW システムの X 方向床反力はゼロになる．X 方向の運動傾向がないことが分かった．図（2.25）は CRW ロボットの前輪のホイールと後輪のホイールの Z 方向床反力を示して，合力は図 (2.27) に通り，ゼロ以下になり，すなわち，歩行のとき、地面から浮上という現象が現れた．図 (2.28) は X，Z 方向の揺動質量の 1 周期の位置を表示する．X 方向の揺動質量は周期運動をする，Z 方向の揺動質量は元の位置から離れる．図 (2.29) は 2 つの揺動質量の位相平面図であり，X 方向の揺動質量はリミットサイクルを生成して、しかし、Z 方向の揺動質量は発散することが分かった

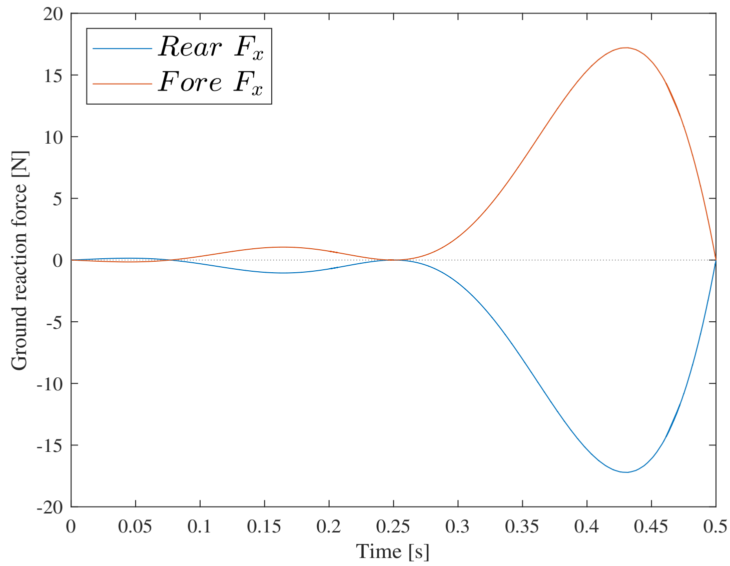

図 3.2: T_{set}=0.5,X 方向の床反力

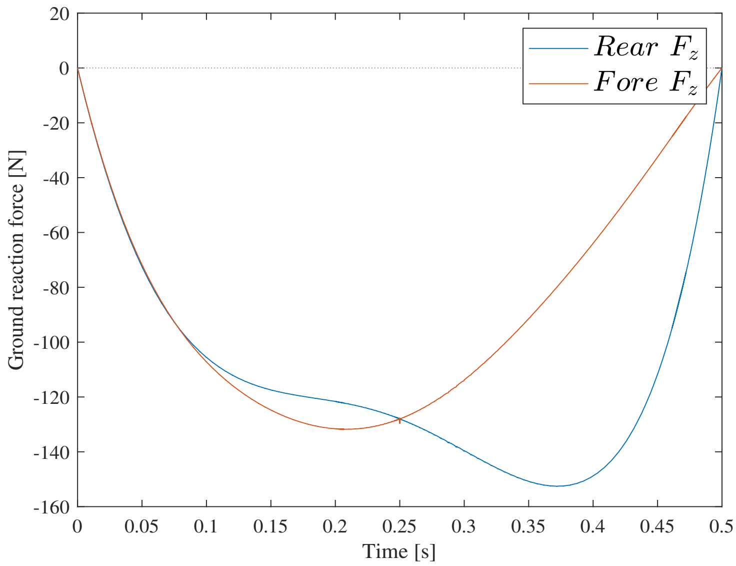

図 3.3: T_{set}=0.5,Z 方向の床反力

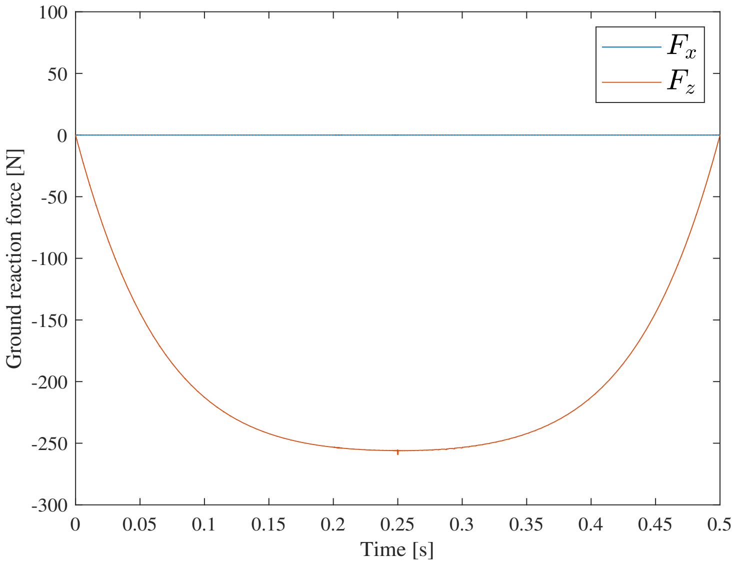

図 3.4: T_{set}=0.5, システムの床反力

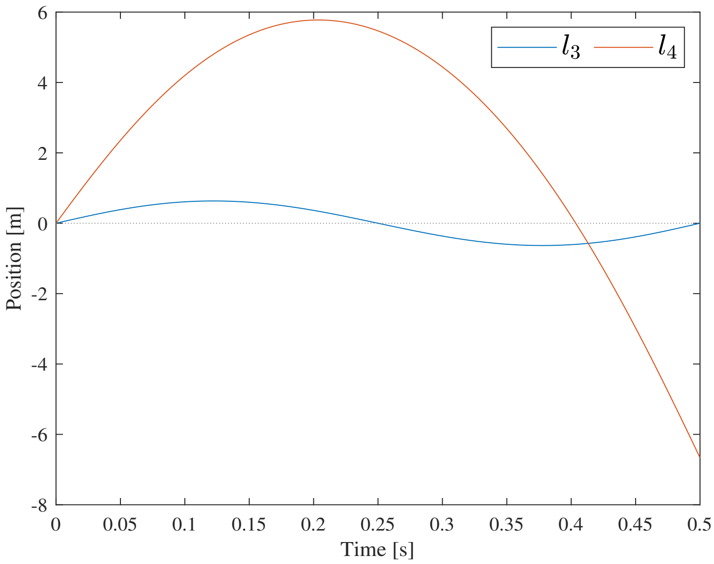

図 3.5: T_{set}=0.5, 揺動質量の位置

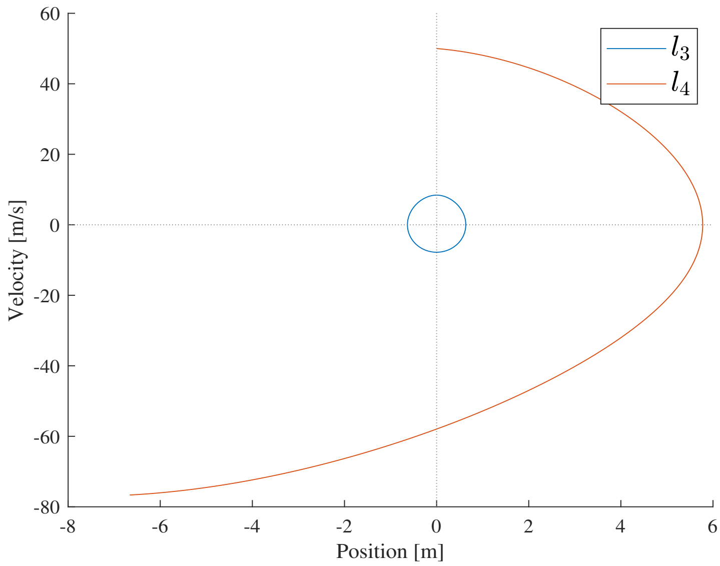

図 3.6: T_{set}=0.5, 揺動質量の位相平面図

3.2.4 出力は θ，Z_{com} の場合

式 (3.6) と (3.8) の制御目標 は，次のようにまとめられる．

$$\boldsymbol{\Phi}_2\ddot{\boldsymbol{q}} = \boldsymbol{\Gamma}_2 \tag{3.16}$$

$$\boldsymbol{\Phi}_2 = \begin{bmatrix} \boldsymbol{S}_1 \\ \boldsymbol{J}_{\mathrm{Zcom}} \end{bmatrix}, \boldsymbol{\Gamma} = \begin{bmatrix} \ddot{\boldsymbol{\theta}}_d \\ -\dot{\boldsymbol{J}}_{\mathrm{Zcom}}\dot{\boldsymbol{q}} \end{bmatrix} \tag{3.17}$$

式 (3.10) を式 (2.1) に代入すると，制御入力 $\boldsymbol{u}$ が得られる．

$$\boldsymbol{u} = (\boldsymbol{\Phi_2 M}^{-1}\boldsymbol{Y S})^{-1}(\boldsymbol{\Phi_2 M}^{-1}\boldsymbol{Y h} + \boldsymbol{\Gamma}_2) \tag{3.18}$$

3.2.5 初期状態の導出

ロボットの制御と物理パラメータは表 (2.1) 記載され，初期状態を次のように設定する．

$$\boldsymbol{q}(0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{\alpha}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{3.19}$$

$$\dot{\boldsymbol{q}}(0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{l}_3(0) & 0 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{3.20}$$

ゼロダイナミクスとして振る舞う l_3 を安定化するため，二分探索法を用いて，$l_3(0) = l_3(T_{\mathrm{set}})$ を達成する初期速度を探索し，$\dot{l}_3(0) = 26.502862195891794$[m/s] が得られる．

Algorithm 2 Calculate target $\dot{l}_3(0)$

Require: The target initial angular velocity
Input: Initial state $\boldsymbol{q}(0)$, $\dot{\boldsymbol{q}}(0)$ and T_{set}
Output: $\dot{l}_3(0)$

Initialization $\dot{l}_{3\ \mathrm{max}}(0)$ and $\dot{l}_{3\ \mathrm{min}}(0)$ to values larger and smaller than the initial value of $\dot{l}_3(0)$ and e to a positive value
while $e > 0$ **do**
  Run the numerical simulation for one step, and save the $\dot{l}_3(T_{\mathrm{set}})$ calculated.
  if $\dot{l}_3(T_{\mathrm{set}}) < 0$ **then**
    $\dot{l}_{3\ \mathrm{min}}(0) = \frac{\dot{l}_{3\ \mathrm{max}}(0)+\dot{l}_{3\ \mathrm{min}}(0)}{2}$
  else
    $\dot{l}_{3\ \mathrm{max}}(0) = \frac{\dot{l}_{l\ \mathrm{max}}(0)+\dot{l}_{3\ \mathrm{min}}(0)}{2}$
  end
  $e = |\dot{l}_3(0) - \frac{\dot{l}_{3\ \mathrm{max}}(0)+\dot{l}_{3\ \mathrm{min}}(0)}{2}|$
  $\dot{l}_3(0) = \frac{\dot{l}_{3\ \mathrm{max}}(0)+\dot{l}_{3\ \mathrm{min}}(0)}{2}$
end while
Return $\dot{l}_3(0)$

3.2.6 シミュレーションの結果

図 (3.7) は前後ホイールの接地点の X 方向の床反力を示し，図 (3.8) は前後ホイールの接地点の Z 方向の床反力を示す．図 (3.9) は CRW のすべての床反力の合力を表示する．この図から、Z 方向の床反力が常に正に保つ，地面から浮上することが発生しないことが分かる．図 (3.10) は揺動質量の位置を表示し，水平揺動質量は初期位置に 1 歩分の運動を経って戻ってきている．そして、図 (3.11) 位相平面図から，各揺動質量は安定することが分かる．しかし、X 方向揺動質量の振幅は最大 2[m] を超えてしまい，最大速度も 25[m/s] に近くなり，ロボットの本体の長さ 1[m] に対して，現実的と言えない範囲に及ぶ激しい運動となってしまう．

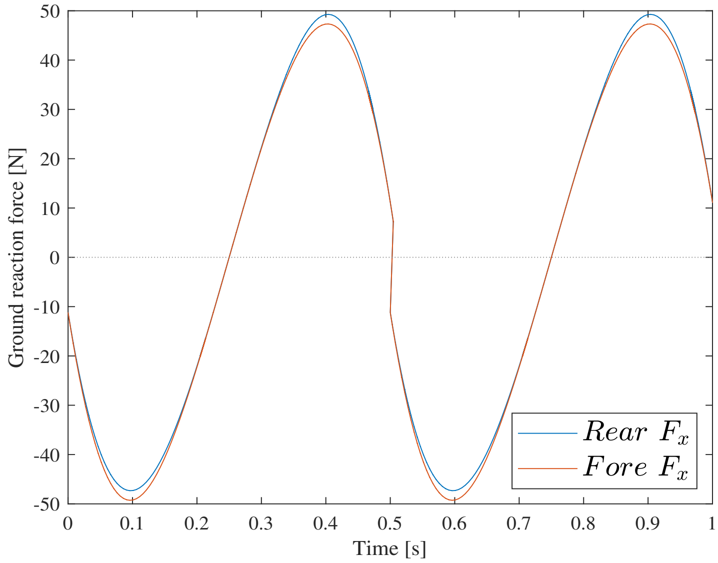

図 3.7: T_{set}=0.5,X 方向の床反力

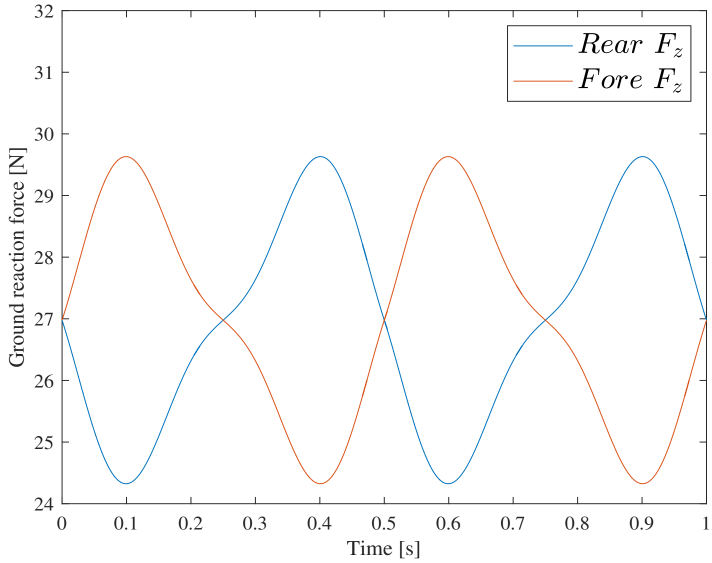

図 3.8: T_{set}=0.5,Z 方向の床反力

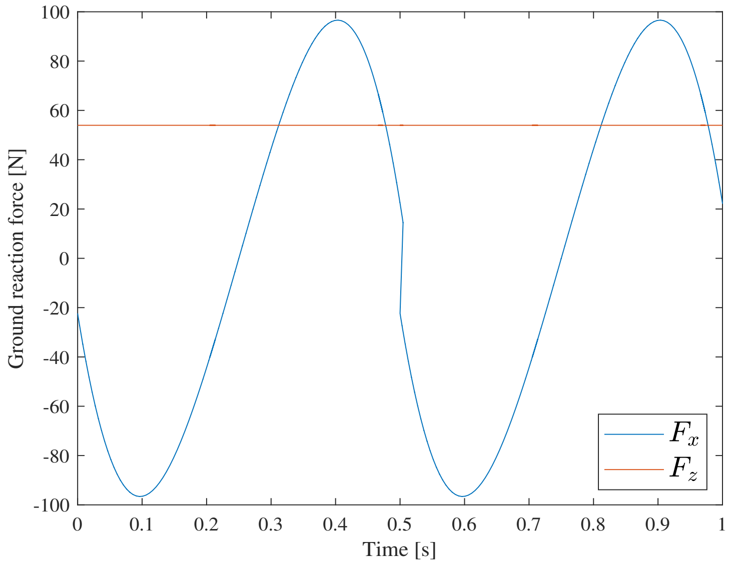

図 3.9: T_{set}=0.5, システムの床反力

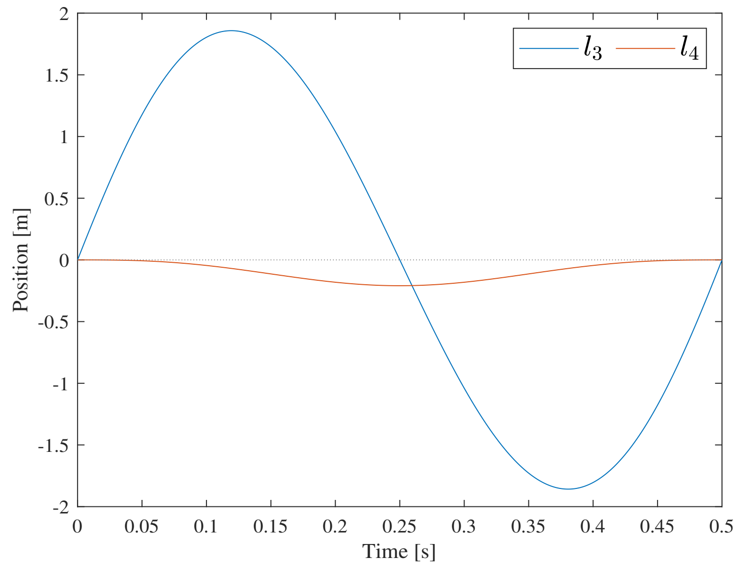

図 3.10: T_{set}=0.5, 揺動質量の位置

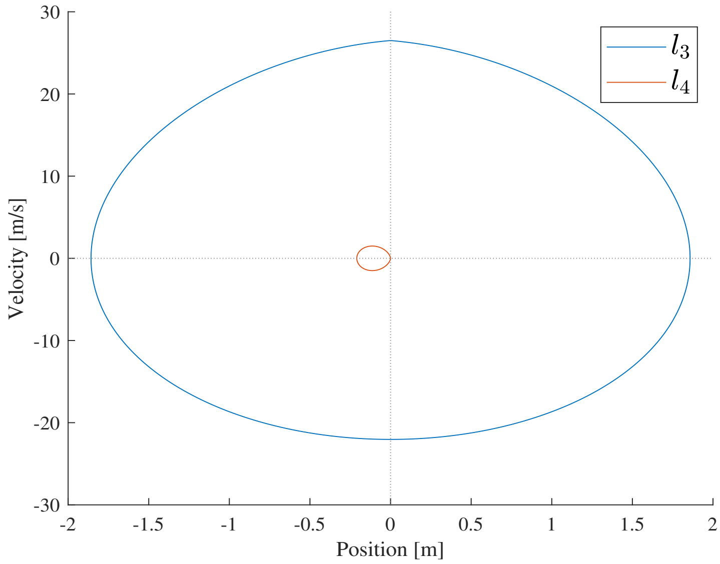

図 3.11: T_{set}=0.5, 揺動質量の位相平面図

本章では，2 章に地面から浮上の問題に対して、重心位置制御方法を使って、低摩擦路面上の安定歩容生成の可能性を検討した、θ_d と X_{com} を出力とした解析では、衝突の直後、揺動質量は整体の重心位置を 0 に保つのために、前方向や、後ろ方向に急に伸びることが発生している，発散してしまう．その点に対する，第 4 章の新しいモデルを紹介する.。

第4章　USSWの実現方法1

本章では，馬を自由に操る馬術から着想を得て、後輪の回転トルク，揺動質量の相対位置を制御するトルクと揺動質量の運動軌道の角度を調整できる回転トルク，三つの入力を使って，滑らない擦路面上の歩容生成について紹介する．揺動質量は馬に騎乗する人を模倣する．最初，滑らない路面上の連結型リムレスホイールを構築し，USW 歩容を生成して，その次に，同じ入力を低摩擦路面上の CRW モデルに入れて，数値シミュレーションをする．該当歩行モデルは 2 つのリムレスホイールを連結し，7 自由度モデルに設定した．このモデルは前後脚を同期させ，胴体に前後揺動を取り付けることで，接地点回りの回転トルクと前後方向の並進力を互いに少ない干渉で作用させることが可能となる．ホイールの回転トルクは支持脚角度を制御するために，揺動の並進力は滑り運動を制御するために，それぞれ用いられる．このモデルを利用し，衝突直後の水平床反力の最小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，CRW モデルについて説明し，数学モデルと制御方法について紹介し，数値シミュレーションについて詳しく検討する．

4.1　数学モデルの導出

本研究に扱う連結型リムレスホイールの数学モデルを図 (4.1) に示す．前後輪のリムレスホイールについて，質量は $m_1[kg]$ と m_2[kg]，足の長さは l_1[m] と置く．前輪の中心点から後輪の中心点まで，連結リンクがあり，質量は m_3[m] と置く．前輪中心点から後輪中心点まで長さは l_2 とする．まだ，後輪のリムレスホイールの支持脚の鉛直方向から絶対角度を θ_1[rad]，前リムレスホイールの支持脚の鉛直方向から絶対角度を θ_2[rad] と置く．後リムレスホイールの接地点座標は (x_1, z_1) とする，前リムレスホイールの接地点座標は (x_2, z_2) とする．後リムレスホイールに制御回転トルク u_1[N·m]．連結リンクと水平方向の絶対角度は θ_3 とする．揺動質量の運動軌道と連結リンクの絶対角度を θ_4[rad] と置く，θ_4[rad] を制御する入力を u_2[N·m] とする．揺動質量の重さは m_4，揺動質量と連結型リムレスホイールの相対変位は l_3，入力は u_3[N] と置く．

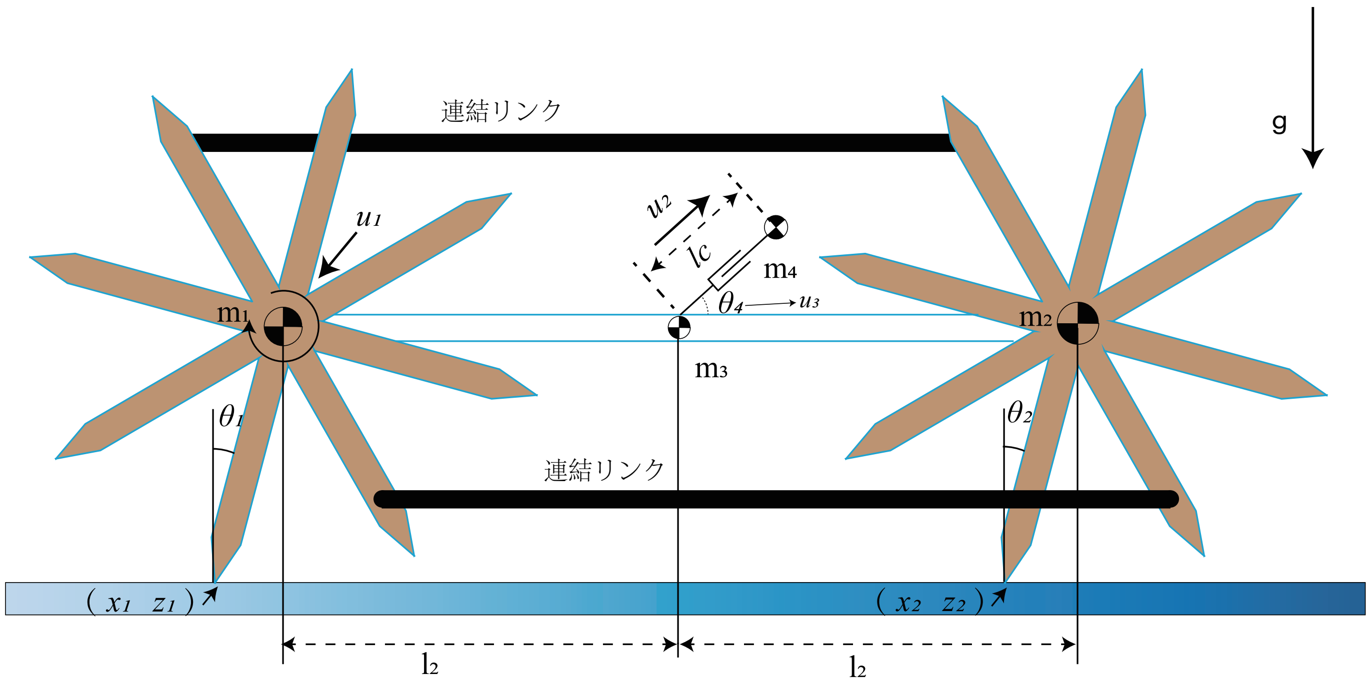

図 4.1: 回転トルク入力と揺動質量入力-RW モデル

4.1.1 滑らない路面上の運動方程式

前後リムレスホイールを同期運動と仮定する．二つのリムレスホイール，胴体リンク及び揺動質量を加えて，全体の簡単化一般化座標ベクトルを $\boldsymbol{q} = \begin{bmatrix} x & z & \theta_1 & \theta_2 & \theta_3 & \theta_4 & l_3 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$ とする．そして，モデル運動方程式は

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{h} = \boldsymbol{S}\boldsymbol{u} + \boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\lambda} \tag{4.1}$$

$$\boldsymbol{J}\dot{\boldsymbol{q}} = \boldsymbol{0} \tag{4.2}$$

となる．ここで，$\boldsymbol{M}$ は慣性行列，$\boldsymbol{h}$ はコリオリ力と重力項の組み合わせ，中心力を表す．また，$\boldsymbol{S}u$ は制御入力項，$\boldsymbol{J}$ は拘束条件項である．$\boldsymbol{M}$ 行列の詳細は，

$\boldsymbol{M} =$

$$
\begin{bmatrix}
m_{all} & 0 & l_1 m_{all}\cos\theta_1 & -l_2 m_5 \sin\theta_2 & 0 & l_3 m_4 \cos\theta_4 & m_4 \sin\theta_4 \\
0 & m_{all} & -l_1 m_{all}\sin\theta_1 & -l_2 m_5 \cos\theta_2 & 0 & -l_3 m_4 \sin\theta_4 & m_4 \cos\theta_4 \\
l_1 m_{all}\cos\theta_1 & -l_1 m_{all}\sin\theta_1 & i1 + l_1^2 m_{all} & l_1 l_2 m_5 S_{12} & 0 & l_1 l_3 m_4 C_{14} & -l_1 m_4 S_{14} \\
-l_2 m_5 \sin\theta_2 & -l_2 m_5 \cos\theta_2 & l_1 l_2 m_5 S_{12} & i_2 + l_2^2 m_5 & 0 & -l_2 l_4 m_4 S_{24} & -l_2 m_4 C_{24} \\
0 & 0 & 0 & 0 & i_3 & 0 & 0 \\
l_3 m_4 \cos\theta_4 & -l_3 m_4 \sin\theta_4 & l_1 l_3 m_4 C_{14} & -l_2 l_4 m_4 S_{24} & 0 & i_4 + l_3^2 m_4 & 0 \\
m_4 \sin\theta_4 & m_4 \cos\theta_4 & -l_1 m_4 S_{14} & -l_2 m_4 C_{24} & 0 & 0 & m_4
\end{bmatrix}
\tag{4.3}
$$

$m_{all} = m_1 + m_2 + m_3 + m_4$
$m_5 = m_2 + 2m_3 + m_4$
$S_{14} = \sin(\theta_1 - \theta_4)$
$S_{24} = \sin(\theta_2 - \theta_4)$
$C_{14} = \cos(\theta_1 - \theta_4)$
$C_{24} = \cos(\theta_2 - \theta_4)$
である．なお，中心力・コリオリ力と重力項の詳細は

$$
\boldsymbol{h} = \begin{bmatrix}
-\dot{\theta_1}^2 l_2 m_5 \cos\theta_2 + 2\dot{l}_3\dot{\theta}_4 m_4 \cos\theta_4 - m_{all}(g\sin\alpha + \dot{\theta}_1^2 l_1 \sin\theta_1) - \dot{\theta}_4^2 l_3 m_4 \sin\theta_4 \\
g m_{all}\cos\alpha - \dot{\theta_1}^2 l_1 m_{all}\cos\theta_1 + \dot{\theta}^2 l_2 m_5 \sin\theta_2 - \dot{\theta}_4 m_4(\dot{\theta}_4 l_4 \cos\theta_4 + 2\dot{l}_3 \sin\theta_4) \\
-l_1\dot{\theta}_2 l_2 m_5 \cos(\theta_1 - \theta_2) - 2\dot{l}_3\dot{\theta}_4 m_4 \cos(\theta_1 - \theta_4) + g m_{all}\sin(\alpha + \theta_1) - \dot{\theta}_4^2 l_3 m_4 \sin(\theta_1 - \theta_4) \\
l_2(\dot{\theta}_1^2 l_1 m_5 \cos(\theta_1 - \theta_2) - g m_5 \cos(\alpha + \theta_2) + \dot{\theta}_4 m_4(\dot{\theta}_4 l_4 \cos(\theta_2 - \theta_4) - 2\dot{l}_4 \sin(\theta_2 - \theta_4))) \\
0 \\
l_3 m_4(2\dot{l}_3\dot{\theta}_4 - \dot{\theta}_2^2 l_2 \cos(\theta_2 - \theta_4) - -\dot{\theta}_2^2 l_1 \sin(\theta_1 - \theta_4) - g\sin(\alpha + \theta_4)) \\
m_4(\dot{\theta}_4^2 l_4 - \dot{\theta}_1^2 l_1 \cos(\theta_1 - \theta_4) + g\cos(\alpha + \theta_4) + \dot{\theta}_2^2 l_2 \sin(\theta_2 - \theta_4)
\end{bmatrix}
\tag{4.4}
$$

$m_{all} = m_1 + m_2 + m_3 + m_4$
である．本章における速度拘束条件は，滑らない地面を仮定するため

$$
\dot{x} = 0, \dot{z} = 0, \dot{x}_2 = 0, \dot{z}_2 = 0. \tag{4.5}
$$

とする．ヤコビ行列は

$$
\boldsymbol{J} = \begin{bmatrix}
1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
1 & 0 & l_1\cos\theta_1 & -l_1\cos\theta_2 & -2l_2\sin\theta_3 & 0 & 0 \\
0 & 1 & -l_1\sin\theta_1 & l_1\sin\theta_2 & 2l_2\cos\theta_3 & 0 & 0
\end{bmatrix}
\tag{4.6}
$$

と記述される．3，4 行目は図 (4.2) のように前後輪のホイールの足先連結リンクを設置することによる，物理的な同期拘束である．

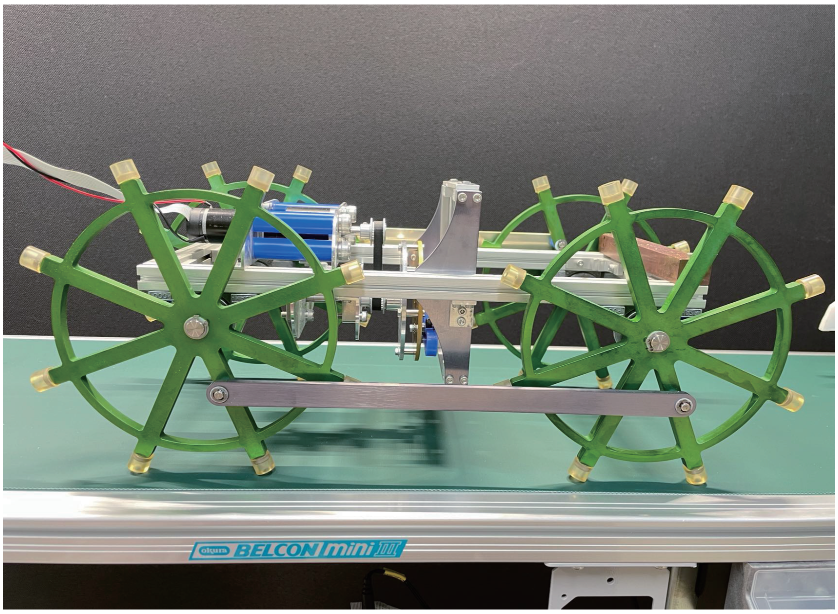

図 4.2: CRW 実験機の外観

制御入力項の詳細は

$$
\boldsymbol{S}\boldsymbol{u} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \tag{4.7}
$$

である．式 (3.2) を 2 階微分すると，以下のようになる．

$$
\boldsymbol{J}\ddot{\boldsymbol{q}} = -\dot{\boldsymbol{J}}\dot{\boldsymbol{q}} \tag{4.8}
$$

そして，式 (4.1) の運動方程式を解いて $\ddot{q}$ を求めて，次のように表示する．

$$
\ddot{\boldsymbol{q}} = \boldsymbol{M}^{-1}(\boldsymbol{S}\boldsymbol{u} + \boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\lambda} - \boldsymbol{h}) \tag{4.9}
$$

式 (4.9) を (4.8) に代入すると，$\boldsymbol{\lambda}$ は以下のように表示される．

$$
\begin{aligned}
\boldsymbol{X} &:= \boldsymbol{J}\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}} \\
\boldsymbol{\lambda} &= -\boldsymbol{X}^{-1}(\boldsymbol{J}M^{-1}(\boldsymbol{S}\boldsymbol{u} - \boldsymbol{h}) - \dot{\boldsymbol{J}}\dot{\boldsymbol{q}})
\end{aligned} \tag{4.10}
$$

また，式 (4.10) を式 (4.1) に代入し，$\boldsymbol{M}^{-1}$ をかけ，$\ddot{\boldsymbol{q}}$ について整理することで，次のようになる．

$$
\begin{aligned}
\boldsymbol{Y} &:= \boldsymbol{I}_4 - \boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{X}^{-1}\boldsymbol{J}\boldsymbol{M}^{-1} \\
\ddot{\boldsymbol{q}} &= \boldsymbol{M}^{-1}(\boldsymbol{Y}(\boldsymbol{S}\boldsymbol{u} - \boldsymbol{h}) - \boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{X}^{-1}\dot{\boldsymbol{J}}\dot{\boldsymbol{q}})
\end{aligned} \tag{4.11}
$$

4.1.2 制御系設計

本章では三つの入力を使って，$\ddot{Z}_{\rm com}=0, \ddot{X}_{\rm com}=0$ とθ_d 三つの目標を制御する．$\ddot{Z}_{\rm com}=0, \ddot{X}_{\rm com}=0$ とθ_d は次式で定まる．

$$X_{\rm com}=\sum_{i=1}^{4}\frac{m_i X_i}{m} \tag{4.12}$$

$$Z_{\rm com}=\sum_{i=1}^{4}\frac{m_i Z_i}{m} \tag{4.13}$$

X_i は m_i の X-座標，Z_i は m_i の Z-座標，m_{all}[kg] は連結型リムレスホイールの全身質量を示す．X 方向と Z 方向の制御目標を次のように表す．

$$m\ddot{X}_{\rm com}=F_{xfore}+F_{xrear}\equiv 0 \tag{4.14}$$

$$m\ddot{Z}_{\rm com}=F_{zfore}+F_{zrear}-mg\equiv 0 \tag{4.15}$$

ここで F_x は支持脚から地面の水平方向の床反力である．F_z は支持脚から地面の鉛直方向の床反力である．ここで θ=$\boldsymbol{S}_1^{\rm T}q$ であり，制御出力として記述さらる．支持脚の絶対角度を $-\frac{\alpha}{2}$ から，$\frac{\alpha}{2}$ までの範囲でスムーズに変化させるために，次の五次関数によって追従目標軌道を求める．

$$\theta_d(t)=\frac{\alpha}{2}(\frac{6t^5}{T_{\rm set}^5}-\frac{15t^4}{T_{\rm set}^4}+\frac{10t^3}{T_{\rm set}^3})-\frac{\alpha}{2} \tag{4.16}$$

走行中にロボットが滑らないようにするため，水平方向の床反力を常に 0 保つ必要がある．$X_{\rm com}$ の加速度は次のように示される．

$$\ddot{X}_{\rm com}=\boldsymbol{J}_{X{\rm com}}\ddot{\boldsymbol{q}}+\dot{\boldsymbol{J}}_{X{\rm com}}\dot{\boldsymbol{q}} \tag{4.17}$$

歩容生成のとき，地面から飛ぶことを回避するため，鉛直方向の床反力 F_z を正に保つ必要がある．(4.15) の $\ddot{Z}_{\rm com}$ は

$$\ddot{Z}_{\rm com}=\boldsymbol{J}_{Z{\rm com}}\ddot{\boldsymbol{q}}+\dot{\boldsymbol{J}}_{Z{\rm com}}\dot{\boldsymbol{q}} \tag{4.18}$$

となる．式 (4.14)(4.1) と (4.17)(4.18) すべての出力目標 の条件は次のようにまとめられる．

$$\boldsymbol{\Phi}\ddot{\boldsymbol{q}}=\boldsymbol{\Gamma} \tag{4.19}$$

$$\boldsymbol{\Phi}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{S}_1\\ \boldsymbol{J}_{Xcom}\\ \boldsymbol{J}_{Zcom}\end{bmatrix},\boldsymbol{\Gamma}=\begin{bmatrix}\ddot{\theta}_d(t)\\ -\dot{\boldsymbol{J}}_{Xcom}\dot{\boldsymbol{q}}\\ -\dot{\boldsymbol{J}}_{Zcom}\dot{\boldsymbol{q}}\end{bmatrix} \tag{4.20}$$

式 (4.17)(4.18) を式 (4.1) に代入すると，制御入力を以下のようにもとめられる．

$$\boldsymbol{u}=(\boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{Y}\boldsymbol{S})^{-1}(\boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{Y}\boldsymbol{h}+\boldsymbol{\Gamma}) \tag{4.21}$$

4.1.3　初期状態の導出

ロボットの制御と物理パラメータは表 (4.1) に記載され，初期状態は次のように設定する．

$$\boldsymbol{q}(0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{\alpha}{2} & -\frac{\alpha}{2} & 0 & 0 & 0.5 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{4.22}$$

$$\dot{\boldsymbol{q}}(0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{\theta}_4(0) & 0 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{4.23}$$

制御出力により，ロボットの揺動質量はゼロダイナミクスになる．ロボットの安定化を実現するため，適切な初期状態を設定する．式 (4.14) により，ロボットの X_{com} の二階時間微分をゼロに維持することで，初期状態を決定する．X 方向の重心速度 V と揺動質量の初期速度の関係は次に示す．

$$V = \frac{2L_1 \sin\alpha}{T_{\mathrm{set}}} = \dot{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{com}}(0) = \frac{\boldsymbol{J}_{X\mathrm{com}}(0)\dot{\boldsymbol{q}}(0)}{m_{all}} = \frac{\dot{\theta}_4(0) l_3 m_4 \cos\theta_4}{m_{all}} \tag{4.24}$$

式 (3.21) を解くと，揺動質量の初期速度 $\dot{l}_c$[m/s] 以下のようになる．

$$\dot{\theta}_4(0) = \frac{2m_{all} L_1 \sin\frac{\alpha}{2}}{l_3 m_4 \cos\theta_4 T_{\mathrm{set}}} \tag{4.25}$$

4.2　シミュレーション

表 4.1 のようにパラメータを設置する．図 (4.3) は前後輪のホイールの X 方向の床反力を示す．前後ホイールの X 方向の床反力はぞれぞれ逆の向きに同じ大きさの力が発生しているため，システムの X 方向の合力はゼロになっている．このことから，水平方向にシステムが滑らないことが分かる．図 (4.4) の結果から鉛直方向の床反力とシステム自身の重量が等しく，地面から浮上しないということが分かる．図 (4.5)(4.6) には，システム全体の床反力と X_{com}，Z_{com} の位置の変位を示す．このことから高摩擦路面上の Ultrahigh-speed Stealth Walking(以下 USSW) を達成した．図 (4.7) は揺動質量の位置の時間発展を表示する．図 (4.8) により、揺動質量の運動軌道はリミットサイクルであり、発散しないことが分かった．θ_1,θ_2 は拘束条件の影響で、運動軌道が一致し，周期的な運動軌道を生成した．揺動質量も周期性運動軌道を生成し，位相平面図から見ると，リミットサイクルを生成した．

表 4.1: 回転トルク入力と揺動質量入力-RW ロボットのパラメータ

$m_1 = m_2$	2	kg
m_3	1	kg
m_4	1	kg
L_1	0.5	m
L_2	1	m
α	0.78	rad
g	9.81	m/s^2
K_D	60	
K_P	900	

4.2.1 シミュレーションの結果

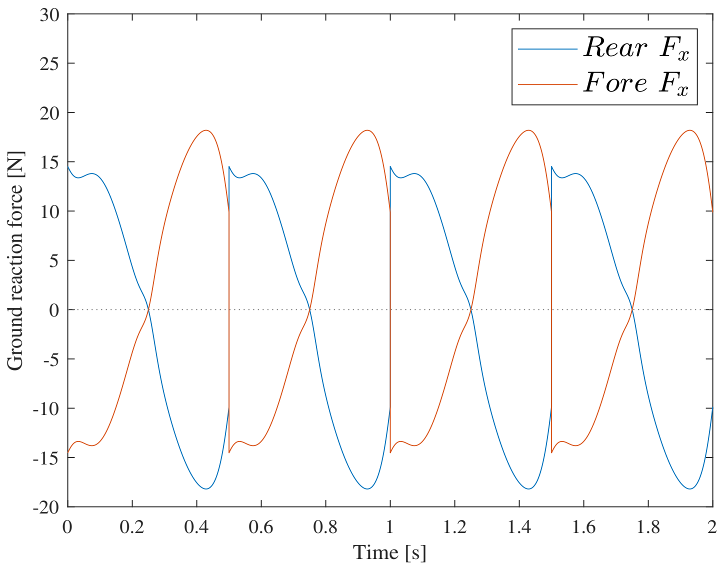

図 4.3: T_{set}=0.5,X 方向の床反力の時間発展

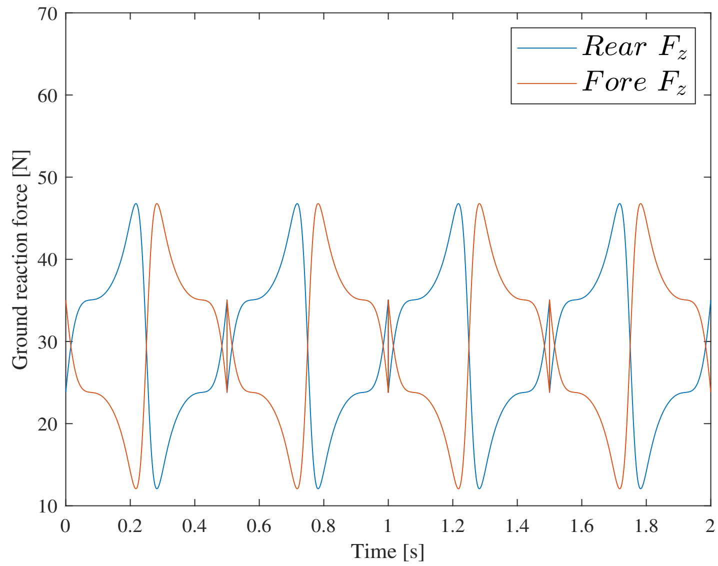

図 4.4: T_{set}=0.5,Z 方向の床反力に時間発展

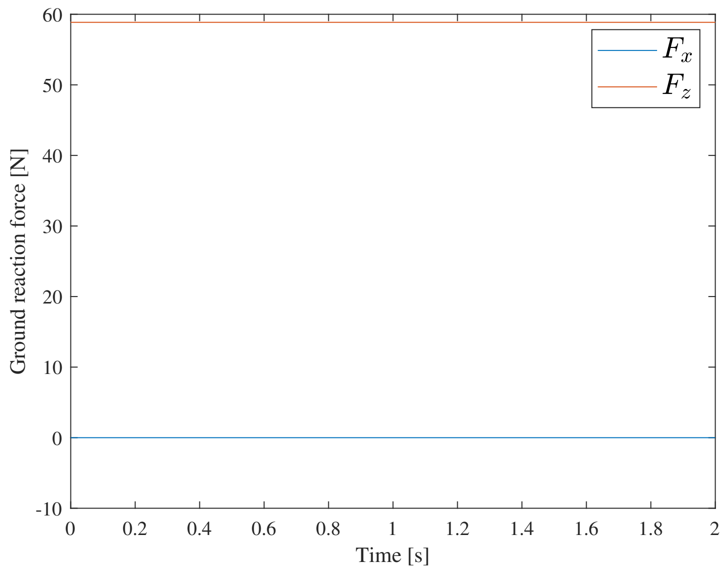

図 4.5: T_{set}=0.5, 床反力の時間発展

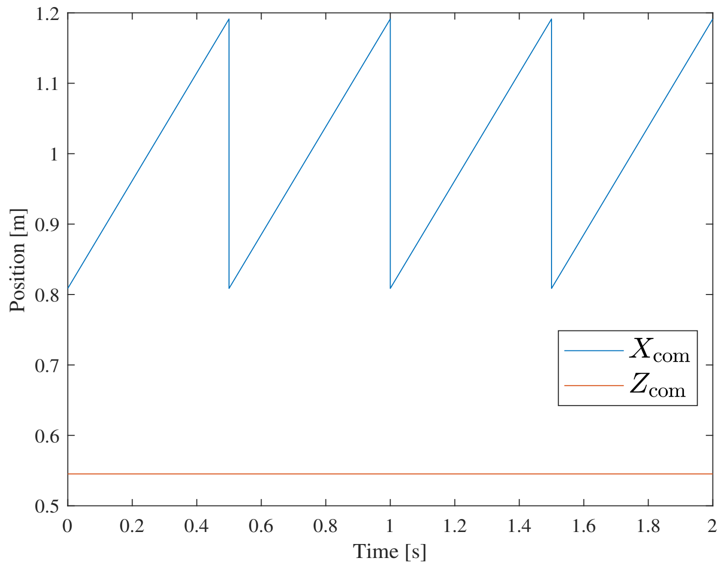

図 4.6: T_{set}=0.5, 重心位置の時間発展

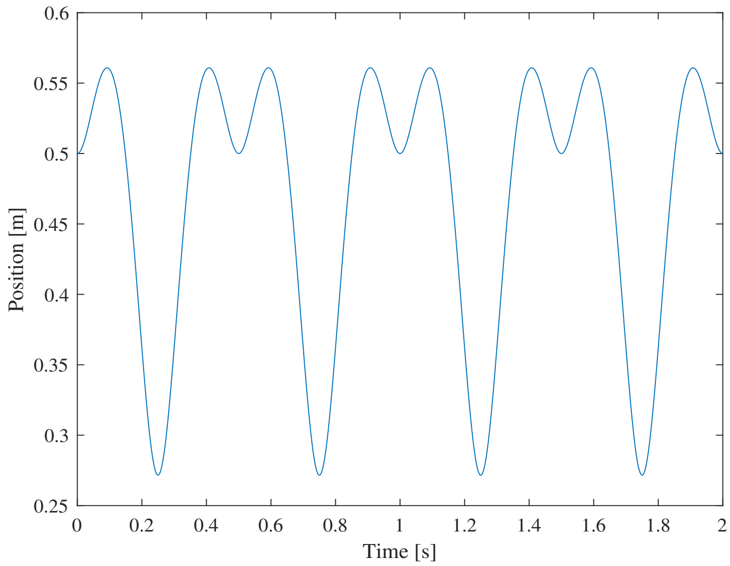

図 4.7: T_{set}=0.5, 揺動質量の位置の時間発展

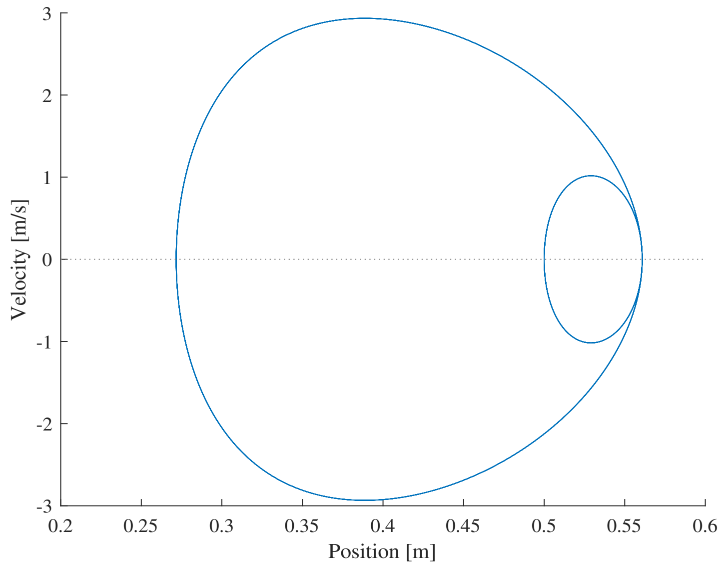

図 4.8: T_{set}=0.5, 揺動質量の位相平面図

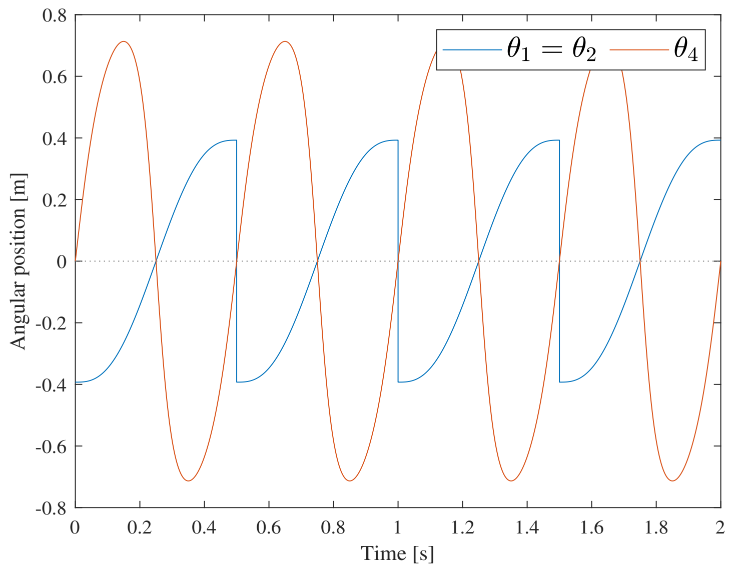

図 4.9: T_{set}=0.5,$\theta_1\theta_2\theta_4$ の時間発展

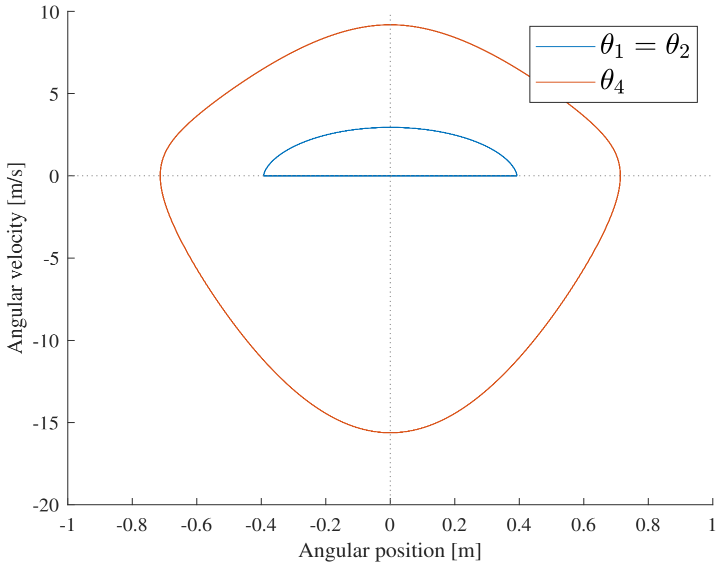

図 4.10: T_{set}=0.5,$\theta_1\theta_2\theta_4$ の位相平面図

4.3 低摩擦路面上の運動方程式

4.3.1 数学モデルの導出

これまで、高摩擦路面上の USSW を生成して，このシステムを用いて摩擦なし路面上の歩容生成を検討する．運動方程式は次のように表示する．

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{h} = \boldsymbol{S}\boldsymbol{u} + \boldsymbol{J_c}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\lambda}_c + \boldsymbol{J}_\mu^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\lambda}_c \tag{4.26}$$

$$\boldsymbol{J_c}\dot{\boldsymbol{q}} = \boldsymbol{0} \tag{4.27}$$

ここで，$\boldsymbol{J}_\mu$ は摩擦力拘束であり，制御入力について $\ddot{X}_{COMd}$=0 の拘束条件があり，$\dot{x}=0$ のとき，μ 必ずゼロになり，しかし，シミュレーションの計算精度差があり，$\dot{x}=0$ のとき μ は近似ゼロ，それゆえ，本章の摩擦係数はゼロを決定された．$\boldsymbol{J}_\mu^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\lambda}$ 以下に省略する．拘束ヤコビ行列の詳細は

$$\boldsymbol{J}_c = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -l_1\sin\theta_1 & l_1\sin\theta_2 & 2l_2\cos\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & l_1\cos\theta_1 & -l_1\cos\theta_2 & -l_2\sin\theta_3 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{4.28}$$

である．そして，式 (4.26) と (4.27) により，λ_c を得られる．

$$\boldsymbol{\lambda_c} = -X_c^{-1}\boldsymbol{J}_c\boldsymbol{M}^{-1}(\boldsymbol{S}\boldsymbol{u} - \boldsymbol{h}) \tag{4.29}$$

$$X_c = \boldsymbol{J}_c\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{J}_c^{\mathrm{T}} \tag{4.30}$$

また，式 (4.29) は (4.26) に代入すると

$$\ddot{\boldsymbol{q}} = \boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{Y}_c(\boldsymbol{S}\boldsymbol{u} - \boldsymbol{h}) \tag{4.31}$$

ここで $\boldsymbol{Y}_c = \boldsymbol{I}_4 - \boldsymbol{J}_c^{\mathrm{T}} X_c^{-1} \boldsymbol{J}_c \boldsymbol{M}^{-1} \in \mathbb{R}^{7\times 7}$．式 (4.31) と (4.26) を連立計算すると

$$\ddot{\boldsymbol{q}} = \boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{Y}_c(\boldsymbol{S}(\Phi \boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{Y}\boldsymbol{S})^{-1}(\boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{Y}\boldsymbol{h} + \boldsymbol{\Gamma}) - \boldsymbol{h}) \tag{4.32}$$

になる．

4.3.2　シミュレーションの結果

図 (4.11) により，CRW ロボットを歩容生成のとき、前後輪のホイールの接地脚は滑らない．そして，前後輪のホイール X 方向の速度は図 (4.12) によって，ゼロに近く，無視することができる．図 (4.13) は歩行周期 T_{set} とリムレスホイールの角速度の関係を表示する．

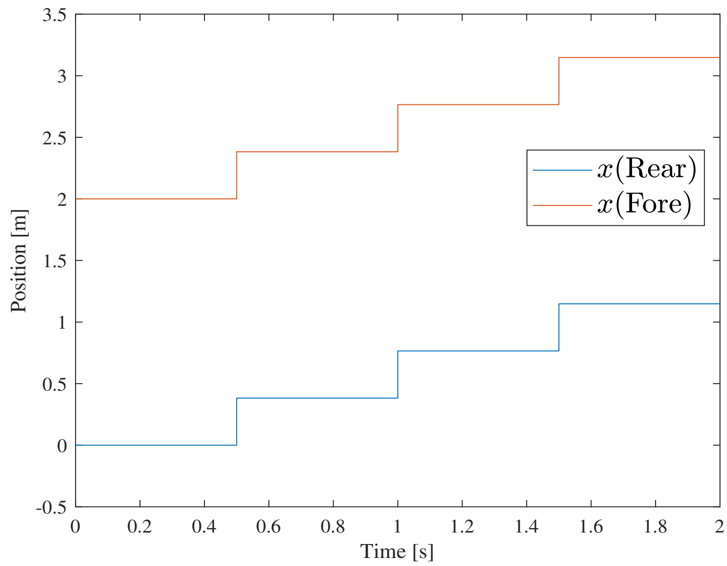

図 4.11: T_{set}=0.5,X 方向の床反力の時間発展

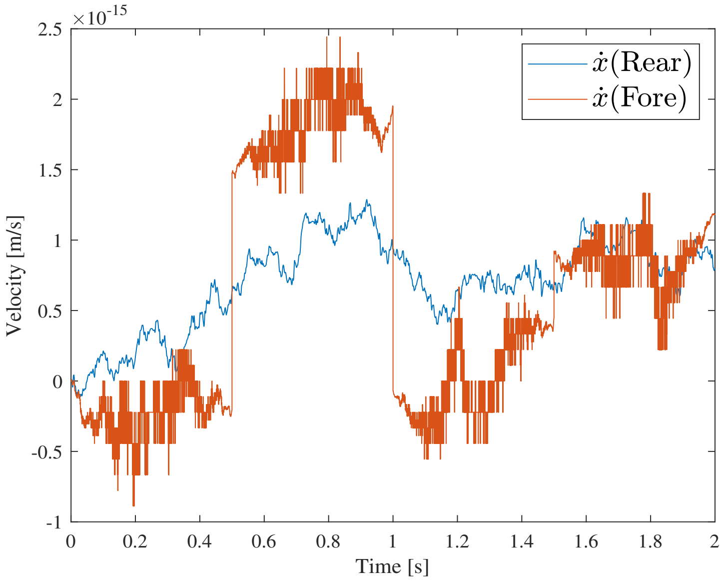

図 4.12: T_{set}=0.5,$\dot{x}$ の時間発展

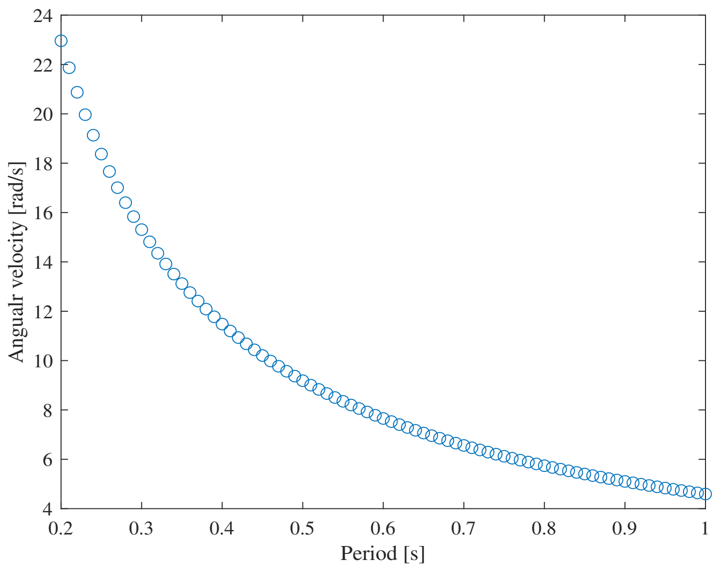

図 4.13: ホイールの角速度と T_{set} の関係

ここで，$\triangle E$[J] はホイールが一歩を歩く，消費したエネルギーであり，$\triangle X$ はホイール一歩の移動距離であり，T_{set} はホイールの歩行周期である．ここでロボットの歩行効率を評価するために，導入する．本章のモデルに置く，SR は下のように計算する．

$$SR = \frac{\triangle E}{mg \triangle X} \tag{4.33}$$

$$\triangle E = \int_0^{\mathrm{T_{set}}} (|\dot{\theta} u_1| + |\dot{l}_c u_2|) dt \tag{4.34}$$

$$\triangle X = 2L_1 \sin \frac{\alpha}{2} \tag{4.35}$$

本章のモデルについて，歩行周期が長くなれば，エネルギー効率が高くなる．

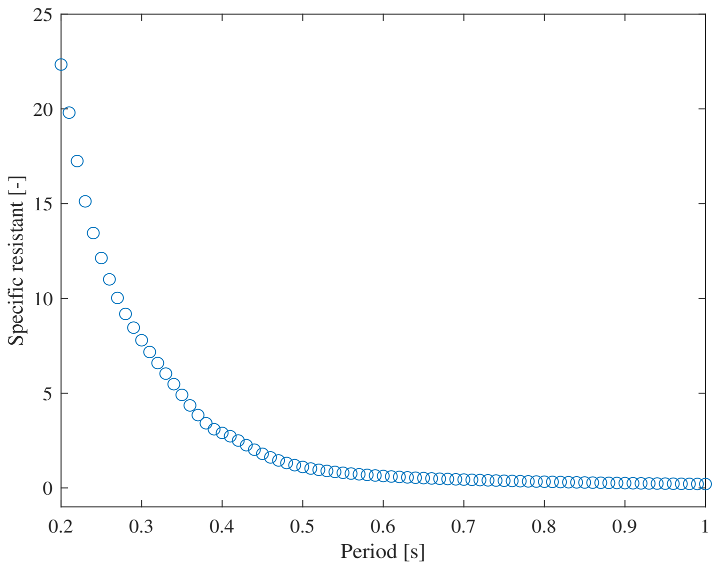

図 4.14: エネルギー効率

第5章　USSWの実現方法2

5.1　数学モデルの導出

本章では、4章のモデルを使って、ステルスウオーキングの生成を目的として行う．4章のモデルが低摩擦路面上の歩容生成は X_{com}, Z_{com},θ_d の制御を基づく，歩容を生成した，新しい制御として，本章は $\ddot{x}$, Z_{com},θ_dw 三つの目標を制御する，低摩擦路面上の歩容生成の可能性を検討する．本章のモデルは4章のモデルを使う．

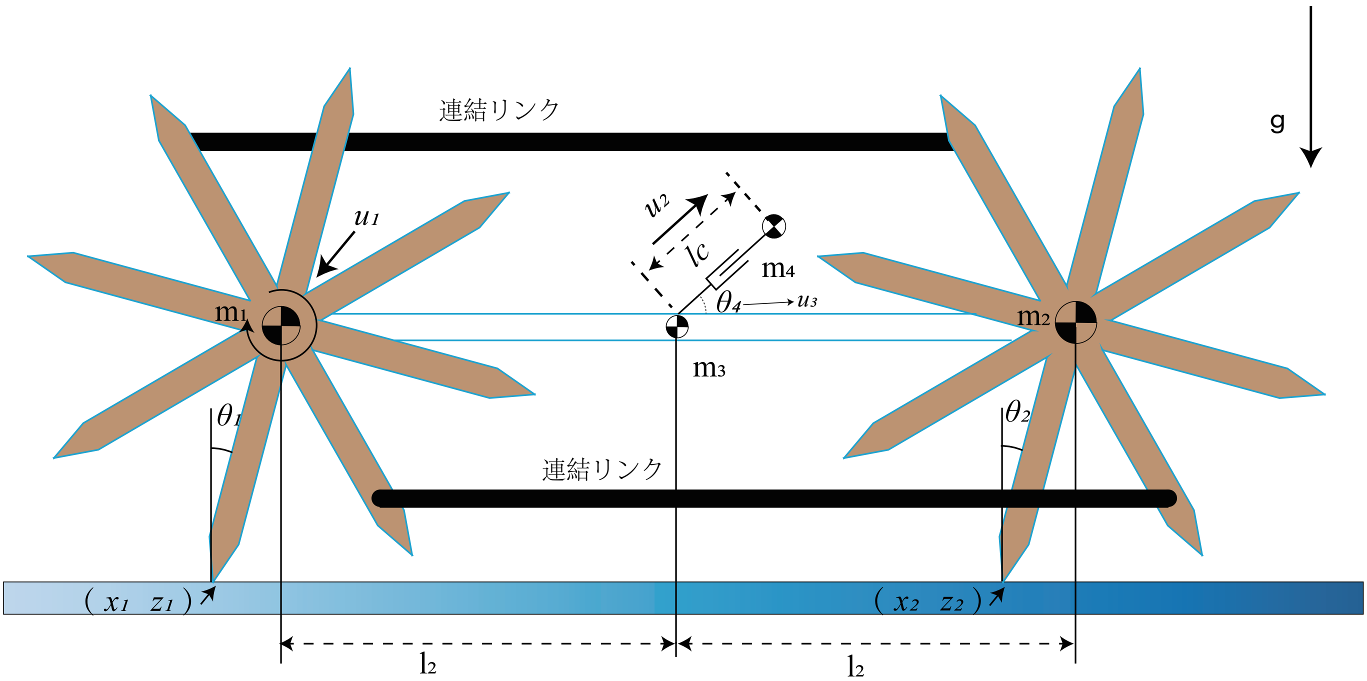

図 5.1: 回転トルク入力と揺動質量入力-RW モデル

5.1.1　数学モデルの導出

これまで、高摩擦路面上のUSSWを生成した，このシステムを用いて摩擦なし路面上の歩容生成を検討する．

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{h} = \boldsymbol{S}\boldsymbol{u} + \boldsymbol{J_c}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\lambda}_c \tag{5.1}$$

$$\boldsymbol{J_c}\dot{\boldsymbol{q}} = \boldsymbol{0} \tag{5.2}$$

拘束ヤコビ行列の詳細は

$$\boldsymbol{J}_c = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -l_1\sin\theta_1 & l_1\sin\theta_2 & 2l_2\cos\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & l_1\cos\theta_1 & -l_1\cos\theta_2 & -l_2\sin\theta_3 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{5.3}$$

である．そして，式 (5.1) と (5.2) により，λ_c を得られる．

$$\boldsymbol{\lambda_c} = -X_c^{-1}\boldsymbol{J}_c\boldsymbol{M}^{-1}(\boldsymbol{Su} - \boldsymbol{h}) \tag{5.4}$$

$$X_c = \boldsymbol{J}_c\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{J}_c^{\mathrm{T}} \tag{5.5}$$

そして，式 (5.4) を (5.1) に代入すると

$$\ddot{\boldsymbol{q}} = \boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{Y}_c(\boldsymbol{Su} - \boldsymbol{h}) \tag{5.6}$$

ここで $\boldsymbol{Y}_c = \boldsymbol{I}_4 - \boldsymbol{J}_c^{\mathrm{T}}X_c^{-1}\boldsymbol{J}_c\boldsymbol{M}^{-1} \in \mathbb{R}^{7\times 7}$．式 (5.6) と (5.1) を連立計算すると

$$\ddot{\boldsymbol{q}} = \boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{Y}_c(\boldsymbol{S}(\Phi\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{YS})^{-1}(\boldsymbol{\Phi M}^{-1}\boldsymbol{Yh} + \boldsymbol{\Gamma}) - \boldsymbol{h}) \tag{5.7}$$

になる．

5.1.2 制御系設計

ゼロ摩擦路面上の拘束ヤコビ行列の詳細は

$$\boldsymbol{J}_c = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -l_1\sin\theta_1 & l_1\sin\theta_2 & 2l_2\cos\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & l_1\cos\theta_1 & -l_1\cos\theta_2 & -l_2\sin\theta_3 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{5.8}$$

システムの入力は 3 つ，後輪の回転トルク，揺動質量の角度を制御する回転トルクと揺動質量の入力。詳細は

$$\boldsymbol{S} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{S}_1 & \boldsymbol{S}_2 & \boldsymbol{S}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{5.9}$$

Z-の中心質点位置 COM は以下のように表示する．

$$Z_{com} = \sum_{i=1}^{4} \frac{m_i Z_i}{m} \tag{5.10}$$

Z_i は m_i の $Z-$ 位置，m[kg] は連結型リムレスホイールの全身質量．X 方向と Z 方向の制御目標は次のように表示する．

$$m\ddot{Z} = F_{Zfore} + F_{Zrear} - mg \equiv 0 \tag{5.11}$$

ここで，F_z は支持脚から地面の鉛直方向の方向の床反力である．ここで θ=$\boldsymbol{S}_1\bar{q}$，θ は制御出力と記述さらた．接地脚と地面の角度が $-\frac{\alpha}{2}$ から，$\frac{\alpha}{2}$ まで変換させ，五次関数を使う．

$$\theta_d(t) = \frac{\alpha}{2}(\frac{6t^5}{T_{\rm set}^5} - \frac{15t^4}{T_{\rm set}^4} + \frac{10t^3}{T_{\rm set}^3}) - \frac{\alpha}{2} \tag{5.12}$$

走行中にロボットが滑らないようにするため，水平方向の力は定数とする．次のように表示する．

$$\ddot{x} = 0 \tag{5.13}$$

歩容生成のとき，地面から飛ぶことを回避するため，鉛直方向の床反力 F_z を正に保つ必要がある，(5.3) の条件を

$$\ddot{Z}_{com} = \boldsymbol{J}_{Zcom}\ddot{\boldsymbol{q}} + \dot{\boldsymbol{J}}_{Zcom}\dot{\boldsymbol{q}} \tag{5.14}$$

と表示する．式 (5.3) と (5.4)(5.5) すべての出力目標 の条件は，次のようにまとめられる．詳細は

$$\boldsymbol{\Phi}\ddot{\boldsymbol{q}} = \boldsymbol{\Gamma} \tag{5.15}$$

$$\boldsymbol{\Phi}\ddot{q} = \begin{bmatrix} \ddot{\boldsymbol{\theta}}_1 \\ \boldsymbol{Z}\ddot{com} \\ \ddot{\boldsymbol{X}} \end{bmatrix}, \boldsymbol{\Gamma} = \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_d(t) \\ -\dot{\boldsymbol{J}}_{Zcom}\dot{\boldsymbol{q}} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{5.16}$$

式 (5.7)(5.8) が式 (4.1) に代入すると，制御入力が計算された．

$$\boldsymbol{u} = (\boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{Y}\boldsymbol{S})^{-1}(\boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{Y}\boldsymbol{h} + \boldsymbol{\Gamma}) \tag{5.17}$$

5.1.3 初期状態の導出

ロボットの制御と物理パラメータは表 (4.1) 記載され、初期状態を次のように設定する．

$$\boldsymbol{q}(0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{\alpha}{2} & -\frac{\alpha}{2} & 0 & 0 & 0.5 \end{bmatrix}^{\rm T} \tag{5.18}$$

$$\dot{\boldsymbol{q}}(0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \theta_4(0) & 0 \end{bmatrix}^{\rm T} \tag{5.19}$$

制御出力により，ロボットの揺動質量はゼロダイナミクスになる．ロボットの安定化を実現するため，適切な初期状態を設定すべく．式 (4.14) により，ロボット

の X_{com} の X 方向の速度をゼロに維持する，初期状態に決まる．X 方向の重心速度 V と揺動質量の初期速度の関係は次に示す．

$$V = \frac{2L_1 \sin\alpha}{T_{\mathrm{set}}} = \dot{\boldsymbol{X}}_{com}(0) = \frac{\boldsymbol{J}_{Xcom}(0)\dot{\boldsymbol{q}}(0)}{m_{all}} = \frac{\dot{\theta}_4(0) l_3 m_4 \cos\theta_4}{m_{all}} \tag{5.20}$$

式 (3.21) を解くと，揺動質量の初期速度 $\dot{l}_c$[m/s] 以下のようになる．

$$\dot{\theta}_4(0) = \frac{2L_1 \sin\frac{\alpha}{2}}{T_{\mathrm{set}}} \times \frac{m_{all}}{l_3 m_4 \cos\theta_4} \tag{5.21}$$

5.2　シミュレーションの結果

図 (5.1)～図 (5.6) は $\ddot{x}$, Z_{com},θ_d の制御を基づく CRW ロボットのステルス歩容生成について，シミュレーションの結果であり、4 章のと同じ結果を示す，水平方向の床反力つねにゼロになる，図 (5.1) は足先の連結リンク上の力を表示する。前後輪のホイールはリンクで繋ぐ，Z 方向の床反力はシステムの質量に相当する．揺動質量のについては、周期性運動軌道を生成した．図 (5.6) から見ると，前後接地脚はゼロにみなしことができる．

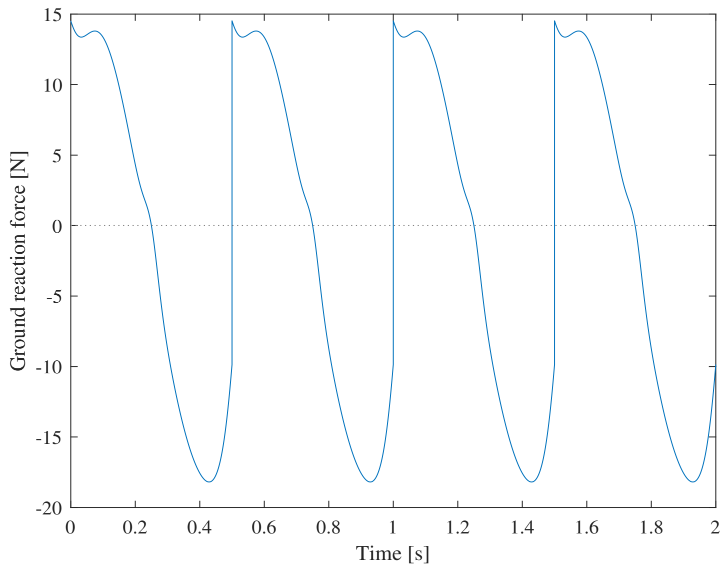

図 5.2: T_{set}=0.5, 連結リンクの相互作用力

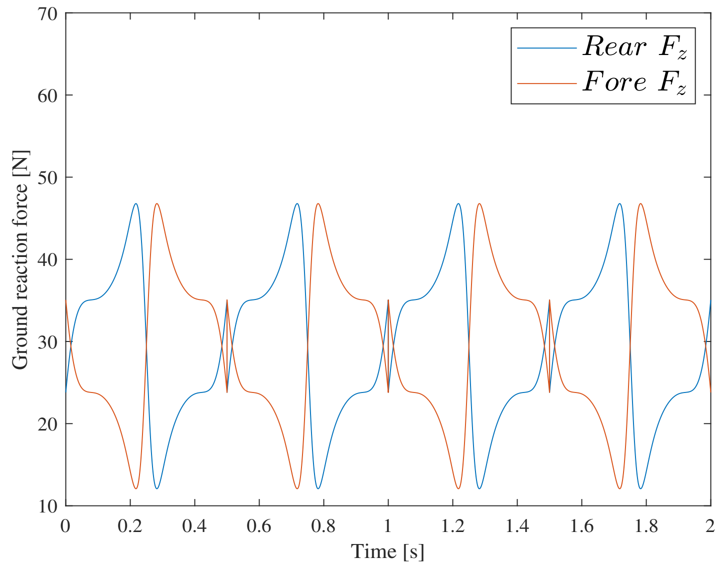

図 5.3: T_{set}=0.5,Z 方向床反力の時間発展

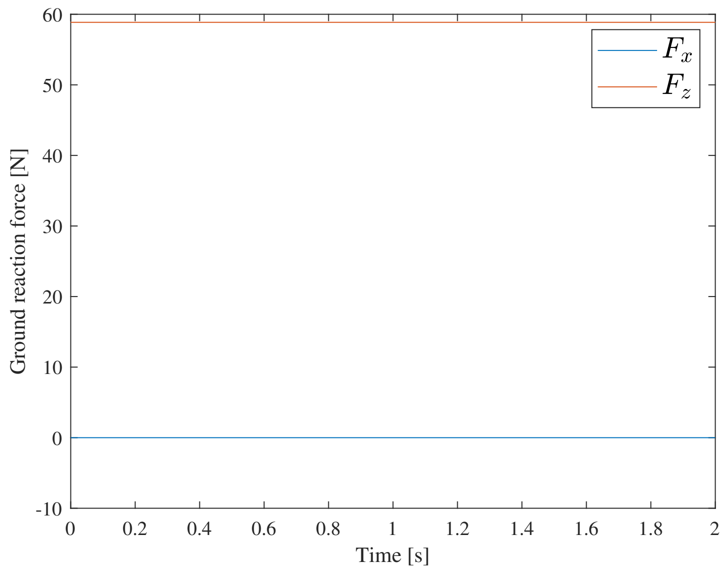

図 5.4: T_{set}=0.5, 床反力の時間発展

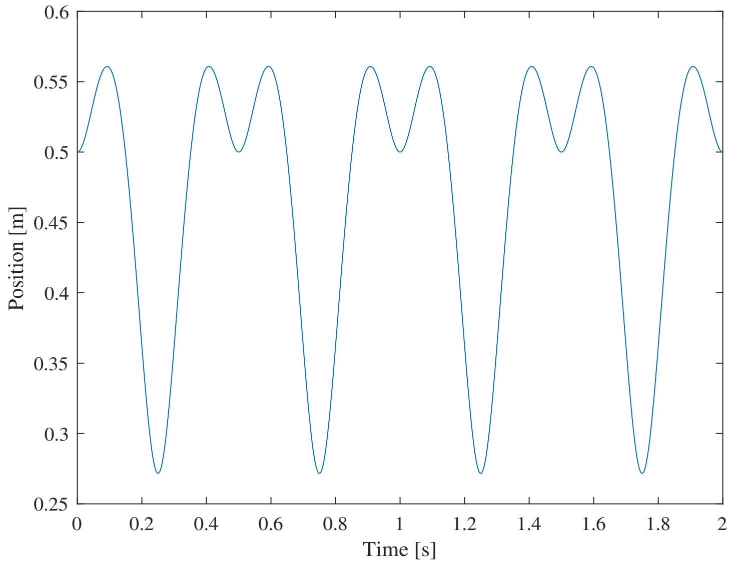

図 5.5: T_{set}=0.5, 揺動質量の位置の時間発展

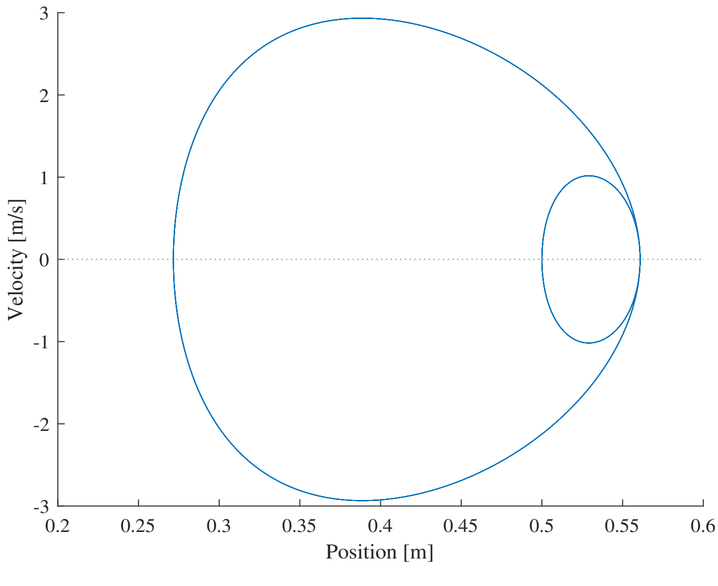

図 5.6: T_{set}=0.5, 揺動質量の位相平面図

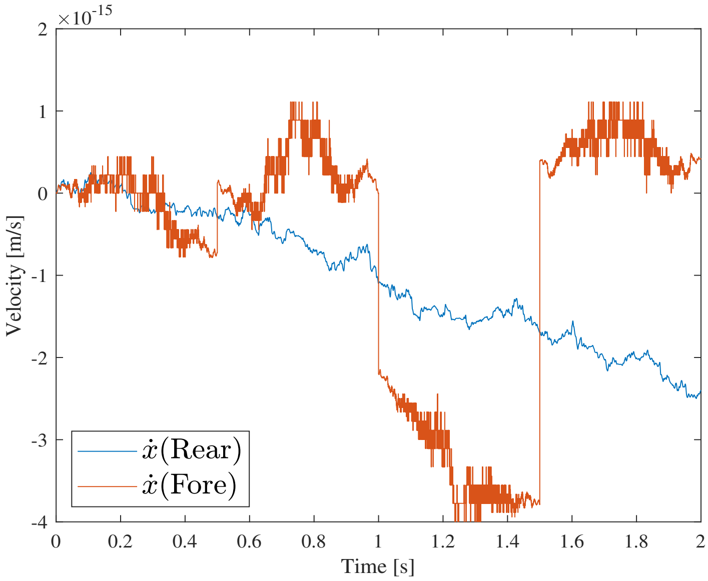

図 5.7: T_{set}=0.5, 接地脚 X 方向の速度の時間発展

第6章　結言

6.1　結論

本論文では，揺動質量を用いた連結型リムレスホイールロボットの低摩擦路面上の安定歩容生成の可能性を検討した．まず，第2章では，水平方向と鉛直方向それぞれの揺動質量を用いた連結型リムレスホイールロボット，安定歩容生成の可能性を論述する．そのために，数学モデルを構築して，数値シミュレーションを通して，典型的な入力と T_{set}，μ を見つける．そして，その中で，歩行周期，引き込み現象，とエネルギー効率について調査した．第3章では，2章に発見した問題に対する、新しい制御を使用して、歩容生成の可能性を検討した．その次、3章のモデルに変更して，2自由度の揺動質量を用いた車輪トルクを駆動力として連結型リムレスホイールロボットモデルを構築し，数値シミュレーションを通し，低摩擦路面上の安定歩容生成の可能性を調べ，歩行解析を行った．結論について，X方向とY方向それぞれの揺動質量を使用した、CRWシステムは低摩擦路面上の歩容生成することが困難である．初期状態に依頼性が高い，現実環境への実用化が難しい．馬術に啓発され，2自由度の揺動質量を用いたCRWシステムにおいて，重心位置を制御することで生成した歩容は現実環境への実用性が高いと考えられる．

6.2　将来の課題

本論文では，揺動質量を追加し，低摩擦路面とゼロ摩擦路面上の歩容生成が可能性を検証した．しかし，第2章のモデルが鉛直方向の床反力がマイナスになる，支持脚が地面から離れ，倒れる場合があった．しかし，理論的に，床反力がゼロ以上になるパラメータ必ず存在する2自由度の揺動質量を取り付け，その初期状態と制御系を適切に設計することで、CRWのUSSWを実現可能であることが明らかにされた．本論文に論述したCRWシステムは平行四辺形の形態をもち、第4章の理論を踏まえて、未来には，水平を保つ，2足ロボットの開発は可能になる．また，リムレスホイール式ロボットは現実に応用の例が少ない，たかい適応力をもつTensegrity [18] ロボットと揺動質量を結合して，多種路面上に歩容生成ができるロボットを将来の課題として残っている．

第7章　謝辞

本論文の執筆にあたり，多くの方々にご支援いただきました．

中間審査および最終審査では，ホ アン ヴァン准教授，平石 邦彦教授，白井清昭准教授より，貴重なご指導とご助言を賜りました．感謝申し上げます．

主指導教員である浅野　文彦准教授には，研究の着想から，調査，論文執筆まで多くのご指導をいただきました．心から感謝申し上げます．

最後に，所属する浅野研究室のみなさまには多くのご支援をいただきました．お礼申し上げます．

ありがとうございました．

参考文献

[1] M. Raibert, K. Blankespoor, G. Nelson and R. Playter," Bigdog, the rough-terrain quadruped robot," *Proc. of the 17th IFAC world congress* ,pp. 10822-10825,(2008)

[2] A. Sprowitz, A. Tuleu, M. Vespignani, M. Ajallooeian, E. Badri and A. J. Ijspeert,"Towards dynamic trot gait locomotion:Design,control,and experiments with Cheetah-cub, a compliant quadruped robot" *The International Journal of robotics Research*,Vol. 32,No. 8,pp. 932-950,(2013)

[3] D. Kuehn, F. Grimminger, G. Beinersdorf, G. Bernhard, A. Burchard, M. Schilling, M. Simnofske, T. Stark, M. Zenzes and F. Kirchner,"Additional DOFs and sensors for bio-inspired locomotion:towards active spine,ankle joints,and feet for a quadruped robot," *Proc. of Int. Conf. on Robotics and Biomimetics*,pp. 2780-2786,(2011)

[4] M. Khoramshahi, Alexander Sprowitz and Alexandre Tuleu, M. N. Ahmadabadi and Auke Ijspeert,"Benefits of an Active Spine Supported Bounding Locomotion With a Small Compliant Quadruped Robot," *Proc. of Int. Conf. on Robotics and Automation* pp. 3329-3334,(2013)

[5] L. Li, F. Asano,and I. Tokuda,"High-Frequency Vibration of Leg Masses for Improving Gait Stability of Compass Walking on Slippery Downhill," *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 31 No. 4,(2019)

[6] C. Yan,H. Chen,Y. Zheng,L. Li,I. Tokuta,and F. Asano,"Entrainment-Based Control for Underactuated Compass-Like Biped Robot," *2021 20th International Conference on Advance Robotics* December 6-10,(2021) Ljubljana,Slovenia.

[7] T.Harada, H. Tanaka, M. J. Handins and I. K. Ziss,"Optimall waveform for the entrainment of a weakly force oscillator," *Physical Review Letters*,Vol. 105,Iss. 8,088301,(2021)

[8] L. Li, I. Tokuda and F. Asano,"Nonlinear analysisi of an indirectly controlled limit cycle walker",*Aritficial Life and Robotics(2018)* 23:508-514

[9] L. Li, I. Tokuda and F. Asano"Optimal Input Waveform for an Indirectly Controlled Limit Cycle Walker,"*International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Madrid, Spain,October 1-5,(2018)

[10] L. Li, I. Tokuda and F. Asano"Optimal Gast Entrainment Waveform for Indirectly Controlled Limit Cycle Walker Against External Disturbances,"*International Conference on Robotics and Automation*.Paris,France(2020)

[11] 浅野文彦，井上遼祐, 田中大樹, 徳田功，“ 連結型 RimlessWheel の受動歩行とその性能解析-前後足間の位相差の調節による高速化 ”, 日本ロボット学会誌 ,Vol. 30. NO. 1,pp.107-116,(2012)

[12] L. Li,I. Tokuda and F. Asano."Optimal Input Waveform for an Indirectly Controlled Limit Cycle Walker,"IEEE,RSJ IROS,October 1-5,(2018)

[13] 田中大樹, 浅野文彦, 徳田功,“揺動質量をもつ連結型 RimlessWheel の歩行解析と性能向上の検討”, 計測自動制御学会論文集,Vol. 49,No. 9,pp. 865–874,(2013)

[14] L. Li, F. Asano,and I. Tokuda. "High-Speed Sliding Locomotion Generation on Slippery Surface of an Indirectly Controlled Robot With Viscoelastic Body,"*Robotics and Automation Letters* Vol 4, No. 3, July(2019)

[15] L. Li, F. Asano and I. Tokuda."Nonlinear Analysis of an Indirectly Controlled Sliding Locomotion Robot"*International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Madrid, Spain, October 1-5,(2018)

[16] F. Asano and I. Tokuda,"Indirectly controlled limit cycle walking of combined rimless wheel based on entrainment to active wobbling mass,"*Multibody System Dynamics*,Vol. 34,Iss. 2,pp. 191-210,(2015)

[17] J.Ackerman and J. Seipel,"Enrgy effciency of legged robot locomotion with elastically suspended loads,"*IEEE Trans. on Robotics* Vol. 29,Iss. 2,pp. 321-330,2013

[18] Y. Zheng, L. Li, F. Asano, C. Yan, X. Zhao and H. Chen"Modeling and Analysis of Tensegrity Robot for Passive Dynamic Walking,"*International Conference on Intelligent Robots and Systems* September 27-October 1, Prague, Czech Republic(2021)