床面との滑り接触を考慮したリミットサイクル規範型脚移動ロボットの歩行運動生成と解析

北陸先端科学技術大学院大学
情報科学研究科

藤本 哲朗

2015 年 9 月

修 士 論 文

床面との滑り接触を考慮したリミットサイクル規範型脚移動ロボットの歩行運動生成と解析

1310063 藤本 哲朗

主指導教員 浅野 文彦 准教授
審査委員主査 浅野 文彦 准教授
審査委員 党 建武 教授
飯田 弘之 教授

北陸先端科学技術大学院大学

情報科学研究科

2015 年 8 月

概 要

本論文では，滑り接触下における脚移動ロボットの歩行性質を調査する．先ず受動歩行規範ロボットである上体を有する2脚ロボットが滑り接触下における歩行速度特性を調査し，続いて連結型リムレスホイールを用いて揺動質量が同環境下における歩行速度向上に有効であることを示す．

目 次

第1章　序論

1.1　研究背景

近年，制御や高出力なアクチュエータを用いずに高効率かつロバストな歩行生成が可能であるとして，受動歩行に注目が集まっている．受動歩行は少ないエネルギーでの平地リミットサイクル歩行を達成する特徴から，McGeer[1] により発見されて以来，受動歩行機の歩容機構を規範とし，アクチュエータによる高効率な準受動歩行的なメカニズム等 [6][7] 様々な研究がおこなわれてきた．またロボット内の質量を効果的に揺動させることで，更なる歩行速度と効率の両立が可能であることが示されている [2][4][5]．本研究において揺動質量とは，リンクの自重とは別にリンクに搭載された駆動域を有する質量とする．これらの研究により将来，脚式ロボットを用いた物資輸送において，荷物等の質量配置に工夫を持たせることで，歩行性能の向上が見込まれる．

これらの揺動質量を搭載した受動歩行規範のロボットが実環境に用いられるために，歩行性能だけでなく，不整地歩行に注目した研究が現在行なわれている．前述の先行研究 [2][5] では路面の高低差に注目した不整地歩行研究が行なわれており，不整地踏破に揺動質量が有効であることは既に報告されている．しかしながら屋外環境は必ずしも高低差だけではない．従って揺動質量の有効性を検討するために，様々な不整地環境の通した議論を行うことが必要である．そこで本研究では，不整地設定として，床面との間に滑り接触が生じると設定する．従来の受動歩行研究は基本的に支持脚と床面との間は滑らないものと前提を置くものがほとんどであるが，氷や油で覆われた路面に代表されるような静摩擦力が低い不整地においては適切な前提とは言い難い．浅野らはこのような条件設定の下，Rimless wheel（以降：RW）を用いて受動歩行規範の歩行解析を行い，定常歩行が生成されることを報告しているが [8][9][11]，揺動質量を搭載した場合も同様に歩容が定常歩行となるかはまだ十分に検討されていない．受動歩行は脚の慣性を十分に活かす歩行であるため，基本的には制御無しに定常歩行生成されることが望ましい．そこでまず，揺動質量を搭載したロボットが滑り接触環境下でも定常歩行生成されるかを検証する．本研究では，転倒による歩行不成立を回避するために連結型 Rimless wheel（以降：CRW）を用いる．揺動質量を搭載した受動歩行規範の歩行ロボットの基礎研究として，幅広い動摩擦係数の環境における歩行性能を調査し，滑り接触下における揺動質量の有効性に関する議論を行う．RW は遊脚の自由度が無いことによる衝突姿勢が一定となることなど，受動歩行ロボットの中でも最も単純なモデルとして知られており，基礎研究として有用であると考えられる．

また後半では上体を有するコンパス型 2 脚ロボットの滑り接触環境下における歩行生成についても数値シミュレーションによる歩行再現と解析を行う．前半では CRW を用いた歩行解析を行ったが，多くの受動歩行規範のロボットはアクチュエータを使用してかつ遊脚自由度を有する歩行を行っているなかで，RW のように歩行が生成可能であるかについては報告が十分でなく，研究が必要である．そこでシンプルな受動歩行規範のロボットとして知られるコンパス型 2 脚ロボットを用いて遊脚自由度を有するロボットであっても歩行生成されるかについて数値シミュレーションを用いて検証するとともに，2 脚歩行ロボットの歩行特性について調査する．

1.2　研究目的

本研究の目的は，脚式ロボットの不整地踏破能力を向上させるために，脚と床面との間に滑り接触が生じる不整地環境下における脚式ロボットの歩行性質を明らかにすることである．また本研究で提案する揺動質量を搭載するという手法の CRW の不整地踏破能力と歩行速度の向上に対する有効性についても調査，検証を行う．

1.3　本論文の構成

本論文は本章を含めて 5 つの章で構成される．第 2 章では静摩擦のみが働く滑りが生じない路面を前提に，揺動質量を搭載した CRW の歩行生成と解析を行い，揺動質量が CRW の歩行速度向上に寄与していること，またそのメカニズムとして重心平坦化の観点から定量的な指標を用いて議論を行う．第 3 章では床面との間に滑り接触が生じる環境下における揺動質量を搭載した CRW の歩行生成と解析を行い，揺動質量が滑りを含まない整地条件同様，CRW の歩行速度の向上に結びついているという結果を示す．また整地条件同様，揺動質量の平坦化に関する議論も併せて行う．第 4 章では滑り接触下における上体付き 2 脚ロボットの歩行生成と解析を行う．本章のモデルは揺動質量の有効性については議論しない代わりに，制御パラメータを変更することによって歩行速度が変化すると共に対応可能な滑りやすさが変化する結果も示す．最後に第 6 章において本研究で得られた結果を総括する．

第2章　非滑り接触下における連結型 Rimless wheelの歩行生成と解析

2.1　非滑り接触下における揺動質量を搭載した連結型Rimless wheelのモデリング

本章ではCRWを用い，床面との間は非滑り接触とした歩行の解析を行う．RWは，回転することで常に一定の遊脚接地を実現させ，一平面上を歩行する最もシンプルな脚式ロボットとして知られている[12]．CRWは単体のRWを前後に配置し，一定の距離を保ち続けて一方向に運動するように剛体で固定したものである．なお本研究では前後の回転は常に同位相であることを前提とする．

2.1.1　運動方程式

本章で用いるモデルを図2.1に示す．ロボットは棒状の胴体部とその中心に棒と垂直な可動域を持つ揺動質量，そして胴体の前後に取り付けられた2つのRWからなる．これらは全て剛体として扱う．前後に配置されたRWが回転することでこのロボットは一方向について歩行を行う．従って本モデルの自由度について，前後RWの回転に2自由度，前後RWを繋ぐ胴体の角度に1自由度，胴体に接続される揺動質量の位置に1自由度，そしてロボット上の1点が平面上の原点に対してどこに位置するのかに2自由度，計6自由度となる．

以上の議論を元に図2.1に表わされるCRWの一般化座標を以下のよう設定した．

$$\boldsymbol{q} = \left[x\ z\ l_{\mathrm{w}}\ \theta_1\ \theta_2\ \theta_3\right]^{\mathrm{T}} \tag{2.1}$$

ただし一般化座標ベクトル内 x, z は後方RWの支持脚先端の座標 x_1, z_1 を表す ($x = x_1, z = z_1$).

このとき，ラグランジュ方程式により揺動質量を搭載したCRWの運動方程式は以下のように表わされる．

$$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{h}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}) = \boldsymbol{J}_{\mathrm{c}}(\boldsymbol{q})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\lambda} \tag{2.2}$$

$$\boldsymbol{J}_{\mathrm{c}}(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{q}} = \boldsymbol{0}_{4\times1} \tag{2.3}$$

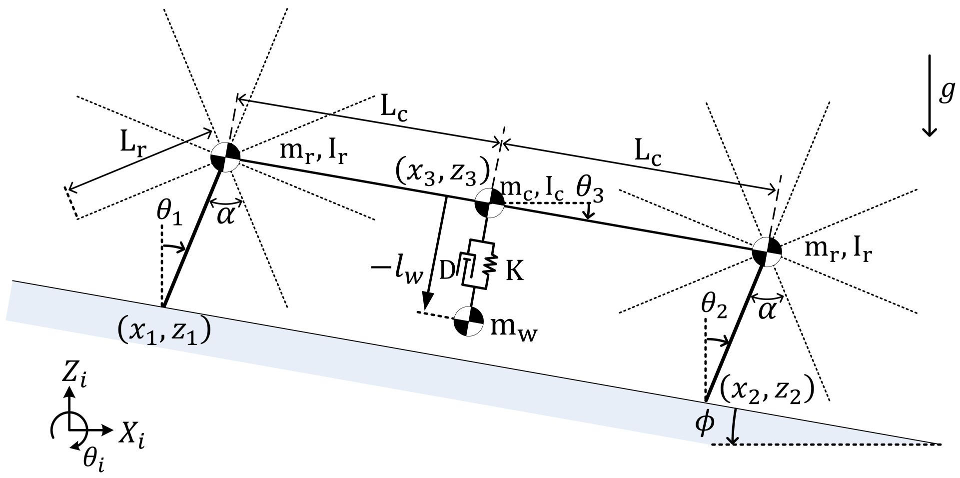


図 2.1: 下り斜面上を歩行する揺動質量を搭載した連結型 Rimless wheel

$$\boldsymbol{J}_c = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \tan(\phi) & 1 \end{bmatrix} \tag{2.4}$$

ただし $\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q}) \in \mathbb{R}^{6\times6}$ は慣性行列，$\boldsymbol{h}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}) \in \mathbb{R}^{6}$ は遠心力とコリオリ力と重力を含むベクトルである．$\boldsymbol{J}_{\mathrm{c}}(\boldsymbol{q}) \in \mathbb{R}^{4\times6}, \boldsymbol{J}_{\mu}(\boldsymbol{q}) \in \mathbb{R}^{4\times6}$ はそれぞれホロノミック拘束と，動摩擦ベクトルのヤコビアンである．また式 (2.2) 右辺第 2 項の $\boldsymbol{J}_{\mathrm{c}}(\boldsymbol{q})$ は式 (2.3) を満たす行列として決定される．$\boldsymbol{\lambda} \in \mathbb{R}^{4}$ は未定乗数ベクトルである．

本章においては，次のホロノミック拘束条件を設定している，すなわち

1) 後方の RW の支持脚先端の x 方向の速度成分は常に 0

2) 後方の RW の支持脚先端の z 方向の速度成分は常に 0

3) 前方の RW の支持脚先端の x 方向の速度成分は常に 0

4) 前方の RW の支持脚先端の z 方向の速度成分は常に 0

5) 前後の RW は同期的に回転する

である．

2.1.2　ホロノミック拘束力

本節ではホロノミック拘束力の導出について述べる．ホロノミック拘束については，以下のように記述されるものである．

ホロノミック，非ホロノミックとは力学的拘束の分類に使われる言葉であって，一般化座標 q のみを含む代数等式 $\gamma\ (q) = 0$ の形で表される拘束をホロノミックといい，そうでないものを総称して非ホロノミック拘束という．[13][14]

従って前述のホロノミック拘束条件 (1)〜(4) は，前後 RW の支持脚先端の位置座標が一定であることと同義であり，ホロノミック拘束条件 (5) は前後輪の RW の角度が常に一致することと同義である．これらはすなわち以下の方程式 (2.5)〜(2.9) で表わされる．

$$x = \text{constant} \tag{2.5}$$

$$z = \text{constant} \tag{2.6}$$

$$x + \mathrm{L_r}\sin\theta_1 - \mathrm{L_r}\sin\theta_2 + 2\mathrm{L_c}\cos\theta_3 = \text{constant} \tag{2.7}$$

$$z + \mathrm{L_r}\cos\theta_1 - \mathrm{L_r}\cos\theta_2 - 2\mathrm{L_c}\sin\theta_3 = \text{constant} \tag{2.8}$$

$$\theta_1 = \theta_2 \tag{2.9}$$

これら位置，角度に関する条件式を時間微分することで，速度，角速度で表わされた次のホロノミック拘束条件式を得る．

$$\dot{x} = 0 \tag{2.10}$$

$$\dot{z} = 0 \tag{2.11}$$

$$\dot{x} + \dot{\theta}_1\mathrm{L_r}\cos\theta_1 - \dot{\theta}_2\mathrm{L_r}\cos\theta_2 - 2\dot{\theta}_3\mathrm{L_c}\sin\theta_3 = 0 \tag{2.12}$$

$$\dot{z} - \dot{\theta}_1\mathrm{L_r}\sin\theta_1 + \dot{\theta}_2\mathrm{L_r}\sin\theta_2 - 2\dot{\theta}_3\mathrm{L_c}\cos\theta_3 = 0 \tag{2.13}$$

$$\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2 = 0 \tag{2.14}$$

これが前節における速度成分等のホロノミック拘束条件文に対応する式である．なお，初期条件として前後 RW の位相差が無い状態から運動を開始させることで，非滑り接触下（ホロノミック拘束条件 (1)〜(4)）においては幾何学的関係から常に $\theta_1 = \theta_2$ が成り立つ．よって条件 (5) を省略したホロノミック拘束条件 (1)〜(4) は次のように表すことができる．

$$\boldsymbol{J}_c\dot{\boldsymbol{q}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & \mathrm{L_r}\cos\theta_1 & \mathrm{L_r}\cos\theta_2 & -2\mathrm{L_c}\sin\theta_3 \\ 0 & 1 & 0 & -\mathrm{L_r}\sin\theta_1 & \mathrm{L_r}\sin\theta_2 & -2\mathrm{L_c}\cos\theta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{z} \\ \dot{l} \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{2.15}$$

2.1.3 衝突方程式

遊脚の着地と支持脚交換は以下の非弾性衝突として扱う．

$$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{q}}^{+} = \boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{q}}^{-} + \boldsymbol{J}_{\mathrm{I}}(\boldsymbol{q})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\lambda}_{\mathrm{I}} \tag{2.16}$$

$$\boldsymbol{J}_{\mathrm{I}}(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{q}}^{+} = \boldsymbol{0}_{4\times 1} \tag{2.17}$$

ただし上付き文字の “+” と “−” はそれぞれ衝突直後，衝突直前を意味する．式 (2.16) 右辺第二項は衝突時のホロノミック拘束ベクトルであり，$\boldsymbol{J}_{\mathrm{I}}(\boldsymbol{q}) \in \mathbb{R}^{4\times 6}$ は式 (2.17) を満たすものである．本研究では衝突において次の条件を設定する．

(a) 交換後の後方 RW 支持脚先端の x 方向の速度成分は 0

(b) 交換後の後方 RW 支持脚先端の z 方向の速度成分は 0

(c) 交換後の前方 RW 支持脚先端の x 方向の速度成分は 0

(d) 交換後の前方 RW 支持脚先端の z 方向の速度成分は 0

これらの条件を満たすものとして $\boldsymbol{J}_{\mathrm{I}}(\boldsymbol{q})$ が求められる．

2.1.4　揺動質量

本研究では CRW の胴体に揺動質量が取り付けられたモデルを用いる．揺動質量はバネとダンパを介して胴体に接続されている（揺動条件）が，用いるバネにより自然長時に揺動質量が胴体と重なるよう吊り上げる位置を調整してあるものとする．また比較対象として揺動質量を胴体に固定した状態のモデル（固定条件:Locked）も併せて検討する．こちらのモデルでは，上記拘束条件に加えて，$\dot{l}_{\mathrm{w}} = 0$ という条件を支持脚期，及び衝突時のホロノミック拘束条件に加えることで再現することとした．

2.2　数値シミュレーション

前述の CRW モデルに対し，表 2.1 の物理パラメータを用いて数値シミュレーションを行う．本研究における数値シミュレーションにおいては全て MATLAB を用いている．図 2.2 は計算結果をアニメーションとして描画し解析する際の画面例である．

表 2.1: 物理パラメータ

$\mathrm{m_r}$	1.0	kg
$\mathrm{m_c}$	1.0	kg
$\mathrm{m_w}$	3.0	kg
$\mathrm{I_r}$	1.0	$\mathrm{kg \cdot m^2}$
$\mathrm{I_c}$	1.0	$\mathrm{kg \cdot m^2}$
K	50	N/m
D	0	Ns/m

$\mathrm{L_r}$	1.0	m
$\mathrm{L_c}$	1.0	m
g	9.81	$\mathrm{m/s^2}$
c	100	−
α	$(1/4)\pi$	rad
ϕ	$(1/36)\pi$	rad

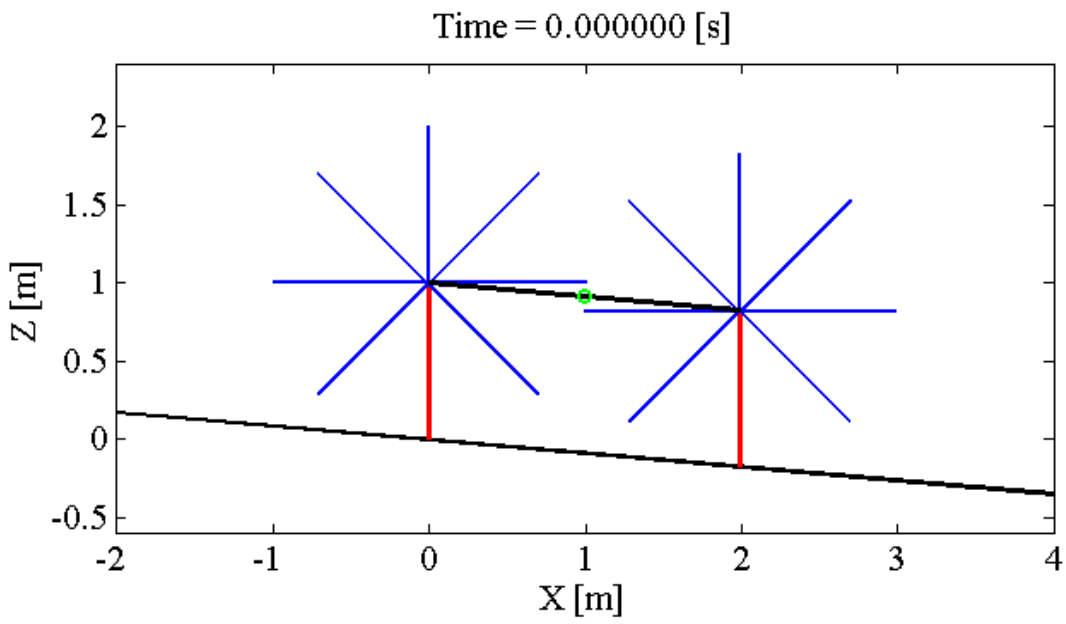


図 2.2: MATLAB 作業画面例

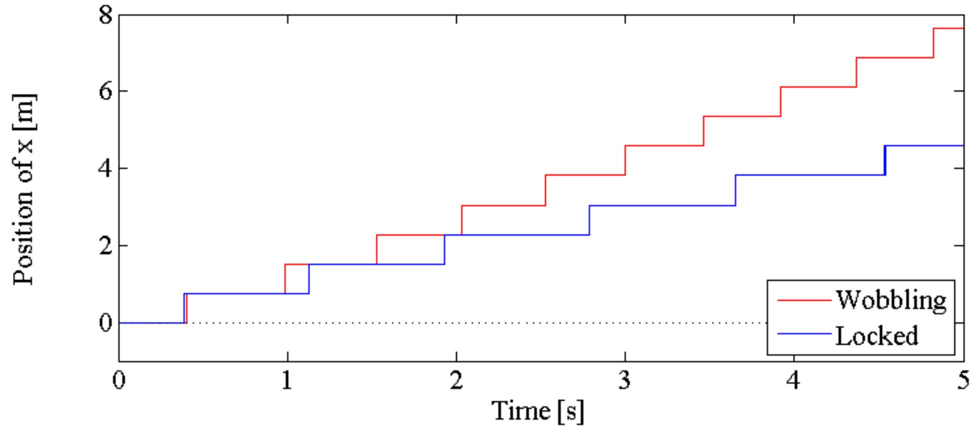
2.2.1 シミュレーション結果に基づく揺動，非揺動の歩容比較

初期状態を式 (2.18) とし，5 秒間歩行の歩行生成を数値計算した．その結果を図 2.3，図 2.4，図 2.5 に示す．

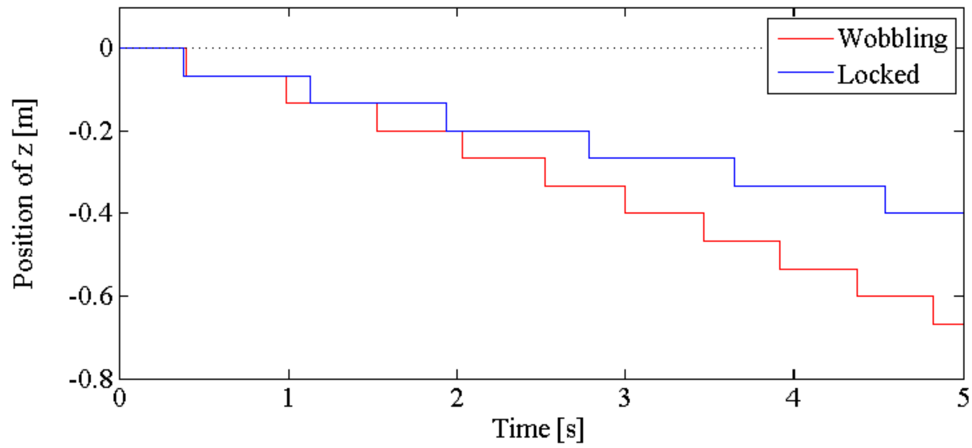
$$\boldsymbol{q}(0) = \begin{bmatrix} 0\ [\mathrm{m}] \\ 0\ [\mathrm{m}] \\ 0\ [\mathrm{m}] \\ 0\ [\mathrm{rad}] \\ 0\ [\mathrm{rad}] \\ \phi\ [\mathrm{rad}] \end{bmatrix},\ \dot{\boldsymbol{q}}(0) = \begin{bmatrix} 0\ [\mathrm{m/s}] \\ 0\ [\mathrm{m/s}] \\ 0\ [\mathrm{m/s}] \\ 1.0\ [\mathrm{rad/s}] \\ 1.0\ [\mathrm{rad/s}] \\ 0\ [\mathrm{rad/s}] \end{bmatrix} \tag{2.18}$$

図 2.3(a)，(b) は後方 RW の支持脚先端の位置座標 x, y についての時間発展をそれぞれ表している．支持脚先端と床面との間には滑りは生じないという条件から，位置座標の値は常に一定値を取っている．値が変化する時点は脚交換が行なわれており，床面と接触した遊脚先端の位置座標の値へと不連続変化を起こす．また下り斜面を歩行しているため，前進すると z の位置座標はより小さくなる．両図を見ると，1 回目の脚交換は固定条件の方が僅かに早いタイミングで行われているもののほとんど差が無く，2 回目以降は揺動条件の方が明らかに早いタイミングで脚交換を迎えていることが分かる．また 5 秒後には概ね 4 歩分の距離だけ揺動条件の方が遠くまで進めているという結果が得られた．

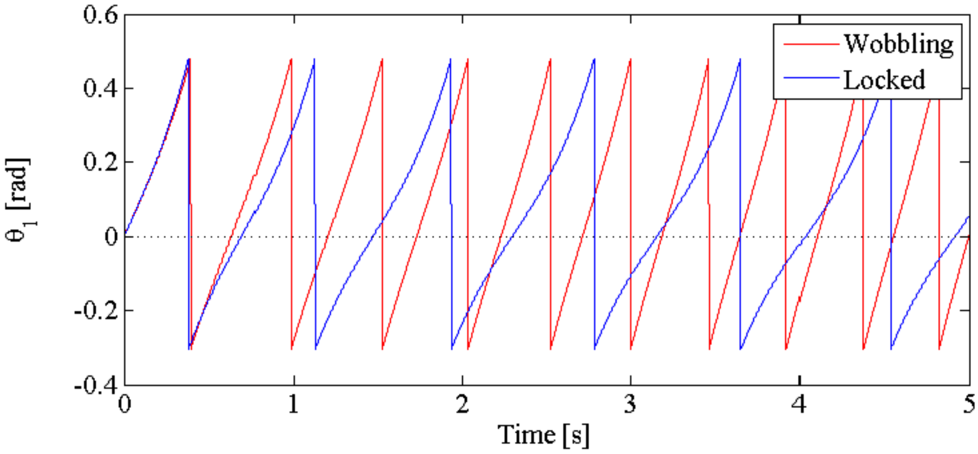
図 2.3(c) は後方 RW の角度 θ_1 の時間発展を表している．基本的に RW は前進している



(a) Position of *x*

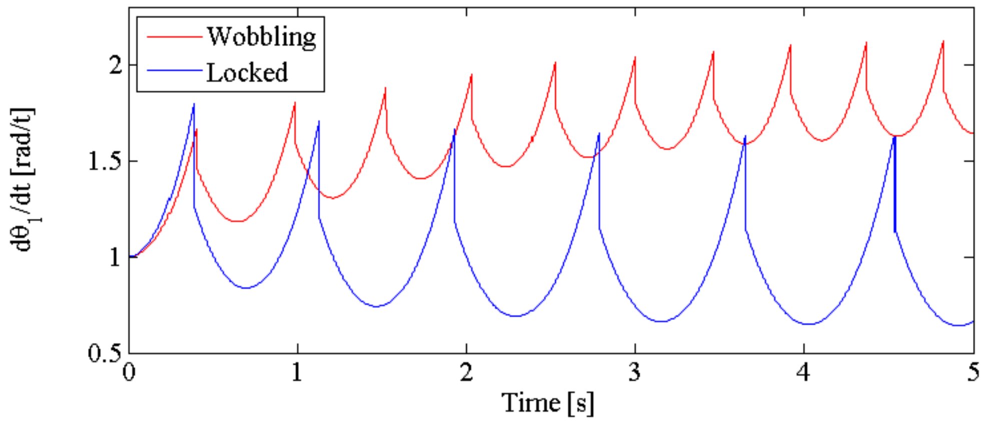


(b) Position of *z*

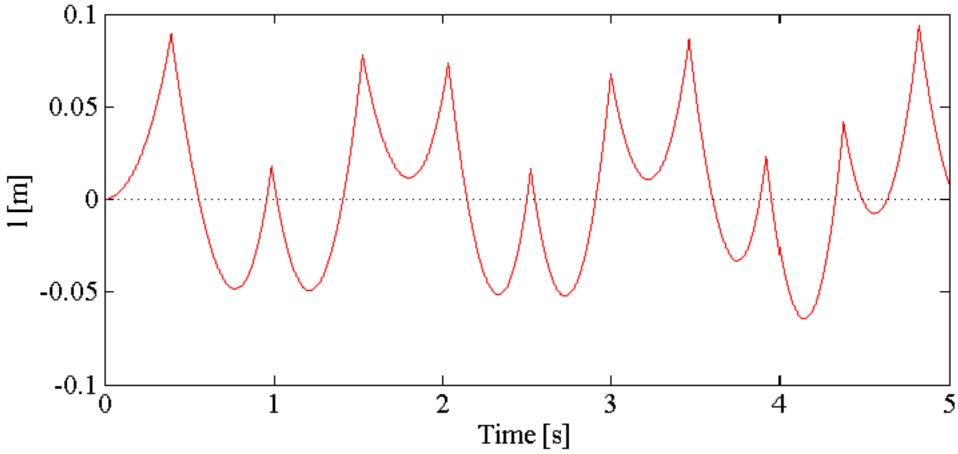


(c) Angular Position of θ_1

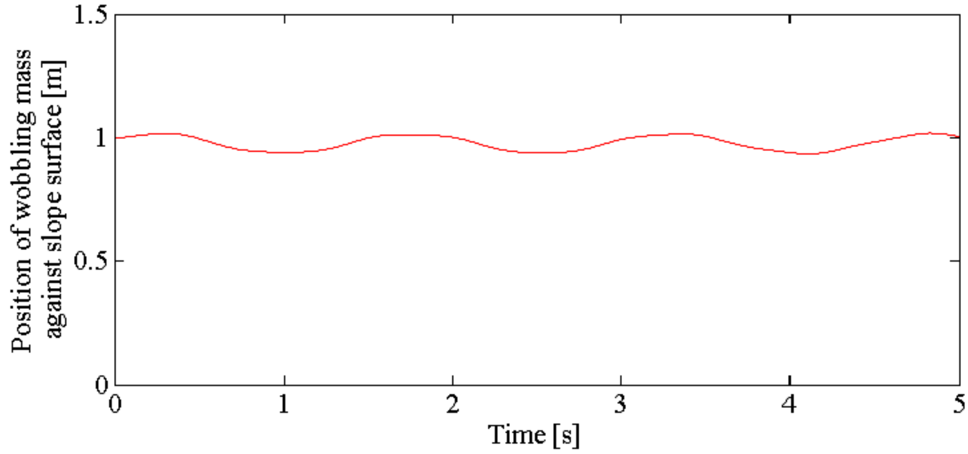
図 2.3: 位置・角度に関するシミュレーション結果



(a) Angular velocity of θ_1



(b) Position of wobbling mass against torso



(c) Position of wobbling mass against slope surface

図 2.4: 角速度・揺動質量位置に関するシミュレーション結果

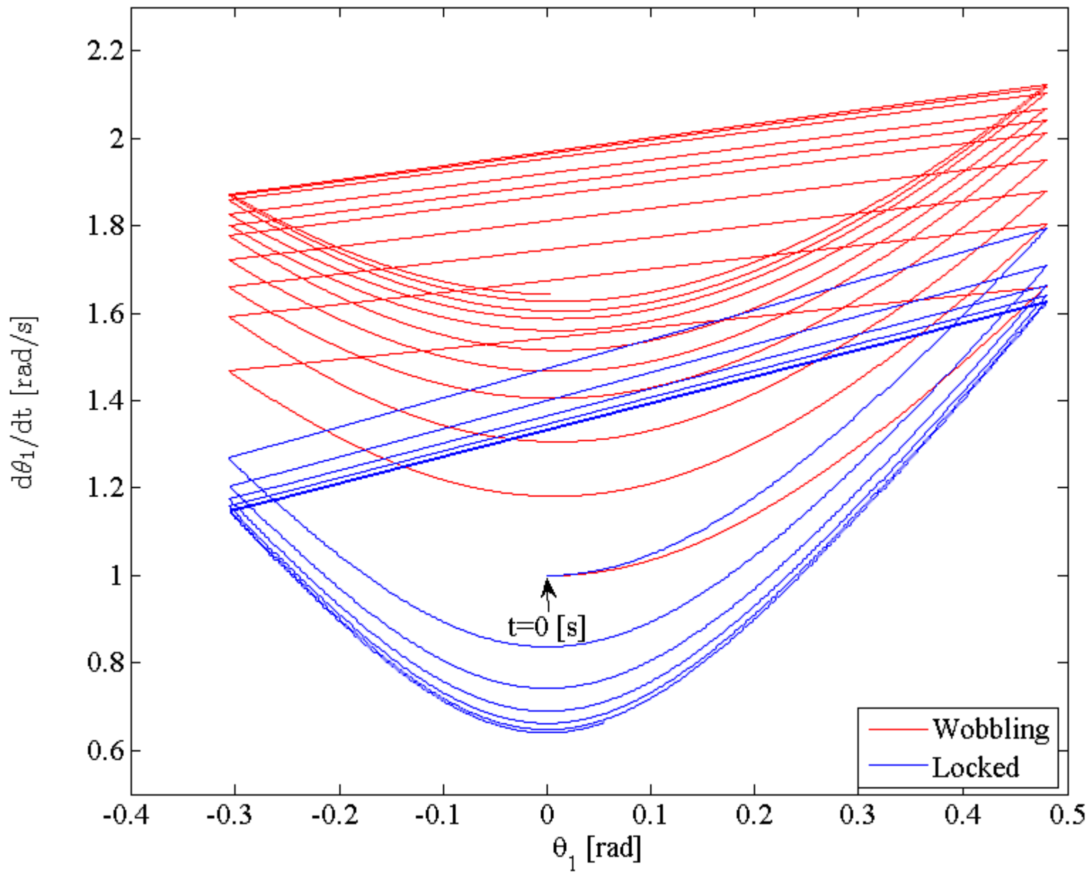


図 2.5: θ_1 に関する位相平面図

間は $\dot{\theta}_1 > 0$ となっているため，支持脚期間中 θ_1 は一様に増加する．図を見ると脚交換で離散的に角度が減少することを除いて，時間と共に常に増加していることから，両条件共に前進していることが分かる．また図 2.3(a)，(b) 同様，図 2.3(c) からも脚交換の間隔が揺動条件の方が短いことが分かる．

図 2.4(a) は後方 RW の角速度 $\dot{\theta}_1$ の時間発展を表している．両条件とも同じ角速度から運動を開始しているものの，異なる角速度のリミットサイクルに収束していく結果が得られた．角速度が離散的に減少する時点では図 2.3 同様に脚交換が行われている．興味深い結果として，脚交換時の角速度の低下が固定条件の場合は揺動条件と比較して非常に大きいということが明らかになった．この角速度の減少は遊脚が床面との間に非弾性衝突を生じ，運動エネルギーが減少することに起因しているが，胴体中の質量を揺動させることにより RW の衝突姿勢は常に一定であるにもかかわらず失われる運動エネルギーが少なくなるという結果は，揺動質量により歩行が高速化される理由の一つであると言える．さら

に立脚期についても速度の減少幅が固定条件に比べ揺動条件は大幅に抑えられるという性質も見受けられる．

図 2.4(b) は胴体を基準とした揺動質量の位置の時間発展を表したものである．これは固定条件の場合は値が常に 0 であるため，揺動条件のみの結果を表示している．歩行に伴って揺動質量が胴体に対して上下動していることが分かる．また下に凸のように見える箇所は全て曲線の傾きが不連続に変化する特異点であり，いずれも脚交換のタイミングと完全に一致していることが分かった．

図 2.4(c) は斜面を基準とした揺動質量の位置の時間発展を表したものであり，図 2.4(b) の値に斜面と胴体の中心の距離を足したものである．この図から揺動質量が床面に対して周期的な揺動を繰り返していることが確認できる．

図 2.5 は θ_1 に関する位相平面図であり，すなわち横軸に θ_1，縦軸に $\dot{\theta}_1$ を取り，時間とともに変化する軌道をプロットしたものである．初期条件より $t = 0$ [s] でどちらも $\theta_1 = 0$, $\dot{\theta}_1 = 1.0$ からスタートし，それぞれ異なる軌道に収束している様子を確認することができる．先ず横軸の値域に注目すると，リムレスホイールは常に同じ姿勢で歩行することからその値域は両条件とも等しいものであることが確認できる．続いて縦軸の挙動にも注目し，時系列の順に歩行の様子を追って確認していく．$t = 0$ 地点より，横軸 θ_1 は時間と共に増加していくが，その時角速度 $\dot{\theta}_1$ は固定条件の方が僅かに高い値を示している．この様子は図 2.4(a) からも確認できる通りである．しかしながら最初の脚交換を経て，前述の衝突によるエネルギーのロスの違いから，以降揺動条件はより高い角速度へと，固定条件はより低い角速度の軌道へと収束していく様子を確認することができる．

2.2.2　性能指標を用いた歩行の定量的比較調査

前節では，ある特定の初期上体から歩行を開始して，リミットサイクル歩行への収束の過程を各状態のパラメータの時間発展を見ることで確認し，概ね揺動条件の方が歩行速度の観点から見て優れていることを確認した．しかしながらそれだけでは最終的に収束するリミットサイクル歩行についても優れているかは明らかではない．そこで本節ではある斜面が与えられた時にそのロボットが最終的に到達する歩行速度を調べるために，十分な時間歩行した後での定常状態の比較を行う．

2.2.3　性能指標

本章では性能指標として Walking speed [m/s]（以降:WS）と Total oscillation distance of COM [m]（以降:TOD）を用いる．それらの定義を以下に示す．ただし式 (2.19),(2.20) において t_0 は前脚交換直後，t_N は次の脚交換直前の，各歩数ごとに対応した時刻を表すも

のとする．

$$\mathrm{WS} = \frac{\frac{x(t_N)-x(t_0)}{\cos\phi} + 2\mathrm{L_r}\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{t_N - t_0} \tag{2.19}$$

$$\mathrm{TOD} = \sum_{i=1}^{N} |A(t_i) - A(t_{i-1})| \tag{2.20}$$

ここで $A(t)$ [m] は斜面から重心までの距離であり，$2\mathrm{m_r} + \mathrm{m_c} = \mathrm{m_w}$ が満たされる今回の物理パラメータの場合に，以下のように計算する．

$$A(t_i) = \frac{1}{2}\left(2\mathrm{L_r}\cos\left(\theta_1\left(t_i\right) - \phi\right) + l_{\mathrm{w}}(t_i)\right) \tag{2.21}$$

WS は滑りの距離を含めた一歩の歩行速度を表す．固定条件に対し WS がより大きければ揺動質量搭載により歩行が高速化されたことを意味する．また TOD は斜面方向に対して重心が一歩当りに移動した総距離を表す．固定条件に対して TOD がより小さければ重心が平坦化されたことを意味する．

2.2.4 性能指標計算手順

数値シミュレータを用いた性能指標の計算手順を以下に示す．初期条件については式 (2.22) を，物理パラメータに関しては $\mathrm{K} = 1$，$\mathrm{D} = 0, 5, 10, 15, 30$，それ以外は表 3.2 の物理パラメータを用いた．

$$\boldsymbol{q}(0) = \begin{bmatrix} 0\ [\mathrm{m}] \\ 0\ [\mathrm{m}] \\ 0\ [\mathrm{m}] \\ \phi\ [\mathrm{rad}] \\ \phi\ [\mathrm{rad}] \\ \phi\ [\mathrm{rad}] \end{bmatrix},\ \dot{\boldsymbol{q}}(0) = \begin{bmatrix} 0\ [\mathrm{m/s}] \\ 0\ [\mathrm{m/s}] \\ 0\ [\mathrm{m/s}] \\ 0\ [\mathrm{rad/s}] \\ 0\ [\mathrm{rad/s}] \\ 0\ [\mathrm{rad/s}] \end{bmatrix} \tag{2.22}$$

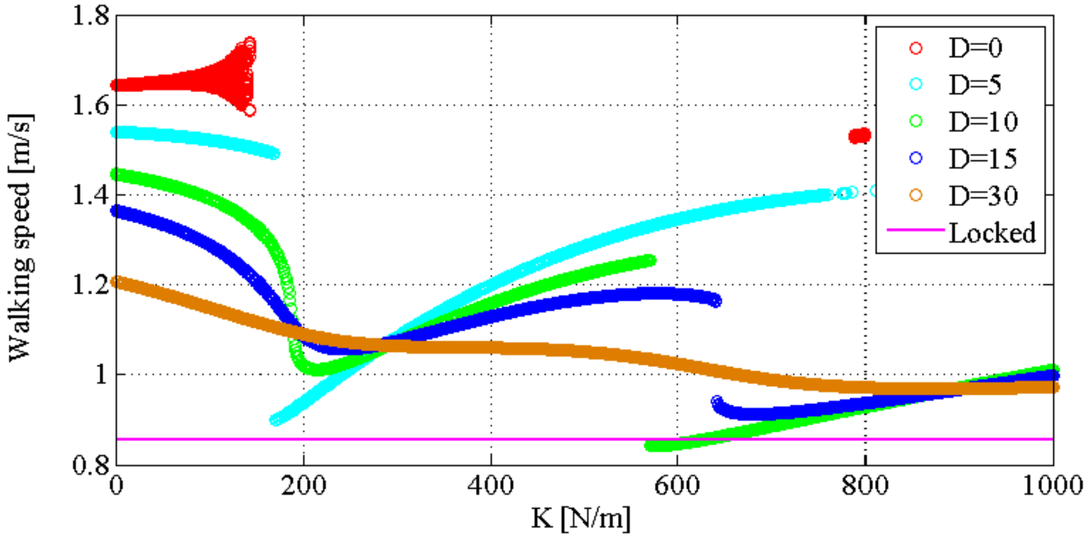
シミュレーションの手順は次のように行った．

1) 初期条件の下，歩行シミュレーションを開始する．

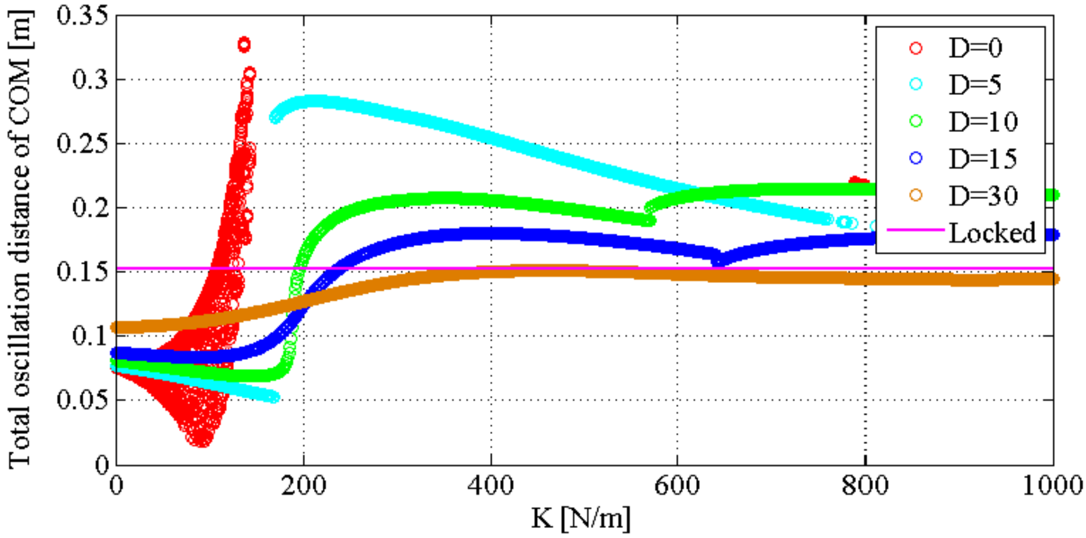
2) 100 秒間の歩行継続を歩行成立とみなし，100 秒経過直前までの 10 歩分の歩行データを保存する，歩行不成立の場合は保存しない．

3) K を 1 だけ増やし，同様の初期条件の下で再度シミュレーションを開始する．

なお，歩行不成立の条件は，“ 床反力が負となる ”，“ 揺動質量が床面より下に移動する ”，“ 一歩前の支持脚が床面に接触する ” とした．ただし二つ目の揺動質量の位置に関する条件については，今回の調査でこれに該当する歩容は現れなかった．



(a) Walking speed [m/s]



(b) Total oscillation distance of COM [m]

図 2.6: 性能指標計算結果

2.2.5　性能指標を用いた比較解析

数値シミュレーションで保存した 10 歩分の歩行性能のプロットを WS について文献 [2] を参考に作成したものを図 2.6(a) に，TOD について図 2.6(b) にそれぞれ示す．各図には D 各値の K の値ごとに 10 のプロットがなされている．従って 10 歩間同じ性能指標を示し続けた場合，その K に対するプロットは一点に重なって表示される．固定条件に関しては K や D の値に依らないので K に対して一定の値がプロットされている．

図 2.6 (a) について述べる．先ず揺動条件では WS は概ね全ての検討範囲で，固定条件よりも高い値を取るという結果が得られた．また特に条件 D=5 で値が離散的に減少するといった特徴が見受けられた．田中 [2] はこのような結果について，離散的に減少した領域について，今までは重心の上下動を平坦化するように揺動質量が動いていたのに対しこの領域では逆に，重心揺動を助長するように動いていると考えられると考察している．

それを踏まえると，図 2.6 (b) の結果はその考えに一致するものであった．すなわち K の増加方向に見て，はじめに WS が低下するときに TOD は固定条件の値を超えるように変化しているという結果が得られた．これらの結果より，揺動質量の歩行速度に対する有効性と，揺動質量により重心軌道の平坦化が達成されているとき特に歩行速度が向上するというメカニズムを確認することができた．

2.3　まとめ

本章では CRW を用いて滑りを含まない，整地歩行における揺動質量の有効性について調査した．過去の研究と同様，揺動質量を搭載することで歩行速度が向上するという結果が得られた．また揺動質量が歩行速度を向上させる要因として，脚交換時のエネルギー損失を抑える，立脚期における重心軌道の平坦化が考えられるということが分かった．今後の課題として，このように重心軌道が歩行速度に与える影響は明らかであるが，平坦化されなかった場合の考察についてはまだ十分とは言い難い．そこで今後の課題として，それらを統一的に扱う指標を用いた検討の必要性が挙げられる．例えばポテンシャル・バリアである．ポテンシャル・バリアの観点から見ると，重心軌道の平坦化は結果的にそれだけポテンシャル・バリアが低減されていると言え，重心揺動の激化はそれだけ通常よりも高いポテンシャル・バリアを突破していると言える．このように揺動質量のポテンシャル・バリアへの寄与に関する議論等を通して，立脚期における揺動質量の有効性については今後も調査が必要である．

第3章　床面との滑り接触を考慮した連結型Rimless wheelの歩行生成と解析

3.1　揺動質量を搭載した連結型リムレスホイールのモデリング

本章では床面との間に滑り接触が生じる環境下での CRW の歩行解析を行う．基本的なモデリングは前章と同様であるが，支持脚先端が滑る場合は前後の RW の回転運動が同期するとは限らないために，前後の RW が同期的に回転するという拘束条件を加える必要がある．この拘束は，現実には前後の RW のリンクにジョイント部が RW の回転と同方向に回転可能な剛体棒を取り付ける等により達成されることを想定している．RW の位相が前後で異なる場合の歩行生成については浅野らの研究により，前後の RW の位相が丁度 $\frac{\pi}{4}$ [rad] だけずれた場合にポテンシャルバリアが最も下がり，その結果歩行が高速化されるという結果を明らかにしている [15]．高速な歩行生成を実現するためには将来的に上記の研究成果についても考慮すべきであるが，滑り接触下における揺動質量を搭載した CRW の歩行生成は未だ前例が無い．そこで本章では最も自由度の低いモデルによる歩行生成について調査することとする．

3.1.1　運動方程式

本章で扱うモデルは前章で示した図 2.1 と同じものである．ロボットの自由度は同様に 6 であり，アクチュエータは搭載していない．揺動質量は胴体に対して垂直方向にのみ可動できるとする．前章同様一般化座標を以下のよう設定する．

$$\boldsymbol{q} = \left[x, z, l_{\mathrm{w}}, \theta_1, \theta_2, \theta_3\right]^{\mathrm{T}} \tag{3.1}$$

一般化座標ベクトル内 x, z は後方 RW の支持脚先端の座標 x_1, z_1 を表す ($x = x_1, z = z_1$)．この時，ラグランジュ方程式により滑り接触下における揺動質量を搭載した CRW の運動方程式は以下のように表わされる．

$$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{h}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}) = \boldsymbol{J}_{\mathrm{c}}(\boldsymbol{q})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\lambda} + \boldsymbol{J}_{\mu}(\boldsymbol{q})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\lambda} \tag{3.2}$$

$$\boldsymbol{J}_{\mathrm{c}}(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{q}} = \boldsymbol{0}_{3\times 1} \tag{3.3}$$

ただし $\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q}) \in \mathbb{R}^{6\times6}$ は慣性行列，$\boldsymbol{h}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}) \in \mathbb{R}^6$ は遠心力とコリオリ力と重力を含むベクトルである．$\boldsymbol{J}_{\mathrm{c}}(\boldsymbol{q}) \in \mathbb{R}^{3\times6}, \boldsymbol{J}_{\mu}(\boldsymbol{q}) \in \mathbb{R}^{3\times6}$ はそれぞれホロノミック拘束と，動摩擦ベクトルのヤコビアンである．また式 (3.2) 右辺第 2 項の $\boldsymbol{J}_{\mathrm{c}}(\boldsymbol{q})$ は式 (3.3) を満たす行列として決定される．$\boldsymbol{\lambda} \in \mathbb{R}^3$ は未定乗数ベクトルである．$\boldsymbol{J}_{\mu}^{\mathrm{T}}\lambda$ は斜面に対し垂直に作用する床反力を表し，$\boldsymbol{J}_{\mu}^{\mathrm{T}}\lambda$ は斜面に対し水平方向に作用する動摩擦力を表す.

3.1.2　下り斜面上の滑り接触下におけるホロノミック拘束力

本研究においては，次のホロノミック拘束条件を設定している，すなわち

1) 後方の RW の支持脚は地面に沿う

2) 前方の RW の支持脚は地面に沿う

3) 前後の RW は同期的に回転する

である.

ホロノミック拘束ベクトルのヤコビアン $\boldsymbol{J}_{\mathrm{c}}(\boldsymbol{q})$ を求める手順を次に示す.

条件 1,2 を満たすような位置に関する拘束条件は次のようになる.

$$\frac{z_i(t_2) - z_i(t_1)}{x_i(t_2) - x_i(t_1)} = -\tan\phi \;\; (\mathrm{i} = 1, 2) \tag{3.4}$$

ただし前章記載の図 2.1 に示す通り，i=1 は後方 RW における支持脚先端座標，i=2 は前方 RW における支持脚先端座標を表す．これを時間で微分することによって，速度に関する次の拘束条件式を得る

$$\frac{\dot{z}_i}{\dot{x}_i} = -\tan\phi \;\; (\mathrm{i} = 1, 2) \tag{3.5}$$

また条件 3 については前章の議論より式 (2.14) の通りである．以上をまとめた結果として次の式が得られる.

$$\boldsymbol{J}_{\mathrm{c}}(\boldsymbol{q})\,\dot{\boldsymbol{q}} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1\tan\phi - \dot{z}_1 \\ \dot{x}_2\tan\phi - \dot{z}_2 \\ \dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} = \boldsymbol{0}_{3\times1} \tag{3.6}$$

ただし

$$\dot{x}_1 = \dot{x} \tag{3.7}$$

$$\dot{z}_1 = \dot{z} \tag{3.8}$$

$$\dot{x}_2 = \dot{x} + \dot{\theta}_1\,\mathrm{L_r}\cos\theta_1 - \dot{\theta}_2\,\mathrm{L_r}\cos\theta_2 - 2\dot{\theta}_3\,\mathrm{L_c}\sin\theta_3 \tag{3.9}$$

$$\dot{z}_2 = \dot{z} - \dot{\theta}_1\,\mathrm{L_r}\sin\theta_1 - \dot{\theta}_2\,\mathrm{L_r}\sin\theta_2 + 2\dot{\theta}_3\,\mathrm{L_c}\cos\theta_3 \tag{3.10}$$

である.

3.1.3　斜面との動摩擦接触

本節では動摩擦力 $\boldsymbol{J}_\mu(\boldsymbol{q})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\lambda}$ について述べる．まず，$\mu(\dot{x})$ について以下のように定義する．

$$\mu(\dot{\boldsymbol{q}}) = -\mu_0 \tanh\left(\frac{\mathrm{c}\dot{x}}{\cos(\phi)}\right) \tag{3.11}$$

ただし μ_0 は正の定数である．支持脚先端の斜面方向の速度 $v = \dot{x}/\cos(\phi)$ に対して，式 (4.25) は以下の性質を満たす.

(a) v の符号に対応して符号が切り替わる

(b) v の絶対値が低い領域を連続に繋ぐ

性質 (a) により支持脚の滑り方向によって別々の動摩擦力を定義する必要がない．また性質 (b) については離散的な外力が作用することによるシミュレータの数値誤差拡大の可能性を回避することに有効であると考えられる．ただしこの近似を行なうためには，調整用の係数として正の定数値 c を十分大きな値に設定することが必要である．本研究では c = 100 と設定した．

式 (3.2) 中に表れる $\boldsymbol{\lambda} = \left[\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3\right]^{\mathrm{T}}$ は前節 3.1.2 で述べたホロノミック拘束を達成するためにモデルに生じる外力であり，そのうち，λ_1, λ_2 は Z 方向を基準に取る．その時斜面に対して垂直な床反力 N_i の大きさは

$$N_i = \frac{\lambda_i}{\cos(\phi)} \quad (i = 1, 2) \tag{3.12}$$

である．N_i を μ 倍し，斜面の水平方向に現われる動摩擦力を x, z 各成分に整理することで $\boldsymbol{J}_\mu(\boldsymbol{q})$ が得られる．なお λ_3 として表される前後の RW を同期回転するために生じる外力に依って発生する摩擦力については本研究では考慮しない．従って $\boldsymbol{J}_\mu(\boldsymbol{q})$ の 3 行目の要素は全て 0 である．

3.1.4　衝突方程式

遊脚の着地と支持脚交換は以下の非弾性衝突として扱う.

$$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{q}}^+ = \boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{q}}^- + \boldsymbol{J}_{\mathrm{I}}(\boldsymbol{q})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\lambda}_{\mathrm{I}} \tag{3.13}$$

$$\boldsymbol{J}_{\mathrm{I}}(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{q}}^+ = \boldsymbol{0}_{3\times1} \tag{3.14}$$

ただし上付き文字の “+” と “−” はそれぞれ衝突直後，衝突直前を意味する．式 (3.13) 右辺第二項は衝突時のホロノミック拘束ベクトルであり，$\boldsymbol{J}_{\mathrm{I}}(\boldsymbol{q}) \in \mathbb{R}^{3\times6}$ は式 (3.14) を満たすものである．本研究では衝突において次の条件を設定する．

(a) 交換後の後方 RW 支持脚先端速度は斜面に沿う

(b) 交換後の前方 RW 支持脚先端速度は斜面に沿う

(c) 前後の RW は同期的に回転する

これらの条件を満たすものとして $\boldsymbol{J}_1(\boldsymbol{q})$ が求められる．

3.2 数値シミュレーション

前章同様に揺動条件，固定条件の二つの CRW モデルに対し，表 3.2 の物理パラメータを用いて数値シミュレーションを行った結果を図 3.1〜3.3 に，対応する Stick diagram を図 3.4 に示す．ただし $\phi = (1/36)\pi$ [rad], $\mu_0 = 0.5$ とし，初期状態は式 (3.15) ように設定した．

$$\boldsymbol{q}(0) = \begin{bmatrix} 0\ [\mathrm{m}] \\ 0\ [\mathrm{m}] \\ 0\ [\mathrm{m}] \\ \phi\ [\mathrm{rad}] \\ \phi\ [\mathrm{rad}] \\ \phi\ [\mathrm{rad}] \end{bmatrix},\ \dot{\boldsymbol{q}}(0) = \begin{bmatrix} 0\ [\mathrm{m/s}] \\ 0\ [\mathrm{m/s}] \\ 0\ [\mathrm{m/s}] \\ 1.3\ [\mathrm{rad/s}] \\ 1.3\ [\mathrm{rad/s}] \\ 0\ [\mathrm{rad/s}] \end{bmatrix} \tag{3.15}$$

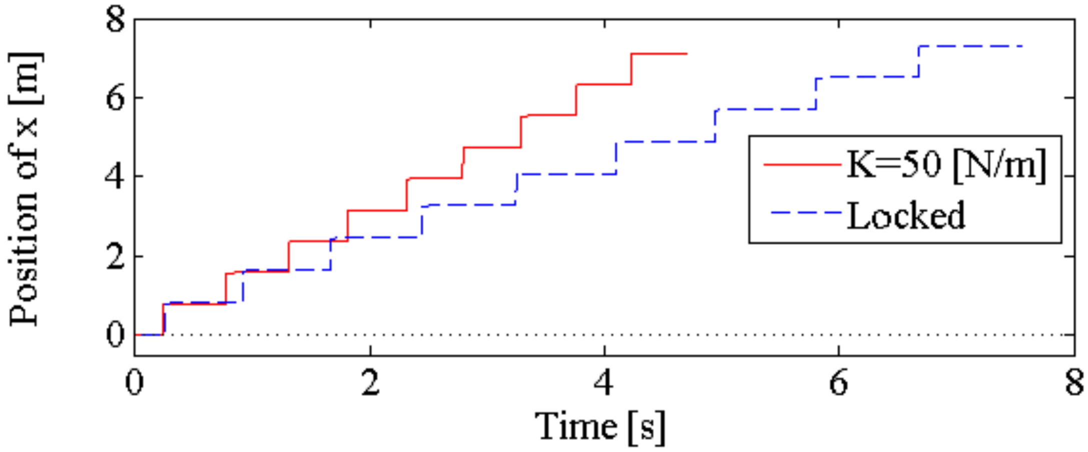
図 3.3(a) は支持脚先端の x 方向の位置座標成分の時間発展を表したものである．時間と共に x の値は増加していることから，滑り接触環境下においてもロボットは前進することができるということが分かる．また揺動条件の方が時間に対してより早く値が増加していることから，揺動条件の方が固定条件と比べて高い歩行速度が得られているという結果が得られた．

図 3.3(b) は支持脚先端 x 方向の速度成分の時間発展を示したものである．これにより支持脚先端は脚交換直後に前進方向に離散的な加速を示し，前進方向に進むものの速やかに減速していくということが分かった．また概して速度のピークは固定条件の方が揺動条件よりも大きなものになるという結果も得られた．

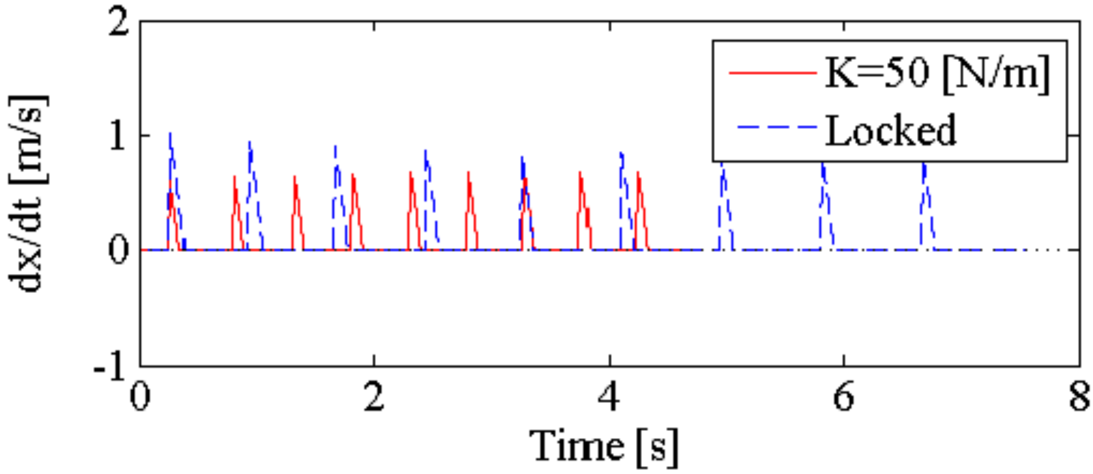
図 3.3(b) は θ_1 の角速度の時間発展を示したものである．これを見ると同様の角速度から開始しても，モデルごとに異なる角速度のパターンに収束していくということが分かる．また非滑り時に確認された脚交換時の角速度の減少割合の大小関係は滑り接触時にも一致しているという結果がこの図からも見ることができる．

図 3.3(a)，(b) はそれぞれ胴体，斜面を基準に見た揺動質量の位置に関する時間発展の様子であるが，(a) における脚交換時の下方への離散的な加速や，(b) における斜面に対してサインカーブを描いていることなど概ね非滑り接触時と同様の挙動を示していることが分かった．

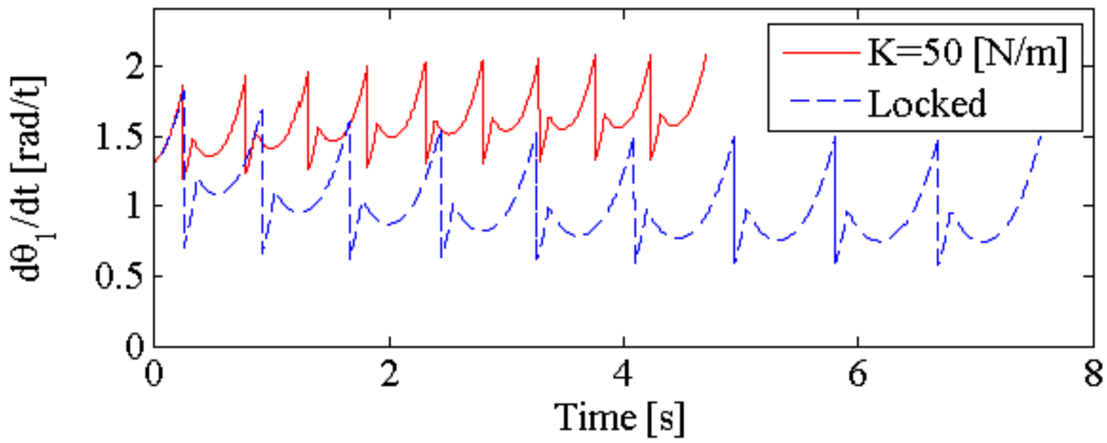
図 3.3 は θ_1 の位相平面図である．固定条件と比べると，揺動条件の方が全ての姿勢 (RW の角度) について，高速化されていることがわかる．これは前章の非滑り斜面上での調査と同じ結果である．



(a) Position of x

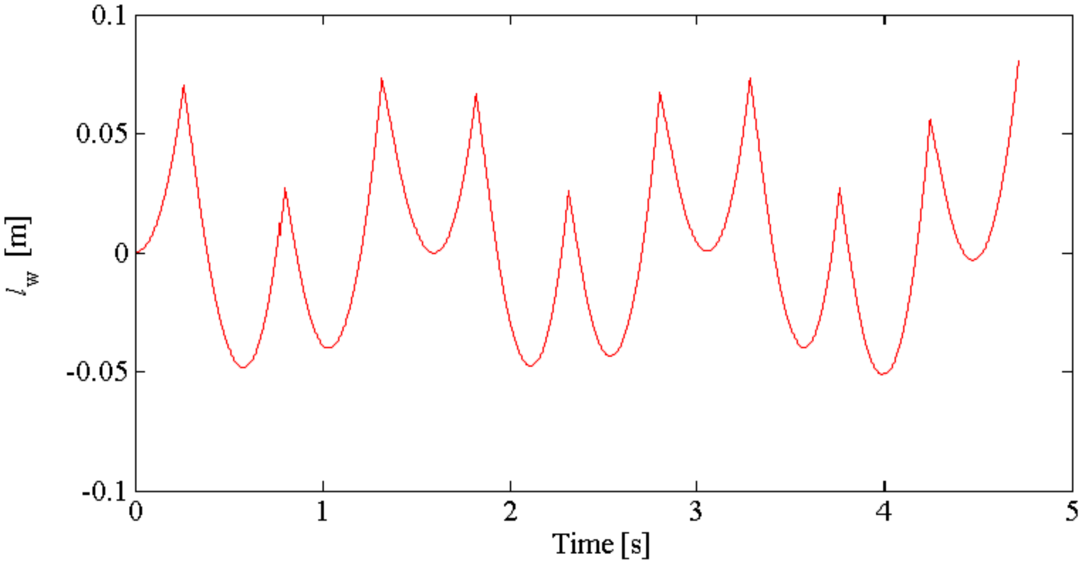


(b) Velocity of x

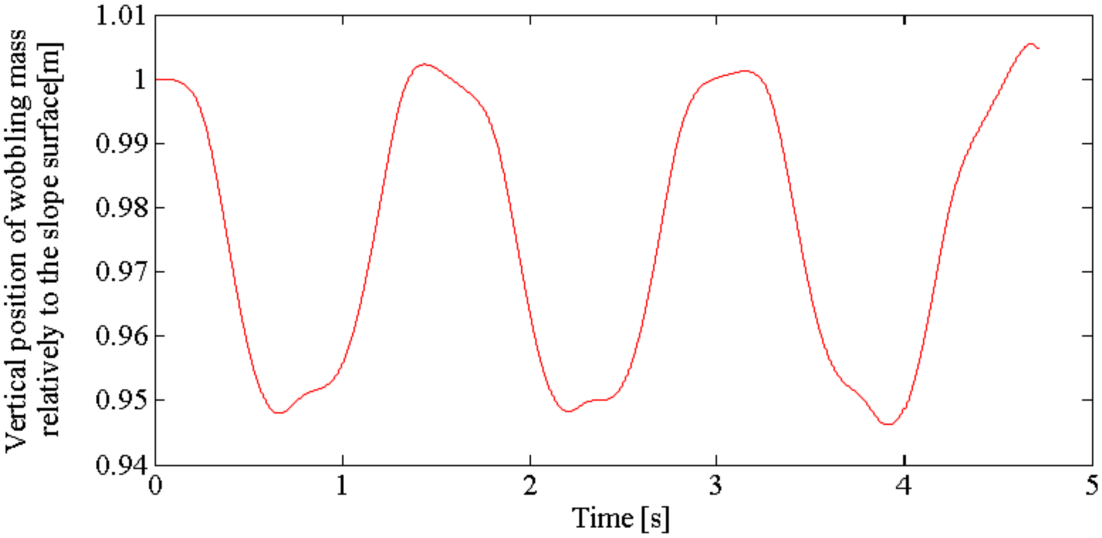


(c) Angular velocity of θ_1

図 3.1: 10 歩間の各パラメータの時間発展の様子



(a) Position of wobbling mass against torso



(b) Position of wobbling mass against limited friction slope

図 3.2: 10 歩間の揺動質量の動き

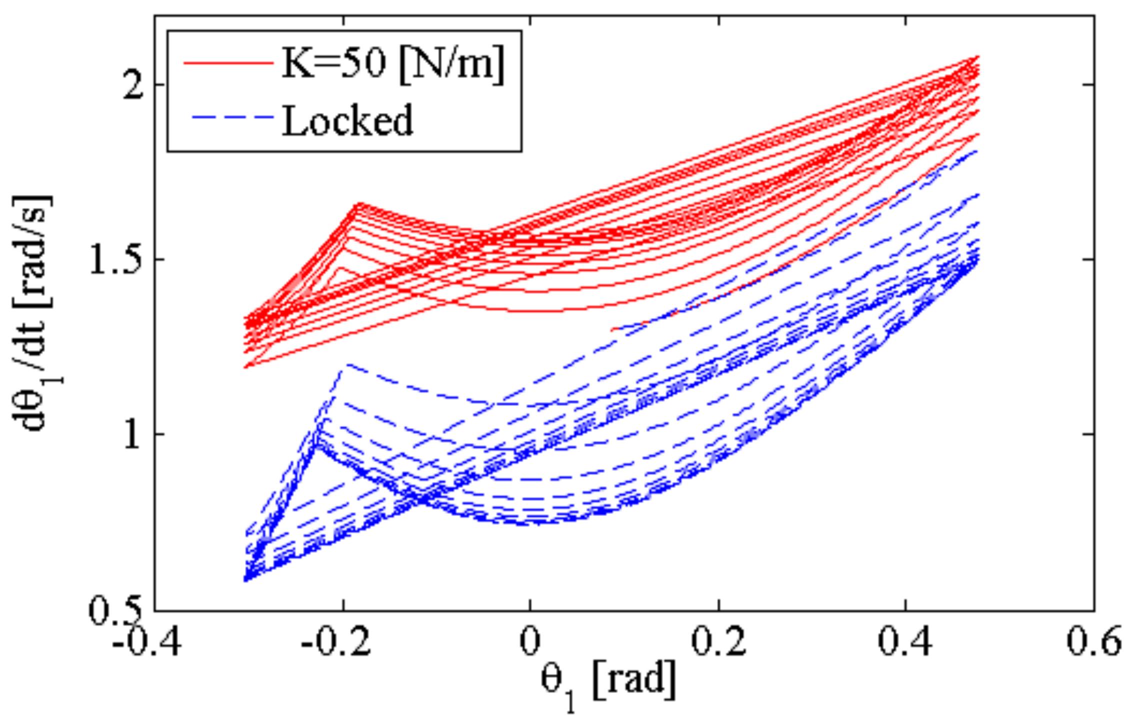


図 3.3: θ_1 における位相平面図

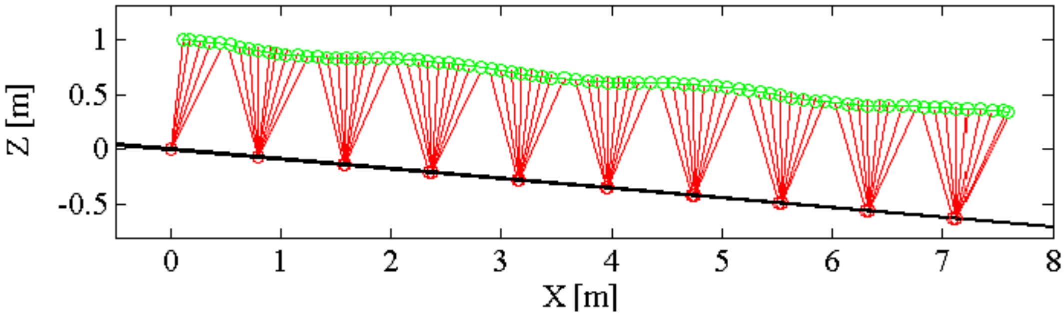
図 3.4 は固定条件と揺動条件について，歩行の概要が分かるよう，後方 RW の支持脚 (接地点から RW の中心まで) と揺動質量のみを抜き出してプロットしたものである．なお揺動質量は本来後方 RW の中心上には存在しないが，分かりやすさのために斜面に対して水平に距離 L_c だけ平行移動した．斜面に対する高さは胴体と RW の中心とは常に等しい．揺動質量の挙動を見ると，(a) 揺動条件は揺動質量が胴体の上下動を打ち消すように斜面に対して上でどうしている様子が分かる．一方 (b) 固定条件は常に揺動質量は胴体に一致するように歩行しているのが見て取れる．また前進距離については，通常の脚交換による前進に対して滑りによる移動は極めて小さい寄与であることが分かる．

3.2.1 性能指標計算手順

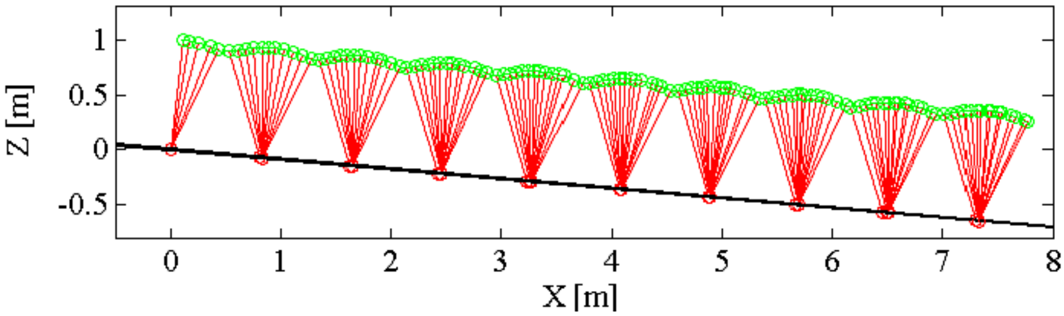
数値シミュレータを用いた定常状態における性能指標を計算する．計算する歩行性能の指標は前章同様 WS(式 (2.19)) と TOD(式 (2.20)) を用いる．計算の手順を以下に示す．

1) 前節と同様の初期条件の下，100 秒間の歩行シミュレーションを開始する．

2) 100 秒間の歩行継続を歩行成立とみなし，100 秒経過直前までの 10 歩分の歩行データを保存する．



(a) Wobbling mass with CRW on limited friction slope



(b) Locked mass with CRW on limited friction slope

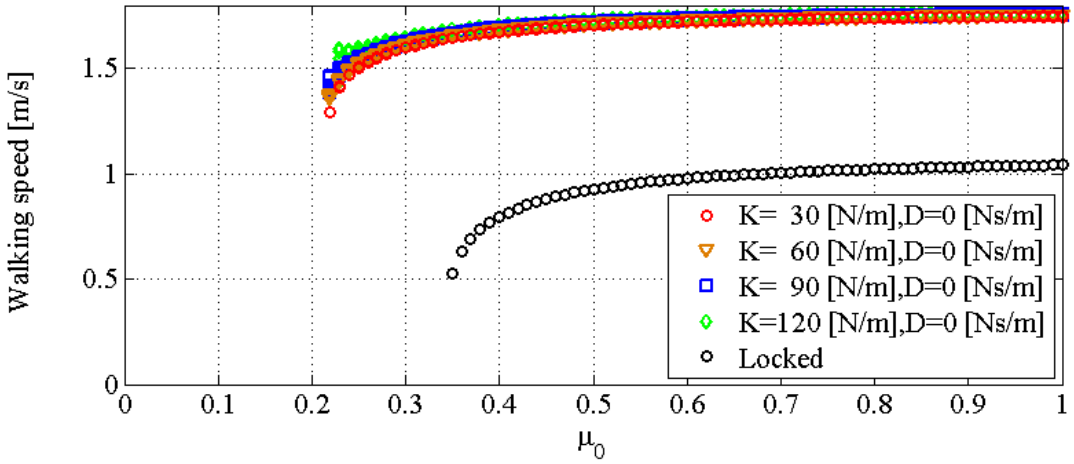
図 3.4: 10 歩間の Stick diagram($\phi = (1/36)\pi$ [rad] $= 5$ [deg] and $\mu_0 = 0.5$)

3) μ_0 を 0.01 だけ小さくし，同様の初期条件の下で再度シミュレーションを開始する．μ_0=0 となったら計算を終了する．

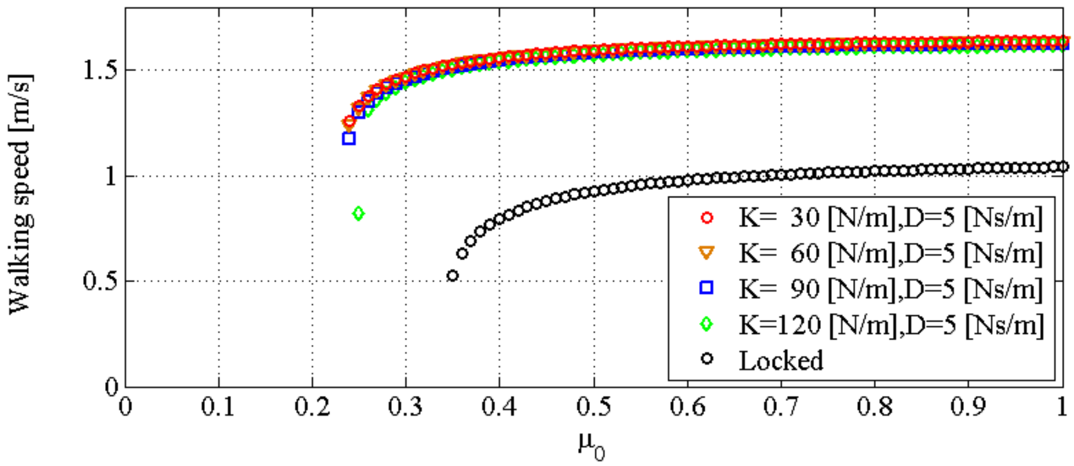
なお，歩行不成立の条件は，“床反力が負となる”，“揺動質量が床面より下に移動する”，“一歩前の支持脚が床面に接触する”とした．ただし二つ目の揺動質量の位置に関する条件については，今回の調査でこれに該当する歩容は現れなかった．

表 3.1: 物理パラメータ

m_r	1.0	kg	L_r	1.0	m
m_c	1.0	kg	L_c	1.0	m
m_w	3.0	kg	g	9.81	m/s^2
I_r	1.0	$kg \cdot m^2$	c	100	–
I_c	1.0	$kg \cdot m^2$	α	$(1/4)\pi$	rad
K	50	N/m	ϕ	$(1/36)\pi$	rad
D	0	Ns/m			



(a) WS(D=0)



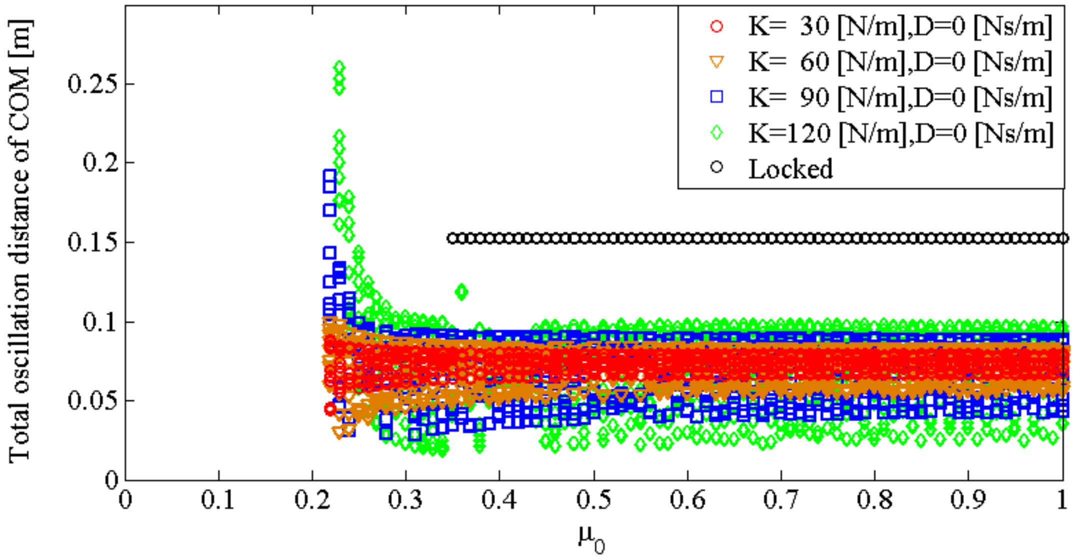
(b) WS(D=5)

図 3.5: Walking speed における μ_0 依存特性グラフ

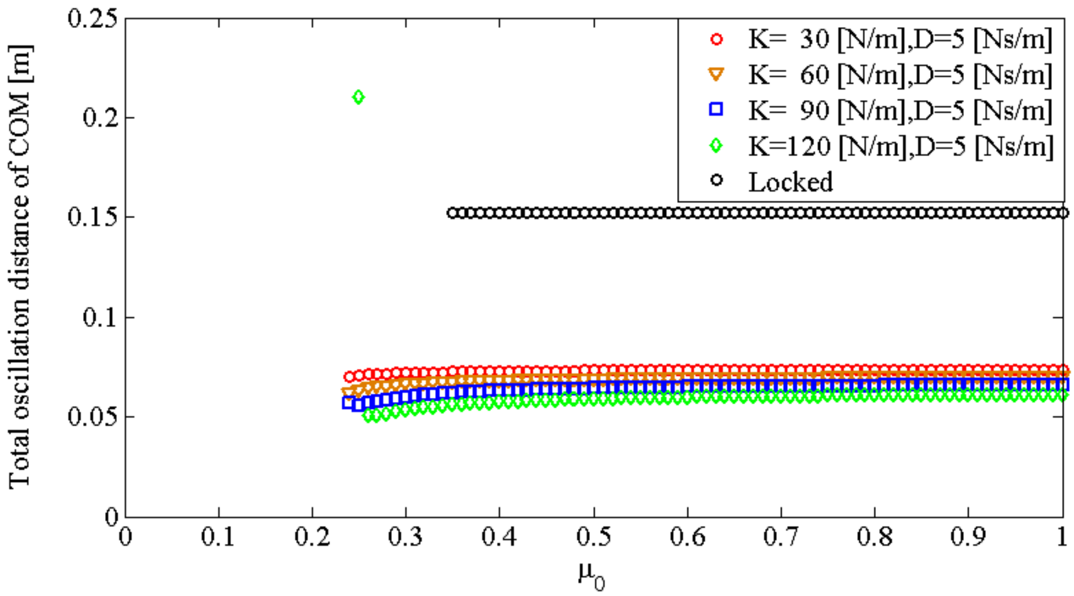
3.2.2 シミュレーション結果

数値シミュレーションで保存した 10 歩分の歩行性能のプロットを，ダンパ搭載，非搭載の両条件について，WS を図 3.5 に，TOD を図 3.6 にそれぞれ示す．各図には各条件の μ_0 ごとに 10 のプロットがなされている．従って 10 歩間同じ歩行性能を示し続けた場合，その μ_0 に対するプロットは一点に重なって表示される．

図 3.5 (a)，(b) より，揺動条件は固定条件に比べ常に歩行が高速化される結果が得られた．また μ_0 が低い，より滑りやすい環境下について揺動条件の方がより多くの状況で歩行が成立するという結果が得られた．また図 3.6 (a), (b) より，ほとんどの領域で TOD は



(a) TOD(D=0)



(b) TOD(D=5)

図 3.6: Total oscillation distance of COM における μ_0 依存特性グラフ

固定条件より小さくなり，重心軌道が平坦化されていることが分かった．しかしながら，一部の領域ではその傾向に反する領域も確認された．また図 3.5(a)，3.6(a) に表わされるダンパ非搭載モデルの性能指標は準周期的であるのに対し．図 3.5(b)，3.6(b) に表わされるダンパ搭載モデルの性能指標は全ての歩行で周期的であることが分かった．ダンパの有無とこの結果の関連傾向は，非滑り接触である先行研究 [2] と一致する結果であった．

3.2.3　WS の K 依存性に関するシミュレーション結果

前節では K について 5 つの条件についてのみを扱った．次に K による WS の違いと，整地条件との比較をするために，さらに複数の K に関する値の取得を行う．データの取得手順を以下に示す．

1) K=1，他は前節と同様の初期条件の下，30 秒間の歩行シミュレーションを開始する．
2) 30 秒間の歩行継続を歩行成立とみなし，30 秒経過直前までの 10 歩分の歩行データと 31 歩目の初期条件を保存する．
3) μ_0 を 0.01 だけ減少させ，保存した初期条件の下で再度シミュレーションを開始する．μ_0=0 となったら計算を終了する．
4) K を 1 増加させ，$\mu_0 = 1$ とし，初期条件をリセットした上で再度シミュレーションを開始する．
5) 手順 2,3,4 を繰り返す．
6) 手順 3 において K=1000，$\mu_0 = 0$ となったら計算を終了する．

図 3.7 にダンパ係数 D=0 の結果を示す．

図 3.7 の二つの図は同一のグラフを二つの視点から表示したものである．ただし見やすさのため μ_0 を 1 から 0.05 刻み，K を 4 から 4 刻みで表示し，WS の値の大小について，図中の最小値と最大値を基準に右端のカラーバーのようにプロットを色分けした．また比較のため滑り接触を含まない整地条件時の値を黒で $\mu_0 = 1.05$ にプロットした．図 3.7 を見ると μ_0 の減少と共に WS が途中で大きく減少するという特徴が図 3.5(a) と同様に確認できる，またこれは概ねどの K 値についても確認できる傾向である．また μ_0 の増加と共に K の値それぞれについて，一定の値域に収束するような変化傾向が得られた．さらにそれは非揺動時の条件についてが漸近している例が関係が明らかとなった．これはつまり，非滑り接触時の歩行が極めて滑りにくい動摩擦接触によって近似できる一例である．

また図 3.7 にダンパ係数 D=5 を用いて同様にシミュレートした結果を示す．ただしその他図の描画の詳細は図 3.8 に準ずる．図 3.8 を見ると図 3.7 と同様に μ_0 の減少と共に WS が途中で大きく減少するという特徴を示す結果が得られた．また 3.6(b) と同様，ダンパを搭載した場合に WS が収束する傾向についても，全ての測定範囲の K について概ね確認

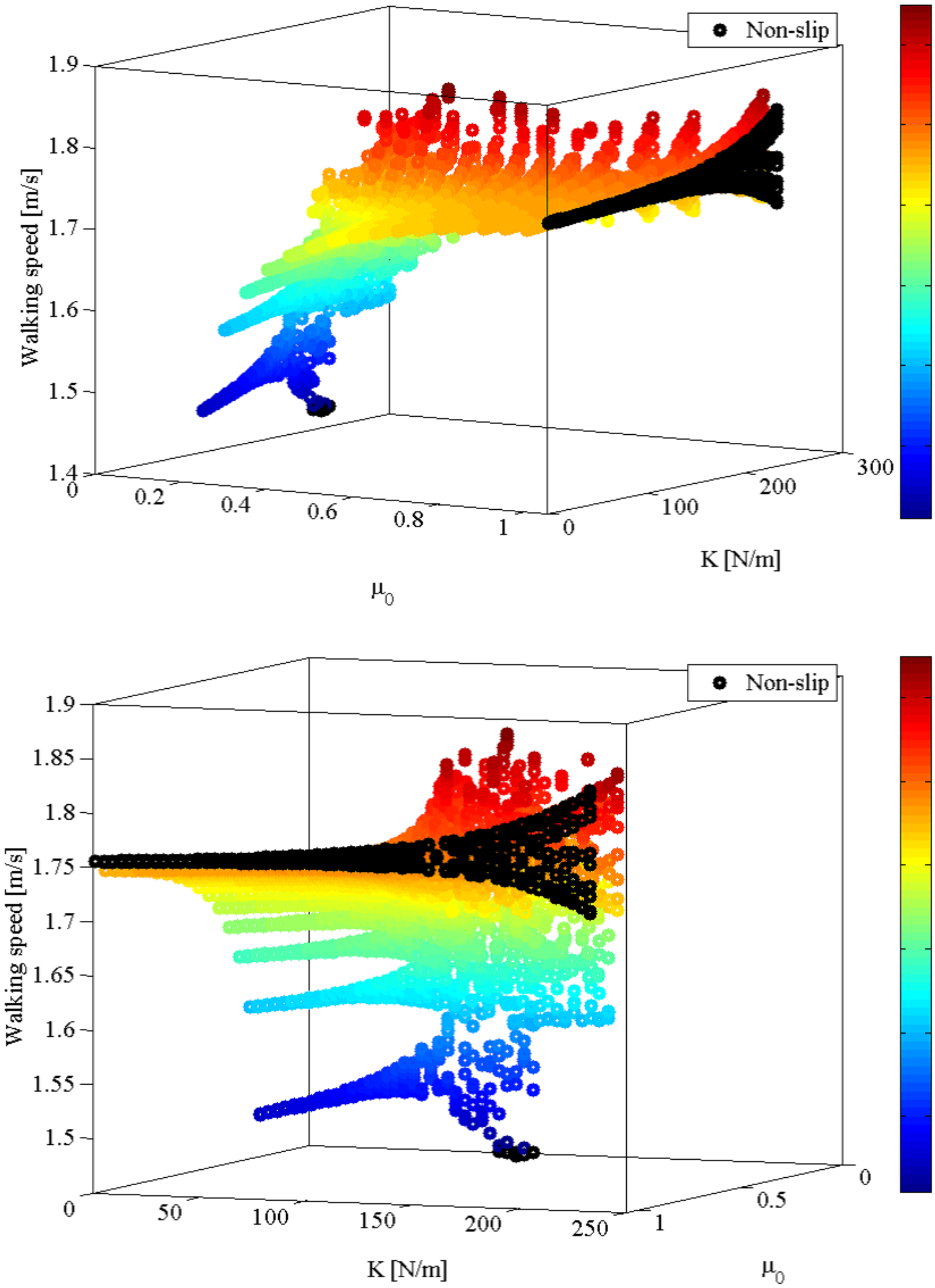


図 3.7: Walking speed の動摩擦係数及びバネ係数依存特性

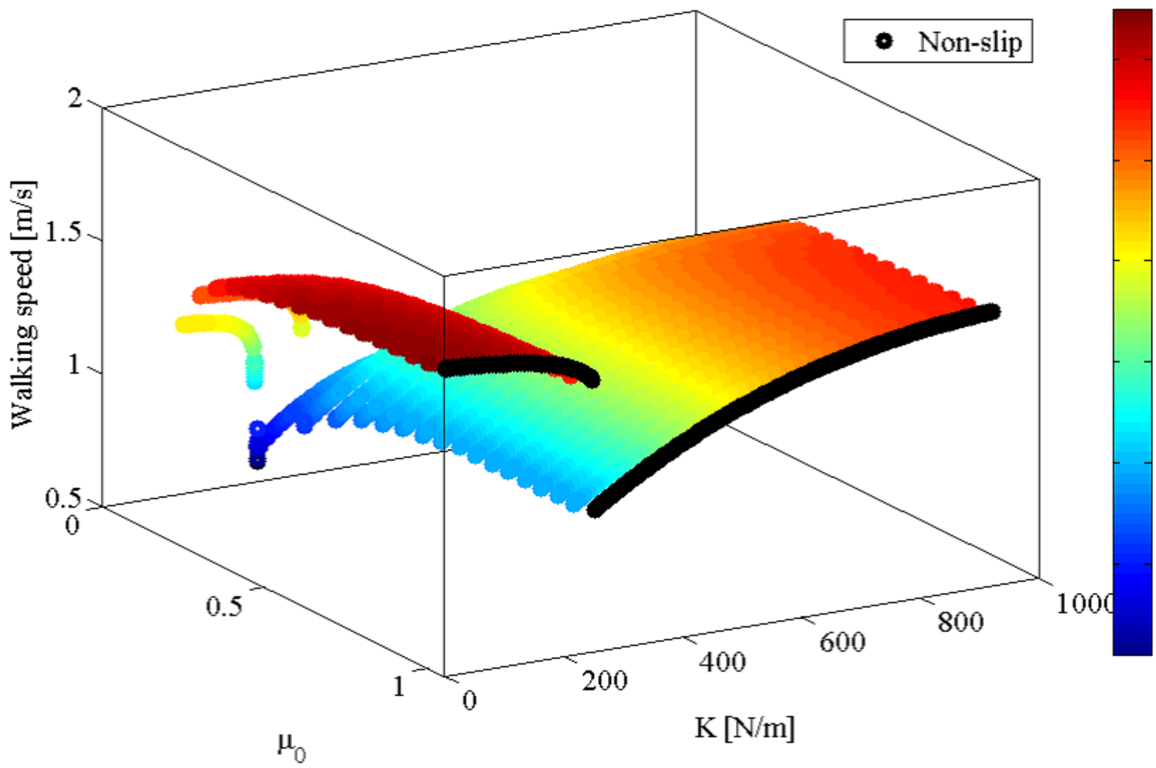


図 3.8: Walking speed の動摩擦係数及びバネ係数依存特性

することができた．さらに図 3.7 と同様，ダンパ搭載した WS についても μ_0 の増加方向について，非滑り接触時のそれに漸近する様子が得られた．

これらの結果から，本研究で用いた動摩擦のみを考慮した摩擦モデルであっても，非滑り接触時の歩行を再現できる可能性を示唆することができた．また同時に，非滑り接触時と漸近的に一致するという結果は，用いた摩擦モデルの妥当性を示す一つの根拠と言える．

3.3　脚衝突における揺動質量の有効性

本章では脚交換直後のロボットの状態について，後方 RW の角速度 $\dot{\theta}_1$ に注目した議論を行う．まず，衝突方程式 (4.26)，(4.27) を解くことで，$\dot{\theta}_1{}^+$ について以下の解が得られる．

$$\dot{\theta}_1^+ = \frac{2\mathrm{I_t} - \mathrm{m_t L_r}^2(1-\cos\alpha)}{2\mathrm{I_t} + \mathrm{m_t L_r}^2(1-\cos\alpha)}\dot{\theta}_1^- \tag{3.16}$$

ただし $\mathrm{I_t} = 2\mathrm{I_r}, \mathrm{m_t} = 2\mathrm{m_r} + \mathrm{m_c}$ である．式 (3.16) に揺動質量に関する状態量 $\mathrm{m_w}$, l_w が含まれていないことから，$\dot{\theta}_1^-$ が与えられれば，揺動質量の搭載は $\dot{\theta}_1{}^+$ に寄与しないことが分か

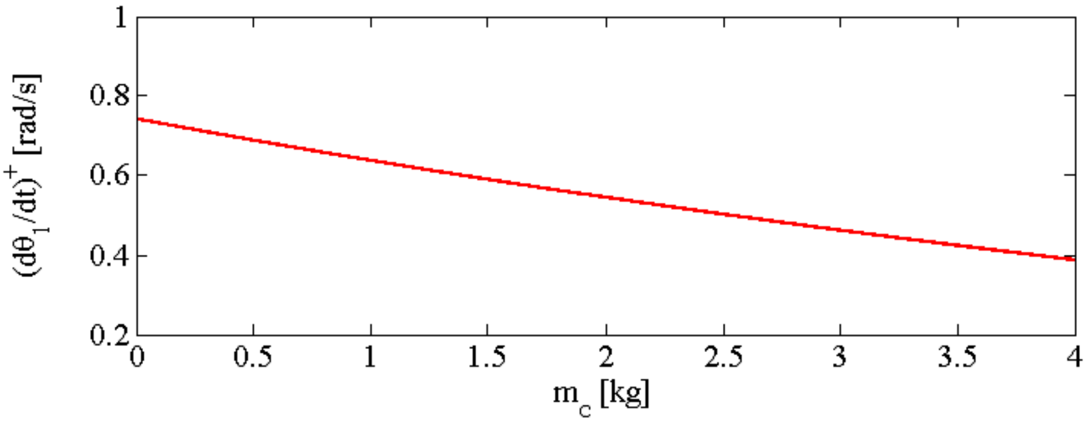


図 3.9: 全質量に対して m_c が占める質量が $\dot{\theta}_1{}^+$ へ及ぼす影響

る．また揺動質量を搭載しない際の RW における $\dot{\theta}_1{}^+$ は既に報告がされており [8]，与式とその結果と一致している．

式 (3.16) には揺動質量項が含まれないが，本来胴体に固定される電源や貨物等の質量を揺動質量に転移することは $\dot{\theta}_1{}^+$ の増加に寄与する．m_c に対する関係を図 3.9 に示す．ただし初期条件は $\dot{\theta}_1 = \dot{\theta}_2 = 1.0$ [rad/s]，他は前述の数値を使用した．

図 3.9 右端は全体の質量は変えずに (m_t=constant) 揺動質量を全て胴体質量に含めた場合（固定条件），左端は胴体質量を全て揺動質量に含めた場合に対応している．この図から，内包する質量を揺動させることで，脚交換時に損なわれる RW の回転速度をより損なわずに済むことから，歩行速度の向上に貢献していると考えられる．

3.4　まとめと今後の課題

今回，滑り接触を考慮しても揺動質量の搭載で歩行は高速化されるという結果が得られた．また歩行の収束傾向について，整地条件である非滑り接触と同様の傾向も歩行性能のプロットから確認することができた．また動摩擦のみを扱った接触について，非滑り接触時の歩行と共通点を見出すことができ，動摩擦接触で非滑り接触の歩行を近似できる可能性について示唆した．

今後の課題として，動摩擦係数に対してより大きい歩行速度が得られる最適なバネ，ダンパ係数の提案が挙げられる．そのためにＫやＤについて検討する数値の領域を増やすことのほか，引き続き傾向の一致が見られる整地条件と比較することも有効であると考えられる．

第4章　床面との滑り接触を考慮した上体付き2脚ロボットの歩行生成と解析

4.1　はじめに

本章では平地歩行が可能な受動歩行規範ロボットの中でも最も自由度の低いモデルとして知られる上体付き2脚ロボットを用い，床面との間に動摩擦接触を生じる環境下でのリミットサイクル歩行生成とその調査を行う．

先行研究 [8][9] で用いられた RW と比較すると遊脚に自由度があり，また質点が複数個所に点在しているといった点から自由度は高いモデルであると言える．またこれは同時に，歩行が成立しない初期状態も多く存在することを意味する．2脚歩行ロボットは人間の歩行形式としても用いられることから，多くの研究で今なお注目されている．本章では単純な上体付き2脚ロボットを用いて滑り接触下において歩行が成立するという仮定を調査し，またその際の歩行性能を調査することを目的とする．

まずこのロボットは後述する出力を厳密に追従する制御を用い動摩擦接触条件下において歩容を生成することが可能か，また可能な場合それはリミットサイクル歩行に収束するかを検証する．次に出力追従制御における目標整定時間に応じて，歩行性能が変化することと Skip 歩容が現われることを報告すると共に，目標制定時間を複数パターン用意し，それらにより生成される歩容が床面の滑りやすさによりどのように変化するのか調査し，得られた結果から定性的な歩行性能評価を行う．

4.2　上体を有する劣駆動2脚ロボットのモデリング

4.2.1　概要

まず，本章で扱うモデルを図 4.1 に示す．本章においては以下を仮定する．

- 支持脚の先端は常に斜面上に接している
- 遊脚が床面を削る現象は無視する

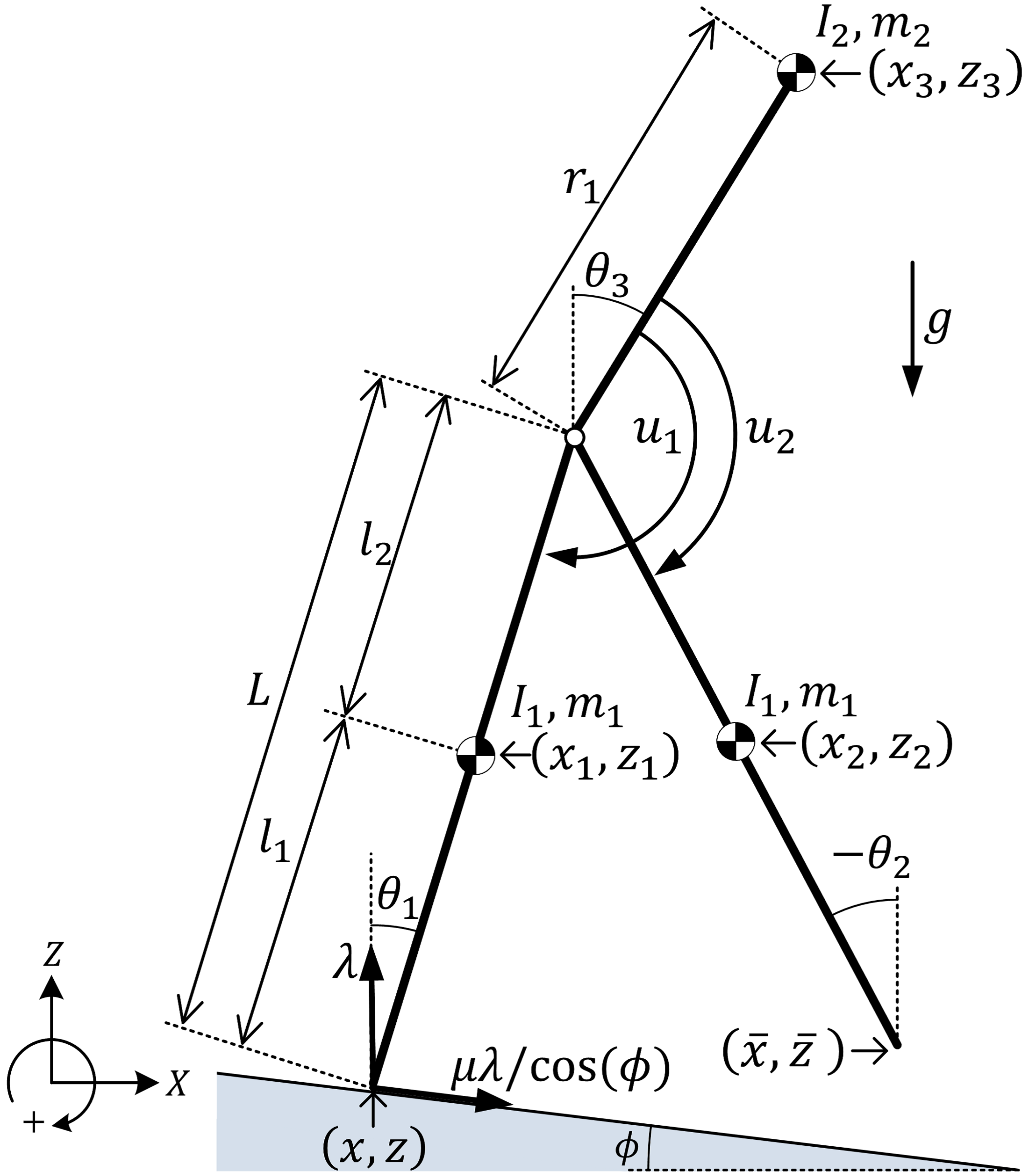


図 4.1: 上体付き 2 脚ロボット

両脚でパラメータに違いはなく，それらは上体に股関節に相当するジョイントで接続されている．上体と脚間にはアクチュエータが備えられており，各脚には上体とのジョイント間で別々にトルクを印加できるものとする．

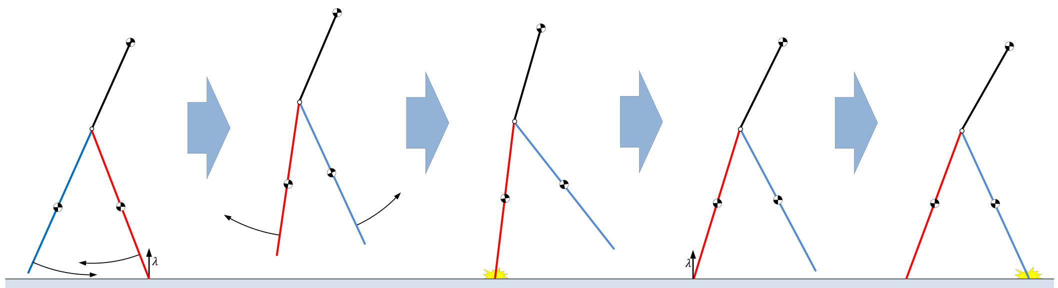


図 4.2: 上体付き 2 脚ロボット

4.2.2　歩行中の状態相の遷移

上記 2 脚ロボットにおいて，数値シミュレーションを用いて脚振りペースに応じて支持脚が常に地面に接触する通常の歩行（Non-Skip 歩行）と，支持脚が切り替わるまでに一度だけ支持脚が地面から離れる Skip 歩行の 2 種類のリミットサイクル歩行を確認した．歩行における状態相の変化について，図 4.2 に表すように以下に定義する．脚交換直後から順に，支持脚相 1，浮遊相，支持脚相 2 である．

- 支持脚相 1 から浮遊相へ床反力が 0 になった瞬間に切り替わる
- 浮遊相から支持脚相 2 へ支持脚先端の座標 z が 0 になった瞬間に衝突 1 を経て切り替わる．
- 支持脚相 2 から支持脚相 1 へ遊脚先端が床面と接触した瞬間に衝突 2（脚交換）を経て切り替わる．

Skip 歩容を含まない歩容については，支持脚相 2 から脚交換（衝突 2）を経て再び支持脚相 2 へと戻る遷移を繰り返すものとする．

4.2.3　運動方程式

ラグランジュ方程式を用いた運動方程式の導出を以下に示す．
図 4.1 に従い一般化座標を以下に設定する．

$$\boldsymbol{q} = \left[\theta_1, \theta_2, \theta_3, x, z\right]^{\mathrm{T}} \tag{4.1}$$

この時，支持脚リンク上の質点 x_1, z_1，遊脚リンク上の質点 x_2, z_2，上体リンク上の質点

x_3, z_3 各質点の座標は以下のようになる．

$$
\begin{aligned}
x_1 &= x + l_1 \sin\theta_1 && (4.2)\\
z_1 &= z + l_1 \cos\theta_1 && (4.3)\\
x_2 &= x + L \sin\theta_1 - l_2 \sin\theta_2 && (4.4)\\
z_2 &= z + L \cos\theta_1 - l_2 \cos\theta_2 && (4.5)\\
x_3 &= x + L \sin\theta_1 + \mathrm{r}_1 \sin\theta_3 && (4.6)\\
z_3 &= z + L \cos\theta_1 + \mathrm{r}_1 \cos\theta_3 && (4.7)
\end{aligned}
$$

次にこれらを時間微分することで，質点の速度が以下のように求められる．

$$
\begin{aligned}
\dot{x}_1 &= \dot{x} + \dot{\theta}_1 l_1 \cos\theta_1 && (4.8)\\
\dot{z}_1 &= \dot{z} - \dot{\theta}_1 l_1 \sin\theta_1 && (4.9)\\
\dot{x}_2 &= \dot{x} + \dot{\theta}_1 L \cos\theta_1 - \dot{\theta}_2 l_2 \cos\theta_2 && (4.10)\\
\dot{z}_2 &= \dot{z} - \dot{\theta}_1 L \sin\theta_1 + \dot{\theta}_2 l_2 \sin\theta_2 && (4.11)\\
\dot{x}_3 &= \dot{x} + \dot{\theta}_1 L \,\mathrm{con}\,\theta_1 + \dot{\theta}_3 \mathrm{r} \,\mathrm{con}\,\theta_3 && (4.12)\\
\dot{z}_3 &= \dot{z} - \dot{\theta}_1 L \sin\theta_1 - \dot{\theta}_3 \mathrm{r} \sin\theta_3 && (4.13)
\end{aligned}
$$

以上より，この系の運動エネルギー K と位置エネルギー U は以下のように定まる．

$$
\begin{aligned}
K &= \frac{1}{2}\left(m_1(\dot{x}_1^2 + \dot{z}_1^2) + m_1(\dot{x}_2^2 + \dot{z}_2^2) + m_2(\dot{x}_3^2 + \dot{z}_3^2) + I_1\,\theta_1^2 + I_1\,\theta_2^2 + I_2\,\theta_3^2\right) && (4.14)\\
U &= m_1 z_1 + m_1 z_2 + m_2 z_3 && (4.15)
\end{aligned}
$$

これを次のラグランジュの運動方程式に代入し，行列を用いて整理することで上体付き 2 脚ロボットの支持脚相 1,2 における運動方程式は以下のように得られる．

$$
\begin{aligned}
\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{h}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}) &= \boldsymbol{S}\boldsymbol{u} + \boldsymbol{J}_c^{\mathrm{T}}\lambda + \boldsymbol{J}_\mu^{\mathrm{T}}\lambda && (4.16)\\
\boldsymbol{J}_c\dot{\boldsymbol{q}} &= 0 && (4.17)
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
\boldsymbol{S} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} && (4.18)\\
\boldsymbol{J}_c &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \tan(\phi) & 1 \end{bmatrix} && (4.19)\\
\boldsymbol{J}_\mu &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \mu & -\mu\tan(\phi) \end{bmatrix} && (4.20)
\end{aligned}
$$

ただし $\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q}) \in \mathbb{R}^{5\times 5}$ は慣性行列，$\boldsymbol{h}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}) \in \mathbb{R}^5$ は遠心力とコリオリ力と重力を含む行列であり，λ は斜面から z 方向に対して作用させる床反力を表す．式 (4.18) に表わされる制御ベクトル $\boldsymbol{S}$ は上体から両脚に印加されるトルクの左右反作用関係を表す．式 (4.19)，(4.20) に表わされるベクトル $\boldsymbol{J}_\mu^{\mathrm{T}}, \boldsymbol{J}_\mu^{\mathrm{T}}$ はそれぞれホロノミック拘束ヤコビアン，動摩擦ベクトル

である．$\boldsymbol{J}_{\mu}^{\mathrm{T}}\lambda$ は斜面に対し垂直に作用する床反力を表し，$\boldsymbol{J}_{\mu}^{\mathrm{T}}\lambda$ は斜面に対し水平方向に作用する動摩擦力を表す．$\boldsymbol{J}_c$ は，支持脚先端が斜面から離れない速度条件を課す方程式として式 (4.17) を解くことで得られる下式 (4.21) により決定される．

$$\dot{x}\tan(\phi) + \dot{z} = 0 \tag{4.21}$$

また Skip 歩容における浮遊相の運動方程式は，式 (4.16) 右辺第 2，第 3 項の床反力が含まれる成分が無くなり，次のようになる．

$$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{h}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}) = \boldsymbol{S}\boldsymbol{u} \tag{4.22}$$

ロボットは，支持脚相 1,2 において支持脚先端が床面下に沈まないようなホロノミック拘束力を受けているといえる．以下にホロノミック拘束力項を導出する過程を示す．支持脚先端が斜面から離れないための速度条件式は式 (4.21) にて与えられる．これらホロノミック拘束ヤコビアンは式 (4.19) のように得られ，また式 (4.17) の時間依存関係について次のように求まる．

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(\boldsymbol{J}_c\,\dot{\boldsymbol{q}}) = \dot{\boldsymbol{J}}_c\,\dot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{J}_c\,\ddot{\boldsymbol{q}} = 0 \tag{4.23}$$

式 (4.16)(4.23) より λ が以下のように求められる．

$$\lambda = -\left(\boldsymbol{J}_c\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})^{-1}\left(\boldsymbol{J}_c^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{J}_{\mu}^{\mathrm{T}}\right)\right)^{-1}\boldsymbol{J}_c^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})^{-1}\left(\boldsymbol{S}\boldsymbol{u} - \boldsymbol{h}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}})\right) \tag{4.24}$$

4.2.4 床面との動摩擦接触

本節では動摩擦係数 μ と動摩擦力 $\boldsymbol{J}_{\mu}^{\mathrm{T}}\lambda$ について述べる．まず，$\mu(\dot{\boldsymbol{q}})$ について以下のように定義する．

$$\mu(\dot{\boldsymbol{q}}) = -\mu_0\tanh\left(\frac{\mathrm{c}\dot{x}}{\cos(\phi)}\right) \tag{4.25}$$

ただし μ_0 は定数である．支持脚先端の速度 $v = \dot{x}/\cos(\phi)$ とするとき，式 (4.25) は以下の性質を満たす．

(a) v の符号に対応して符号が切り替わる

(b) v の絶対値が低い領域を連続に繋ぐ

性質 (a) により支持脚の滑り方向によって別々の動摩擦力を定義する必要がない．また性質 (b) については離散的な外力が作用することによるシミュレータの数値誤差拡大の可能性を回避することに有効であると考えられる．ただしこの近似の行なうためには，調整用の係数として正の定数値 c を十分大きな値に設定することが要請される．本章では c=100 と設定した．

4.2.5 衝突方程式

まず，衝突 1 について検討する．衝突 1 における支持脚の床面への着地に関しては以下の非弾性衝突として扱う．

$$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{q}}^{+} = \boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{q}}^{-} + \boldsymbol{J}_{\mathrm{I}}(\boldsymbol{q})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\lambda} \tag{4.26}$$

$$\boldsymbol{J}_{\mathrm{I}}(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{q}}^{+} = \boldsymbol{0}_{3\times 1} \tag{4.27}$$

ただし上付き文字の“ + ”と“ − ”はそれぞれ衝突直後，衝突直前を意味する．式 (4.26) 右辺第二項は衝突時のホロノミック拘束ベクトルであり，$\boldsymbol{J}_{\mathrm{I}}(\boldsymbol{q}) \in \mathbb{R}^{3\times 5}$ は式 (4.27) を満たすものである．

本章では衝突 1 において次の条件を設定する．

(a) 衝突後の支持脚先端の速度方向は斜面に沿う

(b) 足首以外の関節は衝突中に機械的にロックされている

条件 (b) については，後述の制御手法により着地時には既に足首以外の関節が固定された状態でいることから導入されている．これらの条件を満たすものとして，式 (4.27) は決定される．

次に衝突 2 について検討する．衝突 2 についても前述の非弾性衝突方程式 (4.26)，(4.27) から計算される．ただし衝突 2 は支持脚交換が行われる衝突であるため，衝突直前の遊脚が衝突直後に床面に沿うように (4.27) が決定される．このため衝突 1 ,2 において $\boldsymbol{J}_{\mathrm{I}}(\boldsymbol{q})$ の各成分は一部異なるものとなっている．

まず条件 (a) について考える．遊脚先端の座標 $\bar{x}, \bar{z}$ は以下のように定まる．

$$\bar{x} = L\sin(\theta_1^-) - L\ \sin(\theta_2^-) + x^- \tag{4.28}$$

$$\bar{z} = L\cos(\theta_1^-) - L\cos(\theta_2^-) + z^- \tag{4.29}$$

式 (4.28)(4.29) を時間微分してその速度を求める

$$\dot{\bar{x}}^+ \ = \ L\,\dot{\theta}_1^+\cos(\theta_1^-) - L\,\dot{\theta}_2^+\cos(\theta_2^-) + \dot{x}^+ \tag{4.30}$$

$$\dot{\bar{z}}^+ = -\ L\,\dot{\theta}_1^+\sin(\theta_1^-) + L\,\dot{\theta}_2^+\ \sin(\theta_2^-) + \dot{z}^+ \tag{4.31}$$

式 (4.30)(4.31) が満たす条件は立脚期の式 (4.21) と同様である，そこでこれらの式を用いることにより衝突前後で満たすべき次の関係式を得る．

$$\frac{L\sin(\phi - \theta_1^-)}{\cos(\phi)}\dot{\theta}_1^+ - \frac{L\sin(\phi - \theta_2^-)}{\cos(\phi)}\dot{\theta}_2^+ + \tan(\phi)\,\dot{x}^+ + \dot{z}^+ = 0 \tag{4.32}$$

条件 (b) については，式 (4.37) の各成分の変化量が 0 の時に満たされていると言える．従って次の条件式

$$\dot{\theta}_1^+ - \dot{\theta}_3^+ = 0 \tag{4.33}$$

$$\dot{\theta}_2^+ - \dot{\theta}_3^+ = 0 \tag{4.34}$$

表 4.1: 物理パラメータ

m_1	5.0	kg	r_1	0.5	m
m_2	15.0	kg	g	9.81	$\mathrm{m/s^2}$
l_1	0.5	m	c	100	–
l_2	0.5	m	ϕ	0.0	rad
I_1	0.5	$\mathrm{kg \cdot m^2}$	α	$(1/6)\pi$	rad
I_2	1.0	$\mathrm{kg \cdot m^2}$	β	$(1/36)\pi$	rad

が導かれる．以上の条件式 (4.32)(4.33)(4.34) より，本章の衝突時における速度拘束ヤコビアンは次のように得られる．

$$\boldsymbol{J}_{\mathrm{I}}(\boldsymbol{q}) = \begin{bmatrix} \frac{L\sin(\phi-\theta_1^-)}{\cos(\phi)} & -\frac{L\sin(\phi-\theta_2^-)}{\cos(\phi)} & 0 & \tan(\phi) & 1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{4.35}$$

次に衝突 1 について考える．衝突 1 は浮遊相から支持脚期 2 への遷移に伴って発生する．衝突 1 において次の条件を前提として課す．

(a) 衝突後の支持脚先端速度は床面に沿う

(b) 足首以外の関節は衝突中に機械的にロックされている

なお条件 (b) について，衝突 1 が起きる段階では後述する出力追従制御の目標整定時間を既に過ぎており，アクチュエータにより股関節が動かないようロックされているという前提を元に課せられている．従って今回は目標制定時間前に衝突 1 が起きた場合は歩行不成立とした．

上記条件式を満たすためのホロノミック拘束ヤコビアンは，以下のように与えられる．

$$\boldsymbol{J}_{\mathrm{I}}(\boldsymbol{q}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \tan(\phi) & 1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{4.36}$$

これら式 (4.26)(4.27) に代入することで衝突 2 のダイナミクスを計算する．

4.3 制御系設計

本章のロボットは股関節に相当するジョイントにて上体から支持脚，遊脚に対して独立にトルクを印加できるようなアクチュエータを有している．本研究では目標軌道追従制御

によりあらかじめ設定された目標軌道上の目標値を常に出力が厳密に追従するように脚に対して印加する制御入力トルクを決定する．今，二つの制御対象 $y_1(t), y_2(t)$ をもとに次の制御出力ベクトル $\boldsymbol{y}(t)$ を定義する．

$$\boldsymbol{y}(t) = \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_1(t) - \theta_3(t) \\ \theta_2(t) - \theta_3(t) \end{bmatrix} \tag{4.37}$$

単脚支持開始時を t = 0 [s]，単脚支持終了時を t = Step period [s](以後 T_{SP}) とすると，この時の制御出力ベクトルは

$$\boldsymbol{y}(0) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}\alpha - \beta \\ \frac{1}{2}\alpha - \beta \end{bmatrix},\ \boldsymbol{y}(T_{\mathrm{SP}}) = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\alpha - \beta \\ -\frac{1}{2}\alpha - \beta \end{bmatrix} \tag{4.38}$$

となる．ただし α は目標軌道において $\theta_1(T_{\mathrm{SP}}) - \theta_2(T_{\mathrm{SP}})$ が取るべき定数値，β は目標軌道において $\theta_3(T_{\mathrm{SP}})$ が取るべき定数値である．今回は $0 \leq T_{\mathrm{set}} < T_{\mathrm{SP}}$ となるような定数を事前に選択し，時刻 T_{set} [s] までに出力の変化が終了しているように制御する．すなわちその時 $\boldsymbol{y}(T_{\mathrm{set}}) = \boldsymbol{y}(T_{\mathrm{SP}})$ となる．時刻 $0 < t < T_{\mathrm{set}}$ [s] の間は以下の関数を用いて目標軌道 $\boldsymbol{y}_{\mathrm{d}}(t) \in \mathbb{R}^{2\times 1}$ を生成する．

$$\boldsymbol{y}_{\mathrm{d}}(t) = (\boldsymbol{y}_{\mathrm{d}}(T_{\mathrm{set}}) - \boldsymbol{y}_{\mathrm{d}}(0))\left(\frac{6t^5}{T_{\mathrm{set}}^5} - \frac{15t^4}{T_{\mathrm{set}}^4} + \frac{10t^3}{T_{\mathrm{set}}^3}\right) + \boldsymbol{y}_{\mathrm{d}}(0) \tag{4.39}$$

ただし式 (4.39) は

$$\boldsymbol{y}_{\mathrm{d}}(t) = a_5 t^5 + a_4 t^4 + a_3 t^3 + a_2 t^2 + a_1 t^1 + a_0 \tag{4.40}$$

としたとき

$$\dot{\boldsymbol{y}}_{\mathrm{d}}(0) = 0,\ \dot{\boldsymbol{y}}_{\mathrm{d}}(T_{\mathrm{set}}) = 0 \tag{4.41}$$

$$\ddot{\boldsymbol{y}}_{\mathrm{d}}(0) = 0,\ \ddot{\boldsymbol{y}}_{\mathrm{d}}(T_{\mathrm{set}}) = 0 \tag{4.42}$$

上記式 (4.41),(4.42) で表わされる条件により導かれる．

制御入力ベクトル $\boldsymbol{u} = \begin{bmatrix} u_1 & u_2 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$ は上記目標軌道 $\boldsymbol{y}_{\mathrm{d}}(t)$ を $\boldsymbol{y}(t)$ が厳密に追従するように決定される．ただし Skip 歩容については，衝突 1 までに T_{set} を経過しない場合，衝突時に生じる激力の影響で厳密な目標追従が困難となる．このため衝突 1 発生までに T_{set} 経過することを歩行成立条件の一つに設定した．

4.4 数値シミュレーションに基づく斜度依存特性解析

4.4.1 歩行概要

では前述のモデリングを用いて ϕ = 0.02 [rad],μ = 0.5 として物理シミュレートした様子を図 4.3 に，対応する結果を図 4.4,4.5 に示す．ただし本稿のシミュレーションは全て次の

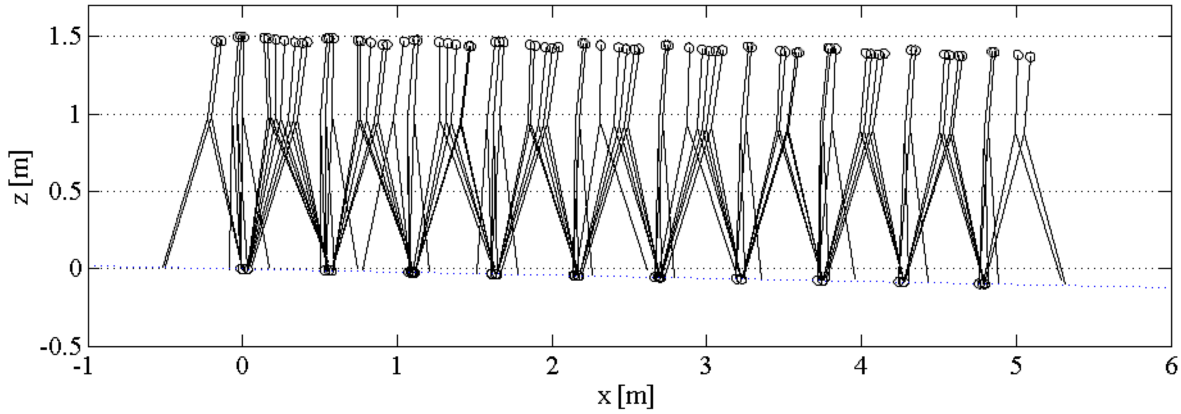


図 4.3: 上体付き 2 脚ロボットの Stick diagram(ϕ = 0.02 [rad] and μ = 0.5)

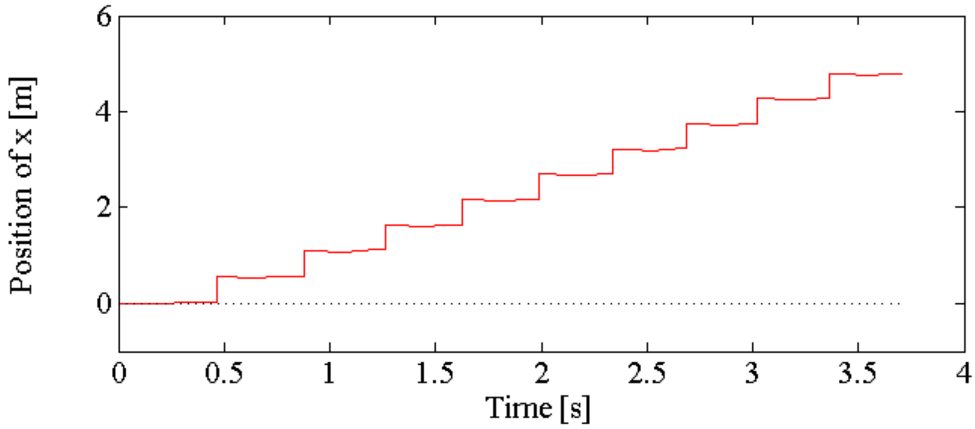
表 4.2: 物理パラメータ

m_1	5.0	kg	r_1	0.5	m
m_2	15.0	kg	g	1.0	m/s^2
l_1	0.5	m	c	1.0	–
l_2	0.5	m	T_{set}	0.3	s
I_1	0.5	kg · m^2	α	$(1/6)\pi$	rad
I_2	1.0	kg · m^2	β	$(1/36)\pi$	rad

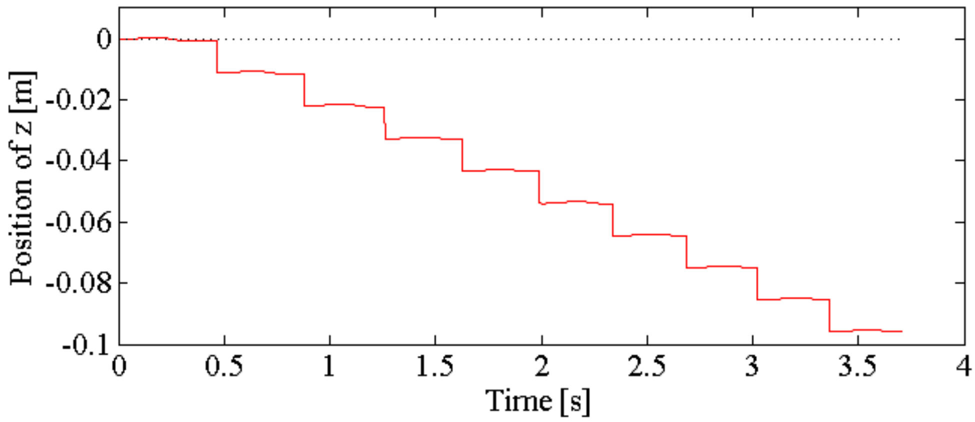
初期状態を設定した．

$$\boldsymbol{q}(0) = \begin{bmatrix} -\alpha/2 + \phi \text{ [rad]} \\ \alpha/2 + \phi \text{ [rad]} \\ \beta + \phi\text{[rad]} \\ 0 \text{ [m]} \\ 0 \text{ [m]} \end{bmatrix}, \ \dot{\boldsymbol{q}}(0) = \begin{bmatrix} 0.70 \text{ [rad/s]} \\ 0.70 \text{ [rad/s]} \\ 0.70 \text{ [rad/s]} \\ 0.30 \text{ [m/s]} \\ -0.3\tan(\phi) \text{ [m/s]} \end{bmatrix} \tag{4.43}$$

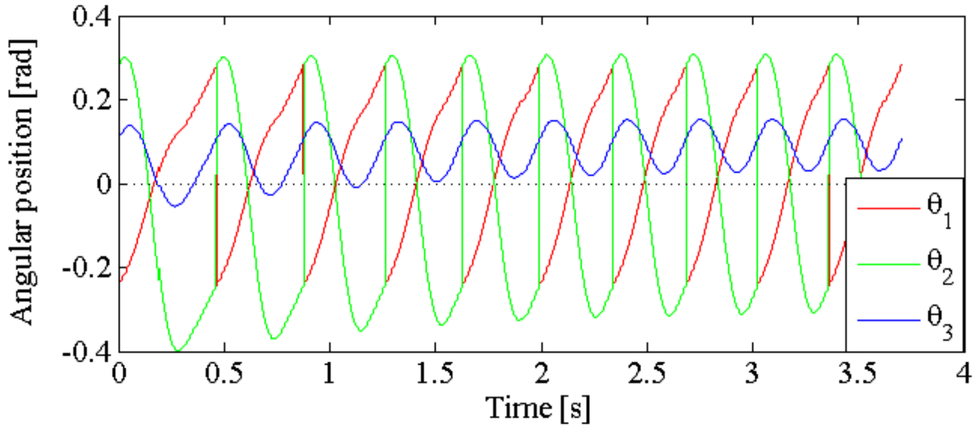
歩行に伴い支持脚先端が滑っている事が確認できる．また図 4.4(a),(b) より動摩擦接環境下においてロボットは支持脚期において僅かな滑りを起こし前進と後退の両方が起きていることが分かる．しかしながら脚交換における寄与も大きく，結果的にロボットは前進していることを示している．図 4.4(c) は脚と上体のの角度の時間発展を表している．θ_1 と θ_2 は脚交換で値が入れ替わるが，上体は連続的な値の変化で推移していることが示されている．また図 4.5(a),(b),(c) からロボットは意図した通り，脚交換後から T_{set} [s] 経過後には制御対象の変化を完了させていることが分かる．T_{set} 以降には股関節が制御によりロック状態へと移行するために次の脚交換まで各リンクの角速度は完全に一致することも図 4.5(a) に示されている．



(a) Position of *x*

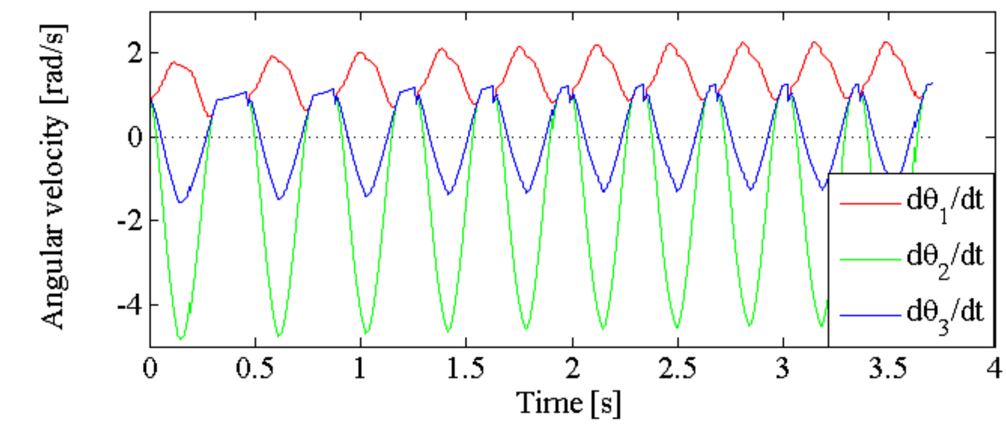


(b) Position of *z*

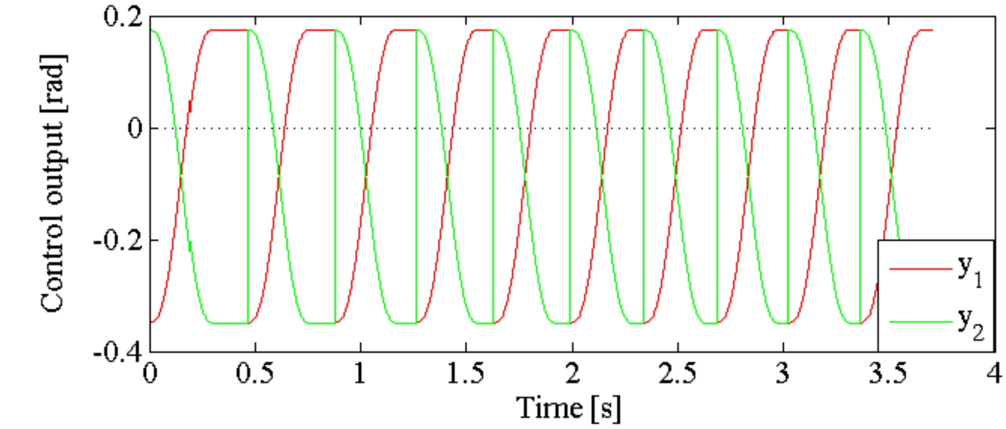


(c) Angular position

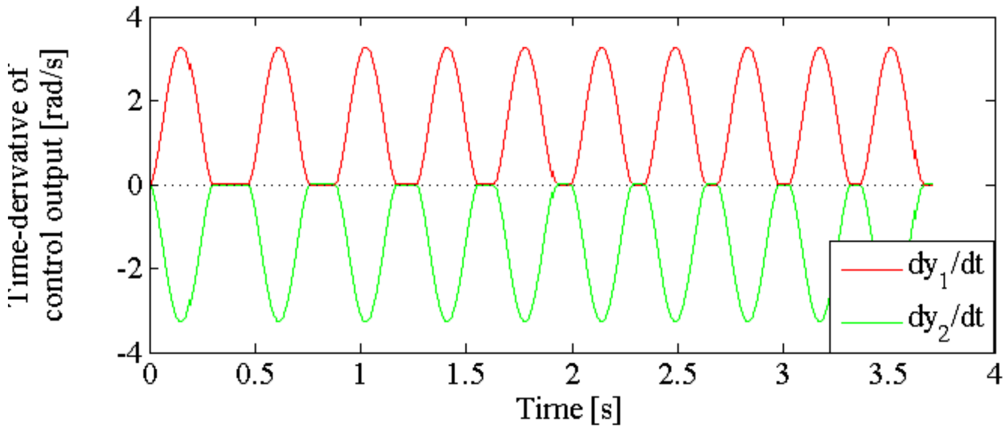
図 4.4: 位置と角度における 10 歩間の発展 (ϕ = 0.02 [rad] and μ = 0.5)



(a) Angular velocity



(b) Control output



(c) Time-derivative of control output

図 4.5: 10 歩間のシミュレーション結果 $\phi = 0.02$ [rad] and $\mu = 0.5$

4.4.2　性能指標

本節では生成される歩容の性質評価のため，次の性能指標を定義する，すなわち Step period,Step length,Walking speed,Specific resistance である．

Step period$_i$（以後 $T_{\mathrm{SP}\,i}$）は 2 章で述べた T_{SP} と等しい．シミュレーション開始直後の脚交換姿勢を 1 番目の脚交換とする．

Step length$_i$ [m]（以後 $\triangle l_{\mathrm{SL}\,i}$）は i 番目の一歩当りに進む距離として，定義を以下に示す．

$$\triangle l_{\mathrm{SL}\,i} = \frac{\left(x_{i+1}^{-} - x_i^{+}\right)}{\cos(\phi)} + 2L\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \tag{4.44}$$

式 (4.44) 右辺 1,2 項は支持脚期の間に滑った総距離を表し，3 項目は支持脚交換により前進した距離を表している．

Walking speed$_i$ [m/s]（以後 WS_i）の定義を以下に示す．

$$WS_i = \frac{\triangle l_{\mathrm{SL}\,i}}{T_{SP\,i}} \tag{4.45}$$

Specific resistance[−]$_i$（以後 SR_i）の定義を以下に示す．

$$SR_i = \frac{p}{m_{\mathrm{t}} g\, WS_i} \tag{4.46}$$

ただし

$$m_{\mathrm{t}} = 2 \times m_1 + m_2 \tag{4.47}$$

$$p = \frac{1}{T_{\mathrm{SP}\,i}} \int_0^{T_{\mathrm{SP}\,i}} \left(|\dot{y}_1 u_1| + |\dot{y}_2 u_2|\right) \mathrm{d}t \tag{4.48}$$

である．力積の時間積分を含むことから一歩当りのアクチュエータの仕事が少ないほど，WS が高いほど SR は小さい値を取り，高効率な歩容であることを意味する．

4.4.3　性能指標計算手順

では前節にて定義した各性能指標を数値シミュレーションを用いて計算する．以下にその手順を示す．

1) $\mu_0 = 1$，また前述の物理パラメータ，初期状態を使用して 100 歩分のデータを測定する．

2) 101 歩目を開始するための脚交換後の状態を次計測の際の新たな初期状態として保存する．

3) μ_0 の値を 0.01 だけ下げ，更新された新たな初期状態を用い再度 100 歩分のデータを測定する．

4) 2,3 を繰り返す．

ただし歩行の際 T_{set} [s] 経過する前に次の支持脚交換が起こってしまう場合，また床反力がマイナスとなる場合は本稿での歩行条件を満たさないものとしてシミュレーションをその時点で終了とした．

4.4.4 リミットサイクル歩行解析結果

図 4.6,4.7 に性能指標の測定結果を示す．これらは上記の手順 (1) において測定したデータ中 $91 \leqq i \leqq 100$ 歩目の性能指標を各グラフに重ねてプロットしたものである．もし各 μ_0 値ごとに複数のプロットが確認された場合，その部分では 1 周期のリミットサイクル歩行ではない，もしくは依然過渡状態であるという事を表す．

図 4.6,4.7 から，いずれの歩容も 90 歩目までに一定の歩容パターンに良く収束していることが確認できる．一部領域を除きほぼ全ての領域でロボットは 1 周期のリミットサイクル歩行を行うことが確認された．

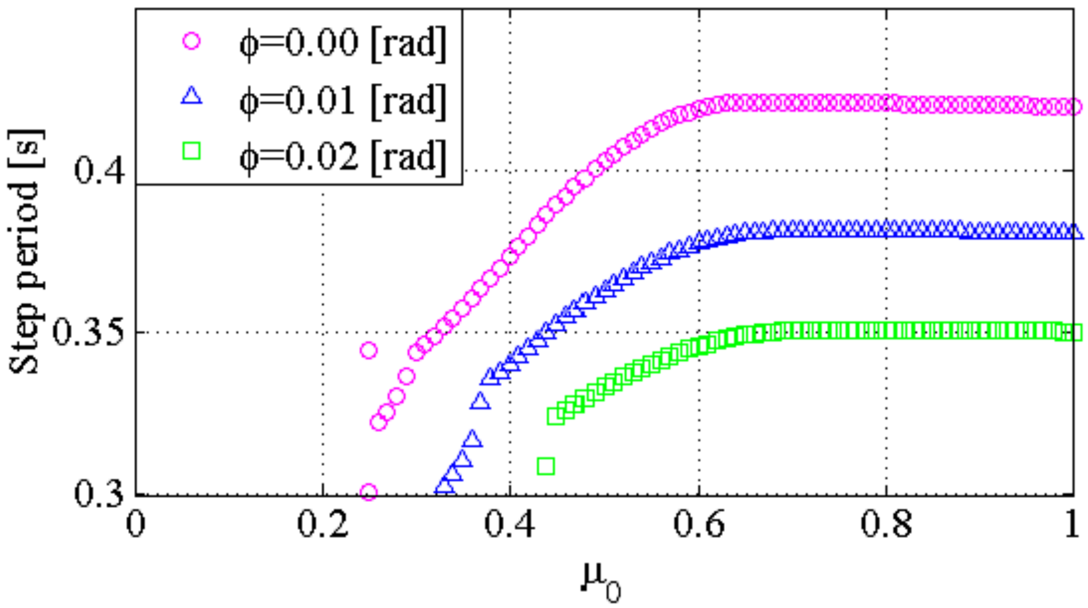
図 4.6(a) を見ると下る斜面の角度 ϕ が増加するほど T_{SP} は一様に減少していることが分かる．これは ϕ が増加したときロボットが前のめりになることから，より前方へと倒れこみやすくなったものと考えられる．今回の計測結果においてグラフが途中で終了した原因はいずれも T_{set} [s] 経過する前に次の支持脚交換が起きた事であり，倒れこむ傾向が強いほど次の支持脚交換のタイミングは早いものとなる．実際，ϕ が増加するほど中断の段階は早いという結果が得られている．

また今回 μ_0 の値を 0 まで測定されず，$\phi = 0$ においては測定を中断する (T_{set} が T_{SP} を上回る) 直前の領域において，2 周期リミットサイクル歩行が確認された．これはどちらも Rimless wheel[8][9] には見受けられない性質であった．

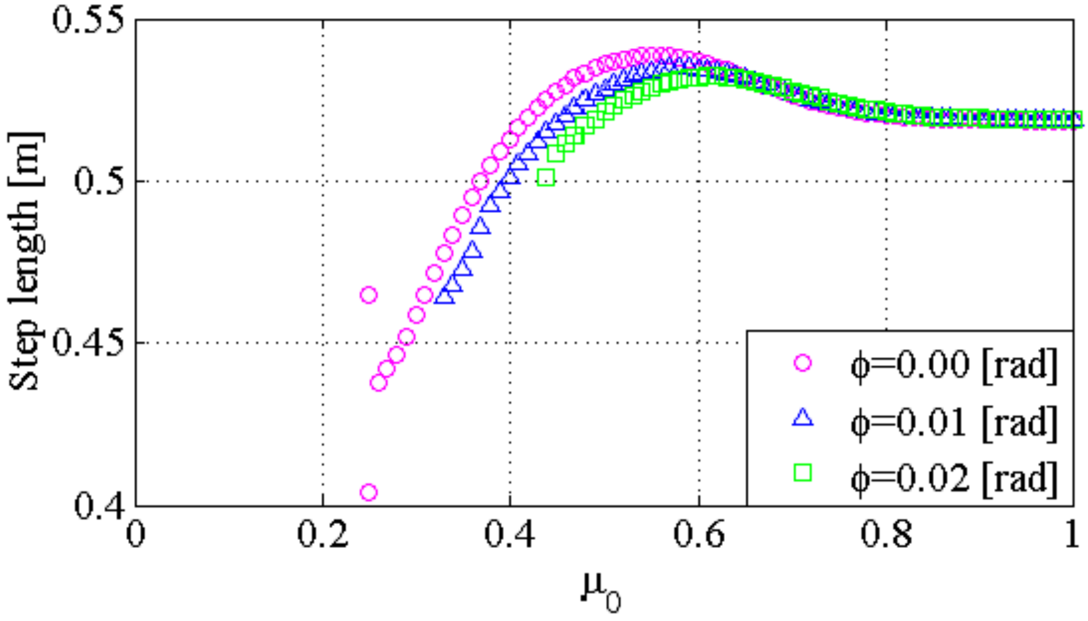
図 4.6(b) においては ϕ が増加した場合の方が $\triangle l_{\mathrm{SL}}$ が小さくなるという一見すると非直観的とも言える結果が得られた．斜面が急になるほど滑りの距離が減少することを意味する結果であるが，これは前述の通り T_{SP} が減少することにより支持脚が滑る時間が少なくなった事が要因として考えられる．$\triangle l_{\mathrm{SL}}$ が減少した事で歩容のエネルギー効率の指標である SR は一部に ϕ が大きいほど大きな値を取る領域が現われたと考えられる．

4.4.5 2 脚ロボットの滑り接触下における歩行生成の難しさ

本節 4.4 では先行研究 [8][9] を元に上体付き 2 脚ロボットが滑り接触という不整地環境における歩行生成の一例を示した．その結果は先行研究で用いられた RW の結果と異なり，μ_0 が 0 付近となる極めて滑りやすい環境においては歩行の継続が困難となるという結果が得られた．これはもちろんある初期条件において，特定の制御を用いた一例に過ぎず，これがそのまま全ての 2 脚ロボットに当てはまる結果とは言えない．しかしながら遊脚自由度が増えたこのロボットは RW よりも歩行が継続不能になりやすく，極めて滑りや

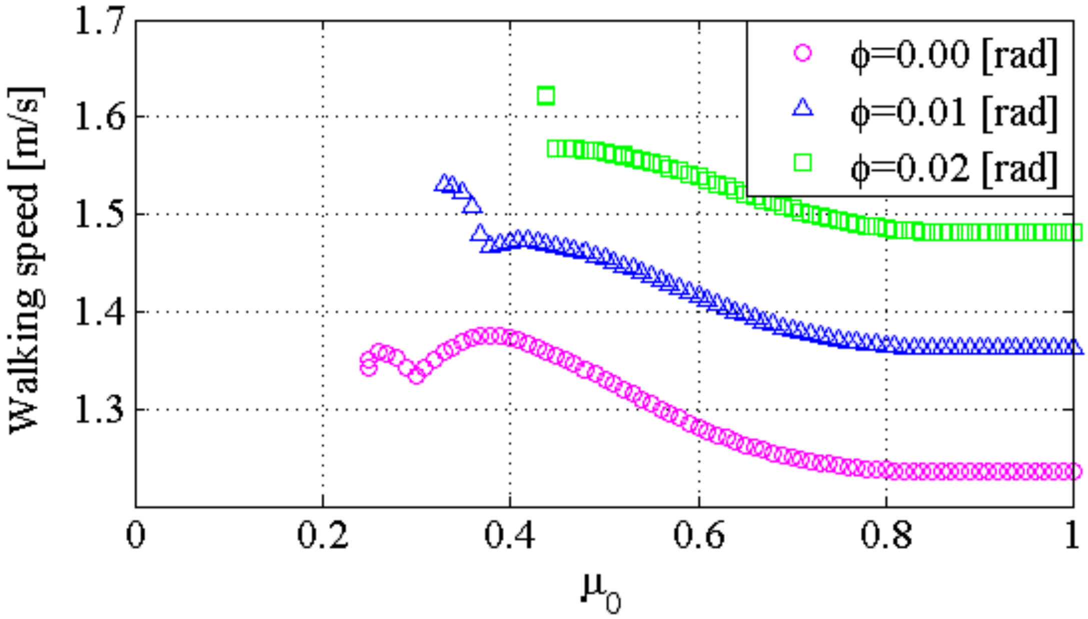


(a) Step period

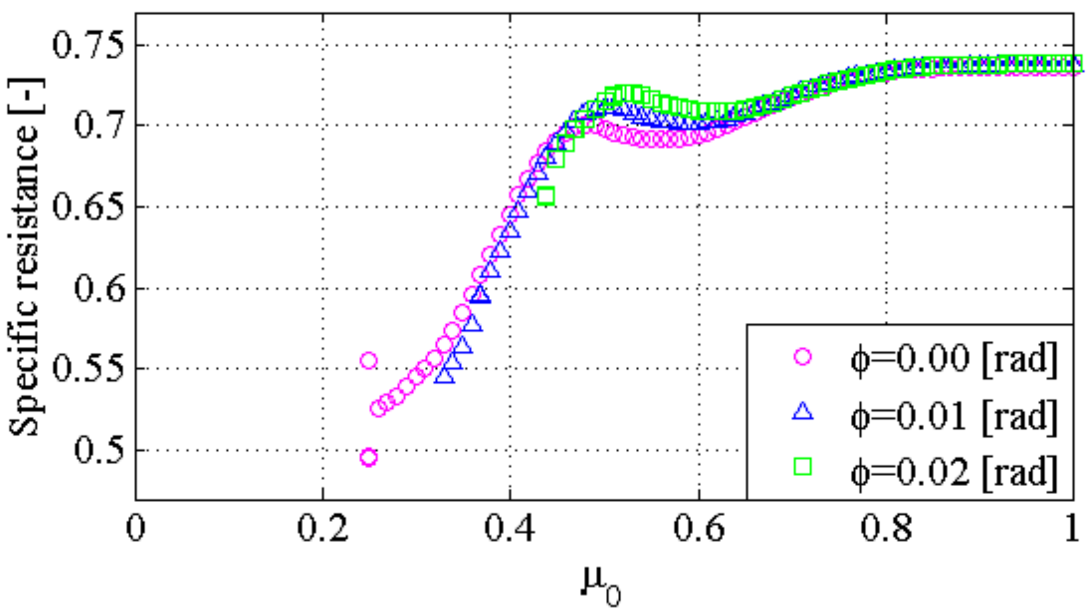


(b) Step length

図 4.6: Step period と Step length



(a) Walking speed



(b) Specific resistance

図 4.7: Walking speed と Specific resistance

すい路面における歩行生成の研究の必要性が示される結果となったとも捉えられる．次節においては先行研究を元に制御パラメータを変更することによって，滑り接触に対する歩行生成の依存性がどのように変化するか調査する．

4.5 数値シミュレーションに基づく脚振り速さに関する依存特性解析

本節でロボットの物理パラメータや初期状態は変更せず，制御パラメータ T_{set} のみを変える場合の歩行生成について調査する．本章のロボットは T_{set} の長さに応じた脚振りを行う．従って T_{set} の値が小さいほどロボットは素早く脚を振り抜き，T_{set} の値が大きいほどロボットの脚振りはゆっくりとしたものになる．本節ではそれによって歩行にどのような変化があるのか，また歩行継続可能な環境に変化が現れるかに注目した調査を行う．その結果として，T_{set} に応じて支持脚中に一度支持脚が地面から離れる Skip 歩行が発現し，そのうちのある条件では極めて滑りやすい $\mu_0 = 0$ という条件下においても転倒せず歩行継続が可能であることを示す．

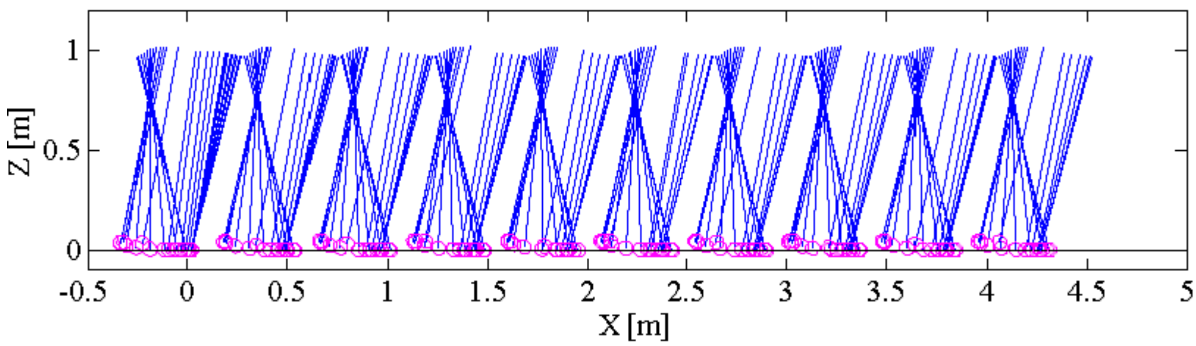
4.5.1 Stick diagram と歩行概要

前述のモデリングを用いて $\mu_0 = 0.3$ の場合について，$T_{\mathrm{set}} = 0.10,\ 0.30$ [s] の 2 つについて 10 歩間物理シミュレートした様子を図 4.8(a),(b) に，また $T_{\mathrm{set}} = 0.10,$ [s] における歩行に対応した各パラメータの時間発展を図 4.9,4.10 に示す．またシミュレーションにおいては式 (4.49) にように設定した．

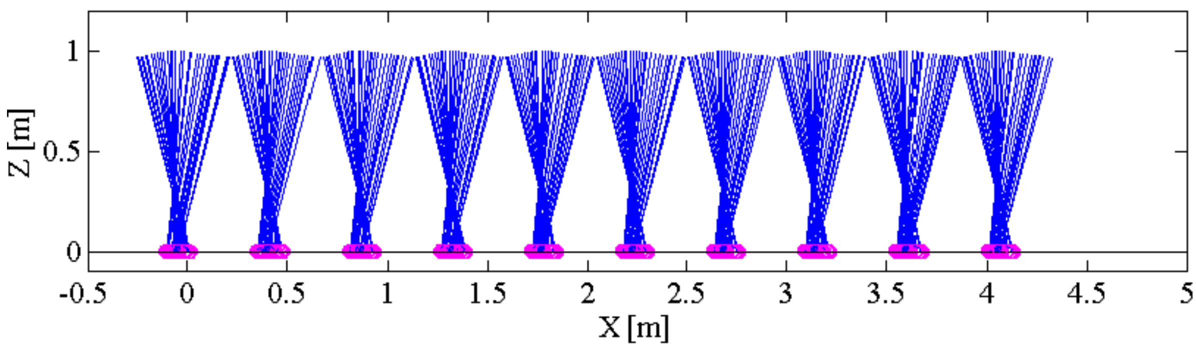
$$\boldsymbol{q}(0) = \begin{bmatrix} -\alpha/2 + \phi \ [\mathrm{rad}] \\ \alpha/2 + \phi \ [\mathrm{rad}] \\ \beta + \phi[\mathrm{rad}] \\ 0 \ [\mathrm{m}] \\ 0 \ [\mathrm{m}] \end{bmatrix},\ \dot{\boldsymbol{q}}(0) = \begin{bmatrix} 0.60 \ [\mathrm{rad/s}] \\ 0.60 \ [\mathrm{rad/s}] \\ 0.60 \ [\mathrm{rad/s}] \\ 0.65 \ [\mathrm{m/s}] \\ 0 \ [\mathrm{m/s}] \end{bmatrix} \tag{4.49}$$

図 4.8(a),(b) において，支持脚のリンクは青，また先端はマゼンダの円で記されている．図 4.8(a) より，$T_{\mathrm{set}} = 0.10$ [s] 時には脚先端は歩行中に床面から離れつつ前進していることが分かる．図 4.8(b) より，$T_{\mathrm{set}} = 0.30$ [s] 時には支持脚先端は常に床面に接し続けており，また滑り距離も図 4.8(a) に比べて抑えられていることが分かる．

図 4.9(a),(b) は支持脚先端の座標成分の時間発展を示している．(b) より支持脚は脚振りに合わせて床面から浮かび上がっていることを確認できる．またその時 (a) より支持脚は大きく後方に後退していることから，地面から十分な摩擦が得られていない，すなわち脚の引き抜き動作が空振りしているということが分かる．また図 4.9(c) より，飛び上がりの直前から飛び上がりに欠けて支持脚先端が大きく後向きの速度を発生させていること，また空中で脚を動かし終えた後はほぼ等速になっているという結果が得られた．図 4.10(a) は各角速度の時間発展を示したものである．Skip 歩行の場合，空中に飛び上がっている最中に T_{set} だけ経過する場合について歩行成立とここではしている関係で，脚振りが終了すると各角速度が同値になるとともに空中のため自由落下運動のように等速の回転運動を



(a)Skip walking where T_{set} = 0.10 [s]



(b)Non-skip walking where T_{set} = 0.30 [s]

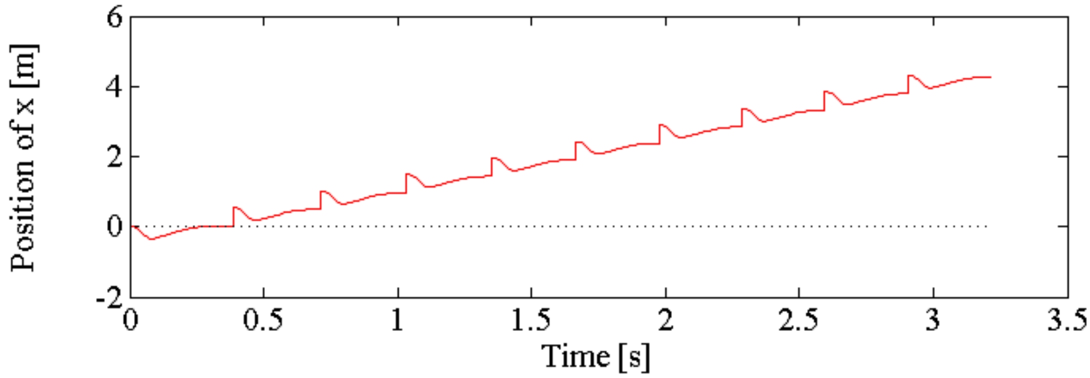
図 4.8: 滑り接触下における歩行中の支持脚の Stick diagram

していることを確認することができた．図 4.10(b) 床面に対して垂直な方向に支持脚先端に対して働く床反力である．通常の歩行であれば必ず 0 とはならないが，Skip 歩行の場合は空中に居る間は 0 の値を取る。図からその結果を得ることができていることが分かる．図 4.10(c) は出力の時間微分を示したものである．支持脚と遊脚で同じ角速度で動くため，このグラフでは上下対照的な値の推移を示していることが分かる．また T_{set} 以降は各リンクが機械的にロックされるという前提から，出力に変化がないこともここで確認できる．

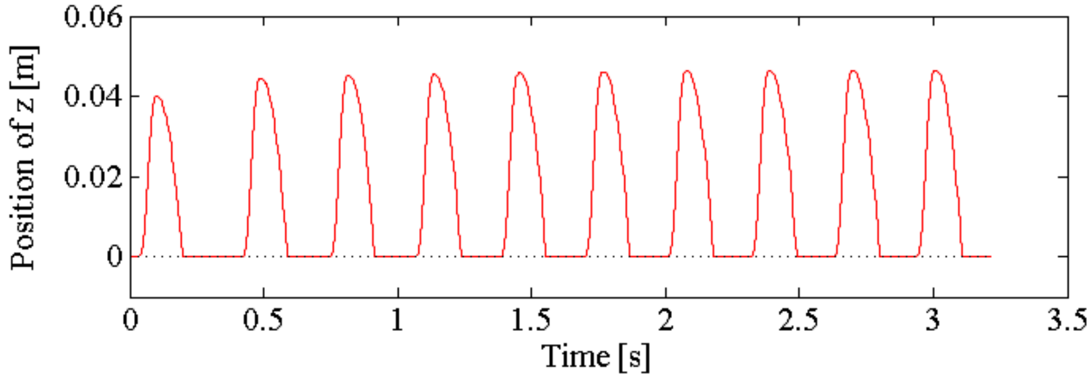
4.5.2　リミットサイクル歩行解析

続いて 3 つの性能指標，Step period [s], Step length [m], Walking speed [m/s] の測定を行う．ただし Specific resistance については途中で支持脚が床面から離れるなど通常の歩行とは異なるため今回は扱わない．

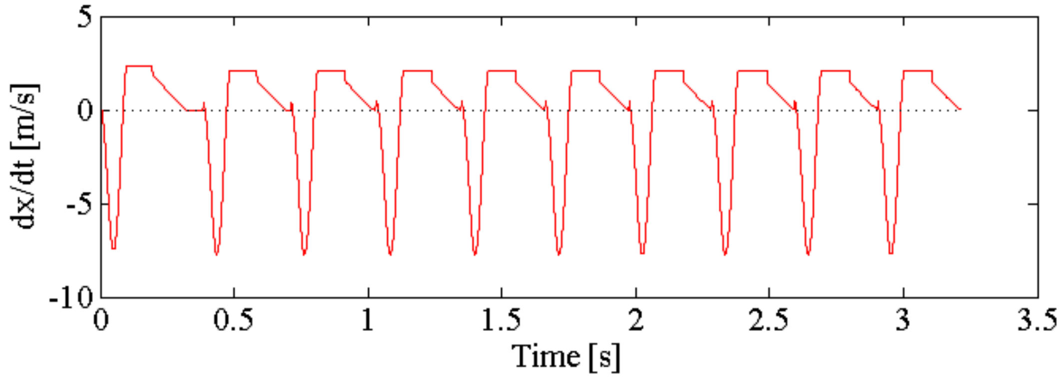
Skip 歩容の測定と Skip を含まない歩容の測定では試行錯誤的に初期状態を決定した関係で，若干測定手順が異なる．まず Skip 歩容の測定について下にその手順を示す．



(a) Position of *x*

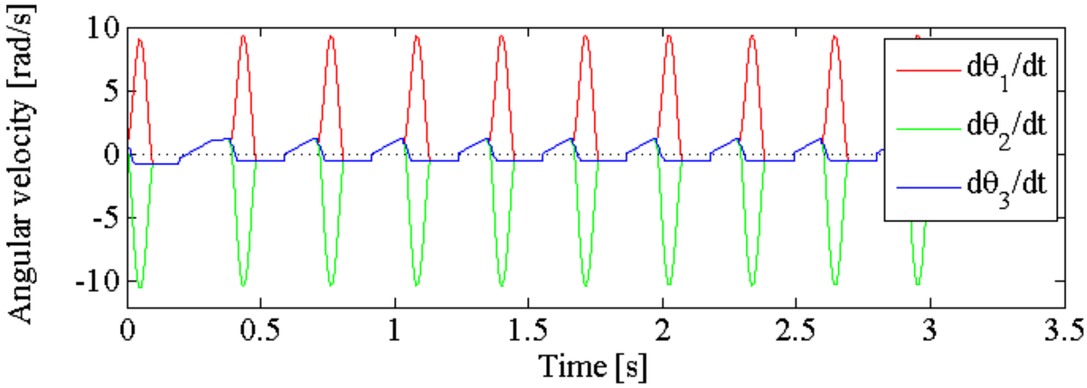


(b) Position of *z*

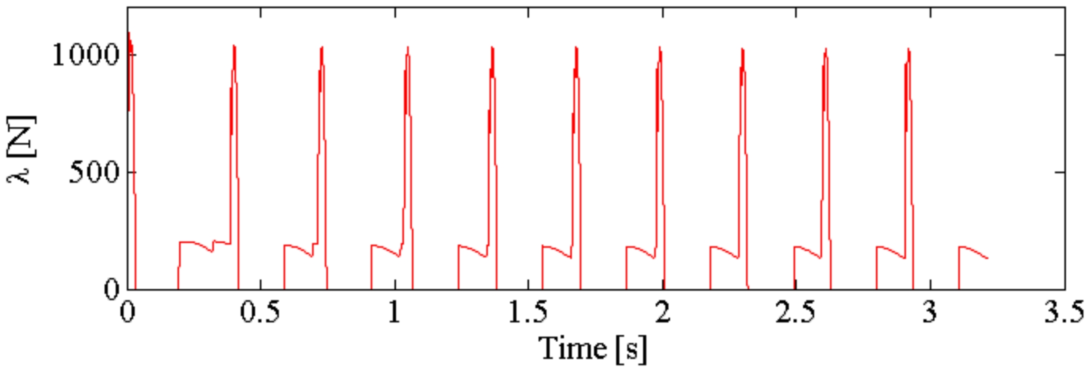


(c) Velocity of *x*

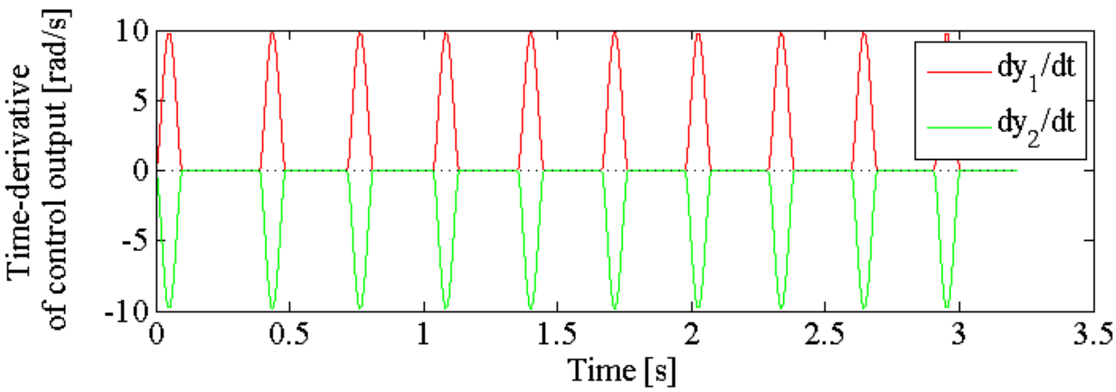
図 4.9: 位置，速度に関する各パラメータの時間発展



(a) Angular velocity



(b) Ground reaction force λ



(c) Time-derivative of control output

図 4.10: 角速度他に関する各パラメータの時間発展

1) $\mu_0 = 0.30$ にて前述の物理パラメータ，初期状態を使用して 150 歩分のデータを測定する．

2) 151 歩目を開始するための脚交換後の状態を次の計測の際の新たな初期状態として保存する．

3) μ_0 の値を 0.01 だけ”減らし”，更新された新たな初期状態を用い再度 150 歩分のデータを測定する．

4) $\mu_0 = 0$ になるまで 2,3 を繰り返す.

5) 手順 1,2 を順に実行し，μ_0 の値を 0.01 だけ”増やし”，$\mu_0 = 1$ になるまで 2,3 を繰り返す.

ただし支持脚期において $T_{set}/2$ [s] 経過前の遊脚の床面への接触は無視する．
次に Skip を含まない歩容の測定について下にその手順を示す.

1) $\mu_0 = 1$，また前述の物理パラメータ，初期状態を使用して 100 歩分のデータを測定する．

2) 101 歩目を開始するための脚交換後の状態を次計測の際の新たな初期状態として保存する．

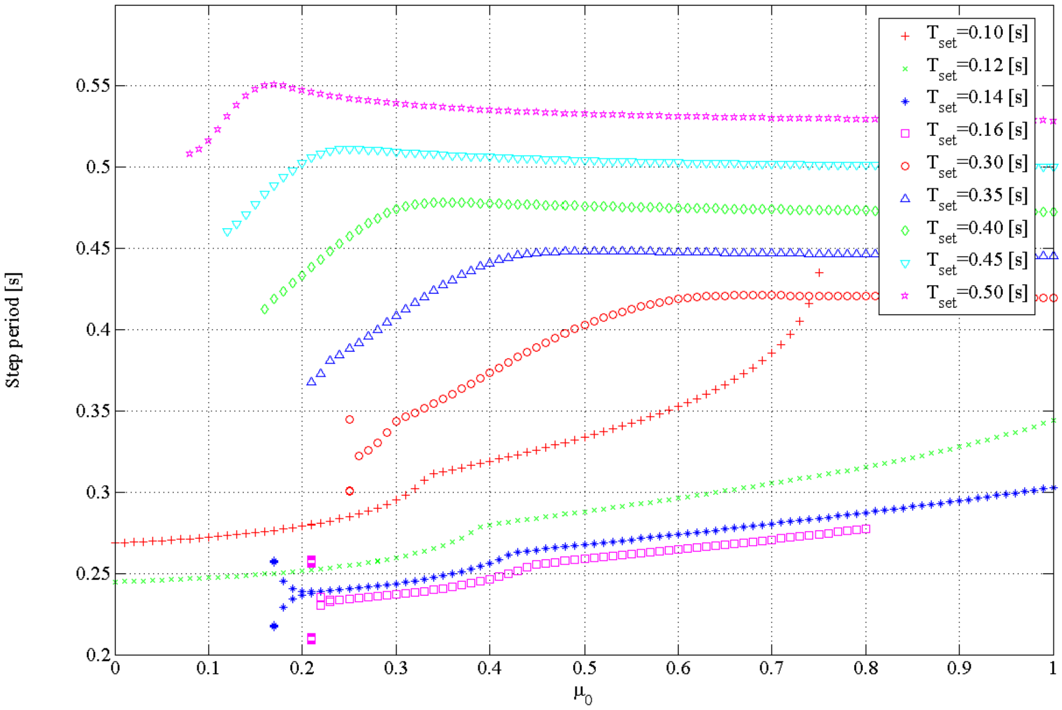
3) μ_0 の値を 0.01 だけ減らし，更新された新たな初期状態を用い再度 100 歩分のデータを測定する．

4) 2,3 を繰り返す.

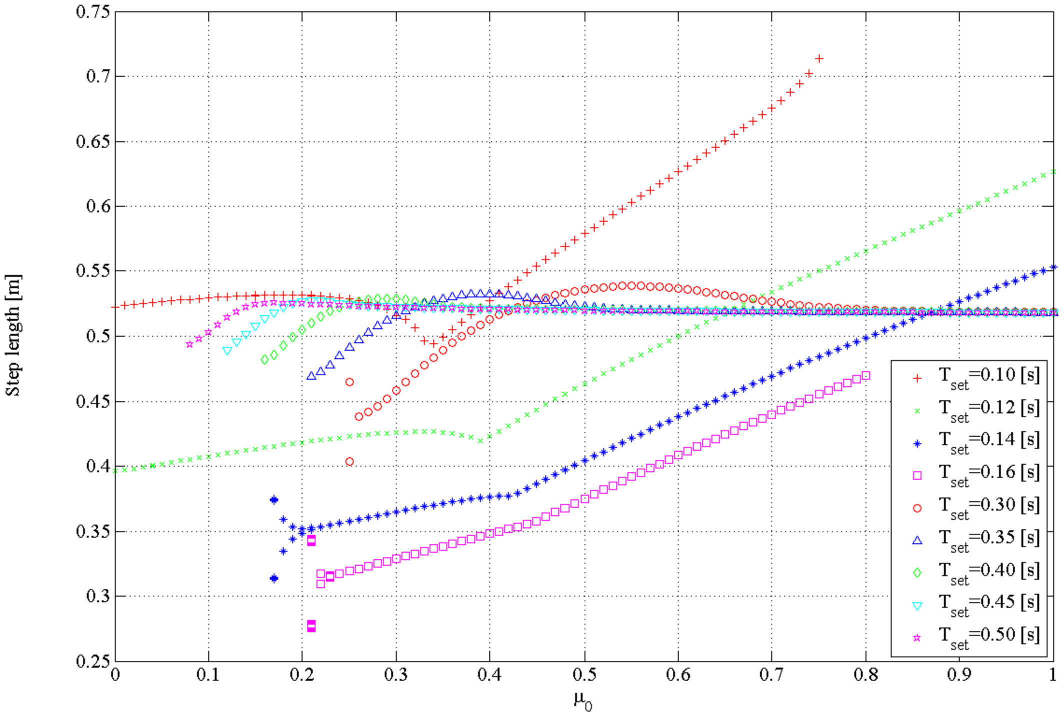
また初期状態は以下のものを使用した.

$$\dot{\theta}_1 = \dot{\theta}_2 = \dot{\theta}_3 = 0.7[\mathrm{rad/s}]$$
$$\dot{x} = 0.0[\mathrm{m/s}]$$

ここでは床反力がマイナスとなる場合は歩行不成立とした．
両方を通じて，T_{set} [s] 経過する前に，遊脚が床面に接触した場合は歩行不成立とした．
図 4.11,4.12 に性能指標の測定結果を示す．図 4.11,4.12 は上記の手順において測定した各 μ_0 値の最終 10 歩分の性能指標値をグラフに重ねてプロットしたものである．もし各 μ_0 値ごとに複数のプロットが確認された場合，その部分では 1 周期のリミットサイクル歩行ではない，もしくは依然過渡状態であるということを表す.
図 4.11,4.12 から，いずれの歩容も最終 10 歩目までに一定の歩容パターンに十分に収束していることが確認できる．一部領域を除きほぼ全ての領域でロボットは 1 周期の定常歩行を行うことが確認された．また Skip 歩容の測定においては，過渡状態においても Skip しない歩容は確認されなかった．反対に $T_{set} > 0.26$ の領域においては床反力が負になる（飛び上がる）状態は確認されなかった．



(a) Step period



(b) Step length

図 4.11: 滑り接触下における Step period と Step length

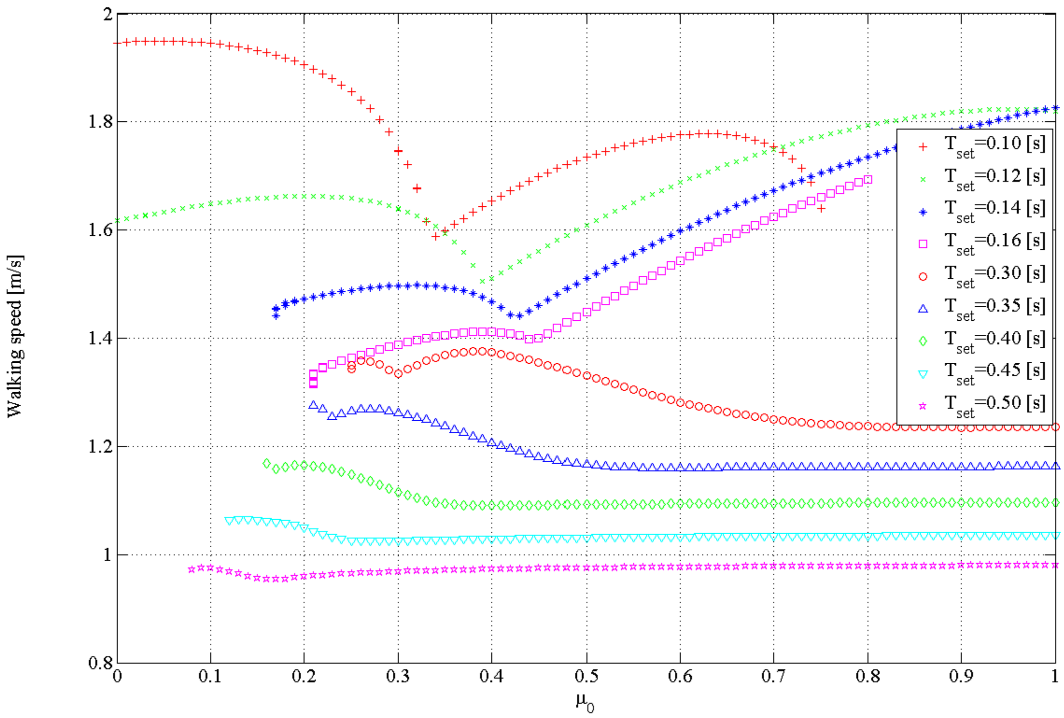


図 4.12: 滑り接触下における Walking speed

表 4.3: T_{set} に対する歩行成立の可否

歩容	Skip					Non-skip
T_{set}[s]	0.06	0.08〜0.18	0.20	0.22	0.24	0.26
状態	後転	定常	a	a	a,b	定常

また表 4.3 にシミュレーションによる持続的な歩行の可否の結果を示す．ここで状態に定常と記されているものは，その T_{set} の値にて 150 歩歩行し続けたことを意味する．またそれ以外の記述があるものは，150 歩以内に歩行不成立となった際の条件である．

ただし歩行不成立条件 a,b は

(a) 着地までに T_{set} 経過しない

(b) 浮遊相かつ $t > T_{\mathrm{set}}/2$ において遊脚が地面と衝突する

である．

4.5.3 性能指標を用いた定量的解析

前節の手順にて数値シミュレーションして測定した各性能指標のプロットを図 4.11，4.12 に示す．それぞれの図は歩行が $T_{\mathrm{set}} \le 0.3$ [s] のものについては 100 歩，$T_{\mathrm{set}} < 0.3$ [s] については 150 歩成立した条件について，最終 10 歩に関する 10 の値が重ねてプロットされているものである．従ってそれが 1 周期の歩行パターンに収束する場合は一つのプロットに全て重なるが，2 周期になる場合は二つの値に，準周期的な場合はにじんだようにプロットされる．なお表 4.3 より，$T_{\mathrm{set}} \le 0.3$ [s] の条件下においては全非 Skip 歩行，$T_{\mathrm{set}} < 0.3$ [s] においては全て Skip 歩行が生成された．

図 4.11(a) は SP に関するプロットである．Skip，非 Skip 歩行を含めて，概ね歩行が継続した領域について T_{set} が増大したとき SP は増大するという傾向は一貫して確認された．あるいは脚をゆっくり動かした場合にはゆっくりとした歩行になると言える．また非 Skip 歩行 $T_{\mathrm{set}} = 0.30$ [s] においては $\mu_0 = 0.30$ 付近において滑らかな変化でない，特異的な箇所が見受けられた．一方 Skip 歩行においてはすべての条件で特異的な変化をする箇所が見受けられた．また非 Skip 歩行については μ_0 の増大方向に対して変化幅は小さいものになっていくのに対し，Skip 歩行においては μ_0 の増大と共に値が収束していく様子は確認されなかった．

図 4.11(b) は SL に関するプロットである．SL については Skip，非 Skip 歩行について大きく傾向が異なるという特徴が得られた．非 Skip 歩行については μ_0 の増大と共に値が各条件とも概ね同じ値に収束していくのに対し，Skip 歩行についてはその傾向は見受けられなかった．非 Skip の場合，脚が上下方向に受ける垂直抗力は支持脚が地面から離れる大きさを必ず下回っているが，Skip 歩行はその制限が無い．非 Skip 歩行よりも大きな摩擦力を得られることが影響していることが原因の一つとして考えられる．また SP と同様，Skip 歩行の SL についても傾向が変化する特異点がそれぞれの条件で確認された．

図 4.12 は WS に関するプロットである．SL で一貫した傾向が見られなかった反面，WS は SP 同様 T_{set} の増減に対して WS の大小関係は概ね一貫しているという結果が得られた．今回扱った領域においては，WS への寄与については SP の大小関係がそのまま反映される結果となり，SL の寄与は SP に比べると小さいものであるという結果が得られた．

4.6　まとめと今後の課題

本章では上体を持つ 2 脚ロボットを用いて斜面との間に動摩擦接触を持つ歩行特性について数値シミュレーションによる解析を行った．目標軌道追従制御を用いて脚が常に事前に定めた姿勢を厳密に一致するような制御を用いて動摩擦接触斜面環境下で定常歩行を生成できることを明らかにした．また今回調査した範囲内において，$T_{\mathrm{set}} = 0.3$ [s] では極めて滑りやすい環境での歩行生成が難しいことが明らかとなったが，制御パラメータの調整，及び Skip 歩行を考慮することによりそのような環境におけるリミットサイクル歩行生成も可能であるということが示された．また性能指標の計算により，歩行速度は脚振りの速さが速くなるほど大きくなる傾向は，Skip 歩容を含めても基本的には保たれることが示された．

今後の課題としては，歩行の安定性や，効率といった側面から生成される歩行の性能を評価することや，それぞれの性能を最大化する最適制御を提案することなどが挙げられる．

第5章　結論

5.1　結論

本研究では滑り接触下という不整地環境に対して CRW と，上体付き 2 脚ロボットが歩行生成可能であることを，数学的なモデルを構築し，数値シミュレーションによる歩行再現解析により明らかにした．受動歩行ロボットである CRW に揺動質量を搭載し，整地，不整地における揺動質量搭載の有効性を明らかにした．また RW より自由度の多い，上体付き 2 脚ロボットに対しても数値シミュレーションによる再現にて歩行生成可能であることを明らかにした．さらに制御パラメータにより歩行生成可能な動摩擦係数が変化することに加え，通常，Skip という 2 つの歩行が生成されることを明らかにした．

5.2　今後の課題

今後の課題として，以下のことが挙げられる．

- 滑り接触下におけるアクチュエータを搭載した CRW の平地歩行生成と解析
- 滑り接触下を歩行する 2 脚ロボットへの揺動質量の搭載

本研究における CRW は下り斜面上の歩行生成についてのみを扱った．アクチュエータを必要としない高効率な歩行が実現されているのを前提に，今後はアクチュエータを搭載して僅かな外力による平地歩行における歩行生成と解析を行うことで，より実生活を想定したシミュレーション結果が得られると考えられる．

また 2 脚ロボットについては，今回は滑り接触下における基礎的な歩行性質についてのみ調査した．今後は CRW を用いた解析結果を踏まえ，2 脚ロボットではどの程度その特性が準拠されるのかを議論することで，滑り接触という環境が歩行ロボットに与える影響について，より一般的な結果を示す事に繋がると考えられる．また 2 脚ロボットの歩行生成については脚の運動がシンプルとなることを重視したために，実機等で再現する際の技術的難度等については考慮しなかった．今後は再現実験を前提にした制御入力を用いた検討も必要であると考えられる．

謝辞

本研究にあたり，熱心に指導して頂いた浅野文彦准教授に心より感謝致します．研究の目標や方向性ついてご助言を頂いた党建武教授に感謝致します．研究手法について鋭い着眼点からご指摘頂いた飯田弘之教授に感謝致します．ロボティクスの観点から様々なご助言を頂いた立命館大学徳田功教授に感謝致します．学会活動中に鋭いご指摘を頂いた広島大学原田祐志助教及び九州工業大学花澤雄太助教に感謝致します．研究にあたり熱心に指導して頂いた田中宏和准教授に感謝致します．情報解析の観点から鋭いご指摘と多数のご助言を頂きました末光厚夫助教と川本真一氏に感謝いたします．様々なご助言を頂きました呉西愉氏，西村奈々氏，滝浪隼氏，寺田夕貴氏に感謝致します．浅野文彦研究室メンバーであり，討論，論文作成において貴重な意見，助言を頂いた肖軒氏，菊地保公氏，坂利昭氏，福田豪氏，板本拓也氏，また卒業生の皆様に感謝致します．最後に，ここまで私を育て見守ってくれた両親に深く感謝します．

参考文献

[1] T. McGeer,“Passive dynamic walking,” Int. J. of Robotics Research, vol. 9, no. 2, pp. 62–82, 1990.

[2] 田中大樹，“ 揺動質量をもつ連結型リムレスホイールの歩行解析と性能向上の検討 ”，北陸先端科学技術大学院大学，情報科学研究科，修士論文，2012.

[3] 浅野文彦，“ 伸縮脚を用いた衝突姿勢の非対称化に基づく高速動的歩容生成 ”，日本ロボット学会誌，vol. 29, no. 1, pp. 99–110, 2011.

[4] Y. Hanazawa, T. Hayashi. M. Yamakita and F. Asano, “High-speed limit cycle walking for biped robots using active up-and-down motion control of wobbling mass,” in Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 3649-3653, 2013.

[5] 阿久津行裕，“ 脚部に動吸振器を持つ 2 脚ロボットの高速かつロバストな歩容生成に関する研究 ”，北陸先端科学技術大学院大学，情報科学研究科，修士論文，2014.

[6] 荻野，春名，俵，細田，浅田，“受動歩行からヒューマノイドロボット歩行に向けて,” バイオメカニズム学会, no.16, pp. 223–230, 2002.

[7] 浅野，羅，山北， “受動歩行を規範とした 2 足ロボットの歩容生成と制御,” 日本ロボット学会誌, vol. 22 ,no. 1, pp. 130–139, 2004.

[8] F. Asano, Y. Kikuchi, and M. Shibata, “Limit cycle walking on ice,” Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.3132–3137, 2013.

[9] F. Asano, Y. Kikuchi, and M. Shibata, “Modeling, control and analysis of limit cycle walking on slippery road surface,”Int. J. of Dynamics and Control, doi:10.1007/s40435-014-0084-7, 2014.

[10] 藤本，浅野 “ 上体を有する劣駆動 2 脚ロボットの滑り接触を考慮した下り斜面上の歩容生成 ”，計測自動制御学会, システムインテグレーション部門講演会，pp. 2058-2062，2014.

[11] 浅野，米谷，寺田，上島，中村 “ 滑り接触を考慮した劣駆動リムレスホイールのスキップ歩容生成 ”，ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014　講演論文集，pp. 2A1-I06(1)- 2A1-I06(4), 2014.

[12] 浅野文彦，“ 受動・能動 Rimless Wheel の能動歩容に内在する安定原理とその有限整定歩容生成への応用 ”，日本ロボット学会誌，vol. 31, no. 4, pp. 435–445, 2013.

[13] 石川将人，“ 拘束系の力学とロコモーション ”，生産と技術，vol. 67, no. 2, pp. 76–78, 2015.

[14] H. Goldstein, C. Poole, and J. Safko: Classical Mechanics (3rd Edition), Publisher, Addison-Wesley, 3 edition, ISBN-13: 978-0201657029 , 2001. y, 3rd edition, 2002.

[15] 浅野，井上，田中，徳田，“ 連結型リムレスホイールにおける位相差の調節による高速化の実験的検証 (受動歩行ロボット ”，日本ロボット学会誌，vol. 30, no. 1, pp. 107–116, 2012.