

Title	角運動量拘束制御に基づく耐摺動性に優れた下り階段上のステルス歩容生成
Author(s)	小林, 聖弥
Citation	
Issue Date	2019-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/15893
Rights	
Description	Supervisor:浅野 文彦, 先端科学技術研究科, 修士 (情報科学)

修士論文

角運動量拘束制御に基づく耐摺動性に優れた下り階段上のステルス歩容生成

1710080 小林 聖弥

主指導教員 浅野 文彦
審査委員主査 浅野 文彦
審査委員 Ho Anh-Van
平石 邦彦
金子 峰雄

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)

平成 31 年 2 月

概要

本論文では、滑り易い低摩擦の下り階段上において、上体リンクを有するリムレスホイールによる耐摺動性の高い歩行運動の実現を試みる。はじめに、上体リンクとリムレスホイールから構成される2自由度の劣駆動移動ロボットについて、滑りのない高摩擦の下り階段上における両脚支持期を含むステルス歩行を紹介し、両脚支持期のダイナミクスについて検討する。次に、同2自由度モデルを用いて、問題を低摩擦の下り階段上に拡張し、角運動量拘束制御による耐摺動性の高い歩行の生成を試みる。また、2自由度モデルにおいて、歩容生成が達成できない問題について検討する。さらに、上記劣駆動移動ロボットにリアクションホイールを追加することで3自由度とし、角運動量拘束制御を用いた耐摺動性の高い歩容生成を達成する。最後に、以上を踏まえて下り階段上での角運動量拘束制御に関して考察するとともに、確認された課題について議論を行う。

目次

第1章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究目的	2
1.3	本論文の構成	2
第2章	下り階段上での2自由度モデルによるステルス歩容生成	3
2.1	数学モデルの導出	3
2.1.1	運動方程式	3
2.1.2	制御系設計	4
2.2	線形化による初期状態の導出	5
2.3	数値シミュレーション	7
2.3.1	シミュレーション結果	7
2.3.2	両脚支持期のZMP解析	9
第3章	低摩擦下り階段上での2自由度モデルによる厳密ステルス歩容生成	13
3.1	数学モデルの導出	13
3.1.1	運動方程式	14
3.1.2	制御系設計	14
3.2	線形化による初期状態の導出	16
3.3	非線形モデルにおける初期状態の探索	17
3.4	新規ロボットモデルの提案	19
第4章	低摩擦下り階段上での3自由度モデルによる厳密ステルス歩容生成	21
4.1	数学モデルの導出	21
4.1.1	運動方程式	21
4.1.2	制御系設計	22
4.2	線形化による初期状態の導出	23
4.3	非線形モデルにおける初期状態の探索	24
4.4	数値シミュレーション	24
4.5	上体リンクの質量による影響	25

第 5 章	結論	33
5.1	統括	33
5.2	今後の課題	33

目 次

2.1	滑りのない下り階段上の2自由度モデル	4
2.2	線形2自由度モデルにおける滑りのない下り階段上での各リンクの挙動	8
2.3	非線形2自由度モデルにおける滑りのない下り階段上での各リンクの挙動	8
2.4	角運動量拘束制御を行わない場合の水平床反力	9
2.5	上体リンクの初期角度による運動の変化	10
2.6	上体リンクの初期角度による運動の変化(拡大図)	11
2.7	上体リンクの初期角度によるZMPの挙動の変化	12
3.1	低摩擦下り階段上の2自由度モデル	14
3.2	非線形2自由度モデルにおけるリムレスホイールの運動の遷移	17
3.3	非線形2自由度モデルにおける上体リンクの運動の遷移	18
3.4	非線形2自由度モデルにおける各リンクの挙動	18
3.5	非線形2自由度モデルにおける各リンクの挙動(拡大図)	19
4.1	低摩擦下り階段上の3自由度モデル	22
4.2	線形3自由度モデルにおけるリムレスホイールの運動の遷移	26
4.3	線形3自由度モデルにおける上体リンクの運動の遷移	27
4.4	線形3自由度モデルにおけるリアクションホイールの運動の遷移	27
4.5	線形3自由度モデルにおける全重心位置と水平方向床反力の遷移	28
4.6	線形3自由度モデルにおける各リンクの運動	28
4.7	非線形3自由度モデルにおけるリムレスホイールの運動の遷移	29
4.8	非線形3自由度モデルにおける上体リンクの運動の遷移	29
4.9	非線形3自由度モデルにおけるリアクションホイールの運動の遷移	30
4.10	非線形3自由度モデルにおける全重心位置と水平方向床反力の遷移	30
4.11	非線形3自由度モデルにおける各リンクの運動	31
4.12	非線形3自由度モデルにおける軽量な上体リンクを用いた場合の各リンクの運動	32

表 目 次

2.1	2 自由度劣駆動モデルの物理パラメータ	7
4.1	3 自由度劣駆動モデルの物理パラメータ	25

第1章 序論

1.1 研究背景

実用的な歩行ロボットにおいて、整地のみならず不整地や悪条件の路面などの多様な路面環境への適応は必要不可欠な能力である。しかし、以前より歩行ロボットが抱える大きな弱点として不整地への適応能力の低さが指摘されており、実環境での利用を実現する上で妨げとなっていた。適応能力を向上させるための手法の一つとして、支持脚先端のみが地面と接するポイントフット型の歩行ロボットが注目されている [1]。しかし、この手法は足首にトルクを印加することができないために劣駆動性を有する。この劣駆動性により、ポイントフット型の歩行ロボットにおいては安定化が困難であることが一般に知られている [2, 3]。

従来のリミットサイクル型歩行の研究においては、支持脚交換時に瞬間的な衝突を含むモデルを用いることが常であった [5]。これらの歩行運動は位相空間上で状態のジャンプを含む極限軌道を形成し、またこの軌道は安定性を有することから、初期状態を極限軌道付近に設定しエネルギー回復制御を繰り返すことで運動の安定化が実現可能であった [4]。しかし、これらの歩行運動は、ゼロダイナミクス of 自明でない安定性に依存して実現されており、滑り易い低摩擦路面上での歩行には不向きであることから、不整地への適応性に欠けることが明らかとなっている。このような欠点の解消には、受動歩行のような効率を重視した歩容生成法ではなく支持脚接地点の摺動を意識した根本的に異なるアプローチが必要とされる。

これに対して、遊脚着地時の衝突を回避しエネルギー損失をゼロにするステルス歩行は、衝突直後の摺動を回避する上で有利であることが明らかにされている [6–8]。加えて、支持脚接地点に作用する水平方向への床反力をゼロに拘束する角運動量拘束制御は、単脚支持期において支持脚接地点の摺動を防ぐことが可能な制御として提案されている [9–11]。先行研究において、ステルス歩行を含む角運動量拘束制御を用いることにより、摩擦ゼロの水平面上で支持脚接地点の摺動を回避する歩行が達成されている [9]。一方で、支持脚接地点と遊脚着地点の間に高低差のある、階段に代表されるような環境においては、階段が本質的には斜面と等価であると看做されることから分かるように、線形モデルと非線形モデルに生じるギャップから初期状態を解析的に求めることが出来ず、数値解析に頼らざるをえないことが知られている。これらを踏まえて、本研究では高い耐摺動性の獲得のために、低摩擦の下り階段上において数値解析を用いてステルス歩行を含む角運動量拘束制御の適用に取り組む。

1.2 研究目的

本研究では、滑り易い低摩擦の下り階段上において、上体リンクを有するリムレスホイールの耐摺動性の向上を目的とする。低摩擦路面のような不整地を考慮しているため、単脚支持期においては支持脚接地点まわりの全角運動量の時間による3階微分をゼロに拘束する必要がある。このような角運動量拘束制御の実現においては、重心の水平位置を制御することが重要となるが、十分な自由度を有さない歩行モデルにおいては、ステルス歩行との同時実現が困難であることが予想される。そこで、自由度の増加のために上体リンクに加えリアクションホイールを搭載したモデルを新たに考え、ステルス歩行を含む角運動量拘束制御の実現に取り組む。また、本研究により、水平面のみならず高低差を含む低摩擦路面においても高い耐摺動性を獲得することにより、歩行ロボットの実環境への利用範囲の拡大に繋げることができると期待される。

1.3 本論文の構成

本論文は、本章を含む全5章から構成される。第2章では、低摩擦の下り階段上への適用の前段階として、滑らない下り階段上におけるステルス歩行について、上体リンクとリムレスホイールから構成される2自由度モデルを用いて紹介する。第3章では、2自由度モデルについて角運動量拘束制御を適用することで低摩擦路面への拡張を行い、数学モデルの導出と当該モデルにおける運動の解析を行う。第4章では、第3章における問題の解決のためリアクションホイールを付加した3自由度モデルを用いて、数学モデルの導出と当該モデルにおける運動の解析を行う。第5章では、本論文の内容を統括するとともに、本研究により明らかにされた課題について示す。

第2章 下り階段上での2自由度モデルによるステルス歩容生成

ここでは低摩擦の下り階段上での歩容生成に取り組む前に、その基礎となるステルス歩行について紹介する。当該モデルは2自由度のモデルであり、摩擦係数の十分大きな滑らない下り階段上でのステルス歩行を行う。まずは本章で用いるロボットの概要を紹介し、数学モデルの導出及び制御系の設計手法について述べる。次に、線形化モデルを用いて目標軌道を達成するための初期状態を近似的に導出する。その後、導出した初期状態に基づいて非線形モデルによるシミュレーションを行い、下り階段上の非線形要素の影響とその対策手法について議論する。

2.1 数学モデルの導出

図2.1に本章で扱う劣駆動移動ロボットのモデルを示す。当該ロボットはリムレスホイールと、リムレスホイールに接続された上体リンクから構成される2自由度の劣駆動移動ロボットである。リムレスホイールは長さ l_1 [m] の8本の脚が、一定の股角度 α [rad] ごとに放射状に伸びている質量 m_1 [kg] のホイールで、歩行研究においてよく用いられる簡潔なモデルの一つである。このリムレスホイールの中心から伸びる長さ l_2 [m]、質量 m_2 [kg] の上体リンクには、リムレスホイールとの接続部にトルク u [N·m] を印加することが可能であり、当該ロボットはこのトルクの入力によって駆動する。なお、リムレスホイールと上体リンクの傾きはどちらも垂直方向からの絶対角度であり、それぞれ θ_1 [rad] と θ_2 [rad] で表される。また、下り階段の傾斜角度は ϕ [rad] とし、支持脚接地点に摺動は生じないものとする。

2.1.1 運動方程式

はじめに、ロボットの一般化座標ベクトルを $\boldsymbol{\theta} = \begin{bmatrix} \theta_1 & \theta_2 \end{bmatrix}^T$ とおくと、運動方程式は次のように示される。

$$M\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{h} = S\mathbf{u} \quad (2.1)$$

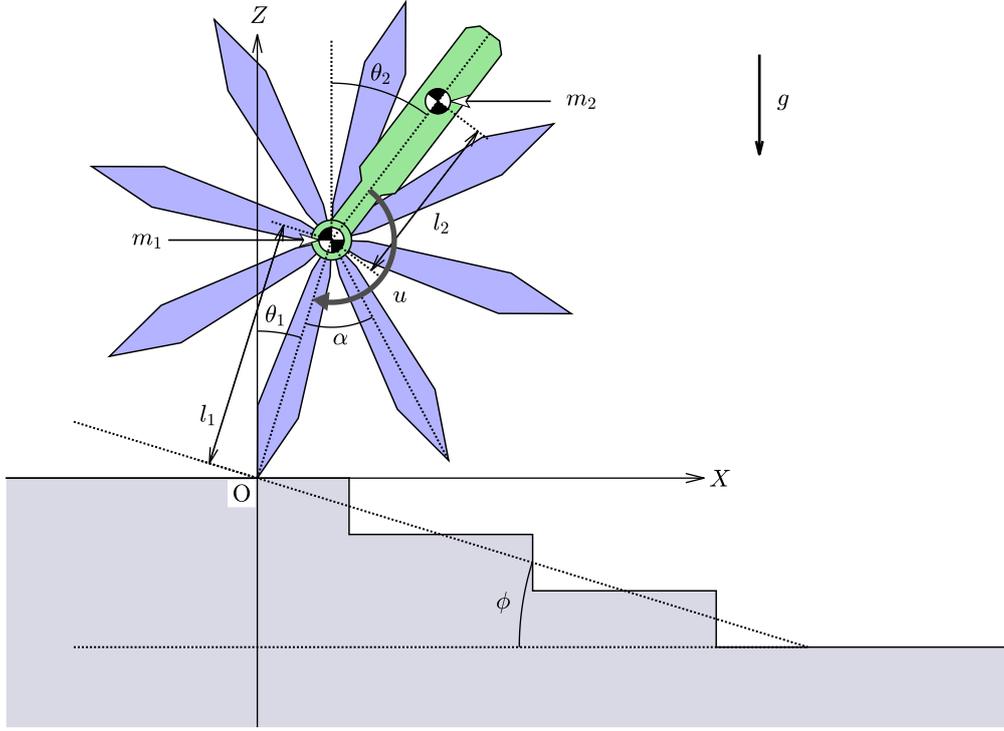


図 2.1: 滑りのない下り階段上の 2 自由度モデル

ここで、左辺第 1 項は慣性力項、第 2 項は中心力・コリオリ力および重力項であり、右辺は制御入力項である。また、慣性行列 $\mathbf{M} \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ 、中心力・コリオリ力および重力項ベクトル $\mathbf{h} \in \mathbb{R}^2$ および駆動ベクトル $\mathbf{S} \in \mathbb{R}^2$ の詳細については以下に示す通りである。

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} l_1^2 (m_1 + m_2) & l_1 l_2 m_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) \\ l_1 l_2 m_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) & l_2^2 m_2 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$\mathbf{h} = \begin{bmatrix} -gl_1 (m_1 + m_2) \sin \theta_1 + \dot{\theta}_2^2 l_1 l_2 m_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) \\ -l_2 m_2 (\dot{\theta}_1^2 l_1 \sin(\theta_1 - \theta_2) + g \sin \theta_2) \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

2.1.2 制御系設計

当該モデルにおいて、遊脚先端位置はリムレスホイールの本体角度 θ_1 によって幾何学的に求まるため、次の境界条件を満たす目標時間軌道に θ_1 を厳密に追従させることにより、ステルス歩行を達成することができる。

$$\begin{aligned}
\theta_1(0) &= -\frac{\alpha}{2} + \phi, & \theta_1(T) &= \frac{\alpha}{2} + \phi \\
\dot{\theta}_1(0) &= 0, & \dot{\theta}_1(T) &= 0 \\
\ddot{\theta}_1(0) &= 0, & \ddot{\theta}_1(T) &= 0
\end{aligned}$$

ここで、 T [s] はステルス歩行を完了するまでの時間であり、上記の6つの条件は初期状態と終端状態において、遊脚先端が加速度や速度を生じずに衝突なく着地することを意味する。この境界条件を満たす θ_1 の目標時間軌道 $\theta_{1d}(t)$ は、最低でも5次以上の時間関数として求められ、

$$\theta_{1d}(t) = \left(\frac{6t^5}{T^5} - \frac{15t^4}{T^4} + \frac{10t^3}{T^3} \right) \alpha - \frac{\alpha}{2} + \phi \quad (2.5)$$

と定まる。

いま、 $\mathbf{C} := \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$ とし、制御出力 y を

$$y := \mathbf{C}\boldsymbol{\theta} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \boldsymbol{\theta} = \theta_1 \quad (2.6)$$

とすると、その時間による2階微分は

$$\ddot{y} = \mathbf{C}\ddot{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{C}\mathbf{M}^{-1}(\mathbf{S}u - \mathbf{h}) = \mathbf{A}u - B \quad (2.7)$$

と求まる。ここで、

$$\mathbf{A} := \mathbf{C}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{S}, \quad B := \mathbf{C}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{h}$$

と定義すると、 $\ddot{\theta}_1 = \ddot{\theta}_{1d}$ を実現する制御入力 u は次のように定めることができる。

$$u = \mathbf{A}^{-1} \left(\ddot{\theta}_{1d}(t) + B \right) \quad (2.8)$$

2.2 線形化による初期状態の導出

次に、歩行運動の初期状態の導出について説明する。リミットサイクル型歩行のような本質的に安定な歩行とは異なり、ステルス歩行では遊脚先端位置の緻密なコントロールが要求される。そのため、制御対象となっていない上体リンクなどのゼロダイナミクスとなる部分の運動が代償となり、しばしば運動が発散する様子が見られる。従って、ステルス歩行において初期状態の導出は重要な手順の一つであり、ここでは近似線形化を用いた初期状態の導出について述べる。

はじめに、式(2.1)について $\boldsymbol{\theta} = \mathbf{0}_{2 \times 1}$ 、 $\dot{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{0}_{2 \times 1}$ のまわりで近似線形化を行うことで、

$$\mathbf{M}_0 \ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{G}_0 \boldsymbol{\theta} = \mathbf{S}u \quad (2.9)$$

が得られる。ここで、

$$\mathbf{M}_0 = \begin{bmatrix} l_1^2(m_1 + m_2) & l_1 l_2 m_2 \\ l_1 l_2 m_2 & l_2^2 m_2 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$\mathbf{G}_0 = \begin{bmatrix} -gl_1(m_1 + m_2) & 0 \\ 0 & -l_2 m_2 g \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

であり、非線形モデルと同様に支持脚の角度 θ_1 を制御出力に選べば、その時間による2階微分は次のように求まる。

$$\ddot{\theta}_1 = \mathbf{C}\ddot{\theta} = \mathbf{C}\mathbf{M}_0^{-1}(\mathbf{S}u - \mathbf{G}_0\theta) \quad (2.12)$$

これを u について整理することで、 $\ddot{\theta}_1 = \ddot{\theta}_{1d}(t)$ を達成する制御入力

$$u = \frac{\ddot{\theta}_{1d}(t) + \mathbf{C}\mathbf{M}_0^{-1}\mathbf{G}_0\theta}{\mathbf{C}\mathbf{M}_0^{-1}\mathbf{S}} \quad (2.13)$$

と定まる。式(2.13)を式(2.9)に代入して整理すると、次の状態空間表現

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\ddot{\theta}_{1d}(t) \quad (2.14)$$

を得る。ただし、

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \theta^\top & \dot{\theta}^\top \end{bmatrix}^\top \quad (2.15)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{I}_2 \\ -\mathbf{M}_0^{-1} \left(\mathbf{I}_2 - \frac{\mathbf{S}\mathbf{C}\mathbf{M}_0^{-1}}{\mathbf{C}\mathbf{M}_0^{-1}\mathbf{S}} \right) \mathbf{G}_0 & \mathbf{0}_{2 \times 2} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{2 \times 1} \\ \frac{\mathbf{M}_0^{-1}\mathbf{S}}{\mathbf{C}\mathbf{M}_0^{-1}\mathbf{S}} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

である。このとき、目標とする境界条件は、次のように表される。

$$\mathbf{x}(T) = e^{\mathbf{A}T}\mathbf{x}(0) + \int_0^T e^{\mathbf{A}(T-\tau)}\mathbf{B}\ddot{\theta}_{1d}(\tau)d\tau = \mathbf{x}(0) + \begin{bmatrix} \alpha \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

式(2.18)を解くことで、以下に示す通り初期状態を求めることができる。

$$\theta_1(0) = \phi - \frac{\alpha}{2} \quad (2.19)$$

$$\theta_2(0) = -\frac{l_1 m \phi}{l_2 m_2} \quad (2.20)$$

$$\dot{\theta}_2(0) = \frac{\alpha l_1 e^{\omega T} \cosh^2\left(\frac{\omega T}{2}\right) F_1}{\omega m_2 g^2 T^5} (\coth(\omega T) - 1) \quad (2.21)$$

ここで,

$$\omega := \sqrt{\frac{g}{l_1 + l_2}} \quad (2.22)$$

$$F_1 := 720m_1gT + \frac{mg^3T^5}{l_2(l_1 + l_2)} - 120m_1(12(l_1 + l_2) + gT^2) \tanh\left(\frac{\omega T}{2}\right) \quad (2.23)$$

$$m := m_1 + m_2 \quad (2.24)$$

である.

2.3 数値シミュレーション

ここでは, 線形化により求めた初期状態に基づき, 線形化モデルと非線形モデルの両者を用いたシミュレーションについて結果を示すとともに, 路面の傾斜のような非線形要素がステルス歩行にどのような影響を及ぼすかに注目して議論する.

本数値シミュレーションにて使用した物理パラメータの詳細を表(2.1)に示す.

2.3.1 シミュレーション結果

滑りのない下り階段上におけるステルス歩行について, 数値シミュレーションの結果を示す. 図(2.2)は線形化モデルにおいて, (2.3)は非線形モデルにおいてどちらも同じパラメータ及び初期状態を用いてステルス歩行を行った際の, 上体リンク及びリムレスホイールの運動を位相平面上にプロットしたものである. これらの結果から, ゼロダイナミクスとなる上体リンクの終端角度および角速度が, 非線形モデルでは初期状態と一致していないことが明らかである. これは, 下り階段により運動の前後対称性が失われるためと考えられる. 特に, 遊脚の着地直前においては支持脚角度が大きく傾斜するため, 遊脚の離陸直後と比較してリムレスホイールに対して重力により大きなモーメントが生じる. 上体リンクはステルス歩容の生成のためにリムレスホイールに働くモーメントを打ち消すように運動を行うため, 非線形モデルではモーメントの非対称性により初期状態と終端状

表 2.1: 2自由度劣駆動モデルの物理パラメータ

m_1	1.0	[kg]	α	$\pi/4$	[rad]
m_2	1.0	[kg]	ϕ	0.1	[rad]
l_1	1.0	[m]	T	0.8	[s]
l_2	0.7	[m]			

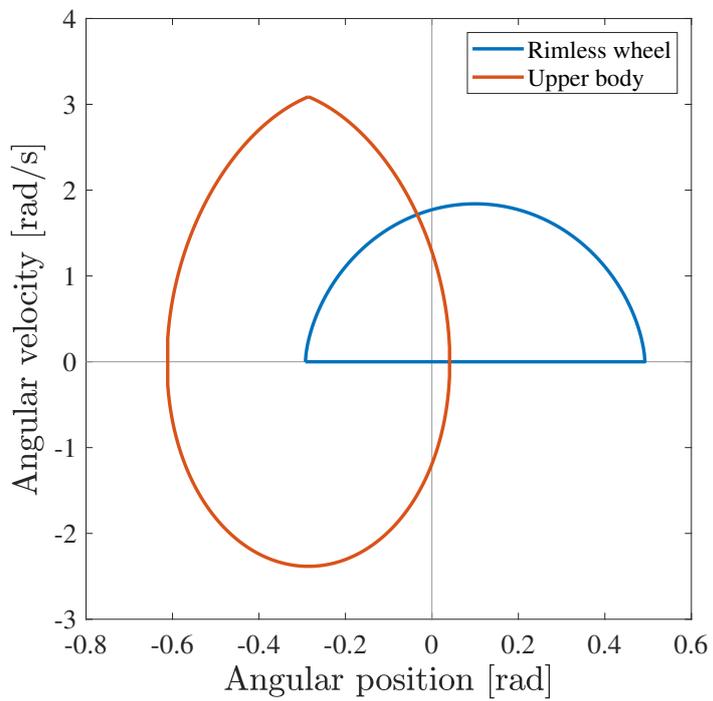


図 2.2: 線形 2 自由度モデルにおける滑りのない下り階段上での各リンクの挙動

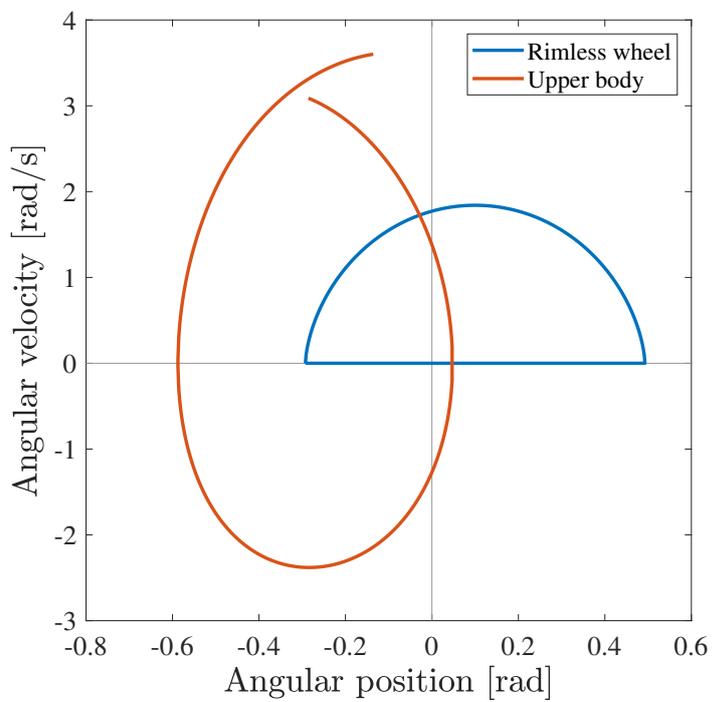


図 2.3: 非線形 2 自由度モデルにおける滑りのない下り階段上での各リンクの挙動

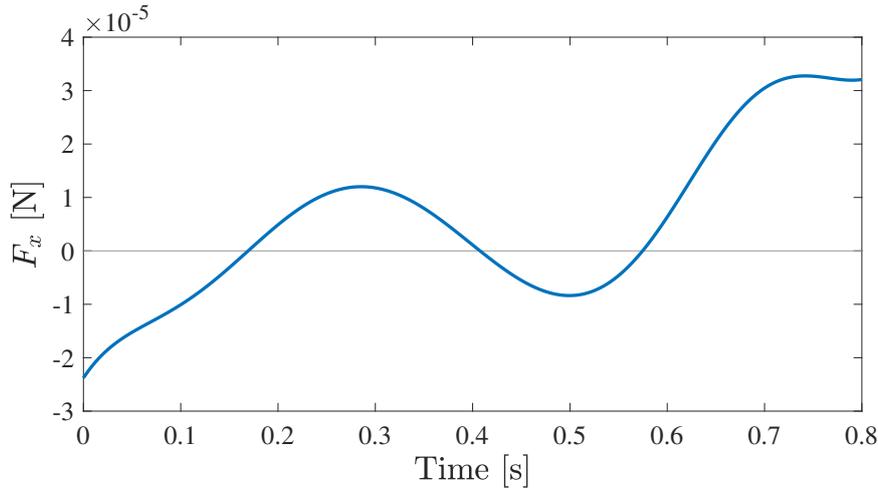


図 2.4: 角運動量拘束制御を行わない場合の水平床反力

態に差異が生じるものと考えられる。傾斜角度が大きくなるにつれ運動の前後非対称性はより強くなることが予想されるため、近似線形化により求めた初期状態は参考になるとは言い難い。したがって、より傾斜角度の大きな路面においては、2.3.2 節に示すように非線形性による影響を低減するような制御を行う必要がある。

また、図 (2.4) は支持脚接地点に生じる水平方向への床反力について、その時間遷移を示したものである。僅かではあるが、無視できない大きさの床反力が水平方向に対して生じている様子が見られる。このため、従来の歩容生成法では床面に十分な摩擦が存在しない場合、支持脚接地点に摺動が生じてしまうことが分かる。

2.3.2 両脚支持期の ZMP 解析

非線形性による影響の低減において最も簡単な手法として、両脚支持期中に上体リンクの初期状態とのギャップを埋める方法が考えられる。具体的には、位相平面上において、上体リンクの終端状態から初期状態までを直線補間で結ぶ方法が考えられる。しかし、この方法を利用する上で注意しなければならない点として、ゼロモーメントポイント (ZMP) の存在がある。両脚支持期を維持するためには ZMP が常に前後脚から構成される支持多角形内に存在しなければならないため、ZMP の位置に注意する必要がある。

本章で用いているモデルにおいては、両脚支持期中はリムレスホイールが静止しているため、上体リンクについてのみ考えれば良い。いま、上体リンクがリムレスホイールから受ける反力を F'_x および F'_z とすれば、ZMP を中心にリムレスホ

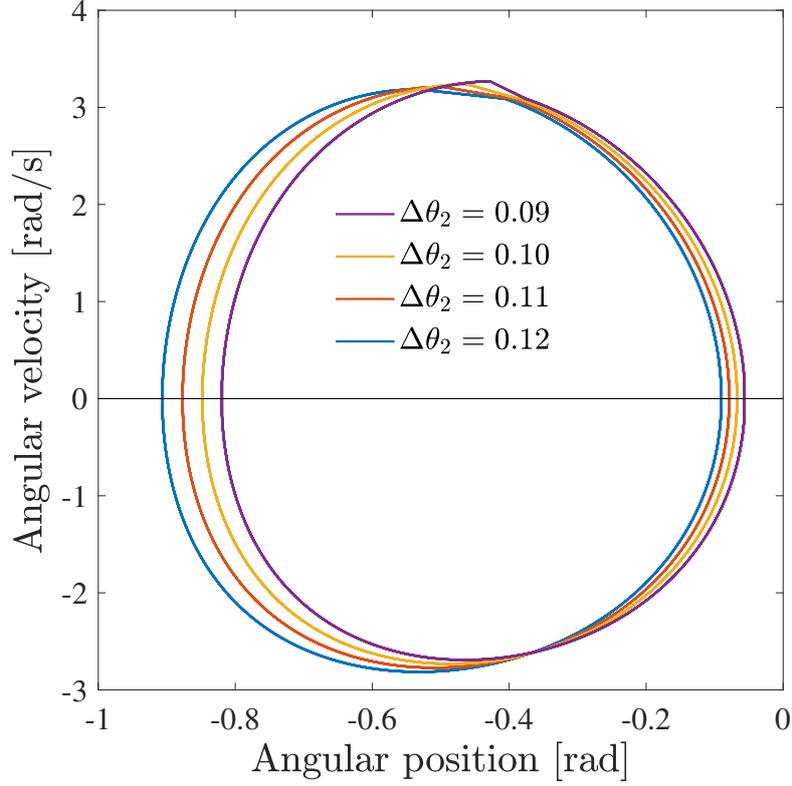


図 2.5: 上体リンクの初期角度による運動の変化

イールに作用する回転モーメントの合計は

$$\begin{bmatrix} 0 \\ u \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 \sin\left(\phi + \frac{\alpha}{2}\right) - X_{ZMP} \\ 0 \\ l_1 \cos\left(\phi + \frac{\alpha}{2}\right) - Z_{ZMP} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} -F'_x \\ 0 \\ -F'_z - m_1 g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

となる．ここで， $Z_{ZMP} = -X_{ZMP} \tan \phi$ であることを考慮すれば， X_{ZMP} は次のように求めることができる．

$$X_{ZMP} = \frac{u - l_1 F'_x \cos\left(\frac{\alpha}{2} + \phi\right) + l_1 (F'_z + m_1 g) \sin\left(\frac{\alpha}{2} + \phi\right)}{F'_x \tan \phi + F'_z + m_1 g} \quad (2.26)$$

ここで， F'_x および F'_z は上体リンクがリムレスホイールから受ける反力である．

いま，上体リンクの位相平面上での軌道は，角度方向に重なって閉じた状態になっている．しかし，上体リンクをギャップを直線補間によって埋める場合，位相平面上での軌道は角度方向に開いている必要がある．ここで，上体リンクの初期角度を僅かに後方へ傾けることにより，初期角度と終端角度の間が十分に開く傾向が見られたため，上体リンクの初期角度からの追加の傾斜角度を調整パラメータ $\Delta\theta_2$ として，両脚支持期に直線補間を行った際の ZMP の挙動について調査した．

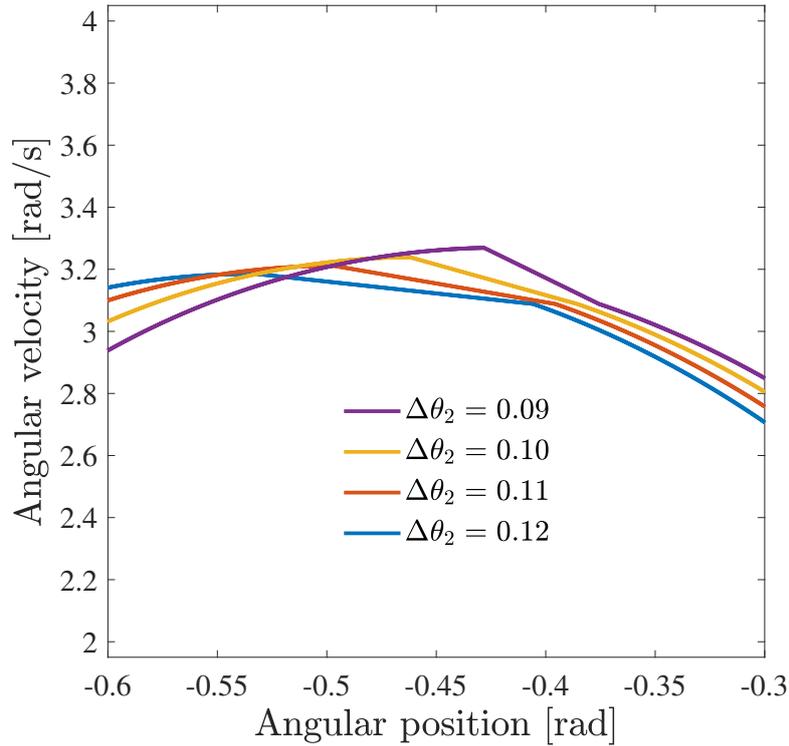


図 2.6: 上体リンクの初期角度による運動の変化（拡大図）

図 (2.5) は、 $\Delta\theta_2$ を 0.09~0.12 [rad] まで変化させたときの 上体リンクの位相平面上での軌道をプロットしたものであり、図 (2.6) は両脚支持期に注目した拡大図である。図より、調整パラメータ $\Delta\theta_2$ が大きくなるほど角度のギャップが大きくなるが、一方で角速度のギャップが低減されることで位相平面上で水平に近付いていく様子が見られる。

また、図 (2.7) はそれぞれの ZMP の挙動をプロットしたものである。灰色の領域は支持多角形の内側であることを意味し、ZMP がこの領域外へ逸脱した場合には、両脚支持期は直ちに終了し単脚支持期へと移行する。結果は、 $\Delta\theta_2$ が小さすぎる場合に、ZMP が支持多角形外へと逸脱していることを示している。また、 $\Delta\theta_2$ が十分に大きい場合には、ZMP は支持多角形内に収まっているが、両脚支持期による時間のロスが見られた。位相平面上での角速度のギャップが小さい場合、直線補間の開始端と終了端で生じる角加速度も十分に小さくなるため、ZMP への影響が小さいと考えられる。ここでは傾向を示すだけに留めるが、両脚支持期の終了時に ZMP が前脚へと到達する $\Delta\theta_2$ を見つけることが、両脚支持期に最も高速に上体リンクのギャップを修正する方法であると予想される。

急傾斜の路面における非線形性による影響を低減する手法として、両脚支持期中にギャップを修正する手法について述べた。しかし、両脚支持期の維持のために ZMP に注意する必要があることや、時間的なロスが生まれることなどの不利益も多い。さらに、直線補間による手法は後述する角運動量拘束制御と異なり摺動を

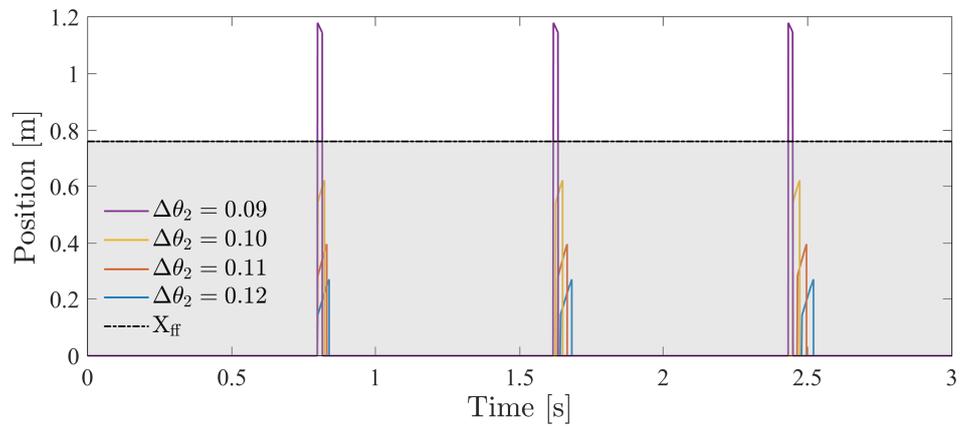


図 2.7: 上体リンクの初期角度による ZMP の挙動の変化

意識した制御ではないため、角運動量拘束制御を適用しつつギャップを修正するためには、両脚支持期のダイナミクスがより複雑になるという問題についても考慮が必要である。

第3章 低摩擦下り階段上での2自由度モデルによる厳密ステルス歩容生成

前章では、リムレスホイール及び上体リンクにより構成される2自由度の劣駆動移動ロボットにより、ステルス歩行の生成を達成した。しかし、前章のモデルにおいては支持脚接地点において摺動が生じないことを前提としており、ステルス歩行の利点である路面環境への適応性については能力を十分に発揮できていないものとする。

本章では、支持脚接地点において摺動が生じないという条件を排する代わりに、支持脚接地点において水平方向への床反力を生じてはならないという条件を付加することにより、低摩擦路面への適応を試みる。新たに付加した条件は、当該モデルに対して適用する角運動量拘束制御において本質とも言える重要な要素である。角運動量拘束制御と同時にステルス歩行を達成することにより、単脚支持期および遊脚の衝突による支持脚接地点の摺動を回避することができる。

実際には、本章の2自由度モデルにおいて、両者の同時達成はされていない。したがって、本章では目的が達成できなかった理由や、次章で劣駆動移動ロボットを3自由度モデルへ拡張した根拠について主に述べることにする。

3.1 数学モデルの導出

図(3.1)に、本章で扱う劣駆動移動ロボットのモデルを示す。劣駆動移動ロボットとしての仕様については、前章で扱った2自由度モデルと同一であるため省略する。ただし、路面上を歩行する際に、支持脚接地点に水平方向への床反力を生じてはいけないという条件を付加する。これは図中ではカートを動かさずにその上を歩行することを意味し、凍結路面などにおいては支持脚接地点に摺動が生じないように制御することを意味する。条件を満たすためには角運動量拘束制御を利用するが、その詳細については本章の3.1.2項の制御系設計を参照されたい。

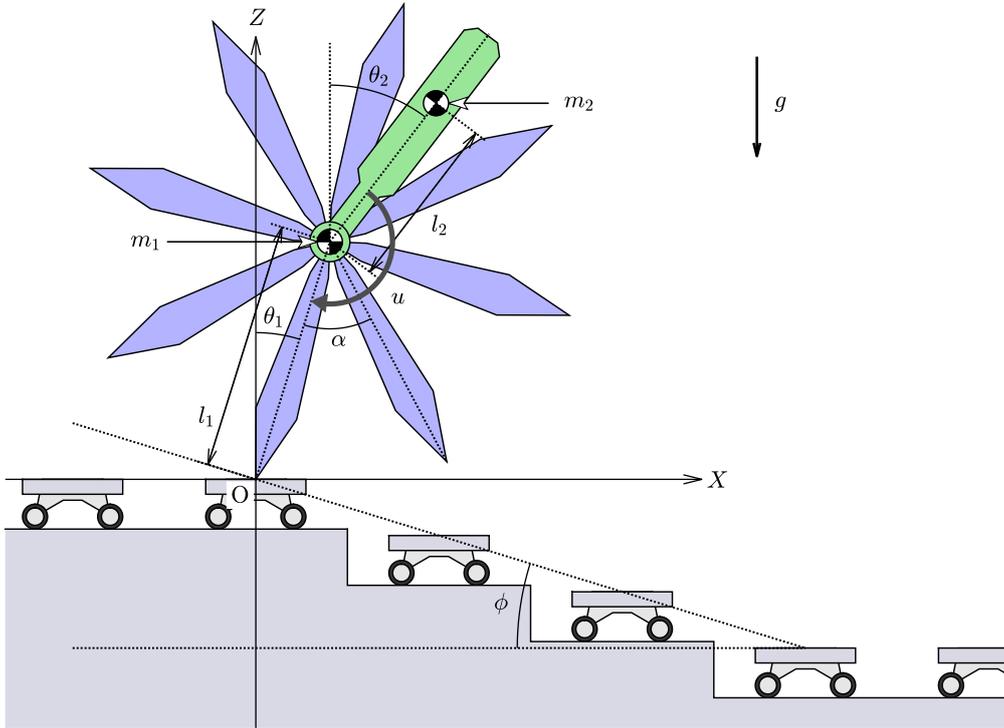


図 3.1: 低摩擦下り階段上の 2 自由度モデル

3.1.1 運動方程式

本章の運動方程式は 2.1.1 項に示したものと同一であるため、そちらを参照されたい。

3.1.2 制御系設計

本モデルにおいて、支持脚接地点での摺動を回避するために、角運動量拘束制御を適用する。角運動量拘束制御は、支持脚接地点まわりの全角運動量の 3 階微分である $\dot{\mathbf{l}}$ をゼロに拘束する制御である。

いま、角運動量拘束制御の達成により支持脚接地点での摺動が回避できることを前提とすると、一般化座標ベクトルは $\boldsymbol{\theta} = [\theta_1 \ \theta_2]^T$ とすることができる。ここで、ロボットの運動方程式は

$$\mathbf{M}\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{h} = \mathbf{S}u \quad (3.1)$$

となる。これを射影ベクトル $\mathbf{p}^T = [1 \ 1]$ によって角運動量と重心位置の関係式へと変換する。いま、各リンクの質量 m_i の位置ベクトルを $\mathbf{r}_i \in \mathbb{R}^2$ 、その時間微分を $\dot{\mathbf{r}}_i = \mathbf{J}_i\dot{\boldsymbol{\theta}}$ とすれば、射影ベクトル $\mathbf{p} \in \mathbb{R}^2$ は

$$\mathbf{J}_i\mathbf{p} = -\wedge \mathbf{r}_i = (\mathbf{r}_i\wedge)^T \quad (3.2)$$

を満たすものとして、 $\mathbf{p}^T = \begin{bmatrix} 1 & 1 \end{bmatrix}$ を選ぶことができる。ここで、支持脚接地点まわりの全角運動量 L [N・m・s] は次のように示される。

$$\begin{aligned} L &= \sum_{i=1}^n \mathbf{r}_i \wedge (m_i \dot{\mathbf{r}}_i) = \sum_{i=1}^n \mathbf{p}^T \mathbf{J}_i^T m_i \mathbf{J}_i \dot{\boldsymbol{\theta}} \\ &= \mathbf{p}^T \left(\sum_{i=1}^n m_i \mathbf{J}_i^T \mathbf{J}_i \right) \dot{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{p}^T \mathbf{M} \dot{\boldsymbol{\theta}} \end{aligned} \quad (3.3)$$

したがって、 L の 1 階微分 \dot{L} は

$$\dot{L} = mgX_{\text{com}} \quad (3.4)$$

となる。ここで、 m [kg] はロボットの全質量、 X_{com} [m] は全質量の X 座標である。また、支持脚接地点に生じる水平方向への床反力を F_x [N] とすると、

$$m\ddot{X}_{\text{com}} = F_x \quad (3.5)$$

の形で表されることから、 \ddot{L} は

$$\ddot{L} = mg\ddot{X}_{\text{com}} = F_x g \equiv 0 \quad (3.6)$$

となる。これは、支持脚接地点まわりの全角運動量の 3 階微分をゼロに拘束することが、支持脚接地点の水平方向の床反力をゼロにすることと等価であることを意味する。また、それは言い換えれば全重心位置を水平方向に等速で運動させることとも等価である。本モデルにおいて、全重心位置の詳細は

$$X_{\text{com}} = l_1 \sin \theta_1 + \frac{m_2 l_2 \sin \theta_2}{m} \quad (3.7)$$

であり、その時間による 1 階微分は

$$m\dot{X}_{\text{com}} = \begin{bmatrix} ml_1 \cos \theta_1 & m_2 l_2 \cos \theta_2 \end{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\theta}} =: \mathbf{J}_{\text{com}} \dot{\boldsymbol{\theta}} \quad (3.8)$$

となる。 $m\dot{X}_{\text{com}}$ の時間による 1 階微分である $m\ddot{X}_{\text{com}}$ は

$$m\ddot{X}_{\text{com}} = \mathbf{J}_{\text{com}} \ddot{\boldsymbol{\theta}} + \dot{\mathbf{J}}_{\text{com}} \dot{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{J}_{\text{com}} \mathbf{M}^{-1} (\mathbf{S}u - \mathbf{h}) + \dot{\mathbf{J}}_{\text{com}} \dot{\boldsymbol{\theta}} = 0 \quad (3.9)$$

であるので、これを解くことにより、

$$u = \frac{\mathbf{J}_{\text{com}} \mathbf{M}^{-1} \mathbf{h} - \dot{\mathbf{J}}_{\text{com}} \dot{\boldsymbol{\theta}}}{\mathbf{J}_{\text{com}} \mathbf{M}^{-1} \mathbf{S}} \quad (3.10)$$

と求まる。

3.2 線形化による初期状態の導出

次に，線形化により初期状態を近似解析解として導出する．いま，運動方程式を $\boldsymbol{\theta} = \mathbf{0}_{2 \times 1}$ ， $\dot{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{0}_{2 \times 1}$ のまわりで近似線形化を行うことで，

$$\mathbf{M}_0 \ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{G}_0 \boldsymbol{\theta} = \mathbf{S}u \quad (3.11)$$

を得る．ここで，支持脚まわりの全角運動量について，以下のように定義する．

$$L_0 := \mathbf{p}^T \mathbf{M}_0 \dot{\boldsymbol{\theta}} \quad (3.12)$$

いま， $\mathbf{p}^T \mathbf{S} = 0$ であることを考慮すれば， L_0 の1階微分は

$$\dot{L}_0 = \mathbf{p}^T \mathbf{M}_0 \ddot{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{p}^T (\mathbf{S}u - \mathbf{G}_0 \boldsymbol{\theta}) = -\mathbf{p}^T \mathbf{G}_0 \boldsymbol{\theta} \quad (3.13)$$

と計算できる．したがって， L_0 の3階微分は

$$\ddot{L}_0 = -\mathbf{p}^T \mathbf{G}_0 \dot{\boldsymbol{\theta}} = -\mathbf{p}^T \mathbf{G}_0 \mathbf{M}_0^{-1} (\mathbf{S}u - \mathbf{G}_0 \boldsymbol{\theta}) \quad (3.14)$$

である．ここで， $\ddot{L}_0 = 0$ となる u について解けば

$$u = \frac{\mathbf{p}^T \mathbf{G}_0 \mathbf{M}_0^{-1} \mathbf{G}_0 \boldsymbol{\theta}}{\mathbf{p}^T \mathbf{G}_0 \mathbf{M}_0^{-1} \mathbf{S}} \quad (3.15)$$

と求まる．これを式(3.11)に代入し整理することで，次の状態空間表現を得る．

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{I}_2 \\ \mathbf{M}_0^{-1} \left(\frac{\mathbf{S} \mathbf{p}^T \mathbf{G}_0 \mathbf{M}_0^{-1}}{\mathbf{p}^T \mathbf{G}_0 \mathbf{M}_0^{-1} \mathbf{S}} - \mathbf{I}_2 \right) \mathbf{G}_0 & \mathbf{0}_{2 \times 2} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

このとき，目標とする境界条件は次のように表される．

$$\mathbf{x}(T) = e^{\mathbf{A}T} \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}(0) + \begin{bmatrix} \alpha \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

式(3.17)を解くことで，以下に示す通り初期状態を求めることができる．

$$\theta_2(0) = -\frac{ml_1 \phi}{m_2 l_2} \quad (3.18)$$

$$\dot{\theta}_2(0) = -\frac{\alpha m l_1}{2m_2 l_2} \sqrt{\frac{mg}{3m_1 l_2}} \quad (3.19)$$

3.3 非線形モデルにおける初期状態の探索

[6, 15, 16] で論じられているように，非線形モデルの目標初期状態を見つけるためには，数値解析によって探索を行う必要がある．そこで，線形化によって求めた初期状態に基づき，非線形モデルにおいて角運動量拘束制御とステルス歩行を同時に達成する初期状態の探索を二分探索法を用いて行った．二分探索法はゼロ点を探索するための基本的な手法の一つであり，探索区間を中点で分割し，ゼロ点を挟む区間を次の探索区間とする手法である．一般に探索速度の低い探索手法として知られているが，ゼロ点を挟む2点間を探索区間に設定すれば，必ず解に収束するという利点がある．

まずは両脚支持期を含まない場合について探索を行ったが，単脚支持期の終端状態が目標初期状態と一致するような初期角度 $\theta_2(0)$ について発見することができなかった．また，両脚支持期を含む場合においても，上体リンクは角運動量拘束制御を達成するために

$$m_2 l_2 \ddot{\theta}_2 \cos \theta_2 - m_2 l_2 \dot{\theta}_2^2 \sin \theta_2 = 0 \quad (3.20)$$

を満たす必要があり，こちらも初期角度 $\theta_2(0)$ について探索を行ったが求めることができなかった．

両脚支持期の有無に関わらず，どちらの場合においても上体リンクの角度および角速度のギャップとリムレスホイールの着地時の終端角速度の計3つの内，どれか2つを十分に小さくした場合，残りの一つに大きなギャップが見られた．

図(3.2) から(3.5) は，両脚支持期を含まない場合において，ステルス歩行の達成を重視したときの各部の挙動をプロットしたものである．見た目上では問題なく歩容生成が行われているように見えるが，上体リンクの位相平面図を拡大すると，初期状態と終端状態の間に小さくないギャップが見られる．

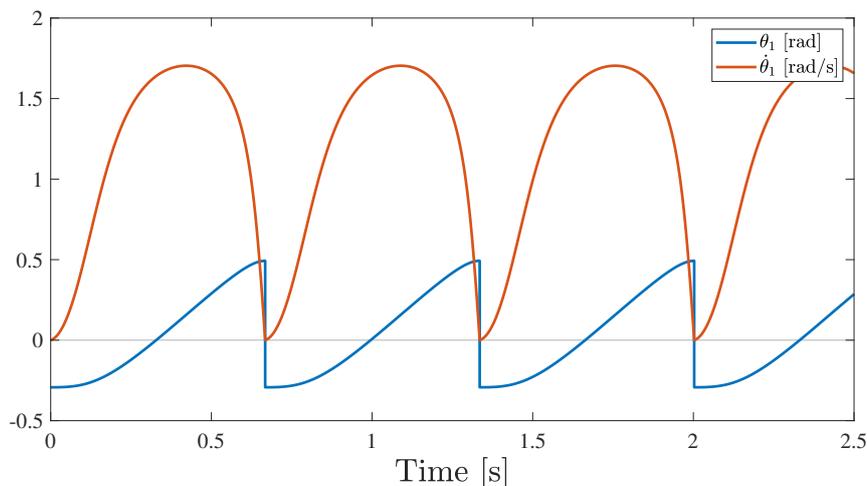


図 3.2: 非線形 2 自由度モデルにおけるリムレスホイールの運動の遷移

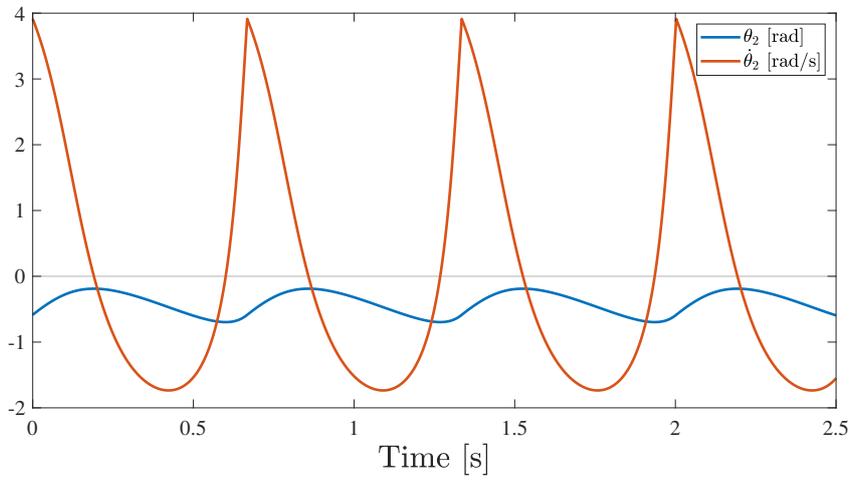


図 3.3: 非線形 2 自由度モデルにおける上体リンクの運動の遷移

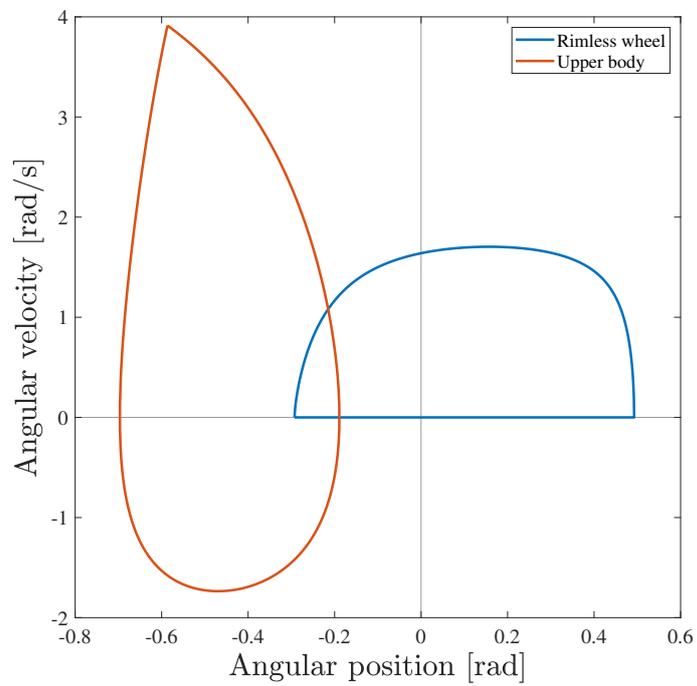


図 3.4: 非線形 2 自由度モデルにおける各リンクの挙動

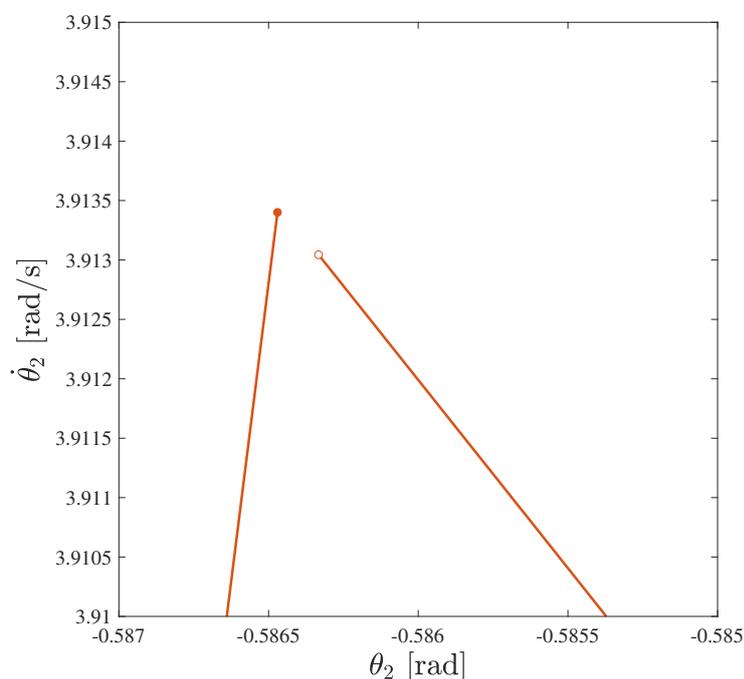


図 3.5: 非線形 2 自由度モデルにおける各リンクの挙動 (拡大図)

上体リンクのみにより角運動量拘束制御を行うモデルにおいては、後述の理由によりステルス歩容生成の達成が非常に困難な問題であると結論付け、より自由度の多いモデルによる達成を試みることにした。

3.4 新規ロボットモデルの提案

前述の問題は、1つの入力のみによって、全重心の水平位置の制御とステルス歩行の達成に加え、上体リンクを初期状態へ戻すという3つの試みを同時に達成しようとしたことが理由の一つとして考えられる。これは、角運動量拘束制御を行っている2自由度モデルにおいて、ステルス歩行は陽に達成されないということである。着地時に衝突を含むような一般の歩行シミュレーションでは、遊脚の先端が地面との境界を越えたかどうかにより着地の判定を行う。しかし、ステルス歩行は着地時に衝突を生じないという特徴から、数値シミュレーション上においても遊脚先端は地面に埋まらず、通常の歩行で使用されているような着地検出を行うことが出来ない。そこで、ステルス歩行では時間軌道に追従させることで歩行を実現しているという点に着目し、遊脚の着地判定は設定した時間の経過により行う。今回のようにステルス歩行が陽に達成されない場合、着地時の状態を正確に取得することができないため、探索の失敗につながったものと考えられる。

この問題は支持脚角度 θ_1 を陽に制御することで解決が可能な問題である。そのため、 θ_1 を陽に制御し、なおかつ重心位置の変化により上体リンクへさらなる負担を与えないために、リアクションホイールを付加することを考えた。歩行ロボットにおいて、リアクションホイールはエネルギーの効率化や姿勢制御等に用いられた実績があり [12–14]、本問題にも効果を発揮することが期待されるものである。次章では、このリアクションホイールを追加した 3 自由度モデルについて述べる。

第4章 低摩擦下り階段上での3自由度モデルによる厳密ステルス歩容生成

前章では，2自由度モデルにおいて物理的かつ構造的な問題点と，探索手法に関する問題点について議論した．また，問題を解決するためにリアクションホイールを付加した3自由度モデルを提案した．

本章では，3自由度モデルへ拡張を行ったことにより角運動量拘束制御と同時にステルス歩行を時間軌道への追従により実現することで，両脚支持期を含まずに角運動量拘束制御とステルス歩行の同時実現を試みた．

4.1 数学モデルの導出

図(4.1)に，本章で扱う劣駆動移動ロボットのモデルを示す．当該ロボットはリムレスホイールと，リムレスホイールに接続された上体リンクとリアクションホイールから構成される3自由度の劣駆動移動ロボットである．リムレスホイールと上体リンクについては前章のモデルと同じであるが，リムレスホイールの中心には新しく慣性モーメント I [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$] のリアクションホイールを接続する．このリアクションホイールにも上体リンクと同様にトルクを印加することが可能であり，上体リンクとリムレスホイール間のトルクを u_1 [$\text{N} \cdot \text{m}$]，リアクションホイールとリムレスホイール間のトルクを u_2 [$\text{N} \cdot \text{m}$] とする．

4.1.1 運動方程式

まず，ロボットの一般化座標ベクトルを $\boldsymbol{\theta} = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T$ とおくと，運動方程式は次のように示される

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

ここで，左辺第1項は慣性力項，第2項は中心力・コリオリ力および重力項であり，右辺は制御入力項である．また，慣性行列 $M \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ ，中心力・コリオリ力および重力項ベクトル $\mathbf{h} \in \mathbb{R}^3$ および駆動ベクトル $S \in \mathbb{R}^3$ の詳細については以下に示す通りである．

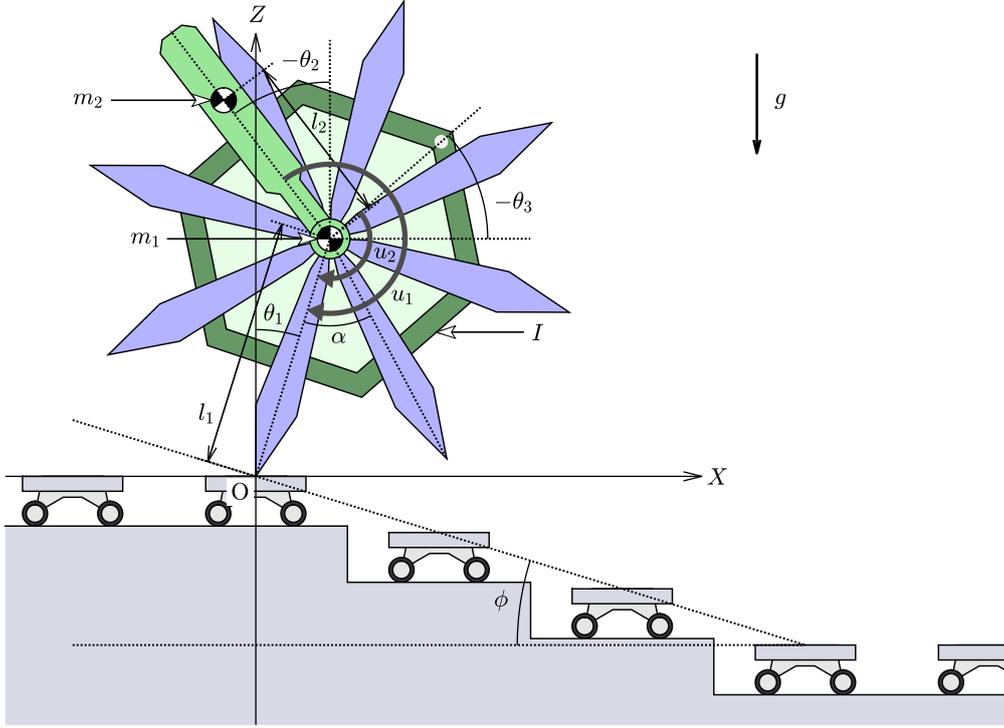


図 4.1: 低摩擦下り階段上の 3 自由度モデル

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} l_1^2 (m_1 + m_2) & l_1 l_2 m_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) & 0 \\ l_1 l_2 m_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) & l_2^2 m_2 & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$$\mathbf{h} = \begin{bmatrix} -gl_1 (m_1 + m_2) \sin \theta_1 + \dot{\theta}_2^2 l_1 l_2 m_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) \\ -l_2 m_2 (\dot{\theta}_1^2 l_1 \sin(\theta_1 - \theta_2) + g \sin \theta_2) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

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

4.1.2 制御系設計

本モデルにおいては，第 2 章で紹介したステルス歩行と第 3 章で紹介した角運動量拘束制御を同時に達成する制御を行う．具体的には，

$$\ddot{\mathbf{y}} = \begin{bmatrix} \ddot{L} \\ \mathbf{C}\ddot{\boldsymbol{\theta}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{\text{com}}\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \dot{\mathbf{J}}_{\text{com}}\dot{\boldsymbol{\theta}} \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \ddot{\boldsymbol{\theta}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \ddot{\boldsymbol{\theta}}_{\text{ld}}(t) \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

を達成することで、両者を満たす制御入力 u を得る。式 (4.5) を整理することで、

$$\begin{bmatrix} \mathbf{J}_{\text{com}} \\ \mathbf{C} \end{bmatrix} \ddot{\boldsymbol{\theta}} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{\text{com}} \\ \mathbf{C} \end{bmatrix} \mathbf{M}^{-1} (\mathbf{S}u - \mathbf{h}) = \begin{bmatrix} -\dot{\mathbf{J}}_{\text{com}} \dot{\boldsymbol{\theta}} \\ \ddot{\boldsymbol{\theta}}_{1d}(t) \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

を得る。したがって、制御入力 u は

$$\mathbf{u} = \boldsymbol{\Phi}^{-1} (\mathbf{v} + \boldsymbol{\Gamma}) \quad (4.7)$$

と求まる。ただし、

$$\boldsymbol{\Phi} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{\text{com}} \mathbf{M}^{-1} \mathbf{S} \\ \mathbf{C} \mathbf{M}^{-1} \mathbf{S} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\Gamma} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{\text{com}} \mathbf{M}^{-1} \mathbf{h} \\ \mathbf{C} \mathbf{M}^{-1} \mathbf{h} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{v} = \begin{bmatrix} -\dot{\mathbf{J}}_{\text{com}} \dot{\boldsymbol{\theta}} \\ \ddot{\boldsymbol{\theta}}_{1d}(t) \end{bmatrix}$$

である。

4.2 線形化による初期状態の導出

いま、運動方程式を $\boldsymbol{\theta} = \mathbf{0}_{3 \times 1}$, $\dot{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{0}_{3 \times 1}$ のまわりで近似線形化を行うことで、

$$\mathbf{M}_0 \ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{G}_0 \boldsymbol{\theta} = \mathbf{S}u \quad (4.8)$$

が得られる。ここで、第 2.2 節および 3.2 節と同様に、ステルス歩行と角運動量拘束制御はそれぞれ

$$\ddot{\theta}_1 = \mathbf{C} \ddot{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{C} \mathbf{M}_0^{-1} (\mathbf{S}u - \mathbf{G}_0 \boldsymbol{\theta}) = \ddot{\theta}_{1d}(t) \quad (4.9)$$

および

$$\ddot{L}_0 = -\mathbf{p}^T \mathbf{G}_0 \mathbf{M}_0^{-1} (\mathbf{S}u - \mathbf{G}_0 \boldsymbol{\theta}) = 0 \quad (4.10)$$

で表される。式 (4.9) と (4.10) により、制御入力は

$$\mathbf{u} = \boldsymbol{\Phi}_0^{-1} (\mathbf{v} + \boldsymbol{\Gamma}_0) = \begin{bmatrix} -m_1 l_1 l_2 \ddot{\theta}_{1d}(t) - (m l_1 \theta_1 + m_2 l_2 \theta_2) g \\ m_1 l_1 l_2 \ddot{\theta}_{1d}(t) + m_2 g l_2 \theta_2 \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

と定まる。ここで

$$\boldsymbol{\Phi}_0 = \begin{bmatrix} \mathbf{C} \mathbf{M}_0^{-1} \mathbf{S} \\ \mathbf{p}^T \mathbf{G}_0 \mathbf{M}_0^{-1} \mathbf{S} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\Gamma}_0 = \begin{bmatrix} \mathbf{C} \mathbf{M}_0^{-1} \mathbf{G}_0 \boldsymbol{\theta} \\ \mathbf{p}^T \mathbf{G}_0 \mathbf{M}_0^{-1} \mathbf{G}_0 \boldsymbol{\theta} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

いま、制御入力 u を運動方程式に代入することで、次の状態空間表現を得る。

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B} \ddot{\boldsymbol{\theta}}_{1d}(t) \quad (4.13)$$

ただし,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{mgl_1}{I} & \frac{m_2gl_2}{I} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ -\frac{ml_1}{I} \\ \frac{m_2l_2}{m_1l_1l_2} \\ \frac{m_2l_2}{I} \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

である. 目標とする境界条件は次の式で示される.

$$\mathbf{x}(T) = e^{\mathbf{A}T} \mathbf{x}(0) + \int_0^T e^{\mathbf{A}(T-\tau)} \mathbf{B} \ddot{\theta}_{1d}(\tau) d\tau = \mathbf{x}(0) + \begin{bmatrix} \alpha \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

式 (2.18) を解くことで, 以下に示す通り初期状態を求めることができる.

$$\theta_2(0) = -\frac{l_1 m \phi}{l_2 m_2} \quad (4.16)$$

$$\dot{\theta}_2(0) = \frac{ml_1 \alpha}{m_2 l_2 T} \quad (4.17)$$

$$\dot{\theta}_2(0) = \frac{(mgT^2 - 12m_1 l_2) l_1 \alpha}{12IT} \quad (4.18)$$

4.3 非線形モデルにおける初期状態の探索

非線形モデルにおいては, 二分探索法を用いて初期状態を探索した. 上体リンクの初期角速度は上体リンクを初期状態へと戻すように探索を行う. また, リアクションホイールの初期角速度は上体リンクのダイナミクスに影響を与えないため, 独立した探索としてリアクションホイールの終端状態が目標初期状態に一致するように探索を行う. 加えて, これらの外側でさらに二分探索を行うことで, リアクションホイールが初期角度へと戻るような上体リンクの初期角度を求める.

つまり, 上体リンクの初期角度を求める二分探索の内側では, 上体リンクの初期角速度とリアクションホイールの初期角速度を求めるそれぞれ独立した2つの二分探索を実行していることになる.

4.4 数値シミュレーション

二分探索法により求めた上体リンクの初期角度と角速度およびリアクションホイールの初期角速度を用いて, 数値シミュレーションを行った. 比較対象とし

て、線形化モデルによるシミュレーションの結果も紹介する。線形化モデルと非線形モデルはどちらも同じ物理パラメータを用いてシミュレーションを行った。ただし、初期状態に関しては、線形化モデルでは近似解析解を、非線形モデルでは探索解を用いた。

そのほか、使用した物理パラメータを表 (4.1) に示す。

表 4.1: 3 自由度劣駆動モデルの物理パラメータ

m_1	2.0	[kg]	α	$\pi/4$	[rad]
m_2	2.5	[kg]	ϕ	0.1	[rad]
l_1	1.0	[m]	T	0.8	[s]
l_2	0.7	[m]			

図 (4.6)~(4.5) は線形化モデルによるシミュレーションの結果である。上体リンクが後方へ傾いていることに加えリムレスホイールが階段の傾斜の分だけ前方へ傾いている点を除けば、前後対称性の高い挙動を示している。一方で、図 (4.11)~(4.10) は非線形モデルにおいて線形化と同じパラメータでシミュレーションを行った結果を示したものである。

図 (4.7) および (4.10) は、それぞれ非線形モデルにおいてのリムレスホイールの挙動と、全重心位置および水平方向床反力の時間遷移を示したものである。これらの図より、ステルス歩容生成と角運動量拘束制御が同時に達成され、単脚支持期および着地直後の摺動を回避できることが分かる。

加えて、図 (4.6) および (4.11) により、線形モデルと非線形モデルの初期状態にはギャップが生じることに加え、その挙動は大きく異なることが分かる。水平面上においては上体リンクの初期角度が線形か非線形かに関わらず $\theta_2(0) = 0$ [rad] となるが、下り階段上では $\theta_2(0)$ についてもギャップが生じるために探索がより困難であることが分かる。また、リアクションホイールが線形か非線形かによって大きく異なる挙動を示している一方で、上体リンクの挙動には大きな差異が見られない。特に、重力の影響を大きく受ける単脚支持期の終盤において、非線形モデルのリアクションホイールは挙動が活発化するが、上体リンクの挙動は終始穏やかであることが見て取れる。このことから、リアクションホイールが下り階段による傾斜の影響を打ち消すように支持脚角度を制御することで、上体リンクの前後運動を抑制しているものと推察できる。

4.5 上体リンクの質量による影響

上体リンクは本研究のモデルにおいて角運動量拘束制御を達成するために必要不可欠な要素であり、その前後運動によって全重心位置の水平方向位置を制御している。ここで考慮しなければならない点として、上体リンクの特異姿勢につい

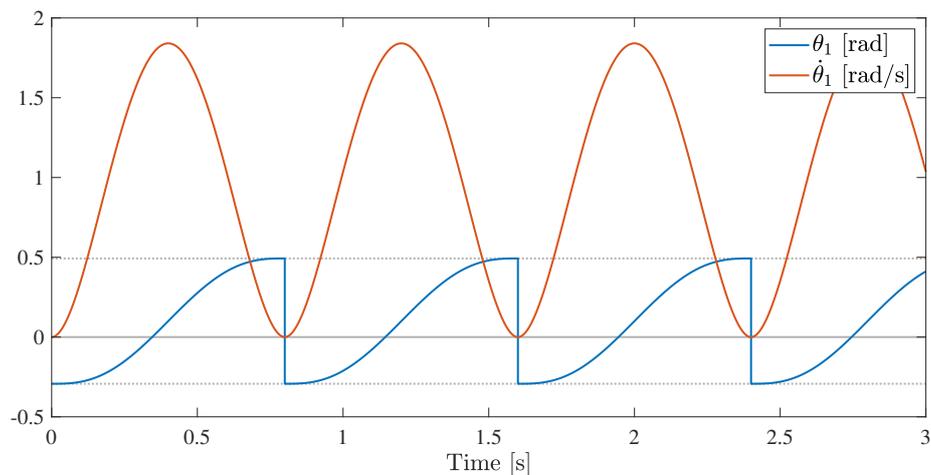


図 4.2: 線形 3 自由度モデルにおけるリムレスホイールの運動の遷移

ての問題がある．上体リンクの角度が $\theta_2 = \pm\pi/2$ [rad] に到達した場合，上体リンクは水平方向の重心位置を変化させることができなくなり，上体リンクの運動は発散する．下り階段上では線形モデルと非線形モデルで上体リンクの初期角度が異なることから，非常に注意が必要な部分であると言える．ここでは，上体リンクの質量を 1.0 [kg] に軽量化した場合についてシミュレーションを行うことで，上体リンクの質量による影響について議論する．

下り階段の傾斜角度が $\phi = 1.0$ [rad] の場合には，運動が発散してしまい歩容生成を確認することができなかった．そこで，傾斜角度を $\phi = 0$ [rad] から 0.01 [rad] 刻みで増加させ，その挙動を観察した．

図 (4.12) は，軽量な上体リンクを使用したモデルにおいて， $\phi = 0.04$ [rad] の場合の各リンクの運動を位相平面上で示したものである．傾斜角度を $\phi = 0.05$ [rad] に増加させた場合には歩容生成が達成できず，軽量な上体リンクでは緩やかな下り階段でのみ歩容生成が可能であることを確認した．上体リンクの質量はリムレスホイールのもものと比較して小さいため，上体リンクは全重心位置の制御のために前後へ大きく運動していることが分かる．このことから，特異姿勢による運動の発散を回避し，より傾斜角度の大きい下り階段上を歩行するためには，上体リンクの質量や慣性モーメントを大きく設定する必要があることが分かる..

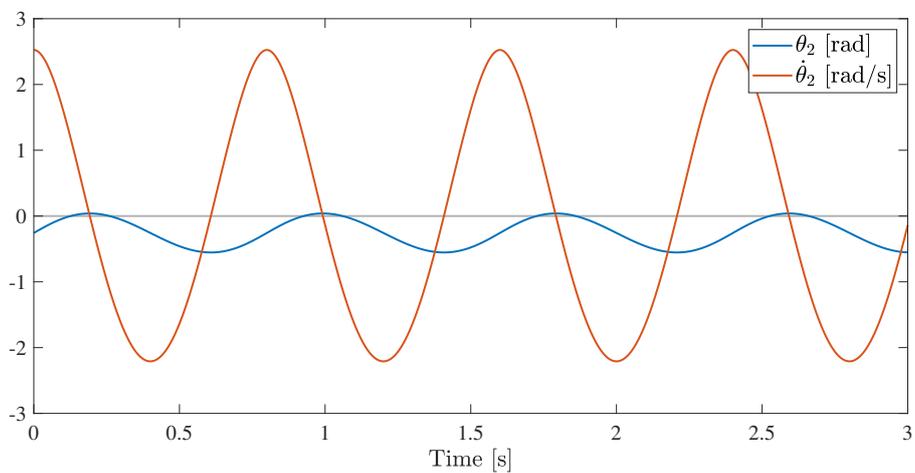


図 4.3: 線形 3 自由度モデルにおける上体リンクの運動の遷移

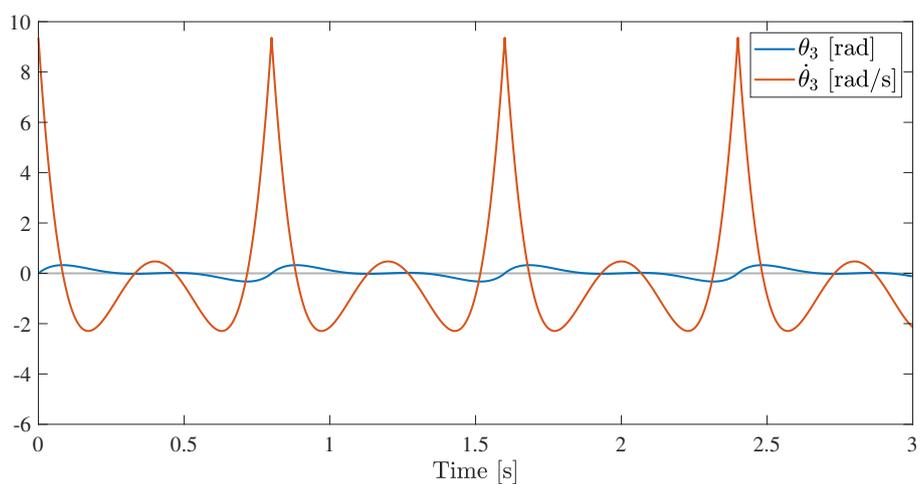


図 4.4: 線形 3 自由度モデルにおけるリアクションホイールの運動の遷移

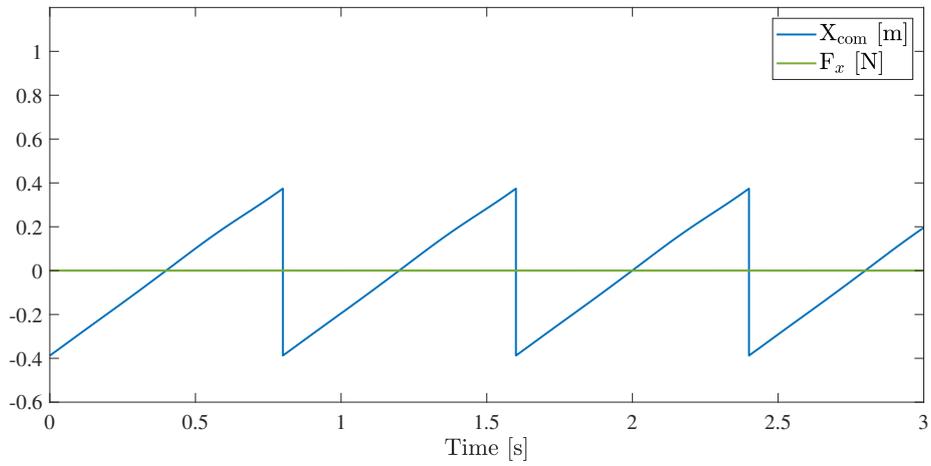


図 4.5: 線形 3 自由度モデルにおける全重心位置と水平方向床反力の遷移

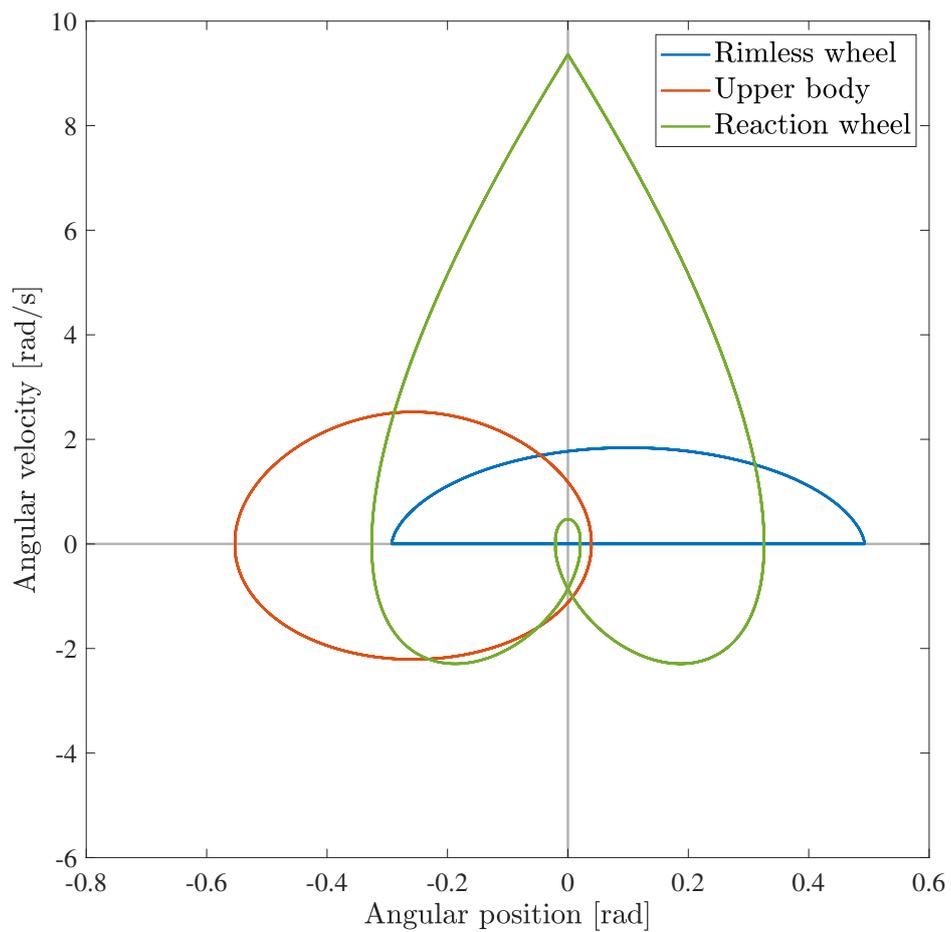


図 4.6: 線形 3 自由度モデルにおける各リンクの運動

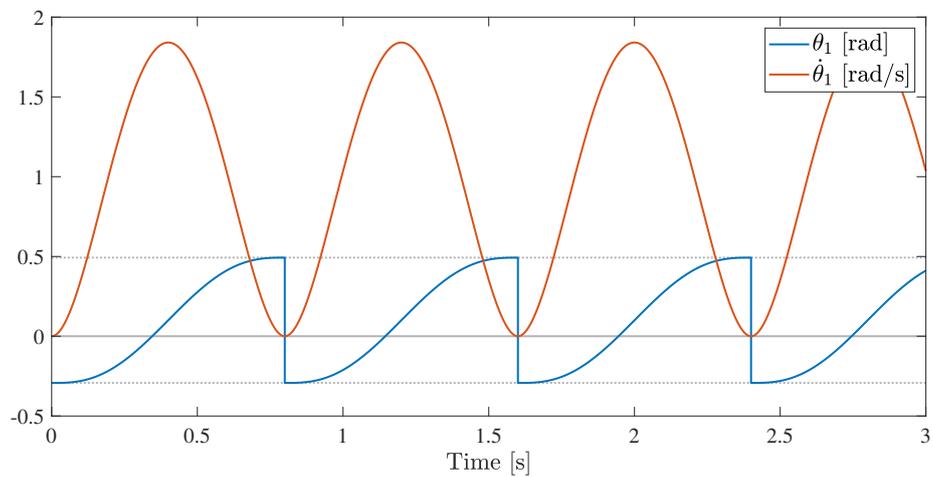


図 4.7: 非線形 3 自由度モデルにおけるリムレスホイールの運動の遷移

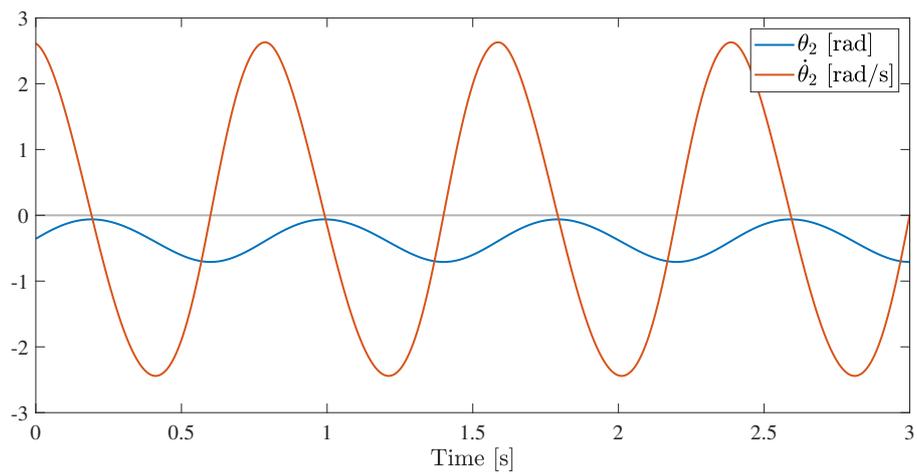


図 4.8: 非線形 3 自由度モデルにおける上体リンクの運動の遷移

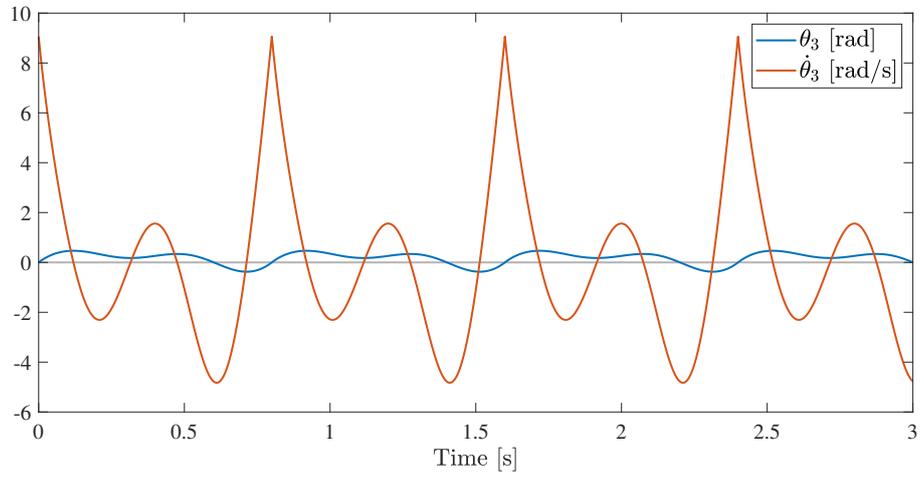


図 4.9: 非線形 3 自由度モデルにおけるリアクションホイールの運動の遷移

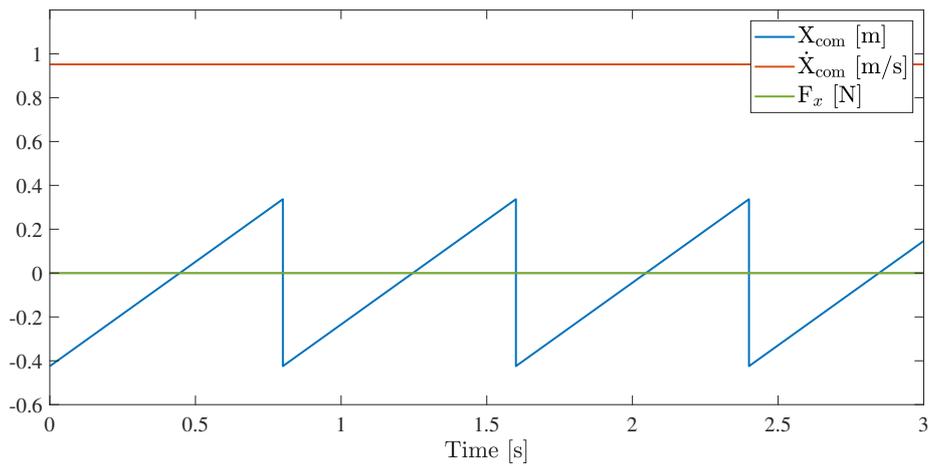


図 4.10: 非線形 3 自由度モデルにおける全重心位置と水平方向床反力の遷移

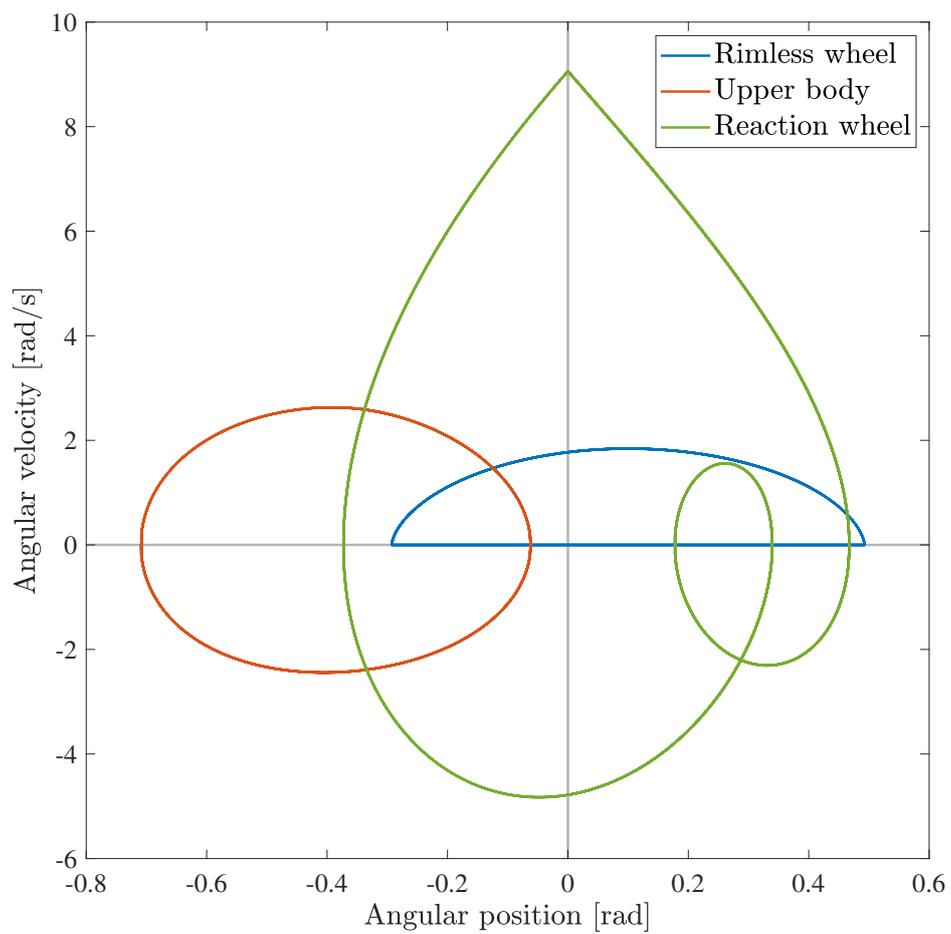


図 4.11: 非線形 3 自由度モデルにおける各リンクの運動

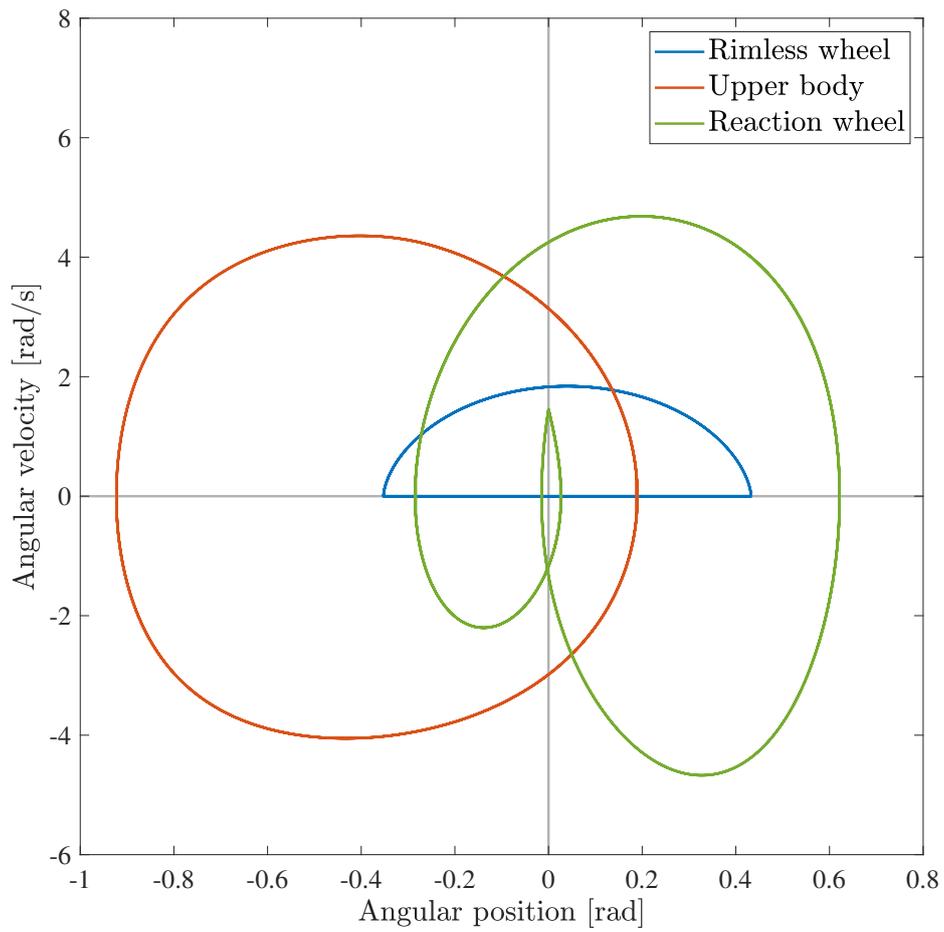


図 4.12: 非線形 3 自由度モデルにおける軽量な上体リンクを用いた場合の各リンクの運動

第5章 結論

5.1 統括

本論文では、数学モデルを使用した数値シミュレーションを通して、下り階段に代表される高低差のある路面上での角運動量拘束制御による耐摺動性の獲得を試みた。従来の2自由度モデルでは1つの入力のみによってステルス歩容生成、角運動量拘束制御および上体リンクの初期状態への復元を達成しなければならなかったため、結果的に達成されるステルス歩行の着地検出が行えず、初期状態探索へも影響を及ぼしていた。この問題に対して、リアクションホイールを付加して支持脚を陽に制御することで、初期状態の探索に及ぼしていた悪影響を取り除き、ステルス歩容生成と角運動量拘束制御の同時達成を実現した。これにより、水平面以外の低摩擦路面においても単脚支持期と着地時の摺動が回避可能となり、高い耐摺動性の獲得に成功した。また、リアクションホイールは非線形要素の影響に対して強い効果を発揮することに加え、その重心位置はリアクションホイール自身の運動によって変化しないという特徴から、角運動量拘束制御との相性の良さも示された。さらに、上体リンクの質量が軽量である場合、特異姿勢の問題により適用可能な傾斜角度が非常に緩やかなものに制限されることが示された。

5.2 今後の課題

本論文において、傾斜角度の小さい下り階段上のステルス歩容生成は成功したが、傾斜角度が大きい、すなわち非線形性が強い場合については、現時点では十分に検討できていない。今後は運動方程式の近似線形化方法を中心として、目標初期状態の導出法の改善に取り組む必要がある。効率的な非線形モデルの初期状態探索法についても、更なる検討が必要である。また、今回は一様な下り階段を対象としたが、実用性を高めるためには水平面から階段への移行やその逆についても考える必要があるものと考えられる。

謝辞

本研究を進めるに当たり，成果の上がらない厳しい状況においても最後まで熱心にご指導いただき，多大な助言を賜りました浅野文彦准教授に心より深謝申し上げます。また，研究生活において的確なご助言を賜りましたHO Anh-Van 准教授，愛知工業大学の原田祐志准教授，九州工業大学の花澤雄太助教，平石邦彦教授，金子峰雄教授に心よりの感謝を申し上げます。研究や生活において意見や助力を頂いた浅野研究室の学生にも厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] F. Asano, “A novel generation method for underactuated bipedal gait with landing position control of swing leg based on property of zero dynamics,” *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp. 1184-1189, 2015.
- [2] E. R. Dunn and R. D. Howe, “Towards smooth bipedal walking,” *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Vol. 3, pp. 2489-2494, 1994.
- [3] M. Hutter, C. D. Remy, M. A. Hoepffinger and R. Siegwart, “Efficient and versatile locomotion with highly compliant legs,” *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, Vol.18, No. 2, pp. 449-458, 2013.
- [4] S. Collins, A. Ruina, R. Tedrake and M. Wisse, “Efficient bipedal robots based on passive-dynamics walkers,” *Science*, Vol.307, Issue 5712, pp. 1082-1085, 2005.
- [5] T. McGeer, “Passive dynamic walking,” *The International Journal of Robotics Research*, 9(2), pp. 62-82, 1990.
- [6] M. Gomes and A. Ruina, “Walking model with no energy cost,” *Physical Review E*, Vol. 83, Issue 3, 032901, 2011.
- [7] 浅野文彦, “劣駆動リムレスホイールの両脚支持期を含まないステルス歩行”, 第18回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集, 1A1-05, pp. 12-15, 2017.
- [8] 原田 祐志, 浅野 文彦, “低摩擦路面上での劣駆動リムレスホイールの低衝撃前脚着地歩容生成”, 第19回SICEシステムインテグレーション部門講演会論文集, 1A4-03, pp. 151-156, 2018.
- [9] 浅野 文彦, “角運動量拘束制御に基づく劣駆動リムレスホイールのステルス歩容生成”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2018 講演論文集, pp. 1A1-M01(1)-1A1M01(4), 2018.

- [10] 浅野 文彦, “線形化モデルを用いた低摩擦路面上のステルス歩容生成”, 第 19 回 SICE システムインテグレーション部門講演会論文集, 1A4-01, pp. 143-146, 2018.
- [11] 浅野 文彦, “ステルス歩行における角運動量拘束制御に基づく両脚支持期の運動生成”, 第 19 回 SICE システムインテグレーション部門講演会論文集, 1A4-02, pp. 147-150, 2018.
- [12] T. L. Brown and J. P. Schmiebler, “Energetic effects of reaction wheel actuation on underactuated biped robot walking,” *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2576-2581, 2014.
- [13] T. L. Brown and J. P. Schmiebler, “Reaction wheel actuation for improving planar biped walking efficiency,” *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 32, No. 5, pp. 1290-1297, 2016.
- [14] Maurice CM, Goodwine B and Schmiebler JP, “Postural balance of an underactuated biped robot with a reaction wheel,” *Proc. of ASME. International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, Volume 5A: 41st Mechanisms and Robotics Conference:V05AT08A057, 2017.
- [15] T. Chyou, G. F. Liddell and M. G. Paulin, “An upper-body can improve the stability and efficiency of passive dynamic walking,” *J. of Theoretical Biology*, Vol. 285, Issue 1, pp. 126-135, 2011.
- [16] A. M. Formalskii, “Ballistic walking design via impulsive control,” *J. of Aerospace Engineering*, Vol. 23, Issue 2, pp. 129-138, 2010.