## **JAIST Repository**

https://dspace.jaist.ac.jp/

Title	角運動量拘束制御に基づく2脚ロボットのステルス歩容 解析及び歩行性能の改善	
Author(s)	柴田,浩貴	
Citation		
Issue Date	2020-03	
Туре	Thesis or Dissertation	
Text version	author	
URL	http://hdl.handle.net/10119/16401	
Rights		
Description	Supervisor: 浅野 文彦, 先端科学技術研究科, 修士 (情報科学)	



Japan Advanced Institute of Science and Technology

#### 修士論文

角運動量拘束制御に基づく2脚ロボットのステルス歩容解析及び歩行性能の改善

1810084 柴田 浩貴

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 上原 隆平

北陸先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科 (情報科学)

令和2年3月

#### 概要

本論文では、2脚ロボットにおける低摩擦路面上での耐摺動性能に優れた歩行運動を実現させ、生成された歩行運動に関して解析を行い、より高性能な歩行を実現させることを目的とする.はじめに、上体を有する2脚ロボットにおいて低摩擦路面上でのステルス歩行ができるように制御系を設計し、運動を解析する.次に、弾性力や半円足を有するロボットにおいて同様の歩行運動を生成させ、歩行運動の効率について議論する.

# 目 次

第1章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究目的	2
1.3	本論文の構成	2
第2章	上体を持つ2脚ロボットにおける厳密なステルス歩容生成	3
2.1	数学モデルの導出...........................	3
	2.1.1 運動方程式の導出	3
	2.1.2 制御系設計	5
2.2	線形化によるパラメータの導出	$\overline{7}$
2.3	数値シミュレーション	8
2.4	移動効率に関して	16
第3章	弾性要素を有する2脚ロボットにおける厳密なステルス歩容生成	17
3.1	数学モデルの導出............................	17
3.2	数値シミュレーション	19
第4章	半円足を有する2脚ロボットにおける厳密なステルス歩容生成	23
4.1	数学モデルの導出..............................	23
	4.1.1 運動方程式の導出	23
	4.1.2 制御系設計	25
4.2	線形化によるパラメータの導出	25
4.3	数値シミュレーション	27
第5章	結論	36
5.1	結論	36
5.2	今後の課題	36

# 図目次

2.1	上体を有する2脚ロボット	4
2.2	線形化モデルにおける角度の時間変化	10
2.3	線形化モデルにおける角速度の時間変化	10
2.4	線形化モデルにおける入力の時間変化	10
2.5	線形化モデルにおける各リンクの運動	11
2.6	線形化モデルにおける重心位置の時間変化...........	11
2.7	非線形モデルにおける角度の時間変化	13
2.8	非線形モデルにおける角速度の時間変化	13
2.9	非線形モデルにおける入力の時間変化	14
2.10	非線形モデルにおける床反力の時間変化	14
2.11	非線形モデルにおける各リンクの運動	15
2.12	生成された歩容のスティック線図 (非線形モデル)	15
3.1	弾性要素を有する2脚ロボット	18
3.2	バネ定数に対する SR の時間変化 (非線形モデル)	20
3.3	バネ定数に対する SR の時間変化 (線形化モデル)	20
3.4	非線形モデルにおける制御入力の時間変化 $(k_1 = k_2 = 10 [N \cdot m/rad])$	22
3.5	非線形モデルにおける制御入力の時間変化 $(k_1 = k_2 = 20 [N \cdot m/rad])$	22
3.6	非線形モデルにおける制御入力の時間変化 $(k_1 = k_2 = 30 [N \cdot m/rad])$	22
4 1	200日を右子ての期日子…1	04
4.1	干门疋を有りる2 $\mu$ レ小ツト	24
4.2	干円足の半住 $R$ に対 $g$ るSRの時間変化(線形化セナル)	28
4.3	半円足の半住 $R$ に対する $\theta_3(0)$ の時間変化(線形化セナル)	28
4.4	半円足の半径 $R$ に対する $T_0$ の時間変化(緑形化セナル)	28
4.5	線形化モアルにおける角度の時間変化 $(R = 0.2 \text{ [m]})$	30
4.6	線形化モテルにおける角度の時間変化 $(R = 0.2 \text{ [m]})$	30
4.7	線形化モデルにおける人力の時間変化 $(R = 0.2 \text{ [m]})$	30
4.8	線形化モデルにおける角度の時間変化 $(R = 0.4 \text{ [m]})$	31
4.9	線形化モデルにおける角度の時間変化 $(R = 0.4 \text{ [m]})$	31
4.10	線形化モデルにおける入力の時間変化 ( <i>R</i> = 0.4 [m])	31
4.11	非線形モデルにおける角度の時間変化 ( <i>R</i> = 0.2 [m])	33
4.12	非線形モデルにおける角速度の時間変化 ( <i>R</i> = 0.2 [m])	33

- 4.14 非線形モデルにおける床反力の時間変化 (R = 0.2 [m]) . . . . . . . . 34
- 4.15 非線形モデルにおけるロボットの位相平面図 (R = 0.2 [m]) .... 35
- 4.16 非線形モデルにおいて生成された歩容のスティック線図 (R = 0.2 [m]) 35

## 表目次

2.1	上体をもつ2脚ロボッ	トの物理パラメータ	8
-----	------------	-----------	---

## 第1章 序論

## 1.1 研究背景

歩行ロボットが実際の環境で活動するにあたって,不整地や悪路などの様々な 路面への適応能力は必要不可欠である [1] [2].現在に至るまで歩行ロボットの研究 は数多くおこなわれてきたが,こういった不整地への適応能力の低さは依然とし て大きな課題の1つである.

従来の歩行制御に関する研究では受動歩行やリミットサイクル歩行といった「安 定性,効率性」を重視した研究が主流であった [3]. これらの歩行はロボット特有 の動特性を利用することで,簡単な制御もしくはほとんど制御をおこなわずに高 効率で安定な歩行運動をおこなうことを可能としている.しかし,制御をほとん どおこなわない故に不整地の適応性には欠けるといった問題があった.よって,不 整地への適応能力の高い歩行を実現するには従来の歩行制御とは異なるアプロー チが必要になってくる [4].

従来の歩行制御に対して,近年ではステルス歩行という新しい歩行形態が生み 出されている [5].ステルス歩行は遊脚接地時の衝突を回避することによって,衝 突時に発生するエネルギー損失をゼロにすることができ [6],これによって衝突直 後の摺動を回避することが可能であることが明らかとなっている.また,それに 加えてロボットの支持脚接地点に作用する水平方向の床反力をゼロに保つことに よって,歩行中に支持脚接地点に生じる摺動を抑えることが可能であることが明 らかとなっており,角運動量拘束制御として提案されている [5].先行研究におい て,角運動量拘束制御を適用したステルス歩行によって摩擦のない水平面上での 歩行が達成されている [7].さらに,入力トルク [8] を追加して支持脚を陽に制御す ることによって,下り階段のような高低差のある路面上においても,滑らない歩 行が達成されている [9].しかし,これらの研究は主に最もシンプルな歩行モデル であるリムレスホイール [5] でおこなわれており,2足歩行ロボットを想定した研 究はまだ十分にはおこなわれていない.

これらを踏まえて、本研究では2脚ロボットにおいて角運動量拘束制御を用い たステルス歩行を実現させることを試みる.また、ステルス歩行全般の問題とし て、厳密な制御をおこなってるが故に効率が犠牲になっていることが挙げられる. 本研究ではステルス歩行の効率についても議論し、受動歩行、リミットサイクル 歩行等との効率面でのギャップを少しでも埋めることを試みる.

## 1.2 研究目的

本研究では、滑りやすい路面上における2脚ロボットのステルス歩行生成の実 現および運動解析を目的とする.滑りやすい路面を歩行するには支持脚接地点に 発生する水平方向の床反力を常にゼロに保つ必要がある.加えて、前進運動をお こなうためには支持脚及び遊脚の制御も必要不可欠である.そのため、歩行を成 立させるにはこれらの要求をすべて満たしつつ、遊脚が地面に接地する際に衝突 が発生しないような厳密な制御が要求される.本研究では、これらの制御を同時 に満たすような制御系を設計し、滑りやすい路面上での歩行を実現させる.また、 ロボットに弾性要素を加えたり、足の形状を変更するといったアプローチによって ロボットの歩行の高効率化に取り組む.

## 1.3 本論文の構成

本論文は、本章を含む全6章によって構成される.第2章では上体を有する2脚 ロボットにおいて、低摩擦路面上でのステルス歩容生成を試みる.第3章では第2 章で得られた制御系を基に、ロボットに弾性力を追加したモデルを提案し、解析 を通じて歩行の高効率化について検証する.第4章では第3章とは異なるアプロー チとして半円足を有するロボットを提案し、高効率なステルス歩容生成を目指す. 最後に第5章で本論文の総括をおこない、本研究を通じて明らかになった今後の 課題について述べる.

## 第2章 上体を持つ2脚ロボットにお ける厳密なステルス歩容生成

本章では、上体を持つ2脚ロボットのステルス歩容生成について説明する.当 該モデルは3自由度のモデルであり、前進運動に加えて支持脚接地点において生 じる水平方向への床反力を常にゼロに維持するという条件を付加することによっ て低摩擦路面上での歩行を試みる.まず、本章で用いるロボットの概要を示して から、数学モデルの導出及び制御系の設計について述べる.次に、線形化モデル を用いて水平方向への床反力をゼロに維持しつつ、全身運動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 による数値シミュレーションをおこなう.

## 2.1 数学モデルの導出

図 (2.1)に本章で扱う劣駆動歩行ロボットのモデルを示す.当該ロボットは長さ  $l_1$  [m], 質量  $m_1$  [kg] の支持脚, 長さ $l_2$  [m], 質量  $m_2$  [kg] の遊脚及び腰のジョイン トに接続された長さ $l_3$  [m], 質量  $m_3$  [kg] の上体リンクによって構成される3自由 度の劣駆動ロボットである.ロボットは上体リンクと支持脚の間に駆動トルク $u_1$ [N・m], 上体リンクと遊脚の間に駆動トルク $u_2$  [N・m] を印加することが可能で ある.また, 図 (2.1)において地面に置かれているカートは滑りやすい路面を表し ており,ロボットがカートを動かさずにその上を歩行することが,地面の上を滑 らずに歩行することを意味する.なお,両脚および上体の傾きは全て垂直方向か らの絶対角度であり,それぞれ $\theta_1$  [rad],  $\theta_2$  [rad],  $\theta_3$  [rad] で表される.

#### 2.1.1 運動方程式の導出

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

$$\boldsymbol{M}\boldsymbol{\hat{\theta}} + \boldsymbol{h} = \boldsymbol{S}\boldsymbol{u} \tag{2.1}$$

ここで, 左辺第一項は慣性力項, 第二項は中心力・コリオリカ及び重力項であり, 右辺は制御入力項である. それぞれの項は,



図 2.1: 上体を有する 2 脚ロボット

$$\boldsymbol{M} = \begin{bmatrix} a_1^2 + l_1^2(m_2 + m_3) & -b_2 l_1 m_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) & l_1 l_3 m_3 \cos(\theta_1 - \theta_3) \\ -b_2 l_1 m_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) & b_2^2 m_2 & 0 \\ l_1 l_3 m_3 \cos(\theta_1 - \theta_3) & 0 & l_3^2 m_3 \end{bmatrix} (2.2)$$

$$\boldsymbol{h} = \begin{bmatrix} h_{11} \\ b_2 m_2 (g \sin \theta_2 + l_1 \dot{\theta}_1^2 \sin (\theta_1 - \theta_2)) \\ -l_3 m_3 (g \sin \theta_3 + l_1 \dot{\theta}_1^2 \sin (\theta_1 - \theta_3)) \end{bmatrix}$$
(2.3)

$$h_{11} = -g(a_1m_1 + l_1(m_2 + m_3))\sin\theta_1 - b_2l_1m_2\dot{\theta}_2^2\sin(\theta_1 - \theta_2) \qquad (2.4)$$
$$+l_1l_3m_3\dot{\theta}_3^2\sin(\theta_1 - \theta_3)$$

$$\boldsymbol{S}\boldsymbol{u} = \begin{bmatrix} 1 & 0\\ 0 & 1\\ -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1\\ u_2 \end{bmatrix}$$
(2.5)

と表される.

### 2.1.2 制御系設計

当該モデルにおいて水平方向の床反力を常にゼロに維持しつつステルス歩行を おこなうために2つの制御入力を導入する.1つは股角度の制御であり,前進運動 を行いつつ遊脚先端が加速度や速度を生じずに衝突できるように次の境界条件を 満たす目標時間軌道を用意する.

 $\begin{aligned} \theta_{\rm H}(0) &= -2\alpha \quad \theta_{\rm H}(T_{\rm set}) = 2\alpha \\ \dot{\theta}_{\rm H}(0) &= 0 \qquad \dot{\theta}_{\rm H}(T_{\rm set}) = 0 \\ \ddot{\theta}_{\rm H}(0) &= 0 \qquad \ddot{\theta}_{\rm H}(T_{\rm set}) = 0 \end{aligned}$ 

ここで、 $\theta_{\rm H} := \theta_1 - \theta_2$  [rad] であり、 $T_{\rm set}$  [s] はロボットの目標歩行周期である. 上記 6 つの条件を満たすことによって歩行時における初期状態及び終端状態において速度、加速度が生じることがなくなるため、ロボットは衝突を生じることなく着地することが可能となる。上記の境界条件を満たす $\theta_{\rm H}$ の目標時間軌道 $\theta_{\rm Hd}(t)$ は上記の条件より、最低でも 5 次以上の時間関数で求められるため、本論文では

$$\theta_{\rm Hd}(t) = a_5 t^5 + a_4 t^4 + a_3 t^3 + a_2 t^2 + a_1 t + a_0 \tag{2.6}$$

とおく.式(2.5)及び6つの境界条件より, θ<sub>Hd</sub>(t)は

$$\theta_{\rm Hd}(t) = 4\alpha \left(\frac{6t^5}{T_{\rm set}^5} - \frac{15t^4}{T_{\rm set}^4} + \frac{10t^3}{T_{\rm set}^3}\right) - 2\alpha \tag{2.7}$$

と定まる.

また,股角度の制御の他に支持脚接地点での滑りを回避するために角運動量拘 束制御を適用する.角運動量拘束制御とはロボットの支持脚接地点まわりの全角運 動量 L [N・m・s] を時間で3階微分した値 Üを常にゼロに拘束する制御法である.

ロボットの運動方程式 (2.1) の両辺に射影ベクトル  $p^{T} = [1 \ 1 \ 1]$  をかけることに よって、運動方程式から角運動量と重心位置の関係式

$$\boldsymbol{p}^{\mathrm{T}}\left(\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{\theta}}+\boldsymbol{h}\right) = \dot{L} - mgX_{\mathrm{com}} = 0$$
(2.8)

を得ることができる.ここで, m [kg] はロボットの全質量,  $X_{com}$  [m] は全重心の X 座標である.支持脚接地点に生じる水平方向の床反力  $F_x$  [N] は

$$F_x = m\ddot{X}_{\rm com} \tag{2.9}$$

と表すことができるため,式(2.8)をさらに時間で2階微分することによって

$$\ddot{L} = mg\ddot{X}_{\rm com} = F_xg \equiv 0 \tag{2.10}$$

という関係式を求めることができる.式 (2.9) より,全角運動量の3階微分 $\ddot{L}$ を常 にゼロに拘束することが,支持脚接地点における水平方向の床反力 $F_x[N]$ を常に ゼロに維持することと等価であることがわかる.ここで,本モデルにおける全重 心の X 座標  $X_{com}$  は

$$X_{\rm com} := \sum_{i=1}^{3} \frac{m_i X_i}{m} \\ = \frac{m_1 a_1 \sin \theta_1 + m_2 (l_1 \sin \theta_1 - b_2 \sin \theta_2) + m_3 (l_1 \sin \theta_1 + l_3 \sin \theta_3)}{m} (2.11)$$

と表すことができるので、X<sub>com</sub>をさらに時間で1階微分すると

$$m\dot{X}_{\rm com} = \left[ (m_1a_1 + (m_2 + m_3)l_1)\cos\theta_1 - m_2b_2\cos\theta_2 - m_3l_3\cos\theta_3 \right] \dot{\theta}$$
(2.12)

となるので、 $m\dot{X}_{
m com} = oldsymbol{J}_{
m com} \dot{oldsymbol{ heta}}$ とおくと式 (2.11) は

$$\frac{\ddot{L}}{g} = m\ddot{X}_{\rm com} = \boldsymbol{J}_{\rm com}\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \dot{\boldsymbol{J}}_{\rm com}\dot{\boldsymbol{\theta}}$$
(2.13)

と書き直すことができる.

式 (2.7), (2.13) より本モデルにおける制御出力を y とおくと,時間による 2 階 微分は

$$\ddot{\boldsymbol{y}} = \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_{\rm H} \\ \frac{\ddot{\boldsymbol{L}}}{g} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [1 & -1 & 0] \ddot{\boldsymbol{\theta}} \\ \boldsymbol{J}_{\rm com} \ddot{\boldsymbol{\theta}} + \dot{\boldsymbol{J}}_{\rm com} \dot{\boldsymbol{\theta}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_{\rm Hd}(t) \\ 0 \end{bmatrix}$$
(2.14)

となり、この制御出力  $\ddot{y}$  を達成することで支持脚接地点に発生する水平方向床反 力を常にゼロに維持しつつ、股角度の厳密な制御をおこなうことが可能となる.  $C := \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \end{bmatrix}$ とおき、式 (2.14)を整理すると、

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{C}\boldsymbol{\ddot{\theta}} \\ \boldsymbol{J}_{\text{com}}\boldsymbol{\ddot{\theta}} + \boldsymbol{\dot{J}}_{\text{com}}\boldsymbol{\dot{\theta}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{C}\boldsymbol{M}^{-1}(\boldsymbol{S}\boldsymbol{u} - \boldsymbol{h}) \\ \boldsymbol{J}_{\text{com}}\boldsymbol{M}^{-1}(\boldsymbol{S}\boldsymbol{u} - \boldsymbol{h}) + \boldsymbol{\dot{J}}_{\text{com}}\boldsymbol{\dot{\theta}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\ddot{\theta}}_{\text{Hd}}(t) \\ 0 \end{bmatrix}$$
(2.15)

が得られる. 上式を整理することによって本モデルにおける制御入力 u は,

$$\boldsymbol{u} = \boldsymbol{\Phi}^{-1}(\boldsymbol{v}(t) + \boldsymbol{\Gamma}) \tag{2.16}$$

と求めることができる. ここで,

$$\boldsymbol{\Phi} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{C}\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{S} \\ \boldsymbol{J}_{\text{com}}\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{S} \end{bmatrix}, \boldsymbol{\Gamma} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{C}\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{h} \\ \boldsymbol{J}_{\text{com}}\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{h} - \dot{\boldsymbol{J}}_{\text{com}}\dot{\boldsymbol{\theta}} \end{bmatrix}, \boldsymbol{v}(t) = \begin{bmatrix} \ddot{\boldsymbol{\theta}}_{\text{Hd}}(t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

である.

## 2.2 線形化によるパラメータの導出

本モデルにおいて制御対象は股角度と角運動量であり、支持脚や遊脚の角度そ のものや上体の角度の制御はおこなっていない. そのため、これらの変数は全て歩 行中にゼロダイナミクスとなり、ロボットを適切に動かさなければ不安定な挙動 をとる可能性がある.ここでは、ロボットを適切に動作させるための初期状態の 導出について説明する.

まず,式(2.1)で示した運動方程式に関して, $\theta = \mathbf{0}_{3\times 1}$ , $\dot{\theta} = \mathbf{0}_{3\times 1}$ のまわりで近 似線形化をおこなうと,

$$\boldsymbol{M}_{0}\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \boldsymbol{G}_{0}\boldsymbol{\theta} = \boldsymbol{S}\boldsymbol{u} \tag{2.18}$$

が得られる.ここで、 $M_0$ および $G_0$ はそれぞれ、

$$\boldsymbol{M}_{0} = \begin{bmatrix} a_{1}^{2} + l_{1}^{2}(m_{2} + m_{3}) & -b_{2}l_{1}m_{2} & l_{1}l_{3}m_{3} \\ -b_{2}l_{1}m_{2} & b_{2}^{2}m_{2} & 0 \\ l_{1}l_{3}m_{3} & 0 & l_{3}^{2}m_{3} \end{bmatrix}$$
(2.19)  
$$\boldsymbol{G}_{0} = \begin{bmatrix} -g(a_{1}m_{1} + l_{1}(m_{2} + m_{3})) & 0 & 0 \\ 0 & gb_{2}m_{2} & 0 \\ 0 & 0 & -gl_{3}m_{3} \end{bmatrix}$$
(2.20)

と表される.線形化モデルにおける角運動量が,式(2.8)を線形化することによって,

$$\boldsymbol{p}^{\mathrm{T}}\left(\boldsymbol{M}_{0}\ddot{\boldsymbol{\theta}}+\boldsymbol{G}_{0}\boldsymbol{\theta}\right)=\dot{\boldsymbol{L}}_{0}+\boldsymbol{p}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{G}_{0}\boldsymbol{\theta}=0 \qquad (2.21)$$

と得られることを利用すれば、線形化モデルにおいて満たすべき条件は、

$$\ddot{L}_0 = -\boldsymbol{p}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{G}_0\boldsymbol{\ddot{\theta}} = -\boldsymbol{p}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{G}_0\boldsymbol{M}_0^{-1}(\boldsymbol{S}\boldsymbol{u} - \boldsymbol{G}_0\boldsymbol{\theta}) = 0 \qquad (2.22)$$

と求めることができる.よって,式(2.14)~(3.16)と同様の手順で線形化モデルにおける制御入力を求めると,

$$\boldsymbol{u}_0 = \boldsymbol{\Phi}_0^{-1}(\boldsymbol{v}(t) + \boldsymbol{\Gamma}_0 \boldsymbol{\theta}) \tag{2.23}$$

が得られる.ここで,

$$\boldsymbol{\Phi}_{0} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{C}\boldsymbol{M}_{0}^{-1}\boldsymbol{S} \\ \boldsymbol{p}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{G}_{0}\boldsymbol{M}_{0}^{-1}\boldsymbol{S} \end{bmatrix}, \boldsymbol{\Gamma}_{0} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{C}\boldsymbol{M}_{0}^{-1}\boldsymbol{G}_{0} \\ \boldsymbol{p}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{G}_{0}\boldsymbol{M}_{0}^{-1}\boldsymbol{G}_{0} \end{bmatrix}, \boldsymbol{v}(t) = \begin{bmatrix} \ddot{\boldsymbol{\theta}}_{\mathrm{Hd}}(t) \\ 0 \end{bmatrix}$$
(2.24)

である.式(2.23)を利用すれば式(2.18)は,

$$\ddot{\boldsymbol{\theta}} = -\boldsymbol{M}_0^{-1}(\boldsymbol{G}_0 - \boldsymbol{S}\boldsymbol{\Phi}_0\boldsymbol{\Gamma}_0)\boldsymbol{\theta} + \boldsymbol{M}_0^{-1}\boldsymbol{S}\boldsymbol{\Phi}_0\boldsymbol{v}(t)$$
(2.25)

と書き換えることができる.よって、 $\boldsymbol{x} = [\boldsymbol{\theta}^{\mathrm{T}} \ \dot{\boldsymbol{\theta}}^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}$ とおくと以下の状態空間表現 を得ることができる.

$$\dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{B}\boldsymbol{v}(t) \tag{2.26}$$

ここで, A, Bはそれぞれ,

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{0}_{3\times3} & \boldsymbol{I}_3 \\ -\boldsymbol{M}_0^{-1}(\boldsymbol{G}_0 - \boldsymbol{S}\boldsymbol{\Phi}_0^{-1}\boldsymbol{\Gamma}) & \boldsymbol{0}_{3\times3} \end{bmatrix}, \ \boldsymbol{B} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{0}_{3\times2} \\ \boldsymbol{M}_0^{-1}\boldsymbol{S}\boldsymbol{\Phi}_0^{-1} \end{bmatrix}$$
(2.27)

と表される. ロボットの初期状態を  $\boldsymbol{x}(0) = [-\alpha \ \alpha \ 0 \ 0 \ 0 \ \dot{\theta}_3(0)]^{\mathrm{T}}$  とおくと,目標 境界条件は,

$$\boldsymbol{x}(T_0) = e^{\boldsymbol{A}T_0}\boldsymbol{x}(0) + \int_0^{T_0} e^{\boldsymbol{A}(T_0 - \tau)} \boldsymbol{B}\boldsymbol{v}(\tau) d\tau$$
$$= \boldsymbol{x}(0) + \begin{bmatrix} 2\alpha \\ -2\alpha \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha \\ -\alpha \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_3(0) \end{bmatrix}$$
(2.28)

となる.式 (2.28) を解くことによって、線形化モデルにおける上体の角速度 $\dot{\theta}_3(0)$ および線形化モデルにおける目標歩行周期 $T_0$ はそれぞれ、

$$\dot{\theta}_3(0) = \frac{\alpha (mgl_1)^{\frac{3}{2}}}{m_3 g l_3 \sqrt{6m_1 l_1 (b_1 + l_3)}}$$
(2.29)

$$T_0 = 2\sqrt{\frac{6m_1(b_1 + l_3)}{mg}} \tag{2.30}$$

と求めることができる.

## 2.3 数値シミュレーション

ここでは、線形化モデルの解析によって得られたロボットの初期状態および目 標歩行周期を用いた数値シミュレーションについて紹介する.まずは、線形化モ デルにおいてのシミュレーション結果を示す.次に、非線形モデルにおけるシミュ レーション結果を示す.非線形モデルでのシミュレーションに関しては、線形化 モデルで得られた近似解を用いて二分探索をおこなうことによって、初期状態お よび目標歩行周期を導出した.それぞれのシミュレーションにおいて使用した物 理パラメータを表 (2.1) に示す.

$m_1$	$(=m_2)$	1.0	kg
$m_3$		2.0	kg
$a_1$	$(=a_2)$	0.5	m
$b_1$	$(= b_2)$	0.5	m
$l_1$	$(=a_1+b_1=l_2)$	1.0	m
$l_3$		0.7	m
$\alpha$		$\pi/8$	rad

表 2.1: 上体をもつ2脚ロボットの物理パラメータ

まず、上体を持つ2脚ロボットの線形化モデルでのシミュレーション結果を図 (2.2)~(2.6)に示す. なお、式 (2.29)、(2.30)および表 (2.1)に示した物理パラメー タによって、線形化モデルにおける上体の初期加速度と目標歩行周期はそれぞれ、  $\dot{\theta}_3(0) = 2.619329 [rad/s], T_0 = 0.856706 [s] と求まった. シミュレーション結果よ$ り、得られた解析解によって、歩容がしっかりと生成されていることがわかる. また、図 (2.5)より、生成された歩容は前後対称性の高い挙動を示していることがわかる. さらに、図 (2.6)より、ロボットの全重心位置が単調に変化しており、角運動量拘束制御によって、線形化モデルにおいて水平方向の床反力が常にゼロに保たれていることがわかる.



図 2.2: 線形化モデルにおける角度の時間変化



図 2.3: 線形化モデルにおける角速度の時間変化



図 2.4: 線形化モデルにおける入力の時間変化



上述したように、線形化モデルにおいて得られた初期状態、目標歩行周期を用 いてもロボットは発散してしまう.そこで、非線形モデルに関しては、線形化モ デルにおいて得られた解析解をもとに二分探索をおこなうことによって初期状態、 目標歩行周期を導出した.二分探索の結果、非線形モデルにおける上体の初期角 速度および歩行周期はそれぞれ  $\dot{\theta}_3(0) = 2.810083$  [rad/s],  $T_{set} = 0.778184$  [s] と求 まった.得られたパラメータに基づいた非線形モデルでのシミュレーション結果 を図 (2.7)~(2.12) に示す.図 (2.10) より、歩行中に水平方向の床反力が常にゼロ に保たれており、当初の目的としていた「支持脚接地点の水平方向床反力を常に ゼロに維持するステルス歩容生成」が達成されていることがわかる.また、線形 化モデルにおけるシミュレーション結果と非線形モデルにおけるシミュレーショ ン結果を比較すると、上体リンクと支持脚の挙動にギャップが見られた.特に、上 体の挙動に関するギャップが非常に大きく、実際に生成される歩容は上体の挙動が とても小さいことがわかる.



図 2.8: 非線形モデルにおける角速度の時間変化







図 2.10: 非線形モデルにおける床反力の時間変化



図 2.12: 生成された歩容のスティック線図 (非線形モデル)

## 2.4 移動効率に関して

次に,生成した歩容の性能を評価するために移動効率を計算する.移動効率の 指標として本論文では Specific Resistance (以下 SR)を導入する [11]. 本モデルに おける SR は以下の式で表される.

$$SR = \frac{P}{mgV}$$
(2.31)

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T (|(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_3)u_1| + |(\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_3)u_2|) dt$$
 (2.32)

$$V = \frac{\Delta X_{\rm com}}{T} = \frac{2l_1 \sin \alpha}{T} \tag{2.33}$$

ここで, P[J/s]は平均入力パワーであり, V[m/s]はロボットの歩行速度である. T[s] はロボットの歩行周期であり、本モデルの場合は線形化モデルの場合は $T = T_0$ , 非線形モデルの場合は $T = T_{set}$ となる.本モデルにおける SR を計算した結果, SR = 0.2442となった.上体の有無や物理パラメータの差異はあるが、従来の受動 歩行などといった高効率な歩行形態と比べると効率は悪い.ステルス歩行のような 厳密な歩行と受動歩行のような高効率な歩行は本来対極に位置する歩行形態であ るが、高効率化が達成できれば省コストで不整地への対応ができる理想的な歩行 が実現できると考えられる.次章以降は本章で得られた知見を基に、歩行の高効 率化について議論していく.

## 第3章 弾性要素を有する2脚ロボッ トにおける厳密なステルス歩 容生成

前章では上体を有する2脚ロボットの厳密なステルス歩行について議論したが, ステルス歩行特有の移動効率の悪さという問題点が残っていた.そこで,本章で はロボットの移動効率を上げる手段として,弾性要素を有する2脚ロボットにつ いて議論する.まずは前章と同様に数学モデルの導出について説明する.次に得 られた数学モデル,制御系を基に数値シミュレーションを行い,その結果につい て議論する.なお,制御系設計の詳細等,前章の内容と類似する点についての記 載はここでは省略する.

## 3.1 数学モデルの導出

図 3.1 に本章で扱う劣駆動歩行ロボットのモデルを示す.本章で扱うロボット は,前章で扱ったロボットとほとんど同じであるが,上体と支持脚,上体と遊脚 がそれぞれ弾性要素 (バネ)で繋がっており,それぞれの脚への入力トルクを弾性 力によって賄うことができる.

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

$$\boldsymbol{M}\boldsymbol{\ddot{\theta}} + \boldsymbol{\hat{h}} = \boldsymbol{S}\boldsymbol{u} \tag{3.1}$$

ここで、慣性力項 M および制御入力項 Su の詳細は前章と同じく式 (2.2), (2.5) で表される.  $\hat{h}$  に関しては、式 (2.3) で示した中心力、コリオリカ、重力に加えて 弾性力も含まれており、

$$\hat{\boldsymbol{h}} = \boldsymbol{h} + \begin{bmatrix} k_1(\theta_1 - \theta_3) \\ k_2(\theta_2 - \theta_3) \\ -k_1(\theta_1 - \theta_3) - k_2(\theta_2 - \theta_3) \end{bmatrix}$$
(3.2)

と表される.



図 3.1: 弾性要素を有する 2 脚ロボット

制御系に関しては前章で扱ったロボットの制御系に関する式 (2.16), (2.17) において $h \in \hat{h}$  に置き替えることによって,

$$\boldsymbol{u} = \boldsymbol{\Phi}^{-1}(\boldsymbol{v}(t) + \boldsymbol{\Gamma}) \tag{3.3}$$

$$\boldsymbol{\Phi} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{C}\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{S} \\ \boldsymbol{J}_{\text{com}}\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{S} \end{bmatrix}, \boldsymbol{\Gamma} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{C}\boldsymbol{M}^{-1}\hat{\boldsymbol{h}} \\ \boldsymbol{J}_{\text{com}}\boldsymbol{M}^{-1}\hat{\boldsymbol{h}} + \dot{\boldsymbol{J}}_{\text{com}}\dot{\boldsymbol{\theta}} \end{bmatrix}, \boldsymbol{v}(t) = \begin{bmatrix} \ddot{\boldsymbol{\theta}}_{\text{Hd}}(t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

と求めることができる.

また,線形化モデルにおいても運動方程式及び制御入力は式 (3.2)~(3.4) を線形 化することによって

$$\boldsymbol{M}_{0}\boldsymbol{\hat{\theta}} + (\boldsymbol{G}_{0} + \boldsymbol{K})\boldsymbol{\theta} = \boldsymbol{S}\boldsymbol{u}$$
(3.5)

$$\boldsymbol{u}_0 = \boldsymbol{\Phi}_0^{-1}(\boldsymbol{v}(t) + \boldsymbol{\Gamma}_0 \boldsymbol{\theta})$$
(3.6)

$$\boldsymbol{\Phi}_{0} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{C}\boldsymbol{M}_{0}^{-1}\boldsymbol{S} \\ \boldsymbol{p}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{G}_{0}\boldsymbol{M}_{0}^{-1}\boldsymbol{S} \end{bmatrix}, \boldsymbol{\Gamma}_{0} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{C}\boldsymbol{M}_{0}^{-1}(\boldsymbol{G}_{0} + \boldsymbol{K}) \\ \boldsymbol{p}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{G}_{0} + \boldsymbol{K})\boldsymbol{M}_{0}^{-1}(\boldsymbol{G}_{0} + \boldsymbol{K}) \end{bmatrix}$$
(3.7)

と求めることができる. ここで,

$$\boldsymbol{K} = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & -k_1 \\ 0 & k_2 & -k_2 \\ -k_1 & -k_2 & k_1 + k_2 \end{bmatrix}$$
(3.8)

である.制御系設計および初期状態の導出に関しての詳細は前章で述べたので,本 章では省略する.

## 3.2 数値シミュレーション

ここでは数値シミュレーションの結果について議論する.弾性力がロボットに 与える影響は制御入力のみであるため,制御入力およびSR以外についての議論は ここでは取り扱わない.数値シミュレーションは後述するが,それぞれのバネ定数 の値を変化させた場合の傾向や線形化モデル,非線形モデルにおける傾向の違い を考察するために次の3つのシチュエーションでおこなった.

- k₁ = 0 (上体と遊脚に繋がっている弾性要素のバネ定数のみを変化させる)
- *k*<sub>2</sub> = 0 (上体と支持脚に繋がっている弾性要素のバネ定数のみを変化させる)
- *k*<sub>1</sub> = *k*<sub>2</sub> (2つの弾性要素のバネ定数を共に変化させる)

図 (3.2) に非線形モデルにおけるシミュレーション結果を示す. なお, シミュレー ションで使用したロボットの物理パラメータは前章と同じく表 (2.1)のものを使用 した.図 (3.2)の黄色のグラフを見ればわかるが,バネ定数を上げていくと,SR が最も小さくなった後、一定の値をとり続け、SR が変化しない区間が存在した. そこで、上述したように片方のバネ定数のみを変化させたり線形化モデルでのシ ミュレーションをおこなった結果,図(3.2)の緑色と赤色の遷移および図(3.3)が 得られた.これらの遷移を見ればわかるが,k1のみを変化させた場合とk2のみを 変化させた場合では、SR はそれぞれ異なる時間変化を示した.なので、それぞれ のバネによる効率の変化の合計が結果的に両方のバネ定数を変化させた場合の結 果(図(3.2),(3.3)の黄色の遷移)として現れたのだと考えられる。前章でも示した が、上体から支持脚への入力 (バネ定数 k1 が作用している入力) は股角度の制御, 上体から遊脚への入力(バネ定数 ko が作用している入力)は角運動量拘束制御なの で,股角度の制御の方がバネ定数によって高効率化が可能であることがわかる.逆 に、角運動量拘束制御についてはバネ定数が0~5 [N·m/rad] 程度の区間であれ ば高効率化に成功しているが、バネ定数がそれより大きくなると効率はむしろ悪 くなっていることがわかる.







図 3.3: バネ定数に対する SR の時間変化 (線形化モデル)

また,  $k_1$  および  $k_2$  を 10 [N・m/rad] ずつ増加させていった際の制御入力の時間 変化を図 (3.4)~(3.6) に示す ( $k_1 = k_2 = 0$  [N・m/rad] の時のシミュレーション結 果は図 (2.9) と同じなのでここでは省略する). これらの結果より, 股角度の制御 に関してはバネの影響で高効率化に成功しているが, 角運動量拘束制御に関して はバネ定数が大きくなるにつれて, むしろ入力が大きくなっていることがわかる. これは, バネ定数が大きくなるにつれて弾性力が大きくなったため, 弾性力を抑 制するために制御入力が大きくなったことが原因だと考えられる.

これらのシミュレーションの結果より,弾性要素が角運動量拘束制御に基づくス テルス歩行において高効率化に役立つことがわかった.しかし,股角度の制御に 関してはバネ定数を大きくすることによって高効率化が可能であるが,角運動量 拘束制御に関してはバネ定数を大きくするとむしろ効率が悪くなることがわかっ た.歩行において支持脚と遊脚は1歩毎に変化するため,それぞれのバネ定数を変 化させながら歩行をおこなうのは難しいと考えられる.股角度の制御と角運動量 拘束制御はそれぞれバネ定数によって異なるSRの時間変化を示したため,結果と して弾性力によって効率をよくできる範囲は限られていることがわかった.次章 では更なる高効率化を目指して半円足を有するロボットについて解析をおこなう.



図 3.4: 非線形モデルにおける制御入力の時間変化  $(k_1 = k_2 = 10$  [N・m/rad])



図 3.5: 非線形モデルにおける制御入力の時間変化 ( $k_1 = k_2 = 20$  [N・m/rad])



図 3.6: 非線形モデルにおける制御入力の時間変化 ( $k_1 = k_2 = 30$  [N・m/rad])

# 第4章 半円足を有する2脚ロボットにおける厳密なステルス歩容生成

前章では弾性力を用いることによってロボットの高効率化について議論したが、 本章では半円足を有するロボットにおいて、前章と同様に生成された歩容の高効 率化について議論する.ステルス歩行における半円足には転がり効果によって上 体の運動を抑制し、結果的にスマートな歩容生成が可能であることが示されてい る [12-14].本章では、半円足を有するロボットの解析を通して、弾性力を有するロ ボットと同様に支持脚接地点まわりの水平方向床反力を常にゼロに保ちつつ、ポ イントフットのロボットと比べて高効率な歩行が可能であるのかを検証する.な お、前章までと同様に、今まで述べてきたことと類似する点に関しての記載はこ こでは省略する.

## 4.1 数学モデルの導出

#### 4.1.1 運動方程式の導出

本章で扱う劣駆動2脚ロボットを図 (4.1) に示す. ロボット及び印加する制御入 力に関しては第2章で扱ったものとほとんど同じであるが,足先がポイントフッ トではなく半円足となっており,半円足の半径 R [m]の大きさによるロボットの 挙動の変化,移動効率について議論していく. ロボットの運動方程式は今までと 同様,一般化座標ベクトルを $\theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T$ とおくことによって,

$$\boldsymbol{M}\boldsymbol{\hat{\theta}} + \boldsymbol{h} = \boldsymbol{S}\boldsymbol{u} \tag{4.1}$$

と表される.



図 4.1: 半円足を有する 2 脚ロボット

右辺の詳細に関しては今までの章と同じだが、半円足の半径 *R* が含まれるため、 左辺第一項及び第二項はそれぞれ以下のように表される.

$$\boldsymbol{M} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & b_2^2 m_2 & 0 \\ M_{31} & 0 & l_3^2 m_3 \end{bmatrix}$$
(4.2)

$$M_{11} = a_1^2 m_1 + l_1^2 (m_2 + m_3) - 2R(a_1 m_1 + l_1 (m_2 + m_3))$$

$$+ 2mR^2 + 2R(a_1 m_1 + l_1 (m_2 + m_3) - mR) \cos \theta_1$$
(4.3)

$$M_{12} = M_{21} = -b_2 m_2 ((l_1 - R) \cos(\theta_1 - \theta_2) + R \cos \theta_2)$$
(4.4)

$$M_{13} = M_{31} = l_3 m_3 ((l_1 - R) \cos(\theta_1 - \theta_3) + R \cos\theta_3)$$
(4.5)

$$\boldsymbol{h} = \begin{bmatrix} h_{11} \\ b_2 m_2 (g \sin \theta_2 + (l_1 - R) \dot{\theta}_1^2 \sin (\theta_1 - \theta_2)) \\ -l_3 m_3 (g \sin \theta_3 + (l_1 - R) \dot{\theta}_1^2 \sin (\theta_1 - \theta_3)) \end{bmatrix}$$
(4.6)

$$h_{11} = -(a_1m_1 + l_1(m_2 + m_3) - mR)(g + R\dot{\theta}_1^2)\sin\theta_1 + b_2m_2\dot{\theta}_2^2((-l_1 + R)\sin(\theta_1 - \theta_2) + R\sin\theta_2) - l_3m_3\dot{\theta}_3^2((-l_1 + R)\sin(\theta_1 - \theta_3) + R\sin\theta_3)$$
(4.7)

#### 4.1.2 制御系設計

股角度の制御に関しては第2章と同じであるためここでは省略する.しかし,半 円足を有する2脚ロボットは今まで扱ってきたポイントフット型のロボットと違っ て,支持脚接地点は常に半円足による転がり運動によって原点から離れていって しまう.なので,原点からロボットを見た場合,ロボットの全角運動量はロボット の全重心に発生する重力が生み出すモーメントに加えて,支持脚接地点から発生 する垂直方向床反力によるモーメントも考慮しなければならない.そのため,式 (2.8),(2.10)に示したような角運動量と重心位置の関係は成り立たなくなってしま う.しかし,式(2.9)に示した支持脚接地点の水平方向床反力とロボットの全重心 位置の関係式は変わらないため,制御出力を*y*とおくと,時間による二階微分は,

$$\ddot{\boldsymbol{y}} = \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_{\rm H} \\ F_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{C}\boldsymbol{\ddot{\theta}} \\ \boldsymbol{J}_{\rm com}\boldsymbol{\ddot{\theta}} + \boldsymbol{\dot{J}}_{\rm com}\boldsymbol{\dot{\theta}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_{\rm Hd}(t) \\ 0 \end{bmatrix}$$
(4.8)

となり,上式を整理することによって式 (2.16), (2.17) と同じような形で表される 制御入力を得ることができる.ただし,全重心の X 座標 X<sub>com</sub> は半円足 R が入る ことによって,

$$X_{\rm com} = \frac{mR\theta_1 + (m_1a_1 + (m_2 + m_3)l_1 - mR)\sin\theta_1 - m_2b_2\sin\theta_2 + m_3l_3\sin\theta_3}{m}$$
(4.9)

となるため,重心の速度に関するヤコビアン **J**<sub>com</sub> も,

$$\boldsymbol{J}_{\text{com}} = [mR + (m_1a_1 + (m_2 + m_3)l_1 - mR)\cos\theta_1 - m_2b_2\cos\theta_2 \quad m_3l_3\cos\theta_3]$$
(4.10)

となる.

## 4.2 線形化によるパラメータの導出

式 (4.1)~(4.7) で示した運動方程式に関して,  $\boldsymbol{\theta} = \mathbf{0}_{3\times 1}$ ,  $\dot{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{0}_{3\times 1}$ のまわりで 近似線形化をおこなうと,

$$\boldsymbol{M}_{0}\boldsymbol{\dot{\theta}} + \boldsymbol{G}_{0}\boldsymbol{\theta} = \boldsymbol{S}\boldsymbol{u} \tag{4.11}$$

が得られる.  $M_0$  に関しては線形化によって式 (2.18) と同じ形で表すことができるが,  $G_0$  に関しては半円足の半径 R が入ることによって,

$$\boldsymbol{G}_{0} = \begin{bmatrix} -g(a_{1}m_{1} + l_{1}(m_{2} + m_{3}) - mR) & 0 & 0\\ 0 & gb_{2}m_{2} & 0\\ 0 & 0 & -gl_{3}m_{3} \end{bmatrix}$$
(4.12)

となる.

今までのモデルにおいて線形化モデルでは式 (2.21) を基に制御系を設計したが, 前述したように本モデルにおいては角運動量に関する関係が成り立たない.そこ で,本モデルにおいては支持脚接地点の水平方向床反力とロボットの全重心位置 の関係式

$$F_x = m\ddot{X}_{\rm com} = \boldsymbol{J}_{\rm com}\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \dot{\boldsymbol{J}}_{\rm com}\dot{\boldsymbol{\theta}}$$
(4.13)

を線形化することによって制御系を設計する.式 (4.13) に関して線形化をおこなうと,

$$\hat{F}_x = \hat{J}_{\rm com} \ddot{\boldsymbol{\theta}} \tag{4.14}$$

が得られる.ここで、 $\hat{F}_x$ 、 $\hat{J}_{com}$ はそれぞれ $F_x$ 、 $J_{com}$ を線形化したものであり、

$$\hat{J}_{\text{com}} = \begin{bmatrix} m_1 a_1 + (m_2 + m_3) l_1 & -m_2 b_2 & m_3 l_3 \end{bmatrix}$$
(4.15)

である.よって,線形化モデルにおいて満たすべき条件は,

$$\hat{F}_x = \hat{J}_{\rm com} M_0^{-1} (S u - G_0 \theta) \equiv 0$$
(4.16)

と求めることができる.式 (4.14) より線形化モデルにおける制御入力は第2章と同じ手順によって式 (2.23) と同じような形で得ることができる.ただし、 $\Phi_0$  および  $\Gamma_0$  の詳細はそれぞれ、

$$\boldsymbol{\Phi}_{0} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{C}\boldsymbol{M}_{0}^{-1}\boldsymbol{S} \\ \hat{\boldsymbol{J}}_{\text{com}}\boldsymbol{M}_{0}^{-1}\boldsymbol{S} \end{bmatrix}, \boldsymbol{\Gamma}_{0} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{C}\boldsymbol{M}_{0}^{-1}\boldsymbol{G}_{0} \\ \hat{\boldsymbol{J}}_{\text{com}}\boldsymbol{M}_{0}^{-1}\boldsymbol{G}_{0} \end{bmatrix}$$
(4.17)

となる.

ロボットの一般化座標ベクトルを $x = [\theta^T \dot{\theta}^T]^T$ とおくと,目標境界条件は第2 章と同様に式 (2.28) 式を解くことによって求めることができる.ただし,境界条 件の式 (2.28) の計算負荷が非常に重く,式 (2.29),(2.30) のようにシンボリックな 解析解を求めることができなかった.そこで本論文では式 (2.28) に表 (2.1) 及び半 円足の半径 R の値といった数値パラメータを全て代入することによって,数値的 に $\dot{\theta}_3(0)$ と  $T_0$ を導出した [7].

## 4.3 数値シミュレーション

半円足を有するロボットにおいての,数値シミュレーションによる初期状態お よび SR に関する解析結果を図 (4.2)~(4.4) に示す.なお,SR 及び平均入力パワー P に関しては今までの章と同様に式 (2.29),(2.30) を用いたが,ロボットの歩行速 度 V に関してはロボットの全重心の X 座標の変位が半円足の半径 R の影響で,

$$V = \frac{\Delta X_{\rm com}}{T} = \frac{2(R\alpha + (l_1 - R)\sin\alpha)}{T}$$
(4.18)

となることに注意が必要である.図(4.2)を見ればわかるが、半円足の半径 Rが増加するにつれて SR が増加していく傾向が見られた.また、図(4.3)、(4.4)より半円足の半径 Rが増加するにつれて上体の初期角速度 $\theta_3(0)$ が減少し、目標歩行周期 $T_0$ が増加する傾向が見られた.これらのことから、半円足の半径 Rが増加するにつれて歩行周期が増加する、つまりロボットの速度は遅くなってしまうが、上体の運動が抑えられたため、結果としてロボットの平均入力パワーが抑えられ、ロボットの効率がよくなったのだと考えられる.また、半円足の半径 R = 0、つまりロボットがポイントフットであるときの線形化モデルにおけるロボットの上体の初期角速度 $\theta_3(0)$ および目標歩行周期 $T_0$ ,SRの値は全て第2章で解析したものと同じであった.つまり、ロボットの全角運動量の時間による三階微分を用いなくても、ロボットの支持脚接地点に生じる水平方向床反力とロボットの重心位置の関係式を線形化することによって線形化モデルの近似解析解が得られることがわかった.



図 4.2: 半円足の半径 R に対する SR の時間変化 (線形化モデル)







図 4.4: 半円足の半径 R に対する T<sub>0</sub>の時間変化 (線形化モデル)

また,線形化モデルにおいて R = 0.2 [m], R = 0.4 [m] のときのシミュレーション結果についても図 (4.5)~(4.10) に示す. 図 (4.7), (4.10) より, Rが大きくなるにつれて, ロボットに必要な制御入力が小さくなっていることがわかる. 上体と遊脚の間の制御トルク  $u_2$  に関しては Rの影響はあまり見られなかったが, 上体と支持脚の間の制御トルク  $u_1$  に関しては Rの影響を大きく受けていることが確認できる. これは,支持脚の半円足の転がり効果がロボットの足首駆動トルクと似たような運動をしたことによって,上体から支持脚への制御トルクの負荷が軽減されたことが原因だと考えられる. これらの要因によって Rが増加するにつれて SRが減少していったのだと考えられる. また,図 (4.5), (4.8) より各リンクの角度の遷移は Rが増加しても大きくは変わっていないが,図 (4.6), (4.9) より各リンクの角速度に関しては大幅に小さくなっていることがわかる. これは,歩行周期が長くなったことによってゆっくりとした歩容が生成されたことが原因だと考えられる.



図 4.5: 線形化モデルにおける角度の時間変化 (R = 0.2 [m])



図 4.6: 線形化モデルにおける角度の時間変化 (R = 0.2 [m])



図 4.7: 線形化モデルにおける入力の時間変化 (R = 0.2 [m])



図 4.8: 線形化モデルにおける角度の時間変化 (R = 0.4 [m])



図 4.9: 線形化モデルにおける角度の時間変化 (R = 0.4 [m])



図 4.10: 線形化モデルにおける入力の時間変化 (R = 0.4 [m])

次に非線形モデルにおいての数値シミュレーションについて説明する. 非線形モ デルの初期状態に関しては第2章と同様に、線形化モデルで得られた解を用いて 二分探索をおこなうことによって求めた.ただし,線形化モデルでは R = 0.6 [m] まで解析をおこなったが、非線形モデルにおいては R が大きくなるにつれて探索 による初期状態の導出が困難になり、R = 0.2 [m] までしか正確な初期状態を導出 できなかった、非線形モデルにおけるシミュレーション結果の一例としてR = 0.2[m] のときのシミュレーション結果を図 (4.11)~(4.16) に示す. なお, SR および初 期状態の傾向に関しては、ギャップこそあったが線形化モデルと似た傾向が見られ たため、本論文での記載は省略する.図(4.14)より支持脚接地点における水平方 向の床反力は常にゼロに保たれており、半円足を有するロボットにおいても滑ら ない歩容が生成可能であることが確認できた.図(4.13)より,生成された歩容は R = 0 [m]の時(図(2.9))と比べて大幅に上体と支持脚の間の制御トルクu1の値が 小さくなっており、線形化モデルと同様に半円足の転がり効果によって上体の制 御トルクの負荷が軽減されていることがわかる.また,図(4.12)より,各リンク の角速度も抑制されており、これらの結果より、ロボットの歩行周期が長くなり歩 行速度も遅くなってしまったが、運動が大幅に抑制されたことによって線形化モ デルと同様にロボットの高効率化に成功したのだと考えられる. さらに,図(2.10) と図 (4.14) を比較すると、支持脚接地点における垂直方向の床反力が抑制されて いることがわかる.これは、これまで議論してきた制御ト ルクや各リンクの運動 の影響によるものだと理解できる.



図 4.11: 非線形モデルにおける角度の時間変化 (R = 0.2 [m])



図 4.12: 非線形モデルにおける角速度の時間変化 (R = 0.2 [m])





図 4.14: 非線形モデルにおける床反力の時間変化 (R = 0.2 [m])



図 4.15: 非線形モデルにおけるロボットの位相平面図 (R = 0.2 [m])



図 4.16: 非線形モデルにおいて生成された歩容のスティック線図 (R = 0.2 [m])

## 第5章 結論

## 5.1 結論

本論文では、数学モデルの構築および数値シミュレーションを通して、上体を 有する2脚ロボットにおいての低摩擦路面上でのステルス歩行について解析した. 股角度を厳密に制御し、角運動量拘束制御によって支持脚接地点の水平方向床反 力を常にゼロに保つことによって、摺動を抑えた2足歩行を達成した.また、弾性 要素を追加したロボットや半円足を有するロボットの解析を通じて、それらの要 素が厳密なステルス歩行において効率を上げることに役立つことを解析した.特 に、半円足を有するロボットの解析に関しては床反力と重心位置の関係式を線形 化することによって角運動量拘束制御と同等な解析解が得られることを明らかに した.さらに、半円足の転がり効果によって制御トルクの負荷が軽減されること を確認し、半円足が厳密なステルス歩行をおこなう場合においても移動効率の向 上に貢献することを示した.

## 5.2 今後の課題

半円足を有するロボットに関しては二分探索による初期状態の導出には限界が あった.非線形モデルにおける初期状態導出法を改善し,非線形モデルでの歩容 および効率に関する更なる解析を進めることは重要な課題である.また,本研究 では弾性力や半円足といった外的要因及びロボットの身体的形状の差異によって 歩行の高効率化をはかったが,ロボットの制御則による面からのアプローチも十 分検討できると考えられる.実際のロボットへの適用も考えると,よりシンプル で高効率な制御則を構築させることは重要であると考えられる.

## 謝辞

本研究を進めるに当たり最後まで熱心にご指導いただいた浅野文彦准教授に心 より感謝致します.また,研究生活において同じロボティクスの分野から助言を 賜りました Ho Anh-Van 准教授,他分野ながら的確なご助言を賜りました平石 邦 彦教授,上原 隆平教授にも心よりの感謝を申し上げます.研究活動において最後 まで私の研究にご助力を賜りました近藤 亮輔氏及び西原 正継氏他浅野研究室の学 生皆にも深く御礼申し上げます.最後に,私を育ててここまで見守ってくれた家 族に深く感謝します.

## 参考文献

- W.-L. Ma, Y. Or and A. D. Ames, "Dynamic walking on slippery surfaces: demonstrating stable bipedal gaits with planned ground slippage," *Proc. of* the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 3705–3711, 2019.
- [2] K. Kaneko, F. Kanehiro, S. Kajita, M. Morisawa, K. Fujiwara, K. Harada and H. Hirukawa, "Slip observer for walking on a low friction floor," *Proc. of* the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 1457–1463, 2005.
- [3] T. McGeer, "Passive dynamic walking," The International Journal of Robotics Research, 9(2), pp. 62-82, 1990.
- [4] M. W. Gomes and K. Ahlin, "Quiet (neary collisionless) robotic walking," Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 5761–5766, 2015.
- [5] B. Wojciech and W. O. Shiehlen, "A control scheme for biped walking without impacts," *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, Vol. 187, pp. 313-321, 1993.
- [6] F. Asano, "Stealth walking of 3-link planar underactuated biped," Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 4118–4124, 2017.
- [7] 浅野 文彦,"角運動量拘束制御見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)-1A1-M01(4), 2018.
- [8] T. L. Brown and J. P. Schmiedeler, "Reaction wheel actuation for improving planar biped walking efficiency," *IEEE Trans. on Robotics*, Vol. 32, Issue 5, pp. 1290-1297, 2016.
- [9] 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.

- [10] F. Asano, S. Kobayashi, "Generation of strict stealth walking gait using upper body and reaction wheel," *Proc. of the IFAC PapersOnLine 52-16*, pp. 400-405, 2019.
- [11] P. Gregorio, M. Ahmadi and M. Buehler, "Design, control, and energetics of an electrically actuated legged robot," *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics-Part B: Cybernetics*, Vol. 27, no. 4, pp. 626-634, 1997.
- [12] 浅野 文彦, "線形化モデルを用いた半円足を持つ劣駆動2脚ロボットのステ 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-M02(1)-1A1-M02(4),2018.
- [13] F. Asano and Z.-W. Luo, "Dynamic analyses of underactuated virtual passive dynamic walking," *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 3210–3217, 2007.
- [14] R. Tedrake, T. W. Zhang, M. Fong and H. S. Seung, "Actuating a simple 3D passive dynamic walker," *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 4656–4661, 2004.
- [15] 浅野文彦,菊地保公,"膝関節を有する劣駆動2脚歩容の収束特性解析",ロボティクス・メカトロニクス講演会2014 講演論文集,pp.2A1-H07(1)-2A1-H07(4),2014.