

Title	遊脚着地時の運動エネルギー損失の低減化を考慮した 劣駆動2脚ロボットの歩容生成と制御
Author(s)	鄭, 彦秋
Citation	
Issue Date	2017-12
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/15067
Rights	
Description	Supervisor:浅野 文彦, 情報科学研究科, 修士

修 士 論 文

遊脚着地時の運動エネルギー損失の低減化を考慮
した劣駆動2脚ロボットの歩容生成と制御

北陸先端科学技術大学院大学
情報科学研究科

ZHENG Yanqiu

平成 29 年 12 月

修 士 論 文

遊脚着地時の運動エネルギー損失の低減化を考慮 した劣駆動2脚ロボットの歩容生成と制御

1510212 ZHENG Yanqiu

指導教官	浅野 文彦
審査委員主査	浅野 文彦
審査委員	平石 邦彦
	前園 涼

北陸先端科学技術大学院大学
情報科学研究科

平成 29 年 11 月

概 要

本論文では，上半身を有する脚移動ロボットのコリジョンレス歩容の生成と制御に関する手法について論ずる．まずリムレスホイールを対象として，コリジョンレス歩容生成法の基盤を構築する．次に提案する手法を2脚ロボットへと拡張し，生成されるコリジョンレス歩容の安定性および制御性能について議論する．

目次

第1章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究目的	1
1.3	本論文の構成	2
第2章	トルソーを持つリムレスホイールのコリジョンレス歩容	3
2.1	仕様	3
2.2	運動方程式	3
2.3	制御系設計	5
2.4	DODC(Discrete-time Output Deadbeat Control)	6
2.4.1	安定性解析と初期状態の最適解	7
2.4.2	シミュレーション結果	10
2.5	CODC(Continuous-time Output Deadbeat Control)	14
2.5.1	安定性解析と初期状態の最適解	14
2.5.2	シミュレーション結果	15
第3章	2脚ロボットへの拡張	19
3.1	仕様	19
3.2	運動方程式と制御系設計	19
3.3	シミュレーション結果	22
第4章	上半身を持つ2脚劣駆動ロボットのコリジョンレス歩容	26
4.1	上半身を持つリムレスホイールの仕様	26
4.1.1	運動方程式と制御系設計	26
4.1.2	シミュレーション結果	29
4.2	上半身を持つ2脚ロボットの場合	31
4.2.1	上半身を持つ2脚ロボット仕様	31
4.2.2	運動方程式と制御系設計	33
4.2.3	シミュレーション結果	35
第5章	障害物を乗り越える膝関節と上半身を持つ2脚ロボット	41
5.1	仕様	41

5.2	運動方程式	41
5.3	制御系設計	43
5.4	シミュレーション結果	45
第 6 章	まとめ	49
6.1	結論	49
6.2	今後の予定	49

第1章 序論

1.1 研究背景

近年、高い適応能力を持つ移動ロボットの研究開発が盛んである。足がなく、支持脚先端は地面と1点で接し、竹馬型のようなポイントフットを持つ脚移動ロボットは、特に高い適応能力を持つものとして注目されている [1]。しかし足首関節に制御トルクを印加することができないため、この劣駆動性により、直立静止状態に安定化することや任意の瞬間に運動を停止することは一般に困難である [2][3]。また、ロボット歩行中に遊脚と地面の衝突により、運動エネルギー損失を発生しシステムが不安定になる [4][5][6]。この問題は世界中の多くの研究者の間で議論されており、単脚に対してシミュレーション分析を通して実験で論じるのもあれば [7] 運動エネルギー損失に対して2脚ロボットで運動分析を行ったものもある [8]。2015年に最新研究 [9] により、1歩分の歩行運動を実現するためにリムレスホイールという基礎的なモデルに基づいて衝突しない歩容、つまりコリジョンレス歩容が実現したのだが、2脚ロボットに関するコリジョンレス歩容という研究例が少ない。

以上を踏まえ本研究では、竹馬型のようなポイントフットの劣駆動2脚ロボットを対象として、不整地踏破を目指した1歩分の歩行運動を確実に行うための制御方法について考察する。まず2脚モデルに対し、運動方程式を提出する。そして胴体と脚の間の相対トルクを用いて1歩で初期の静止状態から終端のそれへと遷移するための制御法を確立する。制御出力として支持脚の絶対角度と股関節の相対角度を設定し、主に目標時間軌道への追従制御を行うことで、スムーズな歩行運動を生成する。さらにシミュレーションを行い、歩幅などの基本パラメータを固定した上で、制御系の最適化も行う。

従来の劣駆動2脚ロボット制御の研究では、全力的エネルギーを単脚支持期に回復し、両脚支持期に消散するよう、定常歩行運動を設計する方針が一般的であった [10]。これに対し本研究は、運動エネルギーがゼロから最大値を通過してゼロへ戻るように歩容設計を行う点で異なる。それに最適化を通して、上半身の姿勢制御の安定性に関する数理的知見の獲得も期待できる。

1.2 研究目的

歩行ロボットは一般に、遊脚着地時に床面と脚先端位置の衝突により、運動エネルギーを損失する [5][6][9]。定常軌道を規範とする歩行運動では、これが大きな不安定化につながる [11]。これに対して本研究では、多様な路面環境において確実に1歩分の歩行運動を

実現するための、新しい歩容生成と制御の方法について考察する．生成される歩容では遊脚着地時の脚先端速度がゼロになるため、運動エネルギー損失が抑制されるという利点も併せ持つ [5]．平面劣駆動モデルを対象として歩容生成法の基礎を確立し、移動効率など性能の最適化を行う．さらに運動エネルギー損失しない歩容、つまりコリジョンレス歩容の安定性分析と実用性を解析し、シミュレーション通して論じる．

1.3 本論文の構成

本論文は本章を含めて 6 つの章で構成される．第 2 章では、リムレスホイールを通してコリジョンレス歩容の実現を探求し、主に Discrete-time Output Deadbeat Control(以後、DODC と称す) と Continuous-time Output Deadbeat Control(以後、CODC と称す) の 2 つの方向から制御系を提案して探求する．それに、コリジョンレス歩容の安定性を証明する．第 3 章は第 2 章の結果を 2 脚ロボットに拡張して議論する、そして 2 脚ロボットの上に第 4 章に上半身を利用する．上半身はどのようにコリジョンレス歩容に影響するか、どのように安定性を保持するかを論じる．第 5 章は实际的に障害物を乗り越える場合は膝関節を持つ 2 脚ロボットはどのように制御するのかを探求する．

第2章 トルソーを持つリムレスホイールのコリジョンレス歩容

本章ではトルソーを持つリムレスホイールのコリジョンレス歩容を生成し，運動解析を行う．そして安定性の分析を行い，最適解を求める．解析は数値シミュレーションによって行い，MATLAB を使用する．

2.1 仕様

本章では図 2.1 に示すトルソーを持つリムレスホイールを扱う．数値シミュレーションにおいて以下の仮定をおく．

- 8 本の脚リンクから構成されるスポーク型である．したがって，隣り合う脚フレーム間の相対角度は $\alpha = \pi/4$ [rad] となる．
- 脚と地面との接地点は滑らない．
- 全質量を m [kg] とする．
- トルソーの慣性モーメントを I [kg·m²] とする．
- 支持脚の絶対角度を θ_1 [rad]，トルソーの絶対角度を θ_2 [rad] とする．
- 回転駆動力 u がトルソーとリムレスホイールの間に印加できる．

2.2 運動方程式

ロボットの運動方程式は Lagrange 方程式を用いて導出する．一般化座標ベクトルを

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} x & z & \theta_1 & \theta_2 \end{bmatrix}^T \quad (2.1)$$

とすると，ロボットの運動方程式は

$$M(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{h}(\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q}) = S\mathbf{u} + \mathbf{J}^T\boldsymbol{\lambda} \quad (2.2)$$

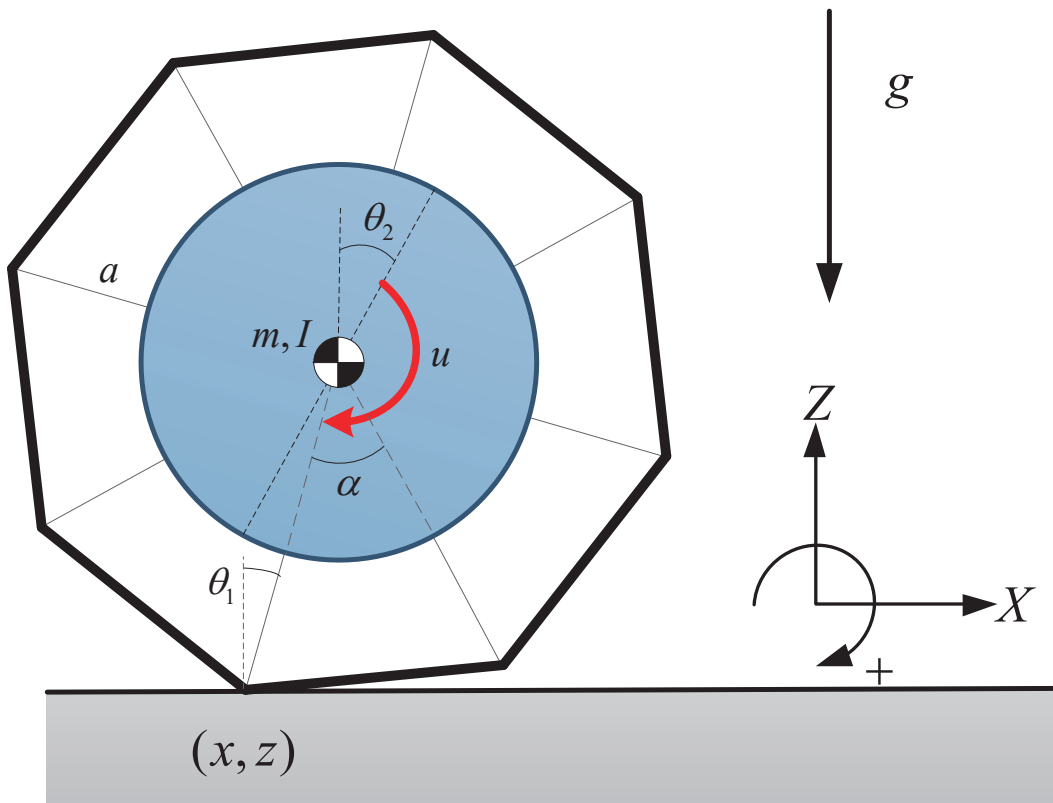


図 2.1: トルソーを持つリムレスホイール

であり，速度拘束条件式は

$$J\dot{q} = \mathbf{0}_{2 \times 1} \quad (2.3)$$

である．式 (2.2) 中の $M(q)$ は慣性行列， $h(\dot{q}, q)$ はコリオリ力・中心力項に重力項を加えたベクトルである．式 (2.2) の右辺第 1 項は入力ベクトルであり，

$$Su = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ -1 \end{bmatrix} u \quad (2.4)$$

である．また，右辺第 2 項は床面と脚先端に作用するホロノミック拘束力項であり，脚と地面との接地点は滑らないので，以下の条件を成立する．

$$\dot{x} = 0, \dot{z} = 0 \quad (2.5)$$

式 (2.3) はその速度拘束条件式である．式 (2.5) により，ヤコビアン J は

$$J = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

となる．式 (2.2) 式 (2.3) より未定乗数ベクトル λ を消去すると，次のように整理される．

$$M(q)\ddot{q} = Y(q)(Su - h(\dot{q}, q)) \quad (2.7)$$

ただし，

$$X(q) := JM(q)^{-1}J^T \quad (2.8)$$

$$Y(q) := I_4 - J^T X(q)^{-1}JM(q)^{-1} \quad (2.9)$$

と置いた．

2.3 制御系設計

コリジョンレス歩容を実現する場合は支持脚の絶対角度のみを制御出力 y とする．つまり，

$$y := \theta_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} q = Cq \quad (2.10)$$

である．ここで， C は制御出力行列であり，2 階時間微分すると，

$$\ddot{y} = C\ddot{q} \quad (2.11)$$

となるので，式 (2.7) より $\ddot{y} = v$ を達成するための制御入力 u は

$$u = A(q)^{-1}(v + B(q, \dot{q})) \quad (2.12)$$

と決定できる．ただし，

$$A(q) := CM(q)^{-1}Y(q)S \quad (2.13)$$

$$B(q, \dot{q}) := CM(q)^{-1}Y(q)h(q, \dot{q}) \quad (2.14)$$

と置いた．ここで，

$$\xi := \theta_1 - \frac{\alpha}{2} \quad (2.15)$$

と定義すると，1 階，2 階時間微分した結果は以下のように得られる．

$$\dot{\xi} = \dot{\theta}_1 \quad (2.16)$$

$$\ddot{\xi} = \ddot{\theta}_1 = v \quad (2.17)$$

制御出力の状態方程は次のようになる．

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \xi \\ \dot{\xi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi \\ \dot{\xi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} v \quad (2.18)$$

2.4 DODC(Discrete-time Output Deadbeat Control)

T^* [s] を単脚支持期間と定義する．なお，リアルタイム t [s] は毎歩後にリセットされ，範囲は 0 から T^* までに限られる．コリジョンレス歩容を実現するなら，式 (2.18) に対して以下の条件を満足しなければならない．

1. 初期状態 : $\xi(0) = -\alpha, \dot{\xi}(0) = 0$
2. 目標状態 : $\xi(T^*) = 0, \dot{\xi}(T^*) = 0$

状態方程式 (2.18) を $T^*/2$ で離散化すると，

$$\begin{bmatrix} \xi[i+1] \\ \dot{\xi}[i+1] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{T^*}{2} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi[i] \\ \dot{\xi}[i] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{(T^*)^2}{8} \\ \frac{T^*}{2} \end{bmatrix} v[i] \quad (2.19)$$

が得られる．ここで，

$$\xi[i] = \xi\left(\frac{T^*}{2}i\right), \dot{\xi}[i] = \dot{\xi}\left(\frac{T^*}{2}i\right), v[i] = v\left(\frac{T^*}{2}i\right) \quad (2.20)$$

と置いた．式 (2.19) を以下のように定義する．

$$\mathbf{x}[i+1] = \mathbf{A}\mathbf{x}[i] + \mathbf{B}v[i] \quad (2.21)$$

制御出力 $v[i] = \mathbf{F}\mathbf{x}[i]$ と定義し， $(\mathbf{A} + \mathbf{B}\mathbf{F})$ の固有値がすべてゼロになればコリジョンレス歩容条件を満足する [12]，つまり $\mathbf{x}[2] = \mathbf{0}_{2 \times 1}$ が達成できる．フィードバックゲイン $\mathbf{F}$ は

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} -\frac{4}{(T^*)^2} & -\frac{3}{T^*} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

である．それぞれの状態変化は以下のように計算される．

$$\mathbf{x}[0] = \begin{bmatrix} -\alpha \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{x}[1] = \begin{bmatrix} -\frac{\alpha}{2} \\ \frac{2\alpha}{T^*} \end{bmatrix}, \mathbf{x}[2] = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

式 (2.23) により， $\xi[2] = 0$ または $\theta(T^*) = \alpha/2$ が実現でき，制御出力 v の状態変化は

$$v[0] = \frac{4\alpha}{(T^*)^2}, v[1] = -\frac{4\alpha}{(T^*)^2}, v[2] = 0 \quad (2.24)$$

である．

2.4.1 安定性解析と初期状態の最適解

支持脚角度は1歩ごとに $\theta_1(0) = -\frac{\alpha}{2}$ から $\theta_1(T^*) = \frac{\alpha}{2}$ まで変化する．式 (2.17) 式 (2.24) により， $0 \leq t < \frac{T^*}{2}$ の範囲内において，支持脚の角速度と角度は

$$\dot{\theta}_1(t) = \dot{\theta}_1(0) + v[0]t = \frac{4\alpha}{(T^*)^2}t \quad (2.25)$$

$$\theta_1(t) = \theta_1(0) + \int_0^t \dot{\theta}_1(t) dt = -\frac{\alpha}{2} + \frac{2\alpha}{(T^*)^2}t^2 \quad (2.26)$$

である．同じく， $\frac{T^*}{2} \leq t < T^*$ の範囲内において，支持脚の角速度と角度は

$$\dot{\theta}_1(t) = \dot{\theta}_1\left(\frac{T^*}{2}\right) + v[1]\left(t - \frac{T^*}{2}\right) = \frac{4\alpha}{(T^*)^2}(T^* - t) \quad (2.27)$$

$$\theta_1(t) = \theta_1\left(\frac{T^*}{2}\right) + \int_{T^*/2}^t \dot{\theta}_1(t) dt = \frac{\alpha}{2} - \frac{2\alpha}{(T^*)^2}(T^* - t)^2 \quad (2.28)$$

である．そのため，以下の関係が成立する．

$$\dot{\theta}_1(t) = \dot{\theta}_1(T^* - t) \quad (2.29)$$

$$\theta_1(t) = -\theta_1(T^* - t) \quad (2.30)$$

式 (2.2) より，トルソーの角加速度は

$$\ddot{\theta}_2 = -I^{-1}u \quad (2.31)$$

であり，単脚支持期間が終わる直前にトルソーの角速度は

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_2(T^*) &= \dot{\theta}_2(0) - I^{-1} \int_0^{T^*} u(t) dt \\ &= \dot{\theta}_2(0) - \frac{ma^2}{I} \int_0^{T^*} v(t) dt + \frac{mga}{I} \int_0^{T^*} \sin \theta_1(t) dt \end{aligned} \quad (2.32)$$

である．ここで，

$$\int_0^{T^*} v(t) dt = \int_0^{T^*/2} v[0] dt + \int_{T^*/2}^{T^*} v[1] dt = 0 \quad (2.33)$$

$$\begin{aligned} \int_0^{T^*} \sin \theta_1(t) dt &= \int_0^{T^*/2} \sin \theta_1(t) dt + \int_0^{T^*/2} \sin \theta_1(T^* - t) dt \\ &= \int_0^{T^*/2} \sin \theta_1(t) dt - \int_0^{T^*/2} \sin \theta_1(t) dt = 0 \end{aligned} \quad (2.34)$$

である．以上より，式 (2.32) は以下のように整理される．

$$\dot{\theta}_2(T^*) = \dot{\theta}_2(0) \quad (2.35)$$

これは，ロボットが1歩移動した後にトルソーの角速度が初期状態に戻ることを示した．式 (2.35) が成立すると，式 (2.33) 式 (2.34) がゼロになるとの条件が必要である．また，式 (2.17) では $v(t) = \ddot{\xi}(t)$ は $\theta_1(t)$ の2階微分の式であり，支持脚の絶対角度に決まるため， $v(t)$ の設計が非常に重要になる．コリジョンレス歩容の条件により， $v(t)$ が最初に負から最後に正までの変化をしなければならない．それなら，支持脚は最初に加速してから減速し，トルソーは反対に減速してから加速する．

システムの安定性を確立する場合は，すべての角速度はもちろんすべての角度も初期状態に戻らなければならない．ロボットが1歩移動した後にトルソーの角度は

$$\begin{aligned} \theta_2(T^*) &= \theta_2(0) + \int_0^{T^*} \dot{\theta}_2(t) dt \\ &= \theta_2(0) + \int_0^{T^*} \left(\dot{\theta}_2(0) - I^{-1} \int_0^t u dt \right) dt \\ &= \theta_2(0) + \dot{\theta}_2(0)T^* - \int_0^{T^*} \left(\frac{ma^2}{I} \int_0^t v(t) dt - \frac{mga}{I} \int_0^t \sin \theta_1(t) dt \right) dt \end{aligned} \quad (2.36)$$

である．ここで， $v(t)$ の1階積分は以下ようになる．

$$\int_0^t v(t) dt = \begin{cases} \int_0^t \frac{4\alpha}{(T^*)^2} dt & 0 \leq t < \frac{T^*}{2} \\ \int_0^{T^*/2} \frac{4\alpha}{(T^*)^2} dt + \int_{T^*/2}^t -\frac{4\alpha}{(T^*)^2} dt & \frac{T^*}{2} \leq t < T^* \end{cases} \quad (2.37)$$

整理すると，

$$\int_0^t v(t) dt = \begin{cases} \frac{4\alpha}{(T^*)^2} t & 0 \leq t < \frac{T^*}{2} \\ \frac{4\alpha}{T^*} - \frac{4\alpha}{(T^*)^2} t & \frac{T^*}{2} \leq t < T^* \end{cases} \quad (2.38)$$

である． $v(t)$ の2階積分は

$$\begin{aligned} \int_0^{T^*} \int_0^t v(t) dt dt &= \int_0^{T^*/2} \int_0^t v(t) dt dt + \int_{T^*/2}^{T^*} \int_0^t v(t) dt dt \\ &= \int_0^{T^*/2} \frac{4\alpha}{(T^*)^2} t dt + \int_{T^*/2}^{T^*} \left(\frac{4\alpha}{T^*} - \frac{4\alpha}{(T^*)^2} t \right) dt \\ &= \frac{\alpha}{2} + \alpha - \frac{\alpha}{2} = \alpha \end{aligned} \quad (2.39)$$

である． $\sin \theta_1(t)$ は積分できないため，級数展開を利用し，整理すると，

$$\sin \theta_1(t) = \begin{cases} \sin \left(-\frac{\alpha}{2} + \frac{2\alpha}{(T^*)^2} t^2 \right) & 0 \leq t < \frac{T^*}{2} \\ \sin \left(\frac{\alpha}{2} - \frac{2\alpha}{(T^*)^2} (T^* - t)^2 \right) & \frac{T^*}{2} \leq t < T^* \end{cases} \quad (2.40)$$

$$\sin \theta_1(t) = \begin{cases} A_1 + O(t^2) & 0 \leq t < \frac{T^*}{2} \\ A_2 + B_2 t + O(t^2) & \frac{T^*}{2} \leq t < T^* \end{cases} \quad (2.41)$$

である．ただし，

$$A_1 := -\sin \left(\frac{\alpha}{2} \right), \quad A_2 := -\sin \left(\frac{3\alpha}{2} \right), \quad B_2 := \frac{4\alpha}{T^*} \cos \left(\frac{3\alpha}{2} \right) \quad (2.42)$$

と置いた． $\sin \theta_1(t)$ の 1 階積分は

$$\int_0^t \sin \theta_1(t) dt = \begin{cases} \int_0^t A_1 dt & 0 \leq t < \frac{T^*}{2} \\ \int_0^{T^*/2} A_1 dt + \int_{T^*/2}^t (A_2 + B_2 t) dt & \frac{T^*}{2} \leq t < T^* \end{cases} \quad (2.43)$$

$$\int_0^t \sin \theta_1(t) dt = \begin{cases} A_1 t & 0 \leq t < \frac{T^*}{2} \\ A_2 t + \frac{B_2}{3} t^2 + C & \frac{T^*}{2} \leq t < T^* \end{cases} \quad (2.44)$$

であり，ただし，ここで C は以下のように定義する．

$$C := A_1 \frac{T^*}{2} - A_2 \frac{T^*}{2} - \frac{B_2}{2} \left(\frac{T^*}{2} \right)^2 \quad (2.45)$$

$\sin \theta_1(t)$ の 2 階積分は

$$\begin{aligned} \int_0^{T^*} \int_0^t \sin \theta_1(t) dt dt &= \int_0^{T^*/2} \int_0^t \sin \theta_1(t) dt dt + \int_{T^*/2}^{T^*} \int_0^t \sin \theta_1(t) dt dt \\ &= \int_0^{T^*/2} A_1 t dt + \int_{T^*/2}^{T^*} \left(A_2 t + \frac{B_2}{6} t^2 + C \right) dt \\ &= \frac{B_2}{48} (T^*)^3 + \left(\frac{A_1}{8} + \frac{3A_2}{8} \right) (T^*)^2 + \frac{C}{2} T^* \end{aligned} \quad (2.46)$$

である．ここで

$$\omega := -\frac{ma^2}{I} \alpha + \frac{mga}{I} \left(\frac{B_2}{48} (T^*)^3 + \left(\frac{A_1}{8} + \frac{3A_2}{8} \right) (T^*)^2 + \frac{C}{2} T^* \right) \quad (2.47)$$

と定義される．1 歩後に状態をリセットしないとすると， $n(> 0)$ 歩目のトルソーの角度は

$$\theta_2[n] = \theta_2[0] + n(\dot{\theta}_2[0]T^* + \omega) \quad (2.48)$$

である．ロボット運動システムが発散せず，運動し続けるためには，

$$\theta_2[n] = \theta_2[0] \quad (2.49)$$

を満足しなければならない．つまり，1 歩後にシステムの状態は初期状態に戻らなければならない．そうでなければ，誤差が累積し，システムは発散することになる．そのため，トルソーの初期速度は

$$\dot{\theta}_2(0) = \frac{-\omega}{T^*} \quad (2.50)$$

を満たさなければならない．

以上提案した安定性解析方法は，コリジョンレス歩容に対して，2 脚を有する場合や，上半身を有する場合などにも運用することができる．ただし，自由度を増やすと，解析に必要な計算量が多くなる．

2.4.2 シミュレーション結果

表 2.1 に示す値に物理パラメータを設定して数値シミュレーションを行った．ここで 1 歩移動する期間 $T^* = 0.8$ [s] と設定し，トルソーの初期速度は数値解を利用した．

図 (2.2) はロボットの支持脚の絶対角度とトルソーの絶対角度の時間変化を表す，1 歩移動するごとに支持脚角度は $-\alpha/2$ から $\alpha/2$ まで変化すること，トルソーは初期角度に戻ることが確立された．図 (2.3) はロボットの支持脚とトルソーの絶対角速度の時間変化を表す．1 歩の移動が終了する瞬間に支持脚の角速度がゼロになり，コリジョンレス歩容を実現した．トルソーの角速度は初期角速度に戻って安定性を保証した．図 (2.4) 図 (2.5) は支持脚とトルソーの位相平面図であり，安定していることが容易にわかる．図 (2.6) は制御入力を表し，図 (2.7) は床反力の時間変化を示す． z 方向の床反力は常にゼロ以上であり，地面から飛び上がることなく，歩行が実現された．

表 2.1: トルソーを持つリムレスホイールの物理パラメータ

m	2.5	kg
a	1	m
I	1	kg·m ²
α	$\pi/4$	rad

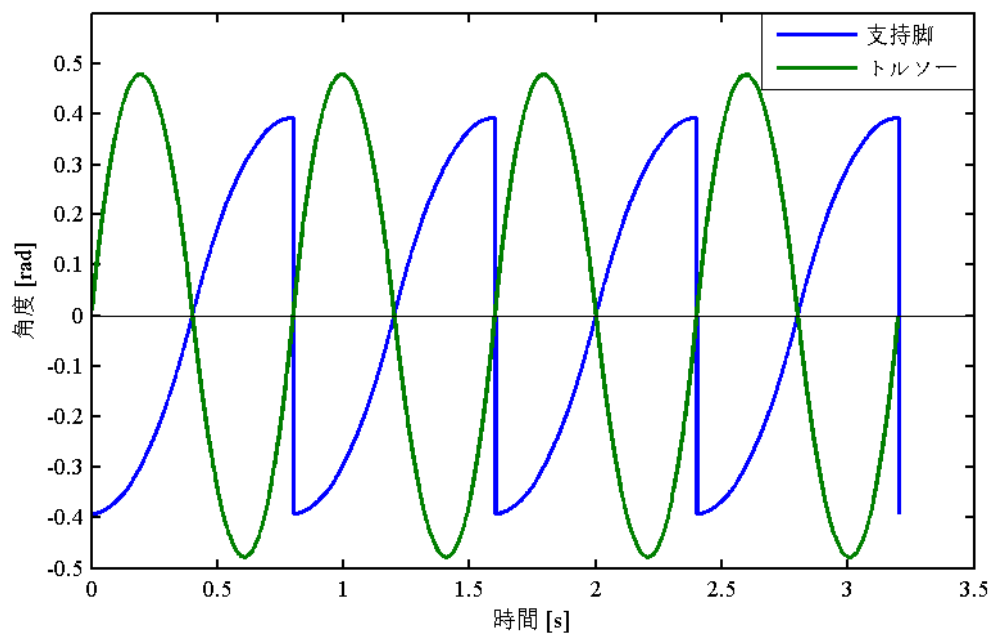


図 2.2: DODC:トルソーを持つリムレスホイールの角度の時間変化

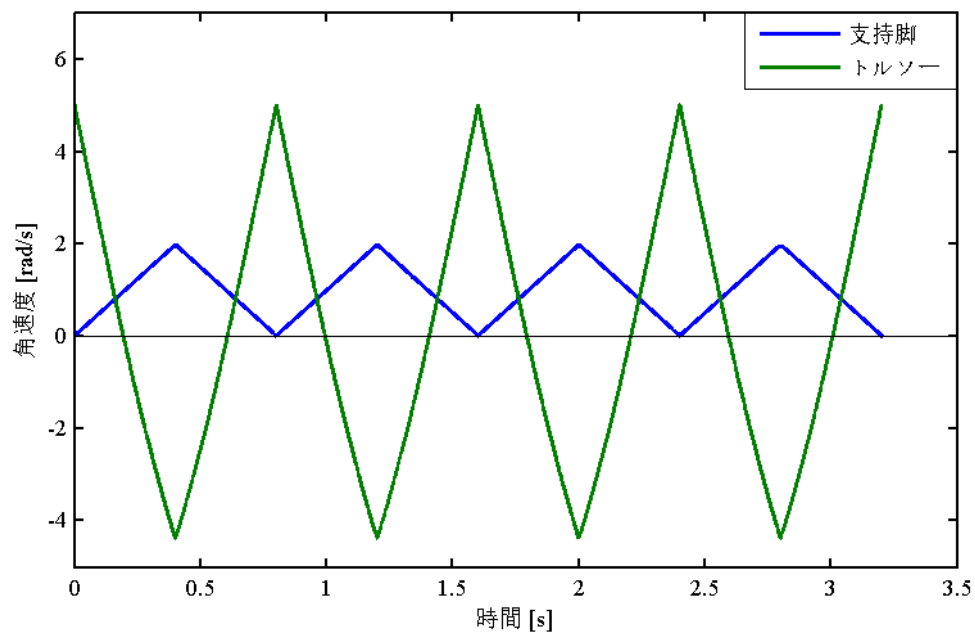


図 2.3: DODC:トルソーを持つリムレスホイールの角速度の時間変化

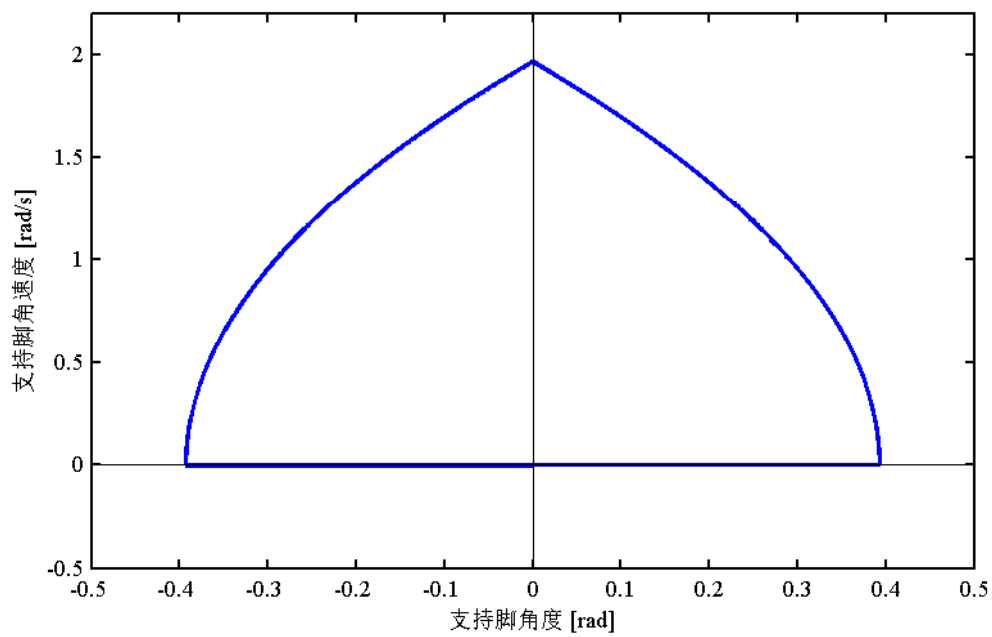


図 2.4: DODC:トルソーを持つリムレスホイールの支持脚の位相平面図

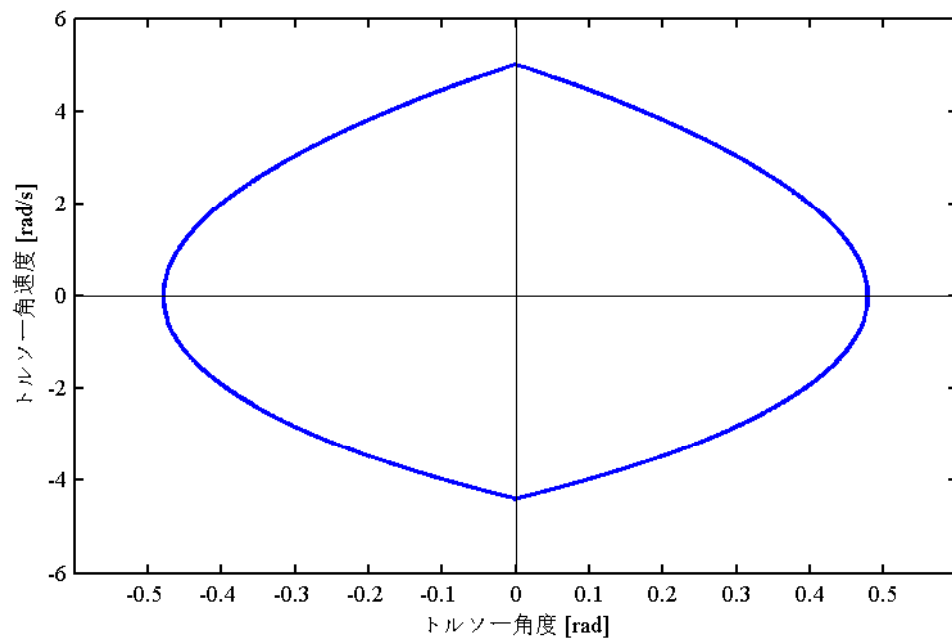


図 2.5: DODC:トルソーを持つリムレスホイールのトルソーの位相平面図

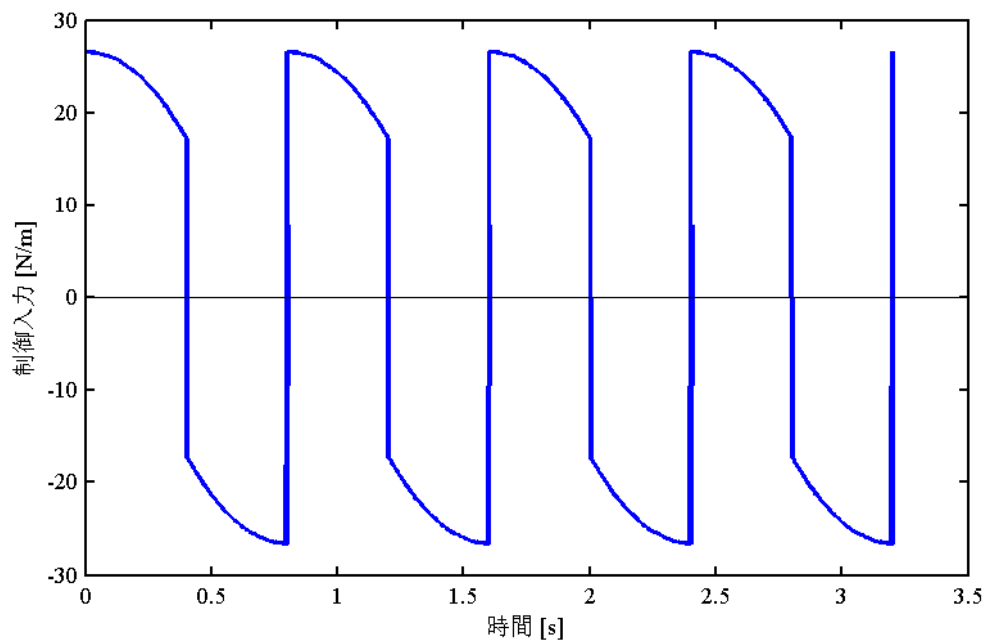


図 2.6: DODC:トルソーを持つリムレスホイールの制御入力の時間変化

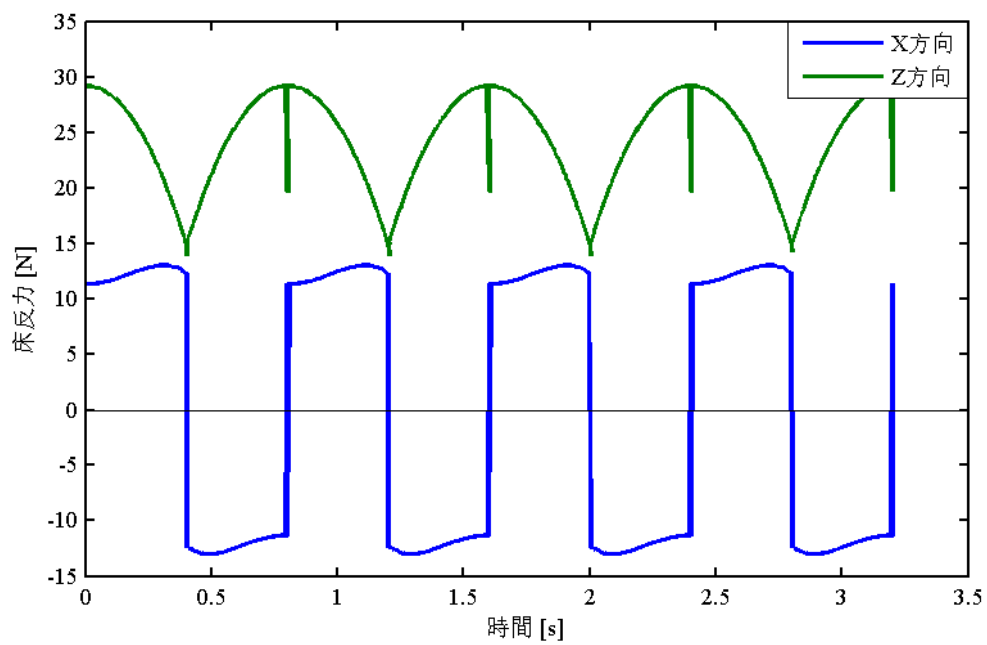


図 2.7: DODC:トルソーを持つリムレスホイールの床反力の時間変化

2.5 CODC(Continuous-time Output Deadbeat Control)

本節はDODCよりもスムーズな曲線を利用し，コリジョンレス歩容を実現する方法としてCODCを提案する． $v(t)$ を確立するために，以下のように定義した．

$$v(t) = \ddot{\xi}(t) = v_0 \cos\left(\frac{\pi}{T^*}t\right) \quad (2.51)$$

ここで， v_0 は境界を決定するパラメータで，式(2.51)は以下の条件を満足する．

$$\ddot{\xi}(0) = v_0, \quad \ddot{\xi}(T^*) = -v_0 \quad (2.52)$$

式(2.30)の対応関係を満足するために，ここでDODCと異なりCODCは目標軌道関数 $v(t)$ をコサイン関数と利用すれば，DODCのように $v(0) = v[0]$ と $v(T^*) = v[1] = -v[0]$ をつなぐことができる．式(2.51)を積分すると，

$$\dot{\xi}(t) = \frac{T^*}{\pi} v_0 \sin\left(\frac{\pi}{T^*}t\right) + \dot{\xi}(0) \quad (2.53)$$

が得られる．ここで

$$\dot{\xi}(0) = 0 \quad (2.54)$$

と仮定し，さらに式(2.53)を積分すると，

$$\xi(t) = -\left(\frac{T^*}{\pi}\right)^2 v_0 \cos\left(\frac{\pi}{T^*}t\right) + C \quad (2.55)$$

になる，ここで， C が定数で，境界条件

$$\xi(0) = -\alpha, \quad \xi(T^*) = 0 \quad (2.56)$$

により，

$$v_0 = \frac{\alpha}{2} \left(\frac{\pi}{T^*}\right)^2 \quad (2.57)$$

が導出される．

2.5.1 安定性分析と初期状態の最適解

前述したDODCの内容と同じく支持脚角度は1歩移動するごとに $\theta_1(0) = -\frac{\alpha}{2}$ から $\theta_1(T^*) = \frac{\alpha}{2}$ まで変化する．式(2.55)より支持脚の角度は

$$\theta_1(t) = -\frac{\alpha}{2} \cos\left(\frac{\pi}{T^*}t\right) \quad (2.58)$$

であり，式(2.30)の関係を満足する．加えて，式(2.49)の対応関係も満足する．そのため，トルソーの初期状態は式(2.50)のように計算できる．

2.5.2 シミュレーション結果

表 2.1 に示す値に物理パラメータを設定して数値シミュレーションを行った．DODC と同じくコリジョンレス歩容を実現した．ただし，CODC の場合は，制御出力がよりスムーズな曲線を利用するため，図 (2.9) より，支持脚とトルソーの絶対角速度もよりスムーズに変化することがわかる．

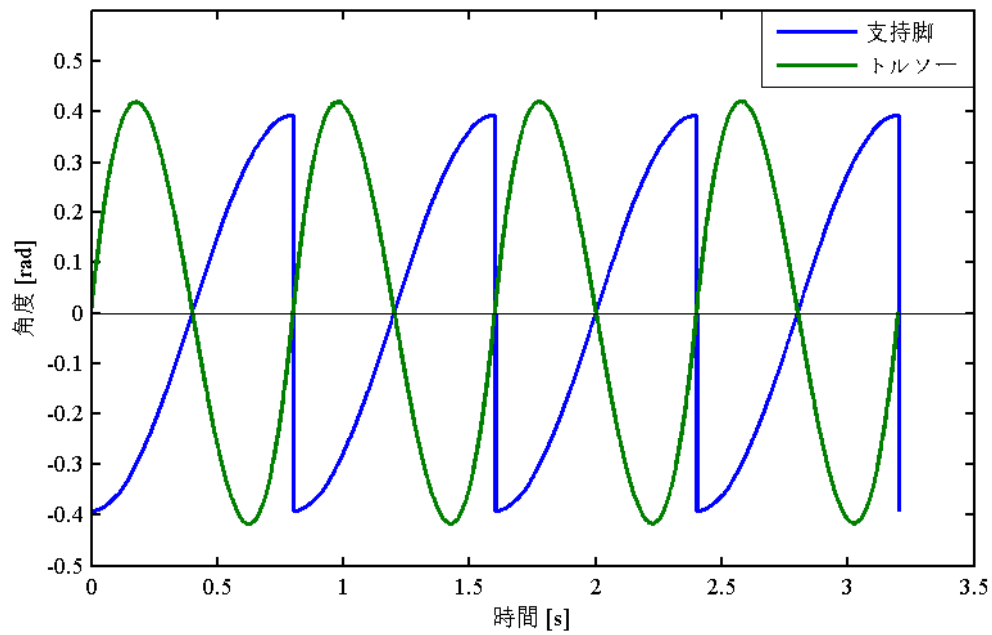


図 2.8: CODC:トルソーを持つリムレスホイールの角度の時間変化

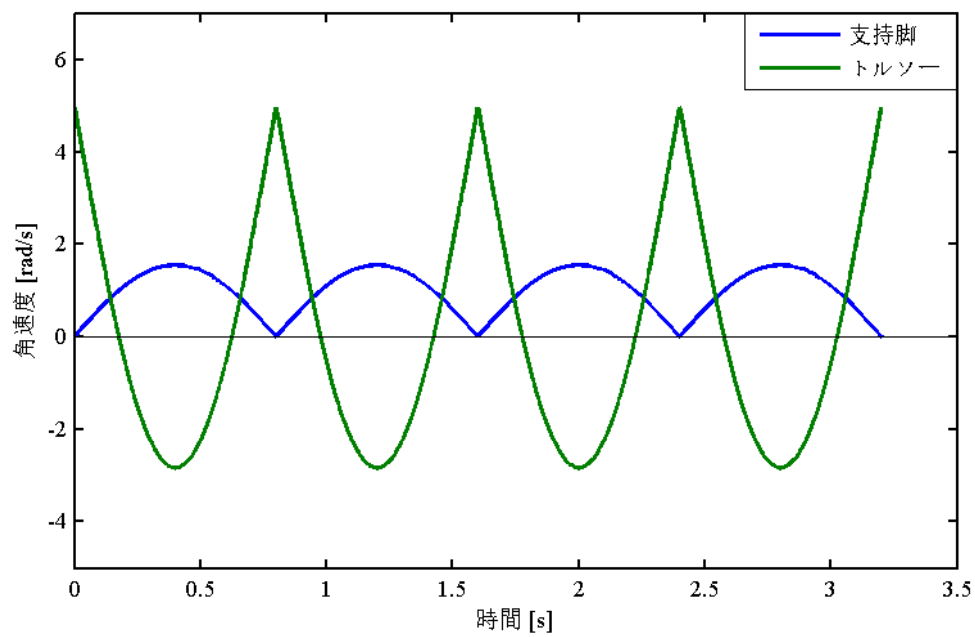


図 2.9: CODC:トルソーを持つリムレスホイールの角速度の時間変化

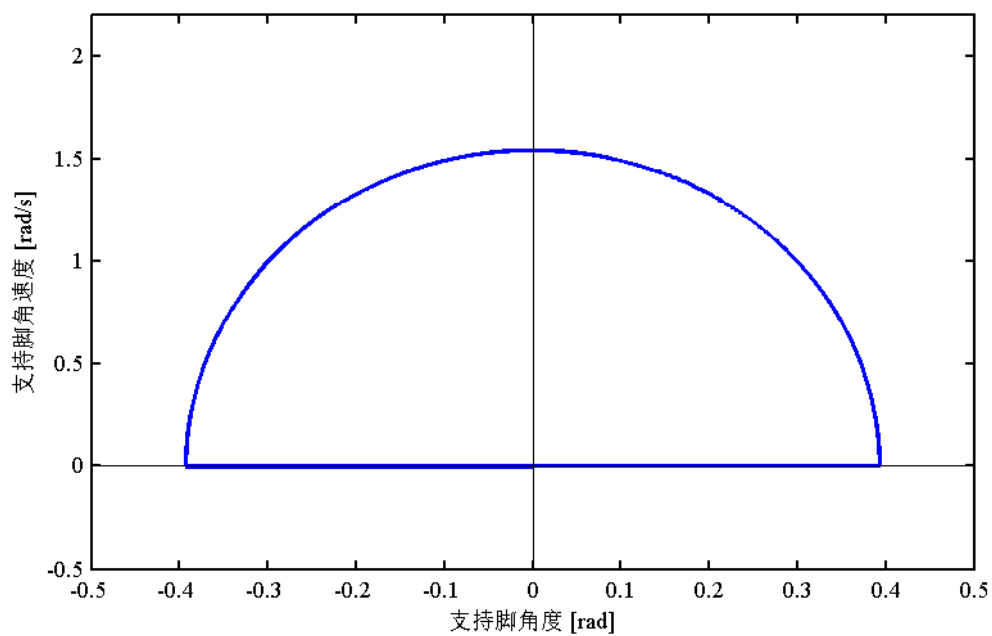


図 2.10: CODC:トルソーを持つリムレスホイールの支持脚の位相平面図

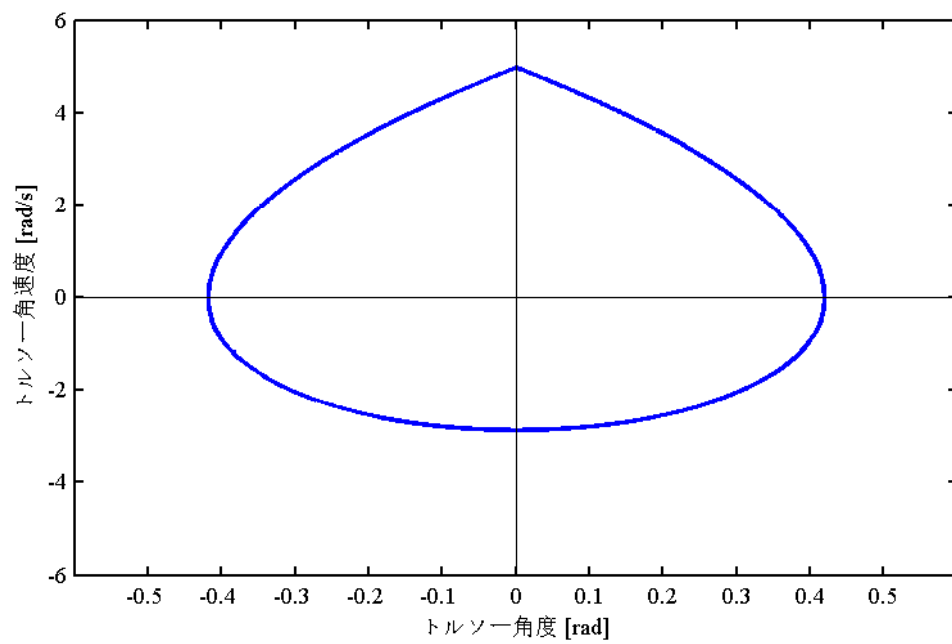


図 2.11: CODC:トルソーを持つリムレスホイールのトルソーの位相平面図

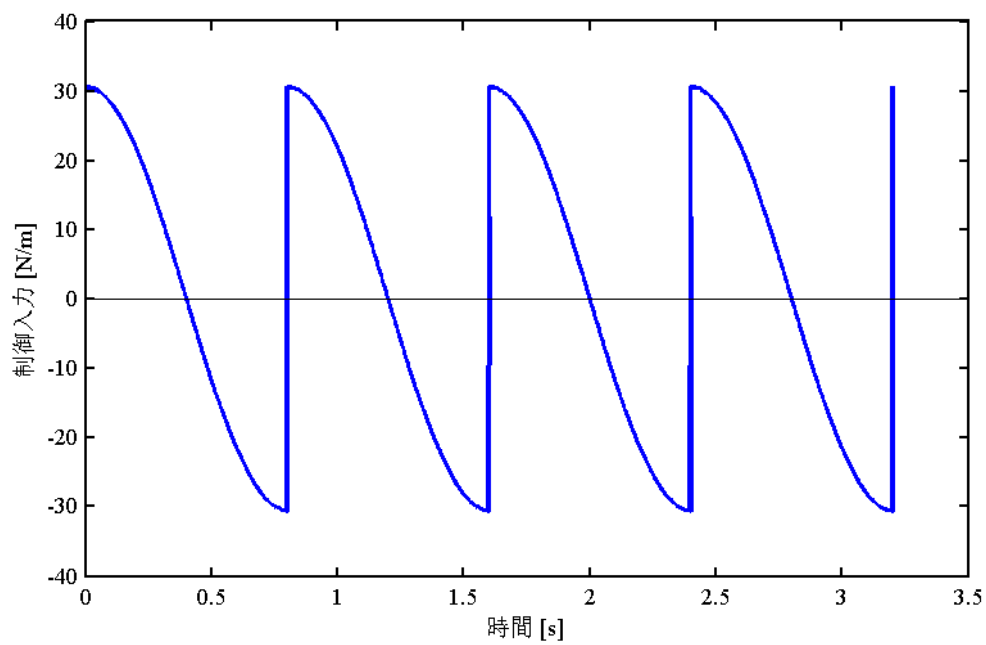


図 2.12: CODC:トルソーを持つリムレスホイールの制御入力の時間変化

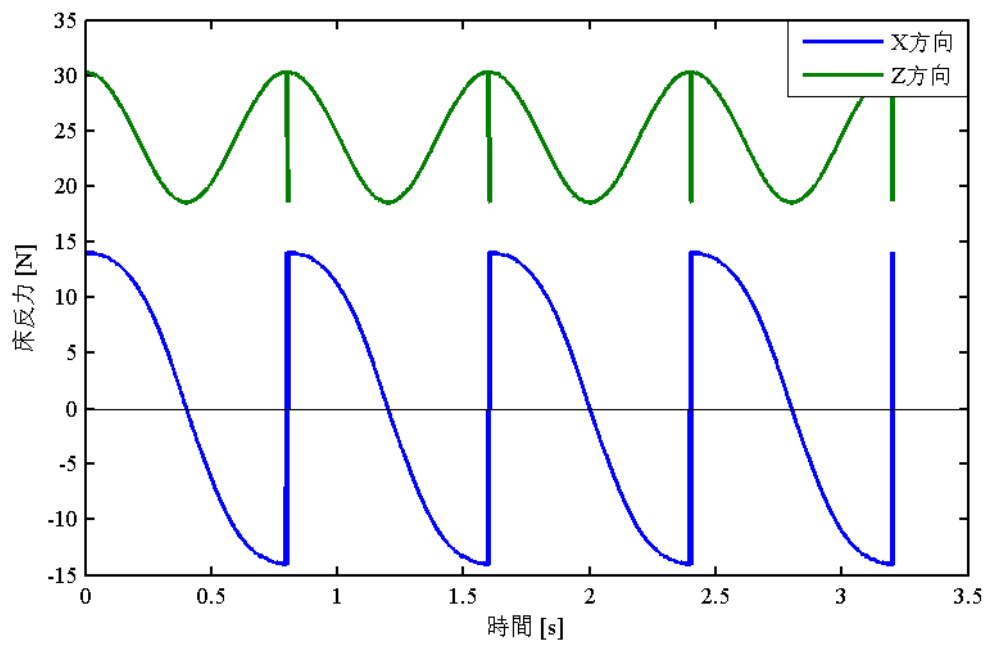


図 2.13: CODC:トルソーを持つリムレスホイールの床反力の時間変化

第3章 2脚ロボットへの拡張

本章では，第2章のコリジョンレス歩容を実現した結果を，2脚ロボットへ拡張する．単脚支持期における遊脚先端と地面との間のクリアランスを保証するために，新たな制御系を提案する．

3.1 仕様

本章では図3.1に示すトルソーを持つ2脚劣駆動ロボットを扱う．数値シミュレーションにおいて以下の仮定をおく．

- 脚と地面との接地点は滑らない．
- 脚の長さを L [m] とし，質量を m [kg] とする．
- トルソーの全質量を m_H [kg] とし，慣性モーメントを I [kg·m²] とする．
- 支持脚の絶対角度を θ_1 [rad]，遊脚の絶対角度を θ_2 [rad]，トルソーの絶対角度を θ_3 [rad] とする．
- 回転駆動力 u_1 をトルソーと支持脚の間に， u_2 をトルソーと遊脚の間にそれぞれ印加できる．

3.2 運動方程式と制御系設計

ロボットの運動方程式は Lagrange 方程式を用いて導出する．一般化座標ベクトルを

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} x & z & \theta_1 & \theta_2 & \theta_3 \end{bmatrix}^T \quad (3.1)$$

とすると，ロボットの運動方程式は

$$M(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{h}(\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q}) = \mathbf{S}\mathbf{u} + \mathbf{J}^T\boldsymbol{\lambda} \quad (3.2)$$

であり，速度拘束条件式は

$$\mathbf{J}\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{0}_{2 \times 1} \quad (3.3)$$

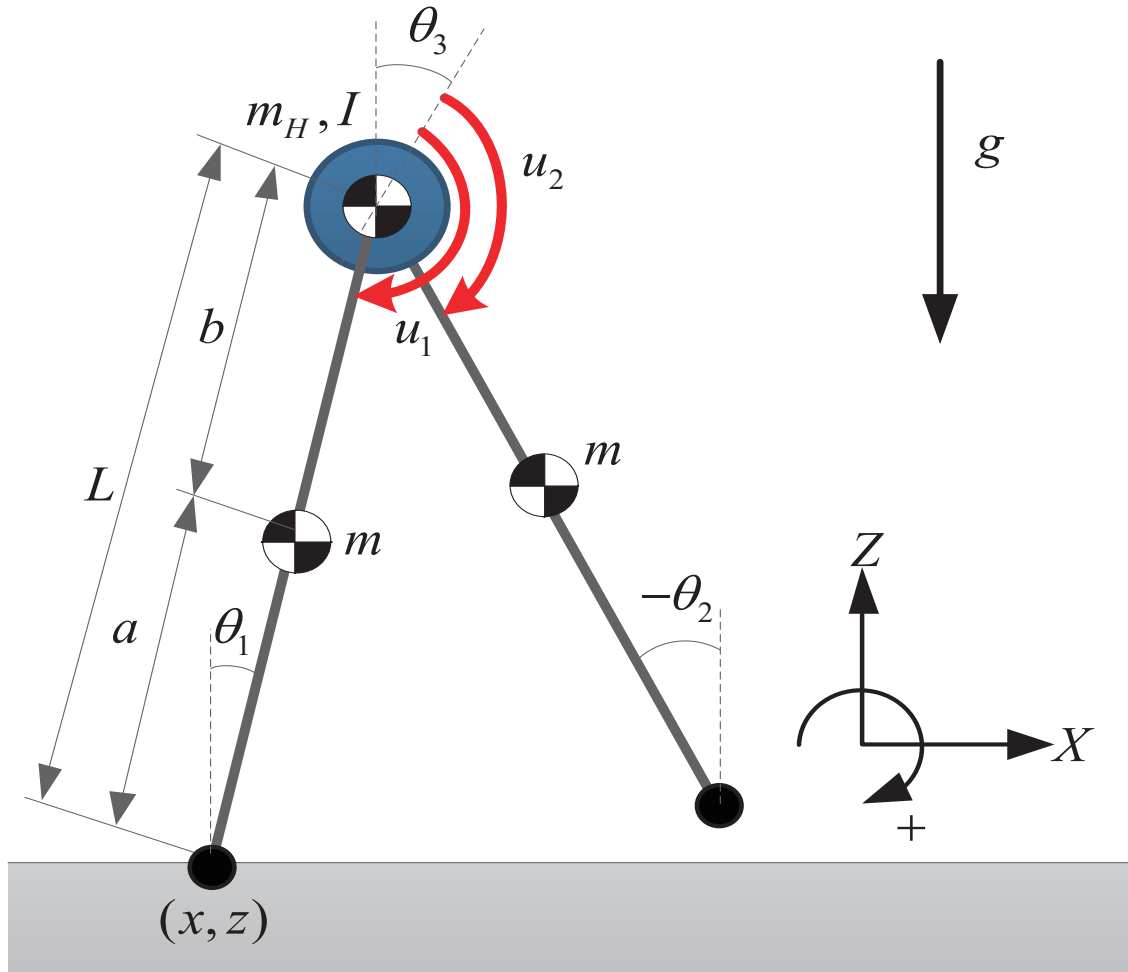


図 3.1: トルソーを持つ 2 脚歩駆動ロボット

となる．式 (3.2) 中の $M(q)$ は慣性行列， $h(\dot{q}, q)$ はコリオリ力・中心力項に重力項を加えたベクトルである．式 (3.2) の右辺第 1 項は入力ベクトルであり，

$$Su = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

である．また，右辺第 2 項は床面と脚先端に作用するホロノミック拘束力項であり，脚と地面との接地点は滑らないため，以下の条件を成立する．

$$\dot{x} = 0, \dot{z} = 0 \quad (3.5)$$

式 (3.3) はその速度拘束条件式である．式 (3.5) より，ヤコビアン J は

$$J = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

となる．式 (3.2) 式 (3.3) より未定乗数ベクトル λ を消去すると，次のように整理される．

$$M(q)\ddot{q} = Y(q)(Su - h(\dot{q}, q)) \quad (3.7)$$

ただし，

$$X(q) := JM(q)^{-1}J^T \quad (3.8)$$

$$Y(q) := I_5 - J^T X(q)^{-1}JM(q)^{-1} \quad (3.9)$$

と置いた．コリジョンレス歩容を実現する場合は支持脚と遊脚の絶対角度を制御出力 y とする．つまり，

$$y := \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} q = Cq \quad (3.10)$$

と置く．ここで， C は制御出力行列であり，2 階時間微分すると，

$$\ddot{y} = C\ddot{q} \quad (3.11)$$

となるので，式 (3.7) より $\ddot{y} = v$ を達成するための制御入力 u は

$$u = A(q)^{-1}(v + B(q, \dot{q})) \quad (3.12)$$

と決定できる．ただし，

$$A(q) := CM(q)^{-1}Y(q)S \quad (3.13)$$

$$B(q, \dot{q}) := CM(q)^{-1}Y(q)h(q, \dot{q}) \quad (3.14)$$

と置いた．第 2 章の結論によって，CODC の制御系のように設定すると，コリジョンレス歩容が実現される．しかし，遊脚先端高さは

$$H_f = z + l \cos \theta_1 - l \cos \theta_2 \quad (3.15)$$

であって，式 (3.15) より，2 脚の場合は支持脚と遊脚との角度変化率が同じになると，支持脚と遊脚は対称的に動き，遊脚先端は常に支持脚先端と同じ高さになり，地面と接触したまま歩くことになってしまう．そのため，地面からの摩擦により，ロボットは歩くことができなくなる．そこで，非対称化関数 $F_d(t)$ を利用し，制御出力は以下のように設定する．

$$v = \begin{bmatrix} \alpha \left(\frac{\pi}{T^*} \right)^2 \cos \left(\frac{\pi}{T^*} t \right) \\ -\alpha \left(\frac{\pi}{T^*} \right)^2 \cos \left(\frac{\pi}{T^*} t \right) + \ddot{F}_d(t) \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

コリジョンレス歩容を達成するために，ここで非対称化関数は以下の条件を満足しなければならない．

$$F_d(0) = 0, \dot{F}_d(0) = 0, F_d\left(\frac{T^*}{2}\right) = 0 \quad (3.17)$$

$$\dot{F}_d\left(\frac{T^*}{2}\right) = V_s, F_d(T^*) = 0, \dot{F}_d(T^*) = 0 \quad (3.18)$$

V_s は時刻 $T^*/2$ における非対称化関数 F_d の値の時間に対する傾きであり，非対称化関数 F_d の変化範囲を決定する．式 (3.18) と式 (3.17) の条件を満足するために，以下の 5 次の時間関数を利用する．

$$F_d(t) = a_5 t^5 + a_4 t^4 + a_3 t^3 + a_2 t^2 + a_1 t + a_0 \quad (3.19)$$

式 (3.18) と式 (3.17) と連立すると，以下の係数が整理される．

$$a_5 = \frac{16V_s}{(T^*)^4}, a_4 = -\frac{40V_s}{(T^*)^3}, a_3 = \frac{32V_s}{(T^*)^2}, a_2 = -\frac{8V_s}{T^*}, a_1 = 0, a_0 = 0 \quad (3.20)$$

ただし， $\theta_1 = \theta_2$ のときに遊脚先端が地面に接触することが避けられないため，本章では，シミュレーション上で地面との瞬間的な接触を無視している．

3.3 シミュレーション結果

$V_s = -1$ と $T^* = 0.8$ [s] を設定し，表 3.1 に示す値に物理パラメータを設定して数値シミュレーションを行った．

シミュレーション結果を図 (3.2) から図 (3.6) までに示す．図 (3.2) はロボットの支持脚と遊脚の絶対角度の時間変化を示し，支持脚も遊脚も設定した通りに変化した．図 (3.3) はロボットの支持脚と遊脚の絶対角速度の時間変化を示し，1 歩移動した後に支持脚も遊脚もその角速度がゼロになり，コリジョンレス歩容を保証した．非対称化関数により，支持脚と遊脚の変化が異なることがわかる．図 (3.4) が制御入力であり，図 (3.5) が遊脚先端

表 3.1: 2 脚劣駆動ロボットの物理パラメータ

m	3	kg
m_H	10	kg
L	1	m
I	1	kg·m ²
α	0.25	rad

の絶対位置を表す．非対称化関数により，遊脚先端と地面とのクリアランスを保証した．幾何的な関係で，水平変位ゼロのときに垂直変位もゼロでなければならない．また図 (3.6) によって，支持脚と遊脚の変化率が違うことがわかる．

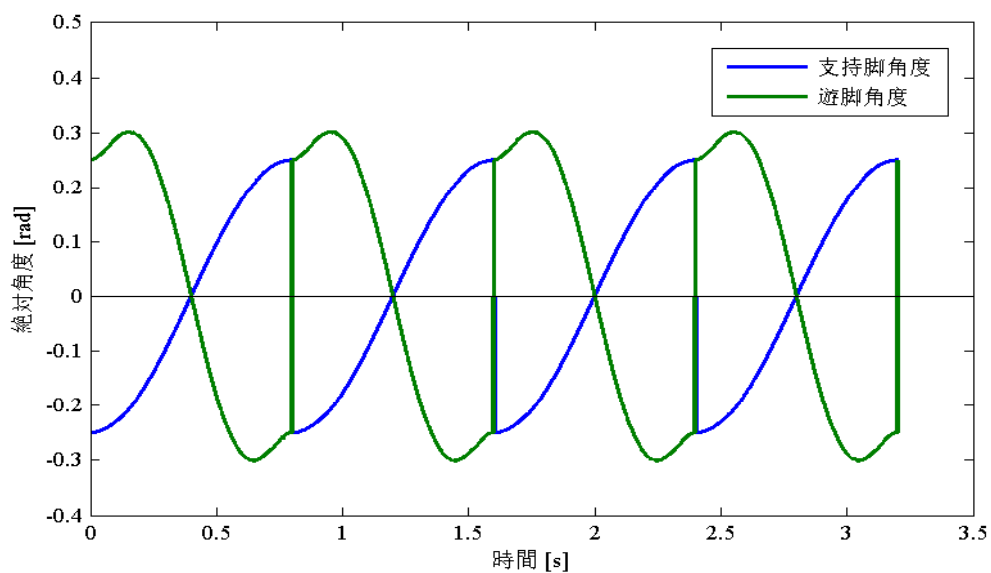


図 3.2: トルソーを持つ 2 脚歩駆動ロボットの角度の時間変化

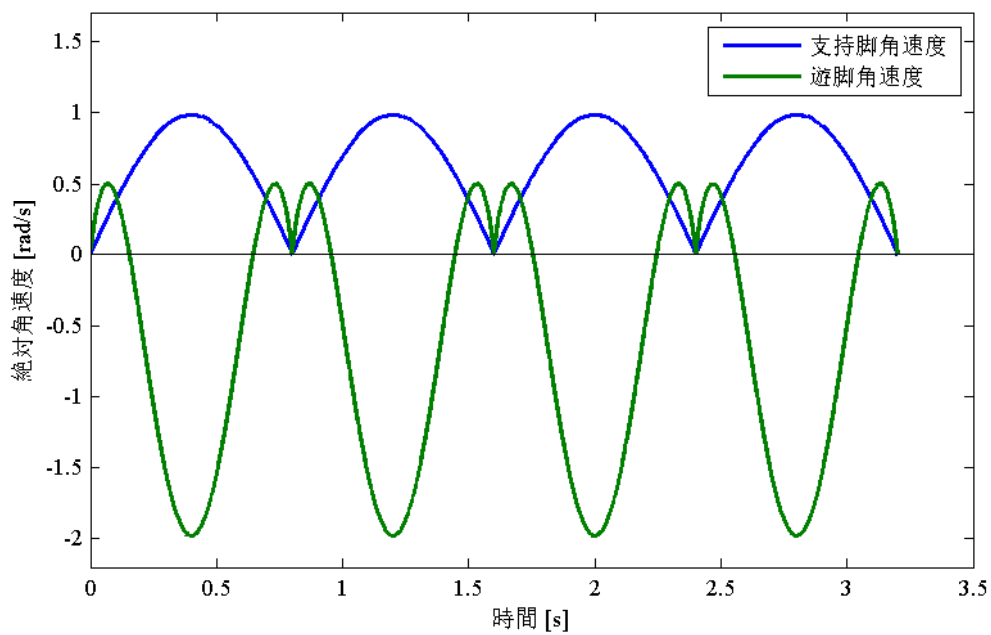


図 3.3: トルソーを持つ 2 脚歩駆動ロボットの角速度の時間変化

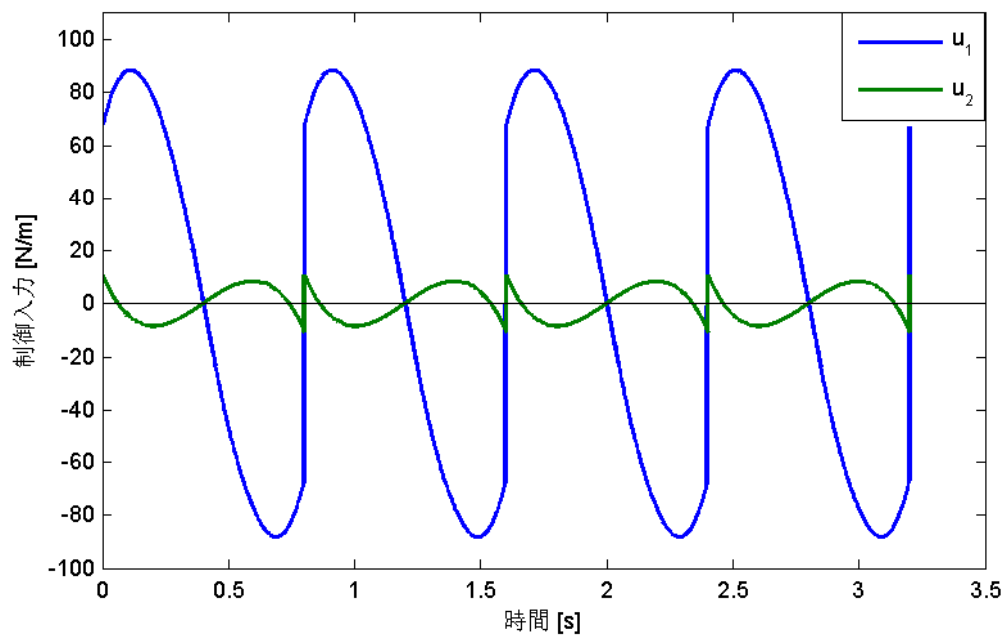


図 3.4: トルソーを持つ 2 脚歩駆動ロボットの制御入力の時問変化

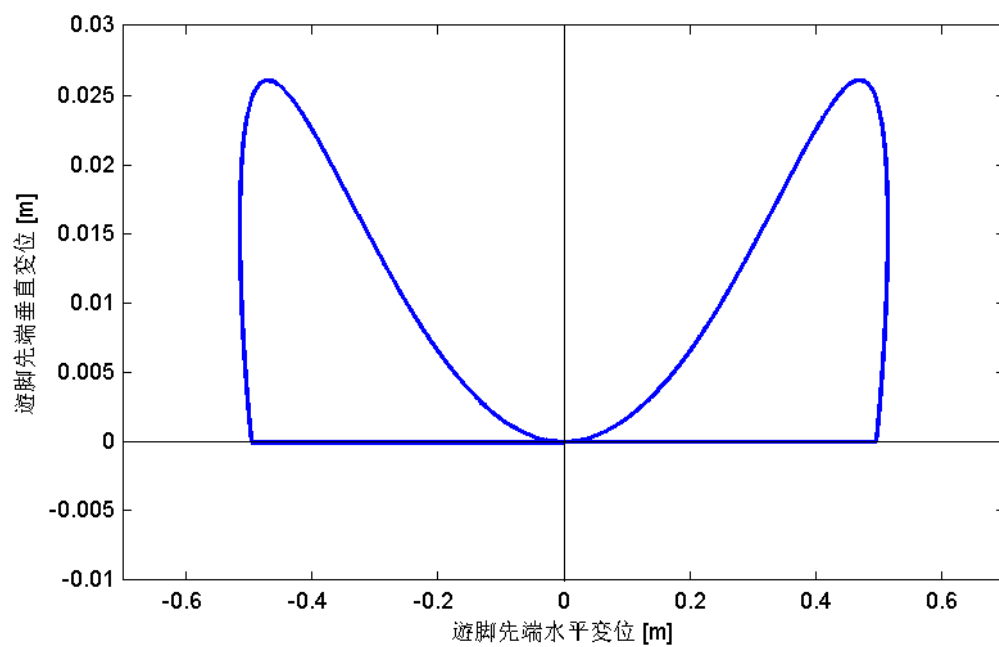


図 3.5: トルソーを持つ 2 脚歩駆動ロボットの遊脚先端位置

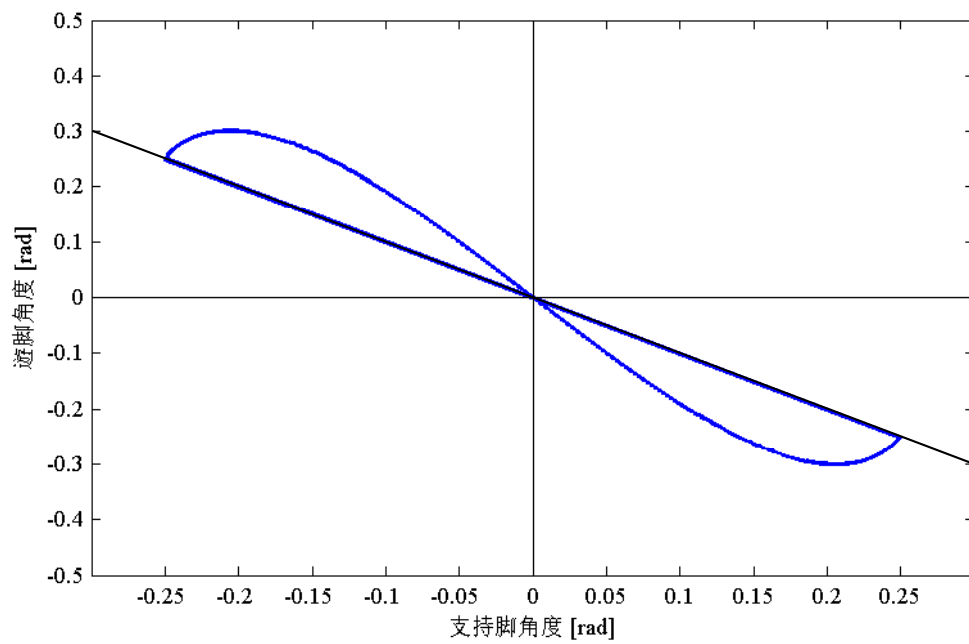


図 3.6: トルソーを持つ 2 脚歩駆動ロボットの支持脚と遊脚の配位平面図

第4章 上半身を持つ2脚劣駆動ロボットの コリジョンレス歩容

ロボットが上半身を持つ場合は、その上半身の質量がコリジョンレス歩容に影響を与える。さらに、システムの自由度が増えると運動解析が難しくなる。そこで本章ではまず上半身を持つリムレスホイールに基づいてシステム線形化を行い、数学的に安定性分析を行う。そして、解析した結果を応用し上半身を持つ2脚ロボットについても検証する。最後に線形化したモデルと実際の数学モデルとの間にあるギャップに対して新たな制御系を提案する。

4.1 上半身を持つリムレスホイールの仕様

本章では図 4.1 に示すトルソーを持つリムレスホイールを扱う。数値シミュレーションにおいて以下の仮定をおく。

- 上半身を持つ8本の脚リンクから構成されて、隣り合う脚フレーム間の相対角度は $\alpha = \pi/4$ [rad] となる。
- 脚と地面との接地点は滑らない。
- 本体質量を m [kg] , 慣性モーメントを I [kg·m²] とする。上半身の質量を m_t [kg] 。
- フレームの長さは a [m] とし、上半身は l [m] とする。
- 支持脚の絶対角度を θ_1 [rad] , 上半身の絶対角度を θ_2 [rad] とする。
- 回転駆動力 u を上半身とリムレスホイールの間に印加する。

4.1.1 運動方程式と制御系設計

ロボットの運動方程式は Lagrange 方程式を用いて導出する。一般化座標ベクトルを

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} \theta_1 & \theta_2 \end{bmatrix}^T \quad (4.1)$$

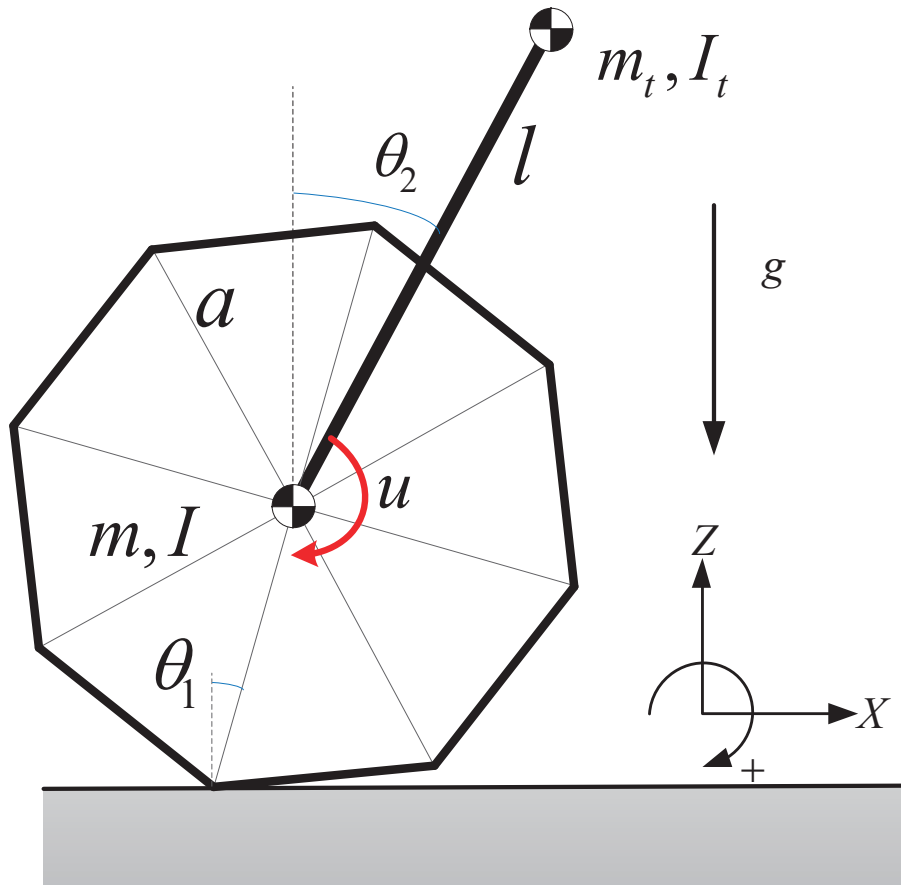


図 4.1: 上半身を持つリムレスホイール

とすると，ロボットの運動方程式は

$$M(q)\ddot{q} + h(\dot{q}, q) = Su \quad (4.2)$$

で与えられる．式 (4.2) 中の $M(q)$ は慣性行列， $h(\dot{q}, q)$ はコリオリ力・中心力項に重力項を加えたベクトルである．式 (4.2) の右辺は関節トルクベクトルであり，

$$Su = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} u \quad (4.3)$$

である．各部の関節角度 q 並びに角速度 $\dot{q}$ について $q = \dot{q} = 0_{2 \times 1}$ の周りで線形近似すると，運動方程式は

$$\bar{M}\ddot{q} + \bar{h}q = Su \quad (4.4)$$

となる．ただし，非線形モデルと異なり線形化後に $\bar{M}$ は定数行列であり， $\bar{h}q$ は変数 q を加えたベクトルである．第 2 章の結論により，上半身を制御せず，リムレスホイールの絶対角度のみ制御する場合は，出力を

$$y := \theta_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} q = Cq \quad (4.5)$$

とし，式 (4.4) と連立すれば $\ddot{y} = v$ を達成する制御入力 u は次のように決定できる．

$$u = \frac{v + \mathbf{C}\bar{\mathbf{M}}^{-1}\bar{\mathbf{h}}q}{\mathbf{C}\bar{\mathbf{M}}^{-1}\mathbf{S}} \quad (4.6)$$

コリジョンレス歩容を実現するために $v(t)$ は式 (4.7) のように定義する．

$$v(t) = \frac{\alpha}{2} \left(\frac{\pi}{T^*} \right)^2 \cos \left(\frac{\pi}{T^*} t \right) \quad (4.7)$$

ここで， T^* を目標とする単脚支持期間と定義する．式 (4.6) を式 (4.4) に代入し整理すると，

$$\bar{\mathbf{M}}\ddot{\mathbf{q}} + \left(\mathbf{I}_2 - \frac{\mathbf{S}\mathbf{C}\bar{\mathbf{M}}^{-1}}{\mathbf{C}\bar{\mathbf{M}}^{-1}\mathbf{S}} \right) \bar{\mathbf{h}}q = \frac{\mathbf{S}}{\mathbf{C}\bar{\mathbf{M}}^{-1}\mathbf{S}} v \quad (4.8)$$

と得られる．式 (4.8) を状態方程に整理すると，

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}v \quad (4.9)$$

となる．ここで

$$\mathbf{x} := \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

$$\mathbf{A} := \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{I}_2 \\ \bar{\mathbf{M}}^{-1} \left(\mathbf{I}_2 - \frac{\mathbf{S}\mathbf{C}\bar{\mathbf{M}}^{-1}}{\mathbf{C}\bar{\mathbf{M}}^{-1}\mathbf{S}} \right) \bar{\mathbf{h}} & \mathbf{0}_{2 \times 2} \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

$$\mathbf{B} := \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{2 \times 1} \\ \frac{\bar{\mathbf{M}}^{-1}\mathbf{S}}{\mathbf{C}\bar{\mathbf{M}}^{-1}\mathbf{S}} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

と置いた．任意時刻における状態は以下の式で求められる．

$$\mathbf{x}(t) = e^{\mathbf{A}t} \mathbf{x}(0) + \int_0^t e^{\mathbf{A}(t-\tau)} \mathbf{B}v \, d\tau \quad (4.13)$$

ここで，初期状態は

$$\mathbf{x}(0) = \begin{bmatrix} -\alpha/2 \\ \theta_2(0) \\ 0 \\ \dot{\theta}_2(0) \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

であり，コリジョンレス歩容を成立させるための目標終端条件は次式で定まる．

$$\mathbf{x}(T^*) = \mathbf{x}(0) + \begin{bmatrix} \alpha \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

つまり，移動する前と1歩移動した後の状態の違いは，支持脚の絶対角度が α を増えることのみであり，上半身の角度が初期状態に戻る上にすべての角速度も初期状態に戻らなければならない．

式(4.15)によって，1歩の時間 T^* ，上半身の初期角度 $\theta_2(0)$ と上半身の初期角速度 $\dot{\theta}_2(0)$ の関係がわかる．

4.1.2 シミュレーション結果

表 4.1 に示す値に物理パラメータを設定して数値シミュレーションを行った．ここで，初期状態 $x(0) = \begin{bmatrix} -\alpha & 0 & 0 & 2.3087 \end{bmatrix}^T$ と1歩の時間 $T^* = 0.8$ [s]を設定しておく．

表 4.1: 上半身を持つリムレスホイールの物理パラメータ

m	1	kg
m_t	0.7	kg
L	1	m
I	0.1	kg·m ²
α	$\pi/8$	rad

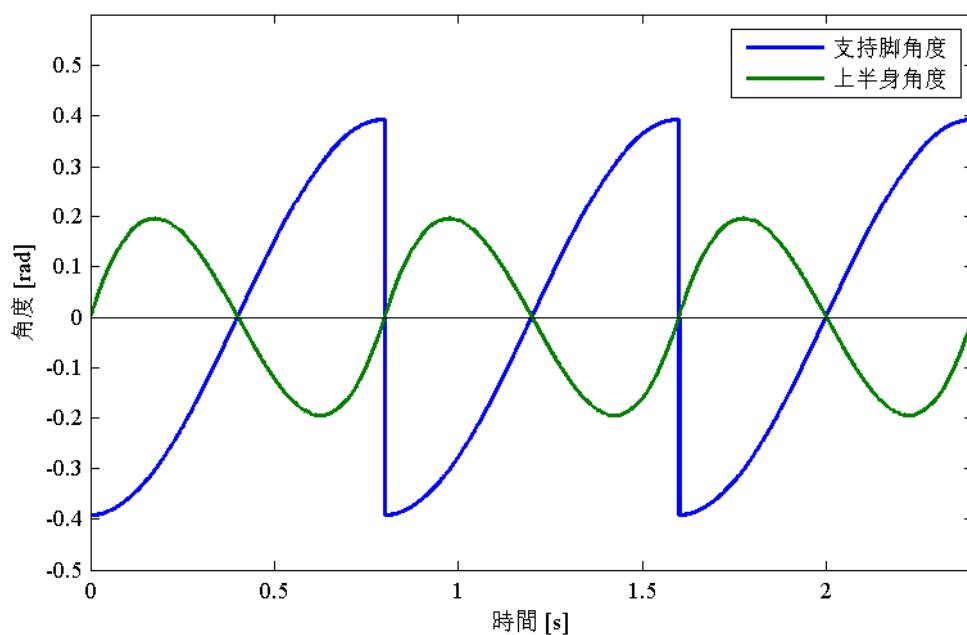


図 4.2: 上半身を持つリムレスホイールの角度の時間変化

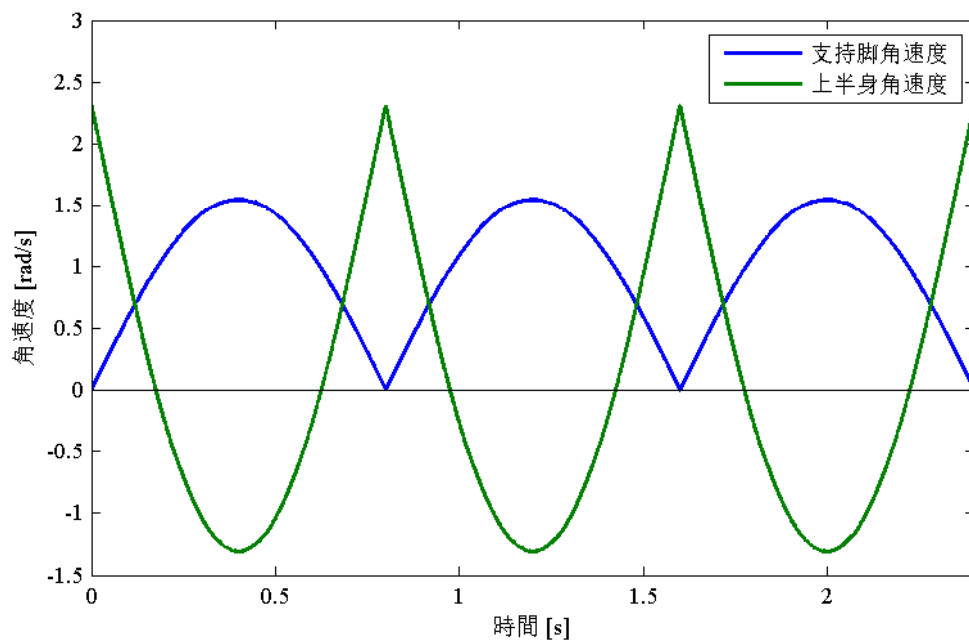


図 4.3: 上半身を持つリムレスホイールの角速度の時間変化

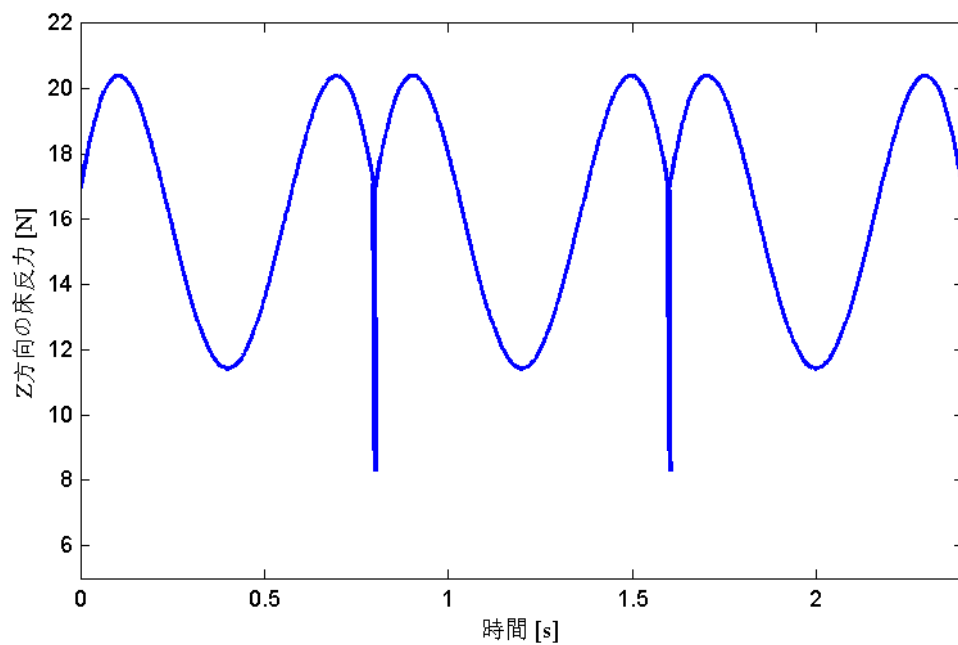


図 4.4: 上半身を持つリムレスホイールの Z 方向の床反力の時間変化

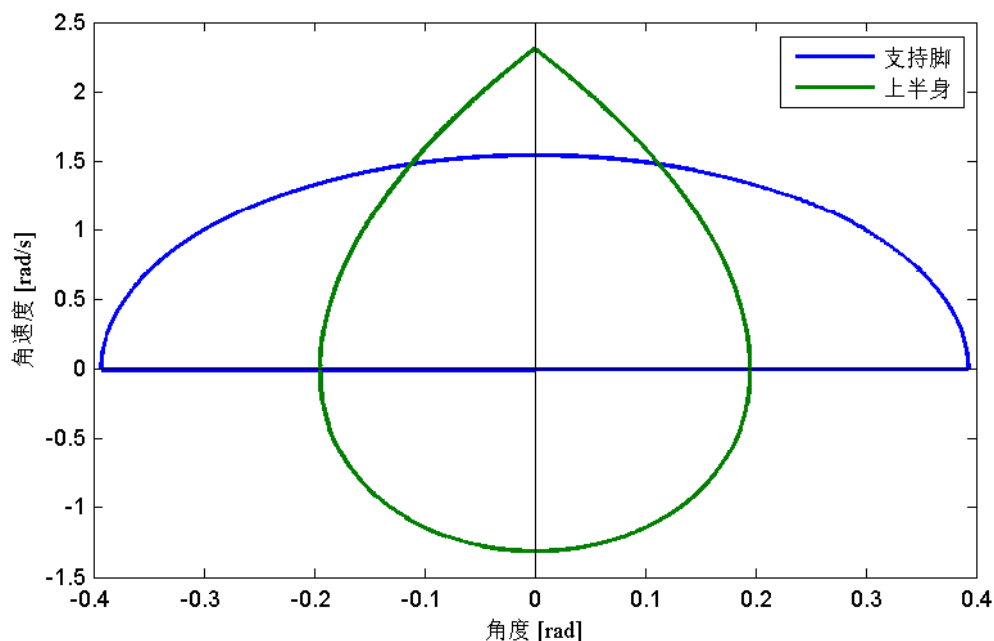


図 4.5: 上半身を持つリムレスホイールの位相平面図

シミュレーション結果を図 (4.2) から図 (4.5) までに示す．図 (4.2) にロボットの支持脚と上半身の絶対角度の時間変化を示す．図 (4.3) にロボットの支持脚と遊脚の絶対角速度の時間変化を示す．1 歩移動した後に支持脚も遊脚もその角速度がゼロになり，上半身も遊脚も式 (4.7) と設定した通りに変化することでコリジョンレス歩容の達成と安定性を保証した．図 (4.4) が床反力の時間変化を示し， z 方向の床反力が常にゼロ以上となっていることで確認した．図 (4.5) が支持脚と上半身の位相平面図であり，1 歩移動した後にすべての状態は初期状態に戻るということがわかる．

4.2 上半身を持つ 2 脚ロボットの場合

前述した内容によって，上半身を持つとコリジョンレス歩容に影響があることがわかる．またシステム線形化における方法で安定性を持つ歩容が実現した．しかし，線形化したモデルと実際の数学モデルとの間にはギャップがあるため，システムが不安定になる可能性がある，これに対して新たな制御系を本節にて提案する．

4.2.1 上半身を持つ 2 脚ロボット仕様

本章では図 4.6 に示す上半身を持つ 2 脚ロボットを扱う．数値シミュレーションにおいて以下の仮定をおく．

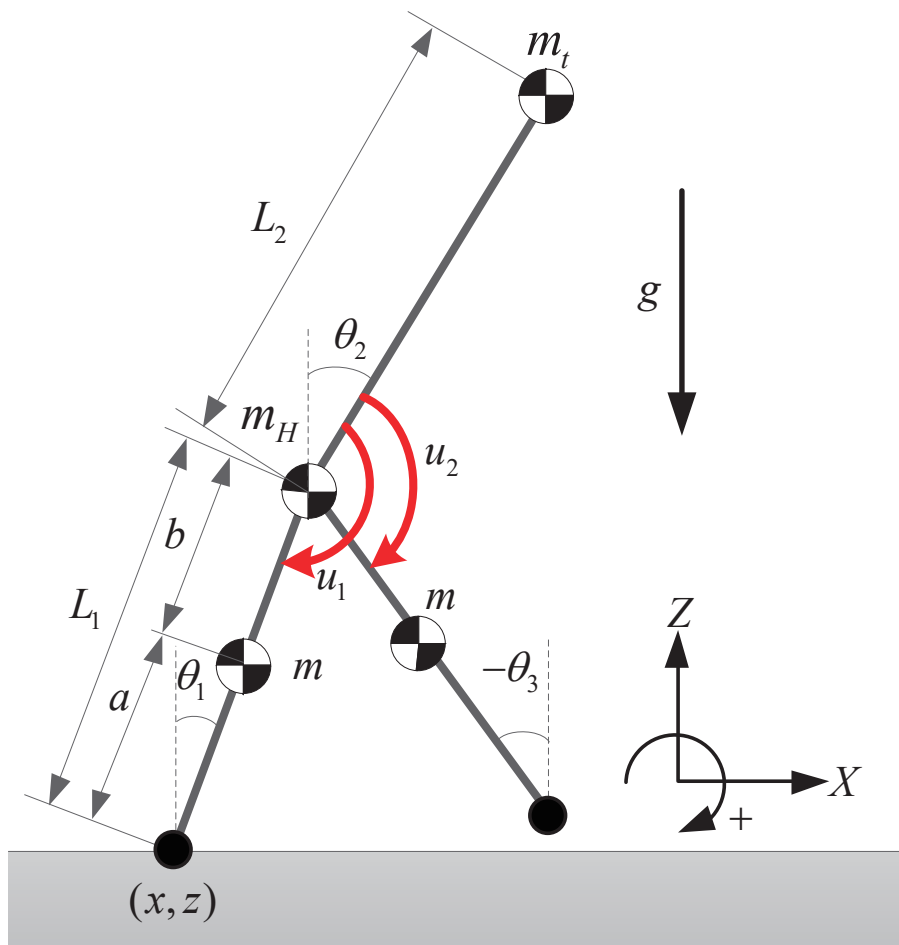


図 4.6: 上半身を持つ 2 脚ロボット

- 脚と地面との接地点は滑らない．
- 脚の長さを L_1 [m] とし，質量を m [kg] とする．
- 上半身の長さを L_2 [m] とし，上半身の質量を m_t [kg] とし，腰質量を m_H [kg] とする．
- 支持脚の絶対角度を θ_1 [rad]，遊脚の絶対角度を θ_3 [rad]，上半身の絶対角度を θ_2 [rad] とする．
- 回転駆動力 u_1 を支持脚と上半身の間に， u_2 を遊脚と上半身の間にそれぞれ印加する．

4.2.2 運動方程式と制御系設計

ロボットの運動方程式は Lagrange 方程式を用いて導出する．一般化座標ベクトルを

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} x & z & \theta_1 & \theta_2 & \theta_3 \end{bmatrix}^T \quad (4.16)$$

とすると，ロボットの運動方程式は

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{h}(\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q}) = \mathbf{S}\mathbf{u} + \mathbf{J}^T\boldsymbol{\lambda} \quad (4.17)$$

であり，速度拘束条件式は

$$\mathbf{J}\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{0}_{2 \times 1} \quad (4.18)$$

である．式 (4.17) 中の $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ は慣性行列， $\mathbf{h}(\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q})$ はコリオリ力・中心力項に重力項を加えたベクトルである．式 (4.17) の右辺第 1 項は関節トルクベクトルであり，

$$\mathbf{S}\mathbf{u} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -1 & 0 \\ 1 & 1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

である．また，右辺第 2 項は床面と脚先端に作用するホロノミック拘束力項であり，脚と地面との接地点は滑らないため，以下の条件を成立する．

$$\dot{x} = 0, \dot{z} = 0 \quad (4.20)$$

式 (4.18) はその速度拘束条件式である．式 (4.20) により，ヤコビアン $\mathbf{J}$ は

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

となる．式 (4.17) 式 (4.18) より未定乗数ベクトル $\boldsymbol{\lambda}$ を消去すると，次のように整理される．

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{Y}(\mathbf{q})(\mathbf{S}\mathbf{u} - \mathbf{h}(\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q})) \quad (4.22)$$

ただし，

$$\mathbf{X}(\mathbf{q}) := \mathbf{J}\mathbf{M}(\mathbf{q})^{-1}\mathbf{J}^T \quad (4.23)$$

$$\mathbf{Y}(\mathbf{q}) := \mathbf{I}_5 - \mathbf{J}^T\mathbf{X}(\mathbf{q})^{-1}\mathbf{J}\mathbf{M}(\mathbf{q})^{-1} \quad (4.24)$$

と置いた．ここでコリジョンレス歩容を達成するために Phase 1 と Phase 2 で分けて制御する．

Phase 1 は単脚支持相であり，コリジョンレス歩容における第 3 章の制御系を参考にし，1 歩を踏む．Phase 2 では両脚支持のまま，上半身を初期状態に戻す．Phase 1 では，コリジョンレス歩容を実現する場合は支持脚と遊脚を制御出力 y とする．つまり，

$$y := \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} q = Cq \quad (4.25)$$

と置く．ここで， C は制御出力ベクトルであり，2 階時間微分すると，

$$\ddot{y} = C\ddot{q} \quad (4.26)$$

となるため，式 (4.22) より $\ddot{y} = v_1$ を達成するための制御入力 u は

$$u = A(q)^{-1}(v_1 + B(q, \dot{q})) \quad (4.27)$$

と決定できる．ただし，

$$A(q) := CM(q)^{-1}Y(q)S \quad (4.28)$$

$$B(q, \dot{q}) := CM(q)^{-1}Y(q)h(q, \dot{q}) \quad (4.29)$$

と置いた．制御出力は第 3 章のように

$$v_1(t) = \begin{bmatrix} \alpha \left(\frac{\pi}{T^*} \right)^2 \cos \left(\frac{\pi}{T^*} t \right) \\ -\alpha \left(\frac{\pi}{T^*} \right)^2 \cos \left(\frac{\pi}{T^*} t \right) + \ddot{F}_d(t) \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

と定義される．ここで，非対称化関数 $F_d(t)$ は式 (3.20) のように定義されるものである．

Phase 2 は両脚支持相であり，拘束条件が変化するため，ヤコビアン $J(q)$ は

$$J(q) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & L_1 \cos \theta_1 & 0 & -L_1 \cos \theta_3 \\ 0 & 1 & -L_1 \sin \theta_1 & 0 & L_1 \sin \theta_3 \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

となる．さらに，アクチュエーター一つを利用し，制御入力と制御出力は以下のように定義される．

$$\bar{S}u_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} u_1 \quad (4.32)$$

$$\bar{y} := \theta_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} q = \bar{C}q \quad (4.33)$$

式 (4.17) より , $\ddot{y} = v_2$ を達成するための制御入力 u_1 は

$$u_1 = \bar{A}(q)^{-1}(v_2 + \bar{B}(q, \dot{q})) \quad (4.34)$$

と決定できる . ただし ,

$$\bar{A}(q) := \bar{C}M(q)^{-1}\bar{Y}(q)\bar{S} \quad (4.35)$$

$$\bar{B}(q, \dot{q}) := \bar{C}M(q)^{-1}\bar{Y}(q)h(q, \dot{q}) + \bar{C}M(q)^{-1}J(q)^T\bar{X}(q)^{-1}\dot{J}(q)\dot{q} \quad (4.36)$$

$$\bar{Y}(q) := I_5 - J(q)^T\bar{X}(q)^{-1}J(q)M(q)^{-1} \quad (4.37)$$

$$\bar{X}(q) := J(q)M(q)^{-1}J(q)^T \quad (4.38)$$

と置いた . 制御出力 $v_2(t)$ は

$$v_2(t) = \ddot{F}(t) \quad (4.39)$$

であり , ここで

$$F(t) = a_3t^3 + a_2t^2 + a_1t + a_0 \quad (4.40)$$

と定義すると , 以下の関数が満足できる .

$$F(0) = \theta_2, \quad F(T) = \theta_2(0) \quad (4.41)$$

$$\dot{F}(0) = \dot{\theta}_2, \quad \dot{F}(T) = \dot{\theta}_2(0) \quad (4.42)$$

ここで θ_2 と $\dot{\theta}_2$ は Phase 1 が終わった直後に上半身の絶対角度と絶対角速度であり , $\theta_2(0)$ と $\dot{\theta}_2(0)$ は上半身の初期角度と初期角速度である .

4.2.3 シミュレーション結果

表 4.2 に示す値に物理パラメータを設定して数値シミュレーションを行った . ここで , 初期状態 $x(0) = \begin{bmatrix} -\alpha & \pi/9 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$ と Phase 1 の時間 $T^* = 0.8$ [s] , Phase 2 の時間 $T = 2.2$ [s] を設定しておく .

表 4.2: 上半身を持つ 2 脚ロボットの物理パラメータ

m	1	kg
m_t	3	kg
m_H	2	kg
L_1	1	m
L_2	1	m
α	$\pi/18$	rad

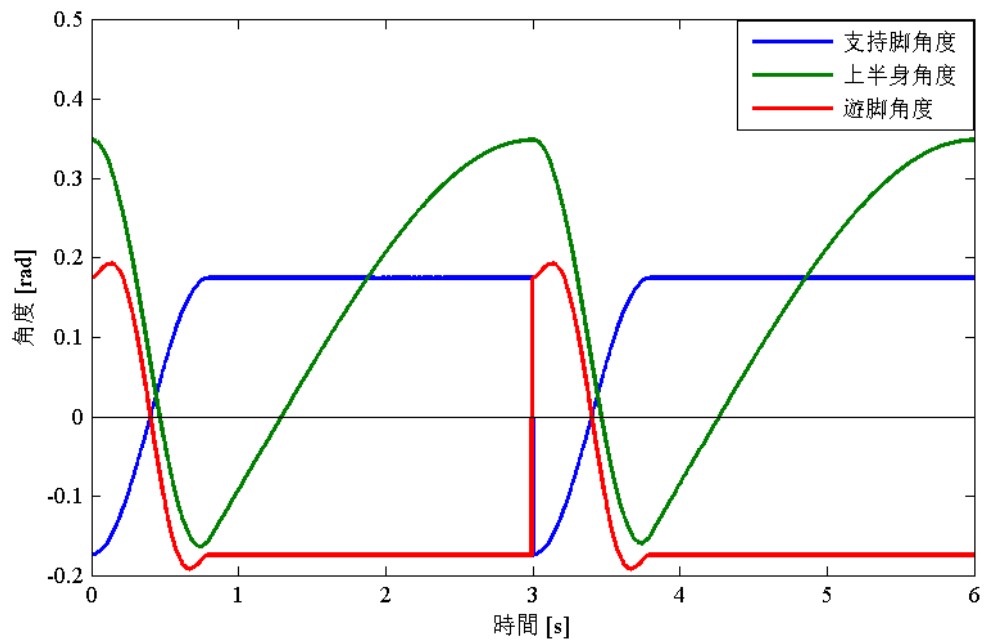


図 4.7: 両脚支持期を含む上半身を持つ 2 脚ロボットの角度の時間変化

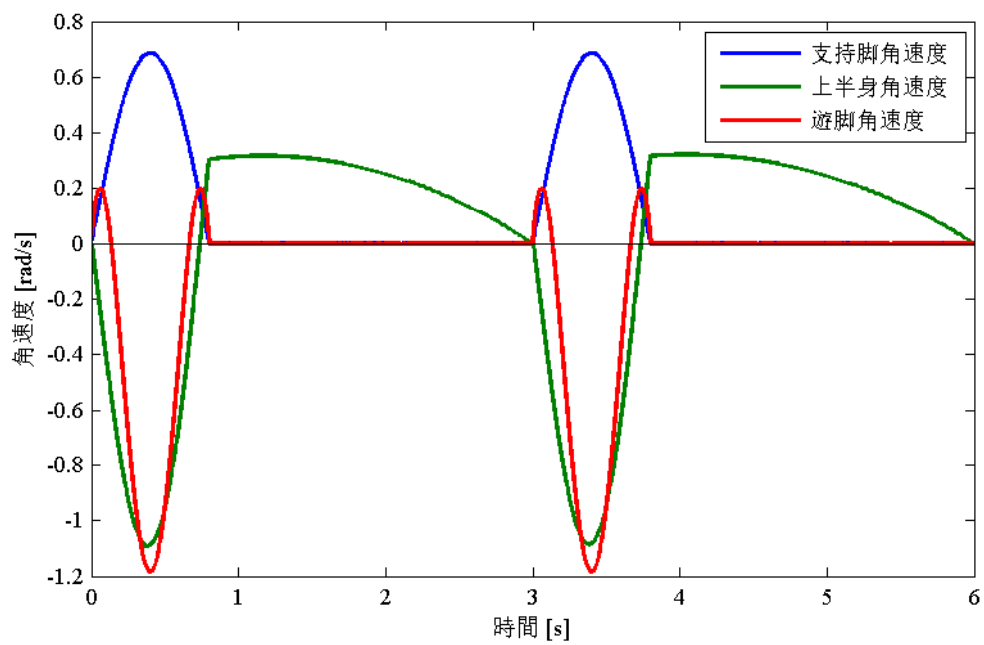


図 4.8: 両脚支持期を含む上半身を持つ 2 脚ロボットの角速度の時間変化

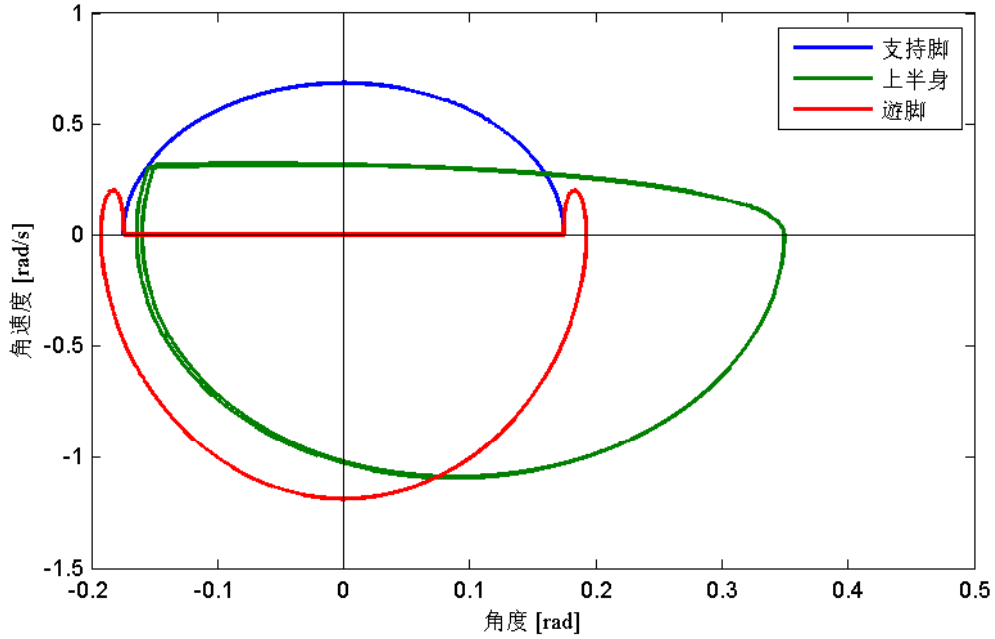


図 4.9: 両脚支持期を含む上半身を持つ 2 脚ロボットの位相平面図

図 (4.7) と図 (4.8) によって、ロボットが 1 歩を完了したとき、つまり Phase 1 が終わったときに支持脚と遊脚の絶対角速度はゼロになる。そして、Phase 2 で上半身は初期状態に戻ることがわかる。図 (4.9) では、上半身の再調整を通してシステムがすべて安定になっていることが見られる。

歩行性能の指標として、本章では歩行速度と Specific Resistance (以下 SR) を用いる。歩行速度 V [m/s] は次のように定義した。

$$V := \frac{2l \sin \alpha}{T^*} \quad (4.43)$$

また、SR は次のように与えられる。

$$\text{SR} := \frac{P}{m_t g V} \quad (4.44)$$

ここで、 m_t はロボットの全質量、 g [m/s²] は重力加速度、 V [m/s] は前述したロボットの平均歩行速度である。 P は平均入力パワーであり、次式で定義する。

$$P := \frac{1}{T^*} \int_0^{T^*} \left(|(\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_1)u_1| + |(\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_3)u_2| \right) dt \quad (4.45)$$

SR は 1.0 [kg] の質量を 1.0 [m] 移動させるのに必要なエネルギー消費量を表す無次元量であり、この値が小さいほど移動効率に優れることを意味する。今回シミュレーションの両脚支持期を含む場合は $\text{SR} = 1.0164$ である。

シミュレーションによって、コリジョンレス歩容では上半身の初期状態と1歩の時間は上半身の1歩後の状態に影響しているが、つまり $\theta_2(0)$, $\dot{\theta}_2(0)$, T^* , $\theta_2(T^*)$, $\dot{\theta}_2(T^*)$ の間には関係がある．ここで、上半身状態変化誤差 d を以下のように定義する．

$$d = \sqrt{(\theta_2(T^*) - \theta_2(0))^2 + (\dot{\theta}_2(T^*) - \dot{\theta}_2(0))^2} \quad (4.46)$$

1歩後に d がゼロに近づくと安定性が高くなる．ここで、前述した $\theta_2(0)$, $\dot{\theta}_2(0)$, T^* , $\theta_2(T^*)$, $\dot{\theta}_2(T^*)$ の5つの要素は、 $\theta_2(0)$, $\dot{\theta}_2(0)$, T^* , d の4つの要素まで減少した．この4つの要素の関係を以下の図で表す．

図 (4.10) では、Color bar は上半身状態変化誤差 d を表し、 x 軸、 y 軸、 z 軸は $\theta_2(0)$, $\dot{\theta}_2(0)$, T^* を表す． d の範囲は10倍ずつ縮小すると、図 (4.10) のように4つの図に展開される．上半身状態変化誤差 d が一番小さい点の対応する座標の初期状態は最適な初期状態パラメータである．この最適な初期状態を利用し、シミュレーションを行った．

今回シミュレーションの両脚支持期を含まない場合は $SR = 0.3889$ であり、両脚支持を含む場合に比べると、エネルギー効率が向上している．

まずは図 (4.11) と図 (4.12) によって、コリジョンレス歩容を達成する適切なパラメータが存在することがわかる、上半身が周期的に運動することも見られる．図 (4.13) では、すべての自由度は安定性を持つ歩容が生成されたる．図 (4.14) では z 方向の床反力は常にゼロ以上であり、地面から飛び上がることなく、歩行が実現された．

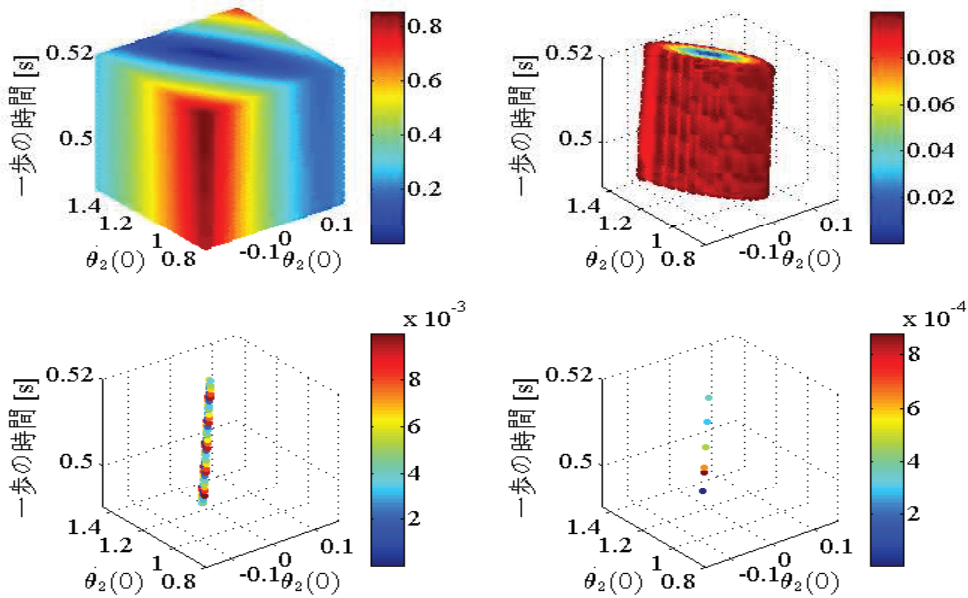


図 4.10: 1 歩移動後の上半身の状態遷移図

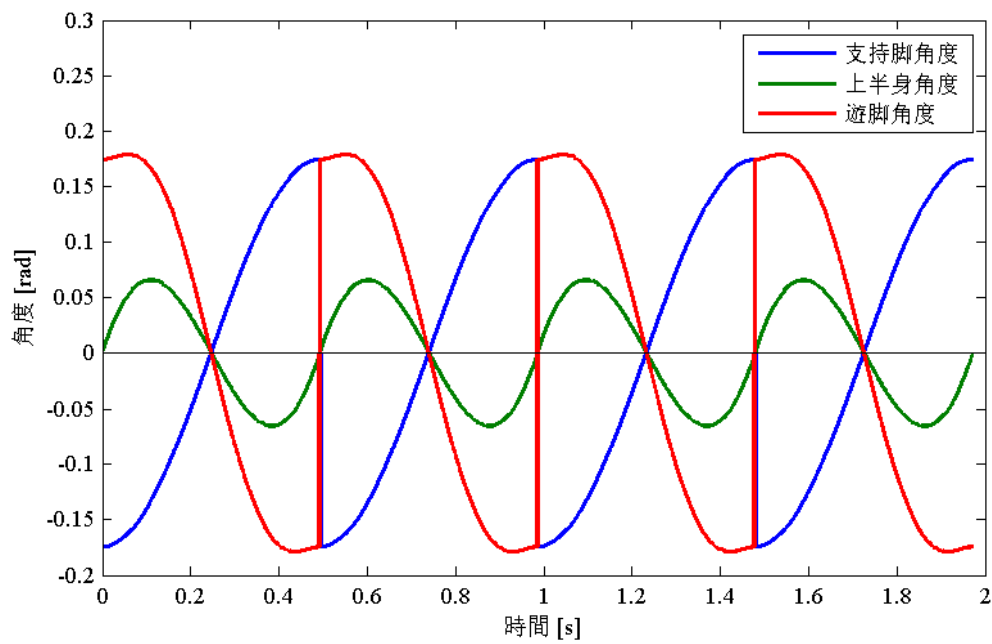


図 4.11: 両脚支持期を含まない上半身を持つ 2 脚ロボットの角度の時間変化

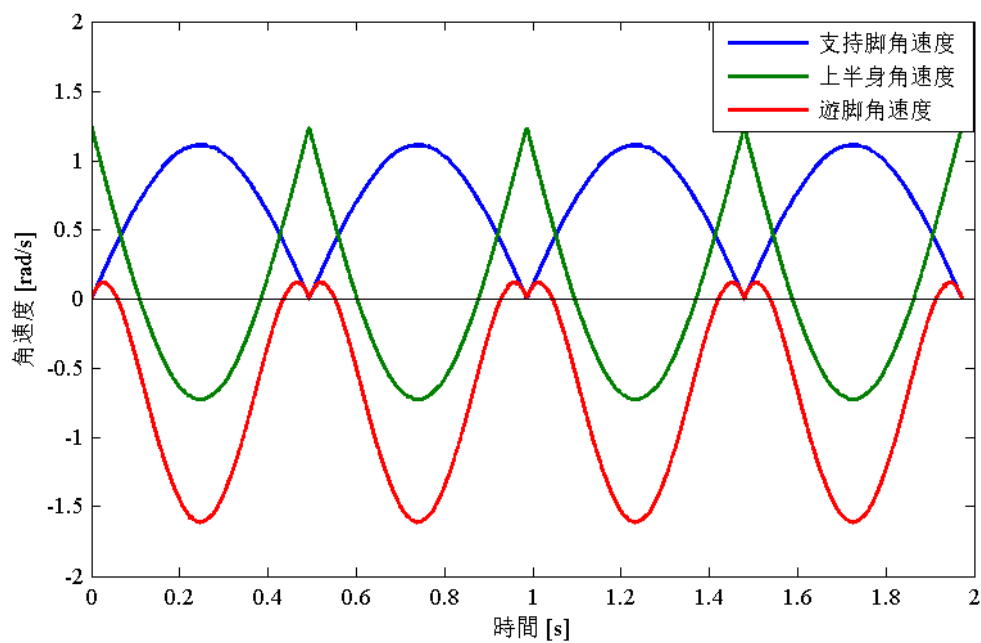


図 4.12: 両脚支持期を含まない上半身を持つ 2 脚ロボットの角速度の時間変化

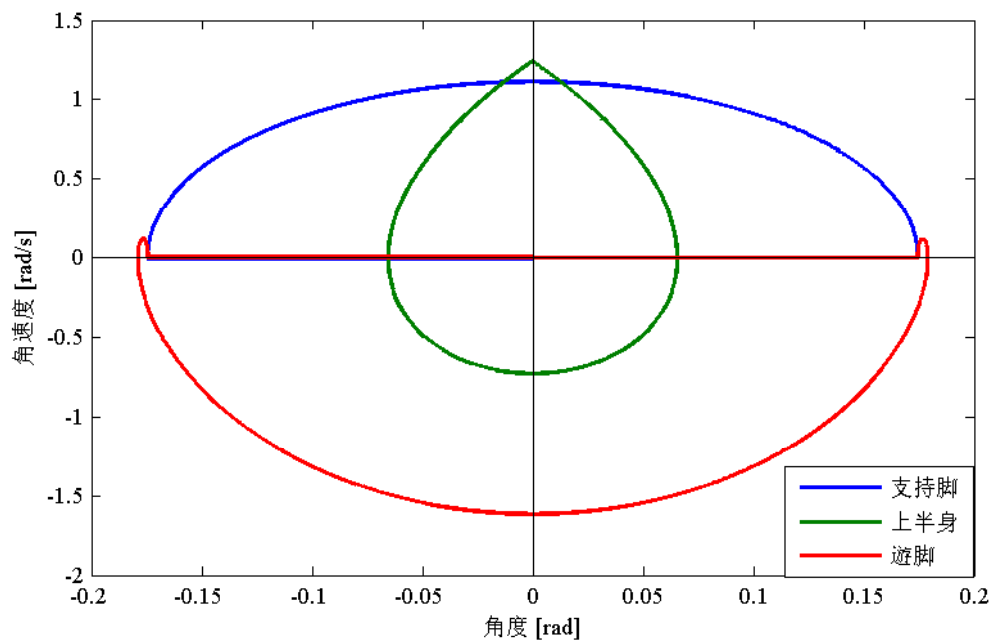


図 4.13: 両脚支持期を含まない上半身を持つ2脚ロボットの位相平面図

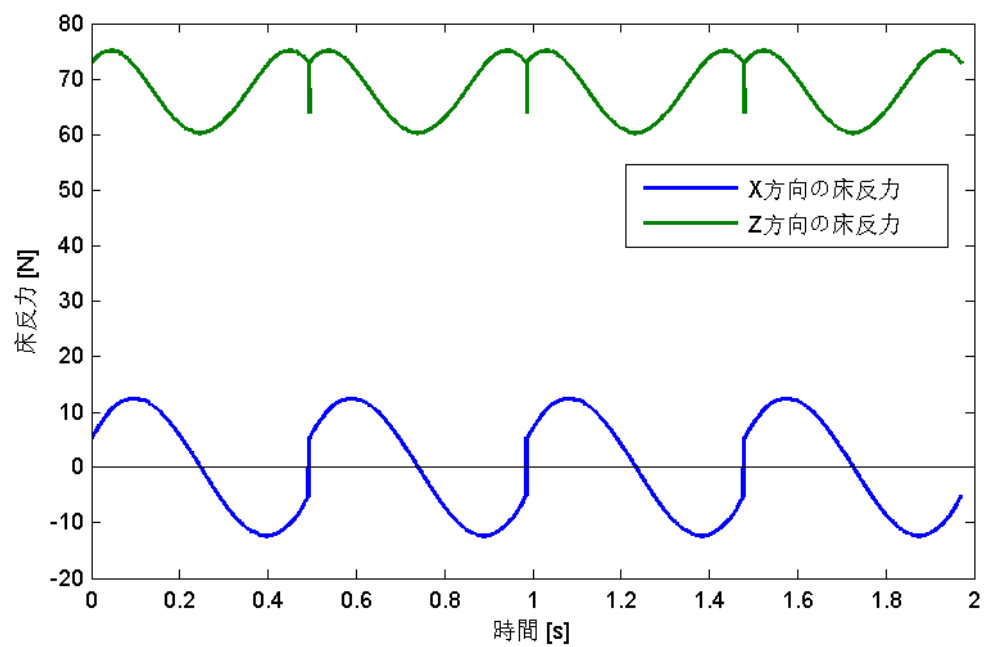


図 4.14: 両脚支持期を含まない上半身を持つ2脚ロボットの床反力の時間変化

第5章 障害物を乗り越える膝関節と上半身を持つ2脚ロボット

本章では，主にコリジョンレス歩容に基づいて障害物を乗り越えるという制御応用について考察する．膝関節の調整を通してコリジョンレスのまま，遊脚先端と地面とのクリアランスを発生する制御方法を提案し，分析を行う．

5.1 仕様

本章では図 5.1 に示す上半身を持つ 2 脚ロボットを扱う．数値シミュレーションにおいて以下の仮定をおく．

- 脚と地面との接地点は滑らない．
- 下腿部の長さを L_1 [m] とし，質量を m_1 [kg] とする．
- 大腿部の長さを L_2 [m] とし，質量を m_2 [kg] とする．
- 上半身の長さを L_3 [m] とし，上半身の質量を m_t [kg] とし，腰質量を m_H [kg] とする．
- 支持脚の下腿部絶対角度を θ_1 [rad]，支持脚の絶対角度を θ_2 [rad]，遊脚の下腿部絶対角度を θ_5 [rad]，遊脚の絶対角度を θ_4 [rad]，上半身の絶対角度を θ_3 [rad] とする．
- 回転駆動力 u_1 を支持脚の下腿部と大腿部の間に， u_2 を支持脚の大腿部と上半身の間に， u_3 を上半身と遊脚の大腿部の間に， u_4 を遊脚の下腿部と大腿部の間にそれぞれ印加する．

5.2 運動方程式

ロボットの運動方程式は Lagrange 方程式を用いて導出する．一般化座標ベクトルを

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} x & z & \theta_1 & \theta_2 & \theta_3 & \theta_4 & \theta_5 \end{bmatrix}^T \quad (5.1)$$

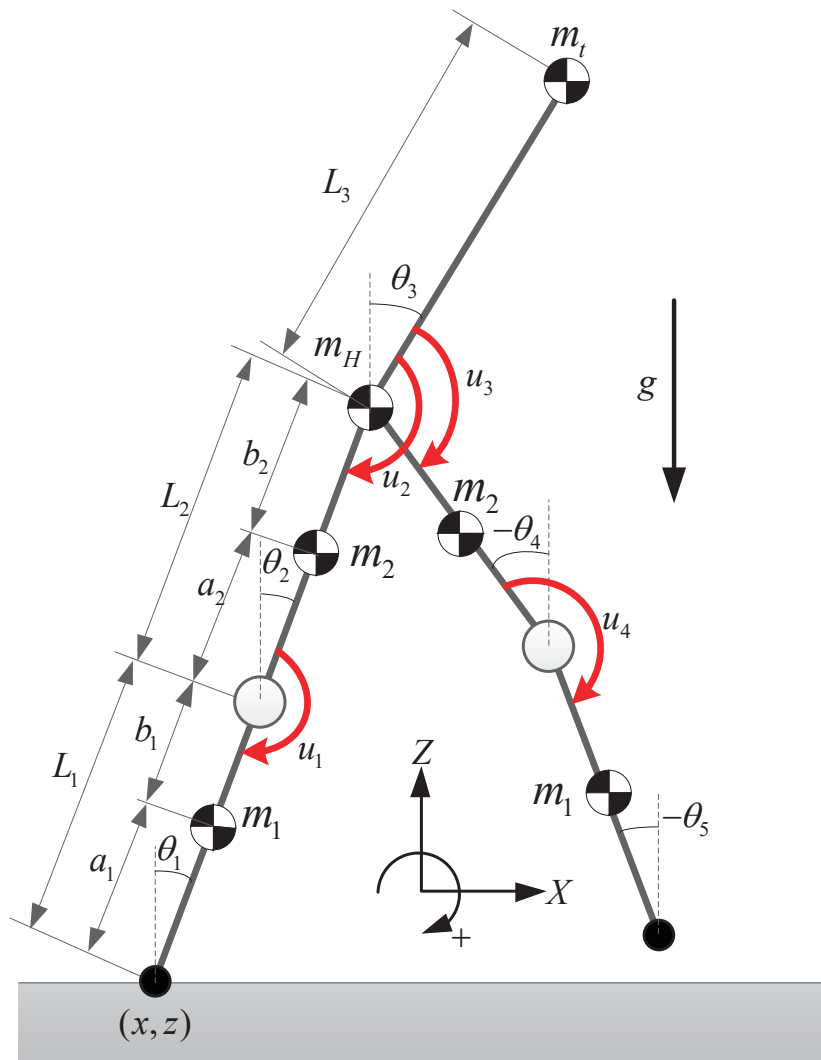


図 5.1: 膝関節と上半身を持つ 2 脚ロボット

とすると，ロボットの運動方程式は

$$M(q)\ddot{q} + h(\dot{q}, q) = Su + J^T \lambda \quad (5.2)$$

であり，速度拘束条件式は

$$J\dot{q} = 0_{2 \times 1} \quad (5.3)$$

である．式 (4.2) 中の $M(q)$ は慣性行列， $h(\dot{q}, q)$ はコリオリ力・中心力項に重力項を加えたベクトルである．式 (5.2) の右辺第 1 項は関節トルクベクトルであり，

$$Su = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

である．また，右辺第 2 項は床面と脚先端に作用するホロノミック拘束力項であり，脚と地面との接地点は滑らないため，以下の条件を成立する．

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

式 (5.3) はその速度拘束条件式である．式 (5.5) により，ヤコビアン J は

$$J = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

となる．式 (5.2) 式 (5.3) より未定乗数ベクトル λ を消去すると，次のように整理される．

$$M(q)\ddot{q} = Y(q)(Su - h(\dot{q}, q)) \quad (5.7)$$

ただし，

$$X(q) := JM(q)^{-1}J^T \quad (5.8)$$

$$Y(q) := I_7 - J^T X(q)^{-1}JM(q)^{-1} \quad (5.9)$$

と置いた．

5.3 制御系設計

コリジョンレス歩容を実現する場合は支持脚と遊脚を制御出力 y とする．つまり，

$$y := \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_4 \\ \theta_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} q = Cq \quad (5.10)$$

である．ここで， C は制御出力ベクトルであり，2 階時間微分すると，

$$\ddot{y} = C\ddot{q} \quad (5.11)$$

となるため，式 (5.7) より $\ddot{y} = v$ を達成するための制御入力 u は

$$u = A^{-1}(q)(v + B(q, \dot{q})) \quad (5.12)$$

と決定できる．ただし，

$$A(q) := CM(q)^{-1}Y(q)S \quad (5.13)$$

$$B(q, \dot{q}) := CM(q)^{-1}Y(q)h(q, \dot{q}) \quad (5.14)$$

と置いた．前述した内容により，コリジョンレス歩容を達成するためには，以下の制御出力を設定すれば良い．つまり，支持脚が折れ曲がることなく，遊脚が折れ曲がることにより，遊脚先端と地面と内へのクリアランスが生じる．

$$v(t) = \begin{bmatrix} \alpha \left(\frac{\pi}{T^*} \right)^2 \cos \left(\frac{\pi}{T^*} t \right) \\ \alpha \left(\frac{\pi}{T^*} \right)^2 \cos \left(\frac{\pi}{T^*} t \right) \\ -\alpha \left(\frac{\pi}{T^*} \right)^2 \cos \left(\frac{\pi}{T^*} t \right) + \ddot{F}_{d1}(t) \\ -\alpha \left(\frac{\pi}{T^*} \right)^2 \cos \left(\frac{\pi}{T^*} t \right) + \ddot{F}_{d2}(t) \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

ここで $F_{d1}(t)$ は遊脚の大腿部に対して変化させる関数で， $F_{d2}(t)$ は遊脚の下腿部に対して変化させる関数である．この 2 つの関数で以下の条件のように遊脚先端の位置を調整する．ただし， $F_{d1}(t)$ の変化範囲はゼロから H_1 まで， $F_{d2}(t)$ の変化範囲はゼロから H_2 までである．

$$F_{d1}(t) = \begin{cases} -(2H_1 t^3/t_1^3) + (3H_1 t^2)/t_1^2 & 0 \leq t \leq t_1 \\ H_1 & t_1 \leq t \leq t_2 \\ H_1 + (2H_1(t-t_2)^3)/(T^* - t_2)^3 - 3H_1(t-t_2)^2/(T^* - t_2)^2 & t_2 \leq t \leq T^* \end{cases} \quad (5.16)$$

$$F_{d2}(t) = \begin{cases} -(2H_2 t^3/t_1^3) + (3H_2 t^2)/t_1^2 & 0 \leq t \leq t_1 \\ H_2 & t_1 \leq t \leq t_2 \\ H_2 + (2H_2(t-t_2)^3)/(T^* - t_2)^3 - 3H_2(t-t_2)^2/(T^* - t_2)^2 & t_2 \leq t \leq T^* \end{cases} \quad (5.17)$$

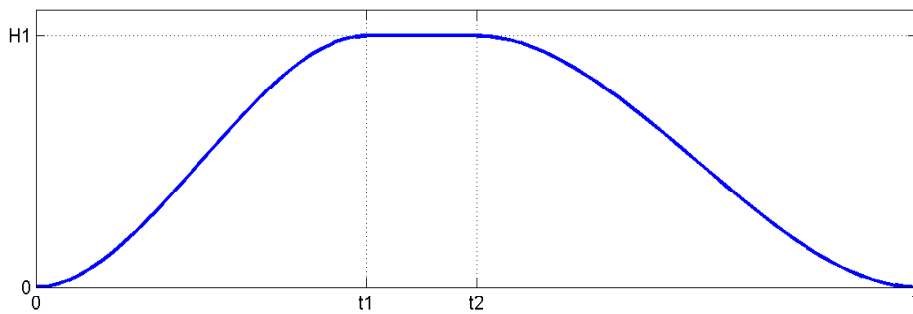


図 5.2: 時間に従う F_{d1} の変化

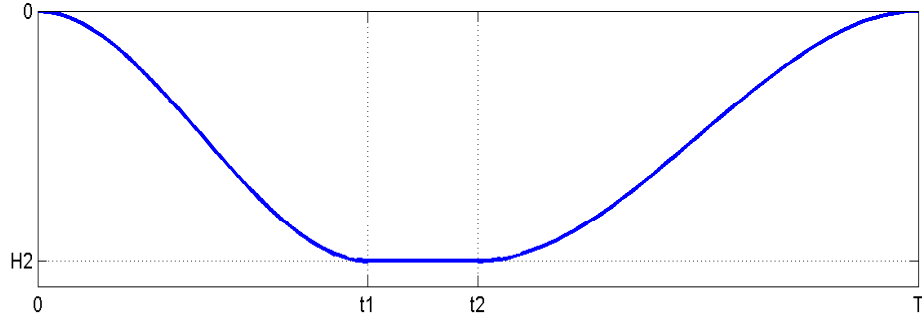


図 5.3: 時間に従う F_{d2} の変化

物理的な意味は $0 \leq t \leq t_1$ で大腿部を上げる，または下腿部を曲げる． $t_1 \leq t \leq t_2$ で姿勢を保持する， $t_2 \leq t \leq T^*$ では遊脚はまっすぐに戻る．そして，姿勢を保持する期間は T と表す．

5.4 シミュレーション結果

表 5.1 に示す値に物理パラメータを設定して数値シミュレーションを行った．設定した条件では，コリジョンレス歩容で障害物を乗り越えるために時刻 t_1 まで遊脚を折り曲げた状態を T 秒間保持してから時刻 T^* までまっすぐになる．

図 (5.4) は各々の角度の時間変化である．支持脚の大腿部と下腿部は同じ制御出力なので，シミュレーションの結果は同じように変化していることが示されている．しかし，遊脚先端と地面に距離があるため，遊脚の大腿部と下腿部の角度の時間変化に違いがあり，遊脚は折り曲げることになるのがわかる．図 (5.5) は各々の角速度の時間変化である．支持脚の大腿部と下腿部は同じ制御出力なので，シミュレーションの結果は同じように変化していることがわかる．そして，支持脚と遊脚の角速度が最後にゼロになっていることも示されている．つまり，コリジョンレス歩容を実現したと言える．また，遊脚の姿勢

表 5.1: 物理パラメータと制御パラメータ

m_1	5	kg	$L_1 = a_1 + b_1$	0.6	m
m_2	5	kg	$L_2 = a_2 + b_2$	0.4	m
m_t	10	kg	L_3	0.8	m
m_H	10	kg	T^*	0.8	s
t_1	0.35	s	t_2	0.45	s
H_1	-1	rad	H_2	1	rad
α	$15\pi/180$	rad	T	0.1	s

は前述通り t_1 時刻から t_2 時刻まで 0.1 秒間保持できていることがわかる．図 (5.6) によって， H_1 ， H_2 の差が大きくなると，遊脚先端位置が高くなっていることが示されている．図 (5.7) によって，遊脚保持する時間 T が大きくなったとき，より幅広い障害物を乗り越えるということがわかる．

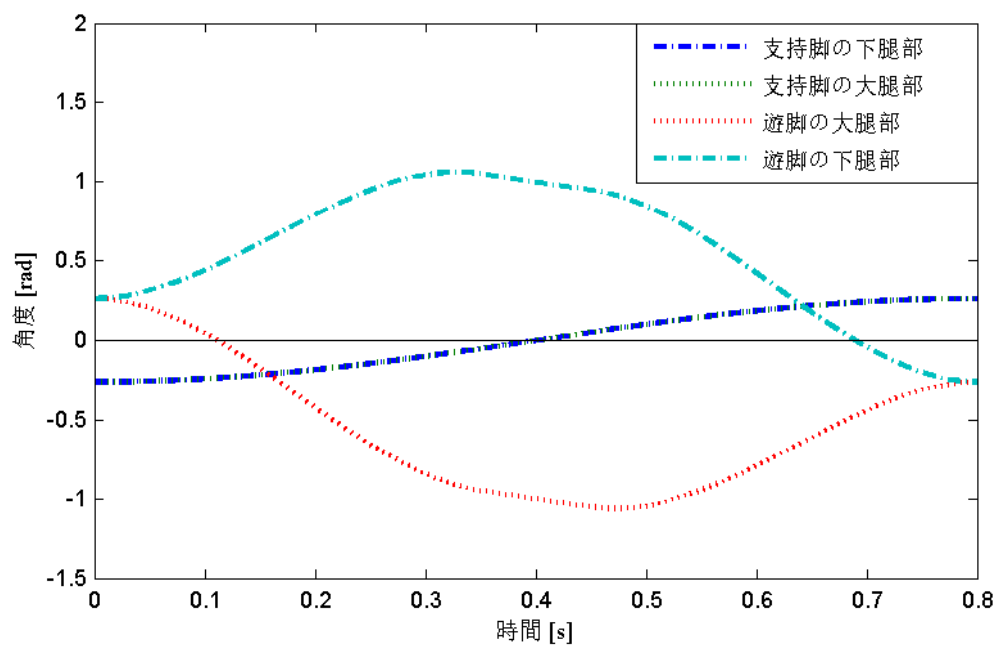


図 5.4: 膝関節と上半身を持つ 2 脚ロボットの角度の時間変化

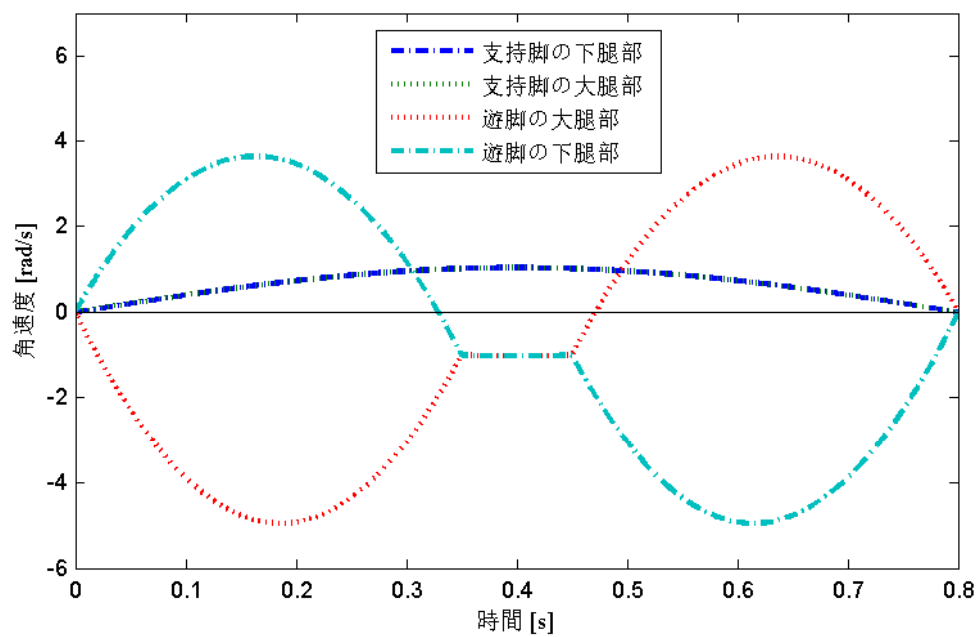


図 5.5: 膝関節と上半身を持つ 2 脚ロボットの角速度の時間変化

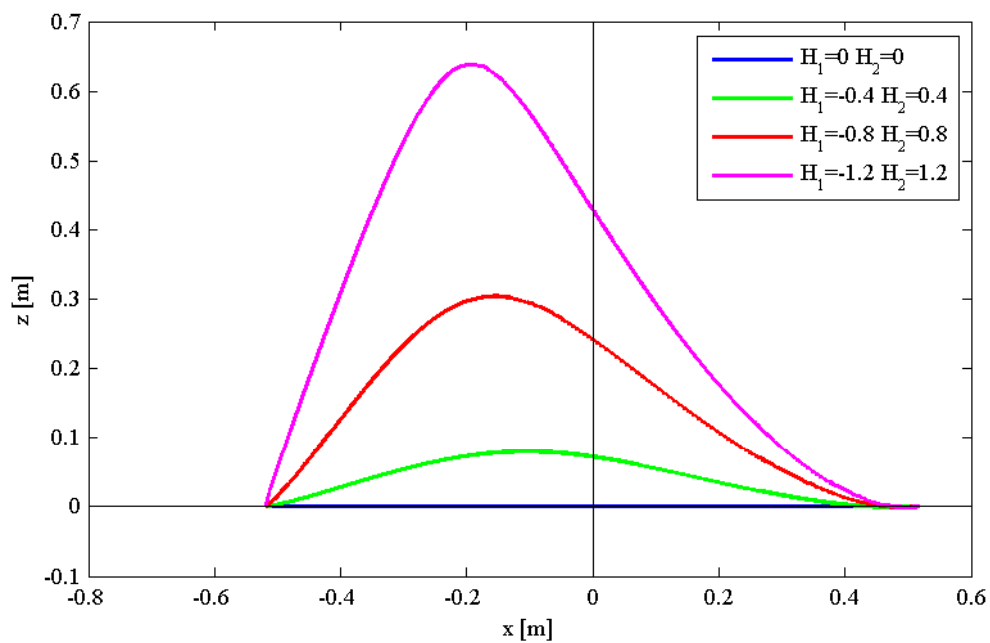


図 5.6: 膝関節と上半身を持つ 2 脚ロボットの H_1, H_2 における遊脚先端位置

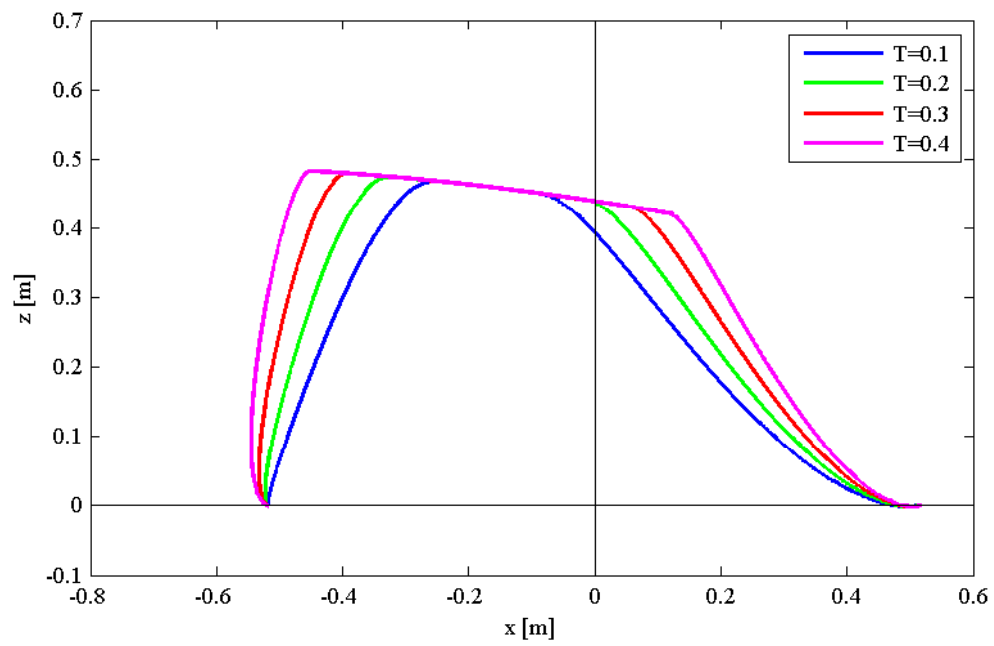


図 5.7: 膝関節と上半身を持つ 2 脚ロボットの T における遊脚先端位置

第6章 まとめ

6.1 結論

本論文では，コリジョンレス歩容の実現と安定性分析をリムレスホイール数値シミュレーションを通して運動特性の解析を行った．2脚ロボットへ拡張できるかどうかを探求し，ロボット上半身はコリジョンレス歩容にどのように影響するのかということも探求した．また，そこで生じた問題に対して数個の制御系を提案した．最後にヒトのように障害物を乗り越えるための応用を実現した．

以下に明らかになった知見をまとめる．

- コリジョンレス歩容生成について，膝関節と上半身を持つ2脚ロボットまでに対する数個の提案した制御系を通して，すべて実現できるということを証明した．
- コリジョンレス歩容は1歩または数歩で完結できるという利点を確認した．
- コリジョンレス歩容の安定性は低く，1歩後にすべての状態は初期状態に戻らないとシステムは安定化できないということを確認した．
- 安定的なコリジョンレス歩容で歩き続けるために満たすべきな初期条件を数学的に解明した．
- 上半身を持つ場合は，上半身の安定性を確立するためにシステム線形化は解決方法の一つとして近似でき，そのために生じる偏差はロボットの両脚支持の状態で調整できる．
- 制御入力なしでコリジョンレス歩容を実現するための数学的な基礎を築いた．
- 膝関節を持つ場合は，コリジョンレス歩容も実現でき，障害物を乗り越えることもできる．

6.2 今後の予定

今後の課題としては，単脚支持相における適切な加減速により運動エネルギー損失を回避するというコリジョンレス歩容の特徴に注目し，これをバネなどの機械要素を利用して再現できないか，その可能性についての数学的考察が挙げられる．特にバネの弾性力のみ

で適切な加減速を実現できれば，入力なしで水平面を歩き続けることが可能になると思われる．また本研究では，コリジョンレス歩容は初期状態を適切に設定しなければ生成できないことを確認した．つまり，生成されるコリジョンレス歩容は本質的に不安定周期軌道であると言える．この問題を解決すべく，ロボットの重心を制御出力として，その安定化を通して歩容全体の安定化も可能となるようなコリジョンレス歩容を探求する必要がある．さらに，各歩容におけるエネルギー効率の最大化を目指した最適解の探求も行うべきである．最後に，本研究では二次元的に運動解析を行ったが，より実地的な運動の実現を目指して，三次元的なモデルへと理論的考察を発展させていく必要もある．

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深謝致します．最適化についての観点から鋭いご指摘を頂いた平石邦彦教授に感謝致します．研究に対する様々なご助言を頂いた前園涼教授に感謝致します．浅野文彦研究室のメンバーであり，討論，論文作成，修正において貴重な意見・助言を頂いた肖軒氏，李龍川氏，菊地保公氏，西原正継氏，小林聖弥氏，松浦光汰氏，朱欣桐氏に感謝致します．

また，授業から色々知識を頂いてこの2年間の研究に非常に助かりました，JAISTで授業を担当する先生たちに感謝致します．これまで支えてくれた家族と友人にも感謝致します．

参考文献

- [1] 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. Hoepflinger 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] M. Gomes and A. Ruina, “Walking model with no energy cost,” Physical Review E, Vol. 83, No. 3, pp. 03290101-03290104, 2011.
- [5] F. Asano and Z.-W. Luo, “Energy-efficient and high-speed dynamic biped locomotion based on principle of parametric excitation,” IEEE Trans. on Robotics, Vol. 24, No. 6, pp. 1289-1301, 2008
- [6] F. Asano, Z.-W. Luo and M. Yamakita, “Biped gait generation and control based on a unified property of passive dynamic walking,” IEEE Trans. on Robotics, Vol. 21, No. 4, pp. 754-762, 2005.
- [7] E. R. Dunn and R. D. Howe, “Towards smooth bipedal walking,” Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 2489-2494, 1994.
- [8] M. Rostami and G. Bessonnet, “Impactless sagittal gait of a biped robot during the single support phase,” Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1385-1391, 1998.
- [9] M.W. Gomes and K. Ahlin, “Quiet (nearly collisionless) robotic walking”, Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 5761-5766, 2015.
- [10] 浅野 文彦, 羅 志偉, 山北 昌毅, “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 22(1), pp. 130-139, 2004.

- [11] F. Asano, Y. Zheng and X. Xiao, “Generation of underactuated bipedal gait completing in one step,” Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 2050-2055, 2016.
- [12] F. Asano and X. Xiao, “Output deadbeat control approaches to fast convergent gait generation of underactuated spoked walker,” Proc. of the IEEE/SICE Int. Symp. on System Integration (SII), pp. 265-270, 2012.