ヘビ型ロボットの接地部反力を考慮した跳躍制御

田中基康^{*1} 星野恵一^{*2} 福島宏明^{*3} 松野文俊^{*3}

Jumping Control of Snake Robots with Considering Reaction Force at Grounding Part

Motoyasu Tanaka^{*1}, Keiichi Hoshino^{*2}, Hiroaki Fukushima^{*3} and Fumitoshi Matsuno^{*3}

This paper proposes a controller for the jumping motion of the 3-dimensional snake robot which has passive wheels and active universal joints. We assume that the snake robot jumps from the initial posture which some forward links are lifted up. First, we derive a dynamic model of the robot with considering the contact force and the frictional force between the robot and the flat surface. Next, we propose a controller which the snake robot jumps without slipping and the evaluation function to select the initial posture with consideration of the constraint force ellipse. Simulation and experimental results show the effectiveness of the proposed controller and the evaluation function.

Key Words: Snake Robot, Redundancy, Jumping Motion Control, Constraint Force Ellipse

1. はじめに

ヘビは手足のない細長い体幹という単純な形態であるにもかかわらず、様々な動作や推進が可能である [1]。これらの特徴を模倣したヘビ型ロボットの機構や推進、およびその制御に関して多くの研究が行われている。先行研究ではうねり推進 [2]、サイナスリフティング滑走 [3]、巻きつき [4] などのヘビの一般的な運動について研究がされている。一般的にヘビは跳躍力がないとされているが、マムシやジャンピングピットバイパーなどの種は跳躍能力が高いことが知られている。ヘビ型ロボットの跳躍運動を実現することができれば、新たな運動能力を付加し、ヘビ型ロボットの運動性能の向上が期待できる。そこで、本研究ではヘビ型ロボットの跳躍制御について考える。ここで、跳躍とは、接地したロボットが離床し、その離床中にロボットが目標の方向へ移動し再度着床することと定義する。また、本研究では接地したロボットが離床するまでの運動を跳躍運動と呼ぶ。

本研究では受動車輪（以下、単に車輪とする）によって生物のヘビの体幹に存在する摩擦の異方性をモデル化した車輪拘束ヘビ型ロボット [1]（以下、単にヘビ型ロボットとする）を研究対象として扱う。このヘビ型ロボットのように能動回転関節を有し冗長性をもつ跳躍ロボットとして動物の脚機構を規範としたロボットやヒューマノイドなどが挙げられる。美多らはカン

ガルーの跳躍運動を解析し、それに基づいた走行を実現するように一脚ロボットの跳躍走行制御を行った [5]。また、ヒューマノイドの跳躍やシリアルリンクロボットの跳躍に関する研究も行われている [6] [7]。

ヘビ型ロボットが他の跳躍ロボットと異なる点は、前述した体幹が持つ摩擦の異方性である。通常のヒューマノイド等の跳躍では接地部分の摩擦はどの方向にも一様に働くと仮定される。一方、ヘビ型ロボットは生物のヘビと同様に体幹方向には摩擦が小さく体幹と垂直方向には摩擦が大きいという特徴をもつため、接地したリンクに発生する摩擦の異方性を考慮した跳躍が必要となる。

本研究では平面環境における三次元車輪拘束ヘビ型ロボットを対象に、横滑りせずに跳躍運動を行う制御則を提案する。まず対象とするヘビ型ロボットの動力学モデルを導出し、ロボットと環境との間に働く床反力と摩擦力を考慮することで接地部分が横滑りせずに跳躍運動を行う制御則を設計する。次に、跳躍運動のための被制御量の目標値を設計し、接地部分が横滑りしないための必要条件を導出する。さらに、効果的な跳躍を行うための評価指標として拘束力楕円とベース部重心角度を提案し、初期姿勢の最適化を行う。そして数値シミュレーションおよび物理シミュレータ Open Dynamics Engine [8] を用いたシミュレーションにより提案制御則の有効性を検証し、実機実験により拘束力楕円に基づく評価指標の有効性を検証する。

2. ヘビ型ロボットの動力学モデル

制御対象として Fig. 1 に示したような n リンクヘビ型ロボットを考える。三次元的な運動を可能とするために各関節は 2 自由度を有する能動ユニバーサルジョイントを想定する。初期姿

原稿受付 2013 年 2 月 6 日

^{*1}電気通信大学

^{*2}株式会社リコー

^{*3}京都大学

^{*1}The University of Electro-Communications

^{*2}Ricoh Company Ltd

^{*3}Kyoto University

Fig. 1 A snake robot

勢において先頭からいくつかのリンクを持ち上げた状態を考え、ロボット先頭から n_h リンクをヘッド部、第 $n_h + 1$ リンクから第 n リンクまでの環境と接触する n_b リンクをベース部とし、以下の仮定を導入する。

[仮定 1] 環境は平坦とする

[仮定 2] 接触は点接触に近似できる

[仮定 3] ヘッド部は環境と接しない

[仮定 4] ロボットはベース部の車輪によって支えられ、跳躍運動中ベース部車輪は常に環境に接する

[仮定 5] ベース部の車輪は横滑りしない

[仮定 6] 車輪はベース部すべてのリンクに配置する

仮定 1, 2 は問題を簡略化するためのものである。仮定 3, 4 は接触点が跳躍運動中に増減することでモデルが変化するケースを考慮しないためのものである。仮定 5 はヘビの「体幹と垂直方向には滑らない」という摩擦の異方性を理想的に表現したものである。また車輪配置条件についてヘッド部とベース部を明確に分けるためベース部先頭に車輪が存在し、すべての関節の運動が被制御量の運動に寄与することを保証するためベース部最後尾に車輪が存在する必要がある [9]。それ以外のベース部リンクについては、関節構成からベース部の車輪を外すことでベース部に運動学的冗長性を与えることができるものの、車輪を外すことによってベース部の支持点が少なくなり、跳躍運動中の安定性を保つ上で不利になる。また、本研究では跳躍運動中のベース部の運動を特に考えないので、仮定 6 を導入しベース部に運動学的冗長性はないものとする。

次に、一般化座標を定義する。絶対座標系 Σ_0 に関するロボット先頭の位置、姿勢を $\mathbf{w} = [x_h, y_h, z_h, \theta_r, \theta_p, \theta_y]^T$ 、第 i 関節の第 1 回転軸まわりの回転角を ϕ_i 、第 2 回転軸まわりの回転角を ψ_i と定義し、それらをまとめたベクトルを $\boldsymbol{\theta}_i = [\phi_i, \psi_i]^T$ 、第 1 関節から第 $n - 1$ 関節までをまとめたベクトルを $\boldsymbol{\theta} = [\boldsymbol{\theta}_1^T, \dots, \boldsymbol{\theta}_{n-1}^T]^T$ とする (Fig. 1 参照)。そして、一般化座標を $\mathbf{q} = [\mathbf{w}^T, \boldsymbol{\theta}^T]^T \in R^{2n+4}$ と定義する。また、第 i 関節の回転角 θ_i に対応する関節トルクを $\boldsymbol{\tau}_i = [\tau_{\phi_i}, \tau_{\psi_i}]^T$ 、第 1 関節から第 $n - 1$ 関節までの入力トルクまとめたベクトルを $\boldsymbol{\tau} = [\boldsymbol{\tau}_1^T, \dots, \boldsymbol{\tau}_{n-1}^T]^T$ とする。ロボットは離床時におけるロボット全体の重心位置および速度によって一意に決まる放物線運動を行うため、ロボットの重心速度を目標軌道に追従させることにより跳躍に必要な飛び出し速度を与える。また、ベース部先頭位置や姿勢が変化することを許容するとベース部が運動中に後退したり、特異姿勢に陥る可能性があるため、ベース

Fig. 2 The k -th link on $O-XY$

部先頭位置と姿勢を制御することを考える。ここで、被制御量として $\bar{\mathbf{w}} = [\bar{\mathbf{w}}^T, \boldsymbol{\theta}_{scp}^T]^T \in R^{(n_{scp}+7)}$ 、 $\bar{\mathbf{w}} = [\mathbf{r}_g^T, \mathbf{P}_{bh}^T]^T$ とする。ただし、 $\mathbf{r}_g = [r_{gx}, r_{gy}, r_{gz}]^T$ はロボット全体の重心位置、 $\mathbf{P}_{bh}$ はロボットのベース部先頭である第 $n_h + 1$ リンクの X, Y 座標位置とロール、ピッチ回転角を並べたベクトルであり、 $\mathbf{P}_{bh} = [x_{n_h+1}, y_{n_h+1}, \theta_{rn_h+1}, \theta_{pn_h+1}]^T$ である。また、 $\boldsymbol{\theta}_{scp} \in R^{n_{scp}}$ は運動学的冗長性に対応する関節角であり、形状可制御点と呼ばれる [9] [10]。

2.1 速度拘束式

仮定 4, 5 より車輪付きベース部リンクに働く速度拘束式を導出する。Fig. 2 は第 k リンクに車輪が取り付けられ、環境である $O-XY$ 平面に接している様子を表した図である。それぞれ、Fig. 2(a) はリンクの側面図、Fig. 2(b) はリンクの上面図である。仮定が成り立つためには、Fig. 2(a) から車輪装着位置 $\mathbf{P}_{gk} = [x_{gk}, y_{gk}, z_{gk}]^T$ が車輪半径 r_w の高さに存在する必要がある。そのため、次式が成り立つ。

$$z_{gk} = r_w \quad (1)$$

Fig. 2(b) において、 $\dot{x}_{gk}, \dot{y}_{gk}$ はそれぞれ第 k リンク重心の絶対座標系 X, Y 軸方向速度、 β_k は第 k リンクの絶対姿勢角のヨー方向角度である。仮定 4 が成り立つとき、仮定 5 より次の速度拘束式が得られる。

$$\dot{x}_{gk} \cos \beta_k - \dot{y}_{gk} \sin \beta_k = 0 \quad (2)$$

式 (2) は、第 k リンクの車輪が車軸方向に横滑りしないという非ホロノミック拘束である。式 (1) の時間微分と式 (2) を連立することで、次の速度拘束式

$$\bar{\mathbf{A}} \dot{\mathbf{w}} = \bar{\mathbf{B}} \dot{\boldsymbol{\theta}} \quad (3)$$

を得る。ここで、 $\bar{\mathbf{A}} = [\bar{\mathbf{A}}_f^T, \bar{\mathbf{A}}_w^T]^T$ 、 $\bar{\mathbf{B}} = [\bar{\mathbf{B}}_f^T, \bar{\mathbf{B}}_w^T]^T$ であり、 $\bar{\mathbf{A}}_f \in R^{n_b \times (n_{scp}+7)}$ と $\bar{\mathbf{B}}_f \in R^{n_b \times 2n_b}$ は式 (1) より得られる行列、 $\bar{\mathbf{A}}_w \in R^{n_b \times (n_{scp}+7)}$ と $\bar{\mathbf{B}}_w \in R^{n_b \times 2n_b}$ は式 (2) より得られる行列である。また、関節角ベクトル $\boldsymbol{\theta}$ から第 n_h 番めの関節から第 $n - 1$ 関節までの関節角を抜き出し並べたベクトルを $\bar{\boldsymbol{\theta}} = [\boldsymbol{\theta}_{n_h}^T, \dots, \boldsymbol{\theta}_{n-1}^T]^T \in R^{2n_b}$ とする。文献 [10] より運動学的冗長性の数は一般化座標の数から被制御量と拘束式の数を引いた数となる。よって、一般化座標 $\mathbf{q}$ の数 $2n + 4$ 、形状可制御点以外の被制御量 $\bar{\mathbf{w}}$ の数 7、拘束式の数 $2n_b$ より運動学的冗長性の数は $n_{scp} = 2n + 4 - 7 - 2n_b = 2n_h - 3$ となる。

2.2 動力学モデル

$\bar{\mathbf{B}}$ が可逆であると仮定すると、速度拘束式 (3) は次式のように変形することができる。

$$\begin{bmatrix} -\bar{\mathbf{F}} & \mathbf{I}_{2n_b} \end{bmatrix} \mathbf{T}\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{0} \quad (4)$$

ここで, $\bar{\mathbf{F}} = \bar{\mathbf{B}}^{-1}\bar{\mathbf{A}}$, $\mathbf{T} \in R^{(2n+4) \times (2n+4)}$ は一般化速度 $\dot{\mathbf{q}}$ をベクトル $\dot{\mathbf{q}} = [\dot{\mathbf{w}}^T, \dot{\boldsymbol{\theta}}^T]^T$ に変換する行列であり, $\mathbf{T}\dot{\mathbf{q}} = \dot{\mathbf{q}}$ である. 速度拘束式 (4) を考慮すると, ヘビ型ロボットの運動方程式

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \hat{\mathbf{g}}(\mathbf{q}) + \mathbf{T}^T \begin{bmatrix} -\bar{\mathbf{F}}^T \\ \mathbf{I}_{2n_b} \end{bmatrix} \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{E}\boldsymbol{\tau} \quad (5)$$

を得る. ここで, $\mathbf{M} \in R^{(2n+4) \times (2n+4)}$ は慣性行列, $\mathbf{h} \in R^{(2n+4)}$ は遠心・コリオリ力項, $\hat{\mathbf{g}} \in R^{(2n+4)}$ は重力項, $\boldsymbol{\lambda} \in R^{2n_b}$ はラグランジュの未定乗数, 行列 $\mathbf{E}$ は, $\mathbf{E} = [\mathbf{0}_{2(n-1) \times 6} \quad \mathbf{I}_{2(n-1)}]^T \in R^{(2n+4) \times 2(n-1)}$ である. さらに, 式 (5) はラグランジュの未定乗数項を消去し, 拘束式 (3) を利用することで, 状態量を $\bar{\mathbf{w}}$ に低次元化した次式の運動方程式に変形することができる.

$$\bar{\mathbf{M}}\ddot{\bar{\mathbf{w}}} + \bar{\mathbf{h}} = \bar{\mathbf{E}}\boldsymbol{\tau} \quad (6)$$

ここで,

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{M}} &= [\mathbf{I}_{n_{scp}+7} \quad \bar{\mathbf{F}}^T] \mathbf{T}^{-T} \mathbf{M} \mathbf{T}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{n_{scp}+7} \\ \bar{\mathbf{F}} \end{bmatrix} \\ &\in R^{(n_{scp}+7) \times (n_{scp}+7)} \\ \bar{\mathbf{h}} &= [\mathbf{I}_{n_{scp}+7} \quad \bar{\mathbf{F}}^T] \mathbf{T}^{-T} (\mathbf{h} + \hat{\mathbf{g}}) \\ &+ [\mathbf{I}_{n_{scp}+7} \quad \bar{\mathbf{F}}^T] \mathbf{T}^{-T} \mathbf{M} \mathbf{T}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{n_{scp}+7} \\ \bar{\mathbf{F}} \end{bmatrix} \dot{\bar{\mathbf{w}}} \\ &+ [\mathbf{I}_{n_{scp}+7} \quad \bar{\mathbf{F}}^T] \mathbf{T}^{-T} \mathbf{M} \mathbf{T}^{-1} \dot{\mathbf{T}} \mathbf{T}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{n_{scp}+7} \\ \bar{\mathbf{F}} \end{bmatrix} \dot{\bar{\mathbf{w}}} \\ &\in R^{n_{scp}+7} \\ \bar{\mathbf{E}} &= \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{n_{scp}+7} & \bar{\mathbf{F}}^T \end{bmatrix} \mathbf{T}^{-T} \mathbf{E} \in R^{(n_{scp}+7) \times 2(n-1)} \end{aligned}$$

である. 本研究では式 (6) を動力学モデルとして扱い, 関節トルク $\boldsymbol{\tau}$ を入力として跳躍制御則を設計する.

3. 跳躍運動制御

3.1 制御入力の設計

動力学モデル (6) に対し, 制御入力 $\boldsymbol{\tau}$ を次式のように設計する.

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau} &= \boldsymbol{\tau}_{min} + \boldsymbol{\tau}_{ker} \\ &= \bar{\mathbf{E}}^\dagger (\bar{\mathbf{M}}\boldsymbol{\alpha}_w + \bar{\mathbf{h}}) + \bar{\mathbf{E}}_{ker} \boldsymbol{\eta} \end{aligned} \quad (7)$$

ここで, $\boldsymbol{\alpha}_w = \ddot{\bar{\mathbf{w}}}_d + \mathbf{K}_v(\dot{\bar{\mathbf{w}}}_d - \dot{\bar{\mathbf{w}}}) + \mathbf{K}_p(\bar{\mathbf{w}}_d - \bar{\mathbf{w}})$, $\bar{\mathbf{E}}^\dagger$ は $\bar{\mathbf{E}}$ の擬似逆行列, $\bar{\mathbf{w}}_d \in R^{(n_{scp}+7)}$ は被制御量の目標値ベクトル, $\mathbf{K}_v > 0$, $\mathbf{K}_p > 0$ はゲイン行列, $\boldsymbol{\tau}_{ker} = \bar{\mathbf{E}}_{ker} \boldsymbol{\eta} \in \text{Ker}(\bar{\mathbf{E}})$, $\bar{\mathbf{E}}_{ker} \in R^{2(n-1) \times (2n_b-6)}$ は $\bar{\mathbf{E}}$ の零空間の基底ベクトルを列とする行列, $\boldsymbol{\eta} \in R^{(2n_b-6)}$ は任意ベクトルである. 入力 (7) の第 1 項 $\boldsymbol{\tau}_{min}$ は被制御量を目標軌道へ追従させるための入力であり,

$\|\boldsymbol{\tau}\|$ を最小にする入力である. 第 2 項 $\boldsymbol{\tau}_{ker}$ は被制御量 $\bar{\mathbf{w}}$ の運動に影響を与えない入力であり, 動力学的冗長性を表す入力である. 式 (3) より $\dot{\boldsymbol{\theta}} = \bar{\mathbf{F}}\dot{\bar{\mathbf{w}}}$ の関係があるため, $\boldsymbol{\tau}_{ker}$ はロボット全体の運動にも影響を与えない. このとき, 動力学モデル (6) の閉ループ系は, $\bar{\mathbf{M}}\{(\ddot{\bar{\mathbf{w}}} - \ddot{\bar{\mathbf{w}}}_d) + \mathbf{K}_v(\dot{\bar{\mathbf{w}}} - \dot{\bar{\mathbf{w}}}_d) + \mathbf{K}_p(\bar{\mathbf{w}} - \bar{\mathbf{w}}_d)\} = \mathbf{0}$ となる. $\mathbf{T}$, $\bar{\mathbf{B}}$ がフルランクであれば $\bar{\mathbf{M}} > 0$ となり, $t \rightarrow \infty$ で被制御量 $\bar{\mathbf{w}}$ は目標軌道 $\bar{\mathbf{w}}_d$ に収束する.

3.2 横滑り回避

ロボットが跳躍運動中に滑らずにロボット全体の重心に任意の運動を与えるためには, 接触点が滑らないような摩擦条件を維持する必要がある. そのためには, ベース部に配置された各車輪が横滑りしないよう, それぞれの車輪において摩擦条件が満足されなければならない. そこでロボットの動力学的冗長性を用いて車輪の横滑り回避を実現する制御入力を設計する.

車輪と環境との間に働く接触力は, 拘束力として導出することが可能である. 速度拘束式 (3) を満たすためにロボットに働かなければならない拘束力 $\mathbf{f} \in R^{2n_b}$ は仮想仕事の原理から導くことができ, 次式で与えられる.

$$\mathbf{f} = \bar{\mathbf{B}}^{-T} \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{X}(\mathbf{q})\boldsymbol{\tau} + \mathbf{Y}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \quad (8)$$

ここで,

$$\begin{aligned} \mathbf{X} &= \bar{\mathbf{B}}^{-T} (\mathbf{J} \mathbf{M}^{-1} \mathbf{J}^T)^{-1} \mathbf{J} \mathbf{M}^{-1} \mathbf{E} \\ \mathbf{Y} &= -\bar{\mathbf{B}}^{-T} (\mathbf{J} \mathbf{M}^{-1} \mathbf{J}^T)^{-1} \{ \mathbf{J} \mathbf{M}^{-1} (\mathbf{h} + \hat{\mathbf{g}}) - \dot{\mathbf{J}} \dot{\mathbf{q}} \} \end{aligned}$$

であり, 行列 $\mathbf{J}$ は $\mathbf{J} = [-\bar{\mathbf{F}} \quad \mathbf{I}_{2n_b}] \mathbf{T}$ である. 第 i ($i = 1, \dots, n_b$) 接触点における環境に垂直な方向の接触力を f_{fi} , 車軸方向の横拘束力を f_{wi} とし, $\mathbf{f}_f = [f_{f1}, \dots, f_{fn_b}]^T$, $\mathbf{f}_w = [f_{w1}, \dots, f_{wn_b}]^T$ とすると, 拘束力 $\mathbf{f}$ は拘束式 (3) の構造との対応関係から $\mathbf{f} = [\mathbf{f}_f^T, \mathbf{f}_w^T]^T$ となる. よって, 接触力 $\mathbf{f}_f, \mathbf{f}_w$ は

$$\mathbf{f}_f = (\mathbf{X}_f \boldsymbol{\tau}_{min} + \mathbf{Y}_f) + \mathbf{X}_f \boldsymbol{\tau}_{ker} \quad (9)$$

$$\mathbf{f}_w = (\mathbf{X}_w \boldsymbol{\tau}_{min} + \mathbf{Y}_w) + \mathbf{X}_w \boldsymbol{\tau}_{ker} \quad (10)$$

と与えられる. ここで, $\mathbf{X}_f \in R^{n_b \times 2(n-1)}$, $\mathbf{Y}_f \in R^{n_b}$ はそれぞれ $\mathbf{X}, \mathbf{Y}$ の 1 行めから n_b 行め, $\mathbf{X}_w \in R^{n_b \times 2(n-1)}$, $\mathbf{Y}_w \in R^{n_b}$ はそれぞれ $n_b + 1$ 行めから $2n_b$ 行めである. 式 (9), (10) より, 接触力 $\mathbf{f}_f, \mathbf{f}_w$ は関節トルクによって一意に決まることが分かる.

接触点における摩擦をクーロン摩擦で表すと, 第 i 車輪が横滑りしないための条件は $|f_{wi}| \leq \mu f_{fi}$ で与えられるが, 等号が成り立つ場合にわずかな外乱によって滑りが生じてしまうため, 余裕 $\epsilon \geq 0$ を与えた次式を第 i 車輪が横滑りしないための条件として扱う.

$$|f_{wi}| \leq \mu f_{fi} - \epsilon \quad (11)$$

ここで, $f_{fi} < 0$ となるときは環境とロボット間で張力が働くという物理的にあり得ないケースであるため, $f_{fi} > 0$ という制約を加えて条件 (11) を書き直すと次式を得る.

$$\begin{cases} -\mu f_{fi} + \epsilon \leq f_{wi} \\ f_{wi} \leq \mu f_{fi} - \epsilon \\ f_{fi} > 0 \end{cases} \quad (12)$$

条件 (12) を式 (9), (10) と $\tau_{ker} = \bar{\mathbf{E}}_{ker} \boldsymbol{\eta}$ の関係を用いて変形すると、次式の $\boldsymbol{\eta}$ についての制約条件を得る。

$$\mathbf{A}_l \boldsymbol{\eta} \leq \mathbf{b}_l \quad (13)$$

ここで、 $\mathbf{A}_l \in R^{3n_b \times (2n_b - 6)}$, $\mathbf{b}_l \in R^{3n_b}$ である。この制約条件 (13) を満たす $\tau_{ker} = \bar{\mathbf{E}}_{ker} \boldsymbol{\eta}$ の任意ベクトル $\boldsymbol{\eta}$ を与えることで、車輪の横滑りを回避することを考える。跳躍には大きなトルクが必要であると考えられるため、時刻 $t = \hat{t}$ において入力トルクを最小化する次式の二次計画問題を考える。

$$\begin{aligned} \min_{\boldsymbol{\eta}} \quad & \frac{1}{2} \boldsymbol{\tau}(\hat{t})^T \boldsymbol{\tau}(\hat{t}) = \frac{1}{2} \boldsymbol{\eta}(\hat{t})^T \mathbf{H} \boldsymbol{\eta}(\hat{t}) \\ \text{subject to} \quad & \text{equation (13)} \end{aligned} \quad (14)$$

制御対象に入力を与える各離散時刻で最適化問題 (14) を解き、 $\tau_{ker} = \bar{\mathbf{E}}_{ker} \boldsymbol{\eta}$ として与えれば、摩擦条件が満たされる。

3.3 最適化問題 (14) の解の必要条件

制約条件付き最適化問題 (14) の解の存在条件について考える。この最適化問題の可解性は一般的には証明することができないため、本論文では力学的観点から、解が存在する必要条件についてのみ考える。

式 (11) から、床反力の総和 $\mathbf{F}_f = \sum_{i=1}^{n_b} f_{fi}$ と横拘束力の絶対値の総和 $\mathbf{F}_w = \sum_{i=1}^{n_b} |f_{wi}|$ は

$$\mathbf{F}_w \leq \mu \mathbf{F}_f - n_b \epsilon \quad (15)$$

となるのが最適化問題が可解となる必要条件である。ここで、床反力の総和 $\mathbf{F}_f$ はロボット全体の重心にかかる慣性力の Z 軸方向成分と等しくなるため、次式のように表される。

$$\mathbf{F}_f = \mathbf{F}_z = (\ddot{r}_{gz} + g) \sum_{i=1}^n m_i \quad (16)$$

ただし、 $\ddot{r}_{gz}$ はロボット全体の重心加速度の Z 軸方向成分、 g は重力加速度、 m_i は第 i リンクの質量である。また、各車輪に発生する横拘束力はロボット全体の重心にかかる慣性力の水平方向成分 $\mathbf{F}_{xy}$ に関係する。慣性力 $\mathbf{F}_{xy}$ を跳躍方向成分とそれに垂直な成分をそれぞれ $\mathbf{F}_x$, $\mathbf{F}_y$ とすると、それぞれ

$$\mathbf{F}_x = \sum_{i=1}^{n_b} f_{wxi}, \quad \mathbf{F}_y = \sum_{i=1}^{n_b} f_{wyi} \quad (17)$$

となる。ここで、 f_{wxi} , f_{wyi} はそれぞれ、第 i リンクに発生する横拘束力 f_{wi} を跳躍方向とそれに垂直な成分に分けたものである。また、慣性力 $\mathbf{F}_x$, $\mathbf{F}_y$ はそれぞれ、床面に水平な跳躍方向の加速度 $\ddot{r}_{gx}$ とそれに垂直な方向の加速度 $\ddot{r}_{gy}$ から

$$\mathbf{F}_x = \ddot{r}_{gx} \sum_{i=1}^n m_i, \quad \mathbf{F}_y = \ddot{r}_{gy} \sum_{i=1}^n m_i \quad (18)$$

と表すことができる。式 (18) から重心加速度によって慣性力が決まり、式 (17) からその慣性力によって各車輪に発生する

横拘束力は

$$\mathbf{F}_x = \ddot{r}_{gx} \sum_{i=1}^n m_i = \sum_{i=1}^{n_b} f_{wxi} \quad (19)$$

$$\mathbf{F}_y = \ddot{r}_{gy} \sum_{i=1}^n m_i = \sum_{i=1}^{n_b} f_{wyi} \quad (20)$$

とならなければならない。ここで、

$$\mathbf{F}_w \geq \mathbf{F}_{xy} \quad (21)$$

となる。ただし、 $\mathbf{F}_{xy} = \sqrt{\mathbf{F}_x^2 + \mathbf{F}_y^2}$ である。式 (21) を式 (15) に代入すると、

$$\mathbf{F}_{xy} \leq \mathbf{F}_w \leq \mu \mathbf{F}_f - n_b \epsilon \quad (22)$$

となる。 $\sum_{i=1}^n m_i = m_{all}$ とすると、式 (16), (18), (22) から、

$$\sqrt{\ddot{r}_{gx}^2 + \ddot{r}_{gy}^2} \leq \mu(\ddot{r}_{gz} + g) - \frac{n_b}{m_{all}} \epsilon \quad (23)$$

となるように重心加速度の目標軌道を設計する必要がある。ただし、式 (23) は最適化問題が可解であるための必要条件であり、必要十分条件でないことに注意されたい。必要十分条件の解明については今後の課題とする。

3.4 被制御量の目標軌道

問題を簡単化するため、跳躍運動においてベース部は運動を行わず横滑りしないよう体を支えるのに用い、ヘッド部の運動によって跳躍の運動量を得ることとする。ベース部先頭位置・姿勢 $\mathbf{P}_{bh}$ の目標値は初期位置および姿勢を維持するよう $\mathbf{P}_{bh}(0)$ とする。

次に、ロボットの重心 $\mathbf{r}_g$ の目標軌道 $\mathbf{r}_{gd}$ を設計する。ロボットは接地状態にて運動量をため、離床時に重心の加速度を 0 にするよう動作することで跳躍できる。本研究では目標重心加速度 $\ddot{\mathbf{r}}_{gd}$ を正弦波を用いて次式のように与える。

$$\ddot{\mathbf{r}}_{gd} = [bx, by, bz]^T \sin\left(\frac{\pi}{t_f} t\right) \quad (24)$$

ここで、 t_f は離床時刻、 bx, by, bz は運動中の重心の最大加速度であり、前述の必要条件 (23) を満たすよう設計する。

形状可制御点の目標値としてはロボットの動力学モデルの特異点回避を考える。特異点回避は運動学的冗長性を表す形状可制御点の目標値 $\boldsymbol{\theta}_{scpd}$ を適切に設計することで実現できる [10]。動力学モデルにおいて、逆行列を必要とする行列は $\mathbf{T}$ と $\bar{\mathbf{B}}$ であり、これら二つの行列がランク落ちした場合、入力が発散してしまう。そこで、これらの行列の行列式の値から評価関数 $\mathbf{V}$ を求め、 $\mathbf{V}$ を増大化する形状可制御点の目標値を与える。まず、評価関数 $\mathbf{V}(\mathbf{q})$ を次のように設定する。

$$\mathbf{V}(\mathbf{q}) = a \det(\bar{\mathbf{B}}^T \bar{\mathbf{B}}) + b \det(\mathbf{T}^T \mathbf{T}) \quad (25)$$

ここで、 $a, b > 0$ は重み係数である。評価関数 $\mathbf{V}$ を増大化することで動力学モデルの特異点を回避することができる。ここで、 $\mathbf{V}$ の時間微分を計算すると

$$\begin{aligned}
\dot{V} &= \frac{\partial V}{\partial \mathbf{q}} \dot{\mathbf{q}} = \frac{\partial V}{\partial \mathbf{q}} \mathbf{T}^{-1} \dot{\mathbf{q}} = \frac{\partial V}{\partial \mathbf{q}} \mathbf{T}^{-1} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{w}} \\ \dot{\boldsymbol{\theta}} \end{bmatrix} \\
&= \frac{\partial V}{\partial \mathbf{q}} \mathbf{T}^{-1} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{w}} \\ \bar{\mathbf{F}} \dot{\mathbf{w}} \end{bmatrix} = \frac{\partial V}{\partial \mathbf{q}} \mathbf{T}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \bar{\mathbf{F}} \end{bmatrix} \dot{\mathbf{w}} \\
&= \frac{\partial V}{\partial \mathbf{q}} \bar{\mathbf{F}}_{T1} \dot{\mathbf{w}} + \frac{\partial V}{\partial \mathbf{q}} \bar{\mathbf{F}}_{T2} \dot{\boldsymbol{\theta}}_{scpd} \\
&= \frac{\partial V}{\partial \mathbf{q}} \bar{\mathbf{F}}_{T1} \dot{\mathbf{w}} + \frac{\partial V}{\partial \mathbf{q}} \bar{\mathbf{F}}_{T2} \dot{\boldsymbol{\theta}}_{scpd} \quad (26) \\
&\quad [\bar{\mathbf{F}}_{T1} \quad \bar{\mathbf{F}}_{T2}] = \mathbf{T}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \bar{\mathbf{F}} \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

を得る。よって、形状可制御点の目標値 $\boldsymbol{\theta}_{scpd}$ を

$$\dot{\boldsymbol{\theta}}_{scpd} = \mathbf{K}_{scpd} \left(\frac{\partial V}{\partial \mathbf{q}} \bar{\mathbf{F}}_{T2} \right)^T \quad (27)$$

と与える。ここで、 $\mathbf{K}_{scpd} \geq 0$ は重み行列である。 $\dot{\boldsymbol{\theta}}_{scpd} = \dot{\boldsymbol{\theta}}_{scpd}$ となれば式 (26) の第 3 式第 2 項が正となるため、重み行列 $\mathbf{K}_{scpd}$ を適切に決定することで評価関数 V の増大化、すなわち特異姿勢回避に貢献できる [10]。

4. ベース部初期姿勢

ヘビ型ロボットは摩擦の異方性という特徴をもつため、初期姿勢が跳躍運動に与える影響が大きい。本章では跳躍運動に適したベース部初期姿勢を選ぶための評価指標を提案する。

4.1 拘束力だ円

ヘビ型ロボットの跳躍運動ではベース部のみで跳躍に耐える摩擦を生み出す必要がある。ヘッド部の運動によって生じる力はベース部の先頭からベース部全体に伝わっていく。そこで、ベース部先頭に発生する力とベース部各車輪に発生する最大摩擦力の関係を求める。

ヘッド部を無視し、ベース部における第 2 回転軸まわりの回転角がすべてゼロであるとする。制御対象は二次元ヘビ型ロボットと等価なモデルとなる。ベース部先頭関節のヨー回転角を θ_{yn_h+1} 、 $\boldsymbol{\theta}_b = [\theta_{yn_h+1}, \phi_{n_h+1}, \dots, \phi_{n-1}]^T$ 、 $\mathbf{w}_b = [x_{n_h+1}, y_{n_h+1}]^T$ とすると、速度拘束式 (2) は

$$\mathbf{A}_w \dot{\mathbf{w}}_b = \mathbf{B}_w \dot{\boldsymbol{\theta}}_b \quad (28)$$

と表すことができる。さらに、ベース部の各関節の速度、加速度を 0 とすると、ベース部における力の関係は次式で表される [11]。

$$\mathbf{J}_w^T \mathbf{B}_w^T \mathbf{f}_w = \mathbf{E}_b \boldsymbol{\tau}_b + \mathbf{Q} \mathbf{f}_{n_h xy} \quad (29)$$

ここで、ベース部各関節ヨー方向回転入力トルクを並べたベクトルを $\boldsymbol{\tau}_b = [\tau_{\phi_{n_h}}, \dots, \tau_{\phi_{n-1}}]^T$ 、ベース部先頭に働く力を $\mathbf{f}_{n_h xy}$ とし、 $\mathbf{J}_w = [-\mathbf{B}_w^{-1} \mathbf{A}_w, \mathbf{I}_{n_b}]$ 、 $\mathbf{E}_b = [O_{3 \times (n_b-1)}, \mathbf{I}_{n_b-1}]^T \in R^{(n_b+2) \times (n_b-1)}$ 、 $\mathbf{Q} = [\mathbf{I}_2, O_{2 \times n_b}^T]^T \in R^{n_b \times 2}$ である。 $\mathbf{B}_w$ は全リンクに車輪をもつ二次元ヘビ型ロボット [2] と同様に常に可逆である。 $\mathbf{E}_b \boldsymbol{\tau}_b$ の 1, 2 行めはすべて 0 であるので、式 (29) の 1, 2 行めを抜き出して変形すると

$$\begin{aligned}
\mathbf{f}_{n_h xy} &= \mathbf{P} \mathbf{f}_w \\
\mathbf{P} &= -\mathbf{A}_w^T
\end{aligned} \quad (30)$$

Fig. 3 Definition of σ_l

Fig. 4 Definition of Θ_r

Fig. 5 Adjustment of Θ_r

を得る。この横拘束力 $\mathbf{f}_w$ は車輪と床面間の最大摩擦力によって制限される。第 i 番めリンクの横方向最大摩擦力の大きさを $f_{\mu \max i}$ とすると、ベース部先頭に与えることができる $\mathbf{f}_{n_h xy}$ は式 (30) より

$$\mathbf{f}_{n_h xy} = \mathbf{P} \mathbf{N} \hat{\mathbf{f}}_w \quad (31)$$

となる。ここで、 $\mathbf{N}$ 、 $\hat{\mathbf{f}}$ は

$$\begin{aligned}
\mathbf{N} &= \text{diag}(f_{\mu \max 1}, f_{\mu \max 2}, \dots, f_{\mu \max n_w}) \\
\hat{\mathbf{f}}_w &= [\hat{f}_{w1}, \hat{f}_{w2}, \dots, \hat{f}_{wn_w}]^T, \quad \hat{f}_{wi} = f_{wi} / f_{\mu \max i}
\end{aligned}$$

であり、 $f_{\mu \max i}$ は式 (9) から求める各車輪にかかる垂直抗力 f_{fi} と摩擦係数 μ を用いて $f_{\mu \max i} = \mu f_{fi}$ で算出される。ここで $\mathbf{P} \mathbf{N}$ を特異値分解し、特異値 σ_1, σ_2 と直交行列 $\mathbf{U} = [\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2]$ から XY 平面上に Fig. 3 のようなだ円を得る。だ円の主軸は $\sigma_1 \mathbf{u}_1, \sigma_2 \mathbf{u}_2$ で与えられる。 $\sigma_1 \mathbf{u}_1$ はだ円長軸、 $\sigma_2 \mathbf{u}_2$ はだ円短軸を表している。また、長軸方向の力に対しロボットは滑らず最も耐えられることを意味しており、このだ円を拘束力だ円と呼ぶ。跳躍時の横滑りに影響するのは跳躍方向の拘束力であることから、だ円の跳躍方向軸長さ σ_l を評価指標とする。 σ_l の値が大きいほど跳躍に適した初期姿勢であると考えられる。

なお、式 (31) から分かるように σ_l は正規化された横拘束力 $\hat{\mathbf{f}}_w \leq 1$ における値である。実際のロボットでは、横滑りしない場合に $\hat{\mathbf{f}}_w$ の各成分 $\hat{f}_1, \dots, \hat{f}_{n_w} \leq 1$ となるため、 $\hat{\mathbf{f}}_w \leq \sqrt{n_w}$ である。以上より、ベース部先頭においてロボットが横滑りせずに耐えられる跳躍方向の最大の力 f_b は次式で計算できる。

$$f_b = \sigma_l \sqrt{n_w} \quad (32)$$

4.2 ベース部重心角度

ベース部において、Fig. 4 のようにヘッド部から受ける力 $\mathbf{f}_{n_h+1 xy}$ とベース部先頭とベース部重心を結ぶベクトル $\mathbf{p}_{bg}$ が一致せず、角度 Θ_r を持つとする。この場合、ベース部重心回りのモーメント $\tau_{bcog} = |\mathbf{f}_{n_h+1 xy}| \cos \Theta_r$ が発生する。ベース部が滑らないためには、このモーメントに対してベース部重心回りに回転しないように耐える必要がある。すなわち、このモーメントが大きいほどベース部に負荷がかかることになる。 Θ_r は $\mathbf{p}_{bg}$ と $\mathbf{f}_{n_h+1 xy}$ より、

$$\Theta_r = \cos^{-1} \left(\frac{\mathbf{f}_{n_h+1xy} \cdot \mathbf{p}_{bg}}{|\mathbf{f}_{n_h+1xy}| |\mathbf{p}_{bg}|} \right) \quad (33)$$

と表すことができる。この Θ_r の小さいベース部形状ほど跳躍に適していると考えられる。

4.3 評価関数

本論文では、**Fig. 5** に示すように跳躍方向とベース部重心位置とが同一直線上となるよう ϕ_{n_h+1} を与えることにより、モーメントによってベース部にかかる負荷を抑えることにする。これにより、すべての姿勢について $\Theta_r = 0$ とすることができる。そして、ベース部初期姿勢を決定するための評価関数 $\mathbf{V}_b$ を

$$\mathbf{V}_b = \sigma_l \quad (34)$$

とし、評価関数を最大とする初期姿勢をベース部初期姿勢として選択する。

5. シミュレーション

前章までに設計した制御則および提案した初期姿勢決定の評価指標の有効性を数値シミュレーションにより検証する。制御対象として $n = 16$ の 16 リンクヘビ型ロボットを用いる。ヘッド部のリンク数は $n_h = 8$ 、ベース部のリンク数は $n_b = 8$ とし、ヘッド部に運動学的冗長性 $n_{scp} = 13$ がある。ここでは形状可制御点として第 1 関節から第 6 関節の自由度と第 7 関節の第 1 軸まわりの自由度を選択し、 $\boldsymbol{\theta}_{scp} = [\theta_1^T, \dots, \theta_6^T, \phi_7]^T$ とした。また、リンク長さを $2l = 0.15$ [m]、質量を $m = 0.5$ [kg]、車輪と環境間の静止摩擦係数を $\mu = 0.8$ とした。ロボットのベース部とヘッド部の間の関節（第 n_h 関節）が絶対座標系 $O-XYZ$ の原点に存在するとし、跳躍方向は X 軸負の方向、ベース部を除く関節角の初期値は $[\theta_1, \dots, \theta_{n_h}]^T = [0, 2.4, 0, 0, 0, -2.4, 0, 0, 0, 2.4, 0, 0, 0, -1.6, 0, -1.0]^T$ とした。

5.1 ベース部初期姿勢の最適化

ベース部の初期姿勢はヘビのサーペノイド曲線 [1] を規範としていると仮定する。サーペノイド曲線とはヘビの蛇行滑走体形曲線を表した曲線であり、体長（リンク数と各リンク長さ）が既知であればくねり角度 α_b とくねり周期 T_b により形状を決定することができる。本論文では

$$\phi_i = \frac{2\pi T_b}{n_b - 1} \alpha_b \sin \left(\frac{2\pi T_b}{n_b} (i - n_h - 1) \right), \quad \psi_i = 0 \quad (35)$$

第 $n_h + 1$ リンクの関節角については、 $\psi_{n_h+1} = 0$ とし、 ϕ_{n_h+1} は前節で説明したようにベース部重心角度 $\Theta_r = 0$ となるよう与える。

ベース部に関する各パラメータに対して、ベース部くねり角度 α_b を $0.1 \leq \alpha_b \leq 4$ [rad] の範囲で 0.01 [rad] 刻みで、ベース部くねり周期 T_b を $0.1 \leq T_b \leq 2.5$ の範囲で 0.01 刻みで離散的に変化させ、各姿勢における評価関数 $\mathbf{V}_b$ の値を導出した。この際、実ロボットにおける可動範囲を考慮し、制約条件として $|\phi_i| \leq \pi/2$ を満たす姿勢のみ計算を行った。 T_b , α_b と評価関数 $\mathbf{V}_b$ の関係を **Fig. 6** に示す。評価関数が最大となったのは **Fig. 7** に示す $T_b = 1.17$, $\alpha_b = 1.69$ [rad] の場合であった。よって、この姿勢をベース部初期姿勢として用いることにする。

Fig. 6 Value of the cost function $\mathbf{V}_b$

Fig. 7 Optimal posture of the base part

5.2 跳躍シミュレーション

制御則の有効性を検証するため跳躍シミュレーションを行う。まず横滑りが生じない式 (6) の動力学モデルを用いて Matlab 上でシミュレーションを行い、重心位置等の時間応答と制御入力を確認する。なお、制約条件付き最適化問題 (14) の数値解法として Matlab の二次計画問題のソルバ quadprog.m を用い、余裕 $\epsilon = 1.0$ [N] とした。次に、得られた制御入力を物理シミュレータ Open Dynamics Engine (ODE) 上に構築したヘビ型ロボットに入力する。ODE 上のヘビ型ロボットは、過度な力がかかった場合に横滑りが生じるモデルとなっており、実ロボットにおける跳躍の実現性を確認できる。ODE においては、本研究では跳躍運動後の浮遊中の運動制御を行わないため、離床時刻となった時点でロボットの各関節を幾何学的に固定した。

ベース部初期姿勢として、最適姿勢 ($T_b = 1.17$, $\alpha_b = 1.69$ [rad]) と最適ではない姿勢 ($T_b = 1.17$, $\alpha_b = 0.5$ [rad]) の 2 とおりについてシミュレーションを行った。重心加速度に関するパラメータについては必要条件 (23) を満たすよう $t_f = 0.15$ [s], $bx = -8$, $by = 0$, $bz = 10$ とし、 $\mathbf{K}_p = \text{diag}(10, 10, 10, 100, 10, 10, 10, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)$, $\mathbf{K}_v = \text{diag}(20, 20, 20, 500, 200, 200, 200, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)$, $\mathbf{K}_{scp} = \text{diag}(0, 2400, 0, 60, 0, 12, 0, 12, 0, 120, 0, 12, 0)$ とした。また、今回用いたパラメータでは $\mathbf{T}$ のランク落ちは起こらなかったため、形状可制御点に関する重み係数 $b = 0$ とし、 a についてはリンク長さの $1/2$ である l で正規化し、 $a = a'/l^{32}$, $a' = 1.0$ とした。

ベース部初期姿勢を最適姿勢 $T_b = 1.17$, $\alpha_b = 1.69$ [rad] とした場合について、横滑りが生じないモデルを用いた結果の一部を **Fig. 8, 9, 10** に示す。なお、重心位置は目標軌道に追従することを確認したが、図については誌面の都合上省略する。**Fig. 8** は跳躍運動中の $\det \bar{\mathbf{B}}^T \bar{\mathbf{B}} / l^{32}$ と $\det \mathbf{T}^T \mathbf{T}$ の時間応答である。どちらの値も 0 には収束しておらず、特異姿勢を回避できている。**Fig. 9** は摩擦条件に関する $\mu f_{fi} - |f_{wi}|$ の時間応答である。摩擦条件を満たしていない場合は $\mu f_{fi} - |f_{wi}|$ が負となる。**Fig. 9** より、常に $\mu f_{fi} - |f_{wi}|$ が正となるよう運動しており、摩擦条件を満足していることが分かる。**Fig. 10** は跳

Fig. 8 Time responses of $\det \bar{\mathbf{B}}^T \bar{\mathbf{B}} / l^{32}$ and $\det \mathbf{T}^T \mathbf{T}$ based on the model without sliding

Fig. 9 Time responses of $\mu f_{fi} - |f_{wi}|$ based on the model without sliding

Fig. 10 The power, angular velocity and torque of ψ_i

躍動作時に大きく駆動しているヘッド部第2回転軸まわりの回転角 $\psi_i (i = 1, \dots, n_h)$ に対するアクチュエータトルク, 回転速度, アクチュエータ出力である。シミュレーションにおける $m = 0.5$ [kg], $2l = 0.15$ [m] というロボットの大きさに対し, アクチュエータ出力が最大で 130 [W] に達していることが分かる。減速機や構造部材の質量や効率を考えると, 現存する電磁モータを用いたヘビ型ロボットの跳躍動作の実現は非常に難しいと言える。跳躍動作の実現方法としては例えば出力質量比が高い空気圧アクチュエータの利用が挙げられるが, これは今後の課題とする。

次に, ODE において横滑りが生じるモデルを用いた結果を Fig. 11, 12 に示す。Fig. 11 は $t = 0, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.339$ [s] のロボットの動作の様子を表している。誌面水平方向が X 軸, 鉛直方向が Z 軸であり, 点線は $t = 0$ におけるベース部先頭リンク中心の X 座標位置を表しており, $t = 0.15$ [s] は離床時刻, $t = 0.20, 0.25$ [s] は浮遊期, $t = 0.339$ [s] は着床時刻のロボットの様子である。Fig. 12 は初期時刻から着床時刻までの重心位置 $\mathbf{r}_g$, ベース部先頭位置姿勢 $\mathbf{P}_{bh}$ の応答

Fig. 11 The motion of the snake robot in ODE

Fig. 12 Simulation results in ODE

を表している。点線は目標軌道を表しており, 制御は離床時刻 $t = 0.15$ [s] まで行っているため, 目標軌道も離床時刻までを表示している。 x_{n_h+1}, y_{n_h+1} のグラフは, 初期ベース部先頭位置を丸印 ($t = 0$ [s]), 着床地点をひし形 ($t = 0.339$ [s]) で表している。Fig. 12 より, 離床時刻まで各状態量が目標軌道に追従しているとともに, ベース部先頭位置 x_{n_h+1}, y_{n_h+1} が跳躍運動中後方へ滑らずに離床していることが分かる。以上のように, ベース部が滑ることなく跳躍を実現できており, 提案制御則の有効性が確認できた。

一方, 各パラメータは変えずにベース部初期姿勢のみを最適でない姿勢 $T_b = 1.17, \alpha_b = 0.5$ [rad] に変更した場合, 制御入力力の計算において最適化問題 (14) の解が存在せずに摩擦条件を満足できないことが確認された。ODE を用いて行ったシミュレーション結果を Fig. 13 に示す。離床時刻前にベース部が後方へ滑ってしまい, いくつかのベース部車輪がすでに地面を離れてしまっている。これは, 最適なベース部初期姿勢と比較し評価関数の値が低い, すなわち跳躍方向に耐えられる力が弱いことが原因であると言える。以上より, 接地部の横滑り回避には拘束力楕円を用いた姿勢決定が有効であると考えられる。

5.3 大跳躍

本手法を用いて大きな跳躍を行うには, ヘッド部とベース部

Fig. 13 The motion of the snake robot in ODE at $T_b = 1.17, \alpha_b = 0.5$

Fig. 14 The high jumping motion in ODE

の質量配分、ヘッド部初期姿勢が重要である。ロボットはヘッド部の動きによって重心を移動させるので、ヘッド部の質量は大きければ大きいほど良い。また、重心を移動できる距離は初期姿勢によって制約される。例えば、ヘッド部が跳躍方向に伸びた姿勢を初期姿勢とする場合、跳躍動作中には重心位置をほとんど移動させることができない。重心位置の移動可能距離を大きくするためには、ヘッド部は縮こまった初期姿勢が良いと考えられる。そこで、ヘッド部のリンク数を $n_h = 12$ に変更し、ベース部を除く関節角の初期値を $[\theta_1, \dots, \theta_{n_h}]^T = [0, 2.74, 0, -2.74, 0, 2.74, 0, -2.74, 0, 2.74, 0, -2.74, 0, -2.74, 0, 2.74, 0, -2.74, 0, -2.62]^T$ 、重心加速度に関するパラメータを $t_f = 0.20$ [s], $bx = -5$, $by = 0$, $bz = 20$ とした場合のシミュレーション結果を Fig. 14 に示す。ヘッド部が大きく伸び上がっており、ロボット全体も大きく跳躍していることが分かる。なお、ベース部先頭リンクの最高到達高さは 0.32 [m]、前方への跳躍距離は 0.26 [m] であった。このように、ヘッド部とベース部の質量配分およびヘッド部初期姿勢を変更することで、より大きな跳躍が実現できることが確認できた。跳躍量をさらに増やしたい場合、ヘッド部リンク数を増やすことで対応できると考えられる。

6. 実機実験

本章では実機を用いた拘束力だ円の検証実験を行う。前章まで

Fig. 15 The experimental system

Fig. 16 The comparison of f_b

はロボットの関節として2軸直交関節を用いているが、実機では十分な可動範囲を確保することが難しい。そこでモデルの簡略化を行い、ベース部は第1回転軸まわりの関節のみ、ヘッド部は第2回転軸まわりの関節のみで構成した。本章は拘束力楕円の検証を目的としており、ロボットの初期姿勢を実現する、という点においてこの簡略化は問題ないと言える。製作実機および計測環境を Fig. 15 に示す。アクチュエータはDynamixel AX-18A (ROBOTIS) を用い、リンク数 $n = 16$, $n_h = n_b = 8$ とし、 $m = 0.083$ [kg], $2l = 0.071$ [m], $\mu = 0.23$ である。

ロボットが滑らずに耐えられる跳躍方向の最大の力 f_b は、動き始める直前の摩擦力（最大静摩擦力）である。そこで、Fig. 15 においてベース部先頭リンクを非常に小さい速度で跳躍方向（矢印の方向）に引っ張っていき、プッシュプルゲージ RX-10 (アイコーエンジニアリング) を用いて引張力の最大値を測定し、その値を f_b として評価を行った。この際、ロボットの各関節は位置制御にて静止させ、ヘッド部の初期角度 $[\psi_1, \dots, \psi_{n_h}]$ は $[1.8, 1.8, -1.8, -1.8, 1.8, 1.8, -1.8, -1.8]$ とした。ベース部相対角 $[\phi_{n_h+1}, \dots, \phi_{n-1}]$ は式 (35) を用い、 α_b を $0.1 \leq \alpha_b \leq 4$ [rad] の範囲で 0.3 [rad] 刻みで、 T_b を $0.1 \leq T_b \leq 2.5$ の範囲で 0.3 刻みで離散的に変化させて与え、各姿勢において測定を行った。測定は各姿勢につき3回行い、平均値を実験結果とした。測定結果を Fig. 16 (a) に示す。また、比較対象として実機のパラメータを導入したシミュレーションにおける f_b の算出結果を Fig. 16 (b) に示す。シミュレーションと実験を比較すると、相対誤差はおおむね 30%、絶対誤差は 0.3 [N] 程度に収まっていた。Fig. 16 より、値の大きさと分布傾向の両面において実験結果とシミュレーション結果がよく一致していることが分かる。式 (32) より f_b と評価指標 σ_l は比例関係にあることから、本論文にて提案した拘束力だ円に基づく評価指標 σ_l は実際の物理現象をうまく表現できており、跳躍方向に滑りにくい初期姿勢を選択する上で有効であることが確認された。しかしながら、 $(\alpha_b, T_b) = (0.3, 0.1)$ において相対誤差が最悪値 290% となり、

$(\alpha_b, T_b) = (0.3, 2.2)$ において絶対誤差が最悪値 0.61 [N] となった。どちらも実験値の方が大きな値となっている。誤差原因としては、例えば関節角度分解能に起因するロボット姿勢の誤差、車輪ごとの摩擦係数のばらつきなどが考えられる。特に誤差が大きく出た前記の2条件では、モデルではゼロとしていた車輪の転がり方向の摩擦が影響し、理論値よりも大きな値が測定されたと推測される。

7. おわりに

本論文では、関節が能動ユニバーサルジョイントで構成され三次元運動が可能な車輪拘束ヘビ型ロボットを対象に、跳躍運動中に滑りが生じないことを保証する制御則を設計と、効果的な跳躍を実現するための初期姿勢決定のための評価指標の提案を行った。ロボットは車輪により平らな床面と接触し、車輪は横滑りしないと仮定した上で動力学モデルを導出し、ロボットと環境との間に働く床反力と摩擦力を考慮することで接地部分が横滑りせずに跳躍運動を行う制御則を設計した。次に、跳躍運動の目標値設計として、横滑りしないための目標値の必要条件を導出するとともに、ロボットの運動学的冗長性を利用し特異点回避に貢献する形状可制御点の目標軌道を設計した。さらに効果的な跳躍を行うための評価指標として拘束力だ円とベース部重心角度を提案し、接地部初期姿勢の最適化を行った。そして数値シミュレーションおよび Open Dynamics Engine を用いたシミュレーションにより提案制御則の有効性を確認し、実験により拘束力だ円に基づく評価指標の有効性を確認した。アクチュエータ出力の問題はあるものの、本研究によってヘビ型ロボットの新たな運動能力である跳躍実現のための一つの指針を示すことができたと考えている。今後の課題としては、実験による跳躍運動の実現、うねり推進を行いながらの跳躍、ロ

ボットの浮遊期における運動制御、着地制御などが挙げられる。

謝辞 この研究は文部科学省科学研究費（基盤研究（B）課題番号 23360105）を使用して行われました。

参考文献

- [1] 広瀬茂男：生物機械工学。工業調査会，1987。
- [2] P. Prautsch and T. Mita: "Analysis and Control of a Gait of a Snake Robot," Proc. International Conference on Control Applications, pp.496-507, 1999.
- [3] S. Toyoshima, M. Tanaka and F. Matsuno: "A Study on Sinus-lifting Motion of a Snake Robot With Sequential Optimization of a Hybrid System," IEEE Trans. on Automation Science and Engineering, pp.1-6, 2013.
- [4] K. Lipkin, I. Brown, A. Peck, H. Choset, J. Rembisz, P. Gianfortoni and A. Naaktgeboren: "Differentiable and Piecewise Differentiable Gaits for Snake Robots," Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.1864-1869, 2007.
- [5] T. Ikeda, Y. Iwatani, K. Suse and T. Mita: "Analysis and Design of Running Robots in Touchdown Phase," IEEE Conf. on Control Application, pp.496-501, 1999.
- [6] T. Sugihara and Y. Nakamura: "Contact Phase Invariant Control for Humanoid Robot based on Variable Impedant Inverted Pendulum Model," IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.51-56, 2003.
- [7] 松井猛, 加藤浩介, 坂和正敏, 宇野剛史, 東森充, 金子真: "生物群最適化に基づくシリアルリンクロボットの跳躍高最大化", 日本ロボット学会誌, vol.26, no.1, pp.41-48, 2008.
- [8] Open Dynamics Engine, <http://www.ode.org/>
- [9] 松野文俊, 茂木一貴: "冗長蛇型ロボットの運動学モデルに基づいた制御とユニット設計", 計測自動制御学会論文集, vol.36, no.12, pp.1108-1116, 2000.
- [10] 佐藤博毅, 田中基康, 松野文俊: "動力学モデルに基づく蛇型ロボットの軌道追従制御", 計測自動制御学会論文集, vol.42, no.6, pp.651-658, 2006.
- [11] K. Hoshino, M. Tanaka and F. Matsuno: "Optimal Shape of a Snake Robot for Jumping," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.697-702, 2010.

田中基康 (Motoyasu Tanaka)

2009 年電気通信大学大学院電気通信学研究科博士後期課程修了。同年キヤノン株式会社に勤務。2012 年から電気通信大学大学院情報理工学研究科助教となり、現在に至る。2007 年から 2009 年まで日本学術振興会特別研究員 (DC1)。主にヘビ型ロボットの研究に従事。2004 年度日本機械学会畠山賞、2006 年度同学会三浦賞、2006 年度 IEEE Robotics and Automation Society Japan Chapter Young Award 受賞。計測自動制御学会、IEEE の会員。博士 (工学)。(日本ロボット学会正会員)

福島宏明 (Hiroaki Fukushima)

2001 年京都大学大学院情報学研究科博士課程修了。1999 年から 2004 年まで日本学術振興会特別研究員、2004 年より電気通信大学助手、2009 年より京都大学大学院工学研究科 (機械理工学専攻) 助教、2010 年より同講師となり、現在に至る。主に、システム同定、ロボスタ制御の研究に従事。計測自動制御学会、システム制御情報学会、IEEE の会員。博士 (情報学)。(日本ロボット学会正会員)

星野恵一 (Keiichi Hoshino)

2009 年電気通信大学電気通信学部卒業。2011 年電気通信大学大学院電気通信学研究科博士前期課程修了。現在株式会社リコーに勤務。

松野文俊 (Fumitoshi Matsuno)

1986 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士課程修了。大阪大学、神戸大学、東京工業大学、電気通信大学を経て、2009 年京都大学大学院工学研究科 (機械理工学専攻) 教授となり、現在に至る。主に、ロボティクス・制御理論・レスキュー学に関する研究に従事。1993 年度システム制御情報学会論文賞、2001 年度、2006 年度計測自動制御学会論文賞、2001 年度同学会武田賞、2006 年度船井情報科学振興賞、2009 年度日本機械学会ロボット・メカトロニクス部門学術業績賞、2013 年度情報処理学会論文賞などを受賞。日本機械学会 (フェロー)、計測自動制御学会 (フェロー)、IEEE 等の会員。工学博士。(日本ロボット学会正会員)