滑り摩擦非対称性を利用した動的2脚移動

妹 尾 拓* 高 野 光 浩* 石 川 正 俊*

Dynamic Biped Locomotion Using Asymmetry of Sliding Friction

Taku Senoo*, Mitsuhiro Takano* and Masatoshi Ishikawa*

In this paper, dynamic biped locomotion is considered with the goal of achieving fast and dexterous leg motion. We propose a new movement principle for legged robots, which produces propulsive force using frictional asymmetry. The dynamic locomotion consists of sliding motion based on the kinematic constraint and jumping motion which enables to keep the maximum horizontal velocity. The dynamics of the 2-DOF biped robot is analyzed to obtain motion characteristics for developing a motion strategy. Experimental results are also shown in which a 2-DOF biped robot takes fast short steps repetitively with compensation of the landing time by high-speed vision.

Key Words: Legged Robot, Frictional Asymmetry, Sliding Motion, Jumping Motion

1. は じ め に

近年、ヒューマノイドを筆頭に脚ロボットの移動能力が向上し、多様な路面状況への適応を目指して研究が行われている。脚の接地状態は安定性を決定する重要な要因であるが、摩擦に起因する複雑な現象であるため、接地面において滑りが生じないという仮定のもとに運動を計画する場合が多い。そのため、高速移動や前後傾姿勢などの大きなモーメントが生じる運動、あるいは水濡路面や凍結路面などの環境では、滑りが発生する可能性が高く、走破性が著しく低下する傾向にある。滑り動作を積極的に利用した脚制御の開発は、高速で動的な脚運動や低摩擦路面での移動を効率的に遂行する基盤技術と成りうるため、その実現には意義がある。

脚ロボットの研究では、一般的に滑りを望ましくない特性と捉えて、その挙動を抑制したり補償することが行われている。金子らは低摩擦路面を移動する HRP-2 の滑りをオブザーバで検出し、転倒しないように体軸を制御して安定化を行っている [1]。竹村らは脚先の加速度情報より路面勾配を推定し、脚先が地面に加える力を摩擦円錐内に誘導して滑りを抑える適応歩容を4脚ロボットで検証している [2]。また、壁面移動ロボットで使われている負圧 [3] や磁力 [4] など吸着力の生成は滑り防止に効果的だが、機構が複雑となり重量も増加するため移動効率が低下する問題を抱えている。

一方、滑りを積極的に応用する例として以下のような研究が報告されている。三浦らは、足裏全体における単位時間の散逸エネルギーを最小化する力学モデルを用いて、足裏を軸にした2足ロボットの方向転換について考察している [5]。WABIAN-2Rを用いた回転滑りによる旋回運動の研究では、足踏みによる旋回運動に比べてエネルギー消費量が64%減少している [6]。KoedaらはHOAP-2を用いて滑りによる並進移動を実証しているが、足裏の回転中心の位置を切り替えることでこれを実現するため、移動原理としては回転滑りを採用している [7]。マイクロロボットの分野では、脚の微細振動で生じる並進滑りを利用した移動メカニズムが提案されている [8] [9]。しかしマイクロメカニズムでは、通常のロボットとはスケールファクタの相違によって支配的な物理法則が異なるため、マクロスケールのロボットへ適応したときの効果が定かではない。以上より、並進滑りを積極的に利用した脚ロボットについて、現状では十分な議論がなされていない。

そこで本論文では、脚移動の推進力として並進滑りを用いた新たな移動手法を提案する。提案手法は、**Fig. 1**のように滑り動作と跳躍動作で構成されたダイナミックな2脚移動を可能に

Fig. 1 Concept of dynamic biped locomotion

原 2012 年 6 月 13 日

*東京大学大学院情報理工学系研究科

*Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

■ 本論文は学術性で評価されました。

■ J-STAGE では本論文の電子付録として動画が閲覧できます。

する．続く2章では，2自由度2脚ロボットの力学モデルについて説明し，そのダイナミクスを導出する．3章では，摩擦非対称性を利用して連続的な前進運動を実現する移動原理について述べる．さらに，ダイナミクスに基づく動作特性を明らかにし，数値シミュレーションによる動作解析を行う．4章では，高速ビジョンを導入して着地タイミングの制御を行った実験結果について述べ，提案手法の有効性を実証する．最後に5章では，結論と今後の課題について述べる．

2. 摩擦非対称性を有する2脚ロボット

本論文で提案する2脚移動は，Fig. 1のように滑り動作と跳躍動作から構成される．両脚を前後に開いた状態から閉じるように制御することで床との間に並進滑りを生じさせ，両脚の滑り摩擦力の差を水平移動の推進力として利用する．滑りの途中で跳躍へ移行し，水平速度を維持したまま空中で前脚と後脚を入れ替えて着地することで1ステップが終了する．

本章では，この滑り動作と跳躍動作のダイナミクスを導出する．提案するモデルでは，膝関節を設けずに，脚を前後に駆動する股関節のみを有した機構を設定する．この形状は受動歩行で多く採用されているコンパス型ロボット（文献[10]～[12]など）と似ているが，アクチュエータを有している点と，両脚と床との間に並進滑りが生じることを前提にモデル化を行う点で，本質的に異なっている．

2.1 力学モデル

二つの脚を有する2自由度ロボットについて考える．直線形状の両脚（Link 1とLink 2）が胴体（Link 0）の重心に接続されていて，両脚とも回転モータにより独立に駆動される．簡略化のため，剛体で構成されたロボットが二次元平面内で運動することを考え，床は凹凸のない水平面とし，各脚は床とそれぞれ点接触をすると仮定する．Fig. 2(a)のように基準座標の x 軸は水平な床面， z 軸は鉛直方向に設定する．

このとき並進運動の方程式は以下のように記述される．

$$\begin{aligned} m_0 \ddot{\mathbf{r}}_{c0} &= m_0 \mathbf{g} - \mathbf{F}_1 - \mathbf{F}_2, \\ m_1 \ddot{\mathbf{r}}_{c1} &= m_1 \mathbf{g} + \mathbf{F}_1 + \mathbf{N}_1, \\ m_2 \ddot{\mathbf{r}}_{c2} &= m_2 \mathbf{g} + \mathbf{F}_2 + \mathbf{N}_2, \end{aligned} \quad (1)$$

ここで m_i はLink i の質量， $\mathbf{r}_{ci}$ はLink i の重心位置， $\mathbf{g} = [0, -g]^T$ は重力， $\mathbf{F}_i$ は胴体からLink i に働く内力， $\mathbf{N}_i$ はLink i に働く床反力を表している．ロボットに働く力とモーメントをFig. 2(b)に示す．

Fig. 2 Mechanical model of biped robot

モータからLink i に働くトルクを τ_i とすると，各リンクの重心における回転運動の方程式は以下のように記述される．

$$I_0 \dot{\omega}_0 = -\tau_1 - \tau_2 + k_1(\omega_1 - \omega_0) + k_2(\omega_2 - \omega_0), \quad (2a)$$

$$I_1 \dot{\omega}_1 = \tau_1 + (\mathbf{r}_{c0} - \mathbf{r}_{c1}) \times \mathbf{F}_1 + (\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_{c1}) \times \mathbf{N}_1 - k_1(\omega_1 - \omega_0), \quad (2b)$$

$$I_2 \dot{\omega}_2 = \tau_2 + (\mathbf{r}_{c0} - \mathbf{r}_{c2}) \times \mathbf{F}_2 + (\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_{c2}) \times \mathbf{N}_2 - k_2(\omega_2 - \omega_0), \quad (2c)$$

ここで I_i はLink i の重心回りの慣性モーメント， ω_i はLink i の角速度， $\mathbf{r}_i$ はLink i ($i=1, 2$)の脚先位置， k_i はモータに起因するLink i の粘性回転摩擦係数を表している．また外積を $\mathbf{a} \times \mathbf{b} \equiv a_x b_z - a_z b_x$ と定義し，回転変数の符号は反時計回りを正とする．

両脚が床と接しているときに脚を回転させるように制御すると，ロボットの挙動は幾何学的拘束によって必然的に滑り運動となる．そのため，床反力は垂直抗力と滑り摩擦力に分解できる．本論文では，垂直抗力と滑り摩擦力が比例関係にあるクーロン摩擦モデルを想定することにする．両脚を閉じるように内側へ滑り運動を行うとき，床反力は次式で表される．

$$\mathbf{N}_1 = \begin{bmatrix} -\mu_1 N_{1z} \\ N_{1z} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{N}_2 = \begin{bmatrix} \mu_2 N_{2z} \\ N_{2z} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

ここで添字 x, z は該当変数の x 成分と z 成分を表し， μ_i はLink i と床の間の滑り摩擦係数である．式(1) (3)より，垂直抗力は重心運動を用いて次式で表される．

$$\begin{aligned} N_{1z} &= \frac{m_s}{\mu_1 + \mu_2} \{-\ddot{r}_{cx} + \mu_2(\ddot{r}_{cz} + g)\}, \\ N_{2z} &= \frac{m_s}{\mu_1 + \mu_2} \{\ddot{r}_{cx} + \mu_1(\ddot{r}_{cz} + g)\}, \end{aligned} \quad (4)$$

ここで $m_s = \sum_i m_i$ はロボットの全質量， $\mathbf{r}_c$ は以下の式で定義されたロボット全体の重心位置を表している．

$$\mathbf{r}_c = m_s^{-1} \sum_i m_i \mathbf{r}_{ci}, \quad (5)$$

股関節位置 $\mathbf{r}_{c0}$ から下方に伸びる鉛直軸とLink i が成す角度を θ_i とすると，各脚の重心位置 $\mathbf{r}_{ci}$ ($i=1, 2$)は次式で表される．

$$\mathbf{r}_{ci} = l_{ai} \begin{bmatrix} S_{\theta_i} \\ -C_{\theta_i} \end{bmatrix} + \mathbf{r}_{c0} = (l_i - l_{ai}) \begin{bmatrix} -S_{\theta_i} \\ C_{\theta_i} \end{bmatrix} + \mathbf{r}_i, \quad (6)$$

ここで， $S_{\theta_i} \equiv \sin \theta_i$ ， $C_{\theta_i} \equiv \cos \theta_i$ ， l_i は各脚の長さ， l_{ai} は股関節位置 $\mathbf{r}_{c0}$ から各脚の重心位置への長さを表している．

本論文では，両脚に関して滑り摩擦係数は非対称性を，それ以外の運動学・動力学パラメータは対称性（回転に関する変数は反対称性）を有すると設定して，以後の議論を進める．モータトルクについても反対称な入力を行う．そこで対称性（反対称性）を有する変数に関して，以下のように再定義する．

$$\begin{aligned} m_1 &= m_2 \equiv m, \quad l_1 = l_2 \equiv l, \quad l_{a1} = l_{a2} \equiv l_a, \\ I_1 &= I_2 \equiv I, \quad k_1 = k_2 \equiv k, \quad \theta_1 = -\theta_2 \equiv \theta, \\ \tau_1 &= -\tau_2 \equiv \tau, \quad \mu_1 \neq \mu_2, \end{aligned} \quad (7)$$

上記の設定より、全重心位置は股関節と同一鉛直線上に並ぶこと（ $r_{c0x} = r_{cx}$ ）が導かれる。胴体の回転運動は、式（2a）（7）より次式で表される。

$$I_0 \dot{\omega}_0 + 2k\omega_0 = 0, \quad (8)$$

式（8）を初期条件 $\omega_0(0) = 0$ のもとで解くと、 $\omega_0(t) = 0$ となる。つまり、胴体の初期角速度が 0 であれば胴体は回転運動を行わないことが分かる。胴体リンクが回転しないため、変数 θ はモータの回転角（胴体と脚が成す相対角）を表すことになり、脚の回転運動は次式で記述される。

$$\tau = M\ddot{\theta} + H\dot{\theta}^2 + G + k\dot{\theta}, \quad (9)$$

ここで M は慣性項、 H は遠心力項、 G は重力項であり、それぞれ θ の関数となる。その具体的な形は、滑り動作と跳躍動作の場合で異なり、以下の節でそれぞれを示す。導出過程の詳細は、付録 A に記述されている。

2.2 床上の滑りダイナミクス

ロボットが床上を運動しているとき、 $\mathbf{r}_i$ は脚と床との接触点を表すため $r_{iz} = 0$ となる。このとき、式（5）（6）より重心高さは次式で表される。

$$r_{cz} = \left(l - \frac{2m}{m_s} l_a \right) C_\theta, \quad (10)$$

式（1）（4）を式（2b）（2c）へ代入して内力と床反力の項を消去すると、加速度に関する以下の拘束条件が成立する。

$$\ddot{r}_{cx} + \alpha(\ddot{r}_{cz} + g) = 0, \quad (11)$$

$$\text{where } \alpha = (\mu_1 - \mu_2) S_\theta \left\{ 2S_\theta - (\mu_1 + \mu_2) \left(1 - \frac{2ml_a}{m_s l} \right) C_\theta \right\}^{-1},$$

つまり、 x 方向と z 方向の重心加速度の比はトルク入力に依存せず、ロボットの姿勢 θ だけで決定することを表している。この拘束条件を用いると、式（9）の各項は以下のように求まり、回転運動が決定する。

$$\begin{aligned} M &= I + ml_a(lS_\theta^2 - l_a) - \left(l - \frac{2m}{m_s} l_a \right) S_\theta \beta, \\ H &= -ml l_a C_\theta S_\theta - \left(l - \frac{2m}{m_s} l_a \right) C_\theta \beta, \\ G &= (ml_a S_\theta + \beta)g, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\text{where } \beta = \frac{m_s l}{2(\mu_1 + \mu_2)} \left\{ -(\mu_1 + \mu_2) S_\theta + 2\mu_1 \mu_2 C_\theta + (\mu_1 - \mu_2) C_\theta \alpha \right\},$$

回転運動が決まれば、式（10）（11）を用いることで、並進運動が決定する。

2.3 空中の跳躍ダイナミクス

空中では床反力が働かない状態なので、式（1）に $\mathbf{N}_i = \mathbf{0}$ を代入することで並進運動が決定する。

$$\ddot{\mathbf{r}}_c = \mathbf{g}, \quad (13)$$

これは、空中において働く外力は重力のみであることを意味している。跳躍を開始する時刻を t_j とすると、上式を積分することで重心軌道は以下の放物線を描く。

$$\mathbf{r}_c(t) = \frac{1}{2} \mathbf{g}(t - t_j)^2 + \dot{\mathbf{r}}_c(t_j)(t - t_j) + \mathbf{r}_c(t_j), \quad (14)$$

跳躍開始姿勢を θ_j 、着地姿勢を θ_l で表すと、跳躍高さが最大になる時刻 t_h では $\dot{r}_{cz}(t_h) = 0$ を、着地の時刻 t_l では式（10）より $r_{cz}(t_l) = r_{cz}(t_j) + (l - (2m/m_s)l_a)(C_{\theta_l} - C_{\theta_j})$ をそれぞれ満たす。よって、 t_h と t_l は以下のように計算される。

$$t_h = t_j + \frac{\dot{r}_{cz}(t_j)}{g}, \quad t_l = t_j + \frac{\dot{r}_{cz}(t_j) + \gamma}{g}, \quad (15)$$

$$\text{where } \gamma = \sqrt{\dot{r}_{cz}(t_j)^2 + 2g(l - \frac{2m}{m_s} l_a)(C_{\theta_j} - C_{\theta_l})},$$

着地までの滞空時間は、離陸時の重心鉛直速度に大きく依存することが分かる。式（15）を式（14）に代入することで、鉛直跳躍高さ J_z と水平移動距離 J_x は以下のように求まる。

$$J_z = \frac{\dot{r}_{cz}(t_j)^2}{2g}, \quad J_x = \frac{\dot{r}_{cx}(t_j) \{ \dot{r}_{cz}(t_j) + \gamma \}}{g}, \quad (16)$$

したがって、離陸時における重心速度は、跳躍に関する移動量 J_x, J_z を決定する主要因となる。一方、回転運動に関しては、式（9）の各項を以下の形で表したダイナミクスにより決定される。

$$\begin{aligned} M &= I + ml_a^2 \left(1 - \frac{2m}{m_s} S_\theta^2 \right), \\ H &= -\frac{2m^2}{m_s} l_a^2 C_\theta S_\theta, \\ G &= 0, \end{aligned} \quad (17)$$

空中では、重力が回転運動に影響を与えないことが分かる。

3. 動的 2 脚移動

前章で導出したダイナミクスをもとに、本章では滑り摩擦非対称性によって推進力を得る水平移動原理について説明する。同時に、提案モデルの運動特性に基づく移動戦略を提案し、数値シミュレーションによって挙動を解析する。

3.1 水平移動原理

通常の 2 足歩行ロボットでは、前脚を滑らないように維持しながら後脚で床を後方へ蹴り、その反作用を利用することで前進の推進力を得ている。床に固定した支持脚を中心に倒立振子の要領で遊脚を前方へ移動し、両脚の支持脚期と遊脚期が交互に入れ替わる歩行を実現している。

これとは異なり、本論文で提案するロボットの移動原理は、脚を前後に開いた状態から閉じる方向へ両脚を滑らせ、その滑り摩擦力の差で前進する。滑り動作から跳躍動作へシームレスに移行して空中で前脚と後脚を交替し、両脚の支持脚期と遊脚期

Fig. 3 Horizontal movement based on sliding frictional force

Fig. 4 Change in α with respect to θ in the case of $\mu_1 < \mu_2$

が同時に入れ替わる移動を実現する。

両脚の摩擦係数の関係が及ぼす水平移動の効果について以下で確認してみる。初めに、両脚の摩擦係数が同じ場合 ($\mu_1 = \mu_2$) について考える。このとき $\alpha = 0$ となるので、式 (11) より $\ddot{r}_{cx} = 0$ となる。つまり Fig. 3 (a) のように、滑り動作によって全重心の運動は水平方向には生じず、鉛直方向のみとなる。次に両脚の摩擦係数が異なる場合について考える。 α を θ で微分すると次式が得られる。

$$\frac{d\alpha}{d\theta} = (\mu_1 - \mu_2) \left\{ 4 + (\mu_1 + \mu_2)^2 \left(1 - \frac{2ml_a}{m_s l} \right)^2 \right\}^{-\frac{1}{2}} \frac{S_\psi}{(S_{\theta+\psi})^2}, \quad (18)$$

$$\text{where } \psi = -\arcsin \frac{(\mu_1 + \mu_2) \left(1 - \frac{2ml_a}{m_s l} \right)}{\sqrt{4 + (\mu_1 + \mu_2)^2 \left(1 - \frac{2ml_a}{m_s l} \right)^2}},$$

ここで $m_s = 2m + m_0 > 2m$ および $l > l_a$ を考慮すると、式 (18) は $\mu_1 \leq \mu_2$ のときに $d\alpha/d\theta \geq 0$ となること、つまり α は θ に関して単調増加/減少となることを示している。よって、両脚を閉じる方向の運動範囲 ($-\pi/2 < \theta < 0$) において、 α の単調性と境界値より $(\mu_1 - \mu_2)/2 \leq \alpha \leq 0$ が成立する。Fig. 4 に、 θ に関する α の変化の一例を示す。床と脚が接触している最中は $\ddot{r}_{cz} + g > 0$ が成り立つ (後述の 3.2.1 項を参照) ことを考慮すると、上記で求めた α の範囲と式 (11) より、跳躍を開始するまでの滑り動作では次の関係が成立する。

$$\begin{cases} \ddot{r}_{cx} > 0 & (\mu_1 < \mu_2) \\ \ddot{r}_{cx} < 0 & (\mu_1 > \mu_2) \end{cases}, \quad (19)$$

式 (19) は、両脚を閉じるように運動を行うときは、トルク入力との与え方によらず、Fig. 3 (b) のように摩擦係数の大きい脚の

Fig. 5 One-way movement based on the switch of frictional coefficients

方向へ全重心が加速することを表している。つまり、前後脚の滑り摩擦力の差を駆動力として水平移動を行う。

滑りと跳躍からなる 1 ステップの連続的な繰り返しによって前進移動を実現するには、前脚と後脚の入れ替えに対して常に同一方向へ推進力を得る必要がある。そこで、Fig. 5 (a) のような非対称性を有する摩擦材料を両脚の先端に取り付ける。この摩擦材料は、 x 軸方向に沿って摩擦係数の低い前部と摩擦係数の高い後部で構成されており、それぞれを μ_{low} , μ_{high} と定義する。胴体リンクへ向かう方向に曲率中心があるカーブを描いており、床と点接触するような構造になっている。この場合、脚の姿勢によって脚先の接触部分が切り替わり、それに伴って摩擦係数が以下のように変化する。

$$\mu_i = \begin{cases} \mu_{high} & (\theta_i > 0) \\ \mu_{low} & (\theta_i < 0) \end{cases}, \quad (20)$$

したがって、床との接触状態は Fig. 5 (b) のように前脚では常に高摩擦、後脚では低摩擦の状態となる。以上より、1 ステップごとに前脚と後脚の入れ替えを空中で行っても、連続的な x 軸の正方向への前進移動が可能となる。

3.2 運動特性

3.2.1 跳躍タイミング

滑り動作中では脚と床が接触しているため、垂直抗力に関して $N_{1z} + N_{2z} = m_s(\ddot{r}_{cz} + g) > 0$ が成立する。接触状態から各脚が跳躍動作へ移行する条件は、垂直抗力 N_{1z} , N_{2z} がそれぞれ 0 になることで記述できる。滑り動作中には式 (11) の拘束条件が存在するため、式 (4) の垂直抗力は次式に変形できる。

$$\begin{aligned} N_{1z} &= \frac{m_s}{\mu_1 + \mu_2} (\alpha + \mu_2) (\ddot{r}_{cz} + g), \\ N_{2z} &= \frac{m_s}{\mu_1 + \mu_2} (-\alpha + \mu_1) (\ddot{r}_{cz} + g), \end{aligned} \quad (21)$$

$\mu_1 \leq \mu_2$ のときには 3.1 節より $(\mu_1 - \mu_2)/2 \leq \alpha \leq 0$ であるので、式変形した $(\mu_1 + \mu_2)/2 \leq \alpha + \mu_2 \leq \mu_2$ から $\alpha + \mu_2 \neq 0$ が成り立つ。よって、 $N_{1z} = 0$ の解は $\ddot{r}_{cz} = -g$ となる。同様に $-\alpha + \mu_1 \neq 0$ が成り立つので、 $N_{2z} = 0$ の解も $\ddot{r}_{cz} = -g$ となる。つまり、 $\ddot{r}_{cz} = -g$ となった瞬間に両脚の垂直抗力が同時に 0 となるため、跳躍時の条件は次式で表される。

$$\ddot{r}_{cx}(t_j) = 0, \quad \ddot{r}_{cz}(t_j) = -g, \quad (22)$$

以上より、片脚支持期を経ないで両脚同時に跳躍を開始することが分かる。この特徴は、一般的に片脚支持の状態がもたらす不安定性や片脚モータへの負荷集中の問題を軽減することに寄与している。

3.2.2 水平移動スピード

式 (19) より, 滑り動作中の水平速度は摩擦係数の大きい脚の方向へ単調に増加する. これと式 (22) の $\ddot{r}_{cx}(t_j) = 0$ を組み合わせると, 跳躍が開始するときに水平速度が最大に達することが分かる. 空中では跳躍開始時の水平速度が維持されることを考慮すると, この特徴は移動速度を高速化することに寄与している. また, α は式 (11) より重心加速度の z 成分から x 成分への変換係数とみなすことができる. 3.1 節で示したように, 脚を閉じるに従い α の絶対値は単調に減少するので, 脚を開いている状態のほうが水平加速度の増加への寄与が大きいといえる. つまり, 滑り動作の初期段階において水平方向への急加速が達成されることが分かる.

3.3 移動戦略

滑り動作と跳躍動作の連続的な繰り返しによって水平移動の実現を目指すために, 以下の方針に沿って動作を決定する.

- I. 跳躍高さ J_z を低く設定し, 着地の衝撃を抑える.
- II. 跳躍開始 t_j の前後にわたって連続的なトルクを入力する.

本論文では並進滑りによる移動効果に焦点を当てているため, 方針 I を設けて着地における衝撃の問題を無視できる程度に簡略化することにする. また, 跳躍高さを低く設定することは, 式 (16) より跳躍時の鉛直速度が小さいことに相当するため, 歩幅と移動周期も小さくなる. よって移動軌道をリアルタイムに変更しやすくなるため, 方針 I は水平方向の移動という観点からも望ましい. 方針 II は, 運動中の急停止を利用した跳躍方法を採用しないことを意味している. 式 (22) から, 跳躍を開始するのは $\ddot{r}_{cz}(t_j) = -g$ を満たすときであり, 多くの跳躍ロボットでは急停止により減速期間を極めて短くすることで重力に抗する加速度を達成している. この手法は, 鉛直速度が大きな状態からほとんど減速せずに跳躍を開始する傾向にあり, 方針 I に沿わないため適さない. さらに 3.2.2 節で記述した水平速度の単調性より, 急停止の跳躍は水平速度の増加時間を短くしていることに相当する. したがって, 急停止による跳躍方法は水平方向の移動には適さないため, 方針 II を設けている.

以上より, 滑り動作から跳躍動作への遷移においてトルク入力の連続性を保ち, 跳躍高さを抑えて短時間の間隔で脚を踏み出すことにより前進移動の実現を行う. この戦略のもと, 以下にその制御方法を示す.

1. 時刻 t_s に床上で脚を開いた状態から定数トルク τ_{const} を入力して滑り動作を開始し, 時刻 t_j に跳躍する.
2. 空中において, 着地姿勢 θ_l となる時刻 t_e までトルク τ_{const} を入力し, その後は着地時刻 t_l までトルクを 0 に設定する.
3. 高速ビジョンで着地の判定を行い, 着地と同時に次の一步の動作を開始する.
4. 一步ごとに τ_{const} と θ_l の正負の符号を入れ替えることで, 脚を前後交互に駆動して連続的な前進運動を行う.

ここで注意すべき点は, 跳躍タイミングに合わせた特別な制御を実行しなくても, 水平速度が最大値に達したときに垂直抗力が 0 になって自動的に跳躍が開始し, 滑り動作から跳躍動作への滑らかな移行が可能なのである. また, 将来的に空中運

Fig. 6 Relation between input torque and timing of state transition

Fig. 7 Time response of normal force N_{1z} corresponding to variations in torque

動から着地までの制御を高速ビジョンを用いてシームレスに行うことを想定し, 本論文では着地判定にビジョンセンサを用いる. 着地時刻に合わせて次の一步の開始タイミングを視覚フィードバックで補正することにより, 床上でのタイムロスもなくした高速な連続移動を可能にする. その際, パラメータに関する対称性の条件 (7) より, 両脚の姿勢は空中でも常に対称となるため, 着地タイミングは跳躍と同様に両脚同時となる. そこで p 歩めのステップに関する変数を添字 (p) で表すと, p 歩めと $p+1$ 歩めの境界条件は $(p)t_l = (p+1)t_s$ と表現される.

以上を要約すると, トルク入力は次式のように設定される.

$$\tau = \begin{cases} (-1)^{p+1} \tau_{\text{const}} & (p)t_s \leq t < (p)t_e \\ 0 & (p)t_e \leq t < (p+1)t_s \end{cases}, \quad (23)$$

Fig. 6 に, トルク入力と状態遷移のタイミングの関係を示す.

3.4 数値シミュレーション

各パラメータは実験で用いる実機の値を参考に以下のように設定し, トルクと滑り摩擦係数の値がロボットの挙動に与える影響についてシミュレーションを行った. $l = 0.1$ [m], $l_a = 0.05$ [m], $m_0 = 0.16$ [kg], $m = 0.05$ [kg], $I = ml^2/12$ [kgm²], $k = 0.0568$ [Ns], $g = 9.8$ [m/s²]. 滑り摩擦による移動効果を明確にするために, 初速度 0 で滑り動作を開始して着地するまでの 1 ステップの期間について検討する.

Fig. 7 にトルクを変化させたときの垂直抗力 N_{1z} の時間応答を示す. トルクを大きくするにつれて, 動作開始時の垂直抗力も大きくなるが, その減少の割合も大きいために跳躍開始までの時間は短くなる. 一方, 図中の $\tau = 0.45$ [Nm] のときのように, ある一定の値よりトルクが小さくなると, 重力に抗する加速度を実現できずに垂直抗力が 0 に達しないことが分かる.

Fig. 8 Time response of horizontal velocity $\dot{r}_{cx}$ corresponding to variations in torque

Fig. 9 Time response of horizontal velocity $\dot{r}_{cx}$ corresponding to variations in difference of frictional coefficients

Fig. 10 Time response of horizontal velocity $\dot{r}_{cx}$ corresponding to variations in sum of frictional coefficients

この場合は、跳躍できずに床と接触を保ち続けるため、連続的な前進移動が行えない。Fig. 8 にトルクを変化させたときの重心水平速度 $\dot{r}_{cx}$ の時間応答を示す。滑りの初期段階に急加速を行って跳躍状態へ移行する瞬間に水平速度が最大値に達し、空中では速度が一定値になっていることが分かる。また、速度が 0 となる時刻に着地状態へ移行することを表している。トルクを大きくするにつれて、水平速度も大きくなると同時に、跳躍の滞空時間も長くなっている。これは、トルクが脚の回転加速度に大きく影響を与えるため、水平方向と同時に鉛直方向の速度にも寄与することを表している。

Fig. 9 に両脚の摩擦係数の差を変化させたときについて、Fig. 10 に両脚の摩擦係数の差を一定にしたまま合計値を変化させたときについて、それぞれ水平速度 $\dot{r}_{cx}$ の時間応答を示す。各グラフは、両脚の滑り摩擦係数の分散と平均の影響をそれぞれ表していることになる。両脚の摩擦係数の差が大きいほど、

また合計値が小さいほど、水平速度が大きくなる様子が分かる。ただし、水平速度へ与える効果は摩擦係数の差のほうが支配的、つまり両脚の摩擦係数の平均よりも分散のほうが支配的であるといえる。また、どちらの場合も跳躍開始時間と着地時間にほとんど影響を与えないことが分かる。これは、摩擦係数が脚の回転加速度にほとんど影響を与えないため、鉛直速度には寄与せずに水平速度のみに寄与することを表している。

3.5 考察

3.5.1 移動速度の高速化

水平方向の移動速度の高速化という観点では、トルク入力はいくつでも大きい方が望ましい。しかし、同時に鉛直速度の増加をもたらすため、跳躍高さを低くして着地の衝撃力を抑える移動戦略のもとでは、トルク入力を必要以上に大きくすることはできない。そのため、鉛直速度へ影響を与えない摩擦変化を利用することが、高速化を実現するには有効である。特に、両脚の摩擦係数の差を大きく設計することが効果的である。また、両脚の摩擦係数の平均値は小さいほうが移動速度が速い。これは、滑りによって推進力を得る移動原理のため、摩擦が少なく滑りやすい路面のほうが、散逸エネルギーが少なく運動エネルギーへの変換効率が高いことを表している。

3.5.2 摩擦特性に対するロバスト性

摩擦特性は接触する物体同士によって決定されるので、脚先の材料だけではなく床の状況にも依存する。一方、摩擦変化によって跳躍開始時間と着地時間は影響を受けない。したがって、トルクを定数値に設定して移動することで、床の摩擦特性が未知の場合や一様でない場合でも、跳躍高さや移動周期はほとんど変化せずに、衝撃力を低減する跳躍を継続しながら安定な移動が実現できる。さらに、跳躍と着地のタイミングに関する両脚の同時性も摩擦変化に依存しないため、安定な移動へ貢献している。また、移動の初期段階で急加速する特徴によって、一般的に低速時に出現するスティックスリップ（静摩擦と動摩擦の不連続な切り替わり）の影響を回避し、滑り摩擦による安定した推進力の生成が可能となっている。

3.5.3 応用可能な路面状況

鉛直方向の跳躍に関して、東森らと筆者らは、小型でトルク重量比の高いモータを用いて跳躍ロボットを設計し、実験で滑り動作を利用した高い跳躍能力を実現している [13] [14]。その跳躍ロボットの構造は本論文の提案モデルと類似であるため、水平速度と同時に鉛直速度の増加を伴う可変トルク入力の制御を導入することで、斜面や段差など高低差を伴う路面においても跳躍高さを調整しながら移動可能と考えられる。また、滑り動作を移動の推進力としている原理のため、従来の脚ロボットが不得手としている凍結路面や水濡路面での移動手段として有効であると考えられる。

4. 実験

4.1 実験設定

Fig. 11 に 2 自由度 2 脚ロボットの写真を示す。胴体リンクにアクチュエータを二つ平行に設置し、直線脚をそれぞれの回転軸に取り付けてある。アクチュエータは質量 66 [g] で、2 脚ロボットの全質量は 260 [g] である。脚リンクはアルミニ

Fig. 11 2-DOF biped robot

Fig. 12 Experimental system

Fig. 13 Time response of vertical centroid position

ウムで、脚長は 10 [cm] である。ステンレスの床面で実験を行い、脚先の高摩擦材料としてゴムシートを、低摩擦材料として塩化ビニルを使用した。この場合の滑り摩擦係数は $\mu_{\text{high}} = 0.52$, $\mu_{\text{low}} = 0.31$ である。滑り摩擦係数は、斜面を滑らせたときの距離と時間の計測値から計算で求めた [15]。また、トルク入力には $\tau_{\text{const}} = 0.9$ [Nm] と設定した。ビジョンセンサとして高速カメラ EoSens MC1362 を使用し、解像度 $1,280 \times 512$ の 8 ビットグレースケール画像を 500 [fps] で取得する。カメラは画像処理用 PC (CPU: Pentium 4, 3.2 [GHz], Mem: 1.0 [GB]) と CameraLink で接続され、特徴量を 500 [fps] で計算する。演算結果をリアルタイムコントローラ (dSPACE) ヘイサネットにて転送している。Fig. 12 にシステム全体の概要を示す。

4.2 実験結果

Fig. 13 に重心の鉛直位置 r_{cz} の時間応答を示す。平均移動周期は 206 [ms] であり、1 秒間に 4.9 歩の移動を実現した。グラフの各極小値の地点が着地を表しており、着地直後に次の一歩を開始して鉛直位置が急上昇していることから、着地タイミン

Fig. 14 Time response of horizontal centroid position

Fig. 15 Serial photographs of sliding motion and jumping motion

グの補償が高速ビジョンにより制御されていることが確認できる。移動中の着地高さが静止時のそれより高い位置になっているが、これは画像情報での着地判断エラーによる移動停止を防ぐために、実際の床面より Δz 高い位置で着地を判定していることに起因する。一歩ごとの跳躍高さと移動周期が全体を通してほぼ一定であり、安定した移動を達成していることが分かる。

Fig. 14 に重心の水平位置 r_{cx} の時間応答を示す。連続的な前進移動が観測されていることから、滑り摩擦の非対称性に基づく移動原理の有効性が確認できる。1 歩めの水平移動速度は 0.20 [m/s] であり、同条件の数値シミュレーションから得られた値 0.12 [m/s] と比べて大きな値となっている。これは、脚先に取り付けてある摩擦材料の円弧形状の曲率半径が、脚リンク長の割合に対して大きいことの影響が考えられる [12]。全移動行程の水平移動速度の平均値は 0.24 [m/s] であり、より速い値

Fig. 16 Serial photographs of dynamic horizontal movement

となった。この原因としては、着地直後に次の滑り動作を開始することで、着地の際に瞬間的に水平速度が 0 に収束せず、初速を有した状態で 2 歩め以降へ移行するためと考えられる。実際、1 歩めの速度を基準とすると、2 歩めと 3 歩めの速度はそれぞれ 61%、40% も増加している。この速度変化の定量的な評価は、脚と床の衝突のモデル化に基づく議論が必要であり、本論文の範囲を超えるため省略する。

Fig. 15 と Fig. 16 に、実験の連続写真をそれぞれ 60 [ms] 間隔と 0.4 [s] 間隔で示す。滑りと跳躍を交互に繰り返しながら、数秒間の安定した水平移動を実現していることが分かる。実際に観測された 2 脚ロボットの挙動は、進行方向の直線に沿って平面内をジグザグに運動しながら前進した。これは鉛直軸回りのモーメントが働いているためである。よって、二次元平面でモデル化している点もシミュレーションとの差異の原因となっている。

これらの実験動画はウェブサイト [16] で見ることができる。移動戦略では着地までのトルク入力を 0 としている一方、実験動画では着地時に姿勢拘束を加えているように見える。これは、床面より Δz 高い位置で着地を判定しているため、実際の着地の直前から次の一步の動作（閉脚運動）を開始することに相当し、着地の時点にトルクが発生していることが原因である。

5. ま と め

本論文では、滑り摩擦の非対称性に基づいて推進力を得る移動手法を提案した。2 脚ロボットのダイナミクスを解析し、水平速度が最大になる時刻に両脚同時に跳躍を開始することを導

出した。数値シミュレーションを行い、跳躍高さや移動周期は摩擦特性にほとんど影響されないのに対して、水平速度は摩擦特性に大きく依存することを確認した。特に、両脚の摩擦係数の差を大きくすることが高速化に効果的であることが分かった。高速ビジョンを着地判定に用いた移動実験を行い、滑りと跳躍を繰り返す連続的な前進移動を実現し、提案手法の有効性を実証した。

今後の課題は、着地における衝突モデルの提案、およびエネルギー効率や安定性の定量的解析が挙げられる。さらに、三次元モデルへ拡張して鉛直軸回りの運動制御を実現し、路面上の任意な移動を可能にすることである。

参 考 文 献

- [1] 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 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.634–640, 2005.
- [2] 竹村裕, 出口将人, 上田淳, 松本吉央, 小笠原司: "脚先加速度情報を用いた力制御による 4 脚歩行ロボットの滑り適応容", 日本ロボット学会誌, vol.23, no.1, pp.124–130, 2005.
- [3] S. Hirose and H. Tsutsumitake: "Disk Rover: A Wall-climbing Robot Using Permanent," Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.2074–2079, 1992.
- [4] W. Fischer, F. Tache and R. Siegwart: "Inspection System for Very Thin and Fragile Surfaces, Based on a Pair of Wall Climbing Robots with Magnetic Wheels," Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.1216–1221, 2007.
- [5] 三浦郁奈子, 中岡慎一郎, 金広文男, 原田研介, 金子健二, 横井一仁, 梶田秀司: "足裏の滑りを利用した 2 足歩行ロボットの方向転換—滑り現象のモデル化と回転角の予測—", 日本ロボット学会誌, vol.28, no.10, pp.1232–1242, 2010.
- [6] K. Hashimoto, Y. Yoshimura, H. Kondo, H. Lim and A. Takanishi: "Realization of Quick Turn of Biped Humanoid Robot by Using Slipping Motion with Both Feet," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.2041–2046, 2011.
- [7] M. Koeda, Y. Uda, S. Sugiyama and T. Yoshikawa: "Shuffle Turn and Translation of Humanoid Robots," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.593–598, 2011.
- [8] 福田敏男, 光本直樹, 新井史人, 松浦英雄: "マイクロ移動ロボットに関する基礎的研究 (第一報: マイクロ移動ロボットの試作, 動作実験及び, 数学モデル)", 日本機械学会論文集 (C 編), vol.59, no.562, pp.185–192, 1993.
- [9] 青島伸一, 森光武則, 辻村健: "圧電振動を用いた細径管移動機械に関する基礎的研究", 日本機械学会論文集 (C 編), vol.55, no.516, pp.1934–1940, 1989.
- [10] T. McGeer: "Passive dynamic walking," Int. J. of Robotics Research, vol.9, no.2, pp.62–82, 1990.
- [11] 大須賀公一: "受動的歩行を規範とした歩行ロボットと制御", 日本ロボット学会誌, vol.20, no.3, pp.233–236, 2002.
- [12] F. Asano and Z. 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.
- [13] M. Higashimori, M. Harada, M. Yuya, I. Ishii and M. Kaneko: "Dimensional Analysis Based Design on Tracing Type Legged Robots," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.181–187, 2005.
- [14] T. Senoo, Y. Tanno and M. Ishikawa: "Jumping Patterns Analysis for 1-DOF Two-legged Robot," Proc. of Int. Conf. on Control, Automation, Robotics and Vision, pp.603–608, 2010.
- [15] 曾田範宗: 摩擦の話, 岩波新書, 1971.
- [16] <http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/fusion/AsymmetricFriction/>

付録 A. ダイナミクスの導出過程

ここでは式 (11), 式 (12), 式 (17) の導出過程の詳細について記述する.

式 (1) (4) より内力 F_i と床反力 N_i を重心加速度の関数として記述し, 式 (2b) へ代入すると次式ようになる.

$$\begin{aligned} I\ddot{\theta} &= \tau + l_a \begin{bmatrix} -S_\theta \\ C_\theta \end{bmatrix} \times F_1 + (l - l_a) \begin{bmatrix} S_\theta \\ -C_\theta \end{bmatrix} \times N_1 - k\dot{\theta} \\ &= \tau + \begin{bmatrix} -S_\theta \\ C_\theta \end{bmatrix} \times \left\{ ml_a(\ddot{r}_{c1} - g) - lN_1 \right\} - k\dot{\theta} \\ &= \tau + \begin{bmatrix} -S_\theta \\ C_\theta \end{bmatrix} \times \left\{ ml_a \left(\ddot{r}_{c0} + l_a \begin{bmatrix} \ddot{S}_\theta \\ -\ddot{C}_\theta \end{bmatrix} - g \right) \right. \\ &\quad \left. - l \frac{m_s}{\mu_1 + \mu_2} \left\{ -\ddot{r}_{cx} + \mu_2(\ddot{r}_{cz} + g) \right\} \begin{bmatrix} -\mu_1 \\ 1 \end{bmatrix} \right\} - k\dot{\theta} \\ &= \tau + ml_a \left\{ -(S_\theta \ddot{r}_{c0z} + C_\theta \ddot{r}_{c0x}) + l_a (S_\theta \ddot{C}_\theta - C_\theta \ddot{S}_\theta) - S_\theta g \right\} \\ &\quad - \frac{lm_s}{\mu_1 + \mu_2} \left\{ -\ddot{r}_{cx} + \mu_2(\ddot{r}_{cz} + g) \right\} (-S_\theta + \mu_1 C_\theta) - k\dot{\theta}, \end{aligned} \quad (A.1)$$

同様に, 式 (2c) を変形すると以下ようになる.

$$\begin{aligned} -I\ddot{\theta} &= -\tau + ml_a \left\{ (S_\theta \ddot{r}_{c0z} - C_\theta \ddot{r}_{c0x}) - l_a (S_\theta \ddot{C}_\theta - C_\theta \ddot{S}_\theta) + S_\theta g \right\} \\ &\quad - \frac{lm_s}{\mu_1 + \mu_2} \left\{ \ddot{r}_{cx} + \mu_1(\ddot{r}_{cz} + g) \right\} (S_\theta - \mu_2 C_\theta) + k\dot{\theta} \end{aligned} \quad (A.2)$$

ここで $r_{c0x} = r_{cx}$ であることに注意し, 式 (A.1) と式 (A.2) について両辺の和を計算すると, 次式が成り立つ.

$$\begin{aligned} 0 &= ml_a (-2C_\theta \ddot{r}_{c0x}) - \frac{lm_s}{\mu_1 + \mu_2} \left[\ddot{r}_{cx} \{ 2S_\theta - (\mu_1 + \mu_2) C_\theta \} \right. \\ &\quad \left. + (\ddot{r}_{cz} + g) \{ (\mu_1 - \mu_2) S_\theta \} \right] \\ &= -\frac{lm_s}{\mu_1 + \mu_2} \left[\ddot{r}_{cx} \left\{ 2S_\theta - (\mu_1 + \mu_2) \left(1 - \frac{2ml_a}{m_s l} \right) C_\theta \right\} \right. \\ &\quad \left. + (\ddot{r}_{cz} + g) \{ (\mu_1 - \mu_2) S_\theta \} \right], \end{aligned} \quad (A.3)$$

これを変形することで, 式 (11) の拘束条件が導かれる.

一方, 式 (A.1) と式 (A.2) について両辺の差を計算すると, 次式が成り立つ.

$$\begin{aligned} 2I\ddot{\theta} &= 2\tau + 2ml_a \left\{ -S_\theta \ddot{r}_{c0z} + l_a (S_\theta \ddot{C}_\theta - C_\theta \ddot{S}_\theta) - S_\theta g \right\} \\ &\quad - \frac{lm_s}{\mu_1 + \mu_2} \left[\{ -(\mu_1 + \mu_2) S_\theta + 2\mu_1 \mu_2 C_\theta \} (\ddot{r}_{cz} + g) \right. \\ &\quad \left. - (\mu_1 - \mu_2) C_\theta \ddot{r}_{cx} \right] - 2k\dot{\theta}, \end{aligned} \quad (A.4)$$

ここで, 式 (5) (6) より以下の関係が成り立つ.

$$r_{c0z} = r_{cz} + \frac{2m}{m_s} l_a C_\theta, \quad (A.5)$$

これを式 (A.4) へ代入すると, 重心運動を用いた回転方程式は次式で記述される.

$$\begin{aligned} \tau &= I\ddot{\theta} - ml_a \left\{ -S_\theta \ddot{r}_{cz} + l_a S_\theta \left(1 - \frac{2m}{m_s} \right) \ddot{C}_\theta - l_a C_\theta \ddot{S}_\theta - S_\theta g \right\} \\ &\quad + \frac{lm_s}{2(\mu_1 + \mu_2)} \left[\{ -(\mu_1 + \mu_2) S_\theta + 2\mu_1 \mu_2 C_\theta \} (\ddot{r}_{cz} + g) \right. \\ &\quad \left. - (\mu_1 - \mu_2) C_\theta \ddot{r}_{cx} \right] + k\dot{\theta}, \end{aligned} \quad (A.6)$$

ロボットが床上で滑り動作をする場合は, 式 (10) (11) より以下の重心加速度で運動する.

$$\ddot{r}_{cz} = \left(l - \frac{2m}{m_s} l_a \right) \ddot{C}_\theta, \quad \ddot{r}_{cx} = -\alpha \left\{ \left(l - \frac{2m}{m_s} l_a \right) \ddot{C}_\theta + g \right\}, \quad (A.7)$$

この値を式 (A.6) へ代入して整理することで, 式 (12) のダイナミクスが導かれる. 一方, 空中で跳躍動作をする場合は, 式 (13) より以下の重心加速度で運動する.

$$\ddot{r}_{cx} = 0, \quad \ddot{r}_{cz} = -g, \quad (A.8)$$

この値を式 (A.6) へ代入して整理することで, 式 (17) のダイナミクスが導かれる.

妹尾 拓 (Taku Senoo)

2005 年東京大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻修士課程修了, 2008 年同大学博士課程修了. 現在同大学創造情報学専攻特任助教. ダイナミックマニピュレーション, 高速センサフィードバック制御, 脚ロボットの研究に従事. 博士 (情報理工学). (日本ロボット学会正会員)

高野光浩 (Mitsuhiro Takano)

2012 年東京大学工学部計数工学科卒業. 現在同大学大学院システム情報学専攻修士課程在学中. 脚ロボット, BMI の研究に従事.

石川正俊 (Masatoshi Ishikawa)

1979 年東京大学工学系研究科計数工学修士課程修了. 同年通商産業省工業技術院製品科学研究所入所. 1989 年東京大学工学部計数工学科助教授. 現在同大学情報理工学系研究科創造情報学専攻教授. 生体情報処理の回路モデル, 触覚センサおよびその知能化, 超並列・超高速ビジョン, 並列処理, 光コンピュータ・センサフュージョンの研究に従事. 工学博士. (日本ロボット学会正会員)