

# 足裏圧力勾配に基づくヒューマノイドロボットの摺足移動

## Shuffling Walk Based on Pressure Gradient of Soles for Humanoid Robots

鎌田 崇史†      杉本 大樹†      小枝 正直†  
Takafumi Kamada      Daiki Sugimoto      Masanao Koeda

### 1. はじめに

一般的にヒューマノイドロボットは連続的な足踏み動作により移動する。しかし、足踏み動作時にロボットの周囲に一定量の空間が必要になるため狭隘域の劣姿勢移動には不向きである。また、足踏み動作時に脚の上下運動による振動が発生するため安定性に難がある。この問題に対して、摺足による移動に注目している(図 1.1)。

摺足は、足を上げずに足裏全体で地面をすするようにして移動する方法である。そのため、移動の際に頭が上下左右に揺れず、重心位置が常に安定している。また、従来の連続的な足踏み歩行と摺足移動を組み合わせれば移動可能な領域を格段に広げることが期待できる。

本研究では、関連研究[1]～[15]において考慮されていなかった摺足移動時における足裏に加わる圧力分布に着目する。また、足首ピッチ・ロール軸と大腿ヨー・ロール軸で再現でき、動作時における上半身の振動が少なく他の摺足方法に比べバランスが安定している同期非平行摺足を用いる(図 1.2)。

同期非平行摺足では、両足裏に加わる荷重の位置によって得られる足裏圧力の勾配が異なる。この時、足裏圧力勾配に対する法線ベクトルの向きも荷重位置によって変化する。足裏圧力勾配の法線ベクトルの向きが常に進行方向へ加わる様に制御することで効率的な摺足移動になると考えられる。

## 2. 足裏圧力勾配モデルに基づく摺足移動

### 2.1 同期非平行摺足の分類

本研究で用いる同期非平行摺足について説明する。荷重位置を足裏四隅に置き、足裏全体を回転させ摺足を行う。

同期非平行摺足のモーション手順を図 2.1 に示す。前開き(A)→平行(B)→後ろ開き(C)→平行(D)の順に動作を繰り返し摺足を実現している。

同期非平行摺足における分類は荷重位置の与え方により前開き(A)、平行(B)、後ろ開き(C)、平行(D)のそれぞれの状態において左右の足裏の荷重位置の与え方によって以下の4種類に分類できる。

- (1) 右足：右寄り - 左足：左寄り
- (2) 右足：左寄り - 左足：右寄り
- (3) 右足：左寄り - 左足：左寄り
- (4) 右足：右寄り - 左足：右寄り

荷重位置の与え方により足裏圧力勾配ベクトル向きが変化する。足裏圧力勾配ベクトルによる進行方向へ押し出す力と荷重位置を中心とした回転力を利用して移動を実現している。

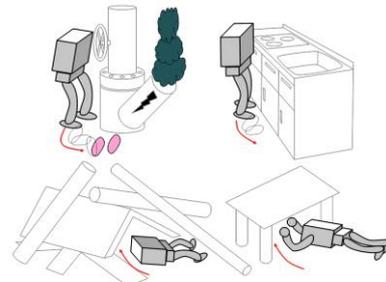


図 1.1 狭隘域・劣姿勢移動での移動方法

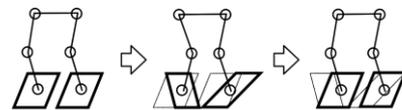


図 1.2 同期非平衡摺足

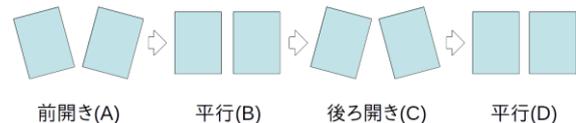


図 2.1 同期非平衡摺足の流れ

### 2.2 足裏圧力勾配モデル

ロボットの全重量  $W$  とし、ロボットの足底(図 2.2)を剛体平面で矩形と仮定する。ここでは前開き→平行における状態を説明するが、他の状態でもほぼ同様である。

荷重位置を座標原点として、ロボットの左右方向を  $x$  軸、前後方向を  $y$  軸とする。また、ロボット胴体の基準座標系を  $\Sigma_{body}$ 、足裏座標系を  $\Sigma_{sole}$  とする(図 2.3)。この時、荷重位置に加わる圧力は最大とし、荷重位置の対角点に向かって圧力は減少する。

足底の左右、前後方向の寸法をそれぞれ  $x_l, y_l$  とする。座標  $(x, y)$  に単位面積に掛かる法線方向の力  $f(x, y)$  とし、以下の拘束条件を設ける。

$$f(x_l, y_l) = 0 \quad (1)$$

$$f(x_l, 0) = f_x \quad (2)$$

$$f(0, y_l) = f_y \quad (3)$$

また、摺足動作は遅く慣性の影響を受けないものとする。これらの拘束条件から足裏圧力勾配式を仮定すると、

$$f(x, y) = -\frac{f_y}{x_l}x - \frac{f_x}{y_l}y + (f_x + f_y) \quad (4)$$

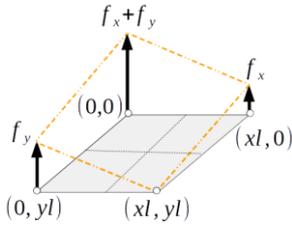


図 2.2 足裏圧力勾配モデル

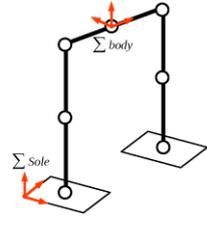


図 2.3 ロボットの座標系

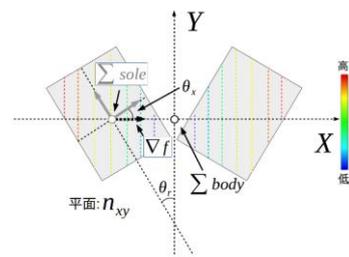


図 2.4 xy 平面への射影

$f(x, y)$ を片足裏全体で重積分すると

$$V = \int f(x, y) dx dy \quad (5)$$

$$= \frac{x_l \cdot y_l}{2} (f_x + f_y) \quad (6)$$

となる。

同期非平行摺足移動においては常時、左右の脚に重量が等分に配分されるため、片足裏では  $V = W/2$  である。

$$\frac{x_l \cdot y_l}{2} (f_x + f_y) = \frac{W}{2} \quad (7)$$

$$f_x + f_y = \frac{W}{y_l \cdot x_l} \quad (8)$$

この時、  $0 \leq \alpha \leq 1$  の制御パラメータを  $\alpha$  とすると、

$$f_x = \alpha F \quad (9)$$

$$f_y = (1 - \alpha) F \quad (10)$$

となるように  $f_x, f_y$  を調整する。

### 2.3 足裏圧力勾配モデルに基づく効率的な摺足移動

式 4 より、平面の法線ベクトル  $n$  は、

$$n_{xy} = \begin{pmatrix} -\frac{f_y}{x_l} \\ -\frac{f_x}{y_l} \\ f_x + f_y \end{pmatrix} \quad (11)$$

で、  $f(x, y)$  の勾配ベクトル  $\nabla f$  (図 2.4) は、

$$\nabla f = \begin{pmatrix} -\frac{f_y}{x_l} \\ -\frac{f_x}{y_l} \end{pmatrix} \quad (12)$$

$\nabla f$  が足裏座標系  $\Sigma_{sole}$  の  $x$  軸となす角度  $\theta_x$  は、

$$\tan \theta_x = \frac{\alpha F \cdot x_l}{(1 - \alpha) F \cdot y_l} \quad (13)$$

これを  $\alpha$  で解くと、

$$\alpha = \frac{y_l \cdot \tan \theta_x}{y_l \cdot \tan \theta_x + x_l} \quad (14)$$

となる。ロボット胴体の基準座標系  $\Sigma_{body}$  に対する足裏座標系  $\Sigma_{sole}$  の相対角度を  $\theta_r$  とすると、

$$\theta_x = \theta_r \quad (15)$$

を摺足中に常時維持するように  $\alpha$  を調整することが望ましいと考える。

## 3. 評価実験

### 3.1 システム構成

#### 3.1.1 Robovie-X PRO

Viston 株式会社が販売している小型 2 足歩行ロボットである。頭部に 1 自由度、腕に 6 自由度、脚部に 12 自由度を有している。足底の寸法は縦 123mm、横 70mm である。モーション生成には RobovieMaker2 を用いた。

#### 3.1.2 LL センサ

LL センサ(図 3.1)は株式会社シロクが販売している電磁誘導方式圧力分布センサである。スペックを表 3.2 に示す。

付属の評価用ソフトウェア「LLtest」(図 3.2)を用いることで、圧力分布データを表示することができる。

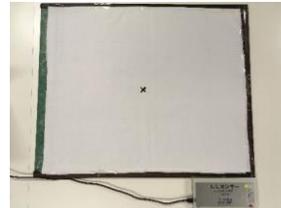


図 3.1 LL センサ

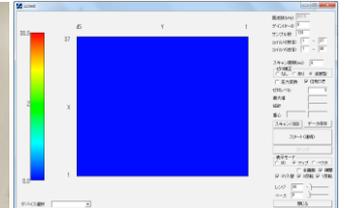


図 3.2 LLtest

表 3.2 LL センサ仕様

センササイズ	580×480mm
センサ制御	マトリクス制御
素子間隔	12.5mm
素子数	1660(37×45)
電源入力	USB 供給 5V
最小空間分解能	4mm
毎秒最大速度	100 フレーム

### 3.2 実験内容

実験では荷重位置が異なる 4 種の同期非平行摺足を行い、移動量と方向変化を比較し、提案手法の有効性を検証する。

- (1) 内寄り荷重
- (2) 外寄り荷重
- (3) 左寄り荷重
- (4) 右寄り荷重

本実験におけるロボットの各関節角度の変化量をそれぞれ表 3.3~3.6 に示す。

実験条件として、ロボットの脚部構造の理由から、摺足動作中における大腿ヨー軸の最大回転角度を $\pm 6.5[\text{deg}]$ に制限した。また、実験フィールドは水平な平地であり、実験中における摺足動作回数は計20回とし、左方向への摺足移動を行う。ロボットの足裏と LL センサ間の摩擦係数を計測したところ摩擦係数は約 $\mu = 0.2$ であった。実験にて使用する摺足モーションは現在のポーズから次のポーズまで約2.5秒かけて関節角度を変化させている。

### 3.3 実験結果

それぞれの荷重位置ごとの平均移動量を図 3.3 に、標準誤差を図 3.4 に、平均変化量を図 3.5 に示す。

表 3.3 内寄り荷重での関節角度

	関節角	角度[deg]	
		左	右
前開き A1	足首ロール軸	0.0	-0.5
	足首ピッチ軸	4.0	3.0
	大腿ロール軸	-3.0	1.5
	大腿ヨー軸	-5.0	5.0
平行 B1	足首ロール軸	0.0	-0.5
	足首ピッチ軸	0.0	0.0
	大腿ロール軸	-3.0	1.5
	大腿ヨー軸	0.0	0.0
後ろ開き C1	足首ロール軸	0.0	-0.5
	足首ピッチ軸	-4.0	-3.0
	大腿ロール軸	-3.0	1.5
	大腿ヨー軸	5.0	-5.0
平行 D1	足首ロール軸	0.0	-0.5
	足首ピッチ軸	0.0	0.0
	大腿ロール軸	-3.0	1.5
	大腿ヨー軸	0.0	0.0

表 3.4 外寄り荷重での関節角度

	関節角	角度[deg]	
		左	右
前開き A2	足首ロール軸	-0.5	0.5
	足首ピッチ軸	0.0	4.0
	大腿ロール軸	2.0	-2.0
	大腿ヨー軸	0.0	5.0
平行 B2	足首ロール軸	-0.5	0.5
	足首ピッチ軸	0.0	0.0
	大腿ロール軸	2.0	-2.0
	大腿ヨー軸	0.0	0.0
後ろ開き C2	足首ロール軸	-0.5	0.5
	足首ピッチ軸	-4.0	-4.0
	大腿ロール軸	2.0	-2.0
	大腿ヨー軸	-5.0	5.0
平行 D2	足首ロール軸	-0.5	0.5
	足首ピッチ軸	0.0	0.0
	大腿ロール軸	2.0	-2.0
	大腿ヨー軸	0.0	0.0

#### 3.3.1 内寄り荷重

縦方向の平均移動量は 32.7[mm]で、横方向は-8.8[cm]であった。5 回行った実験のいずれにおいても最終的に右回

り方向に方向変化し、後方に移動した。移動中の圧力分布を図 3.6 に示す。

#### 3.3.2 外寄り荷重

縦方向の平均移動量は 4[mm]で、横方向は-5.6[mm]であった。5 回行った実験のいずれにおいても移動はごく少量だった。移動中の圧力分布を図 3.7 に示す。

表 3.5 左寄り荷重での関節角度

	関節角	角度[deg]	
		左	右
前開き A3	足首ロール軸	0.0	0.0
	足首ピッチ軸	-2.0	-2.0
	大腿ロール軸	-3.0	-3.0
	大腿ヨー軸	-5.0	5.0
平行 B3	足首ロール軸	0.0	0.0
	足首ピッチ軸	0.0	0.0
	大腿ロール軸	-3.0	-3.0
	大腿ヨー軸	0.0	0.0
後ろ開き C3	足首ロール軸	0.0	0.0
	足首ピッチ軸	2.0	2.0
	大腿ロール軸	-3.0	-3.0
	大腿ヨー軸	5.0	-5.0
平行 D3	足首ロール軸	0.0	0.0
	足首ピッチ軸	0.0	0.0
	大腿ロール軸	-3.0	-3.0
	大腿ヨー軸	0.0	0.0

表 3.6 右寄り荷重での関節角度

	関節角	角度[deg]	
		左	右
前開き A4	足首ロール軸	0.0	0.0
	足首ピッチ軸	1.5	1.5
	大腿ロール軸	3.0	3.0
	大腿ヨー軸	-5.0	5.0
平行 B4	足首ロール軸	0.0	0.0
	足首ピッチ軸	0.0	0.0
	大腿ロール軸	3.0	3.0
	大腿ヨー軸	0.0	0.0
後ろ開き C4	足首ロール軸	0.0	0.0
	足首ピッチ軸	-1.5	-1.5
	大腿ロール軸	3.0	3.0
	大腿ヨー軸	5.0	-5.0
平行 D4	足首ロール軸	0.0	0.0
	足首ピッチ軸	0.0	0.0
	大腿ロール軸	3.0	3.0
	大腿ヨー軸	0.0	0.0

#### 3.3.3 左寄り荷重

縦方向の平均移動量は 9.3[mm]で、横方向は-46[mm]であった。5 回行った実験のいずれにおいても横方向へ移動した。移動中の圧力分布を図 3.8 に示す。

### 3.3.4 右寄り荷重

縦方向の平均移動量は5.7[mm]で、横方向は-85[mm]であった。5回行った実験のいずれにおいても横方向へ移動し、その平均移動量は実験で行った4種の摺足を比較すると最も多く移動し、移動量の理論値に最も近かった。また、平均方向変化量も4種の摺足の内では0.8[deg]と比較的に低かった。移動中の圧力分布を図3.9に示す。

## 4. おわりに

本稿では、摺足移動時における足裏に加わる圧力勾配に着目し、足裏圧力勾配モデルから得られた圧力勾配に基づき足裏に加わる圧力を変化させる制御方を提案した。

実験結果より、荷重位置によって足裏圧力勾配の法線ベクトルの向きが異なる圧力勾配状態での摺足動作において提案手法による圧力勾配調整の有効性を確認できた。

今後、ロボットの足裏に力センサを取り付け、提案手法によるフィードバック制御を行う。次に、本研究で用いたロボットの足裏の形状が異なる場合でも同様の効果が得られるのか検証する。

## 参考文献

- [1] F.Kanehiro, et al.: "Locomotion Planning of Humanoid Robots to Pass through Narrow Spaces", ICRA2004, pp.604-609, 2004.
- [2] 金広文男, 他: "3D グリッドマップを用いたヒューマノイドの狭隘部移動", 日本ロボット学会誌, 2007.
- [3] M. Koeda, et al.: "Shuffle Turn with Both Feet of Humanoid Robot by Controlling Load Distribution of Soles", CLAWAR2009, pp.1007-1014, 2009.
- [4] K. Miura, et al.: "A friction based "twirl" for biped robots", Humanoids2008, pp.279-284, 2008.
- [5] K. Miura, et al.: "Analysis on a Friction Based "Twirl" for Biped Robots", ICRA2010, pp. 4249-4255, 2010.
- [6] J.Kim, et al.: "Quick change of walking direction of biped robot with foot slip in single-support phase", Humanoids2011, pp.339-344, 2011.
- [7] M. Koeda, et al.: "Shuffle Turn and Translation of Humanoid Robots", ICRA2011, pp.593-598, 2011.
- [8] M. Koeda, et al.: "Side Translation by Simultaneous Shuffle Turn for Humanoid Robots", ASCC2011, pp.1346-1351, 2011.
- [9] S. Tsuchihiro, et al.: "A sliding walk method for humanoid robots using ZMP feedback control", ROBIO2011, pp.275-280, 2011.
- [10] 杉本大樹, 他: "力センサによるヒューマノイドの摺足制御", SI2015, 2F3-1, pp.1429-1433, 2015.
- [11] 杉本大樹, 他: "ヒューマノイドのZMPフィードバック摺足制御による移動性能検証", ROBOMECH2016, 2A1-12b6, 2016.
- [12] D. Sugimoto, et al.: "ZMP-based Shuffling Walk Control for Humanoid Robot", RO-MAN2016, pp.904-905, TuIVS.2, 2016.
- [13] 高林佑介, 他: "2足歩行ロボットにおける高速歩行実現のための足裏摩擦の拘束に関する基礎研究", ROBOMECH2016, 1A2-06b1, 2016.
- [14] K.Kojima, et al.: "Shuffle motion for humanoid robot by sole load distribution and foot force control", IROS2015, pp.2187-2194, 2015.

[15] K.Hashimoto, et al.: "Realization of Quick Turn of Biped Humanoid Robot by Using Slipping Motion with Both Feet", ICRA2011, pp.2041 - 2046, 2011.

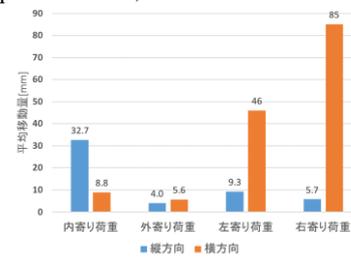


図 3.3 平均移動量の比較

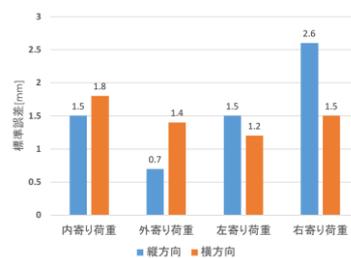


図 3.4 標準偏差の比較

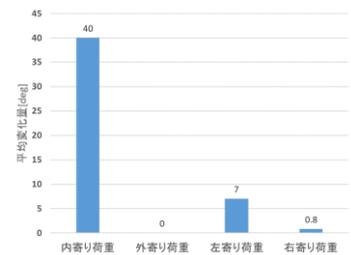


図 3.5 平均変化量の比較

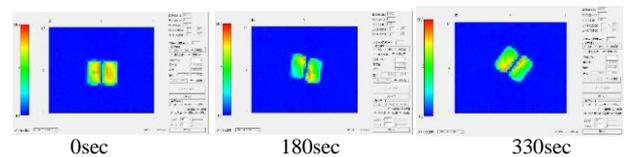


図 3.6 内寄り荷重圧力分布

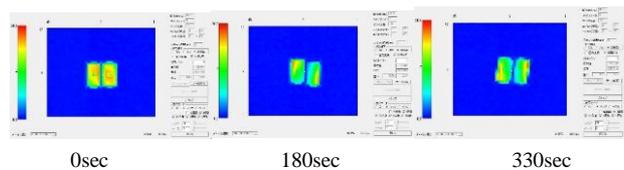


図 3.7 外寄り荷重圧力分布

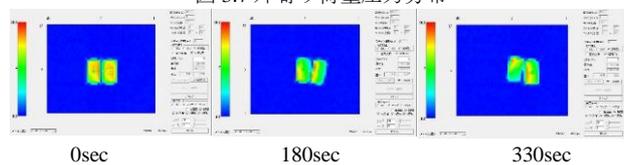


図 3.8 左寄り荷重圧力分布

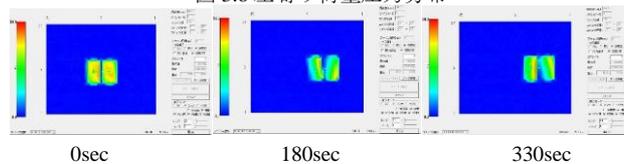


図 3.9 右寄り荷重圧力分布