人体運動シミュレータとしての2足ヒューマノイドロボットの開発 —第11報：両足の滑りを利用した高速な旋回運動の実現—

Research on Biped Humanoid Robot as a Human Motion Simulator -11th Report: Realization of Quick Turn by Using Slipping Motion with Both Feet-

○正 橋本健二 (早大) 吉村勇希 (早大) 正 近藤 秀樹 (早大)
正 林 憲玉 (神奈川大, 早大 HRI) 正 高西淳夫 (早大, 早大 HRI)

Kenji HASHIMOTO, Yuki YOSHIMURA, Hideki KONDO, Waseda University,
k-hashimoto@takanishi.mech.waseda.ac.jp
Hun-ok LIM, Kanagawa University / Humanoid Robotics Institute, Waseda University
Atsuo TAKANISHI, Waseda University / Humanoid Robotics Institute, Waseda University

This paper describes a fast turning method for a humanoid robot by using slipping motion with both feet. The humanoid robot, WABIAN-2R, has achieved human-like walking with heel contact and toe off motions by using a human-like foot mechanism with a passive toe joint. The human-like foot enables a robot to turn by using slipping motion because it can switch ground contact conditions such as heel contact, sole contact and toe contact. To realize a slipping turn, we develop an attitude control. Verification of the proposed method is conducted through experiments with WABIAN-2R. WABIAN-2R realized a quick turn by using slipping motion with both feet. We also confirmed the energy consumption of a slipping turn is less than that of a stepping turn.

Key Words: Humanoid Robot, Slip, Turning Motion

1. はじめに

これまでに演者らは、人間の構造と運動の模擬を目的として人体運動シミュレータとしての2足ヒューマノイドロボット WABIAN-2R (WAseda Bipedal hUmAnoid - No. 2 Refined) を開発してきた (図 1)。その全高は 1480 mm, 重量は 63.8 kg で、全身 41 自由度を有している。これまでに、人間の骨盤を能動 2 自由度でモデル化した腰部を用いることで膝関節を伸ばした歩行を実現し[1], アーチ構造を模擬した人間形足部機構での踵接地・爪先離地歩行を実現してきた[2]。

人間の運動にさらに注目すると、人間はすり足や旋回などの滑りを利用した運動も行う。滑りを利用した運動の利点としては、運動の高速化によるエネルギー効率向上や、両足が地面に接地した状態で動作を行うため、外乱に対する安定性向上などが期待される。

滑りを利用した旋回運動の例として、西川[3]は足裏に特殊なピストンを持つ2足歩行ロボットを開発し、回転方向に滑りやすいようにしている。小枝ら[4, 5]は小型のヒューマノイドロボットを用いて、足の滑りを活用することで90度方向転換を試みており、また両足の足裏力分布を調節し、両脚を同時に滑らせることで方向転換する手法も提案している。宇多ら[6, 7]は角速度センサの値をフィードバックすることにより、目標方向転換角度からのずれを修正する手法を提案し、両足滑り方向転換を連続させることにより、横方向の滑り並進移動も実現している。しかし、30度旋回するのに要す時間が4秒と長く、現時点では高速な旋回運動は実現されていない。一方 Miura ら[8]は、床面摩擦による損失エネルギーを最小限にするモデルを仮定し、等身大のヒューマノイドロボットで足の滑りを利用した旋回運動を実現している。約2.5秒で90度の旋回運動を実現しているが、低摩擦環境を作り出すために、ロボットの足裏面にプラスチック板を取り付け、また床面にもプラスチック板を置いている。人間の滑りを利用した旋回に注目すると、踵接地や爪先接地などと積極的に路面との接地状態を切り替えることで旋回運動を実現している。

そこで本研究では、等身大の2足ヒューマノイドロボット WABIAN-2R を用いて、踵接地や爪先接地など路面との接地状

態が切り替え可能な人間形足部機構[2] (図 2) を応用し、滑りを利用した高速な旋回運動の実現を目的とする。

Fig. 1 WABIAN-2R

(a) Overview

(b) Heel contact

(c) Toe contact

Fig. 2 Human-like foot mechanism with the medial longitudinal arch

2. 両足の滑りを利用した人間の旋回運動の解析

滑りを利用した旋回運動としては、片足で旋回する場合と、両足を利用する場合が考えられる。図 2 に示す人間形足部機構は爪先が受動関節であり、片足で爪先立ちになることが困難なため、本研究では両足での旋回運動を対象とすることとした。また両足旋回においても、左右の足部の路面との接地状態の組み合わせとして、以下の 3 通りが考えられる：

- 踵接地－踵接地
- 爪先接地－踵接地
- 爪先接地－爪先接地

本研究では爪先が受動関節でも可能で、接地面積を大きく確保可能な「爪先接地－踵接地」による旋回運動を対象にする。具体的には、両足の滑りを利用する「右向け右」を対象にすることとした。「右向け右」とは足の爪先と踵を軸にして一気に右に 90 度旋回するものである。

ロボットの動作を生成するにあたり、人間の旋回運動を床反力計とモーションキャプチャシステムを用いて計測した。その際、滑りを利用した旋回だけでなく、通常の足踏みによる旋回運動も計測する。

まず、両足の滑りを利用した旋回において各足の CoP (床反力作用点) に注目すると、爪先立ちしている左足は人差し指付け根を中心に、踵立ちしている右足は踵を中心に足部を回転していることが分かった (図 3)。

●: CoP

Fig. 3 Transition of each foot's CoP during slipping motion. The robot contacts ground with the heel of the right foot and the toe of the left foot

Fig. 4 Comparison of travel distance of stepping turn and slipping turn

Fig. 5 Turning simulation by using slipping motion with both feet

また足踏みによる旋回と滑りを利用した旋回のそれぞれの場合の CoP の移動量を計算したところ、滑りを使用した場合のほうがその移動量が 40% 程少なく、滑りを利用した旋回のほうが移動効率が良いことが推測される (図 4)。

人間の旋回運動の解析結果をもとに、各足の爪先と踵を旋回中心として足部を回転させるようにロボットの動作を生成し、シミュレーションを行ったものを図 5 に示す。しかし、この動作を実際のロボットにそのまま出力すると、モデル誤差などの影響により旋回中にロボットの姿勢が崩れるため、次のような転倒を抑制する手法を考案した。

3. 滑りを利用した旋回運動の安定化制御

人間の滑りを利用した両足での旋回運動 (右足は踵接地、左足は爪先接地) を参考に、ロボットの旋回運動パターンを作成したが、ロボットのモデル誤差などの影響により旋回中にロボットの姿勢が崩れるため、転倒を抑制する手法を考案した。本研究では図 6 に示すように、踵接地側の足部は路面と点接地、爪先接地側の足部は線接地するため、各足の前後方向の CoP の位置は自動的に決まる。また、点接地している足部は接地点周りにトルクを発生できないため、線接地している爪先接地側の足部の姿勢を修正することで、ロボットの姿勢を安定化することとした。

具体的には、旋回中のロボットを図 7 のようにモデル化し、体幹部に備えた姿勢角センサから取得したデータを用いて姿勢角偏差 θ_{error} を算出し、これに応じて爪先接地している足部の足関節の Roll 軸角度を PD 制御することで姿勢を補償するものである。

$$\Delta\theta(t) = K_p \cdot \theta_{error}(t) + K_d \cdot \dot{\theta}_{error}(t) \quad (1)$$

ここで、 $\Delta\theta(t)$ は爪先接地している足部の足関節の Roll 軸周りの修正量、 K_p 、 K_d は比例ゲイン、微分ゲインである。 $\theta_{error}(t)$ は姿勢角の偏差であり、次式より計算される：

Fig. 6 Contact conditions between the robot's feet and the ground

Fig. 7 Robot's model during turning by using slipping motion

$$\begin{aligned}\theta_{error}(t) &= \{\theta_{roll}(t) - \theta_{roll}(0)\} \cdot \sin \varphi \\ &\quad + \{\theta_{pitch}(t) - \theta_{pitch}(0)\} \cdot \cos \varphi \\ \dot{\theta}_{error}(t) &= \dot{\theta}_{roll}(t) \cdot \sin \varphi + \dot{\theta}_{pitch}(t) \cdot \cos \varphi\end{aligned}\quad (2)$$

ここで、 θ_{roll} 、 θ_{pitch} はロボット体幹部の姿勢角センサから得られる値である。また、 φ は図 8 に示すようにロボットの運動座標系の x 軸と各足の設定 CoP を結んだ線（設定 CoP 軸）がなす角度であり、次式の関係がある。

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{a^2 + 1}}, \quad \sin \varphi = \frac{|a|}{\sqrt{a^2 + 1}}, \quad a = \frac{Y_{Lcop} - Y_{Rcop}}{X_{Lcop} - X_{Rcop}} \quad (3)$$

ここで、 (X_{Rcop}, Y_{Rcop}) 、 (X_{Lcop}, Y_{Lcop}) はロボットの運動座標系から見た各足における設定 CoP の座標である。

旋回中に上記手法でロボットの姿勢を安定化するが、ロボットの運動座標系の y 軸と設定 CoP 軸が重なるとき（ φ が 90 度のとき）を境に、ロボットの姿勢の倒れに対して足関節 Roll 軸の修正すべき方向が逆転する。そこで、この特異点付近では一度修正量を 0 に戻すことで特異点前後での修正方向が逆転する問題への解決を図った。また、旋回中の修正量を保持したまま旋回動作を終了し、各足を爪先接地や踵接地から足底接地へと戻すと転倒する可能性があるため、各足を足底接地に切り替える間に修正量を 0 に戻し、基準パターンに復帰する。

4. 旋回運動実験

提案手法を評価するために、2 足ヒューマノイドロボット WABIAN-2R を用いて旋回運動実験を行う。

- : Reference CoP of each foot
- : Axis between right and left CoP

Fig. 8 Definition of the moving coordinate system

Fig. 9 The under side of the robot's feet. A narrow part is attached to the heel of the right foot

4.1 システム構成

人間形足部機構[2]の足裏には、通常の歩行時に摩擦を確保するための摩擦シートを貼っている。本研究では、足裏の素材を変更することで摩擦を低減するようなことはせず、踵接地や爪先接地などの接地条件を変更し摩擦の低減を図る。ただし、人間形足部機構の踵部には円柱状のゴム素材を用いており、このままでは踵接地時に線接地になるため、幅の狭い素材に変更し、点接地するようにした。（図 9）

4.2 両足の滑りを利用した旋回運動実験

踵接地や爪先接地が可能な人間形足部を用いて旋回実験を行った（図 10）。この際、目標旋回角度は 90 度、旋回時間は 1.5 秒、各足を踵接地や爪先接地に移行するための切替時間は 0.25 秒である。旋回実験の結果、目標旋回角度 90 度に対して、旋回角が 80 度の旋回運動に成功した（図 11）。目標旋回角度に到達しなかった理由としては、足部が回転方向だけでなく、並進方向にも滑りが生じ、各足の回転軸がずれたためである。

Fig. 10 Turning experiment. The turning phase is 1.5 sec, the switching phase is 0.25 sec, and the target turning angle is 90 degrees

と考えられる。この原因として旋回中の各足の鉛直方向の床反力が一定でないことが考えられる。今回開発した制御は旋回中に転倒を抑制することのみに着目しており、より安定した滑りを利用した旋回運動を実現するためには、床反力も考慮した制御が必要であると考ええる。

また旋回実験の際の姿勢角偏差とそれに応じた姿勢角の修正量を図 12 に示す。先に説明したように、旋回中にロボットの姿勢の倒れに対して足関節 Roll 軸の修正すべき方向が逆転する特異点において、修正量を一度 0 に戻している。また、後半の切替期においても、修正量を 0 に戻して基準パターンに復帰している。

4.3 足踏みによる旋回運動との比較

WABIAN-2R に足踏みによる旋回運動をさせ、滑りを利用した旋回とのエネルギー消費を比較した。その際、WABIAN-2R は 4 歩で 90 度旋回をしており、歩行周期は 1.0 s/step である。滑りを利用した旋回と足踏みによる旋回のそれぞれにおいて駆動電源の電流値を測定し消費エネルギーを求めた結果を図 13 に示す。測定の結果、約 65% のエネルギー効率向上が確認できた。

5. まとめ

踵接地や爪先接地などの路面との接地状態を切り替え可能な人間形足部機構を応用し、滑りを利用した旋回運動の実現

Fig. 11 Turning angle. The measured angle is 80 degrees, while the target turning angle is 90 degrees

Fig. 12 Attitude angle errors and the modification angle of left ankle about the roll axis

を目指した。具体的には、人の旋回運動を解析し、両足の滑りを利用する際には、各足の ZMP 周りに足部を回転させていることが分かり、実際にそれに基づきロボットの旋回運動を生成した。しかし、モデル誤差などにより旋回中に姿勢を崩してしまうため、旋回中の姿勢の倒れへ対応する制御法を考案した。これは、踵接地側の点接地している足部では姿勢復帰のためのモーメントを発生できないため、姿勢の倒れに応じて爪先接地側の線接地している足部の足関節を修正するものである。考案した手法を用いることによって、80 度旋回するのに約 2 秒と高速な旋回運動を実現した。また、従来の足踏みによる旋回運動に比べ、65% 程のエネルギー効率向上が実現され、本提案手法の有効性を確認した。

今後は、180 度旋回や片足での旋回運動の実現を目指す。

謝 辞

本研究は早稲田大学理工学研究所および早稲田大学ヒューマノイド研究所のもとで実施された。本研究で用いられた 3DCAD はソリッドワークス・ジャパン株式会社より提供され、OS は QNX ソフトウェアシステムズ株式会社より、ケーブル・コネクタは大電株式会社より提供された。また本研究の一部は文部科学省の科学研究費補助金 (18360126, 基盤研究 (B)) の助成を得た。各社・官公庁に感謝致します。

文 献

- [1] 小椋優他, “爪先受動関節を持つヒューマノイドロボットによる踵接地・爪先離地歩行,” 日本ロボット学会第 24 回学術講演会予稿集, 3H14, 2006.
- [2] 橋本健二他, “2 足ヒューマノイド・ロボットを用いた人間の足部アーチ構造の機能解明,” 第 15 回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp. 94-99, 2010.
- [3] 西川正雄, “歩行ロボット,” 特開 2005-238407, 2005.
- [4] 小枝正直, 吉川恒夫, 伊藤利達, “足の滑りを利用した二足歩行ロボットの方向転換,” 日本ロボット学会第 25 回学術講演会予稿集, 3H15, 2007.
- [5] M. Koeda, T. Ito and T. Yoshikawa, “Shuffle Turn with Both Feet of Humanoid Robot by Controlling Load Distribution of Soles,” Proc. of the 12th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, pp. 1007-1014, 2009.
- [6] 宇多由美, 伊藤利達, 小枝正直, 吉川恒夫, “ヒューマノイドの両足滑り方向転換における回転角度制御,” 日本ロボット学会第 27 回学術講演会予稿集, 1S2-04, 2009.
- [7] 宇多由美, 小枝正直, 杉山正治, 吉川恒夫, “足裏力分布制御によるヒューマノイドロボットの滑り並進移動,” 第 15 回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp. 80-85, 2010.
- [8] K. Miura, S. Nakaoka, M. Morisawa, K. Harada and S. Kajita, “A Friction Based “Twirl” for Biped Robots,” Proc. of 8th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, pp. 279-284, 2008.

Fig. 13 Comparison of energy consumption between stepping and slipping turn