

ヒューマノイドロボットの摺足並進移動

○ 小枝 正直（大阪電気通信大学），宇多 由美（立命館大学），
杉山 正治（立命館大学），吉川 恒夫（立命館大学）

Shuffle Translation for Humanoid Robots

○ Masanao KOEDA, Yumi UDA, Seiji SUGIYAMA and Tsuneo YOSHIKAWA

Abstract— Conventionally, the walking motion of humanoid robots is performed by a repetition of stepping the feet. However, the motion is inefficient and has low stability. We have been studying shuffle turn of a humanoid robot, which can perform a stepless and stable turning. In this paper, we propose two shuffle translating methods for humanoid robots. Experiments using a humanoid robot were conducted and the experimental results demonstrate the feasibility of these methods.

Key Words: Humanoid robot, Shuffle, Slip, Narrow space motion, Constrained posture

1. はじめに

狭領域・劣姿勢移動は一般的な作業において多発する．例えばキッチンでは，作業者はシンク付近の狭領域で短距離移動をしつつ，前屈や屈伸姿勢で作業を行う (Fig. 1)．自動車製造ラインでは，狭い作業領域で短距離の移動を繰り返し，手にしたパーツを腰を曲げた姿勢で組み込んでゆく．介護現場においては，介護者は要介護者を不自由な姿勢でベッドから抱え上げ，その場で方向転換して車椅子へ搬送する．プラント内作業では，多数の配管が配置された空間の移動が必要で，狭領域・劣姿勢移動が発生する．

現在の多くのヒューマノイドロボットは停止，足踏みの2状態を遷移して移動する (Fig. 2)．これは中・長距離移動の高速移動には適しているが，狭領域・劣姿勢での移動には不向きである．

そこで我々は，ヒューマノイドの摺足による動作に注目して，停止，足踏み，摺足の3状態 (Fig.2) による総合的な移動動作の確立を目指して研究してきた [1, 2, 3, 4]．本稿では摺足による様々な移動方法について包括的にまとめると共に，摺足による前方および側方移動の実現と実験結果について述べる．

2. 摺足による移動

摺足による移動は，常に両脚が接地した状態での移動方法であり，脚上下ではなく脚回転により実現され，安定した狭領域・劣姿勢移動が可能である．またエネルギー効率が高いことも示されている [5]．ここでは摺足による移動を並進移動と方向転換とに分け，それぞれを実現する方法についてまとめる．

2.1 摺足並進移動

摺足による並進移動について，ここでは以下のように分類する．

1. 片足ずつ逐次摺足し，前方移動 (Fig. 3-(a))
2. 片足ずつ逐次摺足し，側方移動 (Fig. 3-(b))
3. 両足を平行に同時摺足し，側方移動 (Fig. 3-(c))
4. 両足を非平行に同時摺足し，側方移動 (Fig. 3-(d))

1,4 については本稿 4.,5. 章で述べる．3 について [4] を参照されたい．2 については本稿では取り扱わず，今後の課題とする．

2.2 摺足方向転換

摺足による方向転換では，

1. 片足ずつ逐次摺足し，方向転換 (Fig. 4-(a))
2. 両足同時に摺足し，方向転換 (Fig. 4-(b))

が考えられる．これらの詳細は [1, 2, 3] を参照されたい．

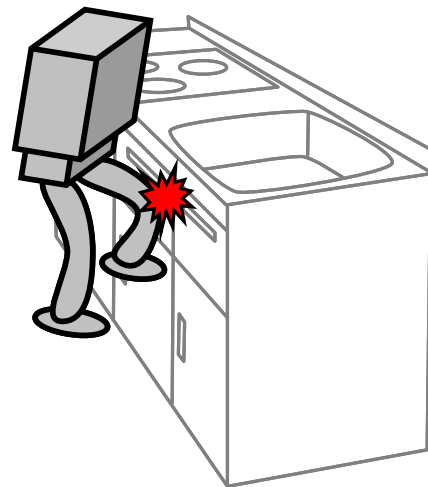


Fig.1 Motivation

Proposed Motion Loop

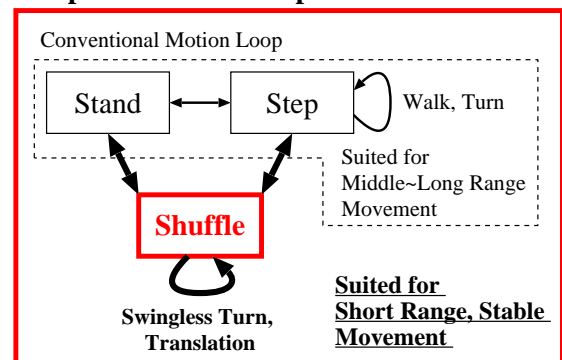


Fig.2 Conceptual diagram

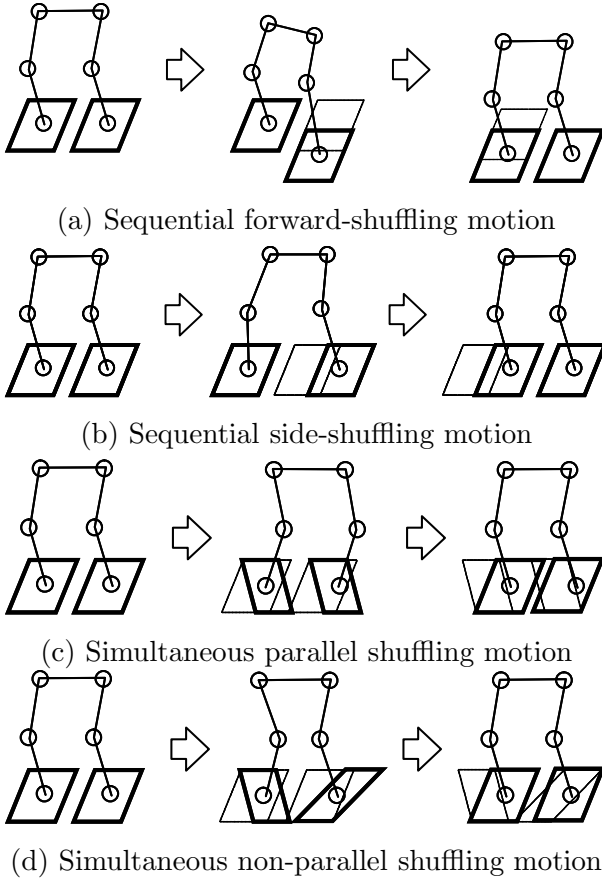


Fig.3 Variety of shuffle translation

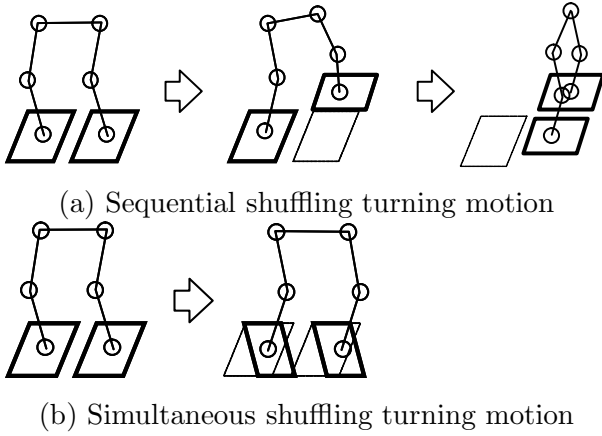


Fig.4 Variety of shuffle turn

3. 動作の生成

足裏座標系 Σ_B を Fig. 5-(a),(b) のように定義する．左右の足の回転中心の midpoint に足裏の座標系 Σ_B の原点とする．初期状態での左右の回転中心の座標を

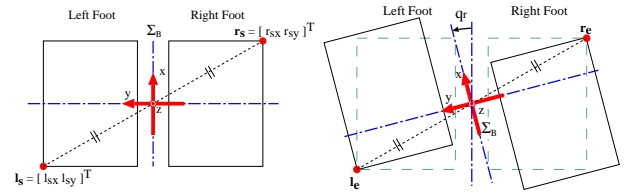
$$\mathbf{r}_s = (r_{sx} \ r_{sy})^T \quad (1)$$

$$\mathbf{l}_s = (l_{sx} \ l_{sy})^T \quad (2)$$

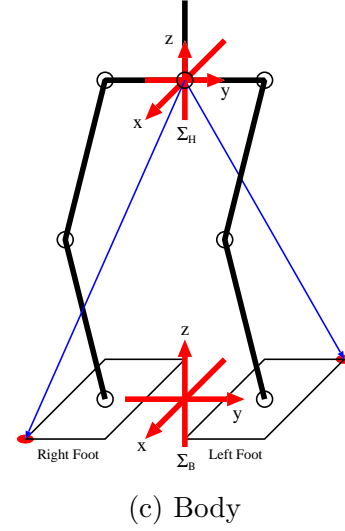
とする． z 軸まわりに角度 q_r だけ方向転換した後の回転中心の座標は，

$$\mathbf{r}_e = \mathbf{R}\mathbf{r}_s \quad (3)$$

$$\mathbf{l}_e = \mathbf{R}\mathbf{l}_s \quad (4)$$



(a) Start feet position (b) End feet position



(c) Body

Fig.5 Coordination system and rotational center

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} \cos q_r & \sin q_r \\ -\sin q_r & \cos q_r \end{pmatrix} \quad (5)$$

となる．Fig.5-(c) に示す腰座標系 Σ_H から見た \mathbf{r}_e と \mathbf{l}_e を実現するために，腰および両脚の関節角度を逆運動学により解くことで動作を生成する．

3.1 運動の制御

力分布を一樣にする場合には足裏姿勢を水平に制御し，対角に集中させる場合には右足裏姿勢を x, y 軸方向にそれぞれ $1, 1[\text{deg}]$ ，左足裏姿勢を x, y 軸方向にそれぞれ $-1, -1[\text{deg}]$ とした．同様に，他の足裏姿勢も x, y 軸方向それぞれ $\pm 1[\text{deg}]$ 動かすことにより実現する．

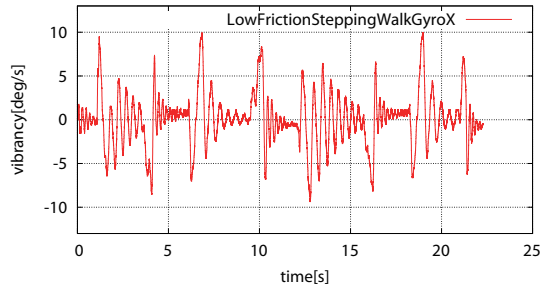
3.2 回転角度のフィードバック制御

足裏力分布調節によって，回転中心の滑りは抑制され，それ以外の部分で滑りを発生させる事が可能な反面，力分布調節の手法によっては方向転換角度が目標と大きく違う場合がある．そこでPI制御により正確な方向転換を実現する．

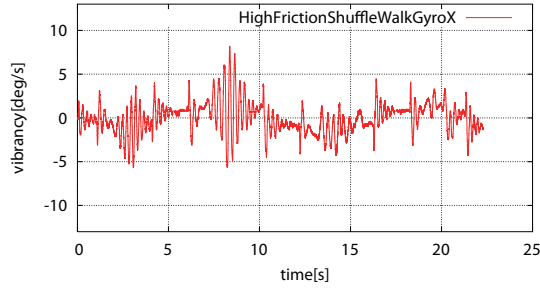
$$q_e(t) = q_r(t) - q_c(t) \quad (6)$$

$$q_r(t+1) = \hat{q}_r(t+1) + K_p q_e(t) + K_i \int_0^t q_e(t) dt \quad (7)$$

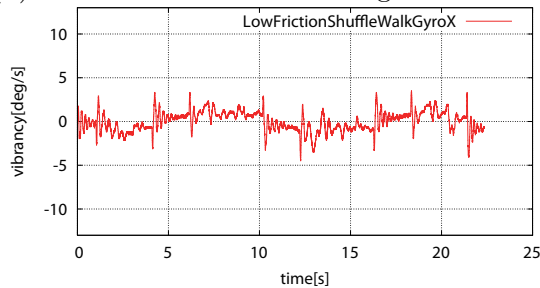
ここで $\hat{q}_r(t+1)$ は時刻 $t+1$ での目標回転角度， $q_c(t)$ は時刻 t での胴体角度， $q_e(t)$ は時刻 t での回転角度誤差， $q_r(t+1)$ は時刻 $t+1$ での修正目標回転角度， K_p, K_i はそれぞれ比例ゲイン，積分ゲインで， $K_p = 0.054, K_i = 0.054$ とした．式 (7) で得られた q_r に基づき，式 (5) により動作を生成する．



(a) Step walk



(b) Forward-shuffle walk on high friction floor



(c) Forward-shuffle walk on low friction floor

Fig.7 Angular velocity around x axis while step and shuffle walking

4. 逐次摺足による前方移動

両足に掛かる荷重が同程度の状態で脚を前方へ移動させても、床面摩擦の影響により胴体が回転するのみで前方への移動は実現しない。そこで、重心を支持脚側に移動させ、遊脚の床面摩擦を低減させることで摺足前方移動を実現する。ここでは両足首および股関節を $\pm 10[\text{deg}]$ として重心移動し、膝関節の曲げ角を $0.7[\text{deg}]$ とした。1歩の歩幅を $17.5[\text{mm}]$ とし、右足から3歩の歩行を行った。両足間距離は $47[\text{mm}]$ に設定した。

低・高摩擦路面上で足踏み歩行、摺足歩行をそれぞれ5回ずつ行い、歩行中の胴体角速度と移動距離を計測した。低摩擦路面上での摺足歩行の様子を Fig.6 に示す。Fig.7 は移動中の x 軸周り角速度であるが、摺足歩行では足踏み歩行と比較して揺れが低減されていることが分かる。足踏みおよび摺足歩行での平均移動距離を Fig.8 に示す。図中の赤線は移動距離の理想値 $52.5[\text{mm}]$ であるが、いずれも試論値に近い値が得られている。理想値を越えた値が得られた理由については、床面に手書きした $10[\text{mm}]$ 方眼を用いた距離計測による計測誤差と考えている。高摩擦路面では直進せずに多少の回転が発生したが、これは yaw 方向の揺れが歩行の直進性と影響したと考えられる。

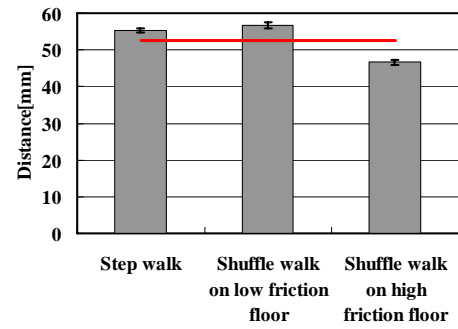


Fig.8 Moving distance of shuffle walk

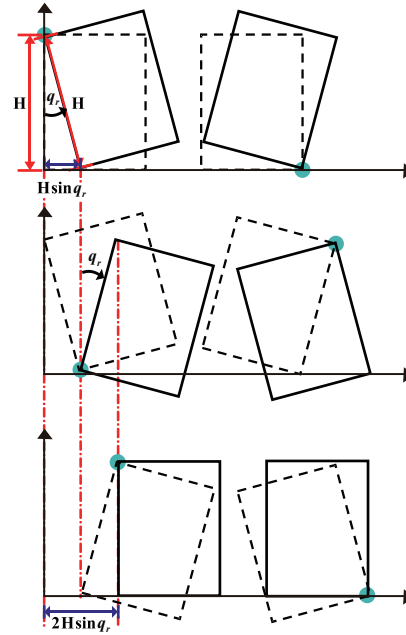


Fig.9 Shuffle translation

5. 同時摺足による側方移動

$q_r = 10[\text{deg}]$ とし、左右の股関節を ± 10 , ∓ 20 , $\pm 10[\text{deg}]$ の順に回転させることにより、横方向移動を行う (Fig.9)。足裏の寸法は $98.0 \times 31.5[\text{mm}]$ であり、理論的には $34.0[\text{mm}]$ 移動することになる。足裏の力分布を変化させるために、 x, y 軸方向の足裏姿勢はそれぞれ外側回転時には右足 $-1, -1[\text{deg}]$ 、左足 $+1, +1[\text{deg}]$ 、内側回転時には右足 $+1, +1[\text{deg}]$ 、左足 $-1, -1[\text{deg}]$ とした。初期状態での両足間距離は $80[\text{mm}]$ 、移動速度は $10[\text{deg/s}]$ とした。

低・高摩擦路面で力分布調節を

- 対角外側に集中させた場合 (Pattern(a))
- 足裏の力分布を一様にした場合 (Pattern(e))

でそれぞれ5回の平均移動距離を比較した結果を Fig.10 に示す。また低摩擦路面で力分布調節を行う様子を Fig.11 に示す。移動距離は、両摩擦路面において力分布調節ありの場合に理論値に近いが、理論値とは大きな差がある。この原因については現在調査中である。一般にヒューマノイドロボットは股関節の可動範囲は狭く、本手法では1サイクルの移動距離が短くなるという問題点があるが、全体的なバランスでは優れていると言える。

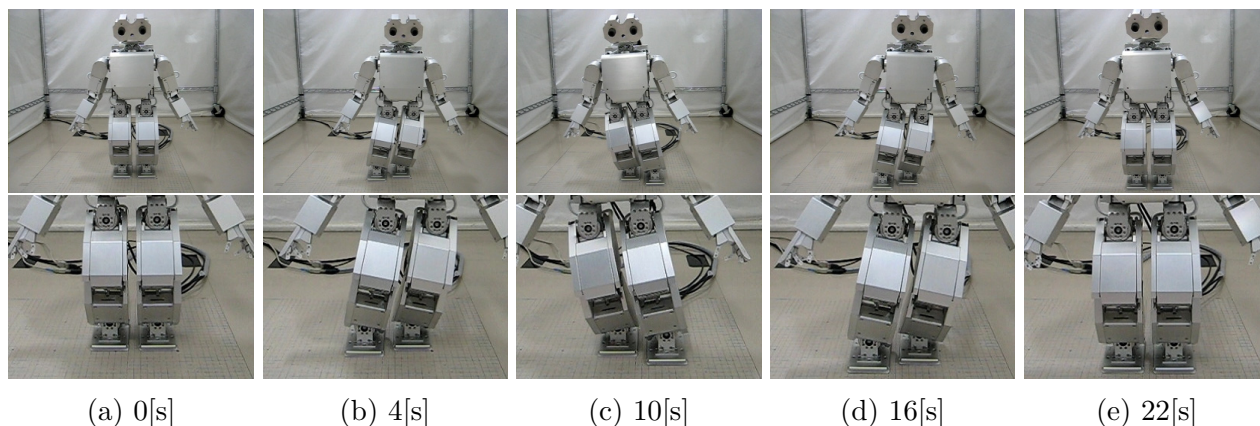


Fig.6 Shuffle walk on low friction

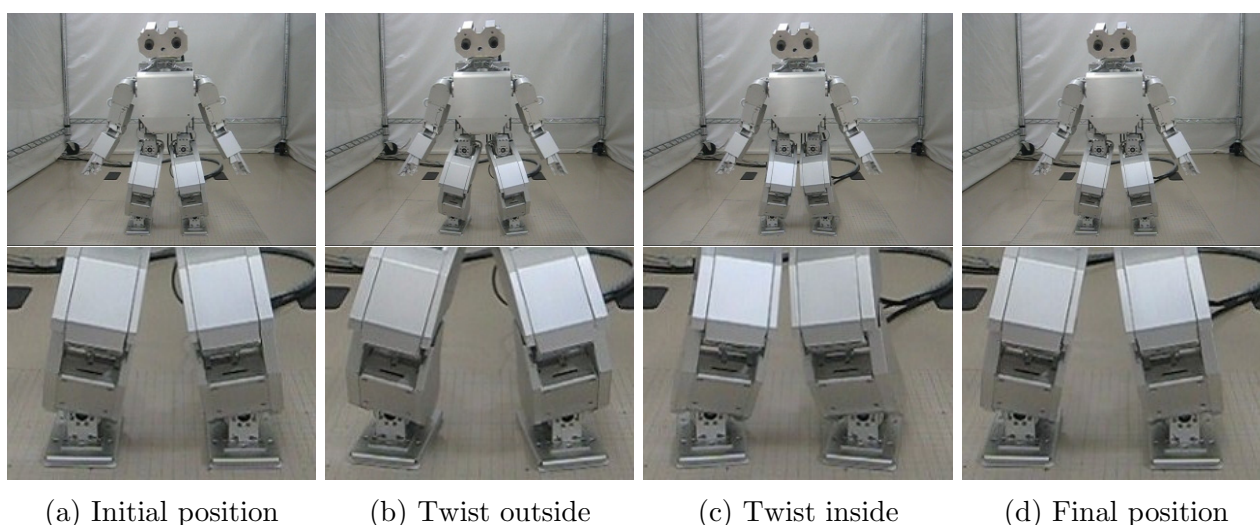


Fig.11 Shuffle translation with load distribution on low friction floor

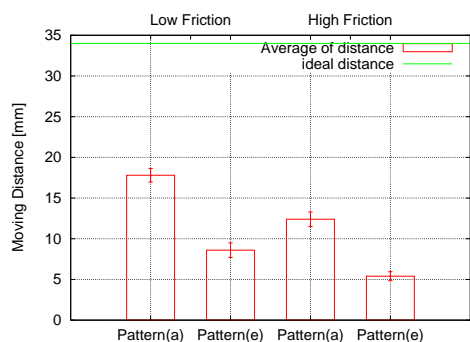


Fig.10 Moving distance of shuffle translation

6. おわりに

本稿では、摺足移動の必要性、有効性について述べた後、その方法について包括的にまとめた。また摺足による前方移動、側方移動の実現方法を示し、実験を行った。摺足による前方移動では、遊脚足裏の摩擦が大きな影響を及ぼすため、重心を適当に調節した後に脚を前に出すことにより実現した。歩行実験においては、低・高摩擦路面で移動距離と胴体の揺れを計測した。その結果、従来の足踏み歩行に比べて胴体の揺れが低減されることを確認した。また摺足による側方移

動では、足裏力分布を変化させつつ両足を同時に反対方向に回転させる動作を連続的に行うことで実現した。低・高摩擦路面において実験を行い、その実現性を確認した。

今後、動的な足裏力分布調節、摺足歩行動作の回転抑制、摺足動作の理論的解析などを行う予定である。

謝辞

本研究は科学研究費補助金若手 B(No.22700207) の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] 小枝, 吉川, 伊藤: “足の滑りを利用した二足歩行ロボットの方向転換”, RSJ2007, 3H15, 2007.
- [2] M. Koeda, T. Ito and T. Yoshikawa: “Shuffle Turn with Both Feet of Humanoid Robot by Controlling Load Distribution of Soles”, In Proc. of CLAWAR2009, pp.1007-1014, 2009.
- [3] 宇多, 伊藤, 小枝, 吉川: “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”, RSJ2009, RSJ2009AC1S2-04, 2009.
- [4] 宇多, 小枝, 杉山, 吉川: “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, 1C3, pp.80-85, 2010.
- [5] 橋本, 吉村, 近藤, 林, 高西: “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 1 報: 両足の滑りを利用した高速な旋回運動の実現)”, ROBOMECH2010, 2A2-D23, 2010.