

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

ZMP-based Shuffling Motion Control for Humanoid Robots

杉本大樹, 小枝正直 (大阪電通大)

Daiki SUGIMOTO, Osaka Electro-Communication University
Masanao KOEDA, Osaka Electro-Communication University

A humanoid robot is expected to perform tasks in a danger zone as well as during daily life. This requires constrained posture movements in narrow areas and shuffling motion is one of the feasible way on such situations. Shuffling is a unique motion neither stepping feet nor swinging body for humanoid robot movement. This study focuses on the robust movement using shuffling and the control method based on zero moment point. To validate the capability of the proposed controller, we conducted some experiments on sloped floors and carrying a heavy object. The moving trajectories were measured and the robustness is confirmed.

Key Words: humanoid, shuffling-walk, narrow-area

1 はじめに

狭隘領域での姿勢移動は、ヒューマノイドロボットに期待される作業において頻発する。例えば、災害発生時のプラント内では、多数の配管や瓦礫が散乱した狭い空間での作業となり、短距離移動をしつつ、前屈や屈伸姿勢で作業を行うこととなる。被災地救助活動での倒壊家屋では、平臥姿勢で迅速に奥へと侵入する必要がある。一般作業でも狭隘領域・姿勢移動は起こる。例えばキッチンでは、シンク付近の狭い領域での短距離移動と、前屈や屈伸姿勢で様々な作業を求められる。介護現場では、狭い病室内の要介護者を姿勢で抱え上げ、その場で転回して車椅子へ搬送する、など枚挙に暇がない (Fig.1)。一般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が、狭隘域の姿勢移動には不向きで安定性に難がある (Fig.2)。そこで我々はヒューマノイドの自由な超狭隘域・姿勢移動実現の一手段として、摺足による移動に注目している。

Koeda ら [1] は、床面摩擦を考慮した滑り方向転換を提案し、ヒューマノイドロボットを用いて実験的に有効性を実証した。Miura ら [2] はヒューマノイドによる滑り方向転換を行い、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た。Uda ら [3], [4] は Koeda らの研究での滑り方向転換を連続で用いることによりヒューマノイドロボットによる横移動を実現した。また、前方方向への摺足前進も実現している。しかし、Koeda ら [1], Uda ら [3], [4] の研究では摺足モーションを過去の経験から作成していた。このため、路面やロボットのバランスなど状況に応じて動作を変更することができなかった。Tsuichihara ら [5] は重心移動時において ZMP を規範とした PI 制御を実現した。これにより、歩行中の両足 ZMP・加速度の Y 方向のずれを微小にした。しかし、その制御は Y 軸方向のみであった。また、摺足移動の研究は極めて少ない。

そこで、我々はロボットの重心を制御するために ZMP フィードバック制御を用いた方法に着目した。本研究の目的は、ZMP フィードバック制御を用いた摺足移動を実現し、摺足移動による自由移動の実現である。これによって、これまで出来なかったロボットの重心や路面環境に応じた摺足移動が出来るようになった。この方法を用いれば、傾斜面や乱雑な路面環境でも摺足移動が可能になり、実際の現場で移動可能な領域を格段に広げる。筆者ら [6] は、ZMP フィードバック制御を用い摺足移動を実現し、その有用性を実証した。しかし、貨物の運搬、障害物の除去等といった実際の作業現場で求められるタスクにおける摺足移動の検証を行っていない。

本稿では、実際の作業現場で求められる貨物を持った状態での摺足移動性能を調査するため検証実験をした。

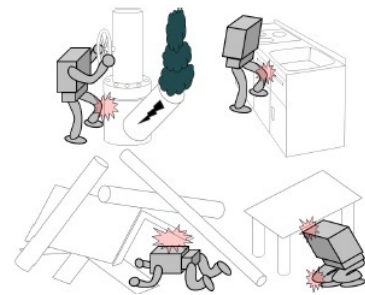


Fig.1 Movements and Tasks in Constrained Postures and Narrow Areas

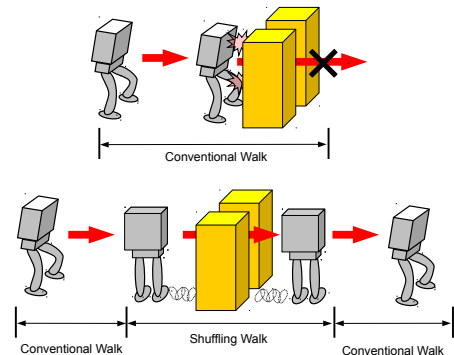


Fig.2 Used Shuffling Walk and Conventional Walk only

2 システム構成

2.1 KHR-3HV

小型ヒューマノイドロボットには、近藤科学株式会社製 KHR-3HV (Fig.3) を用いた。本ロボットは身長約 401[mm], 横幅約 194[mm], 奥行き約 129[mm], 重量約 1.5[kg], 関節自由度 17 を有する。本ロボットの初期状態の足裏は縦 128[mm], 横 77[mm] のポリアセタール樹脂製であるが、Fig.4 に示す同寸法の板厚 2[mm] アルミ製足裏に換装し、ここに感圧センサを取り付けた。感圧センサとして浅草ギ研の感圧センサ AS-FS を、感圧センサ用 A/D 変換機として Arduino Nano を利用した。また、ロボットの制御コントローラには Raspberry Pi2 を用いた。

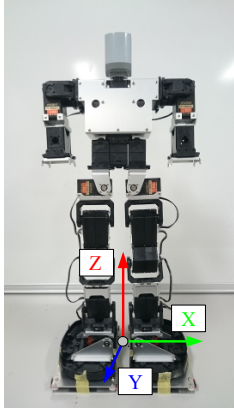


Fig.3 KHR-3HV

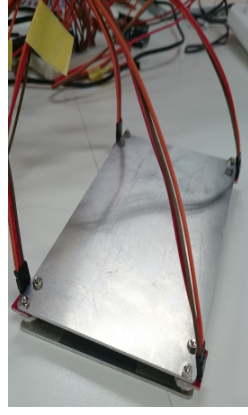


Fig.4 Parts of the Sole

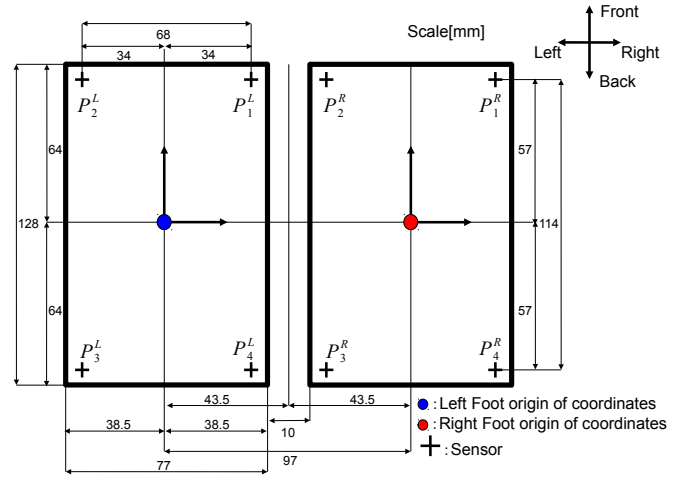


Fig.5 Coordinate System of Soles

2.2 カセンサと ZMP

足裏感圧センサの配置を Fig.5 に示す。KHR-3HV の足裏は、縦 128[mm]、横 77[mm] で、直立時に両足の間隔は 10[mm] となる。また、Fig.5 の P_1^L から P_4^L 、 P_1^R から P_4^R は設置した感圧センサの各座標であり、足底感圧センサは各足裏に 4 個、計 8 個あり、それぞれ 1 軸 (Z 方向) である。各足裏の座標系は、足裏領域の中心点を原点とし、ヒューマノイドロボットのワールド座標系と同じく Y 軸を前進向き、X 軸を左向きとする。また、ロボット移動時のバランスを安定させるため ZMP を考慮する。

各足裏の垂直抗力は式 (1) となり、片足毎の ZMP から両足 ZMP を導出する。Fig.5 より左足、右足それぞれの ZMP (X^L, Y^L), (X^R, Y^R) は式 (2), (3) となる。この時、左足にかかる垂直抗力を P^L 、右足を P^R とする。これらより両足 ZMP (X^{LR}, Y^{LR}) は式 (4) となる。本研究では片足毎の ZMP と両足 ZMP を重心移動に用いる。

$$\begin{pmatrix} f^L \\ f^R \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^4 f_i^L \\ \sum_{i=1}^4 f_i^R \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} x^L \\ y^L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\sum_{i=1}^4 x_{f_i} f_i^L}{\sum_{i=1}^4 f_i^L} \\ \frac{\sum_{i=1}^4 y_{f_i} f_i^L}{\sum_{i=1}^4 f_i^L} \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} x^R \\ y^R \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\sum_{i=1}^4 x_{f_i} f_i^R}{\sum_{i=1}^4 f_i^R} \\ \frac{\sum_{i=1}^4 y_{f_i} f_i^R}{\sum_{i=1}^4 f_i^R} \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} x^{LR} \\ y^{LR} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\sum_{i=1}^4 x_{f_i} f_i^{LR}}{\sum_{i=1}^4 f_i^{LR}} \\ \frac{\sum_{i=1}^4 y_{f_i} f_i^{LR}}{\sum_{i=1}^4 f_i^{LR}} \end{pmatrix} \quad (4)$$

3 ZMP フィードバック制御による摺足

3.1 従来手法と提案方法

従来手法 (Fig.6) では足首の角度をあらかじめ任意の角度に決めた上で同じ動作を繰り返すことで摺足移動を行っていた。本研究で用いた摺足モーション (Fig.6,7) の手順を次に示す。

1. 右足首ピッチ軸 +1 [deg]、左足首ピッチ軸 -1 [deg]、右足首ロール軸 -1 [deg]、左足首ロール軸 +1 [deg]。

2. 右足ヨー軸 +30 [deg]、左足ヨー軸 -30 [deg]。
3. 右足首ピッチ軸 -1 [deg]、左足首ピッチ軸 +1 [deg]、右足首ロール軸 -1 [deg]、左足首ロール軸 +1 [deg]。
4. 右足ヨー軸 -30 [deg]、左足ヨー軸 +30 [deg]。

従来手法では周りの環境に合わせて動作を変えることができない、路面が乱雑したあるいは凹凸のある不整地や傾斜のある坂道などに非常に弱い。また、左右で同じ角度を指定していても、実際にはロボットの構造上または関節アクチュエータなどのガタや遊びがあり、ロボットのバランスが悪く不安定である。そのため、意図した方向へ正確に移動できない問題があった。

提案手法 (Fig.7) では摺足移動中である各フェーズ中に足裏のカセンサ情報から、その時の ZMP を導出する。その後、導出した ZMP の変化に合わせて各足それぞれの足首ロール軸、ピッチ軸角度を変更し摺足移動を行う。これにより、ロボットの重心や路面環境に合った摺足を行う。

3.2 制御方策

左足の目標 ZMP 座標を (x_d^L, y_d^L) とし、ある時刻 t におけるロボットの左足首ロール軸角度を θ_t^{Lr} 、ピッチ軸角度 θ_t^{Lp} とする。このとき、Fig.6 の Phase1 および 3 の期間に以下のフィードバック制御を行った。

$$\theta_{t+1}^{Lp} = \theta_t^{Lp} + K_p(x_d^L - x^L) \quad (5)$$

$$\theta_{t+1}^{Lr} = \theta_t^{Lr} + K_p(y_d^L - y^L) \quad (6)$$

右足のロール軸、ピッチ軸にも同様の制御を行った。さらに、両足の目標 ZMP 座標を (x_d^{LR}, y_d^{LR}) とし、ある時刻 t におけるロボットの両足首ピッチ軸角度を θ_t^{LRp} とする。このとき、Fig.6 の全 Phase 期間に以下のフィードバック制御を行った。

$$\theta_{t+1}^{LRp} = \theta_t^{LRp} + K_p(y_d^{LR} - y^{LR}) \quad (7)$$

また、実験においては経験的に $K_p = 3$ と設定した。ただし、転倒防止のために制御量は最大 ± 3 [deg] に制限した。

4 実験

4.1 実験方法

ここでは、従来の摺足移動と感圧センサによるフィードバックを用いた摺足移動を比較する実験を行った。この時、斜面の傾斜角は 10 度とし適度な摩擦を発生させる為にコルク材の上で実験を行った。各足裏の目標 ZMP 位置は左足を $x_{Ld} = \pm 30$ [mm]、

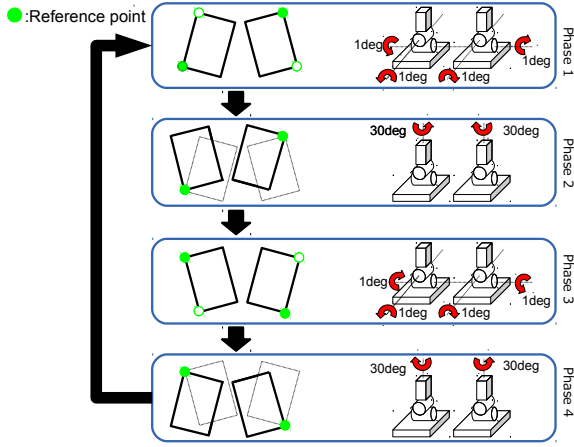


Fig.6 Conventional Method

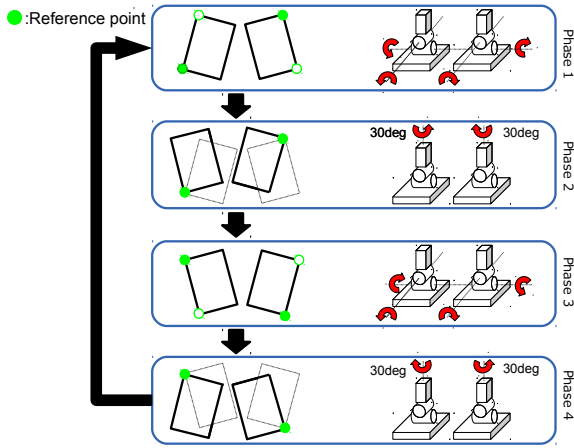


Fig.7 Proposed Method

$yL_d = \pm 45[\text{mm}]$, 右足を $xR_d = \pm 30[\text{mm}]$, $yR_d = \pm 45[\text{mm}]$ の位置に仮定した.

また、平地で摺足移動による貨物運搬を行い、従来手法と提案手法で比較する実験を行った。この際、模擬貨物として縦 60[mm], 横 115[mm], 奥行き 58[mm], 重量約 300[g] の木製重り (Fig.9) をロボット正面で抱えさせる様に持たせた (Fig.10)。

4.2 実験結果

平地実験では、提案方法と従来方法は、どちらも同様な摺足移動をした。この時のロボットの移動軌跡と移動量を (Fig.11) に示す。傾斜面実験では、提案方法は、平地実験時と同等な摺足移動をした。しかし、従来方法では、ロボットの重心が極端に前方あるいは後方に偏っていた。このため、摺足移動を行った際にロボットが前後方向に大きく揺れが発生し摺足移動することが極めて困難であった。この時のロボットの移動軌跡と移動量を (Fig.12,13) に示す。また、従来方法と提案方法の移動量を比較した場合、その差は約 34 [cm] であった。これらの結果から傾斜面では従来方法より ZMP を考慮した提案方法が優れていると言える。

運搬実験では、従来の場合貨物の重量によってロボットの重心が極端に前方に偏ってしまい摺足による移動が困難であった。また、実験中転倒を繰り返していたことから不安定だったと言える。一方、提案手法では貨物の重量によって前方に偏った重心を ZMP を基に各脚関節角度を変更することで重心を修正していた。これにより、提案手法では摺足による横方向への並進が可能であった。この時のロボットの移動軌跡と移動量を (Fig.14) に示す。これらの実験結果より、従来手法より提案手法が優れて

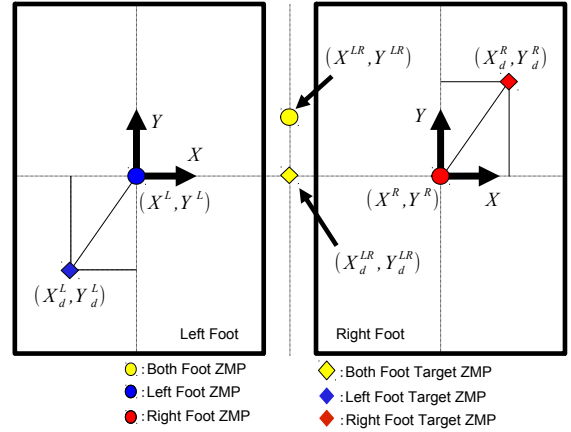


Fig.8 Coordinate System of Soles

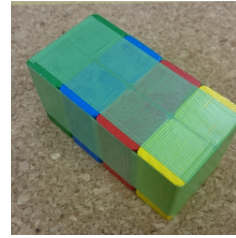


Fig.9 Wooden Weight

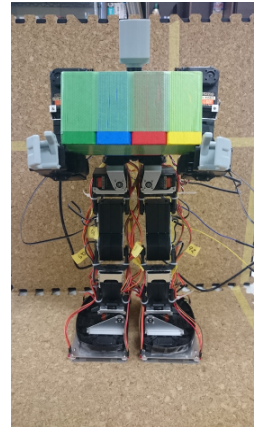


Fig.10 State having Weight

いることがわかる。

5 おわりに

本研究では、ZMP フィードバック制御を用いた摺足移動を提案し実現した。従来の研究では摺足モーションを過去の経験から作成していた。このため、路面やロボットのバランスなど状況に応じて動作を変更することができなかった。そこで、我々は ZMP フィードバック制御を用いた方法に着目した。この方法は各足裏 ZMP に応じて各足首角度を調節することによって実現した。従来方法と提案方法を平地及び斜面上で行い、その移動軌跡と移動量を比較した。その結果、平地では従来方法と提案方法ともに摺足移動可能であり、移動軌跡と移動量に差は見られなかった。しかしながら、傾斜面上では従来方法はロボットの重心が前後に偏っていたため摺足移動が困難であった。一方、提案方法は平地時の摺足移動と同様な移動軌跡と移動量を示した。また、摺足による貨物運搬を行い、従来方法及び提案方法での移動軌跡と移動量を比較した。その結果、従来手法では貨物重量によってロボットの重心が前方に偏ってしまい移動が困難であった。一方、提案手法では ZMP を基に貨物重量によって偏ってしまった重心を修正し、横方向への並進が可能であった。今後の課題として、より精度に優れた力センサの導入を検討しフィードバック制御の精度向上を行う。また、横移動のみならず前進、後進、旋回を可能にし摺足による自由移動を目指す。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 No.15K00369 の助成を受けたものです。

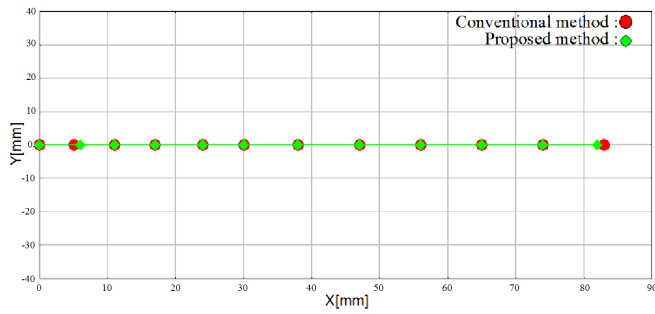


Fig.11 Shuffling Walk on Flat Floor

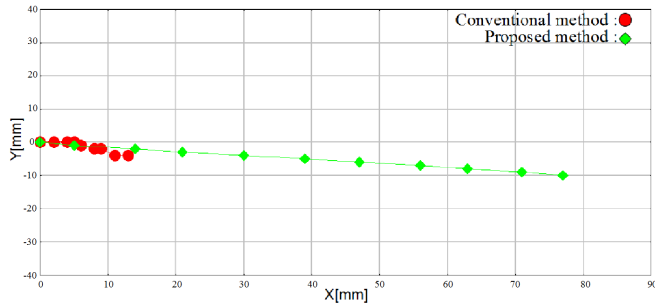


Fig.12 Shuffling Walk on Upward Sloped Floor

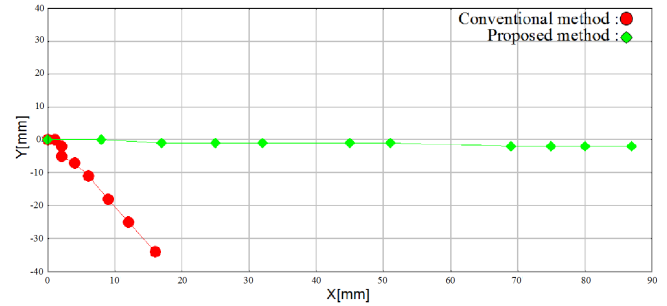


Fig.13 Shuffling Walk on Downward Sloped Floor

References

- [1] M. Koeda, T. Ito and T. Yoshikawa: "Shuffle Turn with Both Feet of Humanoid Robot by Controlling Load Distribution of Soles", In Proceedings of the 12th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines (CLAWAR2009), pp.1007-1014, 2009.9.
- [2] K. Miura, S. Nakaoka, M. Morisawa, F. Kanehiro, K. Harada and S. Kajita: "Analysis on a Friction Based "Twirl" for Biped Robots", In Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 4249-4255, 2010.
- [3] M. Koeda, Y. Uda, S. Sugiyama and T. Yoshikawa: "Shuffle Turn and Translation of Humanoid Robots", In Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2011), pp.593-598, 2011.5.
- [4] M. Koeda, Y. Uda, S. Sugiyama and T. Yoshikawa: "Side Translation by Simultaneous Shuffle Turn for Humanoid Robots", In Proceedings of the 8th Asian Control Conference (ASCC2011), pp.1346-1351, 2011.5.
- [5] S. Tsuchihiro, M. Koeda, S. Sugiyama and T. Yoshikawa: "A sliding walk method for humanoid robots using ZMP feedback control", In Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (RO-BIO2011), pp.275-280, 2011.12.
- [6] 杉本大樹, 小枝正直: "カセンサによるヒューマノイドの摺足制御", 第 16 回計測自動制御学会システムインテグレーション (SI2015), 2F3-1, pp.1429-1433, 2015.

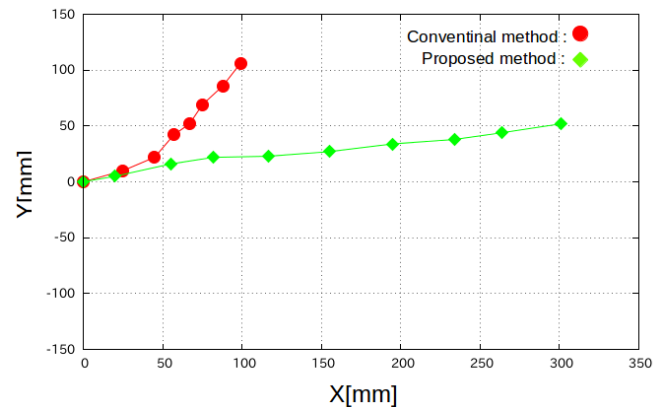


Fig.14 Transportation on Flat Floor