

2足ロボットの足裏を円弧状に変形させる機構の開発

—足裏の精度および剛性向上に関する検討—

Development of Mechanisms to Bend the Sole into an Arc for Biped Robots

—Accuracy and Stiffness Enhancement of the Sole—

○ 加藤真也*, 落合章裕*, 坂本達也**, 山野光裕*

○ Masanari Kato*, Akihiro Ochiai*, Tatsuya Sakamoto**, Mitsuhiro Yamano*

*山形大学大学院 理工学研究科, **山形大学 工学部

*Graduate school of Science and Engineering, Yamagata University,

**Faculty of Engineering, Yamagata University

キーワード: 2足ロボット (Biped robot), 変形可能な足裏 (Deformable sole),
足裏形状可変機構 (Mechanism to deform sole),
クランク - スライダ機構 (Crank-slider mechanism)

連絡先: 〒992-8510 山形県米沢市城南4-3-16 山形大学工学部 機械システム工学科

山野研究室 加藤真也 Tel.: 0238-26-3238 E-mail: seehund@hotmail.co.jp

1. 序論

近年, ヒューマノイドロボットの歩行におけるエネルギー効率の課題に対する形で受動歩行ロボットの研究が行われている. 浅野らは半円足 (円弧形状の足部) の転がり効果について検証し, 足裏形状の工夫により, 支持脚交換の衝突時のエネルギー損失を低減できる可能性などを示唆している^{1, 2)}. 佐藤らは, 足裏形状を円弧状に可変とする機構 (以下, 足裏機構) を有するロボットを開発した³⁾. その中で佐藤らは

2種類の足裏機構を開発したが, 改善すべき点として次の2点が挙げられる.

- 足裏形状が目標値に対して最大約 2 [%]の誤差
- 外力に対して最大約 3 [%]の変形

本研究では佐藤らが開発した足裏機構を改良し, 足裏の円弧を形成する精度と剛性の向上を図る. 性能向上の方策として, 足裏を内側から3本の梁で支持することを実現する機構の組合せを調査し, 機構の構成部品を設計製作する.

2. 足裏機構の設計

2.1 設計方針

足裏機構の設計方針について述べる。搭載の対象として佐藤らのロボットを想定し、全高約 300 [mm], 全幅約 140 [mm] 程度の 2 足ロボットに搭載可能とする。足裏の曲率半径は、扁平からロボットの脚長の 1/2 程度まで無段階変形可能とする。その時、目標とする曲率半径に近似する足裏形状の実現を目指す。また、床反力などの外力による変形量を抑制する。

2.2 機構の選定

本研究では、リンク機構などを対象に足裏機構に利用する機構の組合せを検討し、その中から 2 つのクランク - スライダ機構による足裏機構を製作した。クランク - スライダ機構を用いる利点を以下のように考えた。

- ・ モータの回転運動を少ない部品点数でスライダの上下運動に変換可能
- ・ モータ角度から先端位置を算出、およびその逆が容易
- ・ 機構先端の運動を直線に限定するため、中央と端の中間部を押す機構の先端軌道が一意に決定
- ・ クランクを共通にすることで機構先端の加減速が類似するため、リンクパラメータの適当な設定によって円弧に近似する可能性

この機構を組み込んだ足部を側面から見たモデルを Fig. 1 および Fig. 2 に示す。これらの図は 2 つのクランク - スライダ機構を別々に表示しており、クランクは共通である。図中の社斜線はスライダの滑り面を示している。下端の三角形はスライダに固定されている部品を示

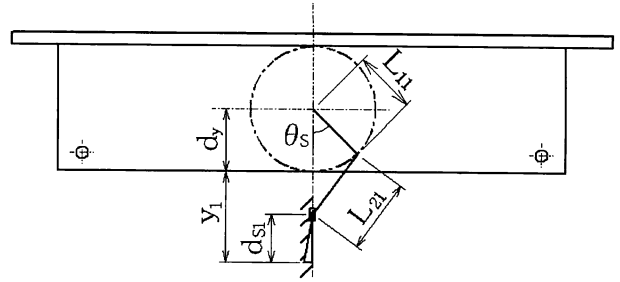


Fig. 1 Model of Crank-Slider Mechanism (Center)

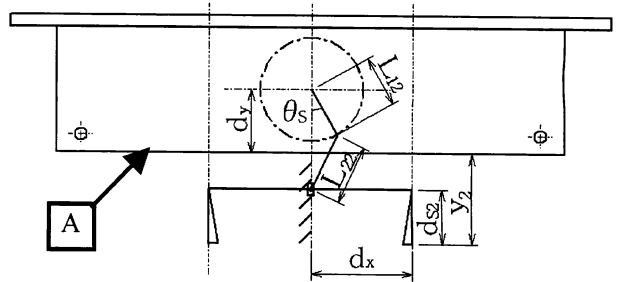


Fig. 2 Model of Crank-Slider Mechanism (Side)

しており、機構の先端で円弧の内面に接する。Fig. 1 のモデルは足裏の中央部を押し下げ、円弧の下端を支持する。Fig. 2 のモデルは足底板を 2 箇所まで押し下げる機構である。スライダ以下は固定であるため、中央から前後に距離 \$d_x\$ だけ離れた位置を同時に押し下げる。この 3 つの先端が円弧に近似するようにパラメータを調節する。以下に算出に用いる式を述べていく。

Fig. 1 のモデルについて幾何学的な関係から、

$$y_1 = L_{11} \cos \theta_S - d_y + d_{S1} + \sqrt{L_{21}^2 - L_{11}^2 \sin^2 \theta_S} \quad (1)$$

式(1)について \$d_y\$ と \$d_{S1}\$ に適当な値を与えた後、最大と最小の \$y_1\$ および \$\theta_S\$ に境界条件を設定することによって \$L_{11}\$ および \$L_{21}\$ が算出できる。

Fig. 2 のモデルについて幾何学的な関係から、

$$y_2 = L_{12} \cos \theta_S - d_y + d_{S2} + \sqrt{L_{22}^2 - L_{12}^2 \sin^2 \theta_S} \quad (2)$$

平方根を外して,

$$L_{22}^2 = L_{12}^2 + (y_2 + d_y - d_{S2})^2 - 2L_{12} \cos \theta_S (y_2 + d_y - d_{S2}) \quad (3)$$

ここで, 足裏の曲率半径 R , 足裏の板厚 J , Fig. 2 に [A] で示した線と円弧の中心の距離 O_C を導入し, 任意の R において機構の先端が足裏の内側に接すると仮定すると, y_2 は次式で表せる.

$$y_2 = \sqrt{(R-J)^2 - d_x^2} - O_C \quad (4)$$

式(3)と(4)を用いて, 任意の 3 つの R について式を立て, それらを連立して解くことによって L_{12} , L_{22} および d_{S2} が求められる. ここで, O_C は次式で与えられる.

$$O_C = R - y_1 \quad (5)$$

2.3 パラメータの算出

前節で述べた計算式を用いて算出したリンクパラメータを示す. 本研究では計算前に決定する数値をそれぞれ, $d_y = 10.5$ [mm], $d_{S1} = 8$ [mm], $d_x = 17$ [mm] として計算し, $L_{11} = 10.5$ [mm], $L_{21} = 12.6$ [mm], $L_{12} = 8.64$ [mm], $L_{22} = 10.02$ [mm], $d_{S2} = 8.99$ [mm] の結果を得た. ここで, これらのパラメータを式(2)へ代入して各 R における y_2 を求め, 式(5)を用いて機構先端と足裏の内面の間には生じる誤差の, 曲率半径に対する誤差率を算出した. 結果を Fig. 3 に示す. この結果によると, 誤差は $R = 60$ [mm] の時で 0.066 [mm], 0.11 [%] の誤差が生じる. ほぼ円弧と一致していると言える.

$$er = \frac{(R-J) - \sqrt{(y_2 + O_C)^2 + d_x^2}}{(R-J)} \times 100 [\%] \quad (5)$$

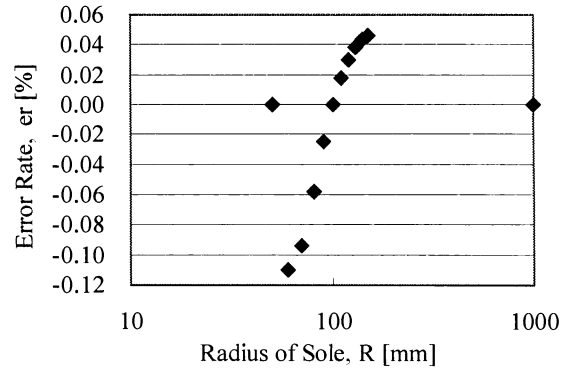


Fig. 3 Error of Crank-Slider (Side)

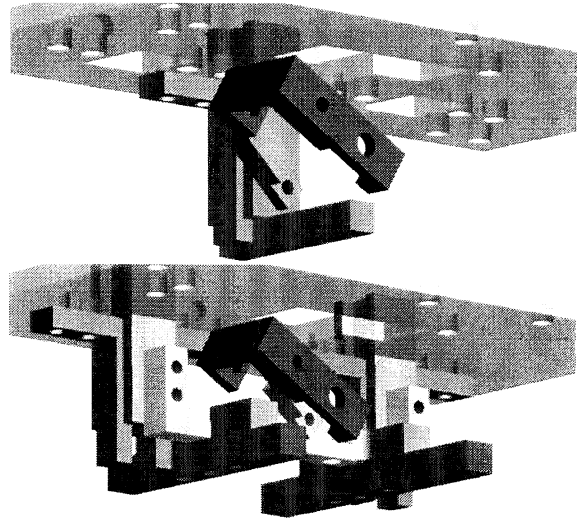


Fig. 4 Assembly Drawing of Sole Mechanism

2.4 構成部品

足裏機構のアクチュエータには, Japan Remote Control Co., Ltd. のデジタルハイパワーサーボ DS8911 を使用している. 設計した足裏機構の組立図を Fig. 4 に示す. 上段が Fig. 1 のモデル, 下段が Fig. 2 のモデルである. 共通のクランクを L 型に製作して 2 つの機構を並べて配置することにより, 2 つのクランク - スライダ機構の組合せを実現している. スライダは H 型に溝が加工してあり, その溝にガイドを当ててスライダを上下運動させている.

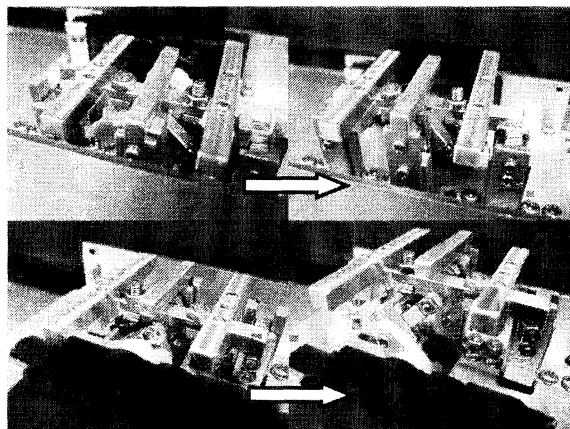


Fig. 5 Sole Mechanism

Fig. 5 に製作した足裏機構の動作の様子を示す。部品はアルミ合金で製作している。機構の寸法は長さ 80 [mm], 幅 45 [mm], 高さ 32 [mm] であり, モータを含めた足部の重量は 220 [g] である。

3. 動作試験および評価

3.1 制御システム

動作試験で使用した足裏機構の制御システムについて述べる。RC サーボモータの制御には市販の RC サーボモータコントローラを使用し, PC から制御コマンドを送信する。制御コマンドは PC 上に C 言語で作成したプログラムで送信する。

3.2 性能評価

3.2.1 測定方法

Fig. 6 に測定の様子を示す。測定の方法には, 動作中の足裏機構をデジタルカメラで撮影し, その画像上に目標とする円弧を CAD で描画して誤差を測定する手法を採用した。

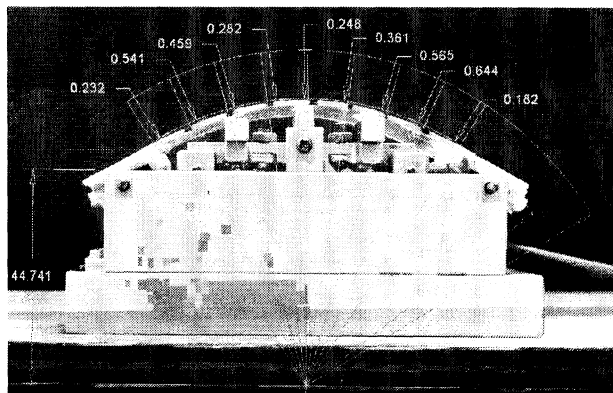


Fig. 6 Measurement of Accuracy

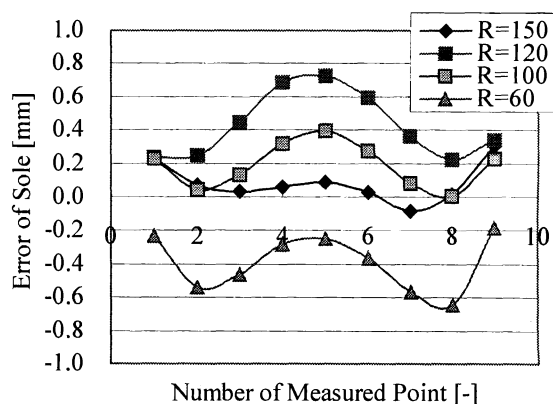


Fig. 7 Error of PET

3.2.2 精度

まず, 目標とする円弧に対する足裏機構の精度を測定した。この時, 足裏の板材を低発泡塩化ビニル(以下 EVC), 変性ポリエチレンテレフタレート(PET), 硬質塩化ビニル(H-VC)の 3 種類に変更して測定し, 足裏機構に有利な材料を調査した。PET の測定結果を Fig. 7 に示す。ここで, 横軸は Fig. 6 の 9 箇所測定点に左から振った番号である。また, 縦軸は各測定点における半径方向の誤差である。PET の測定結果で R に対する誤差率が最も大きいのは $R = 60$ [mm] で, 1.1 [%] であった。誤差の発生原因として, 構成部品の加工誤差および部品をねじで締結する際の位置のずれが考えられる。EVC と H-VC の測定結果を Table 1 にまとめる。ここで, RMS (Root Meaning Square, 二乗平均平方根)

は次式で求められ、目標値からの偏差が得られる。 n は標本数、 e は各測定点における目標値との誤差である。

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum e^2} \quad (6)$$

Table 1 の結果より、EVC を用いた足裏機構でも PET と同等の結果が得られたことが分かる。しかし、H-VC は目標の R から大きな誤差が生じている。これは、板の復元力がモータの保持力を上回ったこと、機構のスライダを圧迫して摩擦抵抗が上昇したことが原因と考えられる。これらの結果より、本研究で製作した機構においては PET 程度またはそれ以上の軟らかさを持つ材料であれば、材質が精度に与える影響は少ないことが言える。

次に、2つのクランク - スライダ機構による足裏機構の精度を、佐藤らの足裏機構と比較したグラフを Fig. 8 に示す。縦軸に各 R における誤差の RMS をとっている。図中に 2CMS PET で示したのが本研究で製作した機構で、佐藤らが足裏に PET を使用していたことから PET の測定結果を記載した。佐藤らが製作した2つの機構は Mechanism 1 および Mechanism 2 で示している。Fig. 8 の結果より $R=70$ [mm] から 130 [mm] の間では 3 つの機構はほぼ同じ精度であることが分かる。しかし、測定範囲のうち R が小さくなると差異が出ている。本研究で製作した足裏機構は、佐藤らの足裏機構が誤差を大きく発生させているのに対してほぼ一定の誤差を保っており、特に $R=60$ において機構 2 が 0.38 [mm] の誤差が発生しているのに対して、0.21 [mm] と約半分の誤差に抑えている。

Table 1 Measured Results of Accuracy

	Max. Error [mm]	Max. Error [%]	RMS [mm]
EVC	0.76	1.0	0.28
PET	0.72	1.1	0.29
H-VC	1.8	3.1	0.77

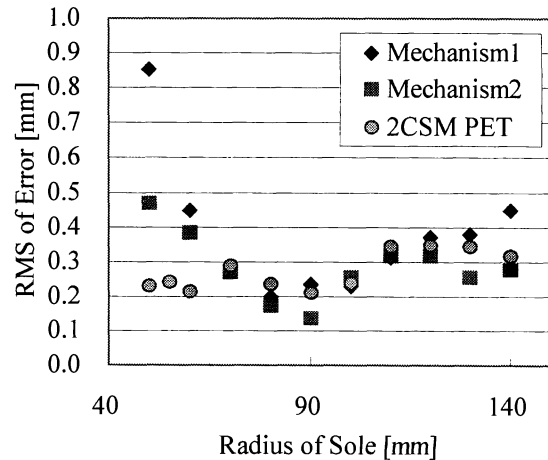


Fig. 8 Comparison of Accuracy

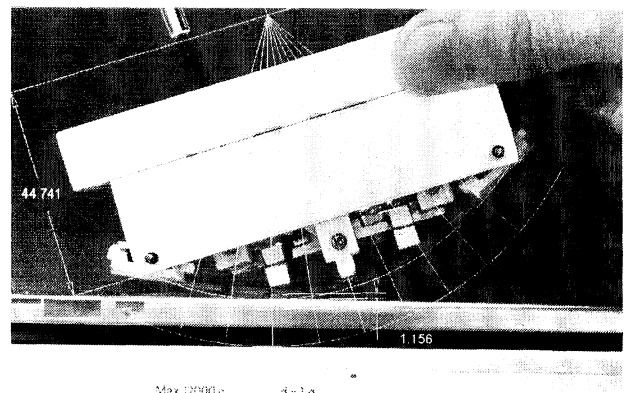


Fig. 9 Measurement of Stiffness

3.2.3 剛性

外力に対する足裏機構の剛性を測定した。Fig. 9 に測定の様子を示す。足裏機構を電子天秤に測定位置 2 から 8 を押し付けて撮影し、その画像を CAD で編集して測定した。測定結果を Fig. 10 に示す。この時、 $R=60$ [mm]、荷重は佐藤らのロボットの重量を参考に 1.5 [kgf] とした³⁾。また、ロボットの歩行時にかかる衝撃荷重を考慮して、2.0 [kgf]、3.0 [kgf] の荷重でも測定を行った。

Fig. 10 より, 1.5 [kgf]の荷重のとき最大で約 1.0 [mm], 3.0 [kgf]では最大で約 2.2 [mm]の変形が生じている. また, EVC と PET の結果を比較すると僅かに PET の方が有利であることが分かる. ここで, PET に 1.5 [kgf]の荷重をかけた測定結果において, 5, 7 の測定点における変形量の平均は-0.57 [mm], 6 の測定点における変形量は-0.80 [mm]でその差は 0.23 [mm]と得られる. これは, 足底板のたわみよりも, 機構が原因の変形量の方が約2倍大きいことを示しており, 3.0 [kg]の荷重でも同様の傾向が現れている. 以上の結果から機構の改良点として, より機械的倍率の高い機構を利用すること, 構成部品の高剛性化を検討することが挙げられる.

Fig. 11 に佐藤らの機構と剛性を比較した結果を示す. 縦軸に Fig. 10 で示した荷重 1.5[kgf]における変形量の RMS をとっている. この結果より, PET を足裏に用いた場合, 本研究で製作した足裏機構は床半力による変形を Mechanism 2 の 73 [%]に抑えることが分かった.

4. 結論

本研究では足裏を円弧状に変形させる機構を開発した. 2つのクランク - スライダ機構の組合せで足裏を3本の梁で支持することにより以下の効果を得た.

目標の円弧を実現する精度に関して, 1.1 [%]以内の誤差に抑制している. これは, $R = 60$ [mm]の足裏を形成する時, 佐藤らの機構と比較して約半分の誤差で実現可能であることを示す. また, 足裏の剛性に関して, 自重を想定した床反力 1.5 [kgf]による足裏の変形量は, 最大で曲率半径の 1.5 [%]である. これは, 佐藤らの機構と比較して変形量を 73 [%]に低減している.

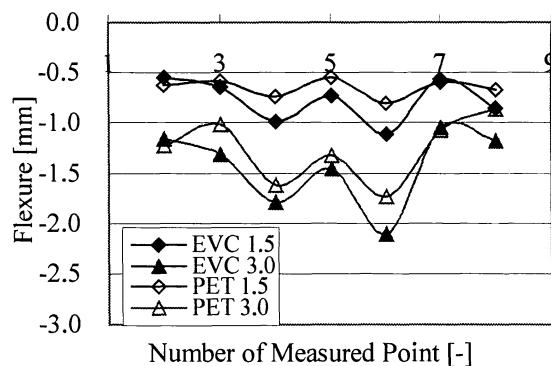


Fig. 10 Measurement of Stiffness

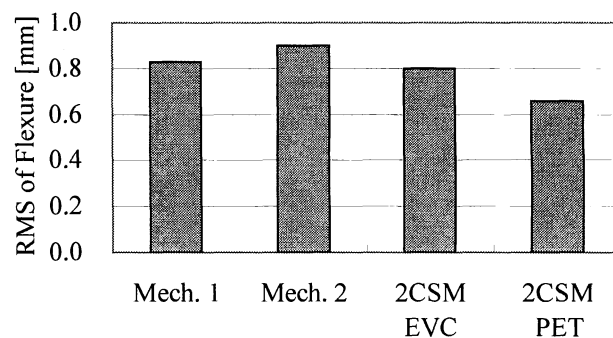


Fig. 11 Comparison of Stiffness

しかし, 歩行時の衝撃荷重を想定して自重の 2 倍の静荷重をかけると, 最大 3.7 [%]の変形が発生する. また, 自重による床半力が作用したとき, 足底板のたわみによる変形量よりも, 機構が原因の変形量の方が約2倍大きいという結果が得られた.

今後, 衝撃荷重を考慮した足裏機構の高剛性化を検討すると共に, 製作した足裏機構を2足ロボットに搭載し, 歩行実験を行って足裏の曲率半径が歩行に与える影響を調査していく.

参考文献

- 1) 浅野 文彦, 羅 志偉: “半円足の転がり効果を利用した劣駆動仮想受動歩行-(I)コンパス型モデルの駆動力学”, 日本ロボット学会誌, 25-4, pp.566-577, 2007

- 2) 浅野 文彦, 羅 志偉: “半円足の転がり効果を利用した劣駆動仮想受動歩行-(II)性能解析と冗長モデルへの拡張-”, 日本ロボット学会誌, 25-4, pp.578-588, 2007
- 3) 佐藤恭平: “足裏形状を可変とする 2 足歩行ロボットの開発”, 山形大学大学院 修士学位論文, 2008