

## 円弧状に変形可能な 2 足ロボット足裏部の開発

### Design of a Deformable Arc-shaped Sole for Biped Robots

落合章裕\* , 佐藤恭平\*\* , 三浦弘之\*\*\* , 山野光裕\* , 水戸部和久\*

Akihiro Ochiai\* , Kyohei Sato\*\* , Hiroyuki Miura,  
Mitsuhiro Yamano\* , Kazuhisa Mitobe\*

\*山形大学大学院 理工学研究科

\*\*豊田合成株式会社

\*\*\*日本電管株式会社

\*Graduate school of Science and Engineering , Yamagata University

\*\*Toyoda Gosei CO. LTD.

\*\*\*Nihon Denei Corporation

キーワード : 2 足歩行ロボット(Biped walking robot) , 足裏形状(Sole shape) ,  
スライダ・クランク機構(Slider-crank mechanism) ,  
接触センサ (Contact sensor) , 足裏センサ (Sole sensor)

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 落合章裕 Tel. : 0238-26-3238 E-mail : [ahiro2112@yahoo.co.jp](mailto:ahiro2112@yahoo.co.jp)

## 1. はじめに

近年 , 多くの 2 足歩行ロボットが開発されているが , 足裏の形状に着目すると , 平らな足裏を持つものと曲面状の足裏を持つものがある .

平らな足裏は , ヒューマノイドロボットのように能動関節を持った 2 足歩行ロボットで多く利用されている<sup>1) 2)</sup> . 支持脚足裏平面でロボットに加わる重力や慣性力を支え , 足裏を面接触させながら歩行する . 足裏面内や足首周辺に力を検出するセンサが取り付けられ , 床反力を測定して制御に利用しているものが多い .

一方 , 曲面状の足裏は , 関節の駆動力をほとんど用いない受動歩行ロボットで利用される<sup>3)</sup> .

このようなロボットは , 曲面状の足裏を床面上で回転させながら歩行する .

歩行ロボットの足裏は , これまで形状が平面または曲面で固定されたものが用いられてきた . 形状を平面から曲面まで歩行中に変形できれば , 歩行ロボットの機能向上に役立つと考えられる . 例えば , 受動歩行ロボットは , エネルギー効率が高いという利点を持つが , 足裏が曲面であるため , 静止時に安定を保ちにくい . 足裏を平面に変形させれば , 安定に静止することが容易になる . また , 足裏形状と歩行の関係を検討した研究<sup>4) 5)</sup>も報告されている . 今後 , 能動関節のロボットについても , 曲面状の足裏を使った歩行法の開発が期待できる .

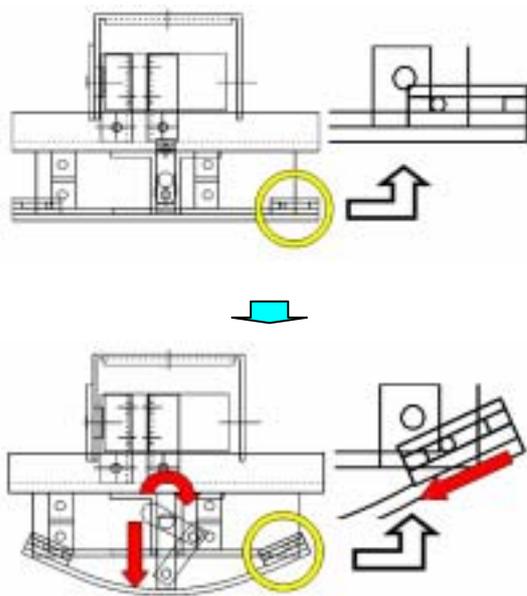


Fig. 1 Motion of the variable sole shape mechanism I.

2 足歩行ロボットの制御においては、脚先に加わる反力の情報がよく使われる。曲面状の足裏の場合は、床面との接触点が床面からの反力の作用点となるため、その情報が制御に役立つと考えられる。また、曲面状の足裏を持つロボットは、足裏の転がりに連動してロボットの姿勢も変化する。支持脚足部の姿勢は、足裏面の爪先側で床面と接触しているときは前に傾き、踵側で接触しているときは後ろに傾く。そのため、足裏の接触点検出は、ロボットの姿勢計測にも役立つ。

筆者らのグループは、足裏形状を平面から曲面まで変形できる機構を開発した<sup>6)</sup>。本稿では、この機構を改良して剛性や形状の精度を向上させた機構と、足裏の接触点検出用センサの開発について報告する。

## 2. 足裏機構

### 2.1 改良型足裏機構の設計

筆者らのグループでは、足裏を円弧状に変形

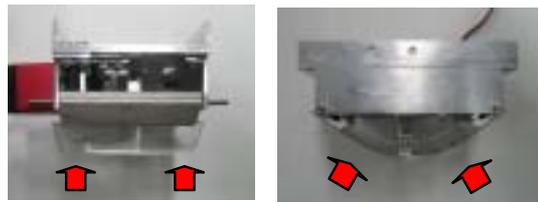


Fig. 2 Force acting on the variable sole mechanism I.

させる機構として、弾性変形する板を RC サーボモータの駆動力で変形させる足裏機構を提案している<sup>6)</sup>。この機構の側面図と写真を Fig. 1 と Fig. 2 に示す。本稿では、この機構を足裏機構 I 型と呼ぶことにする。

足裏機構 I 型は、小型の 2 足口ポットに装着することを想定し、爪先から踵までの長さを 100 mm としている。足裏面を厚さ 1 mm の変性ポリエチレンテレフタレート (PET) の板で製作し、その板の弾性変形により、足裏面の曲率を変化させる。板の変形量は RC サーボモータにより調節される。RC サーボモータの軸の回転運動を、スライダ・クランク機構により直線運動に変え、板の中央部を 1 点で押すことにより、板を平面から曲率半径 50 mm の曲面に近い形状まで変形させることが出来る<sup>6)</sup>。

足裏機構 I 型は、Fig. 2 に示す矢印の方向から力を加えた際、足裏の形状が変形しやすいという欠点がある。変形量を小さくするために足裏の板の強度を高めれば、足裏面の曲率を変えるための RC サーボモータへの負荷も大きくなるため、小型の RC サーボモータで駆動しにくくなる。

そこで、足裏機構 I 型の設計を改良して足裏機構 II 型を製作した。足裏機構 II 型では、スライダ・クランク機構の先端部分を Fig. 3 のような形状に変更し、板とスライダ先端部分が 2 箇所線接触するようにしている。足裏機構 II 型の写真を Fig. 4 に示す。足裏の板は足裏機構 I と同じ材質、寸法のものを用い、足裏面の最小曲率半径も足裏機構 I と同じ 50mm としてい



Fig. 3 Components to push the sole plate.



(a) flat sole



(b) curved sole



(c) the sole mechanism without sole plate

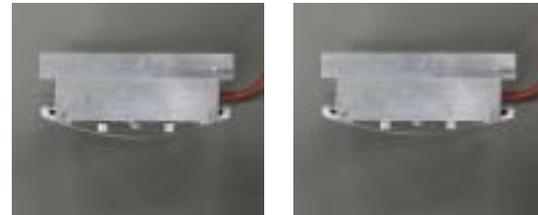
Fig.4 The sole mechanism II.

る．RC サーボモータには，日本遠隔制御社製の DS8911 を用いている．RC サーボモータを駆動して，足裏曲面の曲率  $R$  を変化させた写真を Fig. 5 に示し，足裏機構 II を片足 6 自由度



(a)  $R= 50 \text{ mm}$

(b)  $R= 70 \text{ mm}$



(c)  $R= 100 \text{ mm}$

(d)  $R= 140 \text{ mm}$

Fig. 5 Motion of the sole mechanism II .

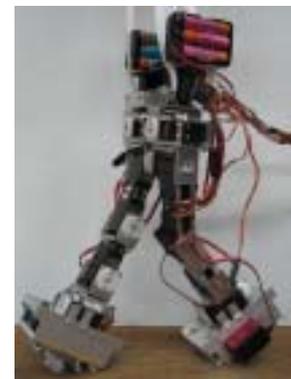


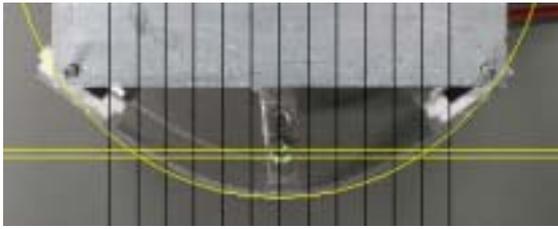
Fig. 6 The sole mechanism II attached to legs.

の 2 足ロボットに装着した写真を Fig. 6 に示す．

## 2.2 性能評価

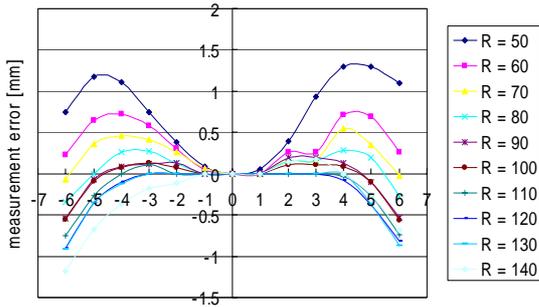
### 2.2.1 形状の評価

開発した機構の性能評価として，足裏の形状が意図した曲率の円弧に変形しているかについて評価する．測定方法として，足裏機構に入力した半径の曲線と実際の足裏の形状との比較を行う．まず，足裏機構の制御装置に足裏の曲率半径  $R$  を入力し，その状態で写真を撮影する．撮影した写真の画像ファイルを使って，PC

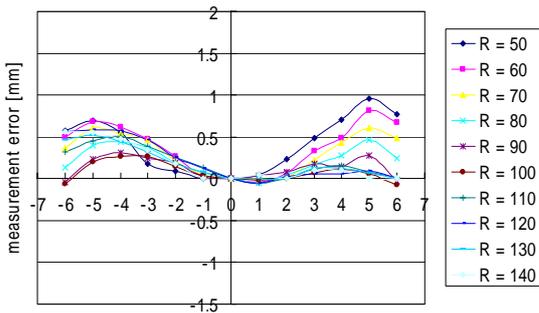


-6 -5 -4 -3 -2 -1 0 1 2 3 4 5 6

Fig. 7 Example of the measurement.



(a) Variable sole shape mechanism I



(b) Variable sole shape mechanism II

Fig. 8 Results of measurement.

上で半径  $R$  の円と比較し、その誤差を測定する。Fig. 7 に測定の例を示す。機構の中心を 0 として左右に 6 分割し、それぞれの地点での誤差を測定した。測定範囲は  $R=50$  mm から  $R=140$  mm とし、この範囲を 10 mm ごとに測定した。Fig. 8 (a) に足裏機構 I 型、Fig. 8 (b) に足裏機構 II 型の測定結果を示す。これらより、まず、足裏機構 I 型も足裏機構 II 型も全体的に足裏の曲率半径が小さくなるにつれて、目標とする半径と実際に足裏機構で作られた半径との誤差が増加していることがわかる。しかし、足裏機

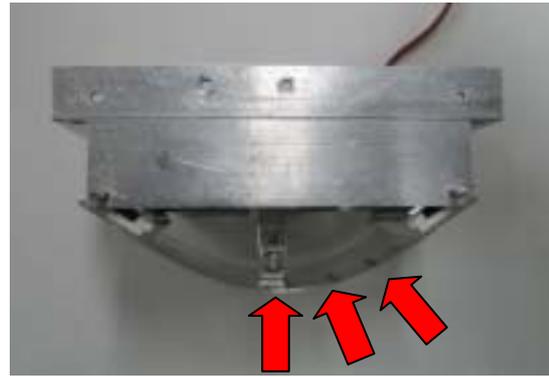


Fig. 9 Example of the measurement.



(a) without load



(b) with load

Fig. 10 Example of the measurement.

構 I 型よりも足裏機構 II 型の方が全体的に誤差が小さくなっていることがわかった。これにより、足裏機構 I 型から足裏機構 II 型に改良したことによって足裏の曲率半径  $R$  の再現性が向上したことがわかった。

## 2.2.1 剛性の評価

足裏の曲率半径を 50 mm として Fig. 9 に示すように 3 種類の方向から力を加え、足裏の変形量を測定した。負荷の大きさは、小型の歩行ロボットの重量を想定して 1.5 kgf とした。は足裏機構 I 型で足裏の部品を押し下げている

**Table 1 Deformation of sole shape mechanism I**

	without load	with load	difference
[mm]	20.04	19.26	0.78
[mm]	17.84	17.00	0.84
[mm]	14.09	13.23	0.86
average			0.83

**Table 2 Deformation of sole shape mechanism II**

	without load	with load	difference
[mm]	20.16	18.69	1.47
[mm]	18.53	18.02	0.51
[mm]	15.04	15.03	0.01
average			0.66

点, は足裏機構 II 型で足裏の部品を押し下げている点, はその中間点となっている. 無負荷のときの写真を Fig.10 (a) に, 負荷を加えたときの写真を Fig. 10 (b) に示す. 図中の矢印の寸法を測定し, この差を算出する.

Table 1 に足裏機構 I 型の測定結果を, Table 2 に足裏機構 II 型の測定結果を示す. どちらの機構も足裏の部品を押し下げている点において変形量が最も小さく, そこから離れるにしたがって変形量は大きくなっている. と の中間の では, 足裏機構 II 型の方が小さな変形になっており, ~ の平均も足裏機構 II 型の方が小さい.

### 3. 足裏センサ

#### 3.1 足裏センサに必要とされる条件

足裏曲面と床面との接触位置を検出するセンサは, 次のような条件を満たす必要がある.

- (1) 曲面上に装着できること
- (2) 接触位置を細かい分解能で検出できること

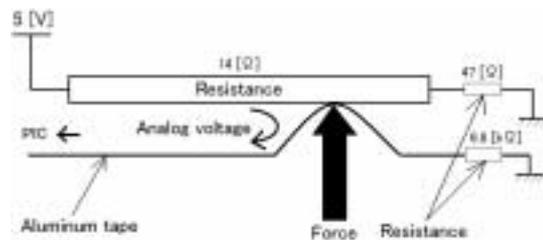


Fig. 11 Measurement principle of sole sensor.

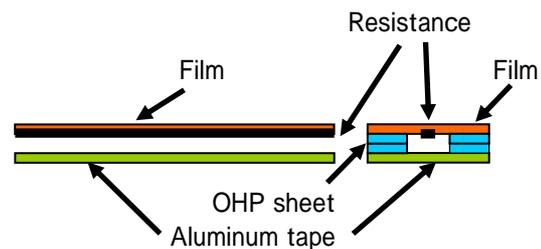


Fig. 12 Structure of the sole sensor.

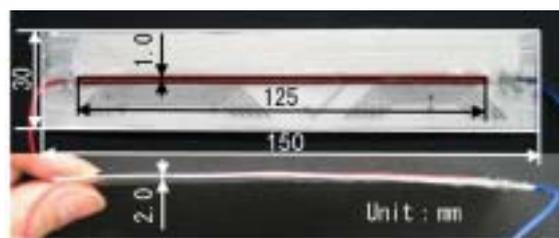


Fig. 13 The sole sensor.

- (3) 足部に搭載できるように軽量かつ小型であること
- (4) 足裏面の転がりに影響を及ぼすような凹凸のないこと

また, 前章のような変形する足裏に取り付ける場合は, 足裏面の変形にも対応できることが必要である.

#### 3.2 測定原理と仕様

製作した足裏センサの測定原理を Fig. 11 に示す. このセンサは接地点に応じて, 可変抵抗器と同様の原理で出力電圧が変化する. そのため, 検出した電圧によってどの位置で接してい

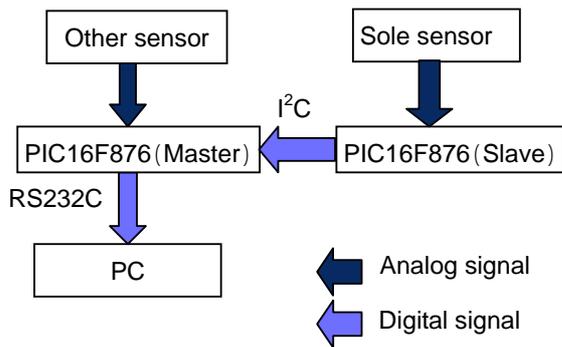


Fig. 14 Data flow of the sensor signal.

るかがわかる．可変抵抗器の役割を果たす部分には，PC のキーボード内部に使用されているフィルム状の抵抗を使用した．このフィルムの導体部は  $0.13 \text{ [ } \Omega / \text{mm]}$  程度の抵抗値を持っている．また，センサの厚さを薄くするために導電部分にアルミテープを，絶縁部分に OHP シートを使用している．フィルム状の抵抗，OHP シート，アルミテープを使用して Fig. 12，Fig. 13 のような足裏センサを製作した．足裏センサの中心には足裏の接地点を感知しやすいように，導線ででっぱりを取り付けている．Fig. 11 内の  $47 \text{ } \Omega$  の固定抵抗器は，フィルム状の抵抗の値が  $14 \text{ } \Omega$  しかなく，電源電圧に対して抵抗値が小さいため，電流値を抑えるために取り付けている．また，足裏と床面が接触していない状態を確実に検出するため，A/D 変換入力端子と GND の間を  $68 \text{ k}\Omega$  の抵抗で接続している．そのため，足裏と床面が接触していないときは，A/D 変換入力端子は  $0 \text{ V}$  となる．

このセンサの寸法は，前章の足裏機構に合うように，幅  $30 \text{ mm}$ ，全長  $150 \text{ mm}$ ，厚さ  $2 \text{ mm}$ ，感知部  $125 \text{ mm}$  とした．また，このセンサは接触を感知した時に電圧を  $3.83 \sim 4.79 \text{ V}$  の間で出力するため， $10 \text{ bit}$  で A/D 変換すると  $195$  段階の分解能で位置を計測できる．センサの感知部が  $125 \text{ mm}$  であるため，足裏センサの分解能は  $0.641 \text{ mm}$  である．

### 3.3 PC との接続

検出されたセンサの信号はマイコン上で A/D 変換され，PC に送信される．マイコンには A/D 変換機能が搭載されている Microchip Technology Inc. の PIC16F876 を使用している．この PIC の A/D 変換の分解能が  $10 \text{ bit}$  であるため， $0 \sim 5 \text{ V}$  の電圧を  $1024$  段階で測定できる．A/D 変換したデータを PIC から PC へ送信する手段として，RS232C によるシリアル通信を用いている．A/D 変換のチャンネル数を増やして，より多くのセンサを同時に接続できるようにするため Fig. 14 のように PIC を複数使用し，PIC 間を I<sup>2</sup>C 通信で接続している．PC 側でのプログラムの開発環境として，PC の OS には Windows XP を使い，プログラム言語は C 言語を用いている．コンパイラに gcc version 2.78.2.3 を使い，プログラムは Cygwin 上で実行する．また，PIC 側でのプログラムの開発環境として，使用するプログラム言語は C 言語とし，コンパイラには CCS Inc. の PCM Version 3.224 を使用している．

### 3.4 足裏センサの評価実験

開発した足裏センサがどのような信号を出力するか確認するための実験を行う．足裏センサを円弧状に変形した足裏に取り付け，Fig. 15 のようにロボットの足を手で持ち，押さえつけながら足先部分から踵部分まで (a) ~ (d) の順で転がした．信号が足裏の接地点に応じて出力されているかどうか確認しやすくするために，転がす速度をできるだけ一定になるようにして行った．また，実験は電子計りの上で行い，足裏に加わる荷重がほぼ  $4 \text{ kgf}$  になるようにして行った．

実験結果を Fig. 16 に示す．縦軸が距離，横軸が時間となっている．縦軸において， $0 \text{ mm}$  が足先部分， $100 \text{ mm}$  が踵部分に相当する．

足裏センサの値が時間経過に比例して右上

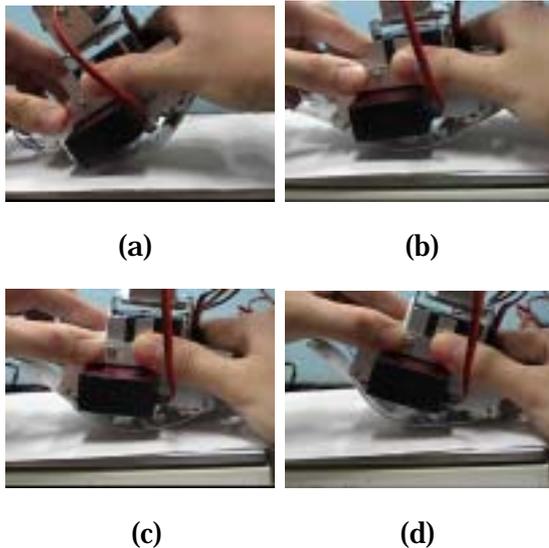


Fig. 15 Experiment of sole sensor.

がりになっているのがわかる。つまり、足裏センサの信号が足裏の接地点の変化に応じて変化していることがわかる。よって、足裏センサが足裏の接地点を検出することができていると考えられる。足裏センサの値が小刻みに上下している原因は、足裏機構を床面に押さえつけている人の手のぶれと考えられる。

#### 4. おわりに

本稿では、改良型の足裏機構と足裏の接触点検出用センサの開発について報告した。改良型の足裏機構は、改良前のものに比べ、より円弧に近い形状に変形することができ、床面からの力による変形も小さく抑えることが出来た。曲面状の足裏や平面から曲面まで変形する足裏の接触点検出のため、薄くて柔軟なセンサを開発し、実験により有効性を確認した。

#### 参 考 文 献

- 1) 広瀬真人, 竹中透, 五味洋, 小澤信明: 人間型ロボット, 日本ロボット学会誌, Vol. 15, No.7, 983/985 (1997)
- 2) 赤地一彦, 他 4 名: ヒューマノイドロボット・HRP-2 の

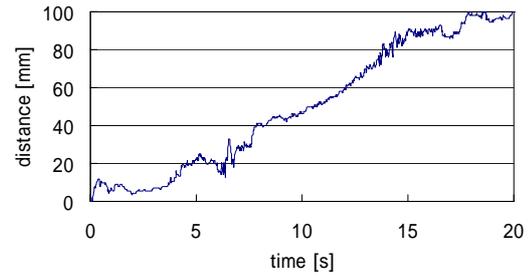


Fig. 16 Experiment result of sole sensor.

開発, 川田技報 Vol.23, 20/25 (2004)

- 3) 池俣吉人, 佐野明人, 藤本英雄: 平衡点の大域的安定化原理に基づくロバストな受動歩行, 日本ロボット学会誌, Vol. 26, No. 2, 178/183 (2008)
- 4) 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, Vol. 25, No. 4, 566/577 (2007)
- 5) 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, Vol. 25, No4, 578/588 (2007)
- 6) 佐藤恭平, 山野光裕, 水戸部和久: 二足歩行ロボットのための足裏形状可変機構の開発, 計測自動制御学会東北支部 第 240 回研究発表会資料 (2007)