

二足歩行ロボットのための足裏形状可変機構の開発

A variable sole shape mechanism for biped walking robot

○ 佐藤恭平*, 山野光裕*, 水戸部和久*

○ Kyohei Sato*, Mitsuhiro Yamano* , Kazuhisa Mitobe*

*山形大学大学院 理工学研究科

*Graduate school of Science and Engineering, Yamagata University

キーワード：円弧(Arc), 足裏形状(Sole shape), 足裏機構(Sole mechanism),
スライダ・クランク機構(Slider-crank mechanism),
スライド機構(Slide 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
水戸部研究室 佐藤恭平 Tel. : 0238-26-3238 E-mail : kyoujp2002@yahoo.co.jp

1. 緒言

現在, 世界中で多くの歩行ロボットに関する研究が行われている. その中でも受動歩行ロボットは重力や慣性力を用い, 歩行時にエネルギーを投入する必要がないということで注目を集め, 多くの研究が行われている. しかし, 受動歩行ロボットは外部からのエネルギーの投入がまったく無いため, 水平面上での継続した歩行が不可能である. また, 多くの受動歩行ロボットの足裏の形状が円弧状のものを有しているため, 静止時に不安定である. また, 足裏の形状が固定され, アクチュエータを持たないため, 歩行動作, 歩行速度が制限されてしまうなどいくつかの欠点を持っている.

また, これら受動歩行ロボットの研究に伴い, 足裏半径が歩行性能に与える影響に関する研究[1][2]など, 足裏の形状に関する研究

も行われている. しかし, これらの多くはシミュレーション上で行われており実機を用いての検証はあまり多く行われていない. 実機を用いての実験では, 足裏の曲率を変えて実験するために, その都度足裏の曲率の違う部品と交換しなくてはならない. また, 歩行中に足裏の形状を変えることができないなど, いくつかの問題点が挙げられる. そこで本研究ではこれらの問題を解決するために, 足裏の曲率を自由に变化可能な足裏形状可変機構(以下, 足裏機構と呼ぶ)の開発を行う.

2. 足裏機構の使用用途

本研究で開発する足裏機構をロボットの脚に取り付けることによって以下のような利点が考えられる.

まず, 受動歩行ロボットの足に取り付けた場合, 足裏半径と歩行の関係, 脚機構の性能

評価を容易に行うことが出来る。また、能動関節を持つロボットの足に取り付けた場合、受動歩行ロボットでは不可能だった継続した歩行を可能とし、歩行速度も自由に変化させることが可能となる。さらに、足裏の形状を平面にすることにより安定して静止することも可能となる。

Fig.1 (a), (b)に本研究で開発する足裏機構の使用例として、各関節にアクチュエータを持つロボットに足裏機構を取り付け、歩行している様子を示す。Fig.1 (a)は歩行開始時の様子を示している。まず、片足を上げ、足裏を円弧状に変形させた後、この足を地面に下ろす。次に、もう一方の足も、同じように足裏を円弧状に変形させた後、足を地面に下ろす。Fig.1 (b)は通常の歩行動作の様子について示している。支持脚の膝は伸ばした状態で、足裏の円弧の転がりを利用し歩行する。

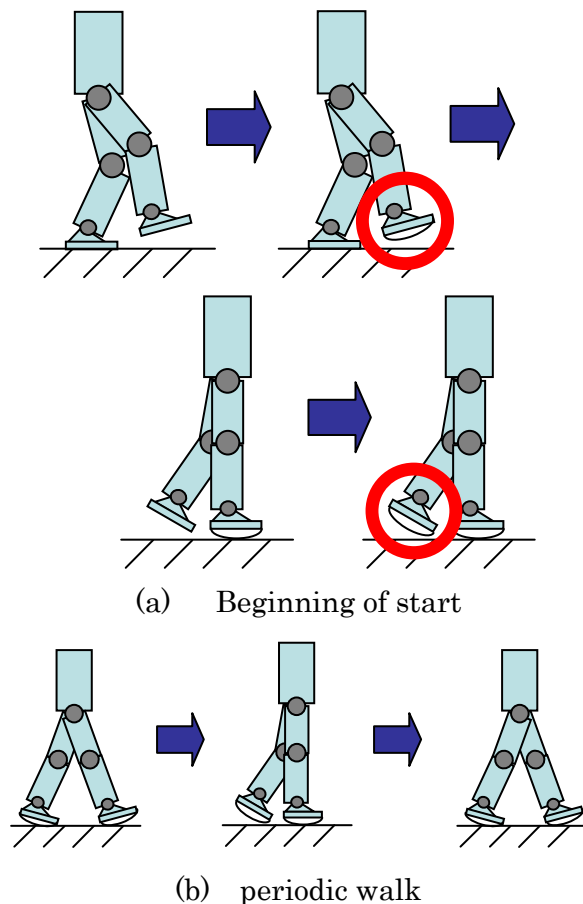


Fig.1 Example of walk

3. 実験用ロボット

本研究で開発する足裏機構を Fig.2 に示す脚型ロボットの足に取り付けるよう設計する。

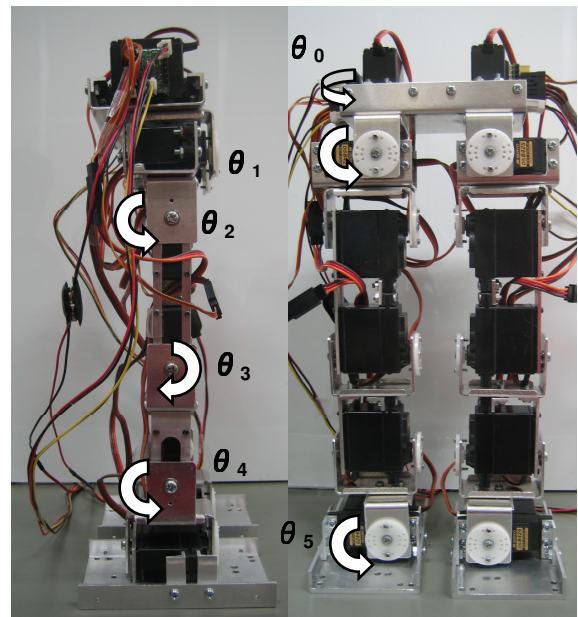


Fig.2 The biped robot

脚は、本研究で開発する足裏の形状の性質上、ロボットが歩行実験において転倒することが考えられる。そこで実験を容易に行えるよう、小型で軽量なものとする事とした。

寸法は全高 315 mm, 全幅 140 mm, 重量 1.2 kg (バッテリー含まず), 自由度は足首 2 自由度, 膝 1 自由度, 股関節 3 自由度の片足 6 自由度で合計 12 自由度となっている。各関節には日本遠隔制御株式会社製の RC サーボモータを用いる。股関節ヨー軸にはトルク 0.34 Nm, 角速度 315 deg/sec のものを, それ以外の部分にはトルク 1.27 Nm, 角速度 400 deg/sec のものを用いる。可動範囲はどちらも約 120 deg となっている。RC サーボを制御する RC サーボコントローラには Pololu 社製の Micro Serial Servo Controller を二つ用いる。

脚の可動範囲は各関節に使用している RC サーボの可動範囲を, 通常の歩行に影響が無いよう, Table 1 に示すように割り振った。

Table 1 Range of joints

| | |
|------------|----------------|
| θ_0 | -60 ~ 60 [deg] |
| θ_1 | -30 ~ 60 [deg] |
| θ_2 | -30 ~ 90 [deg] |
| θ_3 | -30 ~ 90 [deg] |
| θ_4 | -60 ~ 60 [deg] |
| θ_5 | -20 ~ 20 [deg] |

4. 足裏機構

4.1 設計条件

本研究で開発する機構は足裏の形状を無段階で任意の半径に変形させることが可能なものとする。このために、足裏の材料には変形可能な板状のものを用いることとした。また、足裏の部品は何回も変形させたり、歩行実験を行ったりすることによって部品が破損することが予想される。このため交換が容易な構造とすることとした。

また、小型ロボットの足にとりつけるため、足裏機構に用いるアクチュエータは足への部品の取り付け位置、取り付け穴等を考慮し、小型である RC サーボモータとした。

これらを用いて足裏の最小半径が足の長さ 100 mm の半分の 50 mm とする真円の円弧を作ることが可能で、一般的な歩行の周期である約 0.5 秒の間に足裏の形状を円弧にすることが可能な機構を設計することとした。

4.2 足裏機構に用いる機構

Fig.3 は、本研究で開発した足裏機構がどのような動きをするのかを示したものである。足裏機構はスライダ・クランク機構を用いて RC サーボモータの回転運動を上下運動に変換にする機構と、図中に丸で囲まれ拡大されている部分のスライド機構によって構成されている。この二つの機構を組み合わせ、足裏の形状を円弧に変形させるものとなっている。

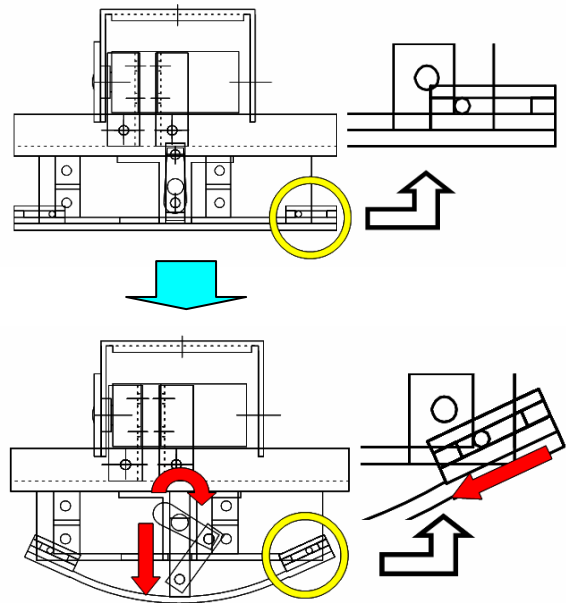


Fig.3 Motion of the variable sole shape mechanism

4.3 設計

まず、足裏機構のアクチュエータとしてロボットの脚の関節にも用いている JR 社製のトルク 1.27 Nm、角速度 400 deg/sec の RC サーボモータを用いることとした。

次にリンクの長さを決定する。これにはまず、足裏機構を製作する上で、スライダ・クランク機構のストロークがどれくらい必要かを決定する必要がある。ここでは設計条件より最小半径が 50 mm の円弧をつくるのに必要なストロークを算出する必要がある。Fig.4 に足裏機構各部のパラメータを示す。

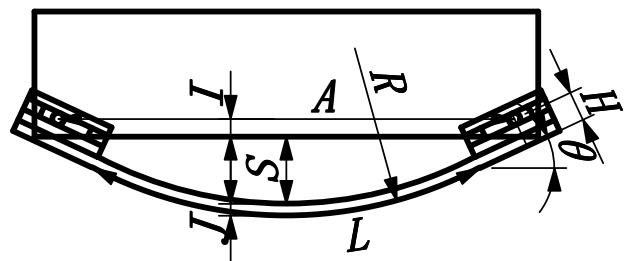


Fig.4 Parameters of the sole mechanism

(1)式にストロークの算出に必要な式を示す. 以下の式は足裏機構を実際に動作させる時のストロークの算出にも用いる.

$$S = \frac{H}{\cos \theta} + \frac{A - 2R \sin \theta}{2} \tan \theta + R(1 - \cos \theta) - I - J \quad (1)$$

ただし,

$$\theta = \frac{L}{2R} \quad (2)$$

とする.

Fig.5 に(1)式をグラフ化したものを示す.

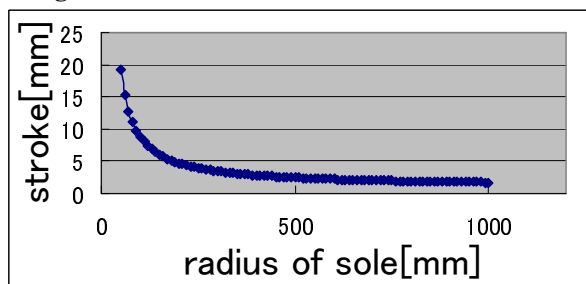


Fig.5 Relation between sole radius and stroke

設計条件を満たすため(1)式に最小半径 50 mm を入力することによってストロークが 19 mm 必要だということがわかる.

次に, このストロークを得るため, 各リンクの長さを決定する必要がある. 各リンクの長さの決定には, リンクの変位だけでなく, 速度やリンクにかかる力も考慮する必要がある. 足裏機構は歩行中に足裏の円弧を作らなくてはならないので, 歩行中に円弧を作れるだけの速度がリンクに要求される. さらに, 足裏機構には板を押し下げる力と歩行中のロボットの重量を支えるだけの力が要求される. Fig.6 にスライダ・クランク機構の各部のパラメータを示し, (3)式にスライド部の変位, (4)式にスライド部の速度, (5)式にスライド部にかかる力を算出する式を示す[3].

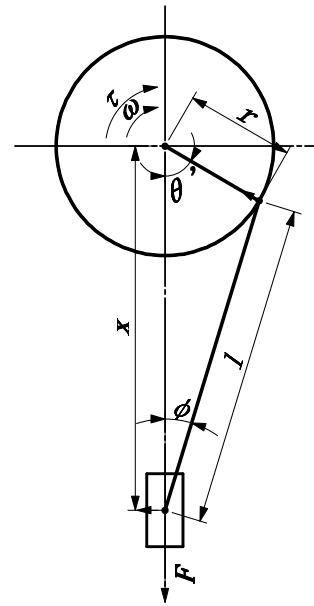


Fig.6 Parameters of slider-crank mechanism

$$x = r \cos \theta' + l \sqrt{1 - \rho^2 \sin^2 \theta'} - (r + l) \quad (3)$$

$$v = -r\omega \left(\sin \theta' + \frac{\rho \sin 2\theta'}{2\sqrt{1 - \rho^2 \sin^2 \theta'}} \right) \quad (4)$$

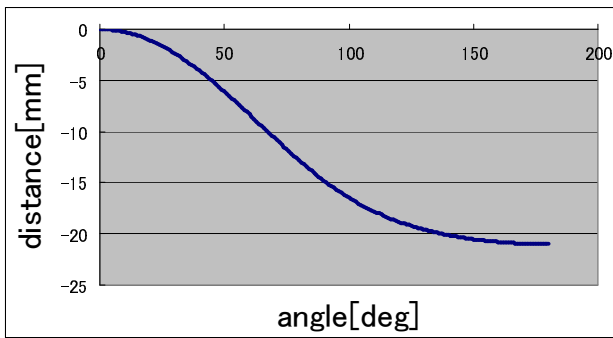
$$F = \frac{\tau}{r \cos(\theta' + \phi - \frac{\pi}{2})} \cos \phi \quad (5)$$

ただし,

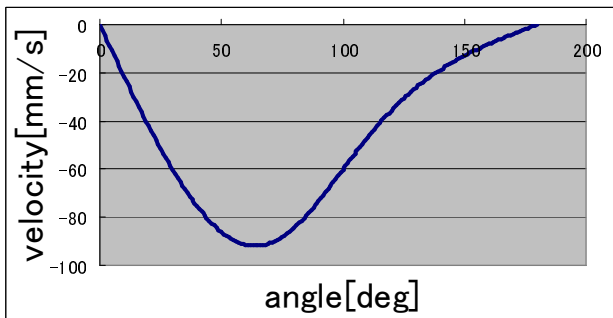
$$\rho = \frac{r}{l} \quad (6)$$

とする

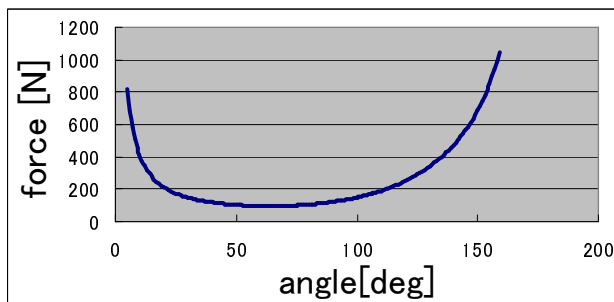
本機構では, RC サーボの動作範囲が 120 deg, 速度が最高 400 deg/sec と限られた中で, 設計条件である約 0.5 秒の間に足裏の形状を円弧にしなくてはならない. これらを満たした上で, RC サーボの可動範囲を最大限利用し, スライダ部に 19 mm のストロークを得るということを考慮し, 各リンクの長さを $r = 10.5$ mm, $l = 15$ mm とすることとした. Fig.7(a)にスライド部の変位を, Fig. 7(b)にスライド部の速度を, Fig. 7(c)にスライド部にかかる力を示す.



(a) Distance



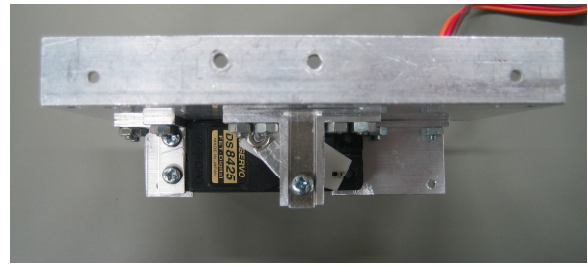
(b) Velocity



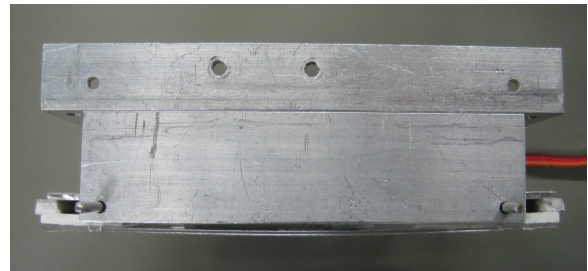
(c) Force acting on slider

Fig.7 Calculation results of slider-crank mechanism

このグラフから、本機構では条件を満たす範囲として、0 deg から 120 deg の範囲を用いることとした。これらをもとに製作した足裏機構を Fig.8 に示す。Fig.8(a)は足裏機構内部を、Fig.8(b)は概観図を示している。寸法は全長 100 mm、幅 60 mm、重量 0.13kg、スライド部のストローク 19 mm、最小足裏半径 50mm となっている。



(a) inside



(b) outside

Fig.8 The variable sole mechanism

5. 性能評価

開発した機構の性能評価として、まず、足裏の形状が意図した曲率の円弧に変形しているかどうかについて調べる。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、足裏機構に足裏半径 R を入力し、その状態で写真を撮影する。撮影した写真を CAD 上で半径 R の円と比較し、その差異を測定する。Fig.9 に測定の例を、Fig.10 に測定結果を示す。機構の中心を 0 とし左右に 6 分割し、それぞれの地点で誤差を測定した。

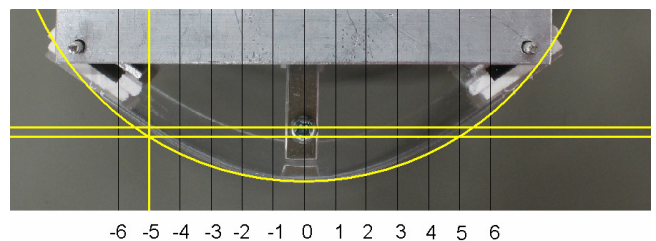


Fig.9 Example of the measurement

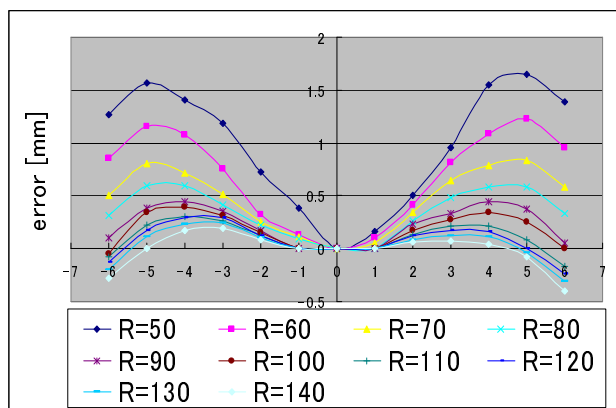
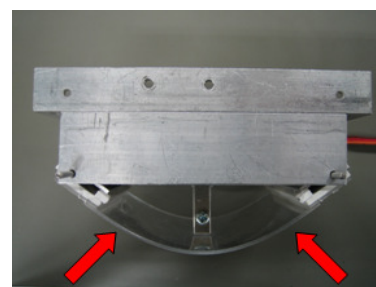


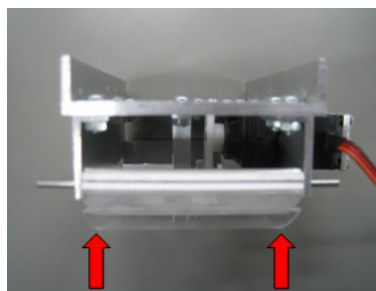
Fig.10 Results of measurement

Fig.10 より，半径が小さいほど誤差が大きくなることがわかった．また，半径によって誤差が最大となる場所が変化している．半径 110 mm から 140 mm 範囲では 6，-6 の地点で誤差が最大となる．この範囲を除けば，半径が 50 mm から 70 mm では 5，-5 の地点で誤差が最大になっており，半径が 80 mm から 110 mm では 4，-4 の地点で誤差が最大になっており，半径が 120 mm から 140 mm では 3，-3 の地点で誤差が最大になっており，誤差が最大となる地点が徐々に中心によっていることがわかった．

次に，外部からの力の入力に対し足裏の形状が保てるかを検証した．Fig11(a)に機構の側面図を，Fig11(b)に機構の正面図を示す．矢印は外力の方向を示している．すべての足裏半径において外力に対して変形してしまった．特に足裏半径が小さいときほど変形量が大きかった．



(a) Side view



(b) Front view

Fig.11 Force acting on the variable sole mechanism

6. 結言

足裏機構の使用用途を想定し，足裏機構の設計とその性能評価を行った．性能評価からいくつかの問題点とその特性が明らかになった．今後これらの問題点に関して，その特性を考慮し，機構の改良を行うことによって解決したいと考えている．また，今回の開発した機構では真円を作ることを目標としたが，今後は実験の幅を広げるため，真円以外の曲面形状も作る事ができるよう機構を改良する予定である．

7. 参考文献

- [1] 浅野文彦 羅志偉：足のころがり効果を利用した劣駆動仮想受動歩行，第 24 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 CD-ROM (2006)
- [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，日本ロボット学会誌，Vol. 25 No4，578/588
- [3] 森政弘(編)多々良陽一，小川紘一(著)：機構学，70/73，共立出版株式会社(1977)