

# 円弧状の足裏を有する二足歩行ロボットを 3D 表示する ソフトウェアの開発

A 3D computer graphics model of a biped robot walking with arc-shaped feet

○濱田修平 山野光裕 水戸部和久

○Shuhei Hamada, 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**：二足ロボット(Biped Robot), 円弧状の足裏(Arc-Shaped Feet), 順運動学(Direct Kinematics), 逆運動学(Inverse Kinematics), アニメーション(Animation)

**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 濱田修平

Tel.: 0238-26-3238 E-mail: alf.rockright@hotmail.co.jp

## 1. はじめに

近年, 二足歩行ロボットの歩行方法と足の形状について様々な研究がなされ, 特に足裏形状が円弧であるロボットについての研究が注目されている<sup>1),2),3)</sup>.

今まで研究されてきた足裏形状が円弧のロボットの多くが 2 自由度のコンパス型モデルである. これについては, 浅野らが半円足のモデルにおいて, 力学や受動歩行についての解析を行っている<sup>4),5)</sup>.

これらのロボットは足裏形状が円弧であ

ることによって, 慣性力を利用して歩行することができるのが最大の特徴である. 山形大学においては, この特長を利用するために足裏が円弧状に変形する二足ロボット<sup>6)</sup>が製作されている.

そこで, 本研究では足裏形状が円弧である二足ロボットについて, 逆運動学や足裏の円弧に沿って転がって歩行する(以後, 転がり歩行と呼ぶ)時の幾何学的条件を定式化して, ロボットの運動を 3D アニメーション表示する. これにより, 動きを可視化して, 動

作成支援ソフトウェアとして使用できるようにすることが目的である。逆運動学や転がり歩行時の幾何学的条件を定式化することにより、歩行フォーム作成や 3D アニメーション表示、動力学モデル作成のために利用することができる。また、3D アニメーション表示を行うことによって、数値やグラフなどではわかりにくい動きを可視化したり、歩行フォームの確認をしたりすることができる。そして、今後、動力学シミュレーションの結果を表示する時にも使用できると考えられる。

本稿では、山形大学が製作している二足ロボットにおいて、逆運動学を解き、各関節角度を求める方法について述べる。また、各関節角度を用いてアニメーション表示を行う方法についても述べる。

## 2. モデルの作成

アニメーションに用いるモデルは、山形大学の佐藤らが開発している二足ロボットを用いる。Fig.1 にこの二足ロボットの写真、Fig.2 にアニメーション用 3D モデルの図を示す。

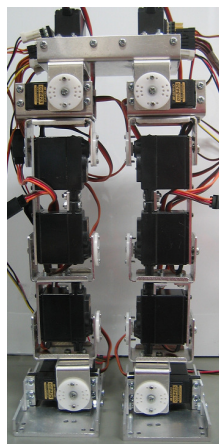


Fig.1 Biped robot

Fig.1 に示した二足ロボットの全高は 315 [mm], 全幅は 100 [mm], 奥行きは 140 [mm], 重量が 1.2 [kg] である。

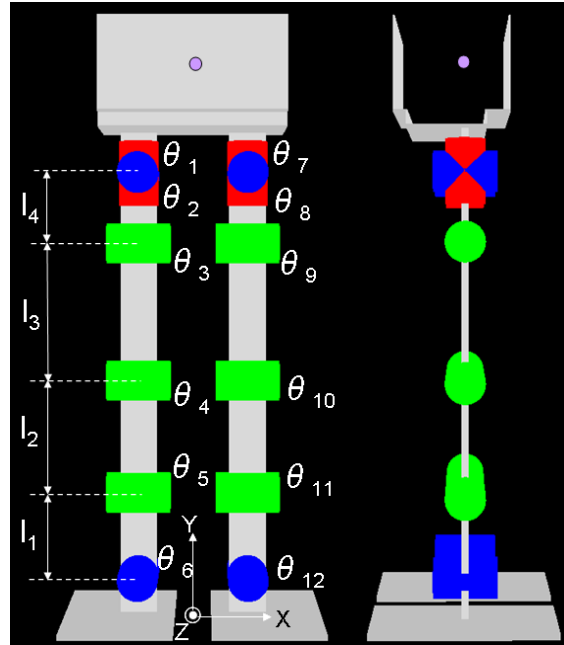


Fig.2 Biped robot model for animation

Fig.2 において、右脚の各関節を上から順に関節 1~6 とし、それぞれの回転角度を  $\theta_1 \sim \theta_6$  とする。また、左脚の各関節は上から順に関節 7~12 とし、それぞれの回転角度を  $\theta_7 \sim \theta_{12}$  とする。また、各関節間のリンク長さは Fig.2 に示したように  $l_1 \sim l_4$  とし、ロボット上部の点をロボットの胴体位置とした。

Fig.2 の座標系において回転角度  $\theta_1, \theta_7$  は Y 軸について、 $\theta_2, \theta_6, \theta_8, \theta_{12}$  は Z 軸について、 $\theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_9, \theta_{10}, \theta_{11}$  は X 軸についてそれぞれ回転する。

### 3. 運動学解析

#### 3.1 順運動学

順運動学とは、各関節角度が与えられた時に、位置及び姿勢を求めることである。ここでは右脚について述べる。Fig.3 に右脚部分の拡大図を示す。

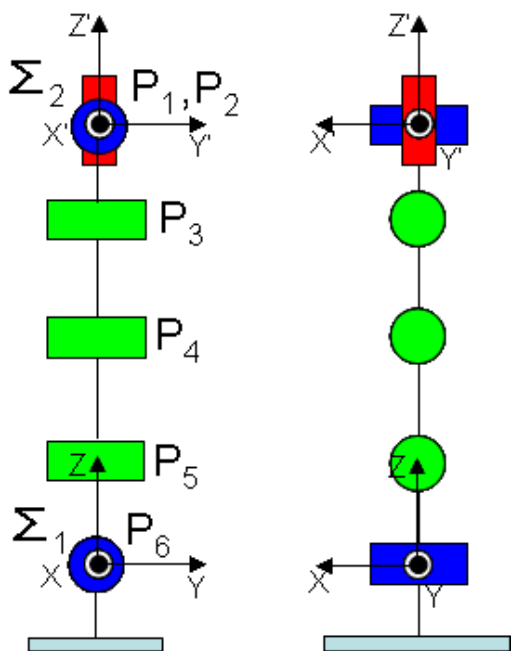


Fig.3 Joint configuration of the right leg

ここでは、 $\Sigma_1$ の位置を基準として、そこから見た関節1と2の交点の位置を求める。Fig.3のように関節6の位置を $P_6$ として、目標位置を $P_1$ とする。ただし、関節1と2の交点を目標位置としているので

$$P_1 = P_2 \quad (1)$$

である。

ここからは、Fig.3 に表した座標系で計算を行うこととし、それぞれの関節間の座標変換行列は以下のように表せる。

$${}^6_5T = \begin{bmatrix} C_5 & 0 & S_5 & 0 \\ S_5 S_6 & C_6 & -C_5 S_6 & -l_1 S_6 \\ -S_5 C_6 & S_6 & C_5 C_6 & l_1 C_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$${}^5_4T = \begin{bmatrix} C_4 & 0 & S_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -S_4 & 0 & C_4 & l_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$${}^4_3T = \begin{bmatrix} C_3 & 0 & S_3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -S_3 & 0 & C_3 & l_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$${}^3_2T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_2 & -S_2 & 0 \\ 0 & S_2 & C_2 & l_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$${}^2_1T = \begin{bmatrix} C_1 & -S_1 & 0 & 0 \\ S_1 & C_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

ただし、 ${}^i_{i-1}T$ は関節*i*から関節*i-1*の座標系への変換行列であり、 $C_j$ は $\cos \theta_j$ 、 $S_j$ は $\sin \theta_j$ を表している。

よって、関節6から関節1と2の交点までの座標変換行列は

$${}^6_1T = {}^6_5T {}^5_4T {}^4_3T {}^3_2T {}^2_1T \quad (7)$$

と表せる。この行列の(1,4)成分、(2,4)成分、(3,4)成分がそれぞれ関節1と2の交点のX、Y、Z座標を表している。

よって、目標位置座標を $P_1(P_x, P_y, P_z)$ とすると

$$P_x = l_4 S_{345} + l_3 S_{45} + l_2 S_5 \quad (8)$$

$$P_y = -S_6 (l_4 C_{345} + l_3 C_{45} + l_2 C_5 + l_1) \quad (9)$$

$$P_z = C_6 (l_4 C_{345} + l_3 C_{45} + l_2 C_5 + l_1) \quad (10)$$

と表せる．また，左脚についても同じ方法で解くことができる．

### 3.2 逆運動学

逆運動学は位置と姿勢が与えられた時に各関節角度を求めることであり，3軸が1点で直行する場合は簡単に解くことができる．

しかし，RCサーボを用いる場合はこの構造にすることが難しい．そこで，3軸が1点で交わらず，3軸が平行な関節構造を持つロボットについて，逆運動学を解く．

ここでは，右脚の各関節角度 $\theta_1 \sim \theta_6$ を求める方法について述べる．ここで，関節1と2の交点位置を $P_1(P_x, P_y, P_z)$ ，姿勢を $(\alpha, \beta, \gamma)$ とする．

また， $\theta_1 \sim \theta_6$ までの回転行列の積と Fig.3 における $\Sigma_2$ の姿勢は等しいことから

$$\begin{aligned} R_x(\theta_6)R_y(\theta_{345})R_x(\theta_2)R_z(\theta_1) \\ = R_x(\alpha)R_y(\beta)R_z(\gamma) \end{aligned} \quad (11)$$

が成り立つ．

ただし， $\alpha$ ， $\beta$ ， $\gamma$ はそれぞれX，Y，Z軸についての回転角度を表していて，計算する際に与える値である．また， $R_x(\theta_i)$ はX軸に関して， $R_y(\theta_i)$ はY軸に関して， $R_z(\theta_i)$ はZ軸に関して， $\theta_i$ 回転するという意味であり，以下のような行列である．

$$R_x(\theta_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C_i & -S_i \\ 0 & S_i & C_i \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$R_y(\theta_i) = \begin{bmatrix} C_i & 0 & S_i \\ 0 & 1 & 0 \\ -S_i & 0 & C_i \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$R_z(\theta_i) = \begin{bmatrix} C_i & -S_i & 0 \\ S_i & C_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

さらに，関節3，4，5の軸が平行なことから以下の式が成り立つ．

$$\theta_{345} = \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 \quad (15)$$

式(8)～(11)，(15)を連立して解くことにより，各関節角度 $\theta_1 \sim \theta_6$ を求める．

まず，(9)，(10)式から $\theta_6$ は以下のように求めることができる．

$$\theta_6 = A \tan 2(\pm P_y, \mp P_z) \quad (16)$$

よって， $\theta_6$ が既知であるので(11)式の両辺の左側から $R_x^{-1}(\theta_6)$ を掛けると

$$\begin{aligned} R_y(\theta_{345})R_x(\theta_2)R_z(\theta_1) \\ = R_x^{-1}(\theta_6)R_x(\alpha)R_y(\beta)R_z(\gamma) \end{aligned} \quad (17)$$

となる．(17)式の左辺は

$$\begin{bmatrix} * & * & * \\ S_1 C_2 & C_1 C_2 & -S_2 \\ * & * & * \end{bmatrix} \quad (18)$$

となり，右辺は

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \quad (19)$$

となる．ただし，

$$A_{11} = C_\beta C_\gamma$$

$$A_{12} = -C_\beta S_\gamma$$

$$A_{13} = S_\beta$$

$$A_{21} = C_6 (S_\alpha S_\beta C_\gamma + C_\alpha S_\gamma) + S_6 (S_\alpha S_\gamma - C_\alpha S_\beta C_\gamma)$$

$$A_{22} = C_6(C_\alpha C_\gamma - S_\alpha S_\beta S_\gamma) + S_6(C_\alpha S_\beta S_\gamma + S_\alpha C_\gamma) \quad R_y(\theta_{345})R_x(\theta_2) \\ A_{23} = -C_6 S_\alpha C_\beta + S_6 C_\alpha C_\beta = R_x^{-1}(\theta_6)R_x(\alpha)R_y(\beta)R_z(\gamma)R_z^{-1}(\theta_1) \quad (28)$$

$$A_{31} = -S_6(S_\alpha S_\beta C_\gamma + C_\alpha S_\gamma) + C_6(S_\alpha S_\gamma - C_\alpha S_\beta C_\gamma) \quad \text{となり, (28) 式について, 両辺の右側から} \\ A_{32} = -S_6(C_\alpha C_\gamma - S_\alpha S_\beta S_\gamma) + C_6(C_\alpha S_\beta S_\gamma + S_\alpha C_\gamma) \quad R_x^{-1}(\theta_2) \text{を掛けると}$$

$$A_{33} = S_6 S_\alpha C_\beta + C_6 C_\alpha C_\beta \quad R_y(\theta_{345}) \\ \text{となり, *は省略記号である. ここで, (18),} \\ \text{(19) 式の (2,3) 成分を取り出して整理すると,} \\ S_2 = C_\beta(C_6 S_\alpha - S_6 C_\alpha) \quad (20) \\ = R_x^{-1}(\theta_6)R_x(\alpha)R_y(\beta)R_z(\gamma)R_z^{-1}(\theta_1)R_x^{-1}(\theta_2) \quad (29)$$

を得る. となる. (29) 式の左辺は

また,  $\sin \theta = a$  を  $\theta$  について解くと

$$\theta = A \tan 2\left(a, \pm\sqrt{1-a^2}\right)$$

となる  $\eta$  ことから, (20) 式を  $\theta_2$  について解くと

$$\theta_2 = A \tan 2\left(B, \pm\sqrt{1-B^2}\right) \quad (21)$$

となる. ただし,

$$B = C_\beta(C_6 S_\alpha - S_6 C_\alpha) \quad (22)$$

である.

次に, (2,1) 成分と (2,2) 成分を取り出すと

$$S_1 C_2 = C_6(S_\alpha S_\beta C_\gamma + C_\alpha S_\gamma) \\ + S_6(S_\alpha S_\gamma - C_\alpha S_\beta C_\gamma) \quad (23)$$

$$C_1 C_2 = C_6(C_\alpha C_\gamma - S_\alpha S_\beta S_\gamma) \\ + S_6(C_\alpha S_\beta S_\gamma + S_\alpha C_\gamma) \quad (24)$$

となる. これより  $\theta_1$  は

$$\theta_1 = A \tan 2(\pm D, \mp E) \quad (25)$$

となる. ただし,

$$D = C_6(S_\alpha S_\beta C_\gamma + C_\alpha S_\gamma) \\ + S_6(S_\alpha S_\gamma - C_\alpha S_\beta C_\gamma) \quad (26)$$

$$E = C_6(C_\alpha C_\gamma - S_\alpha S_\beta S_\gamma) \\ + S_6(C_\alpha S_\beta S_\gamma + S_\alpha C_\gamma) \quad (27)$$

である.

(17) 式について, 両辺の右側から  $R_z^{-1}(\theta_1)$  を掛けると

$$\begin{bmatrix} C_{345} & 0 & S_{345} \\ 0 & 1 & 0 \\ -S_{345} & 0 & C_{345} \end{bmatrix} \quad (30)$$

となり, 右辺は

$$\begin{bmatrix} F & * & * \\ * & * & * \\ G & * & * \end{bmatrix} \quad (31)$$

となる. ただし,

$$F = C_1 C_\beta C_\gamma + S_1 C_\beta S_\gamma \quad (32)$$

$$G = C_1(-S_6(S_\alpha S_\beta C_\gamma + C_\alpha S_\gamma) + C_6(S_\alpha S_\gamma - C_\alpha S_\beta C_\gamma)) \\ - S_1(-S_6(C_\alpha C_\gamma - S_\alpha S_\beta S_\gamma) + C_6(C_\alpha S_\beta S_\gamma + S_\alpha C_\gamma)) \quad (33)$$

である.

(1,1) 成分と (3,1) 成分を取り出すと,

$$C_{345} = F \quad (34)$$

$$-S_{345} = G \quad (35)$$

これより  $\theta_{345}$  は

$$\theta_{345} = A \tan 2(\pm G, \mp F) \quad (36)$$

となる.

次に, (10) 式を変形すると,

$$l_3 C_{45} + l_2 C_5 = \frac{P_z}{C_6} - l_4 C_{345} - l_1 \quad (37)$$

となる. また, (16) 式から  $C_6$  は

$$C_6 = \pm \frac{P_z}{\sqrt{P_y^2 + P_z^2}} \quad (38)$$

と表せるので, (37) 式は

$$l_3 C_{45} + l_2 C_5 = \pm \sqrt{P_y^2 + P_z^2} - l_4 C_{345} - l_1 \quad (39)$$

となる.

(8) 式を変形すると

$$l_3 S_{45} + l_2 S_5 = P_x - l_4 S_{345} \quad (40)$$

となる. ここで, (39) 式の二乗と (40) 式の二乗の和を求めて, まとめると

$$C_4 = \frac{H^2 + I^2 - l_2^2 - l_3^2}{2l_2 l_3} \quad (41)$$

となる. ただし,

$$H = \pm \sqrt{P_y^2 + P_z^2} - l_4 C_{345} - l_1 \quad (42)$$

$$I = P_x - l_4 S_{345} \quad (43)$$

である.

また,  $\cos \theta = b$  を  $\theta$  について解くと

$$\theta = \pm A \tan 2(\sqrt{1-b^2}, b)$$

となる  $\forall$  ことから,

$$\theta_4 = A \tan 2(\sqrt{1-J^2}, J) \quad (44)$$

ただし

$$J = \frac{H^2 + I^2 - l_2^2 - l_3^2}{2l_2 l_3} \quad (45)$$

である.

(40) 式の左辺を変形してまとめると

$$(l_3 S_4) C_5 + (l_2 + l_3 C_4) S_5 = P_x - l_4 S_{345} \quad (46)$$

となる. ここで,  $d \cos \theta + e \sin \theta = f$  を,  $\theta$  について解くと

$$\theta = A \tan 2(e, d) \pm A \tan 2(\sqrt{d^2 + e^2 - f^2}, f)$$

となる  $\forall$  ことから, (46) 式を  $\theta_5$  について解くと

$$\theta_5 = A \tan 2(l_2 + l_3 C_4, l_3 S_4)$$

$$\pm A \tan 2(\sqrt{(l_3 S_4)^2 + (l_2 + l_3 C_4)^2 - I^2}, I) \quad (47)$$

となる.

さらに, (15)式より  $\theta_3$  は

$$\theta_3 = \theta_{345} - \theta_4 - \theta_5 \quad (48)$$

である.

左脚についても同様に計算することができるので,  $\theta_1 \sim \theta_{12}$  までを求めることができる. よって, 各関節角度が解析的に求められたので, 同じ関節構造のロボットに対しても使用できる.

### 3.3 胴体と支持脚の相対位置・姿勢

3.2 節で求めた逆運動学は足首位置から見た股関節の位置・姿勢を用いて解いている. このため, 逆運動学を用いるためには, 足からみた胴体の位置・姿勢を求める必要がある.

そこで, 胴体位置を  $(x_0, y_0, z_0)$ , 姿勢を  $(\alpha_0, \beta_0, \gamma_0)$ , 右足の位置を  $(x_1, y_1, z_1)$ , 姿勢を  $(\alpha_1, \beta_1, \gamma_1)$  とおき, 右足姿勢を表す回転行列  $R_1$  と胴体姿勢を表す回転行列  $R_2$  を求めると, 以下のようなになる.

$$R_i = \begin{bmatrix} M_{11i} & M_{12i} & M_{13i} \\ M_{21i} & M_{22i} & M_{23i} \\ M_{31i} & M_{32i} & M_{33i} \end{bmatrix} \quad (49)$$

ただし,

$$i = 1, 2$$

$$M_{11i} = C_{\beta_i} C_{\gamma_i}$$

$$M_{12i} = -C_{\beta_i} S_{\gamma_i}$$

$$M_{13i} = S_{\beta_i}$$

$$M_{21i} = S_{\alpha_i} S_{\beta_i} C_{\gamma_i} + C_{\alpha_i} S_{\gamma_i}$$

$$M_{22i} = C_{\alpha_i} C_{\gamma_i} - S_{\alpha_i} S_{\beta_i} S_{\gamma_i}$$

$$M_{23i} = -S_{\alpha_i} C_{\beta_i}$$

$$M_{31i} = S_{\alpha_i} S_{\gamma_i} - C_{\alpha_i} S_{\beta_i} C_{\gamma_i}$$

$$M_{32i} = C_{\alpha_i} S_{\beta_i} S_{\gamma_i} + S_{\alpha_i} C_{\gamma_i}$$

$$M_{33i} = C_{\alpha_i} C_{\beta_i}$$

よって右足からみた胴体姿勢  $R$  は以下のようになる。

$$R = R_1^{-1} R_2 \quad (50)$$

さらに、右足の座標系からみた胴体位置は以下のようになる。

$$(R^{-1}(x_0 - x_1), R^{-1}(y_0 - y_1), R^{-1}(z_0 - z_1)) \quad (51)$$

(50), (51)式と逆運動学の式を用いて各関節角度を求める。

#### 4. 転がりの幾何学的条件

次に転がる足が滑らず、浮かず、地面に沈まないという条件の下で転がった場合の変位量を表す式を求める。

この変位を表した図を Fig.4 に、転がる足の様子を Fig.5 に、Fig.5 の転がり移動量  $d$  を求めるための図を Fig.6 に示す。

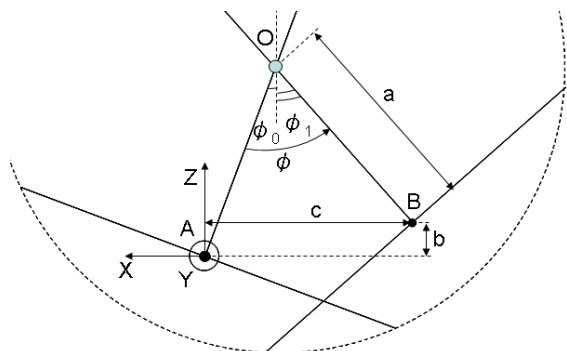


Fig.4 Displacement of the right foot

Fig.4 の点  $O$  は回転中心を表している。回転

中心に関して  $\phi (= \phi_0 + \phi_1)$  だけ回転したとすると点  $A$  は点  $B$  の位置に移動する。このときの  $X$  軸方向の移動量は、

$$c = -a(\sin \phi_0 + \sin \phi_1) \quad (52)$$

となり、 $Z$  軸方向の移動量は

$$b = a(\cos \phi_0 - \cos \phi_1) \quad (53)$$

となる。

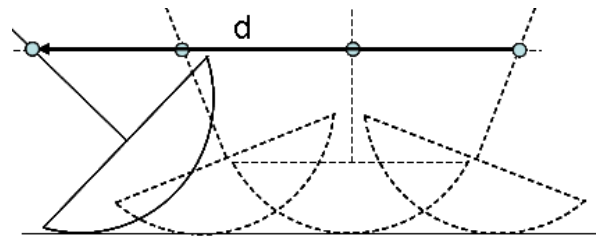


Fig.5 Rolling motion of arc-shaped foot

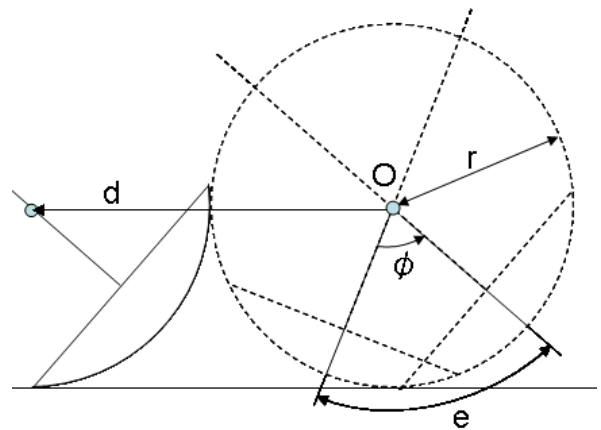


Fig.6 Rotation of arc-shaped foot

さらに、Fig.5 において、足裏の円弧に沿って転がって移動した距離  $d$  を求める必要がある。Fig.6 において、 $d$  は図の円周部分  $e$  と等しいので以下の式が成り立つ。

$$d = e = r\phi \quad (54)$$

よって、これらの結果から  $\phi$  だけ回転して移動する距離は、 $X$  軸方向に  $\Delta x$ 、 $Z$  軸方向に  $\Delta z$  である。ただし、

$$\Delta x = -a(\sin \phi_0 + \sin \phi_1) + r\phi \quad (55)$$

$$\Delta z = a(\cos \phi_0 - \cos \phi_1) \quad (56)$$

である。

## 5. 膝を伸ばした状態での転がり歩行

### 5.1 転がり歩行におけるロボットの動き

転がり歩行をアニメーション表示するためには、支持脚が転がった時の右足、左足、胴体位置を求める必要がある。そこで、回転中心についてロボット全体を回転させた後、転がり歩行によって回転中心が移動する距離だけ平行移動することにより、転がり後の位置を求めることにする。

Fig.7 に膝を伸ばし、左脚を前に出した状態で転がる場合の様子を示す。また、Fig.7 の右側にロボット全体の回転を、左側に平行移動の様子を示す。ただし、点 O は回転中心、 $\phi$  は転がる角度、 $\varphi$  は左脚の初期角度を表している。

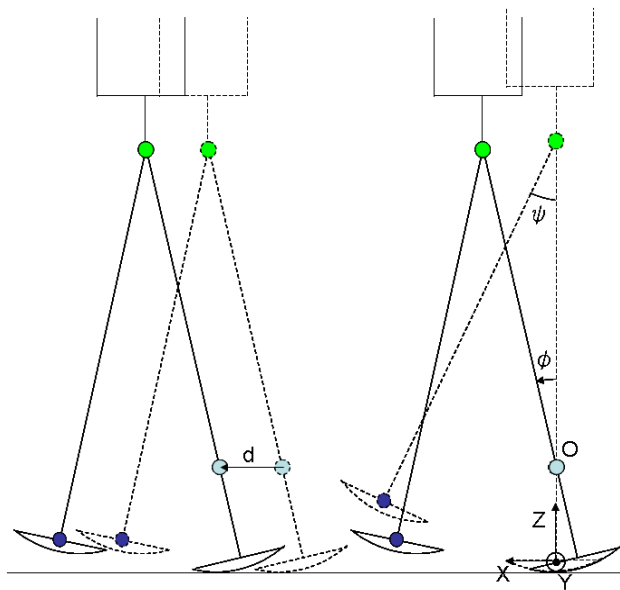


Fig.7 Rotation and translation of the robot

### 5.2 胴体の転がり歩行による変位

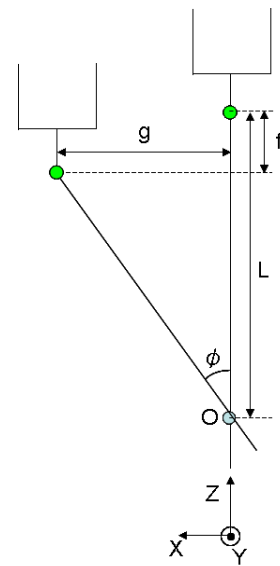


Fig.8 Displacement of the body

Fig.8 は回転中心について  $\phi$  だけ回転した時のロボットの胴体の様子を表したものである。このときの X 軸方向の移動量は

$$g = L \sin \phi \quad (57)$$

であり、Z 軸方向の移動量は

$$f = -(L - L \cos \phi) = -L(1 - \cos \phi) \quad (58)$$

となる。さらに円弧に沿った転がりの移動量も加わるので、X 軸方向の移動量は

$$g = L \sin \phi + r\phi \quad (59)$$

となる。

### 5.3 遊脚の転がり歩行による変位

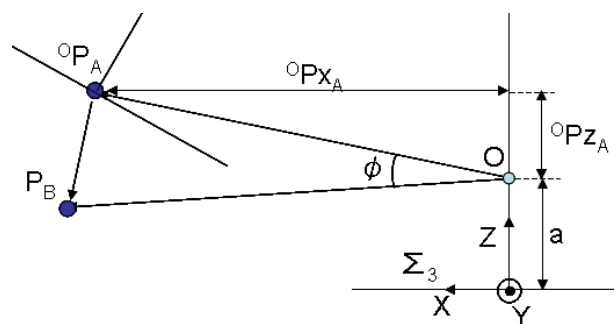


Fig.9 Displacement of the left foot



Fig.9 は遊脚の移動に関する図である。Fig.9において座標系が描かれている部分が原点である。また、原点から回転中心  $O$  までの距離を  $a$ 、点  $O$  からみた左足位置が  ${}^O P_A$ 、 $\phi$  回転した後の原点から見た左足位置が  $P_B$  である。このとき、回転後の位置  $P_B$  は座標変換行列を使って、以下のように表せる。

$$\begin{bmatrix} P_{X_B} \\ P_{Y_B} \\ P_{Z_B} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & \sin \phi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \phi & 0 & \cos \phi & a \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^O P_{X_A} \\ {}^O P_{Y_A} \\ {}^O P_{Z_A} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (60)$$

さらに転がった距離だけ  $X$  軸方向に移動するので、回転後の位置は以下のように表せる。

$$P_{X_B} = {}^O P_{X_A} \cos \phi + {}^O P_{Z_A} \sin \phi + r\phi \quad (61)$$

$$P_{Z_B} = -{}^O P_{X_A} \sin \phi + {}^O P_{Z_A} \cos \phi + a \quad (62)$$

右足の変位量については(55)、(56)式を用いて計算する。

これらの計算を行うプログラムを作成して、計算結果を4章の胴体位置  $(x_0, y_0, z_0)$ 、姿勢  $(\alpha_0, \beta_0, \gamma_0)$ 、右足の位置  $(x_1, y_1, z_1)$ 、姿勢  $(\alpha_1, \beta_1, \gamma_1)$  に入力することによって、右脚の各関節角度が求まる。また、左脚についても同様に計算する。これらの結果を用いてアニメーションを作成する。

## 6. 三次元 CG アニメーション

### 6.1 開発環境

アニメーションの表示には三次元グラフィックスの拡張 API である Java3D を使用する。プログラムは統合開発環境の Eclipse を用いて Java で作成した。Eclipse はオー

ブンソースであり、プログラムを作成した後、そのままコンパイルもできるので、プログラム作成には便利であると考え選定した。

### 6.2 足裏が平らな場合の歩行

アニメーションは 0.01 秒ごとに 1 コマずつ描画させて表示させる。このようにすれば、0.01 秒ごとに記載する角度の間隔を広くすることにより、関節の回転速度を増加させることができるため、任意に回転速度を変更することができる。

また、0.01 秒ごとの胴体位置と姿勢、右足の位置と姿勢、左足の位置と姿勢を書いた CSV ファイルを読み込み、左右の足の位置からみた胴体位置・姿勢を求めて、逆運動学を計算し、各関節角度を求める。

Fig.10 に足裏が平らな時の動きを表した図を示す。

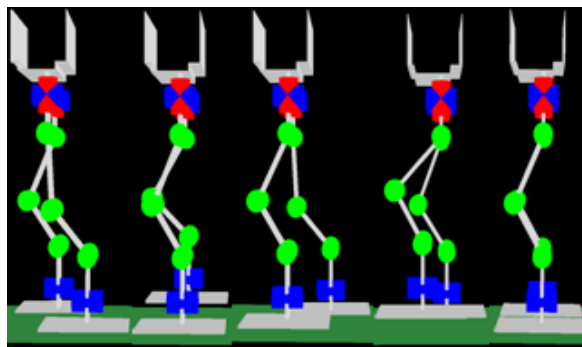


Fig.10 Walking motion with flat feet

Fig.10 に示した動きは、胴体の高さを一定にして、進行方向に真っ直ぐ歩行する動きである。左足を持ち上げ前に出して着地し、その後、右足を持ち上げ前に出して着地する動きを示している。

### 6.3 足裏が円弧の場合の歩行

Fig.11 に足裏形状が円弧の時の転がる動きを表した図を示す。

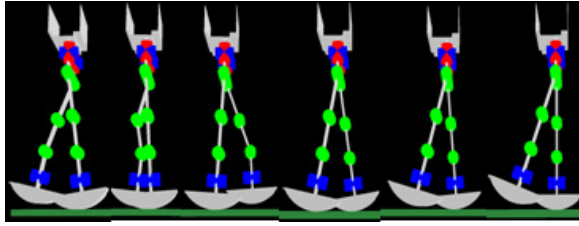


Fig.11 Walking motion with arc-shaped feet

Fig.11 に示した動きは、左脚を前に出した状態から右足の転がりによって前に進み、左足が接地したら左足の転がりによって前に進むという動きである。

## 7. おわりに

本稿では、股関節で3軸が直行しない構造において、逆運動学を解いた。また、逆運動学を解いて求めた各関節角度を用いて、足裏が平らな場合と円弧の場合について簡単な動作を表示した。

今後は、3D空間における進行方向の変更や動力学についても考えていく。また、円弧の曲率を変更しての動きも作成していく。

## 8. 参考文献

- 1) 小山 崇之, 杉内 肇, 藪田 哲郎: 受動歩行における Foot Scuffing 現象と足裏形状との関係に関する一考察, ロボティクス・メカトロニクス講演会, Vol.2004 70/71 (2004)
- 2) Martijn Wisse, Daan G. E. Hobbelen

and Arend L. Schwab: Adding an Upper Body to Passive Dynamic Walking Robots by Means of a Bisecting Hip Mechanism, IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS, 23-1, 112/123 (2007)

- 3) 細田 耕: 動特性を利用した空気圧拮抗駆動二足歩行, システム/制御/情報: システム制御情報学会誌, 49-10, 411/416, (2005)
- 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, 25-4, 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, 25-4, 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(発表予定), 計測自動制御学会, 240-10 (2007)
- 7) 鈴森 康一: ロボット機構学, 58/60, コロナ社 (2004)