

# 線形倒立振り子モードを用いた動的二足歩行ロボット

木澤 悟・菊地 賢\*

## Dynamic Biped Walking Robot Using Linear Inverted Pendulum Mode

Satoru KIZAWA and Satoshi KIKUCHI\*

(2007年11月26日受理)

The research of the biped walking robot is performed eagerly. The main goal of our study is to imitate the motion of human walk by a biped humanoid robot, and to generate reference trajectories that make the biped walking robots walk like the human. Recently, Linear Inverted Pendulum Mode (LIPM) is proposed, whose theorem is simple and effective for controlling biped walking. In this paper, we adopted LIPM theory in order to make the model for the biped walking robot, which assumes that center of gravity of robot is located on hip. And we proposed the reference trajectory of the swinging-leg and the supported-leg. Moreover we produced a 10DOF biped walking robot and the proposed reference trajectory was implemented. As a result, the effectiveness of the proposed methods was confirmed through the walking experiments with the robot.

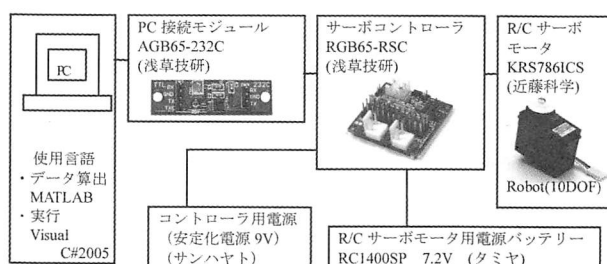
### 1. 緒言

近年、二足歩行ロボットの研究・開発は人間との協調・共存を目指し、盛んに行われている。二足歩行ロボットの制御において、目標軌道の設計は非常に重要であり、その手法として動歩行に対して多くの制御手法が提案されている。本来、動歩行は慣性力を制御する必要があり、そのために各リンクの重心位置、慣性モーメント、加速度等の情報をセンシングする必要がある。それに対し、特に加速度センサやジャイロセンサを必要とせず、運動方程式も簡単に集中質量系として扱える線形倒立振り子モード<sup>1)~3)</sup>に基づいた動歩行制御という動歩行制御が提案されている。そこで、本研究ではR/Cサーボモータを使った二足歩行ロボットを製作し、PCで二足歩行ロボットの重心軌道を線形倒立振り子モードに基づいて算出し、それを基に各関節の軌道を求め、インターフェースを介して実機に適用することで、この制御手法の有効性と安定な二足歩行について検討した。

### 2. 実験装置システムの概要

#### 2.1 開発プロセスの概要

本研究においては、動的な歩行制御を実現させるために、線形倒立振り子モードに基づいた重心の軌道から水平方向 ( $x-z$  平面) の関節の軌道を設計した。また、その軌道に同期した左右方向 ( $x-y$  平面) の軌道に関する軌道関数の設計を行い、求められた各関節の角度データを自作したロボットに適用し、動歩行制御を試みた。実装試験の前に、重心位置の計算および各関節の軌道のシミュレーションをMATLABを用いて行い、支持脚、遊脚の関節を制御するための軌道を算出した。実装試験においては、算出された関節角度データを Visual C#2005で作成



\* 秋田高専専攻科学生

Fig. 2-1 開発環境および制御回路

された実行プログラムを用いて、PC 接続モジュールを介してサーボコントローラに送ると、各関節の R/C サーボモータにパルス信号が送られ駆動する。Fig.2-1 には開発環境および制御回路を示す。また、Fig.2-2 にはロボットの外観を示す。

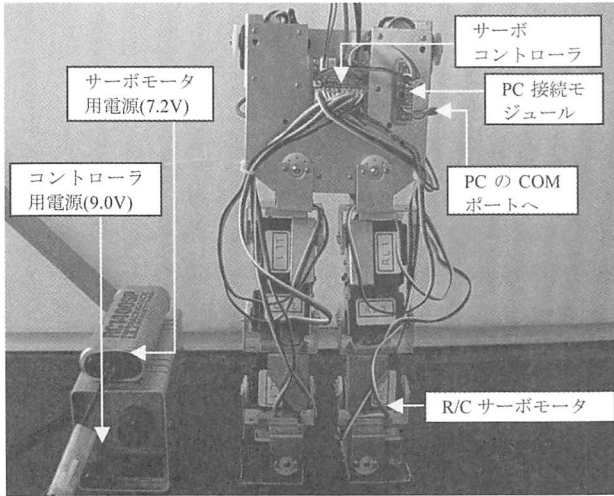


Fig. 2-2 二足歩行ロボット

2.2 二足歩行ロボットの機構について

本研究において製作したロボットは、足首 2 自由度、膝 1 自由度、腰 2 自由度の片足 5 自由度、計 10 自由度で構成されている。サーボモータを連結するブラケットは、サーボモータの寸法に合わせて設計し、厚さ 1 mm のアルミ板を加工して製作した。ロボット組図を Fig.2-3 に示す。ロボットの全長 308mm、重量 1.11kg で、足裏の寸法は縦 72mm、幅 45mm である。Fig.2-3 のように各所に取り付けられたサーボモータを、右脚は RL0~RL4 とし、左脚は LL0~LL4 とした。RL0, LL0, RL4, LL4

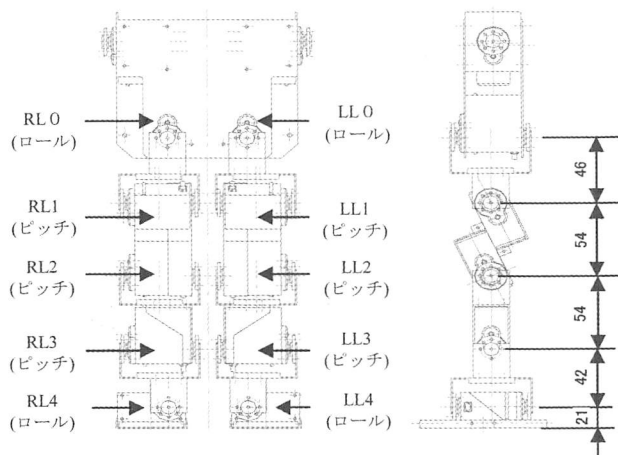


Fig. 2-3 ロボット組図

は左右方向（ロール）に動作し、RL1~RL3, LL1~LL3 は前後方向（ピッチ）に動作する。

2.3 制御方法について

R/C サーボモータは制御信号のデューティ比に応じて角度制御を行っている。この制御信号は R/C サーボモータ特有の信号であり、直接 PC から信号を生成できない。そのため、接続モジュール及びサーボコントローラを介して PWM 信号を生成し、R/C サーボモータをコントロール<sup>4)</sup>ことにした。

3. 線形倒立振り子モードに基づく歩行

3.1 線形倒立振り子モード

本研究では、二足歩行ロボットを線形倒立振り子モードを用いてモデル化した。この線形倒立振り子モードとは、倒立振り子モデルでトルク  $\tau$  を無視し、けり力  $f(t)$  を以下の式で与えた場合で、直線運動を行う。

$$f(t) = \frac{Mg}{\cos \theta(t)} \tag{3.1}$$

これは重力  $Mg$  とけり力  $f(t)$  の垂直成分が等しく、互いに打ち消し合う場合であり、重心が高さを維持したまま残った水平成分により直線運動を行う。つまり、重心が落ちる分だけ脚を伸ばして高さ  $z$  を一定に維持する理論であり、Fig.3-1 にその概念を示す。なお、図の  $x$  方向は水平方向、 $z$  方向は垂直方向とする。また、進行方向 ( $x$  方向) に対する左右方向である奥行き方向を  $y$  方向とした。

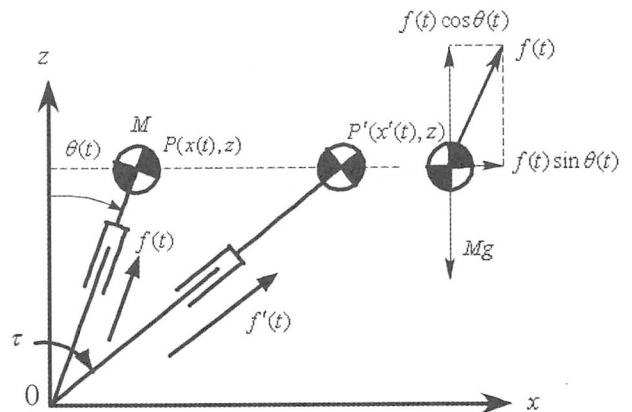


Fig. 3-1 線形倒立振り子

### 3.2 線形倒立振子の運動方程式

この運動を運動方程式で記述すると次式となる。

$$M\ddot{x}(t) = f(t) \sin \theta(t) \quad (3.2)$$

式(3.2)に式(3.1)を代入し、質量  $M$  を消去すると

$$\ddot{x}(t) = \frac{g}{z} x(t) \quad (3.3)$$

となる。また、 $x(t)$  について解くと次式となる。

$$x(t) = x(0) \cosh(t/T_c) + T_c \dot{x}(0) \sinh(t/T_c) \quad (3.4)$$

$$\dot{x}(t) = x(0)/T_c \sinh(t/T_c) + \dot{x}(0) \cosh(t/T_c) \quad (3.5)$$

$$T_c = \sqrt{z_c/g} \quad (3.6)$$

上式で、 $T_c$  は重心の高さと重力加速度によって決まる定数で  $x(0)$  は初期位置、 $\dot{x}(0)$  は初期速度である。ここで、 $x(0)$ 、 $\dot{x}(0)$  をそれぞれ  $x_s$ 、 $v_s$  とする。なお、変位  $x(t)$  の定義は支持位置から重心位置までの水平距離である。

### 3.3 線形倒立振子の軌道エネルギー

この節では運動中の線形倒立振子のエネルギーに関して考える。式(3.3)の両辺に  $\dot{x}(t)$  を掛け、積分すると

$$\frac{1}{2} \dot{x}(t)^2 - \frac{g}{2z} x(t)^2 = E = \text{const.} \quad (3.7)$$

となり、左辺の第一項は運動エネルギー、第二項は仮想的なポテンシャルエネルギーに相当する。右辺の定数は軌道エネルギー  $E$  と呼ばれ、線形倒立振子の運動では必ず軌道エネルギーが一定になることを示す。次に、線形倒立振子を二足歩行に応用することを考える。支持脚切り替え時の模式図を Fig.3-2(a) に示す。また、右脚から左脚へ支持脚を切り替える瞬間の状態を Fig.3-2(b) のように定義する。図中で、 $S$  は歩幅、 $x_f$  は切り替え前の着地点からの重心位置、 $v_f$  は切り替え直前の重心の速度であり次の支持脚切り替えまでの運動の初期速度となる。切り替え後の変位  $x(t)$  は支持位置から重心位置までの距離なので  $x_f - S$  となり、次の支持脚切り替えまでの運動の初期変位となる。

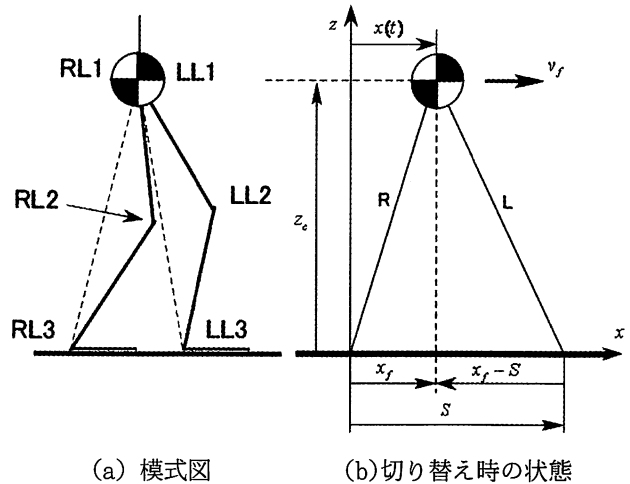


Fig. 3-2 支持脚の切り替え

ここで切り替え前の軌道エネルギーを  $E_b$ 、切り替え後の軌道エネルギーを  $E_a$  とすると式(3.7)より次式が成り立つ。

$$E_b = -\frac{g}{2z} x_f^2 + \frac{1}{2} v_f^2 \quad (3.8)$$

$$E_a = -\frac{g}{2z} (x_f - S)^2 + \frac{1}{2} v_f^2 \quad (3.9)$$

上式から支持脚切り替えの瞬間の速度  $v_f$  は

$$v_f = \sqrt{2E_b + \frac{g}{z} x_f^2} \quad (3.10)$$

と求められ、2つの式から  $v_f$  を消去することで、支持脚切り替え条件  $x_f$  は

$$x_f = \frac{z}{gs} (E_a - E_b) + \frac{S}{2} \quad (3.11)$$

と求められる。これらから  $x_f$ 、 $v_f$  を求めるには  $E_b$ 、 $E_a$  を指定する必要がある。そこで、簡単な歩行軌道を考え  $E_b$ 、 $E_a$  を求める。Fig.3-3 ように重心と脚だけのロボットが  $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow e$  と運動するものとする。この場合、支持脚の切り替えは2回行なわれ、 $a \rightarrow b$  間、 $b \rightarrow c \rightarrow d$  間、 $d \rightarrow e$  間の3つの軌道エネルギーを定義する必要がある。

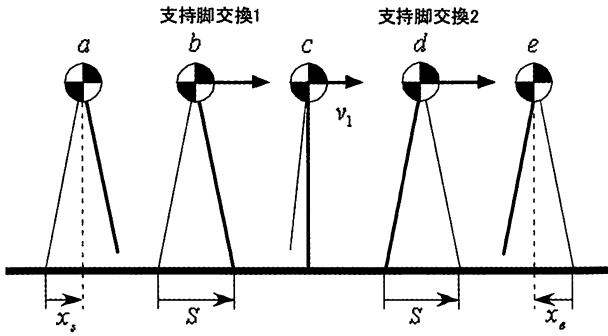


Fig. 3-3 歩行の様子

まず、歩行開始から最初の支持脚切り替え直前まで (a→b 間) の軌道エネルギーは初期速度が 0 なので初期位置  $x_s$  から計算することができる。

$$E_0 = -\frac{g}{2z} x_s^2 \quad (3.12)$$

次に、最初の支持脚切り替え後から次の切り替え直前まで (b→c→d 間) の軌道エネルギーは、重心が支持位置の真上を通過する時の速度 (0 点通過速度)  $v_1$  を決める事で定義できる。

$$E_1 = -\frac{1}{2} v_1^2 \quad (3.13)$$

最後に、2 回目の切り替え後から歩行終了まで (d→e 間) の軌道エネルギーは、歩行終了時に停止するため、停止時の重心位置 (終位置)  $x_e$  によって定義できる。

$$E_2 = -\frac{g}{2z} x_e^2 \quad (3.14)$$

最初の支持脚切り替え条件  $x_{r1}$  は式(3.11)に  $E_0, E_1$  を代入することで求められ、二回目の支持脚切り替え条件  $x_{r2}$  は式(3.11)に  $E_1, E_2$  を代入することで求められる。つまり、初期位置  $x_s, 0$  点通過速度  $v_1, 終位置  $x_e$  を与えることで式(3.12)~式(3.14)より軌道エネルギーを求められ、それらを式(3.11)に適用することで支持脚切り替え条件  $x_r$  が求められる。実際には、この切り替え条件のもとで左右の足が、支持脚の切り替えを繰り返すことになり、支持位置も支持脚切り替えの度に左右交互に切り替わる。$

#### 4. 関節角度の軌道計算 (x-z 平面)

##### 4.1 支持脚の関節角度の計算

この節では、線形倒立振り子モードの運動方程式に基づいた水平方向 (x-z 平面) に移動する重心位

置および支持位置をもとに支持脚の関節角度を求め。各関節角度は Fig.4-1 に示した支持脚の幾何学的モデルから算出する。ここでは、一回目の支持脚交換の前から二回目の支持脚交換の後までを示した Fig.3-3 の b→c→d 間について考える。まず、各パラメータについて定義する。重心位置、膝関節、指示位置をそれぞれ  $L_1(x(t), z_c), L_2(x'(t), z'(t)), L_3(0, 0)$  とする。歩行時の支持位置は支持脚切り替えるため、左右交互に切り替わる。重心の高さは  $z_c$  一定、支持位置から重心までの直線距離を  $L(t)$  とし、指示位置から膝関節までの距離を  $l_1$ 、膝関節から重心位置までの距離を  $l_2$  とする。また、 $l_1$  と  $l_2$  は制御を簡単にするために設計段階で同じ長さにしてあるので  $\triangle L_1 L_2 L_3$  は 2 等辺三角形となる。 $z$  軸と  $L(t)$  の間の角度を  $\phi_1(t)$  とし、 $L(t)$  と  $l_1$  の間の角度を  $\phi_2(t)$  とする。この  $\phi_1(t), \phi_2(t)$  から腰の関節角度  $\theta_1(t)$ 、膝の関節角度  $\theta_2(t)$ 、足首の関節角度  $\theta_3(t)$  を求める。ここで、重心の水平位置  $x(t)$  が正と負の 2 通りの場合が考えられる。したがって、以下の (a), (b) のように計算式が求められる。なお、図より  $L(t)$  は以下となる。

$$L(t) = \sqrt{x(t)^2 + z_c^2} \quad (4.1)$$

(a)  $x(t) \geq 0$  のとき

Fig.4-1(a) から幾何学的に  $\phi_1(t), \phi_2(t)$  を求めると以下となる。

$$\phi_1(t) = \cos^{-1}\left(\frac{z_c}{L(t)}\right) \quad (4.2)$$

$$\phi_2(t) = \cos^{-1}\left(\frac{L(t)}{2l_1}\right) \quad (4.3)$$

これらから図中の  $\theta_1(t), \theta_2(t), \theta_3(t)$  を求めると以下になる。

$$\begin{cases} \theta_1 = -(\phi_2(t) - \phi_1(t)) \\ \theta_2 = 2 \times \phi_2(t) \\ \theta_3 = -(\phi_2(t) + \phi_1(t)) \end{cases} \quad (4.4)$$

(b)  $x(t) < 0$  のとき

Fig.4-1(b) から幾何学的に  $\phi_1(t), \phi_2(t)$  を求めると以下となる。

$$\phi_1(t) = -\cos^{-1}\left(\frac{z_c}{L(t)}\right) \quad (4.5)$$

$$\phi_2(t) = \cos^{-1}\left(\frac{L(t)}{2l_1}\right) \quad (4.6)$$

これらから図中の  $\theta_1(t), \theta_2(t), \theta_3(t)$  を求めると以下になる。

$$\begin{cases} \theta_1 = -(\phi_2(t) - \phi_1(t)) \\ \theta_2 = 2 \times \phi_2(t) \\ \theta_3 = -(\phi_2(t) + \phi_1(t)) \end{cases} \quad (4.7)$$

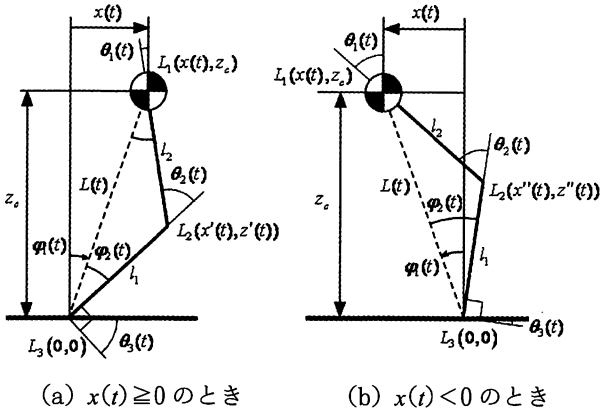


Fig. 4-1 支持脚の幾何学的モデル

#### 4.2 遊脚の関節角度の計算

遊脚についても幾何学上で目標角度を求める。ただし、支持脚とは違い線形倒立振りモードに基づいてはいない。これは線形倒立振りモードの運動が支持脚のみによって重心位置の高さが一定になるような水平運動を実現させられれば良いからである。したがって、遊脚の軌道は支持脚切り替え条件に合わせて自由に設計できる。そこで、本研究では遊脚足首の軌道  $L_6(x_y(t), z_y(t))$  は足上げ高さ  $h$  を最大とする正弦波関数を与えて設計した。膝関節の位置  $L_5(x_{y2}(t), z_{y2}(t))$  は足首の軌道と重心の軌道から求め、それらの位置から幾何学的に  $\theta_4(t)$ ,  $\theta_5(t)$ ,  $\theta_6(t)$  の関節角度を求める。ここでも、前節4.1と同様に重心位置の正負によって二通りの場合が考えられる。Fig.4-2 に  $x(t)$  が正の場合と、 $x(t)$  が負の場合について示す。図より  $L(t)$  は以下となる。

$$L(t) = \sqrt{(x(t) - x_y(t))^2 + (z_c - z_y(t))^2} \quad (4.8)$$

および  $\phi_3(t)$ ,  $\phi_4(t)$ ,  $\theta_4(t)$ ,  $\theta_5(t)$ ,  $\theta_6(t)$  の角度は、重心の水平位置  $x(t)$  の正負によって異なる。したがって、以下の (a), (b) のようになる。

(a)  $x(t) \geq 0$  のとき

$$\phi_3(t) = -\tan^{-1}\left(\frac{|x_y(t) - x(t)|}{z_c - z_y(t)}\right) \quad (4.9)$$

$$\phi_4(t) = \cos^{-1}\left(\frac{L(t)}{2l_1}\right) \quad (4.10)$$

$$\begin{cases} \theta_4 = -(\phi_4(t) - \phi_3(t)) \\ \theta_5 = 2 \times \phi_4(t) \\ \theta_6 = -(\phi_4(t) + \phi_3(t)) \end{cases} \quad (4.11)$$

(b)  $x(t) < 0$  のとき

$$\phi_3(t) = \tan^{-1}\left(\frac{|x_y(t) - x(t)|}{z_c - z_y(t)}\right) \quad (4.12)$$

$$\phi_4(t) = \cos^{-1}\left(\frac{L(t)}{2l_1}\right) \quad (4.13)$$

$$\begin{cases} \theta_4 = -(\phi_4(t) - \phi_3(t)) \\ \theta_5 = 2 \times \phi_4(t) \\ \theta_6 = -(\phi_4(t) + \phi_3(t)) \end{cases} \quad (4.14)$$

以上で水平方向 ( $x-z$  平面) の支持脚、遊脚の関節角度は求められたが、実際は右脚、左脚が交互に支持脚、遊脚となる。したがって、シミュレーションおよび実際の制御では、支持脚切り替えのタイミングで支持脚のデータと遊脚のデータを交互になるように入れ換えることにより、歩行を実現させる。

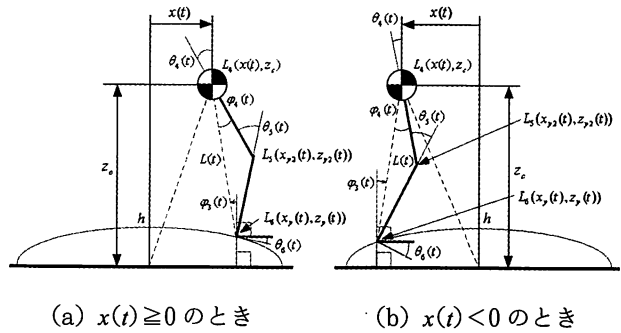


Fig. 4-2 遊脚の幾何学的モデル

#### 4.3 関節角度のシミュレーション ( $x-y$ 平面)

前節で説明した支持脚および遊脚の軌道設計を基にして軌道計算のシミュレーションを MATLAB で行った。その際のロボットの設計パラメータを表 4-1 に示し、シミュレーションのフローチャートを Fig.4-3 に示す。また、シミュレーションした結果を Fig.4-4~Fig.4-6 に示す。Fig.4-4 は腰関節角度 ( $\theta_1, \theta_4$ ) の軌道で、実線が右腰 (RL1)、破線が左腰 (LL1) である。なお、RL1 と LL1 は支持脚切り替え条件により支持脚 (Ⓢ)、遊脚 (Ⓔ) が交互に繰り返される。グラフ上の縦の二点鎖線は支持脚と遊脚を切り替えの境界線である。グラフ上で緩やかな軌道の角度変化を示しているのが支持脚で、急激な軌道の角度変化を示しているのが遊脚である。Fig.4-5 は膝関節角度 ( $\theta_2, \theta_5$ ) の軌道で、実線が右膝 (RL2)、破線が左膝 (LL2) である。腰関節と同様に RL2 と LL2 も支持脚切り替え条件により、支持脚 (Ⓢ)、遊脚 (Ⓔ) が交互に繰り返される。グラフ上で急激な軌道の角度変化を示しているのが

遊脚で、緩やかな軌道の角度変化を示しているのが支持脚である。図中の軌跡の上の頂点の実際の状態は、 $x-z$  平面上においてロボットの重心が支持位置  $L_3(0,0)$  の真上を通過している状態である。Fig.4-6 は足首の関節角度 ( $\theta_3, \theta_6$ ) の軌道で、実線が右足首 (RL3) で破線が左足首 (LL3) である。この図は Fig.4-4 で示した腰関節の軌道の逆の応答を示している。この理由としては、式(4.2)と式(4.5)、式(4.9)と式(4.12)の符号が逆になっているこ

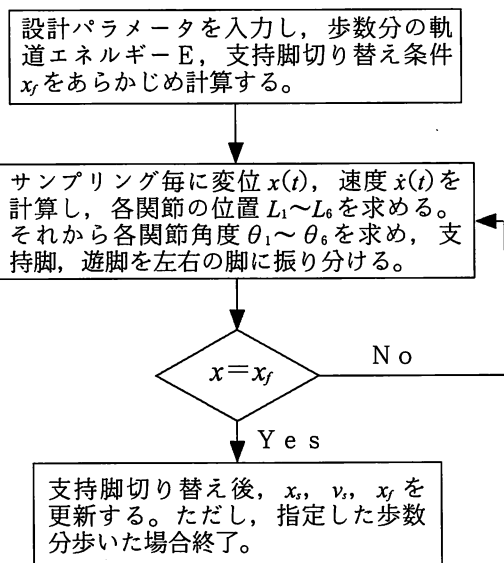


Fig. 4-3 フローチャート

表 4-1 設計パラメータ

重心高さ $Z_c$	0.102 [m]
歩幅 $S$	0.03 [m]
脚上げ高さ $h$	0.02 [m]
初期位置 $x_s$	0.01 [m]
初期速度 $v_s$	0.0 [m]
終位置 $x_e$	-0.01 [m]
0点通過速度 $v_1$	0.05 [m/sec]

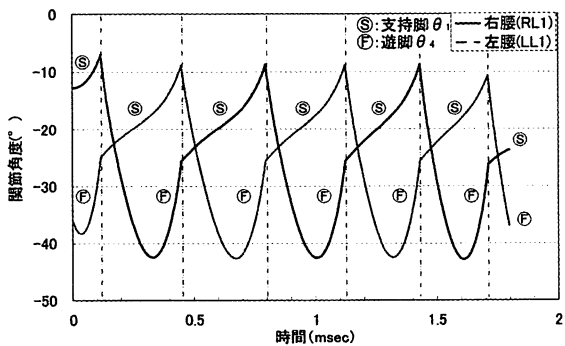


Fig. 4-4 腰の関節角度の軌道

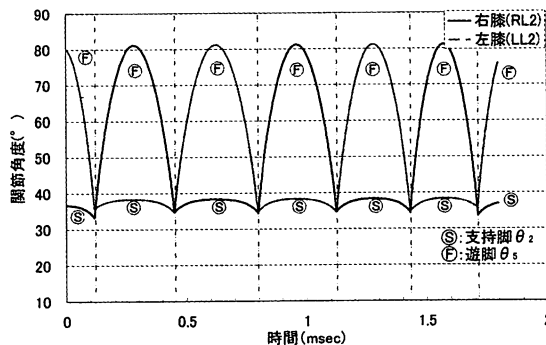


Fig. 4-5 膝の関節角度の軌道

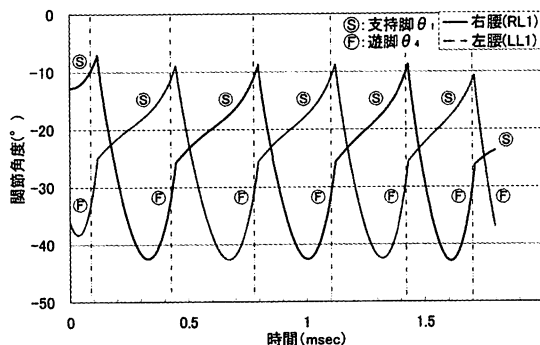


Fig. 4-6 足首の関節角度の軌道

とから明らかである。

## 5. 関節角度の計算 (x-y 平面)

### 5.1 左右への重心移動の設計

二次元線形倒立振り子では理論上、重心移動は水平方向 ( $x-z$  平面) の軌道の設計である。しかし、二足歩行の重心移動は水平方向ばかりでなく、左右方向 ( $x-y$  平面) の重心移動を行う必要がある。したがって、前章で述べた  $x-z$  方向の重心移動に合わせた  $x-y$  平面の重心移動のための軌道設計を考える。Fig.5-1 には  $x-y$  平面のロボットの幾何学的モデル図を示す。図中の  $\alpha(t)$  は腰および足首の関節の角度で、回転方向が逆になっている。本研究では  $x-y$  方向の重心移動の軌道は最初に加速し、重心が支持脚に乗るまでに減速するような関数を考え設計した。設計した関数を以下の式(5.1)、式(5.2)に示す。ただし、 $1 < a \leq 2$  であり、 $a, b$  は任意の定数で軌道の加減速に関するパラメータである。また、 $\alpha_{max}$  は最大重心移動角度であり、この設計パラメータによりどれだけ左右に重心移動させるかを決定する。次章で説明するが、設計パラメータ  $a, b, \alpha_{max}$  が、実際の動歩行に対して影響を与える。なお、二つの対称な式を用いるのは、左右の重心移動

の一周分分の軌道を生成させるためである。また、式(5.3)の  $\tilde{x}(t)$  は、一歩にかかる時間  $t_i$  間に  $-1$  から  $1$  まで増加する関数である。なお、一歩とは Fig. 3-3 に示した歩行動作状態である  $b \rightarrow d$  の動作を示している。

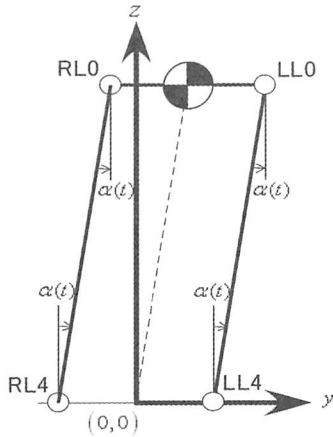


Fig. 5-1 左右の重心移動

i)  $y$  軸が正の領域の場合

$$\alpha(t) = \left( a - (a-1) \times \frac{e^{(\tilde{x}(t) \times b)} + e^{(-\tilde{x}(t) \times b)}}{2} \right) \times \alpha_{\max} \times \frac{\pi}{180} \tag{5.1}$$

ii)  $y$  軸が負の領域の場合

$$\alpha(t) = - \left( a - (a-1) \times \frac{e^{(\tilde{x}(t) \times b)} + e^{(-\tilde{x}(t) \times b)}}{2} \right) \times \alpha_{\max} \times \frac{\pi}{180} \tag{5.2}$$

$$\tilde{x}(t) = \frac{2t}{t_i} - 1 \tag{5.3}$$

5.2 関節角度のシミュレーション ( $x-y$  平面)

$x-y$  方向の重心移動に関する式(5.1), 式(5.2)に基づいて設計した腰関節, 足首関節のシミュレーションを MATLAB で行った。例として  $a=1.1, b=3.1,$

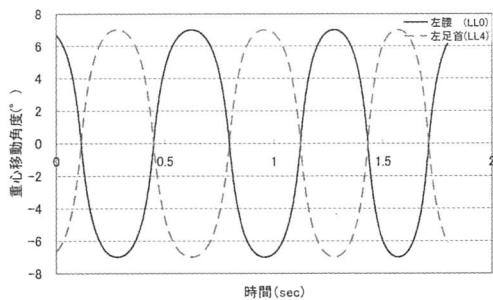


Fig. 5-2 左脚の重心移動の軌道

$\alpha_{\max}=7$ とした場合の左脚の重心移動の軌道を Fig.5-2 に示す。Fig.5-1 で示したように左右の関節角度は同期しているので右脚も同様な軌道となる。なお、図中の実線は腰の関節角度 (RL0) 軌道, 破線は足首の関節角度 (LL0) の軌道を示している。

6 実機による実験と検証

6.1 二足歩行の実験

4章で軌道設計した  $x-z$  平面の重心移動, および5章で軌道設計した  $x-y$  平面の重心移動の軌道をあらかじめ MATLAB で求め, 各関節の角度をサーボモータに与えるために, PC 上で実行プログラムを実行し, 二足歩行ロボットの歩行実験を行った。このときの各パラメータを表 6-1 に示し, Fig. 6-1 には  $x-z$  方向からの歩行の連続写真を示す。

表 6-1 設計パラメータ

重心高さ $z_c$	0.102 [m]
歩幅 $S$	0.03 [m]
脚上げ高さ $h$	0.02 [m]
初期位置 $x_s$	0.01 [m]
初期速度 $v_s$	0.0 [m]
終位置 $x_e$	-0.01 [m]
0点通過速度 $v_1$	0.05 [m/sec]
パラメータ $a$	1.1
パラメータ $b$	3.1
パラメータ $\alpha_{\max}$	7.0 [°]

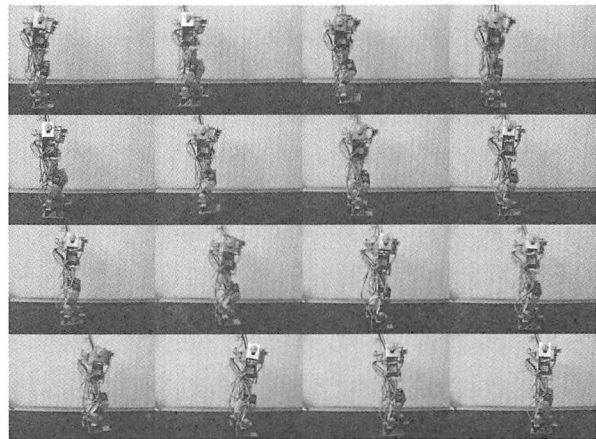


Fig. 6-1 歩行動作の確認実験

この歩行実験で, 歩行時のバランスは  $x-y$  方向の軌道を拘束する式(5.1), 式(5.2)の設計パラメータ  $a, b$  および  $\alpha_{\max}$  によって影響されることが確認された。次節では, これらの設計パラメータの歩行

への影響について検証した。

### 6.2 重心移動の比較 (x-y平面) と検証

Fig.6-1で示した二足歩行ロボットの歩行実験は式(5.1), 式(5.2)における設計パラメータを調節することにより, 安定した動歩行を実現させた場合であるが, ここでは, 安定した動歩行を検証するために, 設計パラメータ  $a$ ,  $b$  および  $\alpha_{max}$  を様々に変えて歩行動作の比較, 検討を行った。特に設計パラメータ  $a$ ,  $b$  は左右の重心移動の加減速に関わるパラメータであり, その組み合わせ値を表6-2に示す。前節で設定した設計パラメータを基準の③とし, 番号が小さい程, 左右の重心移動の加減速が大きい軌道で, 番号が大きい程, 左右の重心移動の加減速が小さな軌道を示している。また, Fig.6-2には, 設計パラメータである最大重心移動角度  $\alpha_{max}=7$  で一定とし, 表6-2に示した設計パラメータ  $a$ ,  $b$  の組み合わせにおいて, 左右方向の軌道を比較した図を示す。図の横軸は時間軸であるので, 曲線の立ち上がりが必要な程, 加減速が大きいことを表している。この軌道で動作させた場合, ③の  $a$ ,  $b$  の組み合わせが一番安定した歩行動作を得られた。①の組み合わせは, 時々ロボットが転倒する状況が見られた。

表6-2 設計パラメータ  $a$ ,  $b$  と軌道の関係

番号	軌道の種類	$a$	$b$
①	加減速を大きくした軌道	1.001	7.6
②	加減速をやや大きくした軌道	1.05	5.3
③	基準の軌道	1.1	3.1
④	加減速をやや小さくした軌道	1.5	1.76
⑤	加減速を小さくした軌道	2	1.32

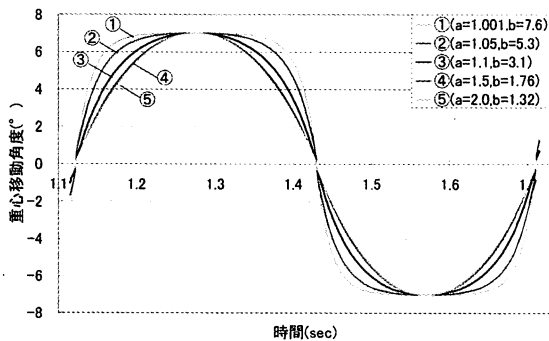


Fig. 6-2 左右の関節軌道の比較 ( $a$ ,  $b$ )

次に, この設計パラメータ  $a$ ,  $b$  の組み合わせに適した最大重心移動角度  $\alpha_{max}$  の最適値を設定することを検討した。この  $\alpha_{max}$  の最適値の決定は, 実際にロボットを動作させ歩行実験を行い, ロボット

の揺れ等から判断し決定した。その結果を表6-3に示す。ここで,  $\alpha_{max}$  の物理的意味は左右の重心移動角度の最大振幅を示しており,  $\alpha_{max}$  が大きいほど左右への重心移動量が大きいことを表している。この結果を Fig.6-3 に示す。図より, 左右の軌道の加減速が大きい①, ②の場合は, 最大重心移動角度  $\alpha_{max}$  が小さい方が安定した二足歩行動作を得られ, 逆に左右の軌道の加減速が小さい④, ⑤の場合は,  $\alpha_{max}$  が大きい方が安定した二足歩行動作を得られた。このことより, 加減速を大きくした軌道は, 左右への重心移動時の横方向への慣性力が強まり, 最大重心移動角度は小さくする必要がある。なお, あまり加減速を大きくしすぎると, 安定性が損なわれ転倒しやすくなる。逆に加減速が小さな軌道は左右への重心移動時の慣性力が弱まるので, ある程度, 最大重心移動角度を大きく設定する必要があるが, 比較的安定しやすくなる。

表6-3 最適な設計パラメータの組合せ

軌道の種類	$a$	$b$	$\alpha_{max}$
①	1.001	7.6	6.0
②	1.05	5.3	5.5
③	1.1	3.1	7.0
④	1.5	1.76	7.5
⑤	2	1.32	8.0

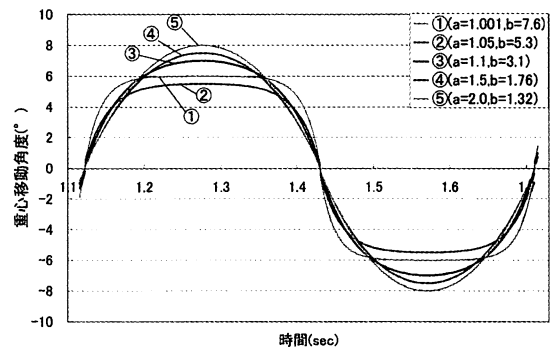


Fig. 6-3 左右の関節軌道の比較 ( $a$ ,  $b$ ,  $\alpha_{max}$ )

## 7 結 言

本研究では, 二次元線形倒立振子を用いた動歩行制御の検討をした。前後方向および左右方向への重心移動の軌道を設計し, この重心軌道から支持脚および遊脚の各関節角度を導出した。また, 左右方向の軌道関数における設計パラメータを変化させた場合の歩行動作への影響について検証した。その結果をまとめると以下のことが言える。

- (1) 2次元線形倒立振子を用いた動歩行制御は有効



であり、また、提案した遊脚の軌道も有効であることが確認できた。

- (2) 線形倒立振子モードに基づいた水平方向 ( $x-z$  方向) の軌道に同期した左右方向 ( $x-y$  方向) の軌道に対して軌道関数を設計し、その有効性を確認した。
- (3) 左右方向に関する軌道関数の設計パラメータ  $a$ ,  $b$  および  $\alpha_{\max}$  の調整が歩行の際の安定性に大きく影響することが確認できた。つまり、左右の軌道の加減速の緩急により、最大重心移動角度を調節する必要がある。

今後の課題としては、歩幅や足上げ高さを変化させた場合の歩行への影響、足裏の形状や材質を変化させた場合の影響などについて、さらに検討する必要がある。

## 参考文献

- 1) 梶田 秀司 著, ヒューマノイドロボット, オーム社, (2005), p.103-p.115
- 2) 梶田 秀司 著, 線形倒立振子モードを規範とする動的2足歩行ロボットの実時間制御, 機械技術研究所報告第171号 (1996)
- 3) 南 裕樹 著, 二足歩行ロボットによる実動的歩行について, 機械学会関西学生会卒業研究発表講演会, p.17-5 (2003)
- 4) ROBO-ONE 委員会 著, ROBO-ONE のための二足歩行ロボット製作ガイド, オーム社 (2004)