

# 小型二足歩行ロボットの製作 ～総合制作実習における取り組み～

関東職業能力開発大学校

西島 俊治

Fabrication of the Small Biped Walking Robots as a Subject of Comprehensive Production Training

Toshiharu NISHIJIMA

**要約** 総合制作実習の課題として2台の二足歩行ロボットを製作した。1台はマイコンを搭載し、自立歩行を目指したロボット、もう1台は音声認識ICを搭載し、簡単な音声認識・再生を目指したロボットである。これらを用いて、前進歩行、横移動歩行および音声認識によるロボット制御を行った。前進歩行は、歩幅約7cm、速度約1.9cm/s、横移動歩行は、歩幅約2.2cm、速度約0.6cm/sであった。前進時のロボットの歩行状態は、ロボット胸部内に取り付けた2個の角速度センサから得られたデータから角度を計算し、ロボット歩行時の傾き角をグラフ化することにより示した。

## I はじめに

2005年の愛知万博の開催時には、ヒューマノイドロボットが大変人気を博していた。日本のロボットは、ホンダのASIMO<sup>(1)</sup>をはじめ世界に先行しており、将来の福祉分野での活用を含め実用化が期待されている。二足歩行ロボットによる格闘競技大会のROBO-ONE<sup>(2)</sup>に代表される小型二足歩行ロボットのパフォーマンスの進化は目を見張るものがある。このような情勢からか学生もロボットを作りたいという要望が多い。ロボット製作は、加工技術や制御するためのプログラム制作知識など多くの要素を含んでおり、専門課程の総合制作において有意義なものであると考えて実践している。

2005年度の総合制作で取り組んだ本大学校専門課程の学生は、ROBO-ONEなど競技の参加を目指すものではなく、アミューズメントを目的とするロボットの製作を希望していた。そこで、C言語やVisual Basic言語（以降、VB言語）の学習も兼ねることをねらいとして総合制作実習の課題を設定した。

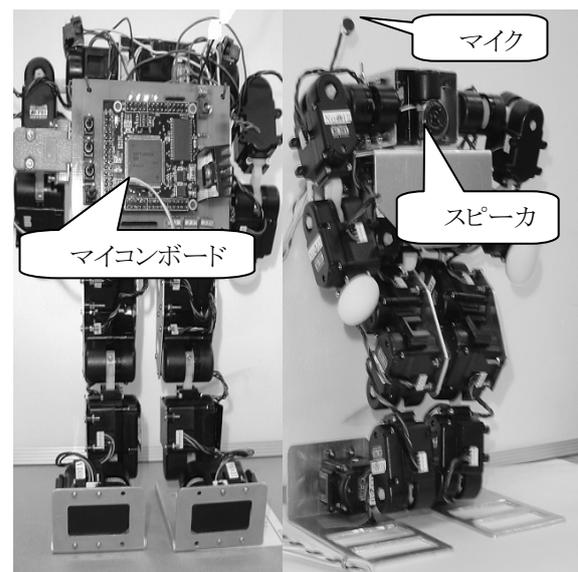
本稿は、2005年度専門課程の総合制作で取り組んだ2台の二足歩行ロボットの製作<sup>(3)</sup>についての報告である。1台はマイコンを搭載し、自立歩行を目指したロボット、もう1台は音声認識ICを搭載し、簡単な音声認識・再生を目指したロボットである。また、

関東ポリテックビジョンにおいて学生が展示・実演した結果について報告する。

## II 小型二足歩行ロボット

### 1. ロボットの概要

図1は二足歩行ロボットの外形写真で、マイコン制御型（同図(a)、以降、タイプ1）とパソコン制御型（同図(b)、以降、タイプ2）を示している。どちらのロボッ



(a) タイプ1背面写真 (b) タイプ2前面写真

図1 小型二足歩行ロボット外形写真

とも、頭部、胸部、腕部および足部などで構成されており、全高約24cm、全幅約19cm、足裏長10.5cm、足裏幅6.5cmである。また、タイプ1の質量約1.2kg、タイプ2の質量約1.1kgである。

図2は、マイコンボードを搭載した基板とタイプ1ロボットとの信号の流れを示したものである。製作した基板上には、マイコンボード、LED出力回路、図3に示すスイッチ入力回路およびアナログセンサ入力回路がある。マイコンは、ルネサステクノロジ社製のSH7145Fで32ビットRISC型CPU、256kバイトのROM、8kバイトのRAMを内蔵している。スイッチ入力と出力LEDはそれぞれ4個使用し、二足歩行、デモプログラムおよび動作確認用に用いた。アナログ入力は、角速度測定用にジャイロセンサ2個、前後左右の物体検知用に赤外線センサ4個を取り付け、合計6個使用した。マイコンによる計測は、サンプリング周波数50MHzで、マイコンタイマーを利用してサンプリングしている。

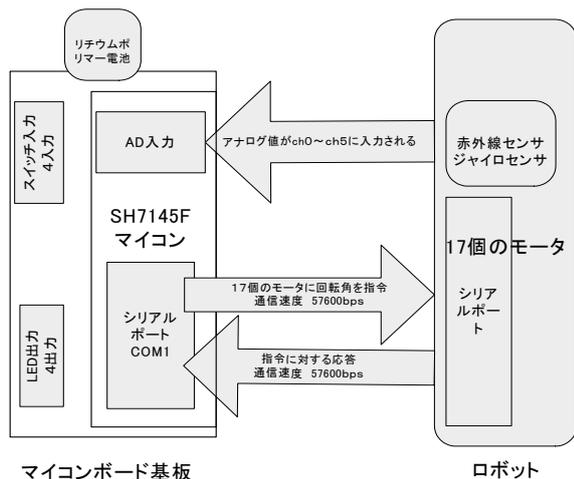


図2 タイプ1ロボットの信号の流れ図

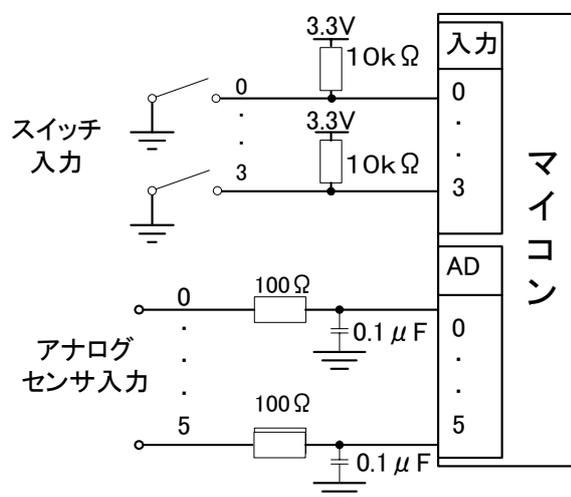


図3 入力回路 (タイプ1に搭載)

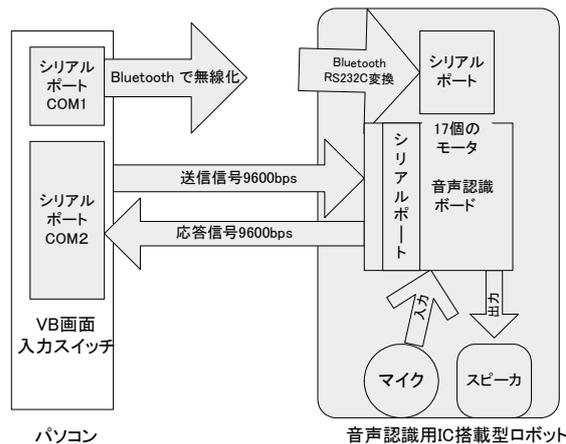


図4 タイプ2ロボットの信号の流れ図

タイプ1ロボットの電源には、質量約80gのリチウムポリマー電池(7.4V1250mAh)を1個使用した。また、マイコン用3.3Vとジャイロセンサ (Silicon Sensing Systems Japan製CRSO3)や赤外線センサ (シャープ製 PSD) 用5Vの電圧は、この電源電圧から降圧して必要電圧を得た。この回路に使用したシリースレギュレータICは、ROHM社製BA05TとBA033TのICである。

図4は、パソコンと音声認識・再生ボードを搭載したタイプ2ロボットとの信号の流れを示したものである。パソコンは自作のもので、CPU133MHz、2つの通信ポート(COMポート)を搭載し、OSはWindows Meである。通信ポートの1つは、ロボット制御用にBluetoothを使用し、RS232C信号を無線化して通信を行っている。この無線化モジュールは、ベストテクノロジー社製のBluetooth (BTX022P)で、RS232C信号に対応しており、2.4GHz帯の無線を利用し、通信距離最大約10mの距離において使用できる。通信を受けるロボット側も同様にBluetoothを搭載し、無線化された信号を受信し、RS232C信号に戻す仕組みになっている。パソコン側のもう1つの通信ポートは、ロボットのRS232Cコネクタに接続され、図5に示すRS232Cインタフェース回路を通してロボット側の音声認識・再生モジュールの制御を行う。この時RS232C通信を行うために製作したインタフェース回路には、通信用ICのMAX232ACを使用した。

図5中に示すタイプ2ロボットの背中に搭載された音声認識ボードには、アルファプロジェクト社製のSRM-10Pを使用した。音声入力に必要なコンデンサマイクには、Knowles Acoustics社製 (MD9745APZ-F)を、音声出力に必要なスピーカには、フォスター電機社製の直径20mmのマイクロスピーカ (334495)を、

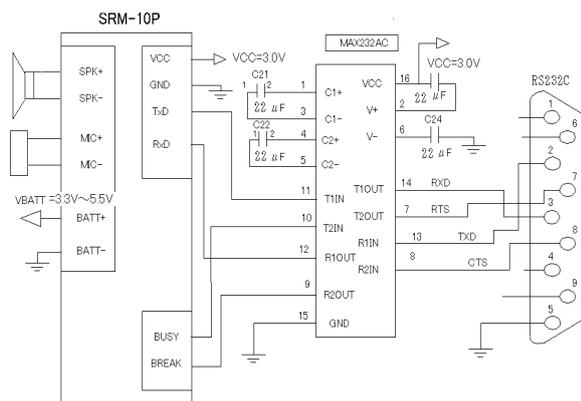


図5 音声認識とRS232Cのインタフェース回路  
(タイプ2に搭載)

図1 (b) に示すタイプ2 ロボットにそれぞれ搭載した。タイプ2 ロボットの電源には、菊水電子工業社製の直流安定化電源 (PMM18-2.5DU) を使用し、ロボットから離れた位置から有線で接続している。

タイプ1 とタイプ2 のロボットには、どちらもベストテクノロジー社製のモータ (AIMotor-701) を17個使用した。このモータの機械的仕様は表1 に示す通りで、ラジコン用のサーボモータなどのハイパワー・高速というコンセプトとは異なっている。このモータは貴金属ブラシ使用のDCモータで、UART(Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) 信号のシリアル通信によりモータ制御ができ、複数のモータ制御が容易である。

表1 AI Motor-701 仕様

質量	サイズ	ギア比	最大トルク
40g	51.6×34.3×37.1mm	1/187	7kg・cm

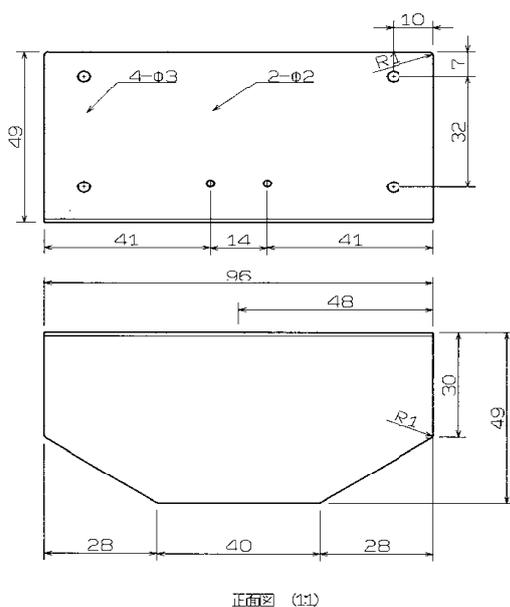


図6 胴体パーツのCAD図面

両タイプのロボットは、前年度 (2004年度) の総合制作で製作されたロボット<sup>(4)</sup> やベストテクノロジー社製のロボット<sup>(5)</sup> を参考に組み立てられた。組み立てに必要な頭部パーツ、背中パーツ、胴体パーツ、膝パーツおよび足パーツは、予めCADで設計し、工作機械などでアルミ板を加工して作られた。図6は、製作された共通のロボットの胴体パーツのCAD図面の一部で、ダッソー・システムズ社製のCADソフトウェアCATIA V5を使用して作成された。

## 2. ロボットによる歩行動作

歩行とは、二脚による移動のうち常にどちらかの足が接地して歩くことである。二足歩行を行うには、静歩行と動歩行の考え方がある。このうち重心投影点が支持脚多角形内をはずれることのないものを静歩行と呼び、重心投影点が支持多角形を外れる期間のあるものを動歩行という<sup>(6)</sup>。支持脚多角形とは、梶田らによるとロボットが床面に接触している点すべてを外側からゴムひもで囲った場合にできる領域をいう<sup>(6)</sup>。

本報告でロボットに行わせる歩行は、静歩行である。歩行動作は、片足を上げて前に出す間体重はずっと後ろの足にかかったままで、前に出した足が地面についたところでようやく前の足に重心移動する動作の繰り返しになる。このため、静歩行は転ぶことは少ないが、ゆっくりとしか歩けない。

## 3. プログラム制御

プログラム言語としては、タイプ1のマイコン制御にはC言語を、タイプ2のパソコン制御にはVB言語を使用した。タイプ1は、作成したプログラムをマイコンの内蔵フラッシュROMへ転送する。転送方法は、マイコン基板上にあるRS232CインタフェースとパソコンのRS232Cを接続することによるシリアル転送である。複数のモータを指定速度で任意の位置に移動させるため、両タイプとも表2に示すトルクの大きさの設定、モータ数、17個のモータの角度データおよび前後のコマンドを加えたバイト数でパケット通信できる関数を作成し、モータの回転動作を確認した。

次に、ロボットの二足歩行動作のプログラム制作について説明する。

表2 モータを動作させる設定値

1byte	1byte	17 byte
トルクの大きさ 設定	モータ数	17個の各モータ の角度データ

最初に、Easy Motion Programmer<sup>(5)</sup> による必要位置モーションデータの取得とモーション実行による動作確認を行う。つぎにパソコンによるプログラム作成を行う。

タイプ1の場合は、C言語で書かれたプログラムをコンパイルし、マイコンに転送する。ロボット制御用のRS232C通信は、タイプ1は有線接続で、タイプ2は無線化して行っている。この時のモータ制御用通信フォーマットは、非同期、スタートビット1、ストップビット1、パリティ無し、データビット8、通信速度57600bpsで行う。

歩くパターンを作るには、ロボットの各姿勢を小間切れにつくり、その姿勢間をバランスよくつなげる必要がある。すなわち、17個のモータが目的位置まで回転するためには、それぞれのモータをバランスよくスピード調節する必要がある。このため、PWM制御に似た制御方法を行う関数を作成した。目的位置までの回転角度が最大のモータが回転完了するまでは、すでに目的角まで到達したモータは停止 (OFF 状態) する制御方法である。例えば目的の位置まで100分割した場合、それぞれのモータ角が1/100の角度に対してモータがスタート (ON) し、早く目的角まで到達したものからストップ (OFF) する。すなわち早く目的の角度に達したもののほどモータのONとOFFのデューティ比が小さくなる。このため回転速度も遅くなる。この関数は分割数と待ち時間の2つのファクターにより、モーションのなめらかさやスピードを調節することが出来る。これにより、各モータ間の補間が行われ、静歩行ではあるが平らな面において二足歩行を行うことができる。

#### 4. 音声認識モジュールとロボット制御

音声認識とは、人間の発する声をコンピュータに認識させる機能であり、決まった人の声のみに反応する特定話者認識と万人の声に反応する不特定話者認識がある。このモジュールをロボット本体に取りつけ、“こんにちは”、“さようなら”などの言葉を認識する音声認識、“おはようございます”、“認識を開始します”などの音声再生をロボットの動作と関連するようにした。

音声認識モジュール<sup>(7)</sup>には、ニューラルネットワーク技術を使ったセンサリー社の音声認識・音声合成ICを搭載しており、大きさ36mm×36mmと小型軽量で、ロボットに搭載が容易である。このモジュールのコントロールは、表3に示す4バイトのコマンドのほかに

表3 話者認識パケット構成

##### (1) コマンドパケット

不特定 or 特定 認識コマンド	認識レベル/ グループ番号	タイム アウト	END
---------------------	------------------	------------	-----

##### (2) 応答パケット

不特定 or 特定 認識コマンド	エラー コード	認識 番号	END
---------------------	------------	----------	-----

前後に認識開始と確認用の2バイトを加えた6バイトのパケット通信で行う。通信フォーマットは、スタートビット1、ストップビット1、パリティ無し、データビット8で、通信速度9600bpsである。また、このモジュールの音声ICチップへの音声録音は、アルファプロジェクト社製SRM-10Pスターターキットを使用して行った。

音声認識の基本プロトコルは次のようになっている。最初に表3(1)に示すようなコマンドパケットをパソコンのCOMポートより送信する。つぎに、音声入力を行う。その後、音声ICチップからのコマンドの有効、無効信号をチェックする。有効であれば再度表3(2)に示すような応答パケットを受信し、認識番号を確認する。この認識番号でどの言葉を認識したかを判断し、応答する言葉や手を振るなどのロボット動作を行う。

### III 実験方法

#### 1. 歩行実験

歩行実験はタイプ1のロボットで、前進歩行および横移動歩行について行った。タイプ2については、歩行実験は実施していない。

前進歩行時のロボット姿勢についての実験では、ロボット胸部内の空洞部中央にお互いに垂直になるようにセットされた角速度センサ2個により、左右の回転角速度と前後の回転角速度について測定した。このとき同時に、ロボット動作の前方からカメラ (ソニー製 Cyber-Shot DSC-P 8) により映像を撮影した。

歩行測定実験は、ロボットが2歩前進する間のデータを40ミリ秒毎の一定間隔でマイコンに取り込み計測した。ここで得られた角速度データから角度を求めるために、数値積分法を用いた。数値積分には、(1)式の台形則および(2)式のシンプソン則<sup>(8)</sup>を使用して面積を求める。

$$S_{mD} = \frac{h}{2} \{f(t_k) + f(t_{k+1})\} \quad \text{--- (1)}$$

$$S_{nS} = \frac{h}{3} \{f(t_{k-1}) + 4f(t_k) + f(t_{k+1})\} \quad \text{--- (2)}$$

ただし、 $S_{mD}$  :  $k$ 番目から $k+1$ 番目までの台形面積  
 $S_{nS}$  :  $k-1$ 番目、 $k$ 番目、 $k+1$ 番目の相隣り合う3点を通る2次曲線でその区間を近似して求めた面積  
 $h$  : サンプル間隔(40ms)  
 $f(t_{k-1}), f(t_k), f(t_{k+1})$  :  $k-1, k, k+1$ 番目の角速度サンプリングデータ

台形則を使用した場合の面積は、時間  $t_k$  と  $t_{k+1}$  の2個の角速度データから40ミリ秒間に増加した角度を表す。また、シンプソン則を使用した場合の面積は、時間  $t_{k-1}$  から  $t_{k+1}$  の3個の角速度データから80ミリ秒間に増加した角度を表す。それぞれの時間における角度データは、過去の角度データに増加分の角度を加えることによって近似的に求める(3)式および(4)式を使用した。

$$\theta_{2nD} = S_{mD} + \theta_{(2n-1)D} \quad \text{--- (3)}$$

$$\theta_{nS} = S_{nS} + \theta_{(n-1)S} \quad \text{--- (4)}$$

ただし、 $\theta_{2nD}$  : 台形則使用による $2n$ 番目の角度  
 $\theta_{(2n-1)D}$  : 台形則使用による $(2n-1)$ 番目の角度  
 $\theta_{nS}$  : シンプソン則使用による $n$ 番目の角度  
 $\theta_{(n-1)S}$  : シンプソン則使用による $(n-1)$ 番目の角度

(3)式による角度の求め方は、40ミリ秒間隔の2つの角速度データから台形則を使用して得た増加分の角度  $S_{mD}$  を1つ前の角度  $\theta_{(2n-1)D}$  に加えることにより得る方式である。(4)式による角度の求め方は、40ミリ秒間隔で得た3つの角速度データからシンプソン則を使用して80ミリ秒間に得た増加分の角度  $S_{nS}$  を1つ前の角度  $\theta_{(n-1)S}$  に加えることにより得る方式である。ここで、双方の同じ時刻の角度データは、シンプソン則使用における $n$ 番目に対して台形則使用では $2n$ 番目で表される。

## 2 音声認識とロボット動作実験

本実験は、単語だけの認識ではあるが、ロボットに話しかけるとロボットが音声で応答し、一連の動作を起こすプログラムを作成することを目的として行った。実験順序は次のように行った。

最初、VB言語プログラムで作成したコンピュータ画面で、特定話者、不特定話者を選別する。次に、スタートボタンを押し、“認識を開始します”の合図を確認した後、ロボットの頭上に飛び出しているマイク

に向かって決められた言葉を丁寧に発し、音声認識を確認した。

特定話者認識では、前もって学生の声で登録されている“前進”と“後退”、不特定話者認識においては、すでにメーカー側で登録されている“しゅうりょう”、“おはよう”、“こんにちは”および“さようなら”などについて音声認識を確認する。

その後、学生が発声する“おはよう”、“さようなら”、“前進”および“後退”に合わせた右手を振る、左手を振る、1歩前進、1歩後退のロボット動作や“おはよう”、“さようなら”、“まえ”および“うしろ”の音声による応答を確認する。

## IV 結果と検討

### 1 歩行実験

タイプ1ロボットに対して行った二足歩行の結果は、前進歩行では歩幅約7cm、速度約1.9cm/sであった。また、横移動歩行は、歩幅約2.2cm、速度約0.64cm/sとなった。

タイプ1ロボットの歩行時の角速度データの計測結果は、マイコンメモリより取り出し、図7および図9のように前後および左右の回転方向の角速度と時間の関係でグラフに示した。図8および図10は、図7および図9の角速度データから数値積分して求めた角度と時間の関係を示している。図8および図10中の実線で示しているものは台形則で、点で示してあるものはシ

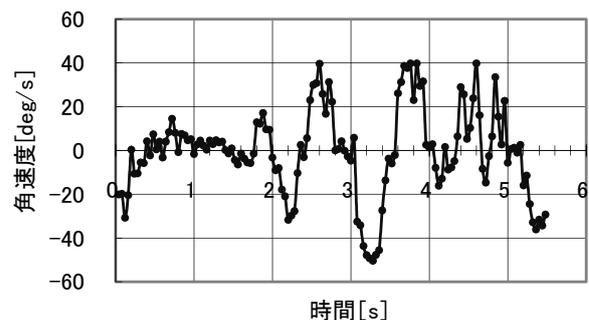


図7 角速度と時間の関係 (前後)

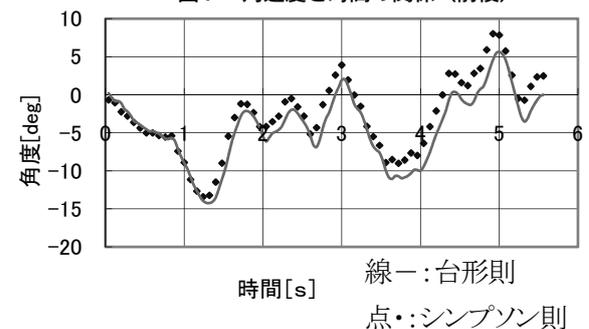


図8 角度と時間の関係 (前後)

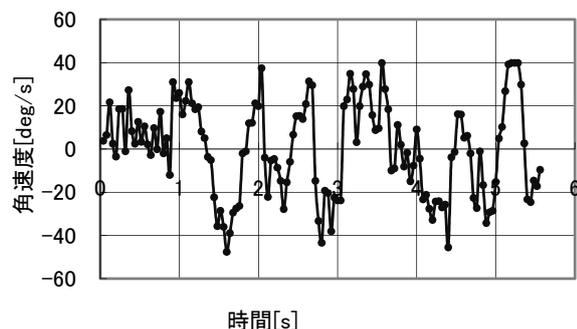
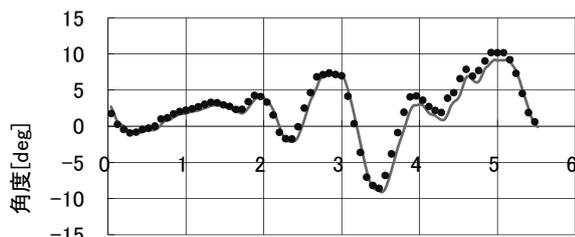


図9 角速度と時間の関係 (左右)



線—:台形則  
点・:シンプソン則

図10 角度と時間の関係 (左右)

ンプソン則で求めたものである。この時の計測スタート時のロボットの初期角度が3.5度のため、左右の角度を算出する数値積分時の初期値を3.5度として計算した。

また、ロボット動作を前方から撮影した画像より得られた左右の傾き角は、ほぼ均等に最大約9度であった。この値と図10で示される最大の傾き角とは概ね一致した。

図8および図10の角度データより、ロボットの姿勢は次のようになる。最初、左に約3.5度傾いた位置 ( $t = 0$  秒) よりスタートする。次に、右側に傾きながら右足に重心を移動し ( $t = 0.3$ 秒辺り)、左足を上げ、体は後方に傾斜しながら足は前方に踏み出す ( $t = 1.3$ 秒辺り)。少し遅れて後足に重心がある状態から前後に揺れながら前進方向に重心が移る。その後、左側に傾きながら左足に重心を移動し ( $t = 2.9$ 秒辺り)、右足を上げ、体は後方に傾斜しながら足は前方に踏み出す ( $t = 3.7$ 秒辺り)。少し遅れて後足に重心がある状態から前後に揺れながら前進方向に重心が移る。この動作を繰り返すことが分かる。

今回用いた数値積分法で求めた角度は、図8および図10の結果より、概ねどちらの式を用いても同じような結果になることが分かる。

以上の結果より、ロボットの歩行時に一定時間毎にセンサから角速度データを取り込み、その値を数値積分することで角度データも同時に取得でき、前後左右

の傾き角により歩行状態を示せることが分かる。

## 2 音声認識とロボット動作実験

タイプ2ロボットに対してVB言語で作成したプログラムによる音声認識とロボット動作について実験を行った。

特定話者認識では、学生の声で登録した“前進”と“後退”、不特定話者認識では、“しゅうりょう”、“おはよう”、“こんにちは”および“さようなら”などについて認識できた。

次に、学生が発声する“おはよう”、“さようなら”、“前進”および“後退”に合わせた“おはよう”、“さようなら”、“まえ”、“うしろ”とスピーカから発する音声による応答を確認した。また、その音声に続いて右手を振る、左手を振る、1歩前進、1歩後退のロボット動作を行うことができた。

本実験では、単語だけの認識ではあるが、ロボットに話しかけるとロボットが音声で応答し、一連のロボット動作を起こすことを目的とした。学生はこの過程を通して、マニュアルの読み方、インタフェース基板の設計の仕方および通信フォーマットからのプログラム作成などを主に理解したと思われる。

## V 関東ポリテックビジョンにおける実験

2006年2月関東職業能力開発大学校で開催された関東ポリテックビジョンの展示室には、専門課程全科の総合制作課題の展示ブースが設定され、参加された一般市民の方々に対して展示や実演をした。本課題は、その時に展示・実演したもので、(1)タイプ2ロボットでは、音声認識によるロボット動作と音声再生実演、(2)タイプ1ロボットでは、長方形の立て看板のような障害物をつくりロボットが認識するまで前進し、認識後左右の障害物がない場合左移動し、障害物を避けて移動する実演、の2点について行った。

結果として(1)については、観客が多い場合、まわりの話し声などの音声がかなり大きくなり、マイクから雑音として入ってしまう。このため、音声による認識がかなり困難になることが判明した。この対策としては、マイクをロボットに直接つけるのではなく、雑音の影響が少ない位置から音声を無線で送信して受信するような仕組みが必要ではないかと考えられる。

(2)については、二足歩行の不安定さが増し転倒する回数が増した。この理由は、歩行データを作成した実験室のテーブル上と展示会場の床とでは摩擦や傾き

などに微妙な違いがあるために起こったのではないかと思われる。また、ロボットは、歩行動作を繰り返して実演すると、搭載されている電池の電源電圧の低下が生じ、各モータのトルクが変わるせいか全体のバランスがとれなくなり倒れてしまう。この時搭載した電池は、連続では5分程度の連続パフォーマンスで電圧降下が発生し、10分程度で交換や充電が必要になった。

## VI おわりに

学生の希望に沿ってテーマを設定し、取り組んだ総合制作であった。結果として、放課後など時間外においてもロボットの調整や基板づくりなどを自分たちの時間に合わせて積極的に取り組む姿やロボットに愛着を持って接している学生の姿が見受けられた。また、実践してみて初めて気づくこともあり、マイコンやパソコンプログラミング、アルミ板の加工、インタフェース基板の製作などを通して学習効果が上がったのではないかと思われる。総合制作実習の報告書でも貴重な体験で勉強になった旨の報告が記載されていた。

製作したロボットは、2006年5月27、28日の栃木県小山市のおやまブランドまつりに参加し、学生による展示・実演を行うことができた。

最後に、2005年度総合制作で本稿のロボット製作に取り組んで頂いた専門課程2年生（当時）の竹下泰弘君、星野潤君および三森潤二君に感謝致します。

## [参考文献]

- (1) 本田技研工業株式会社ホームページ  
<http://www.honda.co.jp/ASIMO/>
- (2) ROBO-ONE OFFICIAL SITE  
<http://www.robo-one.com/>
- (3) 竹下泰弘、星野潤、三森潤二、AIモータによる二足歩行ロボットの製作、関東職業能力開発大学校 制御技術科総合制作実習中間発表会予稿集、2005年、P7
- (4) 植野 裕 他、二足歩行ロボットの製作、関東職業能力開発大学校制御技術科 総合制作実習発表会予稿集、2005年、P5-6
- (5) ベストテクノロジーホームページ  
<http://www.besttechnology.co.jp/>
- (6) 梶田秀司 他、ヒューマノイドロボット、オーム社2005年、P66、P103
- (7) 音声認識・音声再生モジュールSRM-10ハードウェアマニュアル、アルファプロジェクト社
- (8) 児島紀男 他、パソコンBASIC数値計算 I、東海大学出版会、1991年、P140-158