

## 二足歩行ロボットを制御する組み込みソフトウェア教材の開発

## Development of Teaching Materials for Embedded Software Controlling a Two-Legged Robot

玉真 昭男\*, 今釜 光輔\$

Teruo TAMAMA and Kousuke IMAKAMA

Abstract: Shortage of embedded software engineers is becoming serious in Japan. Complying with a request from the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, a laboratory course is prepared for teaching embedded software programming in the newly established Faculty of Comprehensive Informatics. For middle- to high- level students, two teaching materials have been developed using PIC and H8 microcomputers: (1) an infrared transmitter and receiver, (2) two-legged robot controllers.

## 1. はじめに

現在、組み込みソフトウェア技術者が不足することが声高に叫ばれている。組み込みソフトウェアとは、パソコン上で動くソフトではなく、自動車、家電、携帯電話、産業ロボットなどに組み込まれたマイクロコンピュータ(マイコン)を動かすプログラムのことである。マイコンには多くの種類があり、それぞれにプログラムが異なるので、マイコンのプログラム開発は簡単ではなく、ハードウェアに関する知識も要求される。

マイコンはもともと日本で電卓用に開発された電子部品であり、家電、自動車、玩具などに組み込んで高度な制御をするようにしたのも日本が最初なので、組み込みソフトウェアの開発は日本が得意な分野であった。しかし、いつの間にか組み込みソフトの技術者が不足するようになり、日本の競争力の低下が心配されている。2004年、経済産業省と情報処理推進機構(IPA)は「組み込みソフトウェアスキル標準」を策定し、産業界と大学に開発技術者の育成を図るよう呼びかけた。

デジタル家電や携帯電話などの高機能化に伴って、組み込みソフトは開発量が年々増加している。一方、携帯電話など、どんどん新しい製品が出て来る。開発期間がますます短くなるので、ソフト開発は困難を極める。組み込みソフトの場合、不具合が起きたら製品を回収しないと直せな

いので、莫大なコストが掛かり、企業に大損害をもたらす。信用も失うことになる。品質と信頼性の高い、高度なプログラムを短期間で開発できる技術者が、今まさに求められている。

組み込みシステムの開発を行っている企業でも、教えられる人材がいない、一線の技術者に時間が無い等の理由で、重要であるのに企業教育は十分に行われていないというのが実態である。そこで、経済産業省は、産官学が協力して大学等の教育機関に組み込みソフトウェア分野の教育カリキュラムを設け、実施していく必要性を訴えている。その要請に応え、本学総合情報学部・コンピュータシステム学科では集中実習科目「組み込みソフトウェア」を新設して、優れた人材の育成を目指す。

この集中実習科目を充実したものにするためには、初級から上級に至るいろいろな教材を用意する必要がある。今、世の中では、何らかのマイコンとその周辺にLEDや液晶ディスプレイを搭載したプリント基板が数多く開発されている。これと小規模なプログラム開発環境がセットになって、安価な電子教材として市販されている。入門から初級用にはこれで十分である。

中級用は各種センサやサーボモータがセットになっていて、これらの制御プログラムの開発を学ぶものが多い。教材としての中～上級用の代表は、それらを組み合わせて車を制御するライントレースロボットであろう。これだと競技を行うことで、作成したプログラムの機能確認だけで

---

2008年3月10日受理

\* 理工学部 情報システム学科

\$ 現 アスモ株式会社

なく、アルゴリズムの優秀性や性能を争うことが出来、より高度なプログラムを開発する能力が鍛えられる。

我々は学生にもっと人気のある二足歩行ロボットをターゲットとした、中～上級用の電子教材開発を目指し、次の2つを開発した。

### (1) 赤外線送受信器

二足歩行ロボットは市販の”ROBONOVA-I” (Hitec Multiplex Japan 社) を用いた (Fig. 1)。これは ATMEL 社の ATmega128 という 8 ビットマイコンを使った専用制御コントローラを搭載しており、PC 上で開発したモーションファイルを内蔵の RAM に保存する方式をとっている。事前に用意した幾つかのモーションの選択は、専用の赤外線リモコンで行う。この赤外線リモコンの出力波形をオシロスコープで解析し、同じ波形を出力する赤外線送信器を PIC (Peripheral Interface Controller) マイコン (Microchip 社) を使って製作した。これに USB インターフェイス回路をつけることにより、PC からの制御が可能になった。同様に、赤外線受信器も開発した。これで”ROBONOVA-I” の制御が可能になったばかりでなく、テレビなどのマルチメディア機器を制御するリモコンや、携帯電話と通信できる赤外線送受信器などのマイコン教材を開発する道が開けた。

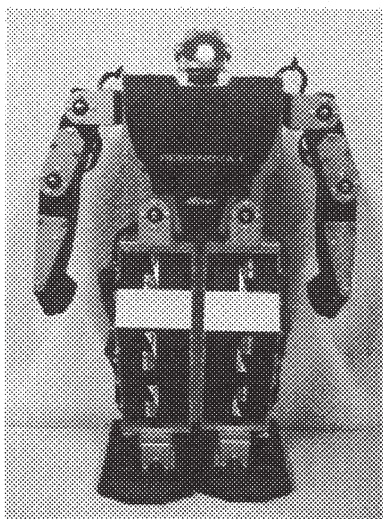


Fig. 1 ROBONOVA-I の写真

### (2) 二足歩行ロボット制御コントローラ

次に、”ROBONOVA-I” の専用制御コントローラと同様のものを 8 ビットの PIC マイコン、16 ビットの H8 マイコン

(ルネサステクノロジー社) を用いて開発することにした。2 種類のマイコンを用いる理由は、第一ステップでの取り組みやすさと、将来の発展性の両方を目指したためである。PIC は低価格でピン数も少なく、また解説本も数多く出版されているため、初心者には半田付け作業もプログラミングも極めて取り組みやすい。しかし、大学の教材としてはこれだけでは不十分なので、産業界でもよく使われている H8 マイコンを使った教材も開発することにした。新学部の集中実習科目「組み込みソフトウェア」では、当面 H8 マイコンを共通マイコンとして用いる予定である。

## 2. 赤外線送信器の製作

ROBONOVA の赤外線リモコンと同じ波形を発生する赤外線送信器を開発するため、オシロスコープを用いて赤外線リモコンの波形を測定した。

### 2.1 赤外線リモコンの構成

赤外線通信はシリアル通信となっており、一本の信号ラインで NEC フォーマットという信号パターンを使用し情報のやり取りをおこなう。NEC フォーマットを Fig. 2 に示す。

### 2.2 ROBONOVA の赤外線リモコンの波形

ROBONOVA の赤外線波形は Fig. 3 に示すように NEC フォーマットと同じくリーダー部、カスタムコード、データコードの 3 部から構成される。しかしリーダー部は NEC フォーマットの場合の HIGH が 9ms、LOW が 4.5ms に対して、ROBONOVA の場合は HIGH が 5ms、LOW が 1ms となっている。カスタムコードはデータコードと同じビット '0' と '1' の並びとなっており具体的には '0101' となっている。データコードは 8 ビット構成になっており、ストップビットは存在しない。

ROBONOVA のカスタムコードとデータコードの '0' と '1' の仕様を Fig. 4 に示す。ビット 1 の場合 HIGH の期間が 0.6ms、LOW の期間が 0.44ms である。ビット 0 の場合 HIGH の期間が 0.6ms、LOW の期間が 0.92ms である。

### 2.3 USB インターフェイス付赤外線送信器製作

今回 PIC マイコンを用いて USB インターフェイス付赤外

線送信器を製作した<sup>1)</sup>。使用した PIC は PIC12F629A である。USB インターフェースの部分は市販の USB I/F ボード” USB-I0V8” (テクノキット社) を用いた<sup>2)</sup>。

赤外線送信器の回路図を Fig. 5 に示す<sup>3)</sup>。赤外線 LED を 2 個配置し、USB からの信号を 4 チャンネル配線した。4 チャンネル配線したことにより  $2^4 - 1 = 15$  種類の信号(命令)を送信することができる。また電源(VCC と GROUND)は USB バスから供給されるようにした。製作した USB I/F 付赤外線送信器の写真を図. 6 に示す。

PIC マイコンはアセンブリ言語か C 言語でプログラミングできるが、今回  $\mu s$  単位の動作が要求されるため、アセ

ンブリ言語を用いた。C 言語の場合、コンパイラを使用して C 言語のソースコードをコンピュータが直接実行可能な機械語のプログラムに変換する。しかし、コンパイラが出力したオブジェクトファイルが必ずしもプログラマの望んだ待機時間を発生するとは限らないため、今回はアセンブリ言語を使用した。PIC のアセンブリ言語は 35 命令からなっている。

赤外線リモコンの波形と USB I/F 付赤外線送信器の波形を Fig. 7 に示す。二つの波形はほぼ同じ形をしていることが確認できる。ROBONAVA を正常に動作させることも出来た。

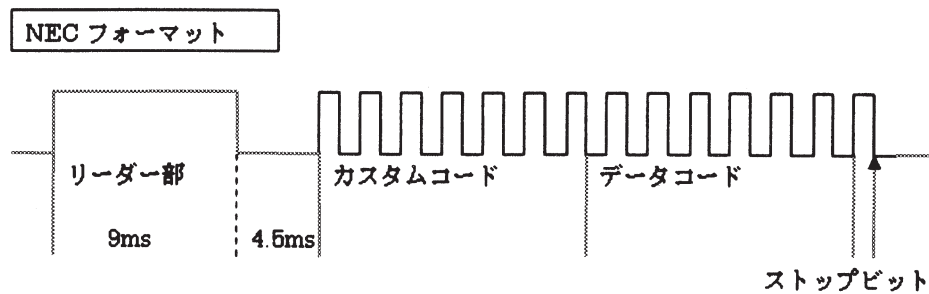


Fig. 2 NEC フォーマット

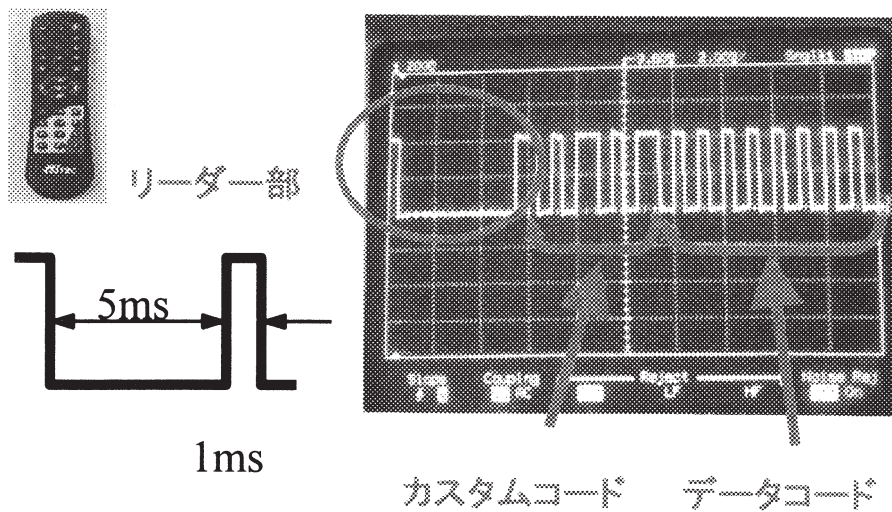


Fig. 3 ROBONOVA の赤外線リモコンの波形

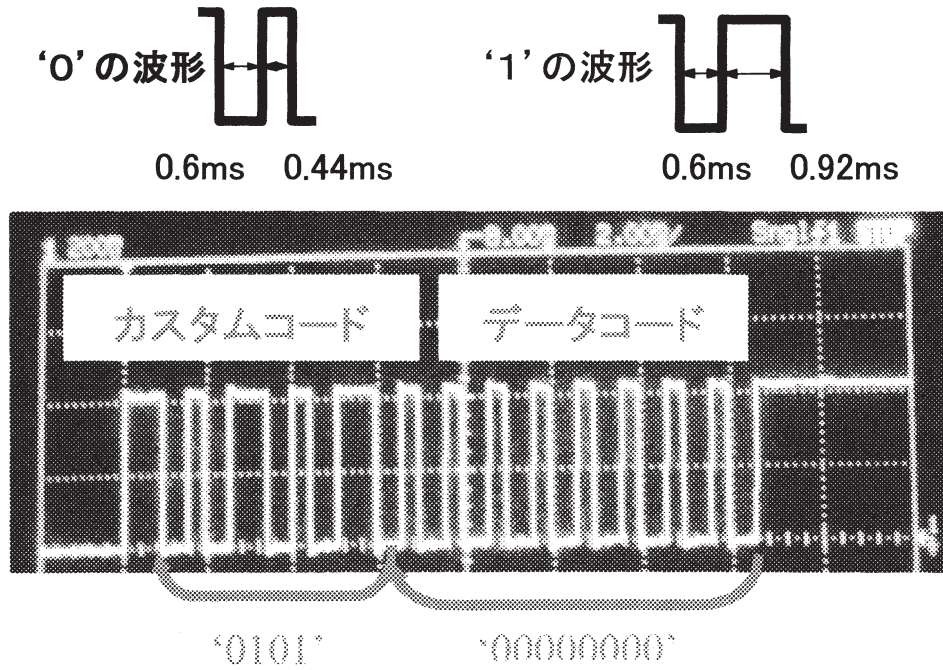


Fig. 4 ROBONOVA の '1' と '0' の仕様

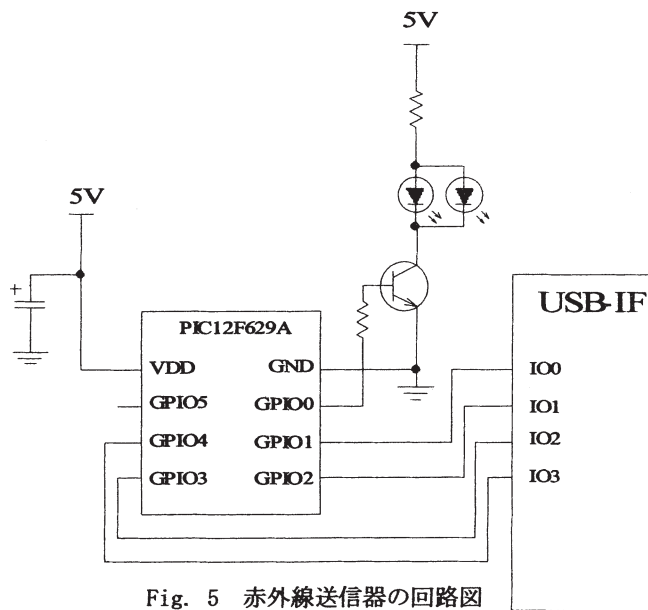


Fig. 5 赤外線送信器の回路図

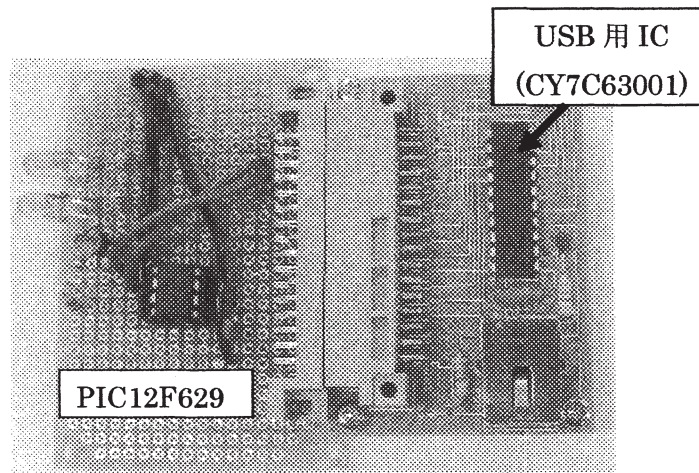


Fig. 6 USB I/F 付赤外線送信器

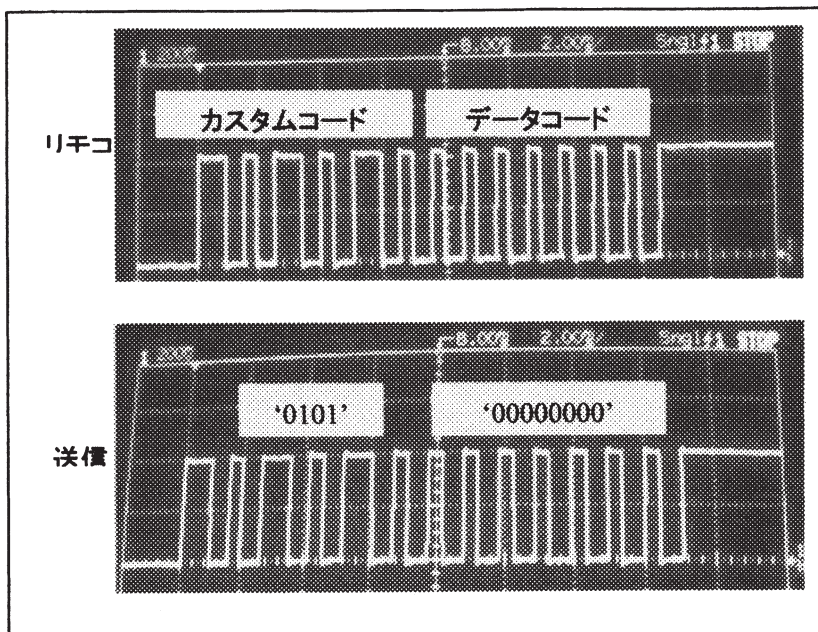


Fig. 7 USB I/F 付赤外線送信器の波形

### 3. 赤外線受信器と PWM 回路を搭載したロボット制御コントローラの試作

ROBONOVA の専用制御コントローラは ATMEL ATmega128 というマイコンを用いた MR-C3024 である。これを解析した結果、二足歩行にフィードバック制御は行われていないことが分かった。通常、ロボットの二足歩行では重心が足裏から外れた時の制御が問題になる。その重心コントロールため、ROBONOVA でも加速度センサによるフィードバック制御が必要と考えていたが、行われていなかった。その代わりにロボットの足裏の部分を広くすることでバランスを取り、簡単化していることが分かった。それなら、本体の制御は関節部に配置された 16 個のサーボモータの制御だけで良いので、制御ボードとプログラムが簡単になる。PIC マイコンでも十分いけると判断して、まずは PIC を用いてロボット制御コントローラを製作することにした。

#### 3. 1 赤外線受信器の製作<sup>4)</sup>

赤外線受信器は USB I/F 付赤外線送信器の赤外線波形を受信し、その波形に従って命令を、PWM 波形を出力する PIC16F877A に送信する。今回 PIC16F877A は 12ms 周期で常に PWM 波形を出力しているため、赤外線受信器は PIC16F84A 内に組み込んだ。PIC16F84A の PORTA の 0 ピン目を赤外線受信に使用し、PORTB の 0~2 ピンで PIC16F877A

に 4 ビットの信号を送出する。

赤外線を受信する際は Fig. 8 に示すように、リーダー部の信号を受信後の 5ms の前後  $500\mu s$  の内に信号が LOW になったらカスタムコードを読み込む処理に進み、それ以外は初期状態に戻る。カスタムコードとデータコードのビット '0' と '1' は  $1000\mu s$  と  $500\mu s$  の前後  $50\mu s$  余裕を持って信号の判定をしている。

#### 3. 2 PWM (パルス幅変調)回路の開発

PWM とはパルス波のデューティ比を変化させることである。サーボモータの制御などに使用する波形で、変更したい角度によって出力する '1' のパルス幅を変更する。周期は一定である。Fig. 9 に ROBONOVA で使用しているサーボモータ用 PWM 波形をオシロスコープで撮った写真を示す。測定結果をもとに角度とパルス幅の関係式を算出した (Table 1)。ROBONOVA のサーボモータ用 PWM は 12.04ms の周期である。'1' のパルス幅は 0.600~2.400ms の間となっている。角度 ( $r$ ) を  $1^\circ$  変化させるごとに '1' のパルス幅が  $10\mu s$  ずつ増減する。

今回、PWM 回路を PIC16F877A と H8/3052F の両方で作成した。使用したプログラム言語はどちらもアセンブリ言語である。アルゴリズムはほぼ同一で、フローチャートを Fig. 10 に示す。

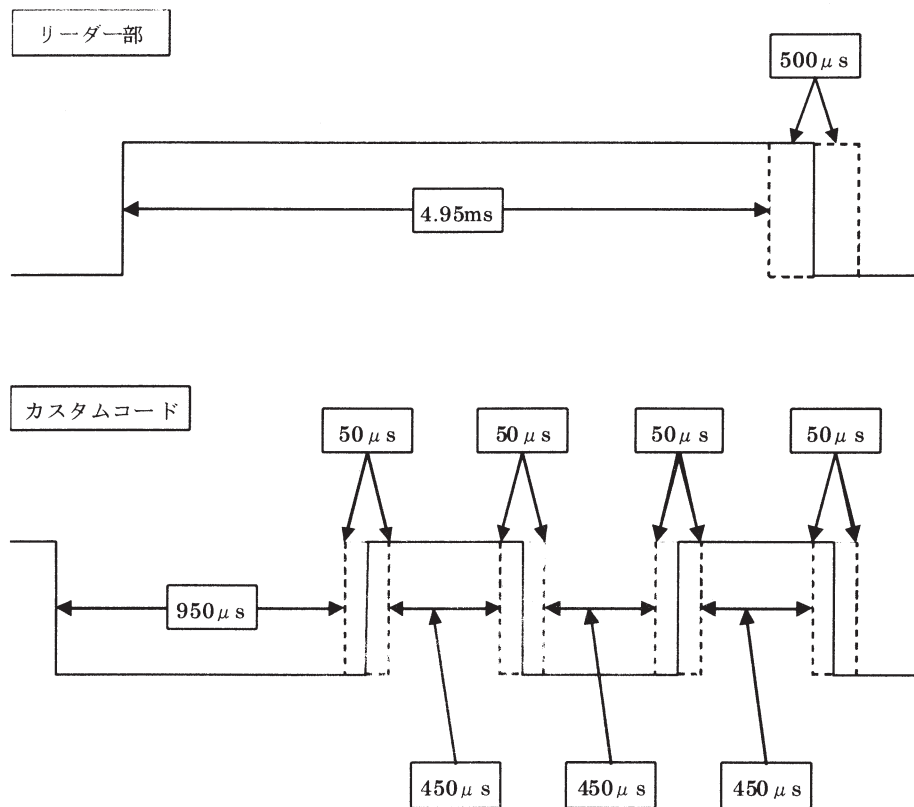


Fig. 8 信号入力の仕事み

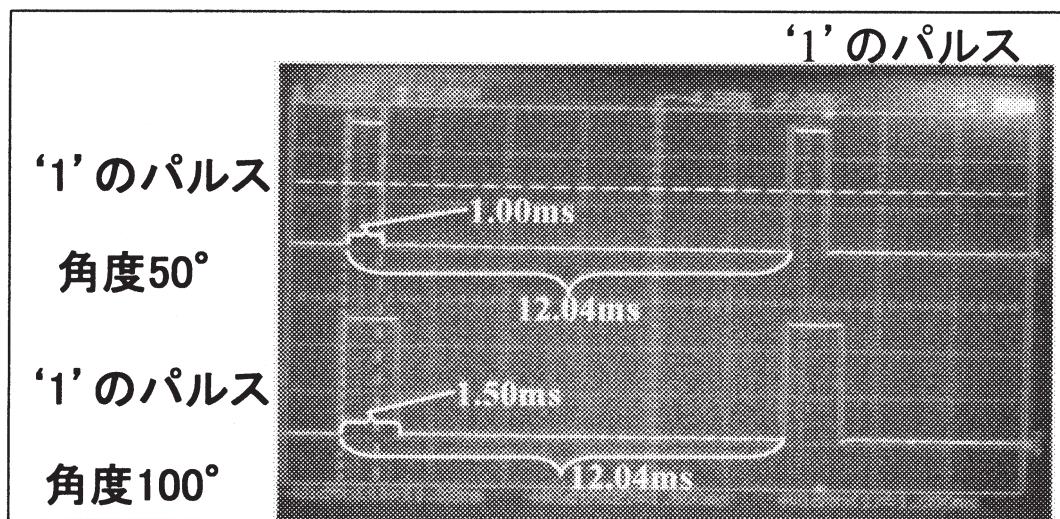


Fig. 9 PWM 波形

Table 1 二足歩行ロボットのパルス幅関係式 (r : モータの角度)

	右側のモータの関係式	左側のモータの関係式
'1'のパルス幅 t1[ms]	$t1 = 2.500 - 0.010 \times r$	$t1 = 0.500 + 0.010 \times r$
'0'のパルス幅 t2[ms]	$t2 = 9.540 + 0.010 \times r$	$t2 = 11.540 - 0.010 \times r$
周期 T[ms]	$T = t1 + t2 = 12.040$	$T = t1 + t2 = 12.040$

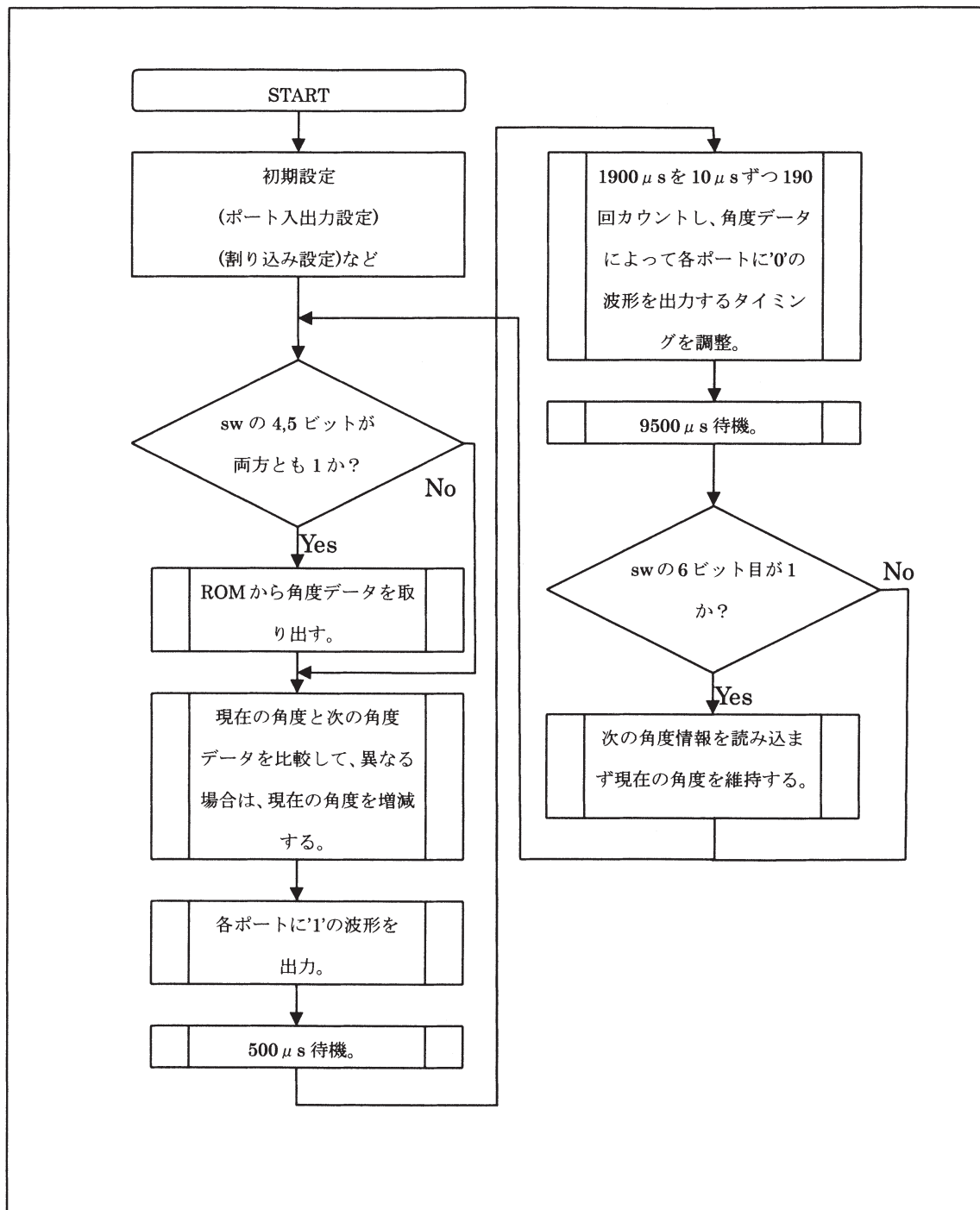


Fig. 10 PWM回路のフローチャート

3. 3 作成したプログラム規模

Table 2 にまとめる。

製作した回路に使った PIC の種類とプログラム行数を

Table 2 マイコンの種類と行数

	赤外線送信器	赤外線受信器	PWM回路
PICの種類	PIC12F629	PIC16F84A	PIC16F877A
行数	296行	178行	761行

### 3. 4 ROBONOVA 制御コントローラ用専用プリント基板の試作

プリント基板の設計にはアルティウム・ジャパン社の Protel 99 SE を使用した。同ソフトウェアを用いて入力したロボット制御コントローラの全回路図を Fig. 11 に示す。

### 3. 5 試作したロボット制御コントローラ

このプリント基板に、PWM出力をする PIC16F877A、モーションファイル（16 個のサーボモータの時系列角度情報）を記録した EPROM M27C256B-10F1、赤外線波形を受信する PIC16F84A を搭載した。完成したロボット制御コントローラを Fig. 12 に示す。PWM 波形を出す PIC16F877A は赤外線受光器と接続された PIC16F84A と接続されている。製作した回路の動作の流れを Fig. 13 に示す。赤外線送信器から信号が送信されたら、プリント基板の赤外線受光器が波形を受信し、PIC16F84A に送信される。PIC16F84A

は受信した波形から命令を抽出し、命令を PWM 回路である PIC16F877A に送信する。命令を受け取った PIC16F877A は EPROM に保存されたモーションデータを取り出し、モーションを実行する。すべてのモーションが済んだら、最後のモーションの状態で待機する。

今回用いた EPROM は、紫外線用いて消去を行う UVEPROM で、ROBONOVA のモーションプログラムを記録するために使用した。PIC マイコン内の EEPROM や ROM では容量が足りないなので、補助するために使用した。

PIC16F877A は 40 ピンの IC であるが、EPROM と接続したため、サーボモータ制御用のピン数が不足し、10 本だけとなってしまった。そこでこのコントローラでは腰から下の 10 個のサーボモータだけを制御することにした。これでも、最も重要なポイントである、うまく二足歩行動作を行わせることが出来るかどうかの判定は出来るためである。16 個のサーボモータ全ての制御は、次に作る H8 マイコンボードで行うこととした。

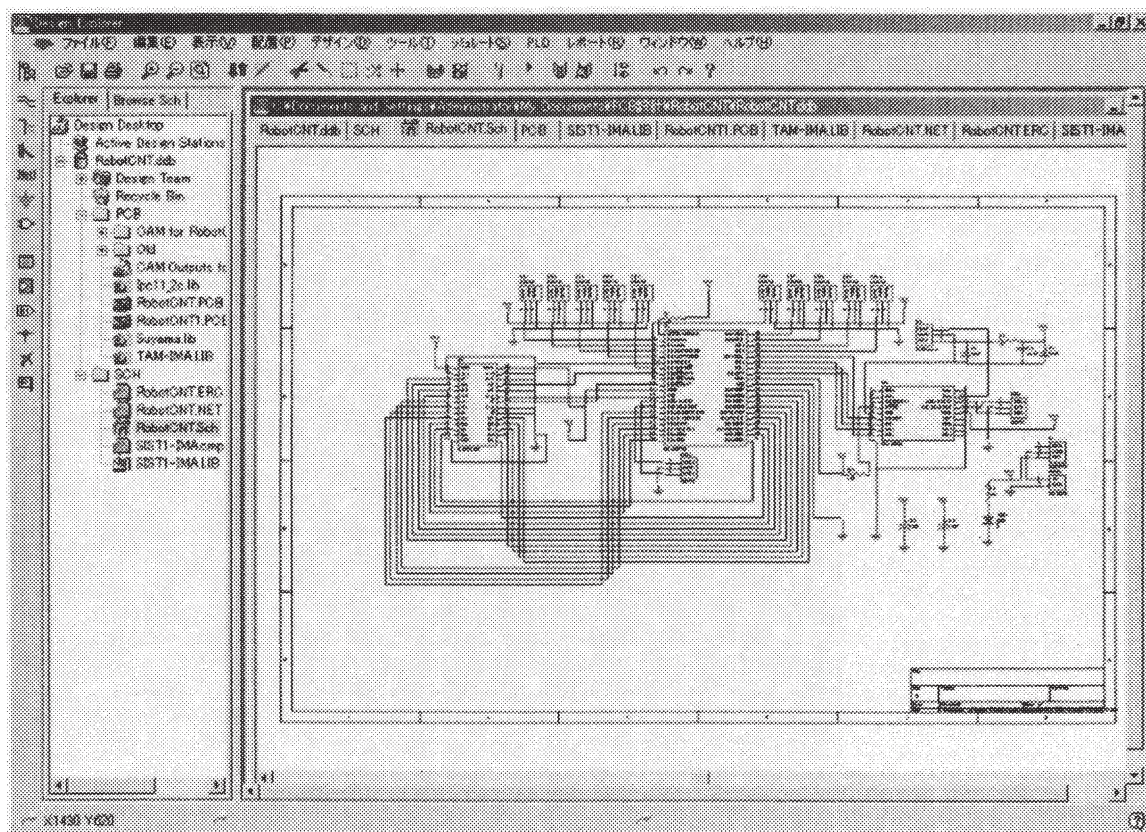


Fig. 11 Protel99SE を用いたロボットコントローラ全配線図の設計



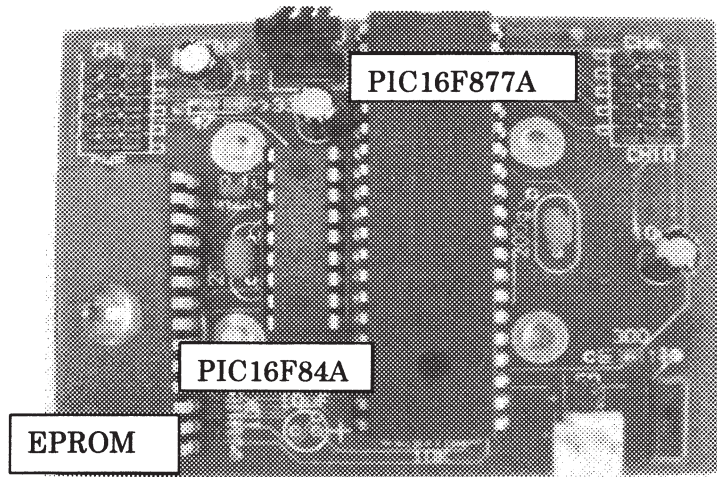


Fig. 12 赤外線受信器とPWM回路を搭載したプリント基板

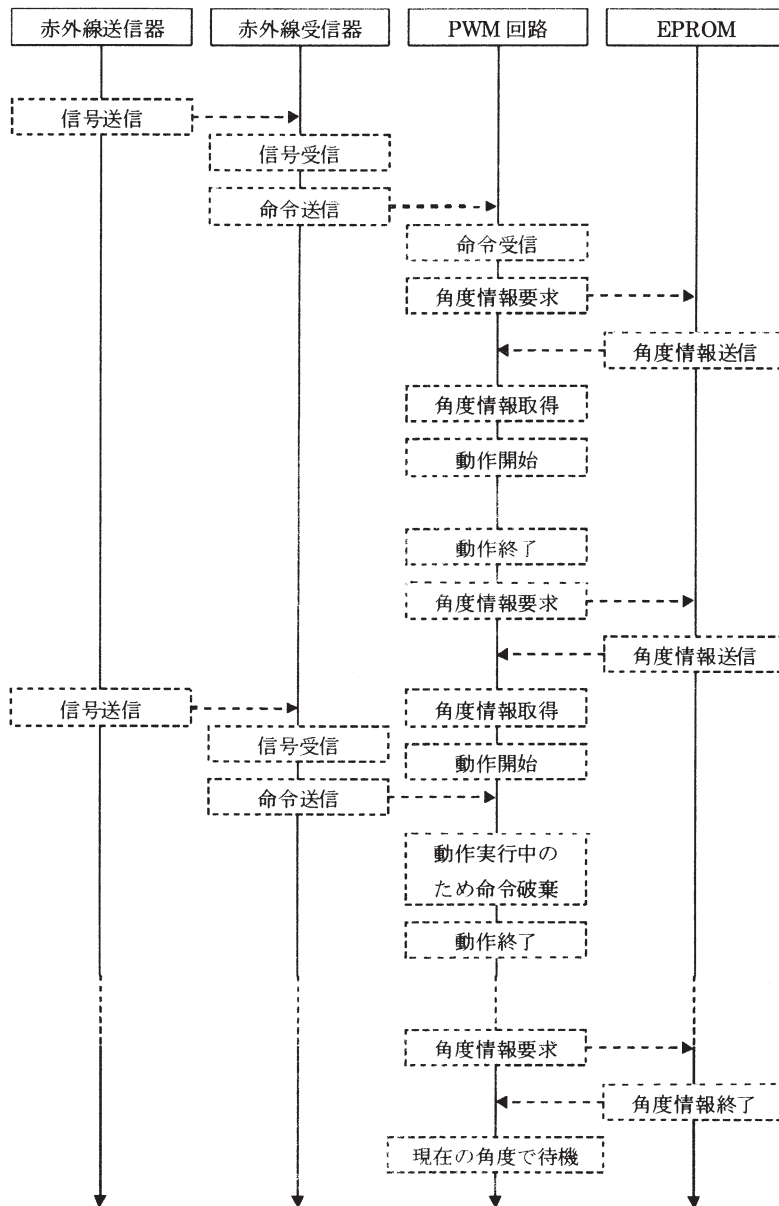


Fig. 13 回路処理のフローチャート

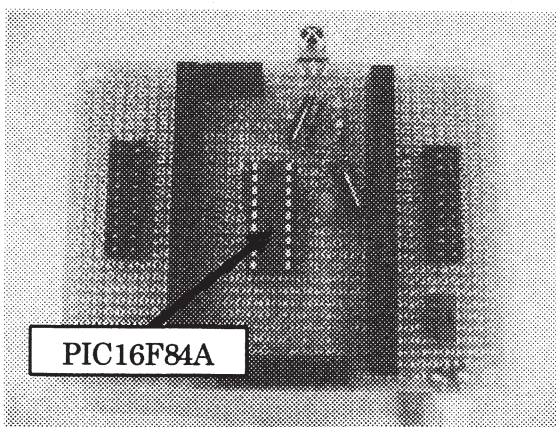
### 3. 6 動作確認

PC からの信号で登録したモーションを順に呼び出し、前進、後退、おじぎなど、腰から下の10個のサーボモータの制御で出来る動作を正常に行わせることが出来た。

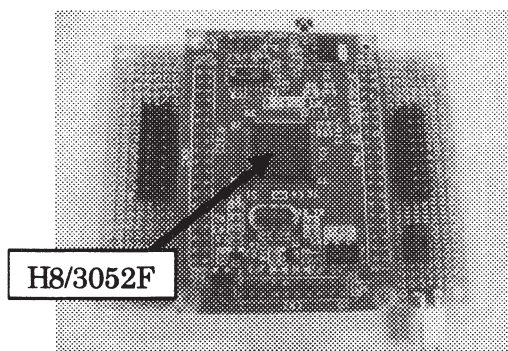
### 4. H8 マイコンの使用

H8 マイコンは、ルネサステクノロジーが開発したマイクロプロセッサである。より高度な制御を行うために、PIC を H8 マイコンに置き換えることにした。

16ビットの H8/3052F を使用することとし<sup>5), 6)</sup>、マイコン搭載部分は市販の「AKI-H8/3052F マイコンボード (秋月電子通商製)」を用いた<sup>9)</sup>。これを載せるマザーボードは、専用プリント基板を起すほどでは無いので手作りとした。試作したロボット制御コントローラを Fig. 14 に示す。このボードでも、PIC を用いたロボット制御コントローラと同じく二足歩行はもちろん、16 個のサーボモータの全てを使った全身動作を正常に行わせることが出来た。



(a) マザーボード部分



(b) (a)の上に AKI-H8/3052F マイコンボードを搭載

Fig. 14 H8 マイコンを用いたロボット制御コントローラ

Fig. 15 はその中の一つ、「水平バランス」というモーシ

ョンを ROBO NOVA に行わせた写真である。

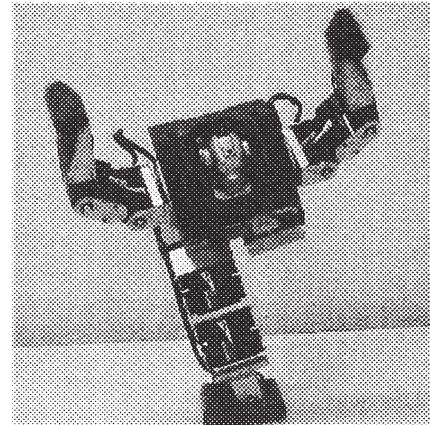


Fig. 15 「水平バランス」のポーズ

### 5. まとめ

中～上級用の組み込みソフトウェア演習用電子教材製作を目的として、市販の二足歩行ロボットを制御する、赤外線送受信器と二足歩行ロボット制御コントローラの2つを開発した。前者により、テレビなどのマルチメディア機器を制御するリモコンや、携帯電話と通信できる赤外線送受信器などのマイコン教材を開発する道が開けた。また、後者を各種センサやトルクの大きいサーボモータなどと組み合わせて発展させることにより、オリジナルなロボットを開発することも可能となった。今後、上級用電子教材開発につなげて行く予定である。

### 参考文献

- 1) 高橋孝雄:「やさしいPIC マイコンプログラミング&電子工作」, 2005, 株式会社秀和システム.
- 2) 永島智二:「手作り USB 機器—USB - IO で作る電子レットから Web カメラまで」, 2005, RBB PRESS.
- 3) 赤外線送信器 HP: <http://www5b.biglobe.ne.jp/~YASUSI/gallery/electronics/041219/041219.htm>
- 4) 田中光一:「PIC マイコンで作るインドア・プレーナラジコン飛行機を作って飛ばそう」, 2005, CQ 出版.
- 5) 堀桂太郎:「H8 マイコン入門」, 2003, 東京電機大学出版局.
- 6) 今野金顕:「マイコン技術教科書 H8 編—AKI - H8 で学ぶ組み込みコンピュータのハード&ソフト (IT text)」, 2002, CQ 出版.