

### 反射を用いた二足歩行ロボットの歩行制御

AOKI, Junya / 青木, 潤也

---

(発行年 / Year)

2009-03-24

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2009-03-24

(学位名 / Degree Name)

修士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

2008 年度 修士論文

反射を用いた二足歩行ロボットの  
歩行制御

指導教授 渡辺嘉二郎 教授

大学院工学研究科

システム工学専攻修士課程

学生証番号 07R6102

氏名 アオキ ジュンヤ  
青木 潤也

# **THE CONTROL OF THE WALKING BY THE REFLECTION FOR A BIPED ROBOT**

## **Abstract**

This paper described the control of the biped walking robot by the reflection. In Japan, many researchers study the bipedal robot. It may be said that it is difficult to perform a robust walk as a problem of biped robot compared with man in strange environment. It is raised that man is rectifying the cycle of a walk, using reflection as a difference. Here, walk control of the biped robot which used reflection is described.

*Key Words: Biped walking robot, Balance control, reflective walk*

# 目次

第1章	はじめに	5
	1-1 本研究の目的	5
	1-2 本論のねらい	6
第2章	歩行システム	8
	2-1 構築する歩行システム	8
	2-1-1 歩行周期の調整	8
	2-1-2 歩行パターンの補正	10
第3章	実験環境	11
	3-1 使用する二足歩行ロボット	11
	3-2 使用マイコン	12
	3-3 信号分配方法と使用 IC	13
	3-4 全体のシステム	16
第4章	実験	18
	4-1 実験1 センサ取り付け方式の検討	19
	4-1-1 実験方法	19
	4-1-2 実験結果	21
	4-2 実験2 歩行パターンの補正検証	19
	4-2-1 実験方法	22
	4-2-2 実験結果	22
	4-2-3 考察	23
	4-3 実験3 歩行周期の補正検証	24
	4-3-1 実験方法	25
	4-3-2 実験結果	25
	4-3-3 考察	25
	4-4 実験4 歩行周期と補正組み合わせ検証	26
	4-4-1 実験方法	26
	4-4-2 実験結果	26

<a href="#">まとめ</a> .....	27
<a href="#">謝辞</a> .....	28
<a href="#">参考文献</a> .....	30
付録.....	32

## 第1章 はじめに

### 1-1 本研究の目的

二足歩行ロボットは直立姿勢で移動することができるため、車輪等、従来の移動手段に比べ不整地や段差といった環境に対応し、人間の生活空間において汎用的な運用ができる可能性を秘めている。そのため現在日本において制御対象として盛んに研究されているほか、動きが人間に近く親近感があるため、ROBO-ONE などの二足歩行ロボット競技大会もさかんに行われ、学習教材やホビー用としても浸透しつつある。



HONDA ASIMO

市販ロボット(KHR-1)

アマチュアの競技大会の様子

図1 日本における二足歩行ロボット

しかしながら、人間のように外部環境に即座に適応し、最適な歩行ができる二足歩行ロボットはまだ実現していない。

二足歩行ロボットは人間を模倣しているため共通点も数多くある。歩行を例にとると人間が視覚、聴覚、触覚で外環境を把握し、三半規管で姿勢を制御している。ロボットも光学センサや超音波センサで外環境を把握し、ジャイロセンサと加速度センサで姿勢を制御する。両者の相違点としてロボットが歩行をする際には時系列別に並べた関節の角度データを順次再生しているに過ぎないが、人間は反射によって歩行パターンを再生しているという点がある。一般に二足歩行ロボットの構造は人間でいう関節にあたる部分に DC サーボモータを用いており、マイコンなどからの PWM 信号で角度を制御することで様々な動作を可能にしている。このときロボットの使われている全てのサーボモータは共通の時系列で制御している。人間も基本的な歩行パターンは固定化されており、それを繰り返しているに過ぎない。だがその歩行周期は脊髄にある神経回路で他の筋肉の動きや外乱によるフィードバックの入力がされたときに発生するリズムに基づいているといわれている[1][2]

本研究では二足歩行ロボットの歩行において、反射による歩行周期の概念を取り入れる事でより安定性の高い歩行を行わせる事を目的とする。

## 1-2 本論のねらい

二足歩行ロボットが歩行するまでの大まかな流れは以下の通りである

### 二足歩行ロボットの製作

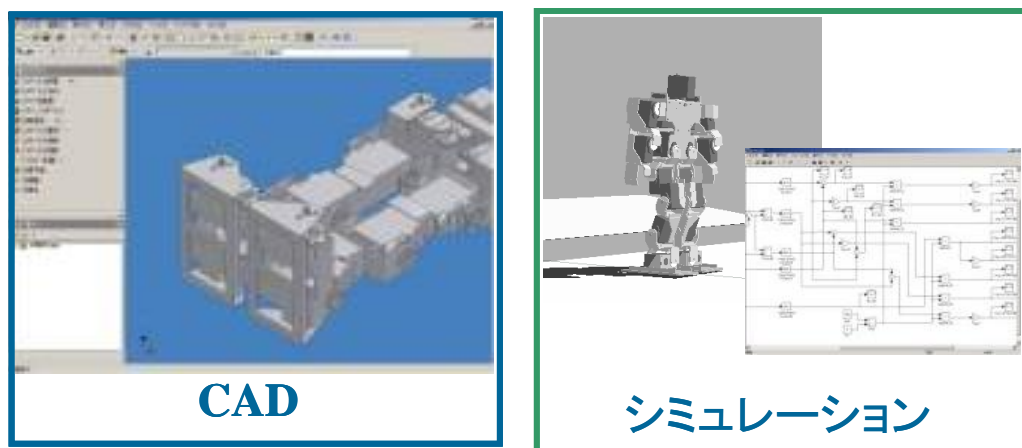


図2 歩行ロボットの製作の流れ

製作における最初の段階であるロボットの設計は CAD, 次の歩行モーションは MATLAB シミュリンクを用いたシミュレーションなど優れたツール, 手法が確立されている。

しかし, シミュレーションで作られたモーションは想定した環境以外ではうまく歩行することができず, 実際に実機を歩行させる場合において機体設計の誤差, シミュレーションと実世界における環境の違いを埋める事が必要となる。この最後の調整は経験による試行錯誤の手作業が大半であり方法は確立されていない。

調整を自動で行う方法として, 「環境に合わせて歩行パターン自体をリアルタイム計算して変更する」といった方法があるが, この方法は計算量が多く実際には困難な事が多い。

そこで本研究は生物の反射による歩行周期調整を取り入れ, 歩行パターン自体を再計算し変更するのではなく, 周期調整を搭載してあるマイコンと足裏に取り付けたセンサを用いて行うことで安定性の高い歩行をさせることを目的とする。

また生物の反射の概念をロボットに取り入れた例として以下のようなものがある。



Genghis (6脚)



BigDog (4脚)

図3 反射を取り入れたロボット

- **Genghis**

昆虫ロボットであり6脚で構成されている.このロボットはブルックス氏が提唱したサブサンクション・アーキテクスチャ (SA) という考えに基づくものである.

サブサンクション・アーキテクスチャとは各々の足がいくつかの条件反射を設定されており.その単純な組み合わせによりまるで知能があるかのような動きをするものである.Genghis の脚にはセンサが取り付けられておりセンサの反応により脚をあげるといった条件反射を行う.これにより障害物を乗り越え歩行する.<sup>3)</sup>

- **BigDog**

4つある脚部の対角線上で対応する2つのペアが交互に接地して歩行し,遊脚となるペアが足裏にある接地センサで着地を判定するまで支持脚のペアは接地状態を保つように制御されている.なんらかの障害で支持脚ペアが接地状態を維持できなくなったときに遊脚ペアが先に接地するような状態ならば支持脚ペアは接地を諦めて遊脚としての動作に移行する.



## 第2章 歩行システム

### 2-1 構築する歩行システム

本研究では左右の足裏に取り付けた接地センサの反応から接地時間を検出し,その値を用いた歩行周期の調整,およびモーション再生パターンの補正を行う.その際,歩行のパターン自体の変化はさせず,センサの信号を元に歩行周期を制御する.この方法は,センサの反応からロボットの各関節角度や動作スピードを再計算するという従来の二足歩行ロボットの制御方法に比べ計算時間を短縮できる.

### 2-2 歩行周期の調整

二足歩行ロボットは

- (1)「両足接地」
- (2)「右足のみ接地」
- (3)「左足のみ接地」
- (4)「両足とも空中」

の4つの状態がある(転倒といった特別な状況を除く)

そして歩行時において (1)>(2)>(1)>(3)>(1)というふうに順に繰り返しながら歩行していく.

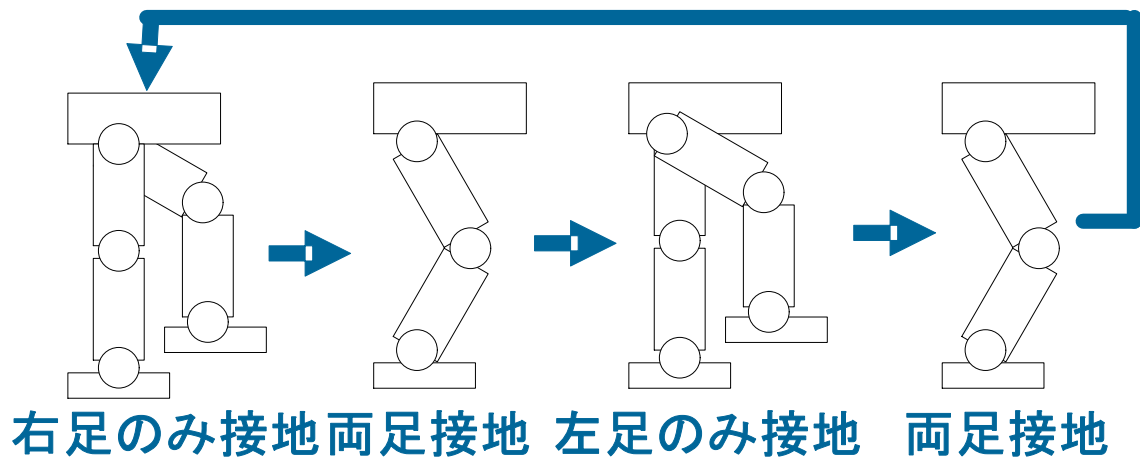


図4 歩行状態の遷移

人間は歩行時、片足あたり60%の時間が接地状態、40%が空中に浮いている状態となっている。また歩行時間の20%は両足接地状態となっており、  
(1)→(3)→(1)→(2)→(1) というように規則的に変化する。[3]  
この規則性は速度が一定ならば周期の大きさに関係なく現れる。これは中枢性パターン発生器（CPG）によるものである。[4]

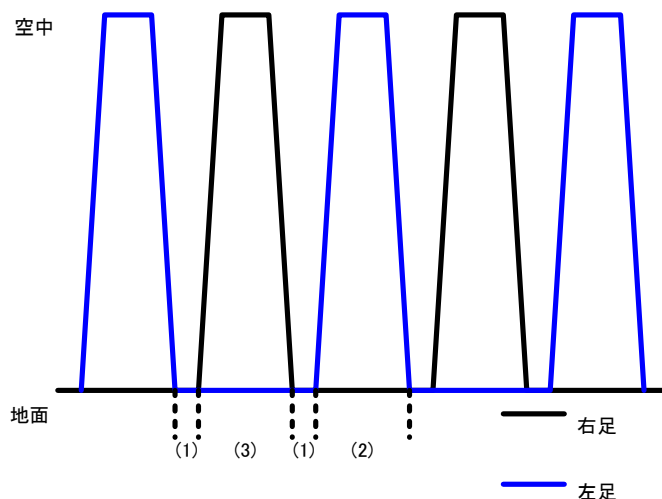


図5 人間の歩行時の周期

本システムでは歩行時の各状態のパターンを角度データとして保存する。このパターンをマイコンのタイマ機能を用いる事によって、一定カウント後に呼び出す。このカウントの値を足裏に接地したセンサの反応で変化させる事で上記のような歩行周期の調整を実現する。

## 2-3 歩行パターンの補正

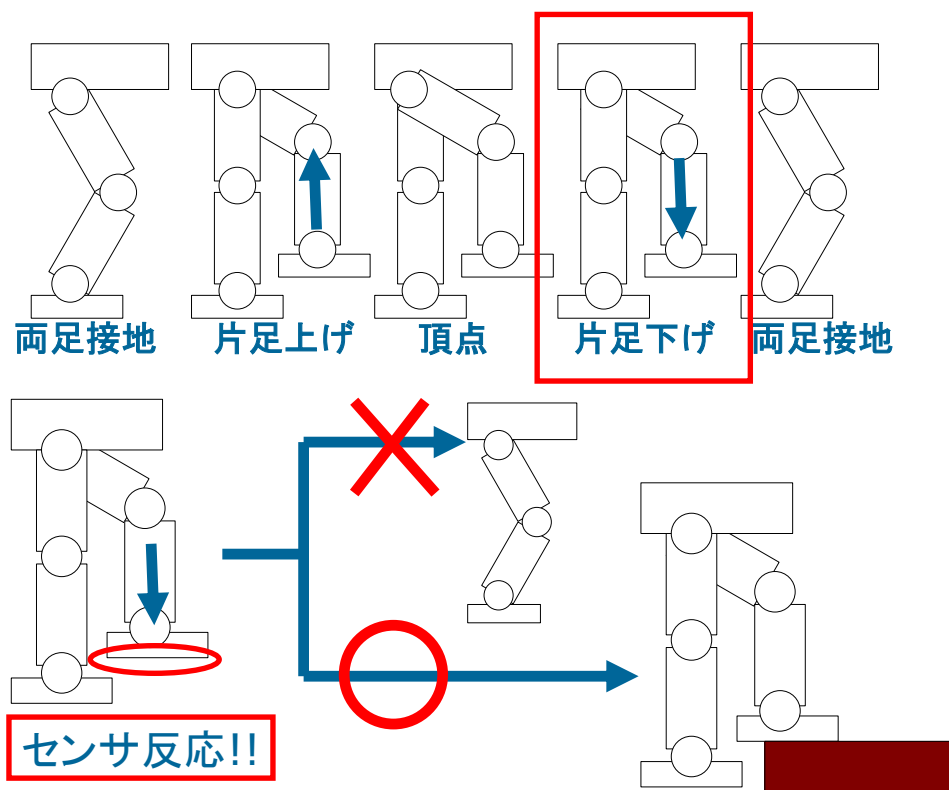


図 6 歩行パターンの補正

歩行モーションを片足当たりで見た場合.

- (1) 両足接地
- (2) 片足上げ
- (3) 頂点
- (4) 片足下げ

の4つの状態に分けることができ. (1) > (2) > (3) > (4) > (1) と繰り返す.  
このときの (4) 片足下げにおいて.推定時間より早く接地をセンサによって検知した場合障害物に接地したと判断する.そして接地した位置を新たな地面としてその時の角度データを保存しデータ (1) の置き換えを行う.

## 第3章 実験環境

### 3-1 使用する二足歩行ロボット

実験には株式会社イトーレイネツ製ヒューマノイドフレームキット YDH-PDS の下半身を使用することとする。機体の仕様は以下の通りである。

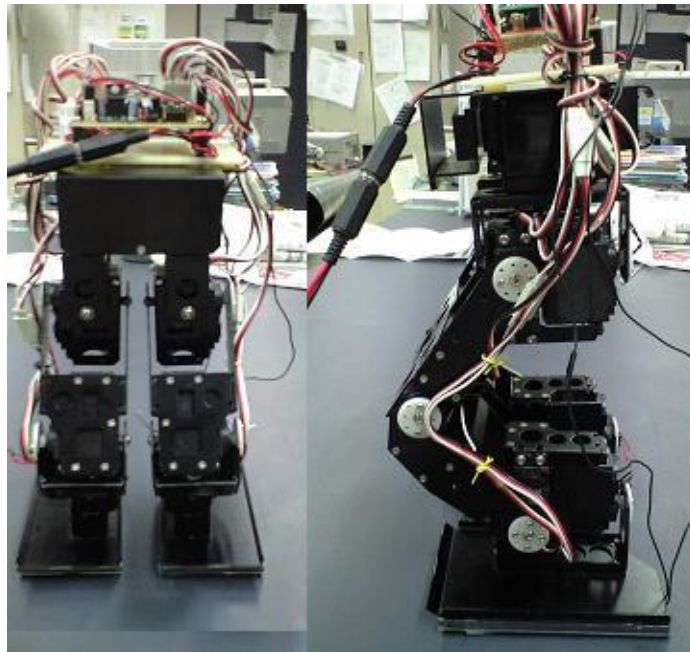


図7 使用した機体（YDH-PDS）

表1 ロボットの仕様

全重量	1.34kg
自由度	12(片足6 * 2)
サーボモータ	PDS-2144FET
回転速度	0.13sec/60°C
トルク	13.0kg/cm
重量	54.5g

### 3-2 使用マイコン

今回サーボモータの制御用として AKI-H8-3694 マイコンを使用する



図 8 AKI-H8-3694 マイコン

表 1 マイコンの仕様

CPU	H8/300H 16 ビット CPU
汎用レジスタ数	16 ビット×16 本
基本命令数	62 種類
周辺機能	タイマ A (時計用) タイマ V(8 ビットタイマ) タイマ W(16 ビットタイマ) ウォッチドッグタイマ SCI(調和同期式またはクロック同期式シリアルコミュニケーションインターフェース) IIC バスインターフェース 10 ビット A/D 変換機
ROM	32K バイト
RAM	2048 バイト
汎用入出力ポート	29 本 (このうち 8 本大電流ポート)
アナログ入力端子 機能付入力ポート	8 本

### 3-3 信号分配方法と使用 I C

ラジコンやロボットに多く使われるサーボモータは PWM というパルス波のデューティ比を変化させて変調する信号で制御される。

H8-3694 マイコンは安価かつ小型である。その反面 PWM 信号出力専用の端子が用意されているもののその数は少なく、3つしかない。今回の制御対象であるサーボモータの数は12であり、このままでは全体の制御が不可能である。しかし、今回使用するサーボモータは PWM 信号の周期約 20msec に対して 0.6~2.3msec 程度のパルス幅で角度決定を行うため、周期のうち 90% 近くの時間が Low となっている。

そのため、この空き時間に位相をずらした別の PWM 信号を足し合わせ、その後足し合わせた信号を分配する方式を用いる。

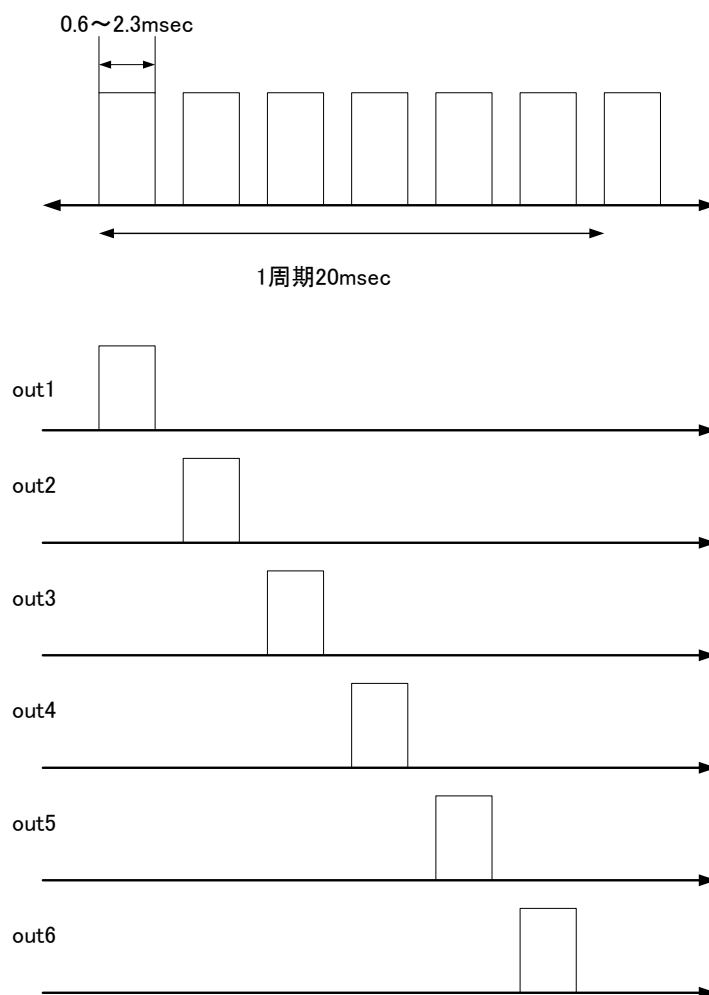


図9 PWM 信号の分配



74HC75 はラッチ回路が4つ詰まった I C で 74HC238 の3箇所の入力のために使用する。ラッチ回路というのは記憶回路の一種で NAND 素子や NOR 素子接続する事によって作られており,過去の入力信号の保持や現在の入力信号の取得を行う事ができる。

この I C の真理値表を以下に示す。

74HC75 は LE 端子の値が 1 なら D 端子の値がそのまま Q 端子に出力され,#Q 端子は常に Q 端子を反転した値が出力される。LE 端子が 0 だと D 端子の値とは関係なく Q 端子は前に出力した値を記憶し続ける。

表 3 74HC75 の真理値表

入力		出力	
D	LE	Q	#Q
0	1	0	1
1	0	1	0
X	0	Q0	#Q0



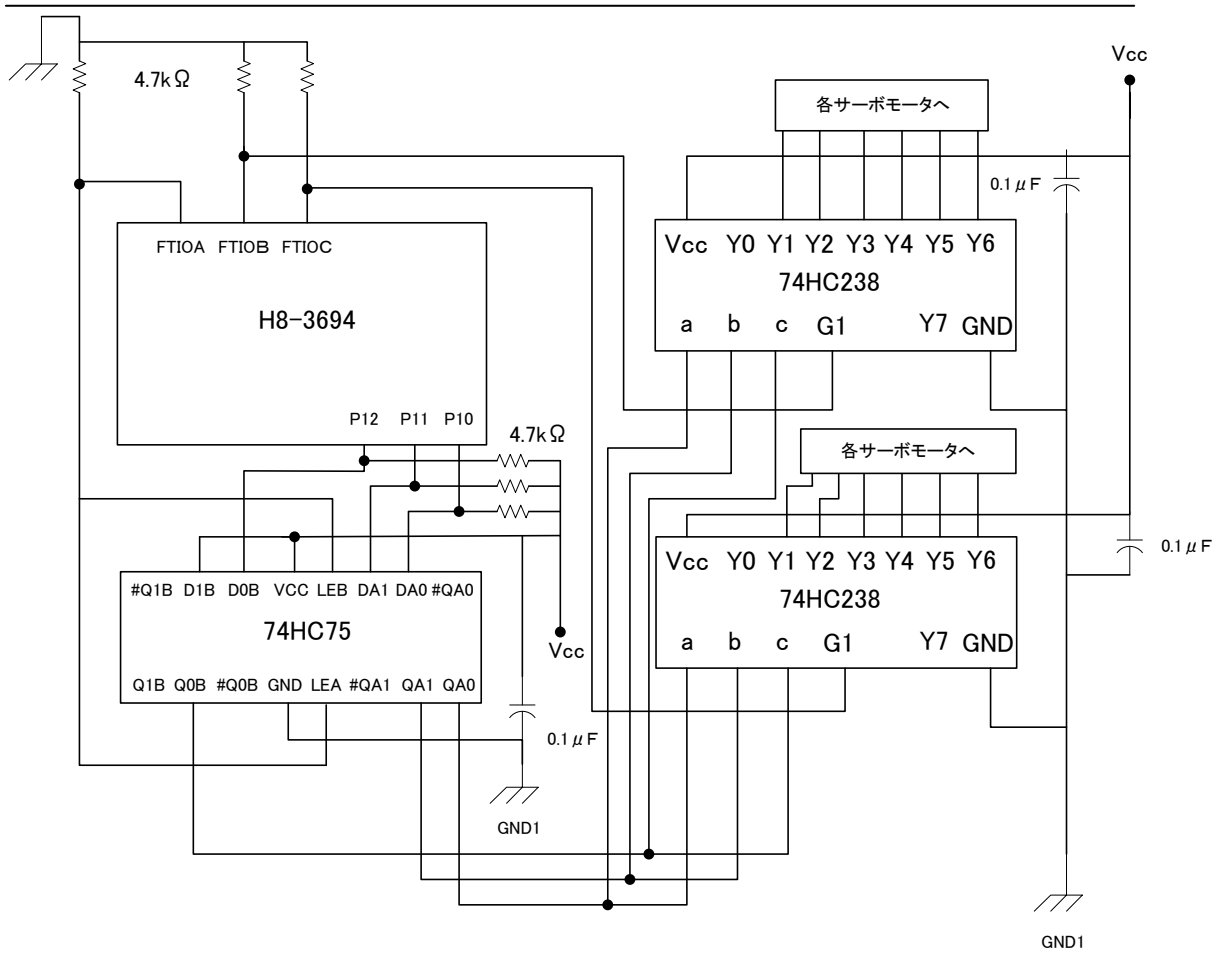


図 1 2 サーボモータ制御用基盤回路図

### 3-4 全体のシステム

実験環境を纏めると図13のようになる

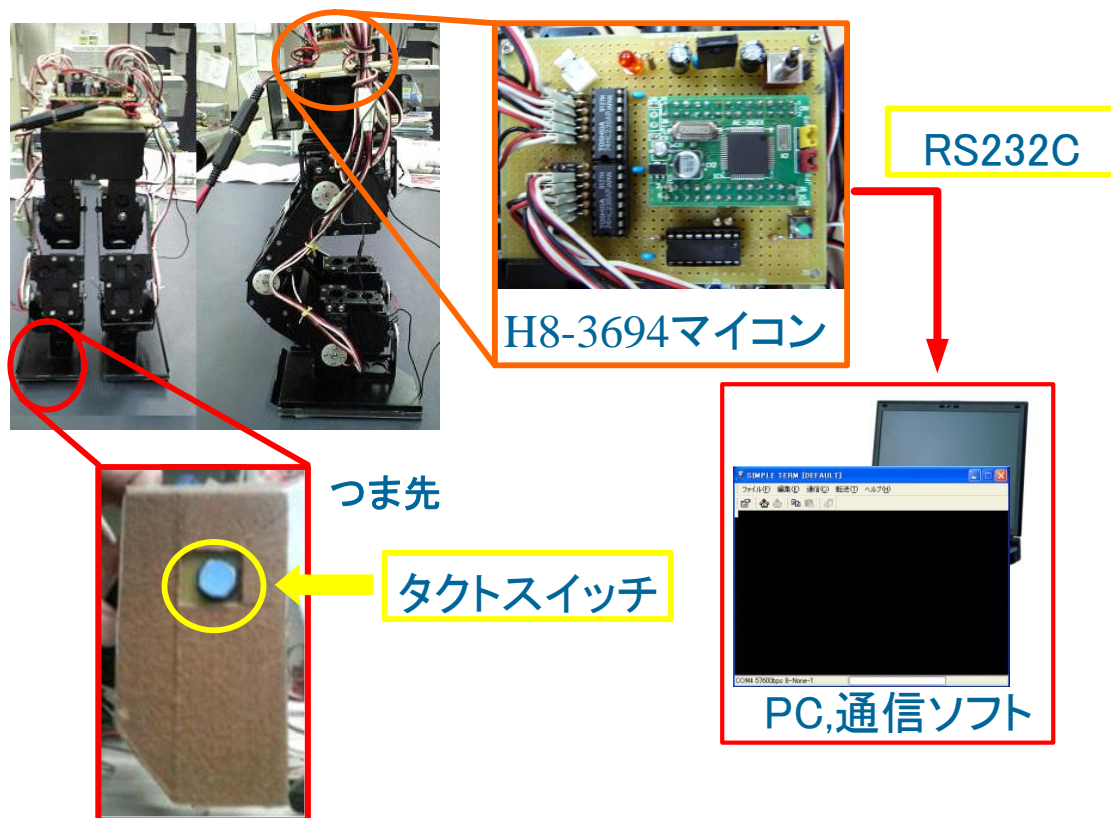


図13 全体のシステム

ロボットは接地センサ（タクトスイッチ）からの反応を元に動作する。  
PC への接続は RS232 シリアル通信を用い、センサの反応とロボット動作のデータを PC へ送り保存する事ができる。

---

## 第4章 実験

接地センサを用いた歩行の制御を行うため以下の基礎実験を行う

実験 (1) センサの取り付け方式の評価

実験 (2) 歩行パターンの補正検証

実験 (3) 歩行の周期の補正検証

実験(2)以降での歩行パターンは(a)足振り上げ→(b)頂点→(c)足振り下げ→(d)待機といった一連の流れを8個の角度データとして左右別々に変換したものを使用する.

## 4-1 実験 1 センサの取り付け方式の評価

### 4-1-1 実験方法

センサ取り付け方式として今回は以下の二種を評価した。

- (a)足裏に取り付けたタクトスイッチの検知部にアルミニウムの板を取り付けた方式
- (b)足裏に取り付けたタクトスイッチの周囲に硬質のフェルト板を取り付けた方式(図 7)

(a)方式は範囲の狭いタクトスイッチの検知範囲を広くする事を目的としている。

足裏に取り付ける接地センサとして日本閉開器工業製のタクトスイッチを用いた。タクトスイッチは足裏に取り付けやすいように削り基盤に取り付けた。また衝撃からセンサを保護するために基盤裏には発泡スチロール板を貼り付けている。

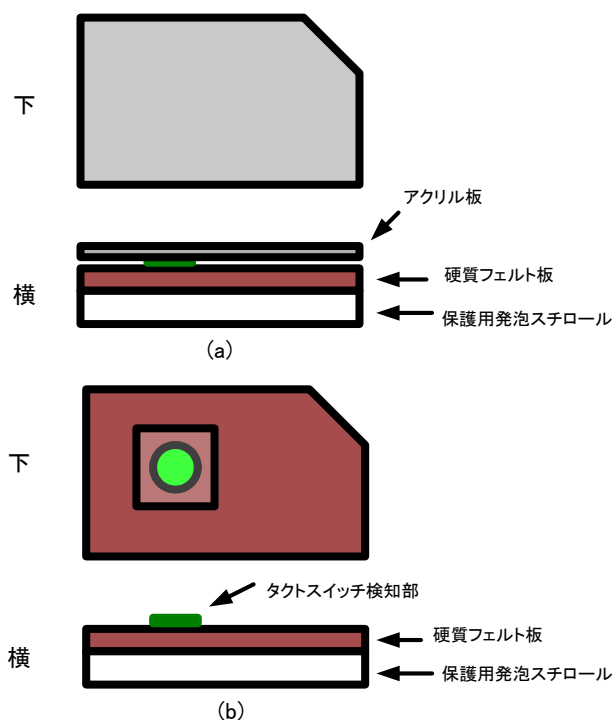


図 1 4 センサ取り付け方式

このロボットの片足を上下に動かし、マイコンが「足を上げる」命令を出してから、センサが応答するまでの時間の計測と実際のモーションとセンサ応答の正誤の確認を行い、どちらの反応が速く、センサの信号が正しいかを検証する。

「センサの反応速度の計測」では動作 50 回分の平均値

---

「モーションとセンサ応答の正誤確認」では 50 回の動作のうち、何回モーションとセンサ応答が一致するかの確認を行う。

また正誤率は足踏み時において、反応時間による誤作動の要因を排除するため、センサが反応するまでに掛かる平均時間の 2 倍の時間経過後におけるセンサ値とその時間の設定角度データから推測される値の比較を行った。

#### 4-1-2 実験結果

表 4 反応時間と一致率

	(a)板取り付け	(b)板取り付け無し
反応時間	22.3ms	15.8ms
一致率	56%	94%

この実験結果から(a)方式に比べ(b)方式のほうが,反応速度の速さ,検出の正確性が高いといえる.これは(a)方式では検出部に取り付けた板が地面と接地,および離れる時に支えているのがタクトスイッチ検出部だけであるため,振動をしているためと判明した.

よって以後の実験では(b)の方式を採用する事とする.また以降の実験に使用する二足歩行ロボット,マイコンも同じとする.

## 4-2 実験2歩行パターンの補正検証

### 4-2-1 実験方法

平面歩行時において、負荷を与えたロボットの足の接地時において、ロボットのモーションデータ（角度データ）の置き換えを行い適応できるかの検証を行う。負荷のかけかたは二足歩行ロボットの右肩の上から負荷をかけるものとする。また実験2において周期速度変更は行わないものとする。

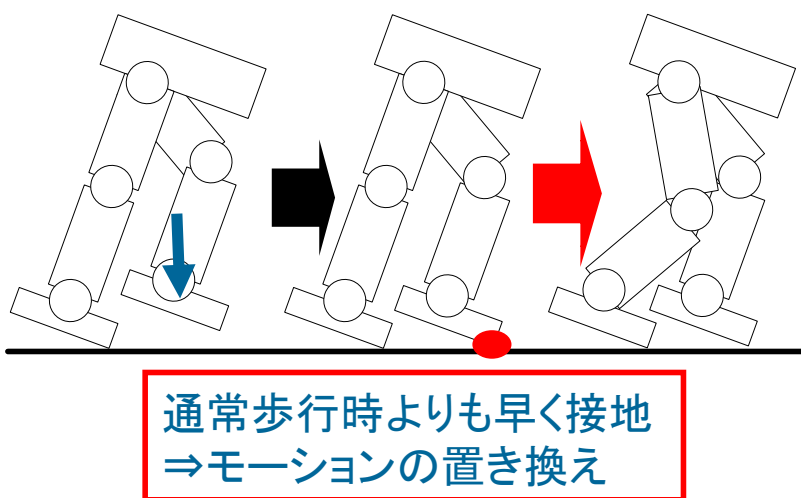


図15 片足にのみ負荷をかけた場合

## 4-2-2 実験結果

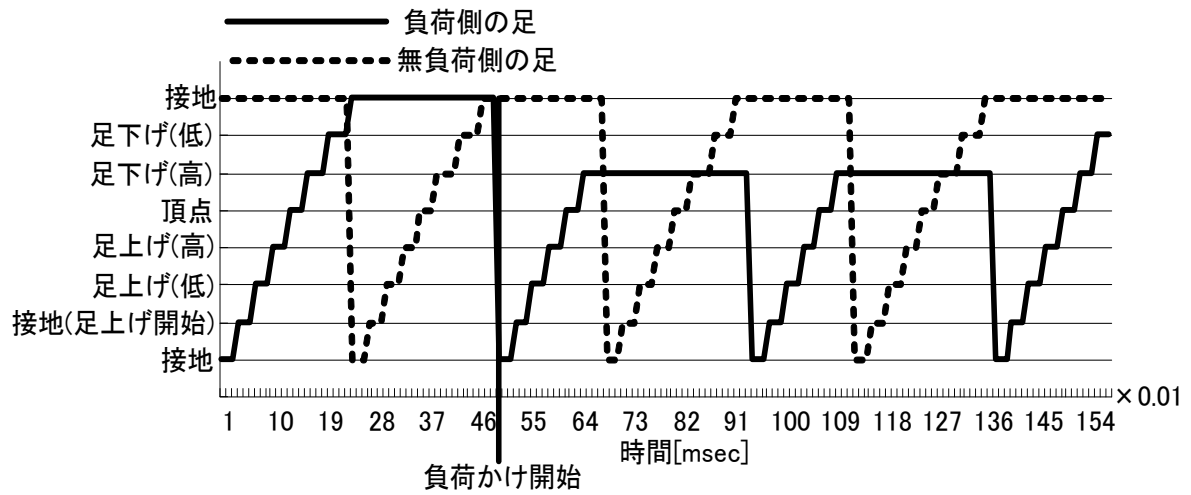


図 16 実験 1 ステップ推移図

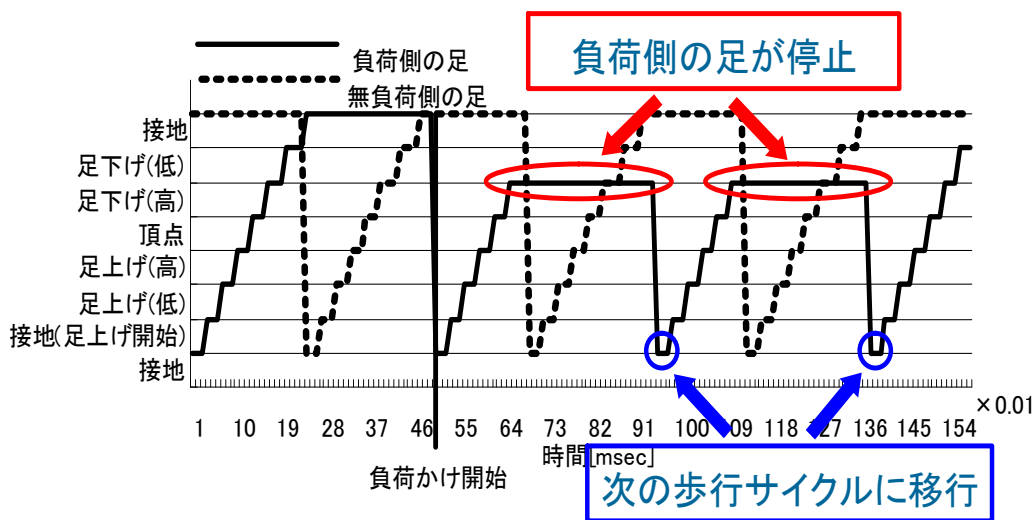


図 17 実験 2 ステップ推移図



#### 4-2-3 考察

0.6 秒から右足のステップ数が足下げ（高）で止まっているのはロボットの右肩からかけられた負荷により、その地点で右足が地面と接地し、モーションを置き換えたためであると考えられる。負荷をかけたのは、ロボットの2周期目と3周期目であったため4周期目ではステップ数が足下げ（低）まで到達している。

## 4-3 実験3 歩行周期の補正検証

### 4-3-1 実験方法

ここでは、足裏センサの信号をもとに、歩行周期を調整することができるかどうかを検証する。

歩行開始時の周期値を通常歩行時よりも大きい状態（約 3.5 倍）で歩行を開始させ、

センサの応答時間から求めた接地間隔により歩行周期を制御し、安定した歩行を行うことが出来るか確認する。

### 4-3-2 実験結果

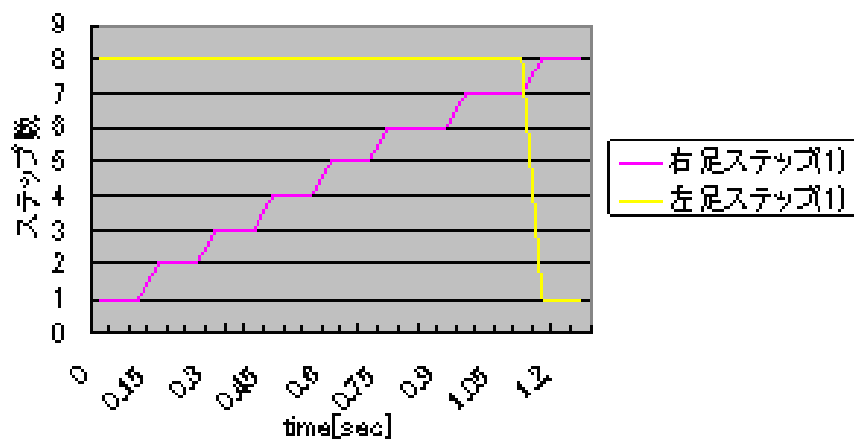


図 1 8 初期歩行周期を増大させた場合

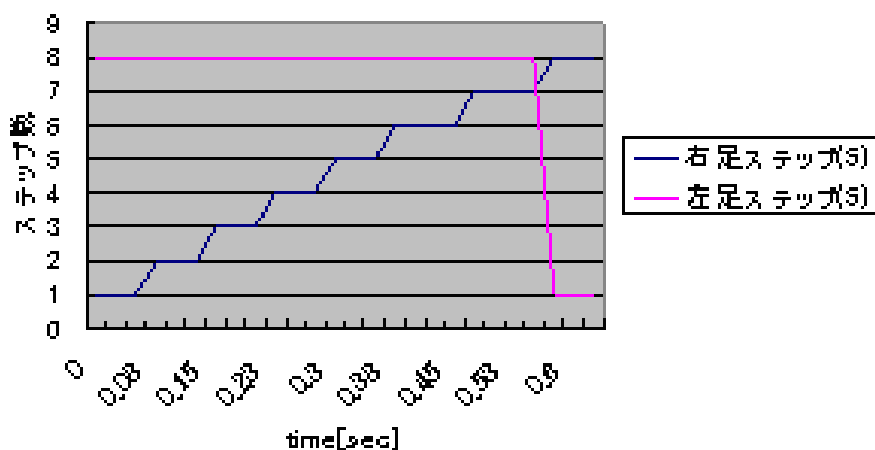


図 1 9 歩行周期増大から 4 周期後

---

グラフのステップはそれぞれ実験 2 における角度データの状態

接地：ステップ 1

接地(足上げ開始)：ステップ 2

足上げ低：ステップ 3 . . .

というふうにそれぞれ対応している

#### 4-3-3 考察

歩行周期が大きいと左右の足の接地タイミングがずれて左右にぶれて、転倒を引き起こしやすくなる。初期値ではロボットは足を踏み出す速度が遅すぎるため大きく左右に振れる状態での歩行をし、不安定であった。だが 4 周期後には周期の長さが初期値のおよそ半分となっている。最終的にはおよそ 13 周期目で実験 2 の周期に収束した。

## 4-4 実験4 歩行周期と補正組み合わせ検証

### 4-4-1 実験方法

実験(2)、(3)の結果を踏まえて歩行パターンと歩行周期の補正を同時に行うことで、歩行中に外乱によって体勢が崩れたときに自動的に補正して歩行を続けることができるか検証する。外乱は歩行中に手で力を加えることで与えた。また段差を上れるかの検証も行った。

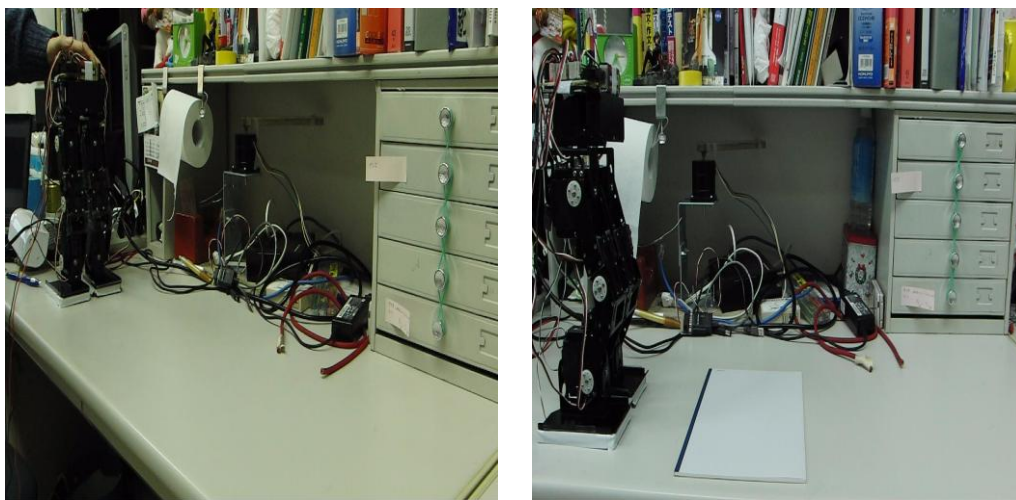


図20 実験4外乱を加えた場合(左)と段差を通過させる場合(左)

### 4-4-2 実験結果

外乱に対して周期の補正を行う事により倒れそうになる方向と反対側に傾けるかのような修正を掛ける事ができた。接地時におけるモーションの置き換えによる補正はセンサ感知範囲の狭さにより有効に働かないケースが発生した。

---

## まとめ

本論では足裏接地センサの信号によるモーシヨンの置き換え歩行周期の調整を行った。

足裏接地センサの信号を用いたモーシヨンの置き換えでは片足に負荷をかけた二足ロボットを歩行させ、負荷側の足が通常歩行時よりも早く接地した時に、モーシヨンを置き換えることができた。

### 歩行周期の調整

初期歩行周期として適切な値より大きな値で開始させ、センサによる接地反応の時間から周期変更を行う事ができた。

### しかし問題点として

段差に対しての安定度が低い。

接地センサの検知外で阻害された場合は歩行することが困難になってしまう。

という事が挙げられる。

これらの問題を解消するためにはタクトスイッチの検知範囲が狭いという弱点を補えるようにセンサの数と配置を変更する、検知範囲が広い光学センサに置き換えるといったことが考えられる。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり,ご指導をしていただいた渡辺嘉二郎教授,小林一行助教授に深く御礼申し上げます.先生方の励ましや助けが無ければ学部時代に私は詰まって先に進めなかったと思います.また就職活動時においても御自身も非常に多忙な中,なかなか決まらない私をいろいろ助けてくださりました.非常にどんくさく最後まで決まらなかった私を支援して下さった事は忘れません.バイタリティ溢れる先生とは対照的に,すぐに息切れをしまい最後の最後まで色々お手間をおかけしてしまった事が本当に心残りです.

またロボット班のメンバにも色々お世話になりました.小俣先輩は最初私がロボット班に入った時にサーボモータの半田付け作業を行わせましたが,非常に長い時間をかけたあげく私が下手な半田付けをしたのを夜中一人で全部付け直すなど,メンバの育成に努力を惜しまない姿勢に感銘を受けました.

蛭田先輩は私がマイコンをその後扱い続けるきっかけになった人です.自身の就職活動が忙しい中ロボット班のメンバ,そしてそれ以外の人にもマイコン講座を開き知識の伝道に努める姿勢は凄いです.特に講座用に作成した自作の資料は非常に分かりやすく,いまだに市販のマイコン解説書でこれより入門用としてわかりやすいと感じたものはありません.また実際に大会におけるマイコンの運用について一番私がお世話になったのが川辺先輩です.ただマイコンをロボット制御に使うのではなく,W I I コントローラと組み合わせる等毎大会において,斬新な運用法を考案するなど色々考えさせられました.またこの論文も川辺先輩のものが完全に土台となっています.本当は先輩の論文の課題の部分まで進めたかったのですが私の力量,努力不足により劣化した内容となってしまいました.本当に申し訳ありません.またロボット班に入りたての頃他のメンバと私だけ中々打ち解けがたい中,声の掛け方を色々工夫してみたりと,私が周囲と打ち解けられるようにしてくれました.平井先輩には3年生の時に私の不注意で本当に失礼な態度を何度か取ってしまいました.そんな私を顔では笑って流してくれていた度量といい,ロボット大会前でのアイデアの発案といいまさにオールラウンダーでした.また一色先輩には就職,卒業論文といった節目の時に何度も気に掛けてくれあした.色々と内に悩みを抱えているとき,問題行動を取ってしまったときにすかさず助言,注意をする面倒見のよさは凄いです.同期の宮川君,大城君にも本当にお世話になりました.

私がミスをした時に厳しく叱責する事もありましたが,その内容は常に道理あとおっており,理に適った内容でした.また影で他の人の助けをするといった気遣いをする事.また緊急時の状況判断の速さは特筆すべき点であると思います.まさに私の代のリーダーとして適任でした.大城君は私が始めて居酒屋で潰れてしまった時に一番献身的に介抱してくれました.宮川君とはまた別の側面というか,一番表立って私を手助けしてくれたのは大城君だと思います.

途中で別の班に移動してしまいましたが,三穂さんには当初勘違いで悪い事をしてしまいま

した.その後別の班になったゆえ二人に比べ共同作業する機会は少なかったですが.セラミック素子を使ったギミックをロボット大会に使う時において.研究成果を快く教えてくれて本当に助かりました.

後輩の小宮山さんは家が遠いにも限らず班の共同作業を非常に遅くまで手伝ってくれました.他の人の指揮をするのは苦手だと思いますが.私も得意ではないので気持ちは多少なりとも分ります.体調に気をつけて今後も頑張ってくれると思っています.田倉君はロボ班歴が浅いながらも.イベントの実行力や会議の進行におけるポイントの抑え方など.人を率いる能力が凄いです.もう卒業してしまうのが非常に惜しいです.合田君は歯に絹を着せぬ言い方という所はありますが.いろいろミスをしてしまう私に実の的を得た指摘をするので非常に有難かったです.岡本君と中山君はマイコン班における私の後輩ですが.初めから私が教える部分がほとんどないほど知識があり頼もしかったです.

ロボ班のメンバではないですが研究室のメンバにも(主に班外の活動で)助けてもらいました.特に発表用の資料.データを作るのが苦手な私を見かねて作り方をいろいろ指導してくれた河西君にはお世話になりました.外部での発表を数多く繰り返して得たテクニックは非常に参考になりました.私と同じく提出物がぎりぎりまで伸びる事が多いものの.非常に豊かな知識.経験から繰り出されるユーモアなアイデアで何度も助言をくれた相澤君.イベントなどの時に何度も資料を贈ってくれた見澤君.慣れないイベント班と一緒に活動してくれた高浜君にも感謝の意を示したいと思います.

最後になりますが.8年という非常に.非常に長い期間学校に何不自由なく通わせてくれた両親に感謝を申し上げます.

## 参考文献

- 1)伊藤宏司,伊藤正美：生体とロボットにおける運動制御,計測自動制御学会,1991,PP147-164
- 2)伊藤宏司：身体知システム論,共立出版株式会社,2005,PP110-130
- 3)Rodney Allen Brooks,：ブルックスの知能ロボット論,オーム社,2006
- 4)Charles T.Leonard: ヒトの動きの神経科学,市村出版,2002,PP143-169



## 付録

実験の動画を付録として添付する.

動画は図ではは分かりにくい歩行補正の様子を収録してある.