

# 目次

<b>第1章</b>	<b>序論</b>	<b>1</b>
1.1	背景	1
1.2	ロボットの動きに関する従来研究	2
1.3	研究目的	3
1.4	論文の構成	3
<b>第2章</b>	<b>ロボットの動きに関する新しい表現方法について</b>	<b>5</b>
2.1	ロボットの動きに関する新しい表現方法の概念	5
2.2	新しい動きの表現方法	5
2.3	新しい動きの表現方法を用いたシステム	6
2.3.1	頻度空間を生成するシステム	7
2.3.2	頻度空間から力を生成するシステム	7
2.4	まとめ	11
<b>第3章</b>	<b>実験に使用したロボットとシステム</b>	<b>12</b>
3.1	実験に使用したロボット:SPC-001	12
3.1.1	サーボ:RS601CR	12
3.1.2	センサボード	14
3.1.3	まとめ:ロボットに関して	14
3.2	システム概要	14
3.2.1	頻度空間の生成	15
3.2.2	力の生成	16
<b>第4章</b>	<b>実験:実ロボットを用いたシステムの動作</b>	<b>19</b>
4.1	実験目標	19
4.2	実験概要	19
4.2.1	実験全体を通して共通の設定	19
4.3	頻度空間の生成に関する実験	20
4.3.1	人による選択頻度の決定	20
4.3.2	ロボットを動かすことによる選択頻度の決定	21
4.3.3	頻度空間の生成全体を通じた考察	22
4.4	頻度空間からのロボットの動きの生成の正当性の検証	22
4.4.1	実験方法・設定	22
4.4.2	実験結果	23
4.4.3	考察	23
4.5	環境変化・状態変化に応じた動きを生成するかの確認	23
4.5.1	ロボットのデータの初期姿勢を変える実験	24
4.5.2	ロボットの動作時に人の手による負荷をかける実験	26
4.5.3	頻度の高い所が複数ある頻度空間における実験	27
4.5.4	頻度の高い所が複数あり、途中で交わる頻度空間における実験	28

4.5.5	ロボットが状態変化に対応した動作をするかの実験 . . .	30
4.6	まとめ . . . . .	32
<b>第5章</b>	<b>結論</b>	<b>33</b>
5.1	本論文のまとめ . . . . .	33
5.2	これからの課題 . . . . .	33
	<b>謝辞</b>	<b>35</b>
	<b>参考文献</b>	<b>36</b>



# 第1章 序論

## 1.1 背景

ロボットは実用初期の頃、遠隔操作ロボットや、工場のラインなどで動く産業用ロボットがほとんどだった。時代が進むにつれ、ハードウェア技術が進歩し、それに伴ってロボットは移動機構や感覚器官を獲得し、現在様々な場面で用いられるようになってきている。例えば、深海や宇宙での作業を行う極限環境用作業ロボット、医療用ロボット、掃除などを行うサービスロボット、AIBOのようなエンターテインメントロボット、ASIMOのようなヒューマノイドロボットなどの多種多様なロボットが作られ、多種多様な環境で使われている。

以下に、ロボットの簡単な分類について述べる。

- 人間が操縦する

ロボットに行わせる動作を人間が直接操作するロボットである。例として、海水中を探索するロボットや、建設用のロボットが挙げられる。

この方法は現在でも、宇宙や深海などを代表とする極限環境で動作する極限作業用ロボットの研究、操作の改善、人間の動作の補助に関する研究などの様々な研究が行われている。

- 記録した動作を行わせる

ロボットの各関節ごとにどのように移動するかを全て指定して、それを実行させるものである。この方法は現在でも工場のラインなどで産業用ロボットとして使われている。

- センサ情報を用いて動作するロボット

ロボットがセンサ情報を持ち、ロボットに環境を認識させてズレを修正するなど、その環境に適応した動きをさせるものである。本論文における環境は触れる対象などの外的なものだけに限らず、ロボット自身の状態も含める。

現在普及している多くのロボットはここに入る。

- 行動の経験を学習し行動に反映するロボット

ロボットが実際に行った行動や他社からの情報などの様々な経験から学習し、次回以降の行動に反映するものである。このようなロボットは現在研究が行われている最中である。

このように、ロボットは様々な機能を持つようになってきている。

技術の進歩とともに多種多様な環境で使われるようになってきているロボットだが、ロボットの直面する環境が多様・複雑化するにつれて、ロボットに望まれる能力も増えている。

以前はロボットを動かすのは工場内や研究室など、変化する要素が少ない単純な環境であった。このような環境においては変化する要素を有限とみなすこ

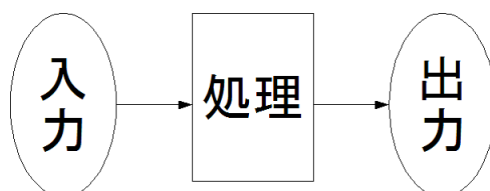


図 1.1: 入力と出力

とが出来たため、起こりうる変化に対して人間が予測したり試行錯誤したりして全ての動きをプログラムすることが可能であった。しかし、オフィスや一般家庭、極限環境などロボットが活躍する範囲が広まった結果、ロボットの動く環境では変化する要素が無限となり、様々なことが起こり得るようになった。そして変化する要素が多いため、人が変化を予測したり試行錯誤によって全ての動きをプログラムすることが不可能になっている [1].

しかし、様々なことが起こる複雑な環境においても、行動停止に追い込まれることなく環境に適応する能力が必要とされている。

ここで、実際の生物の動きとロボットの動きを対比して考えてみる。

人間が自分の体を動かす時、具体的なことはあまり考えない。例えば、手を上げる動作を考える。人間は大体どの辺りまで動かすかということを考えればあとはほとんど考えないで手を上げることができる。考えたとしても、速く上げるなどの抽象的な概念である。つまり、運動をどのように行うかという計画を行えば動ける。ロボットが手を上げる場合はどの角度まで、どのぐらいの力で、どのぐらいの速度でなど計画以外にも様々な値を与えてやらなければならない。他の動作についても同様で、ロボットに何か動作をさせるということは様々な値を具体的に決める必要がある。この決めるべき値を計算などして、決定することにより運動軌道の生成を行う。

また、生物は基本的に体を動かす時に周りの状況や自分の状況を感じ覚器官から情報を得て、その情報をもとに脳の中で何らかの処理して運動の決定をし、実際に動く。ロボットは感覚器官にあたるセンサや脳に当たるコンピュータ、力の出力を行うアクチュエータなど、実際の生物と同じような構造をしていて、ロボットにも入力、処理、行動と言った手順を踏むことが考えられる。これらを図に表すと図 1.1 のようになる。

様々な環境で動くと言う要求に答えるために、生物と比較しつつ適応的な動作の生成手法として様々な提案、研究が行われてきている。大きくその方向を分類すると、どこにどのように動くかと言った運動の計画を行うものと、どの腕をどの角度までというような運動軌道の生成を行うものとに分類することが出来る。 [2].

本論文では後者のような運動生成のレベルに分類される研究を行う。

## 1.2 ロボットの動きに関する従来研究

先ほど述べたとおり、ロボットが様々な環境で適応して動作を生成する方法として様々なものが提案されており、大きく方向性を分類すると運動の計画と運動軌道の生成とに分類することが出来る。

前者の研究に関しては、ロボットの運動に「歩く」、「走る」と言ったラベルを与え、ラベルごとの運動の最適化、選択を行うシステムの設計に対する議論が行われている [3].

後者の具体的な研究の説明の前に既存の動きについて説明する。まず、ロボットの動いている状態をロボットのデータと時間で表す。以下に、既存の動きの表現方法の例を示す(図 1.2)。

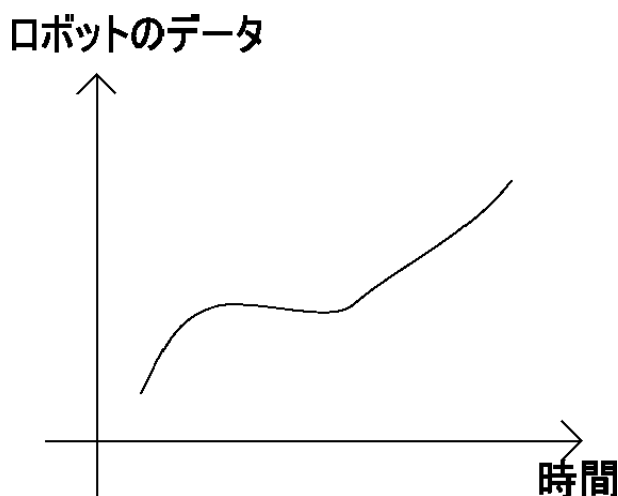


図 1.2: 既存の動きの表現方法

図 1.2 のように、ロボットの連続的な動きはロボットのデータと時間からなる状態空間上に線で表すことができる。この線一つにつき一つの動きが表現される。また、この線上の任意の点がその時刻におけるロボットのデータを表す。

この方法では、ロボットの軌道が線から外れた時に制御を行うのは難しい。

そこで後者の研究として、生物でリズム的な運動の生成に用いられていると考えられている神経振動子を用いた研究 [2] や、カオスアトラクタを設計し、そのアトラクタへの引き込み現象を用いるもの [1] が挙げられる。他にも、人間の動作をまねて新しい行動を獲得する見まね学習、その見まね学習から得た情報をもとに運動のパターンを抽象化してシンボルとして表す方法 [4] などが挙げられる。

本研究では後者に関する研究に分類される。後者の問題点として、環境に適応的な動作が生成できない、適応的な動作が生成出来てもパラメータの設定やアトラクタの設計が複雑、などと言ったものが挙げられる。

### 1.3 研究目的

前節までで述べたとおり、ロボットには様々な環境で機能停止に陥らずに動作することが求められている。本研究はそのような多種多様な環境に適応した動作を生成する研究の中でも特に運動軌道の生成レベルに関する研究にあたる。

今まではある時間におけるデータが一意に定まるような表現や、適応的な動作を生成出来ても場の設計が複雑と言った問題があった。

そこで、環境に適応的な動作を生成しつつ、設計や計算が比較的簡単な表現方法を提案し、その表現方法を用いたシステムの作成を目標とする。

### 1.4 論文の構成

以下に、本論文の構成を述べる。

第 1 章では、本研究の背景及び従来手法を述べ、本研究における目的を示した。

第2章では、提案する動きの新しい表現方法について説明する。

第3章では、本研究の実験において使用する実ロボット及び、実ロボットに提案手法を適用したシステムについて説明する。

第4章では、作成したシステムを用いて実際に行った実験と結果について述べる。

第5章では、本研究全体に関する考察及びまとめを行い、今後の課題を示す。

## 第2章 ロボットの動きに関する新しい表現方法について

この章では、本論文で提案する新しい動きの表現方法の概念を述べ、その概念を実現するための一つの方法について述べる。

### 2.1 ロボットの動きに関する新しい表現方法の概念

今回提案する動きの表現方法ではロボットの状態空間に通りやすさと言う概念を考える。図 2.1 に本論文で提案する表現方法の概念図を示す。

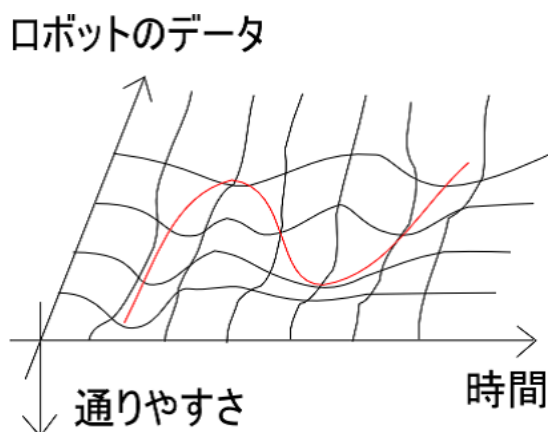


図 2.1: 新しい表現のイメージ

動きの中心となる所が大きくへこんでいるような場である。砂場の砂を指でなぞった時に出来るような状態を想像する。

このような場にボールを置くことを想像する。この時、ボールは場において通りやすさが一番高い所に近づくようにして動く (図 2.2)。

この場はロボットのデータ、時間、通りやすさからなる空間なのでその時のボールの位置はロボットのデータと時間を表している。このボールが動いた軌跡をロボットの動きに用いようというのが本研究の提案である。

### 2.2 新しい動きの表現方法

提案する概念は、図 2.1 のように軌道を中心とした場を作っていくものである。そして、その場の任意の点において軌道によっていくような力を計算出来る場を設計するものである。

この概念をどのように実装するかを考える。

まず、通りやすさで決まるパラメータを、選択されやすいものと考え、選択頻度と定義する。そして、時間、ロボットのデータ、選択頻度からなる空間を頻度空間と定義する。

## ロボットのデータ

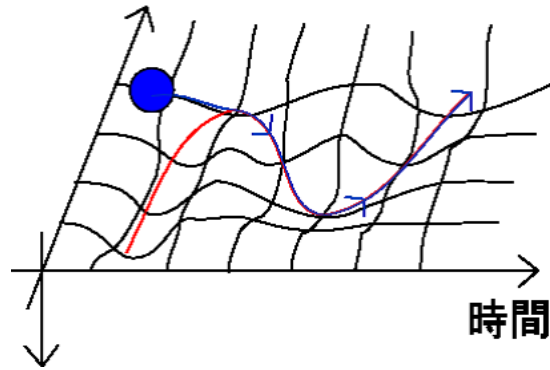


図 2.2: 場にボールを置いた状態

次に、この頻度空間から力を生成することを考える。

頻度空間にボールを置く。このボールはロボットのその時における状態を表すものである。その時の状態における力を計算し、その力によってボールが動く。この時のボールの軌跡をロボットの動きに利用する。

### 2.3 新しい動きの表現方法を用いたシステム

次に、新しい動きの表現方法を用いたシステムをどのように構築するかについて述べる。

まず、システムの全体像について述べる。以下にシステムの全体図を示す(図 2.3)。

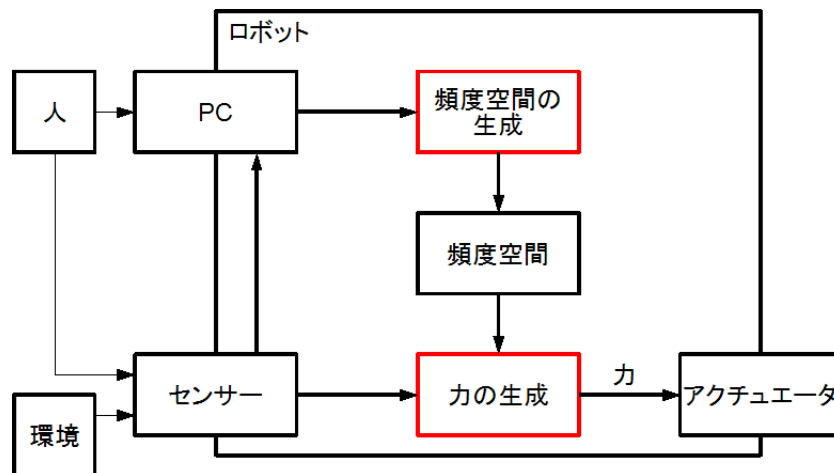


図 2.3: 新しい動きの表現を用いたシステム

今回提案するシステムは大きく分けて二つの部分に分けられる。一つは頻度空間の生成、もう一つが頻度空間から力を生成するものである。人がPCやロボットを操作することで、頻度空間を生成し、生成された頻度空間と、ロボットの環境を基に動きを生成、出力するシステムである。

以下、頻度空間の生成、力の生成それぞれについて詳しく述べる。

### 2.3.1 頻度空間を生成するシステム

まずは頻度空間を生成するシステムから述べる。ここでは、人がPCを操作する、PCを通して何らかの命令を与える、ロボットを直接動かすといった様々なロボットへの入力をもとに頻度空間を生成する。以下に頻度空間の生成に関連するシステム図を示す(図2.4)。

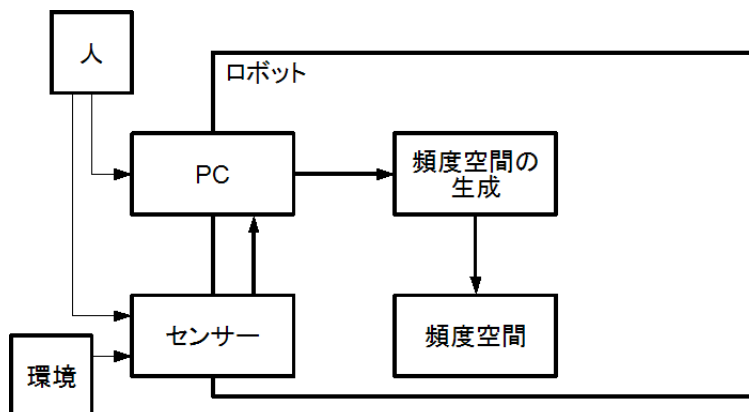


図 2.4: システム:頻度空間の生成

頻度空間の生成には、時間・ロボットのデータからなる状態それぞれにおける選択頻度を決定していく。イメージとしては2.5のようなものになる。

図2.5の上のように空間に複数の動きが表現されている時、その動きを中心に周囲をへこませて作ったイメージになる。

ここでは、頻度空間の時間及びロボットのデータをそれぞれ区切り、離散的な空間として表す。そして、区切った所に来たマスをセルと定義する。そのセルごとに選択頻度を決定していく(図2.6)。

このようにして選択頻度を決定していくと頻度空間を生成することが出来る。選択頻度の軸を上向きにして表示すると、図2.7のようなものが出来上がる。以下、計算を簡単にするため選択頻度は正の数として扱い、軸は上向きに取る。

選択頻度を決定する方法には人が直接入力する。ロボットを動かしてその動作を基に決定するなど何種類か考えられる。今回、どのようなものを作ったかに関しては次章で述べる。

### 2.3.2 頻度空間から力を生成するシステム

それでは次に、生成された頻度空間をもとに力を生成するシステムについて述べる。まずは、力の生成に関連するシステム図を示す(図2.8)。

ここでは、生成した頻度空間とその時のロボットから得られるデータをもとに力を計算し、環境に適応的な動きを生成する。

力の生成は頻度空間における力の生成とそこからロボットへの出力を計算する部分に分かれる。

#### 頻度空間における力の計算

ここでは、頻度空間における力の生成について述べる。まずは、図を示す(図2.9)。

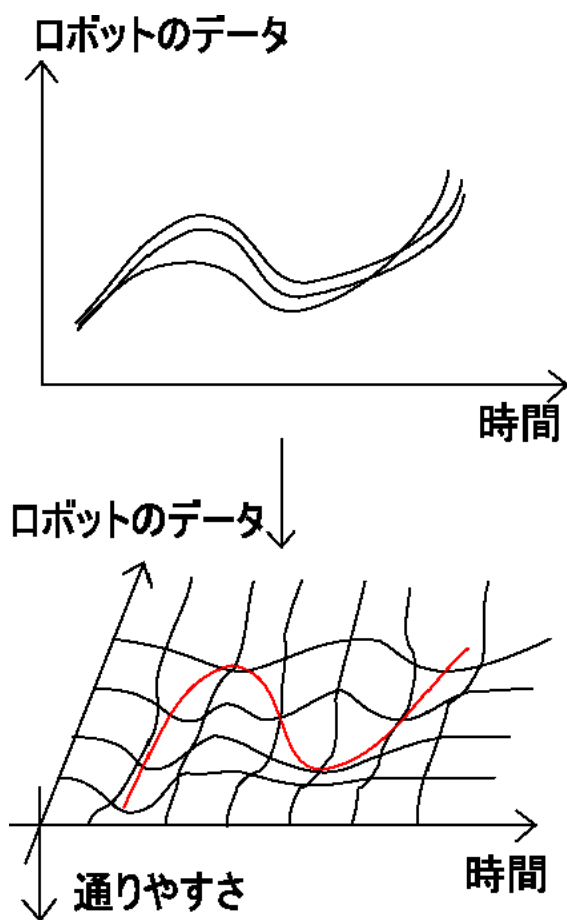


図 2.5: 新しい表現のイメージ

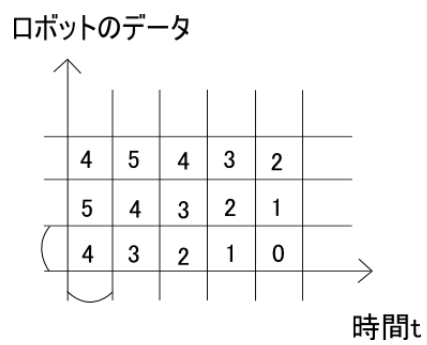


図 2.6: 時間・ロボットのデータを区切る



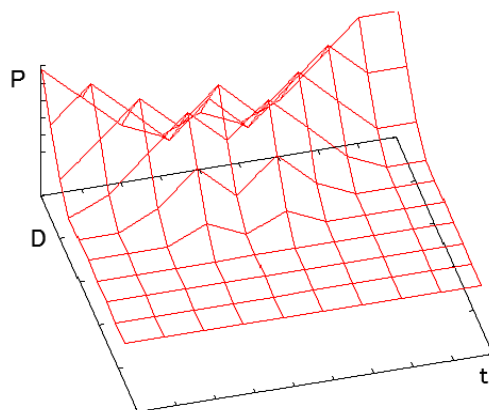


図 2.7: 実際に作る場の例

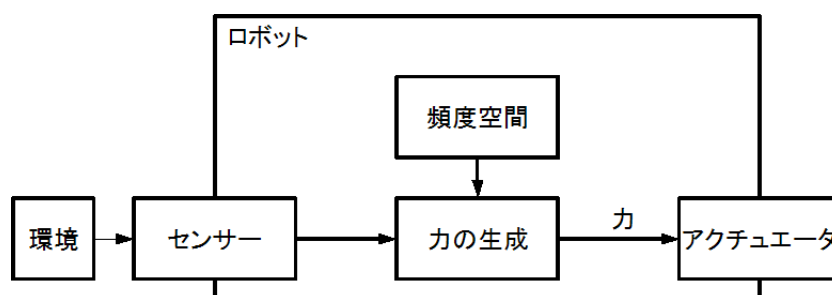


図 2.8: システム:力の生成

先ほど生成した頻度空間 (図 2.9) において, ロボットの状態である青い球が頻度の高い所へ近寄っていくように頻度空間における力を設計する.

図 2.9 において, ロボットの状態である青い球が現在時刻を  $T$ , その時のロボットのデータを  $D$  と表している.

また, 次の時刻を  $T'$  とし,  $T'$  における選択頻度のうち, 一番近い  $n$  個のセルを選択する.  $n$  個のセルは (図 2.10) のようにロボットの現在の状態を中心として左右に  $n/2$  個ずつ選択する ( $n$  は奇数, 図 2.10 は  $n=3$  の時). こうして選択したセルにおけるロボットのデータと選択頻度を  $(D_i, P_i)$  (ただし,  $i=1 \sim n$ ,  $n$  は奇数) で表す.

更に, 慣性力  $V$  を定義し,  $V$  を用いてロボットの状態を変える力  $F$  として計算する. また,  $n$  個のマスの中で選択頻度が最も高い時, ロボットのデータと選択頻度をそれぞれ  $D', P'$  とする.

次に, 実際に力を計算するのに用いた計算式を示す.

$$F = k \times (\theta' - \theta) \quad (2.1)$$

$$k = \frac{P'}{\sum_{i=1}^n P_i} \times \alpha \quad (2.2)$$

これによって, 頻度空間におけるロボットの力を表す. この式における  $\alpha$  は任意の定数である.  $k$  は場におけるロボットの状態の動かしやすさを表す.  $k$  が大きければ  $F$  は大きくなり,  $k$  が小さければ  $F$  は小さくなる. 力学における運動方程式における  $m$  のような存在である.

また,  $k$  の計算式 2.2 は頻度の大きさによって力  $F$  を変えるために用意した.

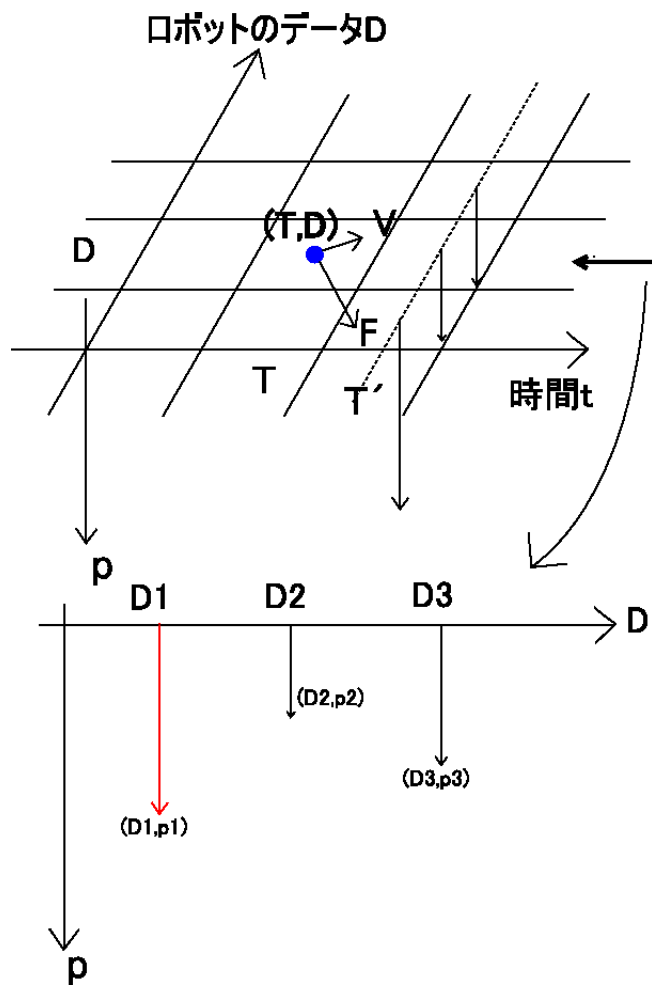


図 2.9: 力の生成イメージ

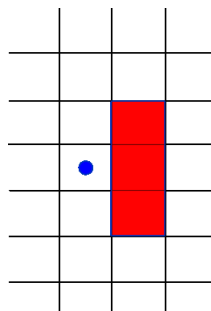


図 2.10: セルの選択方法 (n=3)

周囲に比べて目標地点  $D'$  における選択頻度  $P'$  が大きければ大きいほど力が大きくなる。自然世界における、斜面の傾きのようなものである。

### ロボットへ出力する力の計算

次に、ロボットに実際に出力する力の計算について述べる。先ほど計算した力は、頻度空間における力の計算なので、実際にロボットへ出力する形に直す必要がある。その計算式は以下のようになる。

$$D'' = D + v(T - T') + \frac{F}{2m}(T^2 - T'^2) - \frac{F}{m}(T - T') \quad (2.3)$$

( $m$  は任意の定数)

## 2.4 まとめ

本章では、本論文で提案する概念及び、その概念を以下に実装し、どのようにシステムを構築するかについて述べた。次章では実際に実験に用いたロボット及びそのロボットに今回提案した手法を適用したシステムについて述べる。

## 第3章 実験に使用したロボットとシステム

本研究では実ロボットを用いて実験を行った。実ロボットにはスピーシーズ SPC-001 を用いた。この章ではロボットについての説明及び、ロボットへ本研究の手法を適用した場合のシステムに関して説明を行う。

### 3.1 実験に使用したロボット:SPC-001

SPC-001 とは、スピーシーズ社の提供する人型ロボットである (図 3.1)。

全身にロボット用サーボ 21 個が搭載されており、各サーボにおいて角度や負荷、温度などの検出が可能である。また、サーボ内臓のセンサとは別にジャイロセンサ、3 軸センサなども搭載している。更に制御用として UNIX 系の NetBSD をベースにカスタマイズした SpeecysOS 搭載している。また、頭部に PWM 制御サーボ 2 個が搭載されている。

主な仕様を表 3.1 に示す。

#### 3.1.1 サーボ:RS601CR

RS601CR は、SPC-001 で用いられているロボット用のサーボである。このサーボは、サーボの角度や負荷、温度、移動経過時間などサーボの状態を検出することが可能である。また、移動後の角度と移動時間を指定することによりロボットを動作させる役割を果たす。

主な仕様を表 3.2 に示す。

また、各サーボには ID 番号が振り分けられており、サーボの識別に使われる。それぞれのサーボのロボット上の位置は図 3.2 のようになる。



図 3.1: 本研究で使用するロボット

表 3.1: SPC-001 の主な仕様

関節可動部自由度	頭	2 軸
	腕	4 軸 × 2 本
	上半身回転	1 軸
	脚部	6 軸 × 2 本
	合計	23 自由度
頭部インターフェース	自由度	2 軸
	LED(眼部分)	3 色 × 2 セット
	35 万画素 CMOS カラーカメラ	1 個
	マイク入力	2 個
	音声出力用スピーカ	1 個
外部接続用 汎用インターフェース	無線 LAN 標準装備 (IEEE802.11b 準拠)	
センサ	サーボ内臓	サーボ個数分
	ジャイロセンサ	1 軸 (2 軸, 3 軸オプション)
	3 軸 G センサ	1 セット
	CMOS カラーカメラ	1 個
	マイク	2 個 (モノラル × 2)
バッテリー	ニッケル水素専用電池 9.6V 2000mA	
寸法/重量	約 50cm/3.7kg	
消費電力	約 1.7A(ひざを曲げて静立時) 約 4A 前後 (Speecys_ Dancing 時)	
動作時間	約 15 分~30 分 (Speecys 社規定による測定)	
充電時間	約 1~2.5 時間 (充電電流による)	
フレーム	アルミ合金製 アルマイト処理 3 色	

表 3.2: RS601CR サーボの主な仕様

寸法	59.0 × 26.0 × 47.1mm
重量	93g(軸, アルミホーンなしの状態)
動作速度	0.17sec/60° (9.6V)
可動範囲	240 度
出力トルク	21kg・cm(9.6V)
電源電圧	9.6V
制御方式	RS485(127 個まで接続可能)
通信速度	最大 1.3Mbps
通信方式	双方向, コマンド式, 半 2 重
センス情報	角度, トルク, 温度など
キャリブレーション	あり:25 点補正
耐久性	通常のラジコンサーボの 10 倍程度 (同等の負荷をかけた実験結果)

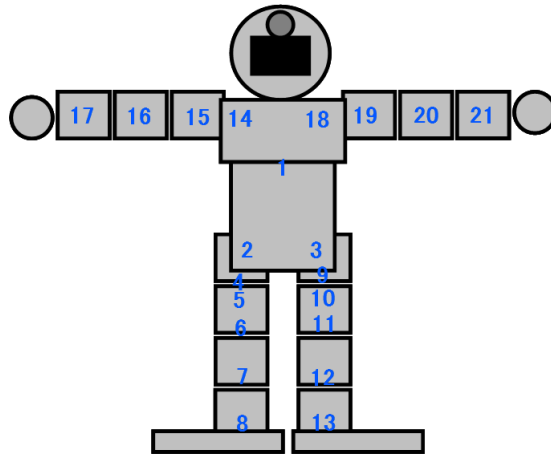


図 3.2: SPC-001 における各サーボの位置

### 3.1.2 センサボード

SPC-001 に搭載されているセンサボードには，ジャイロセンサ，G センサなどが実装されている．主な仕様を表 3.3 に示す．

表 3.3: センサボードの主な仕様

I/F	RS485
ジャイロセンサ	1 軸 × 1
G センサ	3 軸 G センサ × 1 $-70 < value < 70$
LED	LED × 6 を制御
トリミング	G センサ，ジャイロセンサそれぞれ可能

### 3.1.3 まとめ:ロボットに関して

本章ではここまでで実験に使用するロボット SPC-001 について説明した．本研究における実験で用いるロボットは，以後全てこの SPC-001 を指す．

また，本節で紹介したサーボは実験において動作の要となり，角度データの取得にも用いた．更に G センサの y 軸成分をロボットのデータとして取得に用いた．

次節では提案手法をこのロボットにどのように適用し，どのようなシステムを作ったかを述べる．

## 3.2 システム概要

本節では前節で述べたロボットに対して前章で提案した手法を適用したシステムについて説明する．ここで再びシステムの全体図を載せておく (図 3.3)．

このシステムにおけるロボットが SPC-001，PC がロボットに搭載された SpecysOS，センサが SPC-001 が持つ各種センサ，アクチュエータがサーボにあたる．このシステムにおいて，頻度空間の生成，生成された頻度空間からの力の生成について述べる．

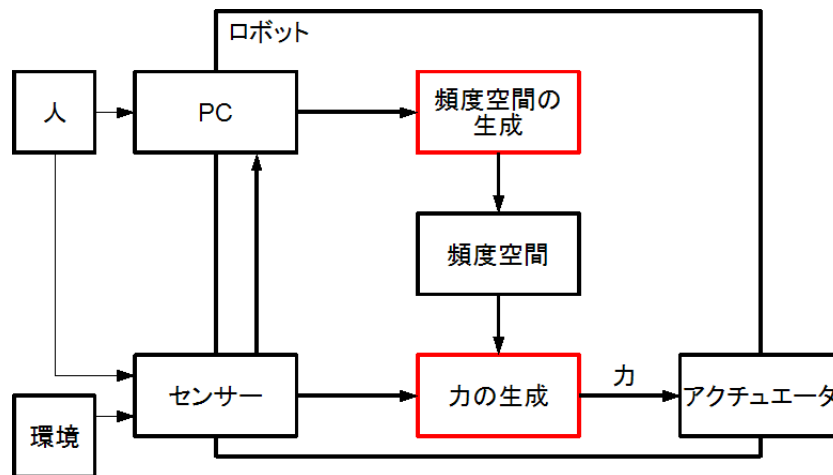


図 3.3: 新しい動きの表現を用いたシステム

### 3.2.1 頻度空間の生成

まずは、頻度空間の生成について述べる。ここではロボットのサーボの角度、時間、選択頻度からなる頻度空間を考える。また、今回はロボットのデータ及び時間の区切る間隔は一定にした。イメージ図を示す (図 3.4)。

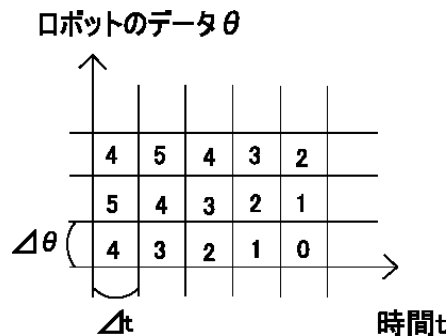


図 3.4: 今回行った頻度空間の生成

このような頻度空間におけるそれぞれのセルの選択頻度を決定していく。これには何通りか方法があるが、実際に実験を行った二つの方法について述べる。人が選択頻度を直接決めていく方法と、人間がロボットを動かす、センサからの情報によって得た値をもとに決めていく方法の二つである。

#### 人による選択頻度の決定

この方法は、時間や角度で空間を区切った後に来たセルに人間が手動で選択頻度を入力していくものである。この方法は、実装が簡単、思い通りの頻度空間が設計できるのに対して、入力にかかる時間が長いという問題がある。

#### ロボットを動かすことによる入力

この方法は、人間がロボットを直接さわって、その時の動きを記録し、その動きをもとに選択頻度を決定、頻度空間を生成する方法である。イメージ図を示

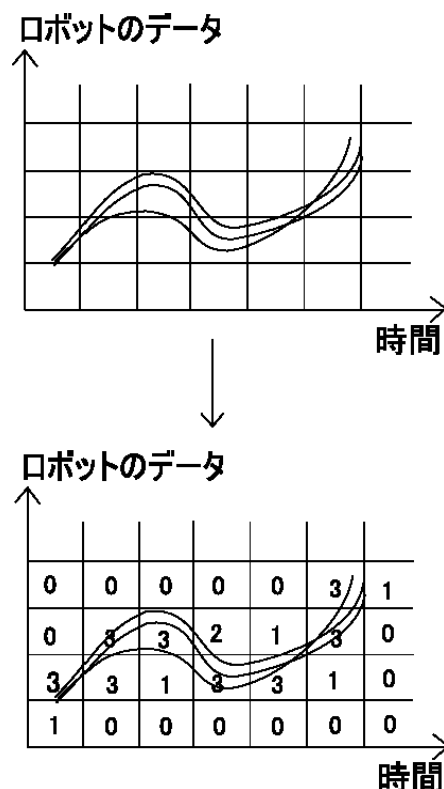


図 3.5: ロボットを動かして頻度空間を生成

す(図 3.5). 図において線が人間がロボットを動かした時の軌跡で, 通ったセルを中心に選択頻度を上げる.

### 3.2.2 力の生成

次に, 生成された頻度空間から実際に力を生成する方法について述べる. これは, ロボットのデータ  $D$  を  $\theta$  に直したものとなる.

まずはイメージ図を示す(図 3.6). 扱うデータが角度なのでロボットのデータは  $\theta$  になっている.

現在の時刻  $T$  におけるロボットのデータを  $\theta$ , 次の時刻を  $T'$  における選択頻度のうち, ロボットのデータの現在の状態を中心として, その中心と左右に  $n/2$  個ずつ選択する. そして, それぞれのロボットのデータと選択頻度を  $(D_i, P_i)$  とする(ただし,  $i=1 \sim n, n$  は奇数). また, 速度を  $V$ ,  $n$  個のマスの中で選択頻度が最も高いものを  $(\hat{\theta}, \hat{P})$  と表す.

これらを用いてロボットの状態を選択頻度の高い状態へ動かすための頻度空間における力を計算する. 実際に用いた式を次に表す.

$$F = k \times (\theta' - \theta) \quad (3.1)$$

$$k = \frac{P'}{\sum_{i=1}^n P_i} \times \alpha \quad (3.2)$$

次にこれらのデータを使って実際にロボットが出力する力を計算する. 本研究で用いたロボットは目標角度と, 移動にかかる時間を指定して動かすので目標角度  $\theta''$  を計算する. 計算式を以下に示す.



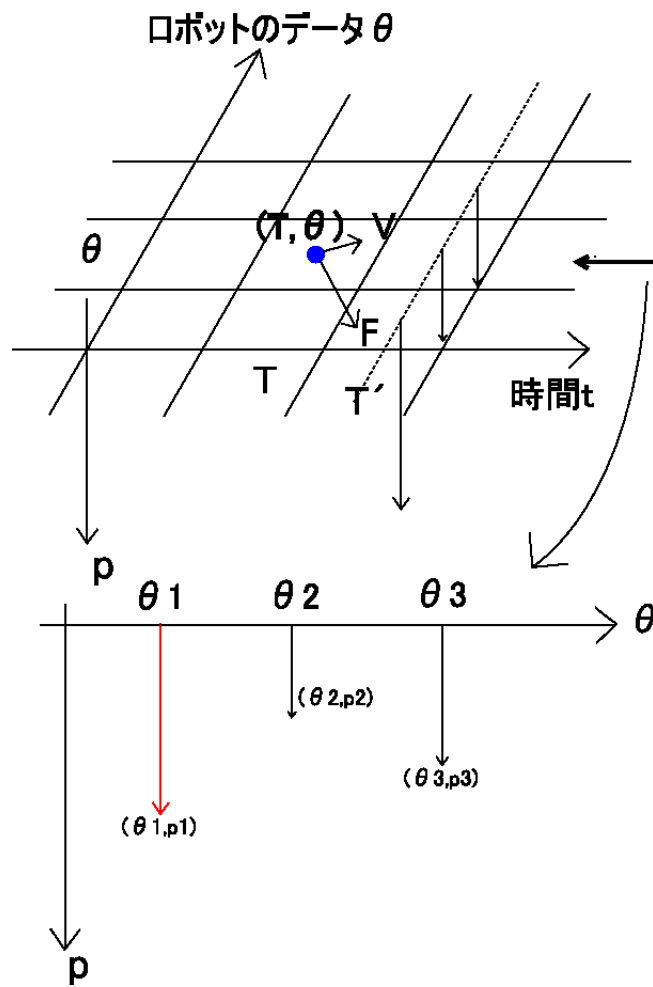


図 3.6: 力の生成イメージ図

$$\theta'' = \theta + v(T - T') + \frac{F}{2m}(T^2 - T'^2) - \frac{F}{m}(T - T') \quad (3.3)$$

( $m$  は任意の定数)

ここで  $m$  はロボットの状態の動きやすさを決める定数で、力学における質量  $m$  と似たような意味を持つ。  $m$  が大きくなればロボットの状態はうごきにくく、  $m$  が小さくなればロボットの状態は動きやすくなる。

## 第4章 実験:実ロボットを用いたシステムの動作

本章では前章で述べたシステムを実ロボットを用いて構築する。また、頻度空間、頻度空間の生成、頻度空間からの力の生成それぞれについての正当性を検証する。

### 4.1 実験目標

本実験では今回実装したシステムを用いて複数種類の頻度空間を生成し、その頻度空間の生成方法の正当性の確認及び、その頻度空間をもとにした動きを生成の正当性を検証する。この実験により、今回提案する手法が環境に対してロバストな動きを生成するかの確認を行う。

なお、今回の実験では簡単のために右肩の14番サーボ(14ページ図3.2参照)とセンサボードについているGセンサのy軸のみ用いた。

### 4.2 実験概要

本節ではシステムを用いた実験方法について述べる。実験は大きく分けて、頻度空間の生成と、頻度空間から力を生成する部分に分かれる。それぞれについて説明を行う。

- 頻度空間の生成に関する実験

提案した頻度空間の生成方法について説明・検証する。生成方法は、人が直接選択頻度を決定する方法と、人がロボットを動かすことによる入力それぞれについて行う。

- 頻度空間を用いたロボットの動作生成に関する実験

複数種類の頻度空間を用いて、実際に動作を生成させて検証する。ロボットの動作生成は、頻度空間における力の計算部と実際のロボットの動きを計算する部分に分かれる。

この実験で、頻度空間からのロボットの動作生成方法の正当性を検証する。また、今回の提案手法がロボットの周りの環境やロボット自身の状況に応じた動きが生成できるかを検証する。

#### 4.2.1 実験全体を通して共通の設定

実験全体を通して共通の設定を表4.1に示す。

表 4.1: 実験全体を通して共通の実験設定

用いるデータ	角度データ (度) G センサ y 軸
用いるサーボ	14 番サーボ
時間	秒
角度の範囲	-120~120 度
G センサの値の範囲	-70~70
全体の時間	10 秒
t	0.5 秒
$\theta$	12 度
$\alpha$	0.7
n	9
m	0.23

### 4.3 頻度空間の生成に関する実験

ここでは頻度空間を実際に生成し、生成方法に関する検証を行う。生成方法は、人による選択頻度の決定を用いる方法と、人がロボットを動かすことによる選択頻度の決定方法を用いる方法の 2 種類である。

#### 4.3.1 人による選択頻度の決定

人による選択頻度の決定を用いて、頻度空間を生成し、生成した空間及び生成方法について検証する。

##### 実験方法設定

人間が選択頻度を決定していく際、先に一番高い値を 5 と決め、中心軌道の通るセルの選択頻度を 5、その隣から少しずつ下がるように選択頻度を決定していった。

また、今回は G センサを固定した状態で行った。

##### 実験結果

実際に生成を行った所、図 4.1 のようになった。

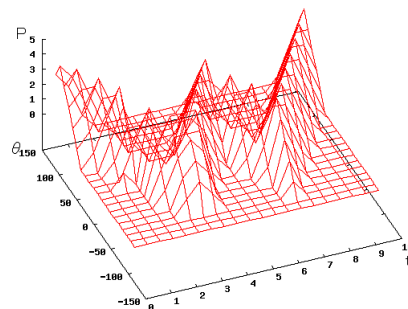


図 4.1: 人による選択頻度の決定を用いて生成した頻度空間

## 考察

最初に考えた中心軌道を持った頻度空間を生成することができた。

この方法は、人間が思ったとおりの場を生成することが出来る反面、全ての選択頻度を入れるのに時間がかかると言った問題点がある。今回は  $20 \times 20 = 400$  個の選択頻度を決定していったので人間が入力できる範囲であったが、区切る間隔を狭くしたり、扱うデータ数が増えていくと、人間が全てを入力していくのは実質不可能となる。そのため、実際に頻度空間全体を生成していくには向かないと考えられる。もしくは、限られた部分に対する微修正に使える。

### 4.3.2 ロボットを動かすことによる選択頻度の決定

人がロボットを直接触れて動かすことにより選択頻度を決定し、頻度空間を生成していく。今回は右肩のサーボを扱うので、腕の上げ下ろしを行った。

#### 実験方法・設定

人がロボットを動かす回数を1回と5回の2通り行い、それぞれ似たような頻度空間を生成して検証する。

#### 実験結果

それぞれ、図 4.2 のような結果になった。

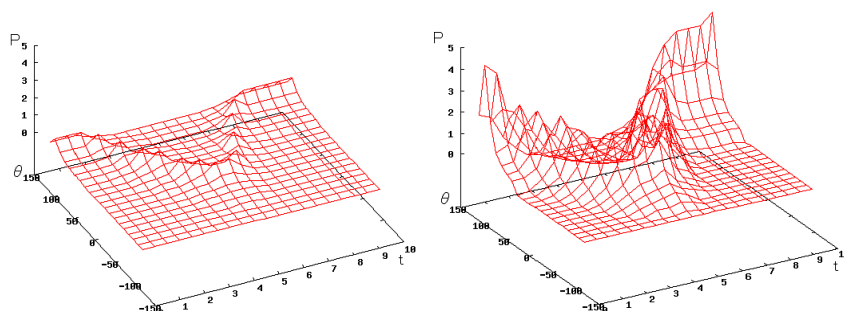


図 4.2: ロボットを動かすことによる選択頻度の決定で生成した頻度空間。左が1回入力、右が5回入力した時の頻度空間

## 考察

どちらも中心に選択頻度の高い頻度空間が生成できた。よって、ロボットを動かすことによる選択頻度の決定を用いた頻度空間の生成は実用範囲のものだと言える。

ただし、複数回入力した場合は時間のずれによって全体的に平らな場が生成されやすい傾向がある。平らな場所については、力の生成については特に問題ないが、曖昧ではない、しっかりした中心軌道を持った場を生成したい場合は向いてないと言える。

### 4.3.3 頻度空間の生成全体を通じた考察

今回作成した頻度空間の生成方法はどちらも実用範囲の頻度空間を生成することができた。

しかし、人による選択頻度の決定は作成するのに時間がかかる、ロボットを動かすことによる選択頻度の決定は複数回入力すると平らな場が生成されやすいなど、入力方法に関しては更に洗練・拡張していく必要があると考えられる。

## 4.4 頻度空間からのロボットの動きの生成の正当性の検証

次に、頻度空間から力を生成する方法の正当性に関して検証する。ここでは、先ほど生成した頻度空間を用いて検証を行う。

### 4.4.1 実験方法・設定

まず、先ほど生成した頻度空間を再び挙げる。

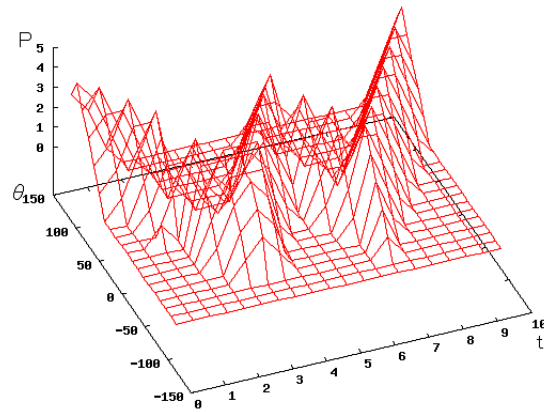


図 4.3: 人による選択頻度の決定を用いて生成した頻度空間

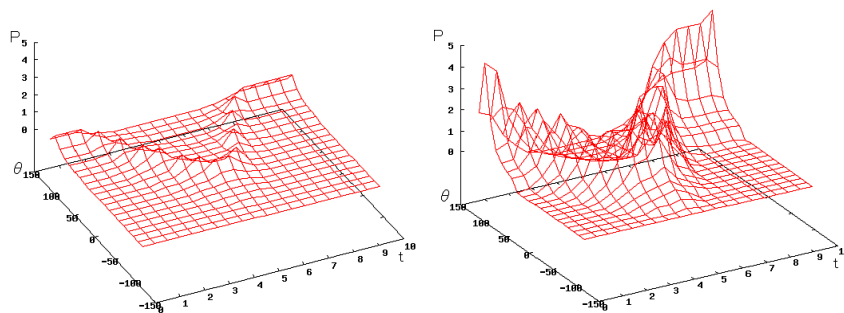


図 4.4: ロボットを動かすことによる選択頻度の決定で生成した頻度空間。左が1回入力、右が5回入力した時の頻度空間

それぞれの頻度空間を用いて実際にロボットを動かし、その時のロボットの動きと頻度空間を比較し、力の正当性の検証を行う。

#### 4.4.2 実験結果

それぞれ実行した結果は図 4.5, 図 4.6, 図 4.7 のようになった. 右にある 2 次元プロットは赤が頻度空間の頂点, それ以外が実際の動きとなる.

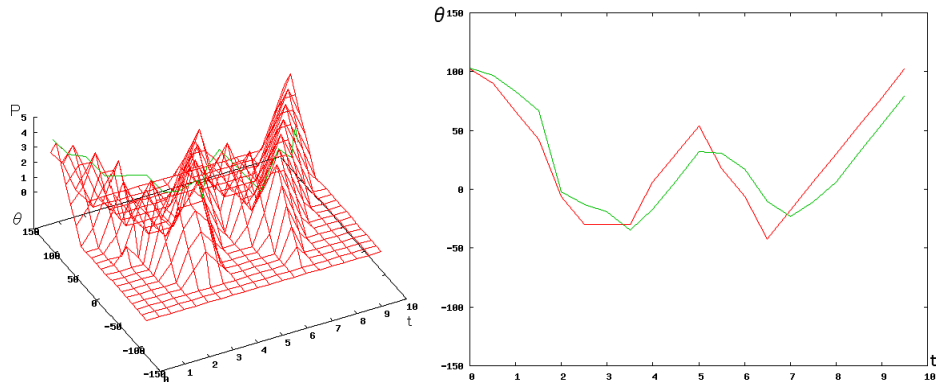


図 4.5: 人による選択頻度の決定を用いて生成した頻度空間から力を生成した時のロボットの動き

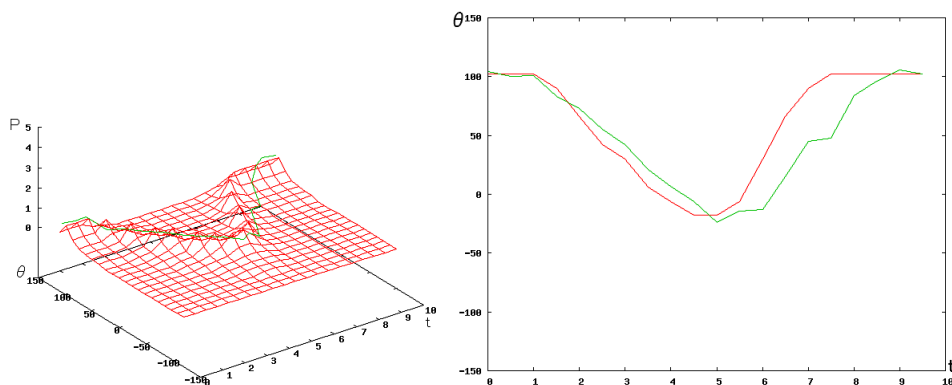


図 4.6: ロボットを動かすことによる選択頻度の決定で生成した頻度空間から力を生成した時のロボットの動き (1 回入力)

#### 4.4.3 考察

それぞれの場において, ロボットの軌道が頻度の高いあたりを通っていることが確認できる. これらの実験結果より頻度空間からの力の生成が正当だと言える.

ちなみに, 図 4.7 ではあまり頂点に寄ってないように見えるかもしれないが, これは複数回入力した結果, 真ん中あたりの頻度が多少平らになっているためである.

#### 4.5 環境変化・状態変化に応じた動きを生成するかの確認

この実験では, 正当性の検証を行った頻度空間の生成, 頻度空間からの力の生成を用いて, 様々な状況を作りながら検証していく. 大きく分けてロボットの周りの環境に応じた動きの生成とロボット自身の状況に応じた動きの生成に

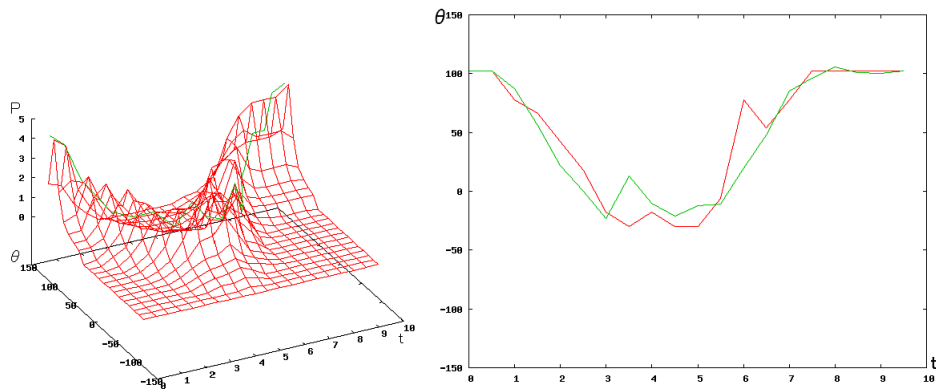


図 4.7: ロボットを動かすことによる選択頻度の決定で生成した頻度空間から力を生成した時のロボットの動き (5 回入力)

ついて 2 種類の実験を行う。また、環境変化に応じた動きの生成の確認のため、以下のような実験を行った。ちなみに、ここで言う初期値とはサーボの角度のことである。

- ロボットのデータの初期姿勢を変える実験
- ロボットの動作時に人の手による負荷をかける実験
- 頻度の高い所が複数ある頻度空間における実験
- 頻度の高い所が複数あり、途中で交わる頻度空間における実験

それぞれについて、実験の詳細を示し、結果・考察と述べる。

#### 4.5.1 ロボットのデータの初期姿勢を変える実験

ロボットが持つサーボの角度において初期値を変えながら実験を行った。以下に実験設定を示す

##### 実験設定

サーボの初期値をを表 4.2, 実験に用いた場を図 4.8 に示す。

表 4.2: サーボの初期値

97 度
60 度
42 度
-32 度
-113 度

##### 実験結果

このような実験設定で実験を行った結果、図 4.9 のようになった。



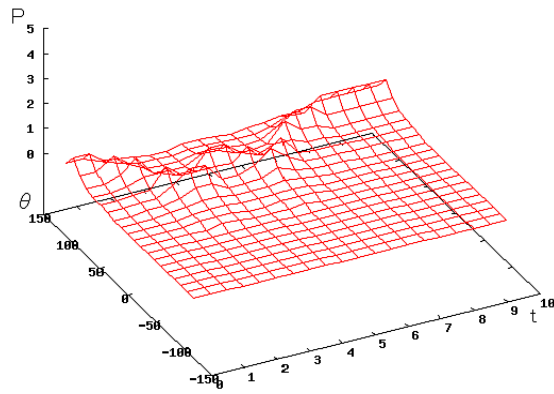


図 4.8: ロボットの初期値を変えて実行する時に用いる場

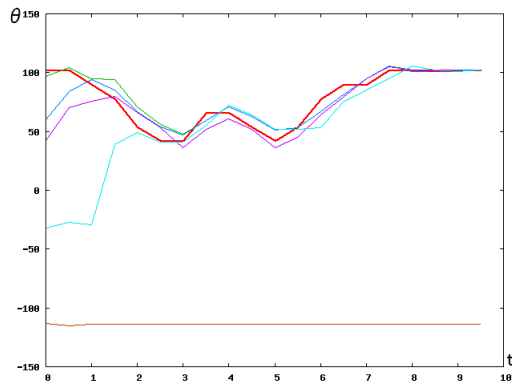
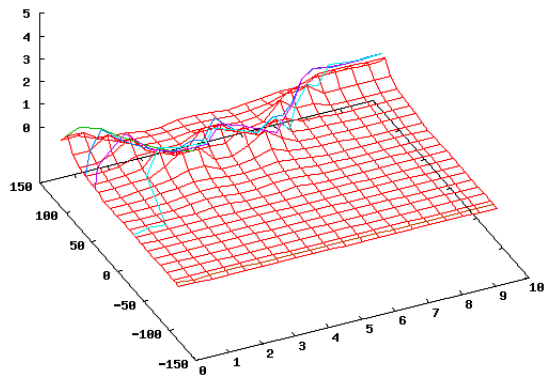


図 4.9: ロボットの初期値を変えて実行した時の動作結果

## 考察

一つの軌道を除いて頻度の高い所へ近づくように動作しているのが分かる。

また、頻度の高い所へ近づかなかった軌道は、付近の頻度が全て0だったからだと考えられる。

頻度の高い所から離れている時に、頻度の高い所へ寄せたい場合は離れた場所まで頻度を設定することによって寄せることが可能である。これは頻度空間の生成方法をより洗練化していくことで解決できると考える。

### 4.5.2 ロボットの動作時に人の手による負荷をかける実験

ロボットを動作させる時に、ロボットを手で押さえて負荷をかけた。その時のロボットの動作を検証する。以下に実験設定を示す。

#### 実験設定

負荷は、動作開始から2秒間腕を押さえることによってかけた。また、負荷をかけた時に故障しないようにサーボのトルク率を80%に下げて実験を行った。更に、実験に用いた場を図4.10に示す。

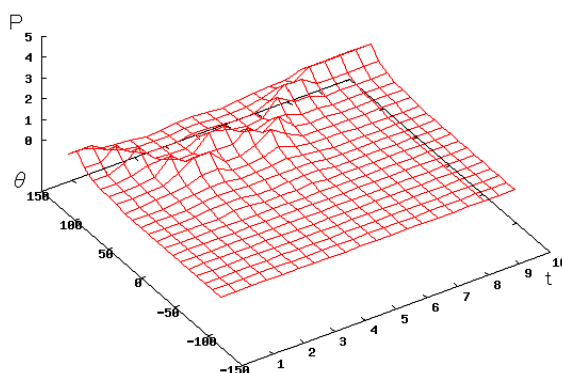


図 4.10: 動作中に負荷をかける時に用いる場

#### 実験結果

以上の実験設定の下で実験を行った結果、図4.11のようになった。青い線では含まれた所が実際に負荷をかけていた時間である。

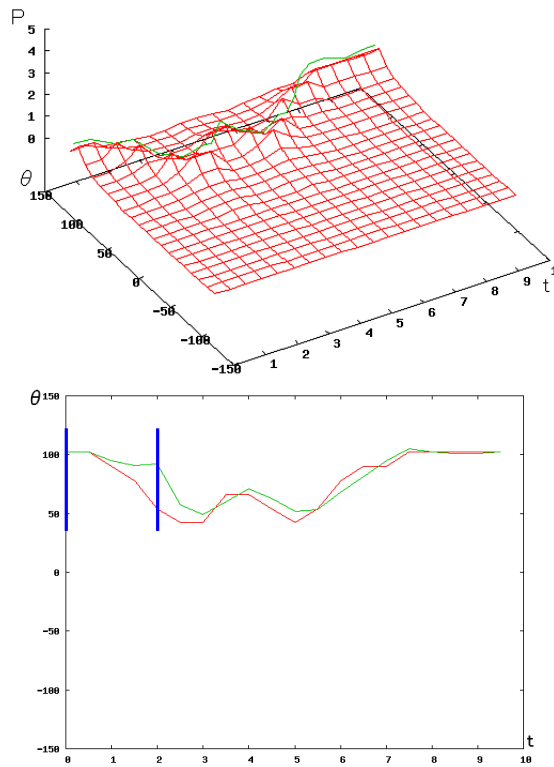


図 4.11: 動作中に負荷をかけた時の動作結果

## 考察

負荷をかけている間、ロボットのサーボの動きは抑えられているが、負荷をなくした後、少しずつ頻度の高い所に近づいていくように動いているのが分かる。

### 4.5.3 頻度の高い所が複数ある頻度空間における実験

頻度の高い所が複数ある頻度空間において実験を行い、自身に近い頻度の高い所へ近づいていくかの確認を行う。以下に実験設定を示す。

#### 実験設定

角度の初期値を表 4.3 に、実験に用いた場合は図 4.12 に示す。

表 4.3: サーボの初期値

102 度
63 度
19 度
-44 度
-120 度

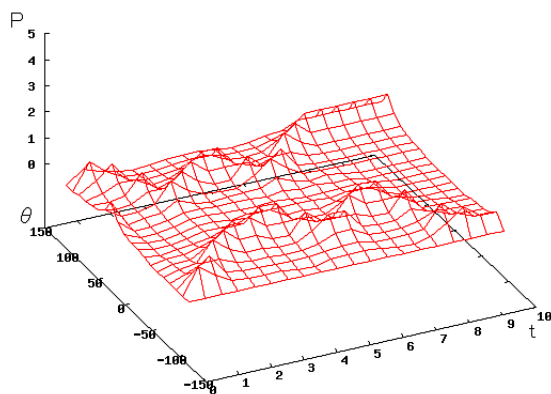


図 4.12: 頻度の高い所が複数ある頻度空間で実行する時に用いる場

### 実験結果

以上の実験設定の下で実験を行った結果, 図 4.13 のようになった.

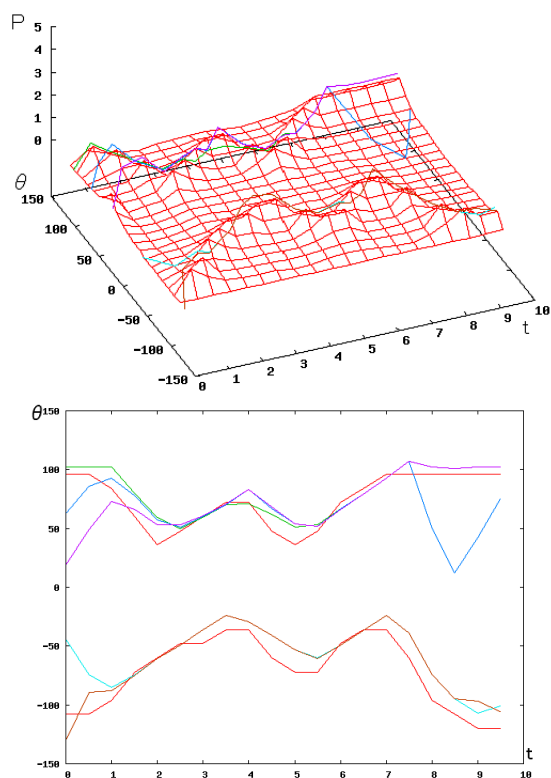


図 4.13: 頻度の高い所が複数ある頻度空間で実行した時の動作結果

### 考察

それぞれ, 近い方の頻度の高い所へ近づいて動いていることが分かる.

#### 4.5.4 頻度の高い所が複数あり, 途中で交わる頻度空間における実験

次に, 頻度の高い所が 2 箇所あり, 更に途中で交わるような頻度空間を用いて実験を行った. 以下に実験設定を示す.

## 実験設定

角度の初期値を表 4.4, 実験に用いた頻度空間を図 4.14 に表す.

表 4.4: サーボの初期値

102 度
63 度
19 度
-44 度
-120 度

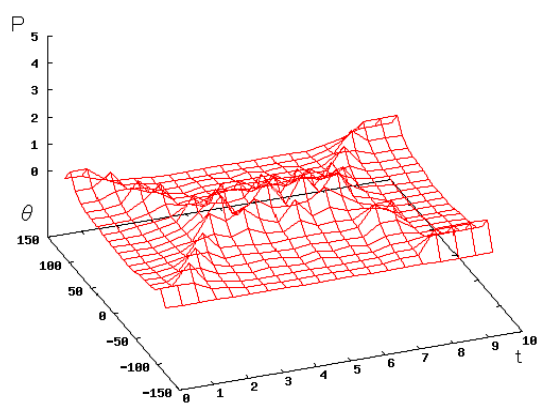


図 4.14: 頻度の高い所が複数ある実験の時に用いる場

## 実験結果

以上のような実験設定で実験を行った所, 図 4.15 のようになった.

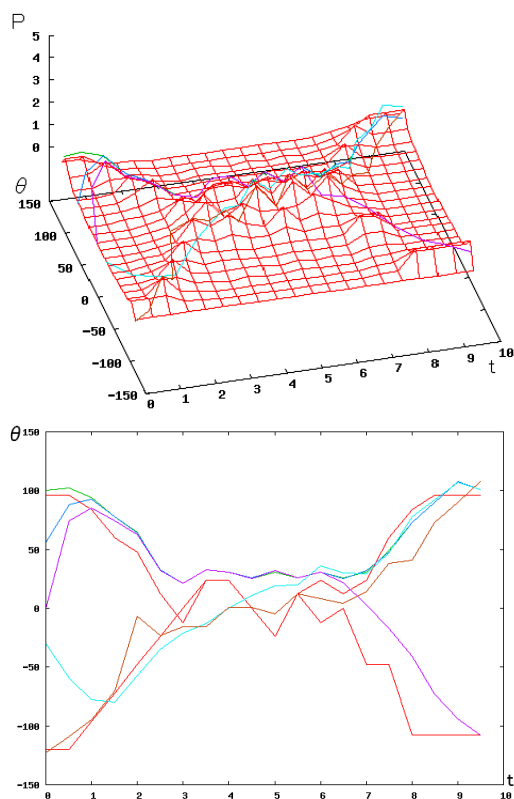


図 4.15: 頻度の高い所が複数ある実験の動作結果

## 考察

動作そのものは生成されているが、交わった後の動きが不定となっている。動きを区別するならば、頻度空間の生成時に頻度の高い所が交わらないように設計する必要がある。動きを区別する必要が無い場合は特に気にする必要は無い。

頻度の高い所が交わらないように設計する際、解決方法として次元を増やすか別な場を用意することが考えられる。サーボ数を増やしていった時、次元数が増えて頻度の高い所が交わる可能性は低くなる。そのため、特別に問題解決を行う必要は無いと考えられる。

### 4.5.5 ロボットが状態変化に対応した動作をするかの実験

次に、ロボットの状態そのものが変化した時に、その状態変化に適応した動作をするかの実験を行う。

今回は、前のめりの状態とのけぞった状態とで比較した。

#### 実験設定

前のめりの状態、のけぞった状態、それぞれの時の G センサの y 軸の値を表 4.5 に、実験に用いた場を図 4.16 に示す。

#### 実験結果

以上の実験設定の下で実験を行った結果、図 4.17 のようになった。

表 4.5: G センサの y 軸の値

前のめりの時	18
のけぞっている時	-14

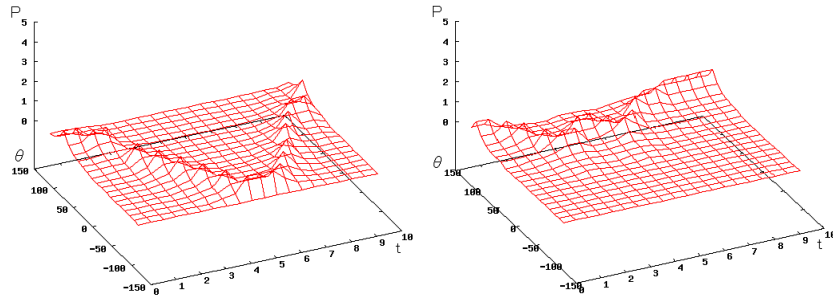


図 4.16: 前のめりの時における頻度空間 (左) と, のけぞっている時における頻度空間 (右)

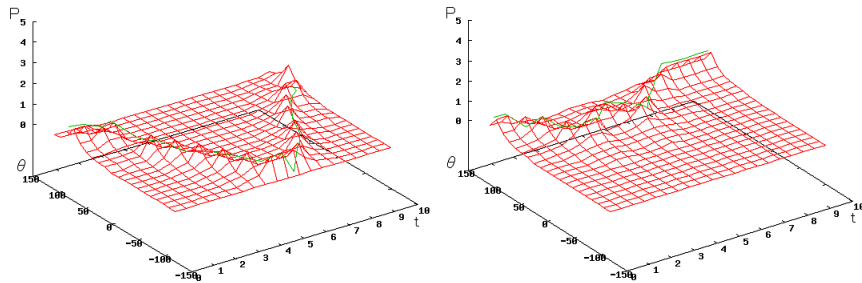


図 4.17: 前のめりの時に動かした結果 (左) と, のけぞっている時に動かした結果 (右) それぞれ, G センサの y 軸の値は 18,-14 の時である.

## 考察

G センサの値によって、動きを切り替えることが出来ているのが確認できる。また、実際のグラフには無いが、途中で切り替えた時にはその切り替えた側の頻度空間によって動く。これにより、自身の状況によって動きの切り替えが出来ていると言える。

## 4.6 まとめ

本章では提案手法を用いたシステムを実装して実験を行い、その結果を示した。本章の実験より、今回作成したシステムが有効に動作していることが分かる。また、負荷に対する耐性、初期値が違っていても動く、センサの状況に応じて動きを使い分けれるなどの理由により、環境に適応的な動作を生成しているといえる。

ただし、先ほども述べたとおり、現在のシステムでさせたい動きが交わる時は交わった後の動きはどちらの動きに従って動くか分からない。これは、扱うデータ数を増やしていった次元数を上げることで解決出来ると考えられる。



## 第5章 結論

### 5.1 本論文のまとめ

本論文では、ロボットの動きについて新しい表現方法として、通りやすさを考えた場を提案した。また、その表現方法を用いるシステムの構築を行った。

第2章では本論文の中核となる動きに関する新しい表現方法の概念について述べた。ここで、今回提案する新しい表現方法における通りやすさを、選択頻度と言うパラメータを用いて頻度空間として定義した。そして、頻度空間からどのように力を生成するかを述べた。

第3章で実験に用いたロボット及び選択頻度からなる頻度空間を適用したシステムについて述べた。今回、システムを作るにあたり、選択頻度の決定方法を考え、頻度空間の生成方法について述べた。また、頻度空間からどのように力を生成するかについて述べた。

第4章では構築したシステムを用いて実際に実験を行った。この章では、頻度空間の生成方法に関する実験と頻度空間からの力の生成方法に関する実験を行い、それぞれの正当性を述べた。また、正統性を述べた頻度空間の生成方法と頻度空間から力を生成を用いて、環境の変化や自身の状況の変化に対応する動きが生成できるかの検証を行った。

これらの結果により、今回提案する表現方法及び作成したシステムが環境や状況に応じた動きを生成することが出来ることが確認できた。

この研究によって計算が簡単かつ環境に動きの表現が出来ると考えられる。

更に、今回提案した表現方法は既存の方法にも応用できる。例えば、ロボットによる人間の模倣システムがあるが、これによって作られた動きを今回提案した表現方法で表し、動作を出力することで、一つの学習からより多くの環境に適応できるようになると考える。

場の生成方法には、他にも様々な方法があると考えられ、今回提案したシステムは汎用性も持ったものである。

### 5.2 これからの課題

今回提案した表現方法は、ある動きに近づけていくと言うアプローチを取った。人間の動きのほとんどは精密なものではなく、今回提案したような大まかなものである。そのため、今回提案した表現方法は有用なものである。

しかし、今回作ったシステムには課題も多くある。

まず、今回提案した新しい表現方法の周りの入出力の拡張・洗練化が挙げられる。

入力に関しては、見まね学習やモーションキャプチャ、コントローラによる操作など様々な方法が考えられる。そのような、様々な入力方法を用意できれば、よりロボットの研究が進むのではないかと考える。

また、今回作ったシステムではサーボを一つのみ扱ったので、全身の運動生成が行えない。扱うサーボが増えると問題が出てくる可能性もある。例えば、既

存の研究でもデータ量が多くなったため、効率的にデータを表すような研究もある。このように、扱うサーボ数を増やして実験・検討していく必要がある。

更に、センサによる情報もまだ数多くある。

例えば、センサを扱う方法の一つとして、負荷がある。現在のシステムでは、途中で障害物があったとしてもそのまま動こうとする。あまり大きな負荷をかけるとロボットが壊れてしまう恐れがあるので、そのような障害物に対処する必要がある。このロボットのサーボには負荷検知機能がついているので、壊れる前に一定以上の負荷がかかったら止まるなどの対処が取れる。この例のように、安全性を高める工夫が必要である。

## 謝辞

本論文を結ぶにあたり、日ごろから様々な面で有益かつ適切なお指導・ご助言を賜りました、倉重健太郎助教に深く感謝の意を表します。また、同じ研究グループの畑中雅彦教授、本田泰准教授、須藤秀紹准教授、渡部修講師にも有益なお助言を賜ったことに感謝の意を表します。そして、普段から参考になる助言を下さり、多忙な中論文の査読をしてくださった院生の尾上由希子さんに感謝の意を表します。また、共に卒業研究を進めてきた4年生の皆様にも時に助言をいただき、励まされたことに感謝しております。更に、精神的な面で支えてくれた多くの知り合いに感謝いたします。

最後に、大学に進学することに許可をいただき、様々な面でサポートしてくださった祖父母に深く感謝いたします。

## 参考文献

- [1] 岡田昌史, 中村仁彦, ”脳型情報処理を行う力学系の多項式設計法とそのヒューマノイドの全身運動生成への応用”, 日本ロボット学会誌 Vol.22 No.8 pp.1050-1060(2004)
- [2] 琴坂信哉, Stefan Schaal, ”神経振動子を用いたロボットのリズムミクな運動生成”, 日本ロボット学会誌 Vol.19 No.1, pp.116-123(2001)
- [3] 稲葉雅幸, ”ロボット知能のアーキテクチャ”. 日本ロボット学会誌 Vol.20 No.5 pp.470-473(2002)
- [4] 稲邑哲也, 中村仁彦, 戸島巖樹, 江崎英明, ”ミメシス理論に基づく見まね学習とシンボル創発の統合モデル”, 日本ロボット学会誌 Vol.22 No.2 pp256-263(2004)