

平成 22 年度

# 卒業研究論文

題 目 ロボットにおける動きの知識化

—データ空間の自動分割の実現—

提出者 室蘭工業大学 情報工学科

氏 名 北山 直樹

学籍番号 1923030

提出年月日 平成 23 年 2 月 10 日

室蘭工業大学  
情報工学科

# 目次

第1章 序論	1
1.1 背景	1
1.2 従来研究	1
1.3 研究目的	2
1.4 論文の構成	2
第2章 先行研究:頻度空間を用いたロボットの動きの表現	3
2.1 先行研究の概要	3
2.2 頻度空間とは	3
2.2.1 頻度空間の概念	3
2.2.2 頻度空間による動作の表現	4
2.3 頻度空間を利用するシステム	5
2.3.1 知識化部による動作知識の形成	6
2.3.2 動作部による動作の再生	7
2.4 先行研究のシステムによる頻度空間利用の流れ	8
2.5 先行研究の問題点	9
2.6 力からロボットの動作を求める式の導出	10
第3章 データ空間の自動分割の実現	11
3.1 頻度空間の自動分割	11
3.1.1 頻度空間の自動分割の概念	11
3.1.2 自動分割の流れ	12
3.1.3 セル分割条件の決定方法	13
3.2 分割頻度空間を利用するシステム	15
3.2.1 先行研究からの変更点	15
3.2.2 知識化部による動作知識の形成	15
3.2.3 動作部による動作の再生	16
第4章 実験	19
4.1 実験目的	19
4.2 実験環境	19
4.2.1 実験に用いるロボット	19
4.2.2 先行研究で提案されたシステムによるデータの取得	20
4.2.3 本研究で提案するシステムによるデータの取得	22
4.3 実験概要	25
4.3.1 行う実験	25
4.3.2 実験に使用するデータ	25
4.4 分割頻度空間を用いるシステムの動作実験	28
4.4.1 実験手順	28
4.4.2 動作Aの実験結果	28
4.4.3 動作Bの実験結果	31
4.4.4 動作Cの実験結果	34
4.4.5 考察	37
4.5 分割頻度空間と頻度空間の比較実験	38
4.5.1 実験手順	38
4.5.2 実験結果	39
4.5.3 考察	44
第5章 結論	45
5.1 本論文のまとめ	45
5.2 今後の展望	46
謝辞	47
参考文献	48

# 第1章 序論

## 1.1 背景

ロボットの技術は日々進歩している。技術の進歩に伴い、ロボットは様々な分野に進出している。ロボットが進出する分野が増えることに伴って、ロボットは複雑な環境化で動作することが求められる。複雑な環境に対応するために、ロボットはその構造を複雑なものとしてきた。ロボットを取り巻く「複雑化」について、いくつか例を挙げて説明する。

ロボットアームは登場したばかりの頃は構造が単純であった。使用される環境も工場内などのロボットにとって最適化された環境に限られていた。しかし、利用される分野が医療や宇宙[1]などに広がるにつれ、利用される環境に合わせて複雑な構造になっている。

人型ロボットは、その構造や機能をより本物の人間に近づける研究が行われている。人間の身体構造は複雑であるので、ロボットの構造を人間のそれに近づけようとすればするほど、ロボットの構造も複雑なものとなる[2]。

「ロボットの構造が複雑化する」ということについて説明する。ロボットの足の数や関節の数を増加させて環境に適応させようとするならば、サーボモータなどのアクチュエータの必要数は増加する。また、ロボットの動作を周囲の状況に合わせて変化させようとするならば、光センサ・音センサなどのセンサが必要となる。本論文において「ロボットの構造が複雑化する」とは、これらのアクチュエータ・センサが増加し、ロボットを制御するために扱う情報が多様化・多量化することと定義する。

ロボットの構造が複雑になると、ロボットを動作させる方法も複雑になる。ロボットの動きを設計することによってロボットを動作させるならば、ロボットの動作を制御する方法に関する専門的な知識が必要となる。ロボットをリアルタイムで操作することによってロボットを動作させるならば、操作技術の熟練が必要となる。その中でも、本研究ではロボットの動きを設計することに着目する。

複雑な専門知識を必要とせずロボットを設計する方法があれば、専門知識を持たない者でもロボットの動作を設計することができる。本研究ではロボットの動作を設計するための表現方法について研究を行う。

## 1.2 従来研究

ロボットの動作を設計するための表現方法の一例としては、以下のようなものが挙げられる。

- ・時間と状態の組を用いた表現方法
- ・神経振動子を用いた表現方法[3]
- ・カオスアトラクタを用いた表現方法[4]
- ・頻度空間を用いた表現方法[5]

本研究では、頻度空間を用いた表現方法を研究対象とする。

頻度空間とは、「ロボットの動きに関する新しい表現方法」[5]によって提案されている、ロボットの動きの知識を表現する空間である。頻度空間によって動きを表現する方法について説明する。ロボットの状態を表現する空間を複数領域に区切る。それらの区切られた領域一つ一つをセルと呼ぶ。各セルに「選択頻度」というパラメータを与える。選択頻度とは、ロボットの現在の状態が目標とする状態に近いことをあらわす値である。ロボットは動作をおこなうとき、選択頻度の高い状態を保つように随時自身の状態を変化させる。これによりロボットは、利用者が意識せずとも環境に適応的な動きを生成することが可能となる。

しかし頻度空間は、動作を精密に記録するほど多くのデータを記録することを必要とする。データ量の多い頻度空間をのデータを全て記録することができないロボットに、頻度空間を適用する方法は2つある。一つは、頻度空間を区切る数を減らし、セル数の少ない頻度空間で動作を表現することである。ただし、この方法では動作の精密さは低下する。もう一つは、頻度空間のデータを効率的に記録する手法を考案することである。

### 1.3 研究目的

本研究では、頻度空間を用いたロボットの動きの表現の問題点を改善し、より汎用性の高い手法を提案することを目指す。本研究では、1.2節で示した、頻度空間のデータ量の問題に着目した。頻度空間は、動作を精密に記録するほど多くのデータを記録することを必要とする。しかし、頻度空間のデータを効率的に記録することができれば、データを十分に記録できないロボットにも頻度空間を適用することができる。

頻度空間のデータが効率的であるとはどういうことか説明する。頻度空間を表すデータ量は、セルの数によって決まる。このことから、セル数の少ない頻度空間とセル数の多い頻度空間で、同様の動作を再現することができた場合、前者の頻度空間は後者のものと比べて効率的であるということが言える。

頻度空間のデータを効率的に記録する方法として、「データ空間の自動分割」という方法を考えた。頻度空間の自動分割を実現することによって、頻度空間のデータを効率的に記録することが本研究の目的である。

### 1.4 論文の構成

本論文の構成は次のとおりである。

第1章では、本研究の背景と研究目的を説明した。

第2章では、本研究の基礎となった先行研究「ロボットの動きに関する新しい表現方法」[5]について詳しく説明する。また、先行研究において残された問題点の詳細を説明する。

第3章では「データ空間の自動分割」によって頻度空間を効率的に表現する方法を提案する。また、自動分割を行うよう拡張した頻度空間と、それを利用するためのシステムの提案も行う。

第4章では、提案システムを実際のロボットに適用して行った実験について解説する。

第5章では本論文のまとめと今後の展望を述べる。

## 第2章 先行研究:頻度空間を用いたロボットの動きの表現

本章では、本研究の基礎となっている先行研究「ロボットの動きに関する新しい表現方法について」[]について説明する。最初にこの研究の概要を説明し、次に頻度空間について説明し、そして頻度空間をロボット上で利用する方法について説明し、最後にこの研究の問題点について説明する。

### 2.1 先行研究の概要

本節では「ロボットの動きに関する新しい表現方法について」[]の概要について説明する。この先行研究では、以下のような特徴を持った「ロボットの動作を表現する方法」と、その表現方法を用いたシステムを提案することを目的としていた。

- ・設計や計算に専門的な知識を必要としない
- ・利用者が意識せずとも環境に適応的な動きが可能である

上記の目的のもと、先行研究では、頻度空間という動作の表現方法と、頻度空間を利用するシステムを提案していた。頻度空間とは、先行研究の中心となる「ロボットの動きに関する新しい表現方法」である。詳細は2.2で説明する。頻度空間を利用するシステムとは、ロボットの動きに関する知識を頻度空間という形で記録・利用するシステムである。頻度空間を利用するシステムは、2つの部分に分けられる。一つは頻度空間にロボットの動作を記録する「知識化部」、もう一つは頻度空間の情報からロボットの動作を生成する「動作部」である。システムの各要素については2.3で詳しく解説する。図2.1に先行研究の大まかな全体図を示す。

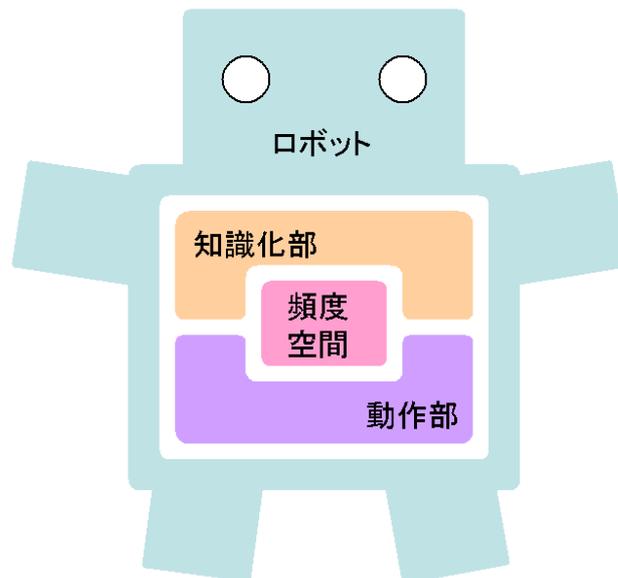


図2.1 先行研究大まかな全体図

## 2.2 頻度空間とは

### 2.2.1 頻度空間の概念

頻度空間とは、ロボットの状態を表す「状態空間」に「通りやすさ」という概念を与えることでロボットの動作を表現する手法である。

この「通りやすさ」という概念を、ロボットの状態が一次元のときの「通りやすさを表す空間」を例に説明する。このとき「通りやすさを表す空間」は高低差を持った曲面で表すことができる。この曲面は、高い「通りやすさ」を持つ部分ほど低い位置になるものとする。この曲面上に、ロボットが現在おかれている状態から決定される点をプロットする。この点はロボット1台に対し1つのみ存在

するものとする。このロボットがおかれている状態を示す点を、この空間において仮定の質量を持った球であると定義する。この球は、物理空間上の球が坂を転がり降りるように、前述の曲面上をより低い位置に向かって進む。ロボットの動作を決定するとき、この球が進んだ先の「ロボットの状態」になるようにする。これを続けることでロボットの動作を生成しようというのが、頻度空間の概念である。この「通りやすさ」を「選択頻度」と定義する。

## 2.2.2 頻度空間による動作の表現

頻度空間とは、ロボットの動きの表現方法の一つである。ロボットの状態を表す空間に、「ロボットの動作そのもの」ではなく「ロボットが動作するとき状態空間を通過する頻度」を情報として与えることで、ロボットの動作を表現する。

ロボットの状態と、時間からなる状態空間がある。ロボットの状態とはサーボやセンサの状態など、ロボットがとっている・認識している状態のことである。ロボットの状態は複数のサーボやセンサを扱う場合、多次元となる。図 2.2 に、ロボットの状態として扱うものが 1 つのみの場合の、状態空間の例を示す。図中の青い線が、ロボットにさせようとしている動作であるとして説明する。

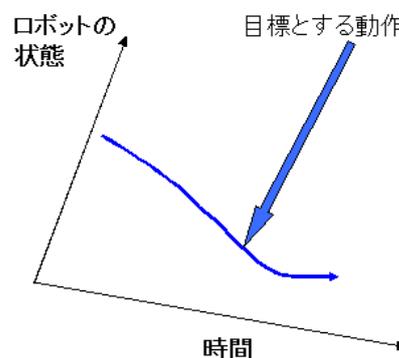


図 2.2 状態空間の例

先行研究では、この空間にさらに選択頻度というものを与え、選択頻度の高さによってロボットの動きを表現する。この空間を頻度空間と呼ぶ。図 2.3 に、図 2.2 の目標とする動作を基にした頻度空間の例を示す。

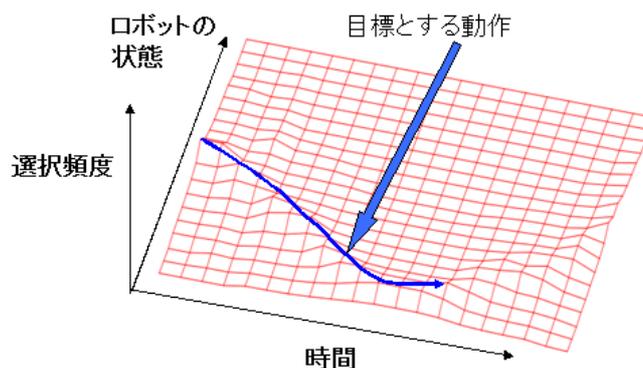


図 2.3 目標とする動作を基にした頻度空間の例

選択頻度とは、ロボットがある状態を選択する頻度である。高い頻度で選択されるべき状態には高い選択頻度を、あまり選択されなくてもよい状態には低い選択頻度を与える。

ロボットの現在の状態を、より高い選択頻度を持った状態に近づけることで、ロボットの動作を決定する。このとき、直接選択頻度の最も高い状態を目指すのではなく、直近の、現在の状態より少し高い選択頻度を持つ状態を追い続ける。それによってロボットの状態が変化し続け、動作が決定される。図 2.3 に、頻度空間を元に動作を決定する様子を示す。ロボットの動作はロボットの状態により変化するが、徐々に目標とする動作に近づく。

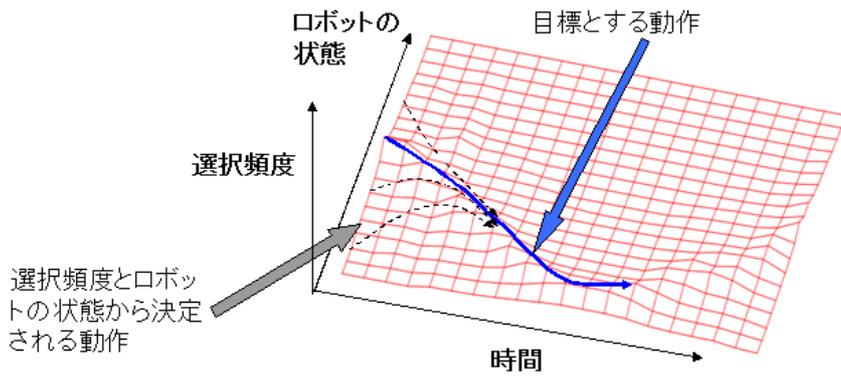


図 2.4 ロボットの状態が目標とする動作に近づく様子

先行研究や本研究で実際に使用される頻度空間は、ロボットの状態、時間を一定間隔で区切り、離散的な情報として扱う。図 2.5 に、実際に使用される頻度空間のイメージを示す。頻度空間の区切られた各部分はセルと呼ばれ、頻度空間を扱うときの最小単位となっている。各セルは1つずつ選択頻度の値を持つ。

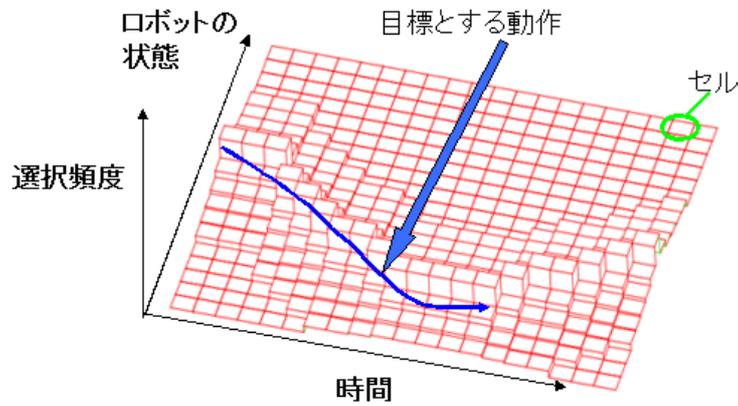


図 2.5 実際に使用される頻度空間のイメージ

## 2.3 頻度空間を利用するシステム

本節では、頻度空間を利用するシステムについて説明する。このシステムの全体構造は図 2.6 のようになっている。知識化部で頻度空間に蓄えた動きの知識を、動作部で利用する。2.3.1 で知識化部、2.3.2 で動作部の部分について詳しく説明する。

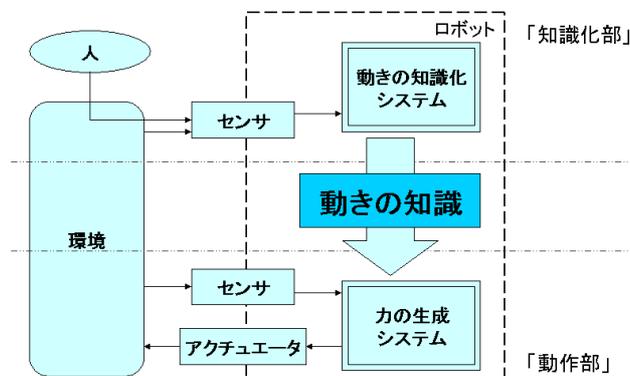


図 2.6 頻度空間を利用するシステムの構造図

### 2.3.1 知識化部による動作知識の形成

知識化部とは、頻度空間を利用するシステムにおいて頻度空間を形成する部分である。図 2.7 に知識化部の構造を示す。頻度空間を形成するには、大きく分けて 2 つの方法がある。一つは各セルの持つ選択頻度の値を利用者が直接操作する方法である。頻度空間を直接操作するとは、コンピュータなどの端末を用いて各セルの値を変更することである。もう一つはロボットの動作情報を元に頻度空間を形成する方法である。

ロボットの動作情報を元に頻度空間を形成する方法を説明する。まず、教示を行う人が手作業もしくは従来の方でロボットを動作させる。次にシステムはセンサを通してロボットの動作を得る。そして得たロボットの動作から頻度空間を形成する。

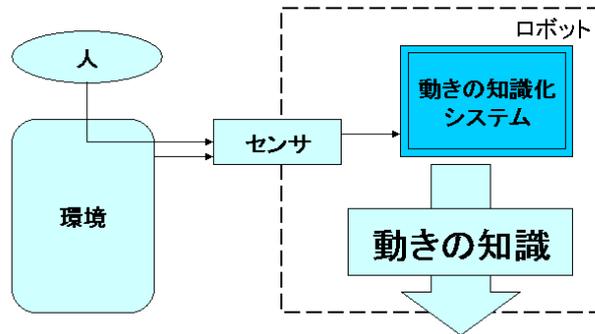


図 2.7 知識化部の構造図

ロボットの動作の情報から頻度空間を形成する手順について説明する。センサよりロボットの頻度空間上における動作を取得する。その動作を元に頻度空間上に選択頻度を加算する。選択頻度は、時間ごとのロボットの状態に最も近いセルを中心として、いくつかのセルに加算する。選択頻度を加算する範囲は、システムの利用者があらかじめパラメータとして与える。中心として決定されたセルに近い部分には「通る頻度の高い場所」として高い選択頻度を与える。この処理を、区切られた時間ごとに行う。図 2.8 に頻度空間に選択頻度を加算する様子を表す。

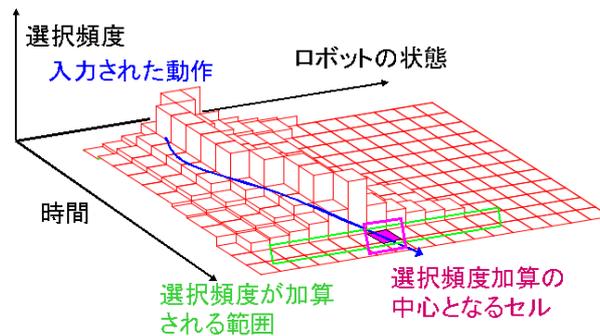


図 2.8 頻度空間に選択頻度を加算する方法

頻度空間に加算する選択頻度を計算する方法を説明する。まず、ある時間のロボットの状態を取得する。その状態が頻度空間上のどのセルに含まれているかを判別する。状態が含まれていたセルを選択頻度加算の中心セルに決定する。決定した中心セルと、利用者があらかじめ決めた選択頻度加算範囲を元に、式(2.1)によって各セルに加算する選択頻度を決定する。式(2.1)のパラメータと頻度空間のセルの対応を図 2.9 に示す。

$$u_{t,i} = \frac{C}{r+1} \dots (2.1)$$

$u_{t,i}$  :  $p_{t,i}$  に加算する選択頻度

$C$  : 一度の加算で加える選択頻度の最大値

- $r$  : 中心のセルを0とした, 中心からのセル数 ( $r=0,1,2,\dots, \lfloor \frac{q}{2} \rfloor$ )
- $q$  : 一度の加算で選択頻度を加算するセルの数 ( $q=1,3,5,\dots$ )

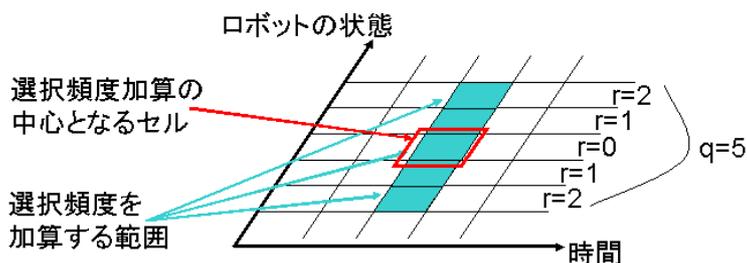


図 2.9  $q=5$  の場合の式のパラメータとセルの対応

### 2.3.2 動作部による動作の再生

動作部とは, 頻度空間を元にロボットの動作を生成する部分である. 図 2.10 に動作部の構造を示す. まず, センサからロボットがおかれている状態を取得する. 次に, 頻度空間上でのロボットの状態が向かう方向と力を求める. そして, 力からロボットの動作を決定し, ロボットに出力する. これによりロボットの動作を行う.

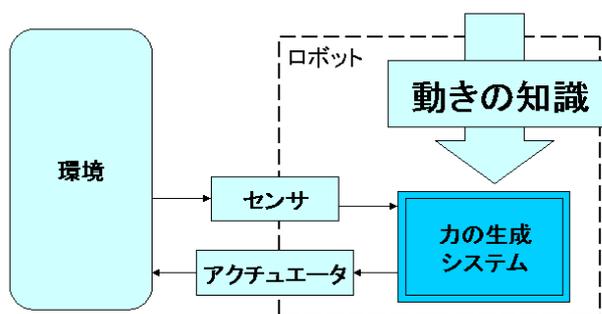


図 2.10 動作部の構造図

頻度空間からロボットの動作を生成する概念について説明する. 動作するロボットの状態は, 頻度空間上では仮想の質量を持った球として表現される. この球が頻度空間上で仮想の運動を行うことによって, ロボットの動作を生成する. この球に力を加えて球の運動方向を操作することで, 任意の動作を生成することが可能となる.

頻度空間上に生まれる力の定義を説明する. まず, 球は選択頻度の高いセルに引き寄せられる. 球があるセルと選択頻度の高いセルとの間にある選択頻度の高低差が大きいほど, 大きな力が生まれる. 選択頻度の高いセルが遠くにあるほど, 大きな力で引き寄せられる. 球を引き寄せることができるセルの有効範囲は, システム利用者が任意に決められるものとする.

この定義を元に, 球を動かす力の計算方法について説明する. まず, 頻度空間上でのロボットの状態をセンサより取得する. 次に, ロボットの状態に近いセルの中から最も高い選択頻度を持つセルを選択する. ここで選択するセルを決定する範囲  $n$  は, システム利用者が任意に決定する 3 以上の奇数である. 図 2.11 に,  $n=3$  の場合のセル選択の様子を示す. 青い球がロボットの現在の状態であり, この球が頻度空間上の力を受けてロボットの動作を決定する.

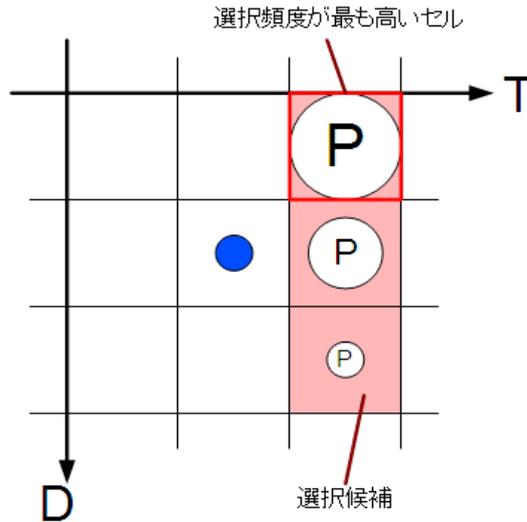


図 2.11 セル選択の手順 (n=3 の場合)

上述の「頻度空間上の力の定義」を元に、 $t$  ステップにおける力  $F_t$  を求める式を次のように定義する。

$$F_t = k_t \times (\dot{D}_t - D_t) \dots (2.2)$$

$F_t$  :  $t$  ステップにおける力

$D_t$  : センサから取得したロボットの状態

$\dot{D}_t$  : 選択頻度が最も高いセルの中心が示すロボットの状態

式(2.2)の意味を説明する。 $\dot{D}_t - D_t$  は現在の状態と目標となる状態が離れているほど大きな力を生むことを意味する。 $k_t$  は頻度空間の高低差によって生まれる力である。 $k_t$  は式(2.3)によって求める。

$$k_t = \frac{p_{t,max}}{\sum_{i=1}^n p_{t,i}} \times \alpha \dots (2.3)$$

$p_{t,max}$  : 選択頻度が最も高いセルの選択頻度 ( $(p_{t,1}, \dots, p_{t,n})$  の中で最も値が大きいもの)

$\alpha$  : 頻度空間の高低差から生じる力の、力全体に占める割合を決める係数

以上の過程によって生成された力を元にロボットが動作した結果の状態を、センサによって取得する。取得された値を用いて次ステップの力の計算を行う。

## 2.4 先行研究のシステムによる頻度空間利用の流れ

頻度空間を利用してロボットを動作させるシステムについて説明する。頻度空間を利用するシステムは、大きく分けて2つの部分からなる。一つは頻度空間に動作の知識を蓄える「知識化部」、もう一つは頻度空間の情報を元に動作を再生する「動作部」である。

図 2.5 にこのシステムを利用する流れの概略を示す。ロボットを通して動作を何度も教示すると、その情報が「知識化部」で動作の知識に変換されて頻度空間に蓄えられる。頻度空間に動作の知識が蓄えられると、それを元に「動作部」によって動作を再生することができる。動作の知識が十分でないと教示通りの動作が再生されない場合もあるが、その場合でも、さらに動作を教示することによって動作の知識を追加することが可能である。

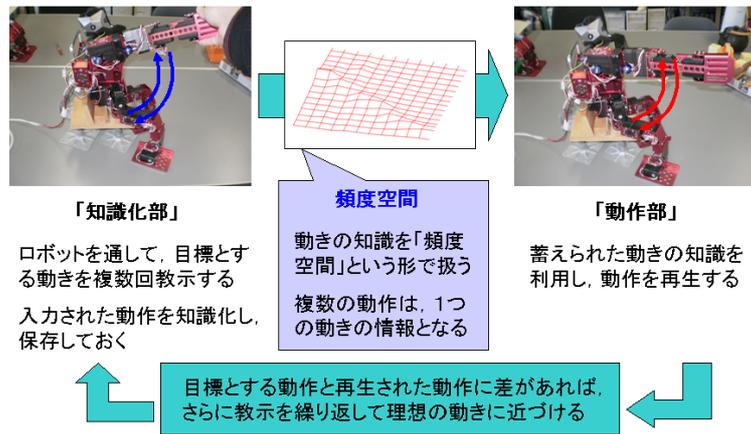


図 2.12 頻度空間を動きの知識として利用するシステムの概略

## 2.5 先行研究の問題点

頻度空間の欠点として、1.2 で説明した他の手法に比べ頻度空間を記述するためのデータ量が多くなってしまいう問題が挙げられる。頻度空間は、セル一つ一つに対して値を記録する。ロボットの状態の次元数が増加すると、セルの数は指数関数的に増加する。頻度空間のデータ量に対してロボットの記憶領域が十分でなければ、そのロボットで頻度空間を用いることはできない。この問題の対策として、以下の2つが挙げられる。

一つはロボットの状態を区切る数を減らし、頻度空間がロボットの記憶領域に収まるようにすることである。ただし、頻度空間から生成される動作は、状態の区切り数によって変化する。そのため、精密な動作が必要とされるような環境には向かなくなってしまう。頻度空間のセル数と生成される動作の関係を図 2.13 に示す。上がセルの区切りを線で表したもの、下のグラフは各セルの選択頻度の高さを色の濃さで表したものに、入力動作と出力動作を重ねたものである。セルの数が少なくなると動作も大振りになり、セルの数が多くなればその分動作も細くなる。

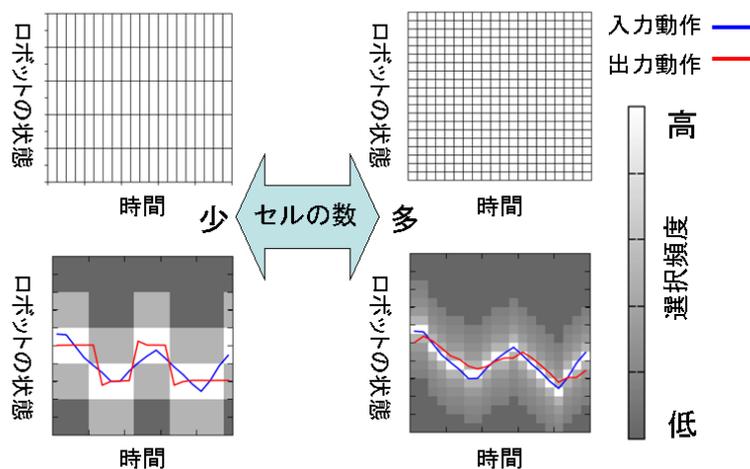


図 2.13 頻度空間のセル数と生成される動作の関係

もう一つの対策は、少ないデータ量で表現可能な、頻度空間の代わりとなる動作の表現方法を利用することである。この方法には頻度空間と同じように扱うことができ、かつ頻度空間よりも少ないデータ量で同じ動作を生成することができる表現方法が必要となる。本研究では、少ないデータ量で頻度空間と同様の情報を表現する方法を提案する。

## 2.6 力からロボットの動作を求める式の導出

本研究では、先行研究とは違った形で、力からロボットの動作を求める式を導出した。理由は提案システムで用いる式と、式の形を合わせるためである。図 2.14 に、頻度空間上の力が球の動きを変化させる様子を示す。

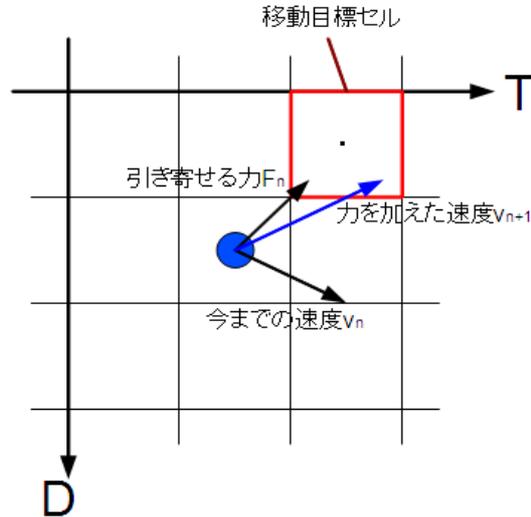


図 2.14 頻度空間上の力が球の動きを変化させる様子

現在のロボットの状態を表す球は、1ステップ前から現在までの時間を動いていた速度を持っている。このとき、選択頻度の最も高いセルから球に対して引き寄せる力が加わる。今までの速度に頻度空間による力が加わり、新たな速度が生まれる。球はこの速度で、現在から1ステップ後までの時間を移動する。

上式で求めた力から  $t+1$  ステップにおけるロボットの状態  $D_{t+1}$  を求める。角度を求めるために、まずは式(1)で求められる  $F_t$  を運動方程式  $F=ma$  に代入することによって、加速度  $a_t$  を求める。

$$k_t \times (\dot{D}_t - D_t) = m \times a_t$$

$m$  は頻度空間上を転がるボールの仮想質量である。

上式を変形することによって得られる、加速度を求める式は以下の通りである。

$$a_t = \frac{k_t \times (\dot{D}_t - D_t)}{m} \dots (2.4)$$

求めた加速度を以下の式に代入することによって速度が求まる。

$$v_{t+1} = v_t + a_t (T_{t+1} - T_t) \dots (2.5)$$

$T_{t+1}$  は  $t+1$  ステップにおける頻度空間上の時間である。

同じく  $T_t$  は  $t$  ステップにおける頻度空間上の時間である。

求めた速度  $v_{t+1}$  を以下の式に代入することによって目標とするロボットの状態が求まる。

$$D_{t+1} = D_t + v_{t+1} (T_{t+1} - T_t) \dots (2.6)$$

ここで求めた目標の状態に向かって、ロボットは動作を行う。

## 第3章 データ空間の自動分割の実現

本章では、頻度空間の自動分割によってロボットの動きの知識を効率よく記録する方法を提案する。

### 3.1 頻度空間の自動分割

#### 3.1.1 頻度空間の自動分割の概念

本研究では、前章で先行研究の問題点として挙げたものの中でも特に、「頻度空間のデータ量」と「動きの再現性」のトレードオフに着目した。

本研究では、頻度空間の選択頻度の偏りに注目した。図3.1に選択頻度の偏りの例を示す。横が時間、縦が角度である。グレースケールの階調で表されているのが選択頻度の高さで、白色に近いほどセルが高い選択頻度を持つことを示す。青い折れ線で表されているのが動作の入力、赤い折れ線で表されているのが動作出力である。

動作知識の記録に用いられている部分はピンクの楕円で示された部分にとどまり、緑色の楕円で示された部分は動作知識の記録にはほとんど使用されていない。頻度空間中にほとんど使用されていない部分が現れるのは、頻度空間に動作を記録するという作業が、頻度空間の選択頻度に偏りを持たせることだからである。このことから、選択頻度が高い部分の情報は、動作の生成にとって重要な情報であり、選択頻度の低い部分の情報は、動作の再生にあまり重要ではないということがいえる。

そこで、次のように考えた。高い選択頻度が与えられる部分のセルを細かく分け、情報の密度を上げる。逆に、低い選択頻度が与えられている部分のセルは、一つ一つを大きく取ることによって情報量を節約する。以上の考えを元に、頻度空間に比べて効率のよい（少ないデータ量で高精度に動きを再現可能な）データ空間を設計する。

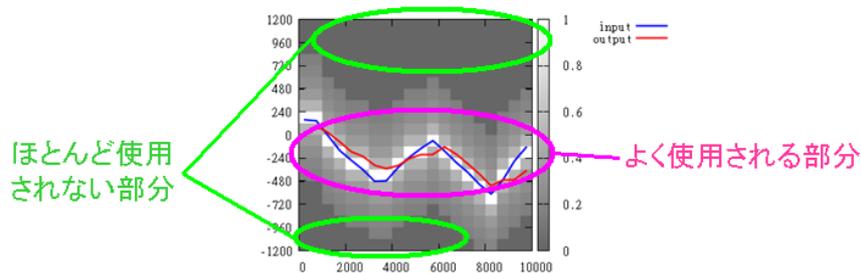


図3.1 頻度空間の選択頻度の偏り

そこで本研究では、頻度空間に以下のような特徴を追加した新たな頻度空間を提案する。

- ・初期状態として、セルの数が少ない空間を与える
- ・各セルの選択頻度が、あらかじめ設定した値を超えるごとに、そのセルをいくつかのセルに分割する

この頻度空間を「分割頻度空間」と呼ぶことにする。この頻度空間のイメージを図3.2に示す。縦軸がロボットのデータ、横軸が時間である。空間上に描写されている曲線は、この頻度空間に教示しようとしている動作を示す。

教えた動作の遠くではセルは大きいままだが、教えた動作に近づくたびに、セルが細かくなっている。

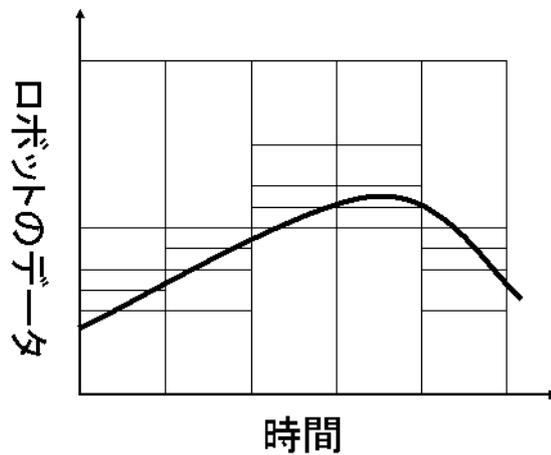


図 3.2 分割頻度空間のイメージ

### 3.1.2 自動分割の流れ

本論文で提案する頻度空間の自動分割について、今回提案する分割の流れを説明する。分割頻度空間の初期状態として、「ロボットの状態」の分割数が少ない状態の分割頻度空間を用意する。この頻度空間に動作教示を何度か行い、セルに蓄積される選択頻度が一定量を超える度にセルの分割を行い、選択頻度の高い部分のセルだけが細くなるようにする。本研究の目指す自動分割前後の様子を図 3.3 に示す。

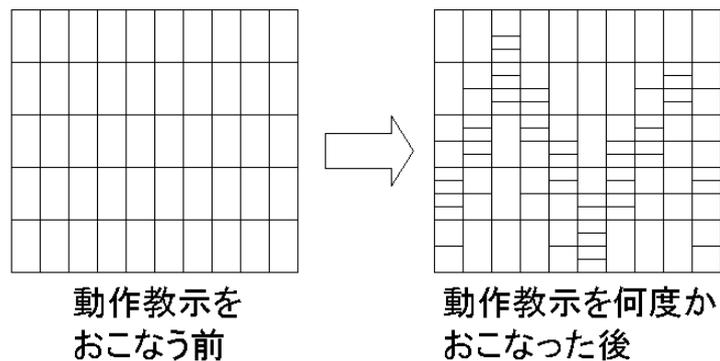
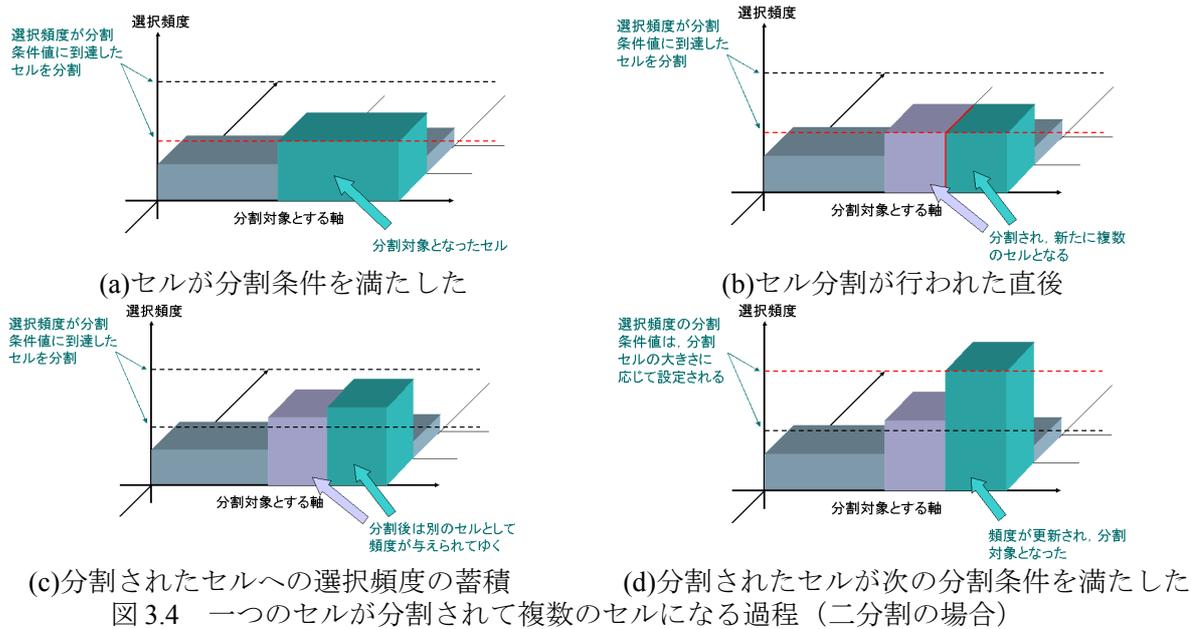


図 3.3 動作教示前後で目指すセルの分割状態

一つのセルが分割されて複数のセルになる過程を図 3.4 に示す。各セルには、その大きさに応じて分割条件値が決められている。この分割条件値はいくつかのパラメータから自動的に導き出される。分割条件値の決定方法は 3.1.3 で詳しく説明する。セルに選択頻度が加算されていくと、やがて選択頻度が分割条件値を満たす (図 3.4(a))。分割条件を満たしたセルは複数に分割される (図 3.4(b))。分割される数はあらかじめ利用者がパラメータとして定義する。分割されたセルの持つ選択頻度は分割前のセルが持っていた選択頻度と同じ値である。分割されたあとは別々のセルとして選択頻度が加算される (図 3.4(c))。分割されたセルに対しても、その大きさに応じて次の分割条件値が決められている (図 3.4(d))。



### 3.1.3 セル分割条件の決定方法

本項では、分割頻度空間のセルの分割が行われる条件の決定方法を説明する。

本論文で提案する分割頻度空間は、正規化や忘却を行わず、選択頻度を単純に蓄積する方法を採用している。この方法では記録できる選択頻度の値に限界が生じることが考えられる。よって、分割条件式は「選択頻度の蓄積に限界がある」という前提で考える。

まず、選択頻度を何段階かに区切り、セルの分割段階に応じた分割条件値を提示するイメージ (図 3.3) から、式(3.1)のような式を考えた。(式の分母が  $l_{MAX} + 1$  となっているのは、最後の分割の後一段階分、選択頻度に伸び白を持たせるため)

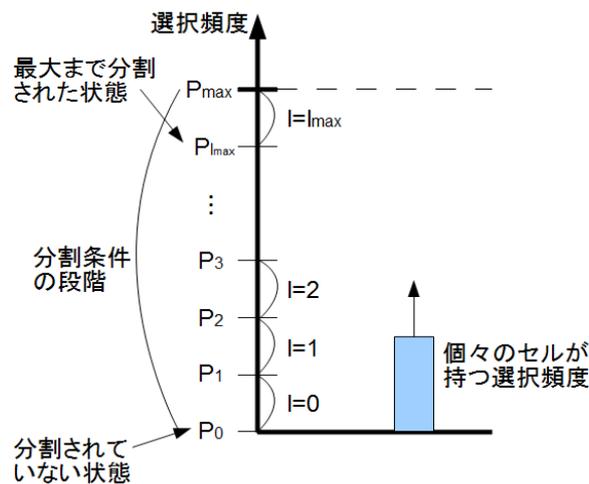


図 3.5 分割条件の設定イメージ

$$P_l = P_{max} \frac{l}{l_{max} + 1} \dots (3.1)$$

$P_l$  :  $l$  回分割されたセルが、次に分割される分割条件値 (選択頻度)

$P_{max}$  : 選択頻度の限界値 (ただし  $P_{max}$  が分割条件値とならないように  $P_{l_{max}} = P_{max-1}$  とする)

$l$  : 対象とするセルが初期状態から分割された回数 ( $l=0,1,2,\dots$ ) ( $l \leq l_{max}$ )  
 $l_{max}$  : ひとつのセルが初期状態から分割可能な最大回数 ( $l$  の最大値を表す)

上式のセルの最大分割回数  $l_{max}$  を, セルが分割できる回数の限界を設定することとする. このとき  $l_{max}$  はセルの大きさに依存する. 頻度空間にはセルの初期状態の大きさと限界の大きさが定められており, それらの関係は以下の式(3.2)のようになる.

$$s_0 \left( \frac{1}{x} \right)^l \geq s_{min} \dots (3.2)$$

$x$  : 一度の分割でのセルの分割数 ( $x \geq 2$  を満たす整数)  
 $s_l$  :  $l$  分割された状態のセルの大きさ  
 $s_0$  : 頻度空間が初期状態のときのセルの大きさ  
 $s_{min}$  : セルの取りうる最小の大きさ

セルの大きさ  $s_l$  は,  $l$  が大きくなるほど小さくなっていくことに注意.

$$l \leq l_{max}, \quad x \geq 2 \text{ より,}$$

$$s_0 \left( \frac{1}{x} \right)^l \geq s_0 \left( \frac{1}{x} \right)^{l_{max}} \geq s_{min}$$

$$s_0 \left( \frac{1}{x} \right)^{l_{max}} \geq s_{min} \dots (3.3)$$

式(3.3)を  $l_{max}$  が中心となるように変形すると

$$l_{max} \leq \log_x \frac{s_0}{s_{min}}$$

$l_{max}$  は必ず整数となるので, 最大の  $l_{max}$  を求める式は以下のようになる.

$$l_{max} = \lfloor \log_x \frac{s_0}{s_{min}} \rfloor \dots (3.4)$$

$\lfloor \cdot \rfloor$  : 床関数 ( $\lfloor x \rfloor$  のとき実数  $x$  以下の最大の整数を表す)

頻度空間が初期状態のときのセルの大きさ  $s_0$  は, 以下の式で求められる.

$$s_0 = \frac{\theta_{max} - \theta_{min}}{X_0} \dots (3.5)$$

$X_0$  : 対象とする軸に対しての, セルの初期分割数 ( $X_0 \geq 1$  を満たす整数)  
 $\theta_{max}$  : 角度の取りうる最大値  
 $\theta_{min}$  : 角度の取りうる最小値

式(3.5)を式(3.4)に代入すると以下のようになる.

$$l_{max} = \lfloor \log_x \frac{\theta_{max} - \theta_{min}}{s_{min} \times X_0} \rfloor \dots (3.6)$$

式(3.6)によって  $l_{max}$  を求め, 式(3.1)でセルの分割条件を決定する.

### 3.2 分割頻度空間を利用するシステム

この節では、分割頻度空間を利用するシステムを提案する。このシステムは、第2章の頻度空間を利用するシステムを基本として、分割頻度空間の利用が可能となるよう変更を行ったものである。システムの全容を図3.6に示す。

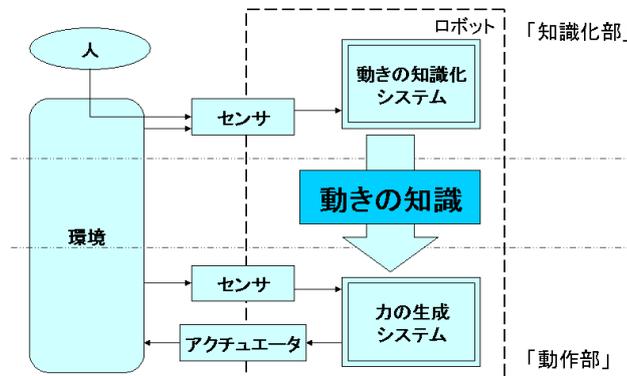


図 3.6 分割頻度空間を利用するシステムの構造

#### 3.2.1 先行研究からの変更点

「頻度空間を利用するシステム」を元に「分割頻度空間を利用するシステム」を考案するにあたり、変更を行った部分について解説する。

#### 3.2.2 知識化部による動作知識の形成

知識化部とは、頻度空間を利用するシステムにおいて頻度空間を形成する部分である。図3.7に知識化部の構造を示す。頻度空間を形成するには、大きく分けて2つの方法がある。一つは各セルの持つ選択頻度の値を利用者が直接操作する方法である。頻度空間を直接操作するとは、コンピュータなどの端末を用いて各セルの値を変更することである。もう一つはロボットの動作情報を元に頻度空間を形成する方法である。

ロボットの動作情報を元に頻度空間を形成する方法を説明する。まず、教示を行う人が手作業もしくは従来の方法でロボットを動作させる。次にシステムはセンサを通してロボットの動作を得る。そして得たロボットの動作から頻度空間を形成する。

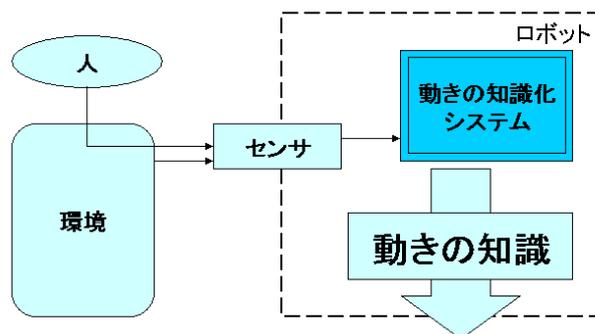


図 3.7 知識化部の構造図

ロボットの動作の情報から頻度空間を形成する手順について説明する。センサよりロボットの頻度空間上における動作を取得する。その動作を元に頻度空間上に選択頻度を加算する。選択頻度は、時間ごとのロボットの状態を中心として、いくつかのセルに加算する。選択頻度を加算する範囲は、システムの利用者があらかじめパラメータとして与える。中心に近い部分には「通る頻度の高い場所」として高い選択頻度を与える。この処理を、区切られた時間ごとに行う。

頻度空間に加算する選択頻度を計算する方法を説明する。まず、ある時間のロボットの状態を取得

する。取得したロボットの状態を中心として、利用者があらかじめ決めた選択頻度加算範囲を元に、式(3.7)によって各セルに加算する選択頻度を決定する。現在の位置情報と各セルの位置との距離を計算するにあたって、大きさの違う複数のセルを最小サイズセルの集まりと見なして計算を行う。大きさの違うセルに加算する選択頻度を計算する様子を、図 3.8 に示す。

$$u_{t,i} = \frac{C}{1 + \frac{r}{s_{min}}} \dots (3.7)$$

$u_{t,i}$  :  $p_{t,i}$  に加算する選択頻度

$C$  : 一度の加算で加える選択頻度の最大値

$r$  : 現在地点と、各セルの現在地点に最も近いところの間の距離

$s_{min}$  : セルのとりうる最小の幅

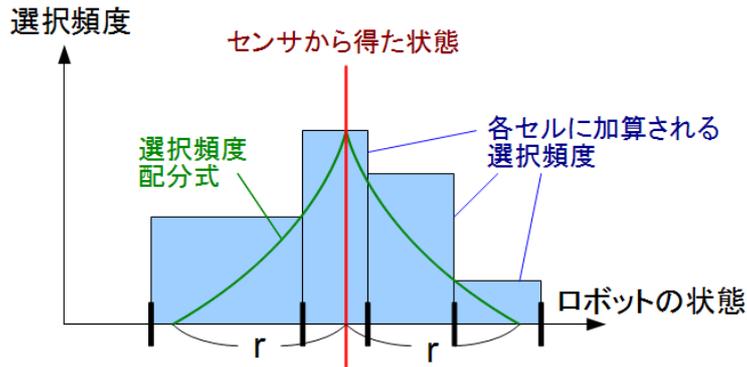


図 3.8 加算する選択頻度の決定

### 3.2.3 動作部による動作の再生

動作部とは、頻度空間を元にロボットの動作を生成する部分である。図 3.9 に動作部の構造を示す。まず、センサからロボットがおかれている状態を取得する。次に、頻度空間上でのロボットの状態が向かう方向と力を求める。そして、力からロボットの動作を決定し、ロボットに出力する。これによりロボットの動作を行う。

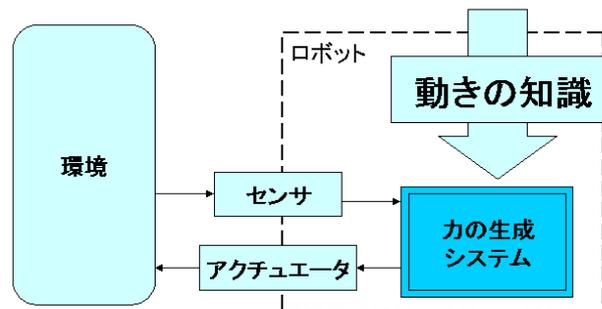


図 3.9 動作部の構造図

頻度空間からロボットの動作を生成する概念について説明する。動作するロボットの状態は、頻度空間上では仮想の質量を持った球として表現される。この球が頻度空間上で仮想の運動を行うことによって、ロボットの動作を生成する。この球に力を加えて球の運動方向を操作することで、任意の動作を生成することが可能となる。

頻度空間上に生まれる力の定義を説明する。まず、球は選択頻度の高いセルに引き寄せられる。球があるセルと選択頻度の高いセルとの間にある選択頻度の高低差が大きいほど、大きな力が生まれる。選択頻度の高いセルが遠くにあるほど、大きな力で引き寄せられる。球を引き寄せることができるセ

ルの有効範囲は、システム利用者が任意に決められるものとする。

この定義を元に、球を動かす力の計算方法について説明する。まず、頻度空間上でのロボットの状態をセンサより取得する。次に、ロボットの状態に近いセルの中から最も高い選択頻度を持つセルを選択する。ここで選択するセルを決定する範囲  $r$  は、システム利用者が任意に決定する頻度空間上の距離である。図 3.10 にセル選択の様子を示す。青い球がロボットの現在の状態であり、この球が頻度空間上の力を受けてロボットの動作を決定する。

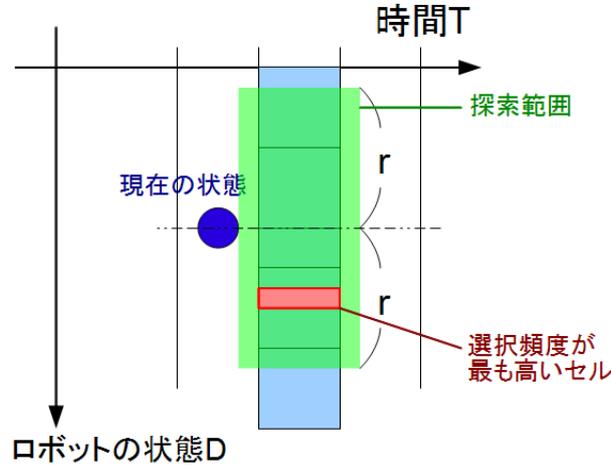


図 3.10 セル選択の手順

上述の「頻度空間上の力の定義」を元に、 $t$  ステップにおける力  $F_t$  を求める式を次のように定義する。

$$F_t = k_t \times (\dot{D}_t - D_t) \quad \dots (3.8)$$

$F_t$  :  $t$  ステップにおける力

$D_t$  : センサから取得したロボットの状態

$\dot{D}_t$  : 選択頻度が最も高いセルの中心が示すロボットの状態

式(3.8)の意味を説明する。 $\dot{D}_t - D_t$  は現在の状態と目標となる状態が離れているほど大きな力を生むことを意味する。 $k_t$  は頻度空間の高低差によって生まれる力である。 $k_t$  は式(3.9)によって求める。

$$k_{t+1} = \frac{p_{t+1,max}}{\sum_{i=1}^n p_{t+1,i} \times w_{t+1,i}} \times \alpha \quad \dots (3.9)$$

$p_{t,max}$  : 選択頻度が最も高いセルの選択頻度 ( $(p_{t,1}, \dots, p_{t,n})$  の中で最も値が大きいもの)

$\alpha$  : 頻度空間の高低差から生じる力の、力全体に占める割合を決める係数

$w_{t,i}$  :  $t$  ステップ、 $i$  番目のセルのサイズに応じてかける重み

セルのサイズに応じてかける重み  $w_{t,i}$  は式(3.10)によって求める。

$$w_{t,i} = \frac{S_{t,i}}{S_{min}} \quad \dots (3.10)$$

$S_{t,i}$  :  $t$  ステップ、 $i$  番目のセルのサイズ

$S_{min}$  : セルのとりうる最小のサイズ

上記の過程によって求められた力を用いて、ロボットの動作を決定する。図 3.11 に動作を決定するイメージを示す。

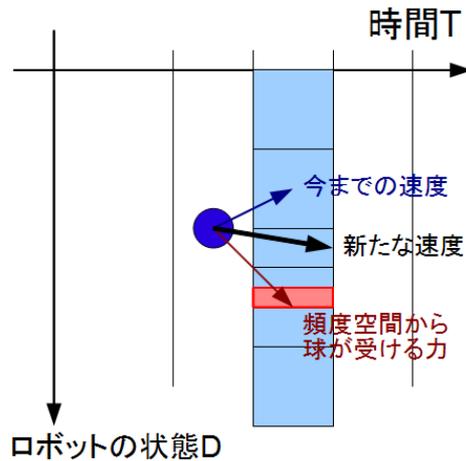


図 3.11 力から動作を決定する様子

ロボットの状態を表す球は、1ステップ前から現在までの時間を動いていた速度を持っている。このとき、選択頻度の最も高いセルから球に対して引き寄せる力が加わる。今までの速度に頻度空間による力が加わり、新たな速度が生まれる。球はこの速度で、現在から1ステップ後までの時間を移動する。

上式で求めた力から  $t+1$  ステップにおけるロボットの状態  $D_{t+1}$  を求める。角度を求めるために、まずは式(1)で求められる  $F_t$  を運動方程式  $F=ma$  に代入することによって、加速度  $a_t$  を求める。

$$k_t \times (\dot{D}_t - D_t) = m \times a_t$$

$m$  は頻度空間上を転がるボールの仮想質量である。

上式を変形することによって得られる、加速度を求める式は以下の通りである。

$$a_t = \frac{k_t \times (\dot{D}_t - D_t)}{m} \dots (3.11)$$

求めた加速度を以下の式に代入することによって速度が求まる。

$$v_{t+1} = v_t + a_t (T_{t+1} - T_t) \dots (3.12)$$

$T_{t+1}$  は  $t+1$  ステップにおける頻度空間上の時間である。同じく  $T_t$  は  $t$  ステップにおける頻度空間上の時間である。

求めた速度  $v_{t+1}$  を以下の式に代入することによって目標とするロボットの状態が求まる。

$$D_{t+1} = D_t + v_{t+1} (T_{t+1} - T_t) \dots (3.13)$$

ここで求めた目標の状態に向かって、ロボットは動作を行う。動作した結果の状態をセンサにより取得し、次ステップの動作を計算する。

## 第4章 実験

### 4.1 実験目的

前章で提案した手法を実ロボットに適用し、実際に教示・動作をおこなって「データ空間の自動分割」が実現されていることを確認する。その上で、前章で提案した手法によって先行研究の問題点が解消されていることを確認する。

### 4.2 実験環境

本節では、本章の実験に用いるロボットの詳細と、実験の対象となるシステムによってどのようにデータを取得するかを説明する。本実験では、ロボットの状態を扱う対象として実際のロボットを用いる。このロボットの概要と実験対象とする状態の範囲について4.2.1項で説明する。本実験には、先行研究で提案されたシステム（第2章にて説明したシステム）と、本研究で提案するシステム（第3章にて説明したシステム）の2種類のシステムを用いる。これらのシステムを用いて実験結果を取得する方法を、4.2.2項と4.3.3項で説明する。

#### 4.2.1 実験に用いるロボット

本実験では、SpecysシリーズのロボットSPC-003を用いて実験を行う。このロボットの全体の外観を図4.1に、上半身部分を拡大したものを図4.2に示す。

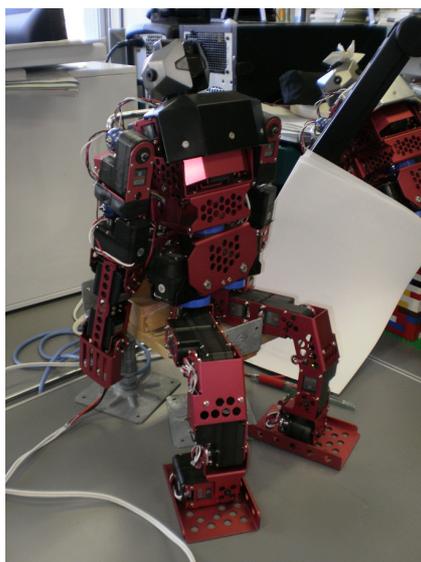


図4.1 ロボット全身図

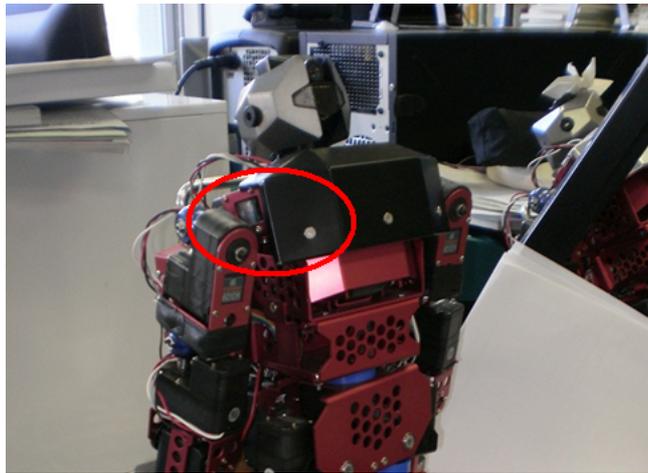


図 4.2 ロボット上半身拡大図

実験に用いるのは、図 4.2 中の赤い円で囲んだ部分に搭載されている、ロボットの右肩のサーボモータ 1 つである。このサーボモータの可動範囲は $-120$ 度 $\sim 120$ 度となっている。また、このサーボモータは、ロボットの中では右腕を前後にさせる役割を持つ。図 4.3 に、右腕の位置とサーボモータの角度の対応を示す。

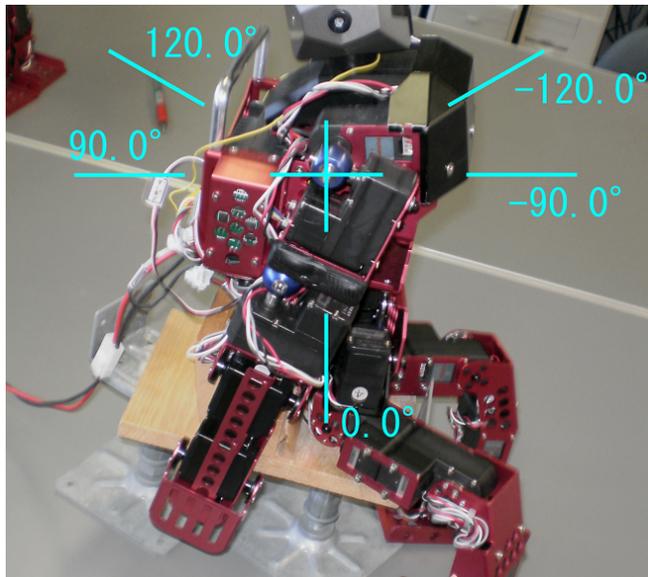


図 4.3 ロボットの腕の位置とサーボモータの角度の対応

実験は、図 4.1 の全身図に示すように、ロボットを椅子に座らせた状態でおこなう。実験の動作中は、上述の「実験に用いるサーボモータ」以外のサーボモータの角度を動作開始前の状態で固定し、動作による姿勢の変化が起こらないようにする。また、実験に用いるサーボモータの角度は、動作再生時には $0$ 度から開始するよう設定している。

本章の実験では、上述の「実験に用いるサーボモータ」の取る角度 $\theta$ を、頻度空間におけるロボットの状態として扱う。

#### 4.2.2 先行研究で提案されたシステムによるデータの取得

本項では、先行研究で提案されたシステムを用いて実験結果を取得する方法を説明する。システムを利用して得られる結果とは、頻度空間の状態と出力動作である。本項では、システムの利用の最も単純な例として、入力動作の情報 1 つから頻度空間の生成をおこなう。

表 4.1 に、本項で説明に用いるシステムのパラメータを示す。動作入力時間、動作再生時間はそれぞれロボットに動作入力を行う時間、ロボットの動作再生にかかる時間である。刻み時間、角度刻み幅は、頻度空間をセルに区切るにあたって、時間・ロボットの状態を区切る間隔である。選択頻度加算

セル数は、動作の知識を頻度空間に蓄積するとき、頻度空間に選択頻度を加算する範囲である。移動先探索セル数は、頻度空間から動作を生成するとき、次ステップの状態の決定に用いるセルの範囲である。仮想球質量  $m$ 、傾斜係数  $\alpha$  は、頻度空間から力を生成する式の定数である。 $m$  は頻度空間上を移動する球の概念に与えられる仮想の質量、 $\alpha$  は選択頻度の高低差の影響を力に反映させる程度を表す。選択頻度加算最大値は、頻度空間のセルに選択頻度を加算するとき、一度にセルに加算する選択頻度の最大値である。

表 4.1 本項で説明に用いるシステムのパラメータ

動作時間[s]	9.5
刻み時間[s]	0.5
角度刻み幅[°]	12
選択頻度加算セル数	11
移動先探索セル数	9
仮想球の質量 $m$	0.1
傾斜係数 $\alpha$	0.7
選択頻度加算最大値	1.0

まず、ロボットを用いて動作情報の入力をおこない、頻度空間の生成に用いるための入力動作のデータを得る。表 4.2 に、本項の例で頻度空間の形成に用いる入力動作を示す。time の列が入力開始から終了までの刻み時間、input の列が刻み時間ごとの入力角度を表している。

表 4.2 頻度空間の形成に用いる入力動作

time[s]	input[°]
0.0	7.2
0.5	4.3
1.0	-5.0
1.5	-13.0
2.0	-18.0
2.5	-22.5
3.0	-28.7
3.5	-33.9
4.0	-42.0
4.5	-51.0
5.0	-57.4
5.5	-57.4
6.0	-43.0
6.5	-37.2
7.0	-32.6
7.5	-25.9
8.0	-13.4
8.5	-4.2
9.0	2.6
9.5	10.0

表 4.2 の入力動作を先行研究のシステムにより知識化し、頻度空間を形成する。表 4.2 の入力動作をシステムに入力して得られた、頻度空間の状態をグラフ化したものを図 4.4 に示す。色の濃淡で表されているのが各セルの頻度空間の高さであり、白色に近いほど高い選択頻度を持つことを示す。

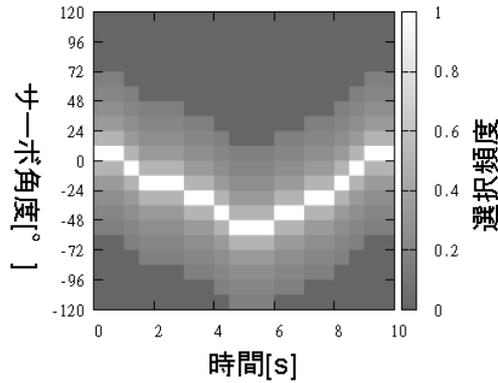


図 4.4 表 4.2 の入力動作を元に形成した頻度空間

頻度空間に動作を教示した後，頻度空間に蓄積された動作知識を元に動作を生成し，出力動作を得る．表 4.3 に，図 4.4 の頻度空間から生成された出力動作を示す．time の列が出力開始から終了までの刻み時間，output の列が刻み時間ごとの出力角度を表している．

表 4.3 図 4.4 の頻度空間を元に生成した出力動作

time[s]	output[°]
0.0	4.0
0.5	5.6
1.0	1.3
1.5	-7.5
2.0	-11.5
2.5	-12.8
3.0	-19.8
3.5	-23.3
4.0	-31.4
4.5	-41.8
5.0	-46.5
5.5	-48.9
6.0	-44.5
6.5	-42.4
7.0	-35.4
7.5	-31.8
8.0	-24.1
8.5	-14.0
9.0	-3.0
9.5	2.2

以上の過程を経て取得した頻度空間の状態や出力動作を用い，データの比較や考察をおこなう．

#### 4.2.3 本研究で提案するシステムによるデータの取得

本項では，本研究で提案するシステムを用いて実験結果を取得する方法を説明する．本研究で提案するシステムは，先行研究で提案されたシステムとほぼ同様の利用方法で利用可能なように設計されている．そこで，本項では本研究のシステムと先行研究のシステムとの相違点を中心に説明をおこなう．

表 4.5 に，本項で説明に用いるシステムのパラメータを示す．動作入力時間，動作再生時間はそれぞれロボットに動作入力を行う時間，ロボットの動作再生にかかる時間である．刻み時間は，頻度空間をセルに区切るにあたって，時間を区切る間隔である．選択頻度加算範囲は，動作の知識を頻度空間に蓄積するとき，頻度空間に選択頻度を加算する範囲である．移動先探索範囲は，頻度空間から動作

を生成するとき、次ステップの状態の決定に用いるサーボ角度の範囲である。仮想球質量  $m$ 、傾斜係数  $\alpha$  は、頻度空間から力を生成する式の定数である。選択頻度加算最大値は、頻度空間のセルに選択頻度を加算するとき、一度にセルに加算する選択頻度の最大値である。セルの大きさの下限は、セル分割によって分割を許す最小の、分割後のセルのサイズ値である。頻度空間の初期分割数とは、頻度空間の初期状態において、ロボットの状態を区切る数である。選択頻度の上限値とは、セルに選択頻度を蓄積できる最大値である。一回分割でのセルの分割数とは、1回のセル分割で一つのセルが分割される個数である。

表 4.5 本項で説明に用いるシステムのパラメータ

動作時間[s]	9.5
刻み時間[s]	0.5
選択頻度加算範囲[°]	33
移動先探索範囲[°]	27
仮想球の質量 $m$	0.03
傾斜係数 $\alpha$	0.7
選択頻度加算最大値	1.0
セルの大きさの下限[°]	6
頻度空間の初期分割数	5
選択頻度の上限値	10
一回分割でのセルの分割数	2

まず、ロボットを用いて動作情報の入力をおこない、頻度空間の生成に用いるための入力動作のデータを得る。表 4.6 に、本項の例で頻度空間の形成に用いる入力動作を示す。time の列が入力開始から終了までの刻み時間、input00～input04 までの各列が刻み時間ごとの入力角度を表している。

表 4.6 頻度空間の形成に用いる入力動作の一覧

time[s]	input00[°]	input01[°]	input02[°]	input03[°]	input04[°]	average[°]
0.0	7.2	1.6	9.2	4.7	6.3	5.80
0.5	4.3	2.2	6.3	3.9	6.3	4.60
1.0	-5.0	-3.6	6.3	-5.4	-0.6	-1.66
1.5	-13.0	-14.2	-9.4	-12.1	-9.9	-11.72
2.0	-18.0	-23.9	-17.6	-20.6	-18.5	-19.72
2.5	-22.5	-31.3	-26.3	-28.0	-24.3	-26.48
3.0	-28.7	-37.8	-32.5	-35.0	-32.6	-33.32
3.5	-33.9	-41.9	-39.2	-39.5	-38.4	-38.58
4.0	-42.0	-45.1	-44.8	-46.4	-44.3	-44.52
4.5	-51.0	-51.3	-51.3	-52.8	-51.0	-51.48
5.0	-57.4	-56.2	-57.4	-52.8	-51.0	-54.96
5.5	-57.4	-58.9	-57.4	-54.2	-62.3	-58.04
6.0	-43.0	-47.2	-44.2	-42.5	-60.5	-47.48
6.5	-37.2	-41.8	-35.9	-32.3	-48.8	-39.20
7.0	-32.6	-35.9	-28.0	-23.9	-34.2	-30.92
7.5	-25.9	-28.2	-18.3	-14.4	-19.4	-21.24
8.0	-13.4	-20.9	-11.9	-8.8	-10.6	-13.12
8.5	-4.2	-15.2	-4.3	-8.8	-0.4	-6.58
9.0	2.6	-7.8	2.6	6.8	6.3	2.10
9.5	10.0	-4.1	4.3	11.4	12.6	6.84

分割頻度空間の、先行研究の頻度空間との最大の相違点は、選択頻度の蓄積に応じてセルを分割し、頻度空間の構造が変化する点にある。先行研究のシステムでは入力の順番の変化によって頻度空間の状態が変化することはないが、本研究のシステムでは、セルの分割が行われることにより入力情報が分割頻度空間に与える影響は変化する。よって、入力したデータの順番を明確にしなければならない。本章においては、input00 など番号が順に割り当てられた入力情報の組を扱う場合、番号の小さい順にシステムに入力するものとする。

表 4.6 の入力動作を先行研究のシステムにより知識化し、頻度空間を形成する。表 4.6 の入力動作を input00～input04 の順にシステムに入力して得られた、頻度空間の状態をグラフ化したものを図 4.5 に

示す。色の濃淡で表されているのが各セルの頻度空間の高さであり、白色に近いほど高い選択頻度を持つことを示す。

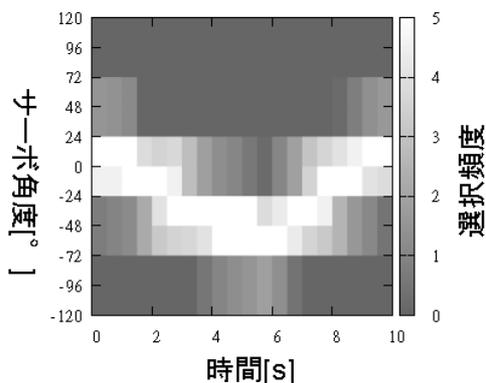


図 4.5 表 4.6 の入力動作を元に形成した頻度空間

頻度空間に動作を教示した後、頻度空間に蓄積された動作知識を元に動作を生成し、出力動作を得る。表 4.7 に、図 4.5 の頻度空間から生成された出力動作を示す。time の列が出力開始から終了までの刻み時間、output の列が刻み時間ごとの出力角度を表している。

先行研究のシステム、本研究で提案するシステムのどちらも、生成した動作を再生中、ロボットから再生中の角度などのデータを取得するのに失敗する場合がある。その場合は、表の中のエラーにより値を正しく取得できなかった部分に、値の代わりに error と表記する。グラフを作成する場合には、エラーがあった点のみプロットせずにグラフ化する。

表 4.7 図 4.5 の頻度空間を元に生成した出力動作

time[s]	output[°]
0.0	9.7
0.5	12.1
1.0	13.0
1.5	-12.0
2.0	-11.3
2.5	-27.6
3.0	error
3.5	-33.4
4.0	-34.3
4.5	-34.3
5.0	-34.2
5.5	-60.0
6.0	-59.0
6.5	-59.1
7.0	-59.0
7.5	-34.6
8.0	-14.8
8.5	-11.5
9.0	10.0
9.5	12.1

以上の過程を経て取得した頻度空間の状態や出力動作を用い、データの比較や考察をおこなう。

## 4.3 実験概要

本節では次節以降でおこなう実験の内容、共通の実験設定、使用する入力データについて説明する。

### 4.3.1 行う実験

本論文では2つの実験を行う。

まず、第3章で提案した手法によって「データ空間の自動分割」が実現されていることを確認するために「分割頻度空間を用いるシステムの動作実験」を行う。実際に、本研究のシステムにデータを入力し、動作の教示を行った分割頻度空間と、分割頻度空間から動作を再生した出力を検証する。まず、本論文の提案どおり、分割頻度空間において動作の知識を詳細に記録する必要がある部分を重点的にセルの分割が行われているかを確認する。次に、分割頻度空間を基にした動作の再生において、入力した動作が正しく再現されているかどうかを確認する。

次に、本論文で提案した手法が先行研究の問題点を解消できていることを確認するために「分割頻度空間と頻度空間の比較実験」を行う。まず、本研究のシステムによって分割頻度空間に動作の教示を行い、出力動作を再生する。次に、前述の分割頻度空間と「セルの数がほぼ同じ」頻度空間と「最小のセルのサイズが同じ」頻度空間を用意する。そして、先行研究のシステムによってそれらの頻度空間に「分割頻度空間に教示したのと同じ動作」の教示を行い、出力動作を再生する。それらの出力動作と入力動作を比較することで、分割頻度空間は従来の頻度空間と比較して、少ない情報量で詳細な動作の知識を蓄えることができるということを確認する。

### 4.3.2 実験に使用するデータ

今回の実験では、現実のロボットを通して頻度空間への動作知識の蓄積を行った。一つの頻度空間には一種類の動作を教えることとした。動作の種類は3種類用意し、それぞれ動作A、動作B、動作Cとした。3種類の動作に対して、それぞれ入力動作を10回ずつ取得した。以下に動作A、動作B、動作Cそれぞれの入力情報の詳細を示す。

#### 動作A

ロボットを介して人の手で、サーボモータの角度が0秒時点で約0度、5秒時点で約-60度、10秒時点で約0度となる動作を教示する。図4.6に、この動作をロボット上で行った場合の動作を矢印で示す。この動作を入力し、0.5秒おきの入力角度を記録した結果が表4.8である。左端の縦一列は入力時間を、input00～input09はそれぞれ記録された入力角度、averageはinput00～input09までの10回分の入力情報を時間ごとに平均したものである。単位は、動作時間が秒、入力角度が度単位となっている。

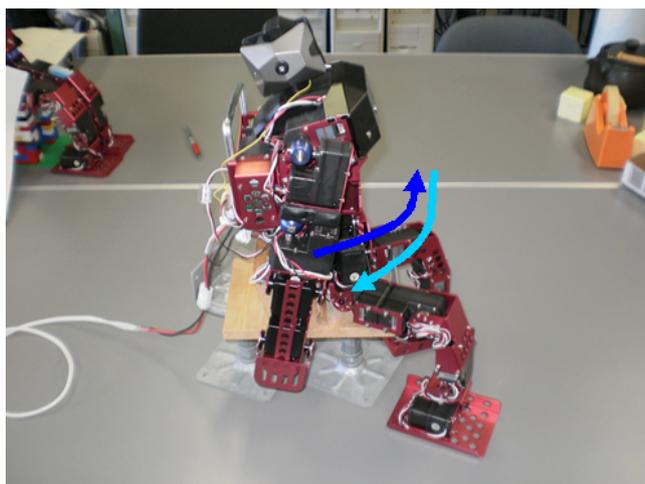


図4.6 動作Aを入力する場合の腕の変位

表 4.8 動作 A の入力

time[s]	input00	input01	input02	input03	input04	input05	input06	input07	input08	input09	average
0.0	7.2	1.6	9.2	4.7	6.3	7.2	3.4	1.3	8.3	6.2	5.54
0.5	4.3	2.2	6.3	3.9	6.3	6.1	-3.3	-5.0	7.8	4.8	3.34
1.0	-5.0	-3.6	6.3	-5.4	-0.6	0.3	-13.0	-23.1	-1.3	-6.9	-5.23
1.5	-13.0	-14.2	-9.4	-12.1	-9.9	0.3	-23.5	-31.9	-15.7	-16.0	-14.54
2.0	-18.0	-23.9	-17.6	-20.6	-18.5	-18.4	-31.3	-31.9	-15.7	-27.0	-22.29
2.5	-22.5	-31.3	-26.3	-28.0	-24.3	-25.7	-37.1	-46.4	-34.0	-32.9	-30.85
3.0	-28.7	-37.8	-32.5	-35.0	-32.6	-31.5	-43.1	-50.4	-34.0	-39.9	-36.55
3.5	-33.9	-41.9	-39.2	-39.5	-38.4	-38.7	-47.3	-55.0	-44.8	-44.8	-42.35
4.0	-42.0	-45.1	-44.8	-46.4	-44.3	-44.8	-52.5	-60.1	-47.7	-48.2	-47.59
4.5	-51.0	-51.3	-51.3	-52.8	-51.0	-51.3	-56.2	-60.1	-54.1	-54.8	-53.39
5.0	-57.4	-56.2	-57.4	-52.8	-51.0	-58.6	-60.7	-61.4	-59.2	-60.0	-57.47
5.5	-57.4	-58.9	-57.4	-54.2	-62.3	-56.7	-59.6	-56.8	-59.6	-59.0	-58.19
6.0	-43.0	-47.2	-44.2	-42.5	-60.5	-49.6	-52.9	-56.8	-55.8	-51.0	-50.35
6.5	-37.2	-41.8	-35.9	-32.3	-48.8	-40.8	-46.5	-34.7	-45.9	-42.2	-40.61
7.0	-32.6	-35.9	-28.0	-23.9	-34.2	25.4	-35.7	-23.8	-37.3	-31.6	-25.76
7.5	-25.9	-28.2	-18.3	-14.4	-19.4	-19.8	-26.1	-13.4	-28.9	-22.0	-21.64
8.0	-13.4	-20.9	-11.9	-8.8	-10.6	-9.4	-15.2	-5.9	-22.2	-14.2	-13.25
8.5	-4.2	-15.2	-4.3	-8.8	-0.4	-3.3	-7.6	1.1	-14.1	-6.7	-6.35
9.0	2.6	-7.8	2.6	6.8	6.3	0.7	-7.6	4.6	-8.3	0.9	0.08
9.5	10.0	-4.1	4.3	11.4	12.6	5.1	7.0	5.5	-3.0	5.1	5.39

動作 B

ロボットを介して人の手で、サーボモータの角度が 0 秒時点で約 0 度、2 秒時点で約 30 度、7 秒時点で約 -40 度、10 秒時点で約 0 度となる動作を教示する。図 4.7 に、この動作をロボット上で行った場合の動作を矢印で示す。この動作を入力し、0.5 秒おきの入力角度を記録した結果が表 4.9 である。左端の縦一列は入力時間を、input00～input09 はそれぞれ記録された入力角度、average は input00～input09 までの 10 回分の入力情報を時間ごとに平均したものである。単位は、動作時間が秒、入力角度が度単位となっている。

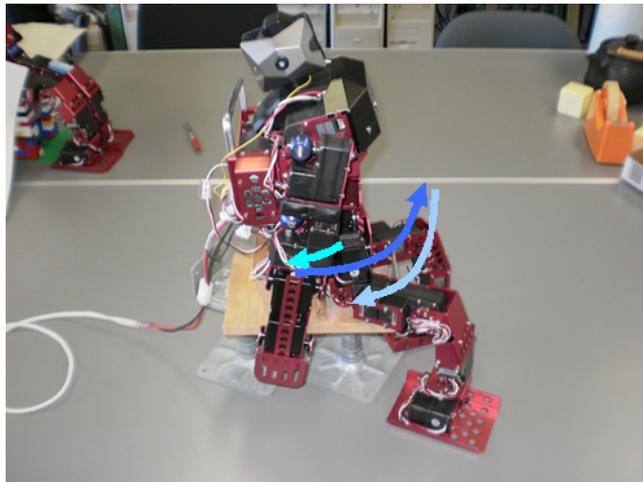


図 4.7 動作 B を入力する場合の腕の変位

表 4.9 動作 B の入力

time[s]	input00	input01	input02	input03	input04	input05	input06	input07	input08	input09	average
0.0	6.3	1.8	4.3	3.0	2.7	7.2	6.3	1.3	0.7	4.7	3.83
0.5	8.4	4.3	4.3	8.5	5.2	14.2	12.2	1.0	0.7	-1.3	5.75
1.0	19.8	14.0	10.3	19.3	16.2	17.5	19.4	8.0	0.7	-1.3	12.39
1.5	26.8	20.5	16.7	27.2	23.5	24.9	25.8	21.0	18.0	-1.3	20.31
2.0	36.1	27.9	25.5	39.1	31.6	32.0	33.7	33.3	28.2	32.6	32.00
2.5	41.6	34.1	32.7	22.8	37.1	40.8	37.4	37.2	37.9	36.1	35.77
3.0	30.7	21.0	35.0	13.7	25.8	40.8	27.5	35.0	32.9	24.3	28.67
3.5	19.3	14.8	21.3	3.0	15.7	40.8	20.5	24.2	21.3	15.4	19.63
4.0	12.7	4.8	13.8	-8.4	4.3	40.8	13.3	16.7	12.8	5.4	11.62
4.5	1.1	-6.8	4.0	-18.3	-5.8	40.8	7.7	10.7	1.2	-0.5	3.41
5.0	-10.9	-11.4	-3.6	-24.2	-16.5	40.8	0.8	-2.6	-10.5	-7.8	-4.59
5.5	-21.3	-16.0	-13.0	-31.2	-25.8	-17.4	-5.9	-12.9	-20.7	-14.3	-17.85
6.0	-28.5	-21.4	-24.0	-39.7	-32.1	-28.6	-17.4	-24.5	-29.3	-20.4	-26.59
6.5	-39.2	-29.9	-33.9	-36.7	-38.9	-37.0	-25.4	-36.3	-38.2	-27.6	-34.31
7.0	-44.2	-39.2	-39.8	-23.1	-38.2	-42.5	-26.1	-44.8	-44.9	-31.8	-37.46
7.5	-38.5	-39.2	-47.3	-13.2	-31.3	-42.3	-11.8	-44.8	-34.7	-19.9	-32.30
8.0	-38.5	-39.2	-42.6	-5.8	-21.0	-29.8	-5.7	-52.2	-24.9	-10.9	-27.06
8.5	-20.1	-39.2	-35.9	-0.4	-21.0	-23.8	1.0	-47.7	-14.8	-2.0	-20.39
9.0	-10.8	25.5	-25.4	5.3	-21.0	-15.2	5.3	-28.3	-5.7	7.2	-6.31
9.5	-3.0	-4.0	-15.7	8.3	3.9	-7.2	6.2	-14.2	2.6	13.0	-1.01

動作 C

ロボットを介して人の手で、サーボモータの角度が 0 秒時点で約 0 度、3 秒時点で約-50 度、5 秒時点で約-10 度、7 秒時点で約-50 度、10 秒時点で約 0 度となる動作を教示する。図 4.8 に、この動作をロボット上で行った場合の動作を矢印で示す。この動作を入力し、0.5 秒おきの入力角度を記録した結果が表 4.10 である。左端の縦一列は入力時間を、input00～input09 はそれぞれ記録された入力角度、average は input00～input09 までの 10 回分の入力情報を時間ごとに平均したものである。単位は、動作時間が秒、入力角度が度単位となっている。

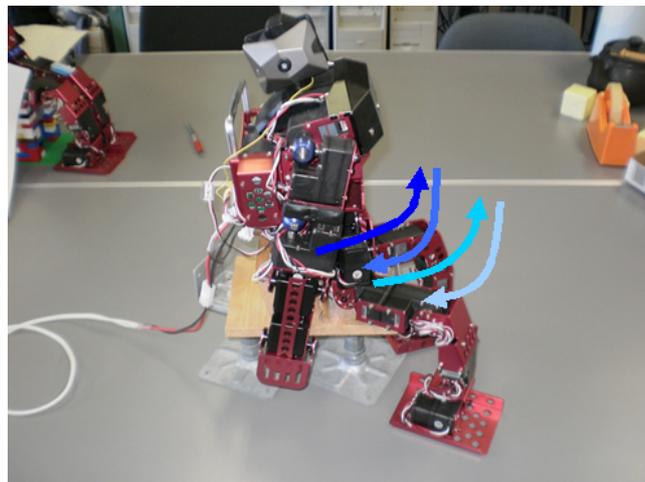


図 4.8 動作 C を入力する場合の腕の変位

表 4.10 動作 C の入力

time[s]	input00	input01	input02	input03	input04	input05	input06	input07	input08	input09	average
0.0	6.0	3.8	4.2	2.6	2.7	3.9	2.9	3.4	3.0	1.3	3.38
0.5	1.4	25.5	-0.4	-3.6	-0.1	-6.8	-6.8	-9.9	3.0	-6.7	-0.44
1.0	-9.0	-16.0	-14.0	-17.5	-13.0	-17.5	-17.5	-21.8	-18.1	-19.1	-16.35
1.5	-16.0	-23.3	-24.1	-27.2	-21.9	-26.7	-27.0	-29.0	-34.6	-33.5	-26.33
2.0	25.4	-31.7	-41.7	-35.9	-33.0	-34.2	-34.7	-36.7	-43.4	-42.4	-30.83
2.5	25.4	-40.5	-53.6	-41.7	-41.7	-46.4	-42.4	-47.7	-53.0	-53.2	-39.48
3.0	-44.7	-47.7	-50.9	-47.7	-47.1	-46.4	-47.7	-47.1	-55.8	-57.4	-49.25
3.5	-48.0	-52.9	-38.8	-38.8	-40.9	-30.9	-36.4	-47.1	-46.3	-53.1	-43.32
4.0	-41.8	-43.3	-38.8	-25.4	-27.8	-16.9	-24.0	-14.3	-32.8	-40.5	-30.56
4.5	-34.0	-33.5	-38.8	-17.6	-14.8	-8.2	-19.3	-4.8	-20.4	-30.1	-22.15
5.0	-23.8	-23.6	-12.1	-17.6	0.0	-1.2	-12.0	5.3	-5.7	-20.0	-11.07
5.5	-12.1	-13.0	-25.9	-14.2	0.0	-11.5	-6.1	-7.5	-4.8	-10.7	-10.58
6.0	-16.0	-15.4	-38.8	-25.4	-9.4	-11.5	-19.8	-19.4	-22.0	-19.4	-19.71
6.5	-26.6	-23.6	-47.3	-34.2	-20.4	-11.5	-30.6	-29.0	-37.9	-33.0	-29.41
7.0	-38.1	-31.7	-54.0	-42.4	-29.5	-41.9	-38.1	-42.4	-48.5	-42.5	-40.91
7.5	-49.2	-38.1	-46.7	-49.5	-38.1	-37.9	-38.1	-45.3	-50.5	-42.5	-43.59
8.0	-39.8	-43.2	-31.8	-42.5	-33.2	-26.1	-38.1	-30.9	-35.3	-55.3	-37.62
8.5	-29.8	-52.8	-17.5	-33.7	-22.2	-17.4	-39.7	-19.9	-19.8	-40.9	-29.37
9.0	-17.5	-44.2	-4.7	-26.4	-12.1	-9.4	-39.7	-12.1	-9.7	-26.5	-20.23
9.5	-6.7	-32.3	1.0	-14.3	-3.2	1.0	-19.9	-2.9	4.3	-15.3	-8.83

## 4.4 分割頻度空間を用いるシステムの動作実験

### 4.4.1 実験手順

この実験は動作 A、動作 B、動作 C の入力動作を別々に用いて、計 3 回おこなう。

まず、分割頻度空間に動作を教示し、動作の知識が多く与えられる部分のセルが、細かく分割されることを確認する。初期状態の分割頻度空間に input00～input09 を番号順に入力情報として与え、動作の知識を蓄積する。その間の分割頻度空間のセルの境界線が変化する様子を確認する。

次に、ロボットに教示した入力動作が、分割頻度空間を基にした動作の生成によって再現されることを確認する。頻度空間から動作を 3 回生成し、その出力動作と、動作の教示に用いた入力動作を比較する。また、この実験でシステムに用いられるパラメータは表 4.11 の通りである。

表 4.11 本節の実験でシステムに用いられるパラメータ

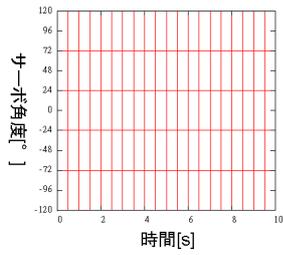
動作時間[s]	9.5
刻み時間[s]	0.5
選択頻度加算範囲[°]	33.0
移動先探索範囲[°]	27.0
仮想球の質量m	0.03
傾斜係数 $\alpha$	0.7
選択頻度加算最大値	1.0
セルの大きさの下限[°]	6.0
頻度空間の初期分割数	5
選択頻度の上限値	10
一回分割でのセルの分割数	2

### 4.4.2 動作 A の実験結果

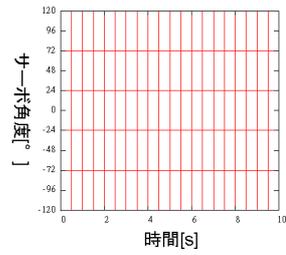
本項では動作 A の入力情報（表 4.8）を用いて行った、分割頻度空間を用いるシステムの動作実験の結果を示す。

#### セルの分割

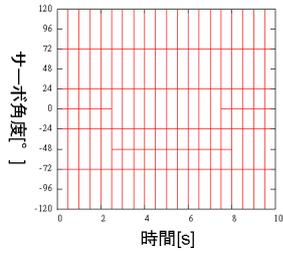
図 4.9 に、input00～input09 をシステムに入力し、知識化を行った直後の頻度空間のセルの分割状況を示す。縦軸がサーボモータの角度、横軸が時間を表す。グラフの枠内の赤い線がセルとセルの境目を表し、セルが分割されると分割されたセルとセルの間に新たに線が増える。



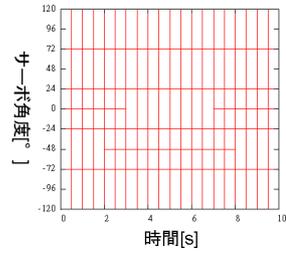
(a)input00 を入力した直後の頻度空間



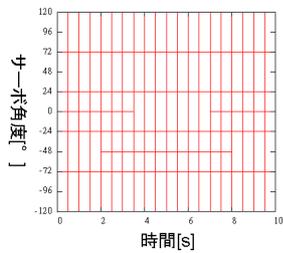
(b)input01 を入力した直後の頻度空間



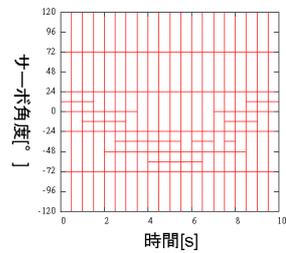
(c)input02 を入力した直後の頻度空間



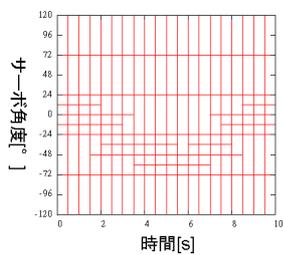
(d)input03 を入力した直後の頻度空間



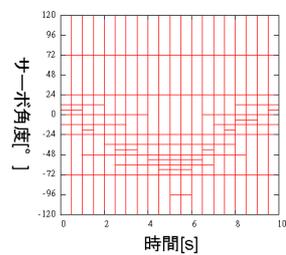
(e)input04 を入力した直後の頻度空間



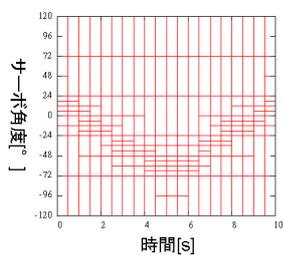
(f)input05 を入力した直後の頻度空間



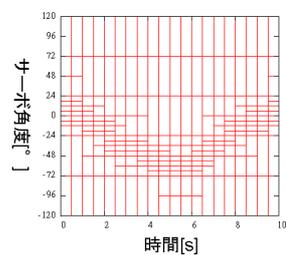
(g)input06 を入力した直後の頻度空間



(h)input07 を入力した直後の頻度空間



(i)input08 を入力した直後の頻度空間



(j)input09 を入力した直後の頻度空間

図 4.9 入力（動作 A）1 回ごとの頻度空間の状態

全ての入力動作の入力が完了した状態の頻度空間を図 4.10 に示す。灰色の濃淡で示されているのが各セルの選択頻度の高さで、白色に近いほど高い値を持つことを示す。また、図 4.10 の頻度空間と動作 A の入力の average（平均）を重ね合わせたものが図 4.11 となる。赤の折れ線で示されているのが average である。

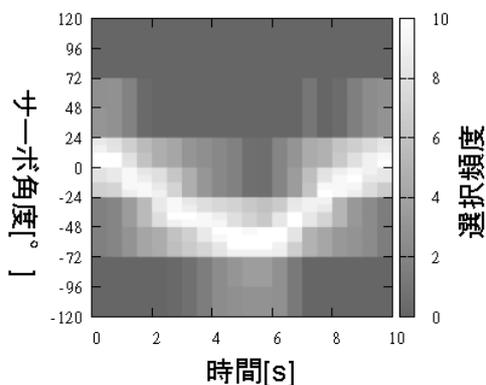


図 4.10 動作 A の入力情報から生成された分割頻度空間

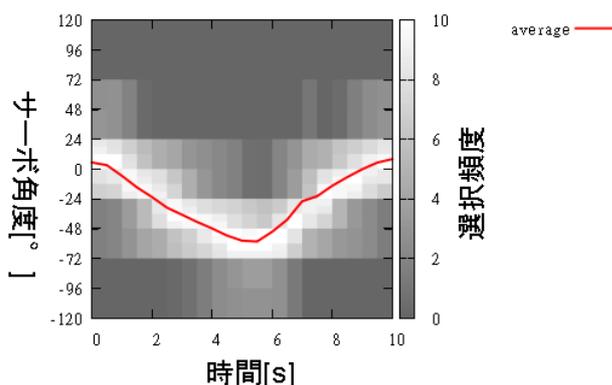


図 4.11 入力情報（動作 A）の平均と生成された頻度空間の重ね合わせ

#### 動作の再生

表 4.12 は分割頻度空間を元に再生された動作の出力角度を 1 ステップごとに記録したものである。左端の縦一列は動作の再生時間を、output00～output02 はいずれも図 4.10 の分割頻度空間を元に生成した動作を示す。図 4.12 は output00～output02 と、表 4.8 の average を比較したものである。

表 4.12 再生動作 A

time[s]	output00	output01	output02
0.0	3.4	3.5	3.4
0.5	4.3	4.3	4.3
1.0	-0.3	-0.3	-0.3
1.5	-11.6	-11.5	-11.5
2.0	-17.5	-17.3	-17.4
2.5	-34.2	-34.5	-34.5
3.0	-37.1	-37.0	-36.8
3.5	error	-37.1	-37.2
4.0	-37.6	-47.9	-47.9
4.5	-48.4	-48.8	-48.9
5.0	-54.4	-54.3	-54.2
5.5	-55.3	-55.4	-55.1
6.0	-55.6	-55.6	-55.3
6.5	-45.1	-45.1	-45.1
7.0	-44.3	error	-33.9
7.5	-21.0	-33.5	-22.2
8.0	-19.7	-20.5	-20.2
8.5	-8.4	-8.4	-8.3
9.0	-3.2	-3.0	-3.2
9.5	2.8	2.8	-3.2

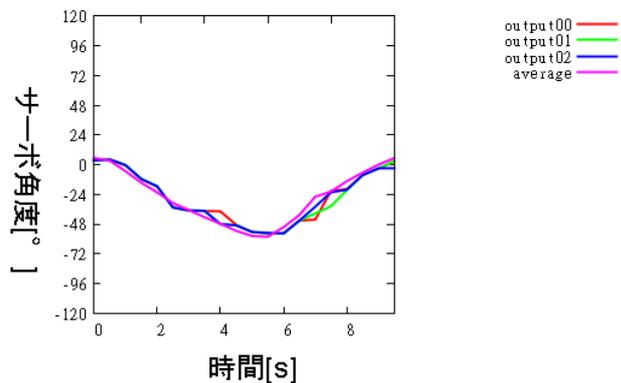


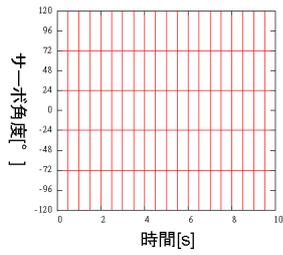
図 4.12 再生動作 A と動作 A の入力の比較

#### 4.4.3 動作 B の実験結果

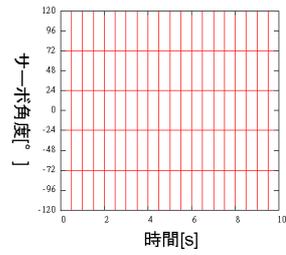
本項では動作 B（表 4.9）の入力情報をを用いて行った分割頻度空間を用いるシステムの動作実験の結果を示す。

セルの分割

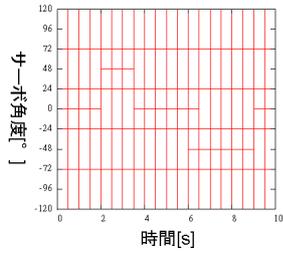
図 4.13 に、input00～input09 をシステムに入力し、知識化を行った直後の頻度空間のセルの分割状況を示す。縦軸がサーボモータの角度、横軸が時間を表す。グラフの枠内の赤い線がセルとセルの境目を表し、セルが分割されると分割されたセルとセルの間に新たに線が増える。



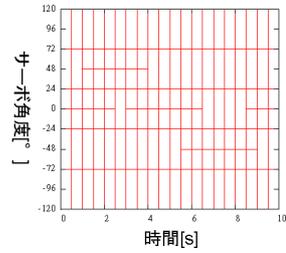
(a)input00 を入力した直後の頻度空間



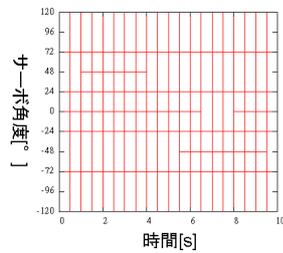
(b)input01 を入力した直後の頻度空間



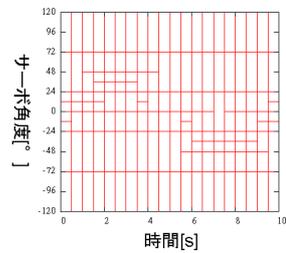
(c)input02 を入力した直後の頻度空間



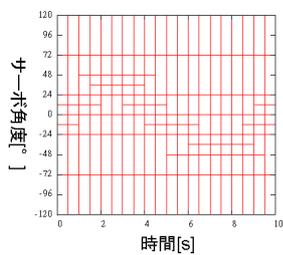
(d)input03 を入力した直後の頻度空間



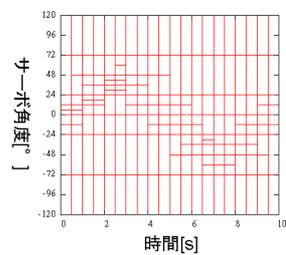
(e)input04 を入力した直後の頻度空間



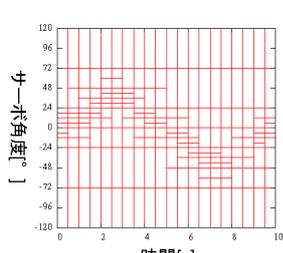
(f)input05 を入力した直後の頻度空間



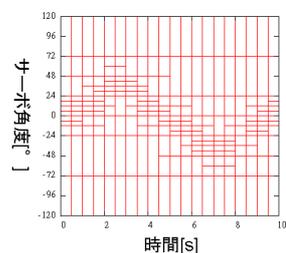
(g)input06 を入力した直後の頻度空間



(h)input07 を入力した直後の頻度空間



(i)input08 を入力した直後の頻度空間



(j)input09 を入力した直後の頻度空間

図 4.13 入力（動作 B）1 回ごとの頻度空間の状態

全ての入力動作の入力が完了した状態の頻度空間を図 4.14 に示す。灰色の濃淡で示されているのが各セルの選択頻度の高さで、白色に近いほど高い値を持つことを示す。また、図 4.14 の頻度空間と動作 B の入力の average（平均）を重ね合わせたものが図 4.15 となる。赤の折れ線で示されているのが average である。

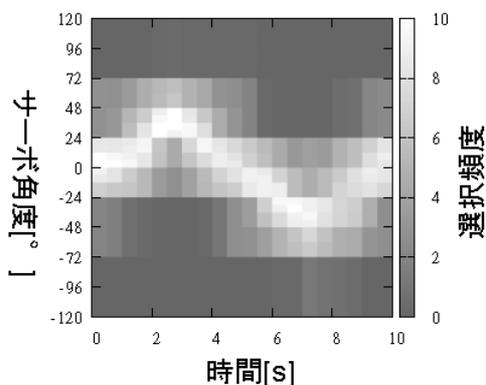


図 4.14 動作 B の入力情報から生成された分割頻度空間

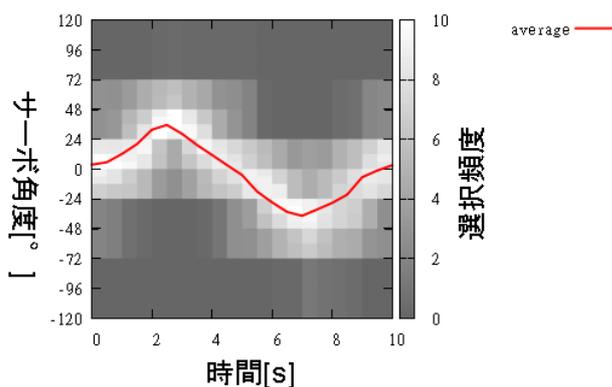


図 4.15 入力情報（動作 B）の平均と生成された頻度空間の重ね合わせ

#### 動作の再生

表 4.13 は分割頻度空間を元に再生された動作の出力角度を 1 ステップごとに記録したものである。左端の縦一列は動作の再生時間を、output00～output02 はいずれも図 4.14 の分割頻度空間を元に生成した動作を示す。図 4.16 は output00～output02 と、表 4.9 の average を比較したものである。

表 4.13 再生動作 B

time[s]	output00	output01	output02
0.0	3.5	3.4	3.4
0.5	4.3	4.3	4.3
1.0	4.4	4.3	4.4
1.5	13.7	13.7	error
2.0	27.2	27.3	14.2
2.5	32.9	32.9	35.4
3.0	error	33.7	34.3
3.5	33.7	error	23.8
4.0	9.1	23.5	11.7
4.5	5.4	4.5	5.7
5.0	-0.2	0.0	-0.3
5.5	-5.8	-5.8	-5.9
6.0	-23.3	error	-23.1
6.5	-30.5	-24.0	-30.4
7.0	-36.0	-35.9	-36.0
7.5	-32.6	-32.6	-32.6
8.0	-29.8	-29.7	-29.8
8.5	-13.4	-13.4	-13.4
9.0	error	-4.2	error
9.5	-3.9	6.4	-13.4

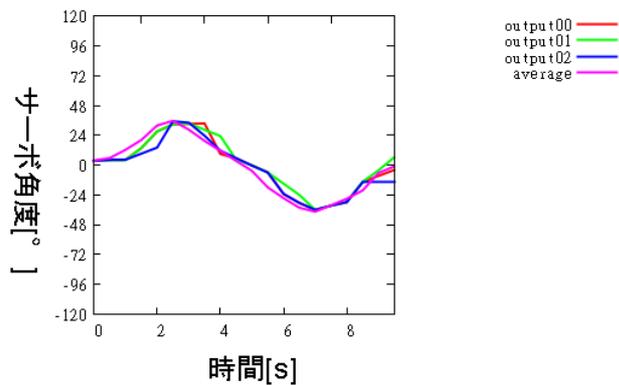


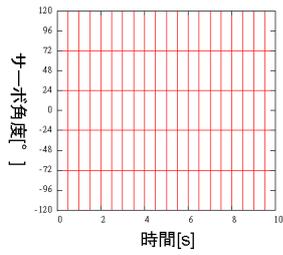
図 4.16 再生動作 B と動作 B の入力の比較

#### 4.4.4 動作 C の実験結果

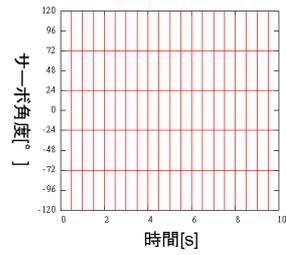
本項では動作 C (表 4.10) の入力情報をを用いて行った分割頻度空間を用いるシステムの動作実験の結果を示す。

セルの分割

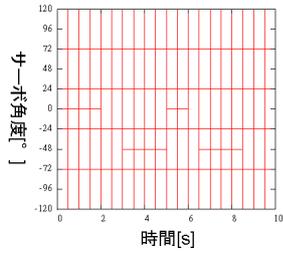
図 4.17 に, input00~input09 をシステムに入力し, 知識化を行った直後の頻度空間のセルの分割状況を示す。縦軸がサーボモータの角度, 横軸が時間を表す。グラフの枠内の赤い線がセルとセルの境目を表し, セルが分割されると分割されたセルとセルの間に新たに線が増える。



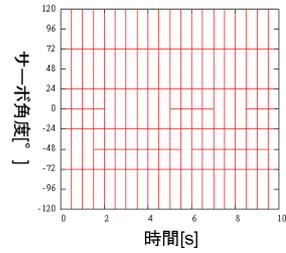
(a)input00 を入力した直後の頻度空間



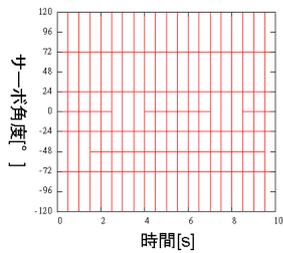
(b)input01 を入力した直後の頻度空間



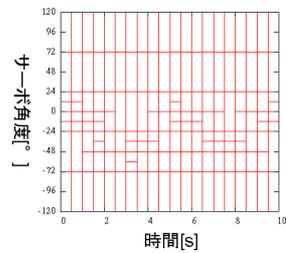
(c)input02 を入力した直後の頻度空間



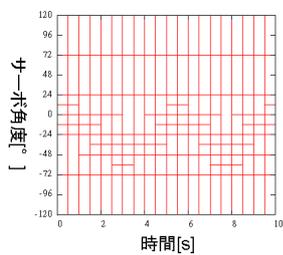
(d)input03 を入力した直後の頻度空間



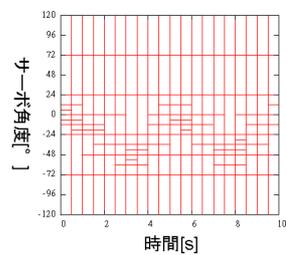
(e)input04 を入力した直後の頻度空間



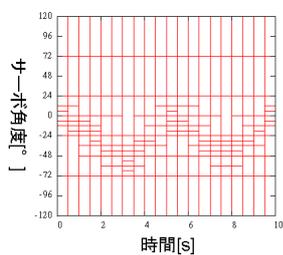
(f)input05 を入力した直後の頻度空間



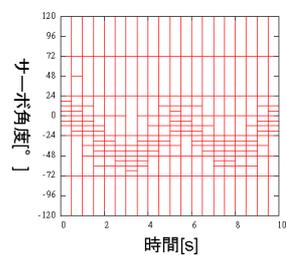
(g)input06 を入力した直後の頻度空間



(h)input07 を入力した直後の頻度空間



(i)input08 を入力した直後の頻度空間



(j)input09 を入力した直後の頻度空間

図 4.17 入力（動作C）1 回ごとの頻度空間の状態

全ての入力動作の入力が完了した状態の頻度空間を図 4.18 に示す。灰色の濃淡で示されているのが各セルの選択頻度の高さで、白色に近いほど高い値を持つことを示す。また、図 4.18 の頻度空間と動作 C の入力の average（平均）を重ね合わせたものが図 4.19 となる。赤の折れ線で示されているのが average である。

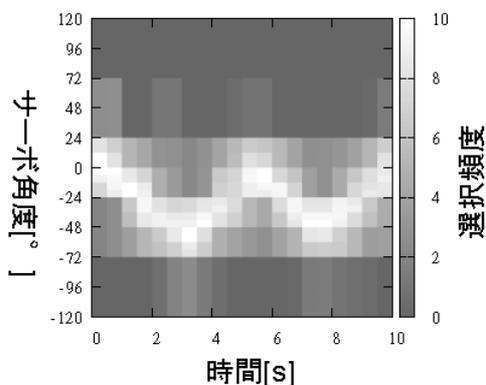


図 4.18 動作 C の入力情報から生成された分割頻度空間

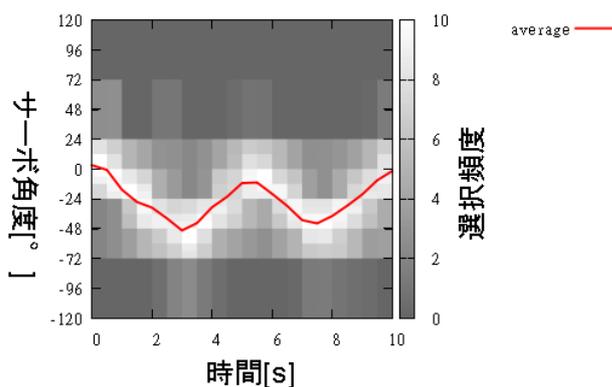


図 4.19 入力情報（動作 C）の平均と生成された頻度空間の重ね合わせ

#### 動作の再生

表 4.14 は分割頻度空間を元に再生された動作の出力角度を 1 ステップごとに記録したものである。左端の縦一列は動作の再生時間を、output00～output02 はいずれも図 4.18 の分割頻度空間を元に生成した動作を示す。図 4.20 は output00～output02 と、表 4.10 の average を比較したものである。

表 4.14 再生動作 C

time[s]	output00	output01	output02
0.0	3.3	3.3	3.4
0.5	-0.5	-0.5	-0.6
1.0	-12.6	-12.7	-12.5
1.5	-23.2	-23.1	-23
2.0	-35.9	-36	-36
2.5	-41.8	-41.7	-41.7
3.0	-47.7	-47.8	-47.8
3.5	-44.5	-44.3	-44.4
4.0	-33.9	-33.9	-33.9
4.5	-32.3	-32.3	-32.3
5.0	-9.4	-9.3	-9.3
5.5	-8.2	-7.9	-7.8
6.0	-12.6	-12.5	-12.5
6.5	-23.7	-23.7	-23.7
7.0	-44.2	-44.2	-44.2
7.5	-43.7	-43.6	-43.7
8.0	-38.8	-38.8	-39
8.5	-33	-33	-33.1
9.0	-21.9	-21.8	-21.8
9.5	-9.8	-9.8	-9.8

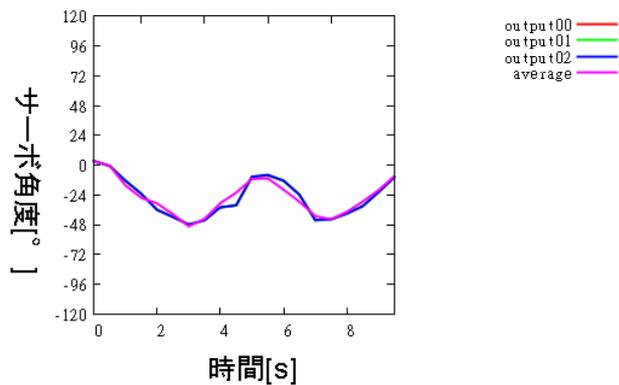


図 4.20 再生動作 C と動作 C の入力の比較

#### 4.4.5 考察

入力に対して頻度空間の形状を見ると、いずれも入力の平均に近いあたりに選択頻度が山を作っている。これは提案内容と一致する。出力同士を比較すると、複数回の再生に対してほぼ同じ動作が再生されている。よって分割頻度空間は、動作の生成に再現性がある表現方法であるといえる。出力と入力を比較すると、似通った形であるといえる。横方向にずれているように見えるのは、出力の動作が入力に比べて1ステップ遅れで追従しているためである。以上の結果より、本論文で提案するシステムによってロボットの動作を記録し、記録した動作に近い動作を生成することができたといえる。

## 4.5 分割頻度空間と頻度空間の比較実験

### 4.5.1 実験手順

この実験では、1つの分割頻度空間と2つの先行研究の頻度空間を用意する。そして、その3つの頻度空間に同じ条件の入力動作を与えることで性能の比較を行う。共通の入力動作として、4.3.3の動作Cの入力情報を用いる。

まず、本研究のシステムによって分割頻度空間に動作の教示を行い、出力動作を再生する。この分割頻度空間のセルの数と、頻度空間上で最も小さく分割されているセルのサイズを確認する。次に、前述の分割頻度空間とセルの数がほぼ同数になるようにパラメータを設定した、先行研究の頻度空間を用意する。その頻度空間に動作の教示を行い、出力動作を再生する。そして、前述の分割頻度空間の最も小さいセルと同じ大きさになるようにセルの大きさを設定した、先行研究の頻度空間を用意する。その頻度空間に動作の教示を行い、出力動作を再生する。最後に、それぞれの頻度空間の出力動作と入力動作を用いて動作の再現性を数値化し、頻度空間の間で動作の再現性を比較する。また、各頻度空間のセルの数も比較する。以後、この実験で用いる本研究で提案したシステムをシステムX、セルの数を合わせた先行研究のシステムをシステムY、セルの最小の大きさを合わせた先行研究のシステムをシステムZと呼ぶことにする。システムX、システムY、システムZのパラメータを表4.15、表4.16、表4.17に示す。

表 4.15 システム X のパラメータ

動作時間[s]	9.5
刻み時間[s]	0.5
選択頻度加算範囲[°]	33.0
移動先探索範囲[°]	27.0
仮想球の質量m	0.03
傾斜係数 $\alpha$	0.7
選択頻度加算最大値	1.0
セルの大きさの下限[°]	7.5
頻度空間の初期分割数	4
選択頻度の上限値	10
一回分割でのセルの分割数	2

表 4.16 システム Y のパラメータ

動作時間[s]	9.5
刻み時間[s]	0.5
角度刻み幅[°]	24
選択頻度加算セル数	11
移動先探索セル数	9
仮想球の質量m	0.03
傾斜係数 $\alpha$	0.7
選択頻度加算最大値	1.0

表 4.17 システム Z のパラメータ

動作時間[s]	9.5
刻み時間[s]	0.5
角度刻み幅[°]	7.5
選択頻度加算セル数	11
移動先探索セル数	9
仮想球の質量m	0.03
傾斜係数 $\alpha$	0.7
選択頻度加算最大値	1.0

また、本実験では入力動作と出力動作にどれだけの差があるかを比較するために、両者のずれを数値で表す。入力動作と出力動作のずれを計算する式を式(4.1)に示す。また、出力エラーがあったステップは計算に含めないものとする。

$$u = \frac{1}{n} \sum_{t=0}^n |\theta_b(t) - \theta_a(t)| \dots (4.1)$$

$u$  : 入出力の差の平均

$n$  : 比較時間の総ステップ数

$t$  : 比較時間のステップ数

$\theta_a(t)$  :  $t$  ステップにおける入力動作の角度

$\theta_b(t)$  :  $t$  ステップにおける出力動作の角度

#### 4.5.2 実験結果

システム X によるデータ取得

システム X に入力動作 C を入力して分割頻度空間を形成した。図 4.21 に形成した分割頻度空間，図 4.22 にセルの分割状況を示す。

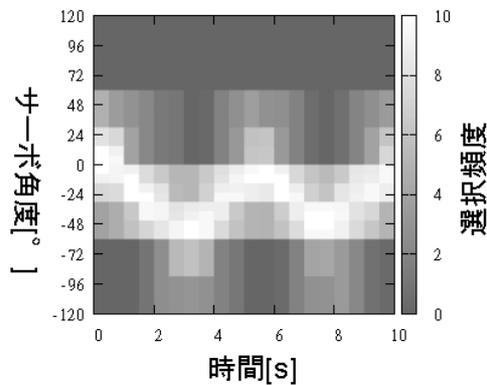


図 4.21 システム X に動作 C を入力して得られた分割頻度空間

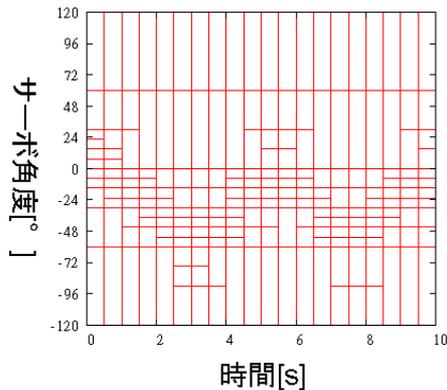


図 4.22 システム X の分割頻度空間のセル区切り状態

図 4.21 の頻度空間を元に 3 回の出力動作を生成した。表 4.18 に生成した 3 回の出力動作，図 4.23 に表 4.18 の出力動作のグラフを示す。グラフには参考として入力動作の平均も載せている。

表 4.18 システム X による出力動作

time[s]	output00	output01	output02
0.0	3.9	3.9	3.9
0.5	4.7	4.7	4.8
1.0	-14	-14.3	-14.2
1.5	-25.9	-25.9	-25.9
2.0	-31.7	-31.4	-31.7
2.5	-47.5	-47.7	-47.6
3.0	-47.3	-47.2	-47.3
3.5	-47.2	-47	-47.2
4.0	-23.4	-23.5	-47.3
4.5	-24.8	-24.8	-17.5
5.0	-9.7	-9.7	-10
5.5	-10.1	-10.1	-10
6.0	-10.1	-10.2	-10.1
6.5	-27.5	-27.8	-27.6
7.0	-39.7	-39.6	-39.5
7.5	-39.9	-39.7	-39.7
8.0	-39.4	-39.7	-39.7
8.5	-26.1	-26	-26
9.0	-25	-24.7	-24.9
9.5	-10.5	-10.6	-10.5

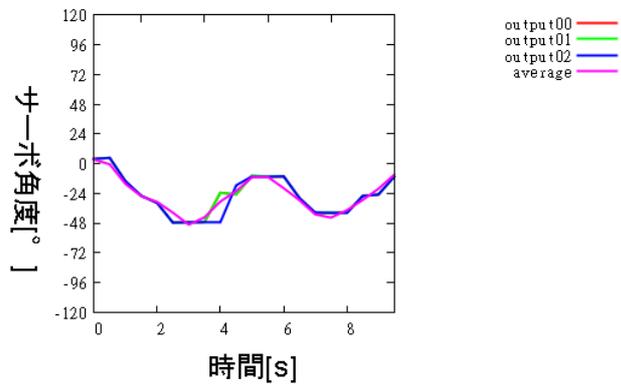


図 4.23 入力動作 A とシステム X による出力動作の比較

システム Y によるデータ取得

システム Y に入力動作 C を入力して頻度空間を形成した。図 4.24 に形成した頻度空間，図 4.25 にセルの区切り状態を示す。

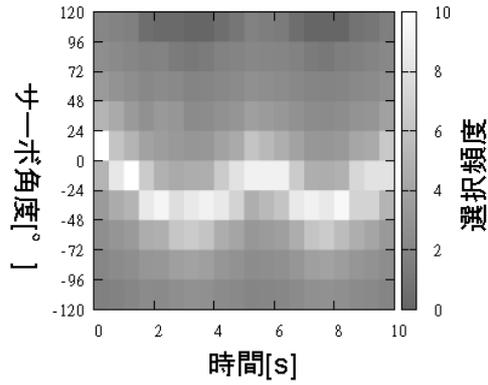


図 4.24 システム Y に動作 C を入力して得られた頻度空間

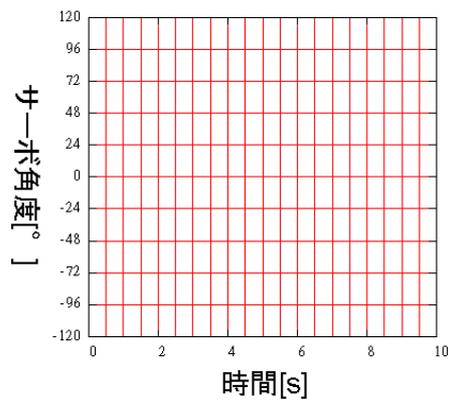


図 4.25 システム Y のセル区切り状態

図 4.24 の頻度空間を元に 3 回の出力動作を生成した．表 4.19 に生成した 3 回の出力動作，図 4.26 に表 4.19 の出力動作のグラフを示す．グラフには参考として入力動作の平均も載せている．

表 4.19 システム Y による出力動作

time[s]	output00	output01	output02
0.0	18.5	18.6	18.6
0.5	-20.6	-20.9	-20.6
1.0	-6.4	error	-6.4
1.5	-45.0	-5.3	-45.0
2.0	-29.8	-49.6	error
2.5	-36.5	-29.5	-29.3
3.0	-34.9	-37.2	-37.6
3.5	-35.4	-34.6	-34.2
4.0	-35.0	-35.3	-35.5
4.5	-3.6	-3.6	-35.7
5.0	-14.2	-14.0	0.6
5.5	-10.1	-10.2	-16.3
6.0	-11.4	-11.5	-9.4
6.5	-43.3	-43.0	-44.5
7.0	-31.4	-31.6	-30.1
7.5	-36.6	-36.4	-36.8
8.0	-34.7	-34.5	-34.6
8.5	-6.1	-6.4	-6.1
9.0	-12.3	-12.1	-12.0
9.5	-11.1	-11.1	-12.0

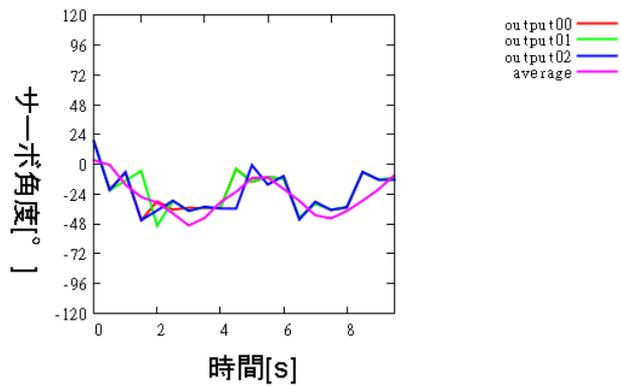


図 4.26 入力動作 A とシステム Y による出力動作の比較

システム Z によるデータ取得

システム Z に入力動作 C を入力して頻度空間を形成した。図 4.27 に形成した頻度空間，図 4.28 にセルの区切り状態を示す。

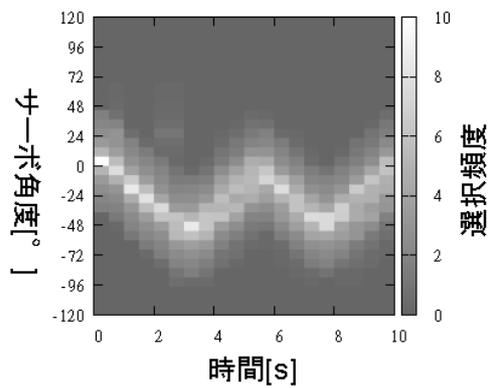


図 4.27 システム Z に動作 A を入力して得られた頻度空間

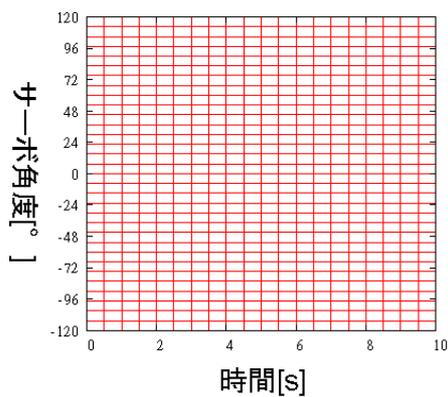


図 4.28 システム Z のセル区切り状態

図 4.27 の頻度空間を元に 3 回の出力動作を生成した。表 4.20 に生成した 3 回の出力動作，図 4.29 に表 4.20 の出力動作のグラフを示す。グラフには参考として入力動作の平均も載せている。

表 4.20 システム Z による出力動作

time[s]	output00	output01	output02
0.0	6	6	6
0.5	-5.5	-5.5	-5.7
1.0	-23.3	-23.3	-23.3
1.5	-25.9	-25.6	-25.9
2.0	-35.3	-35.2	-35.3
2.5	-40.6	-40.6	-40.5
3.0	-50.1	-50.3	-50.1
3.5	-40.5	-40.4	-40.5
4.0	-39.9	-39.9	-39.9
4.5	-16.5	-16.5	-16.3
5.0	-11.1	-11.1	-10.9
5.5	-10.1	-10	-10.2
6.0	-19.7	-19.9	-19.8
6.5	-32.5	-32.6	-32.5
7.0	-42.1	-41.8	-42
7.5	error	-48.5	-48.5
8.0	-49.1	-31	-30.9
8.5	-10.5	-16.7	-16.7
9.0	-10.1	-10.4	-10.5
9.5	-3.2	-3.2	-3.2

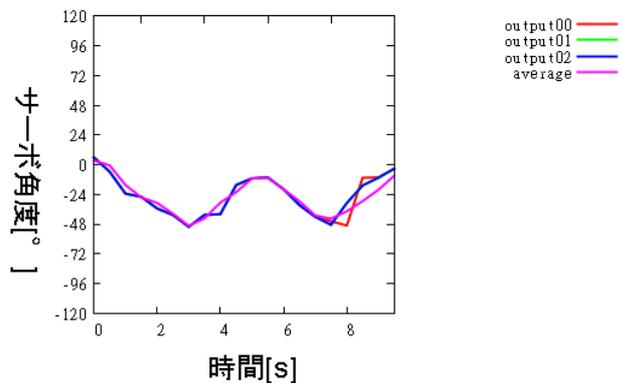


図 4.29 入力動作 A とシステム Z による出力動作の比較

### 3つのシステムの性能比較

式(3.1)によってシステム X, システム Y, システム Z による出力動作と, 入力動作の平均 average のずれを測定し, 比較した. 表 4.21 に各システムによる出力動作 (表 4.18, 表 4.19, 表 4.20) と表 4.10 の average のずれの値と, それぞれのシステムの分割頻度空間・頻度空間のセルの数を示す.

表 4.21 セルの数と入出力間のずれの比較

	システムX	システムY	システムZ
セルの数	208	200	640
output00[°]	3.14	9.59	4.75
output01[°]	3.11	10.93	4.22
output02[°]	3.74	11.13	4.20
平均	3.33	10.55	4.39

### 4.5.3 考察

表 4.21 を見ると，システム X の入出力間のずれが 4 度前後であるのに対し，セルの数がほぼ同じであるシステム Y の入出力間のずれは 11 度前後である．よってシステム Y よりシステム X のほうが，より入力動作に近い出力動作を生成できているといえる．また，システム Z の入出力間のずれは 5 度前後であり，システム X の入出力間のずれとの差は 1 度程度である．しかし，システム Z のセル数はシステム X のセル数に対し約 3 倍となっている．以上の結果より，本実験の条件下において，分割頻度空間のほうが頻度空間よりも動作のデータを効率よく記録しているといえる．

## 第5章 結論

### 5.1 本論文のまとめ

本研究では、ロボットの動作を表現する方法に着目した。特に「頻度空間」という方法に着目した。頻度空間とは、「ロボットの動きに関する新しい表現方法」[1]という研究で提案された、ロボットの動きを表現する方法である。頻度空間は、「状態空間」の上にロボットの動作に関する知識を記述することによって、ロボットの動作を表現する。状態空間とは、ロボットがとりうる状態を表す空間である。この状態空間に「通りやすさ」という概念を付与することによって、頻度空間を表現する。頻度空間の表現方法を説明する。状態空間を一定間隔で区切り、区切られた各部分をセルと呼ぶ。このセル一つ一つに、「選択頻度」という通りやすさを表すパラメータを与える。この選択頻度を持ったセルの集まりによって、頻度空間を表現する。

この頻度空間の問題点として、次のようなことがいえる。沢山の数値データの集まりで表現されるために、ほかの表現方法に比べてデータ量が膨大になる。ロボットのデータの次元数が上がると、データ量はさらに膨大なものとなる。先行研究によっても懸念されている。これによって、ロボットに頻度空間を実装できないという問題が起こることが考えられる。この問題を解決する方法として、2つの方法が考えられる。一つは、セルを区切る間隔を大きくとってデータ量を減少させることである。ただし、この方法では動作の情報の正確性は低下する。もう一つの方法は、少ないデータ量で実現でき、かつ頻度空間と同様の方法で使用可能な「ロボットの動作を表現する方法」を考案することである。本研究では、この「ロボットの動作を表現する方法」の提案を目指した。

本研究の目標は、「必要データ量の減少」と「正確な動作再現の保持」の両立が可能な「ロボットの動作を表現する方法」を提案することである。本研究では目標を達成する手がかりとして、頻度空間上の選択頻度の偏りに着目した。それにより、選択頻度の高いセルは動作の生成に頻繁に利用されるが、選択頻度の低いセルはあまり使用されていないことが判明した。そこで本研究では、頻度空間をベースとした新しい表現方法「分割頻度空間」を提案した。分割頻度空間とは、セルの自動分割により効率のよいデータでロボットの動作を表現する方法である。分割頻度空間上では、選択頻度の低い部分は大きなセルで、選択頻度の高い部分は小さなセルで表現される。それにより、動作の生成に特に重要な部分は細かく、あまり重要でない部分は大きめに記録することを目指した。

本研究で提案したシステムが「必要データ量の減少」と「正確な動作再現の保持」の両立を実現していることを、先行研究によって提案されたシステムとの比較実験を行うことによって確認した。実験は、ある分割頻度空間と2種類の従来頻度空間を用意して行った。従来頻度空間は、分割頻度空間とセルの数をほぼ同数に設定したもの、セルのサイズを分割頻度空間の最小セルサイズと同じにしたものの2種類を用意した。その結果、分割頻度空間は動作の再現は最小セルのサイズが同じ頻度空間と同程度、データ量は最小セルのサイズが同じ頻度空間の約3分の2であった。以上の結果から、本研究で提案した分割頻度空間は、「必要データ量の減少」と「正確な動作再現の保持」の両立を実現しているということが示された。

分割頻度空間によって、従来頻度空間よりも少ないデータ量で動作を表現することができるようになった。しかし、それに伴いいくつかの課題も残された。一つは、分割頻度空間の多次元への対応である。本研究の実験では、ロボットの状態が一次元の場合のみを扱っている。分割頻度空間を多次元に対応させた場合の確認を行うことが一つの課題である。

利用のしやすさという観点からも、課題が残った。本研究の提案においては、分割頻度空間のセルの最小サイズは利用者が決定する。しかし、分割頻度空間を適用するロボットや教示する動作によって、適切なセルの最小サイズは変化する。そこで、システム利用者の代わりにセルの最小サイズを決定する方法が求められる。

頻度空間では可能だったが、分割頻度空間でできなくなったこともある。複数の頻度空間を足し合わせて一つの頻度空間とすることである。分割頻度空間では、動作を教示すると共に頻度空間のセルの並び方が変わってしまうため、セルからセルへの一対一の選択頻度の受け渡しができない。よって、複数台の同じロボットに別々の動作を教え、後から動作知識を一つに統合する、といった用途には従来研究の頻度空間の方が適しているのが現状である。

## 5.2 今後の展望

本節では、5.1 で触れた今後の課題について詳しく説明する。また、それらの問題を解決することで今後どのような発展が見込めるか説明する。

### 分割頻度空間の多次元への対応

先行研究の問題点として、頻度空間を多次元にすると、それを表現するために必要なデータ量が膨大になってしまうという問題があった。分割頻度空間が多次元に適用可能であるならば、この問題を解決することが期待できる。しかし本研究では、分割頻度空間が多次元に適用可能であることを確認していない。分割頻度空間がそのままの形で多次元に適用することができないならば、分割頻度空間を多次元に適用するための新たな研究が必要となる。分割頻度空間がそのまま多次元に適用できるならば、本研究で提案した分割頻度空間を用いたシステムが、多くの実際に用いられているロボットに適用可能となることが期待される。

### セルの最小サイズの自動最適化

本論文で提案した手法では分割頻度空間のセルを分割する大きさの下限は利用者が決定する。しかし、分割頻度空間のシステムやロボットの性質、教示するタスクの性質に詳しくない利用者がこのシステムを利用することも考えられる。その場合、利用者はロボットや教示する動作に適したセル最小サイズを設定することができない可能性が高い。それは本研究や先行研究の目指すところである「専門的な知識を必要としない表現方法」に合致しない。この課題の解決方法としてシステムに、動作入力を元にセルの最小サイズを決定する機能を盛り込むことが考えられる。この機能の実現によって、利用者が専門的な知識を必要としないシステムを実現することが期待できる。

### 分割頻度空間同士の足し合わせ

従来の頻度空間では、構造が同じ複数の頻度空間において、その内容を足し合わせて新たな動作の知識とすることができる。しかし分割頻度空間では、別々に知識が蓄えられた頻度空間同士をそのまま足し合わせることはできない。これは、動作を教示すると共に頻度空間のセルの並び方が変わってしまうためである。分割頻度空間では、セルからセルへの一対一の選択頻度の受け渡しが不可能である。複数の分割頻度空間の知識を統合する方法を考案することで、分割頻度空間の利用の幅が広がることが期待できる。

これらの課題を解決することができれば、より汎用性が高く、利用に専門的な知識を必要としない「ロボットの動作を表現する方法」の実現が期待される。

## 謝辞

本論文を結ぶにあたり、日頃より懇切丁寧なご指導・ご助言を賜りました倉重健太郎先生に深く感謝の意を表します。また、ご助言・ご指導いただいた畑中雅彦先生、本田泰先生、佐賀聡人先生、蓮井洋志先生に感謝の意を表します。そして論文の査読や助言をしてくださった認知ロボティクス研究室院生の木島康隆さん、宮崎愛央さん、中南義典さん、4年生の梅津祐介さん、渋谷和さんに感謝いたします。

## 参考文献

- [1]上野浩史：“国際宇宙ステーションにおけるロボット技術”，日本ロボット学会誌 Vol.27 No.5 pp.498～501(2009)
- [2]稲葉雅幸：“知能ロボットフロンティアとしての筋骨格ヒューマノイド”，日本ロボット学会誌 Vol.28 No.6 pp.666～671(2010)
- [3]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)
- [4]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)
- [5]幾世橋将文：“ロボットの動きに関する新しい表現方法”，室蘭工業大学卒業研究(2007)