

皮膚感覚のファントムセンセーションと  
画像との対話への応用

東京工芸大学工学研究科

画像工学専攻

9662005 白井 暁彦

# Haptic Phantom Sensation and its Applications for Interacting with Images

Akihiko Shirai

Tokyo Institute of Polytechnics

## Abstract:

Tactile displays are becoming more and more important for a person in the virtual space to interact with virtual objects. However, those displays developed have some restrictions, such as the limitation of motion freedom and psychological discomfort to wear. In order to solve these problem, we employ vibro-tactile stimulation to display infomation of virtual environment.

In this study, we investigated perceptual characteristics of tactile sensations by multiple vibrators attached to human soles or hands. We constructed some prototype human interface devices for virtual environmet employing vibrational phantom sensation.

Consequently, we experienced the phantom sensation of two-dimensions by four vibratiors attached to the toes and heels of both feet, and discovered that the two-dimensional phantom sensation could give the subjects sense of direction and rotation.

For application, we applied above mentioned devices to an interface something like a pair of slippers, and could interact with virtual objects.

# 目次

## 第1章 序論

1-1 本論文の構成	1
1-2 研究の背景	2
1-2-1 画像との対話における皮膚感覚の重要性	2
1-2-2 皮膚感覚情報の提示方法	3
1-2-3 皮膚感覚を利用した情報伝達	4
1-2-4 ファントムセンセーション	5
1-3 本研究の目的	6

## 第2章 手掌部におけるPhSと 3次元画像との対話への応用

2-1 はじめに	7
2-1-1 背景	7
2-1-2 目的	7
2-2 理論	8
2-2-1 皮膚の構造	8
2-2-2 ファントムセンセーション	9
2-2-3 振動刺激子	9
2-2-4 振動知覚閾	10
2-2-5 静的PhS	11
2-2-6 動的PhS	12
2-2-7 周波数特性	13
2-3 実験	14
2-3-1 実験装置	14
2-3-2 刺激素子の基礎特性	14
2-3-3 結果 (刺激素子の基礎特性)	15
2-3-4 振動知覚閾実験	15
2-3-5 結果 (振動知覚閾実験)	16
2-3-6 静的なPhSの知覚特性	17

2-3-7	結果（静的PhS）	17
2-3-8	動的PhSの知覚特性	19
2-3-9	結果（動的PhS）	20
2-3-10	動的PhSの知覚周波数特性	22
2-3-11	結果（知覚周波数特性）	23
2-4	3次元画像との対話への応用	24
2-4-1	PhSの基礎特性	24
2-4-2	奥行き知覚補助への応用	24
2-4-3	考察	26
2-5	本章のまとめ	27

## 第3章 足裏における

### 2次元ファントムセンセーション

3-1	はじめに	28
3-1-1	目的	28
3-2	理論	28
3-2-1	仮想工具の改良すべき点と足デバイス	28
3-2-2	新しい振動子の選択	30
3-2-3	足裏（あしうら）のPhS	31
3-2-4	足裏の2次元PhSによる方向提示	31
3-2-5	足裏の2次元PhSによる回転表示	33
3-3	実験	34
3-3-1	実験装置	34
3-3-2	振動子の基礎特性	36
3-3-3	足裏のPhS	38
3-3-4	足裏の2次元PhSによる方向提示	41
3-3-5	回転方向／周波数提示	46
3-4	まとめ	47

## 第4章 応用

4-1 本章の目的	48
4-2 PhSの応用	48
4-2-1 静的PhSの応用	48
4-2-2 動的PhSの応用	49
4-2-3 PSDを用いた応用「仮想工具」	49
4-2-4 4点振動提示板の3次元画像との協調	50
4-2-5 足裏2次元PhSのスリッパへの応用	50
4-3 Fantastic Phantom Slipper	51
4-3-1 コンセプト	51
4-3-2 装置	52
4-3-3 提示方法	53
4-4 まとめ	55

## 第5章 結論

5-1 本章の目的	56
5-2 まとめ	56
5-3 考察	56
5-3-1 振動子の特性	56
5-3-2 振動量の算出方法	58
参考文献／付録	61

## ～第1章～

### 序論

#### 1-1 本論文の構成

本論文は以下のような構成となっている。

**第1章「序論」**においては、画像との対話における皮膚感覚の重要性、従来方式の問題点を述べるとともに、皮膚感覚の心理物理的現象であるPhSについて過去の研究例についてまとめ、本研究の目的を述べる。**第2章「手掌部におけるPhSと3次元画像との対話への応用」**においては、手掌部におけるPhS現象の基礎的生起条件を測定し、3次元画像の奥行き情報提示に利用した応用について述べる。**第3章「足裏における2次元ファントムセンセーション」**では、PhS現象を足裏へ応用するとともに、刺激提示を両足の4点に拡張した2次元PhSを提案し、その基礎特性と、方向提示に有効な提示方法を述べる。**第4章「応用」**においては、足裏の2次元PhSを用いて、違和感が少なく直接的に画像と双方向対話が可能なヒューマンインターフェイスデバイスを開発した結果について述べる。**第5章「結論」**においては、足裏における2次元PhSの有効性と、その提示方法についての結論を述べる。

## 1-2 研究の背景

### 1-2-1 画像との対話における皮膚感覚の重要性

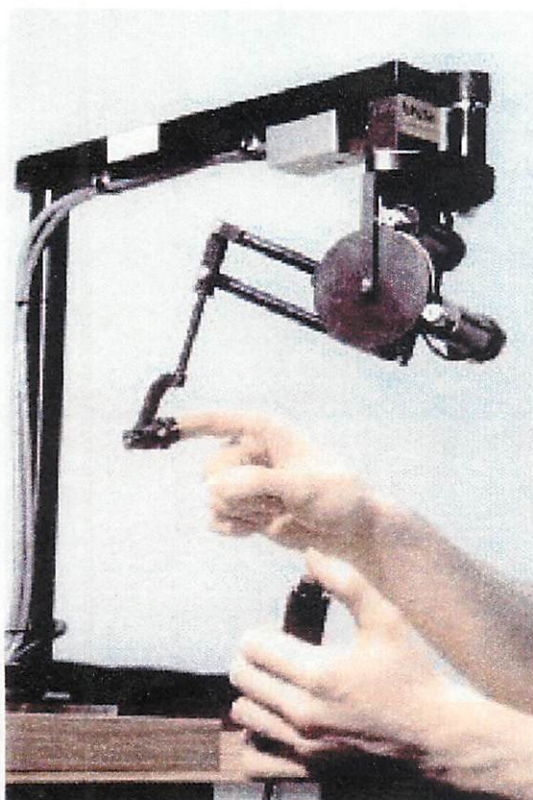
近年、ディスプレイや画像生成技術の進歩発展により、画像ディスプレイは2次元から3次元となり、ユーザに対して多くの情報を提示できるようになった。しかしながら多くの3次元ディスプレイはその立体提示に両眼視差を利用しているため、実体を見る事と比較して、その知覚が異なる事を原因とする違和感等の問題点も指摘されている[1]。

また、ディスプレイ装置に求められる機能も、従来の画像情報提示といった面だけでなく、インタラクティブ、すなわち双方向対話性といった機能を要求されている。ヴァーチャルリアリティ（VR）において、3次元空間における仮想環境との双方向対話が重要であるが、その現実感の向上を考えると、3次元画像の画質向上と並行し、視覚以外の現実感提示を考慮するのが現在の一般的な研究の動向となっている。

視覚以外の現実感提示の1つとして、ハプティクス[2]、すなわち触覚や力覚といった皮膚感覚情報が重要視されている。ハプティクスは、実際の生活においても、物体に接触する上で重要な感覚であるため、仮想環境で物体と対話する上では非常に重要な情報といえる。また、聴覚のような他の感覚受容器による補完も考えられるが、物体を触ったときの現実感ハ触覚に直接提示する方が、現実感が高いといえる。

## 1-2-2 皮膚感覚情報の提示方法

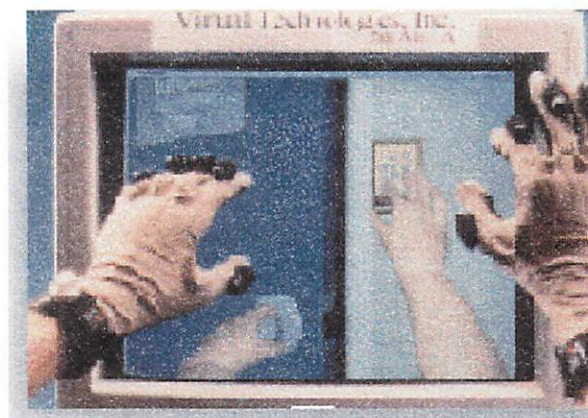
これまでのVR分野における皮膚感覚への情報提示は大きく分けて2



【Fig.1-1:PHANTOM】

種類に分類することが出来る。ひとつは実際の力学量を身体そのものに提示する方法、これは「PHANTOM」[3]や佐藤らの「SPIDAR」[4]に代表される方法で、ダイナミックな現実感を生成することが出来る反面、システムと人体が機械的機構によって接続されているため拘束度と装着違和感が高く、逆に動作の自由度を失う可能性もある。対してもう一つの方法は、疑似触覚として提示情報を別の表現として提示する方法である。

これは「Cyber Touch」[5]に代表される方法で、接触情報を振動刺激として提示して、3次元仮想空間における奥行き知覚を補完する事が可能である。またこの方式においても、装着違和感や疑似表現の不自然さは問題となるが、一般的に拘束度は低い傾向がある。



【Fig.1-2:Cyber Touch】

しかし「Cyber Touch」は、その振動刺激提示方式に関しては皮膚感覚



の特性を十分には考慮していない。

### 1-2-3 皮膚感覚を利用した情報伝達

皮膚感覚を利用した情報提示として代表的な過去の研究分野は「感覚代行」である。視覚障害や上肢障害といった障害に対して感覚代行器を用いることにより、その感覚を擬似的に補完し、正常な生活を営めることを目的としている[6]。この分野の研究は目的が異なるが、VRのヒューマンインターフェイス分野の研究に非常に近い。

皮膚感覚を積極的に利用した過去の研究例として、電気刺激による情報提示が代表として挙げられる。皮膚電極を用い、その刺激強度や刺激パルスの繰り返し周波数などのパラメータを利用して情報の符号化を行った場合、その1チャンネル当たりの情報伝達速度は2～5 bit/s程度であると言われている[7]。このように単一箇所で行う場合、提示できる情報量の限界が存在するため、提示箇所を複数に増やし、それらの位置に対応した空間的な情報を利用することも試みられている。理論的には刺激提示部位を多数箇所に増やせば提示情報量も増加するが、皮膚刺激の特性から、2点最小弁別閾や、空間として知覚できる面積の限界、各点の近く強度の違いといった問題が存在するため最適な提示数と場所を選択しなければならない。しかしながら電気刺激法では電極を皮膚面へ装着することや、皮膚インピーダンスの変化が大きく安定した刺激知覚が得られない等の問題点があり、実際には情報伝達にはほとんど使用されていない。振動刺激利用の過去の例としては、視覚障害者のための感覚代行機器であるオプタコンやTVSS、ウォータージェットなどが存在する。

## 1-2-4 ファントムセンセーション

前節のように多数の電極を配置する場合や「Cyber Touch」のように各指の先端に振動子を配置する方式には大きな違和感が存在する上、皮膚刺激の特性から正確な情報提示を行う為には多くの問題が存在する。

Békésyによると近傍の2点に刺激を提示すると、中間部分に2つの刺激が融合した感覚が知覚される。また2刺激に時間差や強度差を与えると融合知覚位置が偏位する。これはファントムセンセーション現象(Phantom Sensation Phenomenon, PhS)と呼ばれている[8]。これを利用すると、刺激子と刺激子の間に融合像(PhS像)を提示できるため、少ない刺激子の数でより多くの情報を提示する事が可能となる[9]。この刺激情報提示は静的で「静的PhS」と本論文では定義する[10]。静的PhSの定位は空間的にかなり広がって知覚されるため容易でないが、提示する刺激強度を時間的に変化させることにより、動的な量を知覚する事を可能となる。これを「動的PhS」と定義する。VRや感覚代行における情報提示に利用する上で必要な情報は、指の曲げ角度や把持力といった時間変化を伴う連続量であるため動的PhSの応用性は高い。

また過去の電気刺激による感覚代行の研究においては、刺激子を3つの電極とした3点動的PhS現象を電気刺激において行っているが、皮膚電気刺激による情報提示においては伝達できる情報量が少ない、伝達すべき信号の速い変化に対する追随性が悪いといった報告がなされている[7]。また前述のような電気刺激法固有の問題点はVRのヒューマンインターフェイスとして大きな欠点となるため、本研究では機械的な振動刺激を用いることとした。

## 1-3 本研究の目的

人間の皮膚感覚における心理物理学的現象であるファントムセンセーションを応用し、複雑な情報を提示するための伝達方法の確立、その基礎特性を明らかにすることを目的とした。

さらに本研究ではファントムセンセーションを用いて擬似的に皮膚感覚情報の提示を試み、応用として、3次元画像やVRとの高度な情報対話方法を考え、違和感が少なく、高度な情報提示の行える双方向対話インターフェイスの開発を行うことを目的とした。

## ～第2章～

# 手掌部におけるPhSと 3次元画像との対話への応用

## 2-1 はじめに

### 2-1-1 背景

本章では皮膚感覚のファントムセンセーション (PhS) を疑似的な力覚として利用する3次元画像システムのインターフェイス装置の実現を目的として、基本となる振動刺激に対する手指の皮膚感覚の受容特性、PhSの生起条件を求め、疑似的に力覚を提示する条件を検討した結果について述べる。また手で把持して使用し疑似力覚を与える、機械的リンクの無い、小型の3次元画像対話システム用デバイスの試作を行った結果についても述べる。

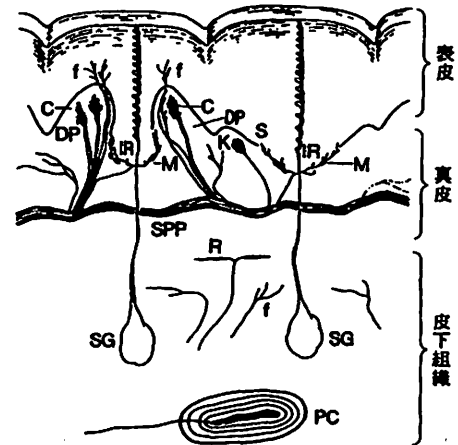
### 2-1-2 目的

手掌部のファントムセンセーションの基礎的生起条件を測定し、手掌部に疑似力覚情報を提示する。また手で把持して使う「仮想工具」によって把持している手にPhSを応用した疑似力覚を与え、3次元画像との対話へ利用する。

## 2-2 理論

### 2-2-1 皮膚の構造

皮膚の構造は【Fig.2-2-1】のように構成され、触覚に関係する受容器は、外力すなわち、機械的な刺激によって興奮するので、機械的受容器 (mechanoreceptor) とも呼ばれる。皮膚機械受容器には表皮の最深部に存在するメルケル細胞 (Merkel cell)、真皮の最下層にあるマイスナー小体 (Meissner corpuscle)、深層にあるパチニ小体 (Pacini corpuscle)、ルフイニ終末 (Ruffini ending) などがある。これらを応答の順応の速度につい



皮膚の構造 (断面) と受容器 (Miller, Ralston, & Kasahara, 1958 を改変)

C: マイスナー小体, DP: 真皮乳頭, I: 自由神経終末, K: クラウゼ終末, M: メルケル盤, R: ルフイニ終末, SG: 汗腺, IR: 汗腺の導管, SPP: 乳頭下神経叢, PC: パチニ小体

【Fig.2-2-1: 皮膚の構造】

て分類すると、約半数(44%)は遅順応型(Slowly Adapting: SA型)、すなわち応答が、刺激の間ほぼ持続するタイプである。残り(56%)は速順応型(Rapidly Adapting: RA型)で、刺激の始めと終わりにのみ応答するタイプであることが生理学的に知られている。どのユニットについても、機械的刺激の有効な皮膚の範囲は比較的限局されている。皮膚の上でこの有効な範囲を受容野と呼ぶ。上述した2つのタイプの受容野は、その受容野の大きさによりそれぞれI型とII型に分けられる。すなわちI型(SA-I, RA-I)は、受容野がごく小さく、その境界が比較的鮮明であるのに対し、II型(SA-II, RA-II)は、受容野が広く、境界不鮮明である。RA-I, SA-I, RA-II, SA-IIの各ユニットは、先述の4つの受容器、すな

【修士学位論文】皮膚感覚のファントムセンセーションと画像との対話への応用 [9662005] Akihiko Shirai  
わちマイスナー小体、メルケル細胞、パチニ小体、ルフィニ終末であると推定されている。

## 2-2-2 ファントムセンセーション

ファントムセンセーション(Phantom Sensation,以下PhS)とは2つの刺激間の距離や強度がある一定の条件を満たすと、2点の刺激として感じることなくその中間のある位置に融合したひとつの刺激として感じることを言う[11]。この現象は機械振動刺激と電気刺激において同様に確認され、感覚代行分野において多くの研究がなされている。

このPhS現象を本論文では以下のように定義している。複数の振動刺激子を用い、振動強度は時間的に変化させないでPhS像を一定の位置に定位知覚させる事を「静的PhS」、刺激提示を時間的に変化させその知覚位置の移動や状態の変化を知覚させる事を「動的PhS」と称することにする。

## 2-2-3 振動刺激子

手掌部で握って使える仮想工具に応用することを目的とした。操作者は小型の筒型グリップ状の振動刺激装置を把持することを前提とし、手に生じる疑似力覚をPhSによって表現する。そのための条件として、人間の動作の妨げにならないこと、常に刺激素子に触れていること、PCから皮膚への刺激量、すなわち振動量を自由に制御すること等が必要となった。

そのためにまず、振動子の電圧に対する振動振幅を測定した。次にその振動刺激を用いて手掌面の各部位に与えたときの振動刺激に対する知覚閾値を測定する。この知覚閾値が低ければ低いほど、振動刺激に対し

【修士学位論文】皮膚感覚のファントムセンセーションと画像との対話への応用 [9662005] Akihiko Shirai  
て敏感な部位と言える。前章のとおり、振動刺激に対する皮膚感覚の受容特性は心理物理学、生理学的に測定されており、その最適頻度はRA-IIユニットの220Hz付近であると言われている[12]。この周波数付近の振動刺激であれば、1  $\mu$ m程度のごくわずかな皮膚の変形で十分知覚できる。しかしながら、十分な強度の220Hzの振動刺激を機械的に生成し、かつその強度を制御する事は難しく、提示部位の選定も一般的には難しい。その為、本研究では100Hzよりも低い周波数に感度を有するRA-Iユニットに着目した。この感覚受容器は、40Hzという粗振動に感受性の極大を持っているため、制御系を設計しやすい。今回の実験では観賞魚用のエアーポンプ（ニッソー  $\alpha$ 600）に用いられている電磁振動子を使用した。この振動子の共振周波数は家庭用電源の交流周波数に設計されているため50-60Hzとなっている。このため、RA-Iユニットに対し十分な刺激強度を与えることが出来る。

この振動子を用いて、PhS生起のために2つの刺激子から皮膚へ振動を提示するが、本来ならば感覚受容器(RA-Iユニット)を刺激する物理量を明らかにし、それに対応する受容器の興奮状態を計測しなければならないが、皮膚と振動子の接触状態や皮膚の表面の振動伝達特性、刺激子の形状、個人差などの要因で、刺激物理量を正確に測定することは難しい。このため、本研究では無負荷時の振動針の振幅を便宜的に振動強度として用いている。

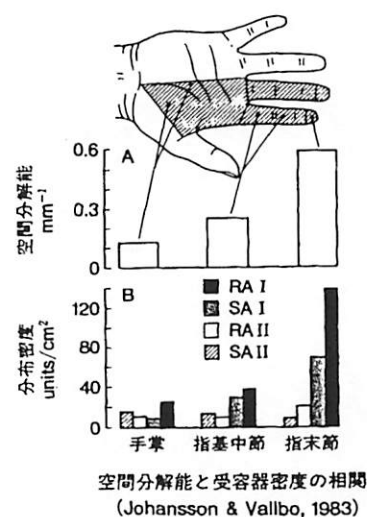
#### 2-2-4 振動知覚閾

手掌部に振動を提示して情報を伝達するため、手掌部の各点における振動刺激に対する知覚閾を求める。ある部位に関して、提示する物理的振動量に対し振動知覚閾値が低い場合、提示した刺激に対してのダイナ

【修士学位論文】 皮膚感覚のファントムセンセーションと画像との対話への応用 [9662005] Akihiko Shirai  
ミックレンジが広く、情報提示に有利な部位であるといえる。

実験的には振動強度をパラメータとし、知覚できる最小値を調整法によって測定していくが、この種の測定方法は知覚心理の実験では一般的である。ただし、この測定によって得られるのは皮膚上の1点における振動知覚閾である。2点の融合知覚であるPhS現象は受容器レベルで生起する現象ではないため、この測定は直接PhS現象生起の条件測定とはならないといえるだろう。

過去の研究報告によると、振動刺激の感覚受容器の密度は手掌部上において【Fig.2-2-2】のような分布をしていることがわかっている[13]。また同図より知覚の空間分解能が感覚受容器の密度と対応する関係にあり、指先の方が空間分解能は良いことも読み取ることが出来る。



【Fig.2-2-2:空間分解能と受容器の密度】

## 2-2-5 静的PhS

前節によって得られた結果を元に、手掌上で振動知覚閾が同等である2点を用いて、PhS現象の基本的な条件である静的PhSを生起させる。

$$I_1 = I_0 + \Delta I \quad I_2 = I_0 - \Delta I \quad (\text{式2-1})$$

(式2-1)において、(I<sub>1</sub>, I<sub>2</sub>)は2点の振動提示位置における提示振動強度である。I<sub>0</sub>は基本振動と呼ぶオフセットで、通常は最大振動強度の50%の値をとる。システム上では255(Level)、電圧換算で60(V)が最高なの



【修士学位論文】 皮膚感覚のファントムセンセーションと画像との対話への応用 [9662005] Akihiko Shirai  
で、127(Level)、電圧換算で30(V)となる。また $\Delta I$ は移動量と呼ぶ値  
で、2つの提示強度の和( $I_1 + I_2$ )が一定になるようになっている。 $\Delta I$   
がゼロのときにちょうどPhS像が2点の中央を指す[8]。この $\Delta I$ を静的  
に(時間的に固定な)変化をさせ提示した場合が静的PhSとなる。

静的PhSはその $\Delta I$ の変化によって知覚位置の変動が行えるとされているが、その定位は像が広く知覚されるため難しいとされている[11]。

## 2-2-6 動的PhS

静的PhSの $\Delta I$ を動的に(時間によって)変化させたものを「動的PhS」と呼ぶ。その状態を(式2-2)に示す。

$$I_1 = I_{01} + f(t) \quad I_2 = I_{02} - f(t) \quad (\text{式2-2})$$

ここで $f(t)$ は時間によって変化する量としている。 $f(t)$ はその出力を矩形波や正弦波形とする場合が多い。いずれにせよ同じ瞬間に正負逆の値がそれぞれの振動子から提示される状態となる。

( $I_{01}, I_{02}$ )は前出の基本振動である( $128 = (I_{01} + I_{02})/2$ )。ただし、静的PhSの場合とは異なり、必ずしもダイナミックレンジの中央をとる必要性はない。実験では左右に基本振動がシフトした提示を与えている。

電気刺激において、時間差を有した複数の刺激を皮膚の異なった点に与えると皮膚感覚の空間分解能が向上することが知られているため[9]振動刺激による動的PhS現象も、静的な提示に比べて特性に変化が現れるかに注目して測定を行う。

## 2-2-7 周波数特性

前節の動的PhSにおける時間的変化  $f(t)$  について、その周波数的観点から人間の知覚の特性を測定する。

$$I_1 = I_0 + \Delta I \cdot \sin(2\pi ft) \quad I_2 = I_0 - \Delta I \cdot \sin(2\pi ft) \quad (\text{式2-3})$$

(式2-3) のように周波数  $f$  と時間変数  $t$  の積を角速度とした周回する正弦波に対し  $\Delta I$  の強度変調を行った値を2つの振動子の移動量とすると、知覚されるPhS像は動的に2点間のある範囲を往復運動するはずである。

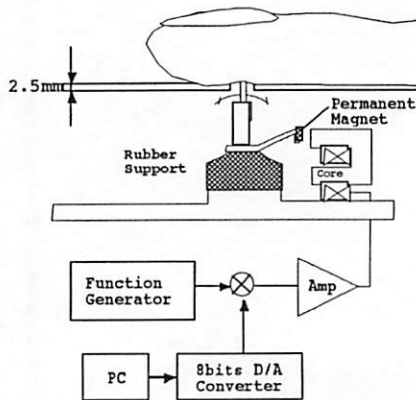
人間の皮膚刺激の特性から、ある周波数以上の速い変化においては、視覚における仮現運動や跳躍運動と似た擬似的な移動知覚をされ、その提示情報を追従できないということが電気刺激におけるPhS現象において報告されているため[7]、融合知覚の生起する周波数特性を測定することが重要といえる。

## 2-3 実験

### 2-3-1 実験装置

【Fig.2-3-1】のような実験装置を制作した。

ファンクションジェネレータからの60Hzの正弦波を、PCにより8ビットD/Aコンバータで256(Level)に強度変調し、コイルの印加電圧を0～60(V)に制御する。



【Fig.2-3-1：電磁振動子による振動刺激提示装置】

電磁石により振動される永久磁石にはゴムによって支持された提示用ピン(直径2.6mm)が取り付けられており、被験者は厚さ2.5mmのプラスチック板の上に軽く指をのせ、その振動を感じる。

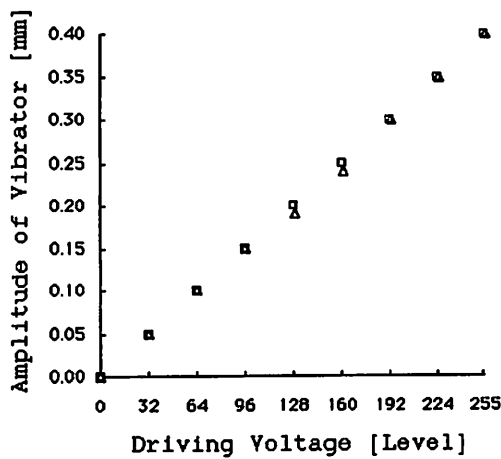
手掌部へPhSを生起させるために、この機構を2チャンネル並列に制作し、実験装置とした。

### 2-3-2 刺激素子の基礎特性

便宜的な刺激強度を振動子の振幅とし、これを制御するために、無負荷時の駆動電圧に対する振動強度(mm)を測定する。本来ならば振動強度(GもしくはNなどの強度)を測定するのが望ましいが、微少なピンに振動計を設置するのは難しく、この様な測定方法を採用した。

2つの振動子を入力電圧で0～60(V)、0～255(Level)まで32(Level)ステップで駆動し、提示部のピンの振幅を拡大鏡とガラスマイクロスケールによって測定した。

### 2-3-3 結果（刺激素子の基礎特性）



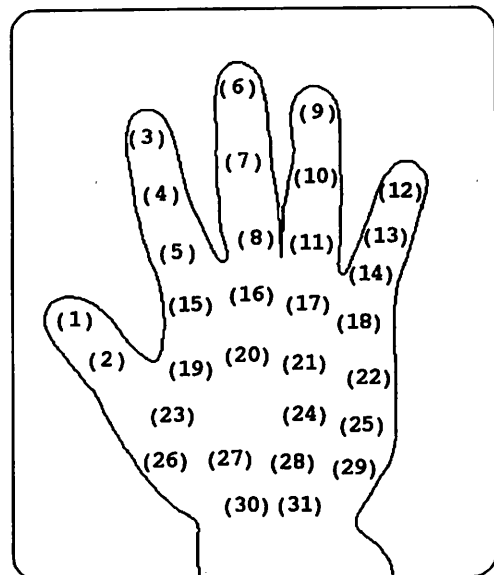
【Fig.2-3-2：振動子の特性】

【Fig.2-3-2】に測定した2つの振動子の無負荷時の、電圧出力(Level)に対する振動振幅を示す。

2つの振動子は個体差も少なく、駆動電圧に対してほぼ比例的な関係にあることが分かる。これにより、刺激強度（振幅）は駆動電圧(level)に対して比例関係にあるといえる。

### 2-3-4 振動知覚閾実験

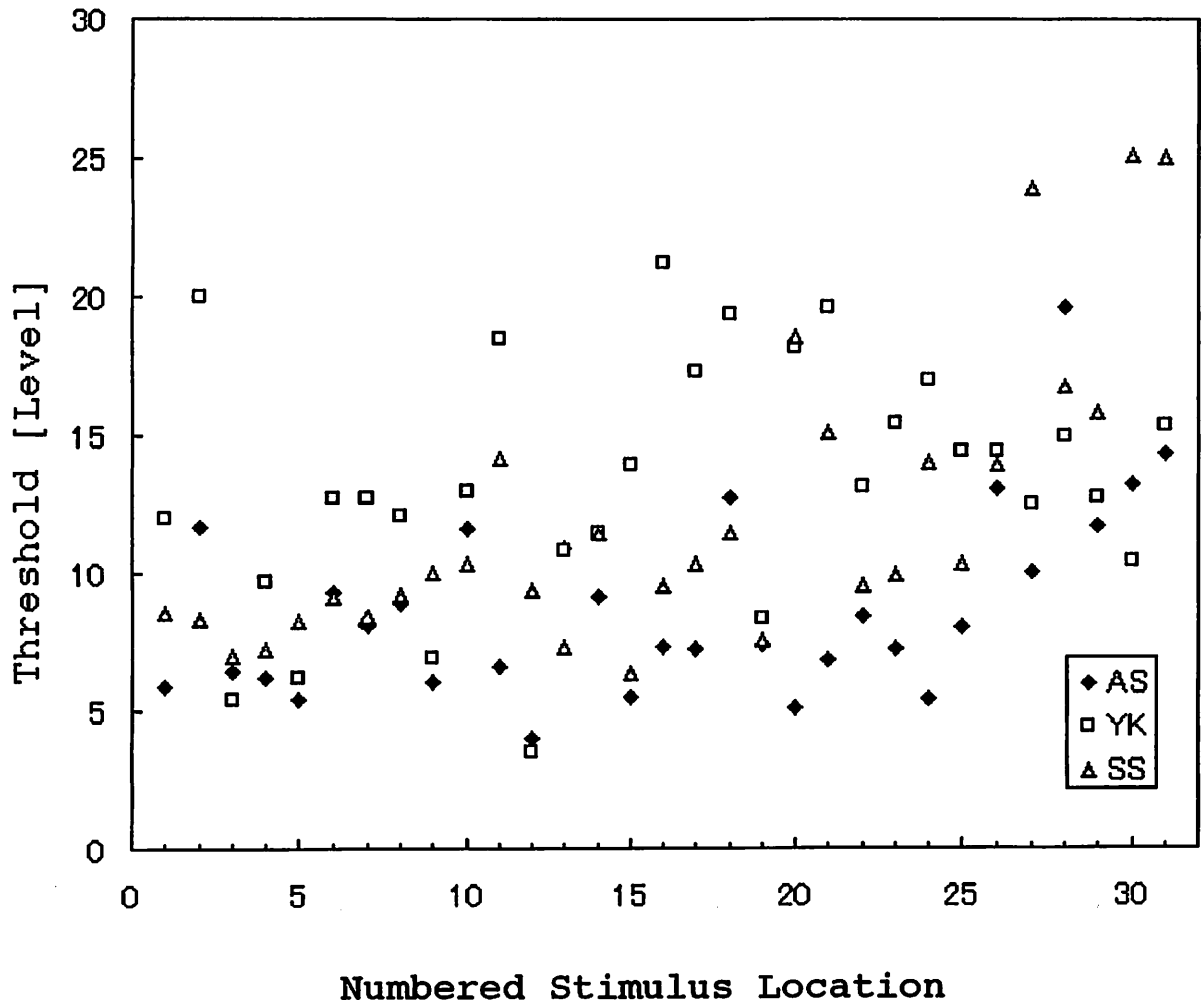
前出の振動刺激提示装置を用いて、手掌部の各点【Fig.2-3-3】における、振動知覚閾を調整法によって求めた。被験者は3名 (AS:23才男性, YK:42才男性, SS:21才女性)、試行回数は各人10回である。1点ずつ提示し、強度を調整し最小知覚値を入力する。



【Fig.2-3-3：手掌部の各点】

## 2-3-5 結果 (振動知覚閾実験)

横軸に【Fig.2-3-3】で定義した各点の番号, 縦軸に調整法によって入力した刺激強度の閾値(Level)を配置した【Fig.2-3-4】。



【Fig.2-3-4 : 手掌部上の知覚閾】

測定した31点全てが出力値 25Level 以下を示している。これは無負荷時の振動振幅に換算すると $50\mu\text{m}$ 以下の振動となる。中でも特に指球部 (点1, 3, 6, 9) の感度が若干高い反面、手掌部 (点26-31など) が高い閾値を持っている。この実験結果は【Fig.2-2-2】の手掌部の振動感覚受容器の密度分布に合致している。

この実験の結果から、制作した振動提示装置は、手掌部上の感度の悪

【修士学位論文】皮膚感覚のファントムセンセーションと画像との対話への応用 [9662005] Akihiko Shirai  
い部位でも最大出力(Level)の9.7%の出力があれば振動が知覚できるため、十分な提示域を持っているといえる。

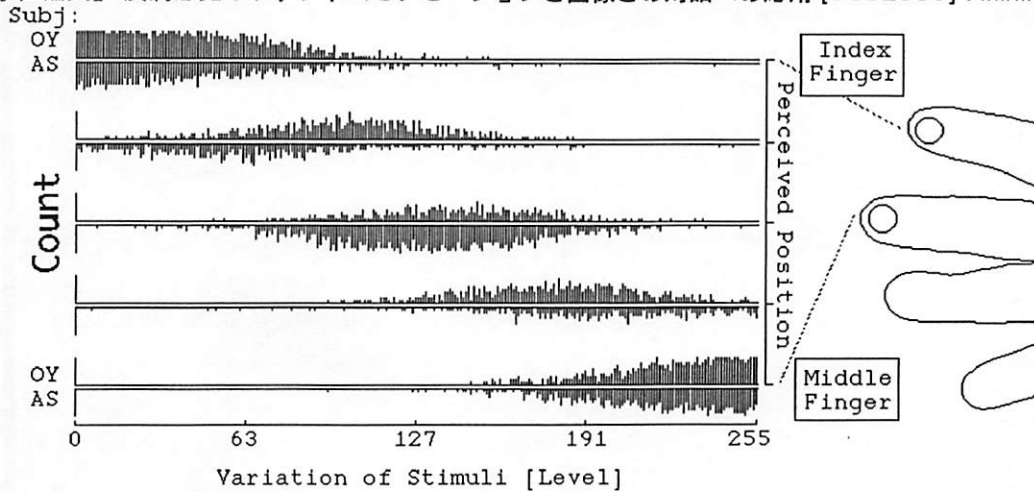
またインターフェイスデバイスとしてPhS現象を能動的にコントロールする上では、その知覚感度の等しい点を選ぶ必要がある。次に述べる「静的PhS現象」において正確に中間位置を知覚させるためにも、この実験結果を積極的に利用すべきである。

### 2-3-6 静的なPhSの知覚特性

(式2-1) で定義した静的PhSを被験者実験により測定するが、この実験では2つの振動子 ( $I_1, I_2$ ) の出力を0~255(Level)の範囲とし、基本振動  $I_0$  を127、移動量  $\Delta I$  を (-127~+127 Level) にランダムに変化させ、常に全体の強度和は一定となるようにした。2刺激は左手の人差し指-中指, 人差し指-小指に提示し、2刺激間を50mm離れた。被験者には刺激される2点と2刺激の間隔を4等分する3点の合計5点のいずれかに最も近くPhSを感じた位置を強制選択法によって回答させた。被験者は3名 (AS:23才男子, OY:21才男子, YK:42才男子) で、試行回数は各人10回である。

### 2-3-7 結果 (静的PhS)

静的PhSを測定した結果を【Fig.2-3-5】に示す。横軸は提示移動量 ( $\Delta I$ ), 縦軸の5段はそれぞれ1~5の各解答入力回数のヒストグラムである。上下に分かれているのは、ここでは被験者間の違いを示している。上向きがOY, 下向きがASの左手の人差し指と中指を使用した場合の結果を比較している。

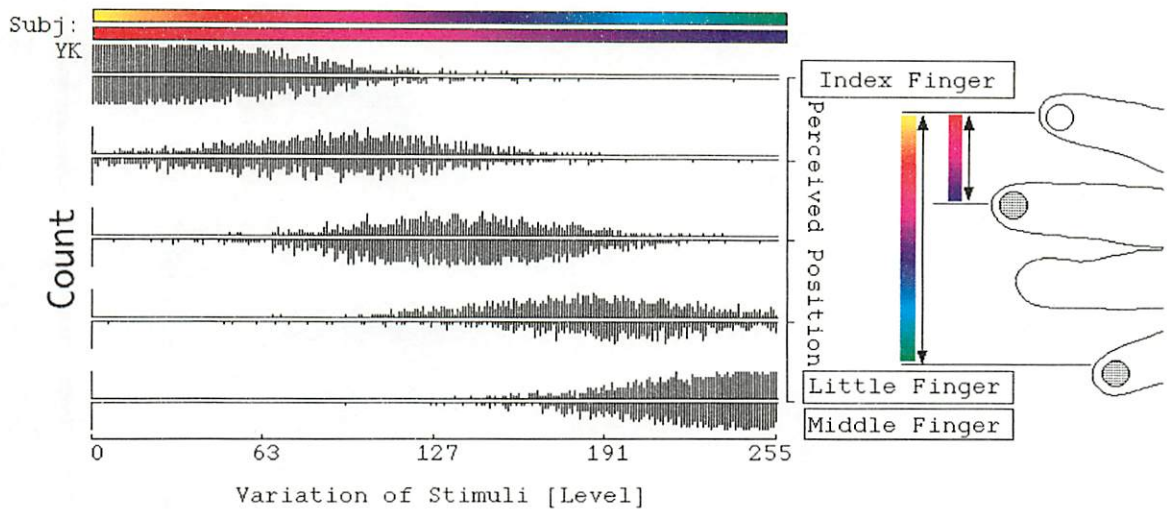


【Fig.2-3-5：被験者間の静的PhS定位】

被験者によって回答傾向の生起が異なっているのは、感覚が広がって知覚されるため、カテゴリー判断基準が被験者間で差が多くなってしまふ為と考えられる。そのため、いずれの被験者も両端である「1,5」の回答数が多い。被験者ASと被験者OYの違いを比べると、定位の判断において「偏位している(1,2,4,5)」と回答する回数が多くなり、逆に中間定位である「3」の回答数が少なくなる傾向の被験者（OY）と、中間定位と知覚する領域が多い代わりに「2,4」の回答頻度が減少する傾向の被験者（AS）が存在する事が判る。

前項の実験から、最低でも25(Level)の振動提示が存在すれば、振動が知覚可能であることや、 $\Delta I = \pm 64$ 以上の近辺の値でも「1,5」と回答していることを考慮すると、2つの振動感覚が比較的融合して知覚されていることが推察できる。逆に前者の融合知覚が拡散している被験者に関しては、振動刺激の2点弁別能の研究からも[14]、手掌部の2点において別々の刺激として知覚されていることがうかがえる。

続いて【Fig.2-3-6】のグラフは同様にして同一被験者に於いて「人差し指-中指」「人差し指-小指」との結果を比較したものである。



【Fig.2-3-6：提示部位間の静的PhS定位】

上向きヒストグラムが「人差し指-小指」を示し、下向きが「人差し指-中指」の回答数を表している。これから、静的PhSは各指の提示部位を変えてもそのカテゴライゼーションは同一被験者ならほぼ同一であることがわかった。

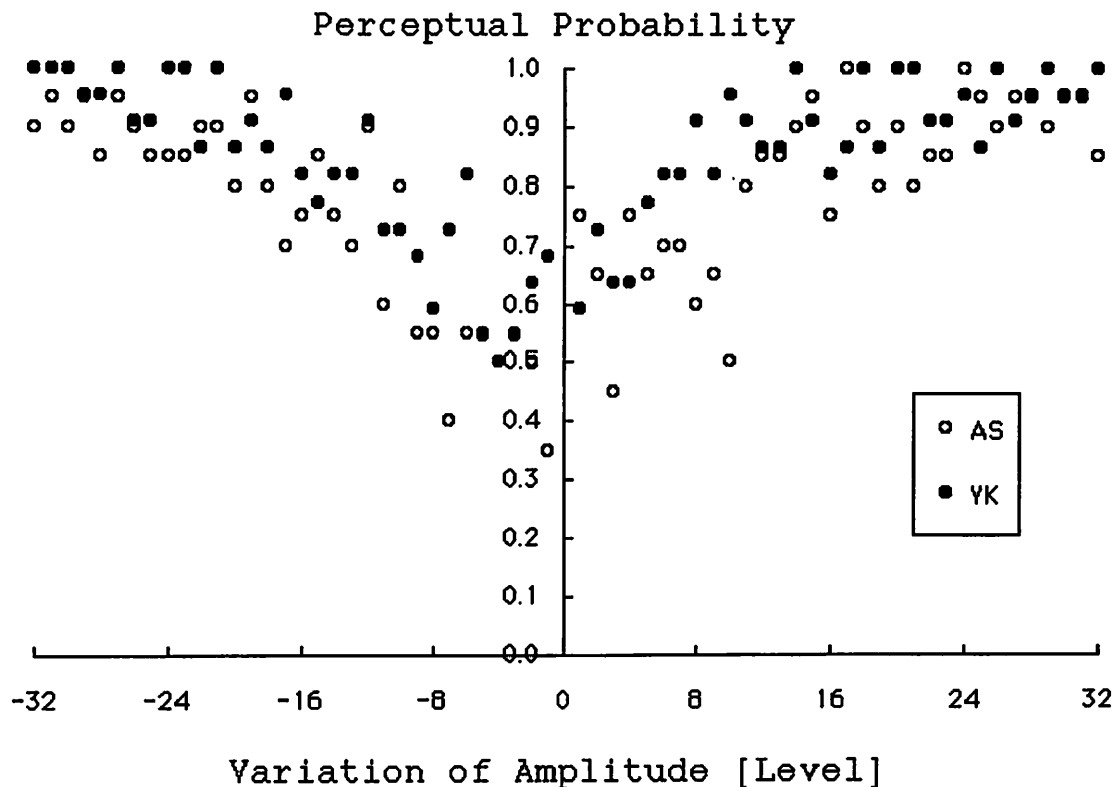
### 2-3-8 動的PhSの知覚特性

(式2-2) で定義した  $f(t)$  をステップ関数的に提示を行う。このステップ関数の高さ  $f(t)$  の高さを  $\Delta I$  とおき、これを  $0 \sim \pm 32(\text{Level})$  までランダムに変化させる。この場合、被験者は基本振動からステップした瞬間、どちらかに移動したPhS像を知覚することになる。

この実験において、基本振動 ( $I_{01}, I_{02}$ ) をそれぞれ(63,191), (128,128), (191,63) というよう3種類設定し、基本振動による移動知覚の正答率の特性を測定した。提示位置は左手で、 $I_1$  を中指、 $I_2$  を人差し指とし、被験者は2名 (AS:23歳, YK:42歳男子) で、試行回数は各  $\Delta I$  ごとに20回以上とした。



【Fig.2-3-7】 は、 $(I_{01}, I_{02})=(128, 128)$ としたときの各 $\Delta I$ を横軸、被験者の回答の正答率を縦軸にとったグラフである。

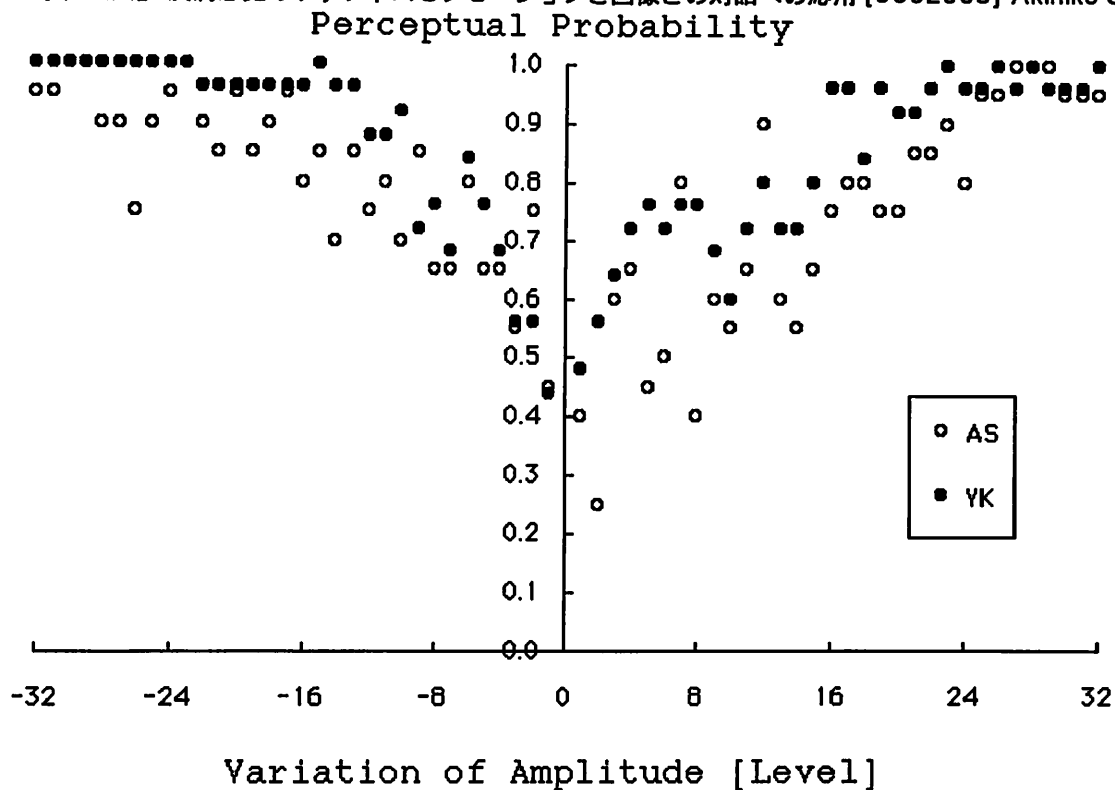


【Fig.2-3-7 : 動的PhS  $(I_{01}, I_{02})=(128, 128)$ 】

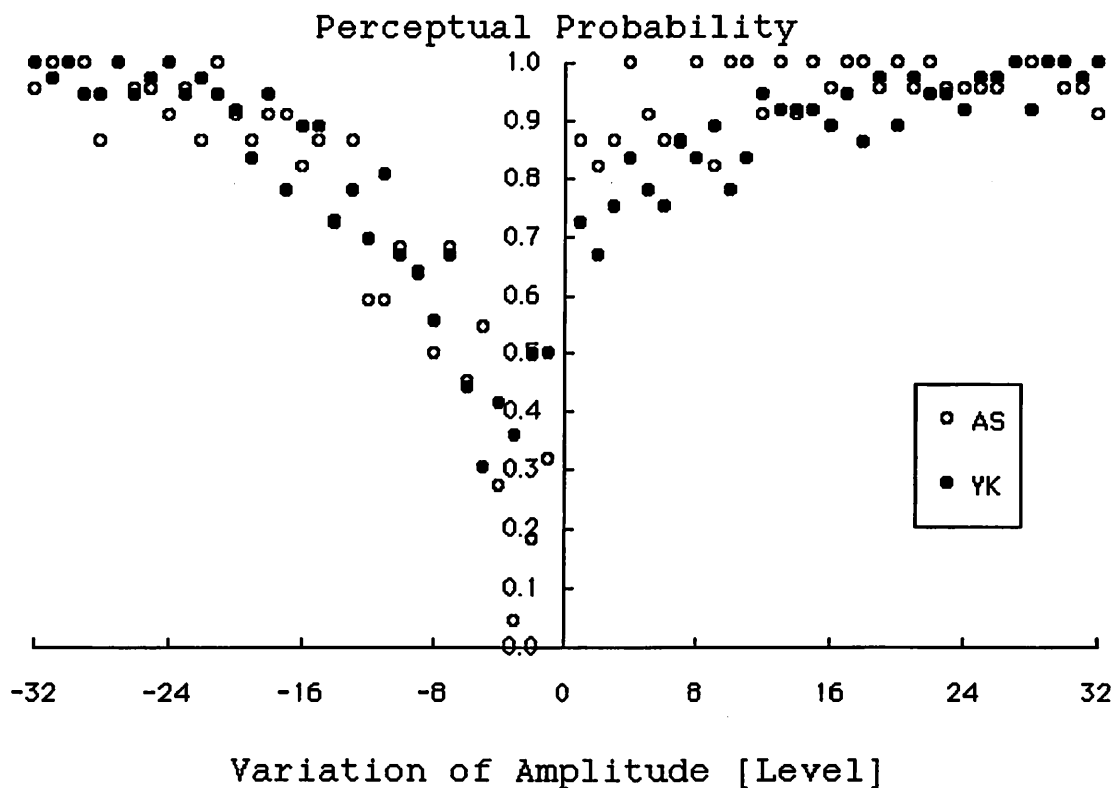
横軸は基本振動から見た $\Delta I$ の相対量を示している。 $I_1$ 方向(中指)が負方向で、 $I_2$ 方向(人指し指)が正方向である。

グラフは被験者によらず左右対称といえる。被験者は左右の移動知覚方向を回答するため、最低の正答率は0.5近辺になる。中央付近、すなわち $\Delta I$ がほとんど変わらない提示では正答率が低い。16(Level)程度(レンジ全体の6.25%程度の移動、 $25\mu\text{m}$ 程度の出力振幅差)の $\Delta I$ を与えると8割以上の正答率を示している。

同様に、【Fig.2-3-8】は $(I_{01}, I_{02})=(191, 63)$ 、【Fig.2-3-9】は $(I_{01}, I_{02})=(63, 191)$ とした場合の同一被験者における結果である。



【Fig.2-3-8 : 動的PhS ( $I_{01}, I_{02}$ )=(191,63)】



【Fig.2-3-9 : 動的PhS ( $I_{01}, I_{02}$ )=(63,191)】

被験者は基本振動があらかじめ右や左に寄った知覚を提示され、ステップ後の方向を回答している。中央に基本振動を加えた場合に比べ、左右対称性が崩れている。傾向として基本振動として与えた初期振動が弱い方向への移動知覚に誤りが多くなっている。逆の方向への知覚確率は比較的向上していることから、刺激提示のダイナミックレンジの問題が関係しているとも考えられる。

以上の結果から、静的PhSの知覚に比べ、動的PhSによる移動方向の知覚は比較的容易であることが読み取れた。静的な提示と比べ、カテゴリー化が、定位と異なり一意的であることが最も大きな原因といえる。また人間の知覚の特性として、動的な刺激の方が静的な刺激に比べ、知覚閾が向上するという一般論にも一致する。

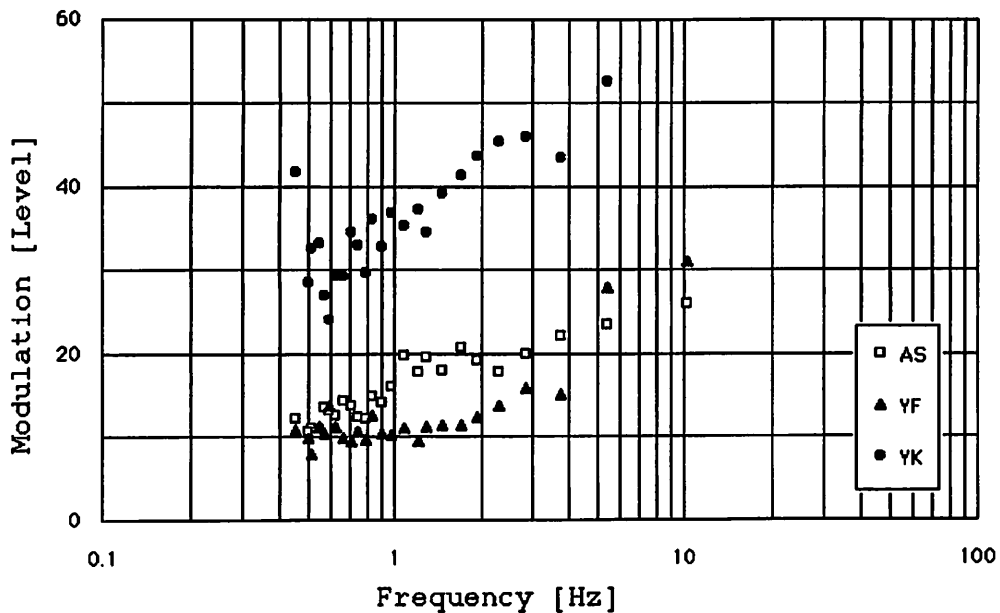
## 2-3-10 動的PhSの知覚周波数特性

前節において、動的なPhSの有効性を結論として得たが、応用を考える上で、その周波数特性について明らかにしなければならない。

実験において被験者は、(式2-3) で定義した変調周波数  $f$  をパラメータとした、ある提示変調周波数において往復運動するPhS像を知覚する。  $\Delta I$  を徐々に増加させ、知覚した最小の  $\Delta I$  を記録した。被験者は3名 (AS:23歳, YF:20歳, YK:42歳男子) とし、  $I_0=128$  とした。

## 2-3-11 結果 (知覚周波数特性)

【Fig.2-3-10】は横軸を提示した変調周波数  $f$ ，縦軸を最小知覚閾として入力した値 (Level) とした結果である。



【Fig.2-3-10：周波数特性】

3名の被験者で2種類の傾向を示しているが、いずれも刺激の変調周波数に対して1 Hz以下において最も低い閾値を示し、同様な傾向といえる。また2 Hz近辺から徐々に知覚閾が上昇し、高周波数域ではPhS像は融合せず、ポコポコとした仮現運動に近い感覚が生起していると被験者から報告された。

各被験者間の知覚閾の違いは、被験者間のカテゴリサイズの相異であるといえる。また知覚閾の高い被験者においても40Level (ダイナミックレンジの16%、62  $\mu$ m程度の振幅)以下の出力であれば知覚できていることから、VRへの応用で、その提示速度を考慮する上で重要な特性といえる。

## 2-4 3次元画像との対話への応用

### 2-4-1 PhSの基礎特性

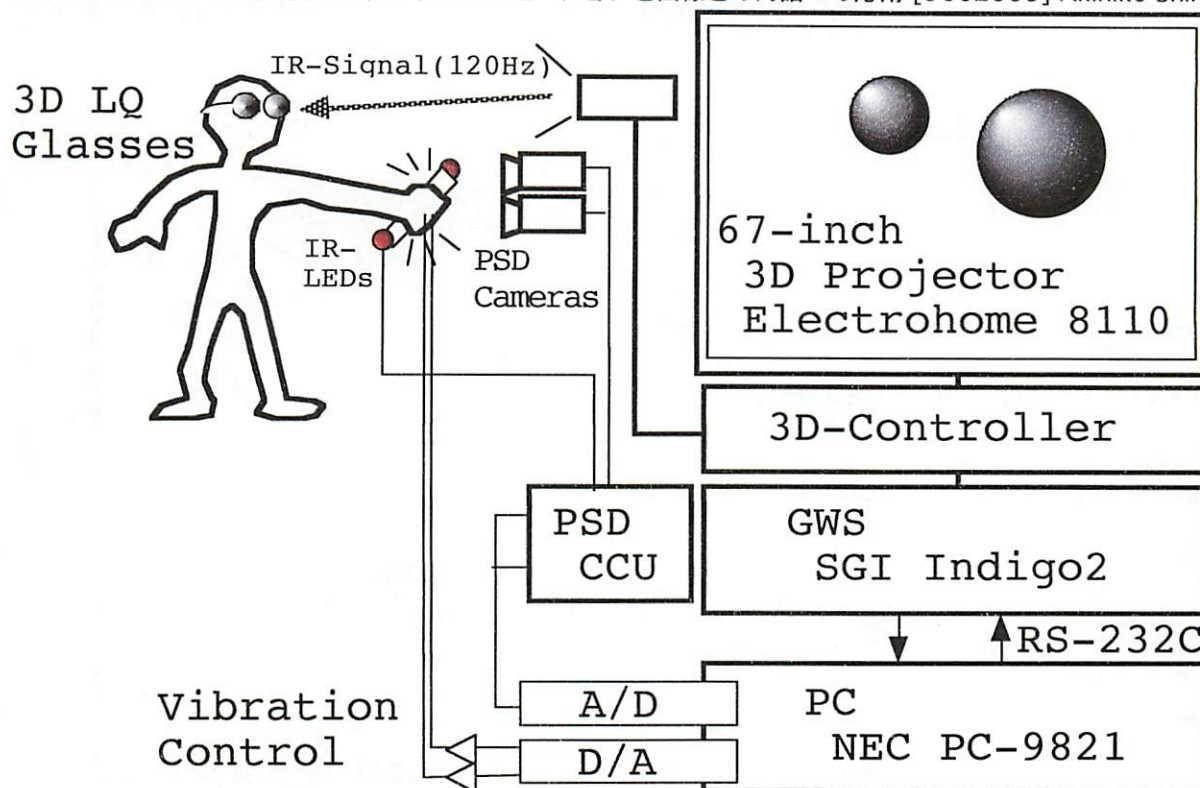
実験の結果から、3次元画像との対話にPhSを応用する上で考慮すべき基礎特性をまとめると、静的PhSはその提示位置が拡散して知覚される上、各被験者ごとにカテゴリズが異なることから、座標等の情報に応用する事は難しいといえる。また同一被験者間の傾向は似ている事は利用できるであろう。

対して動的PhSは、その移動方向の知覚が容易であることから、移動する仮想物体や、ユーザの動的情報に関連したフィードバックなどに利用するのが有効であるといえるだろう。

またその移動速度は周波数特性から、1 Hz以下という結果を得た。これは前出のPHANToMを利用して、仮想物体を提示する場合に必要な空間レンダリング速度に1 KHzという高速度を必要とすることを考えると、通常人間が手腕を動かす場合の速度は数ヘルツ以下の速度なので、人間の動作に対応する疑似触覚としては簡易に提示が行えると言える。

### 2-4-2 奥行き知覚の補助への応用

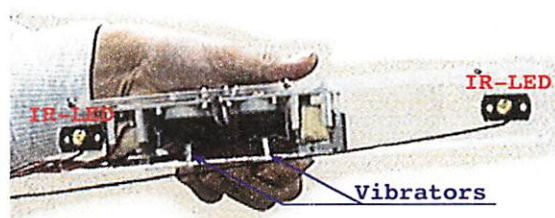
3次元ディスプレイには、その提示像の奥行きと知覚上のずれが存在するため現実感の低下や疲れなどの原因となっている[1]。人間の動作位置に対応した動的PhSを3次元入力インターフェイス装置を通して3次元ディスプレイ提示することにより、相互対話的に作業性を向上することが出来ればVR等の分野で有用である。そこで【Fig.2-4-1】に示すようなシステムを考案し、実験システムを構築した。



【Fig.2-4-1 : 装置の概念】

ユーザは近赤外線LEDと振動提示装置が取り付けられた仮想工具を把持し、3次元ディスプレイ用の液晶グラスを装着する。2点のLEDから発する近赤外線光は2台のPSDカメラによって検出されステレオカメラの手法によってその3次元位置を算出する[15]。

算出された2点の3次元座標から、GWSはVR空間上の3次元仮想物体との距離に対応した振動量を手掌部の仮想工具に提示する。手掌部の仮想工具は【2-3 : 実験】に用いたものと同等のものである【Fig.2-4-2】。



【Fig.2-4-2 : 仮想工具】

この場合のPhS提示は手掌部上の2点と仮想物体との3次元距離に対応しているため、手腕を動かせば動的PhSを提示、静止させれば静的

【修士学位論文】皮膚感覚のファントムセンセーションと画像との対話への応用 [9662005] Akihiko Shirai  
PhSの提示を行っていることになる。また基本振動となる出力は検出した2点が仮想物体に近ければ近いほど強く出力されるためもう一つの情報提示として利用している。

また同研究室の別グループが同様の実験システムにおいて3次元空間における作業性の向上について詳細な測定を行った。「ディスプレイの2次元表示・3次元表示」、「PhSの提示の有無」をパラメータにしたところ、結果として目標点の誘導にPhSを利用した場合の作業時間に減少傾向が見られた[16]。この実験では手掌部への振動提示に電磁振動子ではなく偏芯モータを利用しているが、3次元画像との対話に対して、補足的な情報提示に利用することが有効であるとの結果を得た。

### 2-4-3 考察

以上のようにPhSを3次元画像との対話に応用する一例を示すため、PhSの算出モデルは仮想物体と手掌部の距離関係をそのまま反映した。

しかしながら、PhSを最大に応用することを考えれば単なる距離情報の提示だけでなく、傾きやモーメント、堅さなどの様々な力学情報を疑似触覚として提示することが可能であろう。ただし、2点の距離情報という単純に算出できる量を提示振動に変換しただけでも、3次元画像との対話性の向上が認められるため、今後の応用の可能性が期待できる。

## 2-5 本章のまとめ

まず、電磁振動子を用いた振動刺激提示装置を制作し、そのデバイスによる手掌部上の各点における刺激に対する知覚閾を測定した。

その情報を元に静的なPhS現象を利用した融合知覚像の定位実験を行い、被験者間の相異、同被験者間の「人差し指—中指，小指」といった提示部位の違いによる基礎特性を明らかにした。

続いて動的PhS現象の移動知覚を提示しその移動方向提示の基礎特性を明らかにした。これにより、ダイナミックレンジの6%程度の変化で移動方向の知覚が可能であることが判った。

また、動的PhS現象の周波数特性の基礎的条件を実験により測定したところ、被験者間によって知覚振動閾に差はあるものの、いずれの被験者も1Hz以下のゆっくりとした移動であれば十分に知覚できることが判った。

以上の結果から、これらをVRへ応用する上で基礎的な実験システムを開発した。手掌部で握って使う仮想工具上の2点の3次元位置をPSDによりリアルタイムに検出し、仮想物体との3次元距離を振動量に変換する方法により、3次元画像との対話においてPhS提示が有効であることが、関連グループの実験により明らかとなった。

<第2章終わり>



## ～第3章～

### 足裏における

## 2次元ファントムセンセーション

### 3-1 はじめに

#### 3-1-1 目的

前章の結果から、3次元画像との対話には、その視覚的情報に加え、力覚・触覚等の他の感覚受容器への情報提示を利用することが有効という結論を得た。

本章では、前章の手掌部への2点の電磁振動子による「1次元PhS」を、足裏へ提示部位を変更すると同時に、4個の偏心モータによる、「2次元PhS」へ拡張し、その振動提示方法の確立と、足裏への擬似的な方向感覚と回転の提示を行い、足裏2次元PhS現象の基礎特性を明らかにする事を目的とする。

### 3-2 理論

#### 3-2-1 仮想工具の改良すべき点と足デバイス

前章で手掌部で把持して使うインターフェイスデバイスを想定し、PSDによる実時間3次元検出、2点の電磁振動子によるPhS提示を利用した「仮想工具」を開発したが、いくつかの改良すべき問題点が存在する。

【修士学位論文】皮膚感覚のファントムセンセーションと画像との対話への応用 [9662005] Akihiko Shirai  
電磁振動子による振動提示は、その振動周波数(60Hz)をファンクション・ジェネレータにより保ち、PCからの信号により振動子の電圧、すなわち振動子の振動振幅を制御することが可能で、PhS現象の基礎特性を測定する上で理想的な実験装置であった。

しかし、電磁振動子によるその実験装置の振動は小さく、手掌部の握力によりその振動が抑制され、安定な刺激-知覚関係を得ることが難しかった。応用に利用するためには、より強力な振動出力により安定な刺激出力を得ることが望ましいといえる。

もう一つの改良すべき点は、PhS提示部位である。仮想工具では手指の先の指球部に電磁振動子を用いて物体との距離や傾きを提示しているが、仮想工具をVRシステムが検出するための2点のPSD指標がLEDであるため、その「隠れ」を考慮して利用しなければならない[15]。本研究のCAD的応用例[16]では、インターフェイス部をハンドガンタイプにし、その上部に設置する事で、2点のPSD指標の光学的隠れを最小限に抑えたが、手で把持するデバイスはその動作自由度が大きいため、2点のPSD指標を同時にPSDのダイナミックな動作範囲で検出する設計を実現するのは難しい。

またVRとのインターフェイスデバイスとして、過去に研究されている例の多くは、実空間に実際の運動状態を再現する手腕拘束型デバイス[2]-[5]である。いずれもマニピュレータ的な仮想物体の操作を想定したものであり、VR空間でのユーザの大きな移動を考えたデバイスは少ない。通常、VR空間でのユーザの移動はマウスなどのインターフェイスを利用したり、データグローブによる指示を与えるなど、擬似的な入力方法を採用していた。

しかし実空間において、一般的に人間は移動に足を使用する。その

【修士学位論文】皮膚感覚のファントムセンセーションと画像との対話への応用 [9662Q05] Akihiko Shirai  
為、足を利用したデバイスはVR空間の移動に適しているといえる上、靴などのインターフェイスは違和感も少ない。また足を使った移動感覚そのものには大きな現実感がある。この様な理由から、これまでの研究成果を足に適用することを考えた。

### 3-2-2 新しい振動子の選択

皮膚上に振動刺激を発生させる素子は電磁振動子以外にも、 piezo素子や、ウォータージェットなどいくつか存在するが、ここでは振動量を電氣的に制御できる偏芯モータを採用することを考えた。これは携帯電話やページャーに使用されているもので、小型軽量で高出力の製品が安価で入手できるため、試作デバイスを製作する上で都合がよい。

しかし、偏芯モータは内部のモータに取り付けられた偏芯錘が回転することによって振動を生成する。このため、最小起動電圧や、振動周波数、複数の振動子を利用した場合の共振現象といった物理特性的問題が存在する。また過去に偏芯モータをPhSに利用した研究例が存在していない事が問題点としてあげられた。

ここで本研究室の別グループは手掌部のPhSに偏芯振動モータを利用することにより、その基礎特性を調べた[18]。これによると最小起動電圧以上のリニアな振動-電圧特性を利用すれば、その振動周波数域は十分に感覚受容器を興奮させ、電磁振動子と同様にPhS現象を生起させることが可能との結果を得た。また、振動出力自体が電磁振動子に比べ強いため「仮想工具」としての応用の可能性も充分で、3次元画像との対話にPhSが有効であるとの結果も得た[16]。

これらの結果より、新しい振動子として偏芯モータを使用する方針とし、その基礎特性を測定することとした。

### 3-2-3 足裏(あしうら)のPhS

PhSについては前章で述べたが、この心理物理現象は手掌部に限定されたものではない[8]。また右手と左手間や右足と左足間といった距離の離れたPhS生起に関しても報告が存在する[11]。これらの要素を利用し、振動子を足に配置し、PhS像を両足間に提示することを考えた。

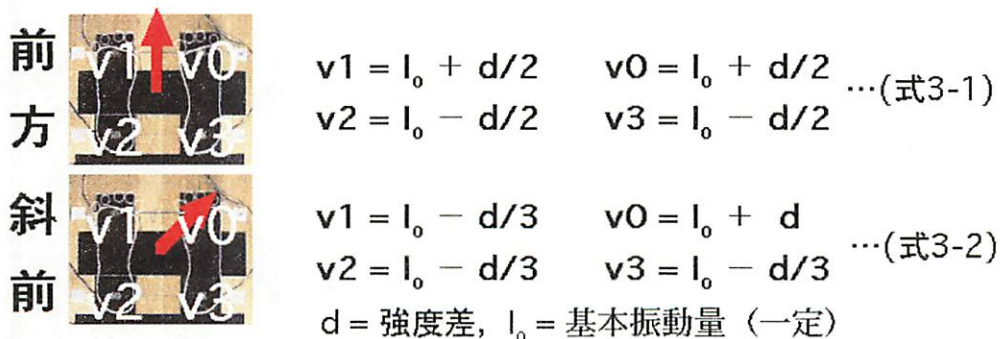
提示部位として左右足の爪先・かかとの4点に振動子を設置した「振動刺激提示板」を製作し、手掌部と同様な手法を用いて、静的・動的なPhSを提示し「両足間PhS現象」の生起を確認する。

### 3-2-4 足裏の2次元PhSによる方向提示

ファントムセンセーションを生起させる刺激子は2個と限定されているわけではなく、谷江らの研究によると胸部の3点の電気刺激による2次元PhSの知覚が報告されている[17]。

この多数点のPhS現象を応用することにより、従来の2点PhSによる1次元的情報から、座標や方向等の2次元的情報を提示することが可能になれば、画像との対話に利用する上で応用性が高い。

そこで前節で利用した4点(左右足の爪先・かかと)に、強度差のある4振動を提示することによって、方向の提示を考えた。

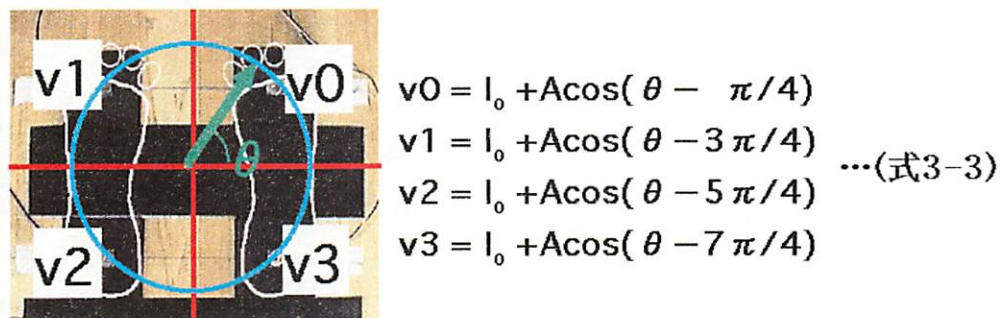


【Fig.3-1：強度差による方向提示】

$v_0 \sim v_3$  は4つの振動子の出力、 $d$  は強度差、 $I_0$  は基本振動である。(式3-1) は、 $v_0 + v_1$  方向(前方)の出力とし、(式3-2) は  $v_0$  方向(斜め前方)の出力として4振動子の出力を算出した。他の方向も同様である。このように提示方向が最も強くなるように強度差を分割し、2次元的な方向を提示する事を試みた。

予備実験によれば、(式3-1,2) によって2次元的な方向を提示することは可能であったが、その提示方向は強度差を分割して算出するため、提示方向そのものは静的であり、この方法で動的な方向を提示する事は理論的ではない。

VR空間で方向提示を行う場合を考えると、ユーザの動作を中心にして方向を提示するため、提示方式は数理論理であることが望ましい。そこでユーザを中心とした方位角  $\theta$  をパラメータとした極座標系を利用する。



【Fig.3-2 : 極座標系による方向提示】

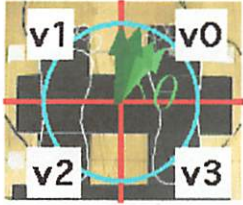
ここでの座標系は、左右の足間距離を直径  $2r$  とし、右足方向をゼロとした、反時計回りが正の方位角  $\theta$  の極座標系となっている。

これにより、足裏4点の振動子を方位角  $\theta$  によって無段階に方向提示することが可能なはずである。

### 3-2-5 足裏の2次元PhSによる回転表示

前出(式3-3)のもう一つの利点は、 $\theta = 2\pi ft$  とおくことにより、 $\theta$  が連続的に変化する「回転」を表現できることにある。

$\theta = 2\pi ft$  とおく,  $A$  : 変調振幅



$$\begin{aligned} v0 &= I_0 + A\cos(\theta - \pi/4) \\ v1 &= I_0 + A\cos(\theta - 3\pi/4) \\ v2 &= I_0 + A\cos(\theta - 5\pi/4) \\ v3 &= I_0 + A\cos(\theta - 7\pi/4) \end{aligned} \quad \dots(\text{式3-4})$$

【Fig.3-3 : 回転提示】

回転が提示できることによるVRへの応用の可能性は、傾斜や揺動など考えられるが、その応用を考える前に、足裏2次元PhSにより回転が正しく知覚できているか、またその回転速度としてどの程度の周波数が知覚できるかの基礎特性を明らかにする必要がある。

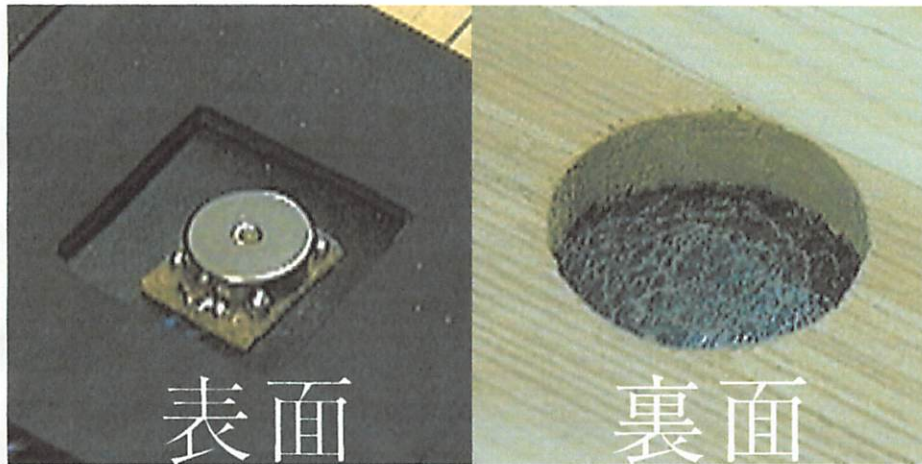
## 3-3 実験

### 3-3-1 実験装置

まず前章の手掌部によるPhSから、足裏へ振動提示部位を変更するにあたり、振動提示装置を変更した。装置は人間の体重のかかる足裏に対して十分な刺激提示が行えるように工夫をしなければならない。

さまざまな予備実験から、振動子には携帯電話用偏心モータFM25E（東京パーツ工業製）を使用した。片足30kg以上の体重が乗ったときも、十分な出力強度を保つために、提示装置の木板面の設置部位に

【Fig.3-4】の直径44mmの穴を空け、その表面に厚さ1mmのゴム板を貼った。

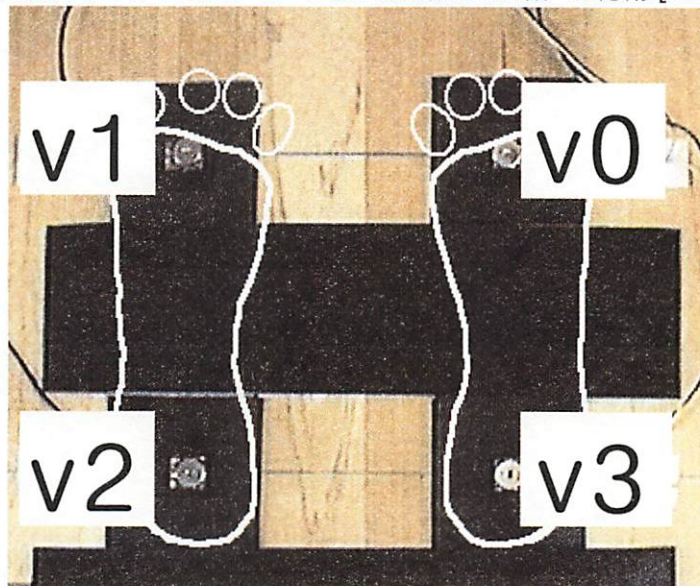


【Fig.3-4：振動子の設置状態】

またこの振動子は、当初の実験においてはゴム板の表面に設置したが、振動子が直接当たることにより被験者が痛みを訴えたため振動子をゴム板の裏面に設置した。

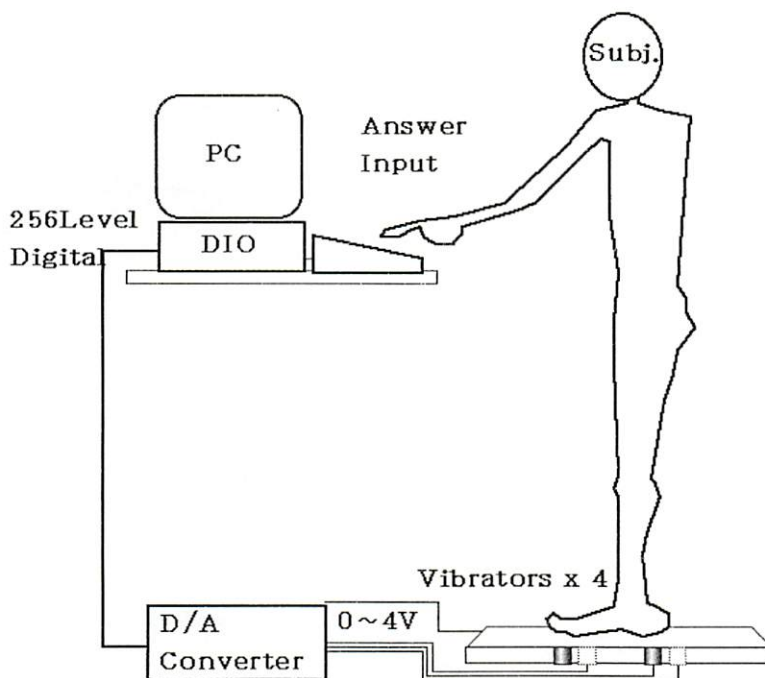
この様な振動子を4個、一辺が150mmの正方形の頂点に設置し、左右の足の爪先・かかとの計4点に対応させることにした。この結果【Fig.3-5】のような振動提示板を製作した。

4つの振動子は以後、図中の通りv0～v3と呼ぶ。



【Fig.3-5 : 振動提示板と4つの振動子】

この振動提示板を用いて、【Fig.3-6】の実験システムを構築した。



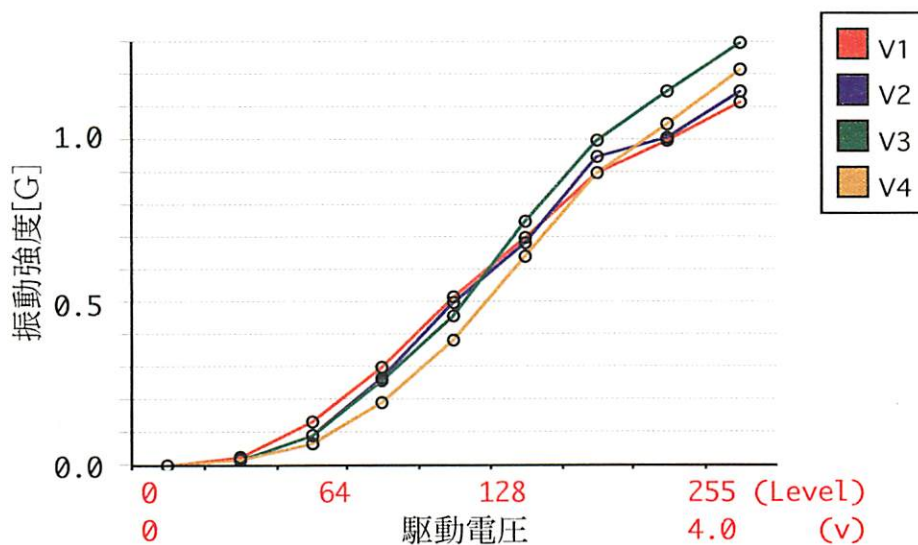
【Fig.3-6 : 4点振動実験装置】

PCからの提示振動を、被験者は振動板からの提示を足裏で知覚し、その結果をマウスやキーボードから入力する。



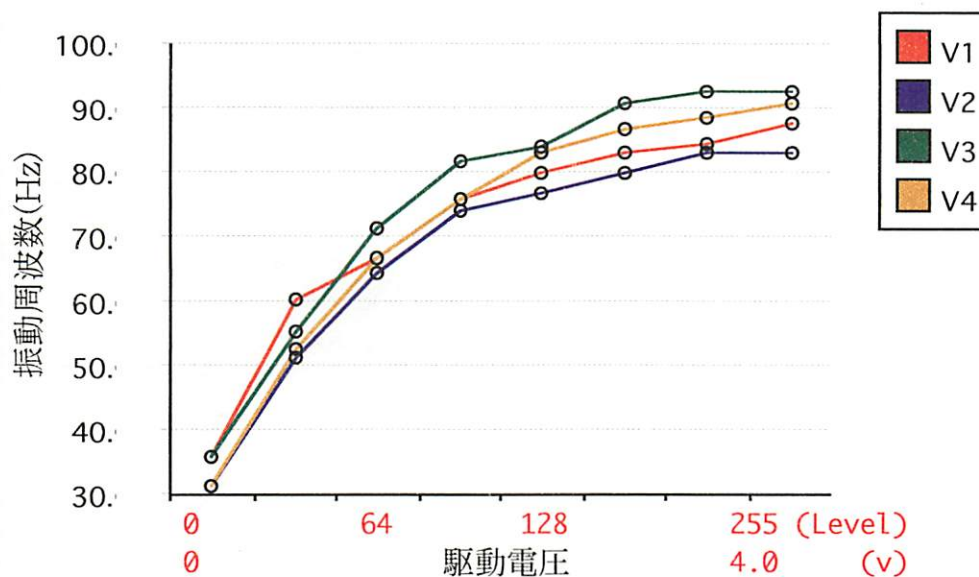
### 3-3-2 振動子の基礎特性

前節の4点振動提示装置の振動強度はPCから0～4V（0～255 (Level)）で駆動するが、実験を行う前に、4つの振動子が駆動電圧に対し、それぞれ等しい特性で振動強度を持つかどうかを測定する必要がある。また偏芯振動モータを使用するため、駆動電圧に対し著しく周波数が異なると皮膚の受容器の特性により、異なった知覚をする可能性がある。そのため振動モータの振動周波数が適正な振動周波数にあることを確認しなければならない。振動周波数および、振動強度の測定は、振動子をゴム板の表側に貼り、その上に貼り付けたピエゾ式加速度計（山一電機製107S）によって行った。



【Fig.3-7：使用した振動子の強度】

4つの振動子はPCからの出力（x軸：0～255Level）に対し、ほぼニアな特性があるといえる。また個々のばらつきも比較的少ない。



【Fig.3-8 : 使用した振動子の周波数】

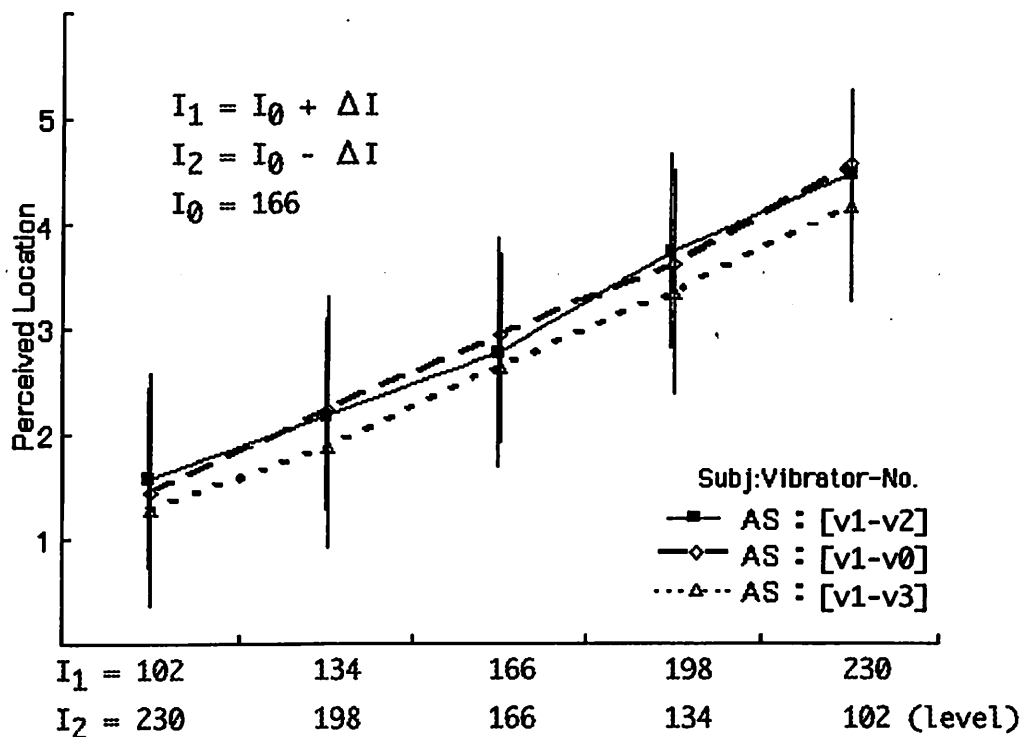
振動子の振動周波数は人間の振動知覚の受容器のひとつであるRA-IIユニット（3-2-5参照）を興奮させるに十分な周波数帯に存在する。

また2 V以下は最小起動電圧に近く、十分な出力が得られていないため、実験では使用しないこととした。

### 3-3-3 足裏のPhS

まず足裏でのPhS現象の生起を確認するために、各振動子2点における静的PhS現象を測定した。振動子は表側に配置している。

被験者は(式2-1)の $\Delta I$ をそれぞれ  $\{-64, -32, 0, 32, 64\}$  (Level)とランダムに変えたときに知覚した位置を1～5で入力する。

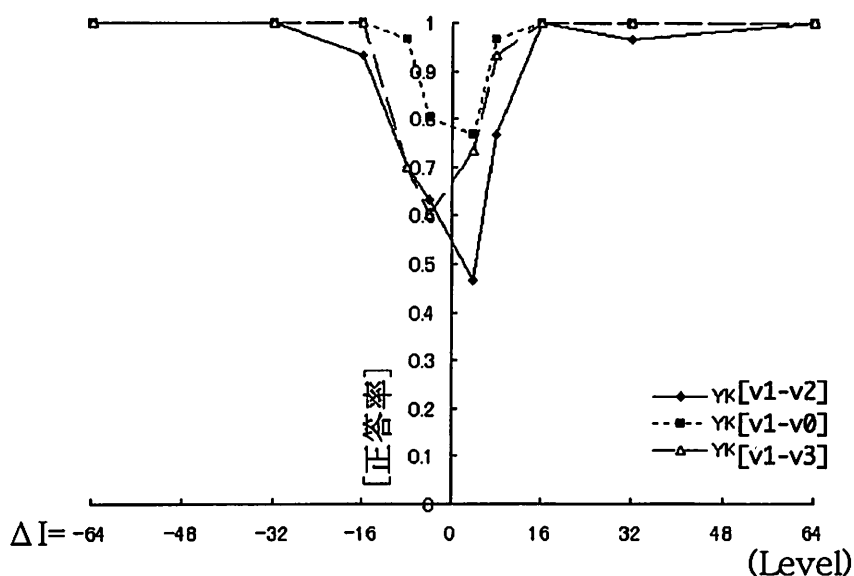


【Fig.3-9 : 足裏の2点静的PhS】

足裏における静的PhSの定位は、手掌部における場合と同じく、その定位はある程度の広がりを持っているが、同一被験者内では、同一の足[v1-v2]と、左右前の足間[v1-v0]、さらに左足前部と右足後部[v1-v3]といった提示部位によらず同様の傾向を示している事がわかる。

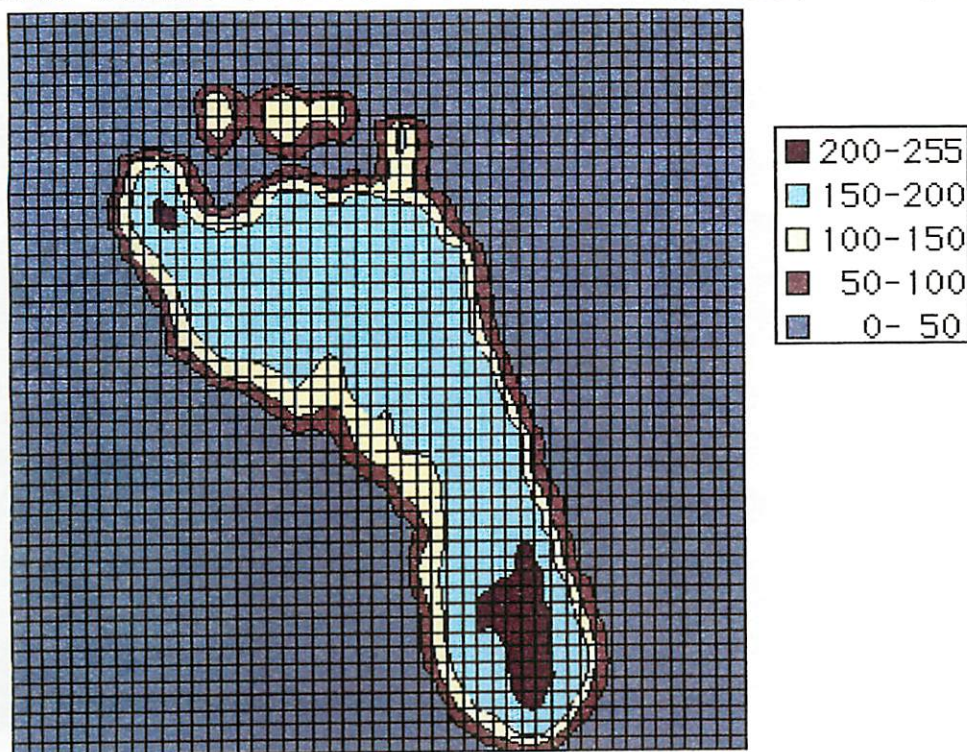
これはPhS現象が末端の受容器において生起しているのではなく、知覚の高次の領域が関与していることを推測させる。しかしながらこの判断は工学的手法で解明することは難しく、本研究では割愛し、結果から応用の可能性を考える方針とする。

【修士学位論文】皮膚感覚のファントムセンセーションと画像との対話への応用 [9662005] Akihiko Shirai  
 同様に足裏の2点を対称とした動的PhSの実験を行った。静的PhS実験と同じ部位に対し、(式2-2)の $I_0=166$ 、 $f(t)=\pm\{4,8,16,32,64\}$ と10種類にランダムに変化させたときの移動方向の知覚を回答させ、その正答率をグラフにした【Fig.3-10】。



【Fig.3-10：足裏の2点動的PhS】

手掌部における結果と同様に、強度差が強くなるほど正答率が上がる傾向にある。また[v1-v0]（爪先-爪先）の結果が比較的良いのは、この部位がかかるとに比べて感度が良いためと思われる。また装置の構造上、かかるとには体重という大きな圧が加わるため、振動が消されるという被験者の報告があったため、参考として足裏の圧力分布をマトリクス状に配置した感圧センサによって測定する事にした。



【Fig.3-11：足裏の圧力分布】

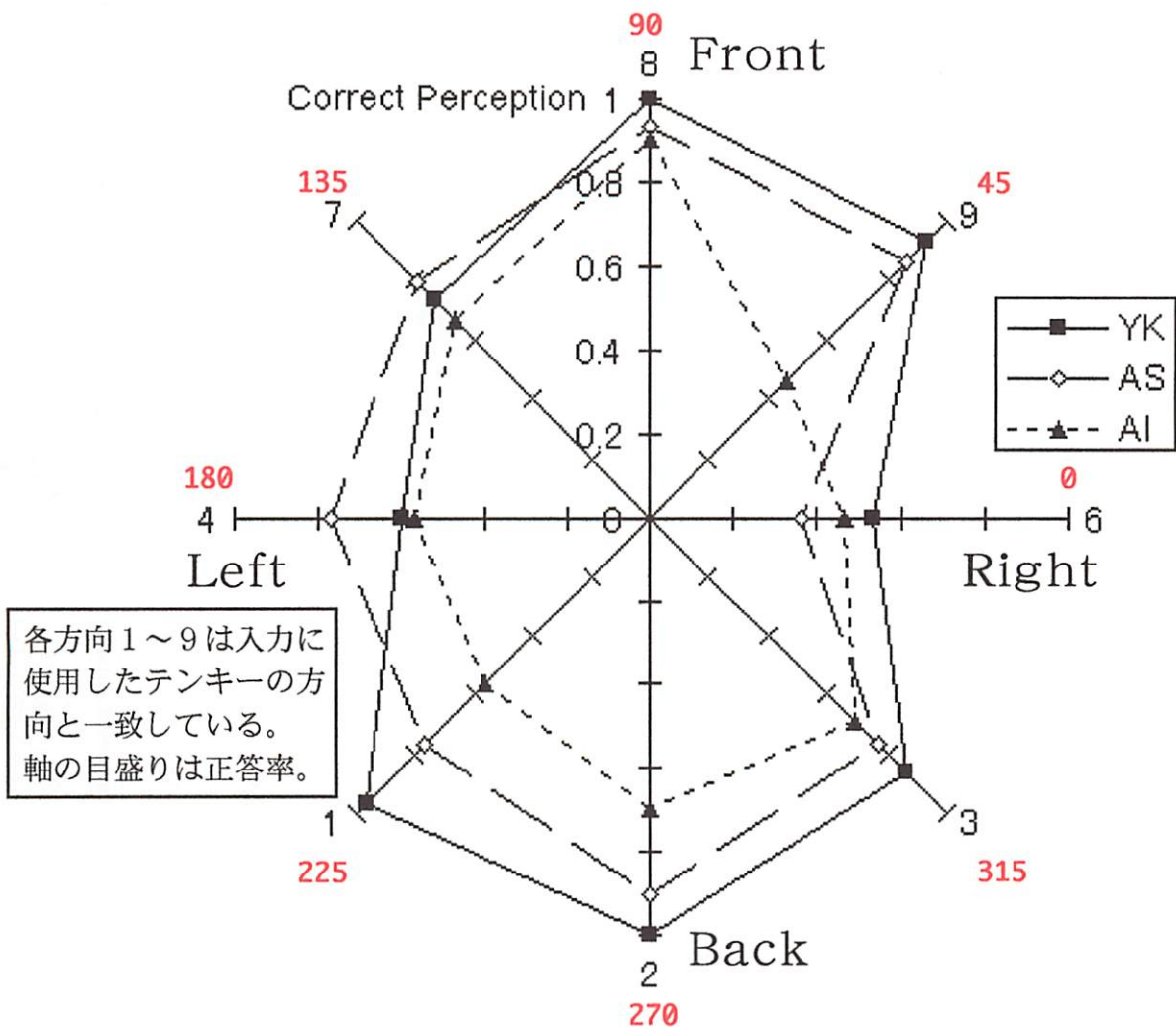
【Fig.3-11】は足裏の圧力分布である。参考として立位の足裏の圧がどのように分布しているか、感圧ゴムマトリクスによって測定した。圧力の単位ではないが、センサの出力を256段階に正規化し、色分けしている。これによると、かかとの提示部位には爪先の提示部位[150-200 (Level)]に比べ、[200-255(Level)]という高い圧が加わっていることが読み取れる。試作した提示板には構造的に提示部位によって、このような条件差が存在する。これでは同一の振動を与えたときに、提示部位によっては振動に差異を生じる可能性がある。ここまでの実験結果からも同様な考察を得ることが出来る。理想的には知覚レベルで同一の刺激量を与えられることが望ましいが、実験結果から静的・動的PhSの提示には十分な装置であることが判ったためこのまま利用することにする。

以上の実験結果から、足裏においても手掌部と同じく2点のPhS現象が生起することが確認され、かつ両足間の「離れた2点の融合知覚」も可能であることが判った。

### 3-3-4 足裏の2次元PhSによる方向提示

前項の実験により、提示部位によらずPhSが生起することが確認できた。この実験結果を利用し、4点の振動子を用いた2次元PhSの知覚を実験する。

被験者は【Fig.3-1】に従ってランダムに出力される方向を、振動状態によりテンキーで方向を回答する。被験者は3名、各方向20回以上の提示を行った。

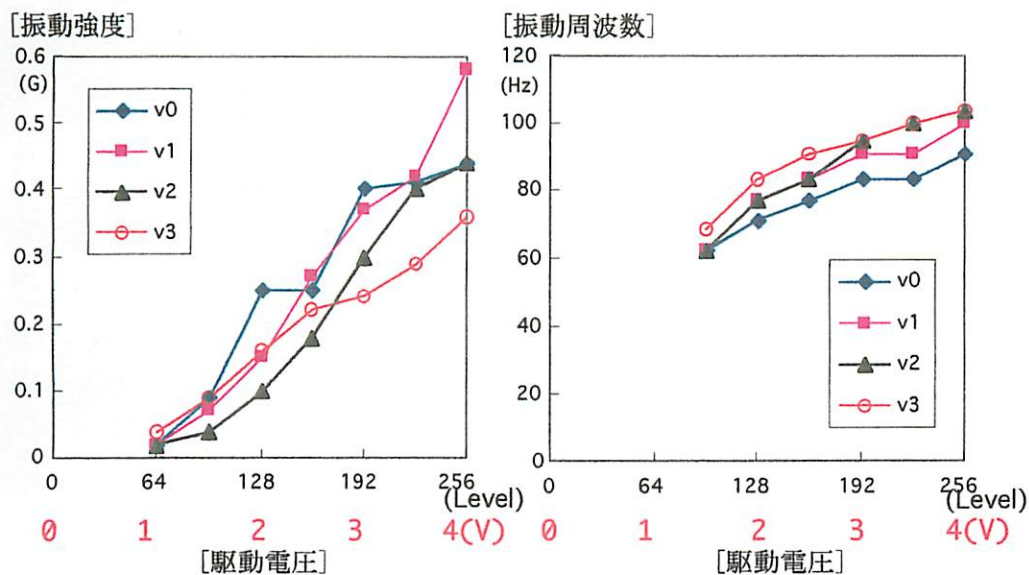


【Fig.3-12 : 2次元PhSによる方向提示(1)】

(式3-1)における  $I_0$  を166(Level)、  $d$  を48(Level)としたときの、提示方向に対する正答率を示している。3名の被験者のうち AI は振動知覚に過敏で、十分にPhS像を知覚できていない(実験後報告より)。強

【修士学位論文】 皮膚感覚のファントムセンセーションと画像との対話への応用 [9662005] Akihiko Shirai  
 度差を大きく与えたため比較的高い正答率を示している。しかし、左右方向の正答率が低い。これは【Fig.3-11】で示したように、足裏の爪先とかかとでは、提示量が等しくても、かかとの圧により振動が消されてしまっている事が原因と考える。

この問題を解決するためには、振動提示の安定を図る必要があるため、振動子をゴム膜の裏側に配置する事にした。これにより振動強度は【Fig.3-13】のように減少したが、直接足裏の体重によって振動子を押しさえつけることがなくなった為、同一振動の4点の知覚量を比較的均一に提示することが可能になった。

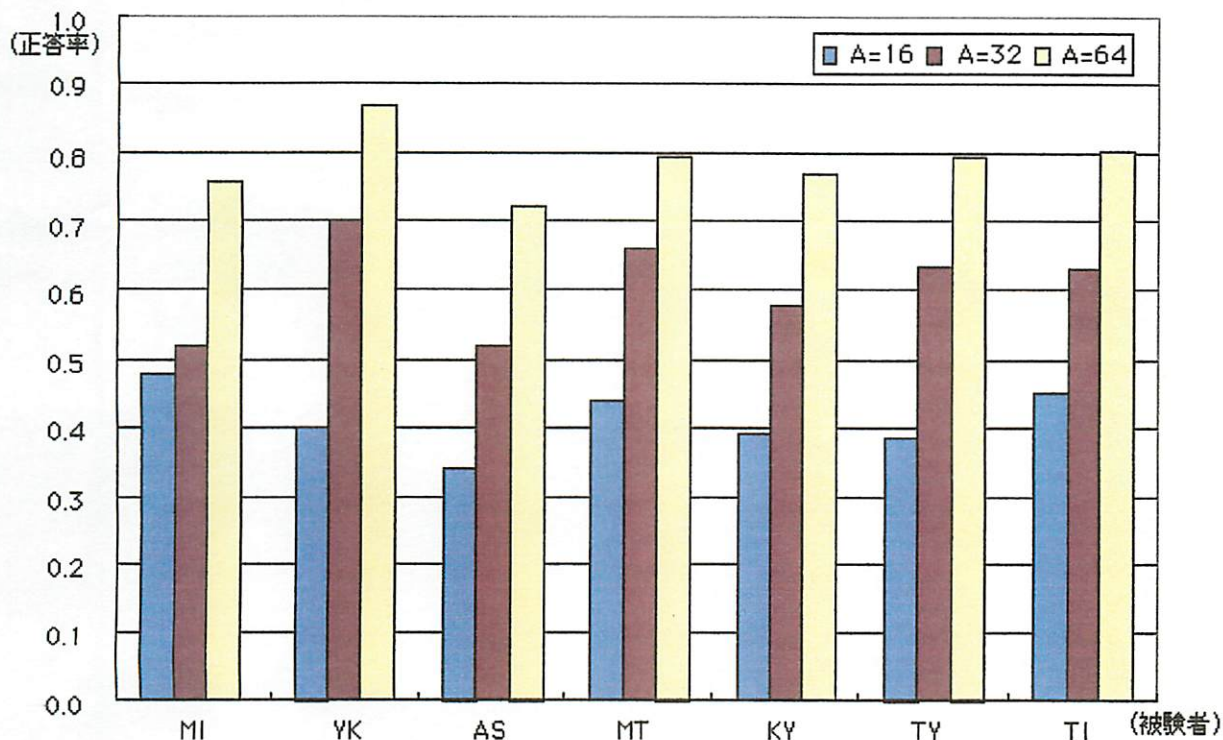


【Fig.3-13 : 改良した振動子の強度と周波数】

測定により改良した振動子が出力(Level)と強度(G)においてほぼ比例関係にあったため(式3-3)を使用した方向提示実験を行う。

被験者は振動提示板の上に立ち、テンキーを構える。足裏には静的な振動出力が提示されている。 $\theta = 0, 45, 90, 135, 180, 225, 270, 315$ の8種類,  $A = 0, 16, 32, 64$ の4種類にランダム変化させる。 $A = 0$ のとき全ての振動子の出力は $I_0$ となるため、被験者はテンキーにより5を回答することとする。

【修士学位論文】 皮膚感覚のファントムセンセーションと画像との対話への応用 [9662005] Akihiko Shirai  
 被験者は成人男子7名によって行い、試行は(8方向)×(変調強度  
 16,32,64)×(試行10回)に加え、A=0のダミー出力40回を混ぜ、1被験  
 者あたり、合計280回の入力を行った。



【Fig.3-14：各被験者の正答率の平均】

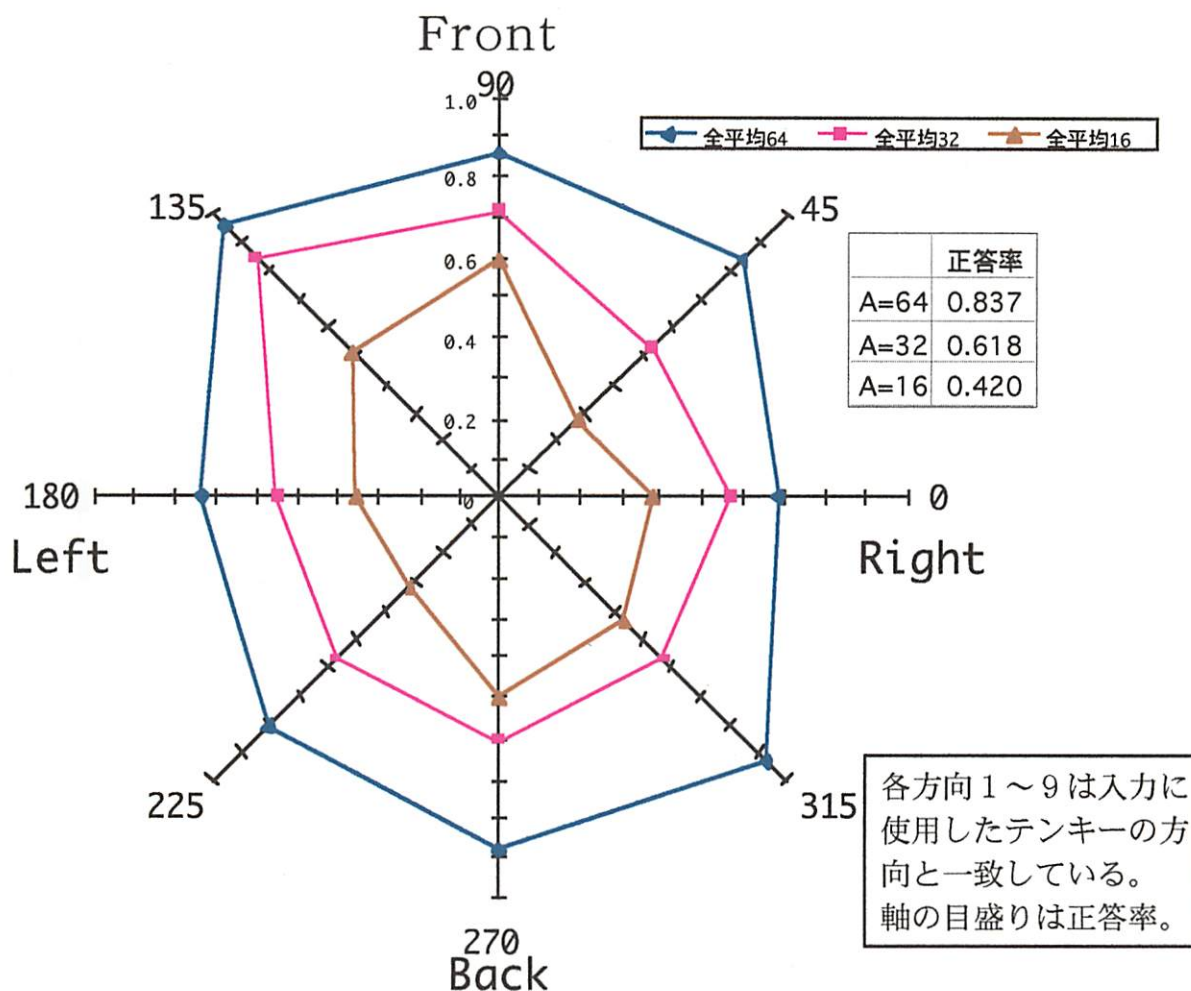
【Fig.3-14】は7人の被験者における、全てのサンプルを変調振幅Aのパラメータで分類した場合の正答率である。

各被験者間のばらつきが比較的少ない。また変調振幅Aを大きくすると正答率が上がる傾向が読み取れる。

実験中の被験者のコメントから「A=16のサンプルは変化がほとんど判らない」という実験後報告を得たが、全くの運だけで回答した場合でも1/9であるから、比較的正答できているといえる。

この結果から「各被験者間の差異は少ない」という前提で全被験者の正答率の平均を求めた【Fig.3-15】。

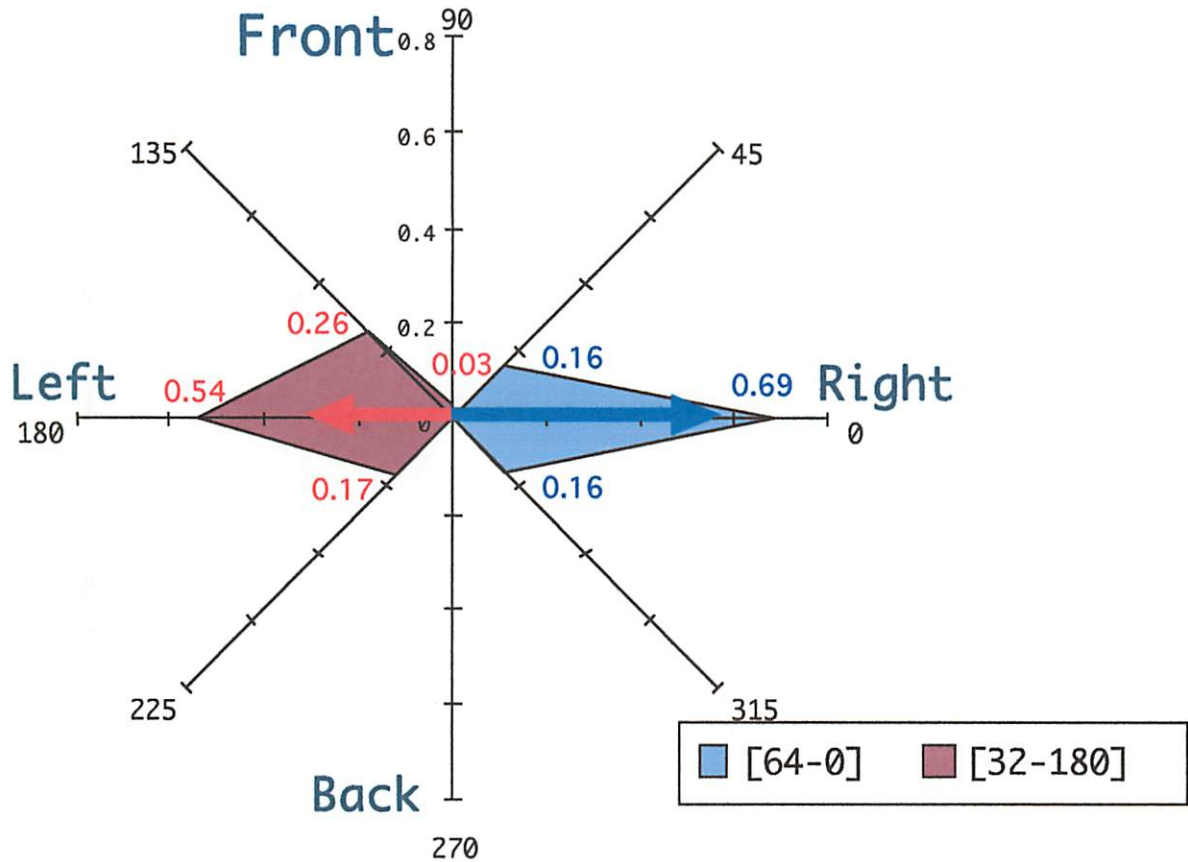




【Fig.3-15：全被験者の正答率】

全体での正答率は0.625。十分な変調振幅があれば、方向弁別が可能であるといえる。

またこの結果について、左右方向 ( $\theta = 0, 180$ ) の正答率が低いが、その誤りの傾向について分析した【Fig.3-16】。



【Fig.3-16：全被験者の誤り傾向】

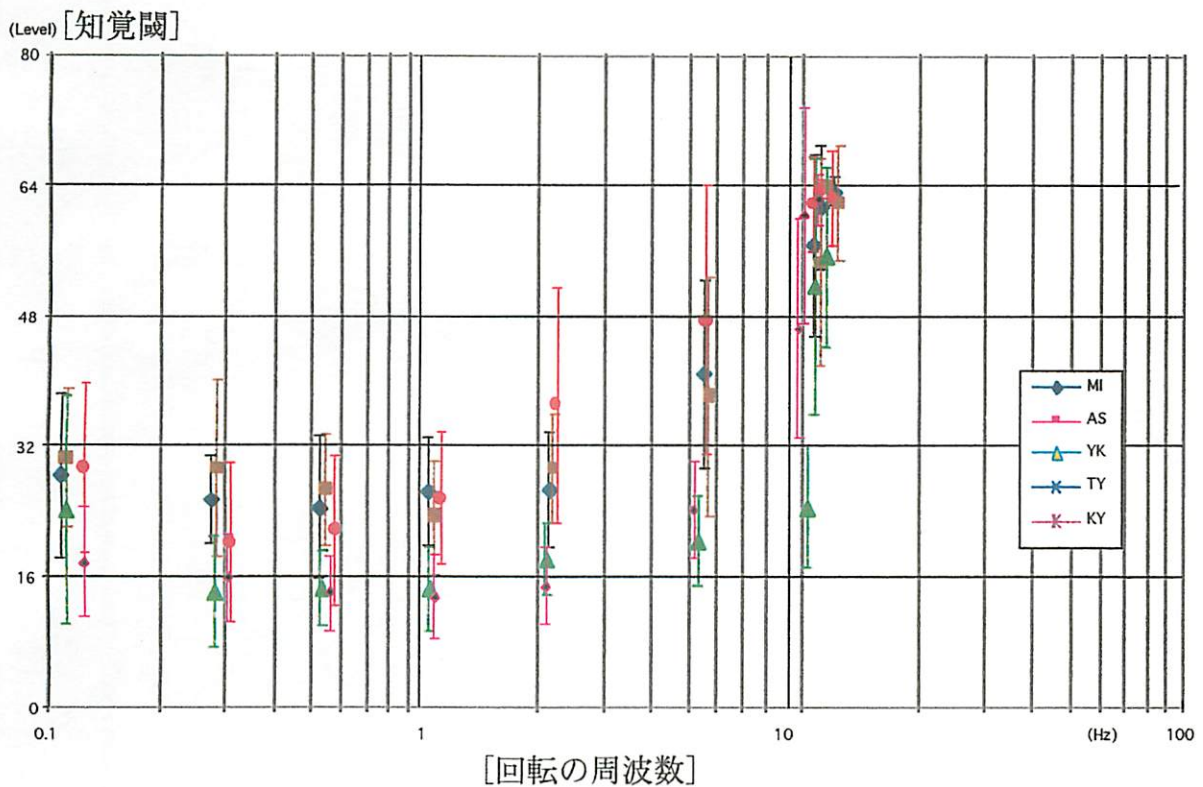
青は変調振幅64で右方向に提示した場合の入力回数の出現率である。赤は同様に、変調振幅32において左側を提示した様子である。数字は各回答の出現率を表している。

図から、提示方向に比較的近い方向を回答していることが判る。また、変調振幅が低いほど誤りが広がる傾向がある。また、変調振幅32において、若干前側を回答する傾向が高い。これは【Fig.3-11】の足裏の圧の分布が関係している可能性がある。

以上結果から、提案した算出方式によって方向提示が可能であることが測定により確認できた。

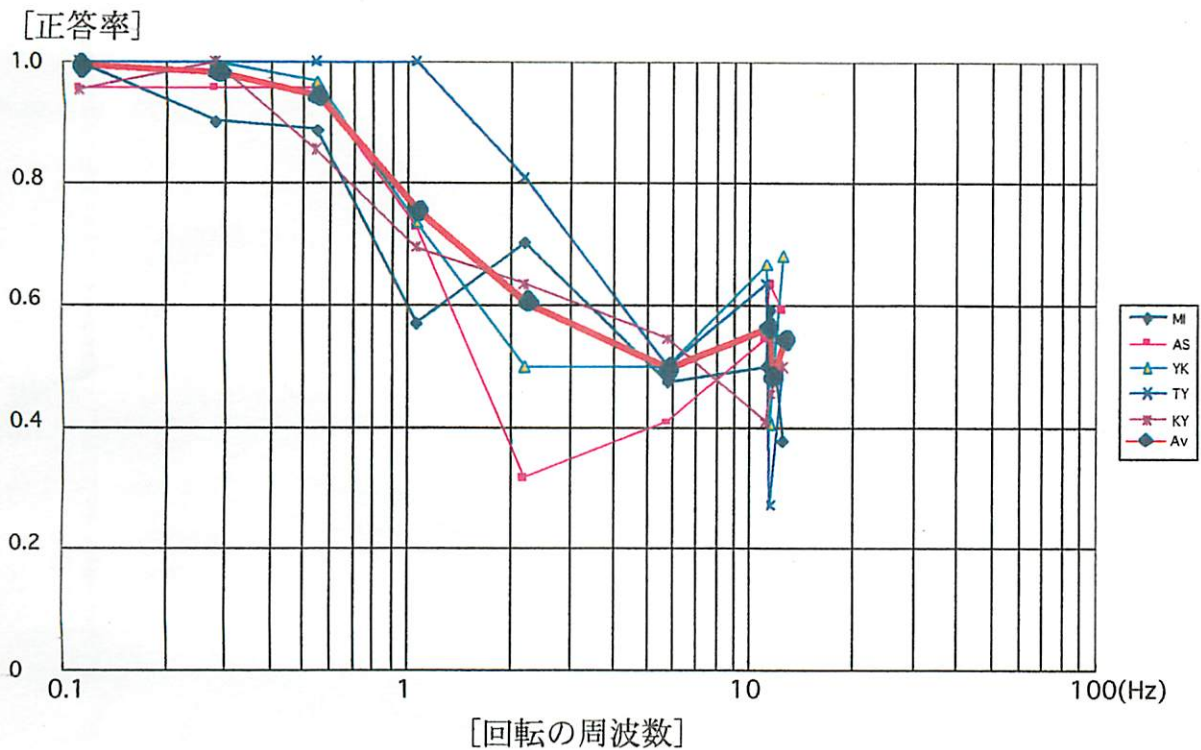
### 3-3-5 回転方向／周波数提示

前出の算出式の $\theta$ を $\theta=2\pi ft$ とおき(式3-4)、PCから、 $f=0.1\sim 20\text{Hz}$ の回転周波数に回転方向+,-を加えた計16種のランダムな提示を被験者に出力する。被験者は知覚できる最小の変調振幅Aをマウスによって調整し、同時に回転方向をマウスの左右クリックによって回答する。回転する移動感覚を入力する上で、その回転方向の正誤を検証することにより、より詳しい測定を行う事とした。



【Fig.3-17 : 動き知覚周波数特性】

【Fig.3-17】は各被験者が融合した回転を感じた変調振幅の最小値とその誤差を示している。各被験者とも同様の傾向を示し、1 Hz 近辺に変調振幅Aの最小閾があることがわかる。



【Fig.3-18：回転方向の知覚】

【Fig.3-18】は同じ実験結果から得られたデータを、正答率によってグラフ化したものである。赤い太線が各被験者の平均を示している。

0.5Hz以下において回転方向を正確に知覚できていることがわかる。

【Fig.3-17】と比較して、回転そのものの知覚が1Hz以下で知覚できる事に対し、回転の方向の知覚は0.5Hz以下のさらに遅い回転と異なっているのが興味深い。

### 3-4 まとめ

2次元足裏PhS現象を提示するための、4つの振動子強度の算出方法を提案し、その算出方法により2次元的方向の提示と、回転方向の弁別が可能となった。またその回転を時間変調し、回転する動きの知覚周波数特性を測定した。

<第3章おわり>

## ～第4章～

### 応用

#### 4-1 本章の目的

本章ではここまでの研究の成果を用いて、PhSを画像との対話へ応用する手法とその応用例「Phantastic Phantom Slipper」についてまとめる。

#### 4-2 PhSの応用

ここまでの研究において、手掌部や足裏のPhS現象の基礎特性を明らかにしてきたが、最終的に目標とするところはVR画像との対話への応用である。

ここでは各種のPhSを画像との対話へ応用する上での問題点と、それを解決する手法、さらに実際の応用例について述べる。

##### 4-2-1 静的PhSの応用

まず、静的PhSを直接画像との対話へ応用することは非常に難しいと言える。VRは動的画像のため、静的な定位を必要とする場面を作りづらい事が最大の原因である。

また静的PhSの融合知覚現象は、実験結果【Fig.2-3-5, Fig.2-3-6】からも分かるように、ある程度の広がりを持って知覚されるため、定位が難しい上、被験者間での相異も存在するため一意的な位置の表示などには使いづらい。このため静的PhS現象をこのままの状態に応用することは非常に難しいと言える。

## 4-2-2 動的PhSの応用

動的PhSは、実験結果【Fig.2-3-7, Fig.2-3-8, Fig.2-3-9】からその移動方向の提示には十分利用できる可能性があるといえるが、PhSを手掌部に利用する場合、腕の挙動の運動知覚等にPhS像がかき消され、十分なPhS像の知覚が行えない場合がある。

これを考慮し、PhSのVR応用は物理的衝突といった拘束的かつダイナミックな動作情報ではなく、接触面の状態やベクトルといった補足的な情報、目に見えない刺激提示等に応用することが望ましいと言える。

## 4-2-3 PSDを用いた応用「仮想工具」

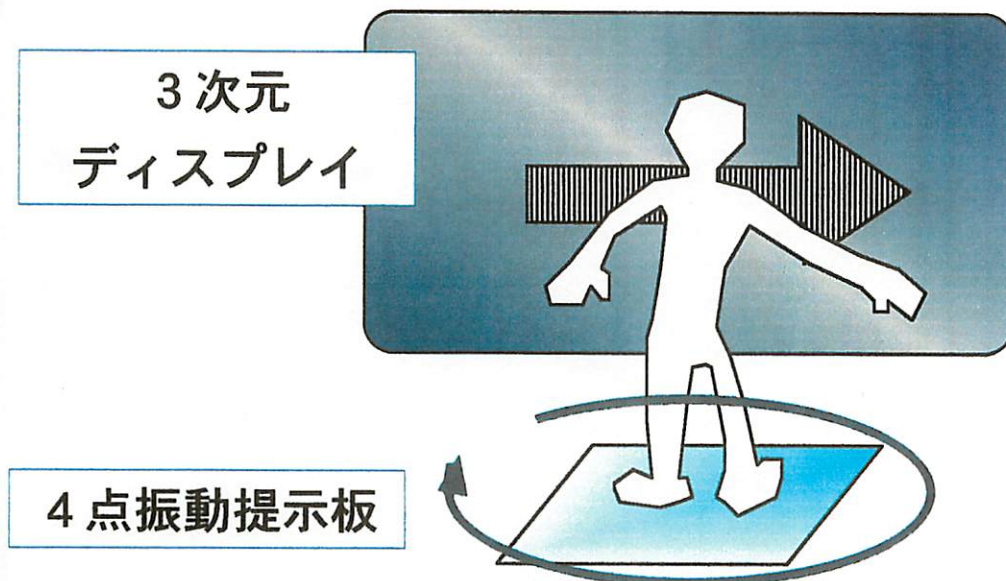
これらの問題を解決する方法として、人間の動的な運動知覚を逆に利用する手法を考えた。光学的3次元位置検出装置としてのPSDによるリアルタイム位置検出法を用いて、手掌部で握って使うデバイス上に配置したの2個のLEDの3次元的位置情報を検出し、それを元に3次元座標上におけるデバイスの座標や距離などに対応したをPhS像を提示する手法である。人間のデバイスを把持した自然な動作に従って動的なPhS像が変化するため、自然な提示が行えるはずである。

「仮想工具」では仮想空間上の物体を工作する為の工具を想定したため、振動量の提示にデバイスと仮想物体との距離を用いる事にした。

デバイス上の2点の赤外線指標を2台のPSDカメラがリアルタイムに検出し、2点の3次元位置を算出する。この3次元位置の情報をもとに、仮想物体との距離に対応した量を2つの振動提示装置の出力とする。この提示方法は目に見えない物理情報である物体の堅さ等が存在するVR空間との自然な対話を考える上では理にかなっていると言える。

【修士学位論文】 皮膚感覚のファントムセンセーションと画像との対話への応用 [9662005] Akihiko Shirai  
4-2-4 4点振動提示板の3次元画像との協調

4点振動提示板によって、基本振動 $I_0$ に加え、ユーザを中心とした方位角 $\theta$ と、強度変調振幅 $A$ によって極座標系の自由度の高い方向提示が可能になった。これを画像との対話に応用することにより、被験者間に偏りの少ない、情報提示装置の実現が可能である。



【Fig.4-1：3次元画像への応用】

【Fig.4-1】は振動提示板を3次元画像との協調へ応用した概念図である。大型の3次元ディスプレイの前に実験に利用した4点振動提示板を置き、ユーザはその上に立つ。3次元画像に同期した方向提示を足裏の振動によって感じる。振動提示板は振動する以外は板状に設置されているのでユーザは拘束性の高いインターフェイスを装着する必要がない。また3次元ディスプレイの性質上、ユーザの鑑賞位置を提示板上に固定できる事も利点と言える。

#### 4-2-5 足裏2次元PhSのスリッパへの応用

足裏の2次元PhSの応用を考えると、前項のような固定された環境ではなく、4個の振動子を左右2個に分割し、PSD指標と共にスリッ

【修士学位論文】 皮膚感覚のファントムセンセーションと画像との対話への応用 [9662005] Akihiko Shirai  
パ型のインターフェイスに取り付ける事により多くの応用が考えられる。

ただし、この方式は4点振動提示板のようにユーザの位置や姿勢は固定ではなく、精密に提示刺激量を算出することは難しい。そのため実験システム「Fantastic Phantom Slipper」では、VR環境へ応用するために、振動提示方法にいくつかの特別な手法を用いている。



【Fig.4-2 : スリッパ型インターフェイス】

## 4-3 Fantastic Phantom Slipper

### 4-3-1 コンセプト

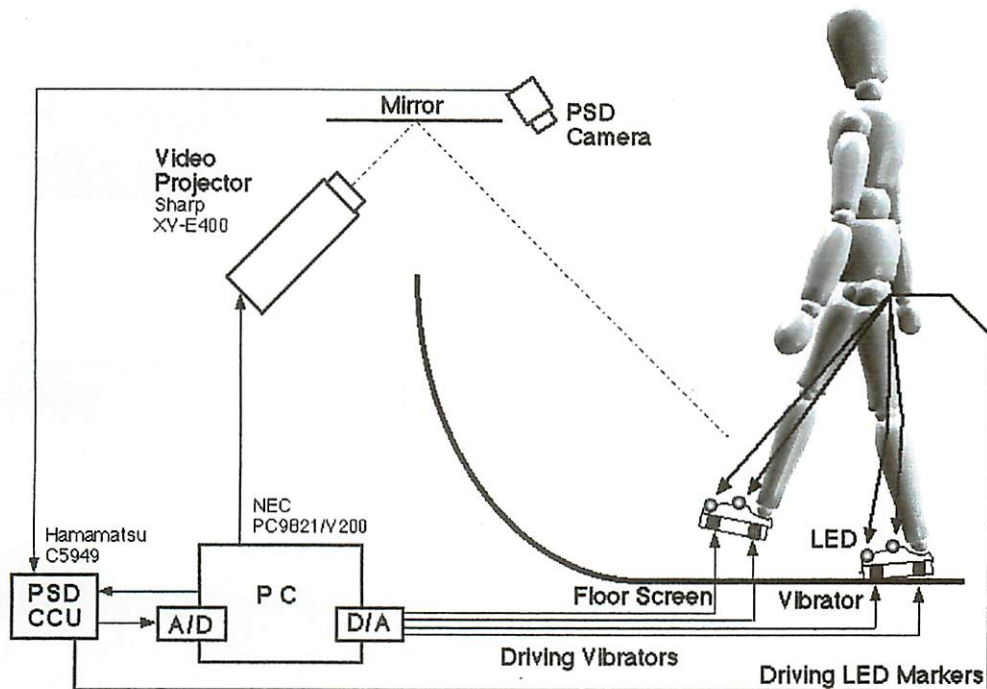
人間は移動をするために足を用いる。その為、VR環境においても移動に足を用いるのは自然である。このような考えから足を用いて直接映像と対話できるヒューマンインターフェイスを設計した。

これを利用し、VRのアミューズメント応用として「Phantastic Phantom Slipper」という名の娯楽システムを製作した。

また、日本バーチャルリアリティ学会第2回大会等において、デモンストレーションを行い、多くの研究者に体験していただいた。



## 4-3-2 装置



【Fig.4-3 : システム構成図】

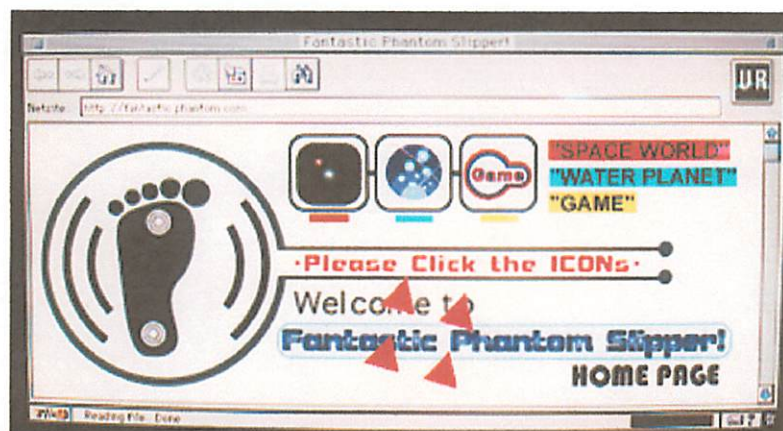


【Fig.4-4 : 外観, P S D, 投影部と投影状態】

基本となるシステム構成は【Fig.4-3】の通りである。ユーザはスリッパ型のインターフェイス【Fig.4-2】を装着し、半球型床面スクリーンの上に立つ。スリッパに装着された両足4個のLEDはPSDカメラによって検出され、その位置はPC上で仮想空間上の座標に変換される。その座標に対して、VR空間内の仮想物体との位置関係から4つの振動子の振動量を算出し、D/Aコンバータ、アンプを通して電圧をス

【修士学位論文】 皮膚感覚のファントムセンセーションと画像との対話への応用 [9662005] Akihiko Shirai  
リッパ内部の偏芯モータに入力する。

映像はPCから液晶プロジェクタを通して床面のディスプレイに投影される。ユーザは仮想物体と直接足で対話することが可能である。

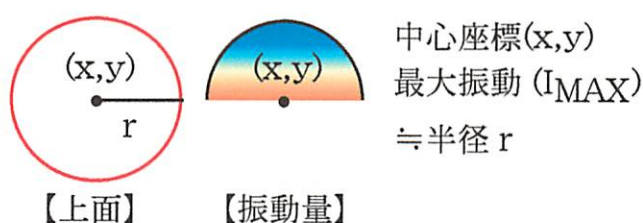


【Fig.4-5：投影画像の一部】

【Fig.4-5】はDirect3D（3次元グラフィクス描画技術）によって描かれているPCの画面の一例である。この映像を液晶プロジェクタによって床面に投影している。

### 4-3-3 提示方法

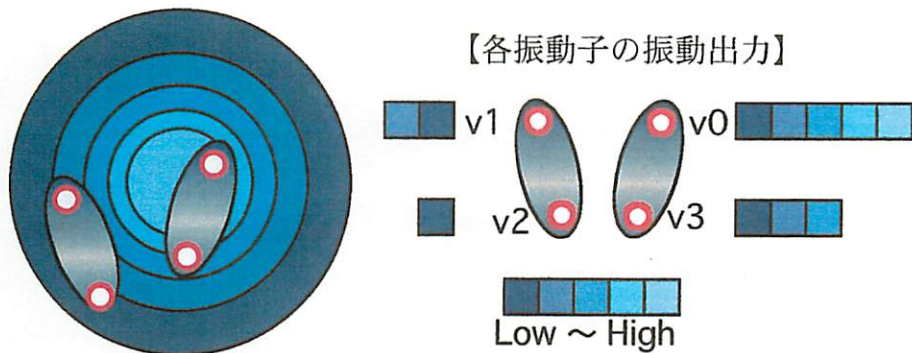
仮想空間上でユーザの位置座標は  $z=0$  平面上の4つの点  $(u_{x0}, u_{y0}), (u_{x1}, u_{y1}), (u_{x2}, u_{y2}), (u_{x3}, u_{y3})$  に変換される。仮想物体は  $z=0$  平面に配置し、次のように定義される。



【Fig.4-8：仮想物体の概念】

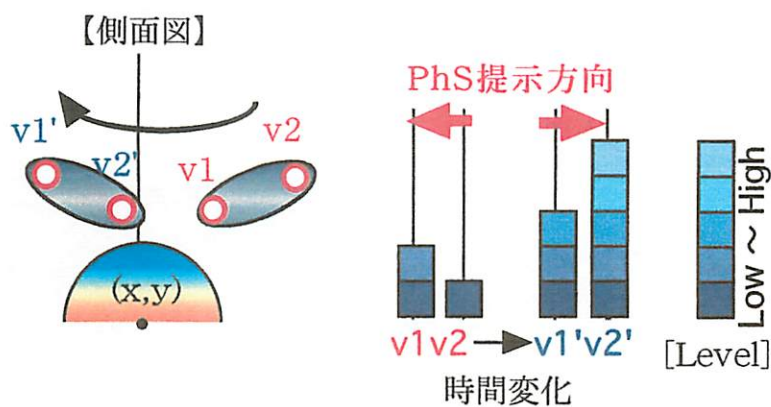
ユーザの足位置  $(u_{x0\sim3}, u_{y0\sim3})$  それぞれに対し、物体の中心座標  $(x,y)$  からの距離を算出する。距離をそのまま振動量に対応させているた

【修士学位論文】 皮膚感覚のファントムセンセーションと画像との対話への応用 [9662005] Akihiko Shirai  
 め $I_{MAX}$ と半径  $r$  (振動出力ゼロの境界線) は等しい値である。足裏へ  
 提示される振動量は中心と一致したときの振動が最大振動( $I_{MAX}$ )とな  
 り、遠ざかるにつれ弱くなり、円の外側はゼロとなる。



【Fig.4-9 : 振動提示の例】

【Fig.4-9】 はある仮想物体に対する足位置とその位置における振動  
 量の概念である。また足によって仮想物体を「なでる」ように動的な接  
 触をした場合、【Fig.4-10】 のような振動出力が提示される。



【Fig.4-10 : 動的な接触の概念】

( $v_1, v_2$ )において、前方を示していたPhSが、( $v_1', v_2'$ )では後方を示し  
 ている。これがユーザの動作によって動的に提示される上、その時間的  
 変化はユーザ自身が制御するため、自然な提示が行える。

## 4-4 まとめ

PhS現象の基礎特性の結果から、画像との対話へ応用する上での問題点、またその解決方法についてまとめた。

PhS現象の画像との対話への応用は、擬似的触覚として提示するため実際の腕や体の運動知覚と協調する形で提示することが有効と言える。その為にはPSD等のリアルタイム人間動作入力装置と組み合わせることが重要で、これによりユーザの位置情報に対応した座標情報を提示することが可能となった。手掌部への応用は仮想工具として他の研究グループへその詳細な研究を引き継いだ[16]。

足裏の2次元PhS現象は、その提示部位の選出等に問題を残しているが、実験装置である「4点振動提示板」と大画面立体ディスプレイを組み合わせることによって、3次元画像の表現力を高めるための応用の可能性を提案した。

足裏のPhS現象をスリッパ型インターフェイスに応用することにより、VRのアミューズメント応用である「FPSシステム」を製作した。床面に投影された画像と直接対話し、振動によって画像では表現できない高度な情報の提示を実現した。またその中で実際に使用されている実践的な振動提示方式について詳細に解説した。

<第4章終わり>

## ～第5章～

### 結論

#### 5-1 本章の目的

本研究の全体を通してのまとめを述べるとともに、皮膚感覚のPhSを画像との対話に応用することの有効性と可能性、その考察と問題点について述べる。

#### 5-2 まとめ

手掌部におけるPhSの基礎的特性を測定し、応用として手掌部で握って使う「仮想工具」を製作した。

足裏における2次元PhSを提案し、4点振動提示板を用い実験により方向提示と回転が提示可能であることを確認した。

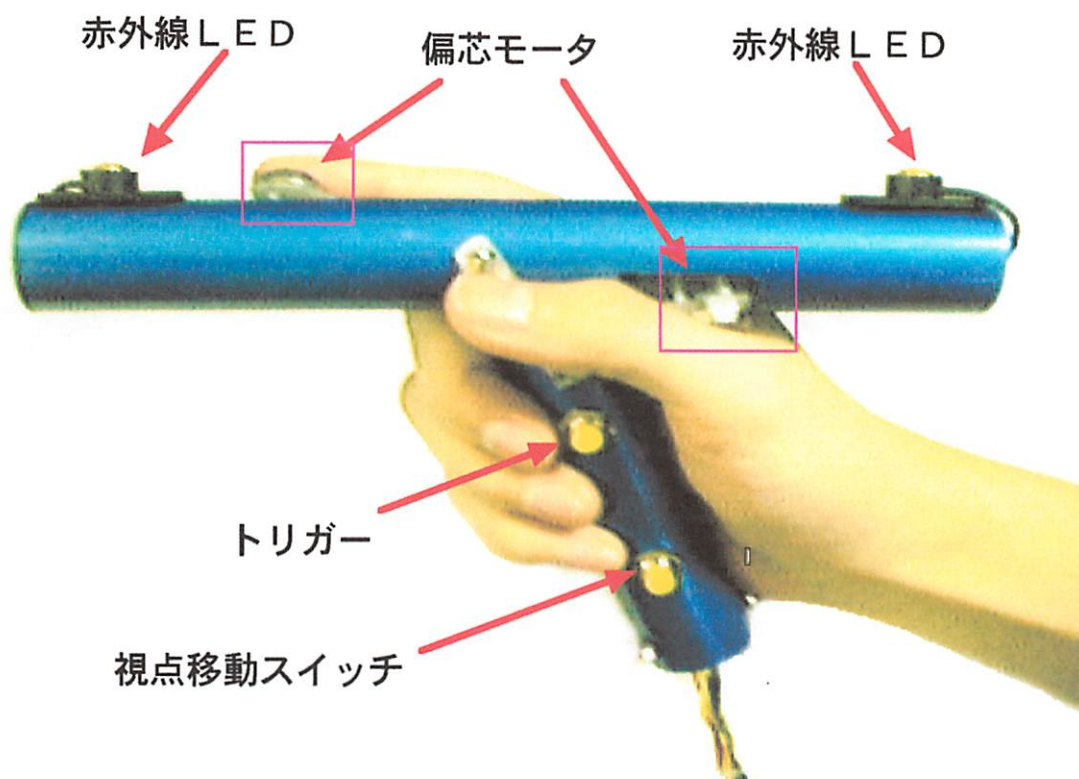
実験によって得られた結果から、画像との対話への応用を考え、アミューズメント応用として、PSDと振動子をスリッパに組み込んだ「Fantastic Phatom Slipper」を製作した。

#### 5-3 考察

##### 5-3-1 振動子の特性

画像との対話を考える上で、振動子の特性はまず調べるべき基礎情報といえる。本研究ではエアポンプ用電磁振動子と、携帯電話用偏芯モータの2種類を使用した。後者の偏芯モータの方が画像との対話には応用しやすいという結果を得た。その理由として、電磁振動子に比べて強

【修士学位論文】皮膚感覚のファントムセンセーションと画像との対話への応用 [9662005] Akihiko Shirai  
い振動強度と、小型軽量で扱いやすい点があげられる。特に、電磁振動子による試作デバイス【Fig.2-4-2】に比べ、偏芯モータによるデバイス【Fig.5-1】は簡易に安定した振動を提示することが出来る。



【Fig.5-1：偏芯モータによる仮想工具】

しかし、どちらの振動子においても解決すべき問題が存在する。それは人体との接触点の改良である。刺激提示を行う部位は手掌部や足裏といった比較的圧のかかりやすい部位である。このような部位、特に足裏では通常30Kg重以上の圧がかかるため、振動子の振動が抑制される傾向にある。これを本研究ではゴム板を利用することにより軽減しているが、より有効な解決策が望まれる。

また振動子の特性としては4個の振動子を利用した、足裏2次元PhSにおいても重要な問題点が存在する。4個の振動子の振動特性を同様に保たなければならないのは必須条件であるが、さらに【Fig.3-11】のよ

【修士学位論文】皮膚感覚のファントムセンセーションと画像との対話への応用 [9662005] Akihiko Shirai  
うな圧の違いが足裏には存在する。今回は離れた4点を利用して2次元PhSの生起を明確に測定したいという目的があったため、「爪先一踵」を利用したが、今回利用した踵は振動提示に向いているとは言いがたい。踵は他の部位に比べ、体重がかかる比率が高く、他の部位に比べ皮膚が角質化している。これでは他の柔らかい部分に比べ振動知覚特性に違いが出る可能性が大きくなる。またこの要因は【Fig.3-12】の結果等に現れている。

これらの要因を明確にするため、足裏の各部位において振動知覚閾を手掌部における【Fig.2-3-4】と同様な手法で測定する事が有効と思われる。しかし人間の足裏は、土踏まず部位の形状の異なり等からも判断できるように、個人差が大きいため万人に対し一般的に有効な部位を選出するのは難しい。

そのため足裏だけでなく上部、足の甲も提示部位の候補に上げることが解決策のひとつである。この部位は前述の体重の圧を受けることもなく、スリッパインターフェイスの赤外線LEDが設置されている部位でもあるので、PhSが有効に生起するのであれば3次元PhSへの展開も含め、応用の可能性は高い。

### 5-3-2 振動量の算出方法

2次元PhSによる方向提示を含め、本研究で最も重要な要素のひとつである振動量の算出方法であるが、これはまだ多くの可能性を持っていると言える。

特に足裏2次元PhSについて、他の配置で3個以上の振動子を用いた場合の各振動子の振動量の算出法や、今回用いた方向/回転提示以外の疑似触覚情報提示の種類や方法、足裏の刺激知覚量の違いを考慮に入れ

【修士学位論文】 皮膚感覚のファントムセンセーションと画像との対話への応用 [9662005] Akihiko Shirai  
た振動量の算出等には多くの可能性が残されている。

<第5章おわり>



## 参考文献

- [1]泉 武博：3次元映像の基礎，NHK放送技術研究所、オーム社，1995.
- [2]H.Iwata:Advanced Reality with Force-Feedback:Development of Desktop Virtual Space with Compact Master Manipulator, Comput. Graphics, vol.24, no.4, 165-170,1990.
- [3]PHANToM,<http://www.tradepia.or.jp/nevc/advanced/vr/image/phantomt.jpg>
- [4]佐藤誠、平田幸広、河原田弘：空間インターフェイス装置SPIDARの提案、電子情報通信学会論文誌、vol.J74-D-II、887-894、1991.
- [5]Cyber Touch,<http://www.solidray.co.jp/images/ct3.gif>
- [6]市川・大頭・鳥居・和気（編）：視覚障害とその代行技術，名古屋大学出版会(1984)
- [7]星宮・泉・半田：“FESにおける感覚フィードバック”，バイオメカニズム学会誌，Vol.12, No.1, pp.8-15 (1988)
- [8]G.von Békésy:Newral Funneling along the Skin and between the Inner and Outer Hair Cells of the Cochlea, Jour. Acoust. Soc. Amer., vol.31, no.9, 1236-1249,1959.
- [9]泉・藤井・星宮・半田：“麻痺上肢補助における感覚フィードバックのための移動感覚の呈示方式”，電気通信学会論文誌，Vol.J 70-D, No.8, pp.1625-1632 (1987)
- [10]白井暁彦、久米祐一郎、津田元久、畑田豊彦：皮膚感覚のファントムセンセーションを用いた3次元画像との対話システム，信学技報，IE96-119,1997.
- [11]星宮望：“C-13 生体工学”，昭光堂，ISBN4-7856-0144-2, p59,p80-82

【修士学位論文】 皮膚感覚のファントムセンセーションと画像との対話への応用 [9662005] Akihiko Shirai

[12]Talbot, Darian-Smith, Kornhuber, & Mountcastle, 1968;

Hohansson, Landstrom, & Lundstrom, 1982

[13]R.S.Johanson, U.Landstorm: Responses of Mechanoreceptive Afferent Units in the Glabrous Skin of the Human Hand to Sinusoidal Skin Displacements, Brain Res., vol.224, 17-25, 1982

[14]和気典二、清水豊：皮膚感覚刺激とその測定法,大山正他編,新編感覚・知覚心理学ハンドブック,誠信書房,p1232,1994

[15]白井暁彦、久米祐一郎、津田元久、畑田豊彦：光学的3次元位置検出法を用いたリアルタイム人間動作入力デバイス、テレビジョン学会技術報告、vol.30,no.7,21-26,1996.

[16]山田貴幸、山本慶一：ファントムセンセーションによる仮想環境下における作業効率の改善について、1997年度東京工芸大学光工学科卒業論文

[17]谷江和雄：電気刺激による生体への情報伝達に関する研究、機械技術研究所報告、106号、1980.

[18]磯部正利：偏芯振動モーターを用いた触覚のファントムセンセーション、1997年度東京工芸大学光工学科卒業論文

★以下の関連する研究報告については付録として添付した。

- ・ 光学的3次元位置検出法を用いたリアルタイム人間動作入力デバイス  
(テレビジョン学会技術報告、vol.30,no.7,21-26,1996)
- ・ 皮膚感覚のファントムセンセーションを用いた  
3次元画像との対話システム (信学技報,IE96-119,1997-02)
- ・ 足裏のファントムセンセーションとその応用  
(日本バーチャルリアリティ学会第2回大会論文集1997年9月)
- ・ ファンタスティック・ファントム・スリッパ  
(日本バーチャルリアリティ学会第2回大会論文集1997年9月)
- ・ 2台の傾斜対向配置PSDカメラによる手の形状認識【共著】  
(日本バーチャルリアリティ学会第2回大会論文集1997年9月)