

平成18年度

卒業研究論文

VR環境における振動子による  
擬似的な触力覚表現に関する検討

指導教官

岩田 彰 教授

黒柳 奨 助教授

舟橋 健司 助教授

白石 義明 助教授

名古屋工業大学 工学部 電気情報工学科

平成14年度入学 14217650 番

森 万純

目次	
第1章 はじめに.....	1
第2章 ヒトの生理.....	3
2.1 ヒトの感覚.....	4
2.1.1 感覚受容器.....	4
2.1.2 触覚・圧覚.....	5
2.1.3 温度感覚.....	6
2.1.4 深部感覚.....	7
2.2 寒冷時の体温調節.....	8
2.3 身震い.....	8
2.4 静脈血の流れ.....	9
第3章 振動子による表現.....	10
3.1 振動の利用.....	10
第4章 実験システム.....	14
4.1 振動グローブ.....	14
第5章 実験及び結果.....	16
5.1 実験1：振動パターンによる臨場感.....	17
5.1.1 実験方法.....	18
5.1.1.1 立方体を触る.....	18
5.1.1.2 円柱を握る.....	19
5.1.2 結果.....	20
5.1.3 考察.....	21
5.2 実験2：触れたと認識した位置と物体表面のずれ.....	22
5.2.1 実験方法.....	22
5.2.2 結果.....	22
5.2.3 考察.....	23
5.3 実験3：身震い.....	24
5.3.1 実験方法.....	24
5.3.2 結果.....	25
5.3.3 考察.....	25
5.4 実験を通しての考察.....	25
第6章 むすび.....	27
参考文献.....	25
謝辞.....	26

## 第1章

### はじめに

バーチャルリアリティ (Virtual Reality : VR) 技術とは、コンピュータによって作り出された世界と現実世界を結びつけるために、物理的には存在しないものを本質的あるいは効果として、その存在を人間の感覚器官に知覚させる技術である[1][2]。

VRを現実に近い表現方法として、かつては視覚・聴覚が主に用いられていた。コンピュータの性能向上により3次元CGはインターネット上でも利用が可能になっている。またアップルコンピュータ社 QuickTime VR では画像を結合して球体として表し、360度の周囲をなめらかな操作感で見渡すことができる[1]。

近年、触力覚フィードバック装置が開発され利用されるようになってきた[3]。形状を変化させることで直接触覚に訴えかけるものや、体験者に実際に力としてフィードバックを与えるものがある。現実にも物に触れたときなどに感じている反力をそのまま力として表現することができるので、反力を感じる体験を再現することに幅広く利用することができる。しかし反力を生み出すには人が押した力で押し返す必要がある。そのため触力覚装置には反力を与えるための支えが必要であり、加わる力と反力の増大に伴いその力を生み出し支えるための触力覚装置には土台も大きく、かつ重みのあるものが必要であった。必然的に規模は大きくなり、さらに土台から体験者まで反力を伝えるためのアームやワイヤーによって操作が制限され扱いが複雑であった。さらにコストも大きくなりがちで一般家庭にまで普及はしていない。

一般家庭に普及させるのに必要な小型かつ低価格を実現し、触覚に刺激を与えられるものの1つに振動がある。

振動子は振動を利用したマッサージ機に使用されている。また電車やコンサートホールといった人が集まる場所で移動通信機器の呼び出し音

が周囲の迷惑にならないように、音に頼らずに利用者に着信を伝える方法としてポケットベルに搭載された。ポケットベルは携帯電話への移り変わり、これらの機器の広い普及と共に振動子も一般へと広く浸透した。さらにゲームの分野では、携帯電話のアラームの機能とは異なる臨場感を高める効果によって多くの機種に搭載されている。振動子を利用した製品も数多く販売されていることから、物が震えることに対して人が違和感を感じることなく受け入れているという現状がうかがえる。

振動によるマッサージやアラームの効果、さらにゲームでは振動によって臨場感を高める効果が確認され、振動子はすでに一般家庭にも普及している。しかしその利用は衝撃や振動そのものの表現に限られており、表現としてもパターン化されてしまっている。そこで振動の可能性を広げるために新たな表現対象を検討する。

本研究では物を触る・握るといった今まで触力覚フィードバック装置により反力として知覚させていたものの代用として、物との接触を振動を用いて体験者に知覚させることを目的とする。ただし振動は視覚フィードバックと組み合わせた場合の補助的な効果に着目し、人に意識させない程度の弱い振動を与えるものとする。ディスプレイ上の仮想手を操作して立方体を触る、円柱を握るときの臨場感に対する評価実験を行う。

さらに触力覚の新たな表現として外部からの振動を自身の身震いと錯覚させ、寒さ・冷たさを表現することを検討する。身震いは体温調節のために恒温動物に備わった機能で、寒冷暴露時に骨格筋が収縮することである。筋は収縮することで熱を産生し、血液が熱を伝えることで体の中枢の温度を保つ重要な反応である。この身震いを錯覚させるために振動を用いた評価実験を行う。

## 第2章

### ヒトの生理

人間の体は外部からの刺激を感覚として捉え、随意的あるいは不随意的な反応を起こす。現実とは刺激から反応までの全てが統括され、その上で自然に感じる事ができている。VR がより現実に近づき、現実とのギャップを埋めるためには感覚を再現できることが不可欠である。

しかし刺激としては正しくとも、刺激情報を正しく処理できないときに人間は錯覚を起こす。さらにエッシャーの「滝」(図 2.1、文献[4])のように錯覚を起こすとされている絵はいくつも存在し、少なくとも人間においては錯覚を起こすメカニズムが共通していることを表している。

視覚で一般に用いられている錯覚は、人間の誤処理によるものである。そこで触覚の分野において、ある刺激を外部から与えたとき本来生み出されるべき感覚とは異なる感覚が得られるか、錯覚を制御することが可能か検討する。



M.C.ESCHER 「滝」

引用：アンシャンテ株式会社

図 2.1 視覚情報により錯覚させる絵

## 2.1 ヒトの感覚

外部からのエネルギーを刺激として最初に受けるのは、体の表面付近にある受容器（感覚器）である。受容器には種類によって存在する場所や反応するエネルギーも決まっている。受容器に特定のエネルギーが加わることで発生したインパルスは第一次・第二次ニューロンにより中枢神経に伝えられ、中枢神経で何度かシナプス伝達を繰り返した後に第三次ニューロンにより大脳皮質に至り感覚を示すが、インパルスの全てが大脳皮質にまで到達して感覚となるわけではない[5][6]。

受容器が体の限られた部分にしか存在しない視覚、聴覚、味覚、嗅覚、平衡感覚を特殊感覚という。触覚、痛覚は体性感覚のうちの皮膚感覚であるが、皮膚感覚には圧覚、温覚、冷覚も含まれ、さらに深部感覚として筋、腱、関節の感覚、内臓感覚としての飢餓感、乾き、吐き気等があり感覚は必ずしも「五感」として表すことはできない[7]。

### 2.1.1 感覚受容器

受容器は神経細胞あるいは活動電位を発生させる特殊な細胞であるが、非神経性の細胞と共に感覚器を構成し、特定の刺激に対して小さな閾値でエネルギーに反応する[8]。受容器における適当刺激を表 2.1 に示す。なお感覚の閾値は感覚神経順応、慣れ、注意集中、比較によって変化する[5]。

表 2.1 感覚受容器と適当刺激 [5][6]

適当刺激		受容器	感覚
電磁波	温度	自由神経末端・クラウゼ小体	温覚・冷覚
	光	杆体細胞・錐体細胞	視覚
機械的	音	有毛細胞	聴覚

刺激	加速度	有毛細胞	前庭感覚
	圧力	マイスネル小体・パチニ小体	触覚・圧覚
	張力	筋紡錘・腱紡錘	深部感覚
侵害刺激 発痛物質		自由神経末端	痛覚

順応とは受容器に刺激加え続けても、インパルスの発射頻度が時間と共に減少していくことである[8]。受容器により順応の速さや受容野が異なり、順応の速い受容器が感覚を捉えるのは刺激を加えたときと取り去ったときのみである。

### 2.1.2 触覚・圧覚

触覚により触れた物体の表面や内部の様子を把握し、適切に把持するための力を加えることが可能になる。触覚に関する受容器は加齢とともに変性するため、触感覚の感度も年々低下する[9]。

触覚とは外部物体との接触等により皮膚の歪みが機械的受容器の刺激となり発生するが、瞬間的なものが触覚、持続的なものが圧覚である[10]。

しかし触覚と圧覚を厳密に分けることは難しく、触圧覚として同一種に扱われる。触圧覚に関係する受容器は、メルケル触版、ルフィニ終末、マイスネル小体、パチニ小体、毛包受容器である。

皮膚には触覚を感じる触点が存在し、体の部位によって触点の数および触覚の閾値は異なる（表 2.2）。触覚の閾値とはどのくらいの圧が加わった時に触覚として認識できるかを表したものである。触点は指に多く存在し、体幹には少ない。触点の数が多い部分では触覚の閾値は小さく、逆に触点の数が少ない部分では触覚の閾値は大きくなっている。

表 2.2 体の部位における触点 [11][7]

部位	触点の数 (/cm <sup>2</sup> )	閾値 (gm/mm <sup>2</sup> )
前額	50	3
鼻	100	2
指(掌面)	100-135	3
指(背面)	9-30	—
手背	14-28	12
腕	16-27	7
脚	11-24	7
腹部	—	26
腰部	—	28

触覚の効果の1つに加重がある[11]。これは同時に複数の触点に刺激が与えられた場合に、1点あたりの触覚の閾値が低下するというものである。刺激の与え方により弱い刺激でも強い刺激と同等の効果を加重で得ることができる。

### 2.1.3 温度感覚

皮膚表面には温、冷のどちらかのエネルギーに反応する点として温点と冷点が互いに離れて存在し、両点の相互作用によって温度を感じることができる。

外部からの温度はたいてい皮膚、口腔、鼻腔、咽頭でとらえる[6]。しかし普通粘膜は温度感覚を感じることができず、粘膜で温度を捕らえることができるのは口腔、咽頭、肛門だけであり、また冷点はあるが温点はない部位として鼻粘膜、角膜等がある[7]。

冷点の数は温点の4～10倍あり、暑さは温点と冷点が同時に刺激を受けることで感じている。温受容器は30℃～45℃、冷受容器は10℃



～38℃で反応する[8]。32.5℃～33.5℃は無感温度で温度感覚は生じないが、17℃以下あるいは43度以上になると温度ではなく痛みを感じる場合がある[6][8]。また冷点は温点よりも皮膚表面に近いところにあるため45℃以上の高温の刺激は冷点を刺激し、冷感を引き起こすことがある[7]。温点と冷点の数を表2.3に示す。

表 2.3 cm<sup>2</sup>あたりの温冷点の数 [11]

部位	温点	冷点
前額	0.6	5.5-8
鼻	1	8-13
口	—	16-19
顔	1.7	8-9
胸	0.3	9-10
前腕	0.3-0.4	6-7
手背	0.5	7.5
手掌	0.4	1-5
指 (背面)	1.7	7-9
指 (掌面)	1.6	2-4
大腿	0.4	4-5

#### 2.1.4 深部感覚

皮下、筋、腱、筋膜、骨膜、関節、胸膜、腹膜などの受容器によって得られる体の位置、動き、力の感覚で、筋感覚や振動感覚が含まれる[5][7]。

筋感覚とは筋の伸縮を感じる受容器である筋紡錘や腱にかかる張力を感じるゴルジ腱器官からなる[6]。筋紡錘は筋の変形や振動に反応するが、腕や脚では筋紡錘よりむしろ皮膚感覚に関する受容体が容易に興奮する。そのため筋紡錘は限られた筋の伸張に敏感であるのに対し、筋の表層の

広い部分の機械的振動は皮膚受容器が敏感に反応する。

振動感覚とは継続的かつ律動的な圧刺激のパターンであり、数10～数100Hzの繰り返し刺激によって起こる[10]。表皮の触・圧受容器と深部の圧受容器が関係するが、骨の上に刺激を与えた場合に一番よく感じられる[5][8]。

## 2.2 寒冷時の体温調節

恒温動物は体温を一定に保つための調節機能を視床下部に持ち、寒冷暴露時には熱の損失を防ぐ一方で熱を産生する。熱を体内に保つ働きは行動性体温調節と自立性体温調節に分けられる[10]。行動性体温調節とは体を丸めることで体表面積を減らしたり、厚着をして熱の拡散を防ぐといった随意的な行動に基づく体温調節で、冬眠や巣作りも含まれる。一方自立性体温調節とは不随意的に起こる反応で、ふるえによる骨格筋の熱産生がある。さらにとりはだによって皮膚に密着する空気層の厚さを増加させ、皮膚血管の収縮により熱の拡散を防ぐものなどがある[5]。

四肢では動脈と平行して深層性の静脈である伴行静脈が走行している。対向流交換によって四肢に向かう暖かい動脈の熱が四肢から戻る冷たい静脈に移動し、身体の熱を温存する[8]。

## 2.3 身震い

身震いとは寒冷暴露時にみられる耐寒反応の一つで顎、胸、四肢背筋等によく現れる[12]。骨格筋の不随意的な収縮により熱を産生するが、ある程度随意的に抑制することが可能で、骨格運動は伴わない。視床下部に刺激を与えても他の耐寒反応と共に現れる[7]。震えの頻度はタイプに

より異なり表 2.4 に示す。

表 2.4 頻度の違いによる震えのタイプ [13]

頻度 (H z)	震えのタイプ
5-8	本態性
7-8	震え、恐怖
8-12	生理的

## 2.4 静脈血の流れ

静脈は全身の皮下に広がる皮静脈と深部の静脈に分けられ、深部の静脈は原則として動脈と並んでいる[7]。上体を流れる太い血管には左右の腕頭静脈並びに頸静脈と鎖骨下静脈が合流した上大静脈がある[14]。腕頭静脈は鎖骨と肩甲骨の間を通り、上腕二頭筋と上腕三頭筋の間を流れる。また腕頭静脈・頸静脈が流れている部位の表皮に近い筋肉が僧帽筋であり、項から肩甲部までを広く覆う筋肉である。

## 第3章

### 振動子による表現

振動子（バイブレータ）はすでに日常で幅広く利用されているが、携帯電話やアラームのように事前に取り決めた振動パターンによって、利用者に状況を知らせているだけである。ゲームでは視覚・聴覚・触覚情報を組み合わせているが、衝撃、ショック、振動そのもののような表現に限定されている。

本研究では何かを触る等の感覚を事前の取り決めなどなしに、振動と視覚情報を組み合わせることにより体験者に知覚させることを検討する。

#### 3.1 振動の利用

一般に普及している小型の振動子は大きな振動を生み出すことができないため、振動子に接した部分で振動が吸収されてしまう。そのため振動子自体に触れている部分でしか振動を知覚することができない。つまり振動を与えたい部位に局所的に与えることができ、周囲に関係なく利用者のみに情報を伝えることができる。

小型化が可能だが振動の強さは振動子自体の大きさに依存する部分が多い。

すでに日常で利用されている振動子は、目的の違いによって以下の3種類に分類することができる。

- ・ ゲーム機
- ・ アラーム
- ・ 振動（ふるえ）の利用

ゲーム機は家庭用のものと、ゲームセンターに置かれているアーケードゲームに大きく分けられる。さらに家庭用のゲーム機は据え置き型としてテレビに接続してプレイするものと、コントローラーと画面が一体型した携帯用のゲーム機に分けられる。さらに近年では携帯電話でのゲーム利用が普及し、元々アラーム目的に搭載されていた振動子がゲームにも利用されるようになってきている。

1990年代後半に振動パックを外付けで拡張するコントローラー（図 3.1、文献[15]）が発売されて以来、現在ではほとんどの家庭用据え置き型ゲーム機ではコントローラーに振動子が内蔵されている（図 3.2、文献[15][16][17]）。携帯用ゲーム機ではカートリッジに振動子を組み込んでおり、振動機能がないカートリッジに比べ厚みがある。このため振動子を共有することができず、携帯型の振動対応ソフトは据え置き型に比べて少ない。しかしカートリッジの差込口を2つ持つ機器（図 3.3、文献[15]）では振動カートリッジとソフトのカートリッジを同時に差し込むことができるため、据え置き型ゲーム機に近い性質を持っている。アーケードゲーム機では振動がレースゲームやシューティングゲームで使用されている。車のエンジンをかけたときの小刻みな振動や、銃の引き金を引いた時の反動を振動として表現している。



引用:Nintendo

図 3.1 振動パックおよび拡張コントローラー



引用:Nintendo、PlayStation.com(Japan)、XBOX

図 3.2 振動子内臓コントローラ



図 3.3 複数のカートリッジ差込口を持つ携帯用ゲーム機

視覚・聴覚情報と振動による触覚情報を組み合わせることで振動はアシスト的な役割をし、臨場感・没入感が増し操作性を高める効果がある。

アラームは利用者に変化を知らせるための道具である。当初は音のみで知らせていたものが、音と振動の併用あるいは選択できるようになってきている。例としては、携帯電話、目覚まし時計、腕時計、キッチンタイマー、体温計、ダイブコンピュータ、ガス探知機等がある。

振動は皮膚感覚ではなく振動感覚として捉えられる。皮膚の触圧覚だけでなく深部の圧覚も関係しているためマッサージの効果が期待でき、筋肉の凝りをほぐすだけでなく美顔器といった関連製品も多い。さらに電動歯ブラシや掃除機のフィルターが目詰まりを防ぐ物など応用範囲が広い。

## 第4章

### 実験システム

ゲームに用いられている振動子には臨場感を高める効果があるが、その表現範囲は限られている。そこで新たな表現方法として物に触れたときの触覚を振動を用いて知覚させる。

臨場感の表現には振動を視覚情報と組み合わせる必要がある。物に触る際に実際に触れるのは手であり、より現実に近い感覚を得るために入力装置にはディスプレイに表示したCGの手を実際の手の動きに連動させられるグローブを用いる。

ディスプレイには手と一緒に触れる対象となる物体も表示し、触る・握る感覚を振動で表現する。物体は様々な方面から触れることができる平面として立方体、さらに握る際に角に当たる感覚を考慮しなくてすむ円柱とする。

#### 4.1 振動グローブ

入力装置を兼ねた振動を出力できる装置として Immersion 社 CyberTouch を使用した。グローブタイプの装置で、各指の関節の曲げ角度および手首の角度を取得することで指先や間接の座標位置を求めることができる。

手の平と各指の第2関節と第3間接の間に振動子を取り付けられている。各指の振動子は操作性を高めるため外側についている(図4.1)。





図 4.1 グローブに取り付けられた振動子

各振動子は独立して動き、複数個を同時に動かすことも可能である。振動強度は0—255の範囲で決定することができる。ただし強さ0は振動オフである。感覚の閾値は注意集中によっても変化するため、1—64での小さな振動でも感じられる最小値は状況によって変化する。何も作業を行わず振動を知覚することだけに集中した時にかすかに知覚できるかの範囲は20—30であり、指を動かしながら振動を感じることができるかどうかの範囲は50—60である[18]。文献[18]では画面に表示された紙をはさみを用いて切断する際の振動として、一般に十分知覚する強さとして76、わずかに知覚する強さとして66と経験的に定めていた。物体に触れる衝撃ははさみで紙を切ることと比べると小さいことから、振動の強さは以下のように定める。

- わずかに知覚する強さ      55
- 十分知覚する強さ          65

## 第5章

### 実験及び結果

第4章で述べた CyberTouch を用いてディスプレイに表示された CG の手を操作し、物に触る・握る動作を行うときの振動の効果を検討する。なお CG の手はグローブと連動して動く。図 5.1 図 5.2 に実験の様子を示す。

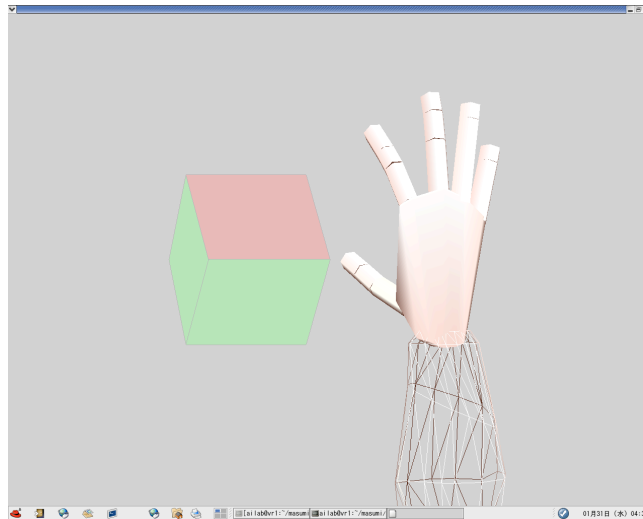


図 5.1 立方体に触る

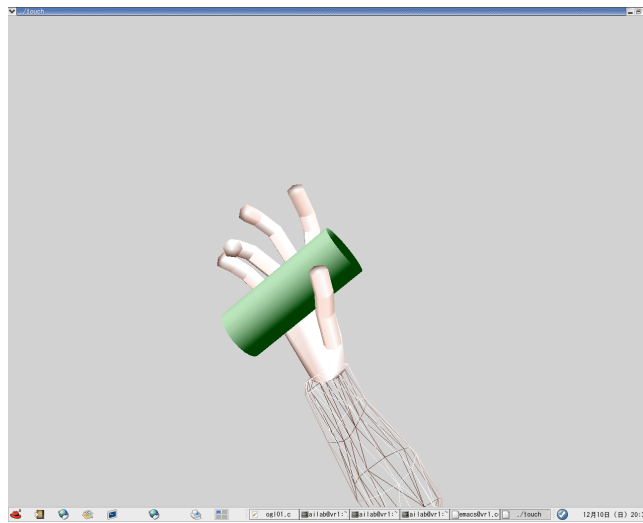


図 5.2 円柱を握る

$f_1 \sim f_5$  及び  $h$  は振動の強さを表す。記号と対応する指及び手の平は表 5.1 のように定める。

表 5.1 記号と対応する部位

$f_1$	親指
$f_2$	人差し指
$f_3$	中指
$f_4$	薬指
$f_5$	小指
$h$	手の平

## 5.1 実験 1 : 振動パターンによる臨場感

物を触る・物を握る動作に対して、振動の与え方により臨場感を高める効果に違いがあるのかを検討する。

### 5.1.1 実験方法

被験者には立方体に触れる・円柱を握る動作をしてもらう。あらかじめグローブに振動を与える場合また振動を与えない場合があることを伝えて、振動パターンを変えながら臨場感を7段階で評価してもらう。

被験者には立方体を表示した画面において、グローブと画面に表示された手が連動することを確認してもらい、グローブの扱いに十分慣れたと判断してから実験を行った。立方体を触る実験を行った後、円柱を握る動作の練習を行い、円柱を握る実験を行った。

#### 5.1.1.1 立方体を触る

立方体は上面に触れることとする。表 5.2 に示す8種類の振動パターンを10人に対して各2回ずつ、順番は被験者ごとに変えランダムに計16回行った。

物体に近づけたときに接する指は、より物体に近い指だと考え人差し指、中指、薬指、小指を振動する指とし、4本が振動する場合と振動する指を減らした場合に分けた。振動を与える場所は指と手の平とし、振動を与える指には表 5.2 に示す2本あるいは4本の指全てに同じ強さの振動を与える。

触れる対象となる立方体の位置・大きさ・向きは全てのパターンで統一する。

表 5.2 振動パターン：立方体を触る

$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$	h	特徴
0	65	65	65	65	55	指：強 / 手：弱
0	65	65	0	0	55	
0	55	55	55	55	65	指：弱 / 手： 強
0	55	55	0	0	65	
0	65	65	65	65	0	指のみ

0	65	65	0	0	0	
0	0	0	0	0	65	手のみ
0	0	0	0	0	0	なし

振動させるタイミングは、人差し指・中指・薬指・小指の先端のうち、どれか1つでも物体に触れた時点とする。

### 5.1.1.2 円柱を握る

指の動きに注目し、握ることだけに集中してもらうために画面中のCGの手及び腕の位置を固定し、指の動きだけで円柱を握る。表 5.3 に示す8種類の振動パターンを10人に対して各2回ずつ、順番は被験者ごとに変えランダムに計16回行った。振動を与える場所は指と手の平とし、振動を与える指には表 5.3 に示す3本あるいは4本の指全てに同じ強さの振動を与える。

触れる対象となる円柱の位置・大きさ・向き及び固定したCGの手の位置は全てのパターンで統一する。

表 5.3 振動パターン：円柱を握る

$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$	h	特徴
0	65	65	65	65	55	指：強 / 手： 弱
65	65	65	0	0	55	
0	55	55	55	55	65	指：弱 / 手： 強
55	55	55	0	0	65	
0	65	65	65	65	0	指のみ
65	65	65	0	0	0	
0	0	0	0	0	65	手のみ
0	0	0	0	0	0	なし

振動させるタイミングは、人差し指・中指・薬指・小指の先端のうち、

どれか1つでも物体に触れた時点とする。

### 5.1.2 結果

振動パターンごとの評価の平均を表 5.4 表 5.5 に示す。

振動の強さの和  $S$  と評価平均の相関を図 5.3 に示す。振動の強さの和は式 5.1 により求めた。

$$S = \sum_{i=1}^5 f_i + h \quad (5.1)$$

表 5.4 評価結果：立方体を触る

$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$	$h$	評価平均
0	0	0	0	0	65	3.80
0	65	65	0	0	55	3.65
0	65	65	0	0	0	3.35
0	65	65	65	65	0	3.25
0	65	65	65	65	55	3.10
0	55	55	0	0	65	2.70
0	55	55	55	55	65	2.35
0	0	0	0	0	0	1.20

表 5.5 評価結果：円柱を握る

$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$	$h$	評価平均
0	0	0	0	0	65	3.75
65	65	65	0	0	0	3.70
65	65	65	0	0	55	2.85
55	55	55	0	0	65	2.35

0	65	65	65	65	55	1.85
0	65	65	65	65	0	1.75
0	55	55	55	55	65	1.65
0	0	0	0	0	0	1.20

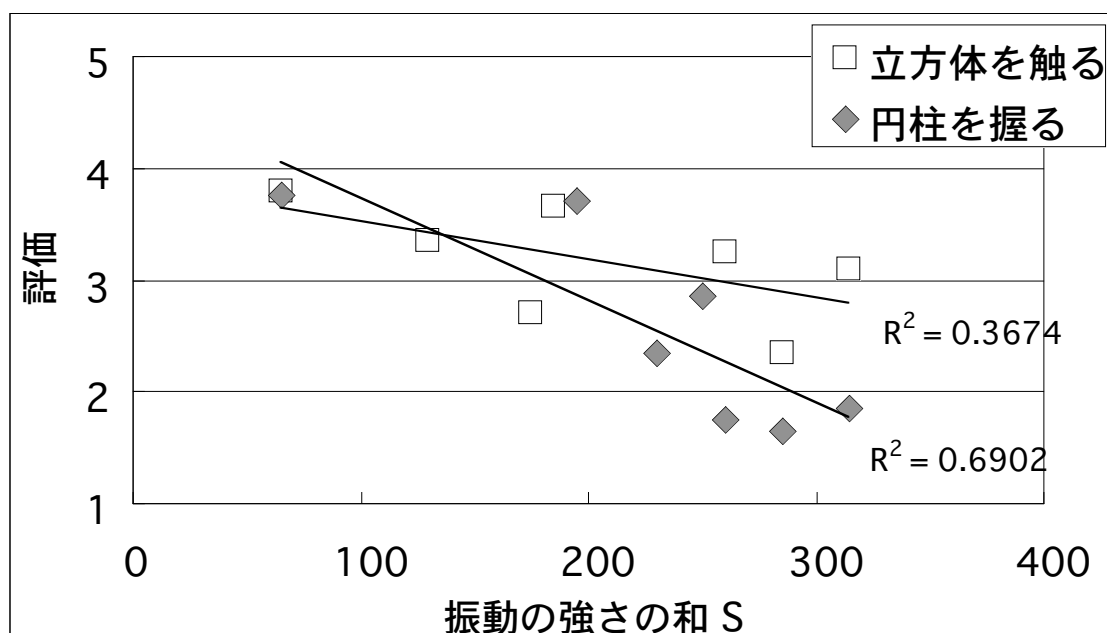


図 5.3 振動の強さの和と評価平均の関係

### 5.1.3 考察

表 5.4 表 5.5 より、振動を与えると評価が高くなっていることから、振動による臨場感を増す効果が確認できた。手の平のみに振動を与えた場合が一番評価が高く、薬指と小指に振動を与えた場合、与えない場合と比較して臨場感が下がっている。振動の強さを指ごとに合計した値が少ない方がいい評価となったのは、全体が振るえるのに比べ局所的に振るえた方が加重の影響により手全体に加わる力が小さくなる。そのため感じる衝撃としては小さくなり自然に触れる動作を連想できたものだと考える。

## 5.2 実験2：触れたと認識した位置と物体表面のずれ

5.1の実験より振動による臨場感を高める効果が確認できた。そこで振動がいかに関与するのかを、触れたと判断した時の手の位置と物体の距離から考察する。

### 5.2.1 実験方法

被験者には立方体の下からと正面から物体に触れてもらい、触れたと判断したところでスペースキーを押してもらいグローブの位置データを取得した。

被験者には立方体を表示した画面において、グローブと画面に表示された手が連動することを確認し、グローブの扱いに十分慣れたと判断してから実験を行った。

振動するタイミングは視覚により接触を判断できる部分とできない部分での振動の影響の差を見るために、物体表面と振動面をずらし人差し指・中指・薬指・小指の指先のうちどれかがグローブの厚みを考慮し立方体の1cm外側に近づいたときとする。振動パターンは実験5.1で手の平のみに65の強さの振動を与える場合が一番高い評価が得られることがわかった。そこで振動の与える部位は1パターンとし、振動あり・なしを5回ずつ計10回を5人に対して行った。

### 5.2.2 結果

指が振動範囲の中に入っているときの誤差をプラスとし、振動範囲内の指先と振動範囲の誤差の平均値を求めた。指先（人差し指・中指・薬指・小指）が振動範囲外状態では、誤差をマイナスとし各指先と振動範囲の誤差を求めた。



表 5.6 図 5.4 に認識位置の誤差の平均値と標準偏差を示す。

表 5.6 触れる位置の違いによる認識誤差

	下から		正面	
	振動あり	振動なし	振動あり	振動なし
平均	0.98	3.55	0.01	0.64
標準偏差	1.60	3.63	0.77	0.57

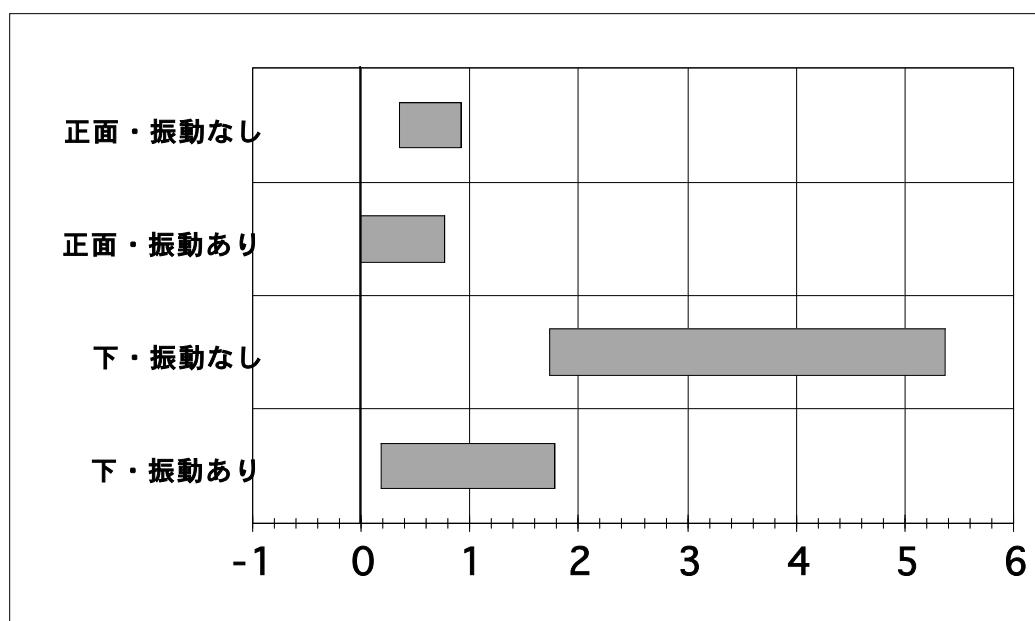


図 5.4 立方体の触る位置による誤差

### 5.2.3 考察

振動があるほうがない場合に比べ標準偏差が小さく、物体表面を認識しやすかったと言える。

正面から触った場合の標準偏差は小さく平均は0付近である。一方、下から触れる場合の標準偏差は大きく平均も大きくなっている。視覚に頼れる部分で誤差が小さくなっていることから視覚による情報を重視し

ていると考えられる。

### 5.3 実験3：身震い

触力覚フィードバックの新たな表現方法として振動を用いて身震いを表現することで、温度感覚の表現を目指す。身震いは体温調節のための不随意反応であるため、人が寒さを認識していなくとも、視床下部が体温調節の必要性を感じたときに起こる。寒冷暴露時に体の中枢部の体温を保つ働きをし、骨格筋の収縮により熱を生み出す働きをする。発生した熱は血液によって体内中枢部に伝えられるため、身震いを起こす部位は上大静脈及び下大静脈付近の筋肉だと予想されることから肩から首まで含んだ背中を覆う僧帽筋に振動を与える。

#### 5.3.1 実験方法

振動子付きグローブを用い背中に振動を与えた。振動を与える位置は図 5.5 の黒丸の位置とし、振動の強さは最大値である 255 とした。

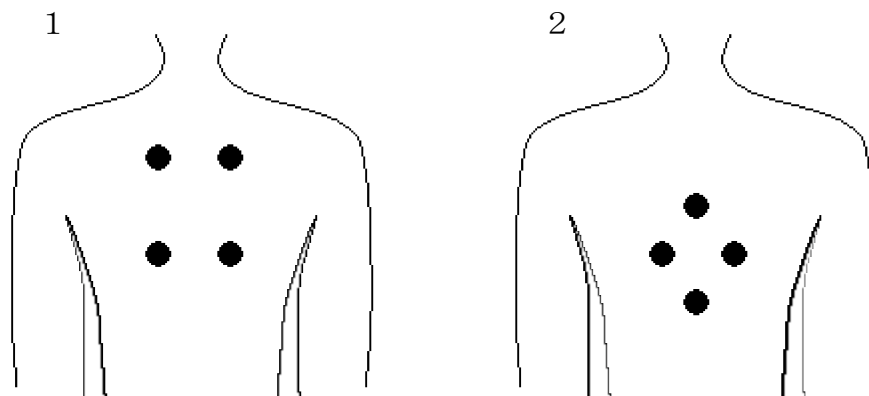


図 5.5 振動子の装着位置

振動子は1つずつ振動させ、振動場所、振動時間、振動と振動の間隔

はランダムとする。被験者には振動をどう感じたかを聞いた。

### 5.3.2 結果

被験者のコメントを表 5.7 に示す。

表 5.7 背中に振動を与えた感覚

被験者	A	B	C	D
マッサージ（低周波治療器・指圧）の弱いもの	○	○	○	○
気持ち悪い・気色悪い	○	○	○	
うにようによ・もぞもぞ・ふるふる		○	○	○
微妙・変	○		○	○
背中に虫がいるみたい		○		
かゆくなりそう		○		

### 5.3.3 考察

背中に振動を与えることでは身震いを表現することはできなかった。触覚の閾値は手に比べて背中是非常に大きい。そのため手に装着するために作られたグローブの振動子では背中に与える振動としては小さすぎ、振動を十分感じさせることができなかった。さらに振動子としてグローブを用いているために最大距離は指を広げた幅にとどまり、広範囲を振動させられなかったことが原因だと思われる。

## 5.4 実験を通しての考察

実験5.1と実験5.2と実験5.3を通して人工現実感と現実とのギャップを埋めることを試みた。

実験5.1と実験5.2では振動により立方体に触れたことをより強く認識できるようになったが、実験5.3では身震いと感じさせることはできなかつた。

振動子付きグローブでは手に振動を与えるには十分でも、他の部位に振動を与えるには振動が小さすぎる。

体の部位によって適する振動の大きさが異なり、対象とする部位に合わせた振動の大きさを選択することが触力覚表現にとって重要だと思われる。

## 第6章

### むすび

振動は体の部位に対応させることより現実感を与えるのに効果的である。

手に適する振動を与えた場合、触るという視覚情報と組み合わせることで振動を触った感じだと捉えた人が半数以上おり、臨場感の評価も振動の有効性を示していた。

振動で触覚を表すことができるが、そのためには表現対象に合った体の部位を振動させること、振動の強さは表現対象及び体の部位に適す強さとすること、表現対象に合った振動パターンにすることが重要だと思われる。振動子はすでに一般に普及している。振動子に心理的抵抗を持たないという反面、はっきりとした振動を与えると感覚の表現以前に他の使用方が先にイメージされてしまう。

身震いに関しては背中に適切な大きさ及び周波数の振動を与え、範囲と振動子の個数も考慮することで表現できる可能性がある。また筋肉は電気刺激を与えると収縮する。低周波治療器のような一般家庭に普及している機器でも筋肉を収縮させるだけの電位を生むことができる。そのため外部からの振動だけではなく、直接筋肉を振動させる手法を検討することで身震いの制御並びに寒さ冷たさといった温度感覚まで表現することが可能になるかもしれない。また温度は皮膚表面だけでなく、口・鼻の粘膜で感じている部分大きい。メントールなどの清涼剤は冷点の刺激に関する物質と考えられ、直接的に感覚点を刺激する物質を組み合わせることで身震いと寒冷感覚を結びつけやすくなるだろう。

今までに利用されている触力覚フィードバック装置の代用として、また新たな振動子による表現の可能性を見出すことができた。新たな手法による触力学フィードバックの提案により、VRの可能性はますます一般家庭へと広がると思われる。

## 参考文献

- [1] 野村淳二, 澤田一哉. ソフトコンピューティングシリーズ 10 バーチャルリアリティ. 朝倉書店, 1997.
- [2] 舘\_. バーチャルリアリティの起訴1人工現実感の基礎. 培風館, 2000.
- [3] 第13回「大学と科学」公開シンポジウム組織委員会. バーチャルリアリティ人工現実感と人間のかかわりを考える. 技報堂, 1999.
- [4] アンシャンテ株式会社 <http://www.enchantart.com/>
- [5] 真島英信. 生理学. 株式会社金芳堂, 2001.
- [6] 山内昭雄, 鮎川武二. 感覚の地図帳. 株式会社講談社, 2001.
- [7] 山本敏行, 鈴木泰三, 田崎京二. 新しい解剖生理学. 株式会社南江堂, 1999.
- [8] 村田誠四郎. ギャノン生理学. 丸善株式会社, 2006.
- [9] 伊藤文雄. クローズアップ生理学—理学療法士・作業療法士のための生理学—. 財団法人名古屋大学出版会, 1996.
- [10] 森本武利, 彼末一之. やさしい生理学. 株式会社南江堂. 2005.
- [11] 猪飼道夫, 松井秀治, 山岡誠一, 広田公一, 蔵本築. 現代保健体育学体系 13 人体生理学. 大修館書店, 1969.
- [12] 宮村実晴. 最新運動生理学—身体パフォーマンスの科学的基礎—. 真興交易医書出版部, 1996.

- [13] 中村隆一. 臨床運動学. 医歯薬出版株式会社, 2004.
- [14] H.Frick, H.Leonhardt, D.Starck. 人体解剖学ハンドブック. 株式会社西村書店, 2000.
- [15] 任天堂 <http://www.nintendo.co.jp/>
- [16] PlayStation.com(Japan) <http://www.jp.playstation.com/>
- [17] XBOX <http://www.xbox.com/ja-JP/>
- [18] 久保谷太亮. 希薄な職力覚フィードバック環境下における仮想はさみシステムの検討, 2006.

## 謝辞

本研究をすすめるにあたって、日頃から多大な御尽力をいただき、御指導を賜りました名古屋工業大学 岩田 彰 教授、黒柳 奨 助教授、舟橋 健司 助教授、白石 義明 助教授に心から感謝致します。

また、本研究に対して御討論、御協力いただきました岩田・黒柳研究室の皆様へ深く感謝致します。

さらに舟橋研究室のゼミにおいて御討論いただきました皆様、実験にご協力いただきました友人の皆様へ深く感謝いたします。