

平成20年度

卒業研究論文

VR ネットショッピングシステムのための  
物体の大きさ認識に関する調査

指導教員

舟橋 健司 准教授

名古屋工業大学 工学部 情報工学科

平成17年度入学 17115015番

市野 雅久

# 目次

第一章	はじめに	1
第二章	ネットショッピングの実績と今後	4
2.1	国内のインターネットショッピング利用状況	4
2.2	海外のインターネットショッピング利用状況	5
2.3	ネットショッピングの未来	5
第三章	人間の生理	7
3.1	錯覚	7
3.2	触覚の錯覚	9
第四章	触力覚フィードバックによる表現	11
4.1	振動の利用	11
4.2	ヒューマンインターフェイスデバイス	13
第五章	実験システム	16
5.1	実験装置	16
5.2	仮想手のモデル	18
5.3	仮想物体のモデル	18
5.4	仮想手と仮想物体の干渉	19
第六章	実験及び考察	22
6.1	システム構成	24
6.2	実験1:振動による仮想物体と実物体の大きさの比較	24
6.2.1	実験方法	25
6.2.2	結果及び考察	28
6.3	実験2:振動の強さの違いによる硬さ認識の有効性	31
6.3.1	実験方法	31
6.3.2	結果及び考察	32
第七章	むすび	34
	謝辞	36
	参考文献	37

# 第一章

## はじめに

インターネットは多くの人々に利用されるものとなり、もはや社会において無くてはならないものとなっている。素早い情報収集、メールやソーシャルネットワーキングなどを利用した連絡手段としていつでも世界を結んでいる。今では、様々な企業がインターネットを利用した事業を考案し、世界中のインターネットの利用率は急速に伸びている。

なかでも近年急速に利用者が伸びている事業のひとつに、インターネットショッピングがある。これは販売者側も購入者側も様々なメリットがあるためである。まず、商品を購入する立場の消費者は、店に出向く必要がない。これにより移動時間を減らし、わざわざ出向いたのに商品の在庫がなく購入できないことや、開店時刻や閉店時刻を気にする必要がなくなる。さらに、店員と話す必要がないため気軽に買い物することができる。その結果、同じ商品でも様々な店の情報を見ることができ、簡単に値段等の比較ができるという利点もある。一方で、商品販売する立場の店側も、在庫管理における土地代、商品の移動費用、店を建設するための建設費用などを減らすことや、実際に販売する際に必要な従業員の人件費の削減をすることもできる。これらのことから分かるように、一般的にネットショッピングは店頭販売より低価格で購入することができ、買い物の時間を減らすこともできる。こういった理由から利用する消費者も販売店も増えている。

一方で、ネットショッピングならではの問題点も存在する。購入した商品が実際に届いた際、イメージしていた商品と違うことがある。想像していた色と違う、画面上ではあまり見えない部分の形が違う、もう少し小さいかと思っていたが実物は大きかった、もう少し軽いかと思っていたが実物は重かったなどの場合が考えられる。これらは、通信販売を行っている販売者側からの一方的な情報を見るだけで商品を購入しているために生じる問題だと考えられる。

しかし、このようなネットショッピングで生じる問題は、実際に店頭で商品を選んでるように買い物することができれば解決できると考えられる。そこで、商品を選ぶ際にバーチャルリアリティー (Virtual Reality: VR) 技術を利用することを考える。VR 技術とは、コンピュータにおいてデータとして定義された仮想空間内で、ユーザの感覚を刺激することにより実際には存在しない物体を知覚させる技術である[1]。一般的に VR は仮想現実感と訳される。本来のバーチャルの意味は「実体は

ないが、本質的には同じ性質を持っていること」であり、日本語の「仮に想定すること」という意味の仮想とは大きく異なる。VR 技術を用いることで、実際には行うことができないことや、安全面や金銭面の問題で行うことが困難なことも擬似的に行うことができる。現在すでにバーチャルリアリティー技術はゲームやテーマパークのアトラクションなどで利用されており、文献[2][3][4]のように医療の分野まで活躍の場は広がっている。このことから今後さらに発展し人々により身近なものになると考えられる。そこで、この VR 技術を通販において利用する方法を考える。現在ではインターネットやテレビなど様々なメディア媒介を利用した通販があるが、いずれも商品を手にとって触ったり持ったりすることはできない。値段や機能などは文字情報から判断できるが、大きさなどの情報は与えられた数値情報や写真などの視覚情報を利用して購入することになる。この部分で問題が生じるため、視覚や数値だけの情報ではなく、VR 技術を用いて触覚や力覚にも情報与え店頭販売のように商品の選択ができると考えられる。

まず、利用する触力覚フィードバック装置について考える。一般家庭への普及を考慮した場合、比較的安価で安心して使用することが出来るシステムを構築することが必要となる。そこで、現在は携帯電話などでも一般的に使用されている振動子を利用した触力覚フィードバック環境下でのネットショッピングシステムを検討する。さらに利用する際に取り付けや取り外しが容易であることや、物体の大きさ認識を感覚的に行うことができるように、データグローブを用いる。グローブ型デバイスを用いることで各種データを用意するだけで様々な商品に対応することが可能である。

通販における購買対象商品は多岐に渡るが、本研究では携帯電話やデジタルカメラといった片手で扱えるような商品を対象として実験を行う。これらの商品は購入する際に性能を比較することだけでなく、デザインや持ったときの感覚も重要であると考えられるためである。また、携帯電話やデジタルカメラの形は多くのものが直方体に近い形であるため、比較的容易に大きさの識別が可能であり、検証実験に適していると考えられる。

本研究では、ネットショッピングを想定した実験システムを用いて、振動子を利用した希薄は触力覚フィードバック環境下で仮想空間内での仮想物体と実空間内での実物体の大きさの比較が可能であるかを検討する。本研究室ではこれまでに仮想物体同士の大きさを比較する研究を行っており[5][6]、被験者は仮想物体同士の大小を、振動を通して比較可能なことが確認されている。しかし、手の大きさが固定されており、利用者の手の大きさを考慮していなかった。仮想物体と実物体を比較する場合は利用者の手の大きさによって明らかな違いが生じるため、仮想物体と実物体の大

大きさが一致しなかった。本研究の目標はインターネットショッピングで利用できるシステム作りであるため、仮想物体と実物体の大きさを同一と認識できなければならない。そこで仮想手の大きさを利用者の手の大きさに合わせて変更できるようにすることで、仮想物体と実物体の大きさを同一と認識できるかを実験により調査する。併せて、振動子の強さを操作することで物体の固さの違いとして認識することができるか検討する。

本稿第二章でネットショッピングの歴史や現状を述べ、第三章では人間の生体について述べる。第四章で振動子やデータグローブを使用する理由を、第五章で実験システムについて述べる。それらを受けて第六章で実験内容や結果、有効性について検討する。

## 第二章

### ネットショッピングの実績と今後

本章では現在のネットショッピングの状況や今後の展望について記す。そこから必要とされるシステムを考える。

#### 2.1 国内のインターネットショッピング利用状況

国内におけるインターネットショッピングのデータでは、ネットショッピング利用者の1年間の平均利用回数は2007年に11.6回、2006年に11.4回、2005年に9.6回となっている。平均合計金額は2007年に106,174円、2006年に103,210円、2005年に95,606円となり、いずれも毎年増加している。2007年に購入されたものを調べてみると、1位は書籍・雑誌、2位は衣類・靴・バッグ・アクセサリ、3位は音楽CD・ビデオ・DVD、4位はホテル・航空券・旅行予約、5位は健康食品・サプリとなっている。この順位から分かることは、書籍や音楽CDなどの見たり聞いたりするものや航空券などの権利を取得するものが多数を占めている。しかし2位に衣類・靴・バッグ・アクセサリといった実際に身につけるものも入っている[7]。このようなバッグやアクセサリ類は、実際に手に持ってから購入したいと考える人が多いのは明らかである。そこで振動の触力覚フィードバックを利用した物体の認識を考える。すでにVR技術を用いた様々な認識の研究は行われており、指先に接触させたベルトをモータでまきとり指を圧迫する装置[8]の開発、糸の張力を用いた接地型力覚提示装置[9]の開発、五指ロボットハンドをユーザの手と対向するように制御しユーザの各指に独立して力覚提示を行っている装置[10]の開発などがある。ほかにも、物体の硬さや重さを表現する研究があり、仮想物体の剛性の違いを識別する研究、柔軟弾性物体の提示を行った研究、手首に圧力をかけ重さを表現する研究も行われている(文献)[11][12][13]。しかし、一般家庭への普及を考えた場合、これらの装置は大型で複雑であったり、汎用性が低いなどの問題が考えられるため難しい。

直近1回のネットショッピングで利用したサイトを調べてみると、楽天、ヤフーに代表されるような

モールやポータルに出展されているものを購入するケースが46.7%で1位となっており、2位のネット単独系の18.8%に対して大きな差をつけていることが分かる。モールが占める割合も前々年の35.3%、前年の45.1%から増えていることも確認され、これからも増えつづけると考えられる[6]。モールやポータルは会社により一括で管理されているため、様々な利用者に対応できなければならない。そこで、本研究では誰が使用しても同じような結果が得られるシステムを目指す。

## 2.2 海外のインターネットショッピング利用状況

インターネットの普及率が日本をしのぐ国は多々ある。それらの国がインターネットショッピングに力を入れた場合、日本以上の市場になることが容易に想像できる。例えば中国ではインターネット利用者が2006年末の時点で1億3700万人で、アメリカについて世界2位の巨大ネット市場に成長している。それに対応してネットショッピング市場も巨大化しており、2004年には数10億元程度だった年間取引総額も、2005年には100億元を越え、2006年には200億元(3000億円)と倍増している。そして2010年には627億元程度にまでなると予測されている[14]。

ネットショッピングが利用されている地域は日本など一部の地域だけでなく世界規模になっている。同時に今後の発展も十分に見込める。このことから、ネットショッピング関連システムの更なる開発が望まれており、誰でも簡単に利用できるシステムの開発が必要である。

## 2.3 ネットショッピングの未来

現在、通信販売でよく用いられている方法は、テレビを通じたテレビショッピング、家庭用のパーソナルコンピュータを用いたインターネットショッピング、家庭に冊子などのカタログを送りそれを元に注文をするカタログショッピングなどがある。テレビ、パソコン、カタログと利用するものは様々であるが、現状ではどの手法でも売り手が買い手にたいして情報を提供してそれを元に商品を選択するという点で同じである。この方法を用いた通信販売では、買い手が知りたい情報を手に入れることができるとは限らず、期待していたものと違う商品が届くことが起こりうる。これに対応するため触

力覚フィードバックを用いた VR 技術を利用することが考えられる。VR 技術を用いてインターネットショッピングを利用する際に必要な条件は対象商品に対してインタラクティブ性があること、触力覚装置のデバイスと接続出来ることが考えられる。これらの条件に当てはまる物はコンピュータを利用したネットショッピングが妥当であると考えられる。また、2011 年 7 月 24 日からは地上デジタル放送に移行する。この地上デジタル放送では、双方向サービスを利用することができるようになる。今後の通信販売はインタラクティブ性が高いシステムがより一般的になると考えられる。

現在インターネットショッピングを利用する人は飛躍的に伸びている。しかし、インターネットショッピングはまだまだ始まったばかりの技術で、より使いやすくするために様々なシステムが望まれている。将来の理想的なシステムはネットショッピングをしているのに、店頭販売で買い物をしているように感じるシステムであろう。しかし今の技術では、とても高価なデバイスを用いることが必要となる。今回の研究では家庭で利用できるような安価な触力覚フィードバックシステムを利用しながら、少しでも店頭販売に近づけることが目的である。



## 第三章

### 人間の生理

人間は現実世界において一般的に「視覚・聴覚・触覚・味覚・嗅覚」の五感を使うことで様々なものの認識を行っている。実物体の大きさを認識する際に利用する感覚は視覚や触覚であると考えられる。また、生理学では触覚は体性感覚と呼ばれており、皮下の筋肉・腱・関節などによって起こる深部感覚と、皮膚表面の受容器によって起こる皮膚感覚とに分類される。深部感覚は位置感覚・運動感覚・力覚など関節や筋肉に存在する受容器によって引き起こされる感覚である。皮膚感覚はざらざらやすべすべといった皮膚表面で感知する感覚である。本研究では画面上に表示される画像の立体視は行っていないが、視覚効果によりある程度大きさを推測することが出来ると考えられる。本章では人間の生理を考えることで、実際の感覚に近づける方法を考える。

#### 3.1 錯覚

現在、様々な錯覚が知られている。錯覚とは、心理学において刺激や対象の客観的事実を違ったものに知覚することであり、幻覚と同様に実際には感覚的刺激や対象がないのに、知覚することである[15]。一般的によく知られているものでは視覚の錯覚や聴覚の錯覚があげられる。

視覚の錯覚は様々なものが考案されている。例えば四本の平行線が引かれていると、ほとんどの人が一目見ただけでこの四本は平行であると認識することができる。しかし、図 3.1 ではおそらく一目見ただけでは横向きに引かれた四本の線を平行であると認識することはできないであろう。これが視覚の錯覚である。その他にも実際には見えたり存在していないものが見えたり、静止しているものが動いて見えるようなものもある。

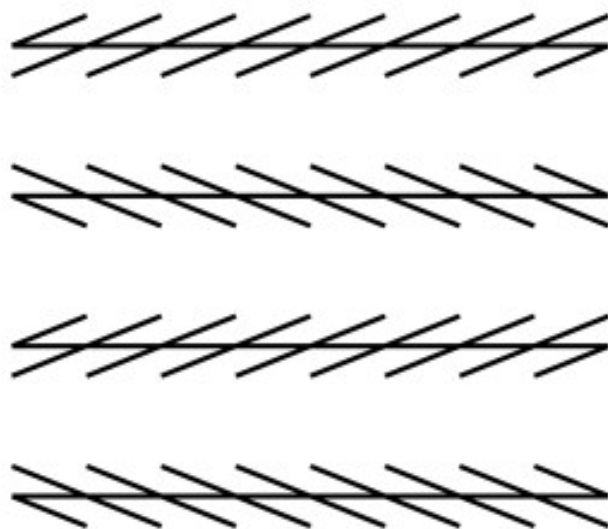


図 3.1: 視覚の錯覚が起こりやすい画像

聴覚の錯覚もいくつか考えられており,その一つに無限音階(シェパドトーン)と言われるものがある.ピアノの鍵盤などでドレミ・・と音の高さをあげながら弾いていくと音はどんどん高くなりいずれそれ以上高い音が出せなくなってしまう.しかし R.N.Shepard が考案した方法では,オランダの画家 M.C.Escher が描いた無限階段と同様に,数個の音を利用し無限に音が高くなり続けるように感じる音階を作ることに成功した[16].

他にも視覚と聴覚が違う情報を取り入れたときに,相互作用により新たな情報として取り込むことも分かっている.人が「ガ(ga)」の口の形をしている映像に「バ(ba)」という音声を組み合わせることで画像を見て音声を聞いている人には「ダ(da)」と聞こえるように聞こえることがあり,マガーク効果と言われている。

人間は実際とは異なったものを脳の処理により認識してしまうことがある.この誤認識は視覚や聴覚だけでなく様々な部分で起こると考えられている.この錯覚を利用して実際とは違う感覚を本物の感覚に近づけることができるのではないかと考えた。

## 3.2 触覚の錯覚

昔の技術のようにナイフや鉛筆を使った作業をする機会は減り、現在はキーボードとマウスを使えば様々なことが出来るようになった。さらに最近ではロボット技術も進歩したため、五感のうち現代人が視覚に頼る割合は7割とも9割とも言われ、現代の大人にとって触覚は視覚より繊細ではなくなっている。さらに、触覚を提示することは困難なため、触力覚デバイスが複雑で高価なものであったらあまり利用されないと考えられる。だからこそ触覚のセンシングと提示を行う際には、視覚や聴覚との類似を把握し、人の触覚を騙せるシンプルな機械を作る必要がある[17]。

以前の研究で触力覚の錯覚を実験したものがある。実験では触力覚フィードバックを備えていないマウスを用いる。まず、格子模様の正方形が一定速度で流れているウインドウ内に操作カーソルを固定させる。被験者はマウスを動かさないものとし、マウスの左クリックのみを操作できる。左クリックした状態で操作カーソルが正方形の領域内に入ると、入っている間は正方形の速度が大きく変化するようにした。移動速度が大きく変化すると、被験者はマウスに触力覚フィードバックが含まれていないのにも関わらず強い衝突感を感じた[18]。このことから、視覚情報を組み合わせることで触覚にも錯覚を起こすことができると考えられる。

最近では実際に触力覚の錯覚を利用した商品も販売されている(図 3.2)。



図 3.2: バンダイ「ツツキバコ」

この商品は箱の一辺に穴があいておりその中に指を突っ込んで動かし、デジタルキャラクターをいじめるというタッチ式インターフェースを売り物にしている。これはディスプレイに表示されたキャ

ラクターを同一画面に影絵のように映し出された自分の指で触るという方法で、触力覚の錯覚を起こさせている。ディスプレイ上でキャラクターを触ると、指先には実際に触ったような感覚が得られる。これは指の運動感覚だけでなく、視覚からくる情報がキャラクターを突っついている状態を強く示しているため、脳がつじつまを合わせて触覚の錯覚を起こし、実際にはないはずのものを本当に触っているように感じる[19]。

人間は一つのことを認識する時にも、様々な感覚から影響を受けている。このことから、実際に物体を把持したときと違う触覚であったとしても、与えられた視覚情報などから本物と同等の効果を得ることができると考えた。本研究では、家庭で利用してもらえるように安価で利用しやすいシステム作りを目指している。そのため、簡単なシステムであっても本章で述べたように人間の生理をうまく利用することで本物と同じような効果を得ることができると考えられる。

## 第四章

### 触力覚フィードバックによる表現

近年様々な触力覚フィードバックが開発されており,人々に身近なものも多数存在している.振動子(バイブレータ)を利用した商品は携帯電話やゲームのコントローラなど様々な場面で使用されている.その他にも手の動きをそのまま伝えるデータグローブも少しずつ販売されるようになり,特別珍しいものではなくなっている.本章では触力覚フィードバックを利用した仕組みについて述べる.

#### 4.1 振動の利用

人々の身近に振動子はあるが,その特徴として実際に振動子に触れている人にしか変化が伝わらないことがあげられる.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,振動子に触れている部分でしか振動を認識できないためである.このことを言い換えると周囲に関係なく利用者の伝えたい部分のみに情報の伝達が出来るということである.そのため振動子はもはや日常生活に欠かせないものとなっており携帯電話やゲーム機など様々なものに内蔵されている.

例えばゲームの分野では,近年販売されているほとんどの家庭用据え置き型ゲーム機でコントローラに振動子が内蔵されている(図 4.1).その他家庭用の小型ゲームでも振動子を接続することで同様な効果を得られるものが販売されている.これらの振動機能はゲーム内においてレースゲームやシューティングゲーム,格闘ゲームなど様々なゲームで利用されており,一つの振動子だけで様々な役割を果たしている.爆発シーンなどにも使用されており,振動は手で感じるだけであるがその効果は多くの場面で利用されている.



図 4.1: 振動子付きリモコン(引用[20][21])

さらに電動の歯ブラシや目詰まりを防ぐためにも振動は用いられている。振動は皮膚の触圧覚だけでなく皮膚の深部の圧覚でも感じる。そのため、筋肉のこりをほぐすマッサージ効果や美顔器など、振動自体を利用する商品も多数存在する。この様に振動子は震えることだけで様々な効果を与えることができる。



図 4.2: 振動機能を利用した商品(引用[22][23])

実世界において人々が受ける影響は様々であり、違ったものから同じ影響を受けることはほとんど無い。しかし、振動子では同じ振動であるにもかかわらず違った効果を与えることができる。これは、振動による触覚情報は利用者が取り入れた視覚や聴覚から与えられる情報と組み合わせられることで臨場感が増すためと考えられる。また、同じ振動子を利用したときでも小さく震える場合と大きく震える場合で受ける影響は異なり、一般的に振動が大きければ大きいほど操作者は大きな効果を受けたと感じる。これを利用し第六章で振動の強さを変えることにより、物体の固さの違いとして認識できるかの実験も合わせて行う。

本実験では振動子を用いた触力覚装置を利用する。振動子は一般的に普及しており、利用することに対して恐怖心はないと考えられ、価格も比較的安価なためである。さらに、振動子は視覚情報を組み合わせることで利用者に錯覚を起こさせ、あたかも実際の影響を受けたように感じさせることが出来るといったメリットがある。

## 4.2 ヒューマンインターフェイスデバイス

ヒューマンインターフェイスデバイスとはマウスやキーボードなど人間がコンピュータに働きかけるための機器、入力装置である[24]。入力デバイスはマウスやキーボードなど一般的に使用されており人々に身近なものであるが、その他にも様々な形状の装置が開発されている。例えば、SensAble technology から販売されている PHANTOM は高精度の力覚インタラクションを実現する三次元入出力デバイスとして利用されており、視覚情報だけでなく力覚情報を加えることにより物体に触れたときに手に伝わる反力をリアルに再現し操作性を向上させている。そのため医療分野やアーティスト、デザイナーなどに利用されており、ゲームなどのアミューズメント分野でも用いられている。CyVerse から販売されている SPIDAR は 8 本のワイヤと 8 個のモータにより、ユーザが操作するグリップ(ボール)の位置と姿勢を検出しコンピュータに伝える装置である。



図 4.3: PHANTOM



図 4.4: SPIDAR

その他にもデータグローブがある。例えば、パワーグローブはゲーム分野で 1990 年に任天堂のファミリーコンピュータの専用コントローラとして販売されたもので、以前よりグローブの研究はされている。また、アメリカの Essential Reality 社から販売されたパソコン対応のグローブ型インターフェイスデバイス「P5」はゲームで利用する以外にも、マウスの代わりとしても利用できる。手を動かすことでカーソルを操作し、人差し指で左クリック、中指で右クリックを表現できるようになっている。10,800 円で販売され、他の触力覚デバイスと比べると安価であった[25][26]。



図 4.5: パワーグローブ



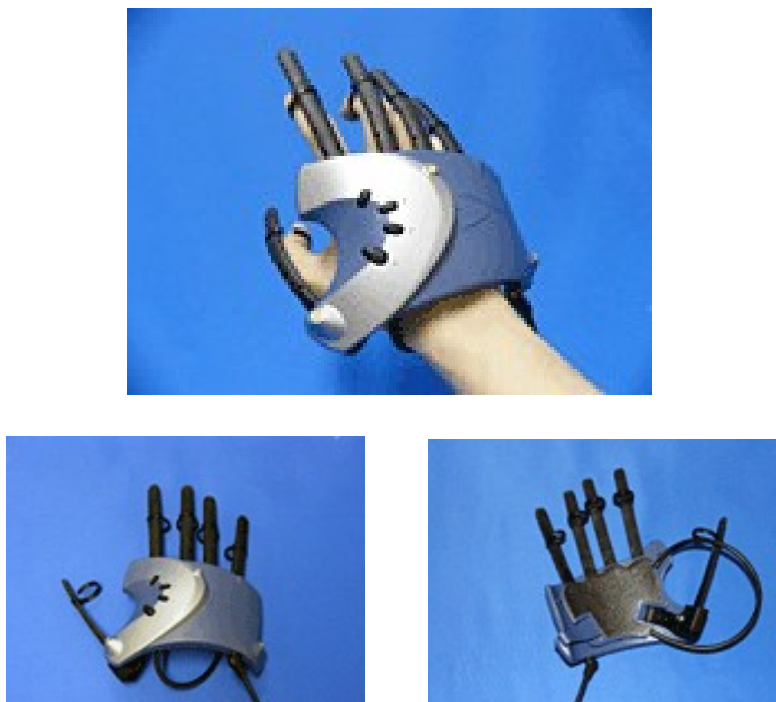


図 4.6: データグローブ『P5』

一般家庭の普及を考えた場合、システムやデバイスは利用しやすくなければならない。データグローブ型のデバイスは、手につけるだけでよいため取り付けが簡単で、手を動かす際にも邪魔になりにくい。さらに、インターネットショッピングシステムで使用する以外の場合の利用法も考えられる。手につけてマウスの代わりに利用すること、パソコンの画面上で本を読むときにページをめくるような動きをすると次ページに切り替えることなどが考えられる。これらを考慮し、本実験ではデータグローブを用いて実験を行うこととする。

## 第五章

### 実験システム

インターネットショッピングで求められているシステムは,利用者が違和感なく操作できることが必要である.そのため,仮想物体の大きさを認識する際にリアルタイムで操作できる必要がある.本章では仮想手のモデルと干渉判定の方法について述べる.仮想手の基本設計は文献[5]と文献[27]のモデルを使用しており,以下に述べるシステムを利用する.

#### 5.1 実験装置

今回の実験で使用する実験装置を考える.高性能の触力覚装置は指先を固定することができるものや,3D眼鏡と組み合わせることで実際の物体把持とほとんど同様な効果を得ることが出来る装置も開発されている.しかし,それらは大型でなおかつ高価なため一般家庭に普及するとは考えにくい.本研究は一般家庭でのインターネットショッピングを想定しているため実際に購入できるような価格で扱いやすくなければならない.そこで,Immersion社のCyber Touchを使用する.これはグローブタイプの入出力装置であり,各指の曲げ角度と手首の角度情報を取得することにより指先や関節の位置を求めることが出来る.また,手のひらと各指の第二関節と第三関節の間に振動子を取り付けられている.今の段階ではこの商品も高価なものではある.しかし,第四章で述べたように振動子もデータグローブも技術的に進歩し価格が下がってきていることから,今後振動子付きのグローブの価格も下がることが十分に考えられるためこの装置を用いることとする.



図 4.7: Cyber Touch

この Cyber Touch の振動子は 6 個で、それぞれを独立して動かすことができる。振動の強さは 0-255 の範囲内において任意の値で利用できる。ただし 0 は振動が無い状態で、255 に近づくほど大きな振動になる。振動の感じ方は人それぞれであり状況によっても大きく変化する。まったく作業を行わずに振動を知覚することができる範囲は 20-30 であり、指を動かしながら振動を感じる事が出来る範囲は 50-60 である[28]。同様の実験装置を用いて振動による触力覚についての実験を行った結果によると、65 の強さが経験的に十分知覚することができる振動の大きさであり、接触感を感じるもっとも効果的な強さである[29]。本研究でもその数値を利用して実験するものとする。

## 5.2 仮想手のモデル

本研究で対象としているものは片手で扱える物体のみである。今回は右手について述べることにする。なお、反転すれば左手のモデルも同様に考えることができる。

仮想手と仮想物体の干渉を判定するため、それぞれの指の指先及び各関節に判定点が定められている。また、実際の手の手首の位置を基準点とし、仮想空間内の仮想手の位置とする。この点におけるベクトル方向とそれを軸とする回転を手の方向とし、位置と方向の変化を手の動きとして扱う。仮想手のモデリングデータはフリーのソフトウェアを利用した。指の動作は、人差し指・中指・薬指・小指は各関節点ごとの曲げと第3関節における指の開閉の2つの自由度を持ち、親指は曲げ、開閉、回転の3自由度を持つ。

## 5.3 仮想物体のモデル

現実空間において物体は様々な形状をとるため、それらを仮想空間においた場合、見た目や内部的な挙動まで忠実に再現することは困難である。そのため、物体そのものや物体の干渉範囲を球や多面体で表現することは多々行われている。さらに、今回は片手に収めることができる程度の大きさで単純な形の物体に限定して研究を行っている。今回使用する仮想物体は大きさを任意に設定できる多面体とし、仮想物体の大きさを比較する際に握り易いように、仮想空間上に浮いた状態で仮想物体を固定している。位置や角度も任意の値で決めることができ、初期状態から変化しないものとする。

実際に通信販売をするためには様々な種類の商品に対応した仮想物体を表示しなければならない。そこで、商品を容易に定義できるように、各面に配置するデータとそれぞれの面のテクスチャ画像が入ったファイルを利用し、商品の定義が容易にできるようにした。

## 5.4 仮想手と仮想物体の干渉

本研究では 5.3 で述べたように、自然現象である重力や磁力、移動時に生じる慣性などから受ける影響を考慮に入れていない。さらに、把持などによる移動も考える必要のない多面体の仮想物体について考えている。そのため、実空間上の干渉判定とは違い、仮想手が仮想物体に触れた位置や方向に関わらず、手及び指が仮想物体の各面に触れたかどうかのみの判定を行うものとする。

仮想手には 5.2 で述べたように、それぞれの指先と各関節点、手首に判定点がある。それらの判定点に対して、指先と第一関節を結んだ線分、第一関節と第二関節を結んだ線分、第二関節と第三関節を結んだ線分、第三関節と手首の判定点を結んだ線分を判定線分と決め、物体の面と交わっていないかを調べ接触判定を行う。

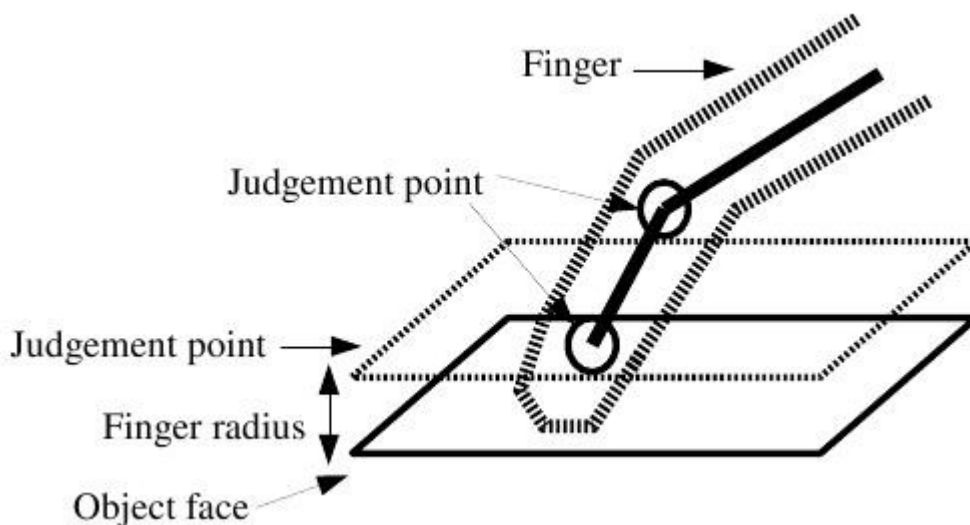


図 5.1: 接触判定の近似

ここでの判定点は指のモデルの中央部分になっているため、仮想物体の面と、この判定線分で接触判定を行った場合、指の厚み分が考慮されない。そのため図 5.1 で示すように接触判定を行う際には判定位置をずらすことで近似的に指の厚みを考慮した。

判定線分と各面との接触判定は、判定線分が仮想物体の各平面と接触しているか判定し、平面と交差していた場合は接触点が物体の面に含まれるかを判定することで接触判定を行っている。

まず、仮想物体の各平面と各判定線分との接触判定を行う式(5.1)を示す。式中の記号  $n$  は仮

想物体判定面の外側向きの法線ベクトルである。 $v_1, v_2$  は判定面の任意の頂点  $P_0$  から, 判定線分の両端の判定点  $P_1, P_2$  へのベクトルである。

$$(v_1 \cdot n)(v_2 \cdot n) \leq 0 \quad (\text{式 5.1})$$

これは  $P_1$  と  $P_2$  のどちらか一方か両方ともが判定面の仮想物体の内側に存在している場合,  $n$  と  $v_1$  及び  $n$  と  $v_2$  によって作られる角度が少なくともどちらかは 90 度以上になることを利用して判定している。なす角が 90 度以上の場合, 内積が必ず 0 以下となる。それぞれの内積を求めた後で内積同士の積を計算するが, どちらか一方でも内側に存在していれば最終的な解も 0 以下となる。よって式 5.1 を満たすとき接触していると判定できる。

判定線分が判定面と接触している場合, 次に接触している点を求める。図 5.2 に示すように線分と判定面の交点を新たに  $P_3$  とし,  $P_1$  と判定面の距離を  $d_1$ ,  $P_2$  と判定面の距離を  $d_2$  とする。このとき  $P_1$  から  $P_2$  までの距離を 1 とし,  $P_1$  から  $P_3$  の距離を  $a$  とすると  $P_2$  から  $P_3$  の距離は  $1-a$  とおくことができる。

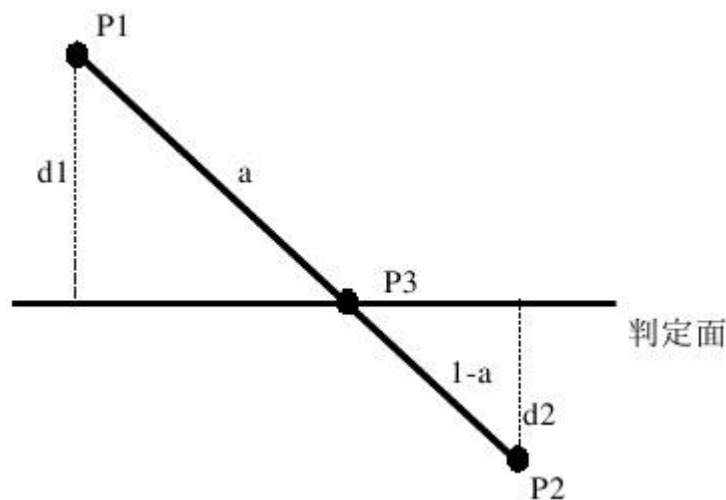


図 5.2: 接触点の算出

このとき  $a$  と  $1-a$  の比は内分比より  $d_1$  と  $d_2$  の比と同じになる。これを用いて  $a$  を式(5.2)のように表すことができる。

$$a : 1-a = d_1 : d_2$$

$$a = d_1 / (d_1 + d_2) \quad (\text{式 5.2})$$

ここで  $d1$  と  $d2$  は各頂点と法線ベクトルが求まっていることから算出できる.そのため  $a$  の値も決まる. $a$  と  $v1$  と  $v2$  を用いて  $P0$  から  $P3$  へのベクトル  $v3$  は式(5.3)のように求めることができる.

$$v3 = (1 - a)v1 + av2 \quad (\text{式 5.3})$$

式 5.3 で求めた  $v3$  から  $P3$  を求めることができ,この  $P3$  に対して各頂点から左回りに頂点同士のベクトルと頂点から  $P3$  へのベクトルの外積を求める.

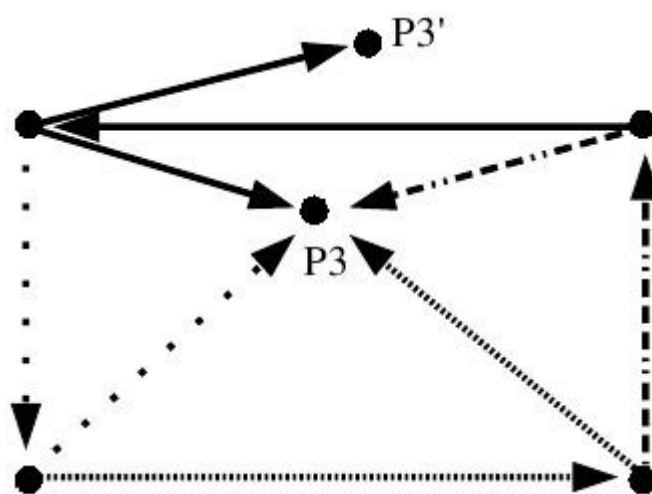


図 5.3: 判定面内に含まれるか判定

図 5.3 の  $P3$  が判定面の内側に含まれているときはそれぞれの外積を行うベクトル同士が左回りになり,外積はすべて同一方向になる.しかし  $P3'$  のように判定面内に含まれていないときは必ず右回りのベクトルが存在する(実線のベクトル).他のベクトルの外積とは逆向きの外積が存在するため,ベクトルの外積が同一方向を向いているかどうかで判定面に対して接触点の内外判定を行うことができる.

この実験システムを用いることで仮想空間でも実空間と同様にリアルタイムな操作ができるようになる.そして,目的のインターネットショッピング技術の実現を目指す.

## 第六章

### 実験及び結果

本章では、ディスプレイに表示された仮想空間上の仮想手を操作し、物体把持による大きさや硬さの認識についての実験について述べる。

前述したことからわかるように、現在は多くの人がインターネットショッピングを利用している。それとともに消費者と販売者の間で問題が起こっており、実際の店頭販売と同じように買い物をすることができるシステムが必要とされている。本研究では VR 技術を用いることでこの問題を解決する方法を考える。人間が無意識のうちに起こしてしまう錯覚の効果と、近年様々な場面で用いられるようになってきた振動子やデータグローブを利用することで仮想的に実際のショッピングと同等の感覚を味わえるシステムを作成する。本研究室ではこれまでに振動子付きのデータグローブによって、仮想空間内で仮想物体同士の大きさを比較した実験を行った[5]。しかし、仮想手と実際の手の大きさを対応させていないため、インターネットショッピングで利用するには問題がある。そこで、今回は仮想手の大きさを実際の手の大きさに合わせて変化させることで、実物体と仮想物体の大きさを同一と認識できるか実験を行う。併せて、振動の強さの違いを利用して物体の硬さの違いを認識できるかを調査する。

以下の図 6.1, 6.2 に実験の様子を示す。



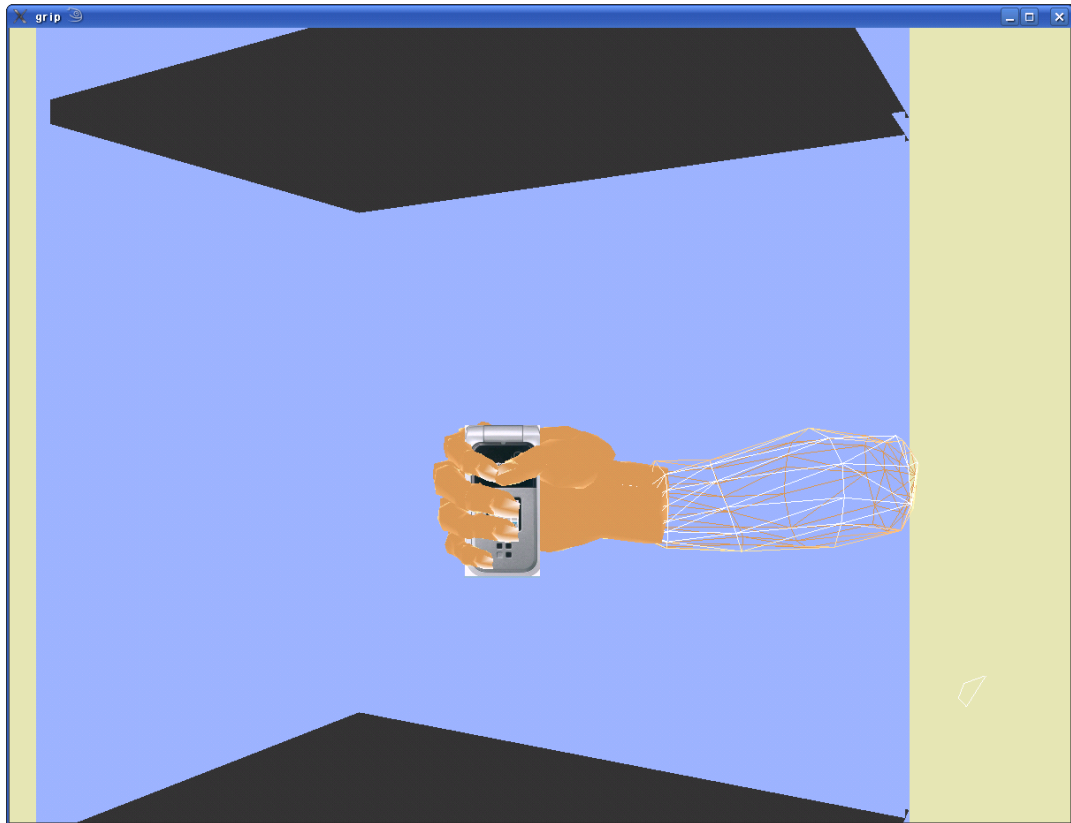


図 6.1: 実験の仮想空間画像

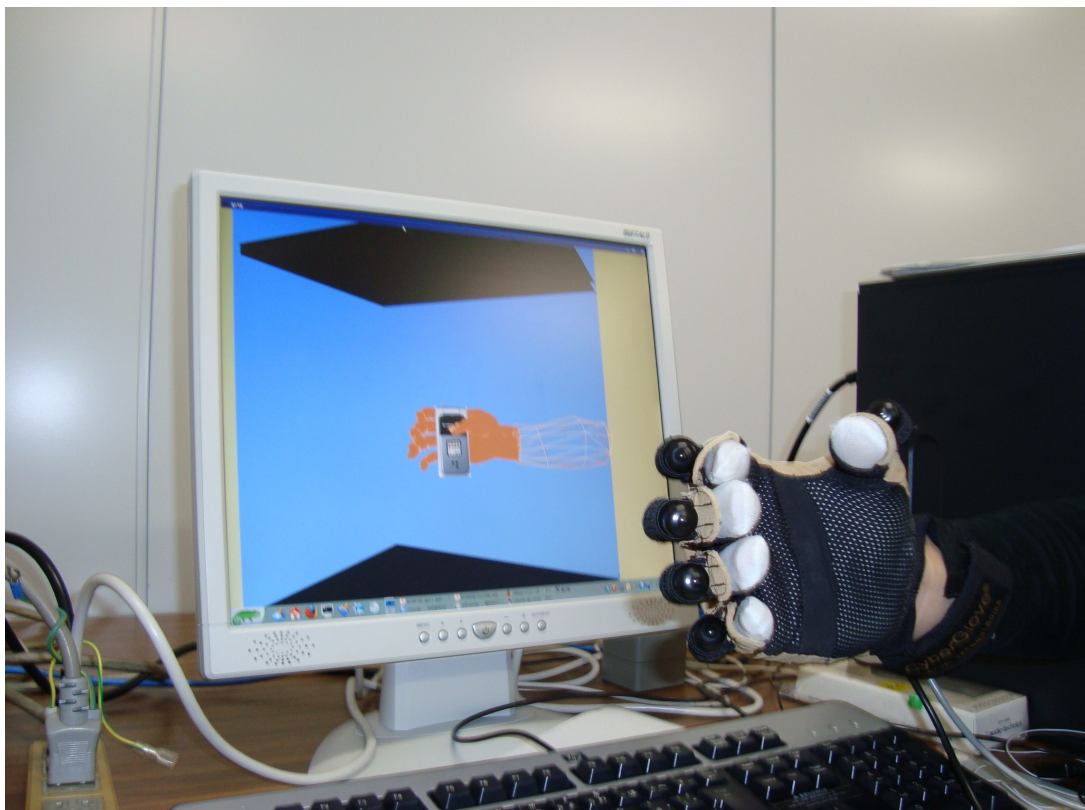


図 6.2: 実験風景

## 6.1 システム構成

本実験システムは C 言語を用いて実装した。操作者の手の位置および方向は, Polhemus 社 3SPACEFASTRAK の低周波の磁界を利用したモーションセンサによって入力されている。センサはグローブの手首の部分に装着されており, 各指の関節の角度, 手首の角度等は, グローブタイプの入力装置である Immersion 社 CyberTouch を使用した。各指と手の平には振動子が装着されており, 操作者の手に振動を伝えることが可能で, それぞれ 255 段階の強さ調節ができるようになっている。仮想空間における手の操作は, グラフィックライブラリである OpenGL を利用することで, コンピュータグラフィックスとして LCD 上に出力している。

## 6.2 実験 1: 振動による仮想物体と実物体の大きさの比較

本研究室では, これまでに同様なシステムで仮想空間内の 2 つの物体の大きさ比較実験を行い成果を出している[5]。

本研究ではこのシステムを応用し, 仮想物体と実物体の大きさを同一と認識できることを目的としている。改良前のシステムでは仮想手の大きさは実際の手を考慮していなかった。そのため, 図 6.3 の左右の写真のように手の大きさが異なる場合でも, 仮想手は同じ大きさのものを使用していた。手の曲げ角度から判断する方法では実際の手と仮想手の大きさが違う場合, 実物体と仮想物体の大きさを同一と認識することはできない。そこで本研究では仮想空間内での手の大きさを図 6.4 のように利用者に合わせ変更することで, システムを利用する人の手の大きさに関係なく実物体と仮想物体の大きさを同一と認識できるか調査を行う。

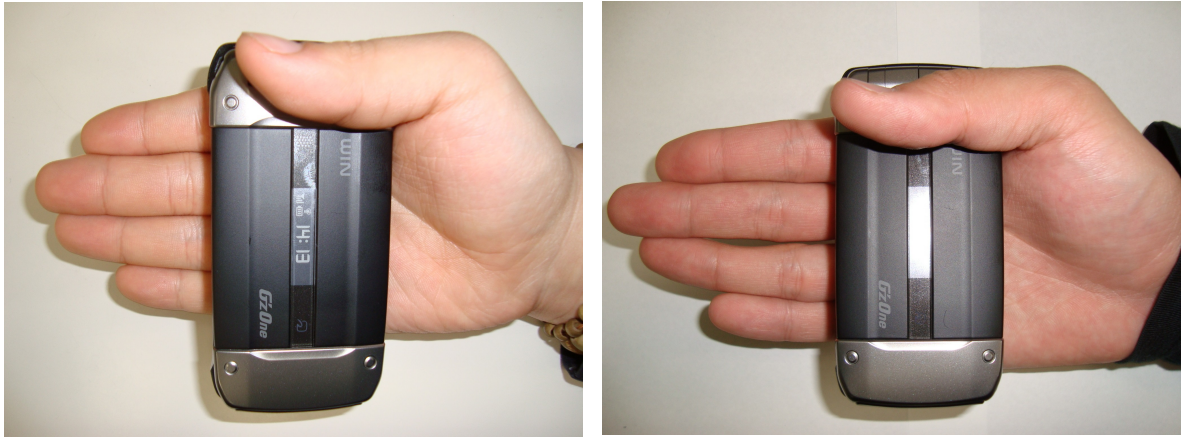


図 6.3: 実際の手の大きさの違い(左:小さい手,右:大きい手)

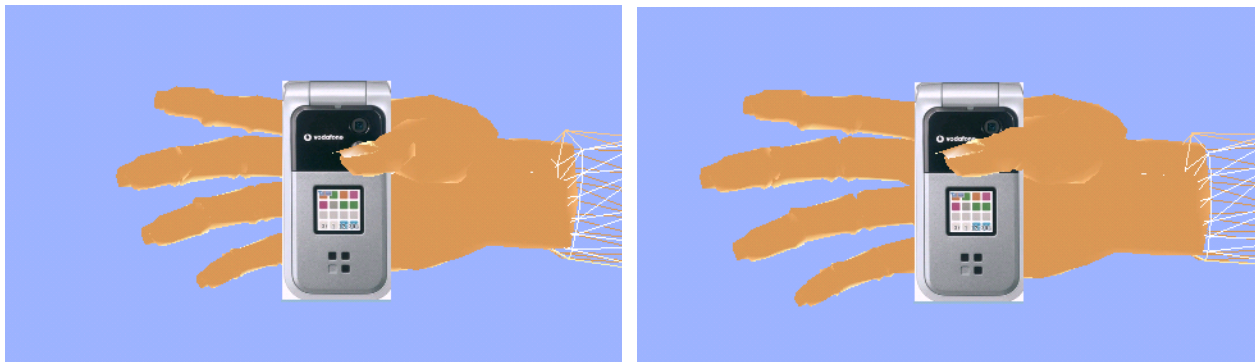


図 6.4: 図 6.3 に対応させた仮想手(左:小さい手,右:大きい手)

### 6.2.1 実験方法

今回と同じデバイスを用いて触力覚の実験を行った文献[29]によると、振動の大きさが 65 の強さで十分知覚できることが経験的に示されており、その数値が接触感を感じるのに最も効果的な強さであるとしている。そこで、本実験では振動の強さを全て 65 で使用した。

実験システムには立体視を導入しておらず、画角や視点位置等のキャリブレーションも行っていない。そこで、仮想空間内での操作を容易にするために仮想手の動きに制限を行った。制限は手首の基準点をもとに判定しており、手首が円錐状のエリアからはみ出さないように制限されている。さらに仮想物体に手の平が接触した時点で手首の角度を固定し、指の開閉を利用して大きさを認知するように制限を設けた。

今回、仮想物体と実物体をそれぞれ把持することで大きさを比較することができるかを調べた。実物体を扱う際、実際の手の大きさは人によって異なることを考慮し、仮想物体を触る際の仮想手

も利用者によって変更する必要が考えられる。そこで、物体の比較実験を行う前に被験者の実際の手の大きさを測定し、その長さに応じて仮想手を決定した。本実験で把持する物体は図 6.5 の例のように、縦 100mm、奥行き 10mm で、横が 5mm 間隔で 20mm～70mm の大きさの直方体を実物体と仮想物体それぞれ 11 個用意し、大きさの比較を行った。被験者は 20 代の右利きの男性 9 人である。

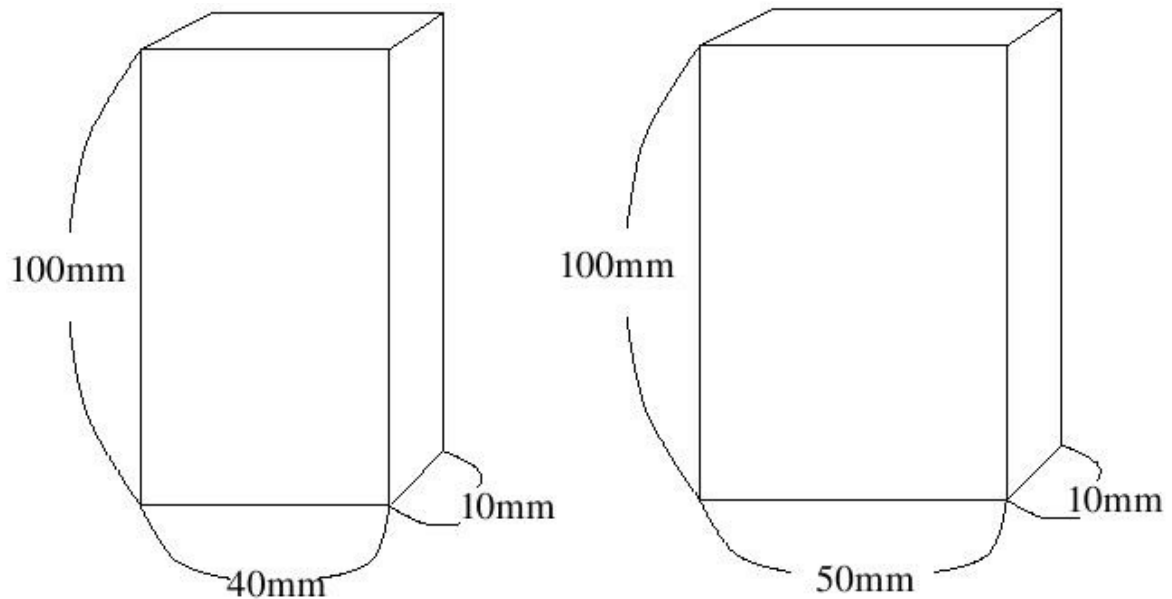


図 6.5: 仮想物体と実物体のモデル

以下にそれぞれの実験の手順を示す。

#### ・実験 1-1

1. 被験者に横幅 40mm (図 6.5 の左図) の実物体を把持して大きさを覚えてもらう。
2. 11 種類の仮想物体を自由に把持し、手順 1 で把持した実物体と同じ大きさと感じた仮想物体を選択し回答してもらう。
3. 被験者に横幅 50mm (図 6.5 の右図) の実物体を把持して大きさを覚えてもらう。
4. 11 種類の仮想物体を自由に把持し、手順 3 で把持した実物体と同じ大きさと感じた仮想物体を選択し回答してもらう。
5. 手順 1-4 をもう一度繰り返す。

※手順 2, 4 を行う際、基準となる実物体に触れてはいけないこととする。

## ・実験 1-2

- 1.被験者に横幅 40mm(図 6.5 の左図)の仮想物体を把持して大きさを覚えてもらう。
  2. 11 種類の実物体を自由に把持し,手順 1 で把持した仮想物体と同じ大きさと感じた実物体を選択し回答してもらう。
  - 3.被験者に横幅 50mm(図 6.5 の右図)の仮想物体を把持して大きさを覚えてもらう。
  4. 11 種類の実物体を自由に把持し,手順 3 で把持した仮想物体と同じ大きさと感じた実物体を選択し回答してもらう。
  - 5.手順 1-4 をもう一度繰り返す。
- ※手順 2,4 を行う際,基準となる仮想物体に触れてはいけないこととする。

## ・実験 1-3

- 1.被験者に横幅 40mm(図 6.5 の左図)の実物体を把持して大きさを覚えてもらう。
  2. 11 種類の仮想物体を自由に把持し,手順 1 で把持した実物体と同じ大きさと感じた仮想物体を選択し回答してもらう。
  - 3.被験者に横幅 50mm(図 6.5 の右図)の実物体を把持して大きさを覚えてもらう。
  4. 11 種類の仮想物体を自由に把持し,手順 3 で把持した実物体と同じ大きさと感じた仮想物体を選択し回答してもらう。
  - 5.手順 1-4 をもう一度繰り返す。
- ※手順 2,4 を行う際,基準となる実物体に触れてよいこととする。

## ・実験 1-4

- 1.被験者に横幅 40mm(図 6.5 の左図)の仮想物体を把持して大きさを覚えてもらう。
2. 11 種類の実物体を自由に把持し,手順 1 で把持した仮想物体と同じ大きさと感じた実物体を選択し回答してもらう。
- 3.被験者に横幅 50mm(図 6.5 の右図)の仮想物体を把持して大きさを覚えてもらう。
4. 11 種類の実物体を自由に把持し,手順 3 で把持した仮想物体と同じ大きさと感じた実物体を選択し回答してもらう。
- 5.手順 1-4 をもう一度繰り返す。

※手順 2,4 を行う際,基準となる仮想物体に触れてよいこととする.

## 6.2.2 結果及び考察

実験結果を以下に示す.表 6.1 は各実験における一致や誤差の出現回数を表す.

表 6.1:実験 1 の回答結果

	一致	誤差+5mm	誤差-5mm	誤差+10mm	誤差-10mm	それ以上
実験 1-1	20	10	3	2	1	0
実験 1-2	10	4	13	1	8	0
実験 1-3	20	11	4	1	0	0
実験 1-4	15	4	12	1	4	0
合計	65	29	32	5	13	0

実験より,全 144 回(各実験 36 回)の試行のうち仮想物体と実物体が一致したケースが 65 回ともっとも多く,誤差 $\pm 5$ mm(誤差+5mm:29 回,誤差-5mm:32 回)が合計 61 回,誤差 $\pm 10$ mm(誤差+10mm:5 回,誤差-10mm:13 回)が合計 18 回となっている.今回 10mm より大きい誤差を検出しなかった.今回の実験結果において仮想物体の大きさと実物体の大きさが一致した場合を 3 点,誤差が 5mm の場合を 2 点,誤差が 10mm の場合を 1 点として,それぞれの実験結果に点数をつけると,表 6.2 のようになった.

表 6.2:各実験の得点

実験番号	得点	誤差(mm)
1-1	89	2.65
1-2	73	4.85
1-3	91	2.35
1-4	82	3.60
全体	335	3.35

実物体から仮想物体を判断した「1-1」,「1-3」と仮想物体から実物体を判断した,「1-2」,「1-4」の結果を比較してみると「1-1」,「1-3」の合計点は 180 点で,「1-2」,「1-4」の合計点 155 点より良い値である。この結果では実物体から仮想物体を選択したほうが良い値であったと言える。これらは元となる物体が実物体であったため,元の大きさを決めやすかったと考えられる。しかし,感想では仮想物体から実物体を決める方がイメージしやすいという意見が多々あった。この感想はネットショッピングで利用する場合良い傾向である。実物体から仮想物体の大きさの認識も,仮想物体から実物体の大きさの認識も効果があったと考えられる。このことから,実際にネットショッピングで利用する際に欲しい商品の大きさを知ることも,自分が持っている商品と比較することもできると考えられる。

一方,表 6.1 から分かるように実物体から仮想物体を選択する場合には,誤差がプラスの間違ひが多くなっていることに対し,仮想物体から実物体を選択する場合には,誤差がマイナスの間違ひの方が多い。この結果から,仮想物体の方が大きく認識されることが多いと分かる。考えられることは,利用者が実物体を把持する際には手にしっかりと当たるように強く握るのに対し,仮想物体は手に振動がきた時点で大きさを認識するため,仮想物体の方が大きく認識されるのではないかと考えられる。

さらに,元の物体を一度しか触ることができない「1-1」,「1-2」と,何度も元の物体を触ることができる「1-3」,「1-4」を比較すると,「1-1」,「1-2」の合計点は 162 点,「1-3」,「1-4」の合計点は 173 点である。この差は 11 点であり,一人当たりで換算すると 1.22 点で,ほとんど差は見られない。このことより,仮想物体の大きさを一度自分で認識すれば,十分に記憶しておくことができると考えられる。

実際に生じた誤差を調べる。実験 1-1 では,得点が 89 点である。これを試行回数の 36 で割って一人当たりの平均得点を求めると 2.47 点である(式 6.1)。仮想物体と実物体が一致した場合 3 点になることより,仮想物体と実物体の誤差が 0.53 点となる(式 6.2)。点数が 1 点ずれることで 5mm のずれが生じることから,仮想物体と実物体の誤差は 2.65mm となる(式 6.3)。

$$89 \div 36 = 2.472\dots \approx 2.47 \quad (\text{式 6.1})$$

$$3.0 - 2.47 = 0.53 \quad (\text{式 6.2})$$

$$0.53 \times 5 = 2.65 \quad (\text{式 6.3})$$

同様に誤差を求めた結果,すべての場合で5mmよりも小さな誤差となった(表6.2).このことから,仮想手の大きさを利用者に合わせて作成することで,仮想物体と実物体の大きさの比較を行うことができると考えられる.



## 6.3 実験 2: 振動の強さの違いによる硬さ認識の有効性

本節では触力覚フィードバックの振動の大きさを変化させることで、仮想物体の硬さの違いを表現できるか調査した実験について述べる。

### 6.3.1 実験方法

実験 2 では実験 1 と同様なシステムを用いて実験を行った。本実験では仮想物体の大きさが縦 100mm, 奥 10mm, 横 5mm の物体を使用し、仮想手の大きさは実験 1 と同様に被験者の実際の手に対応したものをを用いた。振動の強さは 65, 80, 95 の大きさが 15 ずつ違う 3 パターン用意した。被験者は 20 代の右利きの男性 9 人である。

以下に実験手順を示す。

#### ・実験 2

1. 3 種類の同じ大きさの仮想物体を把持してもらう。
  2. 一番硬いと感じた仮想物体を答えてもらう(希望があれば仮想物体は何度も把持可能)。
  3. 二番目に硬いと感じた仮想物体を答えてもらう(希望があれば仮想物体は何度も把持可能)。
- ※被験者には振動の強さを利用した硬さ認識であることは伝えていない。

実験終了後にリッカート法を用いて振動の強さを利用した硬さ認識の有効性を、まったく有効でないを「1」、とても有効であるを「7」、どちらでもないを「4」とした 7 段階評価で回答させた。

### 6.3.2 結果及び考察

以下に回答結果を示す。

表 6.3: 実験 2 の結果

選択した回答	人数	パーセント
振動が強い順に回答	7人	78%
振動が弱い順に回答	0人	0%
その他の回答	2人	22%

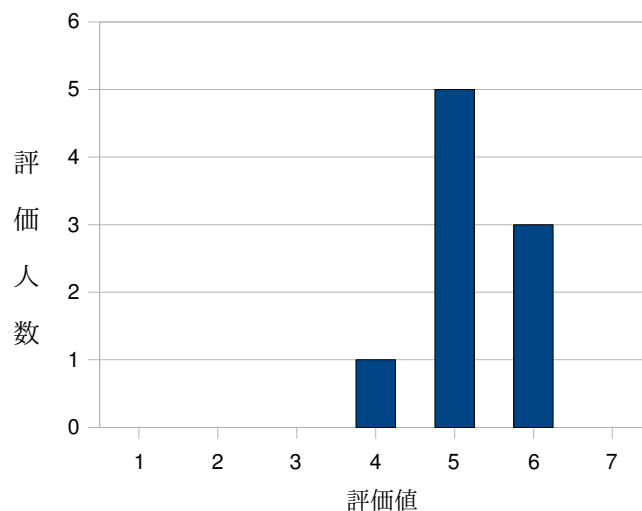


図 6.6: 実験 2 の評価値の結果

表 6.4: 実験 2 の評価値のまとめ

平均値	5.22
最頻値	5 (出現回数 5 回)

表 6.3 より振動が強い順に硬いと回答した人は 78% だった。振動の大きさが強くなれば、それに対応し仮想物体を硬いと感じる傾向があることが示された。さらにリッカート法による評価では最頻値が 5 で平均値も 5.22 だったことから(図 6.6, 表 6.4) 振動を変化させることで仮想物体の硬さに

変化をつけることができたと考えられる。一方で22%の人が違う答えを述べている。間違えた人の感想では振動の違いで硬さのように感じることはできるが、手が止まらないために迷う部分があり判断が難しいという意見があった。

今回の実験では、仮想物体同士の硬さを比較に関して振動の強さを変化させることで物体ごとの違い表現することができるという結果が得られた。

## 第七章

### むすび

本研究ではネットショッピングを想定した実験システムで、振動子を利用した希薄な触力覚フィードバックを用いて、仮想空間内の仮想物体と実空間内の実物体の大きさ比較が可能であるか検討した。本研究室ではこれまでに仮想物体同士の大きさを比較する研究を行ったが、利用する仮想手の大きさは固定されており利用者の手の大きさを反映させていなかった。その結果、仮想物体と実物体の大きさが同一と認識できなかった。本研究ではインターネットショッピングで利用できるシステムを目指すため、仮想物体と実物体の大きさを同一と認識する方法を考える必要があった。そこで今回は手の大きさを利用者に合わせて選択できるように改良し実験を行った。また、振動子の強さを変化させることで物体の固さ認識に効果があるか検討した。

実験の結果、仮想物体と実物体の誤差は今回の実験の全体平均として 3.35mm の誤差であった。この結果から仮想物体と実物体の大きさ比較は手の大きさを利用者に合わせることでほぼ正確に認識できることが分かった。さらに、振動子を利用した硬さ認識の実験では、振動が大きいほど仮想物体を硬いと感じる人が多く存在した。評価値でも比較的よい評価を得ることができた。このことより振動の強さを変化させることで仮想物体の硬さに変化をつけられると考えられる。しかし、仮想物体の硬さを実物体の硬さと比較して考えるにはさらに改良を施すことが必要であると考えられる。

今回の実験では、利用者の手と仮想手の大きさを対応させるため、利用する前に実際の手の大きさを簡単に測定し仮想手を決定した。今後、家庭での普及を目指す場合、同程度の手の大きさの人でも指が長い短いなどの部分的な違いで誤差が生じることが考えられる。そこで、より精密に仮想手を作成する方法を考える。利用者は容易に測定できることを望んでいるため、カメラを用いて実際の手のデータを取得すれば、利用者の手の形と一致した仮想手を作成できると考えられる。さらにカメラを用いた場合、利用者の手の色情報も取得することができる。そのデータを元に仮想手の色を変化させることで、臨場感の向上も考えられる。また、今回の実験の感想で、仮想物体を把持するときは指などを固定をすることができないため、どのぐらいの位置で仮想物体に触っているか認識が難しいという意見があった。現在は仮想物体に軽く触れていても、深く握っていても振動の

強さやパターンは同じである。そこで、握りすぎているときには振動をより強くしたり振動パターンを変化させることでわかりやすくなると考えられる。他にも振動の変化を利用することで、実験で行った硬さ認識だけでなく弾力などを表すことも考えられる。

現在、ネットショッピングの利用者は増加傾向にある。その中で振動を用いた触力覚フィードバックの研究はまだ始まったばかりであり、今後さらに改良を重ねることでより利用しやすく扱いやすいものになると考えられる。研究が進むことで家庭での VR の新しい可能性がますます広がっていくであろう。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、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 舟橋健司 准教授, 伊藤宏隆 助教, 山本大介 助教に心から感謝いたします。

また,本研究に対して御討論,ご協力いただきました 伊藤・中村研究室 の皆様ならびに中部大学 岩堀研究室 の皆様に深く感謝いたします。

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,実験に御協力いただきました友人の皆様に深く感謝いたします。

## 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] アルティオン・シモ,木島竜吾,マーク・カワザ:  
病態生理学的シミュレーションに基づく仮想患者を用いた臨床医療訓練システム,  
日本バーチャルリアリティー学会論文誌 Vol.8,No.4,pp.413-420,2003
- [3] 堀内郁孝,酒井昭彦,東祐二,藤元登四郎:  
VR 画像を付加した歩行訓練に対する高齢者訓練対象者の評価  
日本バーチャルリアリティー学会論文誌 Vol.6,No.3,pp.171-176,2001
- [4] 宮野秀市,坂野雄二:VR を利用したエクスポージャー療法の願望  
日本バーチャルリアリティー学会論文誌 Vol.7,No.4,pp.575-582,2002
- [5] 黒田雄大:VR ネットショッピングシステムのために触力覚フィードバック方法の検討,  
名古屋工業大学大学卒業研究論文,2008.
- [6] Kenji Funahashi, Yuuta Kuroda, Masumi Mori,  
A Study for Touchable Online Shopping System with Haptical Force Feedback  
Proc. ICAT2008,pp.297-300,2008
- [7] 富士通総研インターネットショッピング 2007 ダイジェスト版  
<http://jp.fujitsu.com/group/fri/report/cyber/report/shopping2007.html>
- [8] 稲葉豪,藤田欣也:指先圧迫による擬似反力提示装置の提案と試作  
日本バーチャルリアリティー学会論文誌 Vol.12,No.1,pp95-102,2007
- [9] L.Buogila, Y.Cai, M.Sota: Scaleable-SPIDAR, Proc.of ICAT, pp.93-98, 1997
- [10] 川崎春久,堀匠,毛利哲也:対向型多指ハプティックインターフェイス,  
日本ロボット学会誌, Vol.11, No.1, pp.47-57, 2006
- [11] 小山辰也,山野郁男,竹村研治郎,前野隆司:パッシブフォースフィードバックを用いた  
多指エグゾスケルトン型ハプティックデバイスの開発,  
日本バーチャルリアリティー学会論文誌 Vol.7, No.4, pp.565-574, 2002

- [12] 池田義明,藤田欣也:指先の接触面積と反力の同時制御による柔軟弾性物体の提示  
日本バーチャルリアリティ学会論文誌 Vol.9,No.2,pp.187-194,2004
- [13] 満田隆:手首圧迫による擬似力覚の提示  
日本バーチャルリアリティ学会論文誌 Vol.12,No.4,pp.577-584,2007
- [14] 独立行政法人中小企業基盤整備機構:中小企業国際化支援レポート  
<http://www.smrj.go.jp/keiei/kokurepo/kaigai/backnumber/020819.html>
- [15] 岩村吉晃:神経心理学コレクションタッチ,医学書院,2001
- [16] 日本音響学会:音のなんでも小事典,講談社ブルーバックス,1996
- [17] 前田隆司:ヒトの触覚受容機構-力学・アナロジー・錯覚という視点から-,  
電気学会センサマイクロマシン部門誌 2002年10月号特集解説電,Vol.122-E,No.10,2002.
- [18] 渡邊淳司,草地映介:背景画像による Pseudo-Haptics の提示,  
日本バーチャルリアリティ学会第12回大会講演論文集(CD-ROM),2007.
- [19] バンダイ:ツツツキバコ, <http://www.bandai.co.jp/top.html>
- [20] 任天堂:Wii, <http://www.nintendo.co.jp/>
- [21] Sony:PLAYSTATION.3, <http://www.sony.co.jp/>
- [22] 日立製作所:Diet Wave, <http://www.hitachi.co.jp/>
- [23] オムロン:音波式電動歯ブラシフラッシュマイクロビブラート, <http://www.omron.co.jp/>
- [24] 日立システムアンドサービス: <http://www.hitachi-system.co.jp/>
- [25] 株式会社パックス・コーポレーション:パワーグローブ
- [26] Essential Reality 社:グローブ型デバイス P5, <http://essential-realty.com/>
- [27] 舟橋健司,安田孝美,横井茂樹,鳥脇純一郎:  
3次元仮想空間における仮想手による物体操作モデルと一実現法,  
電子情報通信学会論文誌 D-II,Vol.J81-D-II, No.5,pp822-831,1998.
- [28] 久保谷太亮:希薄な触力覚フィードバック環境下における仮想ハサミシステムの検討,  
名古屋工業大学大学院修士学位論文,2006.
- [29] 森万純: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,  
名古屋工業大学大学卒業研究論文,2007.