

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  
物体の重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 17115096番

勅使河原 甫俊

# 目次

1	はじめに	1
2	重さ認識システム	4
2.1	目的とするシステム	4
2.2	重さ認識システムの構成	7
3	視覚効果による臨場感	9
3.1	人間の持つ感覚	9
3.2	仮想手および仮想物体の描画	11
3.3	デバイスの挙動に伴う画像の変化	13
4	実験および結果	14
4.1	システム構成	14
4.2	実験 1:実空間と仮想空間の重さ認識の違いの検証	15
4.2.1	実験方法	15
4.2.2	結果および考察	18
4.3	実験 2:重さを感じるのに最適な部位の検証	21
4.3.1	実験方法	21
4.3.2	結果および考察	22
4.4	実験 3:仮想空間における重さの弁別閾の検証	27
4.4.1	実験方法	27
4.4.2	結果および考察	28
5	むすび	30

謝辭	32
----	----

参考文献	33
------	----

# 第1章

## はじめに

テレビやパーソナルコンピュータといった機器及びこれらを介したインターネット等を中心としたメディアが近年急速に普及している。こうした普及によって、購買活動における商品の情報収集などが、テレビコマーシャルやウェブサイトなどを用いて簡易に行えるようになった。そのため、実際に店舗に行って商品を手にとることなく、テレビショッピングやインターネットショッピングといった通信販売を利用する消費者が増加している。販売者側から見た通信販売のメリットとして、在庫管理がしやすくなりコストの削減ができることが挙げられる。また、消費者側のメリットとしては、24時間利用可能であるために自分の都合に合わせた時間に買い物ができることや、販売者側のコストが削減されたことによって通常よりも商品を安く購入することができることなどが考えられる。

しかし、そういったメリットがある反面、デメリットも確実に存在する。その中でも、注文した商品が自宅に届いたときに、自分が想像していたものと大きさや重さが違うという例が多く見られる。こういった事態が発生するのは、商品を実際に手にとるのではなく、大きさや重さといった商品の情報を数字としてしか判断していないことが原因である。この問題を解決するためには、自宅に居ながらにして店舗へ買い物に行っているかのような感覚を味わえる環境を作ることが望まれる。

そこで、通信販売の商品の情報提供にバーチャルリアリティ (Virtual Reality : VR) 技術を応用することを考える。VR技術とは、コンピュータ上の仮想空間内で、実際にはその場に存在しない物体を、ヒトの感覚器を刺激することであたかもその場に物体があるかのように知覚させる技術である [1]。実際には手にとることができない、または手にとることが困難な商品であっても、この技術を用いることで擬

似的にはあるが手に取っている感覚を体験することが可能である。また、VR 技術を導入することで、通信販売においては今まで数字でしか判断できなかった大きさや重さといった商品の情報を直感的に知ることができるので、通信販売の問題点の解消や軽減といった効果が期待される。

VR 技術を用いて表現する仮想世界をより現実世界に近いものにするためにヒトが持つ五感を始め、様々な分野の研究がなされている。本研究で扱う触力覚の分野においても多くの研究がなされており、触力覚フィードバックに関するデバイスは、医療をはじめとする安易に行うことができない業務の擬似体験や危険な業務の遠隔操作などの目的で研究、開発されている [2][3]。その他にも関連研究として文献 [4][5] において、仮想の展示品に擬似的に触れることや形状を確認することができる仮想美術館についての研究が行われている。現実世界において物体を押したり触れたりするとそこに反力が生じる。この反力を精密に表現することができるデバイスは高価なものになる。また、反力が増大すればその力に耐えうるものでなければならぬためにデバイスは必然的に大型なものになってしまう [6]。

しかし通信販売は企業よりも一般家庭で多く利用されている。そのため、通信販売に特定のデバイスを用いるのであれば、一般家庭でも容易に購入することができ、なおかつ扱いが簡単なものでなければならない。高価なものや大型で操作が複雑なものでは一般家庭にまで普及することは期待できない。そこで、単純な触力覚フィードバックを用いて、比較的安価に実現できる通信販売システム、あるいはその基礎となるシステムを考える。

現在、振動のみという希薄な触力覚フィードバックの環境下でのインターネットショッピングシステムの研究が行われている [7][8]。文献 [7][8] では、グローブ型デバイスと振動を用いた仮想空間上での大きさの認識について、有効性があるという結果が出たとされている。ただし将来的には、通信販売において、商品の大きさだけでなく重さも仮想空間上で認識できるようになることが望ましい。しかし、振動を用いて重さを表現することは困難であると考えられる。

そこで、本研究では、SensAble Technologies 社の力覚フィードバックデバイス PHANTOM Omni[9] を用いてインターネットショッピングにおける重さ体感システムを

検討する。計量器などを使わずに、自分の手のみで物体の重さを量るとき、本来は、手でつかむ、手の上に乗せるといった方法が考えられるが、本研究では手の上に乗せて重さを量る方法に限定した。そのため、通信販売における購買対象商品の中でも片手で扱える商品が対象となる。その中でも、本研究では主に携帯電話を実験対象とした。携帯電話は今やほとんどの人が持っているものであり、次々と新しい商品が発売されている。近年の新しい携帯電話は機能の向上やデザインの変化以外では、薄型化などの軽量化の傾向にあるといえる。つまり、消費者が重い商品よりも軽く扱いやすい商品を求めていることが伺える。そのため、通信販売で購入した商品が想像していたものより重たいという事態になれば消費者の不満が大きくなることが予想される。本システムが実用化されれば、インターネットショッピングの場において購入時に重さを体感できるため、そういった問題は少なくなる上に、自分にとって扱いやすい商品も選択しやすくなると考えられる。ただし、本システムで体感した重さと実際の重さが違ってしまっても意味がないし、重さの感じ方は人によって異なる。本論分では、いくつかの実験により、重さの感じ方について本システムと現実世界でどのくらいのずれがあるか、本システムにおいてどの程度の重さの違いを識別できるのかといったことや、広く一般的に使えるシステムにするためにはどのように重さを体感することが望ましいか等を検討する。

以下では、第2章で重さ体感システムを提案し、理想とする形や展望を示す。第3章においては、本システムに臨場感を与えるための方法について説明する。第4章では重さ体感システムを想定した実験を行い、その有効性を検証する。

## 第2章

### 重さ認識システム

本章では, 理想とするシステムについての説明をし, 次に本研究の重さ認識システムの構成を述べる.

#### 2.1 目的とするシステム

どれだけ精密な触力覚を表現できるとしても, 高価なデバイスや大型で場所をとるようなデバイスは一般家庭には普及し難い. 本研究が目指すシステムは, 安価な触力覚フィードバックデバイスを用いることで重さを表現し, 体感できるものであり, 将来的にはネットショッピングの場で使用されるようなシステムである. デバイスが安価でかつ場所をとるものでなければ広く一般的に利用されることが期待できる.

現在安価で提供されている力覚フィードバックデバイスの例として, Novint 社 [10] の Novint Falcon が挙げられる (図1). Falcon は内臓されたフォースフィードバック機能によって, 仮想物体の形状や重量などを感じることができるデバイスである. 価格は2万円程度なので, 比較的手軽に家庭で購入することができる.



図 1: Novint Falcon

また、過去には Essential Reality 社 [11] から P5 GLOVE というグローブ型のインターフェイスが発売されたこともある (図 2,3)。このデバイスは指の曲げ具合を検出できるほか、手の動きに合わせてディスプレイ上のマウスカーソルを動かすことができる。販売されていた頃の価格は 1 万円程度なので家庭でも十分に購入可能であったといえる。また、今後これに類似した製品が同程度の価格で販売される可能性もある。

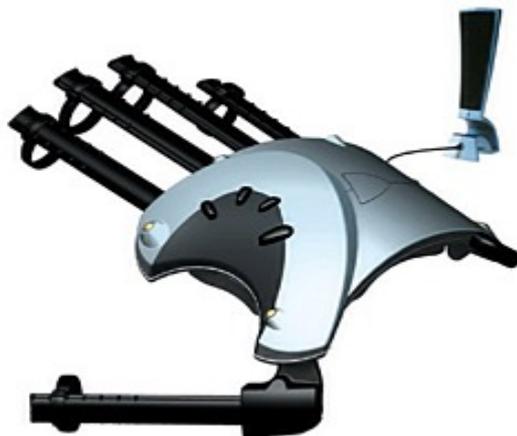


図 2: P5 GLOVE



図 3: P5 GLOVE を装着した様子

例に挙げた二つのデバイスなどを組み合わせたものを用いて、商品の大きさや重さを感じながらネットショッピングができる環境作りを目的とする。すなわち、P5グローブをはめた状態で、重さを認識できる Falcon を手首に固定することを考える。Falcon を固定する位置を手首にすれば、ユーザは腕をある程度自由に動かすことができ、Falcon で重さを感じながら P5 グローブで大きさを知ることができる。また、例に挙げた二つのデバイスならば両方合わせて3万円程度で実現できるので、一般的に普及することも十分に期待できる。また、それぞれのデバイスの特徴があらかじめ一体となったようなデバイスの研究や開発がされれば、このシステムが実現される可能性はさらに大きくなる。このようなシステムが実現された場合のイメージを図4に示す。

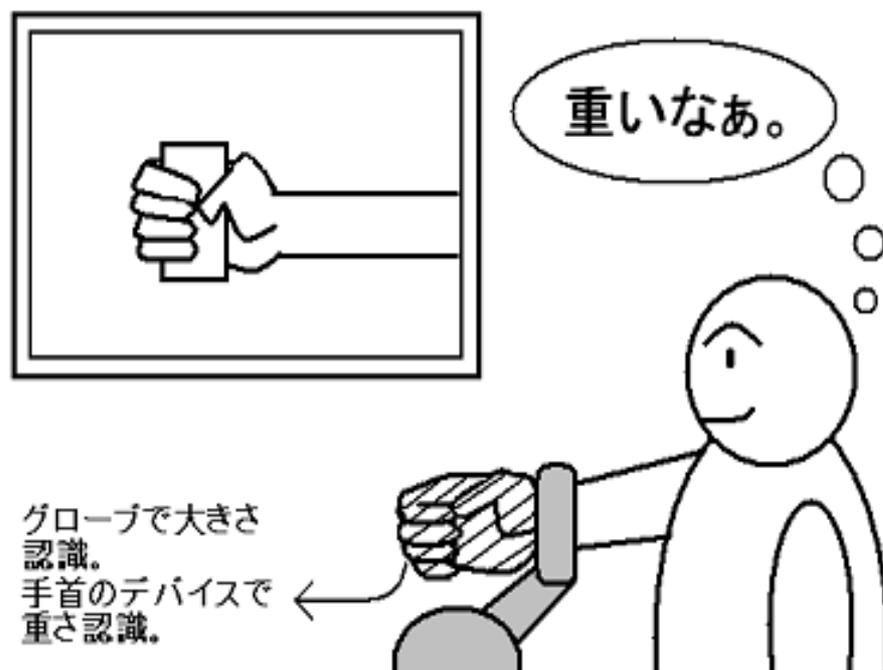


図4: 将来のネットショッピングのイメージ図

## 2.2 重さ認識システムの構成

本研究では力覚フィードバックデバイスを用いて重さを体感するシステムを前提としている。力覚フィードバックを得るためには、専用のデバイスを計算機に接続する必要がある。また、販売者と消費者の間の情報交換の即時性や力覚フィードバックデバイスの親和性も求められる。いくつかの通信販売方式の中で、これらの要件を満たすものとしてネットショッピングが最も適していると考えられる。そのため重さ認識システムは、ネットショッピングを対象とする一般家庭用の計算機で動作するシステムとした。

本研究では重さ認識システムのデバイスとして、比較的高価ではあるが Falcon と類似した機能を持つ PHANTOM Omni(図 5) を利用する。PHANTOM はバネの力や摩擦力などの様々な力を表現でき、それらの力を 3 自由度で出力することが可能である。



図 5: PHANTOM Omni

そこで、鉛直下向きに一定の力が常にかかるようにすることで擬似的な重力を表現することを考えた。また、デバイスを動かした方向にわずかな慣性が働くようにすることで、仮想物体が慣性によって移動する様子を擬似的に表現した。体感でき

る重さは50gから10g刻みに200gまでに設定し、その中から利用者が体感したい重さを選択できることとした。本研究で主に対象にした商品は携帯電話であり、近年では200gを超える重さの携帯電話はほとんど販売されていない。また、あまりに重い重量では、利用者の腕にかかる負担が大きくなってしまいうことも考えられる。こうした理由により体感できる重さの範囲は妥当なものであるといえる。

本来ならば、デバイスは手首に取り付けることが望ましい。しかし現状では、PHANTOMを手首に取り付けるためには、デバイスを紐やテープで固定することになってしまう。そこで、本実験ではデバイスを、手首に取り付けるのではなく持つ形で重さを感じる方法を考えた。PHANTOMはペン型のデバイスである。そのため、図5のようにペンを握るように持った場合とペンを手のひらに乗せるように持った場合とでは重さの感じ方が変わってしまうことが考えられる。一般的に、体重計や計量器などをはじめとする重さを量る機械の多くは対象物を上に乗せる形のものである。そこで、本研究では手のひらを上に向けて対象物を乗せる形で重さを体感することを前提とした(図6,7)。実際の商品においても主に携帯電話を対象としているため、デバイスをペンを握るように持つより手に乗せるように持ったほうが感覚は現実に近くなると考えられる。

また、システム利用時には臨場感を与えるための画像が表示される。これについては本稿第3章で述べる。



図 6: 実物体の持ち方



図 7: デバイスの持ち方

## 第3章

### 視覚効果による臨場感

本章ではシステム利用時の臨場感を増すための方法について述べる。単純に「重さ」というものを知るために必要なのは、物体に触れたかどうかを感じる触覚と物体からどれほどの力が加わっているかを感じる圧覚の二つである。本研究が提案する重さ認識システムにおいても、この二つの感覚を使うことで重さを認識・識別することとしている。

しかし、本研究の将来的な目的の一つはネットショッピングという場で用いられるためのシステムである。そのため、手で感じる感覚のみでは臨場感が欠けると考えられる。そこで2次元ディスプレイにユーザの手の動きと同期する画像を表示することによって臨場感を補い、実際に商品を手に乗せている感覚に近づけることを検討する。

以下では、まず人間の感覚について説明し、次に2次元ディスプレイに表示する画像について説明する。

#### 3.1 人間の持つ感覚

人間の体は外部、または内部からの刺激を感覚として捉え、それに対して何らかの反応を起こす。感覚は大きく分けると三つの感覚に分類できる [12]。皮膚表面で感じる表面感覚と筋肉などの動きや痛みを感じる深部感覚からなる体性感覚、臓器から受け取る吐き気などの感覚である内臓感覚、体の一部にしか含まれない受容器で刺激を受け取る感覚である特殊感覚の三つである。重さを知るときに必要な触覚と圧覚はどちらも表面感覚に含まれる。また、視覚は特殊感覚に含まれる。

人間が持つ感覚の中の、異なる複数の感覚を刺激することによってシステムに臨場感を与えることを検討する。また、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。なかでも、図8に代表されるような視覚情報の錯覚が広く知られている。図8は実際はまっすぐな平行線が中ほどへいくにしたがって離れて見えたり、すぼんで見えたりする図である。このような例から、視覚が人間に及ぼす効果は少なくないといえるので、システム利用時に画を表示させることは有効であると考えられる。

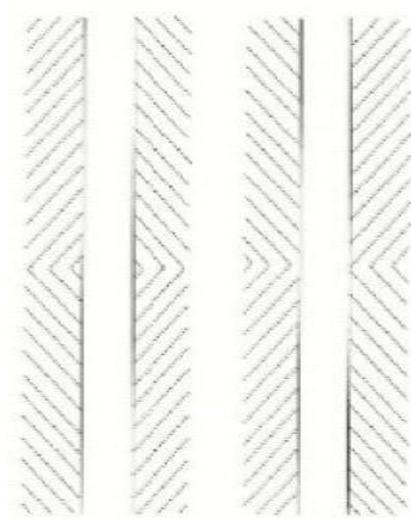


図 8: 目の錯覚の例

### 3.2 仮想手および仮想物体の描画

本研究では、重さは片手で感じることをしているため、本節では右手についてのみ述べる。ただし、反転することによって同様のモデルで左手を描画することができる。描画した仮想手を図9に示す。

図9はOpenGLによって描画された画像である。また、PHANTOMは文献[7][8]で用いているグローブ型デバイスとは異なり、現実空間における各指の動きや手全体の形状の変化には対応していない。本システムに関して言えば手の描画は補助的な意味合いが強く、また、物体の持ち方も限定しているため指の動きなどに対応していなくても大きな問題にはならない。

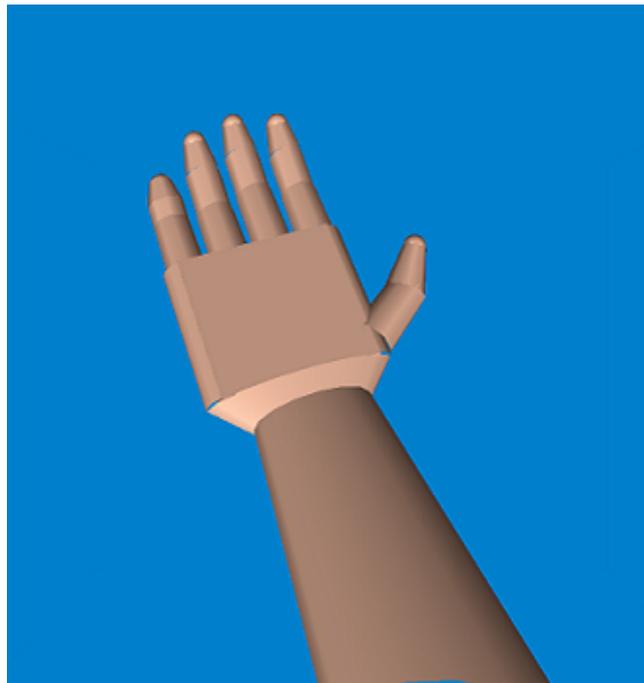


図9: 描画した仮想手

本システムでは片手で重さを感じることを前提としている。片手で扱える商品の一例として、対象を図10のような携帯電話とした。図10は図9と同様にOpenGLによって描画されている。

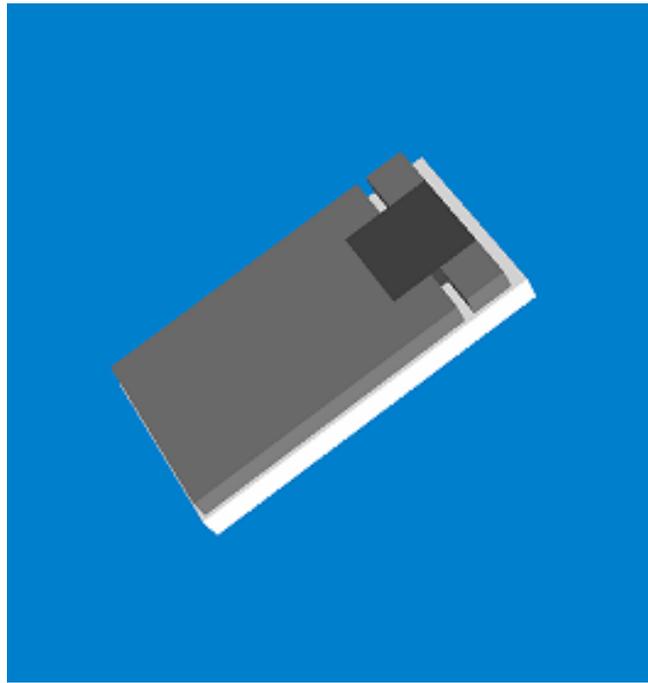


図 10: 描画した仮想物体

### 3.3 デバイスの挙動に伴う画像の変化

デバイスから擬似的な重さを表現した力が出力される時、画像が表示される。その際に表示させるのは、仮想手と仮想物体を組み合わせで作成した、手の上に携帯電話を乗せている画像とする(図11)。

PHANTOMは内蔵されたモーションセンサによってペン型デバイスの位置や方向が入力できる。これにより、現実空間で重さを感じながらデバイスを動かしたとき、その動きに伴って図中の画像も動くようにできる。単純に重さだけを感じるよりも、視覚的な情報を付加することによってシステム利用時の臨場感が増す効果が期待できる。

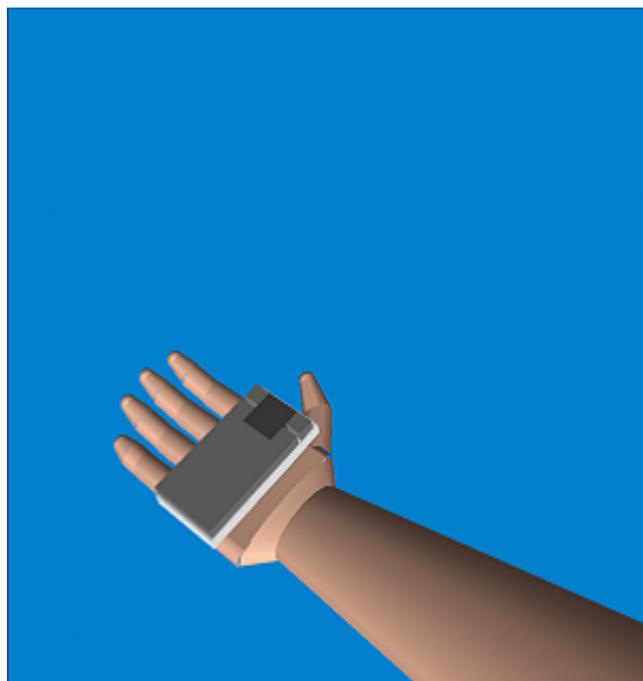


図 11: デバイスの動きに対応する画像

## 第4章

### 実験および結果

#### 4.1 システム構成

第2章で述べた重さ認識システムを以下の構成のコンピュータ上で,C++言語により実装した. なお, 開発環境は Microsoft Visual C++ 6.0 である.

- CPU: Intel(R) Pentium(R) 4 1.60GHz
- RAM: 256MB
- GPU: NVIDIA GeForce2 MX/MX 400
- OS: Microsoft Windows XP Professional

ペン型でかつ, 内臓されたモーションセンサによるデバイスの位置や方向の入力と,3自由度で力の出力ができる PHANTOM Omni(SensAbleTechnologies 社) をインターフェース装置として使用した. また第3章で述べた, デバイスの動きに合わせて動く 3D グラフィックスを OpenGL を利用することによって描画した.

以下では, このシステム環境下で行った三つの実験の結果を示し, 得られた結果を考察する.

## 4.2 実験 1:実空間と仮想空間の重さ認識の違いの検証

本研究では,安価なデバイスを用いた仮想空間での重さ認識システムを提案している.そのため,対象物が携帯電話のような直方体であった場合,本来は重さを「面」で感じるのに対して,デバイスでは重さを「点」で感じることになる場合が想定される.そのため数値上では同じ重さでも使用者の感じ方が異なってしまふことが考えられる.

そこで,実空間と仮想空間での重さの認識の仕方にどのようなずれがあるのかを検証する.

### 4.2.1 実験方法

実験に用いるデバイス PHANTOM Omni は 3 自由度で動かすことが可能であり,各方向に設定した力を出力することができる.今回の実験では重さを表現するため,鉛直下向きに一定の力を出力した.

また,本実験では実空間においても仮想空間においても,手のひらを上に向けて対象物を乗せる形で重さを体感することとした.そのため腕の動きは制限される.実験の様子を図 12 に示す.

ある重さの実物と,仮想空間上に実物と同じ重さ,異なる重さの重量パターンを用意し(図 13),それぞれを比較することによって実験を行った.PHANTOM を乗せる位置は手のひら,指先,手首の 3ヶ所とし,被験者によって乗せる位置がずれてしまわないように市販のグローブに目印を縫い付けたものを使用した(図 14).被験者の利き腕を考慮し,左手用のグローブも用意した.



図 12: 実験の様子

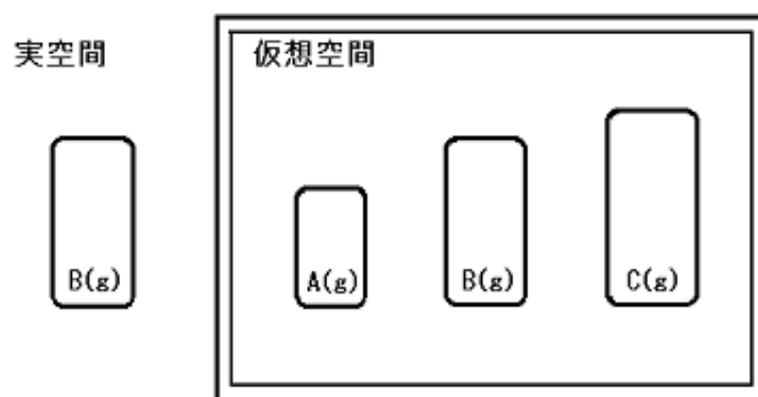


図 13: 実験のイメージ



図 14: 実験に使用したグローブ

本実験においては実物に 130g の携帯電話を用いることとし、また、仮想空間上の重量パターン間の差を 50g, 30g, 10g の 3 種類とした。重量の差とその時に用意する仮想空間上のパターンを表 1 に示す。

表 1: 重量差と重量パターン

重量差	重量パターン
50g 差	80g 130g 180g
30g 差	100g 130g 160g
10g 差	120g 130g 140g

また、本実験には以下の条件を設定した。

- 適宜、実物との比較ができるものとする。
- 実物の持ち方は、「手の上に乗せる」ということ以外は指定しない。(乗せる位置や乗せ方は自由)
- 仮想の重量は何度でも体験可能とする。

実験は右利き、左利きの男女計 10 名に対して、それぞれの重量差についての 3 パターンをランダムに体感してもらい 3 パターンすべて体感した後、どれが実物と同

じ重さと感じたかを聞くという試行を各3回ずつ行った。さらに、この実験は前述のように手の部位3ヶ所に乘せて、それぞれ同様に行うので1人あたりの実験回数は3(重量差) × 3(試行回数) × 3(手の部位) の計27回である。

#### 4.2.2 結果および考察

実験結果を表2(a)～(c)に示す。表は被験者が、実物と同じ重さであると感じて選んだ仮想重量と、その仮想重量が選ばれた回数を重量差別に示している。各重量差において、選ばれた回数の合計は3(試行回数) × 3(手の部位) × 10(被験者数) の計90回となる。

表2: 実験における被験者の回答数

(a) 50g 差		(b) 30g 差		(c) 10g 差	
仮想重量	回数 (回)	仮想重量	回数 (回)	仮想重量	回数 (回)
80g	20	100g	33	120g	43
130g	67	130g	53	130g	29
180g	3	160g	4	140g	18

仮想重量パターン間の差が50gのときは被験者が正解を選んだ回数が67回と最も多くなり、正解率は70%を超えた。被験者からも50g差のときはどれが実物と同じ重さであるかがはっきりわかったという積極的な意見が得られた。また、答えを間違える場合は実際よりも軽い方を選ぶ傾向にあることがわかった。30g差のときも、50g差のときと比較すると減ってはいるが、正解が選ばれた回数が53回と最も多くなった。正解が減った回数とほぼ同じ数だけ軽い方が選ばれた回数が増えていた。このことから、重さの選び方に50g差のときと同様の傾向があると考えられた。10g差のときにもやはりその傾向は現れており、軽い方の回数が正解の回数を上回る結果となった。しかし、30g差のときと比較してみると、被験者が軽い方を選んだ回数と重い方を選んだ回数がほぼ同じ数だけ増えていることがわかった。これは、重量差が10gのときは重さの違いの判断そのものが難しくなったためだと考えら

れる。

仮想空間上の重量パターンの中で、実物と同じ重さよりも軽いものを選ぶ場合が多いということがわかった。仮想重量パターン間の差が 50g のときを例に考えると、実際は 80g の重さしかない仮想重量を 130g 相当の重さを感じているということである。これはつまり、仮想空間上で感じる重さは実空間上で感じる重さよりも重たく感じるということである。どの重量差のときにも重さの感じ方に同じような傾向が表れたことはシステムを改善するためには有効な情報であり、改善もしやすいので大いに役立つ結果であったといえる。

仮想空間上で感じる重さが実空間上で感じる重さよりも重たく感じる原因としてまず、力の質の違いが挙げられる。デバイスを用いて重力を表現した場合、被験者はデバイスを見たときの先入観によって、重さを感じているという感覚よりも機械に押されているという感覚が強くなってしまうと推測できる。そのため、同じ重さであってもデバイスで感じた重さの方が重く感じると考えられるので、出力する力の値を実際よりも小さくする必要がある。また現実世界では、物体を手に乗せた状態で上下運動をすると、動かした方向への加速度に対する反力が生じる。すなわち、鉛直上向きに手を動かしたとき、上方向に生じた加速度に対して下方向に反力が働くことになる。そのため、感じる重さは本来の物体の重さよりも重たくなると考えられる。デバイスにこういった反力などの力の表現を加えることで使用者が感じる感覚の違いを少なくすることが期待できる。

その他にも被験者の意見に、携帯電話と PHANTOM では手に触れる感触が大きく異なるという意見があった。PHANTOM はペン型デバイスであるため、手に乗せたときにデバイスが触れる面積が狭く重さを感じる範囲がある程度絞られてしまう。しかし、対象物が携帯電話の場合は手に触れる面積が広がるため、手にかかる力が同じであっても分散されてしまい軽く感じるのではと考えられる。この結果によって実験前に立てた、「面」で感じる重さと「点」で感じる重さが違うという仮説が実証されたことになる。ただし、この問題を根本から解決するためには、携帯

電話だけではなく多岐にわたるネットショップの商品すべてに対応させる必要がある  
ので、事実上はほぼ不可能である。そのため、前述のように力の大きさや出力方法  
を調整することが現状では最善の解決策であると考えられる。

## 4.3 実験 2:重さを感じるのに最適な部位の検証

ここでは人の手のどこの部位が重さを認識するのに適しているのかを調べる。本稿第2章で述べたようなデータグローブと力覚フィードバックデバイスを合体させたものが利用されるようになった場合、デバイス装着箇所として考えられるのは手首である。現実世界において物を乗せて重さを量るとき、多く使われるのは手のひらである。また、細かい作業を行うときなどに使われる指先は繊細な感覚が備わっていると考えられる。

これらの理由により、本実験で検討する部位は手首、手のひら、指先の3ヶ所とした。

### 4.3.1 実験方法

実験に用いるデバイス PHANTOM Omni は3自由度で動かすことが可能であり、各方向に設定した力を出力することができる。今回の実験では重さを表現するため、鉛直下向きに一定の力を出力した。

また、本実験では実空間においても仮想空間においても、手のひらを上に向けて対象物を乗せる形で重さを体感することとした。そのため腕の動きは制限される。

ある重さの実物と、仮想空間上に実物と同じ重さ、異なる重さの重量パターンを用意し、それぞれを比較することによって実験を行った。PHANTOM を乗せる位置は手のひら、指先、手首の3ヶ所とし、被験者によって乗せる位置がずれないように市販のグローブに目印を縫い付けたものを使用した。被験者の利き腕を考慮し、左手用のグローブも用意した。

本実験においては実物に130gの携帯電話を用いることとし、また、仮想空間上の重量パターンの間の差を50g,30g,10gの3種類とした。重量の差とその時に用意する仮想空間上のパターンを表3に示す。

表 3: 重量差と重量パターン

重量差	重量パターン
50g 差	80g 130g 180g
30g 差	100g 130g 160g
10g 差	120g 130g 140g

また, 本実験には以下の条件を設定した.

- 適宜, 実物との比較ができるものとする.
- 実物の持ち方は, 「手の上に乗せる」ということ以外は指定しない.(乗せる位置や乗せ方は自由)
- 仮想の重量は何度でも体験可能とする.

実験は右利き, 左利きの男女計 10 名に対して, それぞれの重量差についての 3 パターンをランダムに体感してもらい 3 パターンすべて体感した後, どれが実物と同じ重さと感じたかを聞くという試行を各 3 回ずつ行った. さらに, この実験は前述のように手の部位 3ヶ所に取り付けて, それぞれ同様に行うので 1 人あたりの実験回数は 3(重量差) × 3(試行回数) × 3(手の部位) の計 27 回である.

実験後, それぞれの手の部位での重さのわかりやすさについて 7 段階評価アンケート (1:わかりにくい, 4:どちらでもない, 7:わかりやすい) を行った.

実験 2 は評価アンケートを行うことを除けば, 実験 1 と同様の実験で検証することができる. 条件や実験回数などもすべて同様であるので, 実験 1 を行った際にアンケートを実施することで二つの実験を同時に行ったものとし, 得られた結果を考察することとした.

#### 4.3.2 結果および考察

手のそれぞれの部位における重量差別の正解率を表 4(a) ~ (c) に, 部位別に見た正解率 (全体) と評価平均値を表 5 に示す.

表 4: 重量差別の正解率

(a) 手首		(b) 手のひら		(c) 指先	
	正解率 (%)		正解率 (%)		正解率 (%)
50g 差	53.3	50g 差	76.7	50g 差	93.3
30g 差	50.0	30g 差	50.0	30g 差	76.7
10g 差	30.0	10g 差	23.3	10g 差	43.3

表 5: 手の部位における正解率と評価平均値

	正解率 (%)	評価平均値
手首	44.4	3.1
手のひら	50.0	5.0
指先	71.1	4.9

手首は重量差が 50g のときであっても正解率は 5 割を少し超える程度にとどまった。全体で見ると正解率は 5 割に満たず、評価平均値も 4 以下となった。手のひらと指先は評価平均値が 5 と 4.9 でほぼ同等の評価を得たが、正解率に大きな差が生じた。手のひらの正解率は重量差が 50g であれば 70%以上あるので実用に足ると考えられるが、30g 差からは手首と同等もしくはそれ以下の正解率になってしまっている。それに比べて指先は 50g 差、30g 差でともに正解率 70%を超えており、他の 2カ所に比べると高い数値であった。また、どの部位においても重量差が 10g になったときは正解率が大きく下がっている。これは実験 1 で述べたように、10g 差のときは重さの違いの判断そのものが難しくなったためだと考えられる。

表 5 の手の部位における全体の正解率を見ても、やはり指先の正解率が他の 2カ所よりも高い数値である。しかもその数値は 70%を超えているので、指先に関してはすでに実用に足る水準に達していると考えられる。ただし、いずれの部位に対しても重量差 10g のときの結果が全体の正解率を下げる要因となっているといえる。そこ

で、実物体同士での重さの違いの判断が難しいと考えられる 10g 差のときを除いた場合の全体の正解率を算出すると、手首は 51.7%、手のひらは 63.3%、指先は 85.0% となった。このことから、重さの差がある程度判断できていれば、どの部位も正解率が 10% 近く増加することがわかった。

手のひらと指先について、評価が同等であるのに正解率に大きな差が出た原因として考えられるのは対象物が手に触れる面積の広さの違いである。指先に比べると手のひらは物体が触れる領域が広い。そのため、対象物が携帯電話であった場合は手のひら全体に物体が触れるので手にかかる力が分散されてしまう。対して PHANTOM はペン型であるため手のひら全体に触れていてもあまり力が分散されない。それに比べて指先は、対象物がどちらの場合であっても触れる面積が狭いため、実物とデバイスで感じる力の差が少ないのだと考えられる。

さらに参考として、実験 1 の視点から見た結果を考察することを考える。手の部位別で見た実験結果を表 6～8 に示す。

表 6: 手首

(a) 50g 差		(b) 30g 差		(c) 10g 差	
仮想重量	回数 (回)	仮想重量	回数 (回)	仮想重量	回数 (回)
80g	11	100g	11	120g	15
130g	16	130g	15	130g	9
180g	3	160g	4	140g	6

表 7: 手のひら

(a) 50g 差		(b) 30g 差		(c) 10g 差	
仮想重量	回数 (回)	仮想重量	回数 (回)	仮想重量	回数 (回)
80g	7	100g	15	120g	16
130g	23	130g	15	130g	7
180g	0	160g	0	140g	7

表 8: 指先

(a) 50g 差		(b) 30g 差		(c) 10g 差	
仮想重量	回数 (回)	仮想重量	回数 (回)	仮想重量	回数 (回)
80g	2	100g	7	120g	12
130g	28	130g	23	130g	13
180g	0	160g	0	140g	5

手首の場合、いずれの重量差のときも答え方にややばらつきがある結果となった。それに対して、手のひらや指先は重量差が 10g になるまでは答えを間違えた場合でも、一貫して軽い方と間違える傾向にあることがわかった。複数の被験者に対し複数回試行を繰り返したのにも関わらず間違え方が同じであるということは、手のひらや指先での重さの感じ方には個人差が少ないと考えられる。

広く一般的に使用されるためには、誰が使用しても同じように利用できるシステムであることが望ましい。また、実物と仮想重量の感じ方にも差が少ないことが重要である。これらの観点から実験結果を考察すると、人が重さを感じるのに最適な手の部位は指先であると考えられる。

ただし、手のひらに関しては被験者の評価が高く、答え方のばらつきも少なかった。そのため、仮想重量を実際よりも軽く設定するなどの調整をすれば正解率も上がり、十分に実用的なレベルに達することが期待できる。将来的に、対象物を握って重さを評価するということを考慮するのであれば、手のひらでの重さの感じ方も重要な要素になると考えられるので重さの調整は必要である。

また、データグローブと力覚フィードバック装置を合体させ、対象物の持ち方を特に指定せずに重さを感じることができるようにした場合、腕が自由に動かせるためには力覚フィードバックデバイスは手首に取り付けることが望ましい。そうなれば、手首においても実空間と仮想空間で同じように重さを感じられるようにする必要がある。本実験における手首の結果は、他の 2ヶ所に比べれば劣っているという結

果であったが、出力する重さの調節をすれば正解率は上がると考えられるし、重さの感じ方にもある程度は一定の傾向が見られるので比較的容易に重さを調節することができると考えられる。

それぞれの部位ごとに設定すべき仮想重量が明確になれば、使用するデバイスや対象物の持ち方によってデバイスの装着位置を選ぶことができるので、より実用的で広く利用されるシステムになることが期待できる。

## 4.4 実験3:仮想空間における重さの弁別閾の検証

本システムを用いたとき, 仮想空間上でどの程度の重さの違いまで識別できるのか, どの程度の精度で重さの違いがわかるのかを検証する.

### 4.4.1 実験方法

仮想空間上の二つの異なる重量パターンを比較することで実験を行った. 重さの感じ方は実験1と同様にデバイスを手に乗せる形とした. ただし, デバイスを乗せる位置は実験2で最も効果が高いという結果が得られた指先のみとした. また, 実験1,2における指先の結果や被験者の意見から重量差が30g程度までは重さの違いを判断することができていると考えられたので, 本実験ではそれ以下の重量差の場合について検討した.

ところで, ドイツの生理学者 E. ウェーバーによれば, 刺激の弁別閾 (気づくことができる最小刺激差) は基準となる刺激の強度に比例する. 標準刺激量を  $R$ , 識別閾値を  $\Delta R$  とすると

$$\frac{\Delta R}{R} = \text{一定}$$

という式が成り立つ. これをウェーバーの法則といい, この法則は重量感覚についてもあてはまる.

そこで, 標準となる重さを 100g, 130g, 160g としウェーバーの法則に従って比較となる重さを表 9, 10 のように設定した. しかし, 本稿第 2 章で述べたように本システムでは 10g 刻みでしか重さの変更をしない. そのため, 正確に法則に当てはめることはせず, それぞれ識別閾が 10%以内, 20%以内となるように設定した. 表中の重量とはすべて仮想空間上に用意した重量のことであり, ウェーバーの法則の式における識別閾値が表中の重量差に該当する.

右利き, 左利きの男女計 9 名に対して, 表 9, 10 に示したパターンの重量比較をしてもらいどちらが重たいかを当ててもらおうという試行をそれぞれ 3 回ずつ行った. 被験者が希望すれば一度感じた重さを複数回体感することも可能とし, 識別できな

表 9: 比較重量パターン 1

標準重量	比較重量	重量差	識別閾 (%)
100g	110g	10g	10.0
130g	140g	10g	7.7
160g	170g	10g	6.3

表 10: 比較重量パターン 2

標準重量	比較重量	重量差	識別閾 (%)
100g	120g	20g	20.0
130g	150g	20g	15.4
160g	190g	30g	18.8

い場合は「識別不能」という回答も可とした。

この実験は三つの標準重量に対しそれぞれ 2 通りの比較重量が用意されており、それぞれの試行回数が 3 回である。よって 1 人あたりの実験回数は  $3(\text{標準重量}) \times 2(\text{標準重量に対する比較重量}) \times 3(\text{試行回数})$  の計 18 回である。

#### 4.4.2 結果および考察

比較重量パターン 1(識別閾 10%) と比較重量パターン 2(識別閾 20%) の弁別確率(正解率)を表 11,12 に示す。

表 11: 比較重量と弁別確率 (1)

標準重量	比較重量	識別閾 (%)	弁別確率 (%)
100g	110g	10.0	81.5
130g	140g	7.7	66.7
160g	170g	6.3	59.3

表 12: 比較重量と弁別確率 (2)

標準重量	比較重量	識別閾 (%)	弁別確率 (%)
100g	120g	20.0	92.6
130g	150g	15.4	96.3
160g	190g	18.8	100.0

識別閾が 20%以内のときは弁別確率はいずれも 90%を超えており、識別閾 10%以内になると弁別確率が下がる結果となった。ただし、標準重量が 100g の場合は 10g の差であっても弁別確率は 80%以上であった。これらのことから、本システムにおいては 10g ~ 15g の差までならば重さの違いを識別することが可能であると考えられる。

文献 [13] では、腕が自由な状態で実物体を持つときの、弁別確率 75%の元での重量弁別閾は標準重量に対して 8%であり、皮膚感覚のみが知覚される状態で標準重量に対して 20%以内の弁別閾を持てば実用上妥当な範囲にあるとしている。本システムは重さを感じる時の対象物の持ち方を限定しているため、腕が自由な状態であるとはいえない。しかし実験結果から、腕の動きが制限された状態でも標準重量に対して 10%までの弁別閾を持つことがわかったので、本システムは実用上妥当な範囲にあるといえる。ただし、本実験では 100g 以下の重さについての実験を行っていないので、システムの実用性をより確実なものとするためにはそれらについての実験も行う必要があると考えられる。

対象物を手に乗せて重さを感じる方法に限定しても、本システムを用いれば、腕が自由な状態で実物体を持ったときと遜色ない程の精度で重さの違いを認識できるということがわかった。そのため、重さの違いの認識ということに関しては、実空間と仮想空間で大きな差はないといえるので、後は実空間での重さの感じ方と仮想空間での重さの感じ方の違いに関する研究が進めば、VR 技術を用いたインターネットショッピングが実現される可能性は高いといえる。

## 第5章

### むすび

ネットショッピングなどで商品情報を見たとき、数値だけでその商品がどのくらいの重さかを理解するのは難しい。そのため、数字として表示された重さがどれほどのものなのかを体感できるシステムが望まれる。そこで本研究ではネットショッピングなどの通信販売の場において用いられるような、重さの体感や認識ができるシステムの構築を目的とした。

目的とするシステムを実用化するためにはいくつかの課題がある。主なものとして、高価で場所をとるデバイスは家庭になじまないということがある。そこで本研究では比較的安価な装置を用いてシステムを構築することを考えた。ただし、そういったデバイスを用いる場合、本来の重さは手の複数箇所を感じるのに対して、デバイスではほぼ一点へのフィードバックしか与えられない。そのため、システムで体感した重さと実物を持ったときに感じる重さではどのような違いがあるのかということや、どのくらいの精度で重さの識別が可能であるのかといったことを検証する必要がある。本研究の実験により、仮想空間上で感じる重さの方が、現実空間で感じる重さよりも重く感じるということがわかった。その他にも、重量差 20g 程度まではほぼ確実に重さの違いを識別できることが実証された。比較実験をする際に基準とする重量や個人差はあるものの 10g ~ 15g 程度の識別も十分に可能であるという結果も得られた。いくつかの制限をつけた状況下ではあるが、本研究が提案する重さ認識システムは実用上妥当な範囲にあるということがわかった。

今後の課題として、重さを感じる部位の拡張や重さの感じ方の制限をなくすことが必要である。本研究の実験において最も高い効果を得られたのは指先であり、指先に関してのみ、本システムは実用に足るという結果となった。ただし、重さを感じ

る部位別に、仮想空間上に設定する重さを調整すれば指先以外の部位でもシステムを利用できるようになると考えられる。特に手のひらについては各個人による重さの感じ方の差が少ないと考えられるので比較的容易に設定すべき重量を検証することができると思われる。また本研究では重さの感じ方を、対象物を手の上に乗せるという形に限定しているので、腕が自由に動かせないという問題を抱えている。今後の研究によってデバイスを手の甲や手首に固定した状態で重さを感じられるようになれば、この問題を解決できる上に、文献 [7][8] で用いているグローブ型デバイスを組み合わせることで重さだけでなく大きさや形状も把握できるシステムが生まれる可能性がある。

他にも、本研究では視覚効果が与える効果についての実験をしていないため、デバイスの動きに対応する画が本当に臨場感を与えているかどうかを実証されていない。今後はこれを検証するとともに、表示する画を変更したり別の視覚効果を加えることでより表現力や臨場感を強めることを課題としたい。

そして、さらに将来的にはやはりインターネットショッピングに本システムを応用していくことも考えたい。重さという情報は実際に体感してみないとわかりにくいものなので、商品に触れることのできないネットショッピングの場に重さ認識システムを取り入れることは有効なはずである。また、家庭における、ネットショッピング以外での重さ認識システムの利用法についても考えていきたい。

## 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 舟橋健司 准教授、伊藤宏隆助教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伊藤研究室の皆様ならびに中部大学 岩堀研究室の皆様にも深く感謝致します。

さらに実験にご協力いただきました友人の皆様にも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] 日本 VR 医学会: <http://www.jsmvr.umin.ne.jp/>
- [3] 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学会論文誌, Vol.8, No.4, pp.413-420, 2003.
- [4] 浅野寿朗, 石橋豊, 峯澤聡司: 触る分散仮想博物館における展示オブジェクト表示と解説情報ストリーミング開始の適応型制御, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.11, No.1, pp.27-38, 2006.
- [5] T.Asano and Y.Ishibashi: A Haptic Museum in Distributed Virtual Environments, Proc. WTC/ISS2004, 2004.
- [6] Immersion 社: Cyber Force  
[http://www.aec.co.jp/mm/products/leaflet/cyberforce\\_datasheet.pdf](http://www.aec.co.jp/mm/products/leaflet/cyberforce_datasheet.pdf)
- [7] 黒田雄大: VR ネットショッピングシステムのための触力覚フィードバック方法の検討, 平成 19 年度 名古屋工業大学卒業研究論文, 2008 .
- [8] Kenji Funahashi, Yuuta Kuroda, Masumi Mori: A Study for Touchable Online Shopping System with Haptical Force Feedback, Proc. ICAT2008, pp.297-300, 2008.
- [9] SensAble Technorogies 社: PHANTOM Omni  
[http://sensable.jp/hapticdevice\\_toolkit/haptic\\_device\\_toolkit.html](http://sensable.jp/hapticdevice_toolkit/haptic_device_toolkit.html)

- [10] Novint 社: Novint Falcon  
[http://home.novint.com/products/novint\\_falcon.php](http://home.novint.com/products/novint_falcon.php)
- [11] Essential Reality 社: P5 GLOVE  
<http://www.essentialreality.com>
- [12] 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.
- [13] 南澤孝太, 深町聡一郎, 梶本裕之, 川上直樹, 舘すすむ: バーチャルな物体の質量および内部ダイナミクスを提示する装着型触力覚ディスプレイ, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.13, No.1, pp.15-24, 2008.