

平成 21 年度 卒業研究論文

VR ネットショッピングのための
センサー数の少ないデータグローブの補正法

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 18 年度入学 18115129 番

濱口 真一

目次

第1章	はじめに	1
第2章	人間の錯覚と触力覚フィードバックの利用	4
2.1	人間の生理と錯覚	4
2.2	視覚による他感覚への影響	5
2.3	触力覚フィードバックの利用による触覚の再現	6
2.4	ヒューマンインターフェイス	7
第3章	VR ネットショッピングシステム	9
3.1	少数のセンサーによる仮想手操作	9
3.1.1	仮想手関節の基本角度の設定	10
3.1.2	指関節角度の再現	13
3.2	カメラを利用した仮想手の自動選択機能	15
3.2.1	色情報の取得	16
3.2.2	大きさ情報の取得	17
3.3	仮想手による物体操作モデル	26
第4章	実験	27
4.1	システム構成	28
4.2	実験 I: センサー数の少ないデータグローブによる仮想手操作実験	29
4.2.1	実験方法	29
4.2.2	結果及び考察	30
4.3	実験 II: カメラによる仮想手自動選択機能の性能実験	31
4.3.1	実験方法	31
4.3.2	結果及び考察	32
第5章	むすび	33
	謝辞	35

参考文献

第1章 はじめに

テレビやパーソナルコンピュータ、携帯電話等に代表される情報通信メディアの普及率は年々増加傾向にあり、その重要性はかなり高くなっている。その中でもパーソナルコンピュータを介したインターネットは2009年現在、日本国内での普及率が国民人口の75.3%に達しており [1]、既に社会にとってなくてはならないものとなっている。この普及率の高さの理由には、ソーシャルネットワーキングシステムやブログなどの個人向けネットサービスの充実や、リアルタイムでの迅速な情報の収集および伝達が可能であるという特性がある。

近年ではこういったメディアの発展・普及に伴って、テレビショッピングやインターネットを利用したオンラインショッピングといった通信販売が登場した。通信販売には、通常の店舗販売に比べてメリットが多い。販売者の立場からみれば、店舗を用意する必要がないため土地代や店舗の建設費用がかからず、従業員の数を減らすことによる人件費の削減も出来るため全体的なコストの削減が可能である。さらに商品を店舗におかず、一ヶ所から発送することができるので在庫管理も容易になる。消費者の立場からみれば、店舗に赴く必要がないので時間がかからず、店まで行ったのに商品の在庫がないため購入できないといったことの心配もない。また、オンラインショッピングであれば自分の欲しい商品に関する情報を即座に入手できる上、ある販売業者と他の販売業者での商品価格の比較も可能である。さらに、先述したとおり通信販売では販売者側がコストを削減できるので、価格設定が店舗販売に比べて安くなることが多い。これらのメリットから、通信販売を利用する消費者の数が増加傾向にある。

しかし、通信販売はメリットばかりというわけではない。店舗での商品購入と違って、商品の現物を手に取って選ぶというプロセスを踏むことが出来ないために、問題が発生することが少なくない。たとえば、実際に購入した商品が届いてみると、頭の中で想像していた商品に比べて大きさが違っていたり、色が違っていたり、重かったりといった問題である。これらは商品を手に取って調べることのできる店舗販売の場合では発生しない問題であるため、商品を手に取るという商品選択方法が再現できれば解決できると考えられる。そこで、オンラインショッピングにおいて、バーチャルリアリティ(Virtual Reality:VR)技術を利用することを考える。

VRとは、日本語では「仮想現実感」とも言われる。実体はないが本質的には同じであるという意味を持ち、ゲーム分野や医療分野、建築分野などで使われるシミュレーションなど

はこの考え方に基づいている。コンピュータの上でデータとしての仮想空間とその空間内の物体を定義し、ユーザーの感覚を刺激することによって、あたかもその場に本当に物体が存在しているかのように知覚させる技術を VR 技術という。この VR 技術を取り入れることで、消費者は仮想空間上で、店舗販売と同様の購入プロセスを擬似的に踏むことが出来るようになる。このとき商品に対する触覚を再現できれば、これまでの通信販売では視覚と聴覚のみに頼っていた商品についての情報が触覚からも得られるため、より直感的な情報収集や購入判断が可能となることが期待できる。

当研究室では仮想空間上で定義された仮想手-仮想物体操作モデルによる実験システムを構築しており、このモデルを用いて、これまでも VR ネットショッピングに関する研究を行ってきた。

これまでの研究における実験システムの操作は、データグローブを用いて行っている。データグローブは複数のセンサーにより指や手の各部位の曲げ具合を数値として測定することができるグローブ型の機器である。当研究室で用いているデータグローブは合計 18 個のセンサーを備えており、細かい動きの情報を検出することができる高価なものである。しかし、我々が想定している VR ネットショッピングの主な利用者層は一般家庭であり、システムの普及を考えると使用機器は安価である必要がある。そこで、安価なデータグローブを操作デバイスとして用いることを考える。現在までに一般家庭向けに販売されたことのあるデータグローブとしては、パワーグローブや P5 などがある。詳細については 2.4 節を参照されたい。こういった家庭で購入できる程度の安価なデータグローブでは、必然的にセンサーの個数は少なくなるものと考えられる。だが、センサーの個数が少なくなると、仮想手の制御に問題が発生する。そもそも人間の手にはいくつもの関節があり、それぞれの関節を曲げ伸ばしすることで多様な動きを可能としている。当研究室の実験システムにおいては、データグローブ 18 個のセンサーによってそれらの関節の動きを測定して仮想手の動きに反映していたが、センサーの個数が少ないデータグローブだと関節の動きの大部分を測定することができないため、仮想手モデルに出力する情報パラメータの数が減少してしまい、その結果ユーザーが仮想手を自分の手のように制御することが困難になってしまう。そのため、一般向けに発売されているような安価なデータグローブを用いる場合には、これらの問題について対処することが必要になる。

これまでの研究で、振動子を用いた希薄な触力覚フィードバック環境下において、把握動作によって仮想物体の大きさを認識できることや仮想物体同士の大きさの比較が振動を通して可能になること [2][3]、このとき使用する仮想手の大きさをユーザーの手の大きさに調整することで仮想物体の大きさを正確に認識する確率が向上することや、振動の強さが仮想物体の固さとして認識される傾向があることは実証されている [4]。ただし、これまでの実験システムで仮想手の大きさをユーザーの手の大きさに調整するためには、実際にユーザーの

手の大きさを計測し、その上で事前に準備してある大きさの仮想手のなかから適当な大きさのものを選択する必要がある。ユーザーの視点でシステムを考えると、手の測定は自動的に、かつ容易に行えることが望ましい。

そこで本研究では、センサー数の少ないデータグローブを使用していても、仮想手へ出力する情報パラメータを補正することである程度まで自由に人間の手の動きを仮想手で再現することのできるモデルと、仮想手の大きさを容易にユーザーに合わせることで機能の実装を目指す。

少数のセンサーを持ったデータグローブによる人間の手の動きの再現については、次のように行う。データグローブのセンサーは、そのセンサーに対応する関節の曲がり具合を数値として検出して出力する。また、今回用いる安価なデータグローブは指1本に対して1個ずつ、計5個のセンサーを持っている。そこでまず、データグローブにおける5本の指のセンサー出力値を元に、仮想手における5本の指の第三関節曲げ角度を決定する。次に、人間の指の関節において、関節同士の動きの相関関係を調べる。ここで調べた相関関係と、先程の第三関節曲げ角度から、残りの仮想手の指関節の曲げ角度を算出する。このようにして、センサー数の少ないデータグローブによって、仮想手の動きを再現することを考える。

また、仮想手の大きさをユーザーに合わせる機能については、PCカメラによって撮影したユーザーの手の画像から情報を取得することで実現する。このときの取得画像に対しては、カメラの向きや手に対する位置、距離等の情報をもとに、システム側で補正を行うものとする。この画像からユーザーの手の大きさを計測すれば、最適な仮想手の選択を自動的に行うことができる。さらに、カメラを用いる場合、ユーザーの手の大きさだけでなく手の表面色についての情報も同時に取得することができる。仮想手を選択する際、表面色がユーザーの手の色に近いものを選択すれば、操作時の臨場感がより向上することも期待できる。以上のことから、PCカメラを用いて手の大きさと色の2つの情報を取得し、仮想手の選択を行うことを考える。

本稿第二章で人間の生理と、振動子やデータグローブを使う理由について述べ、第三章で今回のVRネットショッピングシステムのモデルについて述べる。その後、第四章で実験内容と結果について述べる。

第2章 人間の錯覚と触力覚フィードバックの利用

我々人間を含む生物の体には様々な感覚器があり、我々はそれらによってもたらされる「視覚・聴覚・嗅覚・味覚・触覚」の五感や、その他の感覚によって外界の情報を認識している。これらの感覚のうち、実空間に存在する物体の認識には主に触覚と視覚がはたらいっていると考えられる。

VR ネットショッピングシステムでは、商品を手にとって操作する行為、つまり実空間での実物体の認識及び操作を仮想空間上での仮想物体に対して再現することに注目している。そこで、仮想空間上での仮想物体の認識において、これらの感覚を実物体操作の際の感覚に近づけられれば、本当に商品を手を持って操作しているように感じることができると考える。

本章では、実際の物体操作を行ったときにより近い感覚を VR ネットショッピングシステムで再現することを目指し、人間の生理及び錯覚について考える。また、感覚の再現という点に関連して、触力覚フィードバックとそれに関連するデバイスについてもこの章で言及する。

2.1 人間の生理と錯覚

人体は外部、内部からの物理的もしくは化学的刺激に対し、受容器と呼ばれる器官でそれを受け取ることで何らかの反応を返す。感覚とは、この刺激に対する反応のことを指す。感覚は大きくわけて体性感覚、内臓感覚、特殊感覚の3つに分けることができる。

体性感覚とは皮膚感覚と、皮膚と内臓の中間領域である関節や腱の動きによって起こる深部感覚からなる。内臓感覚とは臓器の痛みや吐き気などの感覚であり、特殊感覚は視覚、聴覚、味覚、嗅覚、前庭感覚(平衡感覚)など、特殊な器官によってもたらされる感覚をいう。これらのうち、視覚は前述の通り特殊感覚であり、触覚は物に触れることで物体に押されて皮膚が歪み、そこにある感覚受容器が刺激されて発生することから皮膚感覚に該当する。これらの感覚は常に正しいものではなく、感覚器に異常がないにもかかわらず、対象物に対して実際とは異なる知覚を得てしまうことがある。これを錯覚とよぶ。

錯覚のうち、視覚に関するものを錯視という。錯視はさまざまな種類がある。例えば図 2.1 の左の図を見ると、二つの扇形のうち、もう一つの扇の内側に相対している扇形、つまり下

の扇Bの方が大きく見える。しかし、右の図を見れば分かる通り、この二つの扇形は同じ大きさである。これをジャストロー錯視という。このほか、錯視には直線が歪んで見えたり、静止している物体が動いて見えたりといったものもある。

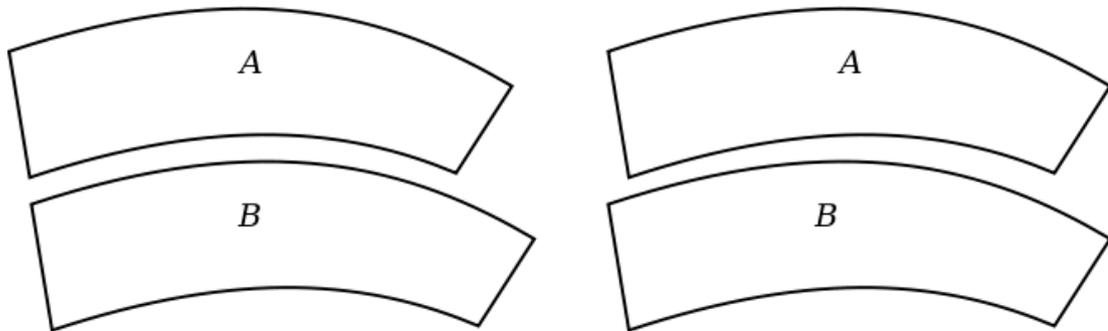


図 2.1: ジャストロー錯視

錯覚の発生はそれほど珍しいものではなく、人間は脳内において実際とは違うものを認識してしまいやすい。視覚における錯覚だけでなく、他の様々な部分でも錯覚が発生すると考えられている。当研究室ではこれまでもVRネットショッピングに関する研究を行ってきたが、その研究過程は人間の錯覚を利用して、実際とは違う感覚を本物の感覚に近づけ、そこに存在しない商品の認識を行わせることが出来るのではないかと考えている。

2.2 視覚による他感覚への影響

我々はひとつの感覚のみで外界を知覚しているわけではない。五感でいえば視覚と聴覚、視覚と嗅覚など、複数の感覚器から得られる情報を総合して外界の情報を得、周囲の空間を認識して活動している。その中でも視覚の占める割合は非常に大きなものである。一般に視覚から得られる情報量は、他の感覚器から得られる情報を合わせた総合的な情報量のうち、実に80-90%に及ぶといわれている。このため、外界の知覚において、視覚情報は他の感覚器がもたらす情報に大きな影響を与える。この影響により、最終的な空間の認識にズレが生じ、結果として錯覚を起こすこともある。

視覚が他の感覚に与える影響を表す現象として、腹話術効果 (ventriloquism effect) が有名である。腹話術師が声を出しているのに、腹話術師の口は動かず、人形の口が動いていることから、人形が喋っているかのように思ってしまうというものである。これは聴覚で感じた音源の位置が、視覚の影響によって音源とは別の場所にある対象に引き寄せられて誤認識

されるという現象であり、人間が空間を認識するとき、視覚から得られる情報が認識の基準となっていることを示すものと考えられる [5]。このように、人間にとって視覚は非常に重要な知覚手段である。

ここで、本章の導入部で述べたように、実空間に存在する物体の認識には主に視覚と触覚が働いていると考えられる。腹話術効果の例からも分かるように、視覚はまったく異なる他の感覚に対しても強い影響を持っており、触覚に対しても同様に何らかの影響を与えるものだと考えられる。実際にこれまでの研究では、仮想物体の操作を行った場合、触覚の再現が行えていても、仮想空間上で操作を行っているのが自分の手だという視覚情報の有無によって、認識の正確性に差異が発生することが実証されている。そのため VR ネットショッピングにおいて錯覚を利用する上では、「自分の手が操作を行っている」という、視覚的認識の存在を考慮することが必要である。

2.3 触力覚フィードバックの利用による触覚の再現

我々の身近には、何種類もの振動子が存在している。例えばその一部は携帯電話やゲーム分野における家庭用ゲーム機のコントローラに内蔵されており(図 2.2)、前者では着信音を鳴らすべきでない状況で、振動によって着信を知らせたり、後者ではゲームの内容とプレイ状況に応じてコントローラが振動し、プレイヤーを引きつける迫力ある演出に一役買っていたりと [6][7]、現代人との関わりが随所でみられる。このように、すでに振動の存在と効果は様々な場面で注目され、役立っている。



図 2.2: 振動機能付きコントローラ

当研究室で研究している VR ネットショッピングシステムでは、振動子を用いた触力覚フィードバックを取り入れたデバイスを利用している。振動子を選択する理由は、本節冒頭に述べた通り一般に普及していることから、誰もが振動を利用した機器に慣れており、抵抗

なく使えると考えられるためである。また、価格も比較的安価であることから、家庭でのシステム利用という前提条件にも適していると考えられる。さらに、仮想物体操作において必要な触覚は、振動子を用いることで再現が出来る。物体への接触と振動とは違う刺激であるが、適度な振動を与えることで触覚や圧覚に相当する衝突感等を感知させる研究はこれまでも行われており、実際にその効果が実証されている。これは振動の影響によって手の感覚器が錯覚を起こし、その錯覚が触覚や圧覚として知覚されているからである。そのため、今回の研究でも継続して振動を触力覚フィードバックとして用いるものとする。

2.4 ヒューマンインターフェイス

人間がコンピュータを操作する際には、キーボードやマウス等、操作を入力するためのインターフェイスデバイスを介している。これまでの実験システムにおいてもそれは例外ではないが、振動による触力覚フィードバックを利用できるデバイスが必要となる。また、VR ネットショッピングシステムでは仮想手モデルを利用するため、ユーザーの手の動きを入力できるかどうかという点を考慮する。

近年、触力覚フィードバックを搭載したデバイスには様々なものが登場している。たとえば、SensAble technology から販売されている PHANTOM Omni(図 2.3) が挙げられる。PHANTOM Omni は内蔵しているセンサーによってペン型デバイスの位置や向きを感知し、画面上の物体に触れたり操作したりといったことが出来る。さらに触れたときの反発力、持ち上がった時の重力などの力を再現することが可能である。この性質を利用して仮想空間上での「重さ」を認識させることにより、仮想物体を判別する研究が行われている [8]。



図 2.3: PHANTOM Omni

ユーザーの手の動きを入力できるデバイスとしては、VR ネットショッピングシステムで

も用いているデータグローブが挙げられる。これは人の手の単純な動作から、情報入力を直感的に行えるセンシング装置として研究が行われてきたものである。データグローブは家庭用のものも存在しており、最初に登場した家庭用データグローブの一つがパワーグローブ [9](図 2.4) である。これはゲーム用のコントローラデバイスとして、1990年に任天堂から発売された。他にも、家庭で利用できる安価なデータグローブとしては、Essensial Reality 社から P5 Glove[10](図 2.5) が発売されている。この P5 は元はゲーム分野での使用を視野に入れて設計されているが、現在は主にコンピュータ向けのインターフェイスとして販売されている。手を動かすことでカーソルを操作し、指を曲げることでクリックするといったマウスと同様の操作が可能である。



図 2.4: パワーグローブ



図 2.5: P5

当研究室でこれまで研究されている VR ネットショッピングシステムでは、オンラインショッピングにおいて商品を手にとって確かめることができるという点から、操作デバイスとしてデータグローブを選択している。人間はある物体の大きさや硬さなどについて情報を得るとき、具体的な数値を教えられるよりも実物に触れてみた方が直感的にその物体について理解しやすいと考えられる。そこで、VR ネットショッピングシステムに用いるデバイスは普通に手を動かすのに近いイメージで仮想空間上の物体を操作することができるものがよい。データグローブであれば一般的な手袋と同様の感覚で着脱が可能であり、装着した状態で手を動かすだけで基本的な仮想手の操作が可能であることから、条件に適している。

第3章 VR ネットショッピングシステム

これまで当研究室で行われてきたVR ネットショッピングに関する研究では、実験システムで使用するデバイスが高価なものであった。しかし将来的な普及を考えた場合、一般家庭でも手の届く程度までデバイスの価格を抑えることが望ましい。今回はデータグローブについて、より安価な物を使うことを考えている。だが安価なデータグローブでは手の動きを検出するためのセンサー数が減ると考えられ、仮想手操作がうまくいかなることが予想される。そこで、本章ではセンサー数の少ないデータグローブを用いて仮想手操作を実現する手法について述べる。

また、本研究の実験システムではユーザーが仮想空間上において仮想手で仮想物体に触れたとき、実空間上において自分の手で商品に触れたように認識することに重心を置いている。このとき重要なのは、ユーザーが仮想手を自分の手と同じように扱えることである。仮想手の外見がユーザーの手に近づくことで、ユーザーが感じる臨場感や没入感が増し、仮想物体を実際にそこにあるように感じやすくなる [4]。そこでユーザーの手の画像情報を元に、本人の手に近い仮想手をシステムが自動的に選択する機能を実装する。これについてもこの章で述べる。

最後に、実験システムで使用する仮想手のモデルと仮想物体のモデルについても述べる。なお、これらの仮想手の基本設計は文献 [11] と文献 [12]、文献 [4] のモデルを用いている。

3.1 少数のセンサーによる仮想手操作

人間の手にはいくつかの関節があり、これらの関節のはたらきによって、手は多種多様な動きをすることができる。物を持ったり押したりといった単純な動きから、じゃんけん等のジェスチャー、裁縫や工作のように道具を使用した複雑な動きまで、その種類は多岐に渡る。仮想空間上で定義された仮想手においても、実際の手と同じようにそれらの動作を再現できることが理想的である。しかし、そのためには手に存在する多数の関節の曲げ角を測定できるデータグローブを用意する必要がある。そのような機器は非常に高価なものであり、一般家庭での利用を想定している当研究室のVR ネットショッピングシステムにおいては適していない。

そこで、比較的安価なデータグローブを用いて仮想手モデルを操作することを考える。こ

の場合、データグローブのセンサー数は少なくなるものと思われる。データグローブのセンサー数が少なくなると手の関節数をカバーできず、正確な手の動きを測定して仮想手モデルに反映することは不可能になる。そこで、あらかじめ仮想手で再現したい手の動きを限定しておく。本研究の実験モデルでは仮想手による仮想物体操作を行っている。実際の手による実空間での物体操作には指先で物体を掴むなどの種類があるが、本モデルで想定している動作は基本的に「物体に合わせて手を握る」というものである。そこで、センサー数の少ないデータグローブで再現する動作を「手を握る動き」を中心としたものに限定し、再現方法を提案する。

3.1.1 仮想手関節の基本角度の設定

今回使用するデータグローブは、指1本につきセンサーが1個で合計5個のセンサーしか存在していない5DT Data Glove 5 Ultra(図3.1)である。このデータグローブは各指に設置されたセンサーによって指の曲げを検知し、曲げ具合がどの程度かを0-4095の整数値で出力することができる。5DT Data Glove 5 Ultraは当研究室でこれまで使用していたデータグローブに比べると低価格で、その他のデータグローブよりも比較的安く入手することができる。ただし、このグローブに設置されているセンサー数は各指に対して1つで合計5個であり、センサー数が非常に少ないため、計測できる手の動きは限られる。また、5DT Data Glove 5 Ultraのセンサー1個が測定できるのは指1本の関節全ての曲げ具合を総合した値であり、それぞれの関節についての曲げ具合の数値が測定できるわけではない。そのため、5DT Data Glove 5 Ultraを装着した状態で手を握っても、仮想手で実際の手のような動きを再現することは不可能である。もしこのデータグローブの出力する値になんの補正も行わ



図 3.1: 5DT Data Glove

ない状態で仮想手モデルを操作しようとする、現実の手の指と仮想手の指とで関節角度に極端なズレが生じてしまったり、指が思うように曲がらなかったりするなど、実際の手とはかけ離れた不自然な挙動をしてしまうと思われる。そこで、手を握るという動きに注目する。この動きは親指から小指までの五指を曲げる動きである。これを仮想手で再現するためには、仮想手の指1本に存在する複数の関節に対して、1つのセンサーの出力値から個別の曲げ角度を算出し、それぞれの関節に設定する必要がある。

仮想手の指には人間の指と同様に、先端から数えて第一関節、第二関節、第三関節の三つが存在する。これに対してデータグローブのセンサーが出力する値は一つしかないため、この値を元に三つの関節の角度を算出する。まず、センサーの値を元に三つの関節のうち第三関節の曲げ角度を算出する。以後、この曲げ角度を基本の角度とする。今回は仮想手の動きをあらかじめ限定しているので、それぞれの関節もある程度決まった動きをされる。また、人間の指関節の動きにはある程度の相関関係が見られるため、これを利用して、基本の角度から他の関節の曲げ角度を求める。ここまでの処理により、指第三関節の角度を算出出来れば仮想手の関節の角度を決めることができるので、センサー数が少なくても仮想手を制御することが可能であると考えられる。

第三関節の角度を算出するための式を作成する。まず手にデータグローブをはめた状態で指を伸ばす操作、第三関節を 90 度曲げる操作、第三関節を 45 度曲げる操作を各 10 回ずつ行い、データグローブのセンサー出力値を記録した。このとき、センサーは検出した指の曲げ具合を 0-4095 の間の整数値として出力する。曲げ具合が大きければ大きいほどセンサー出力値は大きくなり、逆に小さければ小さいほどセンサー出力値は小さくなる。こうして出力されたデータのうち、例として指の中でも最も長い第三指に注目し、その値を表 3.1 に示す。

表 3.1: 指第三関節における関節角度に対するデータグローブのセンサー出力値 (中指)

	1 回	2 回	3 回	4 回	5 回	6 回	7 回	8 回	9 回	10 回
0 度	2257	2268	2267	2270	2270	2287	2280	2278	2268	2261
45 度	2509	2513	2499	2497	2500	2531	2482	2522	2507	2499
90 度	2707	2713	2709	2719	2718	2709	2691	2700	2704	2700

他の指についても同様にデータを取得し、それらの値を元にデータグローブのセンサー出力値と指の関節角度の関係を求める。例として表 3.1 の第三指第三関節の各角度のデータの平均値をとり、その散布図を作ると図 3.2 のようなグラフが得られる。5 本の指について同

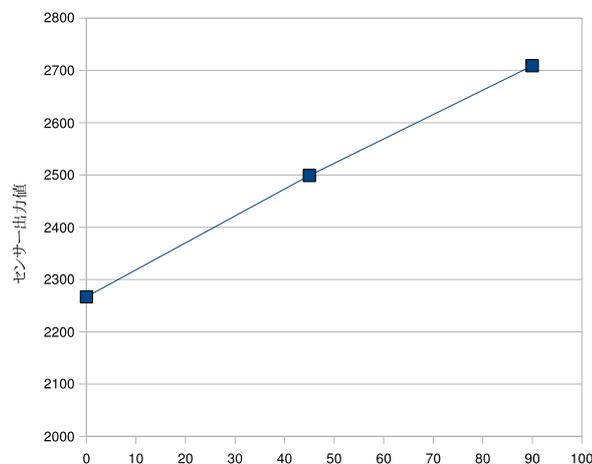


図 3.2: 手・第三指第三関節の角度に対するグローブのセンサー出力値分布

様にこのような散布図を作成した後、各サンプル点の近傍を通る直線を引く。この直線の方程式を指の第三関節曲げ角度とグローブのセンサー出力値との関係式とする。この式は、以下の形の線形方程式 (3.1) で表すことができる。

$$\theta = Ag + B \quad (3.1)$$

θ は仮想手の指の第三関節の角度、 g はデータグローブの出力値、 A 、 B は定数である。同様に、親指から小指までのセンサー出力値に対する第三関節角度の算出式を設定する。データグローブの各指のセンサーが出力する値はこの式によって変換され、仮想手の各指の第三関節の角度として操作モデルに反映される。

3.1.2 指関節角度の再現

前節で得られた指の第三関節の関節角度を基本の角度とし、これをもとに第一から第三関節までのそれぞれの指関節の動きを設定する。ここで、指の関節の動きには以下の式 (3.2) のような比例関係があることが知られている。

$$\theta_{dip} = \frac{2}{3}\theta_{pip} \quad (3.2)$$

θ_{dip} は指の第一関節の角度、 θ_{pip} は指の第二関節の角度である。よって、指第一関節と第三関節の角度の関係を求めれば、センサーが一つしかなくても、そこから導き出した第三関節の角度情報をもとにして、指の三つの関節角度をすべて求めることができる。その結果、実際の手の動きと比べて違和感の少ない動きを仮想手で再現できると考えられる。

指の関節角度の関係を求めるため、人間の手の動きのデータを収集した。手の指を伸ばした状態での各センサーの出力値、手を握った状態での各センサーの出力値を記録する。データ収集には、当研究室における従来の実験システムで仮想手操作に使用しているデータグローブである Immersion 社の CyberTouch を用いた。CyberTouch は今回の実験モデルで使用する 5DT Data Glove 5 Ultra よりもセンサー数が多く、計 18 個のセンサーを備えている。だが、センサーの配置部位の問題で、1 本の指の根元部分と、指先と根元の間部分の 2 つの出力値しか取ることができない。そこで CyberTouch で何度か数値を計測して経験的に判断したところ、根元部分のセンサーは第三関節の曲げ具合の値に対応していると思われる。指中間部に設置されているセンサーは、第一関節と第二関節の曲げを総合した値を検出しているものであると思われる。そこで、式 (3.2) を用いて後者のセンサーの出力値から第一関節、第二関節それぞれの曲げ具合の推測値を算出し、これを計算に用いる。

また、CyberTouch のセンサーの値は 0-255 の値で出力される。指関節の曲げ具合が大きければ大きいほど出力値は大きく、小さければ小さいほど出力値は小さくなる。こうして出力されたデータのうち、例として第三指に注目し、その値を表 3.2 及び表 3.3 に示す。

表 3.2: 各状態でのデータグローブのセンサー（第三指根元）出力値

状態	指を伸ばした状態			握った状態		
	1回目	2回目	3回目	1回目	2回目	3回目
1人目	66	69	69	133	135	132
2人目	63	72	69	92	93	89
3人目	54	54	55	121	114	116
4人目	71	69	60	117	127	116

表 3.3: 各状態でのデータグローブのセンサー（第三指中間部）出力値

状態	指を伸ばした状態			握った状態		
	1回目	2回目	3回目	1回目	2回目	3回目
1人目	86	86	84	182	184	181
2人目	86	84	85	154	158	160
3人目	87	87	85	176	172	175
4人目	89	87	87	171	173	165

表 3.2 に示されているのが根元部分のセンサーの出力値、表 3.3 で示されているのが指中間部分のセンサーの出力値である。手を握った状態でのセンサー出力値と指を伸ばした状態でのセンサー出力値との差を、関節がどの程度曲がったかを示す曲げ度値であると考え、これを Δ で表すものとする。すると、それぞれの関節における曲げ度値について、式 (3.2) から式 (3.4)-(3.6) が成り立つ。

$$\Delta_{InF} = \Delta_{dip} + \Delta_{pip} = \frac{2}{3}\Delta_{pip} + \Delta_{pip} = \frac{5}{3}\Delta_{pip} \quad (3.3)$$

$$\Delta_{pip} = \frac{3}{5}\Delta_{InF}, \quad (3.4)$$

$$\Delta_{dip} = \frac{2}{3} \cdot \frac{3}{5}\Delta_{InF} = \frac{2}{5}\Delta_{InF} \quad (3.5)$$

$$\Delta_{mp} = \Delta_{In} \quad (3.6)$$

Δ_{InF} はデータグローブのセンサーのうち、指先端部のセンサーが検出した曲げ度値、 Δ_{In} は指根元のセンサーが検出した指の曲げ度値である。 Δ_{dip} は第一関節の曲げ度値の推測値であり、同様に Δ_{pip} は第二関節での曲げ度値の推測値、 Δ_{mp} は第三関節での曲げ度値である。これらの値から、第三関節の Δ_{mp} と第一関節の Δ_{dip} の関係を求める。第三指を例にあげると、 Δ_{mp} に対する Δ_{dip} の値は以下の図 3.3 のようになる。

前節と同様に、この散布図に対して各サンプル点の近傍を通る直線を引き、その直線の方程式が第三関節の曲げ度値と第一関節の曲げ度値の関係を表す式であると考え。各指に対

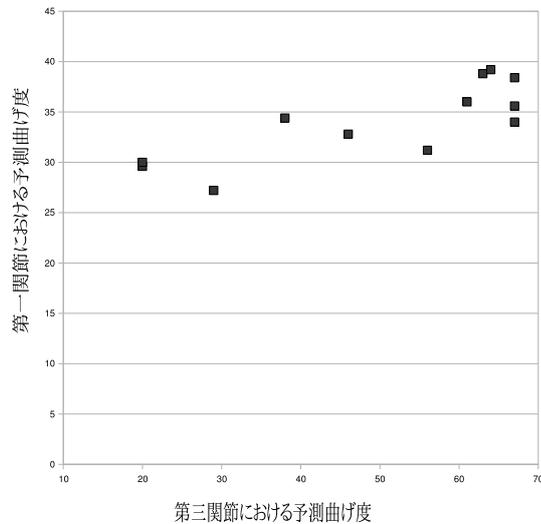


図 3.3: 第三関節の曲げ度値と第一関節の曲げ度値の関係

してこの処理を行うと、以下の式 (3.7) のような形の関係式が得られる。

$$\Delta_{dip} = C\Delta_{mp} + D \quad (3.7)$$

c、d は定数である。得られた関係式を用いて、仮想手の指の第三関節角度を基本の角度とした第一、第二関節の角度計算を行う。結果として仮想手は指の3つの関節の角度情報を得て、握る動作においては実際の手に比べてかなり違和感の少ない動きができるようになる。

3.2 カメラを利用した仮想手の自動選択機能

ディスプレイ上の仮想空間内で動く仮想手をユーザーの実際の手に近づけることは、ユーザーが仮想物体を本物の物体のように認識できる確率の向上を招き、操作時の臨場感、没入感といった「物体を操作している実感」を演出するという面でも効果的である。ここでいう「仮想手を実際の手に近づける」とは、本研究では、仮想手の表面色と大きさを本人のものに近づけることとした。従来の研究における実験システムでは、3段階の表面色と6段階の大きさをもつ仮想手を用意している。ユーザーは自分の手の長さを手動で計測し、その結果に合うように仮想手を手動で選択するという形式で、仮想手を実際の手に近づけている。そこで今回提案する実験システムでは、PCカメラを用いて直接ユーザーの手の色情報と大きさ情報を取得し、それらの情報からユーザーではなくシステムが自動的に最適な仮想手を選

択する機能について検討する。ただし家庭での利用が容易となるように、カメラは特に固定することなく、また詳細な位置合わせを不要とする。

3.2.1 色情報の取得

従来研究における実験システムでは、ユーザーの肌の色合いに合わせて表面色を変更できるように、基本の表面色をもつ仮想手の他に、表面色が濃いもの、表面色が薄いものの合計三種類の仮想手を候補データとして用意している。そこで、今回もこの候補データを用いることを考える。カメラで撮影した画像から手の色情報を取得し、ユーザーの手の表面色に最も適した色の候補データを仮想手として選択するものとする。

PCカメラは位置を固定せず、自由に動かすことが可能であるとする。ただし、手の撮影は白い平面をもつ台の上で行うこととし、手以外の背景はすべて白いとする。この画像に対して、RGB値の一定範囲を指定してマスク処理を行う。マスク処理とは、色情報に注目して画像全体を走査し、条件を満たす特定の領域を別の新しい画像に抜き出す画像処理の一手法であり、抜き出された画像をマスク画像という。取得した手とボードの画像の左上の頂点を原点としたマスク処理を行うと、条件範囲を満たすRGB値を持つ領域が手、そうでない部分が台と判別され、図3.4のようなマスク画像が得られる。ここで、手と判定され

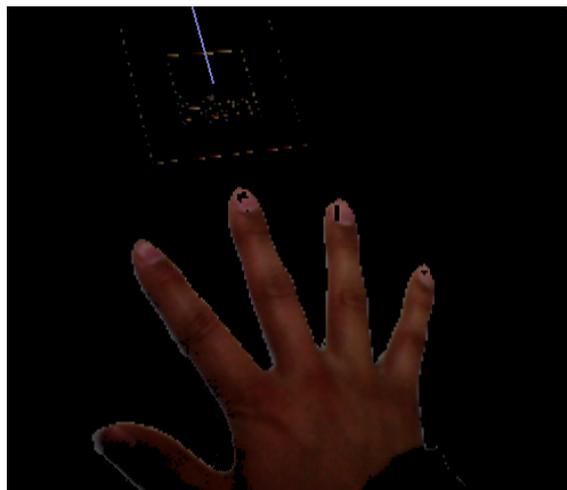


図 3.4: マスク画像

た一定領域に注目する。この一定領域に存在するピクセル数を P 、ピクセル i における R、G、B それぞれの値を $r(i)$ 、 $g(i)$ 、 $b(i)$ 、色情報の平均値を R_n 、 G_n 、 B_n とすると、以下の

式 (3.8)-(3.10) が成り立つ。

$$R_n = \frac{\sum_{i=0}^{i=p} r(i)}{P} \quad (3.8)$$

$$G_n = \frac{\sum_{i=0}^{i=p} g(i)}{P} \quad (3.9)$$

$$B_n = \frac{\sum_{i=0}^{i=p} b(i)}{P} \quad (3.10)$$

この R_n 、 G_n 、 B_n を、ユーザーの手表面の RGB 値とする。ここで、任意のピクセルの色を「RGB を成分とする 3 次元の色ベクトル」と考える。仮想手の表面色ベクトルには、濃い色、薄い色、中間色の三種類がある。これら 3 種の表面色ベクトルとユーザーの手の色ベクトルとのベクトル間距離に注目し、ユーザーの手の色ベクトルに最も近い表面色ベクトルを決定する。その後、決定した色ベクトルに対応する表面色を持つ仮想手を選択する。

3.2.2 大きさ情報の取得

従来研究における実験システムでは標準サイズの仮想手を含め、大小合わせて 6 段階の大きさをもつ仮想手を用意している。そのため、これらの仮想手からユーザーの手の大きさに合ったサイズのものを選択する機能を考える。ユーザーの手の大きさについての情報は、色情報のときと同様に PC カメラの撮影画像から取得するものとする。仮想手モデルにおける仮想手の大きさの違いは、仮想手の指の長さを変更することで表現しているため、画像から取得するデータも指の長さのデータとする。今回は一般に人間の手の中でもっとも長い指とされる第三指に注目し、第三指背面の長さを手の大きさの判断基準とする。また、大きさ判断のための計算には人体の平均寸法データ [13] を用いる。

カメラの撮影時には、ARToolKit のマーカーを 1 枚用意する。これは一辺が 80mm の長さをもつ正方形のマーカーである。ARToolKit とは、拡張現実 (Augmented Reality:AR) と呼ばれる現実世界と仮想世界を融合する技術を実現するためのオープンソースの C 言語ライブラリである [14]。任意の場所に置いたマーカーをカメラでキャプチャし、マーカーの姿勢や位置の情報を求めて、それに対応した形で 3D キャラクターを表示したりすることが出来る。

ここで、図 3.5 に ARToolKit におけるカメラ座標系、ウィンドウ座標系、マーカー座標系のそれぞれの座標軸を示す。カメラ座標はカメラを原点とした座標系であり、グローバル座標系とも呼ばれる。ウィンドウ座標系は撮影画像を表示するウィンドウの画面左上を原点とする座標系である。マーカー平面座標系は ARToolKit のマーカー平面の延長平面上における中心部を原点とし、ARToolKit ではこれらの座標系の間で座標変換を行うことで、様々な画像処理を扱っている。

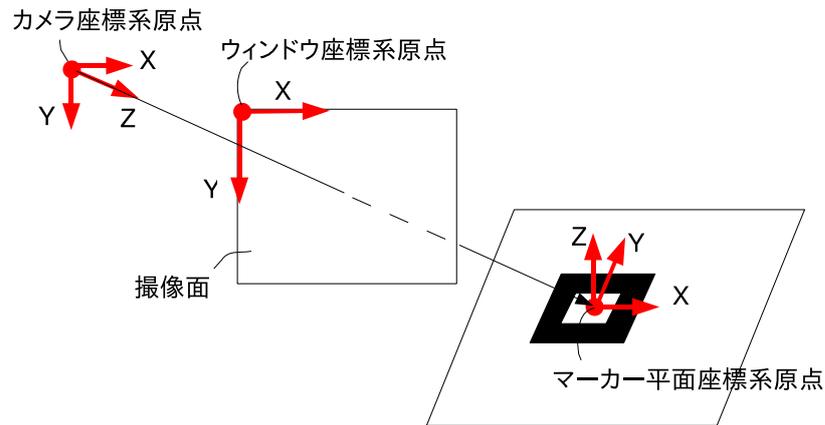


図 3.5: ARToolKit における各座標軸

また、ARToolKit のマーカーはカメラ座標系におけるマーカーの中心点座標や向きベクトル、傾きベクトル、ウィンドウ座標系における中心点などの情報を構造体に格納しているため、撮影画像に処理を行う際に便利である。今回の実験システムでも、カメラの画像から指の長さを求める前に、画像に対して変換処理を行っている。撮影時のカメラに対する手の傾き具合などの影響があるため、画像から求めた指の長さは正確ではない。そのため、AR マーカーの情報を元に撮影時に手が傾いていた角度を算出し、正確な値を求めている。

撮影にあたって、色情報の取得時と同様にカメラは固定せず、自由に動かせるものとする。また、知りたいのは第三指の長さなので、画面内に手全体を映す必要はない。手とマーカー以外の背景についても色情報のときと同じく白いものとする。ここで、手首を始点として第三指先端部に引いた直線を、第三指の方向ベクトルと呼称する。手とマーカーの配置については、図 3.6 のように第三指の方向ベクトルの向きがカメラ座標系におけるマーカーの Y 軸方向ベクトルと一致し、かつマーカーが第三指の方向ベクトルの延長線上かその付近に存在するように配置する。

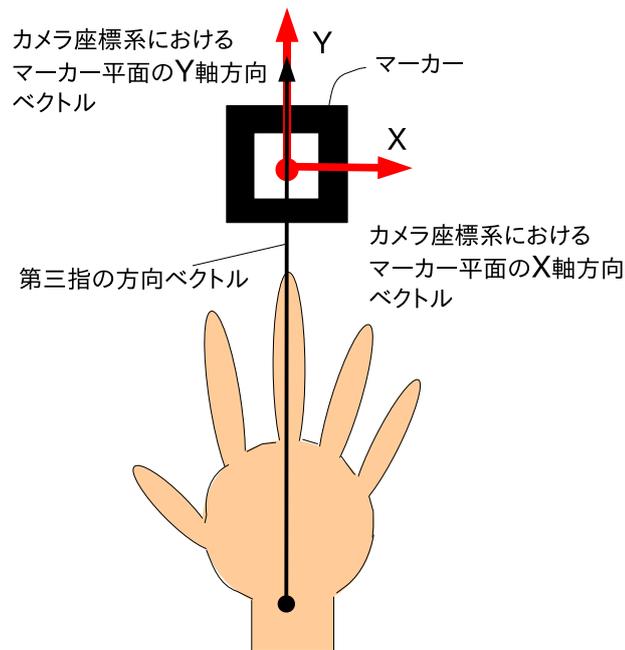


図 3.6: 手を撮影する際の手とマーカーの配置のイメージ

こうして得られた画像からマスク画像、及び二値画像を生成する。二値画像とは、マスク画像と同様に色情報に基づく画像の走査を行い、条件を満たす特定の領域を白く、それ以外の領域を黒く塗りつぶした二色の画像である。二値画像は画像全体の画素の色が白か黒かの二色しかないため、マスク画像に比べて、撮影する際画像内に手とマーカー以外の余計な情報が映っていないかどうかを確認しやすい利点がある。このため、第三指の長さを求める処理は、図 3.7 のような二値画像をベースに行うようにする。

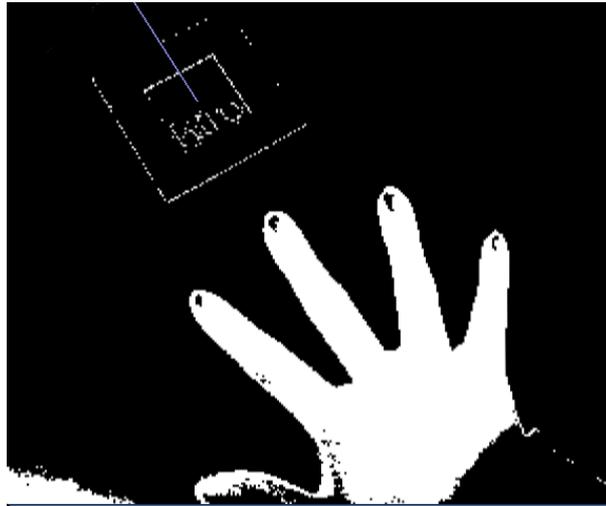


図 3.7: 二値画像

ここで、正方形のマーカーの4辺のうち、第三指の方向ベクトルと平行な辺をマーカーの注目辺とよぶことにする。手とマーカーを図3.5のような配置にして撮影を行っているため、第三指の方向ベクトルはカメラ座標系におけるマーカー Y 軸方向ベクトルと同じ向きである。第三指の長さを求める際に使用する二値画像では、後述する処理方法の関係上、マーカーの注目辺とウィンドウ座標系における Y 軸がほぼ平行になっている必要がある。しかし図3.6の二値画像では、カメラに対するマーカーの位置や向き及び傾きの影響で、マーカーの注目辺とウィンドウの Y 軸は平行ではない。このままでは第三指の長さ情報を得ることが出来ないため、マーカーの注目辺とウィンドウ Y 軸が平行になるように画像に処理を行う必要がある。

そこで、ARToolKit における各座標軸の関係を利用する。図3.4で、カメラ座標系における X 軸方向ベクトル、Y 軸方向ベクトルはウィンドウ座標系における X 軸方向ベクトル、Y 軸方向ベクトルに等しい。また、カメラ座標系におけるマーカーの X 軸方向ベクトル、Y 軸方向ベクトルはそれぞれウィンドウ座標系における X 軸方向ベクトル、及び Y 軸方向ベクトルの逆ベクトルに等しい。これらの座標軸の関係から、ウィンドウ座標系におけるマーカー注目辺のウィンドウ Y 軸に対する傾き A の $\cos A$ 、 $\sin A$ の値を求めることが出来る。これらの値を元に、図3.8のように画像に対する回転処理を行えば、マーカーの注目辺がウィンドウ Y 軸とほぼ平行になっている画像が得られる。

回転処理を行うために、カメラ座標系におけるマーカーの Y 軸方向ベクトル m と、ウィンドウ座標系における Y 軸方向ベクトルの逆ベクトル w との内積・外積から、式(3-12)及び式(3-14)によって $\cos A$ 、 $\sin A$ を導く。

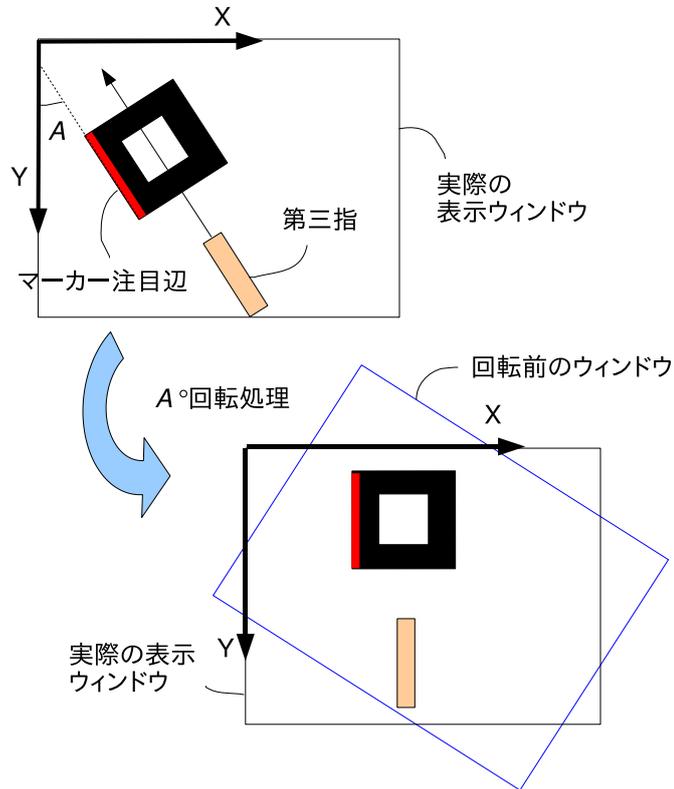


図 3.8: 画像の回転処理イメージ

$$\mathbf{m} \cdot \mathbf{w} = |\mathbf{m}| |\mathbf{w}| \cos A \tag{3.11}$$

$$\cos A = \frac{\mathbf{m} \cdot \mathbf{w}}{|\mathbf{m}| |\mathbf{w}|} \tag{3.12}$$

$$\mathbf{m} \times \mathbf{w} = |\mathbf{m}| |\mathbf{w}| \sin A \tag{3.13}$$

$$\sin A = \frac{\mathbf{m} \times \mathbf{w}}{|\mathbf{m}| |\mathbf{w}|} \tag{3.14}$$

これらの $\cos A$ 、 $\sin A$ を用いて、以下の式 (3.15)-(3.16) によって画像全体を A° 回転させる。このときの回転中心は画像の中心点とする。

$$x_2 = (x_1 - CX) * \cos A - (y_1 - CY) * (-\sin A) + CX \tag{3.15}$$

$$y_2 = (x_1 - CX) * (-\sin A) + (y_1 - CY) * \cos A + CY \tag{3.16}$$

x_1 、 y_1 はそれぞれ回転前の画像の x 座標および y 座標、 x_2 、 y_2 はそれぞれ回転後の画像の x 座標及び y 座標である。 CX 、 CY はそれぞれ画像の中心の x 座標、 y 座標である。回転処

理を行った後の画像は図 3.9 のようになる。図 3.8 のイメージ画像のように、第三指の方向ベクトルがウィンドウ座標系 Y 軸と平行になっていることが分かる。

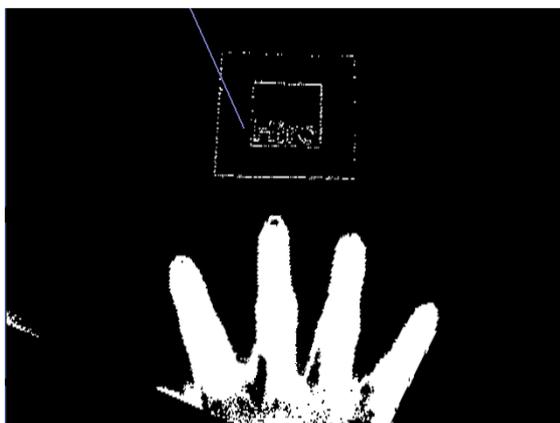


図 3.9: 回転処理後の二値画像

回転後の二値画像をもとに、第三指の長さを求める。この画像では第三指はウィンドウ座標 Y 軸に平行に伸びており、かつ第三指の方向のベクトルはウィンドウ座標 X 軸方向ベクトルに垂直に交わる。そのため、第三指先端と第三指付け根部分のウィンドウ座標系における y 座標の差を第三指の長さと考えることができる。ウィンドウ座標系におけるマーカールの中心点の座標を $(x, y) = (a_0, b_0)$ 、マーカールの正方形の一辺の長さを L_m とすると、撮影時の手とマーカールの配置条件 (図 3.6) により、第三指の先端及び付け根部分の y 座標の値は必ず $b_0 + L_m$ よりも大きくなる。そこで、ウィンドウ座標系 X 軸に平行な直線 $y = b_0 + L_m$ よりも y 座標が大きい領域について第三指の探索を行う。

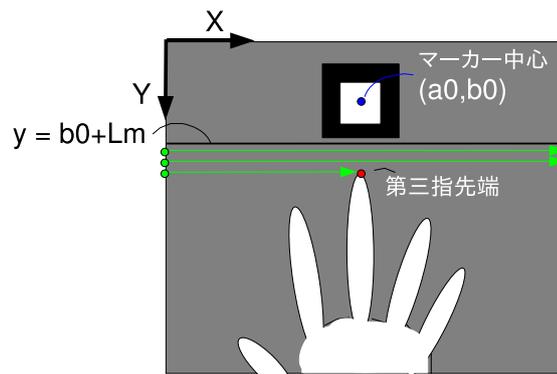


図 3.10: 第三指先端点の探索イメージ

まず、ウィンドウ座標系における第三指先端部を探索する。探索は図 3.10 に示すように、 $y = n (n > b_0 + L_m)$ の直線上において、 $x = 0$ のウィンドウ端点から、ウィンドウの逆側端点までの x 座標に存在する画素を順番に調べていくことで行う。探索に使用する画像は二値画像なので、画素は白か黒かの二通りの色情報をもっている。このことから、探索中の画素が白であれば手領域、黒であれば背景領域と判断することができる。ここでウィンドウ座標 X に平行な直線 $y = b_0 + L_m$ を考えると、手領域の中で直線 $y = b_0 + L_m$ との距離が最も小さい点が第三指先端である。

次に、ウィンドウ座標系における第三指の付け根を見つけるため、図 3.11 に示すように第三指先端部から指の輪郭に沿って探索を行う。回転後の二値画像における第三指先端部に注目し、ウィンドウ座標 X 軸における正の側の輪郭に沿って探索する。

最初に第三指先端部の点を通りウィンドウ座標系 X 軸に平行な直線上で X 軸正方向に移動を行い、移動先の点に注目する。この注目点の画素値を調べ、手領域内の点であればさらに X 軸正方向に平行移動を行い、背景領域内の点であればウィンドウ座標 Y 軸正の方向に平行移動を行う。移動先の点でも同様に画素値を調べ、手領域であれば X 軸正方向、背景領

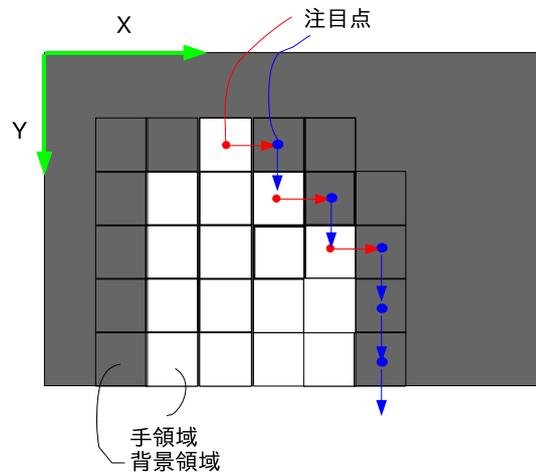


図 3.11: 第三指付け根部の探索イメージ

域であれば Y 軸正方向へ平行移動を行う。このようにして注目点を移動していくと、第三指先端を基準とし、ウィンドウ座標 X 軸における正の側の輪郭の概形に沿った探索が可能となる。なお、ここまで述べた指の輪郭に沿った探索方法は、X 軸正方向への移動を X 軸負の方向への移動に変更すれば、指の反対側の輪郭に沿った探索方法として使用できる。探索を繰り返していくと、ある y 座標に到達すると Y 軸正方向へそれ以上移動せず、X 軸方向への移動がしばらく続くようになる。これは、注目点が中指の付け根の y 座標に到達したということを表している。

そこで第三指の先端と付け根の y 座標の差を求めると、第三指の長さが得られる。しかし、この値はウィンドウ座標系における 1 画素を基本単位とする値である。グローバル座標系での長さの値を求めるためには、1 画素あたりのグローバル座標系における長さ l_{pic} をかける必要がある。 l_{pic} の値は ARToolKit により求めることができる。ARToolKit は画面内にマーカーが映っているとき、ウィンドウ座標系におけるマーカーの面積を調べることができる。ここでマーカーは正方形であり、グローバル座標系におけるマーカーの一辺の長さは定数値なので、式 (3.17) により l_{pic} が求められる。

$$l_{pic} = \frac{\sqrt{S}}{L_M} \quad (3.17)$$

S はウィンドウ座標系におけるマーカーの面積、 L_M はグローバル座標系におけるマーカーの一辺の長さである。

l_{pic} によって第三指の長さを求めることが出来るが、ここで求められた長さの値は撮影時のカメラの傾きを考慮していない。実際には撮影時のカメラはマーカに対してある程度傾いていると考えられる。このとき撮影画像はカメラ座標系における XY 平面と平行な平面であることから、実際の長さはカメラ座標系 Z 軸の傾きを考慮して算出する必要がある。二値画像に回転処理を行ったときと同様にして、カメラ座標系におけるマーカの法線ベクトルとカメラ座標 Z 軸のなす角の余弦を求める。先ほど l_{pic} をかけた長さの値にこの余弦をかければ、グローバル座標系における第三指の長さを求めることができる。

以上の処理により求めたユーザーの第三指の長さから、式 (3.18) により拡大率 α を算出する。

$$\alpha = \frac{l}{L} \quad (3.18)$$

l はカメラ画像からの情報取得処理によって求めた第三指の長さ、 L は人間の第三指背面長の全国平均長 [13] である。この拡大率 α の値がどの程度かによって、用意してある仮想手のうちもっとも適したものを選択する。

3.3 仮想手による物体操作モデル

従来の研究ではユーザーが仮想空間上で仮想手を操作し、仮想物体を認識するという点に重点を置き、具体的な操作は仮想手によって操作対象に触ることや、握ることで行うものとしている。そのため操作物体の大きさは片手で扱える程度に限定している。

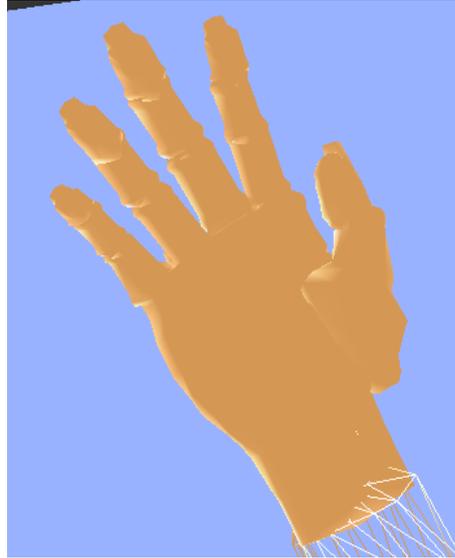


図 3.12: 仮想手

今回は右手だけで操作する仮想手モデルを想定している(図 3.12)。なお、これらのモデルは反転すれば左手用の操作モデルとして転用できる。物体との干渉を判定するために、それぞれの指の指先及び各関節に判定点を設定している。これらのうち、関節部分の判定点を以下便宜的に関節点と呼ぶ。実際の手における手首の位置を仮想手の基準点とし、この点を仮想空間内の仮想手の位置とする。仮想手の表示の際、基準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、位置と方向の変化を手の動きとして扱う。なお、仮想手のモデリングデータにはフリーのソフトウェアを利用している。仮想手モデルでは、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に加えて第3関節における指の開閉の2つの自由度を持つ。親指は曲げと回転、加えて開閉の合計3自由度をもつ。なお、実際の手の開閉動作においては指の動作によって掌の形状も多少変化するが、このモデルでは考慮しないものとする。

第4章 実験

これまでに述べてきたように、現在オンラインショッピングの利用者数は増加傾向にある。しかし、消費者がイメージする商品と実際の商品との違いからトラブルが発生することがある。これは実際の店舗販売では起こり得ない問題であるため、当研究室ではVR技術を利用してオンラインショッピングでも実際の店舗販売のように買い物ができるシステムについて研究を行っている [2][3][4]。VR ネットショッピングシステムでは、ディスプレイ上に定義される仮想空間上において仮想手を操作し、商品に見立てた仮想物体に触れることで情報を得ることができる。仮想手の操作にはデータグローブを用いるが、データグローブは高価な物が多い。安価な物はセンサーの数が少ないため、仮想手制御に必要なユーザーの指の曲げ角度などの情報が不足してしまい、自然な操作が難しくなる。しかしシステムの一般普及を考慮すれば、操作デバイスは安価なものを使用する必要がある。そこで今回は、3.1節で述べた少数センサーによる指関節角度の算出方法を取り入れたモデルを作成し、センサー数が少ないデータグローブでも自然な動作ができるかどうか実験を行った。

また、仮想手の外見をユーザーの実際の手の外見に近づけることはVR ネットショッピングシステムにおいて効果的である。操作中の臨場感や没入感が増すため、仮想物体を実際の物体のように感じられる確率が向上する [4]。前述したように、このとき当研究室の実験システムでは、ユーザーが自分の手の長さを計測し、それに応じた長さの仮想手を選択するという方法で仮想手を実際の手に近づける作業を行っている。これは不便であるため、ユーザーの手の画像をPCカメラによって撮影し、システムが手の画像から自動的にユーザーの手の大きさを検出し、最適な仮想手を選択する機能を実装する。

そこで本章では、3.1節で述べた少数センサーによる指関節角度の算出方法を取り入れたモデルを作成し、センサー数が少ないデータグローブでも自然な動作ができるかどうか実験を行う。また、PCカメラの撮影画像による仮想手の自動選択機能においては、最適なサイズの仮想手を決めるための情報として第三指の長さに注目している。そこで、第三指の長さを正確に求めることができるかどうかについても実験を行う。

4.1 システム構成

実験システムはC言語によって実装した。実験はPentium(R) Dual-Core CPU E5200 @ 2.50GHzのCPUをもつLinuxマシンにおいて行い、仮想空間における仮想手や仮想物体はコンピュータグラフィックスによってディスプレイ上に出力される。

使用するデバイスに関しては、本稿2.4節でも述べたようにデータグローブを選択している。実験に使用するセンサー数の少ないデータグローブは5DT社から販売されている5DT Data Glove 5 Ultraというデータグローブである。5DT Data Glove 5 Ultraに設置されているセンサー数は各指に対して1つ、合計5個であり、現在販売されているデータグローブのセンサー個数としては少ない。本章で行うセンサー数の少ないデータグローブのデータ補正手法が有効なものかどうか調べる実験において、このデータグローブを用いる。

また、システムが自動的に仮想手を選択する機能を使用するためには、手の画像を取得する必要がある。そこで、従来の実験モデルにPCカメラを導入する。使用するカメラはサンワサプライ社から販売されているCMS-010SVというUSBカメラで、記録画素数は200万画素、フレームレートは解像度640x480で最大30fpsである(図4.1)。価格は一万円未満であり、PCカメラを導入することによる総合的なコストの上昇は許容範囲内であると考えられる。



図 4.1: CMS-010SV

4.2 実験I:センサー数の少ないデータグローブによる仮想手操作実験

VR ネットショッピングにおいては仮想手によって仮想物体を操作するが、その時最も重要度の高い動作は仮想手による仮想物体把持の動作であると思われる。そこで、物体を把持する際の手の動きに近いと思われる動作として、仮想手の各指における握りと開きについて再現を試みている。本節では実際に仮想手を操作し、センサー数の少ないデータグローブによって仮想空間上の仮想手を操作する実験を行う。図 4.2 に実験風景を示す。

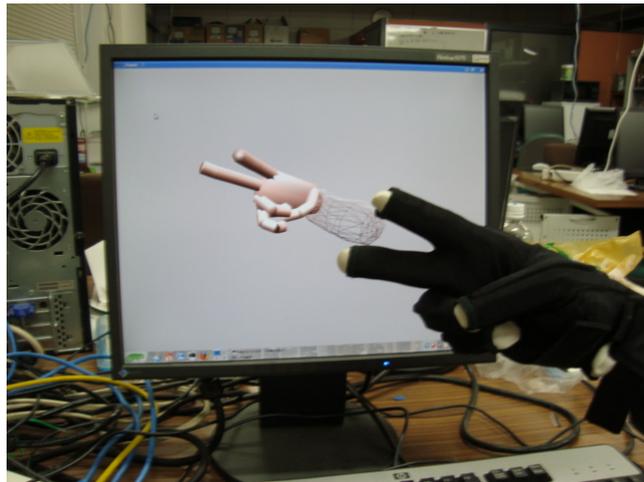


図 4.2: 実験風景

4.2.1 実験方法

被験者に実際にデータグローブをはめてもらい、画面上の仮想手モデルを操作する実験を行った。以下に実験の手順を示す。

1. データグローブをはめた状態で、「各指ごとの動作」「指全体を握る動作」「指全体を開く動作」を行う。
2. 各動作を行っているときのデータグローブをはめた手と画面上の仮想手の動きを比較する。
3. どの程度自然に動いているか、動きに違和感はないかを評価する。

これらの実験は実験は20代の右利きの男女5人(男性4人、女性1人)に対して行った。また、評価はリッカート法による5段階の尺度とし、「違和感を感じない」を「5」、「どちらでもない」を「3」とした評価を行った。

4.2.2 結果及び考察

実験結果を以下に示す。表 4.1 はリッカート法による 5 段階尺度での評価値のまとめである。

表 4.1: 各動作の自然さにおける評定平均点

	各指ごと	指全体の「握る動作」	指全体の「開く動作」
被験者 1	4	5	4
被験者 2	4	3	4
被験者 3	4	4	3
被験者 4	5	4	3
被験者 5	4	5	4
平均点	4.2	4.2	3.6

各指ごとの動作の自然さ及び指全体の「握る動作」の自然さについては 4.2、指全体の「開く動作」の自然さについては 3.6 という評価結果が得られた。各指ごとの動作については、被験者が第一指から第五指までの指を順番に曲げ伸ばしたり、じゃんけんにおけるグーやチョキの動作を行ったりすることで確認しており、これらの動きをかなり自然に感じる程度まで再現できていると考えられる。握る動作についても同様で、全体の動きの再現に関してもあまり違和感のない程度まで再現できていると思われる。

しかし表 4.1 をみると、他の二つの動作に比べて、指全体の開く動作についてはそれほど良い結果が得られていない。これについて被験者にアンケートをとったところ、「他の指は自然に動いているが、第一指の動きにはわずかに違和感を感じる」といった意見を頂いた。また、指全体の「握る動作」の自然さについても、一部の被験者から同様の意見を頂いた。これは人間の手において、第一指が他の第二指-第四指とは異なる構造を持っているためだと考えられる。例えば第二指-第四指同士を向かい合わせることは不可能だが、親指ではそれを可能にする回転動作が存在している。今回実験に使用したモデルではこのような第一指特有の回転を考慮していないため、実際の手の親指の動きとの間にズレが生じてしまい、違和感を感じたのだと考えられる。

また、他の 2 種類の動作についても、被験者がグローブを嵌めた状態で指を限界まで曲げているのに対して、仮想手の指は曲がりきっていかかったりするという状況があった。これは人間の指の長さに個人差が存在しているためである。今回の研究ではデータ収集により得たサンプルから人間の指の各関節における曲げ具合の平均値を算出し、その値に基づいた計算を行っている。しかし、その平均値と被験者の指の長さに大きな違いがあると、仮想手の指の関節角度として計算される値と実際の指の関節角度の値に誤差が生じてしまうと考えら

れる。

4.3 実験 II:カメラによる仮想手自動選択機能の性能実験

本研究では PC カメラを用いた画像からの情報取得によってユーザーの肌の色と第三指の長さを調査し、その結果から最適な表面色と大きさの仮想手を選択する機能を実装した。この機能の性能を確認するため、第三指の長さを判別する機能について実際にカメラによる第三指長の計測実験を行う。図 4.3 に実験風景を示す。

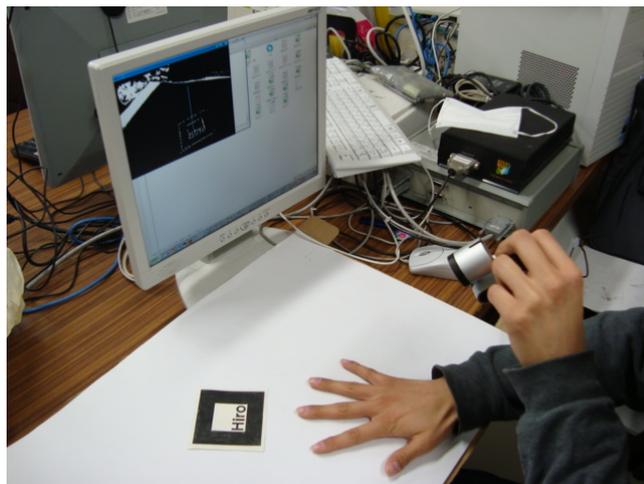


図 4.3: 実験風景

4.3.1 実験方法

被験者に実際に自分の手をカメラで撮影してもらい、その画像から第三指長を取得する性能確認実験を行った。以下に実験手順を示す。

1. 被験者の第三指の長さを手動で計測する。
2. 被験者の第三指の方向ベクトルがカメラ座標系におけるマーカー Y 軸方向ベクトルと一致するように手を置き、カメラでマーカーと手の撮影を行う。
3. 撮影画像によってシステム側で自動算出された第三指の長さ情報を記録し、手動計測データと比較する。

このとき、1 回の実験結果に対して手動計測データと自動算出データの誤差が 0mm なら 3 点、0mm 以上 3mm 以内なら 2 点、3mm 以上 6mm 以下なら 1 点の点数を与えるものとする。実験は一人あたり 10 回、被験者数 5 人の計 50 サンプルに対して行った。

4.3.2 結果及び考察

実験結果を以下に示す。表 4.2 は各被験者 10 回ずつのカメラによる第三指長の自動計測結果に対して、手動計測データとの誤差が発生した回数を示す。

表 4.2: それぞれの誤差の発生回数

	一致	+3mm	-3mm	+6mm	-6mm	それ以上
1人目	4	1	4	0	1	0
2人目	3	6	0	1	0	0
3人目	4	1	2	0	1	2
4人目	1	2	4	0	0	3
5人目	1	6	0	3	0	0
合計	13	16	10	4	2	5

手動計測結果と画像による自動計測結果では、発生した誤差はほぼ 6mm 以内に収まっていることがわかる。文献 [13] によると第三指を背面から見たときの平均長は 96.3mm であり、その約 6%に収まることから、比較的精度は良いように思える。そこで、実際にシステムによる自動計測の誤差がどの程度なのかを調べる。表 4.2 をもとに、計測結果に与えた点数によるすべての実験結果の合計点数を求める。

$$13 \times 3 + 16 \times 2 + 10 \times 2 + 4 \times 1 + 2 \times 1 + 5 \times 0 = 97 \quad (4.1)$$

式 (4.1) により、すべての実験結果の合計点数は 97 点である。合計点数の 97 点を試行回数である 50 で割ると、一人当たりの一回の試行の平均点数は 1.94 点になる (式 4.2)。実際の第三指の長さ自動計測結果とが一致した場合の点数は 3 点になるため、計測結果の誤差は 1.06 点となる (式 4.3)。点数が 1 点ずれると 3mm の誤差が生じるため、自動計測データの誤差は 3.48mm となる (式 4.4)。

$$97/50 = 1.94 \quad (4.2)$$

$$3.00 - 1.94 = 1.06 \quad (4.3)$$

$$3 * 1.06 = 3.48 \quad (4.4)$$

今回のシステムでは人間の指と指の間にある水かきの存在を考慮していないため、計測データとして出される値は水かきの長さの分だけ誤差が生じている。また、陰領域を検出・削除する処理を行っていないため、これらの処理を行うことで誤差を減らすことができると考えられる。

第5章 むすび

本研究ではオンラインショッピングを想定した実験システムで、センサー数の少ないグローブを用いて仮想手モデルの操作を可能とするためのデータ補正法を提案した。当研究室ではこれまでに振動子を利用した希薄な触力覚フィードバック仮想物体を操作する仮想手の外見、主に大きさをユーザーの手に近づけることで、仮想物体を実物体と同じように認識し、大きさを比較することができるかどうかについて研究した。その結果、仮想手の大きさがユーザーの手に近づけば、仮想物体と実物体を同じように認識する確率が向上する事が分かっている。しかしこれまでの実験システムにおいては、仮想手をユーザーの大きさに近づける作業を、ユーザーによる自分の手の長さ計測及びその結果に適した仮想手の選択という形で、すべてユーザーの手に委ねていた。そこで今回はシステムの利便性を考え、PCカメラによって取得したユーザーの手の画像からユーザーの手に関する情報を取得し、自動的に仮想手を選択する機能を実装した。

実験の結果、グローブのセンサーの数が少なくても、そこから取得したデータを補正し各関節の角度値として与えることで、仮想手の動作はかなり自然なものに見えるという評価が得られた。このため手を握る程度の動きであれば、センサー数の少ないグローブでも再現が可能であると考えられる。ただし考察でも述べた通り、ほかの四指と構造の異なる第一指に関しては違和感を感じる被験者が存在した。現在のままでもかなり良い評価は得られているが、仮想手がユーザーの手に対して自然な動きを行えるということは、操作性や臨場感の向上、また仮想物体を実物体のように認識する確率が上がるというメリットがある。そこで第一指に関して現在とは異なるデータ補正を行い、より自然な動きに近づける必要がある。また、ユーザーの指の長さを新たなパラメータとして利用し、手の大きさに個人差があっても問題なく仮想手を操作できるよう改良を行う必要がある。このときパラメータとする指の長さには、後述する仮想手の自動選択の際に計測した指の長さデータを利用することも考えられる。

PCカメラによる仮想手の自動選択機能は、実験の結果指の実際の長さより3.48mm程度の誤差が発生する事が分かった。この結果から、カメラ画像によりある程度正確な長さが計測できると考えられる。しかし、今回の実験では撮影の際に指と指の間に存在する陰などの影響についてほとんど考慮していない。そのため、これらの影響を排除する改良を行うことで誤差を減らし、より正確なデータの自動計測が可能になると思われる。例えば陰領域につ

いては現在は照明の位置を調整することで対応しているが、今後はフレームごとの画像を記録し、各フレームでの指の輪郭の差から陰領域の形状を推測するなどの方法が考えられる。

これらの改良点は今後の研究課題とし、これらの課題の検討や、VR ネットショッピングシステムの研究をこれからも行っていきたい。オンラインショッピングの利用者は現在でも増加傾向にあり、商品が利用者の想像していたものと違うという問題は未解決のまま残っている。VR ネットショッピングシステムはこの問題に対する有効な解決策だと期待できる。そのため、今後も改良を重ねていき、一般家庭に受け入れられる VR ネットショッピングシステムを実現していきたい。

謝辞

本研究を進めるにあたり、日頃から多大なご尽力をいただき、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も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] 総務省：統計調査データ：通信利用動向調査，報道発表資料，2009，
<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/statistics/statistics05a.html>
- [2] 黒田雄大：VR ネットショッピングシステムのための蝕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.
- [3] Kenji Funahashi, Yuuta Kuroda, Masumi Mori,
A Study for Touchable Online Shopping System with Haptical Force Feedback
Proc.ICAT2008, pp.297-300, 2008
- [4] 市野雅久：VR ネットショッピングのための物体の大きさ認識に関する調査
名古屋工業大学大学卒業研究論文，2009
- [5] 積山薫：視覚と聴覚の接点，日本音響学会誌 54 巻 6 号，pp450-45，1998.
- [6] 任天堂：Wii，<http://nintendo.co.jp/>
- [7] SONY：PlayStation3，<http://www.sony.co.jp/>
- [8] 勅使河原甫俊：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
名古屋工業大学大学卒業研究論文，2009
- [9] 株式会社パックス・コーポレーション：パワーグローブ
- [10] Essential Reality 社：グローブ型デバイス P5，<http://essential-reality.com/>
- [11] 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, pp.822-831, 1998.
- [12] 久保田太亮：希薄な蝕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.
- [13] 産業技術総合研究所：人体寸法データベース 1991-92 <http://riodb.ibase.aist.go.jp/>

- [14] 橋本直：ARToolKit 拡張現実感プログラミング入門, アスキー・メディアワークス,2008