

平成 22 年度 卒業論文

物体形状情報を利用した
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 19 年度入学 19115039 番

名前 金沢 秀典

目次

第1章	はじめに	1
第2章	センサー数の少ないデータグローブによるデータ補正法	4
2.1	センサー出力値からの第三関節角度の算出	5
2.2	各指関節角度の算出	6
第3章	物体形状に基づく把持動作の補正法	8
3.1	把持対象物体の条件	10
3.2	基本把持動作の設定	11
3.2.1	少数センサーからの指関節角度の再現	11
3.2.2	物体形状に基づく基本的な把持動作	12
3.2.3	基本形状の把持寸法	13
3.3	物体形状に応じた把持動作の補正	17
3.4	把持する方向・傾きに応じた把持動作の補正	19
3.4.1	把持方向と把持傾き	20
3.4.2	手の方向・傾きに応じた相関関係式の導出	20
3.5	対象物体が二つ存在する場合の把持動作補正	23
第4章	実験	24
4.1	システム構成	24
4.2	実験	25
4.3	実験の結果及び考察	27
第5章	むすび	29
	謝辞	31
	参考文献	32

第1章 はじめに

近年、バーチャルリアリティ(Virtual Reality:VR)の分野は広く研究・開発が進み技術が発展し、それに伴いVR技術が活用される場面が広がっている。バーチャルとは、「みかけや形は原物そのものではないが、本質的あるいは効果としては現実であり原物であること」であり、これはそのままVRの定義を与えている[1]。VR技術はユーザの感覚を刺激することで、実体は存在しない事象を実在しているように知覚させる技術である。

VR技術を用いることで、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可能になる。そのため、VR技術はアミューズメント施設のアトラクションや、ゲームなどの場面で多く利用されており、最近では文献[2]のような医療の分野での業務支援や文献[3]のような技術訓練などにも利用されている。VR技術が活用される場合は、技術の発展に伴いさらに広がることが予想され、VRの技術はより一般的で身近なものになると考えられる。しかし、現在は身近な生活空間のなかでVR技術を見掛けることはほとんどなく、VR技術を身近な生活空間に取り入れるのは難しい現状にある。その大きな要因として、VR技術の多くは大規模で高価なインターフェースを用いていることが挙げられる。そのため、一般ユーザへのVR技術の普及を考えると、今後は安価でかつ小規模な扱いやすいインターフェースが求められると思われる。

VR技術に用いられるインターフェースにはヘッドマウントディスプレイ、ロボットアーム、データグローブなどがある。仮想空間上でも現実空間と同様に手で物体操作などを行うことを考え、ここでは手の動作を測定することができるデータグローブに着目した。データグローブはグローブ型のデバイスなので小規模であり、ヒューマンインターフェースの中でも比較的扱いやすいため、一般ユーザ向きだといえる。

データグローブの多くは曲げ角を計測することができるベンドセンサーを用いて、各関節の曲げ角を測定することで手の動作の計測を行う。ところで、人間の手には多数の関節があり、それぞれの関節を使い組み合わせることで多種多様な動きをすることができる。多様な手の動作を正確に再現するために手指の曲げ角を計測するには、手指の各関節に曲げ角センサーを取り付ける必要がある。そのため、多くのデータグローブは一つのデバイスに対し取り付けるセンサーの数が多くなり高価な物になっている。しかし、5DT Data Glove 5 Ultra[4](以下、5DT)のような比較的安価なデータグローブも存在する。5DTは、指関節ではなく指一本につき一個のセンサーを取り付けてあり、一個のセンサーで指一本の全体の曲

げ具合を測定するため、センサーの数が少なく安価になっている。しかし、センサーの数が少ないと個々の関節の細やかな動きを測定することができない。そのため、5DTを装着した実際の手の動きを、仮想手において再現するのは困難である。

ところで、日常生活の中で人は自分の手を用いて様々な動作を行っている。その中でも人が意識的に行う動作は、じゃんけんやOKサインなどのジェスチャー動作と、鉛筆で字を書く、蛇口を捻るなどの物体を把持して行う作業動作に、大まかに分けられると考えられる。そして、日常生活の中において、人はジェスチャー動作より、何か物を把持して行う作業動作を行うことの方が多いと考えられる。そのため身近な生活空間でのVR技術の使用時においても、仮想空間上で物体を把持して操作することが多いと思われる。また、物体を把持する際の手動作は物体の形状やサイズなどにより様々である。そこで、身近な空間でのVR技術の普及のため、センサー数の少ないデータグローブを用いても、様々な形状の物体を把持する手の動きを再現することを考える。

当研究室ではこれまでに、少数のセンサーを用いた場合でも仮想手へ出力する値を補正することで人の手の動きを再現するモデル [6] を提案している。この手法ではまず指一本につき一個のセンサーの出力値から、指の第三関節の曲げ角度を算出する。そして手を広げた状態から握るという特定の動作での、各指における関節同士の角度の相関関係をあらかじめ調べ、その相関関係を用いて指の第三関節の曲げ角度から残りの指関節の曲げ角度を算出する。このようにして1個のセンサーからそのセンサーが取り付けられた指の三箇所関節の角度を求めているため、合計で5個のセンサーから15個の関節角度を算出し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している。しかし、この手法では手の動きは手を広げた状態から握るという特定の動作に限られてしまっており、様々な形状の物体に応じた把持動作は再現できない。

ところで、仮想空間で物体を把持しようとする場合、計算機は対象物体の形状やサイズの情報を持っている。また人の手は把持しようとしている物体の形状やサイズに応じて適切な動きをすると考えられる。そこで本研究では、5個のセンサーから得られる出力値に加え、把持対象である物体の形状やサイズの情報を利用することを考える。

まず特定の形状の物体に対する把持動作における指関節角度を再現する。少数センサーによる手動作の再現については、従来の研究と同様に指一本毎の一個のセンサーから指の第三関節の角度を算出し、関節同士の相関関係の式を用いて残りの関節角度を算出する。このときの関節同士の相関関係の式を、実空間で実物体を把持する動作を元に算出する。あらかじめ求めた把持動作における関節同士の相関関係の式を、物体形状に応じて補正することで様々な物体に対する把持動作の相関関係式の生成を行う。こうして把持対象である物体の情報を利用することで、様々な形状の物体に対して適切な把持動作の再現を行う。また、どの方向からどのような傾きで物体を把持するかを調べるため、把持対象物体に対する手の姿勢

を調べる。ここで本論文では手の姿勢とは、指を含めた手全体の形状ではなく、手の三次元空間上での6自由度における位置、姿勢という意味での姿勢を表すこととする。手の方向を表す把持方向線、手の傾きを表す把持傾き線と物体の各慣性主軸を表す物体把持線との傾きを調べることで、把持対象物体に対する手の姿勢を調べ手が物体を把持する方向、傾きを推定する。推定した方向、傾きに合わせ、相関関係式を補正し手の姿勢に合わせた把持動作の再現を行う。

また当研究室ではVR技術を用いた一般ユーザ向けのサービスとして、VRネットショッピング [7] を提案している。VRネットショッピングとは、仮想空間上で商品に実際に触れて比較し、購入することで擬似的に店舗での買物と同じプロセスを踏むことを可能にするシステムである。現在のネットショッピングでは実際に商品の実物に触ることができないために、注文時のユーザの商品のイメージと実際の商品とが異なるという問題が起こりやすいが、VRネットショッピングでは振動子による触力覚フィードバック環境下において仮想手で商品である仮想物体を把持する際の触覚を再現することで、この問題の解決が期待できる。また一般ユーザ向けのサービスとして、安価であるセンサー数の少ないデータグローブを用いることを考える。センサー数の少ないデータグローブでは指の複雑な動きを測定できず仮想手が不自然な動きになってしまい、臨場感が損なわれてしまうことや、商品の比較の指標とならないことが考えられる。しかし、本研究の手法を用いることで仮想物体の形状やサイズの情報を利用し、把持動作を再現することでより臨場感が増し商品比較の手助けとなるだろう。

本稿の第二章では従来当研究室で提案されている、少数センサーのデータグローブにおけるセンサー出力値の補正法について述べ、第三章では少数センサーのデータグローブによる物体形状に応じた把持動作の生成法について述べる。第四章では実験内容とその結果について述べる。以上をうけて第五章では本研究のまとめを述べる。

第2章 センサー数の少ないデータグローブによるデータ補正法

本章では、当研究室で提案されている、少数センサーのデータグローブを用いた場合に仮想手へ出力する値を補正することで人の手の動きを再現するモデルの概要を述べる。この研究ではセンサー数の少ないデータグローブとして5DTを使用している。5DTは指1本につき1つ、合計5つのセンサーが設置されており、各センサーは指全体の曲げ具合を出力することができる。しかし、指1本には3つの関節が存在するため、1つのセンサー出力値から個々の関節の角度を算出する必要がある。そこで手の動作を、指を伸ばした状態から手を握るという特定の動作に限定することで、その動作を行う際の指の関節同士の相関関係を導き出し、相関関係を利用してセンサーの値から各指関節の角度を算出している。

一つのセンサーから各指関節の角度を求めていく手順を以下に示す。また、指の関節は先端から順に、第一関節、第二関節、第三関節とする。

手順1 センサーの出力値から指の第三関節の角度を算出

手順2 指の第三関節の角度から指の第一関節の角度を算出

手順3 指の第一関節の角度から指の第二関節の角度を算出

上記の手順を各指のセンサーごとに行い、5本の指の各関節角度を求める次節以降で、これらの手順について説明する。

2.1 センサー出力値からの第三関節角度の算出

まず手順1について説明する。手順1では、センサーの出力値を元に、指の三つの関節のうち第三関節の角度を算出している。手順2以降において、特定の動作における指関節同士の角度の相関関係を利用し残りの二つの関節の角度を算出するため、この角度が基本の角度となる。

センサー出力値から第三関節の角度を算出するための式を作成する。実際に手に5DTを装着した状態で、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度曲げる操作における5DTのセンサー出力値を記録した。記録した指の第三関節の角度のデータと、それに対するセンサー出力値の平均値の散布図を作成し、各サンプル点の近傍を通る直線を引くことで、各指の第三関節の角度とセンサー出力値の関係を求める。例として、指の中でも最も長い第三指に注目した場合は、以下のようなグラフが得られる(図2.1)

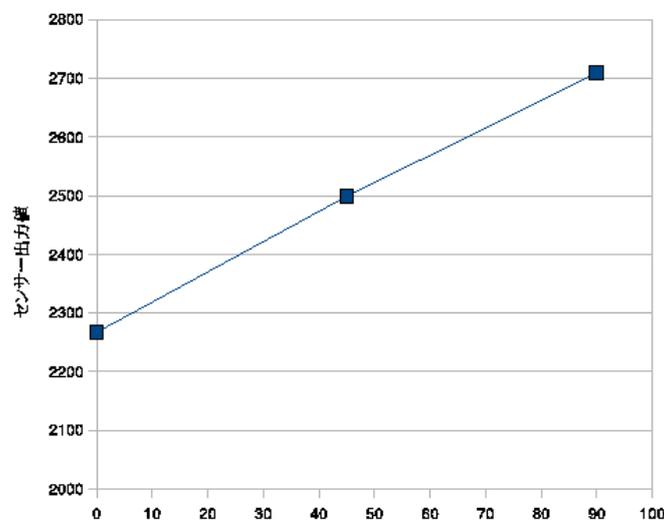


図 2.1: 手・第三指第三関節の角度に対するグローブのセンサー出力値

この直線の方程式を指の第三関節の角度とセンサー出力値の関係式とみなす。また、求めた関係式は以下の形の線形方程式 (2.1) で表すことができる。

$$\theta_{mp} = Ag + B \quad (2.1)$$

g はセンサーの出力値、 θ_{mp} は指の第三関節の角度を表す。また A 、 B は定数である。

2.2 各指関節角度の算出

手順2では、指の第三関節の角度と第一関節の角度の相関関係を用いて、前節で求めた第三関節の角度から第一関節の角度を算出する。第三関節角度と第一関節角度の相関関係を求めるため、手を握る動作における指の関節角度のデータを収集する。データの収集には、高価ではあるがセンサー数の多いデータグローブである Immersion 社の CyberTouch を用いる。CyberTouch は合計 18 個のセンサーが設置されており、各指には二つのセンサーが取り付けられている。これらの指のセンサーは一つが指の根元の部分、もう一つが指先と根元の間部分に取り付けられており、根元部分のセンサー出力値は第三関節の曲げ具合に、指の中間部のセンサー出力値は第一関節と第二関節の曲げ具合を統合した値になっていると思われる。

また、人間の指の第一関節の角度と第二関節の角度には以下の式 (2.2) のような比例関係があることがわかっている [11]。

$$\theta_{dip} = \frac{2}{3}\theta_{pip} \quad (2.2)$$

ここで θ_{pip} は指の第二関節角度、 θ_{dip} は指の第一関節角度である。式 (2.2) を利用して、指の中間部のセンサーの出力値から第一関節と第二関節の曲げ具合の予測値を求める。そのために、実際に CyberGlove を装着し、指を伸ばした状態と握った状態におけるセンサーの出力値を記録する。また、CyberTouch におけるセンサーの出力値は 0-255 の整数値で得られ、曲げ具合が小さければ小さいほどセンサー出力値も小さくなり、逆に大きければ大きいほどセンサー出力値も大きくなる。この時の指を伸ばした状態と握った状態のセンサー出力値の差を、関節の曲がった度合いを表す屈曲量とする。すると式 (2.2) より、各関節における屈曲量について以下の式 (2.3)-(2.6) が成り立つ。

$$\Delta_{InF} = \Delta_{dip} + \Delta_{pip} = \frac{2}{3}\Delta_{pip} + \Delta_{pip} = \frac{5}{3}\Delta_{pip} \quad (2.3)$$

$$\Delta_{pip} = \frac{3}{5}\Delta_{InF} \quad (2.4)$$

$$\Delta_{dip} = \frac{2}{3} \cdot \frac{3}{5}\Delta_{InF} = \frac{2}{5}\Delta_{InF} \quad (2.5)$$

$$\Delta_{mp} = \Delta_{In} \quad (2.6)$$

Δ_{InF} は指の中間部のセンサーが検出した屈曲量、 Δ_{In} は指の根元のセンサーが検出した屈曲量である。 Δ_{dip} は第一関節の屈曲量の推測値、 Δ_{pip} は第二関節の屈曲量の推測値、 Δ_{mp} は第三関節の屈曲量を表す。式 (2.4),(2.5) によって、センサーの出力値から第一関節と第二関節の屈曲量を予測できる。

そしてこれらの値を用いて、第三関節の角度と第二関節の角度の関係を調べる。前節と同様に、第三指に注目して第三関節の屈曲量とそれに対する第一関節の予測屈曲量の散布図を作成する。散布図における各サンプル点の近傍を通る直線を引くことで以下のようなグラフが得られる(図 2.2)。

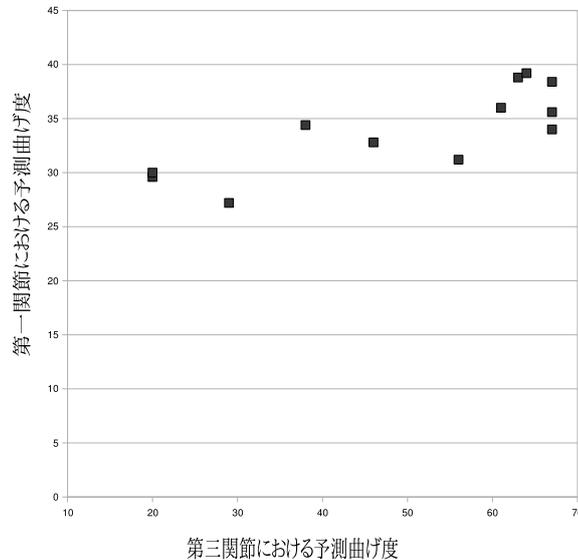


図 2.2: 第三関節の屈曲量と第一関節の屈曲量の関係

この直線の方程式を指の第三関節の角度と第一関節の角度の相関関係を表す式とみなす。また、この式は以下の形の線形方程式 (2.7) で表すことができる。

$$\Delta_{dip} = C\Delta_{mp} + D \quad (2.7)$$

C 、 D は定数である。各指に対して同様の処理を行うことで、各指における指の第三関節の角度と第一関節の角度の相関関係を表す式を求めることができる。以後、相関関係式とは、指の第三関節の角度と第一関節の角度の相関関係の式 (2.7) を表すこととする。

また、手順 3 は式 2.2 の式を用いて、手順 2 で算出した第一関節の角度から第二関節の角度を求める。このようにして、指を伸ばした状態から手を握るという特定の動作における指関節同士の相関関係を求めることで、センサー出力値から各指関節の角度を算出する。結果として、仮想手モデルに各指関節の角度情報を与えることが可能であり、指を伸ばした状態から手を握る動作に限り違和感の少ない動きが可能となる。

第3章 物体形状に基づく把持動作の補正法

従来のモデルでは、手動作を指を伸ばした状態から手を握る動作に限定することで、センサー数の少ないデータグローブを用いても、実際の手の動作と比べ違和感の少ない動作を仮想手で行うことを可能とした。しかしあくまで手動作を限定してしまっているため、対象物体の形状次第で手動作が変わってしまう把持動作には対応できない。また、5DTのセンサーは指全体の曲がり具合を計測することができるが、その性質上、ある指の各関節が異なる角度に曲がってもほぼ同じ値を出力してしまうという問題が起こることがある。例として、5DTを装着した手の図(3.1)を以下に示す。二つの画像における人差し指の各関節は異なる角度に曲がっているが、どちらもセンサー出力値がおおよそ等しいという状況が起こり得る。

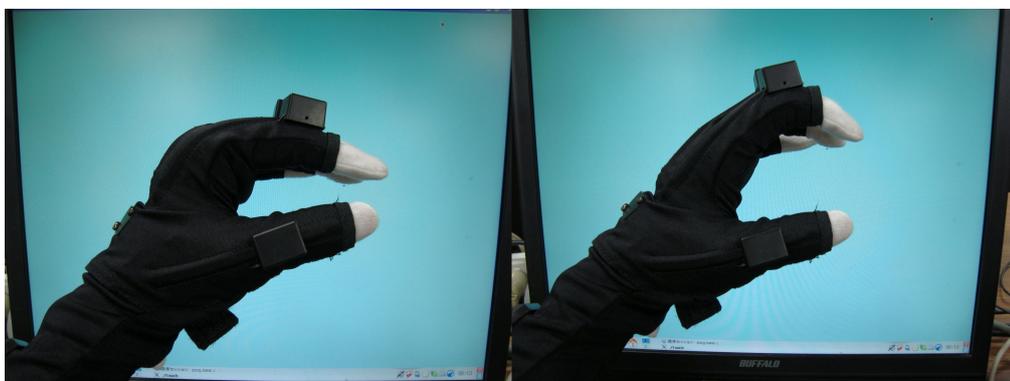


図 3.1: 人差し指のセンサー出力値がほぼ等しい二つの手

物体を把持する際の手動作は物体の形状やサイズなどにより様々であるため、こういった問題が多く起こることが考えられる。同じセンサー値であっても、把持対象物体の形状に応じて適切な角度を仮想手に与えられるようにセンサー出力値を補正したい。

そこで本研究では、仮想空間で物体を把持しようとする場合、計算機は対象物体の形状やサイズの情報を持っているという点に着目し、把持対象物体の形状情報を利用することで、物体に応じて適した把持動作を仮想手で行うことを考える。また、把持動作は従来の研究と同様に、指関節同士の相関関係式を算出することで再現する。物体形状に応じた把持動作の相関関係式の算出あたり、まず、あらかじめ特定の形状の物体に対する把持動作における相関関係式を求め、把持対象物体の形状情報をもとに相関関係式を補正することで、物体に適

した把持動作における指関節角度の再現を行う。また、手が物体をどの方向から、どのような傾きで把持するかを調べるため、把持対象物体に対する手の姿勢を調べる。把持対象物体に対する手の方向・傾きに合わせ、相関関係式を補正し手の姿勢に合わせた把持動作の再現を行う。

3.1 把持対象物体の条件

人間が物体を把持する際の手の動作は、把持対象である物体の形状やサイズに大きく依存することが分かっている [8]。このことから、把持対象である物体の形状情報から、人がその物体を把持する際の手の動作を推定することができると考えられる。また同じ形状、サイズの物体であっても、物体の質量が異なる場合や、携帯電話や鉛筆などのように固有の機能を持っている物を把持する場合はそれに応じて物体に適した把持を行うと考えられる。これらのことから把持動作は、物体の形状やサイズに限らず、質量や物体固有の機能にも依存すると考えられるが、今回は物体の形状やサイズの情報に着目し、質量や固有の機能については考慮しないこととする。

身近な生活空間には細長い棒状の物や薄い板状の物など様々な形状の物体があり、様々な把持の仕方が可能である。しかし、そのほとんどはおおまかに直方体や円柱などの基本的な形状で表すことができる。このことから、本研究では物体の概形を基本的な形状で表すこととし、把持対象物体を直方体に限定して扱う。そして直方体の各寸法を、物体の形状情報として与える。片手での把持動作を想定しているため、物体の大きさは片手で把持できる程度のものとする。

また、人が基本的な形状の物体を把持するとき、親指以外の四指の付け根をつないだ線と、物体の慣性主軸のいずれかが同じ方向を向く傾向があることがわかっている [9]。直方体を把持する場合は手の平が直方体のある一面に対しほぼ正対し、隣り合う一面とそれに向かい合う一面をそれぞれ親指と親指以外の四指で押えるように把持すると考えられる。今回直方体の把持はこのように行うものとする。また、このときの手の平が向いている方向を物体を把持する方向、その方向に対する傾きを物体を把持する傾きとする。

3.2 基本把持動作の設定

人は物体の把持を行う際、その把持対象である物体の形状、サイズに応じて様々な把持動作を行う。そこで、物体の形状による影響が大きいと考えられる基本的な三つの把持動作に着目した。ここでは、いくつかの特定の形状の物体に対する、基本的な把持動作における指関節の角度再現を行う。この特定の形状を基本形状とし、基本形状に対する把持動作を基本把持動作とする。次節以降で、この基本把持動作を組み合わせることで、様々な形状の物体に適した把持動作の再現することを考える。本節では、把持動作における指関節の角度の再現法と基本把持動作の対象物体の選択について述べる。

3.2.1 少数センサーからの指関節角度の再現

まず少数センサーのデータグローブを用いた各指関節の角度の算出法について述べる。センサー数の少ないデータグローブとして5DTを用いる。指関節の算出は従来の研究 [6] と同様に以下のような手順で行う。

手順1 センサーの出力値から指の第三関節の角度を算出

$$\theta_{mp} = Ag + B \quad (3.1)$$

手順2 指の第三関節の角度から指の第一関節の角度を算出

$$\theta_{dip} = C\theta_{mp} + D \quad (3.2)$$

手順3 指の第一関節の角度から指の第二関節の角度を算出

$$\theta_{pip} = \frac{3}{2}\theta_{dip} \quad (3.3)$$

手順1の式(3.1)はセンサー毎に求められる固有の式であり、指の第三関節曲げ角度とセンサーの出力値の関係式を表す。この式は5DTを装着し指を曲げた際の、指の第三関節の曲げ角度とそれに対応するセンサーの出力値のデータを収集することで求められる。手順2の式(3.2)は指の第三関節の角度と第一関節の角度の相関関係式である。これは把持動作を行った際の指の第三関節の角度とそれに対する指の第一関節の角度を記録し、その散布図における各サンプル点の近傍を通る直線の方程式から得ることができる。また、手順3の式3.3は第一関節と第二関節の間に見られる比例関係の式である [11]。

手順2における相関関係式は手動作ごとに異なっており、相関関係式によって手動作が決まるとも言い換えられる。そこでいくつかの特徴的な把持動作における相関関係式をあらかじめ求めておき、物体形状情報に応じてその相関関係式を組み合わせ補正することで把持動作の再現を行う。

3.2.2 物体形状に基づく基本的な把持動作

ここでは、物体形状の影響が大きいと考えられる基本的な把持動作について述べる。まず、本研究の把持対象物体である直方体の、形状について考える。直方体の寸法は、高さ×幅×奥行きで表されるのが一般的である。人が物体を把持するときは、把持する方向や傾きによって手にとってどの寸法がどの方向の長さとなるかが変わってしまう。そこで、把持を行う手から見た寸法を把持寸法として以下のように設定する(図3.2)。

- 把持幅：親指と他四指にはさまれる方向の長さ
- 非把持幅：親指以外の四指の並びの方向
- 奥行き：手の平と向かい合う方向

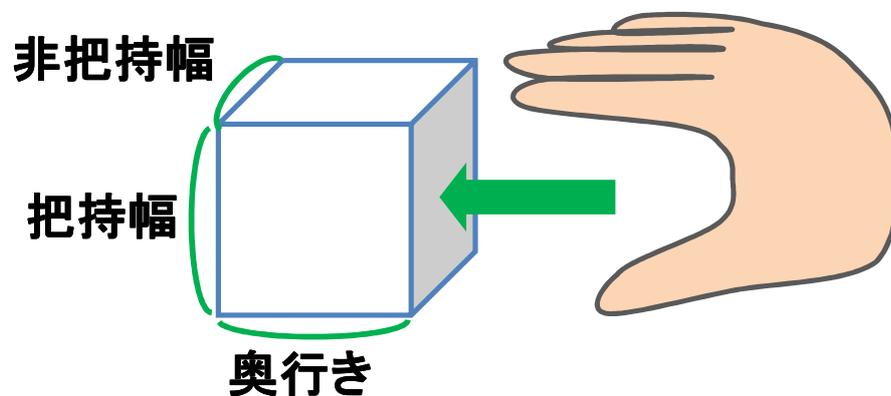


図 3.2: 手とそれに対する把持寸法

これら把持寸法に着目し、物体形状に基づく基本的な把持動作を考える。一般的に片手でできる直方体の把持動作は以下のような動作が考えられる。

- つまみ：指先で物体を支える把持動作(図3.3)
- にぎり：指先を曲げて指全体で物体を支える把持動作(図3.4)
- はさみこみ：指先を伸ばして指全体で物体を支える把持動作(図3.5)

これらの把持動作に対して把持対象物体である直方体の把持寸法に着目し、直方体の非把持幅と奥行きの二つの寸法から、上記の把持動作を以下のようにおおまかに分類した。



図 3.3: つまみ動作の例 図 3.4: にぎり動作の例 図 3.5: はさみこみ動作の例

- つまみ：非把持幅の小さい物体を対象とした把持動作
- にぎり：非把持幅が大きく、把持奥行きが小さい物体を対象とした把持動作
- はさみこみ：非把持幅が大きく、把持奥行きが大きい物体を対象とした把持動作

3.2.3 基本形状の把持寸法

前節で設定した物体の形状による影響が大きいと考えられる基本的な把持動作において、3.1.1 節の手法を用いて、相関関係式を算出する。その把持動作の相関関係式が、把持対象物体の寸法に応じてどのような変化があるかを調べる。

把持対象物体の把持幅により、各把持動作における指の第三関節と第一関節の角度の相関関係にどのような変化があるか調べた。把持幅を 2cm, 4cm, 6cm, 8cm に分けて各把持動作の相関関係式を調べた。例として中指に着目し、把持幅別のつまみ動作における第三関節角度に対する第一関節角度の散布図と、その各サンプル点の近傍を通る直線を図 3.6 に示す。また、各把持幅に対する相関関係式の定数 C, D の値の散布図を示す (図 3.7, 3.8)。

散布図の各サンプル点の近傍を通る直線を引くと、把持幅と定数 C, D の関係式が得られる。この関係から、つまみ動作は把持幅に比例して相関関係式が変わることがわかる。にぎり動作とはさみこみ動作においても同様の処理を行ったところ、同じような結果が得られた。

これらの結果から、基本形状の各把持寸法の値を定義する。把持対象物体の把持幅が大きいほど、第三関節の曲げる範囲が小さくなるため、相関関係式を導くためのデータ数が少なくなってしまう。相関関係式を求める上で、データ数は多い方がより良いと考えられることからここでは 8cm の場合はデータ数が少ないため除くこととし、把持幅が 6cm の場合の把持動作を基本把持動作として用いることとする。それに対してより小さい 2cm の場合の把持動作も基本把持動作として用いることとする。また、それに合わせて基本形状の非把持幅と把持奥行きを 2cm と 6cm の場合に分け、つまみ、にぎり、はさみこみ動作の分類を行う (図 3.9)。このときの基本把持動作における第三関節の角度と第一関節の角度の相関関係式

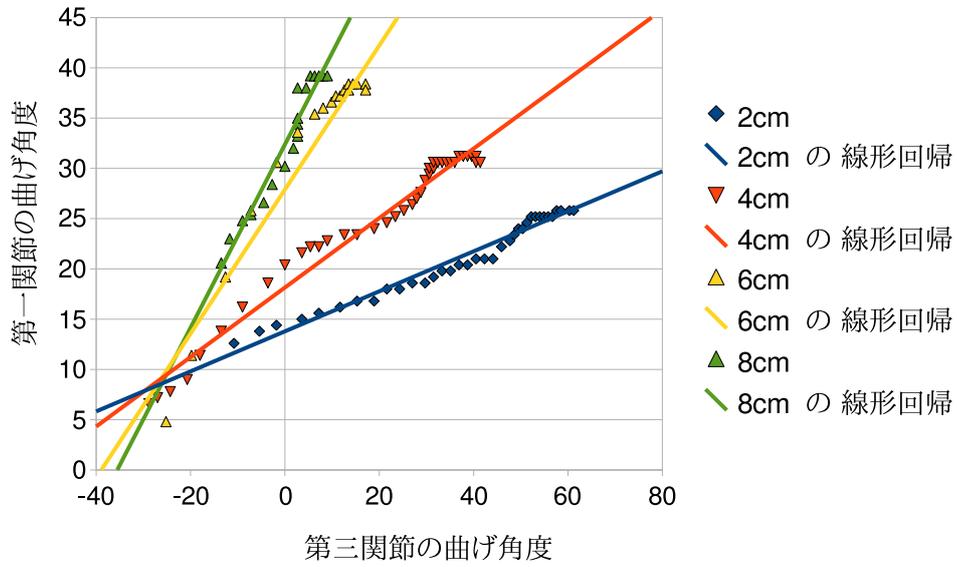


図 3.6: 把持幅別つまみ動作の相関関係式

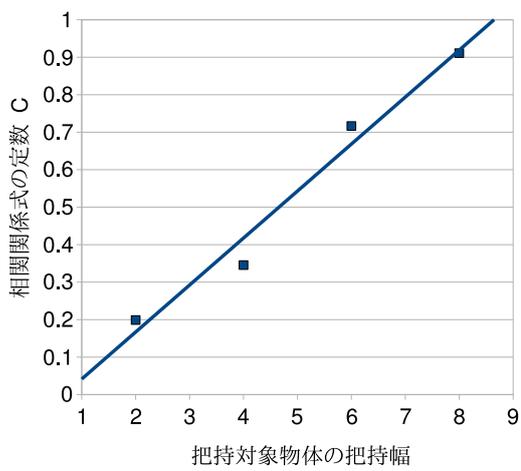


図 3.7: 把持幅に対する C の値

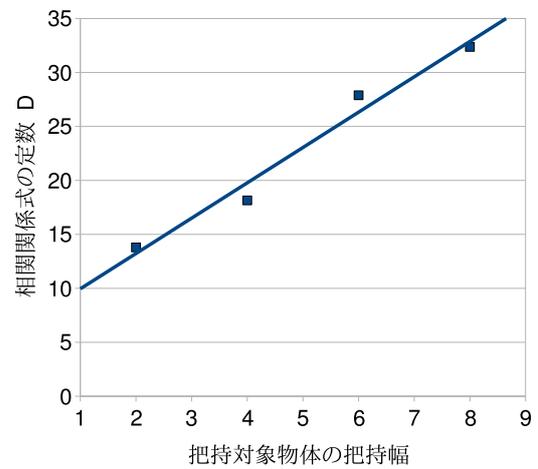


図 3.8: 把持幅に対する D の値

表 3.1: 中指における各基本相関関係式

基本把持動作	中指における基本相関関係式
つまみ小	$\theta_{dip} = 0.2023\theta_{mp} + 13.63$
にぎり小	$\theta_{dip} = 0.4114\theta_{mp} + 16.28$
はさみこみ小	$\theta_{dip} = 0.0745\theta_{mp} + 4.359$
つまみ大	$\theta_{dip} = 0.7165\theta_{mp} + 27.89$
にぎり大	$\theta_{dip} = 0.6578\theta_{mp} + 17.49$
はさみこみ大	$\theta_{dip} = 0.2137\theta_{mp} + 20.59$

を、基本相関関係式とする。例として、最も長い中指における各基本相関関係式を表 3.1 に示す。また、基本把持動作における対象物体の把持寸法を、基本把持寸法とする。

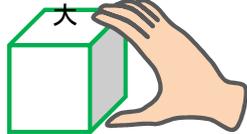
	非把持幅 2cm	非把持幅 6cm	
		奥行き 2cm	奥行き 6cm
把持幅 2cm	つまみ小 	にぎり小 	はさみこみ小 
把持幅 6cm	つまみ大 	にぎり大 	はさみこみ大 

図 3.9: 基本把持動作と基本把持寸法

また、図 3.7, 3.8 の散布図で指の第三関節の曲げ角度の範囲がおよそ-30 度から 60 度という範囲になっている。この範囲が-30 度から始まっているのは、把持幅の大きい物体の把持動作のためである。日常生活の中で指を反らせるような動作はあまり多くはないと思われるが、把持幅の大きい物体を把持する際には無意識のうちに第三関節を反らせる (図 3.10)。このとき、指の第三関節の角度は通常の曲げ動作と反対に指を曲げるため、このような範囲になっている。また、物体を親指と他四指ではさむため、その範囲は通常の第三関節の可動範囲より小さくなっており、この傾向は把持幅の大きさに比例している。



図 3.10: 把持幅の大きい物体の把持 (第三関節が反る)

3.3 物体形状に応じた把持動作の補正

対象物体の把持寸法がいずれかの基本把持寸法である場合、把持動作は基本把持動作となる。しかし、実際は基本把持寸法である物体以外の様々な物体を把持する。よって本節では、対象物体の把持寸法が基本把持寸法でないときの把持動作の相関関係式の補正を考える。

対象物体の把持寸法が、基本把持寸法でないとき、基本把持寸法との違いを調べ、基本把持動作同士の内分をとることで把持寸法に応じた基本相関関係式を導出する。

各基本把持動作の対象物体は、基本把持寸法として各寸法が 2cm もしくは 6cm の値をとっている。この把持寸法をもとに把持対象物体の寸法の値によって基本相関関係式を組み合わせることで補正することで物体形状に応じた相関関係式を導き出す。

物体の把持寸法に応じた基本相関関係式の補正は、相関関係式 3.2 の定数 C と D の値を補正することで行う。対象物体の把持寸法と、基本把持寸法である 2cm、6cm との差を内分比とすることで、基本相関関係式の定数 C と D から対象物体の把持寸法に合わせた相関関係式の定数を算出する。例として定数 C に着目すると以下のような式になる 3.4。

$$C_3 = \frac{(nC_1 + mC_2)}{m + n} \quad (3.4)$$

C_3 が求める相関関係式の定数の値であり、 C_1, C_2 が内分をとる元の相関関係式の定数である。また、内分比 m, n は注目している寸法の値を k とすると $m = k - 2$ 、 $n = 6 - k$ として求める。この式の C を D に入れ替えることで定数 D についても同様に内分・外分を行うことができる。

上記の内分の式を用いて、三つの把持寸法、把持幅・非把持幅・奥行きそれぞれについて内分比を求めて相関関係式の補正を行う。以下のような手順で各把持寸法に応じて物体に合わせた把持動作の相関関係式を導き出す。また、これらの手順で相関関係式の定数を内分していく基本把持動作を表す図 (3.11) を以下に示す。

手順 1 : 奥行きの値を元に、にぎり小とはさみこみ小の相関関係式の内分・外分と、にぎり大とはさみこみ大の相関関係式の内分・外分をとる

手順 2 : 非把持幅の値を元に、つまみ小と手順 1 で求めた小同士の相関関係式の内分・外分と、つまみ小と手順 1 で求めた大同士の相関関係式の内分・外分をとる

手順 3 : 把持幅の値を元に、手順 2 で求めた二つの相関関係式の内分・外分をとる

基本把持動作を定義した図 3.9 より、把持寸法の奥行きの値はにぎり動作とはさみこみ動作にのみ関連しており、つまみ動作には影響をあたえない。また、非把持幅はにぎり動作とはさみこみ動作に区別はない。そのため、まず手順 1 で奥行きの値を用いて、にぎり動作と

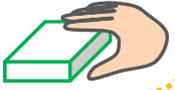
		手順1	手順2	手順3
		非把持幅 2cm	非把持幅 6cm	
			奥行き 2cm	奥行き 6cm
把持幅	2cm	つまみ小 	にぎり小 	はさみこみ小 
	6cm	つまみ大 	にぎり大 	はさみこみ大 

図 3.11: 物体形状に応じて基本把持動作を内分する手順

はさみこみ動作の基本相関関係式の定数の内分をとる。これを小動作、大動作に対して行う。次に手順2で非把持幅の値によって、つまみ動作と、手順1で内分をとって求めた相関関係式の定数の内分をとる。これについても小動作、大動作に対して行う。最後に手順3において、手順2で求めたつまみ小・にぎり小・はさみこみ小の相関関係式の定数の内分をとった値と、つまみ大・にぎり大・はさみこみ大の相関関係式の定数の内分をとった値の内分をとる。これらの手順を踏むことで、6つ基本相関関係式の定数 C 、 D から、物体形状の情報を用いて補正し把持対象物体に最適な把持動作の相関関係式を導き出す。

3.4 把持する方向・傾きに応じた把持動作の補正

人が物体を把持する際、手が物体に対してどの方向からどのような傾きで把持するかによって、把持動作は変わってくる(図 3.12,3.13)。そのため物体の形状とサイズが既知だとしても、その物体を把持する際の手の把持動作を一つに特定することはできない。

また、人が物体を把持しようと物体に手を伸ばしているとき、手の方向が物体に対しまっすぐではなく斜めに向かうことが多々考えられる。こういった場合、手が物体を把持する方向・傾きは最も近い物体把持線の方向と同じとは限らない。そこで、手の方向・傾きが物体把持線に対し斜めに向かっているとき、手の方向と近い方向である物体把持線を二本選択し、物体把持線に対する手の方向の角度によって、それぞれの物体把持線を把持方向とする二つの把持動作同士の中間の把持動作の相関関係式を算出することを考える。

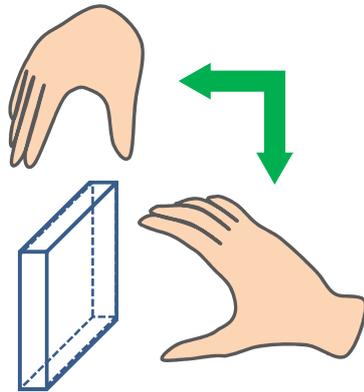


図 3.12: 方向により把持動作はかわる

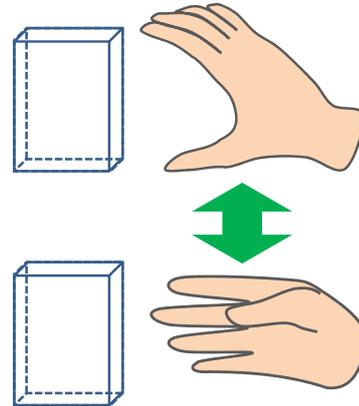


図 3.13: 傾きにより把持動作はかわる

まず人が物体を把持する際の、物体と手の関係について考える。文献 [9] では、人が物体を把持しようとする際の物体と手の方向に着目し、把持を行う手の方向を表す仮想把持線と把持対象物体の方向を表す物体把持線が同じ方向を向くという相関関係があることを明らかにしている。このことから、把持を行う際の手の方向と物体の方向の関係を調べることで、手の方向の情報をもとに、複数の物体から把持の対象を予測する手法を提案している。この手法を参考に、文献 [10] では物体に対し手がどの方向から把持するかを推定する手法を提案している。物体を把持する際の手の方向と把持対象物体の方向の相関関係に着目し、仮想把持線と物体把持線の方向を調べることで手がどの方向から物体を把持するかを推定している。そこで、本手法ではこの手法を応用し、手と物体の方向の情報から物体に対する手の方向・傾きを推定する。

3.4.1 把持方向と把持傾き

物体の方向を三本のベクトルで表し、手の方向と傾きをそれぞれ一本のベクトルで表す。把持対象物体の方向を表すベクトルを物体把持線とし、手の方向を表すベクトルを把持方向線、手の傾きを表すベクトルを把持傾き線とする。また、各ベクトルは単位ベクトルであり、以下のように定義する。

- 物体把持線：把持対象物体である直方体の各面の垂線方向のベクトル
- 把持方向線：手の平の垂線方向のベクトル
- 把持傾き線：薬指の第三関節から人差し指の第三関節へ向かうベクトル

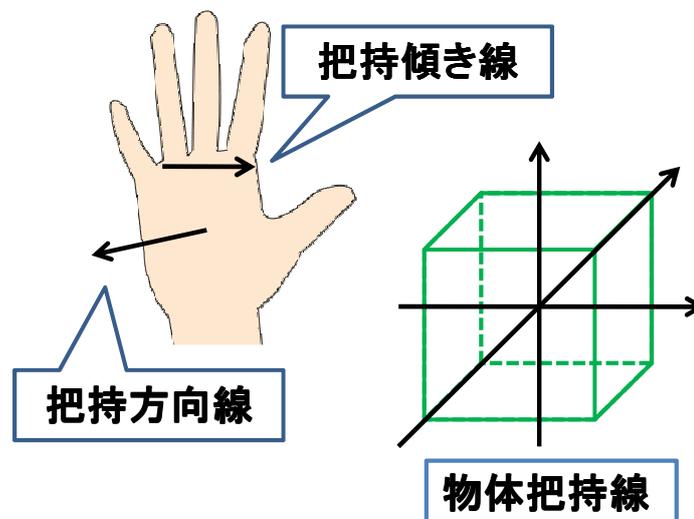


図 3.14: 把持方向線、把持傾き線と物体把持線

物体を把持するときの把持方向線の方向を把持方向、把持傾き線の方向を把持傾きとする。把持方向と把持傾きは直交であり、物体を把持する際はそれぞれいずれかの物体把持線と同じ方向を向く。このときの物体把持線の向きと同じ方向である把持方向を、基準方向とする。

3.4.2 手の方向・傾きに応じた相関関係式の導出

物体把持線と把持方向線・把持傾き線から、手の方向・傾きに応じた相関関係式を導出する。その手順を以下に示す。

手順1 把持方向線と近い基準方向の向きの物体把持線を二本選択

手順2 それぞれの把持方向線の方向を把持方向とした場合の、把持傾きを求める

手順3 それぞれの把持方向における把持動作の相関関係式を算出

手順4 把持方向線と物体把持線との角度により相関関係式を補正し手の方向・傾きに応じた相関関係式を導出

まず手順1において、把持方向線と物体把持線の方向の関係は、ベクトル同士の内積を用いて角度を求めることで調べる。単位ベクトル同士の内積の絶対値は大きいほど、ベクトル同士の方向は近く、内積が1のとき平行である。把持方向線と各物体把持線の内積を求め、把持方向線との内積の絶対値が大きい順に二本、把持方向線との方向に近い物体把持線として選択する。次に手順2において、それぞれの物体把持線について、その方向を把持方向とした場合の、把持傾きを調べる。注目している物体把持線に直交する残りの二本の物体把持線と、把持傾き線の内積を求め、内積の絶対値が大きい方の物体把持線の方向を、注目している把持方向に対する把持傾きの方向とする。

手順3において把持方向・把持傾きに加え、把持対象となる直方体の各寸法の情報から、それぞれの把持方向・把持傾きにおける把持動作の相関関係式を算出する。手の物体に対する把持方向・把持傾きに対して、3.2節で取り上げた把持寸法をそれぞれ以下のように設定する。

- 非把持幅：把持傾きと推定した物体把持線と同じ方向の寸法の大きさ
- 把持奥行き：把持方向と推定した物体把持線と同じ方向の寸法の大きさ
- 把持幅：上記以外の残りの寸法の大きさ

こうすることで、手の物体に対する把持方向・把持傾きと、物体の各把持寸法が得られる。これらの情報が得られれば、3.3節の物体形状に応じた把持動作の補正を行うことで相関関係式が算出できる。二つの把持方向に対してそれぞれ相関関係式を算出する。

手順4において、手順3で求めた二つの把持動作から、手の方向・傾きに応じた相関関係式を導出する。二つの把持動作の把持方向であるそれぞれの物体把持線と、把持方向線とのなす角度に基づいて、手順3で求めた二つの把持動作の相関関係式の定数を内分する。最も把持方向が近いと判定した物体把持線と、把持方向線とのなす角度はその内積の逆余弦により求められる。この角度を θ とする。すると、物体把持線同士は三本とも直交しているので、二番目に手の方向が近いと判定した物体把持線と把持方向線とのなす角度 θ' は $\theta' = 90 - \theta$ で求められる。

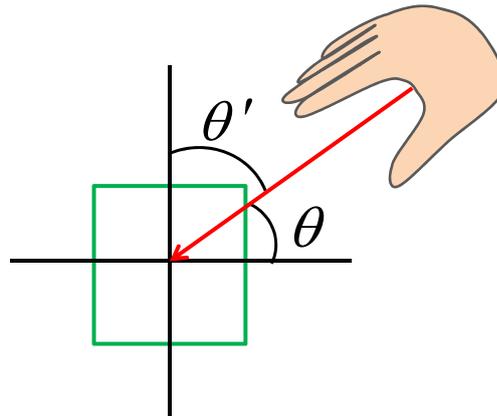


図 3.15: 把持方向線と二本の物体把持線のなす角

最も把持方向に近い物体把持線の方角を把持方向とした把持動作における相関関係式の定数と、二番目に把持方向に近い物体把持線の方角を把持方向とした把持動作における相関関係式の定数を θ と θ' の値を内分比として用いて内分することでこの手の方向に応じた把持動作の相関関係式が得ることができる。内分は式 3.4 を用いることで C 、 D において行う。

3.5 対象物体が二つ存在する場合の把持動作補正

日常生活の中で、身の周りには様々な物体が多数あり人はその中から把持する物体を選択し、その物体に合わせた把持動作を行っている。本節では、把持対象である物体が二つ存在する場合の手動作の挙動を考える。人が複数ある物体の中から一つを選択し把持するときの手の動作は、その物体に近づくにつれてその物体に合わせた把持動作に近づいていくと考えられる。そこで、把持対象物体が二つ存在する場合を想定し、手と各物体との位置から距離を調べ、それを元に把持動作を補正する。

仮想手の位置を手のひらの中心の位置とし、各物体の位置を各物体の重心の位置とすることで、仮想手の位置と物体の位置から仮想手と物体の距離を求める。物体 A との距離を d_A 、物体 B との距離を d_B としたとき、その距離を内分比とする。

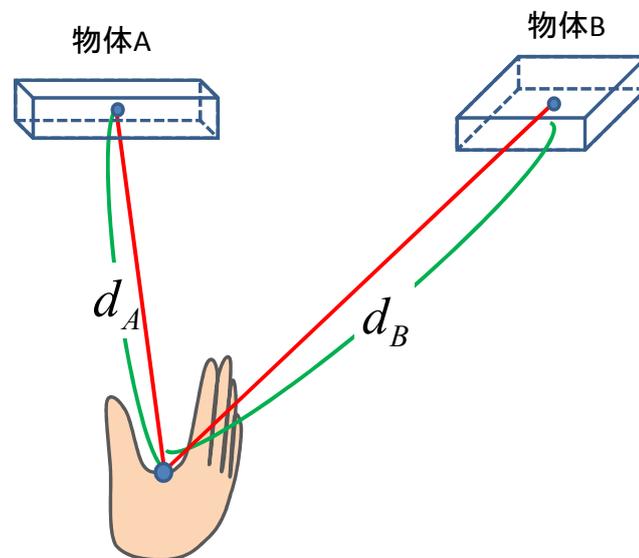


図 3.16: 手と各物体との距離

前節までで算出した物体の形状、手の方向・傾きに応じた把持動作の相関関係式を物体 A、B に対して求め、それぞれの相関関係式の定数を、 d_B と d_A の値を内分比として用いて内分する。前節と同様に、内分は式 3.4 を用いることで C 、 D において行う。こうすることで、把持対象である物体が二つある場合に、手がどちらかの物体に近づくにつれて、近づいた物体に合わせた適切な把持動作となる。

第4章 実験

本章では、センサー数が少ないデータグローブを用いても、物体の形状情報を利用して仮想手に与える値を補正することで、仮想手による物体把持動作が物体に合った自然な挙動であるかを実験を行って検証する。

本研究ではまず、いくつかの特定の形状に対する把持動作における指関節角度の算出を行った。次に特定の形状に対する把持動作を組み合わせ補正することで、特定の形状以外の把持動作における指関節角度の算出を行った。そして、手の把持方向線・把持傾き線が物体把持線と平行でない場合、物体把持線に対する傾き具合に応じて異なる方向・傾きにおける把持動作の中間の把持動作における指関節角度の算出も行った。

4.1 システム構成

実験システムを以下のような環境をもつ Linux マシンにおいて、C 言語を用いて実装した。

- CPU : Dual-Core AMD Opteron(tm) Processor 1210 1.8GHz
- GPU : GeForce 7600 GT 256MB
- MEM : 1GB

仮想手を動かすインターフェースとして、データグローブを用いる。今回の実験は、3.2 節でも述べているようにセンサー数の少ないデータグローブとして、各指に対して1つ、合計5個のセンサー設置されている5DTを用いて行う。また、手の位置・姿勢を計測するため POLHEMUS 社の PATRIOT を用いた。このセンサは対象物体の3次元の位置と角度(オイラー角)をリアルタイムに計測することが出来る。

4.2 実験

被験者に、実際に 5DT を装着し、手の甲の位置に PATRIOT のセンサを設置してもらい、画面の仮想空間上の仮想手を動かす実験を行った。今回以下のような 5 つの動作における評価実験を行った。また、3.2 節、3.4.1 節にあるように、基本形状とは基本把持動作の対象物体の形状のことであり、基準方向とは、物体を把持する際の、物体把持線と同じ方向を向く把持方向のことである。



図 4.1: 実験の様子

実験 1 基本形状の物体に対し、基準方向から把持

仮想空間上に基本形状の仮想物体を一つ表示する。仮想手の動作は基本把持動作である。仮想手で仮想物体を把持するように動かしたときに仮想手の動作がどの程度自然に感じられるかを評価する。

実験 2 基本形状以外の物体に対し、基準方向から把持

仮想空間上に基本形状と異なる形状の仮想物体を表示する。仮想手の動作は基本把持動作を物体形状に応じて補正した把持動作である。仮想手で仮想物体を把持するように動かしたときに仮想手の動作がどの程度自然に感じられるかを評価する。

実験 3 基本形状の物体に対し、基準方向以外の方向での仮想手の動き

仮想空間上に基本形状の仮想物体を表示する。仮想手の動作は物体に対する方向・傾

きに合わせて、補正した把持動作である。仮想空間上の仮想物体に対する手の方向を変えていき、把持動作が方向の変化に合わせて自然に変化しているか、また二つの把持方向における把持動作の中間動作がどの程度自然に感じられるかを評価する。

実験4 二つの基本形状の物体が存在するときの仮想手の動き

仮想空間上に基本形状の仮想物体を、距離を置いて二つ表示する。仮想手の動作はそれぞれの物体に対する仮想手からの距離に応じて補正した動作である。仮想空間上で仮想手の位置を変えていくことで、把持動作が仮想手の位置に合わせて自然に変化しているか、また、それぞれの物体に対する把持動作がどの程度自然に感じられるかを評価する。

実験5 実験2から4を複合したモデルにおける仮想手の動き

実験2から4を複合して実験を行う。仮想空間上に、基本形状と異なる形状の仮想物体を二つ表示させ、自由に仮想手の位置・方向・傾きを変化させ、仮想物体を把持するように動かしたときに、仮想手の動作がどの程度自然に感じられるかを評価する。

これら5つの動作の実験を9人に対し行い、簡単な質問とアンケートを行った。被験者には仮想手の動作が自然であるかどうかを7段階で評価してもらった。評価点は7が「限りなく自然に近いように感じる」、評価点4が「モデルとして利用可能な程度の自然さを感じる」、評価点1が「まったく自然に感じられない」とする。

4.3 実験の結果及び考察

実験を行った結果、それぞれの実験に対して得られた評価を図 4.2 から図 4.6 にまとめる。それぞれの実験における評価点の平均値を求め、以下の表 4.1 にまとめた。

表 4.1: 各実験における評価点の平均値

	実験 1	実験 2	実験 3	実験 4	実験 5
平均値	4.7	4.6	5.2	5.2	4.9

実験 1、実験 2 の評価から、物体形状に合わせた把持動作は、少なくともある程度自然に感じる程度まで再現できていると考えられる。これらの実験に対し、「指をまっすぐに伸ばしても指先が伸びきらないことに違和感を感じる」といった意見を複数いただいた。把持幅の大きい物体を把持する際は、第三関節がほとんど曲がっていない状態でも第一関節・第二関節は曲がり始めてしまう。そのため、把持対象物体の把持幅が大きい場合は、第三関節をほぼまっすぐにしても第一関節・第二関節は若干曲がってしまい、違和感につながったと思われる。

また実験 3、実験 4、実験 5 の結果から、物体を把持する方向が基準方向でない場合の仮想手の動作と二つの基本形状の物体が存在するときの仮想手の動作については、あまり違和感なく自然に再現できているといえる。手の位置、姿勢に合わせた動作の自然な移り変わりに対して良い評価が得られた。

しかし、全体的に実験の結果にはばらつきがあり、低い評価をした人に関してはどの実験に対しても総じて評価が低かった。これは、人の指の長さに個人差が存在しているためだと考えられる。センサー出力値から第三関節を求める際にその指の長さの個人差により影響を受けると、第三関節の角度に実際の指の関節角度との誤差がでてしまう。また、第三関節は第一・第二関節の曲げ角度を求める基準となる角度でもあるので、その影響はすべての指関節に及んでしまい、誤差が大きくなってしまったと考えられる。

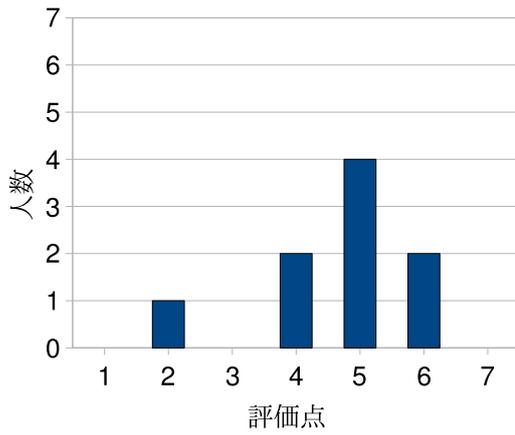


図 4.2: 実験 1 の評価

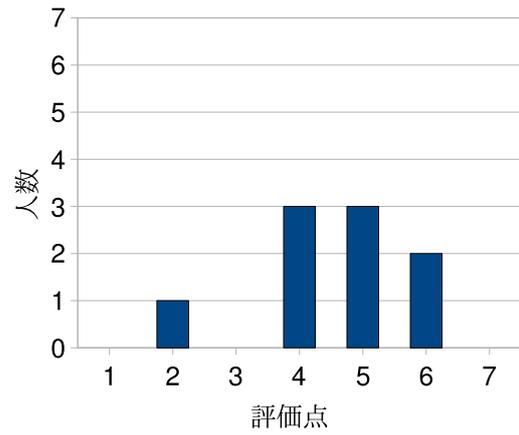


図 4.3: 実験 2 の評価

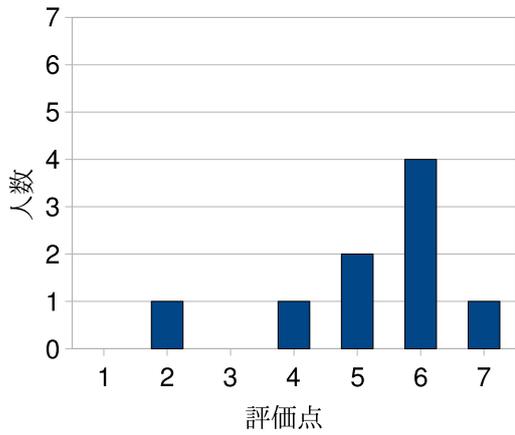


図 4.4: 実験 3 の評価

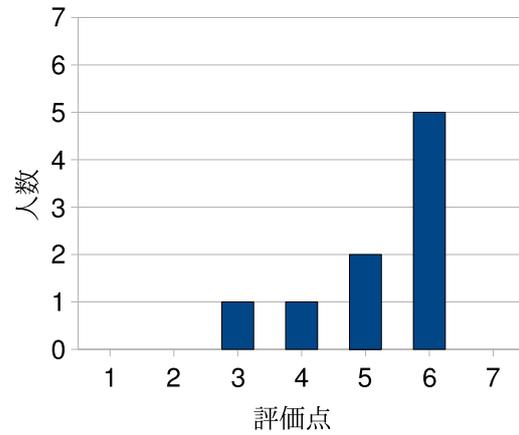


図 4.5: 実験 4 の評価

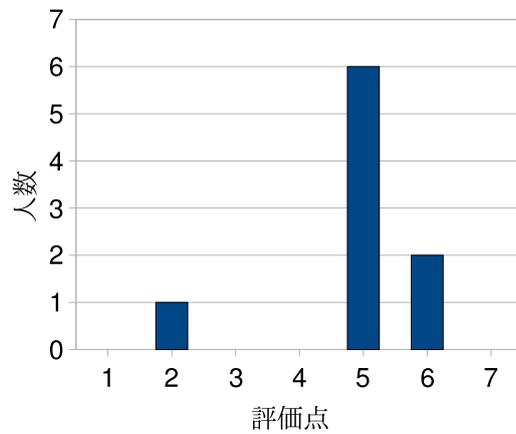


図 4.6: 実験 5 の評価

第5章 むすび

本研究では、一般家庭へのVR技術の普及のために、比較的安価なセンサー数の少ないデータグローブの効果的な利用法を提案した。仮想空間操作において計算機は操作対象物体の形状などの情報を既に有しているため、その物体情報を利用したセンサー数の少ないデータグローブの補正法を提案した。当研究室ではこれまでに特定の動作において、ある指の関節同士の曲げ角度の相関関係を調べることで一つのセンサーの出力値から指の各関節の曲げ角度を算出し、特定の動作に限り自然な挙動を再現する手法を提案している。具体的には指を伸ばした状態から、手を握る動作を可能としている。しかし、従来の手法では再現できる動作が限られており、物体を把持する動作などの多様な手動作の再現はできなかった。今回、把持対象物体の情報を利用し、特定の形状に対する把持動作の相関関係式を把持対象物体の形状に応じて補正することで物体に適した様々な把持動作を仮想手モデルで再現した。また、物体に対して手が斜めに向かっており把持する方向が特定されない場合にも、現在の手の方向から把持する基準方向を二つ予測し、物体に対する手の方向の角度に応じて二つの把持方向における把持動作の相関関係式を補正することで、手が物体に対し斜めに向いている際の挙動を再現した。

実験の結果、センサー数の少ないデータグローブを用いても、物体の形状情報を利用することで、様々な物体に応じた把持動作がある程度自然な挙動が再現できるという評価が得られた。また、物体に対する手の方向に応じた把持動作の補正や、二つの物体から把持対象を選択するといった場合での把持動作補正についても自然な挙動が再現できるであろう評価が得られた。しかし、考察でも述べたように、問題点としてユーザの指の長さの個人差によっては、センサー出力値から求めた第三関節角度と実際の第三関節角度に誤差が生じてしまい、仮想手の挙動があまり自然なものではなくなってしまう。そのため、利用者の指の長さに応じて、センサー出力値から第三関節の角度を算出する式を補正する、といった改良が必要だと考えられる。

今回は物体の形状を直方体に限定してしまっている。しかし現実の世界にはもっと様々な形状の物体が多くあるため、今後は円柱や球といった他の形状の物体における把持動作の再現も考えたい。また、今回は手の方向が物体に対し斜めに向いているときに、手の方向に近い二本の物体把持線を把持方向とする把持動作の相関関係式を、手の方向との角度に合わせて内分をとることで把持動作の補正を行った。しかし、手が物体の角に向いているときなど

は、二本の物体把持線を選択するのではなく、三本の物体把持線の方向に対する把持動作を要素とし、その相関関係式の内分をとって把持動作を求めるべきだと思われる。この点についても改良していきたい。そして対象物体の数についても、今回は二つから選択する場合を想定したが、より多くの多様な物体が、様々な位置に配置されている場合も考えていきたい。

そして、当研究室において提案されている色マーカーと ARToolKit マーカーを用いたイメージベースデータグローブのシステムとも組み合わせることもできるだろう。イメージベースデータグローブでは指先の位置から逆運動学を用いて各関節の角度を求めている。このときの、指先の位置から各関節の角度を求めるプロセスにおいて本研究と同様に、把持対象物体に応じた式をあらかじめ求め、把持対象物体の形状に合わせてその式を補正することで様々な形状の物体における把持動作を導き出せるだろう。

VRの技術は今後も研究・開発が進み、技術の発展に伴いより身近なものになっていくだろう。現在はVR技術に用いるインターフェースが高価であり大規模であることが、一般家庭への普及の妨げとなってしまうている。今後、より安価なインターフェースの研究・開発が進めば一般家庭への普及の追い風となりVR技術が活用される場がより広がるだろう。

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、御協力いただきました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。最後に、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心から感謝致します。

参考文献

- [1] 舘 暲(分担執筆): バーチャルリアリティとはなにか, 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-, クバプロ, pp.8-21, 1999
- [2] 大村廉, 納谷太, 野間春生, 小暮潔: ENVIS:センサデータに基づく看護業務分析支援システム, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 vol.14, No.1, pp.67-78, 2009
- [3] 渡部直人, 永村慎吾, 齋藤泰範, 村山淳, 原田哲也: VR 訓練システム実行時とビデオ映像視聴時における脳活動の比較に関する一考察, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 Vol.14, No.1, pp.107-110, 2009
- [4] Fifth Dimention Technologies: 5DT Data Glove Ultra, <http://www.5dt.com/>
- [5] Essential Reality 社: グローブ型デバイス P5, <http://essential-reality.com/>
- [6] 濱口真一, 舟橋健司: 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によるデータ補正法, 日本バーチャルリアリティ学会第 15 回大会講演論文集, 2A2-4 (DVD-ROM), 2010
- [7] 市野雅久, 舟橋健司, 黒田雄大: 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, 名古屋工業大学卒業研究論文, 2009.
- [8] 福田浩士, 福村直博, 片山正純, 宇野洋二: 対象物の認知と手の把持形状の計算との関係: ヒトの把持運動への計算論的アプローチ: 電子情報通信学会論文誌, Vol.J82-DII, No.8, pp.1314-1326, 1999

- [9] 中村宜孝, 宮里勉, 岸野文郎: 把持動作における preshaping の解析とターゲット予測, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J80-A, No.6, pp.1003-1013, 1997

- [10] 山崎仁之: 把持対象に注目した動作計測に基づく手のアニメーション, 奈良先端科学技術大学院大学修士学位論文, 2006

- [11] George ElKoura, Karan Singh: "Handrix: Animation the Human Hand", SIGGRAPH Symposium on Computer Animation, 2003