

平成 21 年度 卒業研究論文

一般家庭での導入を可能とする  
イメージベースデータグローブの検討

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 18115165 番

名前 山本 三四郎

# 目次

第1章	はじめに	1
第2章	ヒューマンインターフェース	4
2.1	モーションキャプチャ	4
2.2	データグローブ	6
第3章	手の3次元モデルと拘束条件	9
3.1	手の3次元モデル	9
3.2	手の拘束条件	10
3.2.1	指関節の構造	10
3.2.2	各指関節の可動範囲	11
3.2.3	指関節間の依存関係	11
第4章	手の姿勢推定	13
4.1	色マーカーによる特徴点抽出	14
4.2	ARToolKitによる特徴量抽出	15
4.3	特徴点・特徴量の関連付け	16
4.4	修正 Denavit-Hartenberg 記法	16
4.5	指先の3次元位置推定	17
4.6	逆運動学による手の姿勢推定	20
第5章	実験	22
5.1	実験システム	22
5.2	実験の結果	23
5.2.1	計算処理速度の結果	23
5.2.2	拳動の自然さについての結果	23
5.3	考察	28
第6章	むすび	29

謝辭	30
参考文献	31

## 第1章 はじめに

近年、バーチャルリアリティ (Virtual Reality: VR) の技術が発展し、現在も ACM SIGGRAPH や IEEE Virtual Reality など盛んに研究・開発の報告が行われている。しかしながら、現在 VR の技術は一部の映画などの映像作品やテーマパークのアトラクション、プロモーション用の商品にモーションキャプチャや仮想空間における物体との対話操作などの一部の技術が使用されている程度で、身近な生活空間においては VR の技術が積極的には使われていない。これにはいくつかの要因が考えられるが、大きな要因としては VR の技術に使われている主なヒューマンインターフェースが総じて装置の規模が大きい、高価であるといった理由で一般ユーザーに普及していないことが挙げられる。

VR の技術に使われているヒューマンインターフェースはヘッドマウントディスプレイ、ロボットアーム、光学センサ、バンドセンサ、磁気センサ、データグローブ、3次元マウスなど多くの種類がある。一般ユーザーに普及させるためには利用しやすく安価なインターフェースであることが重要になってくる。ところで、仮想空間において物体を操作するときにおいても人は現実空間と同じく手で操作すると考え、本研究では手の動作・姿勢を計測するデータグローブに着目し考察を行った。

データグローブは VR でヒューマンインターフェースとしてよく利用されており、様々な手法のものが開発されている。データグローブは、手という物体の動作・姿勢を計測するという点ではモーションキャプチャの一種であると解釈することが出来る。たとえば、計測対象にロボットアームなどを取り付けて計測する機械式モーションキャプチャのロボットアームのようにバンドセンサを計測対象に取り付けて計測を行うデータグローブがある。データグローブはこのバンドセンサを用いたものが一般的であるが、一つの曲げ角センサで一つの曲げ角を計測するため正確な計測を行うには各指関節にセンサを取り付けるためセンサの数が多くなり、高価なものとなっている。しかし中には、各指の全体の曲げ角を計測しそれぞれの関節についての計測を省くことでセンサの数を少なくした安価なデータグローブも存在する。また、カメラ画像から取り付けたマーカーや抽出した特徴点を計測する光学式モーションキャプチャと同様手に取り付けたマーカー又は特徴点を抽出して計測を行うデータグローブの手法も存在する。

後者の光学式モーションキャプチャと同様の技術を用いたデータグローブの手法に関する研究で、谷口らはキャリブレーションしたカメラ2台で手に取り付けた6つの色マーカーの

位置をステレオ視で計測を行い逆運動学 (Inverse Kinematics: IK) を解いて手の姿勢を推定するという手法 [1] を提案している。また V.F.Pamplona らはカメラ 1 台と各指に取り付けた ARToolKitPlus [2] のマーカーで指先の位置を計測し逆運動学を解いて手の姿勢を推定するという手法 [3] を提案している。これら二つの手法はマーカーを手に直接取り付けるのみでグローブ状のものを装着していない。しかしマーカーが透明なグローブに装着されていると考えれば、この二つの手法はデータグローブであるといえる。ここでカメラ画像から計測を行うことを谷口らは「ビジョンベース」、V.F.Pamplona らは「image-based」と異なった語を使用しているがカメラ画像を扱う点において差異はない。そこで本研究ではこれらの光学式モーションキャプチャと同様にカメラ画像から計測を行うデータグローブを「イメージベースデータグローブ」と総称することにする。

これら二つの手法はインターフェースの入力として用いるのはカメラと安価なマーカー類で、一般的なデータグローブで使用されている高価なセンサ類は使用されていない。そのため、安価にデータグローブによる計測を行うことが可能である。しかし、谷口らの手法では PC に接続するカメラを 2 台使用している。これではユーザーはカメラ複数台所有している必要があり、さらにその 2 台のカメラをキャリブレーションして使用するためカメラを移動させる度にキャリブレーションを行わなければならないため利便性が高いとは言い難い。また V.F.Pamplona らの手法ではカメラを 1 台しか使用していないがカメラを手に固定して使用するため、使用する度にカメラを固定する必要がある。また、手にカメラを固定する関係上カメラの重量によってユーザーは疲労しやすく、長時間に渡って使用する際にはユーザーへの大きな負担となる。これらの問題は普及を考える上で重要な要因になる。ユーザーは普通利用しやすく安価なものを購入するため、先に挙げた問題を解消したイメージベースデータグローブのシステムを構築する必要がある。

本研究ではデータグローブというヒューマンインターフェースを一般家庭での環境下で気軽に使用でき安価なものにすることで、一般家庭でデータグローブを使用して VR の技術を用いた製品、サービスを利用出来るようにすることを目標とし、そのためにユーザーへの負担が少ないイメージベースデータグローブのシステムを提案する。具体的なシステムとしてはカメラ 1 台と ARToolKit [4] のマーカーを用いて計測を行い逆運動学を解いて手の姿勢を推定するものである。VR の技術を用いた具体的なサービスとしては、本研究室が開発を行っている VR ネットショッピングシステム [5] が考えられる。このシステムはネットショッピングをする際に直接商品に触ることが出来ないためユーザーがイメージした商品と実際の商品との大きさ等の違いを埋めるよう振動子による触力覚フィードバック環境下で実際に商品を比較するシステムである。本論文ではまず本研究の第一段階として限定的な環境下ではあるが安価に手の姿勢推定を行えるシステムについて述べる。

以下、2 章では既存のモーションキャプチャ、データグローブについて説明し、3 章では

本研究で用いる手の拘束条件とCGモデルについて述べる。4章では手の姿勢を推定するための方法を説明し、5章では実験とその結果について述べ、6章で提案システムの展望について述べる。

## 第2章 ヒューマンインターフェース

ヒューマンインターフェースとは、人間とコンピュータとの間で情報交換を行う際にやりとりを円滑に行えるようにする手段・方法である。コンピュータのヒューマンインターフェースでは、キーボードやマウスなどが一般的であるが本章では VR に使われている数あるヒューマンインターフェースの中からモーションキャプチャとデータグローブについて説明する。

### 2.1 モーションキャプチャ

先に述べたようにモーションキャプチャとは人間や物体の動作・姿勢を測定し、コンピュータに取り込む技法で VR などによく使われているヒューマンインターフェースである。動作・姿勢を取り込むことによって現実空間の動作を仮想空間に反映させることで様々なインタラクシオンな操作が可能になる。たとえば、仮想空間にある物体を持つ、運ぶ、打つなどの操作を現実空間の動作で行うことが出来る。またコンピュータグラフィクス (Computer Graphics: CG) では 3DCG モデルに計測した動作を反映させて自然な動作をさせることが出来る。このようにモーションキャプチャを行うことによって現実空間においての動作を仮想空間にそのまま情報として与えることが出来るようになり、より VR での臨場感が感じられるようになる。

また CG では人間や物体の自然な動作を作成するためにモーションキャプチャの技術はよく使用されている。CG アニメーションはモーションキャプチャが使用される前までは、各フレーム毎にモデルの一つ一つの関節角度を調節するキーフレームアニメーションと呼ばれる技法で作成されていた。キーフレームアニメーションは作成するコストが高く CG モデルに自然な動作をさせるのが困難であったがモーションキャプチャの出現により CG モデルに自然な動作を行わせることが容易になり、CG アニメーションはよく使用されるようになった。最たる例は映画やゲームなどであろう。近年では、モーションキャプチャ技術を用いて 3D モデルの体の動きだけでなく顔の表情もモーションキャプチャで作成された作品もある。

モーションキャプチャの技術は大きく分けて 3 種類あり一般に、光学式、機械式、磁気式と呼ばれる。

光学式は測定対象にマーカールを取り付け周囲に複数あるいは一つのカメラを置き測定するものと、マーカールは取り付けずカメラ画像から特徴点を抽出し測定するものがある。そのため、限られた狭い範囲内では測定することが出来ず専用のスタジオ(図 2.1) 等で使用されることが多い。



図 2.1: モーションキャプチャスタジオの様子

機械式はアームなどの機械を測定対象に取り付け測定をする。機械式は高精度のデータ計測することが出来るが、機械を取り付けるためマーカールを取り付ける光学式に比べ重く動作範囲が限定される場合が出てくる(図 2.2)。



図 2.2: 機械式のモーションキャプチャ

磁気式は計測範囲に磁界を発生させ測定対象の動作によって生じた磁界の変化を計測する(図 2.3)。そのため、マーカーが隠れるということをご心配する必要はないが、測定対象以外による磁界の変化の影響を受けてしまう。

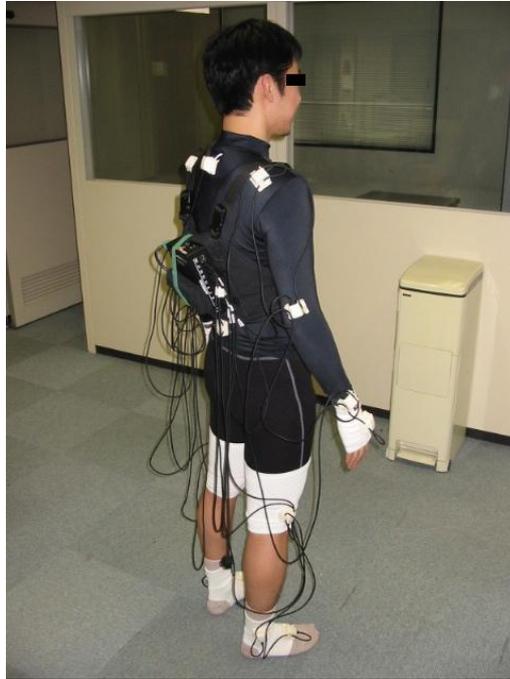


図 2.3: 磁気式のマーションキャプチャ

また、いずれのマーションキャプチャの装置も規模が大きいため家庭への導入には向いていない。

## 2.2 データグローブ

データグローブとは、指の曲がりや指先、関節の位置をセンサで計測しコンピュータに取り込むヒューマンインターフェースで VR などによく使用されている。先述のようにセンサを用いて手の動作(指の曲がりや指先の位置等)を計測するので、データグローブはマーションキャプチャの一種であると解釈することが出来る。またデータグローブの技術にもマーションキャプチャと同じく光学式、機械式、磁気式があり類似した点は多い。データグローブには他にも光ファイバ式などの形式がある。

光ファイバ式は、指の曲がりに応じて光ファイバから光が漏れる量が異なることを利用して、減少した光量から指の屈曲度合いを測定するものである。しかし、指の大きさによって

光の漏れ具合が違ってくるため装着者それぞれに合うようにキャリブレーションする必要がある。

人間は手によって持つ、切る、書く、投げる等の様々な作業を行う。それは VR の仮想空間で作業を行う際も同様である。そのため現実空間における手の動作・姿勢を計測することは仮想空間で様々な作業を行おうとするときには必要になる。先に挙げた VR ネットショッピング等のシステム・サービスを利用するためには人間の動作・姿勢を計測することが一般家庭でも行えるようにすることが必要である。その中でデータグローブは VR のヒューマンインターフェースの中で小型でかつ直感的な操作が可能である点、一般ユーザでも気軽に操作することが可能であるという点を考慮してデータグローブを一般家庭へ導入する方法を検討する。

既存のデータグローブの製品としては、まずゲームの分野で 1989 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マテル社のパワーグローブ(図 2.4)[6]がある。日本では 1990 年にパックスコーポレーションから発売された。



図 2.4: パワーグローブ

他に Essential Reality 社から発売された非常に安価であるが曲げ角センサが 5 つのデータグローブ P5 Glove(図 2.5)[7]があり、P5 Glove はゲーム利用以外にも人差し指で左クリック、中指で右クリック、手を動かすことでマウスカーソルを操作してマウスの代わりとして使用することが出来る。

またデータグローブの中でも高価ではあるが曲げ角センサが 18 ないし 22 個付いており更新レートが高く高精度な計測が行える Immersion 社の CyberGlove (図 2.6)[8]等がある。CyberGlove にはワイヤレスの製品や振動子が付いた製品もあり、振動子が付いた製品による触力覚フィードバックシステムを VR ネットショッピングなどで利用しているほか、CyberGlove は VR の分野でよく使用されている。



図 2.5: P5 Glove



図 2.6: CyberGlove

またモーションキャプチャ、データグローブの他に人間や物体の動作・姿勢を測定するインターフェースにベンドセンサを用いたデータスーツなどが挙げられる。

## 第3章 手の3次元モデルと拘束条件

本章では本研究の実験で用いる手の3次元モデルと手の姿勢推定で活用する手の拘束条件について説明する。

### 3.1 手の3次元モデル

手は本来であれば非剛体の物体であるが、本研究では手の姿勢推定を優先し他の物体と接触を行わせないため、手を各関節点で剛体同士が接続された剛体の物体として近似した骨格モデル(図3.1)とそれに付随するスキンモデル(図3.2)を使用した手の3DCGモデルで実験を行う。スキンモデルは手の姿勢推定には使用せず、実験の結果を表示させるためだけに使用するため簡単なスキンモデルとしてシリンダーベースのモデルを使用する。

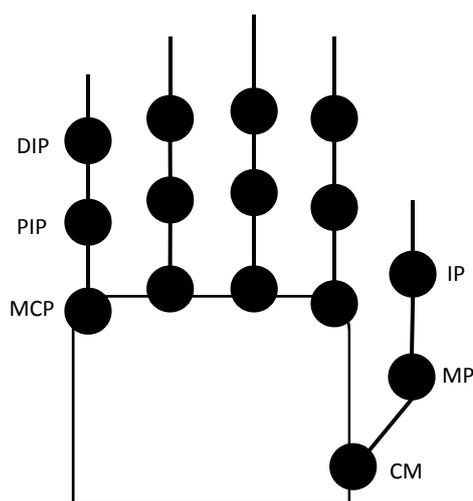


図 3.1: 骨格モデル



図 3.2: スキンモデル

また本研究では関節の名称を以下の表 3.1 ように表記する。

表 3.1: 各関節の名称

遠位指節間関節	DIP 関節
近位指節間関節	PIP 関節
中手指節関節	MCP 関節
指節間関節 (母指)	IP 関節
中手指節間関節 (母指)	MP 関節
母指手根中手関節	CM 関節

## 3.2 手の拘束条件

人間の手には構造上様々な拘束があり、これは拘束条件として知られている。本研究ではこの拘束条件をモデルに取り込み、手の姿勢を推定する上で活用する。

### 3.2.1 指関節の構造

母指には IP 関節に 1 自由度、MP 関節と CM 関節に 2 自由度の計 5 自由度があり、その他の指には DIP 関節と PIP 関節に 1 自由度、MCP 関節に 2 自由度の計 4 自由度がある。しかし、母指の MP 関節における内転・外転の運動は非常に小さくかつ MP 関節の内転・外転の運動のみさせることは経験的に見て非常に困難であると判断し、本研究では MP 関節の内転・外転の運動を考慮しないものとする。これにより母指も他の指と同様な 4 自由度の運動を行うものとする。よって本研究で用いる指関節の自由度は図 3.3 のように設定する。

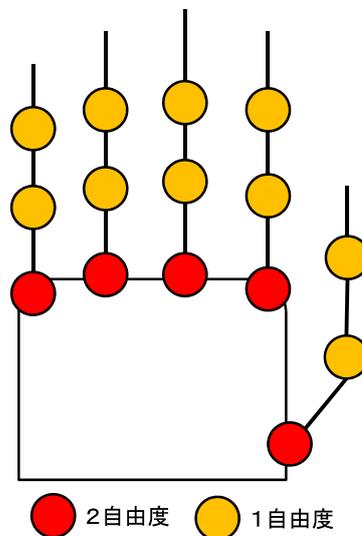


図 3.3: 各関節の自由度

### 3.2.2 各指関節の可動範囲

指の関節には文献 [9] にあるようにそれぞれ可動範囲がある。各指に対応する可動範囲を知識と経験に基づいて設定する。設定した各関節に対応する可動範囲は表 3.2 に示す通りである。

表 3.2: 各指の関節角の可動範囲

	IP	MP	掌側	橈側
母指	0° ~ 80°	0° ~ 60°	0° ~ 90°	0° ~ 60°
	DIP	PIP	MCP	内転・外転
示指	0° ~ 80°	0° ~ 100°	0° ~ 90°	-20° ~ 20°
中指	0° ~ 80°	0° ~ 100°	0° ~ 90°	-20° ~ 20°
環指	0° ~ 80°	0° ~ 100°	0° ~ 90°	-20° ~ 20°
小指	0° ~ 80°	0° ~ 100°	0° ~ 90°	-20° ~ 20°

### 3.2.3 指関節間の依存関係

同じ指における各関節角度の間には次のような依存関係がある。

- DIP 関節は PIP 関節の関節角度には比例の相関関係がある [10]。
- MCP 関節と PIP 関節の関節角度には S 字型の相関関係がある [11]。

それぞれを図 3.4、図 3.5 に示す。

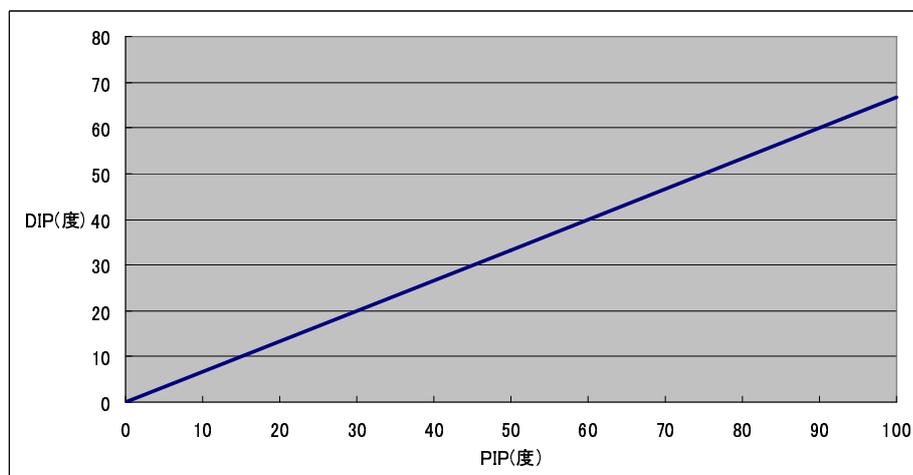


図 3.4: DIP 関節と PIP 関節の比例の相関関係

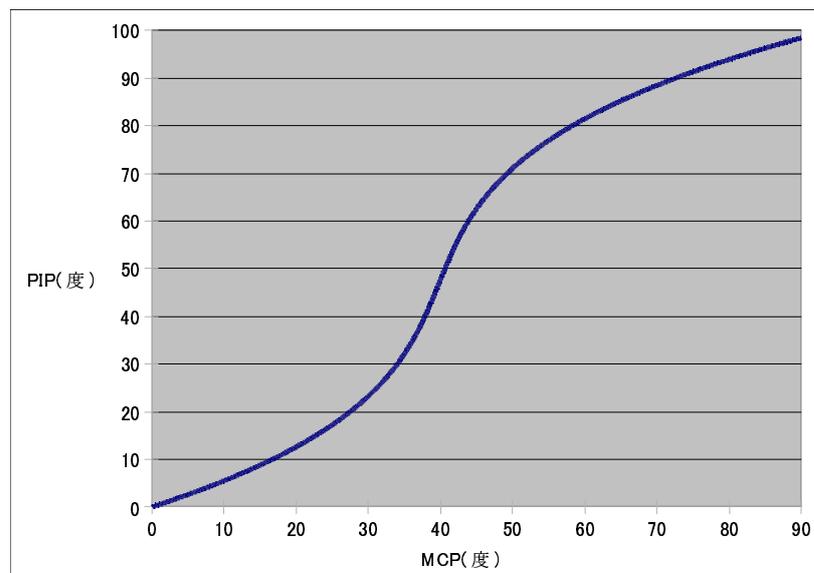


図 3.5: MCP 関節と PIP 関節の S 字型の相関関係

## 第4章 手の姿勢推定

本章では色マーカーと ARToolKit マーカーを用いて指先の3次元位置を推定し逆運動学を解いて手の姿勢推定を行う。まず指の3次元位置推定・手の姿勢推定を行う処理の流れを図4.1に示す。

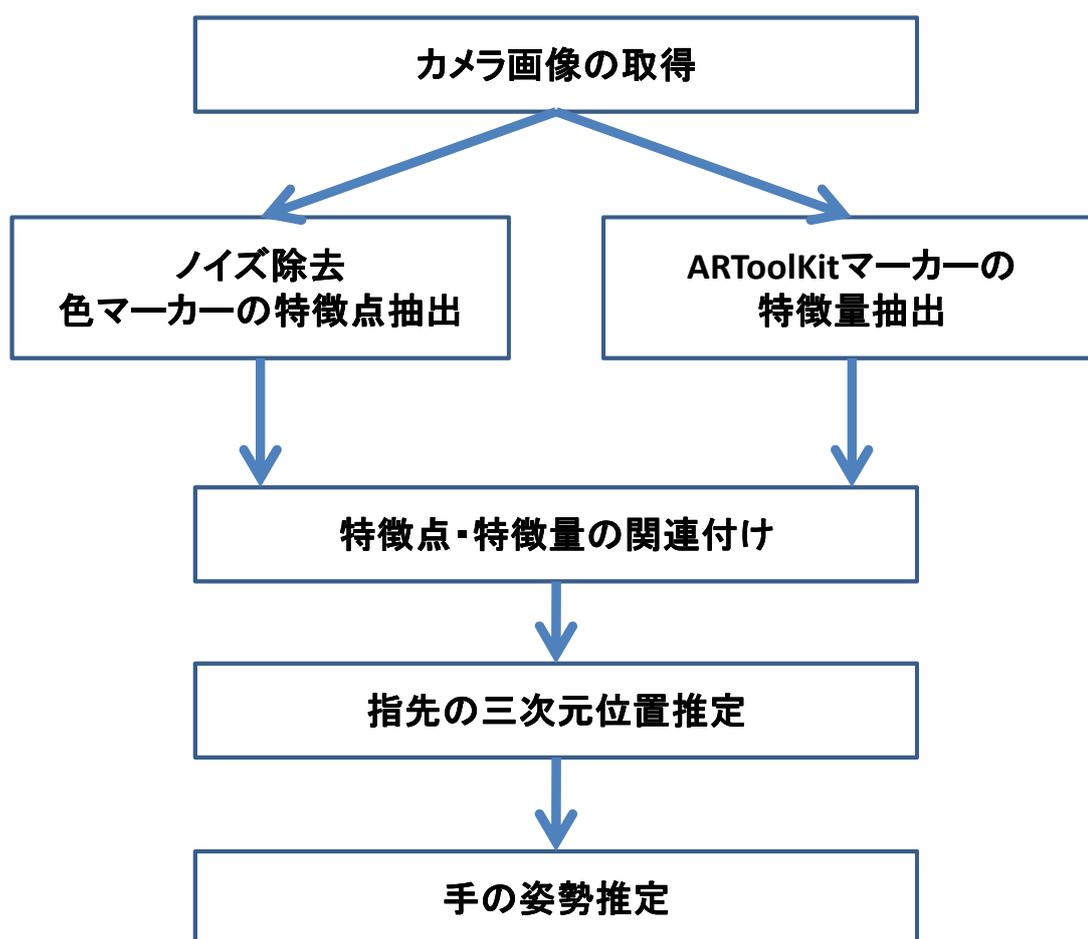


図 4.1: 手の姿勢推定の流れ

## 4.1 色マーカによる特徴点抽出

本研究では指先の位置の特徴点を得るため色マーカを各指先に一つずつそれぞれ異なる色の色マーカを指先を覆うように取り付けて使用する。実際に色マーカを取り付けたものを図 4.2 に示す。



図 4.2: 色マーカ (母指:緑, 示指:赤, 中指:紫, 環指:黄色, 小指:水色)

これにより各色マーカの対象領域を一つの指先に対応させることができ画像中での指先の位置を容易に判断することが出来る。RGB 空間でそれぞれの色マーカに対応する色領域にラベル付けを行い LUT を作成する。カメラからの入力画像の各画素の RGB 値で LUT を参照することで色マーカの対象領域を抜き出したマスク画像を作成する。作成したマスク画像のノイズを取り除くためモルフォロジー変換の縮退処理によりノイズ除去を行う。ノイズ除去を行ったマスク画像から各色マーカの領域の重心点を算出し画像中の指先の位置とする。重心点の計算は画素単位で以下の式 4.1 で行う。

$$(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^{num} (x_i, y_i)}{num} \quad (4.1)$$

点  $(x, y)$  は重心点のウィンドウ座標を表し、 $num$  はマスク画像における各色マーカ領域の画素数、点  $(x_i, y_i)$  は各色マーカ領域の画素のウィンドウ座標を表す。

## 4.2 ARToolKit による特徴量抽出

ARToolKit はマーカーをカメラでキャプチャすることで画像中のマーカーの各辺の傾き等からカメラとマーカーの位置・姿勢関係を計測することが出来るオープンソースのライブラリである。ARToolKit では、このカメラとマーカーの位置・姿勢関係を元に 3D モデル等を配置することで拡張現実 (Augmented Reality: AR) を容易に実現することが可能である。

本研究ではこの ARToolKit のマーカーを手の平の位置・姿勢を計測するセンサとして手の平に取り付けて利用する。マーカーを取り付ける手の平の位置は、指でマーカーが隠れない位置であること、指を動かす際に邪魔にならない位置であることなどを考慮して図 4.3 の位置とする。



図 4.3: 手の平のマーカーの位置

V.F.Pamplona らは ARToolKitPlus のマーカーを貼ったダイスを指先に取り付けてることで指先の位置を計測していた。しかし、ダイスを指先に取り付けてしまうと指の運動を妨げる場合が出てきてしまう。本研究では色マーカーを指先を覆うような形で取り付けることで指の運動の妨げになることを回避する。

色マーカーにより画像中の指先の位置を ARToolKit マーカーのマーカーにより手の平の位置・姿勢を計測出来るが、指先の 3 次元位置を計測出来ていない。そのため 4.1 述べた色マーカーの重心点と手の平の位置・姿勢との関連付けを行い指先の 3 次元位置が存在する点の推定を行う。さらに推定した指先の 3 次元位置から逆運動学を解いて手の姿勢推定をする。

### 4.3 特徴点・特徴量の関連付け

式 4.1 で求めた各色マーカー領域の重心点を画像中のウィンドウ座標系から手の平に取り付けた ARToolKit のマーカー座標系へと変換する。各色マーカー領域の重心点から決まるカメラと各色マーカーの重心点を結んだ直線は図 4.4 のようになり、式 4.2 で表すことができる。

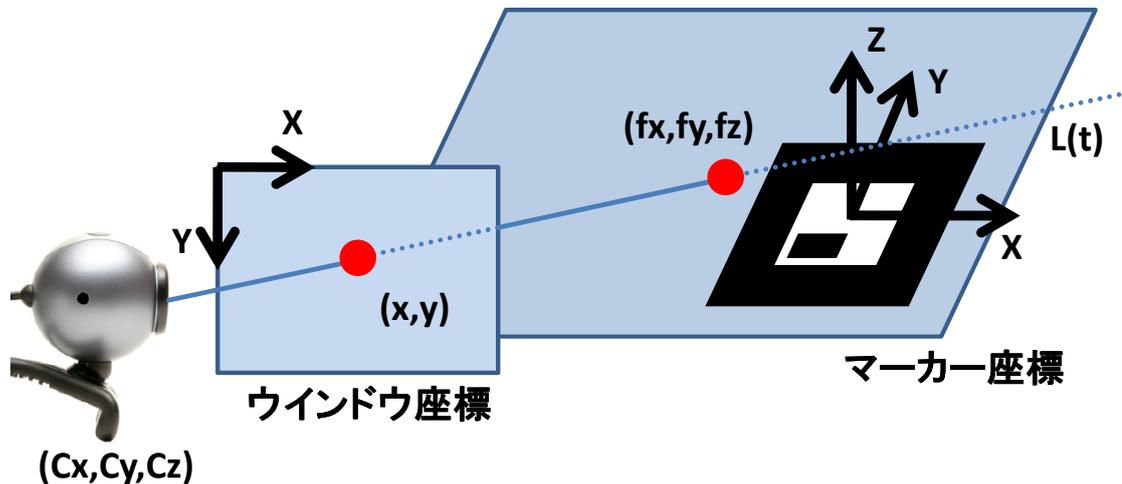


図 4.4: カメラと色マーカー領域の重心点とを結んだ直線

$$L(t) = \begin{bmatrix} c_x + t e_x \\ c_y + t e_y \\ c_z + t e_z \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

ここで  $t$  は媒介変数を表し、点  $C = (c_x, c_y, c_z)$  はマーカー座標系におけるカメラの位置、 $e = (e_x, e_y, e_z)$  はカメラから色マーカーの重心点への単位ベクトルを表す。図 4.4 での点  $(x, y)$  はウィンドウ座標系における色マーカーの重心点の座標、点  $F = (f_x, f_y, f_z)$  はマーカー座標系における色マーカーの重心点の座標を表す。式 4.2 によりマーカー座標系における各色マーカーの重心点 点  $F$  を含む直線が計算できる。しかしこのままでは点  $F$  を決定出来ない。そのため 3.2 節で述べた手の拘束条件を利用して直線から点への推定を行い点  $F$  を求めることにする。

### 4.4 修正 Denavit-Hartenberg 記法

3.2 節の拘束条件を利用するために指の構造の数式化を行う。指の構造を数式化するために、修正 Denavit-Hartenberg(修正 DH) 記法を用いる。DH パラメータを表 4.1 に示す。表

の変数については図 4.5 に示す通りである。

表 4.1: DH パラメータ

	$a$	$\alpha$	$d$	$\theta$
リンク 1	0	0	0	$\theta_0$
リンク 2	0	90	0	$\theta_1$
リンク 3	$L_1$	0	0	$\theta_2$
リンク 4	$L_2$	0	0	$\theta_3$
リンク 5	$L_3$	0	0	0

ここで  $a$  はリンクの長さ ( $mm$ ) を表し、 $\alpha$  はリンクのねじれ角 (度)、 $d$  はリンク間距離 ( $mm$ )、 $\theta$  はリンク間角度 (度) を表す。

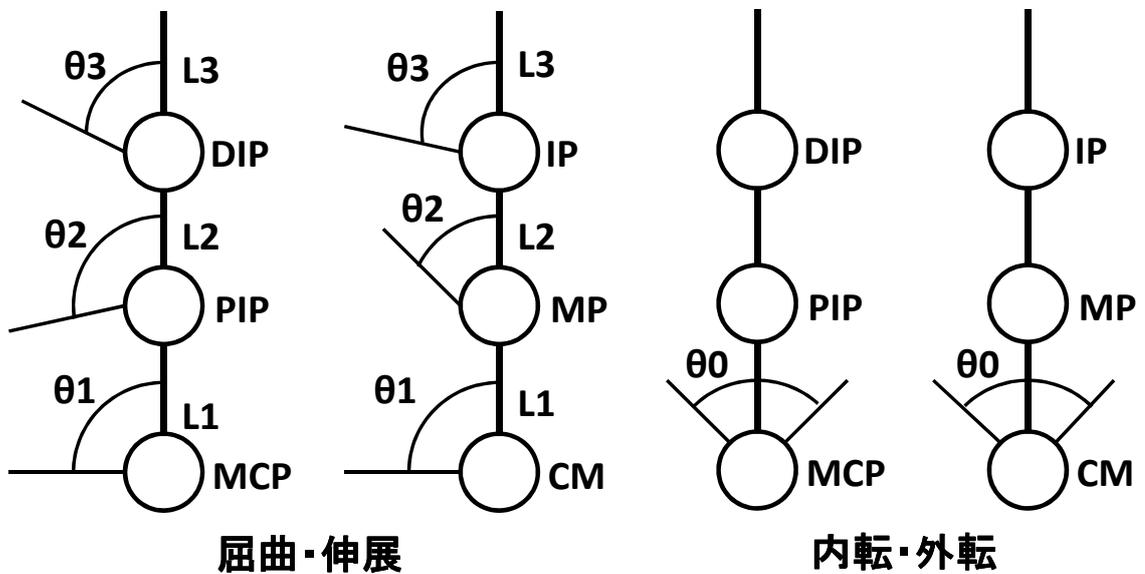


図 4.5: DH パラメータの変数

#### 4.5 指先の3次元位置推定

指先の3次元位置の推定には運動学を利用して行う。運動学は以下の順運動学と逆運動学と大きく二つに分けられる。

- 順運動学 (Forward Kinematics: FK): 関節角から指先の位置を求める計算手法
- 逆運動学 (Inverse Kinematics: IK): 指先の位置、角度から関節角を求める計算手法

指先の3次元位置の推定には順運動学を利用する。4.4節で述べた修正DH記法により順運動学を求めることができる。本研究のモデルの順運動学は表4.1のDHパラメータに基づき以下の式4.3になる。

$$r(\theta) = \begin{bmatrix} L_3 \cos \theta_0 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + L_2 \cos \theta_0 \cos(\theta_1 + \theta_2) + L_1 \cos \theta_0 \cos \theta_1 \\ L_3 \sin \theta_0 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + L_2 \sin \theta_0 \cos(\theta_1 + \theta_2) + L_1 \sin \theta_0 \cos \theta_1 \\ L_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + L_1 \sin \theta_1 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

ここで、人間の手の拘束条件として3.2.3小節で述べたように各指の関節角度には相関関係がある。指の運動がこれらの相関関係に基づいて行われると仮定した場合、指先は一定の曲線上を移動する。この曲線を以後、指先の軌跡と呼ぶことにする。よって、本研究では指先はこの相関関係に基づき指先の軌跡の近くに存在するものと仮定して推定を行う。

まず指先の軌跡の式を求める。MCP関節の内転・外転の関節角 $\theta_0$ はMCP関節の屈曲によって可動範囲の中心に向かっていく[11]ため関節角を可動範囲の中心に固定する。また、 $\theta_1 \sim \theta_3$ は図3.4、図3.5の相関関係を利用することで $\theta_2$ で表すことが出来る。図3.4、図3.5の相関関係を以下の式4.4、式4.5に近似する。

$$\theta_1 = \alpha \theta_2^3 + \beta \theta_2^2 + \gamma \theta_2 \quad (4.4)$$

$$\theta_3 = \delta \theta_2 \quad (4.5)$$

ここで $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ は定数である。式4.3、式4.4と式4.5より順運動学の式は、

$$r(\theta_2) = \begin{bmatrix} L_3 \cos \theta_0 \cos(\alpha \theta_2^3 + \beta \theta_2^2 + (\gamma + \delta + 1)\theta_2) + \\ L_2 \cos \theta_0 \cos(\alpha \theta_2^3 + \beta \theta_2^2 + (\gamma + 1)\theta_2) + \\ L_1 \cos \theta_0 \cos(\alpha \theta_2^3 + \beta \theta_2^2 + \gamma \theta_2) \\ L_3 \sin \theta_0 \cos(\alpha \theta_2^3 + \beta \theta_2^2 + (\gamma + \delta + 1)\theta_2) + \\ L_2 \sin \theta_0 \cos(\alpha \theta_2^3 + \beta \theta_2^2 + (\gamma + 1)\theta_2) + \\ L_1 \sin \theta_0 \cos(\alpha \theta_2^3 + \beta \theta_2^2 + \gamma \theta_2) \\ L_3 \sin(\alpha \theta_2^3 + \beta \theta_2^2 + (\gamma + \delta + 1)\theta_2) + \\ L_2 \sin(\alpha \theta_2^3 + \beta \theta_2^2 + (\gamma + 1)\theta_2) + \\ L_1 \sin(\alpha \theta_2^3 + \beta \theta_2^2 + \gamma \theta_2) \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

となり式4.6が指先の軌跡の式となる。これを $\theta_0 = 0.0^\circ$ 、 $L_1 = 50.0(mm)$ 、 $L_2 = 25.0(mm)$ 、 $L_3 = 20.0(mm)$ として指先の軌跡のYZ平面を表したグラフが図4.6である。この式4.6の軌跡 $r(\theta_2)$ と式4.2の直線 $L(t)$ 間の距離が最短になる2点を求め、そのときの直線上の点を指先の3次元位置として決定する。しかし指先の軌跡は3次元空間における曲線となり、3次元空間中における直線と曲線の問題になってしまい解を求めるのが困難である。

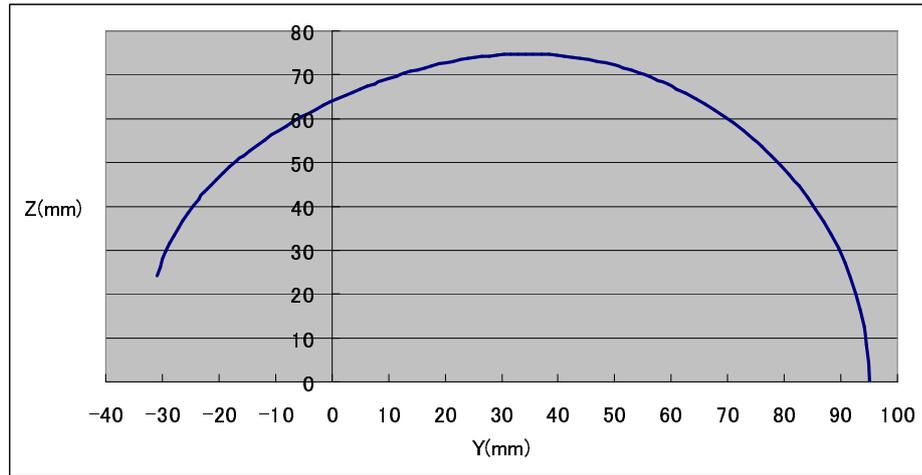


図 4.6: 指先の軌跡のグラフ

そこで式 4.6 の軌跡を複数の線分で近似して直線と線分の距離の簡単な問題となるようにする。ここで任意の軌跡の近似線分は以下の式 4.7 で表される。

$$L_{(s)} = \begin{bmatrix} p_x + s d_x \\ p_y + s d_y \\ p_z + s d_z \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

ここで  $s$  は媒介変数を表し、点  $P = (p_x, p_y, p_z)$  は線分の始点の座標、 $\mathbf{d} = (d_x, d_y, d_z)$  は線分の始点から終点へのベクトルを表す。式 4.2 の直線  $L(t)$  上の点  $Q$  と任意の軌跡の近似線分  $L(s)$  上の点  $R$  の距離  $\|\mathbf{QR}\|$  を求める。 $\mathbf{QR} = R - Q$  とすると

$$\begin{aligned} \mathbf{QR} &= (P + s \mathbf{d}) - (C + t \mathbf{e}) \\ &= P - C + s \mathbf{d} - t \mathbf{e} \end{aligned} \quad (4.8)$$

$\|\mathbf{QR}\|$  が最小のとき  $\mathbf{QR} \perp \mathbf{e}$  かつ  $\mathbf{QR} \perp \mathbf{d}$  となるから、

$$\mathbf{QR} \cdot \mathbf{e} = 0 \quad (4.9)$$

$$\mathbf{QR} \cdot \mathbf{d} = 0 \quad (4.10)$$

式 4.9 と式 4.10 を  $t$  と  $s$  について解く。

$$t = \frac{\{\|\mathbf{d}\|^2(\mathbf{CP} \cdot \mathbf{e}) - (\mathbf{e} \cdot \mathbf{d})(\mathbf{CP} \cdot \mathbf{d})\}}{\|\mathbf{e}\|^2\|\mathbf{d}\|^2 - (\mathbf{e} \cdot \mathbf{d})^2} \quad (4.11)$$

$$s = \frac{\{(\mathbf{e} \cdot \mathbf{d})(\mathbf{CP} \cdot \mathbf{e}) - \|\mathbf{e}\|^2(\mathbf{CP} \cdot \mathbf{d})\}}{\|\mathbf{e}\|^2\|\mathbf{d}\|^2 - (\mathbf{e} \cdot \mathbf{d})^2} \quad (4.12)$$

ここで  $\mathbf{CP} = P - C$  とする。求めた  $t$  を式 4.2 に代入することで直線上  $L(t)$  の点  $Q$  が求まる。ここで  $L(s)$  は線分なので  $(0.0 \leq s \leq 1.0)$  であるため  $s < 0.0$  のとき点  $R$  を線分の

始点に、 $1.0 < s$  のとき点  $R$  を線分の終点にし、 $L(t)$  上の点  $Q$  を求める。距離  $\|QR\|$  が最小のとき  $QR \perp e$  なので

$$QR \cdot e = 0 \quad (4.13)$$

式 4.13 を  $t$  について解く。

$$t = \frac{-C \cdot e + R \cdot e}{\|e\|^2} \quad (4.14)$$

求めた  $t$  を式 4.2 に代入した値が最小となる直線  $L(t)$  上の点  $Q$  である。

この計算を全ての近似した線分で行い距離  $\|QR\|$  が最小となる点  $Q$  が直線  $L(t)$  上の点を指先の3次元位置点  $F$  とする。

また本論文では母指の運動に関する関節角度間の依存関係について考察を行わなかった。そのため本論文では親指の動きは考慮しないものとする。

## 4.6 逆運動学による手の姿勢推定

本節では前節で推定する指先の3次元位置から各関節角を推定することによって手の姿勢推定を行う。手の姿勢は逆運動学を解くことによって推定する。本研究では、いくつかある逆運動学のうち、Cyclic-Coordinate Descent (CCD) 法 [12] を用いて手の姿勢推定を行う。

CCD 法はエンドエフェクタとゴールの距離を最小化する最適化問題を反復して解くことで解を求める計算手法である。この手法は反復1回あたりの計算コストが小さく、前時刻での姿勢から次の時刻における姿勢の推定を行うため時系列データで手の姿勢推定を行う本手法において有効であると考えられる。

次に CCD 法の計算手順について説明する。図 4.7 において指先 (エンドエフェクタ)  $e$  を目標位置 (ゴール)  $g$  まで移動させる場合は以下の計算手順で計算を行う。

1. 先端の関節  $c$  から指先  $e$  へのベクトル  $E$  と  $c$  から目標位置  $g$  へのベクトル  $G$  を算出する。
2. 1. で求めたベクトルを正規化し、 $E$  から  $G$  への回転角を算出する。
3. 関節  $c$  に 2. で求めた回転角を加える。このとき関節の拘束条件に当てはめるため、関節の可動範囲と新しく得られた関節角を比較し、可動範囲を越えているならば関節角の値を可動範囲の上限 (あるいは下限) となるように変更する。
4. 新しく得られた関節角における指先の位置を算出し、指先と目標位置との距離が前のものよりも大きくなる場合は前の関節角の値に戻す。

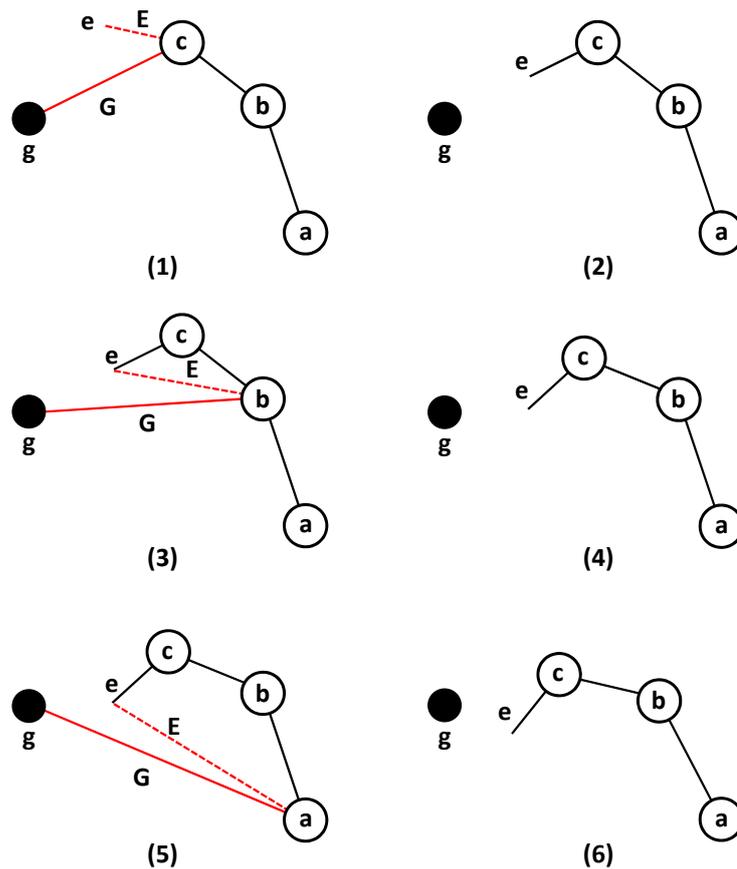


図 4.7: CCD 法を用いた逆運動学

5. 関節  $c$  の親である関節  $b$  において 2. から 4. の手順を繰り返す。以上の手順をルートである関節  $a$  まで繰り返す。
6. 指先と目標位置との距離が閾値以下になるか、設定された反復回数を越えるまで 2. から 5. の手順を繰り返す。

また CCD 法には一度に関節が大きく移動しない用に damping (粘性減衰) を付け加えることが出来る。この damping で図 3.5 の相関関係を近似的に与えることで滑らかな指の動きを再現する。具体的には図 3.5 におけるグラフの接線の傾きの大きさによって damping の値を変更する。

## 第5章 実験

実際に実画像を用いて実時間計測を行い実験を行った。

### 5.1 実験システム

前述のモデルによる実験システムを、CPU: Dual-Core AMD Opteron(tm) Processor 1210 1.8GHz、GPU: GeForce 7600 GT 256MB、メモリ 1GB の環境で C++ 言語により実装した。使用したカメラは、サンワサプライ社製の USB カメラの CMS-010SV(図 5.1)[13] でこのカメラは本来、最大 30fps で動作可能だが、後述の実験においては最大 25fps で動作させた。また画像サイズはカメラ画像を  $640 \times 480$  pixel としノイズ除去にはこれを  $320 \times 240$  pixel にリサイズした画像で行いノイズ除去後再び  $640 \times 480$  pixel にリサイズをした。



図 5.1: サンワサプライ CMS-010SV

実験は計算処理時間を計測しこれを評価した。また手の姿勢推定の自然さを評価するため本実験システムの動作の様子、すなわちグローブを装着した状態での手の動作と、計測された値を基に表示した CG の手を 8 名の被験者に観察してもらい、簡単な質問とアンケートを行った。

実際に行った実験の様子を図 5.2 に示す。

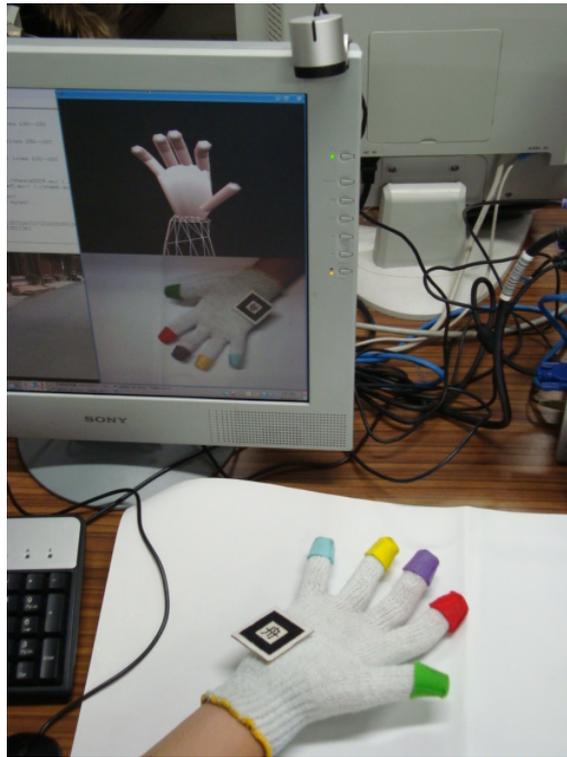


図 5.2: 実験の様子

## 5.2 実験の結果

### 5.2.1 計算処理速度の結果

1 フレーム辺りの計算処理速度は表 5.1 に示す通りである。

本システムは全体の処理に 1 フレーム辺り平均約 40.0 msec でカメラの最大動作である 25fps が出ているので、十分に実用可能な処理速度である。

### 5.2.2 挙動の自然さについての結果

本システムの挙動の自然さを評価するため本実験システムの動作の様子を 8 名の被験者に観察してもらい、簡単な質問とアンケートを行った。アンケートの評価は 7 段階で評価の目安を「1: 挙動に全く自然さが感じられない」、「4: システムとして利用可能な程度の自然さを感じる」、「7: 限りなく自然に近いものを感じる」とした。

行った実験は以下の 4 つである。

- 実験 1: 手をグーの状態に固定した状態の手の姿勢の自然さ

表 5.1: 処理時間

	処理時間 (msec)
カメラ画像の取得	25.1
ノイズ除去	8.8
特徴量抽出	4.5
指先の3次元位置推定	0.1
手の姿勢推定	1.0
手のモデルの表示	0.5
合計	40.0

- 実験 2: 手をチョキの状態に固定した状態の手の姿勢の自然さ
- 実験 3: 手をパーの状態に固定した状態の手の姿勢の自然さ
- 実験 4: 手を自由に動かしたときの手の姿勢の変化の自然さ

実際に実画像を用いた手の姿勢推定の結果を図 5.3 ~ 図 5.6 に、アンケート結果を図 5.7 ~ 図 5.10 示す。

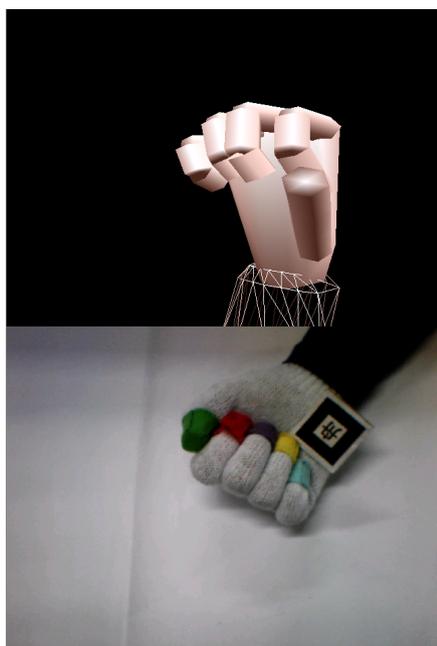


図 5.3: 実験 1

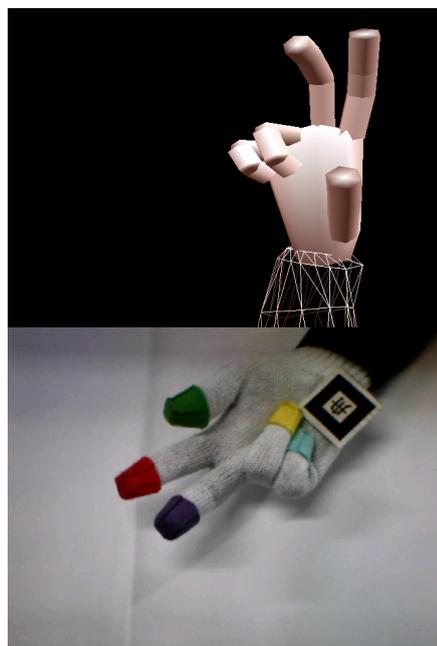


図 5.4: 実験 2

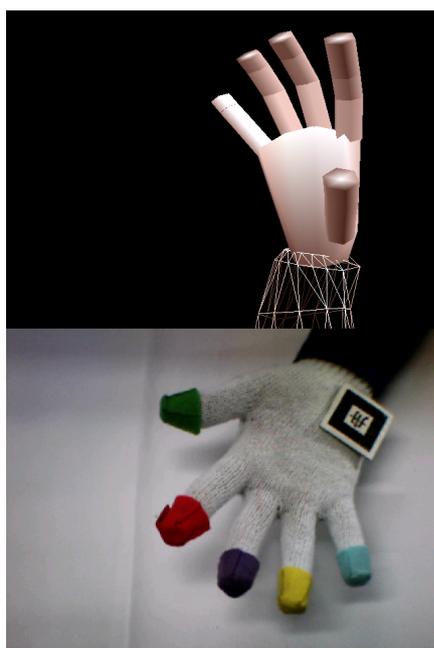


図 5.5: 実験 3

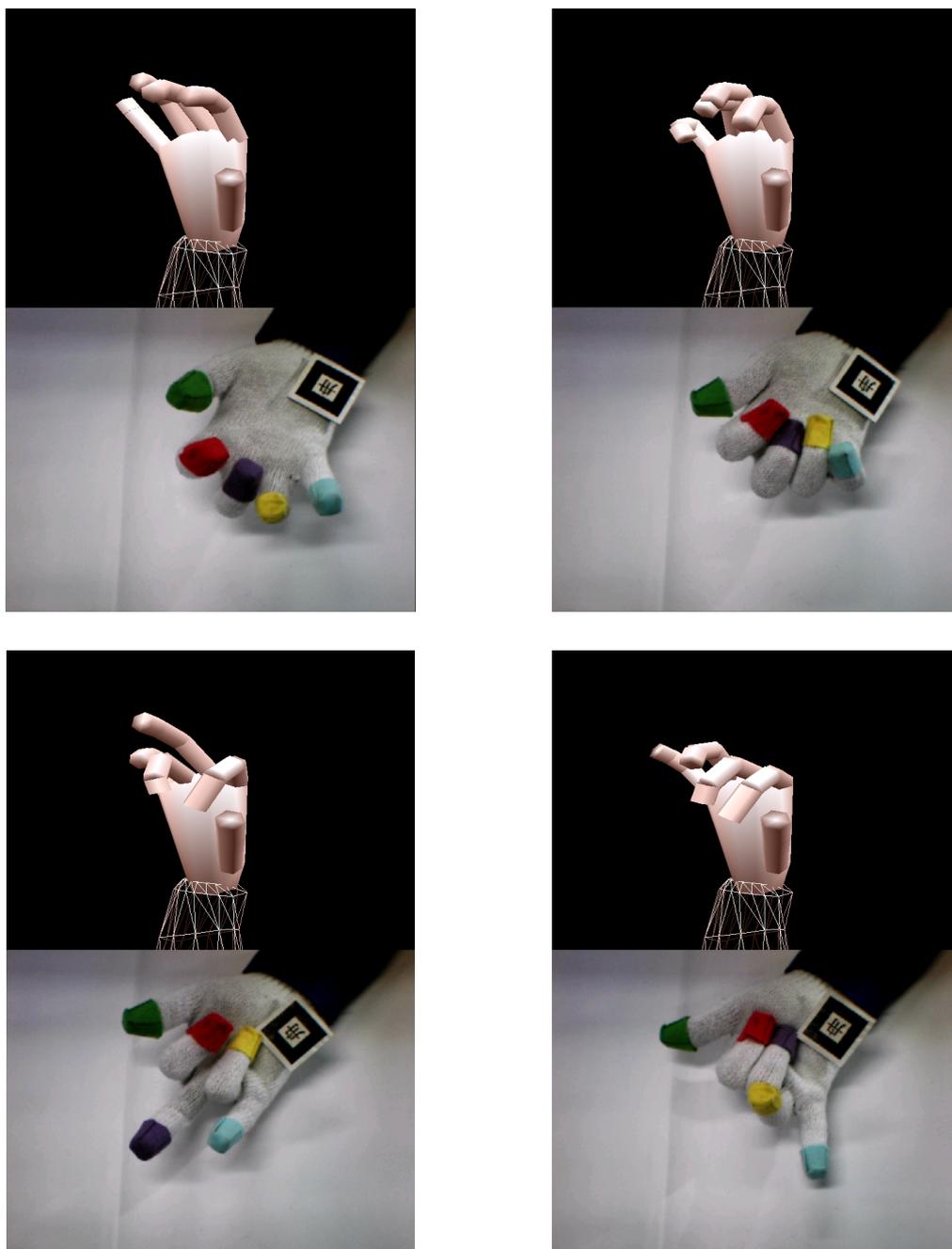


図 5.6: 実験 4

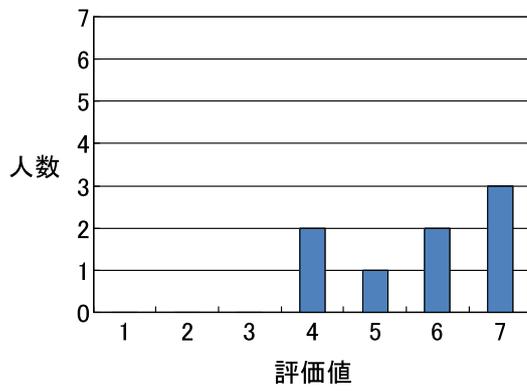


図 5.7: 実験 1 の評価

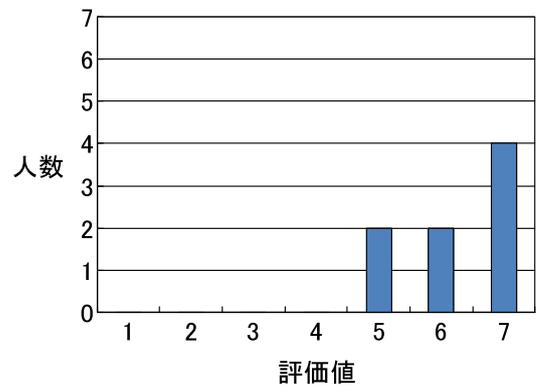


図 5.8: 実験 2 の評価

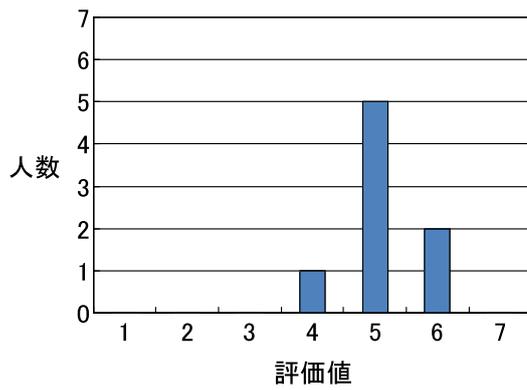


図 5.9: 実験 3 の評価

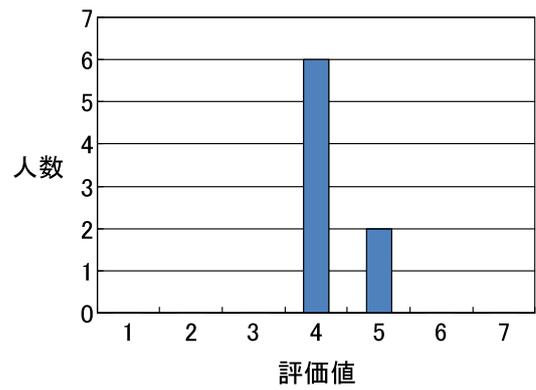


図 5.10: 実験 4 の評価

実験1での評価値の平均は5.75、実験2での平均は6.25、実験3での平均は5.01、実験4での平均は4.25であった。全ての実験において評価値の平均が「システムとして利用可能な程度の自然さを感じる」である評価値の4を越える結果になった。実験1で評価値にややばらつきはあるものの最大評価値である7が最多である。実験2に関しては平均が6を越えている。実験4においてはほとんどの被験者が評価値4を付けている。また、被験者の一部から指ごとに動きの滑らかさが違っているという意見を頂いた。

### 5.3 考察

実験1、実験2は結果画像・評価をみると自然な手の姿勢を推定出来ていると言え、実験3、実験4も結果画像・評価をみるとある程度の自然な手の姿勢を推定出来ていると言える。

実験1において評価値がややばらけているのは今回親指の運動を考慮せず親指の姿勢を固定して行ったため表示したモデルに違和感を感じたためだと思われる。実験2の評価値は行った全ての実験において最も高い評価値になった。これはやや複雑な形のチョコの姿勢をモデルで自然に再現できていたためだと思われる。また手の姿勢を固定して行った実験1、実験2、実験3を比較すると実験3がやや低い評価値になっている。これは手を完全に開いた状態に固定しても表示したモデルではPIP関節が少し曲がっているため手が開いていると感じにくかったためだと思われる。指が完全に開いている状態とわずかに曲がっている状態では、指先の位置はほとんど変わらない。しかし少しの指の曲がりの有無が感じる手の姿勢の自然さに大きな影響を与えることがこの実験3から見て取れる。実験4は行った全ての実験において最も低い評価値であったがそれでも「システムとして利用可能な程度の自然さを感じる」である評価値を付けている被験者が多く、最低限以上の自然さは感じられると言える。

手の姿勢を固定した場合MCP関節における内転・外転の運動の差が見た目にはあまり感じられないが、手を自由に動かしているときには内転・外転の運動の差が見た目にも感じられている可能性がある。そのため手を自由に動かしているときでも自然に感じられるようにするには内転・外転の運動を計測出来るよう指先の位置だけでなく向きも推定する必要があると思われる。

また、被験者の一部から頂いた指ごとに動きの滑らかさが違っているという意見は各関節間の長さなどを手動で計測したため手動計測における真値との誤差が影響しているものと思われる。

## 第6章 むすび

本研究では一般家庭においても VR の技術を用いた製品の使用・サービスを受けることが出来るよう、データグローブを安価にかつ気軽に使用出来るようにすることを目標とした。本論文では色マーカーと ARToolKit マーカーを使用したイメージベースデータグローブのシステムを提案した。本システムは限定的な環境下ではあるが、布と紙さえあれば数百円で簡単に製作すること可能なイメージベースデータグローブを用いて安価に手の姿勢推定を行うことが出来る。

今回実装したシステムによる実験では手の姿勢を固定した手の姿勢推定については自然な姿勢を推定することが出来た。しかし、問題点として手を自由に動かす挙動については手の姿勢を固定したときと比較するとやや自然さを感じにくいという点がある。これは手の姿勢を固定した推定した手の姿勢については指先の位置に注目するが、手が動いているときには指全体の姿勢に注目するためだと思われる。

今後の課題としては指先の位置を計測するだけでは MCP 関節の内転・外転を正確に推定出来ないため指先の向きについても計測することが挙げられる。他に親指の姿勢も推定するために親指の拘束条件についても考察をすることが挙げられる。親指の姿勢を推定することでより手の姿勢に自然さが感じられるようになるとと思われる。また今回の実験では実際の手の姿勢と推定した指先の位置・手の姿勢との誤差を計測しなかった。今回推定した指先の位置・手の姿勢がどの程度信頼出来る値なのかを検証する必要がある。

近年発展してきた VR 技術は今後も積極的に研究・開発が行われていくだろう。そのとき使用されるヒューマンインターフェースが高価で利用しづらいものであれば一般に普及する過程で大きな障害となる。そのため使用されるヒューマンインターフェースが安価で利用しやすいものの研究・開発が進めば一般にも普及しやすくなり、さらなる VR 技術の発展に繋がるだろう。

## 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 岩堀研究室の皆様へ深く感謝いたします。

最後に、本研究を進めるにあたり多大な協力を頂いた舟橋研究室の皆さま、友人の皆さまに心から感謝致します。

## 参考文献

- [1] 藤木隆司, 吉本廣雅, 有田大作, 谷口倫一郎. ”ヒューマンインターフェースのための実時間手形状計測”, 火の国情報シンポジウム 2004.
- [2] D.Wagner. ARToolKitPlus, [http://studierstube.icg.tu-graz.ac.at/handheld\\_ar/](http://studierstube.icg.tu-graz.ac.at/handheld_ar/)
- [3] Vitor F. Pamplona, Leandro A. F. Fernandes, Joao Prauchner, Luciana P. Nedel e Manuel M. Oliveira. The Image-Based Data Glove . Proceedings of X Symposium on Virtual Reality (SVR'2008), Joao Pessoa, 2008. Anais do SVR 2008, Porto Alegre: SBC, 2008, (ISBN: 857669174-4). pp. 204-211.
- [4] 加藤博一, Billingham Mark, 浅野浩一 他. ”マーカー追跡に基づく拡張現実感システムとそのキャリブレーション (「複合現実感」特集)”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.3, No.1, pp.607-616, 1998.
- [5] 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”, 平成 20 年度名古屋工業大学卒業研究論文, 2009.
- [6] 株式会社パックス・コーポレーション, パワーグローブ
- [7] Essential Reality 社, グローブ型デバイス P5, <http://essentialreality.com/>
- [8] Immersion 社, CyberGlove, <http://www.aec.co.jp/mm/products/glove.htm>
- [9] 鎌倉矩子. ”手のかたち 手のうごき”, 医歯薬出版株式会社, 1989.
- [10] ELKOURA G. ”Handrix : Animating the Human Hand”, Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation, 2003.
- [11] 市川亮. ”物体の把握・操作時における指関節の動きモデル”, 和歌山大学学士学位論文, 2002.
- [12] Chris Welman, ”Inverse kinematics and geometric constraints for articulated figure manipulation”, M.Sc Thesis, Simon Fraser University, 1993

- [13] サンワサプライ株式会社, CMS-010SV,  
<http://www.sanwa.co.jp/product/peripheral/pccamera/index.html>