

## 手の制約知識を用いた逆運動学解法による実時間三 次元手形状推定

藤木, 隆司  
九州大学システム情報科学研究院知能システム学部門

陳, 維英  
九州大学システム情報科学研究院知能システム学部門

吉本, 廣雅  
九州大学システム情報科学研究院知能システム学部門

有田, 大作  
九州大学システム情報科学研究院知能システム学部門

他

<https://hdl.handle.net/2324/5911>

---

出版情報 : 画像の認識・理解シンポジウム, pp.1380-1387, 2005-07  
バージョン :  
権利関係 :

# 手の制約知識を用いた逆運動学解法による実時間三次元手形状推定

藤木 隆司<sup>†</sup> 陳 維英<sup>†</sup> 吉本 廣雅<sup>†</sup> 有田 大作<sup>†</sup> 谷口 倫一郎<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 九州大学大学院システム情報科学府 〒 816-8580 福岡県春日市春日公園 6-1

E-mail: †{fujiki,chen,yosimoto,arita,rin}@limu.is.kyushu-u.ac.jp

あらまし 本稿では、ヒューマンインタフェースへの応用を目的としたビジョンベースの実時間三次元手形状推定について述べる。人の手は多くの関節を持つためわずかな変化でも見えが大きく変化する。このため形状特徴の消失やデータベースの増大などの問題を引き起こすことが推定を困難にしている。しかし一方で、手には関節角の可動範囲や依存関係など様々な制約が存在する。よって本研究では、それだけから手形状を知るには不十分であるが比較的ロバストに求まる輪郭情報から、制約知識を利用して三次元手形状を推定するモデルベースのアプローチを提案する。さらに、推定結果からより詳細な仮説を立てることで、ロバスト性の劣る手領域内エッジ情報も利用可能になり、これを用いてより正確な手形状推定を行なう。実験により、本手法によって手形状を実時間で推定できることを確認した。

キーワード 三次元手形状推定, 逆運動学, 手の制約知識

## 3D Hand Shape Estimation based on Inverse Kinematics with Hand Constraints

Ryuji FUJIKI<sup>†</sup>, Weiyang CHEN<sup>†</sup>, Hiromasa YOSHIMOTO<sup>†</sup>,

Daisaku ARITA<sup>†</sup>, and Rin-ichiro TANIGUCHI<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Department of Intelligent System, Kyushu University 6-1 Kasuga-koen, Kasuga, Fukuoka 816-8580 Japan

E-mail: †{fujiki,chen,yosimoto,arita,rin}@limu.is.kyushu-u.ac.jp

**Abstract** We are researching for real-time hand shape estimation for human interface. Since a human hand has many joints, it makes hand shape estimation difficult. For example, we have to deal with a self-occlusion problem and a large amount of computation. On the other hand, a human hand has several constraints, i.e., each joint has a movable range and interdependence. In this paper, we propose a model-based method to estimate 3D hand shape using a hand contour and hand constraints. Though a hand contour can be extracted robustly, it does not have enough information for estimating 3D hand shape. To estimate for it, we use hand constraints. Based on this estimation, we can hypothesize about the positions of fingertips for searching for edges corresponding to fingertips in order to estimate 3D hand shape more accurately. In addition, we make experiments to show our method can estimate 3D hand shape in real-time.

**Key words** 3D Hand shape estimation, Inverse Kinematics, Hand Constraints

### 1. はじめに

近年、ヒューマンインタフェースへの応用を目的とした技術の一つとして、ユーザにマーカやセンサ等の装着を強要することなしに任意の姿勢における三次元手形状を実時間で計測し、マシンへの入力へ利用しようという試みが行われている。これは、直感的でかつ自由度が高いインタフェースの実現を可能にし、日常生活における手の役割から多くのアプリケーションに利用できると考えられているためである。具体的に

は、CG キャラクタの手の動き生成やロボットハンドの遠隔操作など手の動きをそのまま利用したシステムや、推定結果から手話やジェスチャの認識するシステムに利用することができる。

この技術を実現する手段としてビジョンベースの手法が研究されており、アプローチの仕方から大きく二種類に分けることができる。

一つは、画像から局所的な特徴を抽出し、その特徴に合うような手の三次元モデルの形状パラメータを推定するモデルベースのアプローチである。実画像とモデルをシルエットでマッチン

グしてパラメタを推定する手法 [1], [2] や、エッジや輝度情報の変化分から三次元モデルを回転・平行移動させる外力を計算しモデルを変形させて推定する手法 [3] が提案されている。これらの手法はモデルを用いることで精度高い姿勢推定が行なうことができるが、指が他の指や掌によって隠れる姿勢などの推定にはロバスト性に欠ける。また、二次元画像ではなく三次元空間中でマッチングを行う手法として、多視点のカメラを用いて得られる手のシルエット画像から視体積交差法により生成された手の三次元手形状と手の三次元モデルが一致するようにパラメタを行なう手法 [4] も提案されている。

もう一つは二次元における手の様々な姿勢での見えを登録しておき、入力画像と最も類似するものを選択するアピアランスベースのアプローチである。このアプローチには様々な手の姿勢を事前にデータベースに登録しておくためセルフオクルージョンの問題に対処することができる。またマッチングにかかる時間を短くするようなアルゴリズムも提案されている。例えば、類似した見えを持つテンプレートは同じ親を持つような階層構造で表し、テンプレートと入力画像との類似度を事後確率を用いて計算することで前時刻の結果を考慮し、なおかつ可能性の少ない場合はその子孫のテンプレートに対して探索を行わないことによって計算を削減する手法 [5] や、形状特徴を手の形状パラメタや視点の類似したものが近傍にくるように考慮した特徴空間上で表し、前時刻で推定された点の近傍に対してビームサーチを行うことによって計算量を削減する手法 [6] である。しかし、アルゴリズムの高速化を図ってとしても手の自由度およびカメラの視点依存性という問題が存在するため、任意の三次元手形状に対応するテンプレートを用意した場合、テンプレート数が非常に多くなってしまい、実時間での推定は困難である。また、指の関節角まで推定する場合、見えだけの情報からで十分であるかという問題もあると考えている。

以上より、ビジョンベースの三次元手形状推定には多くの姿勢に対応できることと計算時間のトレードオフが存在する。また、画像から求まる形状特徴としても手形状を知るために有効な情報とロバストに抽出できることといった点でのジレンマが存在すると考えている。

一方、手には関節角の可動範囲や依存関係など様々な制約が存在する [7] ~ [9]。これらの研究は主により自然なアニメーションや精巧なモデルの構築を目的としてなされているが、手形状推定に利用することも有効であると考えられる。よって本研究では、それだけから手形状を知るには不十分であるが比較的ロバストに求まる輪郭情報から、制約知識を利用した逆運動学解法 (以降、IK と呼ぶ) を用いて実時間で三次元手形状を推定を行なうモデルベースのアプローチを提案する。さらに、推定結果からより詳細な仮説を立てることで、ロバスト性の劣る手領域内エッジ情報も利用可能になり、これを用いてより正確な手形状推定を行なう。

## 2. 手の三次元形状モデル

手は本来非剛体の物体であるが、本研究では剛体の関節物体として近似し、手形状推定に用いる。モデルには骨格のみで表

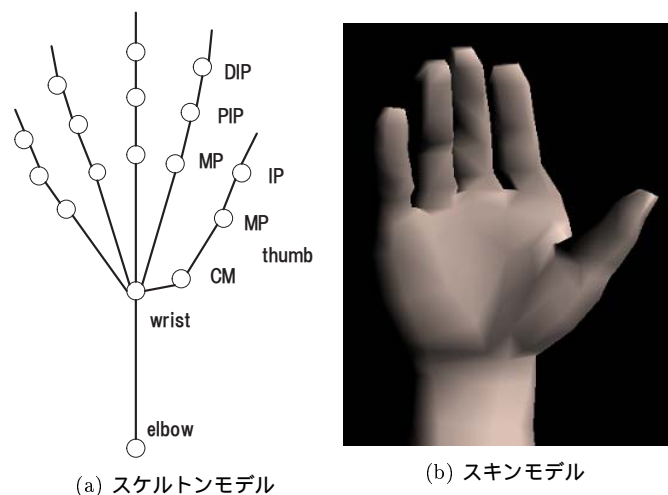


図 1 手の三次元形状モデル

現するスケルトンモデル (図 1(a)) と骨格のデータに付随して三次元の手の見えを表現するスキンモデル (図 1(b)) を用意するが、スキンモデルは手形状推定には用いずに結果の表示のためだけに利用した。

DIP 関節および PIP 関節には屈伸運動を行なう回転の 1 自由度, MP 関節には屈伸運動および内転・外転運動を行なうため回転の 2 自由度, 計 4 自由度を考える。同様に親指にも IP 関節と MP 関節に 1 自由度, CM 関節に 2 自由度を考える。手首の関節にはヨー, ピッチ方向回転の 2 自由度, 肘の関節には平行移動成分と回転移動成分の 6 自由度を考える。ただし, ヨー, ピッチ, ロールは, それぞれ関節において左右の首振り, 上下の首振り, 左右の傾きの回転を表す。一般に手形状推定する場合は, 手首と肘のパラメタは手首のパラメタとして一つにまとめて表されることが多いが, 実際は手のロール方向の回転は肘によって制御されている。記述することができる手形状に本質的に違いがないが, 今回は現実に近いパラメタの設定を採用した。また, これらのモデルは肘を最上位として, それ以降接続する関節を子とする階層構造を持ち, 親の関節のパラメタの変更はこの関節に影響を与える。

手の形状パラメタは, 上で紹介した関節の屈曲角度と肘の三次元位置との動的なパラメタと掌の大きさや指の長さなどの静的なパラメタから成り, これらパラメタを用いて三次元上での手形状を記述することができる。本研究では, 静的なパラメタはあらかじめ測定し手動で設定されるものとする。よって三次元手形状推定とは関節の屈曲角度と肘の三次元位置の総数 28 のパラメタを逐次推定することとなる。

## 3. 入力画像からの形状特徴抽出

ロバストに形状特徴を得ることのできる掌の正面に近い位置の 2 枚のカメラ画像から三次元手形状推定に必要な形状特徴を抽出していく。以下に, これらの処理の詳細を述べる。

### 3.1 手領域の切り出しおよび回転の正規化

入力画像から手領域を抽出するために, 以下の処理を行なう。ただし, 今回は研究の第一段階としてロバストに手領域を抽出するために, 背景は黒一色であるとする。

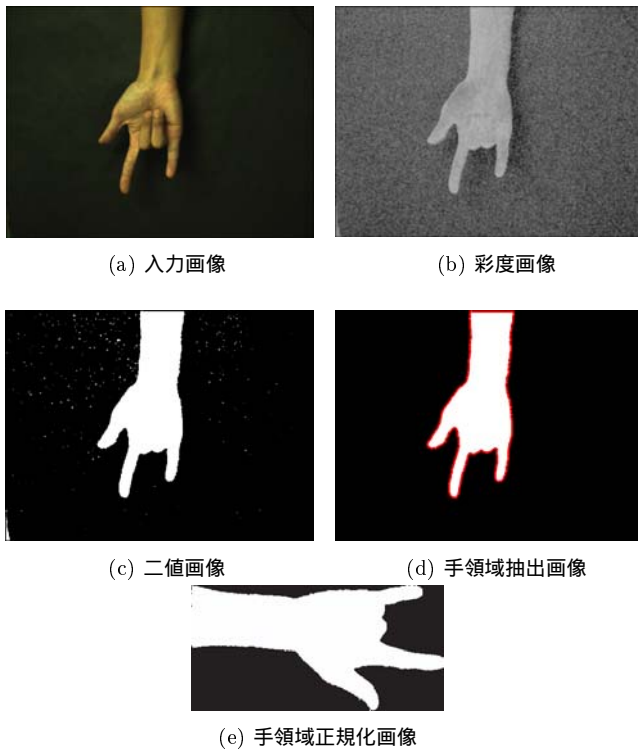


図 2 手領域の切り出しおよび回転の正規化

RGB 表色系画像 (図 2(a)) から彩度画像への変換を行う。次に、彩度画像に平滑化フィルタをかけノイズの影響を小さくした (図 2(b)) 上で二値化を行なう (図 2(c))。この二値画像から各領域の輪郭線を検出する。本研究ではカメラに対して手を差し出した状況を想定しているため、抽出された領域の中から輪郭長が最大となるものを手領域と決定する (図 2(d))。

後の工程で行なう画像処理を簡単なものとするために、手領域の主軸が画像の横軸と平行になるように回転の正規化を行う (図 2(e))。

この正規化処理は、Rotating Calipers Technique[10] を用いて手領域を含むような最小の四角形を求め、四角形の長辺が画像の横軸と一致し、輪郭の開始点が左端にくるように回転することで行う。

### 3.2 腕中心・手首・掌中心の三次元位置検出

図 3 の上部の画像から、画像上での腕中心・手首・掌中心位置を求める。ただし、ここでの腕中心とは画像に含まれる前腕部分の中心位置のことをいう。

始めに手首位置  $(x_{wrist}, y_{wrist})$  を求める。まず、次式で示すように肌色画素を画像の横軸に射影する。次に、画像を横幅  $n$  の区間に分割する。図 3 下部において、左端から  $i$  番目の区間での肌色画素数の和を  $SUM_i$  とすると、 $SUM_i$  は次式で求めることができる。

$$SUM_i = \sum_{x=ni}^{(n+1)i} \sum_{y=0}^{H-1} I(x, y) \quad (1)$$

ただし、

$H$ : 画像の高さ

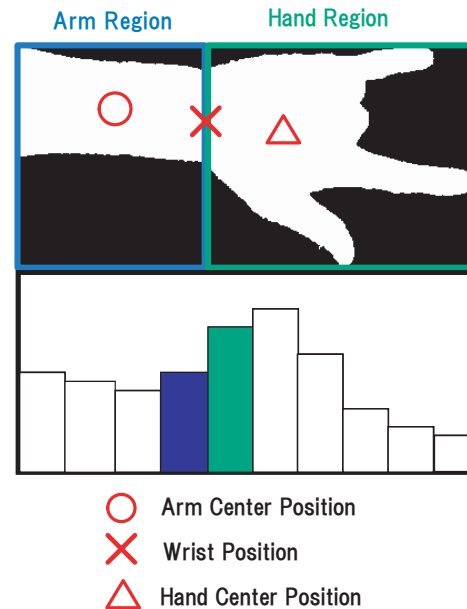


図 3 画像上での腕中心・手首・掌中心位置

$$I(x, y) = \begin{cases} 1: (x, y) \text{ が肌色画素のとき} \\ 0: (x, y) \text{ が肌色画素でないとき} \end{cases}$$

とする。一般に、人の腕の幅はほぼ一定で、手首から掌にかけて幅が広がっていく。このことを利用して、左端から隣接する区間での肌色画素の和を比較していき、ある区間での肌色画素数の和が前区間のものを定数倍したものより大きくなる位置を見つける。そのときの区間の始まりの  $x$  座標を  $x_{wrist}$  とする (図 3 の下部)。

$y_{wrist}$  は、 $x_{wrist}$  上の点を上から下に走査し、手首の両端となる点を検出した上で、それらの中心位置を計算することで求める。このとき、手首の幅も計算しておく。

求めた  $x_{wrist}$  を境に、左側の領域を腕領域、右側の領域を掌領域とする。腕中心位置  $(x_{arm}, y_{arm})$  は腕領域の肌色画素の重心とする。一方、掌中心  $(x_{hand}, y_{hand})$  は、掌領域の肌色画素の中で輪郭からの距離が最も大きくなる点とする。掌中心に掌領域の重心を用いないのは、重心の位置は指を広げているか曲げているかに大きく影響され安定していないからである。

### 3.3 先頭の関節位置検出

#### 3.3.1 輪郭上の弧検出

掌領域の輪郭上から曲率を用いて弧を検出する。このとき、検出された弧は指の指先または関節に相当するはずであり、本稿ではこの関節のことを先頭の関節と呼ぶ。IK を用いて三次元手形状推定することを考えた場合、関節の先端に相当する指先を求めることが望ましい。しかし、掌方向に指を曲げた場合、指先は同じ肌色に隠れてしまうため検出が困難となる。一方、先頭の関節位置は手領域を表す輪郭の上に存在するためマスクに抽出することができる。そこで、本稿では先頭の関節位置を検出し、不足した情報を補うために手の制約知識を取り入れた IK により先頭の関節角がどの関節であるか決定し、指の関節角の推定に用いる。

まず掌領域の輪郭点を  $contour_i(x_i, y_i)$  とする。手首がヨー

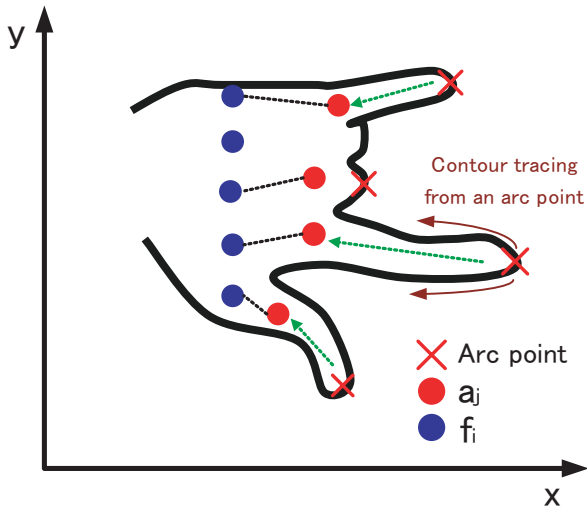


図4 弧と指の対応

方向の回転を行っている場合でも対処できるように、画像上の手首位置から掌中心を結ぶ直線が画像の横軸と平行になるように輪郭点  $contour_i$  を正規化する．正規化された輪郭点に対して、

$$\arctan\left(\frac{x_i - x_{i-k}}{y_i - y_{i-k}}\right) < threshold_\theta \quad (2)$$

$$-threshold_\theta < \arctan\left(\frac{x_{i+k} - x_i}{y_{i+k} - y_i}\right) \quad (3)$$

を満たす点  $contour_i$  を検出し、このときの輪郭点を弧として検出する．実際には、式 (2) および式 (3) を満たす点は連続的に見つかる．このように連続して見つかる点に関しては、その中央の位置を弧として検出する．ここで、 $threshold_\theta$  および  $k$  は実験的に求めた値であり、それぞれ 120, 10 とした．

### 3.3.2 弧と指の対応

次に、検出された弧がどの指の先頭の関節位置であるか判定する．もし、検出された弧の数が 5 個の場合、全ての指に対応する弧が見つかったと判定し、検出された弧の輪郭上の順番を基に、親指、示指、... と対応づけていく．一方検出された弧の数が 5 個ではなかった場合、検出された順番だけではどの指に対応するか判断できない．

検出された弧が  $t (t < 5)$  個の場合、各指の予測される位置を計算し、検出された弧の位置と近いものを見つけることで弧と指の対応を求める．なお、弧の  $x$  座標の値は指の屈伸によって大きく変わるので、 $y$  座標の値のみを利用して以下を行う (図 4)．画像上での各指の候補位置  $f_i (i = 1, \dots, 5)$  を、これまでに得られた画像特徴とあらかじめモデルのパラメタとして求まる指の間隔を用いて計算する．

$$f_i = y_{hand} + w_{wrist} \times \frac{Y_{hand} - F_i}{W_{wrist}} \quad (4)$$

- $w_{wrist}$  : 画像上での手首の幅
- $y_{hand}$  : 画像上での掌中心の  $y$  座標
- $W_{wrist}$  : モデルでの手首の幅
- $Y_{hand}$  : モデルでの掌中心の  $y$  座標
- $F_i$  : モデルでの  $i$  番目の指の  $y$  座標の値

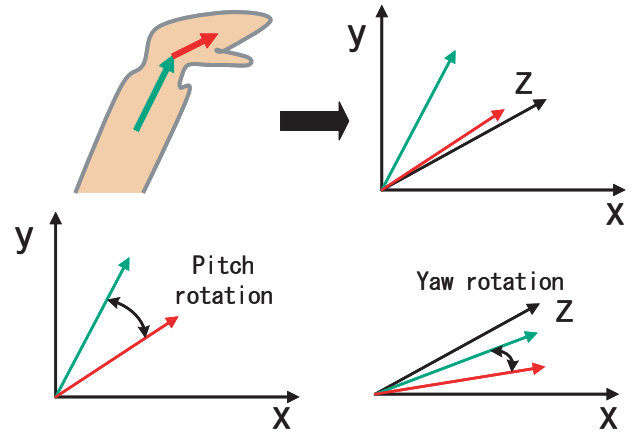


図5 ヨー、ピッチ方向の回転角度

ただし、添え字の  $i$  は、順番に親指、示指、...、小指に対応している．手首の幅は、手の姿勢の影響を受けにくいので、モデルと画像上での掌の大きさを正規化するために利用した．

次に 1 から 5 までの数字から  $t$  個選んだ組み合わせ  $C(num_1, \dots, num_t)$  の中から次式が最小となる組み合わせ  $C_{min}$  を見つける．

$$\sum_{j=1}^t \|f_{num_j} - a_j\| \quad (5)$$

ここで  $a_j$  とは検出された弧の  $y$  座標である．しかし一般に、指先の  $y$  座標の値は内転・外転によって変わりやすく、指の付け根の位置は影響を受けにくい．よって、輪郭点を走査することで、伸ばした状態の指については付け根の位置を求め、その  $y$  座標の値を  $a_j$  とすることで指の内転・外転の影響をなくす．具体的には、検出された弧点から隣接する輪郭点を両方向に一画素ずつ走査していき、どちらか一方で  $x$  座標の極小点が見つかった場合、各点の  $y$  座標の midpoint を求め  $a_j$  の値とする．

求めた  $C_{min}$  により、弧点  $a_j$  が  $num_j \in C_{min}$  番目の指と対応していることを求めることができる．この方法は、弧点の検出された並びを考慮することで計算する弧点と指の候補点の組み合わせを減らし、なおかつ一対一の対応を保証している．また、検出された弧の数が 5 個よりも多かった場合も同様の考え方により対応を求める．

さらに、このとき検出できなかった指に対しては、選択されなかった  $f_i$  と同じ  $y$  座標の値の点を輪郭上から見つけ、そこから局所的に曲率が大きくなる点を探すことで検出する．

## 4. モデルを用いた三次元手形状推定

画像解析により得られた腕中心・手首・掌中心および先頭の関節について、ステレオ視により三次元位置を計算し、この情報から三次元手形状を推定する．

### 4.1 手首のヨー、ピッチ方向の回転角度

抽出した特徴点から手首のヨー、ピッチ方向の回転を求める．3.2 節で求めた腕中心・手首・掌中心の三次元位置を  $P_{arm}, P_{wrist}, P_{hand}$  とすると、肘から手首の向きを持つ単位ベクトル  $V_{arm}$  および手首から掌中心の向きをもつ単位ベクトル

$V_{hand}$  は以下の式で得ることができる。

$$V_{arm} = \frac{P_{wrist} - P_{arm}}{\|P_{wrist} - P_{arm}\|} \quad (6)$$

$$V_{hand} = \frac{P_{hand} - P_{wrist}}{\|P_{hand} - P_{wrist}\|} \quad (7)$$

$V_{arm}, V_{hand}$  を  $x-y$  平面に投影したベクトルが  $x$  軸と正の向きになす角を  $\theta_{arm}, \theta_{hand}$ 、同様に  $x-z$  平面に投影したベクトルが  $x$  軸と正の向きになす角を  $\phi_{arm}, \phi_{hand}$  としたとき、ヨー、ピッチ方向の回転角度  $\theta_{yaw}, \phi_{pitch}$  は

$$\theta_{yaw} = \theta_{hand} - \theta_{arm} \quad (8)$$

$$\phi_{pitch} = \phi_{hand} - \phi_{arm} \quad (9)$$

によって求めることができる (図 5)。

#### 4.2 肘の三次元位置推定

肘の三次元位置を求める。実際は、肘が撮影領域に存在することは想定してないので、肘の三次元位置  $P_{elbow}$  を画像から直接求めることができない。よって、以下の式を用いて  $P_{elbow}$  を求める。

$$P_{elbow} = P_{wrist} + (-V_{arm}) \times L_{elbow\_wrist} \quad (10)$$

ただし、 $L_{elbow\_wrist}$  とは、モデル上での肘から手首までの長さである。肘の三次元位置を抽出することで、三次元空間上で平行移動するような手の動きにも対応することができる。

次に、モデルの肘から手首向きが  $V_{arm}$  と一致するよう肘の関節角を回転させる。

#### 4.3 肘のロール方向の回転角

肘のロール方向の対する回転角は、以下のようにして求める。まず、先頭の関節の三次元位置位置と手首の三次元位置  $P_{wrist}$  の 6 点を通るような三次元平面を特異値分解によって計算する。次に肘のローカル座標においてロール方向の回転を行なう軸に関して、求めた平面との相対的な角度を計算することで求める。

#### 4.4 先頭の関節の特定

指の関節角度を推定するには、まず 3.3 節で求めた先頭の関節位置がどの関節 (指先を含む) のものであるか特定する必要がある。本手法はこの問題を IK を用いて解く。IK とはゴールにターゲットが一致するために必要な関節の角度を推定する手法である。今回は IK に Cyclic Coordinate Descent (CCD) 法 ([12]) を用いた。CCD 法はターゲットとゴールの距離を最小とするような最適化問題を反復計算により解を求める発見的な手法である。一回の計算コストが小さく、前時刻の姿勢から次の姿勢を推定するので、時系列のデータを実時間で扱うのに有効である。また、CCD 法には動的に制約を付け加えることが簡単であるという特徴が挙げられる。

先頭の関節の特定法としては、ある指において、抽出された先頭の関節位置 (ゴール) に指定した関節位置 (ターゲット) が一致するようにターゲットより根元側の関節 (MP 関節まで) を変化させていく。このとき、ターゲットとして全ての関節 (指先を含む) の場合を考え、ゴールとターゲットの距離が最小と

表 1 関節角の可動範囲

	DIP	PIP	MP	内転
小指	0~80	0~100	-30~90	-20~20
環指	0~80	0~100	-20~90	-20~20
中指	0~80	0~100	-20~90	-20~20
示指	0~80	0~100	-40~90	-20~20
母指	-20~90	-20~70	-20~50	-40~40

単位: 度

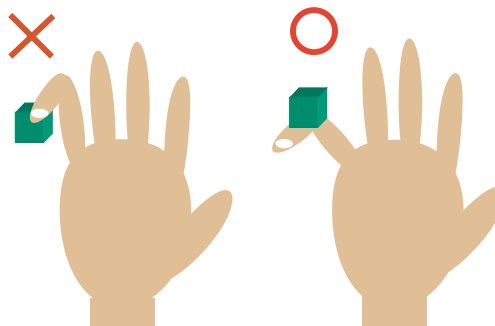


図 6 先頭の関節である条件

なる関節を先頭の関節として選択する。

しかし、この処理は逆問題を解いており、一般に複数の解を持つことになる。一方、人の手には様々な制約が存在する。よって、本手法では一意で最適解を得るために、以下のような手の制約条件および抽出した形状特徴の条件を利用した。

#### 関節角の可動範囲

各関節には可動範囲がある [11]。指同士でも、示指・小指と比較して中指・薬指は伸展しづらいなど特徴がある。これら知識に基づいて関節角に可動範囲を設定した。それぞれの関節に対する可動範囲を表 1 に示す。

#### 内転、外転の制限

指は屈曲させると、同時に内転が起こる [13]。この知識に基づき MP 関節の屈曲角度に伴い、線形的に内転・外転の可動範囲を制限する。

#### 先頭の関節である条件

IK の結果、指定された関節より根元側の関節が手首より遠い位置にある場合は、候補として外される。これは、先頭の関節は輪郭上の弧として得られたので、手首と最も遠い位置に位置する関節である必要があるからである (図 6)。これらの条件を利用して CCD 法により関節角を推定し、先頭の関節位置と最も近づくことができる関節を先頭の関節として選択する。この手法を用いることで、先頭の関節を特定すると同時に指の関節角も推定することができる。

#### 4.5 指の関節角の推定

ここまで述べた手法では先頭関節より根元側の関節の関節角度しか推定することができない。よって、先頭の関節が指先であると判定された場合を除いては、さらに末端側の関節の角度を推定する必要がある。本手法では、この問題に対して以下のようにして対応する。

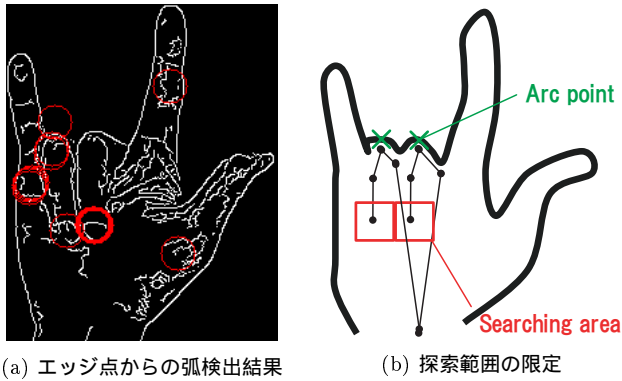


図 7 手領域内部のエッジを用いた三次元手形状推定

#### 4.5.1 手領域内部のエッジを用いた指の関節角推定

推定結果から大まかな手形状を知ることができるため、より詳細な仮説を立てることが可能となる。このため、画像から得られる形状特徴として輪郭情報だけでなく手領域内部のエッジ情報の利用することが可能となる。具体的には、曲げ状態の指において、指先の推定位置周辺で指先に対応する形状特徴を探索し、もし指先が求まった場合は再び IK を用いてより精密な関節角度を推定する。

図 7(a) は入力画像に対してエッジ検出を行い、弧となる点を検出した結果である。エッジ点からの弧抽出手法に参考文献 [14] の手法を用いた。また、探索範囲の絞り方は、画像上での輪郭位置と手首位置を結ぶ線分のどこあたりに指先が存在するかを、モデル上での手首から先頭の関節までの距離とその関節から指先までの長さの比を用いて予測する。この点から  $50 \times 50$  画素の領域で画像から弧を検出する。

#### 4.5.2 関節角の依存関係を用いた指の関節角推定

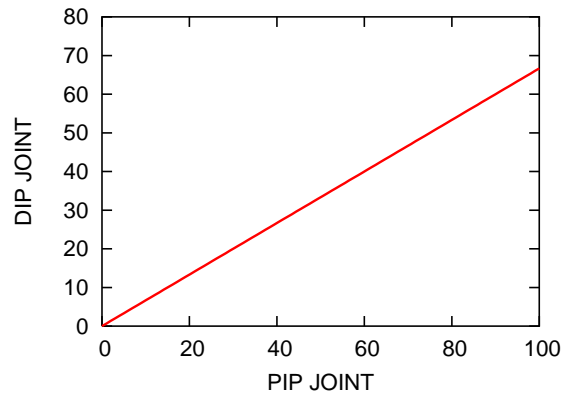
手領域のエッジによる指先が求まらない場合には、以下に挙げる関節角の依存関係を利用することで指の関節角を推定する。

- DIP と PIP の関節角度には比例関係 ( $\theta_{DIP} = \frac{2}{3}\theta_{PIP}$ ) が見られる [9]。
- MP と PIP の関節角度には S 字型の相関関係が見られる [13]。

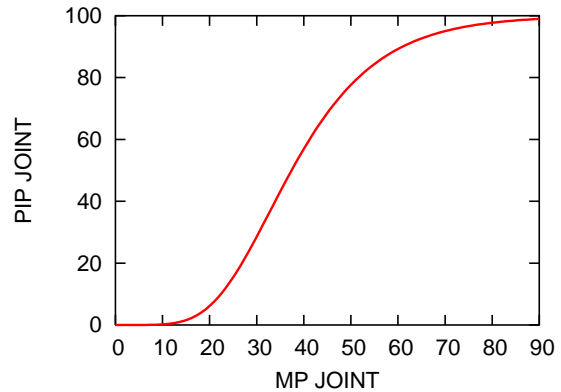
上記の知識に基づいて今回利用した PIP-DIP 及び MP-PIP 関節角の関係を表したものを図 8 に示す。この関係を利用して、先頭の関節より末端側の関節角度を推定する。ただし、先頭の関節が MP 関節と判定された場合、どの関節の関節角度も求めることができない。しかし、MP 関節が輪郭上の弧として検出されるときは指を最大限に曲げている場合が多い。よって、この場合の各関節角度は可動範囲内で最大となる角度とした。

## 5. 実験

本手法を用いて三次元手形状姿勢推定の実験を行なった。実験には Pentium Celeron, 2GHz の CPU, 512MB のメモリを搭載した計算機を 1 台、IEEE1394 規格のカメラ (Point Grey Research Flea) を 2 台使用した。また、画像サイズは  $640 \times 480$  pixel である。実験では、2 台のカメラを約  $40^\circ$  間隔で配置している。これらは、固定カメラで、計測空間中に設置したワール



(a) PIP-DIP 関節間の依存関係



(b) MP-PIP 関節間の依存関係

図 8 指内の関節角の依存関係

ド座標系とカメラ座標系の間であらかじめキャリブレーションをしておくものとする [15]。

#### 5.1 三次元手形状推定の評価

本システムを用いた三次元手形状推定結果を図 9 に示す。図 9 の一、二段目は掌方向に指を曲げた姿勢の入力画像およびそれに対する姿勢推定結果である。また三、四段目は掌のヨー・ピッチ・ロール方向の回転を行なった姿勢の入力画像およびそれに対する姿勢推定結果である。どちらの姿勢推定結果をみても入力画像に近い推定結果がでていることを確認することができる。

次に探索範囲を限定したエッジ情報を用いて、関節角推定を行なう有効性を図 10 に示す。曲げ状態の指に関して、輪郭情報だけではどのくらい指を曲げているかは指の依存関係をもちいておおまかにしか知ることができないが、エッジ情報から指先位置を検出することでより厳密にすることができ、入力画像に近い推定結果が得られていることが確認できる (図 10(b)(c))。

#### 5.2 動作速度

1 フレームあたりの計算時間を示したものが表 2 である。合計処理時間は 60 ミリ秒である。このためシステムは約 16 フレーム毎秒で動作しており、十分な速度で推定を行なっている。

## 6. おわりに

本稿では、ロバストに求まる画像特徴に、手の制約知識を組み合わせることで三次元手形状推定を行うモデルベースのアプ

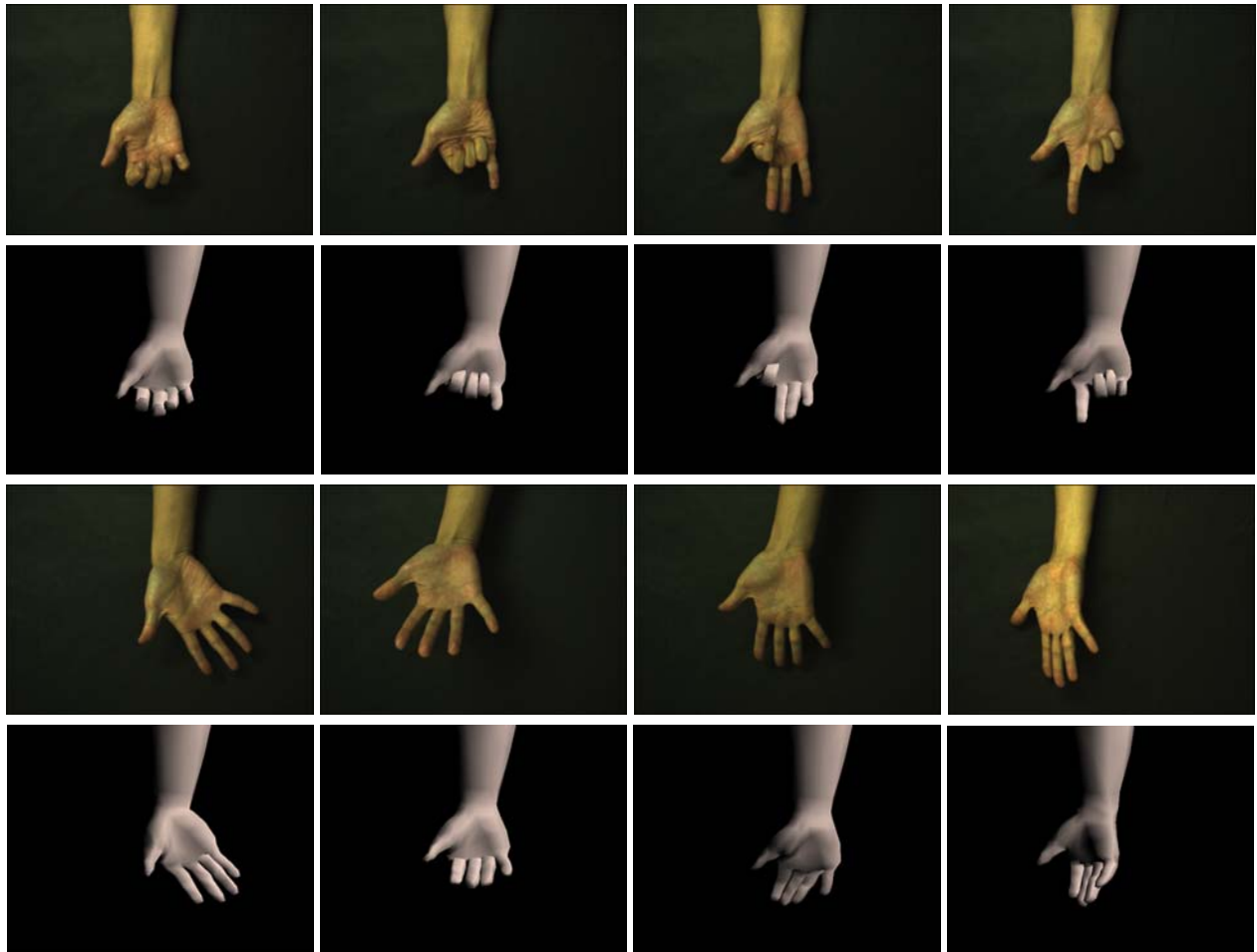


図 9 三次元手形状推定結果

表 2 各アルゴリズムの計算時間

処理	時間
RGB 画像から彩度画像への変換	11ms
肌色領域抽出と回転の正規化	22ms
腕中心, 手首, 掌中心の三次元位置抽出	9ms
先頭の関節の三次元位置抽出	1ms
IK による三次元手形状推定	12ms
手領域内部のエッジを用いた三次元手形状推定	5ms
合計	60ms

ローチと共に、推定結果から詳細な仮説を立てることで、より有効な画像特徴を抽出し、利用する手法を提案した。これにより指を掌方向に曲げるような姿勢に対応できるシステムを構築した。また、本システムを実装することで実時間で処理ができることを確認した。

将来の課題としては以下の点が挙げられる。

- 複雑背景から手領域を抽出することで場所を限定することのない応用範囲の広いシステムを構築する。
- 今回利用した手の制約知識の他に、ある指を曲げると隣接する指も曲がってしまうなどの指間の関節角の依存関係も存在する。この制約知識をモデル化し、手形状推定に組み合わせることで、手形状の情報の捕捉や画像特徴の抽出失敗のエラー一回

復などに利用する。

- 指の長さや掌の大きさなど自動的にそれらのパラメタを推定することで、より手軽に利用できるシステムを構築する。
- 本システムは設置したカメラから掌と正面に近い画像に対して特徴点抽出を行っているため、より広範囲の回転に対応するためにはさらに多くのカメラを用意する必要がある。

謝 辞

本研究の一部は総務省戦略的情報通信研究開発推進制度および科学研究費補助金特定領域研究「情報学」の援助を受けた。

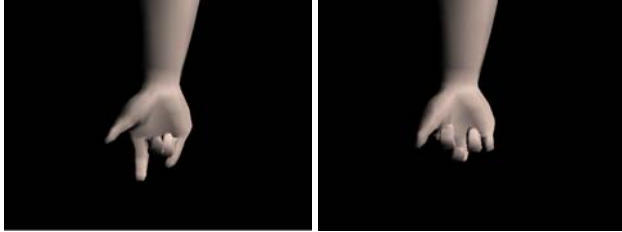
文 献

- [1] S. U. Lee and I. Cohen, "3D Hand Reconstruction from a Monocular View", Proc of ICPR, pp310-313, 2004.
- [2] 亀田, 美濃, 池田 "シルエット画像からの関節物体の姿勢推定," 電子情報通信学会論文誌, DII Vol. J79 -DII No.01 pp.26-35, 1996.
- [3] S. Lu, D. Metacas, D. Samaras, J. Oliensis, "Using multiple cues for hand tracking and model refinement," Proc of CVPR, pp443-450, 2003.
- [4] E. Ueda, Y. Matsumoto, M. Imai and T. Ogasawara, "Hand Pose Estimation for Vision-based Human Interface", IEEE Transactions on Industrial Electronics. Vol.50, No.4, pp.676-684, 2003.
- [5] B. Stenger, A. Thayananthan, P. H. S. Torr, and R. Cipolla, "Filtering using a tree-based estimator," Proc of ICCV, pp.1063-1070, 2003.
- [6] N. Shimada and Y. Shirai, "Hand Posture Estimation based on 2D Appearance Retrieval Using Monocular Camera,"

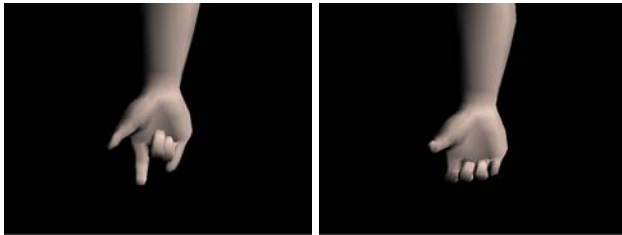




(a) 入力画像



(b) 輪郭情報のみによる推定結果画像



(c) エッジ情報を用いた推定結果画像

図 10 手領域内部のエッジを用いた三次元手形状推定結果

Proc of Workshop on RATFG-RTS, pp. 23-30, 2001.

- [7] Kamper, DG, EG. Cruz, and MP. Siegel. "Stereotypical fingertiptrajectories during grasp," Journal of Neurophysiology, pp3702-3710, 2003.
- [8] C.Hüger-Ross, and M. H. Schieber. "Quantifying the Independence of Hand Finger Movements: Comparisons of Digit, Hands, and Movement Frequencies," Journal of Neuroscience, pp8543-8550, 2000.
- [9] George ElKoura, Karan Singh "Handrix: Animating the Human Hand," Proc of SIGGRAPH on Symposium on Computer Animation, pp110-119, 2003.
- [10] M.I.Shamos, "Computational geometry", Ph.D. thesis, Yale University, 1978.
- [11] 鎌倉矩子, "手のかたち 手のうごき" 医歯薬出版株式会社, 1989.
- [12] Wang, L. T. and Chen, C. C, "A combined optimization method for solving the inverse kinematics problem of mechanical manipulators," Transactions of Robotics and Automations, Vol.17 No.4, pp489-499, 1991.
- [13] 市川 亮, "物体の把握・操作時における指関節の動きモデル化", 和歌山大学学士学位論文, 2002.
- [14] N. Ukita, M. Kidode. "Wearable Virtual Tablet:Fingertip Drawing on a Portable Plane-Object Using an Active-Infrared Camera." IUT, pp.169-176, 2004.
- [15] R. Y.Tsai, "A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-Shelf TV Cameras and Lenses", Transactions of Robotics and Automation, Vol.3, No.4, pp.323-344, 1987.