

全方位視覚センサとLEDを用いた手指姿勢推定法

國貞 智治*¹ 間下 以大*¹ *² 清川 清*¹ *² 竹村 治雄*¹ *²

Hand Pose Estimation using Omni-Directional Camera and LEDs

Tomoharu Kunisada*¹, Tomohiro Mashita*¹ *², Kiyoshi Kiyokawa*¹ *² and Haruo Takemura*¹ *²

Abstract – Recently, there have been many user interfaces proposed that detect a user's body motion and recognize it as a gesture. Such interfaces have the advantage in offering intuitive human computer interaction. In such a user interface, it is necessary to be able to input a variety types of information such as texts and menu operations, while moving a user's body. It is also desired to be able to input hand gestures such as gripping, twisting and pointing. In this paper, we propose a novel input device that allows both multi-touch input and hand gesture recognition, by using an omni-directional optical sensor and LEDs. Specifically, a model-based hand pose estimation method is detailed.

Keywords : User Interface, Omnidirectional Sensor, Hand Pose Estimation, Gesture Recognition

1. はじめに

計算機能力やセンシング技術の向上に伴い、ユーザの身体動作を入力とするインタフェースが数多く開発されている。そのような入力インタフェースでは人間の自然な動作を用いた直感的な操作が可能であり、様々な分野で注目されている^[1]。例えば、VR (Virtual Reality) では、一般に三次元センサを用いてユーザの手の位置や姿勢を認識し、それに対応したバーチャル物体の操作を可能としている。ビデオゲームやアミューズメント分野では、任天堂のWiiに代表されるように、入力デバイスに内蔵した加速度センサなどを用いてユーザの動きに基づいたインタラクションの利用が進んでいる。

このようなシステムでは手や腕を動かすこととは独立して様々な入力を行う必要がある。例えば、メニューの操作やテキストの入力は多くのアプリケーションに必須の機能でありそれらを通常のマウスやキーボードを用いずに行える必要がある。また、バーチャル物体を移動しながらその属性を変更するなど、複数のパラメータを連続的かつ同時に操作したい場合も考えられる。手や腕の動作だけではなく、握る、ひねる、指差すといった手指の形状を用いたジェスチャ入力を行いたい場合も考えられる。しかしながら、これらの要求をすべて満たすような入力インタフェースは従来存在していない。

従来、このようなシステムで用いられる入力インタフェースは、ユーザの指がデバイスに触れることによって入力を行う接触型と、ユーザの手指の姿勢を計測し、入力とする手指姿勢計測型に大別することができる。

接触型インタフェースでは入力値を直接ハードウェアで計測するため誤入力が少なくデバイス表面で指がサポートされるため安定した入力が行える利点がある。ただし、ボタンやダイヤルなどのユーザインタフェース (UI) 部品を物理的にデバイス上に構成するものが多く、その個数やレイアウトは固定されており変更ができない。従ってアプリケーションが本来必要とするUI部品の個数と比して過不足が生じ得る。また、手や指のサイズ、可動域はユーザごとに異なるためUI部品の大きさや取付位置によっては使いづらくなる。

一方、手指姿勢計測型インタフェースでは手指の形や動きを用いた直感的な操作が行える利点がある。しかし、グローブ型デバイスを用いる場合は着脱が煩雑であり、ユーザに拘束感を与えるという問題がある。デバイスの装着が不要な画像認識による手法では一般に高精度の姿勢計測が困難であり、オクルージョンなどの影響を受けやすいという問題がある。

本稿では、接触型インタフェースと手指姿勢計測型インタフェースの利点を併せ持ち、かつ、それらの問題点の多くを緩和した新しい入力インタフェースを提案する。特に、提案手法における手指姿勢計測手法について詳述する。

2. 関連研究

我々は、接触型インタフェースでありながら手指の姿勢を計測でき、ジェスチャ入力も行える小型入力イ

*1: 大阪大学 大学院情報科学研究科

*2: 大阪大学 サイバーメディアセンター

*1: Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

*2: Cybermedia Center, Osaka University

インタフェースの開発を目指している。以下では、接触型インタフェースと手指姿勢計測手法のそれぞれについて本論文の関連研究について述べる。

2.1 接触型インタフェース

接触型インタフェースではボタンやダイヤルなどのUI部品を物理的にデバイス上に構成するものが多い。代表的な例としては、任天堂のWiiリモコンやVR入力デバイスとして知られるWanda^[2]などが挙げられる。この場合、前述のように確実な入力が行える利点があるが、UI部品の個数やレイアウトが固定であるという制限がある。

一方、iPhoneなどの静電容量方式やHanによるFTIR方式^[3]に代表されるマルチタッチデバイスを用いれば、操作面上にUI部品を自由に構成できる。しかしながら、平面状のタッチパネルを把持しながら五指による入力を行うことは難しく、その形状については検討が必要である。Villarらは、従来のマウスの機能を継承しつつその表面を操作面とするマルチタッチ機能を追加した新しいマウスの構成方法について検討している^[4]。Villarらの方法では曲面上に操作面を構成でき、五指による入力により適するといえる。

より高自由度の入力が可能な接触型インタフェースとして神山らのGelForce^[5]や暦本らのSmartSkin^[6]が挙げられる。GelForceでは接触だけではなく圧力の強さと向きを分布まで計測することができる。また、SmartSkinでは操作面から指までの大まかな距離の分布を計測することができる。ただし、SmartSkinでは距離が大きくなるほど分解能が低くなり、手指姿勢計測を行うには制約が大きい。

2.2 手指姿勢計測手法

手指姿勢計測を用いたインタフェースでは、手指の形や動きを用いた直感的な操作が行える利点がある。ただし、前述のように、CyberGlove^[7]に代表されるグローブ型デバイスを用いる場合は着脱が煩雑であり、ユーザに拘束感を与えるという問題がある。一方、画像認識による手法はデバイスの装着が不要であるという大きな利点があり古くから研究されている。特に、環境に設置したカメラで撮影した手の画像と見えが一致するように手の三次元モデルのパラメータを推定する手法が一般的である^{[8][9]}。しかし、環境にカメラを設置する場合、ユーザの可動範囲が制限され、体が手を隠したり手や指が他の指を隠したりといったオクルージョンの問題も発生しやすくなる。

ユーザに装着したカメラを用いれば、オクルージョンの問題は緩和される。佐々木らはユーザの頭部に装着したカメラを用いた手指のジェスチャ認識手法を提案している^[10]。ただし、この手法ではユーザはインタラクションを行う際、常に自身の手を見続ける必要

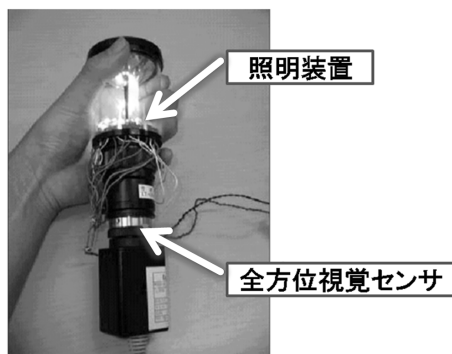


図1 円筒形入力デバイス

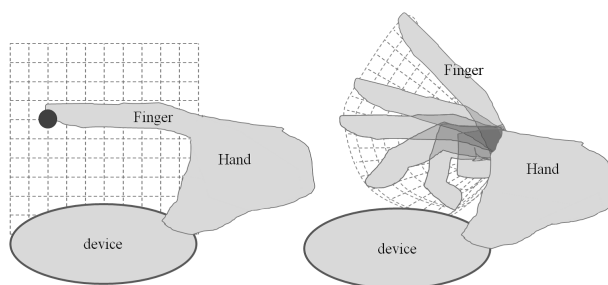


図2 (a) 先行研究での入力方法 (b) 提案手法における入力方法

がある。常に手を撮影できるように、藤本らは手首に装着したカメラを用いて空中でタイピングが行える手法を提案している^[11]。ただし、この手法では手首から手前方向への撮影となるため認識できる手形状に制約が大きい。坂田らは小型の全方位視覚センサを用いて、これを取り囲む複数の指のトラッキングを行っている^[12]。ただし、この手法も自由な手指姿勢の認識を目指しているわけではなく、認識できる手形状に制約が大きい。

3. 円筒型入力デバイスのための手指姿勢推定

本研究で提案する入力インタフェースでは、接触型インタフェースで実現されている位置指定やボタン入力と、手指姿勢計測型インタフェースで実現できるジェスチャ入力というそれぞれの利点を備える。本節では、これらを実現するための円筒型入力デバイスと本デバイスに適した手指姿勢推定手法について検討する。

3.1 全方位視覚センサを用いた円筒型入力デバイス

前節で述べたように、非装着型の入力インタフェースを実現するにはカメラを用いた画像認識による手法が一般的である。しかし、デバイス外部にカメラを設置した場合には、カメラと手の位置関係でオクルージョンが発生してしまう。デバイスにカメラを設置して手の移動の影響を相殺することを考えても、指とカメラの間には十分な距離を取らなければ撮影が可能な

いという問題がある。また、デバイスを把持したままという状況を考えると、一台のカメラですべての指を撮影することには困難が伴う。

我々はこれらの問題を解決する円筒形の全方位視覚センサを用いた三次元入力デバイス(以下、提案デバイス)を提案してきた(図1)^[13]。提案デバイスは、全方位視覚センサとそれを覆う透明の円筒面、およびLED光源からなる。この円筒部を把持することにより、一台のカメラですべての指が撮影可能となる。また、指とカメラの間に遮蔽物がないため、オクルージョンの問題も回避される。さらに、提案デバイスではLEDを明滅させ、距離による光の減衰モデルを用いて全方位の距離画像を取得することができる。従来、我々はこの距離画像を用いて各指先の三次元位置を実時間で検出し、それを用いた三次元インタラクションを実現してきた。

3.2 手指姿勢推定を用いた入力インタフェース

従来手法^[13]では、各指先の三次元位置は検出できるが、各指の曲げ角や掌の向きなどの手指姿勢は計測できない。従って、提案デバイスの近傍でひねる、つまむ、指差すなどのジェスチャを用いたインタラクションを実現できなかった。また、円筒表面を操作面としてマルチタッチインタラクションを行う際にも、手指姿勢が不明であることに起因する使いづらさが明らかとなっていた。例えば、円筒面にスライダを設定し、指のなぞりによってその値を変化させることを考えた場合、従来手法では手指姿勢が不明なためにスライダの向きや長さは事前に設定せざるを得ず、それと異なる向きで把持したり指の長さが設定と異なる場合は使いづらくなるという問題があった(図2-(a))。そこで、本研究ではデバイスを中心とした指先の絶対的な座標値を入力に用いるのではなく指先が自然に動きうる範囲を手の向きや大きさから推定し、その範囲における相対的な指先位置を入力に用いることでユーザの身体的特徴に合わせた入力手法を提案する。

また、各入力に手指の姿勢を用いることで連続値の入力が可能となる。手指の各関節には骨格などの制約から回転できる範囲に限界がある。この範囲を関節可動域と呼び、個人差は存在するが参考となる関節可動域が定められている^[15]。この関節可動域と指の長さを元に指先の存在可能な範囲を決定する。図2-(b)に示すように、指先の可動範囲の上限と下限の間を等間隔に区切った座標系を考えると、ユーザの手の大きさ等に合わせた位置入力を設定することができる。これを以後「指先座標系」と呼び、この座標値を入力値とすることでどのようなユーザであっても無理のない自然な動作による入力が可能になる。

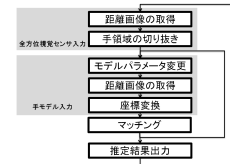


図3 手姿勢推定の流れ

3.3 提案デバイスに適した手指姿勢推定手法

関節可動域を元にしてユーザの手の大きさに合わせた入力デバイスを実現するには、手指を関節物体とみなして姿勢推定を行う必要がある。関節物体の姿勢推定には大きく分けて、appearance-basedとmodel-basedという二つのアプローチが存在する^[16]。appearance-basedアプローチは対象物体の見え方と物体の姿勢との写像関係を教師あり学習によって求める手法である。appearance-basedな手法の欠点として、変動するパラメータの空間が大きくなると、学習データが膨大になることが挙げられる。この変動するパラメータには各関節の長さなど、個人差によるものも含まれる場合がある。

一方、model-basedな手法は画像に対して関節物体を当てはめ、その誤差を最小化するような姿勢を推定値とする手法である。model-basedな手法の場合、個人差によるパラメータの変動はモデル内のパラメータとしてあらかじめ設定したり推定することができる。

本研究では、あらかじめ大量の学習データを用意することの難しさや、個人の身体的特徴の影響を考慮した入力インタフェースの構築が目的であることから、model-basedアプローチを採用する。本手法ではリンク長と関節角度をパラメータとした関節物体モデルを用いて全方位距離画像を作成し、円筒型入力デバイスから得られた距離画像との差を誤差関数とするしてモデルのフィッティングを行う。

4. 手姿勢推定アルゴリズム

本節ではこれまで提案してきた全方位円筒形デバイスによる距離画像取得手法とその距離画像を用いた手指の姿勢推定手法について述べる。手指姿勢推定の流れを図3に示す。

4.1 全方位距離画像の取得

4.1.1 全方位視覚センサ

本研究で用いる全方位視覚センサは、鉛直下向きの双曲面ミラーと上向きカメラから構成されている。双曲面ミラーの形状は二葉双曲面の式

$$\frac{X^2 + Y^2}{a^2} - \frac{Z^2}{b^2} = -1 (Z > 0) \quad (1)$$

$$c = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (2)$$

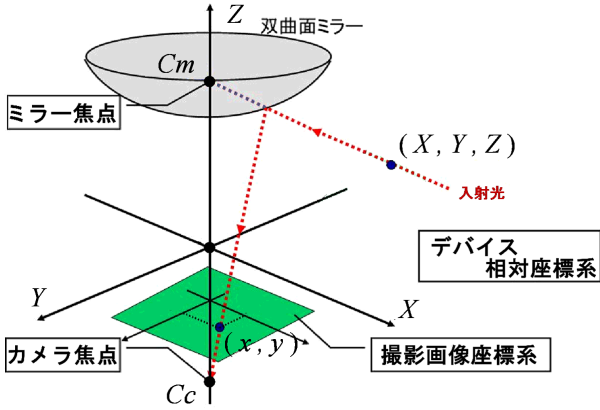


図4 入射光と撮影画像の射影関係

を用いて表され、2つの焦点 $C_m(0, 0, c)$, $C_c(0, 0, -c)$ を持つ。カメラの光軸と双曲面の中心軸を同軸に、カメラ主点が双曲面の焦点 C_c と重なるように配置されている。このような配置によってミラー焦点へ向かう光が反射され、カメラが配置されたもう一方の焦点へと向かう。これによって双曲面ミラーの焦点を視点とした透視投影画像や周囲360度のパノラマ画像を作成することができる。空間上のある点 (X, Y, Z) と撮影画像上の点 (x, y) の対応関係は式

$$x = X \times f_c \times \frac{(b^2 - c^2)}{Z(b^2 + c^2) - 2bc\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}} \quad (3)$$

$$y = Y \times f_c \times \frac{(b^2 - c^2)}{Z(b^2 + c^2) - 2bc\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}} \quad (4)$$

で与えられることが知られている^[17]。ここで、 f_c は焦点 C_c と撮影画像平面との距離を表す。この射影関係を図4に示す。

4.1.2 距離測定法

一般に、光源から放たれた光は光源から離れるほどその放射輝度が小さくなる。この性質を利用し、入力面と指先との距離を推定することを考える。小川らの手法^[14]によると、一般のデジタルカメラを用いた場合、照明装置をカメラのレンズ中心にあると仮定しカメラと被写体の位置関係を図5のようにモデル化すると、その距離 z は明度差を用いて

$$z = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{rI}{E^{on} - E^{off}}} \frac{d}{f} \cos^3 \alpha \cos^{\frac{3}{2}} \theta \quad (5)$$

のように表すことができる。ここで、 E^{off} , E^{on} は照明消灯時と点灯時画像中の明度値、 I はレンズ中心にあると仮定する光源の放射強度、 r は物体表面の反射率、 d をレンズの直径、 α はカメラ光軸に対して被写体表面とレンズ中心を結んでできる線が交差する角度、 θ は被写体表面の微小面の法線とレンズ中心と表面を結んでできる線が交差する角度である。

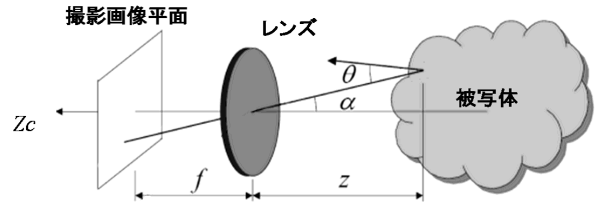


図5 カメラと物体の位置関係 (図は小川らの手法^[14]より引用し、パラメータなど一部変更)

E^{off} , E^{on} 以外のパラメータが変化せず、光源からの距離が z_0 であるような基準点を考え、その点での物体表面の明度差が判明している場合には、同物体の移動した位置 z_n は明度差の比を用いて式(6)のように表すことができる。

$$z_n = z_0 \times \left(\sqrt{\frac{E_0^{on} - E_0^{off}}{E_n^{on} - E_n^{off}}} - 1 \right) \quad (6)$$

本システムでは円筒形入力デバイスでの距離画像取得に上記のアルゴリズムを利用する。 E^{off} , E^{on} の値は内蔵のLED(図1)を明滅させ、それぞれの状態で撮影した連続する2フレームの明度情報を用いることで取得できる。基準点 z_0 は指先がデバイスに接触している点とすることで光源からの距離が測定可能である。

このモデルでは双曲面ミラーによる反射は考慮に入れていないが、双曲面ミラーの働きを光の向きを変えるのみであると考え、我々が提案してきたデバイスにおいてもこのモデルを適用することができる。操作中は常に指の腹が入力面に対して垂直であると仮定すると、 θ と α は各画素ごとに決まった値をとる。 r は利用者毎に値を取得する必要がある。 I , d , f は設定により一定にすることが可能である。

4.2 手指の姿勢推定

4.2.1 手指の関節物体モデル

提案手法では手指の関節物体モデルとしてLeeらのモデルを用いる^[18]。Leeらのモデルを図6に示す。このモデルは15関節21自由度で手指の姿勢を表現する。

4.2.2 姿勢推定

距離画像とモデルのフィッティングは手のモデルから全方位距離画像を生成し、距離画像同士の差を最小化することで行う。誤差関数 $\epsilon(\mathbf{w})$ は

$$\epsilon(\mathbf{w}) = \sum_x \sum_y \left[\{p(x, y) - q(x, y, \mathbf{w})\}^2 s(x, y) \right] \quad (7)$$

とする。ここで、 $p(x, y)$ は入力となる距離画像の座標 (x, y) の奥行き値、 $q(x, y, \mathbf{w})$ はパラメータ \mathbf{w} の手指

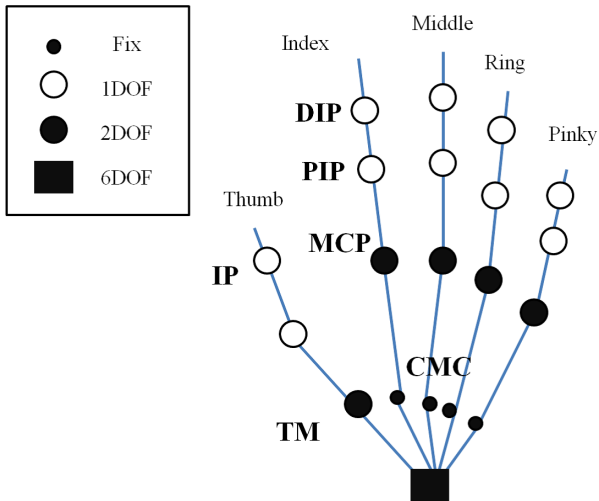


図6 Leeらの手指モデル [18]

モデルから合成される距離画像の座標 (x, y) の奥行き値, $s(x, y)$ は各画素の立体角による補正係数である. この誤差を最小化する w を Levenberg-Marquardt 法によって推定する.

5. 試作システム

5.1 ハードウェア構成

試作システムでは全方位視覚センサとして Firefly(Point Grey Research 社)を用いたその仕様を表1に示す. この全方位視覚センサの透明円筒の内側に照明として白色LEDアレイを設置している. 指先の明度差を取得するために PIC16F628A を用いてカメラの外部トリガへの同期信号生成と照明装置の明滅を 25Hz に制御する信号の生成を行う.

5.2 距離画像の取得

提案手法では, 距離画像取得は, 「初期化」, 「手領域抽出」, 「距離推定」の3つの処理からなる. 以下にこれらの処理について述べる.

5.2.1 初期化

照明装置から鏡を経由して入力面に至る光路長は計算可能であり, 指先接触時の照明装置と指との鏡を経由する光路長に等しい. 接触時の位置を基準点として明度差を取得すると, 式(6)を用いることにより入力面から物体までの距離が得られる. 明度差は指先の反射率から決定されるが, 指先の反射率には個人差があると考えられる. このため基準点における明度差は利

表1 本研究で用いたカメラの仕様

機種	Point Grey Research 社製 Firefly®MV
解像度	640x480
最大フレームレート	60fps

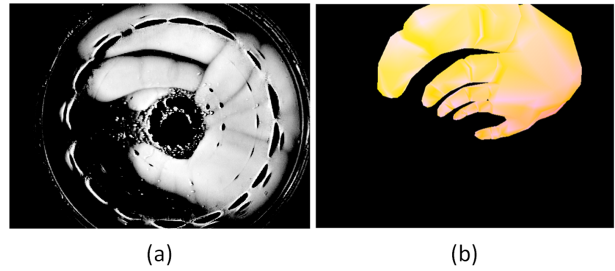


図7 (a) 取得した距離画像と (b) 合成した距離画像

用者別に取得する. また, z_0 での明度差は画像中のすべての画素で必要である. しかし入力面全体に指を接触させた状態の画像は撮影が困難であるため, 紙で入力面全体を覆った際の明度差分布を撮影し, 紙と指の反射率の比率から距離 z_0 での明度差の推定を行うこととする.

5.2.2 手領域抽出

操作中に手以外の物体がデバイス付近に存在しないという仮定に基づき, 照明装置の光を十分に反射する部位を手領域とする. つまり, 点灯時と消灯時で一定以上の明度差がある領域を手領域とする.

しかし, 照明装置の光が双曲面ミラーや円筒内部でカメラに向かって直接反射した場合, ノイズとして検出されるという問題がある. これに対しては, 暗室で鏡面に照明の反射だけが映った画像を取得し, 点灯時画像から対応する画素の明度値を引くことで影響を小さくする. また, 消去しきれなかったノイズの影響除去のため, 膨張収縮処理と中央値を用いたフィルタリングを行う.

5.2.3 距離推定

式(6)を用いて推定距離の距離画像を取得する. 取得した距離画像の例を図7-(a)に示す.

5.3 距離画像の合成

手指の姿勢モデルからポリゴンメッシュを生成し, これを用いて距離画像を合成する. 合成距離画像は式(3), (4)によって手指の表面上の点を全方位画像へ投影することで得られる. 実際には, ポリゴンの各頂点については式(3), (4)を用い, ポリゴン内の画素の距離は線形補間によって距離画像を得る. ポリゴンメッシュは Poser6 の HandShape_1 を用い, 手指姿勢の変化によるメッシュ形状をジオメトリブレンディングによって変化させた. 合成した距離画像を図7-(b)に示す.

5.4 手指の姿勢推定

本手法で手指の姿勢推定を行うには各関節の可動範囲を設定する必要がある. 表2に各関節に設定した可動域を示す. 指の MCP の外回と内回には参考可動域

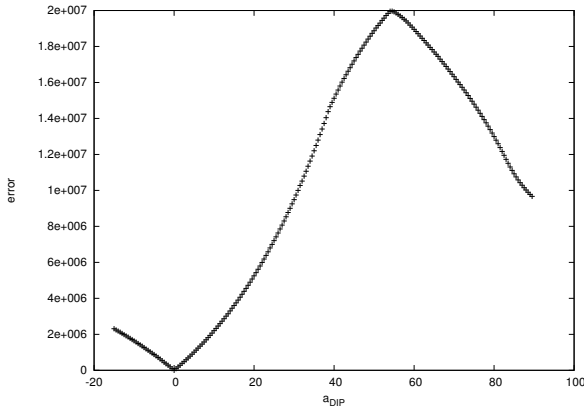


図8 推定誤差 a_{DIP} と誤差関数の値との関係

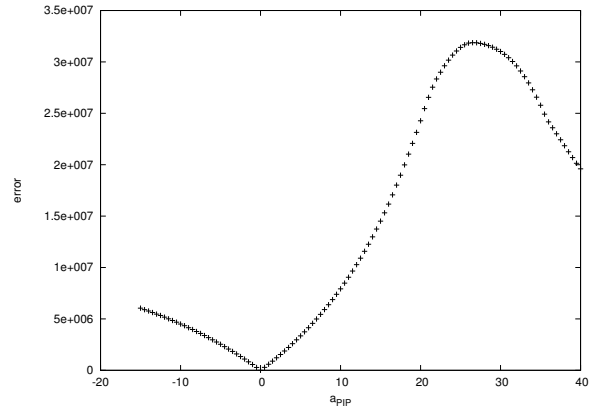


図9 誤差 a_{PIP} と誤差関数の値との関係

は定められておらず表記法も異なるが、今回は十分大きい値で代用することとした。

6. 誤差関数の評価と考察

本節では定義した誤差関数 $\epsilon(\mathbf{w})$ の妥当性の評価を行った。実験では真値としてパラメータ \mathbf{w}_t から合成される距離画像を $p(x, y)$ とし、誤差 \mathbf{a} を持つパラメータ $\mathbf{w}'_t = \mathbf{w}_t + \mathbf{a}$ から合成される距離画像を $q(x, y, \mathbf{w})$ とし、誤差関数の値を求めた。手指モデルのパラメータは互いに依存関係を持っていると考えられるので、パラメータが一つ異なる場合といくつか同時に異なる場合に分けて実験を行った。

6.1 1変数における誤差関数の評価

最初にパラメータが一つ異なる場合について評価した。手指モデルの小指 DIP 関節の角度が真値から a_{DIP} の推定誤差をもつ場合について誤差関数の値を求めた。図8に a_{DIP} と誤差関数の値との関係を示す。同様に、小指 PIP 関節に関しても推定誤差 a_{PIP} を変化させ、誤差関数の値との関係を求めた。推定誤差 a_{PIP} と誤差関数の値との関係を図9に示す。

それぞれの実験で共に推定誤差と誤差関数の値との関係は推定誤差がない時を最小値として局所的になだらかな曲線を描いていることがわかる。すなわち、

a_{DIP} と誤差の関係を見ると最急降下法を用いてパラメータを推定する場合、 $-20^\circ \leq a_{DIP} \leq 50^\circ$ の値を初期値とすれば正しい推定が可能であると言える。また、推定誤差が大きくなるにつれて誤差関数の値が増加しているが、ある点を境に減少に転じている。これは手指モデルを画像平面に射影する際、指同士の遮蔽や重複が起きているためと考えられる。

6.2 2変数における誤差関数の評価

次にパラメータ間の依存関係を確認するため、推定誤差 a_{DIP} と a_{PIP} を同時に変化させた場合の推定誤差と誤差関数の値の関係を求めた。結果を図10に示す。図10から、推定誤差が0の場合に誤差関数の値が最小値を取る曲面となっていることがわかる。また、曲面はなだらかに変化しており、適切な初期値においては最急降下法で正しいパラメータ推定が可能と考えられる。曲面の形状を見てみると、前実験の二つの推定誤差と誤差の関係をかけ合わされたような形になっている。それぞれの関係において局所解が複数存在することから、同時に動かすパラメータの数を増やしていくにつれて極小値の数が指数オーダで増加すると思われる。人の手の動きには各関節間に依存関係があることが知られているため、このことを利用した次元圧縮が有効な手段と考えられる。

7. おわりに

接触型インタフェースで実現できる二次元座標の入力やボタン入力と、手指姿勢計測型インタフェースで実現できるジェスチャ入力というそれぞれの利点を備えるインタフェースを提案した。提案手法では、全方位視覚センサを備えた透明円筒形状の入力デバイスを用いることにより撮影範囲やオクルージョンの問題を回避しつつ手指姿勢を推定可能である。推定した手指姿勢を用いれば、デバイスを把持した手の向きや指の長さに合わせてインタフェースを自動的に構成することも可能である。試作システムを通じて手指姿勢計測

表2 各関節の可動範囲^[15]

	関節名	運動方向	可動域 [°]
母指	TM	橈側外転-尺側内転	60-0
	TM	掌側外転-掌側内転	90-0
	MCP	屈曲-伸展	60-10
	IP	屈曲-伸展	80-10
指	MCP	屈曲-伸展	90-45
	MCP	外回-内回	45-45
	PIP	屈曲-伸展	100-0
	DIP	屈曲-伸展	80-0

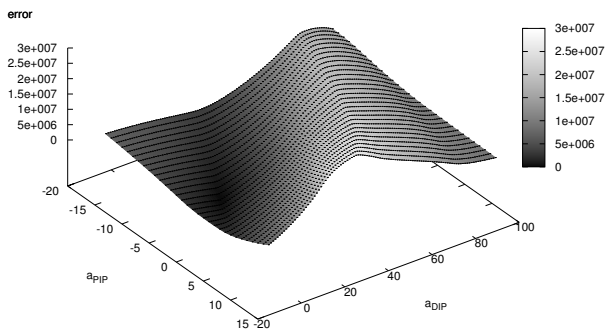


図10 小指 DIP 関節角 α_{DIP} および小指 PIP 関節角 α_{PIP} と誤差関数の値との関係

手法における誤差関数の性質を評価した。結果、2自由度の場合に最急降下法によって最適解を求めることが可能な関数の形をしていることを確認し、初期値についても許容される範囲の目安を得ることができた。今後の課題としては、組み合わせた場合のパラメータの制限方法の考案や、局所解に陥りにくい初期値の設定方法についての考察などが挙げられる。また、ノイズが含まれる実際の入力距離画像を用いた場合の有効性の検証や、姿勢推定処理の高速化を行い、提案したユーザインタフェースを実現していく。

参考文献

- [1] 岡, 佐藤: 柔軟なインタフェースの実現に向けた人間行動の計測と理解; IPSJ SIG Notes. CVIM, Vol. 2006, No. 51, pp. 275–290, (2006).
- [2] Wanda; <http://www.wandavr.com/>, (最終閲覧日 2010年7月19日).
- [3] Han, J. Y.: Low-Cost Multi-Touch Sensing through Frustrated Total Internal Reflection; Proceedings of the 18th Annual ACM Symposium on User Interface, Software and Technology (UIST), pp. 115–118, (2005).
- [4] Villar, N., Izadi, S., Rosenfeld, D., et al.: Mouse 2.0: Multi-touch Meets the Mouse; Proceedings of UIST 2009, ACM Symposium on User Interface Software and Technology, pp. 33–42, (2009).
- [5] 神山, 梶本, 稲見, 川上, 舘: 触覚カメラ: 弾性を持った光学式3次元触覚センサの作成; 電気学会論文誌 E, Vol. 123, No. 1, pp. 16–22, (2003).
- [6] Rekimoto, J.: Smartskin: an Infrastructure for Freehand Manipulation on Interactive Surfaces; ACM CHI '02: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human factors in Computing Systems, pp. 113–120, (2002).
- [7] CyberGlove; <http://www.cyberglovesystems.com/>, (最終閲覧日 2010年7月19日).
- [8] 岩井, 八木, 谷内田: 単眼動画画像からの手の3次元運動と位置の推定; 電子情報通信学会論文誌 (D-II), 情報・システム, II-情報処理, Vol. 80, No. 1, pp. 44–55, (1997).
- [9] 陳, 藤木, 有田, 谷口: 複数カメラを用いた実時間

- 三次元手形状推定; 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2006), pp. 328–333, (2006).
- [10] 佐々木, 黒田, 眞鍋, 千原: 『てのひらめにゆう』: ウェアラブルコンピュータ用入力インタフェース; 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 7, No. 3, pp. 393–401, (2002).
- [11] 藤本, 井村, 安室, 眞鍋, 千原: AirGrabber: 小型カメラと傾斜センサを用いたパチャルキボド; 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 9, No. 4, pp. 413–422, (2004).
- [12] 坂田, 生駒, 土居: 混合分布トラッキングを用いた全方位カメラ画像に映る本数可変の指の追跡; 第33回知能システムシンポジウム, pp. 55–58, (2006).
- [13] 國貞, 間下, 清川, 竹村: 全方位視覚センサとLEDを用いた3Dインタラクションのための指先位置検出法; 第52回自動制御連合講演会, F6-2, (2009).
- [14] 小川, 梅田: フラッシュを使用したデジタルカメラでの距離計測の一手法; 動的画像処理実用化ワークショップ 2005 講演論文集, pp. 82–85, (2005).
- [15] 日本リハビリテーション医学会: 関節可動域表示ならびに測定法; The Japanese Journal of Rehabilitation Medicine, Vol. 32, No. 4, pp. 207–217, (1995).
- [16] Erol, A., Bebis, G., Nicolescu, M. Boyle, R. D. and Twombly, X.: Vision-based Hand Pose Estimation: A Review; Computer Vision and Image Understanding, Vol. 108, No. 1-2, pp. 52–73, (2007).
- [17] 山澤, 八木, 谷内田: 移動ロボットのナビゲーションのための全方位視覚センサ Hyperomni vision の提案; 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. J79-D2, No. 5, pp. 698–707, (1996).
- [18] Lee, J. and Kunii, T., Constraint-based Hand Animation. in Models and Techniques in Computer Animation, Springer, Tokyo. pp. 110–127, (1993).