

3次元人体形状計測に基づく指差し動作の解析

田中 宏一 和田 俊和 松山 隆司

京都大学大学院情報学研究科知能情報学専攻

人間の指示動作を理解するためには、指差し時の姿勢から指示方位を求めることが不可欠である。これを明らかにするために、「指示方位は、指先と人物の姿勢によって決まる基準点を結ぶ直線によって決まる」と仮定して、この基準点を求めようとする研究が行われてきた。これらの研究では、指差し方位に応じて変化する姿勢とは無関係に基準点を求めており、指示動作の理解に利用できるほどの位置精度は得られていない。本研究では、視体積交差法による指差し時の人体形状復元と、人体モデルのフィッティングによる姿勢の同定を行い、頭部、胴体、上腕に設定した座標系を用いて、指差しの基準点を求める方法について示す。また指示者と対象点の位置関係から、指示基準点の位置が、方位により左右に、距離により左右及び前後に移動している様子を述べる。

Analyzing finger pointing behavior through 3D human shape model

TANAKA Koichi, WADA Toshikazu, MATSUYAMA Takashi

Department of Intelligence Science and Technology
Graduate School of Informatics Kyoto University

In order to understand finger pointing behavior, it is necessary to know the pointing direction from the posture of the performer. For realizing it, in the foregoing researches, they assumed that the pointing direction is set by drawing a straight 'pointing line' between the forefingertip and some 'base point'. They tried to detect the point without considering changes of the posture, but a 'base point' is essentially defined considering changes.

In this paper, 3D shape of the pointing performer is fit to the 3D human model depending on performer's body size, and then the directions and the locations of the body parts becomes clear. The 3D shape was reconstructed with a volumetric intersection. The method is mentioned to find a 'basepoint' considering changes of the posture, and our results showed exerted influence on the point by directions and distance.

1 序論

近年ロボットに関する研究が盛んに行なわれている。現段階では人間とのコミュニケーション機能が限られているが、人間とコミュニケーションを行なうことができるロボットに対する要望が高まりつつある。

人間とロボットの間で自然なコミュニケーションをとることを目的としたとき、人間の意図を正確に伝達することは重要な問題である。これを実現するためにさまざまな研究がなされており、特に音声と単語、ジェスチャーとコマンドというように入力パ

ターンをあらかじめ用意したカテゴリに対応付ける、言語的なコミュニケーションに関する研究はこれまでも行なわれてきた。しかし現実に人間は言語的情報だけでなく、カテゴリに分けることができない非言語的な情報伝達手段も用いて、他者とのコミュニケーションを行なっている。

本研究ではこのような非言語的な人間の情報伝達手段として、指差し動作を理解する問題を扱う。人間の指差し動作は方位の伝達手段である。この動作は人間にとっては理解しやすいが、機械にとって必ずしも理解しやすいものではない。これは、人間の指差し姿勢とそれによって表現しようとする方位

の関係が幾何学的に明らかになっていないためである。この問題を解決するために指差し動作のメカニズムを解明しようとするさまざまな研究が行なわれている [2][3]。これらの研究では指差し動作の基準となる「指示基準点」を求めようとしている。指示基準点と指先を結べば、指差しの方位を表す「指示直線」が得られる。

文献 [2] では、鉛直方向から見た指示者の腕が人体と成す水平方向の角度から、指示直線を 2 次元的に求めて指示基準点を計算し、人間が対象を指差す時の基準点は目と肩の間の部位を中心に存在すると結論づけている。

文献 [3] では、複数のビデオカメラを用いて指先の 3 次元位置を計測し、これと指示しようとしている「指示対象点」の位置を通過する指示直線を求めている。複数の指示対象点を指差し、得られる指示直線群が人体のどの位置を通るかを調べている。

本来、指示基準点の位置は、姿勢に応じて変化する人体部位のいずれかを基準として定義されるべきものである。すなわち、人体部位の向きを基準とする座標系を導入し、その座標系において指示直線の解析を行なう必要がある。しかし、上記 [2][3] の研究では、計測された指差し方位を姿勢と直接関係のない絶対的な座標系で解析している。

本研究では、指差し動作時の人体形状そのものを計測し、指差し方位のみでなく腕や全身の姿勢を解析に用いる。具体的には、姿勢の変化を反映する人体部位として頭部、胴体、上腕部の方位をもとにした座標系を構築し、指示直線をその座標系で表して解析を行なう。各直線の交点として指示基準点を定め、指示基準点の位置を最も良く表現できたのはどの人体部位座標系なのかを決定する。また、その人体部位座標系を用いて、指差し対象の距離や方位が指示基準点に与える影響を見てみる。

これらを実現するために以下の方針で研究を行なう。

- **指差し動作のモデル化** 文献 [3] の結果では、対象を指差す場合に指示方向はある基準点を通るという仮説を立てた。ここでは、まずこの仮説を正しいとし、この基準点を「指示基準点」と呼ぶ。指差し方位は、指示基準点と指先とを結ぶ直線の方向にあると見なす。この直線を「指示直線」と呼ぶ。
- **人体部位基準座標系の選定** 複数の方位にある

対象を指差した時の、3 次元人体形状から得られる頭部、胴体、上腕部の向きを基準とする座標系において、各方位の指示直線を計算し、全指示直線の最近接点を指示基準点とする。指示直線の収束度を基本として各座標系を評価し、どれが最も良い座標系なのかを決定する。

- **方位及び距離と指示基準点の関係** 最良とした人体部位基準座標系において、人体に対する指示対象点の方位と距離が、指示基準点にどのような影響を与えるかを観測する。

本論文では、モデルの検証に焦点を当て、複数の被験者について、指差した時の 3 次元人体形状データを解析することで、指示基準点の存在を確認してその位置の推定を行なった。構成として、第 2 章では人体の 3 次元形状計測の原理と手法を紹介し、第 3 章では指示直線の算出手法について説明する。第 4 章では実験と結果を述べ、第 5 章では結論と今後の展開についてまとめた。

2 3次元人体形状と指差し方位の計測

指差し方位を求めるには、指先と指示対象点の 3 次元座標の計算が必要になる。そこで 2.1 では、多視点画像から空間中にある点の 3 次元座標を求める計算手法の説明を行なう。

また、指示基準点の探索には人体部位に依存した人体部位基準座標系による指示直線の解析を基本とする。この基準座標系を決定するには、指差し動作を行なっている人体の 3 次元形状を取得して位置や向きを測定する必要がある。3 次元人体形状を求めるための手法には、視体積交差法 [1] を用いる。

2.1 多視点画像からの 3 次元座標計算

N 台のカメラを用いて同一の対象を撮影できる環境があると仮定する。図 1 のように、各カメラにおけるカメラ座標系 $O_{C_i} - X_{C_i}Y_{C_i}Z_{C_i}$ は、カメラの視線方向を Z_{C_i} 軸の、撮影平面において水平方向右方を X_{C_i} 軸の、垂直方向上方を Y_{C_i} 軸の正の方向である。点 P を撮影可能な 1 台のカメラを C_i とし、そのカメラ座標系の原点すなわちカメラの光学

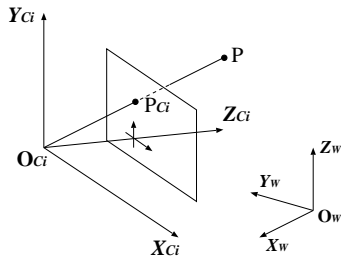


図 1: カメラ座標系とワールド座標系

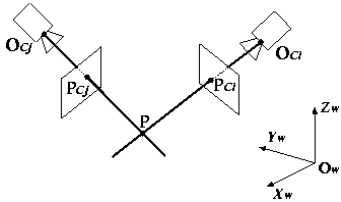


図 2: 2 直線の交点

中心を O_{C_i} とする。各カメラ間はワールド座標とキャリブレーション済みである。

カメラ C_i で点 P を撮影し、その画像平面上で得られる点 P_{C_i} の座標をワールド座標系での 3 次元座標で表す。図 2 のように、この点と点 O_{C_i} とを結んでできる 3 次元直線群の交点として点 P の 3 次元座標とする。

実際には 1 点に交わらないことが多いので、2 点間の距離が最小となるような 2 直線を選び、その 2 直線からの距離の和が最小となる点を点 P とする。

3 人体部位基準座標系による指差し方位の解析

本章では、前章で述べた方法を用いて指差し動作を観測していくうえで、必要となる解析手法について述べることにする。

まず初めに使用する語句の定義をまとめておく。

- **指示対象点** 指差し動作の対象となる点。
- **指示動作点** 指差し行動に使用する人体における点。今回は指先とする。
- **指示直線** 指示対象点と指示動作点を結んでできる直線。この直線の方向が指示方向を表すとする。

- **指示基準点** 人間の指差し動作において指示方向を決定する基準となる点。この点と指示動作点を結んだ直線上に指示対象点があるとする。
- **人体部位基準座標系** 指示者の人体部位上に設定した直交座標系。人体の移動とともに動く。

指差し動作中の指示者の 3 次元人体形状から人体部位の位置や向きを測定する。得られたデータをもとにして、指差し動作とともに移動する人体部位とワールド座標系との関係を計算することができる。また指差し動作の指示方向を決定する基準点を仮定し、人体形状との間で関連性があると予測した。

そこで基準点の位置を推定するために、人体形状と基準点との関係をより良く表現する方法を考え、人体部位基準座標系というものを定めた。指示者の人体形状とともに動く人体部位上に直交座標系を設定し、その座標系上で表した指示直線群の解析を行うことで、ワールド座標系よりも指示基準点の観測が容易になる可能性がある。人体部位基準座標系の設定方法とともに、人体形状の位置や方位の測定に用いるモデルマッチングの方法についても述べる。

3.1 人体部位基準座標系の導入

今まで述べた仮定により人間には指示基準点が存在すると考えられるが、実際に確固たる点は知られていない。そこでより明確な指示動作の基準点を求めることが本研究の目的のひとつであるが、それは指示者の人体部位により異なって表現される座標系において一定の法則があると推測される。

外部のある固定された直交座標系としてワールド座標系を定めた場合、観測される人体部位の座標及び指示直線はワールド座標系において表される。しかしこのワールド座標系は指示動作とは無関係に定められたものであるから、指示動作と共に変化する人体部位の位置を反映する座標系ではない。そこで変化を反映したような座標系として人体部位基準座標系という新たな直交座標系を設定し、その座標系上で指示動作点、指示対象点を表して指示直線を定め、収束性を調べることにする。

人体部位基準座標系を設定する際には指示動作とともに位置や方向が変わる部位を選ばなければならないが、本研究ではその部位として胴体と腕と頭部の 3 つを選んだ。各基準座標系で重要な要素は軸の向きであり、原点位置の違いは平行移動の要素の



図 3: 3次元人体形状と人体モデルのマッチング

みであるから指示直線群の方向や距離とは関連がなく、どこに定めても構わない。よって各人体部位において測定の容易な点をひとつ選んでその座標系の原点とした。

- **胴体基準座標系** 胴体の正面の向きをひとつの軸とし、臍部を原点とする直交座標系。
- **腕基準座標系** 指示動作をする側の上腕において肩から肘への向きをひとつの軸とし、それが繋がっている肩を原点とする直交座標系。
- **頭部基準座標系** 顔の正面の向きをひとつの軸とし、それが繋がっている胴体の最上部を原点とする直交座標系。

3.2 人体部位の位置及び向きの計算

人体部位の位置や向きについては3次元人体形状を用いたモデルマッチングを行なう。まず原点 O_v を持つ直交座標で定義した仮想空間 V を用意し、これを実空間に設定したワールド座標と一致させる。この V 内に、指示動作の被験者の人体構造を単純化した仮想的な人体モデルを配置する。このモデルは頭部、胴体、腰、右上腕部、などの分類に基づいた部位の集まりとして構成され、各部位に関してその位置や向きを変更でき、同時に位置や向きを数値として計測できるようなボックス型構造を持つ。各ボックスでは内部にボクセルデータが入るとその数をカウントできるようになっており、総ボクセル数を評価関数として使用することができる。3次元人体形状と人体モデルのマッチングを図3に示す。人体の寸法は被験者によってまちまちであるが、あらかじめ各ボックスと対応する被験者の人体部位の大きさ

を測定しておき、その寸法に基づいた人体モデルを被験者ごとに作成することで、より被験者に近い適切な人体モデルを用意できる。

視体積交差法により得られる、指差し動作をしている被験者の人体に関するボクセルデータと、先ほどの人体モデルをマッチングさせることで人体部位の位置や向きを測定する。これをもとにして人体部位基準座標系を作成する。

3.3 指示直線収束性の評価

もし理想的な指示基準点があるとすると、全ての指示直線はその基準点を通っていると言える。このとき、逆に指示基準点と動作点を結んだ直線は必ず対象点を通る直線となるので、指示方向を決定する際に非常に有用である。この性質を考慮すると、異なった M 箇所に対して指示動作を行ない、その結果得られた人体部位基準座標系上での M 本の指示直線の交点はただ1点で表せ、それが指示基準点となる。もっとも、人間の指差し動作はそれほど厳密ではないので交点が1点にはならないが、少なくともある程度それに近い点がある。

そこで、収束性の評価の基準として距離を用いる。指示直線群中の異なる2直線を選んで、その距離を D とし、

$$D_{sum} = D_{sum} + D \quad (1)$$

を計算する。全ての直線の組み合わせでこれを求め、最終的な総和 D_{sum} を評価値とする。 D_{sum} の値は小さい方がよく収束しているとし、初期値は0である。

指示基準点の求め方としては、指示直線群中の異なる2直線を選び、そこに2直線間の距離が最小となる線分を引いて中点を H_m とする。全ての直線の組み合わせでこれを求め、各中点 H_m の座標を平均して指示基準点の座標とする。

これらを並行して行ない、 D_{sum} の値がより小さくなる人体部位基準座標系の存在を調べると共に、その時の指示基準点を求める。この点と、人体部位基準座標系で表された動作点を結べば人体部位基準座標系での指示方向が求められる。

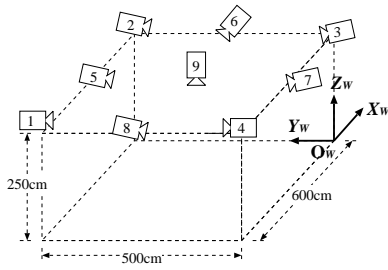


図 4: 実験空間

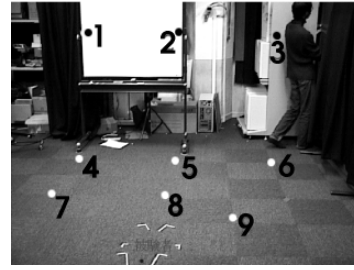


図 5: 実験 1 における指示対象点 9 点の配置

4 実験

この章では、実際に実験を行なった環境と実験条件について述べる。

4.1 撮影環境

実験空間内に固定した直交座標系としてワールド座標系 $O_W - X_W Y_W Z_W$ を図 4 のように設定した。ワールド座標系の原点を O_W とする。ワールド座標を取得したい 3 次元空間中の点を P とし、その座標値を (P_{Wx}, P_{Wy}, P_{Wz}) とする。天井にはカメラ 9 台を、記号 $C1, \dots, C9$ で表すように配置してある。

4.2 指差し動作実験の条件

指差し動作実験は 2 種類に分けて行なった。

- **実験 1** 男性 9 名、女性 1 名を被験者とし、複数の対象点に対する指差し動作の解析から、どの人体部位が基準座標系として適しているかを調べる実験を行なった。被験者は固定した椅子に着座した状態で指差し動作を行ない、全員右利きであった。指差し動作の指示対象点には、正面を向いて着座した被験者の腰の位置から前方、手の届かない距離空間内の点として 6 点を、指示者の視線の高さに対して同じ高さ及び下方で、その各高さにおいて視線より左方、正面、右方に配置した。足元の点として 3 点を床面上に、被験者の視線より左方、正面、右方に配置した。これら合計 9 点を設定し、全指示対象点は第 2 章で述べた方法であらかじめ 3 次元ワールド座標を測定しておいた。指示対象点の配置は図 5 に示してある。被験者はこれらの点を番号 1 から 9 の順に連続して指差しした。



図 6: 実験 2 の様子

- **実験 2** 右利きの男性 5 名を被験者とし、距離および方位が指示基準点に与える影響を調べる実験を行なった。対象点以外の実験環境は同じであるが、できるだけ視界に余分なものが入らないようにし、対象点は 9 点用意した。被験者の右肩を通る線上で、正面方向に対して左方、正面、右方においてそれぞれ指示者の右肩から距離のみ異なる 3 点、合計 9 点を設定した。図 6 に実験の様子を示す。

両実験に共通な被験者の指差し動作の制約として、

1. 利き腕の人差し指によって行なう。
2. 利き腕の肘、背筋、及び人差し指を伸ばした状態にした上で上半身は動かしてもよい。
3. 必ず指示対象点を見る。その際対象点が指先で隠れてはいけない。

という 3 つを設定した。2. に関し、肘を曲げた状態での指差し動作は自然な動作であるが、そのパターンの多様性から解析が非常に困難なため、本研究では見送ることにした。3. に関しては、もし指示対象点が指示動作点で隠れて見える場合、指示動作点、指示対象点、眼は一直線上に位置しているが、これは視線と指示直線が同一になってしまったことを意味

する。求めるべきものは視線ではなくて指示直線であるので、この制約を設けることによって視線と指示直線を分離することは重要である。

指差し動作中の被験者の様子を異なる9台のカメラで撮影し、9枚の画像を用いて指示動作点の座標を検出して、指示対象点と結んで指示直線を形成する。同時に視体積交差法により被験者の3次元人体形状を得る。こうして1人の被験者あたり1指示対象点につき指示直線1本と3次元人体形状を1形状、9指示対象点で合計指示直線9本、3次元人体形状9形状を得ることができる。得られた3次元人体形状は、第3章で述べたモデルマッチングで処理することにより被験者の3次元人体モデルに変換する。動作可能な部位を上半身としたので、モデルマッチングにおいては特に頭部、右腕部、胴体部のマッチングに重点をおいた。

4.3 結果と考察

初めに姿勢についての考察をする。指差し動作は着座姿勢及び前節の制約2.のもとで行なわれたので、被験者の腰及び足はほぼ動いていない。にもかかわらず指差し動作に支障はなかった。よって腰及び足は指差し動作に対する影響が無いと仮定できる。これを検証するため、着座姿勢による指差し動作実験の前に同じ環境において立位姿勢による実験も行なって比較したが、大きく異なる点はなかった。つまり人体部位において腰と足の位置や向きは指差し動作の重要な要素ではないといえる。このことと、姿勢維持が容易な点も考慮して、被験者が着座姿勢にて実験を行なったことは妥当であったといえる。

続いて実験1, 2ともに指示直線及び指示基準点を人体部位基準座標系上で解析した後、指示基準点を人体形状上で表す。

4.3.1 実験1

ワールド座標系における分析では、指示直線が収束する点は被験者の指示腕側にある肩から頭部にかけて位置している。視線や腕の位置から考えてこれは妥当なように見える。指差し動作に伴う座標系の移動を行っていないため評価値 D_{sum} の値が悪く、この収束地点を指示基準点とするのは危険であるが、傾向として各被験者間で共通の基準点の存在を期待できる結果となっている。

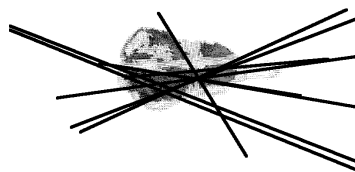


図 7: 実験 1: 胴体基準座標系で解析した指示直線群



図 8: 実験 1: 腕基準座標系で解析した指示直線群

次に胴体基準座標系、腕基準座標系、頭部基準座標系という3種類の人体部位基準座標系を定義した。これらの座標系で指示直線を解析した結果が図7, 8, 9である。

評価値 D_{sum} による指示基準点の評価では、腕座標系により得られた指示基準点の方がワールド座標系と比較して良かった。しかし元々肘を伸ばした状態での指差し動作において指示方向と腕の方向が似ているため、この結果は当然といえる。つまり評価値 D_{sum} に指示直線の分散度評価が含まれていなかったことが、問題であったといえる。新たな評価値の決定が必要となるが、指示方向と腕方向の類似性を良く表す評価は難しいため、これは今後の課題である。この点を考慮すると、やや評価値が悪いが



図 9: 実験 1: 頭部基準座標系で解析した指示直線群



図 10: 実験 1: 基準点の分布 (遠くから 1,2,3)

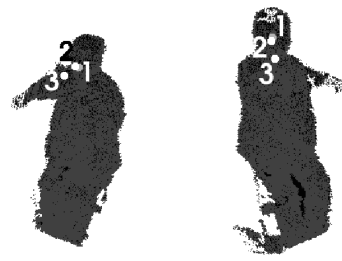


図 11: 実験 2: 距離による基準点 (遠くから 1,2,3)

適度に指示直線の広がりを持ちながら収束性も見られる, 胴体基準座標系を解析に用いるのが一番妥当と思われる. 頭部座標系は評価値が悪く, 特に指示対象点との関連も見られなかった.

続いて各基準座標系を使用して, 指示対象点を被験者から距離的に遠い 3 点, 中間の 3 点, 足元の 3 点それぞれについて別々に解析を行なった. その結果, 9 点同時に評価した時に比べて評価値がはるかに良くなった. これより距離の違いごとに収束点すなわち指示基準点があり, 被験者と指示対象点との距離が指示基準点に影響を与えることがわかる. このため, 胴体基準座標系を用いて距離及び方位を分けて考える実験 2 を行なった. 図 10 に実験 1 の胴体基準座標系で解析した基準点の分布を示す.

4.3.2 実験 2

- **解析 1** 指先から 2.4m の 3 点, 1.2m の 3 点, 0.1m の 3 点に分けて, 対象点と指示者間の距離が基準点に与える影響を調べる.
- **解析 2** 方位的に左 26.4 度の 3 点, 正面の 3 点, 右方 35.4 度の 3 点に分けて, 方位が指示基準点に与える影響を調べる.

の 2 種類の解析を行なった結果, 解析 1, 2 ともに 9 点全体で基準点を求めたときよりも収束度が非常に良くなり, 距離及び方位によって基準点に傾向があることがわかる. 図 11, 12 に, 実験 2 による指示基準点の分布を示す. 解析 1 では, 指示者と対象点間の距離が近くなるにつれて指示基準点が胴体の左から右へ, 体よりから対象点よりに移動する. 近い距離の 3 点のみ他と比べて下へ移動する. 解析 2 では, 対象点が指示者の左から右へ移動するにつれて

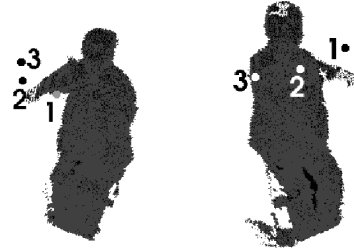


図 12: 実験 2: 方位による基準点 (左から 1,2,3)

指示基準点が胴体の左から右へ移動する. 右の 3 点のみ他と比べ体よりに移動する. 上下の変化は見られない. 結局これらを総合すれば,

人間の指差し動作における指示基準点は,

- 対象点が指示者に近付くと, 左から右, 体よりから対象点よりに移動する.
- 対象点が指示者の右へ行くと, 左から右に移動する.

いうことになる. これらは全て単調な変化であったが, 線形に表されるものではなかった. 次に人体形状の位置や方位を考察してみると,

距離に関しては,

- 対象点が指示者から遠い場合は指先をより対象点に近付けるためか, 腕が前方に, 胴体が左に向くように移動する.
- 逆に対象点が指示者にかなり近い場合は, 指示者が対象点から距離をおこうとして上半身が後方に傾く.

方位に関しては,

- 対象点が指示者の左にあるときは、腕とともに胴体が左に向くように移動する。
- 対象点が指示者の右にあるときは、腕のみが右に向くように移動し、胴体に動きは見られない。

といった傾向が見られた。これらの傾向も指示基準点の移動に影響していると思われるが、さらに詳細に調べるためにはより正確な人体モデル、および心理的な要因の観測が必要であると思われる。

5 結論

本研究では、人間が行なう動作に込められた意図がどのように伝達されるかを調べる上で特に指差し動作を取り上げた。人間の動作において方向を示す基準がとなる指示基準点の存在を仮定し、それがどこに存在するかを調べた。その際に指差し動作と共に変化する人体部位を考慮した人体部位基準座標系を3種類考えて解析を行なったが、特に確定された指示基準点を発見するには至らなかった。

さらに基準座標系の中で最も妥当と思われた胴体部位基準座標系を用いて、距離と方位の違いが指示基準点の位置に与える影響を調べた結果、指示対象点と指示者との位置関係により基準点が単調に移動していくことがわかった。しかし同時に、特に方位に関して、胴体部位基準座標系のみでは基準点を良く表せないことも明らかになった。指示直線が右肩から頭部にかけて特徴点のない空間を通る収束性を持ち、指示基準点が固定されずに移動を伴うことを考慮すると、指示基準点はひとつの人体部位座標系にのみ依存しているのではないと言える。すなわち、指示基準点を良く表せる座標系は複数の座標系からなり、距離及び方位ごとに異なっていると考えられる。

5.1 今後の課題

計算された指示基準点の評価として、指示基準点と指示動作点から指示直線を作り、指示者が意図した方向がその指示直線の先に存在するか、誤差ほどの程度かという追実験を行なう必要がある。

対象点としては9箇所の指差しを行なったが、これは十分な数とはいえない。空間中の点は最低2台のカメラで撮影すれば3次元座標を求められるの

で、指差し対象の配置を増やすことでさらに多くの情報を取得することができる。

人体の位置と方位は、視体積交差法によって得られた3次元人体形状と3次元人体モデルをフィッティングして測定した。しかし現在の人体モデルは精度が低いため、さらに細かく指差し動作の解析を行なっていくためにはより精度の高い正確な人体モデルが不可欠である。

指示動作点には人差し指の指先を選び、指差し動作の指示方向を示すものとして指示対象点と指示動作点を結んだ直線を指示直線と定義した。解析には全てこの指示直線を用いたが指示動作点として他の人体部位を用いて異なる指示直線を定義することも可能であり、より良い指示動作点及び指示直線、さらには直線でない可能性も含めて探索することが重要である。評価基準には、指示直線群の距離の和を評価値として、値が小さいほど収束性があるとした。しかし直線群の分散性を考慮していないことから適切な評価値とはいえず、指示動作点や指示直線と共に再考すべき点である。

なお、この研究は科学研究費補助金特定領域研究13224051の補助を受けて行った。

参考文献

- [1] Andrea Bottino and Aldo Laurentini. A silhouette based technique for the reconstruction of human movement. *Computer Vision and Image Understanding* 83, 79-95, 2001.
- [2] 吉田千里, 乾敏郎. ポインティング動作に基づく空間認知特性の検討. 信学技報, HCS2000-15, 2000.
- [3] 福本雅朗, 間瀬健二, 末永康仁. Finger-pointer: 画像処理を用いた仮想指示棒. *HCI91-12*, 1991.