

顔の部分構造を用いた 3次元顔認証の検討

A Study of 3D Face Recognition Using Facial Parts

早坂 昭裕[†]

柴原 琢磨[†]

伊藤 康一[†]

青木 孝文[†]

中島 寛[‡]

小林 孝次[‡]

[†] 東北大学 大学院情報科学研究科 〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05

[‡] 株式会社山武 〒 259-1195 伊勢原市鈴川 54

Akihiro HAYASAKA[†], Takuma SHIBAHARA[†], Koichi ITO[†], Takafumi AOKI[†],
Hiroshi NAKAJIMA[‡], and Koji KOBAYASHI[‡]

[†]Graduate School of Information Sciences, Tohoku University

6-6-05, Aramaki Aza Aoba, Sendai-shi 980-8579, Japan

[‡]Yamatate Corporation 54, Suzukawa, Isehara-shi 259-1195, Japan

アブストラクト 本論文では、顔の部分的な構造情報を利用した 3次元顔認証手法について検討する。現在までに研究されている 3次元顔認証では、顔全体の 3次元構造を用いて認証することが多いが、表情の変化などにより顔の表面構造が変化すると認証精度が低下してしまう。そこで、本論文では、顔全体の構造情報ではなく、顔の部分的な構造情報を利用する 3次元顔認証手法を提案する。性能評価実験を通して、表情変化の影響を受けにくい顔の部位について検証する。

Abstract This paper presents a three-dimensional (3D) face recognition method using facial parts. So far, the reported 3D face recognition methods assume the use of the entire facial structure. In these methods, the recognition accuracy may decrease when the facial structure is changed by facial expression. Addressing this problem, we propose a 3D face recognition system using 3D structure of facial parts. Through an experimental evaluation, we discuss the 3D structure of facial parts which is not affected by facial expression.

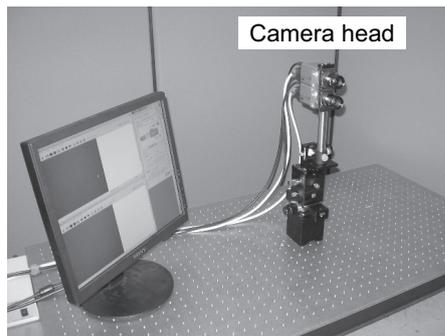
1 まえがき

ユビキタス情報社会における個人認証として、鍵・ICカード・パスワードを使った従来の認証に代わり、人間の身体的・行動的特徴を使ったバイオメトリクス認証が注目されている。従来の認証は、本人の記憶や所持を伴うため、「なくす」、「忘れる」、「盗まれる」という危険性がある。一方、バイオメトリクス認証は、本人の身体的・行動的特徴を用いるため、記憶や所持が不要であり、信頼性・安全性が非常に高い。バイオメトリクス認証に用いられる特徴には、指紋・顔・虹彩・掌形などがある。その

中で、利便性と受容性の高さから、顔を利用した認証技術のニーズが高まっている [1]。

現在までに研究されている顔認証技術は、顔の 2次元画像を利用する手法が一般的である。それに対して、近年では、顔の 3次元構造を用いた顔認証に関する研究が盛んに行われている [2]。3次元顔認証では、3次元スキャナを使って顔の 3次元情報（構造）を取得し、得られた構造間の類似度により認証する。そのため、照明・向きの変化に対して安定した認証が期待できる。これまで、筆者らの研究グループでは、受動型 3次元計測法であるステレオビジョンを利用した高精度 3次元計測システム [3] と、ICP (Iterative Closest Point) アルゴリズム [4] に基づく認証アルゴリズムを組み合わせた受動型 3次元顔認証システムを開発してきた [5],[6]。開発したシステムを用いることで、平常時（無表情）の顔において非常に高精度な認証が実現できるという結果を得ている [6]。しかし、表情など顔表面の構造が変化するような変動が加わった場合は、認証精度が低下してしまう。

これに対して、本論文では、これまで広く研究されている 3次元顔認証のように顔全体の構造情報を利用するのではなく、顔の部分的な構造情報を利用した認証手法を提案する。表情による顔表面の構造変化は、顔全体の構造が均等に变化しているのではなく、変化の大きい部位と小さい部位が混在していると考えられる。そのため、顔全体の中で表情による構造変化の大きい部位を認証に利用せず、構造変化の小さい部分のみを認証に利用することで、表情変化に対して従来の認証手法よりロバストな認証が実現できる可能性がある。そこで、これまで筆者らの研究グループで開発してきた受動型 3次元顔認証



(a)



(b)

[Specifications]

- Camera: Adimec-1000m/D
10 bits digital resolution
monochrome
- Image size: 1000x1000 pixels
- Lens: μ TRON, FV1520
15 mm focal length
- Image grabber: Coreco Imaging
X64-CL-DUAL-32M
- Measurement range: 400 ~ 600 mm
- Lighting: Ambient light

図 1: ステレオビジョンシステム : (a) システム構成, (b) ステレオカメラヘッドとその仕様

システムを改良し、顔の部分的な構造情報を利用して認証する 3 次元顔認証システムの開発を行う。そして、顔のさまざまな部分領域を用いた認証実験を行い、表情変化の影響を受けにくく、認証に適した顔の部位について検証する。

2 3 次元計測システム

筆者らの研究グループで開発した高精度受動型 3 次元計測システムについて述べる。

これまで報告されている 3 次元顔認証システムの多くは、顔の構造情報を取得するためにレーザー光やパターン光を照射する能動型 3 次元スキャナを利用している。能動型 3 次元スキャナを用いることにより高精度な顔の構造情報を容易に取得できるため、能動型 3 次元スキャナが 3 次元顔認証システムには広く利用されている。しかし、顔認証に能動型 3 次元スキャナを用いることによって生じる問題もいくつか存在する。例えば、レーザー光を利用する 3 次元スキャナの場合、計測対象である顔にレーザー光を照射することになるため、安全性の面で大きな問題がある。また、パターン光を利用する 3 次元スキャナの場合、パターン光が計測対象にはっきり映るように、自然光のない暗い環境で 3 次元計測を行わなければならないため、適用環境に大きな制約が生じてしまう。さらに、能動型 3 次元スキャナで 3 次元計測を行う際、ユーザーは数秒間静止していなければならないため、顔認証の最大の利点である非拘束性を活かした認証（歩行中の人物の認証など）が実現困難になる。

それに対して、筆者らの研究グループで開発した 3 次元顔認証システムでは、顔の 3 次元データを取得するために、図 1 に示すステレオビジョンによる受動型 3 次元計測システムを用いる。受動型 3 次元計測法では、計測対象にレーザー光やパターン光を照射する必要がなく、カメラのみを用いて 3 次元計測を行うことができる。そのため、受動型 3 次元計測法を利用することにより、安全

性や適用環境の制約など能動型 3 次元スキャナを利用することで生じるさまざまな問題が解消される。また、受動型 3 次元計測システムでは、カメラで撮影した画像を利用して 3 次元計測を行うため、計測対象が静止している必要がなく、歩行中の人物などの 3 次元計測も可能である。そのため、能動型 3 次元スキャナよりも受動型 3 次元計測システムの方がより顔認証に適した 3 次元計測装置であると考えられる。

受動型 3 次元計測法であるステレオビジョンを用いて顔認証に適した顔の 3 次元データを取得するためには、以下の点に注意しなければならない。

1. 顔の広範囲を 3 次元計測するために、ステレオ画像間の共通領域を可能な限り大きくする。
2. ステレオ画像間の密な対応付けを行うために、ステレオ画像間の幾何学的変形やオクルージョンを可能な限り小さく抑える。
3. 顔の構造の正確な 3 次元復元を行うために、ステレオ画像間の対応付けを可能な限り高精度に行う。

開発したシステムで用いているステレオカメラヘッドは、平行に配置された 2 台のカメラで構成されている (図 1 (b))。このカメラヘッドの大きな特徴は、その基線長が可能な限り短くなるようにステレオカメラを設置していることである。本論文では、基線長をカメラの大きさによって制限された値である 46 mm に設定している。顔認証に利用する 3 次元データは、個人が識別できるくらいに顔の構造的な特徴がよく現れていなければならない。そのためには、顔のできるだけ広い領域を密に 3 次元計測する必要がある。ステレオビジョンシステムのカメラ配置には、ナローベースラインとワイドベースラインが考えられるが、上記の点を考慮した場合、ワイドベースラインよりもナローベースラインのカメラ配置の方が適していると考えられる。また、2 台のカメラをナローベースラインかつ平行に配置することで、ステレオ画像間の幾何学的変形やオクルージョンを抑えることができる。以

上のようにステレオカメラヘッドを構成することで、ステレオ画像間の対応付けを比較的容易に行うことができるようになる。しかし、このようなナローベースラインのステレオビジョンシステムを使用するためには、再構成した 3 次元データの精度の低さの問題を克服しなくてはならない。

高品質な 3 次元データを得るためには、ステレオ画像間の対応付けを高精度かつ高密度に行うことが必要不可欠となる。そこで、本論文では、位相限定相関法 (Phase-Only Correlation: POC) を利用することにより、サブピクセルレベルの非常に高精度なステレオ画像対応付けを実現している [3], [7], [8]。位相限定相関法は、画像を 2 次元離散フーリエ変換することで得られる画像の位相情報を利用することで、2 枚の画像間のロバストな位置合わせや照合を実現する手法である。実験から、位相限定相関法に基づいた画像マッチング手法により、画像サイズが 100×100 ピクセルのときに 0.01 ピクセルの精度で 2 枚の画像間の位置ずれを検出できることを確認している。また、領域ベースのステレオマッチングで必要となる小領域画像のマッチングについても、画像ピラミッドを用いた粗密戦略を用いることにより、高精度なマッチングを実現している。実験から、この手法を用いることにより、画像サイズが 11×11 ピクセルのときにおよそ 0.05 ピクセルの精度で対応点間の位置ずれを検出できることを確認している。

図 1 に示されるナローベースラインのステレオカメラで撮影したステレオ画像に対し、上記手法を用いて対象物体の 3 次元形状を高精度かつ高密度に計測することが可能である。開発した受動型 3 次元計測システムを利用して平板の 3 次元計測を行ったところ、平板の平面性を RMS (Root Mean Square) 誤差で約 0.16 mm で計測可能であるという結果が得られている。また、開発した受動型 3 次元計測システムを利用して取得した人物の顔の 3 次元データを図 2 に示す。図 2 に示すように、受動型 3 次元計測により能動型 3 次元計測で取得した 3 次元データと同程度の高品質な 3 次元データが取得できていることが確認できる。顔の場合、およそ 4,000 点ほどの対応点を得ることができる。そのため、開発した受動型 3 次元計測システムを利用することで、一般的な能動型 3 次元スキャナを利用した 3 次元顔認証システムと同等程度の高精度な認証が実現できる。

3 3 次元顔認証アルゴリズム

開発した 3 次元顔認証システムでは、(i) ステレオカメラで顔画像を撮影し、(ii) 撮影した顔画像から顔領域を検出した後、(iii) 決定した計測領域の 3 次元形状を計測し、(iv) 取得した 3 次元データを用いて認証を行う。本節で

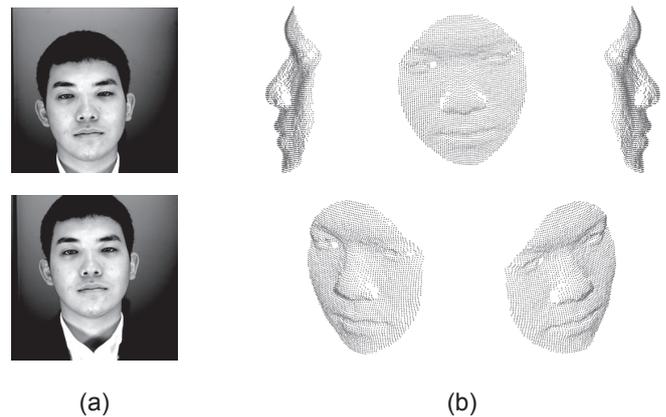


図 2: 開発した 3 次元計測システムを用いて取得した 3 次元データの例: (a) 撮影したステレオ画像, (b) 復元した顔の 3 次元データ

は、3 次元計測領域を自動で決定するために画像中の顔領域を検出する顔検出処理および得られた 3 次元データを用いて認証を行う照合処理について説明する。

画像から顔領域を検出する処理は、AdaBoost を用いた顔検出手法 [9] により自動で行う。AdaBoost は、逐次的に例題の重みを変化させながら異なる識別器を生成し、それらを組み合わせることでより精度の高い識別器を構成するブースティングと呼ばれる学習アルゴリズムの 1 つである。AdaBoost を用いた顔検出では、図 3 に示すような 4 種類の 2 値 (± 1) 矩形フィルタを画像に適用することで得られる Haar タイプの特徴量を利用する。入力画像内の任意の位置・サイズの正方形部分領域から Haar タイプの特徴量を抽出し、その領域に顔が含まれるかどうかの判定を行う。特定の領域内に顔が含まれているかどうかの判定は、AdaBoost アルゴリズムにより学習された識別器を利用して行う。AdaBoost アルゴリズムによる識別器の学習は、画像サイズ 24×24 ピクセルの顔画像および顔以外の画像を多数用いて行う。今回は、顔画像 200 枚と顔以外の画像 1,916 枚のサンプル画像を利用して識別器の学習を行った。図 3 の各フィルタは、画像サイズ 24×24 ピクセルの画像領域内の任意の位置に任意のサイズ・縦横比で配置することが可能であるため、そのフィルタのパターン総数は膨大なものになる。しかし、これらのうち顔検出に寄与しているフィルタはごく一部である。そのため、AdaBoost アルゴリズムを用いた学習で顔検出に有効なフィルタを選択しながら識別器を構成する。学習により選択された 2 値矩形フィルタの例を図 4 に示す。

AdaBoost アルゴリズムにより学習した識別器を用いて顔検出を行うと、顔付近の領域に検出結果が多数集中して現れるとともに、顔以外の領域が誤検出されてしま

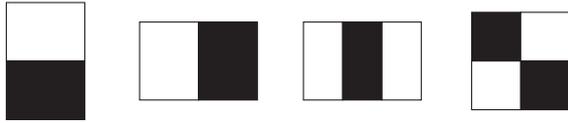


図 3: 4 種類の 2 値矩形フィルタ



図 4: 選択された 2 値矩形フィルタの例

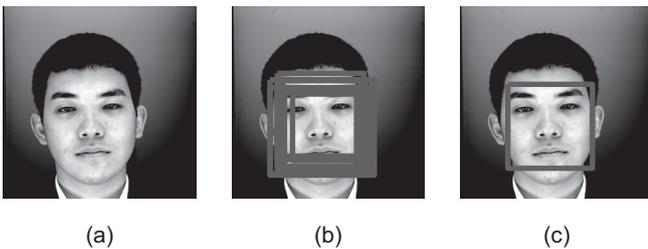


図 5: 顔検出の流れ: (a) 原画像, (b) 顔検出結果, (c) 統合した検出領域

う場合もある (図 5 (b)). この問題を解決するために, 顔検出処理を行った後, 簡単なクラスタリングにより検出領域の統合を行う. 検出された領域の中心座標の点群をクラスタリングし, 同一クラスに属する検出領域を 1 つにまとめることで検出領域を統合する. 基本的に, 正しい顔領域付近には検出領域が多数集中して現れるが, 誤検出領域付近には検出領域があまり集中しないという傾向がある. そのため, クラスタ要素の少ない検出領域を無視することで, 誤検出領域を除去することもできる. 一連の顔検出処理の流れを図 5 に示す.

AdaBoost アルゴリズムを用いた顔検出では, その性質上, 検出される領域は正方形となる. しかし, 検出した正方形領域をそのまま 3 次元計測領域とすると, 顔の輪郭よりも外側の部分が計測領域に含まれてしまい, 結果として得られる 3 次元データの品質が低下してしまう場合がある. そのため, 検出した正方形領域全体ではなく, 正方形領域を基準とした円形領域を 3 次元計測領域として利用する. 計測領域を円形にすることで, 顔の輪郭の外側が 3 次元計測されるのを防ぐ. 検出した顔領域と決定した円形の 3 次元計測領域および取得した顔の 3 次元点群データの例を図 6 に示す.

以上のように取得した顔の 3 次元データは, あらかじめ登録されている顔の 3 次元データと照合され, 同一人物であるか異なる人物であるかが判断される. 提案する照合アルゴリズムは, (i) 与えられた 2 つの 3 次元点群

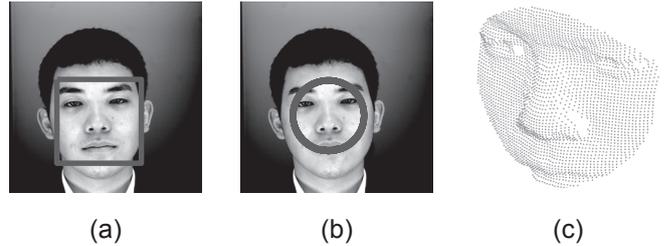


図 6: 顔の 3 次元データ取得の流れ: (a) 検出した顔領域, (b) 決定した 3 次元計測領域, (c) 取得した顔の 3 次元点群データ

	本人同士の場合	他人同士の場合
初期状態		
位置合わせの中間状態		
位置合わせ完了状態		

図 7: ICP アルゴリズムによる 3 次元点群データの位置合わせの様子

データのレジストレーションを行い, (ii) 2 つの 3 次元点群データ間の距離に基づいて類似度を評価する 2 段階の処理に分けられる. 3 次元データのレジストレーションは, 得られた 3 次元データの精度が十分に高いため, 非常にシンプルな手法である ICP (Iterative Closest Point) アルゴリズム [4], [5] を用いる.

ICP アルゴリズムは, 2 つの 3 次元データ間の距離が最小となるように回転・並進の操作を繰り返しながら位置合わせを行う手法である. この手法は, 学習や特徴点抽出などの前処理を特に必要としないため, もっとも簡単にレジストレーションを行うことのできるアルゴリズムである. レジストレーション処理の際には, 初めは少ない点数を用いて大まかな位置合わせを行い, 徐々に点数を増やして細かく位置合わせを行う粗密戦略を適用することにより処理時間の短縮を図っている. 本人同士のペアおよび他人同士のペアの 3 次元点群データの位置合わせの様子を図 7 に示す.

ICP アルゴリズムにより位置合わせが行われた 2 つの 3 次元点群データ (それぞれ M , M' とする) の間の類似度は, 点群間の平均距離によって評価する. まず, ドロネー三角形を用いて, 一方の 3 次元点群データ M' に面

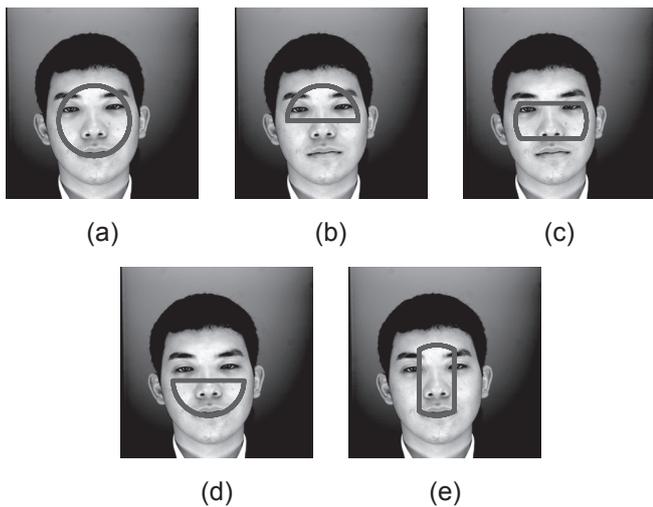


図 8: 3次元計測する顔部分領域の例: (a) 顔全体, (b) 目周辺, (c) 鼻と頬, (d) 口周辺, (e) 鼻のみ

を構築する．そして、 M と M' が重なっている領域内における M のすべての点に対して、 M' 上に構築した面との距離を計算する．2つの3次元点群データ間の距離は、各点対面の距離の平均値として定義する．この2つの3次元点群データ間の距離は、同一人物のデータ間では小さい値となり、異なる人物のデータ間では大きな値となるため、類似度の指標として利用することができる．3次元データ間の距離という顔の構造に基づく指標を利用することで、2次元情報である顔のテクスチャ情報を利用した認証よりも照明や姿勢の変化に対してロバストな認証が可能となる．

4 実験・考察

これまで行った実験を通して、開発した3次元顔認証システムを利用することにより、無表情の顔であれば非常に高精度に認証を行うことができるという結果を得ている [6]．しかし、わずかな表情変化により顔の表面構造が変化した3次元データがあると、本人同士でも3次元点群データ間の距離が大きくなってしまい、結果として認証精度が低下してしまう．そこで、決定した3次元計測領域全体ではなく、一部のみを3次元計測することにより得た顔の部分的な構造を利用し、認証精度がどのように変化するかを検証する．今回の実験では、円形の顔領域全体以外に、円形領域の上半分(目周辺領域)、円形領域の上下中央部分(鼻と頬を含んだ領域)、円形領域の下半分(口周辺領域)および円形領域の左右中央部分(鼻のみを含んだ領域)をそれぞれ用いて認証実験を行った．実際に3次元計測に利用したそれぞれの顔部分領域の例を図8に示す．

今回の実験では、24人の被験者に対して異なるタイミングで1人につき8回撮影することにより得た計192組

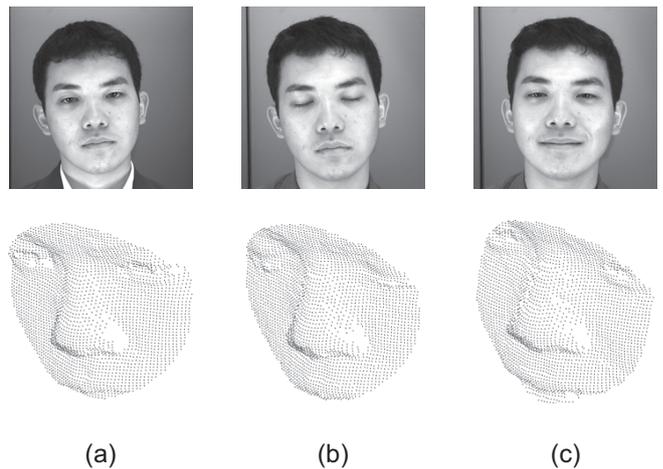


図 9: 実験に使用したデータベースの画像および3次元データの例: (a) 平常時(無表情)のデータ, (b) 目を閉じた状態のデータ, (c) 微笑んだ状態のデータ

(24人 × 8回)のステレオ画像データベースを使用した．8回の撮影のうち、1回は目を閉じて撮影し、2回は少し微笑んだ状態で撮影している．残りの5回は平常時の状態(無表情)で撮影した画像である(図9)．前髪がやや長い被験者に対しては、前髪で顔が隠れない程度に前髪をよけてもらった上で撮影を行っている．このとき、本人同士の照合の組み合わせは672組(24人 × ${}_8C_2$ 通り)、他人同士の照合の組み合わせは17,664組(${}_{192}C_2 - 672$ 通り)であり、合計で18,336組に対して認証実験を行った．

図10に、顔全体の領域およびそれぞれの顔部分領域の3次元データを利用した場合の本人照合ペアと他人照合ペアの距離の分布を示す．この分布から、認証に利用する顔の部分により3次元データ間の距離の分布の様子が異なっていることが確認できる．それぞれの場合におけるEER (Equal Error Rate: 本人拒否率と他人受入率が等しくなる値)は、図10に示した順に約8.04%、6.62%、11.43%、14.73%、5.06%となり、顔全体の3次元構造を利用した場合よりも3次元計測領域の上半分(目周辺領域)および左右中央部分(鼻のみを含む領域)を利用した場合の方が認証率が高いという結果が得られた．また、上下中央部分(鼻と頬を含む領域)や下半分(口周辺領域)を利用した場合、顔全体を利用した場合よりも認証率が低くなるということも確認できる．これは、少し微笑んで撮影した顔において無表情から表面形状が変化した部分は主に頬であったため、形状変化した頬の領域を認証に利用しない場合の方が顔全体を利用する場合よりも認証精度が高くなったと考えられる．また、3次元計測領域の上半分(目周辺領域)のみを利用して認証した場合、顔全体を利用した場合よりも認証精度が高かったことから、目が閉じている場合のような微笑みによる頬の形状変化

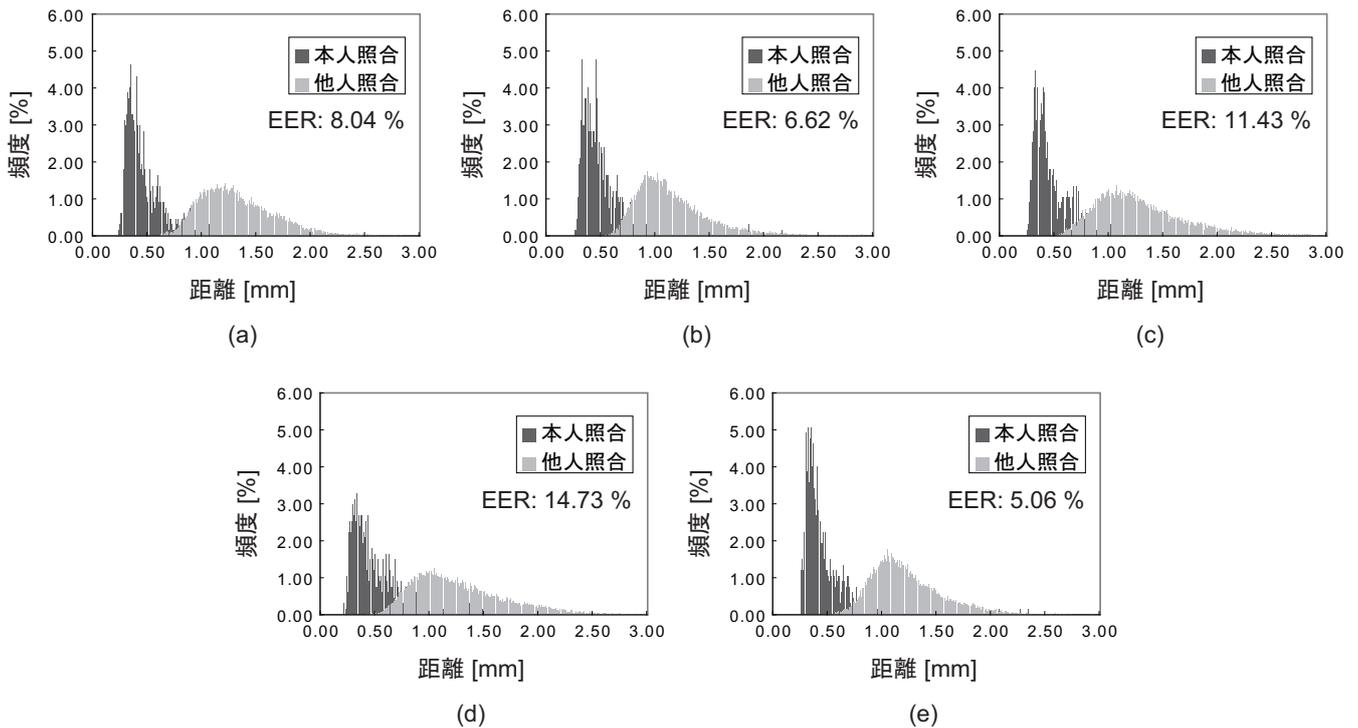


図 10: 3 次元データ間の距離の分布 : (a) 顔全体を利用した場合 , (b) 目周辺領域を利用した場合 , (c) 鼻と頬の領域を利用した場合 , (d) 口周辺領域を利用した場合 , (e) 鼻のみの領域を利用した場合

よりも小さい変化については認証精度に大きな影響を与えないということが確認できる。さらに、表情などにより本人であっても顔表面構造の異なるデータが含まれている場合、形状変化のある部分領域のみを利用して認証するよりも、たとえ形状変化のある部分を含んだとしても可能な限り広い領域を認証に利用した方が精度が高くなる傾向があることも確認できる。以上の結果から、顔全体の 3 次元構造を認証に利用するのではなく、顔の部分的な 3 次元構造を認証に利用することにより、表情変化によりロバストな認証が実現できる可能性があることが確認できた。

5 まとめ

本論文では、受動型 3 次元計測法であるステレオビジョンと ICP アルゴリズムに基づく認証アルゴリズムを組み合わせた受動型 3 次元顔認証システムを改良し、顔の部分領域の 3 次元構造を利用する認証手法を提案した。認証実験を通して、顔全体の構造ではなく顔の部分領域の 3 次元構造を利用して認証することで、より表情変化にロバストな認証が実現できる可能性があることを示した。

参考文献

[1] S. Z. Li and A. K. Jain, *Handbook of Face Recognition*, Springer, 2005.
 [2] A. Scheenstra, A. Ruifrok, and R.C. Veltkamp, "A survey of 3D face recognition methods," *Audio- and Video-*

Based Biometric Person Authentication (AVBPA 2005), Vol. 3546, pp. 891–899, July 2005.
 [3] M. A. Muquit, T. Shibahara, and T. Aoki, "A high-accuracy passive 3D measurement system using phase-based image matching," *IEICE Trans. on Fundamentals*, Vol. E89-A, No. 3, pp. 686–697, March 2006.
 [4] Z. Zhang, "Iterative point matching for registration of free-form curves," *Technical Report RR-1658, INRIA-Sophia Antipolis, Valbonne Cedex, France*, 1992.
 [5] N. Uchida, T. Shibahara, T. Aoki, H. Nakajima, and K. Kobayashi, "3D face recognition using passive stereo vision," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Image Processing 2005*, pp. II-950–II-953, September 2005.
 [6] A. Hayasaka, T. Shibahara, K. Ito, T. Aoki, H. Nakajima, and K. Kobayashi, "A 3D face recognition system using passive stereo vision and its performance evaluation," *Proc. of the 2006 IEEE Int. Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems*, No. WPM2-5-2, pp. 379–382, December 2006.
 [7] K. Takita, T. Aoki, Y. Sasaki, T. Higuchi, and K. Kobayashi, "High-accuracy subpixel image registration based on phase-only correlation," *IEICE Trans. on Fundamentals*, Vol. E86-A, No. 8, pp. 1925–1934, August 2003.
 [8] K. Takita, M. A. Muquit, T. Aoki, and T. Higuchi, "A sub-pixel correspondence search technique for computer vision applications," *IEICE Trans. on Fundamentals*, Vol. E87-A, No. 8, pp. 1913–1923, August 2004.
 [9] P. Viola and M. Jones, "Robust real time object detection," *Proc. of 2nd Int. Workshop on Statistical and Computational Theories of Vision – Modeling, Learning, Computing and Sampling*, pp. 1–25, July 2001.