

表情変化にロバストな 3 次元顔認証アルゴリズムの検討

A Study of a Robust 3D Face Recognition Algorithm under Varying Facial Expression

早坂昭裕[†] 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, [‡] 株式会社山武

Akihiro HAYASAKA[†] Koichi ITO[†] Takafumi AOKI[†] Hiroshi NAKAJIMA[‡]
Koji KOBAYASHI[‡]

[†] Graduate School of Information Sciences, Tohoku University

[‡] Yamatake Corporation

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OMETRICS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OMETRICS認証は、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OMETRICS認証に用いられる特徴には、指紋・顔・虹彩・掌形・筆跡などがある。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が注目されている [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を用いて認証する。3 次元の構造を利用することで、照明・向きの変化に対して安定な顔認証が期待できる。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いる [5, 6]。そして、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ことを、実験を通して確認している [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に認証精度が

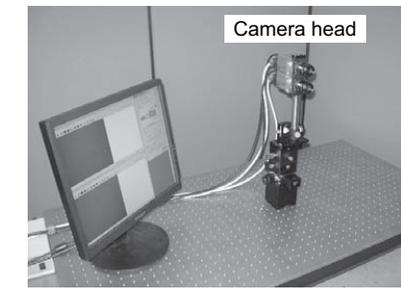
低下する問題がある。

これに対して、本論文では、表情が変わることで顔の表面構造が変化した場合でも正確に認証することができる高性能な 3 次元顔認証アルゴリズムを提案する。具体的には、まず、表情の異なる 3 次元データが入力された場合に従来の認証アルゴリズムで生じる問題について詳細な解析を行う。その解析結果に基づき、顔の中で表情変化の影響を受けにくい部分領域の 3 次元構造のみを利用して認証する 3 次元顔認証アルゴリズムについて述べる。そして、表情変化のある顔データを含んだデータベースを用いた認証実験を通して、提案手法を利用することにより、顔全体の構造を利用する従来手法よりも極めて高性能な認証が実現可能であることを示す。

2 従来の 3 次元顔認証アルゴリズムとその問題点

2.1 3 次元計測システム

これまでに筆者らの研究グループが開発したステレオビジョンを利用した受動型 3 次元計測システムの概観を図 1 に示す [5, 6]。本システムの大きな特徴は、受動型 3 次元計測法であるステレオビジョンを用いて 3 次元計測を行う点である。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、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。能動型は、物体の高精度な 3 次元データを容易に取得できるという利点があるが、安全性や利用環境の制限などの問題がある。それに対して、受動型 3 次元計測法は、これらのような問題が生じないため、人体計測、特に顔の計測に適した 3 次元



(a)



[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

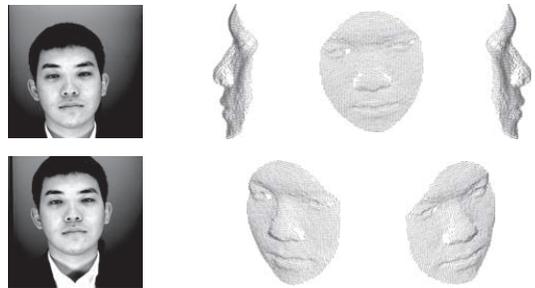
(b)

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

計測法である。しかし、一般的に受動型 3 次元計測法は能動型 3 次元計測法と比べて計測精度が低いため、受動型 3 次元計測法を利用する場合は、その計測精度の問題を解決しなければならない。そこで、筆者らの研究グループでは、位相限定相関法 (Phase-Only Correlation: POC) [3, 7, 8] を用いることで計測精度の問題を克服している。位相限定相関法は、画像の位相情報を利用した高精度な画像マッチング手法である。短基線長かつ平行にカメラを配置することでステレオ画像間のオクルージョンや幾何学的変形を抑え (図 1 (b)), 位相限定相関法を利用して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により、能動型 3 次元計測法に匹敵するほど高品質な 3 次元データを取得することができる。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、人物の顔の高品質な 3 次元データを取得することができる。顔の場合、およそ 4,000 点ほどの 3 次元点群を得ることができる。

2.2 従来の 3 次元顔認証アルゴリズム

これまでに開発した 3 次元顔認証アルゴリズムは、(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 AdaBoost [9] を用いて顔領域を検出し、



(a)

(b)

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

(iii) 決定した計測領域の 3 次元形状を復元し、(iv) ICP (Iterative Closest Point) アルゴリズム [4, 5] を用いて位置合わせをした 3 次元形状データ間の距離に基づいて認証を行う。AdaBoost とは、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。また、ICP アルゴリズムとは、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。(iv) において、ICP アルゴリズムにより位置合わせが行われた 2 つの 3 次元点群データの間の類似度は、点群間の平均距離によって評価する。

2.3 従来のアルゴリズムの問題点

これまでに開発した 3 次元顔認証アルゴリズムを利用することで、平常時 (無表情) の顔においては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、わずかに表情の変化した 3 次元データがデータベースに含まれているだけで、認証精度が低下してしまう。図 3 に、同一人物で表情の異なる顔データの例を示す。表情が異なる場合は、顔表面の構造も変化するため、本人同士であっても位置合わせ後の 3 次元データ間の距離が大きくなり、誤って他人と認証されてしまう。これは、ICP アルゴリズムが 2 つの 3 次元データはともに剛体であることを仮定して位置合わせを行っているためである。以上のような問題のため、現状のアルゴリズムでは、表情の異なるデータが含まれた場合、高い認証性能が得られないと考えられる。

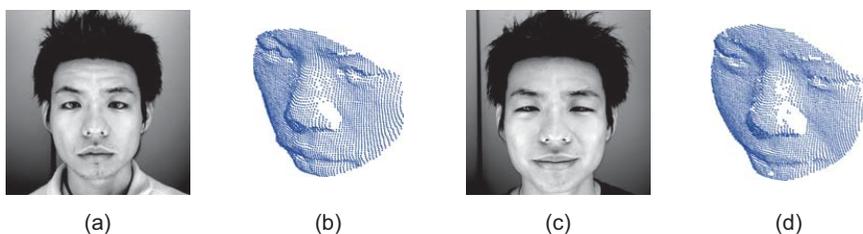


図 3: 表情の異なる顔データの例: (a) 無表情の顔画像, (b) 無表情の顔の 3 次元データ, (c) 微笑んだ顔画像, (d) 微笑んだ顔の 3 次元データ

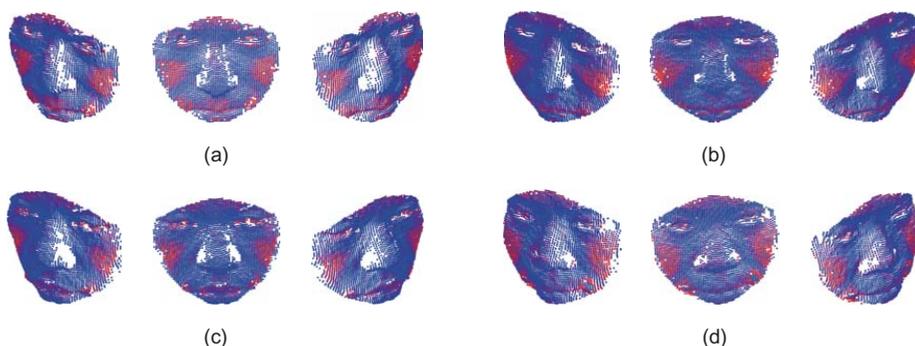


図 4: 同一人物における無表情と微笑の 3 次元データ間の距離分布 (青色が距離の小さい部分であり, 赤色に近づくにつれて距離が大きいくことを示している): (a) 人物 A の場合, (b) 人物 B の場合, (c) 人物 C の場合, (d) 人物 D の場合

2.4 現状の問題点に対する解析結果

表情が変化した顔でも正確に認証するために, まず, 表情変化による顔表面構造の変動について調べる. 図 3 より, 表情による顔表面構造の変化は, 顔全体が均一に変化しているのではなく, 一部の領域が局所的に変化していると考えられる. そこで, 開発した 3 次元顔認証システムを用いて作成したステレオ顔画像データベースの中で特に表情変化が大きい 4 名について, 無表情と微笑の 3 次元データ間の距離の分布を解析する. 図 4 にその結果を示す. 同一人物の無表情と微笑の 3 次元データを ICP アルゴリズムにより位置合わせし, そのときの各点の 3 次元データ間の距離を色で表示したものである. 3 次元データ間の距離が小さい点を青色とし, 距離が大きくなるにつれて色が赤色に近くなるように表示している. どの人物においても特に頬の部分の点群が赤くなっている. また, 人により変化の度合は異なるが, 口周辺部の点群も赤くなっている. 一方で, それ以外の目や鼻の部分は, 表情変化の影響を受けにくいことが確認できる. 以上の解析結果から, 目や

鼻周辺の部分領域の 3 次元構造のみを使って認証することにより, 従来の認証手法よりも高性能な認証が実現できると考えられる.

3 提案する 3 次元顔認証アルゴリズム

目および鼻周辺の構造のみを認証に利用するためには, 顔全体の 3 次元構造からそれら部分領域を正確に抽出しなければならない. 3 次元構造から目や鼻の位置を特定するのは困難であるため, 2 次元画像から目や鼻の位置を特定する. 一般に, AdaBoost アルゴリズムに基づく顔検出手法 [9] を利用して画像中から顔領域を検出することが多い. しかし, 検出される顔領域は, 実際はそれほど安定には求まらず, 場合により位置や大きさが多少異なる. また, 撮影のタイミングによっては画像面内の顔の回転 (やや首を傾げているような状態) が含まれていることもあるため, 回転を考慮して目や鼻を検出する必要がある. そこで, 撮影状態が変化したとしても同一の位置に検出される顔の特徴点 (目の両端など) を検出し, 得られた特徴点を利用して目や鼻の領域を決

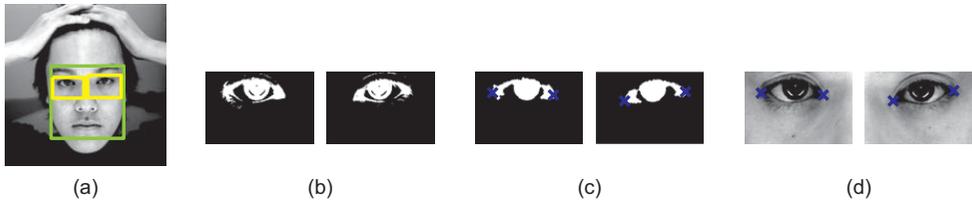


図 5: 両目それぞれの両端点の検出過程：(a) 顔および目の検出結果，(b) 検出した目領域を輝度補正後に二値化した画像，(c) (b) にモルフォロジカルフィルタを適用しクラスタリングした画像（マークは検出した特徴点），(d) 原画像上の特徴点

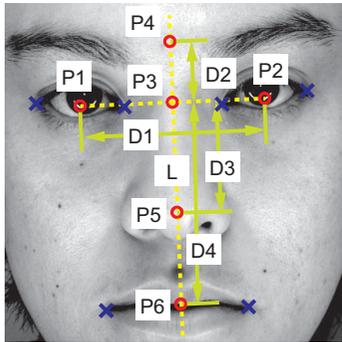


図 6: 人体計測モデルに基づく顔特徴点

定する。以下では、正確に目や鼻の領域を決定するための顔特徴点抽出と提案する顔認証アルゴリズムについて述べる。

3.1 顔特徴点抽出

顔のテクスチャ情報から正確に特徴点として抽出できる場所はあまり多くない。そのような顔特徴点は、左右の目の両端と口の両端くらいである。これに対し、基準となる特徴点の位置関係さえ正確に得られれば、人体計測モデルに基づいて機械的に各部位の位置をおおよそ推定することができる [10]。

本論文では、左右の目の両端の点を検出し、基準として利用する。顔全体の中から両目の両端点を直接検出するのは困難であるため、目周辺領域だけに探索領域を絞ることで、特徴点を容易にかつ精度良く検出する。目周辺領域の検出には、顔検出と同様に AdaBoost アルゴリズムを用いる。AdaBoost アルゴリズムに基づく顔検出手法により顔領域を検出し、その後、検出した顔領域の上部周辺に対して目検出処理を適用することで、検出精度の向上を図る。顔および目の検出結果を図 5 (a) に示す。左右の目の周辺領域が検出されたら、それらの領域に対して

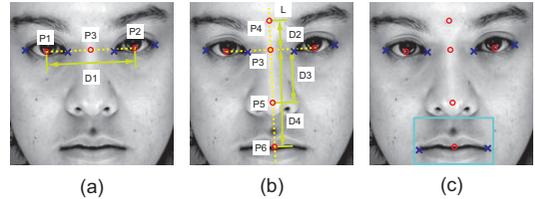


図 7: 他の顔特徴点の検出過程：(a) 目の中央および両目の中間点，(b) 眉間・鼻先・口の中心点，(c) 口の両端点

輝度補正を行い、二値化することで目のみをおおよそ抽出する (図 5 (b))。このままではノイズなどが多く含まれているため、モルフォロジカルフィルタにより収縮および膨張させた後、クラスタリングにより最大となる領域のみを残す (図 5 (c))。その後、残った領域の左右両端の点を検出し、目の両端点とする (図 5 (c), (d))。

両目の両端点が検出できれば、左右の目それぞれの中央点が求められ、中央点間の距離を基準として、他の顔特徴点 (図 6 を参照) の位置を以下のように求めることができる [10]。

Step 1: 検出した両目の両端点の中点をそれぞれ目の中央点 $P1, P2$ とする。そして、 $P1$ と $P2$ の中点を両目の中間点 $P3$ とする。また、 $P1$ と $P2$ の間の距離を $D1$ とする (図 7 (a))。

Step 2: $P1$ と $P2$ を結ぶ線分の垂直二等分線を L とし、 L 上で $P3$ からの距離が $D2$ となる点を眉間の点 $P4$ とする。同様に、 L 上で $P3$ からの距離が $D3, D4$ となる点をそれぞれ鼻先の点 $P5$ 、口の中心点 $P6$ とする。ここで、 $D2, D3, D4$ は、それぞれ $D2 = 0.33 \times D1, D3 = 0.60 \times D1, D4 = 1.10 \times D1$ とする。なお、 $P4$ は $P3$ よりも上側に、 $P5$ および $P6$ は $P3$ よりも下側になるように決定する (図 7 (b))。

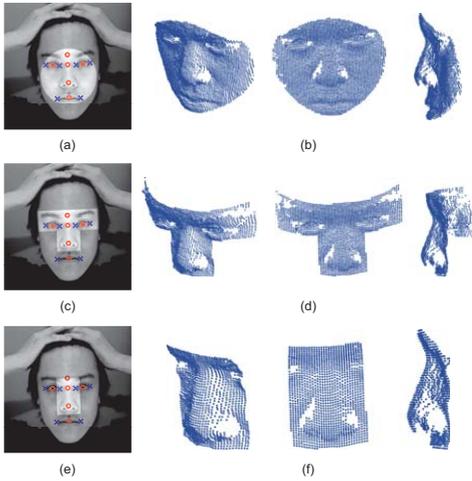


図 8: 顔特徴点を基準として決定した 3 次元計測領域と 3 次元データの例: (a) 顔全体領域, (b) (a) の 3 次元データ, (c) 目と鼻の領域, (d) (c) の 3 次元データ, (e) 鼻のみの領域, (f) (e) の 3 次元データ

Step 3: P_6 を基準としたウインドウを開き, 得られた領域に対して目の両端点を抽出した手法と同様の処理により, 口の両端点を検出する (図 7 (c)).

以上の処理により, 顔の主要な特徴点を抽出した後, それらの特徴点をもとに 3 次元計測領域を決定する. 本論文では, 抽出したすべての特徴点を含む正円領域を顔全体と定め, 表情変化の影響が小さい目と鼻を含んだ T 型領域と, 鼻のみの I 型領域の 2 種類を考える. 顔特徴点を基準として決定した 3 次元計測領域とその 3 次元データの例を図 8 に示す. T 型領域および I 型領域の幅は, 目および鼻が完全に含まれ, かつ頬や口があまり含まれないように定める. これらの領域は特徴点の位置によって決定されるため, 仮に顔がやや傾いて撮影されたとしても, その傾きに応じて目と鼻の領域を適切に設定することができる.

3.2 提案アルゴリズム

以上のまでに述べた顔特徴点抽出を含め, 本論文で提案する 3 次元顔認証アルゴリズムは, 以下のよう処理の流れとなる.

Step 1: AdaBoost アルゴリズムに基づく顔検出手法により, 画像中からおおよその顔の位置を検出する.

Step 2: 検出した顔領域をもとに前述した手法により顔特徴点を抽出する.

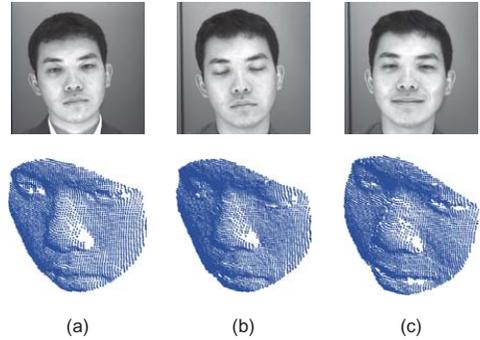


図 9: 実験に使用したデータベースの画像および 3 次元データの例: (a) 平常時 (無表情) のデータ, (b) 目を閉じた状態のデータ, (c) 微笑んだ状態のデータ

Step 3: 抽出した顔特徴点を基準に, 表情変化の影響が小さい部分領域を 3 次元計測領域として決定する.

Step 4: 決定した 3 次元計測領域に基づいて 3 次元復元を行い, 目や鼻のみの 3 次元データを取得する.

Step 5: 取得した 3 次元データを用いて, ICP アルゴリズムに基づく 3 次元データ間の距離算出手法により認証を行う.

上記の処理のうち, **Step 1** および **Step 4**, **Step 5** の処理は, 従来手法と同様である. 提案手法では, 顔特徴点を利用することにより精密に顔部分領域を抽出し, 表情変化にロバスタな 3 次元顔認証を行う.

4 実験・考察

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 (24 人 \times 8 回) のステレオ画像データベースを使用する. 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, 前髪で目が隠れない程度に前髪をよけた上で撮影している. 本人同士の照合の組み合わせは 672 組 (24 人 \times ${}_{8}C_2$ 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う. また, 本実験では, 顔全体の 3 次元データを利用した場合 (従来手法) と目および鼻を含んだ T 型領域を利用した場合, それから鼻のみの I 型領域を利用した場合の 3 通りの認証精度を比較する.

認証精度の評価として, 今回はバイオメトリクス

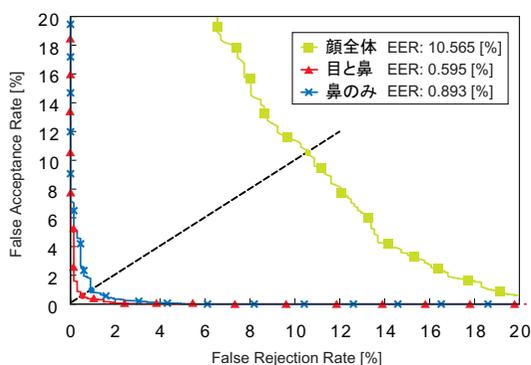


図 10: ROC 曲線

認証の性能評価手法として一般的な ROC (Receiver Operating Characteristic) 曲線を用いる。ROC 曲線とは、横軸に本人拒否率 (False Rejection Rate: FRR), 縦軸に他人受入率 (False Acceptance Rate: FAR) をとった曲線であり、この曲線が原点に近くなればなるほど認証性能が高いことを示す。また、本人拒否率と他人受入率が等しくなったときの値を EER (Equal Error Rate) といい、性能評価の指標としてよく用いられる。EER が小さいほど認証性能が高いということを表している。

図 10 に、今回の実験で得られた 3 種類の ROC 曲線を重ねて示す。認証に利用する顔の部分により認証精度が大きく異なっていることが確認できる。それぞれの認証における EER は、顔全体の構造を利用した従来手法の場合が約 10.565 % であり、顔の部分構造のみを利用する提案手法のうち、目と鼻の領域を利用した場合が約 0.595 %、鼻のみを利用した場合が約 0.893 % である。表情変化のあるデータが含まれている場合、顔全体の 3 次元構造を利用するよりも、表情変化による影響が小さい部分の 3 次元構造のみを利用した方が認証性能が 10 倍以上向上するという結果が得られた。また、鼻のみの 3 次元構造を利用するだけで、本人・他人をおよそ 99 % の精度で識別することができるがわかる。以上の実験を通して、提案手法が従来手法と比べて極めて高性能な認証を実現できることを示すとともに、非常に重要な知見を得ることができた。

5 まとめ

本論文では、顔の表情変化にロバストな 3 次元顔認証アルゴリズムを提案した。表情の変化により顔の 3 次元構造がどのように変化するかを解析し、表

情が変化しても構造が変わらない目や鼻周辺の領域を認証に用いた。表情変化を含んだデータベースを使った認証実験を通して、提案手法を利用することにより、顔全体の構造を利用する従来手法と比べて極めて高い認証性能を得ることができることを示した。

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. 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, Sept. 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. Symp. on Intelligent Signal Processing and Communication Systems, no.WPM2-5-2, pp.379-382, Dec. 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, Aug. 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, Aug. 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.
- [10] A.S.M. Sohail and P. Bhattacharya, "Detection of facial feature points using anthropometric face model," Proc. of the IEEE Int. Conf. on Signal-Image Technology & Internet-Based Systems, pp.656-665, Dec. 2006.