

位相限定相関法に基づく高精度ステレオビジョンシステムと 3次元顔照合への応用

内田 尚秀[†] 柴原 琢磨[†] 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

E-mail: †aoki@ecei.tohoku.ac.jp

あらまし 本稿では, ステレオビジョンを用いて顔の3次元形状を受動的に計測し, この3次元データを照合することによって個人の識別を行うバイオメトリクス認証システムを提案する. 現在までに報告されている3次元顔照合技術は, 顔の3次元データを取得するために能動型3次元計測法を使っている. しかし, 能動型3次元計測法は, パターン光やレーザスキャンなどを用いるため, 人間を計測する応用には必ずしも適さない. 一方, 受動型の3次元計測法としてステレオビジョンがあるが, 計測精度が低く実用的ではなかった. 本稿では, サブピクセル精度でステレオ画像間の視差を推定することができる位相限定相関法 (Phase-Only Correlation: POC) を用いた高精度受動型3次元顔形状計測システムを提案した. 顔の3次元形状に基づくバイオメトリクス個人認証システムを構築するために, 受動型3次元計測技術を用いた初めての試みを報告する.

キーワード 位相限定相関法, ステレオビジョン, 3次元計測, 3次元顔照合, バイオメトリクス, 個人認証

High-Accuracy Stereo Vision System Based on Phase-Only Correlation and Its Application to 3D Face Matching

Naohide UCHIDA[†], Takuma SHIBAHARA[†], Takafumi AOKI[†],

Hiroshi NAKAJIMA^{††}, and Koji KOBAYASHI^{††}

[†] Graduate School of Information Sciences, Tohoku University, Sendai-shi 980-8579, Japan

^{††} Yamatake Corporation, Isehara-shi 259-1195, Japan

E-mail: †aoki@ecei.tohoku.ac.jp

Abstract This paper proposes a face recognition system using passive stereo vision to capture three-dimensional (3D) facial information. So far, the reported 3D face recognition techniques assume the use of active 3D measurement for 3D facial capture. However, active methods employ structured illumination or laser scanning, which is not desirable in many human recognition applications. A major problem of using passive stereo vision system for 3D measurement is its low accuracy. Addressing this problem, we have newly developed a high-accuracy 3D measurement system based on passive stereo vision, where Phase-Only Correlation (POC) is employed for sub-pixel disparity estimation. This paper presents the first attempt to create a practical 3D face recognition system on the basis of a passive 3D measurement technique.

Key words phase-only correlation, stereo vision, 3D measurement, 3D face matching, biometrics, personal authentication

1. まえがき

バイオメトリクス個人認証における最も重要な技術の1つとして, 顔認証技術が注目されている [1], [2]. 現在までに報告されている顔認証技術に関する研究の多くは, 照合に2次元画像

を用いている. しかし, この場合は, 顔の向きや光源の変化に強く影響を受けるため, 撮影環境によっては照合精度が大きく低下する問題がある. また, 顔画像から目や鼻などの特徴をロバストに抽出することは困難な問題である. 近年, 顔の向きや光源の変化による影響を受けにくいことから, 顔の3次元データ

を用いた認証技術が注目を集めている [3]~[5]. しかし、現在のところ 3 次元顔認証技術に関する研究の報告はまだ少なく、分野としても発展途上の状態にある. 3 次元顔認証システムの開発を困難にしている主な原因としては、顔の 3 次元データを取得するために、高価な装置が必要になることがあげられる.

現在までに報告されている 3 次元顔認証技術では、顔の高精度な 3 次元データを得るために、能動型 3 次元計測法を用いている. しかし、パターン光やレーザスキャンを使用する能動型 3 次元計測法は、人体への影響が懸念されるため、顔認証システムへの応用を想定した場合、必ずしも望ましい手法とは言えない. これに対して、本稿では、(i) 顔の 3 次元データを取得するために受動型 3 次元計測法を用いるとともに、(ii) 3 次元データの照合のために ICP (Iterative Closest Point) アルゴリズムを用いた 3 次元顔認証システムを提案する.

顔の 3 次元計測にステレオビジョンを用いた場合、得られる 3 次元データの精度の低さが重大な問題になる. このため、ステレオビジョンを用いた 3 次元顔認証システムに関する研究は、筆者らが知る限りでは報告されていない. この問題を解決するために、サブピクセル精度でステレオ画像間の対応付けを行うことができる位相限定相関法 (Phase-Only Correlation: POC) [6], [7] を利用した高精度なステレオビジョンシステムを開発した. 開発したステレオビジョンシステムは、カメラから 500 mm の位置にある顔の 3 次元形状を 0.6 mm の RMS (Root Mean Square) 誤差で計測することができる. 顔の 3 次元形状に基づくバイオメトリクス個人認証システムを構築するために、受動型の 3 次元計測技術を用いた初めての試みについて報告する.

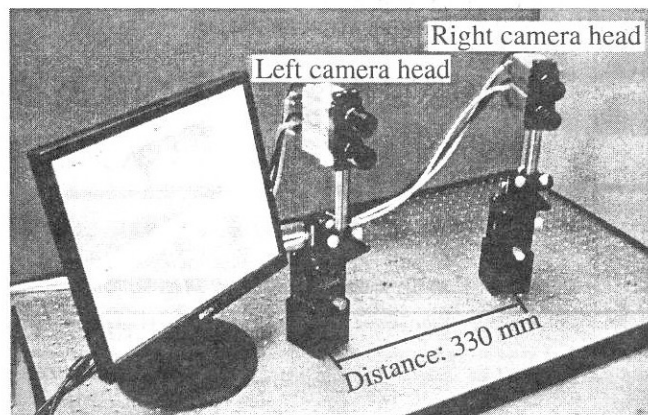
2. 受動型ステレオビジョンによる高精度 3 次元計測

開発した受動型ステレオビジョンシステムを図 1 に示す. このシステムは、2 つのステレオカメラヘッドから構成されている. それぞれのカメラヘッドは平行に配置された 2 つのカメラで構成されている. 左カメラヘッドは顔の左側を計測し、右カメラヘッドは右側を計測する. このカメラヘッドの大きな特長は、ステレオカメラの基線長 (2 つのカメラの距離) を可能な限り短くしていることである. 本システムでは、基線長を 46 mm に設定しているが、これは純粋にカメラのシャーシのサイズに起因した制限である.

一般に顔照合に適したカメラ配置を決定するには、基線長に関して次の 2 つのことを考慮しなければならない.

- 短い基線長のカメラ配置は、2 つのステレオ画像の間の幾何学的変形が少なく、ピクセルごとに対応付けを行うことができる. しかし、長い基線長のカメラ配置に比べて、再構成した 3 次元データの精度がきわめて低いという欠点がある.
- 長い基線長のカメラ配置は、高精度な 3 次元計測を可能にするが、自動的な対応点探索がきわめて困難である. 得られる対応点は、エッジなどの特徴点のみに限られる. このことは、3 次元顔認証システムにはあまり望ましくない.

これらのことは、ステレオビジョンが 3 次元顔認証システム



(a)

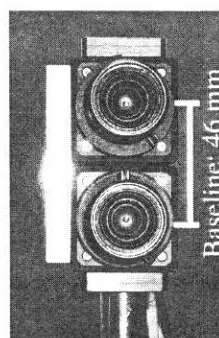


Image size: 1000 x 1000 pixels
 CCD: Adimec-1000m/D
 10 bits digital resolution
 monochrome
 Lens: μ TRON, FV1520
 15 mm focal length
 Image grabber: Coreco Imaging
 X64-CL-DUAL-32M
 Measurement range: 400 ~ 600 mm
 Lighting: ambient light

(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

に適さないとされる主な理由でもある. 本システムでは、図 1 (b) に示す短い基線長のカメラ配置を用いる. この場合、精度がきわめて低いという問題を克服しなくてはならない. この問題を解決するために、位相限定相関法 (Phase-Only Correlation: POC) を利用して、サブピクセル精度でステレオ画像間の対応付けを行う手法を新たに開発した (詳細については [6] [7] 参照). 以下に開発した手法の特長を示す.

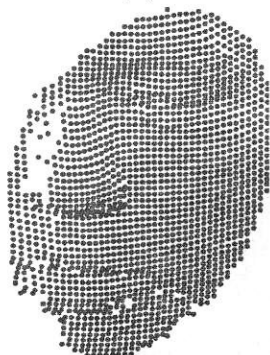
● 高精度画像マッチング

ステレオ画像間の高精度な対応付けにおいて必要とされるサブピクセル精度の画像マッチング手法として、位相限定相関法を用いる. 一般的に、SAD (Sum of Absolute Differences) を用いた画像マッチング手法よりも、2 次元離散フーリエ変換 (2 次元 DFT) の位相情報を用いた手法の方が良いレジストレーション結果が得られる [8]. 論文 [6] において、筆者らは、位相情報に基づくサブピクセル画像マッチング手法 (位相限定相関法) の高性能化手法を提案している. 具体的には、(i) 相関ピーク値の位置をサブピクセル精度で推定するために解析的ピークモデルに基づく関数フィッティングを行うとともに、(ii) 2 次元 DFT における不連続性の影響を低減するために窓関数を適用し、(iii) エイリアシングやノイズの影響を除去するスペクトルの重み付け手法を提案している. 本稿で提案するステレオビジョンシステムにおいては、これらすべての手法を適用することにより、高精度化を達成している. この結果、画像サイズが 100 x 100 ピクセル程度の場合、2 つの画像間の位置ずれを



(a)

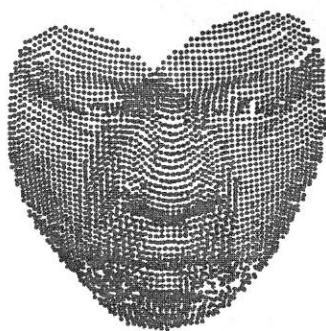
(b)



(c)



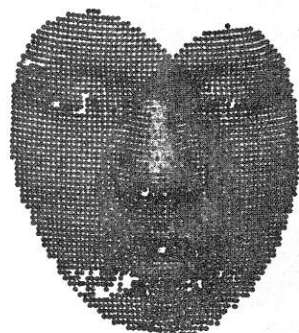
(d)



(e)



(f)



(g)



(h)

図2 受動型ステレオビジョンシステムによって得られた顔の3次元データ: (a) 左カメラヘッドによるステレオ画像, (b) 右カメラヘッドによるステレオ画像, (c) 顔の3次元再構成データ(左カメラヘッド), (d) 顔の3次元再構成データ(右カメラヘッド), (e)(f) 統合した3次元データ(左カメラヘッド+ 右カメラヘッド), (g)(h) テクスチャマッピングした3次元データ.

0.01 ピクセル程度の精度で推定できることを実験的に確認している。

● サブピクセル対応点探索

ステレオ画像間のピクセル対応付け問題では、 33×33 ピクセルのような小さい画像ブロックの高精度なマッチングが必要となる。しかしながら、位相限定相関法に基づいた画像マッチング手法の精度やロバスト性は、画像サイズが小さくなるにつれ低下する。この問題を解決するために、筆者らは、小さい画像ブロックに対してもレジストレーション精度を向上させるための手法を提案している [7]。具体的には、(i) ピクセルレベルの対応点探索のために画像ピラミッドを用いた coarse-to-fine 探索を採用するとともに、(ii) 対応点の座標をサブピクセル精度で検出するためにサブピクセル窓合わせ法を提案している。これにより、例えば、大きさが 11×11 ピクセルの画像ブロックを用いた場合、0.05 ピクセル程度の精度でステレオ画像の対応点の座標を推定できることを実験的に確認している。

● システムパラメータ

構築したステレオビジョンシステムにおいて実際に用いたパラメータは以下の通りである。(i) マッチングブロックのサイズ: 33×33 ピクセル (2次元ハニング窓を適用), (ii) スペクトル重み付け関数: 2次元ガウス関数 ($\sigma^2 = 0.5$), (iii) サブピクセル視差推定のためのフィッティング点数: 5×5 , (iv) coarse-to-fine 探索のための画像ピラミッドの階層数: 6, (v) サブピクセル窓合わせの最大反復回数: 5, (vi) カメラキャリブレーションは $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ のチェッカーパターンを用いて Zhang [9] の手法により行った。

● 誤対応点の除去手法

さらに、ステレオ画像の対応付けにおける誤対応点を除去するための手法を用いる。画像中のある基準点に対する他の画像の対応点を探索する際には、基準点を中心とする画像ブロックと注目する対応点の候補を中心とした画像ブロックの位相限定相関関数を計算する。その際に得られる相関ピークの大きさをその対応づけの信頼性の指標として用いる。具体的には、位相限定相関関数の正規化した相関ピーク値が特定の値より小さければ、その候補点を除去する。なお、本システムでは、相関ピーク値が 0.3 以下の点を対応点の候補から除去する。また、位相限定相関関数の相関ピーク値を用いた手法とともに、ステレオ画像の対応付けにおける誤対応点を除去するための手法として、エピソード幾何拘束を利用した手法を用いる。

以上に示した技術によって、3次元顔認証システムのためのステレオビジョンシステムとして、図1(b)に示した短い基線長のステレオカメラヘッドを用いることが可能となり、また、完全に自動的な処理で、きわめて高精度に人間の顔を3次元再構成することが可能となった。構築したステレオビジョンシステムにおいては、それぞれのカメラヘッドから得られたステレオ画像に対して、約 2000 ~ 2500 点の対応点が自動的に抽出される。従って、2つのカメラヘッドから得られる顔の3次元データは、合計 4000 ~ 5000 点の点群により構成される。構築したステレオビジョンシステムの精度を評価するために、木目模様の平板の平面性を計測する実験を行った。その結果、カメ

ラからの距離が 500 mm の位置にある平板の平面性を, RMS (Root Mean Square) 誤差 0.6 mm で計測した。

構築したステレオビジョンシステムによって得られた顔の 3 次元データを図 2 に示す。図 2 (a), (b) は, それぞれ左カメラヘッドと右カメラヘッドによって撮影したステレオ画像である。ステレオ画像 (a), (b) から再構成された顔の 3 次元データを図 2 (c), (d) に示す。図 2 (e), (f) は, 顔の左側 (c) と右側 (d) を統合して得られた顔の全体的な 3 次元データである。図 2 (g), (h) は, それぞれ (e) と (f) に対応するテクスチャをマッピングした顔の 3 次元データである。

3. 3 次元顔照合

1 組の顔の 3 次元データが与えられたとき, 提案する顔照合アルゴリズムは, (i) 与えられた 2 つの 3 次元データの位置合わせを行い (図 3), (ii) 適切な距離尺度に基づいて 2 つのデータ間の類似度を評価する。構築したステレオビジョンシステムによって得られる顔の 3 次元データの精度が十分に高いため, (i) における顔の 3 次元データの位置合わせ手法として, シンプルな ICP (Iterative Closest Point) アルゴリズム [10] を用いる。

2 つの顔の 3 次元データの一方を M とし, もう一方を M' とする。 M, M' が与えられたとき, ICP アルゴリズムによる位置合わせは以下の通りに行われる。

(1) M に含まれるすべての点 m_i について, 最も近い点 m'_i を M' の中から探し, 得られた m_i と m'_i の組を対応点の組とする。

(2) 現在の対応関係を基にして, 2 つの 3 次元データ M, M' 間の最適な運動パラメータ (回転 R , 並進 t) を最小 2 乗法により推定する。

(3) 上記 (2) で得られた R と t を用いて, M' を座標変換する。

(4) R と t の変化が十分に小さくなり, 収束するまで上記 (1) ~ (3) を繰り返す。

以上に示した ICP アルゴリズムの処理において, 計算を高速化するために coarse-to-fine 戦略を適用する。ICP アルゴリズムの初期段階では, 少ない数の対応点 (全点数の 1/32) を使用して大まかな位置合わせを行い, 処理が進むにつれて徐々に対応点の数を増やし, 細かく位置を合わせる。

ICP アルゴリズムによって位置合わせを行った 2 つの顔の 3 次元データ M と M' の類似度は, 点対面の距離によって評価する。まず, 点対面の距離を計算するために, 2 次元のドロネー 3 角形分割を利用して, M' に 3 角パッチによる面を生成する。さらに, 位置合わせによって重なった M と M' の共通領域を求め, そこに含まれるすべての点 $m_i (\in M)$ に対して, M' に生成した面までの距離 d_i を計算する。このとき得られるすべての点対面の距離 d_i の平均値として, 2 つの顔の 3 次元データ間の距離を定義する。

4. 実験結果・考察

18 人の被験者のデータを用いた照合実験によって, 提案し



(a)



(b)



(c)

図 3 ICP アルゴリズムによる 3 次元データの位置合わせ: (a) 初期位置, (b) 繰り返し回数 26 回, (c) 繰り返し回数 98 回。

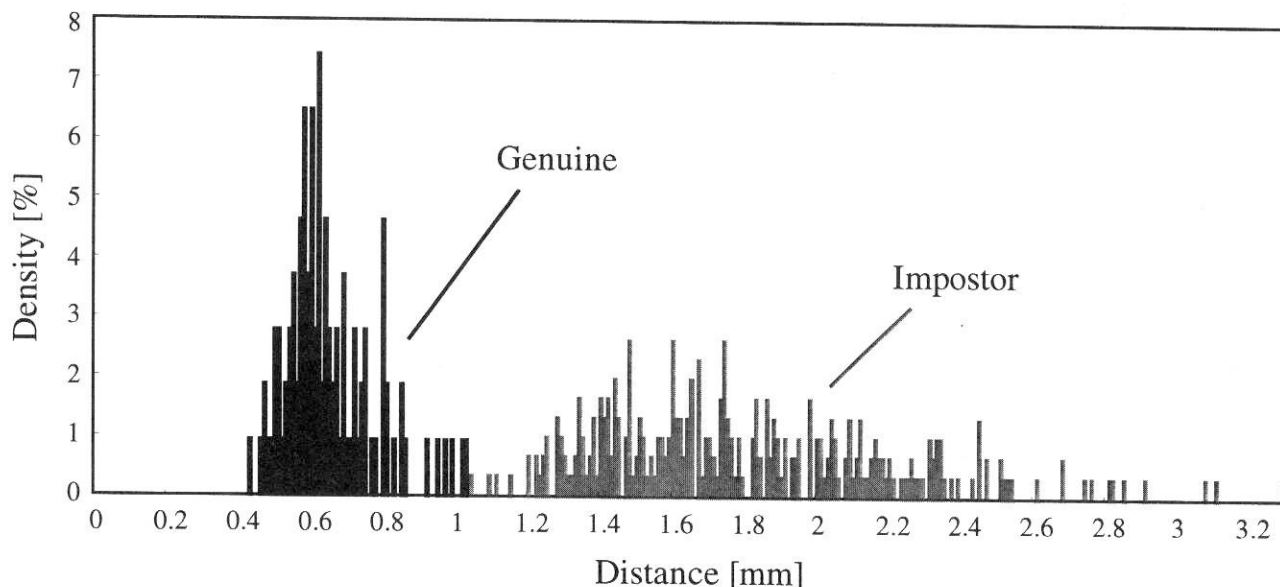


図4 距離の分布.

表1 本人の組み合わせ (Genuine), 他人の組み合わせ (Impostor) の距離の平均値, 最大値, 最小値

	平均値	最大値	最小値
Genuine	0.661 mm	1.021 mm	0.429 mm
Impostor	1.839 mm	3.280 mm	1.034 mm

た受動型 3 次元顔認証システムの性能を評価する. この実験では, ステレオビジョンシステムによって, 普通の表情の被験者の顔を異なるタイミングで 1 人につき 4 回撮影し, 顔の 3 次元データを再構成する. 従って, 合計 72 個 (18 人 \times 4 回) の顔の 3 次元データが得られる. 提案したシステムの評価を行うための照合実験は, 本人の組み合わせ (Genuine) 108 組 (18 人 \times ${}_4C_2$ 通り) と他人の組み合わせ (Impostor) 306 組 (18 人 \times 17 通り) からなる, 合計 414 組のデータを使って行った. 照合実験の結果, 本人の組み合わせに対して得られた距離の分布と, 他人の組み合わせに対して得られた距離の分布は, 図 4 のようになった. この分布から, 本人の組み合わせと他人の組み合わせの距離の分布が明確に分離していることが確認できる. また, 表 1 は, 本人の組み合わせと他人の組み合わせに対して, 距離の平均値, 最大値, 最小値を示している. 表 1 から, 距離を用いて本人の組み合わせと他人の組み合わせを分けるためのしきい値として, 1.025 ~ 1.030 mm 内の値を選ぶことができる. もし, 位置合わせを行った 2 つの顔の 3 次元データ間の距離が, 設定したしきい値よりも大きな値であれば, それらのデータは他人のデータであると考え. もし, 位置合わせを行った 2 つの顔の 3 次元データ間の距離が, 設定したしきい値よりも小さな値であれば, それらのデータは同一人物のデータであると考え. 以上により, 今回の実験については, 100 % の認証を実現することができた.

5. まとめ

本稿では, (i) 顔の 3 次元データを取得するために受動型ステ

レオビジョンを使用するとともに, (ii) ICP (Iterative Closest Point) アルゴリズムに基づく照合手法を用いた 3 次元顔認証システムを提案した. これは, 受動型 3 次元計測技術を用いて 3 次元顔認証システムを実現した初めての試みである. 実験結果を通して, 幅広い応用に適用可能な安価で簡便な顔認証システムを構築できることを示した.

文 献

- [1] W. Zhao, R. Chellappa, A. Rosenfeld, and P. J. Phillips, "Face recognition: A literature survey," *UMD CfAR Technical Report CAR-TR-948*, 2000.
- [2] S. Z. Li and A. K. Jain, *Handbook of Face Recognition*, Springer, 2004.
- [3] X. Lu and A. K. Jain, "Deformation analysis for 3D face matching," *Proc. 7th IEEE Workshop on Applications of Computer Vision*, pp. 99-104, January 2005.
- [4] V. Blanz and T. Vetter, "Face recognition based on fitting a 3D morphable model," *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 25, No. 9, pp. 1063-1074, September 2003.
- [5] C. Beumier and M. Acheroy, "Automatic 3D face authentication," *Image and Vision Computing*, Vol. 18, No. 4, pp. 315-321, 2000.
- [6] K. Takita, T. Aoki, Y. Sasaki, T. Higuchi, and K. Kobayashi, "High-accuracy subpixel image registration based on phase-only correlation," *IEICE Trans. Fundamentals*, Vol. E86-A, No. 8, pp. 1925-1934, August 2003.
- [7] K. Takita, M. A. Muquit, T. Aoki, and T. Higuchi, "A subpixel correspondence search technique for computer vision applications," *IEICE Trans. Fundamentals*, Vol. E87-A, No. 8, pp. 1913-1923, August 2004.
- [8] C. D. Kuglin and D. C. Hines, "The phase correlation image alignment method," *Proc. Int. Conf. on Cybernetics and Society*, pp. 163-165, 1975.
- [9] Z. Zhang, "A flexible new technique for camera calibration," *Technical Report MSR-TR-98-71*, Microsoft Research, December 1998.
- [10] Z. Zhang, "Iterative point matching for registration of free-form curves," *Technical Report RR-1658*, INRIA-Sophia Antipolis, Valbonne Cedex, France, 1992.