

位相相関に基づく顔認証アルゴリズム

石川さゆり, 渡邊恵理子, 小館香椎子
日本女子大学理学研究科 数理・物性構造科学専攻

(2007年10月26日受理)

要旨 これまで我々は、光相関演算の代表的な VanderLugt Correlator (VLC) の原理を用い、高速・高精度な顔認証システム FARCO (Fast Face Recognition Optical Correlator) を構築している。さらに FARCO システムのボトルネックであった「デジタルデータベース」の部分に「光情報データベース」としてホログラフィックな蓄積を可能とする全光型相関顔認証システム S-FARCO の開発により、100 万 faces/s での顔照合の実現を目指している。FARCO システムの特徴は、人物検索や空港での本人認証といった大規模顔データベースでの高速認証において有利な点で、これまで特に相関演算スピードの向上に向けて研究開発を行ってきた。FARCO システムは、処理速度により3つの使用形態がある。本稿では、位相情報を用いた FARCO の認証アルゴリズムをソフトウェアで構築した FARCO ソフトウェアを用い、高精度な相関演算フィルタの設計を行う。顔認証の要求のひとつには、低解像度 (例えば 64×64 pixels) の顔画像においても精度良く認証可能なことがあげられる。そこで、相関フィルタを新たに設計し最適化を行った結果、CPU (Central Processing Unit) 3 GHz、メモリ 2 GB のスペックを有する PC において、入力顔画像サイズ 64×64 pixels で相関演算時間 10 ms 以内を実現した。さらに、その応用として実用化を目指した汎用性の高いオンライン型の携帯電話顔認証システムとして、3ヶ月にわたる実運用実験を行い、期間平均本人認証率 98.0% を達成した。最適化した FARCO ソフトウェアにより汎用的な顔認証応用が可能で、例えば、Web 上に氾濫する画像や、管理カメラから取得した低解像度の画像においても、高精度に認証可能である。

キーワード：光相関, 位相相関, 顔認証システム, 特徴強調位相型相関, オンライン, 携帯電話

1. はじめに

2010年にユビキタス社会の実現を目指した u-Japan 政策の展開により、インターネットの利用は年々増加の一途をたどり、ネットワークを介して様々な情報のやり取りを可能とするシステム開発が進められている。いつでも・どこでも・誰でも自由にインターネット上のコンテンツを閲覧、利用することが可能なユビキタス社会において、親しみやすく非接触で安易な撮影が可能となる“顔”は、銀行でのログイン、顔認証インターフォン、また、空港や街中での大規模人数の中での人探しをはじめとしたセキュリティ応用だけではなく、類似芸能人検索、デジタルカメラなどでの顔認証としてエンターテイメント応用としても様々なアプリケーションが展開されている。このような背景のもと、より汎用的に利用が可能な

高精度顔認証システムが求められている。

これらの要求に対し、本研究室では、光の高速・空間並列処理とデジタル処理の双方のメリットを活かしたハイブリッド高精度顔認証システム^{1,2)}を提案し、構築を行ってきた。1964年に考案された光相関演算の代表的な原理である VanderLugt Correlator (VLC)³⁾の原理を用い、2004年には顔認証エンジン FARCO (Fast Face Recognition Optical Correlator) を構築してきている。この FARCO では、光位相情報を利用し精度を高めた相関フィルタの設計と、DMD などの高速デバイスを活かしたシステム構成および顔画像に適した前後処理により、高精度 (本人拒否率, 他人受け入れ率, EER が共に 0%) かつ高速化 (1,000~15,000 faces/s) を実現している。引き続き現在では、超高速 (1,000,000 face/s) 演算が可能な同軸型光相関顔認証システム S-FARCO の実現をめざし、検討を行っている⁴⁾。

これらのシステムにおける顔画像判別の高精度化は、

Contribution No.: MP 07-1

位相情報を利用した相関演算に基づいている。FARCOの高精度な位相相関演算アルゴリズムを FARCO ソフトウェア⁵⁾として用い汎用性を高めた。数人～数十人を対象とした小規模データベースにおいては、ソフトウェアとしての演算でも数秒オーダーで実行することが出来、十分に利用可能である。

本論文では、FARCO ソフトウェアの位相情報を用いた高精度フィルタの設計と、相関演算時間・認証精度などの向上に向けた検討、および、その応用として実用化を目指した汎用性の高いオンライン型の携帯電話顔認証システムとしての構築について示す。

2. 光相関演算システム「FARCO」

光相関演算システム FARCO は、光のフーリエ変換の原理を用い周波数空間で位相情報を利用した位相型マッチフィルタリングを行っている。画像の位相情報には重要な情報が含まれているため、周波数空間において位相情報を利用した位相相関演算は、認証精度が向上することが知られている⁶⁾。

2. 1. 顔画像における位相情報

実空間上で表現する2次元画像は振幅の情報を持っており、強度で表現することが出来る。この実空間上の顔画像はフーリエ変換により、周波数空間上で振幅と位相に分離することが出来る。

ここで、位相画像とは、 $f(x, y)$ のフーリエ変換画像 $F(v_x, v_y)$ を、絶対値の分布 $|F(v_x, v_y)|$ および位相分

布 $\phi_F(v_x, v_y)$ を使って、

$$F(v_x, v_y) = |F(v_x, v_y)| \exp[-j\phi_F(v_x, v_y)]$$

と表したとき、位相に関する項だけをフーリエ逆変換した画像

$$f\phi(x, y) = F^{-1}\{\exp[-j\phi_F(v_x, v_y)]\}$$

で定義される。

$F(v_x, v_y)$ は振幅であり物体の強度を表し、 $\phi_F(v_x, v_y)$ は位相であり物体の位相情報を表している。

ここで、2名の顔画像を用いて、位相情報の重要性を Fig. 1 で説明する。実空間上の振幅画像 A と B のフーリエ変換像をそれぞれ作成する。次に、周波数空間における A の振幅画像と、B の位相画像の積をとり、逆フーリエ変換を行った結果、B の顔画像が再現されていることがわかる。同様に、周波数空間上で A の位相画像と B の振幅画像の積を逆フーリエ変換することで A の顔画像が再現されることがわかる。これらのことから、画像のフーリエ変換により得られる強度と位相の情報では、位相情報が顔画像全体の情報を持っている事が確認された。従って、認証には振幅情報に比べて位相情報が重要⁷⁾であるといえる。

2. 2. FARCO の顔認証アルゴリズム

光相関演算システム FARCO では、位相情報を用いて、高精度な認証を行っている。FARCO のアルゴリズムは Fig. 2 に示すように、①顔画像の前処理⁸⁾、②顔画像の

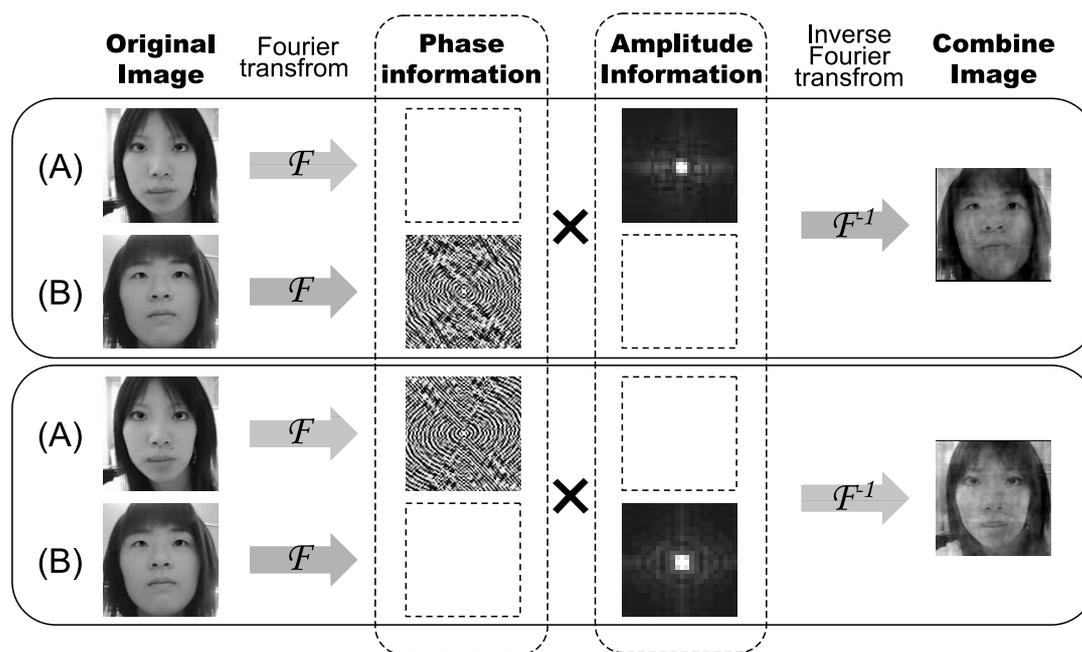


Fig. 1. Phase information of facial image.

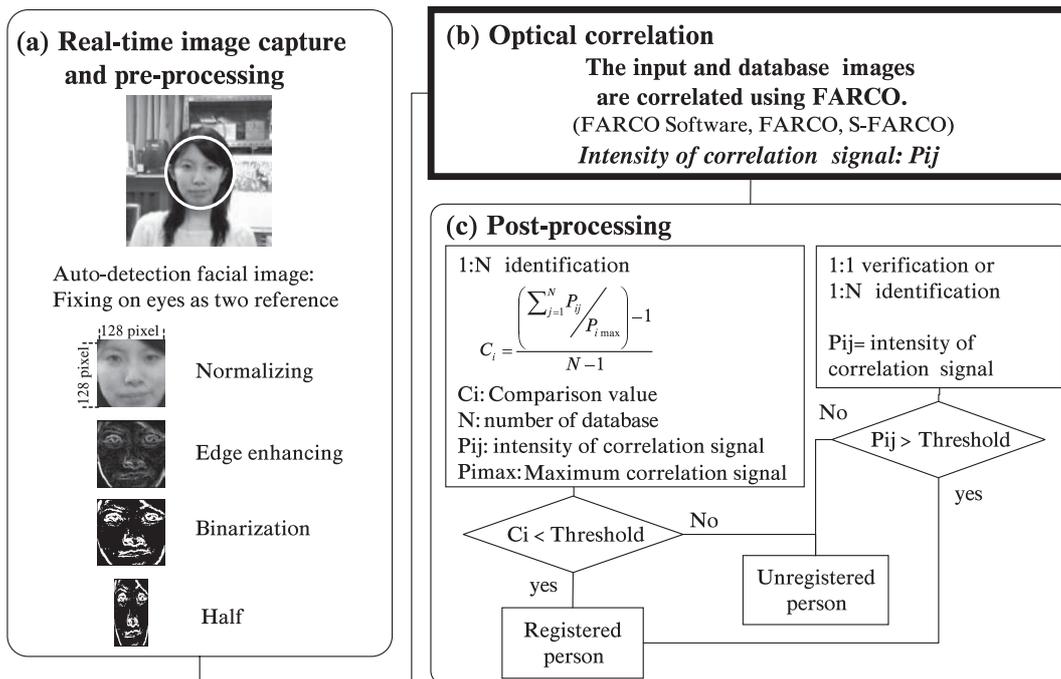


Fig. 2. Our hybrid facial recognition system: flow-chart representation.

Table 1. Optical vs software correlation: comparison of parameters.

| | Quantization | Image size | 0th-order image |
|---------------------------------------|--------------|----------------|--------------------------|
| Optical correlation (FARCO) | 1 bit | 128×128 pixels | Not overlapped |
| Software correlation (FARCO Software) | 32 bit | Minimum | Either overlapped or not |

相関演算, ③後処理の3部構成である。まず, 撮影された顔画像の①前処理を行う。前処理を施すことで, 光相関演算用に最適化された画像となる。入力顔画像は, 両目2点を基準に切り出しサイズの正規化, グレースケール化, エッジ抽出, 2値化, x軸の横方向に1/2のサイズ縮小という前処理を施す⁹⁾。その後, ②相関演算(マッチトフィルタリング)を行う。前処理を施した顔画像をフーリエ変換し, 位相成分を抽出して, あらかじめ登録しておいたデータベースマッチトフィルタパターンでフィルタリングを行う。その後, 逆フーリエ変換を行い最終的に出力された強度相関信号の値を取得する。③後処理では相関演算により取得した強度相関信号値を用い, 比較値(Comparison-Value)を算出する。比較値が, あらかじめ実験により設定しておいたしきい値より低ければ本人と認証され, 高ければ他人と識別される。

3. 顔認証ソフトウェアとしての相関マッチトフィルタの設計

位相情報を利用した光相関演算は, レーザ光を用いた

マッチトフィルタリングとして超高速に計算ができる。マッチトフィルタは, レーザ光とレンズにより実空間に配置した2次元の画像を, 光速でフーリエ変換することが可能であるという特徴を持っており, この性質を利用して顔画像の相関演算を行う。本研究室ではこれまで, FARCOの光相関演算用に, マッチトフィルタを設計してきた。そして, FARCOの顔認証アルゴリズムを汎用的に利用が可能なソフトウェアでFARCOソフトウェアとして構築した。さらにTable 1に示すように, ソフトウェアとしての相関演算スピードにおけるマッチトフィルタを最適設計した。提案する相関演算を特徴強調位相型相関と名付け, 光相関演算の一種である光結合変換相関(Joint Transform Correlation: JTC)と位相限定相関, そして特徴強調位相型相関手法との比較を行った。

3. 1. 光結合変換相関(JTC)

JTCの原理について簡潔に示す。相関演算を行うべき前処理を施した画像2枚を並列に配置する。その画像をフーリエ変換し, 再び逆フーリエ変換を行う。すると,

2つの画像の相関演算に応じた強度相関信号が出現する。この信号の値に応じて本人・他人の識別を行う。我々のグループでも光相関演算を利用した顔認証システムの相関演算は JTC の原理に基づいて構築してきており、実験やシミュレーションにより高精度な顔認証結果を得ている¹⁰⁾。

3. 2. 位相限定相関法¹¹⁾

2つの画像が与えられたとき、それぞれの画像の2次元フーリエ変換の振幅を1で規格化し、積をとった位相スペクトルの逆フーリエ変換が位相限定相関関数と定義される。位相限定相関の $g(x, y)$ は、画像 $f(x, y)$ と画像 $h(x, y)$ をフーリエ変換し、次式のように表される。

$$g(x, y) = \mathfrak{F} [F(v_x, v_y) \cdot H^*(v_x, v_y)]$$

ここで、 $*$ は共役を表し、 \mathfrak{F} は、フーリエ変換演算子である。 $F(v_x, v_y)$ は $f(x, y)$ のフーリエ変換であり、 $H^*(v_x, v_y)$ は $h(x, y)$ で表される相関フィルタとなる。また、 v_x および v_y は、周波数空間において2つのベクトル成分を表している。フィルタの $h(x, y)$ は $H^*(v_x, v_y)$ で定義される。振幅成分を1で規格化し、 $1/H(v_x, v_y)$

として掛け合わせたものを我々は位相限定フィルタと定義した。

$$H_p(v_x, v_y) = \exp \{-i \phi(v_x, v_y)\}$$

ここで、 p は位相 (phase) を表す。

3. 3. 特徴強調位相相関

FARCO システムの相関演算は、位相限定相関に基づいている。その相関フィルタは光相関演算の0次光と最後に出力される強度相関信号が重なることを回避し、かつ、周波数空間上でのキャリア周波数が、顔画像特徴の低周波領域を含むように設計してきた^{12, 13)}。このフィルタには、フーリエ変換時の振幅の周波数分布を平均化し、高周波成分を強調する工夫を加えている。

上記に示した3種類の相関手法を用いて、相関演算時間の削減を考慮した、最適画像サイズの検討を行った。実験に用いた顔画像サイズは、Fig. 3に示すように、(a) 128×64 pixel, (b) 64×32 pixel, (c) 32×16 pixel の3種類となる。使用した顔画像は、Fig. 4に示す世界的な評価に利用されている顔画像データベース¹⁴⁾ 30人分とした。入力画像1枚に対し、データベース画像1枚で相関演算を行い、エラーレイトを求めた。

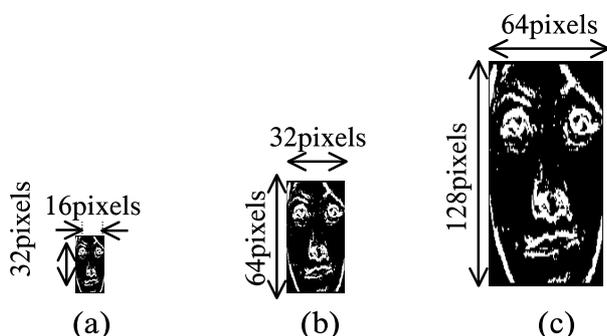
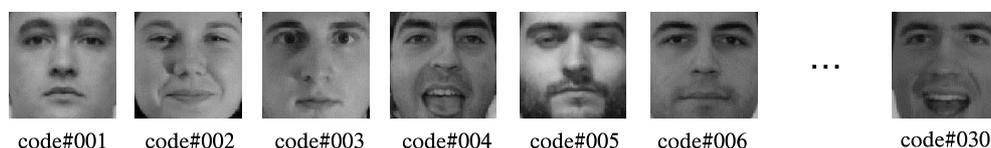


Fig. 3. Examples of database images of different sizes.

3. 4. 実証実験

3種類の相関演算手法において画像サイズを(a)~(c)のように変更していった際の EER (Equal Error Rate) を Table 2 に示す。顔画像サイズ (b) 64×32 pixel で特徴強調位相相関の場合、EER 0%となり、非常に高精度な結果を得た。また、(b) 64×32 pixel のとき、3種類の相関手法に関して、FAR (他人受け入れ率: False Acceptance Correlation), FRR (本人拒否率: False Rejection Correlation) を Fig. 5 に示す。縦軸にエラー

Input



Database

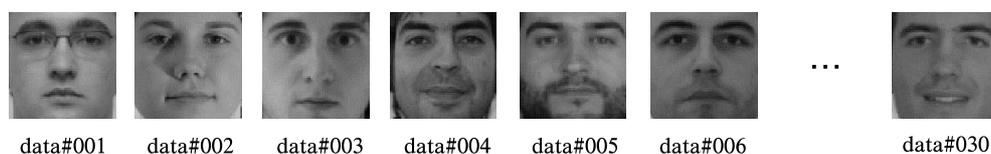


Fig. 4. Examples of database and input facial images.

Table 2. Experimental error rates of three different methods.

| Method | 32×32 (pixels) | | | 64×64 (pixels) | | | 128×128 (pixels) | | |
|-----------------------------|----------------|-----|-----|----------------|------|-----|------------------|------|-----|
| | FAR | FRR | EER | FAR | FRR | EER | FAR | FRR | EER |
| Phase-only correlation | 0 | 100 | 33 | 0 | 46.7 | 3.3 | 0 | 3.3 | 3.3 |
| Filtering correlation | 0 | 100 | 26 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Joint Transform correlation | 0 | 100 | 60 | 0 | 100 | 6.7 | 0 | 10.0 | 6.7 |

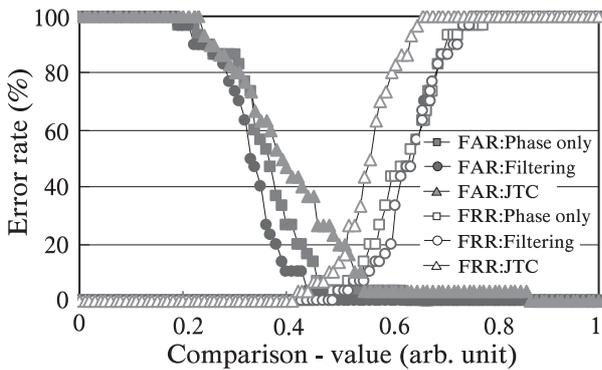


Fig. 5. Results for three kinds of correlation with 64×64 pixel.

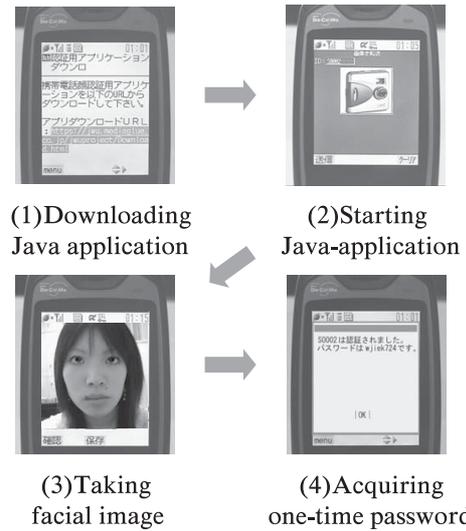


Fig. 7. Flowchart of face recognition based on Java application.

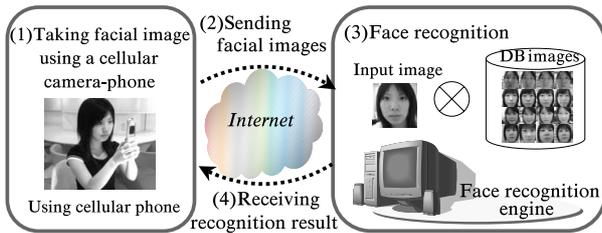


Fig. 6. Cellular phone face recognition system.

レイト, 横軸に Comparison-Value とし, FAR と FRR をプロットした。FAR 0%のときの FRR の値は, 特徴強調位相型相関: 0%, 位相限定相関: 3.3%, JTC: 20.0% となり, 特徴強調位相型相関が, 最も高精度に認証可能だということがわかった。また, 画像サイズを 64×32 pixel とすることで, 相関演算時間を 1/3 以下の 10 ms まで短縮することができ, 相関演算の高速化を実現した。

4. FARCO ソフトウェアの応用

特徴強調位相型相関を用い, 高精度かつ短時間での認証が可能な FARCO ソフトウェアを用いたオンライン型の携帯電話顔認証システムを構築した。本節では, FARCO ソフトウェアを用いて構築したシステムの概要, および経時変化を伴う顔画像データを利用した評価実験について示す。

4.1. 携帯電話顔認証システム

携帯電話顔認証システムは Fig. 6 に示すように顔画

像取得端末としてカメラ付携帯電話, FARCO ソフトウェアを搭載した顔認証制御用サーバから構成されている¹⁵⁾。認証, 前後処理を行う顔認証制御用サーバには Linux を使用した。開発言語はネットワークおよびサーバ接続部分は Java, Python, 認証の前後処理部分には C を使用している。

4.2. システムの流れ

はじめにユーザは顔認証 i アプリを起動させ, 登録画像となる自分の顔画像を撮影し ID とともにサーバへ送信する。サーバでは管理者が ID と画像データベースへアップロードし, 登録完了となる。次に認証では, Fig. 6 に示すように, ユーザが所持している携帯電話で (1) 顔画像を取得し, ID と共に顔認証制御用サーバへと (2) 顔画像を送信する。その後, サーバでは (3) FARCO ソフトウェアによる相関演算を行い, 本人他人の識別を行う。最後に, (4) 認証結果がユーザの携帯電話へと返信される流れとなっている。

また, Fig. 7 では携帯電話顔認証システムのインターフェイス画面を示す。(1) は指定された Web サイトから顔認証 i アプリをダウンロードする画面となる。(2) は, 顔認証 i アプリの起動画面となり, (3) はユーザに

Table 3. Experimental error rates over a duration of three months.

| | First trial (%) | Second trial (%) | Third trial (%) |
|-----------|-----------------|------------------|-----------------|
| 1st week | 6.7 | 0 | 0 |
| 5th week | 10.0 | 0 | 0 |
| 10th week | 13.3 | 3.3 | 3.3 |
| 15th week | 5.0 | 0 | 0 |
| 20th week | 0 | 0 | 0 |
| average | 9.9 | 2.9 | 2.0 |

よる顔画像撮影画面、そして (4) は認証結果の返信画面となる。本人と認証された場合、オンライン授業支援ツールである Web-CT にログインが可能となるワンタイムパスワードがユーザの携帯電話には返信される仕組みとなっており、これをもとに Web-CT にログインし、授業の出席となる。

4. 3. 実運用実験

実運用を想定し、3ヶ月にわたる評価実験を行った。データベース用顔画像は、学生が授業の出席管理を想定して週1～2回の撮影で3ヶ月間蓄積した。画像取得端末は携帯電話カメラとし、1人につき10枚の画像をデータベースとして登録し、入力は同日撮影の画像で3回まで試行可能とした。その結果、Table 3 に示すように FAR 0% をしきい値とした場合、期間中の平均 FRR 2.0% という高精度な結果を得た。この結果より、3ヶ月間にわたる授業の出席管理においても、システムは円滑に運用可能である結果を得た。

5. まとめ

ユビキタス社会において汎用的利用が可能な顔認証システムとして、位相情報を利用した FARCO の顔認証アルゴリズムを FARCO ソフトウェアとし構築し、演算速度・認証精度の最適化を行った。周波数領域において顔画像の特徴量を強調し、最適化した相関フィルタを用いることで縮小した 64×32 pixel 顔画像サイズにおいても、精度の良い認証が可能となった。また世界標準評価用顔

画像データベースの中から抽出した30人による評価実験の結果、EER 0% を達成した。

また、カメラ付携帯電話を顔画像取得端末とし、最適化した FARCO ソフトウェアを搭載した顔認証制御用サーバを用いたオンライン型の携帯電話顔認証システムを構築し、3ヶ月の経時変化のある顔画像を用いた実証実験を行った結果、20回の試行で期間平均エラーレート 2.0% を達成した。最適化した FARCO ソフトウェアは、従来の 1/3 の演算速度で高精度に認証可能な汎用性の高いソフトウェアとして、幅広く利用できることを確かめた。

参考文献

- 1) E. Watanabe and K. Kodate: *J.J. of App. Phy.*, **45**, 8B, 6759 (2006).
- 2) E. Watanabe and K. Kodate: *Appl. Opt.*, **44**, 5, 666 (2005).
- 3) A. Vanderlugt: *IEEE Trans. Inform. Theory*, IT-10, 139 (1964).
- 4) K. Kodate and E. Watanabe: *Face Recognition*, 235 (I-Tech Education and Publishing, Croatia, 2007) Vol.1, Chap. 12, pp.235-260.
- 5) S. Ishikawa, E. Watanabe and K. Kodate: *5th International Conference on Optics-photonics Design & Fabrication*, 7PS4-49, 305 (2006).
- 6) M. Savvides, B.V.K.V. Kumar, and P.K. Khosla: *Proc. ICPR* 3, 810 (2004).
- 7) A.V. Oppenheim and J.S. Lim: *IEEE*, **69**, 5, 529 (1981).
- 8) R. Inaba, E. Watanabe and K. Kodate: *Opt. Rev.*, **10**, 4, 255 (2003).
- 9) K. Kodate, R. Inaba, E. Watanabe and T. Kamiya: *Meas. Sci. Technol.*, **13**, 1756 (2002).
- 10) J. Goodman and M. Moeller: *Introduction to Fourier Optics* (Roberts & Company Publishers, Colorado, 2004) Vol. 1, Chap. 8, p.237.
- 11) J.L. Horner and D.P. Gianino: *Appl. Opt.*, **23**, 6, 812 (1982).
- 12) E. Watanabe and K. Kodate: *Opt. Rev.*, **12**, 6, 460 (2005).
- 13) E. Watanabe, S. Ishikawa and K. Kodate: *Opt. Rev.*, **14**, 5, 1 (2007).
- 14) F. Tarres, A. Rama, "GTAV Face Database", <http://gps-tsc.upc.es/GTAV/ResearchAreas/UPCFaceDatabase/GTAVFaceDatabase.htm>
- 15) 渡邊恵理子, 石川さゆり, 小館香椎子: 電気学会論文誌 C, **127**, 4, 636 (2007).

A Face Recognition Algorithm Using Phase Correlation

Sayuri Ishikawa, Eriko Watanabe and Kashiko Kodate
The Graduate School of Science, Division of Mathematical and
Material Structure Science, Japan Women's University

(Received October 26, 2007)

Abstract: Our previously constructed a highly accurate Fast Face Recognition Optical Correlator (FARCO), and subsequently developed an improved, super high-speed FARCO (S-FARCO), which is able to process several hundred thousand frames per second. A principal advantage of our new system is its wide applicability to any correlation scheme. Three different configurations were proposed, each depending on correlation speed. This paper describes and evaluates a software correlation filter. The face recognition function proved highly accurate, seeing that a low-resolution facial image size (64×64 pixels) has been successfully implemented. An operation speed of less than 10 ms was achieved using a personal computer with a CPU of 3 GHz and 2 GB memory. When we applied the software correlation filter to a high-security cellular phone face recognition system, experiments on 30 female students over a period of three months yielded low error rates: 0 % False Acceptance Rate and 2 % False Rejection Rate. Therefore, the filtering correlation works effectively when applied to low resolution images such as web-based images or faces captured by a monitoring camera.

Key words: optical correlation, phase-only correlation, face recognition system, filtering correlation, online, cellular phone

