

A Fingerprint Matching Technique Based on Phase-Only Correlation

— Algorithm Design and Implementation for Fingerprint Matching Devices Dedicated to Home Applications —

Hiroshi Nakajima Member (Yamatake Corporation, nakajima-hiroshi-1@jp.yamatake.com)

Koji Kobayashi Non-member (Yamatake Corporation, koji-kobayashi@jp.yamatake.com)

Makoto Morikawa Non-member (Yamatake Corporation, morikawa-makoto@jp.yamatake.com)

Atsushi Katsumata Non-member (Yamatake Corporation, katsumata-atsushi@jp.yamatake.com)

Koichi Ito Non-member (Tohoku University, ito@aoki.ecei.tohoku.ac.jp)

Takafumi Aoki Non-member (Tohoku University, aoki@ecei.tohoku.ac.jp)

Tatsuo Higuchi Non-member (Tohoku Institute of Technology, higuchi@toitech.ac.jp)

Keywords : Biometrics, Personal Authentication, Fingerprint Matching, Phase-Only Correlation

A major approach for fingerprint recognition today is to extract minutiae from fingerprint images and to perform fingerprint matching based on the number of corresponding minutiae pairings. One of the most difficult problems in minutiae-based fingerprint recognition has been that the recognition performance is significantly influenced by fingertip surface condition, which may vary depending on environmental or personal causes. Addressing this problem, we have proposed an efficient fingerprint recognition algorithm using phase-based image matching. The use of phase components in 2D discrete Fourier transforms of fingerprint images makes possible to achieve highly robust fingerprint recognition for low-quality fingerprints. However, due to its high computational complexity, the proposed algorithm is not suitable to be implemented in compact

fingerprint matching devices for home applications. In this paper, we propose an improved fingerprint recognition algorithm using phase-based image matching, which significantly reduces computational complexity without degrading recognition performance, compared with the reported algorithm (Table 1, Fig. 1). We also present prototype implementation of a high-performance, easy-to-use fingerprint matching device for home applications, which employ a specially designed ASIC for executing the proposed algorithm in real time (Fig. 2, Fig. 3)

Table 1. Performance comparison

	MINUTIAE	BLPOC	PROPOSED
EER	7.3	2.5	2.3
ZeroFMR	17.4	5.0	4.3

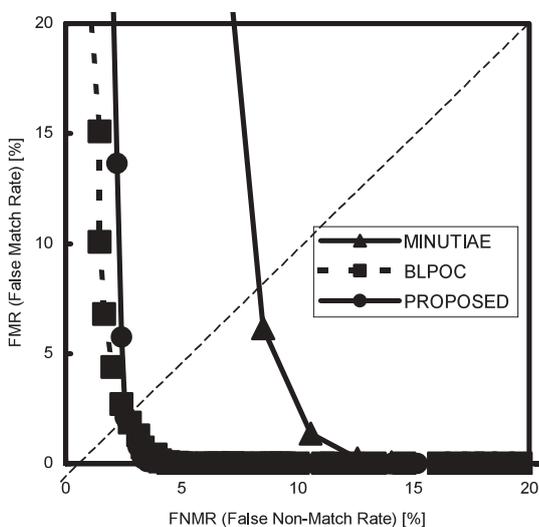


Fig. 1. Receiver operating characteristic curves

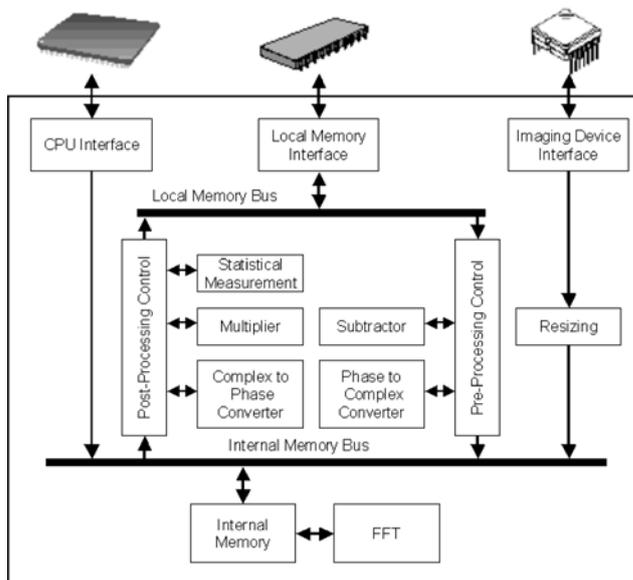


Fig. 2. Block diagram of ASIC



Fig. 3. Fingerprint recognition device

位相限定相関法に基づく指紋照合技術

一般住宅向け指紋照合装置のためのアルゴリズム設計と実現

正員 中島 寛* 非会員 小林 孝次*
 非会員 森川 誠* 非会員 勝亦 敦*
 非会員 伊藤 康一** 非会員 青木 孝文**
 非会員 樋口 龍雄***

A Fingerprint Matching Technique Based on Phase-Only Correlation Algorithm Design and Implementation for Fingerprint Matching Devices Dedicated to Home Applications

Hiroshi Nakajima*, Member, Koji Kobayashi*, Non-member, Makoto Morikawa*, Non-member,
 Atsushi Katsumata*, Non-member, Koichi Ito**, Non-member, Takafumi Aoki**, Non-member,
 Tatsuo Higuchi***, Non-member

A major approach for fingerprint recognition today is to extract minutiae from fingerprint images and to perform fingerprint matching based on the number of corresponding minutiae pairings. One of the most difficult problems in minutiae-based fingerprint recognition has been that the recognition performance is significantly influenced by fingertip surface condition, which may vary depending on environmental or personal causes. Addressing this problem, we have proposed an efficient fingerprint recognition algorithm using phase-based image matching. The use of phase components in 2D discrete Fourier transforms of fingerprint images makes possible to achieve highly robust fingerprint recognition for low-quality fingerprints. However, due to its high computational complexity, the proposed algorithm is not suitable to be implemented in compact fingerprint matching devices for home applications. In this paper, we propose an improved fingerprint recognition algorithm using phase-based image matching, which significantly reduces computational complexity without degrading recognition performance, compared with the reported algorithm. We also present prototype implementation of a high-performance, easy-to-use fingerprint matching device for home applications, which employ a specially designed ASIC for executing the proposed algorithm in real time.

キーワード：バイオメトリクス，個人認証，指紋照合，位相限定相関法

Keywords : Biometrics, Personal Authentication, Fingerprint Matching, Phase-Only Correlation

1. まえがき

近年，バイオメトリクスによる個人認証は，さまざまな応用においてセキュリティ確保に欠くことのできない技術として認知されつつある。特に指紋照合は，他のバイオメトリクス認証に比べ，装置の小型化が可能であり，価格も安く，認証性能も高いので最も実用化が進んでいる⁽¹⁾⁽²⁾。

現在の指紋照合技術では，一般に，多くの標準的なユーザーは問題なく使用できるものの，全体の数パーセント程度のユーザーは照合が難しい指紋を有すると言われ，製品化の際の問題となっている。このような指紋の持ち主は，

* 株式会社 山武
 〒259-1195 神奈川県伊勢原市鈴川 54
 Yamatake Corporation,

** 東北大学大学院情報科学研究科
 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05
 Graduate School of Information Sciences, Tohoku
 University,
 Aoba 6-6-05, Aramaki-aza, Aoba-ku, Sendai, Miyagi
 980-8579, Japan

*** 東北工業大学工学部
 〒980-8579 宮城県仙台市太白区八木山香澄町 35-1
 Faculty of Engineering, Tohoku Institute of Technology,
 35-1 Kasumi-cho, Yagiyama, Taihaku-ku, Sendai, Miyagi
 982-8579, Japan

アレルギー性皮膚炎の人や家事などによって肌荒れしやすい主婦、肌が乾燥しやすい高齢者などに多い。一般に、肌の乾燥や濡れによる指紋画像の乱れについては、感圧センサ⁽³⁾の使用によってある程度の改善が可能である。しかし、肌荒れによって指紋自体が乱れている場合は、隆線が擦り減りと再生を繰り返している状態であり、指紋画像上では、隆線が部分的に切れたり潰れたりするため、本人認証が難しい。この問題を解決するためには、照合アルゴリズム自体の検討が必要であると考えられる。

このような観点から、筆者らは、現在までに、位相限定相関法(Phase-Only Correlation: POC)と呼ぶ画像マッチング手法を用いた指紋照合アルゴリズムを提案している⁽⁴⁾⁽⁵⁾。位相限定相関法は、サブピクセル精度の位置ずれ検出が可能な画像マッチング手法であり、コンピュータビジョンの応用において有用性が示されている⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾。近年、筆者らは、指紋画像の有効帯域を選択的に抽出して照合を行うことができる帯域制限位相限定相関法(Band-Limited Phase-Only Correlation: BLPOC)を提案し⁽⁵⁾、劣化した指紋画像の照合に対して有効であることを確認している。一般に、特徴点抽出に基づく通常の指紋照合手法⁽⁹⁾、肌荒れなどによって紋様が乱れている場合、特徴点を正確に抽出できないことが多く照合精度が大幅に低下する。これに対して、帯域制限位相限定相関法は、画像全体の位相情報を用いた照合手法であり、劣化に対してロバストである⁽⁵⁾。

一方、特徴点方式と異なり、帯域制限位相限定相関法に基づく指紋照合アルゴリズムは、2次元FFT(高速フーリエ変換)などの計算量が問題になり、通常の組み込みコンピュータによるリアルタイム処理は困難である。特に、認証性能を重視して指紋画像のサイズを増加させると処理速度が低下する。すなわち、認証性能と処理速度はトレードオフの関係にあり、一般に、処理速度を優先すれば、認証性能を犠牲にして演算量を減らすことになる場合が多いと考えられる。

本論文では、主婦や高齢者のユーザーが多い一般住宅のアクセス管理に使用することを目標に、帯域制限位相限定相関法の認識性能を維持しつつ、演算量を大幅に削減した製品向けの指紋照合アルゴリズムを提案する。従来のアルゴリズム⁽⁵⁾では、指紋画像の固有周波数に応じて帯域制限したフーリエ変換を使用していたが、提案するアルゴリズムでは、入力画像を最適なサイズに縮小することによって、ほぼ同等の効果が得られることを明らかにし、大幅に演算量を減少させた。さらに、相関ピークから照合スコアを算出する際の新しい計算方法を開発し、状態が悪い指紋を含むデータベースを用いた性能評価を通して有効性を確認した。

提案する照合アルゴリズムは、帯域制限型のアルゴリズム⁽⁵⁾と同等の認証性能を実現する一方で、計算量が少なく固定サイズの2次元FFTのみを使用するため、LSIによる高速化に適している。本論文では、提案手法を実時間処理するための専用LSIを開発した結果を示す。このLSIをコア

とし、感圧センサを組合せた一般住宅向けのユーザーフレンドリーな指紋照合式ドア制御装置のプロトタイプを試作した。通常の特徴点ベースの指紋照合装置と比較して、条件の悪い指紋に対してもロバストな認証が可能であり、さらに専用LSIの採用によって、きわめて高速な認証を実現している。

2. 位相限定相関法に基づく指紋照合アルゴリズム

2.1 位相限定相関関数 まず、位相限定相関関数(POC関数)の定義を示す。いま、 $N_1 \times N_2$ の2つの画像 $f(n_1, n_2)$ と $g(n_1, n_2)$ を考える。ここで、簡単化のために画素のインデックスの範囲を正の整数 M_1 および M_2 を用いて、 $n_1 = -M_1 \dots M_1$, $n_2 = -M_2 \dots M_2$ とする。すなわち $N_1 = 2M_1 + 1$, $N_2 = 2M_2 + 1$ である。このとき、画像 $f(n_1, n_2)$ および $g(n_1, n_2)$ の2次元離散フーリエ変換(2次元DFT) $F(k_1, k_2)$ および $G(k_1, k_2)$ は次式で与えられる。

$$F(k_1, k_2) = \sum_{n_1=-M_1}^{M_1} \sum_{n_2=-M_2}^{M_2} f(n_1, n_2) W_{N_1}^{k_1 n_1} W_{N_2}^{k_2 n_2} = A_F(k_1, k_2) e^{j\theta_F(k_1, k_2)} \dots \dots \dots (1)$$

$$G(k_1, k_2) = \sum_{n_1=-M_1}^{M_1} \sum_{n_2=-M_2}^{M_2} g(n_1, n_2) W_{N_1}^{k_1 n_1} W_{N_2}^{k_2 n_2} = A_G(k_1, k_2) e^{j\theta_G(k_1, k_2)} \dots \dots \dots (2)$$

ここで $k_1 = -M_1 \dots M_1$ と $k_2 = -M_2 \dots M_2$ は周波数インデックスであり、 $W_{N_1} = e^{-j\frac{2\pi}{N_1}}$ と $W_{N_2} = e^{-j\frac{2\pi}{N_2}}$ は回転因子である。 $A_F(k_1, k_2)$ と $A_G(k_1, k_2)$ は振幅成分、 $e^{j\theta_F(k_1, k_2)}$ と $e^{j\theta_G(k_1, k_2)}$ は位相成分を表す。

このとき、 $F(k_1, k_2)$ と $G(k_1, k_2)$ の合成位相スペクトル $\hat{R}_{FG}(k_1, k_2)$ を次式で定義する。

$$\hat{R}_{FG}(k_1, k_2) = \frac{F(k_1, k_2) \overline{G(k_1, k_2)}}{|F(k_1, k_2) G(k_1, k_2)|} = e^{j\theta(k_1, k_2)} \dots \dots \dots (3)$$

ここで $\overline{G(k_1, k_2)}$ は $G(k_1, k_2)$ の複素共役を表し、 $G(k_1, k_2)$ である。位相限定相関関数(POC関数) $\hat{r}_{fg}(n_1, n_2)$ は $\hat{R}_{FG}(k_1, k_2)$ の2次元離散フーリエ逆変換(2次元IDFT)として定義される。

$$\hat{r}_{fg}(n_1, n_2) = \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{k_1=-M_1}^{M_1} \sum_{k_2=-M_2}^{M_2} \hat{R}_{FG}(k_1, k_2) W_{N_1}^{-k_1 n_1} W_{N_2}^{-k_2 n_2} \dots \dots \dots (4)$$

2つの同じ画像のPOC関数は、常にクロネッカーのデルタ関数となる。この相関ピークの急峻な特性を利用すると、指紋画像の照合などの応用で通常的相关関数と比較して、高い識別性能を実現することができる。画像の位置ずれは相関ピークの位置のみに反映され、相関ピークの形状には影響を与えないという特長がある。また、スペクトルの振幅成分を使わないので、輝度変化に影響されにくい。ただ

し、画像の回転には大きな影響を受けるので、指紋画像の回転を正規化する必要がある。

一般に指紋画像は、その紋に対応する固有の周波数以下の成分に重要な情報を有する。それ以外の高周波成分はエネルギーが小さく、その位相情報は相関を計算する際の外乱として働き、識別性能を低下させることが実験的に判明している。そこで、指紋画像の有効な周波数成分のみを抽出して照合するために、次式で与えられる帯域制限位相限定相関関数 (BLPOC 関数) が提案されている⁽⁵⁾。

$$\hat{r}_{fg}^{K_1, K_2}(n_1, n_2) = \frac{1}{L_1 L_2} \sum_{k_1=-K_1}^{K_1} \sum_{k_2=-K_2}^{K_2} \hat{R}_{FG}(k_1, k_2) W_{N_1}^{-k_1 n_1} W_{N_2}^{-k_2 n_2} \dots \dots (5)$$

ここで、 K_1 ($0 < K_1 \leq M_1$) および K_2 ($0 < K_2 \leq M_2$) は指紋画像の有効周波数の上限である。また、 $L_1=2K_1+1$ 、 $L_2=2K_2+1$ 、 $n_1=-K_1 \dots K_1$ 、 $n_2=-K_2 \dots K_2$ である。BLPOC 関数は、制限する周波数帯域 K_1 および K_2 に依存せず、常に相関ピークの最大値が 1 に正規化される。また、BLPOC 関数は通常の POC 関数と比較して高い識別性能を有するが、2 次元離散フーリエ逆変換のサイズが指紋の固有周波数 K_1 および K_2 により変化するため、専用ハードウェアによる実装は必ずしも容易ではない。

2.2 指紋照合アルゴリズム 図 1(a)に BLPOC 関数を用いた指紋照合アルゴリズムを示す⁽⁵⁾。本論文では、このアルゴリズムと同レベルの認証性能を実現しつつ、計算の複雑さを大幅に低下させたアルゴリズムを提案する。BLPOC 関数を用いたアルゴリズムにおいて、その認証性能を決定する重要な処理は、図 1(a)のステップ 6 であり、それぞれの指紋画像に固有の周波数帯域 K_1 と K_2 を求めたうえで、その周波数範囲において帯域制限位相限定相関関数 $\hat{r}_{fg}^{K_1, K_2}(n_1, n_2)$ を計算することが重要である。ここで、 K_1 と K_2 はそれぞれの指紋画像ごとに適応的に決定される。さらに、ステップ 5 で共通領域抽出された指紋画像の大きさも画像ごとに異なる。このため、本アルゴリズムにおいては、 $\hat{r}_{fg}^{K_1, K_2}(n_1, n_2)$ の計算の際に必要な 2 次元離散フーリエ変換の順変換 (式(1), (2)) と逆変換 (式(5)) の点数が指紋画像ごとに異なり、そのハードウェア化は必ずしも容易ではない。

一方、筆者らの想定している指紋センサ (BMF 社製感圧式センサ BLP-100, 画像サイズ 384×256 画素)⁽³⁾を用いて多数の評価実験を行った結果、 K_1 と K_2 の値は、ほぼ 0.4 ~ 0.6 の範囲に分布していることが判明しており、これらを 0.5 近傍の定数としても、認証性能の劣化は少ないことが考えられる。また、周波数領域での帯域制限の効果は、原画像の縮小操作 (本実験の場合は縮小率 0.5 程度) によって置き換えることが可能であると考えられる。そこで、以下では、次のような方針によってアルゴリズムの大幅な単純化を行う。(i) 入力画像を一定の割合 S ($S \leq 100\%$) でスケールアップ (縮小) する。() 2 次元離散フーリエ変換の順変換と逆変換のサイズをすべて固定サイズとする。() その他、共通

領域抽出を単純化するとともに照合スコアの算出法を改良する。

以上の方針によって単純化されたアルゴリズムを図 1(b)に示す。基本的な処理の内容は、次の通りである。

() 画像縮小処理

BLPOC 関数の帯域制限効果を入力画像の縮小処理 (縮小率 S) によって置き換えることによって、通常の POC 関数の 1 回の計算によって照合を行う。センサより得られた 384×256 画素の指紋画像間の POC 関数を計算すると、高周波帯域にある信頼性の低い位相データの影響を受けるため、認証性能は悪くなると考えられる。これに対して、縮小処理を行うと信頼性の低い位相データの影響を抑えられるので、認証性能はよくなると考えられる。ただし、画像を縮小しすぎると指紋パターンの解像度が低くなり、パターンが潰れはじめるので、認証性能は悪くなると考えられる。そのため、信頼性の低い位相データを除去しつつ、認証性能が低下しないように、画像縮小率 S を実験的に最適化することによって、認証性能は向上すると予想される。この方法は、低解像度のセンサにも対応しやすく、縮小率 S をパラメータとした最適化により、ほぼ BLPOC の帯域制限効果と同等の効果が期待できる。センサが出力する画像は 384×256 画素であるが、照合に用いる画像サイズは計算量の観点から 128×128 画素とした。指紋画像全体を S 倍に縮小し、指紋画像の重心を中心として 128×128 画素の領域を抽出して使用する。

() 2次元離散フーリエ変換 (順変換と逆変換) におけるサイズの固定

提案するアルゴリズムでは、BLPOC 関数を用いた場合のように指紋画像ごとに順変換と逆変換のサイズが変化することがなく、固定サイズ (128×128) の POC 関数のみで照合を実行する。このため、固定サイズの FFT を基本とする専用ハードウェアによる実現に適している。

() 照合スコアの算出法の改良

POC 関数の最大相関ピークを中心とした一定領域に着目し、大きなピークを上位から数個選び、最大ピークからの距離に依存する重みをかけて、その大きさを合計したものをスコアとする。実験では、最大ピークを中心とした 5×5 画素の領域を用い、評価するピーク数は上位 3 個とした。これら 3 つのピークの値に、中心からの (距離+1) の逆数を重みとしてかけて合計したものをスコアとした。一般に、他人照合時には、最大ピークから離れた位置に比較的大きなピークが現れる傾向があり、これを減点することによって他人受入率を下げる効果がある。

2.3 評価実験とパラメータ最適化

評価実験では、性能の差を明確にするために、意図的に指紋の状態が悪く照合が困難なユーザーのデータを収集して使用した。被験者は 12 名であり、うち男性 8 名、女性 4 名である。指紋の状態で分類すると、状態が良好な人が 7 名、乾燥肌のために照合に多少の困難がある人 3 名、肌荒れのひどい人 1 名、アトピー性皮膚炎の人 1 名という構成である。各被験

1. Repeat the following process over the angular range $-20^\circ \leq \theta \leq 20^\circ$ with an angel spacing 1° :
 - Generate the rotated image $f_\theta(n_1, n_2)$ of the registered fingerprint image $f(n_1, n_2)$.
 - Calculate the POC function $\hat{r}_{f_\theta g}(n_1, n_2)$ between $f_\theta(n_1, n_2)$ and $g(n_1, n_2)$.
2. Determine the rotation angle Θ by evaluating the similarity using the POC function $\hat{r}_{f_\theta g}(n_1, n_2)$ to select the rotation-normalized image $f_\Theta(n_1, n_2)$.
3. Estimate image displacements (τ_1, τ_2) between $f_\Theta(n_1, n_2)$ and $g(n_1, n_2)$ from the peak location of $\hat{r}_{f_\Theta g}(n_1, n_2)$.
4. Align the translational displacement $f_\Theta(n_1, n_2)$ and $g(n_1, n_2)$ to obtain the normalized images $f'(n_1, n_2)$ and $g'(n_1, n_2)$.
5. Extract the common regions $f''(n_1, n_2)$ and $g''(n_1, n_2)$ from $f'(n_1, n_2)$ and $g'(n_1, n_2)$.
6. Detect the inherent frequency band (K_1, K_2) from the 2D DFT of $f''(n_1, n_2)$.
7. Calculate the BLPOC function $\hat{r}_{f'' g''}^{K_1, K_2}(n_1, n_2)$ and compute the matching score as the sum of the highest two peaks of calculated BLPOC function.

(a)

1. Scale $f(n_1, n_2)$ and $g(n_1, n_2)$ to $S\%$ of their image sizes and extract 128×128 -pixel images, from the scales images, centered at the center of gravity.
2. Repeat the following process over the angular range $-20^\circ \leq \theta \leq 20^\circ$ with an angel spacing 1° :
 - Generate the rotated image $f_\theta(n_1, n_2)$ of the registered fingerprint $f(n_1, n_2)$.
 - Calculate the POC function $\hat{r}_{f_\theta g}(n_1, n_2)$ between $f_\theta(n_1, n_2)$ and $g(n_1, n_2)$.
 - Calculate the matching score by using the improved score calculation method.
3. Obtain the final matching score as the maximum value of the calculated matching scores.

(b)

図1 指紋照合アルゴリズムのフロー : (a) BLPOC 関数を用いた照合アルゴリズム , (b) 提案する照合アルゴリズム

Fig. 1. Flow diagram of fingerprint matching algorithms: (a) BLPOC-based matching algorithm and (b) proposed algorithm.

者より 10 枚の指紋画像を取得し , 合計で 120 枚の指紋画像を用いた。評価実験は , 次の組合せで行った。

- 本人同士の照合の組合せ : ${}_{10}C_2 \times 12 = 540$ 組
- 他人同士の照合の組合せ : ${}_{120}C_2 - 540 = 6600$ 組

認証性能を定量的に評価するために , 下記のパラメータを定義しておく。

- FNMR (False Non-Match Rate): 本人を間違っ他人として拒否してしまう本人拒否率。FNMR が小さいほど性能が高い。
- FMR (False Match Rate): 他人を間違っ本人とし

て受け入れてしまう他人受入率。FMR が小さいほど性能が高い。

- EER (Equal Error Rate): FNMR と FMR が等しくなるときの誤り率。EER が小さいほど性能が高い。
- ZeroFMR: 他人を間違っ本人として受け入れることがないように閾値を設定した場合 (FMR=0%) の最小の FNMR。

以下では , 画像縮小処理が BLPOC 関数の帯域制限効果と同等の効果があることを検証した実験 (実験 1) と , 一般的によく用いられている特徴点を用いた照合アルゴリズム

と性能を比較した実験（実験 2）について述べる。

（実験 1）画像縮小処理の効果とパラメータ最適化

提案手法（図 1(b)）における画像縮小の効果を検証するために、作成した指紋画像データベースに基づいて照合実験を行った。実験では、提案アルゴリズムの縮小率 S を最適化するために、 S を 30% から 100% まで 5% 刻みで変化させた。図 2(a) および (b) は、縮小率 S に対する EER および ZeroFMR をそれぞれプロットしたものである。最大相関ピーク値をそのまま照合スコアとした場合と、改良したスコア算出法により得られた照合スコアを用いた場合を比較している。また、比較のために、BLPOC 関数を用いた照合アルゴリズム（図 1(a)）における EER と ZeroFMR を点線で示す。実験結果より、縮小率 S を 45% と設定し、改良したスコア算出法を用いた場合の性能が最適であった。この場合の EER と ZeroFMR は、BLPOC 関数を用いた照合アルゴリズムにおける値にほぼ等しいことより、画像縮小は、BLPOC 関数の帯域制限と同等の効果があることを示している。

今回のセンサは、画像サイズ 384 × 256 画素、解像度 500dpi のものを用いたが、提案手法は他のセンサにも応用可能と考えている。実験結果より、最適な縮小率は 45% と判明したので、指紋画像の解像度は原画像の解像度 500dpi に 0.45 をかけた 225dpi が最適となる。この 225dpi への縮小処理により、指紋画像の固有周波数を含み、かつ、信頼性の低い高周波の位相成分の少ない最適な指紋画像が得られる。他のセンサに応用する場合も同様に、指紋画像を 225dpi 程度に画像を縮小して、重心を中心とした 128 × 128 画素で抽出すれば同様な結果が得られると考えられる。

（実験 2）性能比較実験

照合アルゴリズムの性能を比較するために、(A) 特徴点を用いた照合アルゴリズム（一般に市販されているもの）、(B) BLPOC 関数を用いた照合アルゴリズム（図 1(a)）、(C) 実験 1 で最適化した提案手法の 3 つを用いて照合実験を行った。性能比較には、ROC（Receiver Operating Characteristic）曲線と EER, ZeroFMR を用いる。ROC 曲線とは、照合スコアの適当な閾値における FNMR と FMR を表した曲線である。3 つの照合アルゴリズムの ROC 曲線と EER, ZeroFMR を図 3 に示す。実験結果より、BLPOC 関数を用いた照合アルゴリズム(B)と提案するアルゴリズム(C)は、特徴点を用いた照合アルゴリズム(A)と比較して、その ROC 曲線が FNMR/FMR の低い場所に位置しているので、より高性能であることが分かる。また、EER は、提案手法(C)が 2.34% であるのに対し、BLPOC 関数を用いた照合アルゴリズム(B)が 2.46%、特徴点を用いた照合アルゴリズム(A)が 7.34% である。ZeroFMR は、提案手法(C)が 4.26% であるのに対し、BLPOC 関数を用いた(B)が 5.00%、特徴点を用いた(A)が 17.41% である。以上より、提案手法は、指紋の状態が悪く照合が困難な指紋画像に対して BLPOC 関数を用いた照合アルゴリズムと同様に有効である。

さらに、提案手法は、固定サイズ（128 × 128）の 2 次元

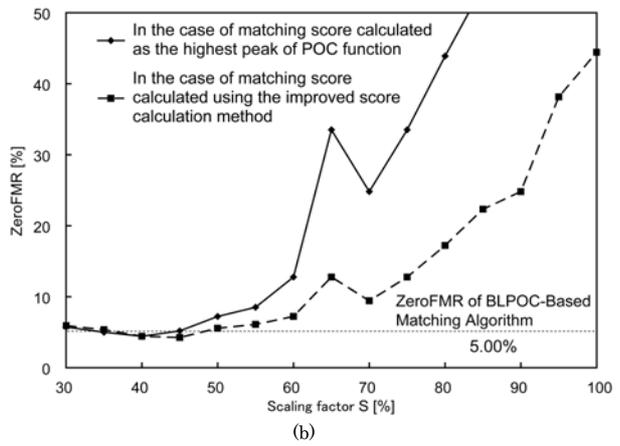
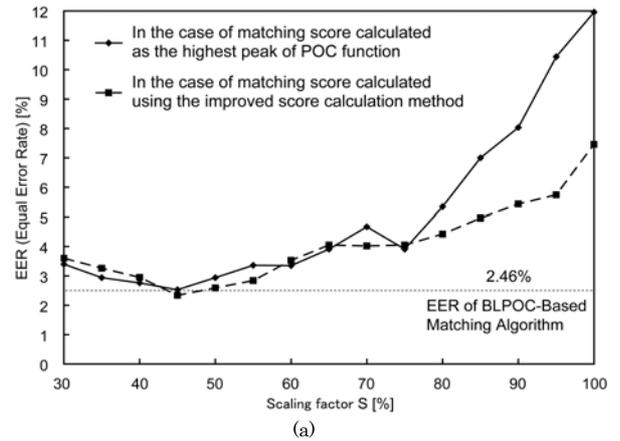


図 2 提案アルゴリズムの縮小率 S を変化させたときの EER (a) と ZeroFMR (b)

Fig. 2. EER (a) and ZeroFMR (b) as the scaling factor S changes.

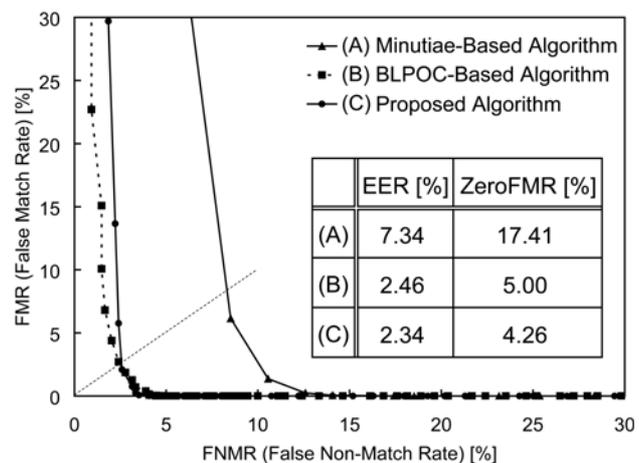


図 3 ROC 曲線によるアルゴリズムの評価

Fig. 3. ROC curves, EERs and ZeroFMRs.

FFT のみを使用するとともに、その他の処理を単純化することによって、BLPOC 関数を用いた手法と比較して、計算の複雑さを大幅に減少している。一例として、計算機実験

(CPU: Pentium4 3.0GHz, Memory: 1GB, MATLAB 7.01)により実行時間を評価した結果, BLPOC 関数を用いた手法の処理時間は 19.07 秒であるのに対して, 提案手法の処理時間はわずか 2.45 秒であった。すなわち, 提案手法は, BLPOC 関数を用いた照合アルゴリズムと同レベルの認証性能を実現しつつ, 計算の複雑さを大幅に減少させることに成功している。

3. 専用 LSI の実現

位相限定相関法はその処理の規則性により専用 LSI による実現にきわめて適している。すでに, 筆者らの研究グループでは, 工業市場向けの画像認識装置の実用化に際して, 位相限定相関法の専用 LSI を開発した実績を有している⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。また, 最近では, 動的再構成 LSI による実現についても報告されている⁽¹²⁾。本論文で取り上げる一般住宅向けの指紋認証装置においても, 利便性の向上の観点から, 位相限定相関法の高速処理を実現する専用 LSI の開発は不可欠である。図 4 に開発した専用 LSI を示す。本 LSI は指紋センサ, ホスト CPU, PBSRAM (Pipelined Burst Static Random Access Memory) などのインターフェースを備え, 部品点数を大幅に削減するとともに基板を小型化できる利点を提供する。

図 5 に専用 LSI のブロック図を示す。応答時間の短縮によるユーザーの利便性を向上させるため, 内部では徹底的なパイプラインアーキテクチャを採用している。各ブロックの処理内容を次に示す。

- CPU Interface: CPU(SH3/7709A)とのインターフェースを行う。
- SRAM Interface: ローカルメモリ(PBSRAM)へのアクセスを行う。
- CCD Camera Capture Interface: CCDをはじめとする画像入力に関わるインターフェースを行う。画像情報はここから入力される。
- Resize: 画像縮小処理部。入力された画像の情報を指定されたサイズに縮小し, 内部メモリに書き込む。入力系のダイナミックレンジ, およびオフセットを調整する機能も含まれている。
- Memory Blocks: 内部メモリブロック (384 bits × 4 banks, デュアルポート同期 SRAM) である。FFT 処理のためのバッファなどとして利用される。4 つの独立した 24 ビット幅メモリとしての利用や 2 つの独立し



図 4 位相限定相関法専用 LSI の外観
Fig. 4. LSI for phase-only correlation.

た 48 ビット幅デュアルポートメモリとしての利用も可能である。

- FFT Unit: FFT 演算処理部。内部メモリ 2 バンクを用いて 128 点 FFT の計算を実行する。
- Pre-Processing Controller: ローカルメモリ (PBSRAM) と前処理部とのインターフェースを行う。専用 LSI からローカルメモリ (PBSRAM) ヘリードするアドレスを計算して SRAM Interface ヘリード要求を行い, ローカルメモリ (PBSRAM) に格納されているデータを前処理部へ渡す。
- Subtractor: 減算部。画像間の差分, オフセット除去などの減算処理を行う。飽和処理, ゲイン調整も行う。
- Phase to Complex Converter: 8 ビットの位相データを 16 ビットの複素数 (直交座標表現) に変換する。
- Post-Processing Controller: 内部メモリに蓄積されて

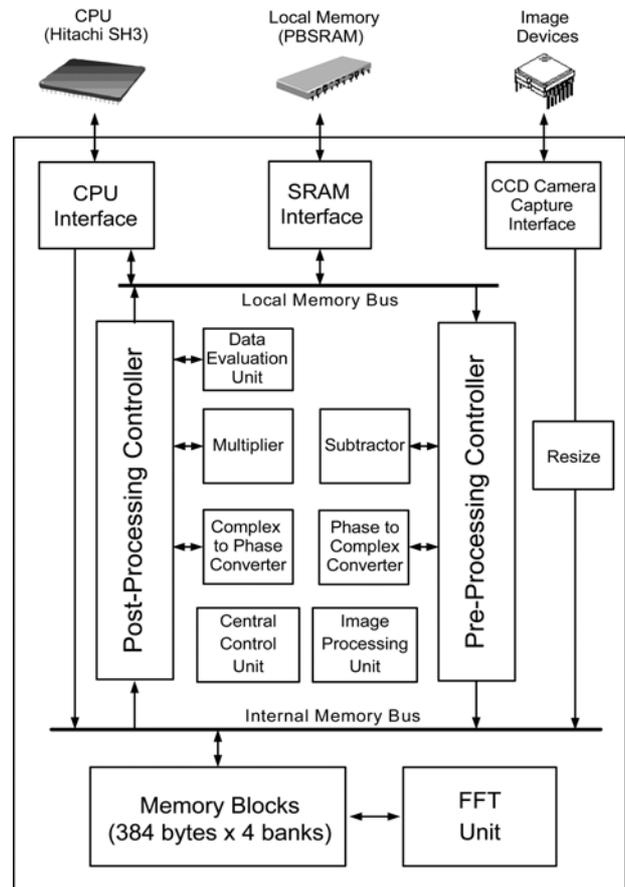


図 5 専用 LSI 内部ブロック図
Fig. 5. Block diagram of the developed LSI.

表 1 LSI 仕様

Table 1. LSI specification.

Process	0.35 μm CMOS Gate Array
Operating Frequency	57 MHz
Package	QFP 208 pins
Power	3.3V±0.3V
Internal Memory	3 kbits × 4 banks
POC Processing Time	8.8 ms (128x128-pixel) images

いるデータを後処理部へ渡す。

- Image Processing Unit: 複素数の絶対値計算、画像の log 変換などの処理を行う。
- Data Evaluation Unit: 画像評価に利用するための輝度値の平均・有効面積などを計算する。画像内での評価エリアも指定できる。
- Multiplier: 乗算部。画像に窓関数を適用するための乗算などを行う。
- Complex to Phase Converter: 24 ビットの複素数データ（直交座標表現）を 8 ビットの位相データに変換する。
- Central Control Unit: 中央制御部。画像取り込みや演算の処理ステートを管理し、データフローを制御する。消費電力を抑えるための制御も行う。

表 1 に LSI の基本仕様を示す。128x128 画素の指紋画像に対する位相限定相関関数の計算時間は、57MHz 動作で約 8.8msec である。同じ計算を PC (CPU: Pentium4 3.0GHz, Memory: 1GB, MATLAB 7.01) で実行すると、平均約 28msec であった。開発した LSI は、約 1/53 の周波数動作でありながら、約 3 倍の高速処理を達成している。

4. 一般住宅向け指紋照合装置の試作

乾燥肌や肌荒れに悩むユーザーも含め、万人が使用できる利便性の高い指紋照合装置の開発を目指し、提案した専用 LSI をコアとして感圧センサを組合せた一般住宅向き指紋照合式ドア制御装置のプロトタイプを試作した（図 6）。通常の特徴点ベースの指紋照合装置と比較して、条件の悪い指紋に対してもロバストな認証が可能であり、さらに専用 LSI の採用によって、きわめて高速な認証を実現している。

このプロトタイプは、指紋登録・照合を行う照合ユニットと電気錠のコントロールを行う制御ユニットの 2 ピース

構成とした。照合ユニット（図 6(a)）の外形寸法は、120 × 160 × 70 (W,H,D) mm である。電源として制御ユニットに AC100V を入力し、照合ユニットには制御ユニットから DC24V を供給する。照合ユニットは、指紋照合により本人が確認されると、RS485 経由で制御ユニットに解錠信号が送られる。制御ユニットは、解錠信号を受け電気錠を解錠する。電気錠は、通電時解錠型、通電時施錠型、モータ錠などほとんどのタイプに対応している。

照合ユニットは、指ガイドを備えることにより指が回転しにくい構造とし、指紋照合における回転補正を -12° ~ 12° の角度範囲に対応するように設計した（上記で評価したアルゴリズムでは -20° ~ 20° としていたが、指ガイドの導入により、探索する角度範囲を制限しても性能が低下しないことを確認している）。この結果、位相限定相関法の専用 LSI の採用により、1 指あたりの指紋照合処理全体をわずか 0.1 秒程度で実行することが可能になった。さらに、20 指紋登録時には約 2 秒で電気錠を解錠できる。

本プロトタイプには、以上の機能のほかに、一般住宅のユーザーに対して利便性を向上させるためのユーザーインターフェースとして、取り込んだ指紋画像をリアルタイムに表示する機能、ならびに、指紋の登録・照合の際のユーザーの習熟度を算出して表示する機能を備えている。また、ユーザーの指の置き方の変化を吸収するために、登録指紋画像を自動更新する機能を実現している。これらの諸機能とともに、指紋画像の劣化に対して本質的にロバストな「位相限定相関法」の採用により、高齢者・主婦・子供など、年齢や性別を問わずに、広く一般家庭で利用できる新しいコンセプトのバイオメトリクス技術を確立するための第一歩が実現できたと考えられる。

5. まとめと今後の展望

今後、バイオメトリクス技術が、一般住居なども含め、

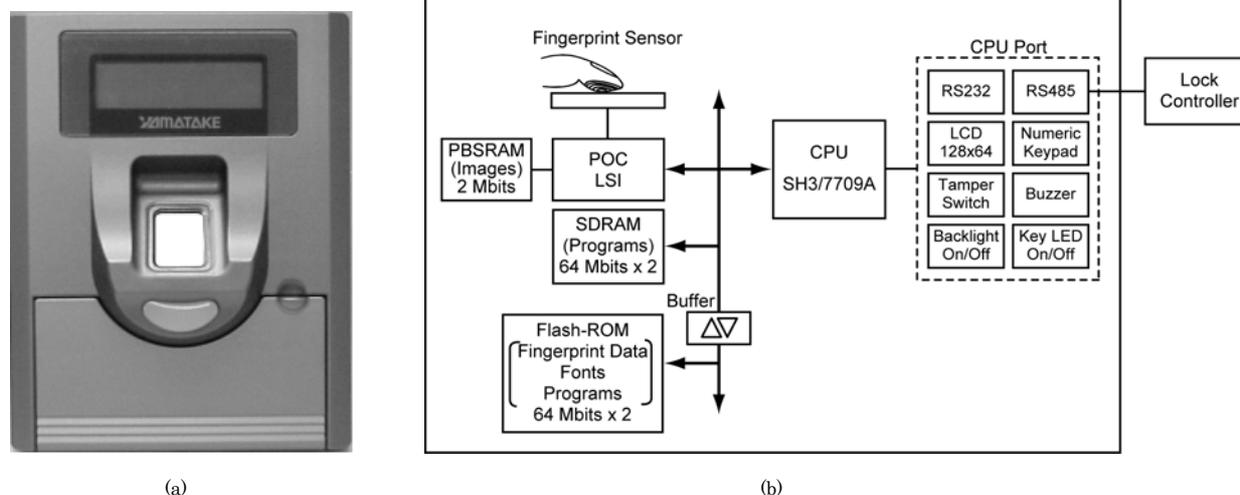


図 6 指紋照合式ドア制御装置のプロトタイプ：(a) 外観，(b) ハードウェア構成

Fig. 6. Prototype of the fingerprint matching device: (a) its appearance and (b) its hardware configuration.

広く社会に浸透するためには、万人にとって利用しやすいという意味での「ユニバーサルデザイン」の視点に配慮するとともに、これを具体化する新技術の開発が不可欠である。このような観点から、本論文では、指紋の劣化にロバストな位相限定相関法に基づく指紋照合アルゴリズムを提案した。評価実験では、指紋の状態が悪い人5人を含む12人のデータベースを用いた評価において、指紋の特徴点を用いるアルゴリズムではEERは7.34%であったが、BLPOC関数を用いた照合アルゴリズムでは2.46%、提案手法では2.34%となった。提案手法は、指紋の状態が悪く照合が困難な指紋画像に対してBLPOC関数を用いた照合アルゴリズムと同様に有効であることを明らかにした。さらに、演算時間は、BLPOC関数を用いた照合アルゴリズムの1/8程度であり、処理もシンプルな固定点数のFFT演算を主体とするためLSI向きであることも示した。さらに、提案アルゴリズムを実行する専用LSIをハードウェアの高速化技術を駆使して開発した。このLSIをコアとし、感圧センサを組合せた一般住宅向けの利便性に優れた指紋照合式ドア制御装置のプロトタイプを試作した。通常の特徴点ベースの指紋照合装置と比較して、条件の悪い指紋に対してもロバストな認証が可能であり、さらに専用LSIの採用によって、きわめて高速な認証を実現できた。

なお、筆者らは、位相限定相関法が、他のバイオメトリクス認証技術においてもきわめて有効であることを見出している。例えば、これを虹彩認証に適用した結果、きわめて高い認識性能を達成できることを明らかにしている⁽¹³⁾。CISIAの虹彩画像データベースを用いた評価実験では、EERがほぼ0%という優れた結果を得ている。また、現在、顔の3次元情報を用いた個人認証技術に対しても、位相限定相関法の有効性が明らかになりつつある。すなわち、ステレオビジョンの対応点探索に位相限定相関法を使用することにより、世界ではじめて受動的な3次元計測による3次元顔照合が可能であることが示されている⁽¹⁴⁾。位相限定相関法のサブピクセル精度の対応点探索アルゴリズムを開発した結果⁽⁷⁾、カメラから50cmの距離にある顔の3次元形状を0.6mm程度の精度で稠密に復元可能である。本技術を18名の顔認証実験に適用し、EER=0%という結果を得ている⁽¹⁶⁾。

以上のように位相限定相関法は、指紋以外にも広範な応用が可能であり、マルチモーダル認証のための照合エンジンとして、さまざまな製品に展開できる可能性を有している。

(平成17年6月29日受付,平成17年10月25日再受付)

文 献

- (1) J. Wayman, A. Jain, D. Maltoni, and D. Maio : Biometric Systems, Springer (2005)
- (2) D. Maltoni, D. Maio, A.K. Jain, and S. Prabhakar : Handbook of Fingerprint Recognition, Springer (2003)
- (3) <http://www.bm-f.com/>

- (4) H. Nakajima, K. Kobayashi, M. Kawamata, T. Aoki, and T. Higuchi : "Pattern Collation Apparatus Based on Spatial Frequency Characteristics (USP5915034)", US Patent (1995-5)
- (5) K. Ito, H. Nakajima, K. Kobayashi, T. Aoki, and T. Higuchi : "A Fingerprint Matching Algorithm Using Phase-Only Correlation", *IEICE Trans. Fundamentals*, Vol.E87-A, No.3, pp.682-691 (2004-3)
- (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.925-1934 (2003-8)
- (7) K. Takita, M.A. Muquit, T. Aoki, and T. Higuchi : "A Sub-Pixel Correspondence Search Technique for Computer Vision Applications", *IEICE Trans. Fundamentals*, Vol.E87-A, No.8, pp.1913-1923 (2004-8)
- (8) <http://www.aoki.ecei.tohoku.ac.jp/poc/>
- (9) A.K. Jain, L. Hong, S. Pankanti, and R. Bolle : "An Identity Authentication System Using Fingerprints", *Proc. IEEE*, Vol.85, No.9, pp.1365-1388 (1997-9)
- (10) M. Morikawa, A. Katsumata, and K. Kobayashi : "An Image Processor Implementing Algorithms using Characteristics of Phase Spectrum of Two-Dimensional Fourier Transformation", *Proc. IEEE Int. Symp. Industrial Electronics (ISIE)*, Vol.3, pp.1208-1213 (1999-7)
- (11) M. Morikawa, A. Katsumata, and K. Kobayashi : "Pixel-and-Column Pipeline Architecture for FFT-based Image Processor", *Proc. IEEE Int. Symp. Circuit and Systems (ISCAS)*, Vol.3, pp.687-690 (2002)
- (12) N. Miyamoto, K. Kotani, K. Maruo, and T. Ohmi : "An Image Recognition Processor Using Dynamically Reconfigurable ALU", Technical Report of IEICE, ICD2004-123, pp.13-18 (2004-8) (in Japanese)
宮本直人・小谷光司・丸尾和幸・大見忠弘 : 「動的再構成ALUを搭載した画像認識プロセッサ」信学会技術報告, ICD2004-123, pp.13-18 (2004-8)
- (13) K. Miyazawa, K. Ito, T. Aoki, K. Kobayashi, and H. Nakajima : "An Efficient Iris Recognition Algorithm Using Phase-Based Image Matching", *Proc. the 2005 IEEE Int. Conf. Image Processing*, pp.II-49-II-52 (2005-9)
- (14) N. Uchida, T. Shibahara, T. Aoki, H. Nakajima, and K. Kobayashi : "3D Face Recognition Using Passive Stereo Vision", *Proc. the 2005 IEEE Int. Conf. Image Processing*, pp.II-950-II-953 (2005-9)

中 島 寛 (正員) 1990年東北大学工学部電子工学科卒。同年山武ハネウエル(株)(現,株式会社山武)入社。2003年同ビルシステムカンパニー開発本部。現在に至る。主としてバイオメトリクスに関する研究開発,住宅/業務用途の指紋照合装置の開発に従事。日本自動認識システム協会バイオメトリクス部会会員。



小 林 孝 次 (非会員) 1976年東北大学工学部電子工学科卒。1978年同大学大学院工学研究科電子工学専攻修士課程卒。同年山武ハネウエル(株)(現,株式会社山武)入社,現在に至る。リアルタイム通信プロトコル,画像処理,バイオメトリクス等の研究,開発に従事。バイオメトリクス開発室室長。IEEE,電子情報通信学会,計測自動制御学会各会員。



森川 誠



(非会員) 1993年静岡大学工学部電子工学科卒業。1995年同大学院工学研究科電子工学専攻修士課程修了。同年山武ハネウエル(株)(現、株式会社山武)入社。現在に至る。主に画像処理・バイオメトリクス用のLSI設計や、センサインタフェイス回路,DSPアプリケーション開発に従事。

勝亦 敦



(非会員) 1986年電気通信大学電子工学科卒業。同年山武ハネウエル(株)(現、株式会社山武)入社。主として通信,ファジィプロセッサ,画像処理などのデジタルLSIの研究開発に従事。現在,同研究開発本部主任研究員。

伊藤 康一



(非会員) 2000年東北大学工学部電子工学科卒業。2005年同大学院情報科学研究科博士課程修了。同年同大学情報科学研究科助手。2004-2005年日本学術振興会特別研究員。現在に至る。画像処理,バイオメトリクスに関する研究に従事。IEEE,電子情報通信学会,情報処理学会各会員。

青木 孝文



(非会員) 1988年東北大学工学部電子工学科卒業。1992年同大学院工学研究科博士課程修了。工学博士。同年同大学工学部電子工学科助手,1994年同大学院情報科学研究科助手,1996年同助教授,2002年同教授。1997-1999年科学技術振興事業団さきがけ研究21研究者兼任,現在に至る。超高速デジタル計算の理論,画像センシング,映像信号処理,バイオメトリクス,VLSI設計技術,多値論理,分子コンピュータの基礎理論に関する研究に従事。IEEE,電子情報通信学会,計測自動制御学会,情報処理学会各会員。

樋口 龍雄



(非会員) 1962年東北大学工学部電子工学科卒業。1969年同大学院工学研究科博士課程修了。工学博士。1967年同大学工学部電子工学科助手,1970年同助教授,1980年同教授。1993年同大学院情報科学研究科教授。1994-1998年同情報科学研究科長併任。1995-2001年東北大学情報処理センター長併任。2003年東北工業大学工学部電子工学科教授・東北大学名誉教授,現在に至る。この間,デジタル信号処理,特に1次元および多次元デジタルフィルタの統一的设计ならびに信号処理プロセッサのアーキテクチャ,および多値集積回路,超多値オプト・バイオコンピューティングの研究に従事。IEEE,電子情報通信学会,計測自動制御学会各フェロー。