—原 著—

指掌紋画像のための画質補正フィルタの開発

磯部義明^{*1}, 瀬戸洋一^{*1}, 海野義貴^{*2}

(株)日立製作所システム開発研究所
〒244-0817 横浜市戸塚区吉田町292 番地^{*1}
日立エンジニアリング(株)
〒319-1221 日立市大みか町5-1-26^{*2}

Image Correction Filter for Finger/Palm-print Live Scanner Image

Yoshiaki Isobe^{*1}, Yoichi Seto^{*1} and Yoshitaka Umino^{*2}

Systems Development Laboratory, HITACHI, Ltd.
292 Yoshida-cho, Totsuka-Ku, Yokohama, 244-0817 Japan^{*1}
HITACHI Engineering Co., Ltd.
1-26 Ohmika-cho 5-chome, Hitachi, 319-1221 Japan^{*2}

(Received 14 Oct., 1998; accepted 21 May, 1999)

We developed a technique that corrects picture quality so that sweat glands on a ridge can be distinguished from the picture obtained by a Finger/Palm-print Live Scanner. The Finger/Palm-print Live Scanner equipment (Live Scanner) has been introduced to the local police stations for fingerprint collection operation. Fingerprint Live Scanner devices have been used as an authentication technology for security systems. The resolution of the Live Scanner image needs to be equal to that of all Live Scanner devices. For example, the required resolution for the police is about 20 points per mm so that sweat glands on a ridge can be distinguished.

We developed a method of image correction to satisfy the requirements for the Live Scanner. Correcting methods for a degraded image such as the inverse filter and the Wiener filter had been proposed. But we are not able to estimate the resolution using the filter designed by these conventional methods. Because these conventional methods use the Signal to Noise ratio as a parameter and don't use relationship to the resolution.

We applied the filter design method that we had developed for a satellite image, to correct the Live Scanner image. The method can evaluate a relationship between the filter effect and the filter parameter by point spread function (PSF). The proposed filter optimization method reduced the full width at half maximum of PSF about 36 %, resulting in an improved resolution. With this method, sweat glands on a ridge can be distinguished.

Key words: Finger/Palm-print, Live Scanner, Point Spread Function, Image Correction Filter

緒 言

指紋には、万人不同、終生不変という特性と、汗の分泌によって痕跡が残るという特性がある。警察

では、この特性を利用して、犯行現場に残された指紋痕跡（遺留指紋）から容疑者を特定する犯罪捜査業務に使われている。上記の遺留指紋照合業務は自動化されており、警察庁の自動指紋照合システム

(AFIS:Automated Fingerprint Identification System)として1983年より稼働している¹²⁾。また、全国警察署の鑑識課における押捺指紋収集業務においては、1997年より、従来の墨押捺から電子的な指掌紋押なつ装置(ライブスキャナ:Live Scanner)が導入されている。

情報セキュリティの分野では、PCなどに接続された指紋入力装置(ライブスキャナ)による指紋画像により本人を識別する技術が実用化されつつある。この技術を応用し、様々な情報サービスにおいて、本人の正当性を確認するためのキー技術として応用が検討されている。

本論文は、以上のような様々なライブスキャナに対して、それぞれの指紋認識アルゴリズムの要求画質に補正するための画質補正アルゴリズムを提案する。

従来、画質劣化を補正する方式として、逆フィルタやウィーナーフィルタ等、いくつかの方法が提案されている³⁾。しかし、これらの方法はS/N比での評価に基づき撮像系全体の劣化要因を取り除くアプローチである。このため、フィルタ設計パラメータからフィルタの分解能向上効果を直接予測することが困難である。そこで、筆者らが衛星画像処理で開発した、フィルタ設計パラメータとフィルタ効果の関係を点広がり関数(PSF:Point Spread Function)により分解能を評価するフィルタ設計方式⁴⁾を採用し、ライブスキャナの画質補正への適用を検討した⁵⁾。

本論文では、2章でライブスキャナの画質劣化要因、3章で画質補正フィルタの設計方法の提案、4章で提案手法の適用実験について述べ、その有効性を検討した。

1. ライブスキャナの画質劣化要因

ライブスキャナの撮像系はFig.1に示すように、撮影系(Digitization)と幾何学補正系(Geometric Correction)の2つの処理過程より構成される。

Fig.1 Imaging System for Finger/Palm-Print

撮影系において、次のような画質劣化要因が考えられる。

- (1) レンズやミラーなどの光学的特性
- (2) CCD などディテクタの開口特性
- (3) A/D 変換器などの電子回路の周波数特性

また、幾何学補正系において、撮影系の幾何学歪みを補正する幾何学変換の際の補間処理による画質劣化が考えられる。

撮影系の劣化要因をまとめてシフトインバリアントな劣化関数 h_1 として数式化すると、次のような畳み込み積分で表わせる。

$$g_1(x,y) = \iint f(\alpha, \beta) h_1(x-\alpha, y-\beta) d\alpha d\beta + n \quad (1)$$

式(1)で、 f は原画像、 g_1 は劣化画像、 n は雑音である。劣化関数 h_1 は、画像をインパルス状の点光源とした際の劣化関数として点広がり関数(PSF)と呼ばれる。PSFのフーリエ変換の結果 H_1 を光学伝達関数(OTF:Optical Transfer Function)と呼び、畳み込み積分は以下のように書き直せる。

$$G_1 = H_1 F + N \quad (2)$$

式(2)で、 F は原画像 f 、 G_1 は劣化画像 g_1 、 N は雑音 n のフーリエ変換結果である。

幾何学補正系の補間処理を要因とする画質劣化を H_2 とすると、ライブスキャナの撮像系全体は、次式のように表わせる。

$$\begin{aligned} G_2 &= H_2 G_1 \\ &= H_2 H_1 F + H_2 N \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)で、 G_2 は撮像系の劣化画像である。

本論文では、雑音の影響を無視し、(実データより雑音を無視できることを確認した)、入力画像 F に対する H_1 、 H_2 の画質劣化の補正に焦点を絞り、それぞれ以下のようなアプローチを採った。

(1) 撮影系の画質劣化 H_1 については、ディテクタの開口特性の要因が大きく、他の2つの劣化要因を無視できると仮定し⁶⁾、開口特性を補正するフィルタを適用する。

(2) 幾何学変換の画質劣化 H_2 については、補間方法の検討を行う。

まず、(2)について続いて述べ、(1)については3章で詳述する。

補間方式による劣化要因の検討

代表的な補間処理には、以下の3つがある⁶⁾。

- (1) 最近傍法(nearest neighbor)
- (2) 線形補間法(bi-linear)
- (3) 3次補間法(cubic convolution)

最近傍法はエッジ部等にアーチファクトが発生するため、画質が要求される場合にはあまり用いられ

ない。線形補間法および3次補間法について、補間処理により生ずる画質劣化をFig.2に示す。

Fig.2 Estimation of Interpolation Method

ナイキスト周波数 N_q である 0.5 cycle/pixel 以内の空間周波数帯域において、線形補間法と比較して3次補間法の方が、最大10%程度、補間精度が良いことが分かる。

ただし、処理時間を比較すると、線形補間が約5sec、3次補間法が約30secと、約6倍の処理時間がかかる。このため、精度と時間のトレードオフにより処理方法を決定する必要がある。本論文では、精度を優先し3次補間法を選択した。

2. 画質補正フィルタの最適化方法の提案

画質補正処理の概要

撮影系の画質劣化 H_i の補正は、下式のように H_i^{-1} の伝達関数を持つ逆フィルタにより実現できる。

$$G_3 = H_i^{-1} H_i F \quad (4)$$

$$G_3 \equiv \bar{F}$$

ここで、補正結果を G_3 、オリジナル F の推定結果とする。

ただし、 H_i^{-1} は H_i の厳密な逆関数としては求められず、画像のボケを鮮鋭化する目的の高周波成分強調型のフィルタとして実現されるため、高周波ノイズを生じるおそれがある。そこで、ナイキスト周波数以上の周波数成分を除去するアンチエイリアスフィルタ (Low-Passフィルタ) を追加する必要がある。Fig.3に画質補正処理を含んだ撮像系を示す。

Fig.3 Blur Correction Process for Finger/Palm-print

続いて、本論文で提案する画質補正フィルタの設計方式について詳述する。

提案するフィルタ設計方式

本論文で提案するフィルタ設計方式は、1次元フィルタシミュレーションにより、画像分解能に直接関係するPSFの広がりによりフィルタの効果を評価し、目標の画質を得るフィルタ係数を求める手法である。この提案手法のアルゴリズムをFig.4に示す。

Fig.4 Proposed Correction Filter Algorithm

ステップ1：撮影系のPSF推定

補正するライブスキャナにFig.5 (a)のようなエッジパターンのテスト画像を入力し、画素配置の垂直方向（あるいは、水平方向）のエッジプロファイル (Fig.5 (b)) を計測し、LSF (Line Spread Function) を推定する²⁷⁾。LSF推定結果をPSFの垂直方向成分とする。

Fig.5 Test pattern and Edge profile for Estimation of PSF

ステップ2：フィルタ設計

画質補正フィルタは、撮影系のPSFに対してフィルタ設計パラメータを設定するChu-McGille²⁸⁾の方

法⁹⁾を採用し設計を行った。

また、Low-Passフィルタは、FIR (Finite Impulse Response) フィルタ設計法を採用し、低空間周波数帯域の信号成分を通過させ、ナイキスト周波数以上の高空間周波数帯域のエリアス成分を抑制するLow-Passフィルタの設計を行った (詳細は、文献⁹⁾を参照)。ここでは、Chu-McGille¹⁰⁾の方法について続いて詳述する。

$2n+1$ 個の係数 p_i からなるフィルタ $p(x)$ を考えると、次のようになる。

$$p(x) = \sum_{i=-n}^n p_i \delta(x-x_i) \quad (5)$$

ここで、 x_i はフィルタ係数の間隔を示す。

撮影系のPSF $h(x)$ にフィルタ $p(x)$ を作用させた結果を $c(x)$ とすると、 $c(x)$ は、次式のように表せる。

$$c(x) = h(x) * p(x) \quad (6)$$

ここで、 $*$ は畳み込み積分演算を表わす。式(6)の $c(x)$ を複合PSF (composite PSF) と呼ぶ。

ここで、複合PSFに対し、次のようなウィンドウ幅 w のウィンドウ関数を定義する。

$$\omega(x) = \begin{cases} 0 & |x| < w/2 \\ 1 & \text{other} \end{cases} \quad (7)$$

ウィンドウ幅の外側のエネルギーにより、フィルタ $p(x)$ による複合PSFの広がり进行评估する式として次のように表現する。

$$\begin{aligned} R^2 &= \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \omega(x) c^2(x) dx}{\int_{-\infty}^{\infty} c^2(x) dx} \\ &= \frac{\sum_{i=-n}^n \sum_{j=-n}^n p_i p_j \int_{-\infty}^{\infty} \omega(x) h(x-x_i) h(x-x_j) dx}{\sum_{i=-n}^n \sum_{j=-n}^n p_i p_j \int_{-\infty}^{\infty} h(x-x_i) h(x-x_j) dx} \quad (8) \\ &= \frac{\mathbf{P}^T \mathbf{A} \mathbf{P}}{\mathbf{P}^T \mathbf{B} \mathbf{P}} \end{aligned}$$

この最小化問題において雑音の制約を期待値演算子 $E\{\cdot\}$ で表わし、

$$E\left\{\left[n(x) * \sum_{i=-n}^n p_i \delta(x-x_i)\right]^2\right\} \leq \sigma^2 \quad (9)$$

$$\mathbf{P}^T \mathbf{N} \mathbf{P} \leq \sigma^2$$

とする。ここで、 $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ および $\mathbf{N}$ は、以下のような成分の行列である。

$$\left. \begin{aligned} a_{ij} &= \int_{-\infty}^{\infty} \omega(x) h(x-x_i) h(x-x_j) dx \\ b_{ij} &= \int_{-\infty}^{\infty} h(x-x_i) h(x-x_j) dx \\ n_{ij} &= E\{n(x-x_i) n(x-x_j)\} \end{aligned} \right\} \quad (i, j = -n, \dots, 0, \dots, n) \quad (10)$$

ここで、以下の制約条件のもと、

$$\begin{aligned} \mathbf{P}^T \mathbf{B} \mathbf{P} &= 1 \\ \mathbf{P}^T \mathbf{N} \mathbf{P} &= \sigma^2 \end{aligned} \quad (11)$$

式(8)は次のような分子のみの最小化問題となる。

$$R^2 = \mathbf{P}^T \mathbf{A} \mathbf{P} \quad (12)$$

この問題は、次の汎関数最小化問題に帰することが出来る。

$$F = \mathbf{P}^T \mathbf{A} \mathbf{P} - \lambda_1 (\mathbf{P}^T \mathbf{B} \mathbf{P} - 1) + \lambda_2 (\mathbf{P}^T \mathbf{N} \mathbf{P} - \sigma^2) \quad (13)$$

(ここで、 λ_1 、 λ_2 はLagrange係数)

最終的には、以下のような (11) 式を満足する $\mathbf{P}$ を求める一般固有値問題を解くことで、フィルタ $p(x)$ を求めることができる。

$$(\mathbf{A} + \lambda_2 \mathbf{N}) \mathbf{P} = \lambda_1 \mathbf{B} \mathbf{P} \quad (14)$$

以上の方法により、ステップ1で求めたPSFを代入し、ウィンドウ関数のウィンドウ幅： w およびフィルタ点数 $m (= 2n+1)$ を適当に設定し、画質補正フィルタを設定する。

ステップ3：劣化シミュレーション

ステップ1で得たPSFを式 (1) に代入し、ライブスキャナの撮影系にエッジを入力した場合をシミュレートし、1次元劣化エッジプロファイルを求める。ここで、雑音 $n=0$ とした。

ステップ4：フィルタシミュレーション

ステップ3の劣化エッジプロファイルに対し、ステップ2で求めたフィルタ係数によりフィルタ演算

をシミュレートする。

ステップ5：幾何学補正シミュレーション

ステップ4のフィルタ演算結果に対して、幾何学補正の際の補間処理をシミュレートし、補正エッジプロファイルを得る。

ステップ6：補正エッジプロファイルのPSF 推定

ステップ1のPSF推定方法にもとづき、ステップ5の補正エッジプロファイルよりPSFを推定し、フィルタ効果の評価を行う。この結果を、フィルタ設計パラメータにフィードバックする。

フィルタの効果は、次の2つの値により評価した。

- (1) 画像分解能の評価値として最大値の半値降下時におけるPSF幅（PSF半値幅）。
- (2) 画質補正フィルタの影響で現れるエリアスの評価値としてPSFサイドローブ値。

本提案方式により、総当たりに設計したフィルタの評価値をグラフ化することで、フィルタ設計パラメータとフィルタ効果の関係を把握できる。

3. 提案方式の適用実験

ライブスキャナの画質評価

実験用に試作したライブスキャナを利用し、画質補正実験を行った。

ライブスキャナにFig.5(a)で示したテストパターンを入力し、エッジプロファイルにより、PSFおよびMTF(Modulation Transfer Function: 振幅伝達関数)特性の推定を行った。ここで、MTFはOTFの位相成分を抜いた振幅成分グラフである。

この推定結果と補正目標についてFig.6(a)にPSF特性を、Fig.6(b)にMTF特性を示す。

本論文では、汗腺口が判別可能な画質レベルとして、ANSI規格¹⁰⁾にて要求仕様としているMTFグラフに基づき、仕様を満たすMTFガウス曲線をフーリエ変換することにより要求仕様のPSFグラフを求めた。このPSFグラフのPSF半値幅を補正目標とした。

ライブスキャナのPSF半値幅：約2.3pixelに対し、補正目標のPSF半値幅は1.6pixelとなっており、PSF半値幅で31%改善する画質補正を行う必要がある。

一方、Low-Passフィルタについては、ナイキスト周波数以上の高空間周波数領域のノイズを抑制するFig.7のような伝達関数を持つFIRフィルタの設計を行い、適用した。

Fig.6 Estimation of Live-Scanner and Requirement

Fig.7 Designed Low-Pass Filter

提案方式によるフィルタの設計

提案するフィルタ設計方式により、Fig.6(a)で補正目標としたPSF半値幅で31%狭くする補正フィルタ設計パラメータの検討を行った。

このエッジプロファイルによるシミュレーション実験結果を、PSF半値幅評価グラフをFig.8(a)に、サイドローブ評価グラフをFig.8(b)に示す。グラフの縦軸は、(a)はPSF半値幅(b)は、メインローブとサイドローブの比とし、横軸は式(7)で定義したウィンドウ関数のウィンドウ幅とし、フィルタ画素数ごとにグラフ化した。

ウィンドウ関数のウィンドウ幅パラメータ w に關し、ウィンドウ幅が狭まるに従いPSF半値幅も狭くなるが、サイドローブ値も大きくなる。但し、フィルタ点数7画素以上において、150%以上のサイドローブ値に差が無く、フィルタ点数によるサイドローブ抑制効果が飽和している。

また、フィルタ点数パラメータ m に関し、5 画素以上のフィルタ点数で PSF 半値幅に差が出なかった。また、7 画素以上のフィルタ点数でサイドローブ値に差が出ていない。

Fig.8 Result of 1D Edge Profile Simulation with Correction Filter

フィルタ点数の変化により差が出なかった理由としては、フィルタ点数 m により拡張されるフィルタ値が、フィルタ中央部の値に比較して小さいため、フィルタ計算時に量子化誤差範囲内に含まれてしまい、差が出なかったためと考えられる。

検討したフィルタの中から目標画質である PSF 半値幅 1.6 pixel を満たし、サイドローブもフィルタ点数：7 画素以上のフィルタ程度に抑制されているウィンドウ幅：300 %、フィルタ点数：5 画素の画質補正フィルタを選択することにした。

テストパターンによるフィルタの評価

前述の画質補正フィルタを適用し補正したライブスキャナに対し、エッジパターンのテスト画像を入力し、設計したフィルタの評価を行った。Fig.9 (a) に PSF 推定結果を、Fig.9 (b) に MTF 推定結果を示す。

1 次元シミュレーションで得た結果通り、PSF の半値幅：1.48 pixel の結果を得ており、本論文で提案したフィルタ設計方式における 1 次元プロファイルによるシミュレーションが妥当なシミュレーションであると考えられる。

Fig.9 Result of 2D Test-Pattern Image

また、MTF 評価においても、ANSI 規格の要求仕様を満たす結果を得ており、汗腺口を判別できる画質レベルへの画質補正を達成していることを確認した。

さらに、200mm/linepair 白黒縞模様のテスト画像（白色値：250、黒色値：2）を用いて、設計したフィルタ効果の 0.25 cycle / pixel での画質確認を行った。この結果を Fig.10 に示す。

Fig.10 では、0.25 cycle / pixel における MTF 変調値を実測により求めた¹⁰⁾。

MTF 変調値はオリジナル画像では約 0.12、フィルタ結果では約 0.4 となっており、Fig.9 (b) の MTF 推定結果通りの値を示した。実測による MTF 変調値の評価においても画質補正効果を確認できた。

実画像への適用

水平方向についても、本提案方式を用いて、画質補正フィルタの設計を行った。水平方向フィルタと前述の垂直方向フィルタをかけた画質補正結果を

Fig.11に示す。

Fig.10 Result of Test Pattern (200mm/line-pair) with proposed Filter Design Algorithm

Fig.11 Result of Fingerprint Image with proposed Filter Design Algorithm

Fig.11 (a) のオリジナル画像ではぼやけていて不鮮明な汗腺が (b) の補正結果では鮮明化されおり、汗腺口がぼやけた画質レベルから汗腺口を判別可能な画質レベルへの画質補正効果を確認した。

結 言

本論文はライブスキャナに対して、隆線上の汗腺

口が判別できるレベルの画質に補正する手法について述べた。

ライブスキャナの画質劣化要因を補正するアプローチとして、①撮影系の開口特性を補正するフィルタの適用の検討、②幾何学補正系の幾何学変換における補間法の検討を行った。

幾何学変換における補間処理では、線形補間法と比較して3次補間法 (Cubic Convolution) の方がナイキスト周波数付近において、10%程度、補間精度が優れており、この方法を用いることで画質劣化を抑制できることを明示した。

また、撮影系の開口特性を補正するフィルタの適用実験において、提案したフィルタ最適化手法により、PSF 半値幅評価で約36%の画質改善を達成した。これにより、目標とする汗腺口による照合が可能な画質レベルへ補正するアルゴリズムを開発することができた。

本論文では、ライブスキャナを対象に隆線上の汗腺口が判別できるレベルを目標として画質補正を行ったが、本手法は電子的に取り込まれた遺留指紋画像などの画質補正にも適用可能であり、また、照合業務や認識アルゴリズムに則して、さまざまなスキャナにより電子化された指掌紋画像に対し、任意に画質調整を行う機能へ拡張していくことも可能である。また、本論文で開発した撮影系のPSFを推定するツールは、定量的な画質評価・解析ツールとしても利用できる。

謝 辞

本研究を進める上で有益な議論を頂いた(株)日立製作所情報システム事業部の青木雅二氏、日立エンジニアリング(株)の黒田守観氏に感謝いたします。

文 献

- 1) 田村秀行編, : コンピュータ画像処理: 応用実践編 (第3巻). 総研出版, 東京 (1992) .
- 2) 津田久男他: 指掌紋自動押捺装置の正確性及び信頼性の検証. 日本鑑識科学技術学会誌, 2, A29 (1997) .
- 3) H. C. Andrews and B. R. Hunt, : Digital Image Restoration. Prentice- Hall Inc. New Jersey (1977)
- 4) 瀬戸洋一他, : 画質補正機能付き画像補間フィルタの提案. 信学論 D-II, J72-D-II, 696-706 (1989)
- 5) 磯部義明他, : 画質補正フィルタの指掌紋押捺

装置への適用. 日本鑑識科学技術学会第4回学術
集会講演集, pp. 35, (1998) .

- 6) R. G. Keys,: Cubic Convolution Interpolation for
Digital Image Processing. IEEE Trans., Acoust.,
Speech, and Signal Processing, ASSP-29, 1153 - 1160
(1981)
- 7) 坂田俊文他, : MESSR 画像のMTF推定:
Proceedings of The Third Symposium on MOS-1
Verification Program, No.1 , I -127-146.
- 8) N. Chu and C. D. McGillem,: Image Restoration
Filters Based on a 1-0 Weighting Over the Domain of
Support of the PSF. IEEE Trans., Acoust.,Speech, and
Signal Processing, ASSP-27, 457-464 (1979) .
- 9) J. H. McClellan et al.,: A Computer Program for
Designing Optimum FIR Linear Phase Digital Filters.
IEEE Trans. On Audio and Electroacoustics, AU-21,
506-526 (1973) .
- 10) ANSI 規格: Data Format for the Interchange of
Fingerprint Information. ANSI/NIST-CSL (1993)