

Fingerprint Enhancement

Abstract

為了保障自動指紋認證系統(automatic fingerprint identification system, AFIS)的品質，將注重加強指紋影像輸入的品質，在AFIS系統裡對增強指紋影像增強模組是很重要的。我們提出一個把輸入的指紋影像分解成一套濾波後之影像的指紋增強演算法。從濾波後的影像，估計出方向域並且在一張指紋影像中產生一個可區別可回復(recoverable)與不可回復(unrecoverable)毀損區域(corrupted regions)的品質遮罩(quality mask)。此幅輸入之指紋影像在可回復區域將被適當地增強。我們演算法之結果已經在一個使用超過600張指紋影像之MSU指紋資料庫之線上指紋認證系統上頻估。實驗結果顯示我們的指紋增強演算法改進線上指紋認證系統之結果並且更加強健指紋影像輸入的品質。

1 Introduction

一個自動指紋認證系統(AFIS)是基於指紋上的ridge/valley結構的微小細節之比較。一共18類的ridge/valley結構描述已經被認定。在他們之中，ridge的端點和ridge的分叉點(Figure 1(a))，我們通常稱作特徵點(minutiae)，用在自動指紋認證系統中是兩個非常顯著的架構。自動並且確實地抽取一張數位指紋影像中的特徵點是一件非常困難的任務。目前已知的特徵抽取演算法之結果極度依賴輸入的數位指紋影像品質。由於許多的因素(如指紋表面ridge的畸變、胎記、擷取設備的問題等等)，數位指紋影像可能不能總是有特徵抽取演算法通常假定的良好定義的ridge/valley結構。圖一顯示出典型應用於好的品質與不好品質的指紋影像之特徵抽取演算法的例子。

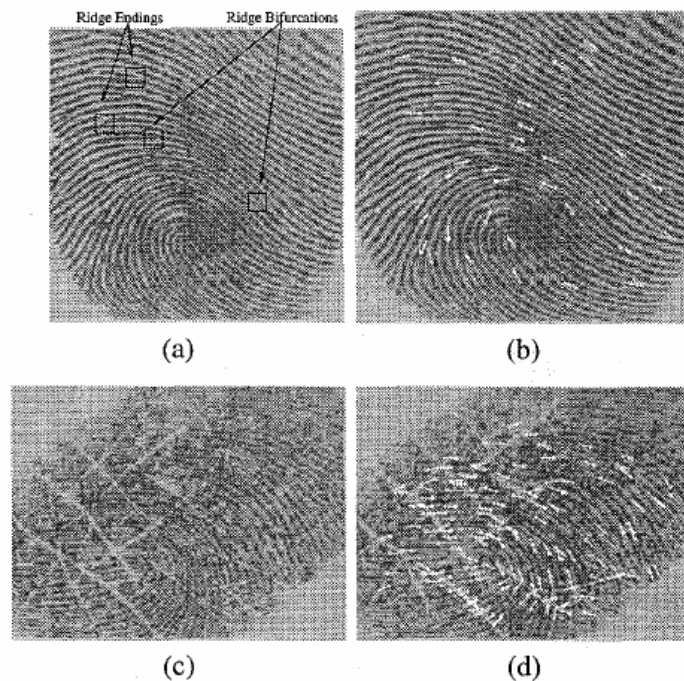


Figure 1. Minutia extraction: (a) good quality input image; (b) extracted minutiae; (c) poor quality input image; (d) extracted minutiae.

理論上，兩個平行的狹窄波谷(valley)將每座波峰(ridge)分開；兩個平行狹窄的波峰將每一波谷分開。並且，特徵點定義為波峰的端點及波峰的分叉點。實際上，像這樣明確的結構並不常在指紋影像上見到。然而，一個經過訓練的專家可以藉由各種視覺的線索正確地辨識出特徵點。因此，我們必須發展出一套演算法可依靠視覺線索去改進輸入指紋影像的品質。

再這篇論文中我們提出一個指紋增強演算法。如之前所描述的，這指紋增強演算法的用意在於提高可回復區域中ridge/valley結構的清晰度並使用合適的特徵抽取演算法。我們的演算法也可分辨不能回復成ridge/valley結構的毀損區域，將他們標示成不可回復的區域。演算法的概述如Figure 2，其主要步驟的描述如下：

- 一排平滑對稱的Gabor濾波器應用於輸入的指紋影像並且產生濾波後的影像。
- ridge抽取演算法用於濾波後的影像並獲得相對應的ridge map。
- 從ridge map中，用一個投票的方法產生一個coarse-level ridge map及unrecoverable-region mask。並用coarse-level ridge map於方向估測上。
- 用一方向估測演算法獲得每一個像素上的方向。
- 從計算出的方向及被濾波後的影像中可以獲得增強後的影像。

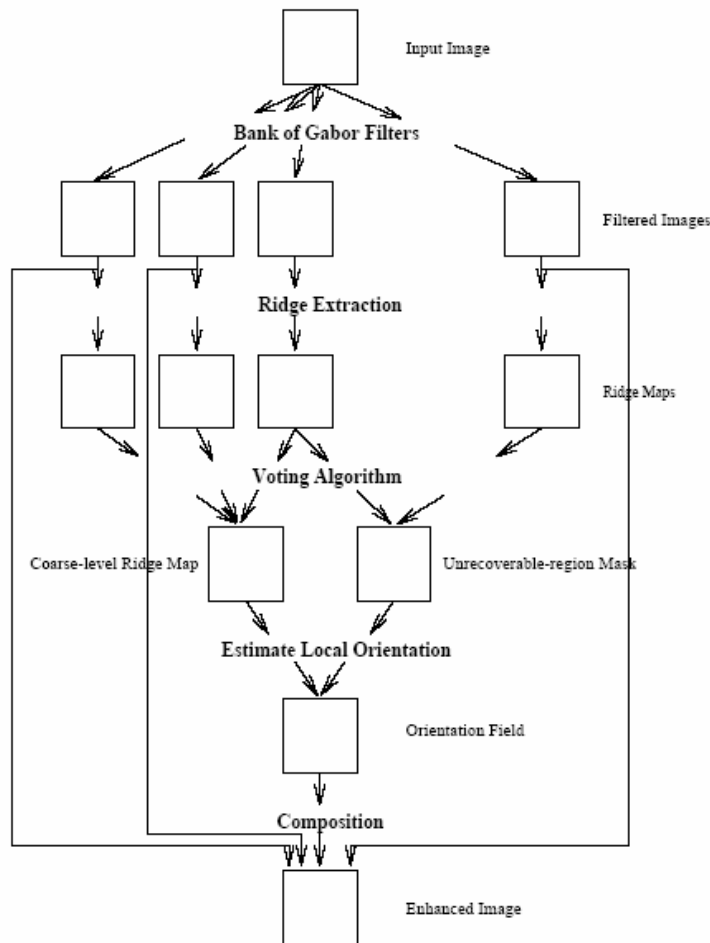


Figure 2. An overview of the fingerprint enhancement algorithm.

2 Fingerprint Enhancement

我們的指紋增強演算法由兩個主要的部份所組成(i)方向估測(ii)指紋增強。取代直接由輸入的指紋影像估測方法，我們從表現出比較可靠之濾波後影像去估測它。因為我們的演算法可以獲得比較可靠的方向估測，所以在影像增強的步驟上可以獲得較好的結果。

2.1 Filtering of Fingerprint Image

指紋有者定義明確的區域頻率及區域方向。一個帶通濾波器可以去除不需要的雜訊及保留準確的ridge/valley結構。Gabor濾波器有著選擇頻率及選擇方向的特性並且在空間域及頻率域有著最佳的分辨率。因此使用Gabor帶通濾波器是有助於去除不需要的雜訊及保留準確的ridge/valley結構。

平滑對稱的Gabor濾波器產生如下：

$$h(x, y) = \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{x^2}{\delta_x^2} + \frac{y^2}{\delta_y^2}\right]\right\} \cos(2\pi u_0 x), \quad (1)$$

其中 u_0 表示頻率， δ_x 及 δ_y 為沿著X軸及Y軸的高斯波封的空間常數。Gabor濾波器的modulation transfer function (MTF)表示如下：

$$H(u, v) = 2\pi\delta_x\delta_y \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{(u - u_0)^2}{\delta_u^2} + \frac{v^2}{\delta_v^2}\right]\right\} + 2\pi\delta_x\delta_y \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{(u + u_0)^2}{\delta_u^2} + \frac{v^2}{\delta_v^2}\right]\right\} \quad (2)$$

其中 $\delta_u = 1/2\pi\delta_x$ 及 $\delta_v = 1/2\pi\delta_y$ 。Figure 3表示平滑對稱的Gabor濾波器及它的MTF。

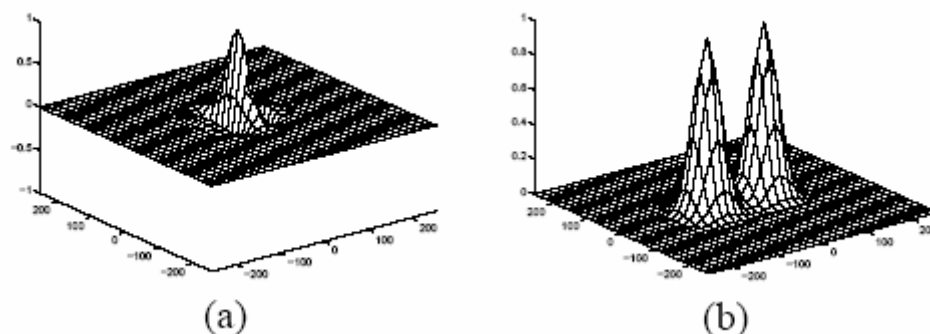


Figure 3. An evensymmetric Gabor filter: (a) Gabor filter tuned to 60 cycles/width and 0° orientation; (b) corresponding MTF.

在應用Gabor濾波器中最重要問題是參數的選擇。我們觀察在大小為512X512的指紋影像中，頻率大約在60 cycles per image width (height)左右。因此，在我們的演算法之中，中央頻率選擇為60 cycles per image width (height)。中央方向 θ_0 的八個值為： 0° 、 22.5° 、 45° 、 67.5° 、 90° 、 112.5° 、 135° 、 157.5° 。對一張輸入的指紋影像，這八個濾波器獲得八個濾波後的影像。為了獲得濾波後的影像，FFT首先在輸入的指紋影像上執行。接著對應參數的Gabor濾波器應用於頻率影像上並且執行反FFT而獲得濾波後的影像。Figure 4(b)~(i)表示八個濾波後的影像，Figure 4(a)為輸入影像。

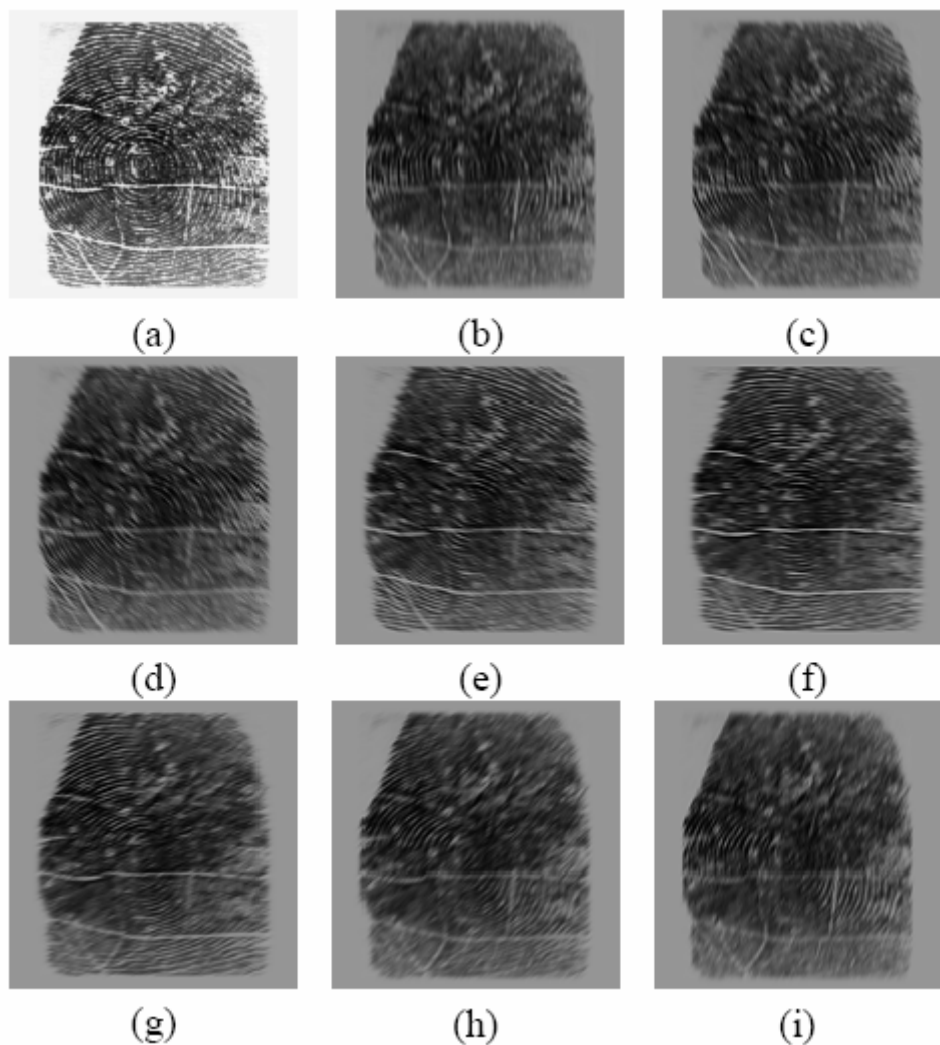


Figure 4. Examples of filtered images for a 512X512 fingerprint image: (a) input image;(b~i)filtered images with Gabor filters tuned to 60 cycles/width and orientations of 0° 、 22.5° 、 45° 、 67.5° 、 90° 、 112.5° 、 135° 、 157.5° , respectively.

2.2 Ridge Extraction

對於濾波後的影像，將應用以下的ridge抽取演算法並且將由濾波後的影像抽取出對應的ridge map。這些ridge map將用來產生輸入指紋影像的coarse-level ridge map。相當於濾波後影像裡的ridge最突顯的特質是ridge上延著與區域ridge正交的方向之灰階值達到局部最大值。Ridge抽取演算法的第一步是根據下列方法估測出區域方向：

1. 用以下的公式估測出每像素(u, v)的區域方向：

$$\Delta_x(u, v) = \sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^W 2G_x(i, j)G_y(i, j), \quad (3)$$

$$\Delta_y(u, v) = \sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^W (G_x^2(i, j) - G_y^2(i, j)), \quad (4)$$

$$\theta(u, v) = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{\Delta_x(u, v)}{\Delta_y(u, v)} \right), \quad (5)$$

在這 W 指的是以像素(u, v)為中心之區域窗口之大小。G_x 與 G_y 分別為沿著 X 方向與 Y 方向之梯度大小。(Δ_x(u, v), Δ_y(u, v)) 表示在像素(u, v)上所估測的向量場。

2. 以下列的公式計算像素(u, v)鄰近區域之方向場之consistency level：

$$C_o(u, v) = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{(i, j) \in D} |\theta(i, j) - \theta(u, v)|^2}, \quad (6)$$

$$|\theta' - \theta| = \begin{cases} d & \text{if } d < 180, \\ d - 180 & \text{otherwise,} \end{cases}, \quad (7)$$

$$d = (\theta' - \theta + 360) \bmod 360, \quad (8)$$

D 表示(u, v)周圍鄰近區域，N 表示在 D 裡頭像素的數量，θ(i, j) 與 θ(u, v) 分別表示像素(i, j)與(u, v)局部 ridge 方向。

3. 如果 consistency level 低於某個閾值 T_C，在這區域內的局部方向將被重新估測直到高於 T_C。

再得到局部方向場之後，對濾波後的影像應用兩個合適的濾波器：

$$h_i(u, v; i, j) = \begin{cases} \frac{-1}{\sqrt{2\pi\delta}} e^{-\frac{i^2}{2\delta}}, & \text{if } i = l(j) - d, j \in \Omega \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi\delta}} e^{-\frac{i^2}{2\delta}}, & \text{if } i = l(j), j \in \Omega \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (9)$$

$$h_b(u, v; i, j) = \begin{cases} \frac{-1}{\sqrt{2\pi\delta}} e^{-\frac{i^2}{2\delta}}, & \text{if } i = l(j) + d, j \in \Omega \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi\delta}} e^{-\frac{i^2}{2\delta}}, & \text{if } i = l(j), j \in \Omega \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (10)$$

$$l(j) = j \tan(\theta(u, v)), \quad (11)$$

$$d = \frac{H}{2 \cos(\theta(u, v))}, \quad (12)$$

$$\Omega = H \left[\left| \frac{\sin(\theta(u, v))}{-2} \right|, \left| \frac{\sin(\theta(u, v))}{2} \right| \right] \quad (13)$$

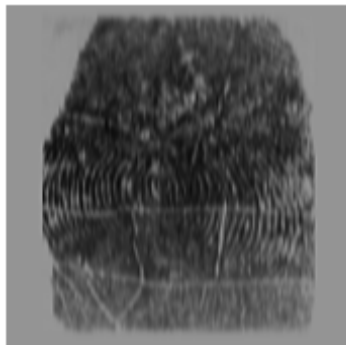
$\theta(u, v)$ 表示像素(u, v)之局部 ridge 方向。這兩個遮罩能沿著局部 ridge 方向的 normal 方向加強局部最大灰階值的值。將濾波後的影像與兩個遮罩做旋積運算。

如果計算後的影像之像素(u, v)的兩個灰階值大於某閾值 T_{ridge} ，將像素(u, v) 歸類於 ridge。透過以遮罩寬度適應 ridge 寬度，此方法可以有效的在指紋中找出 ridge。

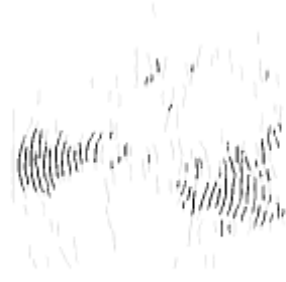
由於在輸入的指紋影像中有雜訊的存在，而導致 ridge map 常常包含大量被歸類為 ridge 像素的非 ridge 像素。我們以下列嘗試錯誤之方法移除這些非 ridge 像素：

- 計算每一個出現在 ridge map 裡的關連元件的面積，如果面積低於某閾值 T_{min} ，將這關連的元件歸類為背景。否則將之毀壞成一套的短線條部分並接著下一步。
- 對於每一條短線條部分，如果他處於一對平行的 ridge 中間，將他歸類為 ridge，否則歸類為背景。

上述的步驟在一張 ridge map 上執行後，大部分假的 ridge 都將被消除，如 Figure 5。



(a)



(b)

Figure 5. The extracted ridge map of a filtered image: (a) filtered image; (b) extracted ridge map; the dark lines represent the detected ridges; grey lines represent the spurious ridges removed by the postprocessing step.

2.3 Coarse-Level Ridge Map and Unrecoverable-region Mask

在獲得每個濾波後影像的 ridge map 後，再我們的指紋增強演算法之下一步是產生 coarse-level ridge map 和 unrecoverable regions 的遮罩。coarse-level ridge map 被用來估測出可靠的方向場。唯一要求是 coarse-level ridge map 它可大略地反映出 ridge/valley 結構的區域方向。coarse-level ridge map 的精確對 ridge 結構而言是不需要的。在我們的演算法中，coarse-level ridge map 和 unrecoverable regions 的遮罩可以藉著下列投票的方法從濾波後影像的 ridge map 產生：

- 將每一個 ridge map 分成大小為 WXW 的區塊。
- 如果區塊內出現足夠的 ridge 像素，將之歸類為前景否則歸類為背景。在這一過程後，每一張濾波後影像的 ridge map 將獲得二值化的區塊圖。
- Delete all the connected components (8-connected) in the binary block maps which have an area less than a threshold (16 in our algorithm).
- 對於每一個區塊，根據下列的法則檢查濾波後影像並計算 coarse-level ridge map (參照 Figure 6)：
 1. 如果八張二值化區塊圖的其中之一在像素 (x, y) 的值為 1，並且這像素屬於大小為 K 的 connected component。接著在 coarse-level ridge map 中與區塊相對映的像素值從關聯的被複製。對應可回復區域遮罩的像素值設定成 0 提示此區塊是可回復的。
 2. 假如超過一張二值化像素圖在像素 (x, y) 的值為 1，並且與區域 ridge 方向不正交，則 coarse-level ridge map 中與區塊相對映的像素值 are taken as the average values of the associated ridge maps。對應可回復區域遮罩的像素值設定成 0 提示此區塊是可回復的。
 3. 假如超過一張二值化像素圖在像素 (x, y) 的值為 1，並且與區域 ridge 方向不正交，並且在大大於某閾值 T_{block} 的 connected component 之中只有一個像素，則 coarse-level ridge map 中與區塊相對映的像素值從與最大 connected component 關聯的 ridge map 複製過來。對應可回復區域遮罩的像素值設定成 0 提示此區塊是可回復的。
 4. 假如上述條件不成立，則標示區塊為不可回復的。

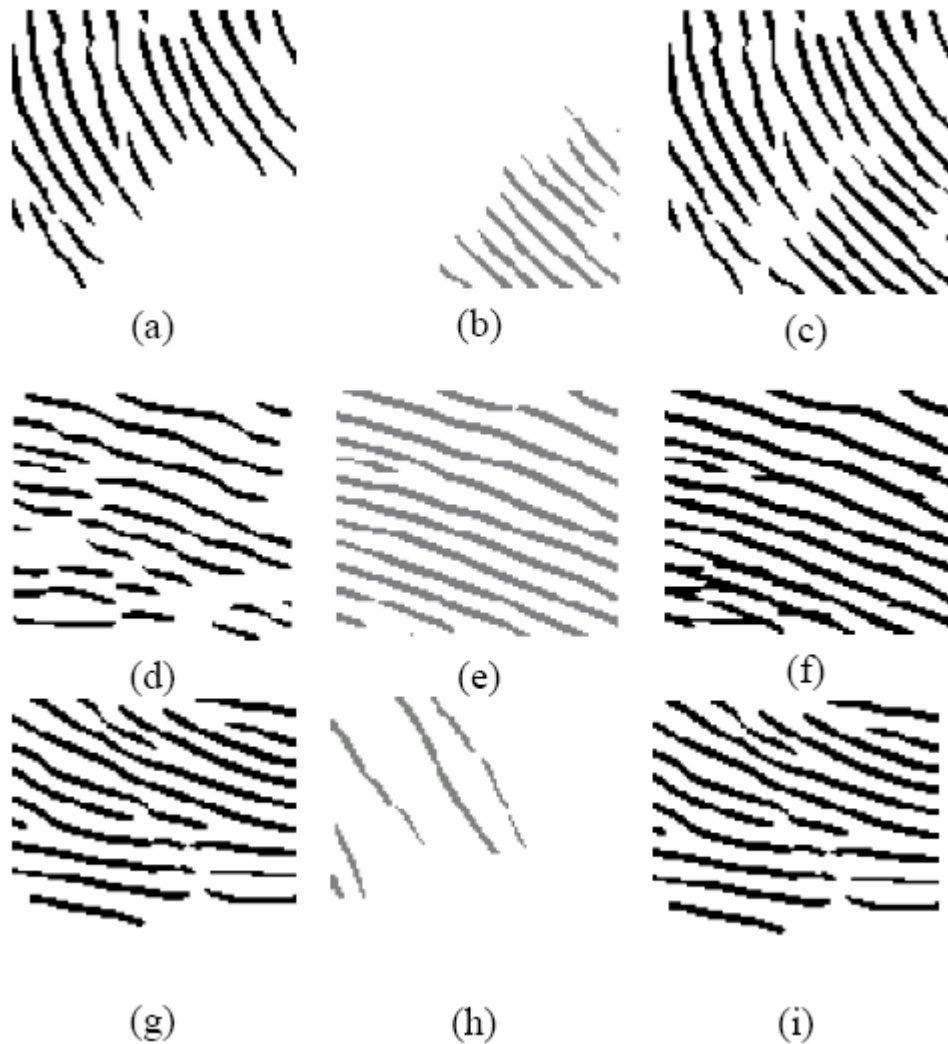


Figure 6. Intuitive meaning of the voting algorithm; here for simplicity, we assume that the input image is decomposed into two filtered images; (a)(c) correspond to rule 1; (d)(f) correspond to rule 2; (g)(h) correspond to rule 3; the left two columns show the inputs to the voting algorithm while the third column shows the voting results.

2.4 Local Orientation Estimation and Enhanced Image

輸入指紋影像的方向場現在可以由忽略不可回復區域的coarse-level ridge map更可靠的被估計出來。

讓 $f_i(x, y)$ ($i=0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$) 表示對應方向 θ_i 的過濾後影像的像素(x, y) 的灰階值， $\theta_i = i * 22.5^\circ$ ，在估測出方向後，以下列公式可以獲得增強影像中像素(x, y)的灰階值：

$$g(x, y) = a(x, y)f_{p(x,y)}(x, y) + (1 - a(x, y))f_{q(x,y)}(x, y), \quad (14)$$

where

$$p(x, y) = \lfloor \frac{\theta(x, y)}{22.5} \rfloor, \quad (15)$$

$$q(x, y) = \lceil \frac{\theta(x, y)}{22.5} \rceil \bmod 8, \quad (16)$$

$$a(x, y) = \frac{\theta(x, y) - p(x, y)}{22.5}, \quad (17)$$

$$(18)$$

and $\theta(x, y)$ represents the value of local orientation field at pixel (x, y) .