

## 一种指纹合成的方法及其实现<sup>\*</sup>

胡瑾<sup>1</sup>, 田捷<sup>1,2+</sup>, 陈新建<sup>1</sup>, 杨鑫<sup>1</sup>, 时鹏<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(中国科学院 自动化研究所 复杂系统与智能科学重点实验室, 北京 100080)

<sup>2</sup>(中国科学院 研究生院, 北京 100049)

### A Synthetic Fingerprint Generation Method and Its Implementation

HU Jin<sup>1</sup>, TIAN Jie<sup>1,2+</sup>, CHEN Xin-Jian<sup>1</sup>, YANG Xin<sup>1</sup>, SHI Peng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(Key Laboratory of Complex Systems and Intelligence Science, Institute of Automation, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

<sup>2</sup>(Graduate School, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-10-62532105, Fax: +86-10-62527995, E-mail: tian@doctor.com, <http://www.fingerpass.net>

**Hu J, Tian J, Chen XJ, Yang X, Shi P. A synthetic fingerprint generation method and its implementation. *Journal of Software*, 2007,18(3):517-526.** <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/517.htm>

**Abstract:** A synthetic fingerprint generation method is presented and implemented in this paper. A new combination model for the orientation field of fingerprint is applied to generate more realistic fingerprint direction map, and a new expression of the fingerprint density map is presented. Then a modified Gabor filter is used for ridge pattern generation. This method consists of two main processes: First, a master-fingerprint image is generated after direction map generation, density map generation and ridge pattern generation. Then a realistic synthetic fingerprint is obtained through a series of steps on the master-fingerprint, including adding scratches, displacement of ridges, erosion or dilation of ridges, distortion, noising and rendering, global displacement and rotation, changing contrast and adding background noise. The synthetic fingerprint generation platform implemented with this method has been applied and verified in Biometrics Verification Competition 2004. Finally, the numerical experimental results approve the validity and robustness of the method.

**Key words:** synthetic fingerprint generation; direction map generation; density map generation; ridge pattern generation

**摘要:** 提出并实现了一种指纹合成方法.该方法通过新的联合方向场模型生成更加符合真实指纹的方向场,并提出一种新的指纹密度图的表示方法.然后,通过改进的 Gabor 滤波器生成指纹脊线纹理.该方法包括两个主要步骤:首先,经过指纹方向场生成、密度图生成和脊线纹理生成产生一个指纹模板图像;然后对指纹模板图像进行一系列变换,包括添加划痕、纹理平移、脊线的膨胀/腐蚀、脊线的弹性形变、脊线的加噪和平滑、图像的

\* Supported by the Project of National Science Fund for Distinguished Young Scholars of China under Grant No.60225008 (国家杰出青年基金); the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60332010 (国家自然科学基金); the Project for Young Scientists' Fund of National Natural Science Foundation of China under Grant No.60303022 (国家自然科学基金青年科学基金); the Natural Science Foundation of Beijing of China under Grant No.4052026 (北京市自然科学基金)

Received 2005-10-18; Accepted 2006-02-24

平移和旋转、改变对比度、添加背景噪声,最终得到类似于真实指纹的合成指纹图像.基于该方法的指纹生成器平台,已在 2004 年中国生物特征竞赛中得到应用和检验.实验结果验证了该方法的有效性和鲁棒性.

关键词: 指纹合成;方向场生成;密度图生成;脊线纹理生成

中图法分类号: TP182 文献标识码: A

指纹识别是目前应用最为广泛的生物特征识别方法.在进行自动指纹识别算法研究过程中,需要较大规模的指纹数据库对算法进行测试和优化.但是,传统的采集指纹建库的方法存在很多缺点:首先,采集大量指纹需要花费大量成本和时间;其次,无论对采集指纹者还是被采集指纹者而言,采集的过程都十分麻烦,并且容易出错;而且,采集指纹还涉及个人隐私.如果能够利用合成指纹的方法生成指纹数据库,会简化建库过程,使得上述问题都能够得到很好的解决.国际上对于指纹合成方法的研究已有多十年,国际指纹认证竞赛 FVC<sup>[1-3]</sup>采用的第 4 个指纹测试库即为合成指纹数据库.而国内目前尚未开展此类工作,但是随着指纹识别技术的推广和应用,合成指纹方法将具有广阔的应用前景.

Sherstinsky 和 Picard 于 1994 年提出一种动态非线性系统的方法<sup>[4]</sup>,将灰度级指纹图像二值化.虽然这项工作没有直接对人工指纹合成进行研究,但是文中所提及的脊线模型仍可作为合成指纹的基础.波兰公司 Optel 的 Kosz<sup>[5]</sup>用一种比较新颖的方法建立脊线纹理和细节的数学模型,进而生成人造指纹.但是,为了保护其商业利益,他们没有向外界透露其技术细节.Nocikov 和 Glushchenko 于 1998 年提出了一种频域内的脊线生成技术<sup>[6]</sup>.由此方法可以引申出若干方法,如空域 Gabor 滤波器的迭代应用.最经典的方法是 Cappelli 等人的研究<sup>[7-9]</sup>,他们提出了合成指纹方法的框架和步骤,首先生成指纹模板图像,再根据模板生成按压图像.应用其算法开发的软件 SFINGE 生成的指纹测试库也用于 FVC 竞赛中.此外,Araque 等人<sup>[10]</sup>也研究了合成指纹算法,其方向场模型是一种由 11 个以上系数控制的偏序模型,系数由真实数据拟合.用简单的二值模型作为生成脊线纹理的滤波器,此方法可以对细节点进行控制.

指纹合成涉及多个步骤,其中,指纹方向场、密度图和脊线纹理的生成对合成指纹的质量最为关键,因而,选择恰当的指纹方向场模型、密度图表示方法和脊线纹理生成算法,对于指纹合成方法的整体效果也就显得至关重要了.基于此,本文提出了一种改进的指纹合成方法.与 Cappelli 等人方法的不同之处在于:对于指纹方向场的生成,本文选择了更加符合真实指纹的联合方向场模型<sup>[11]</sup>,并且提出一种新的指纹密度图的表示方法,进而将 Gabor 滤波器加以改进,生成更加真实的指纹脊线纹理.这些改进使得应用本文方法合成的指纹更为逼真.基于本文提出的指纹合成方法,我们实现了指纹生成器平台.

本文第 1 节介绍指纹合成方法的主要步骤,重点给出生成方向场、生成密度图和生成脊线纹理的改进方法,同时对生成按压指纹图像的具体方法也给出详细说明.第 2 节给出利用基于本文方法的指纹生成器平台进行实验的结果,验证本文方法的有效性和鲁棒性.第 3 节是结论与展望.

## 1 指纹合成方法

指纹合成方法总体上分为两部分:生成指纹模板图像和生成指纹按压图像.生成指纹模板图像是整个指纹合成的基础,经过生成方向场、生成密度图和生成脊线纹理 3 个步骤,得到一个指纹脊线纹理的二值化图像,称作指纹模板图像.再以此模板图像为基础,经过一系列的变换步骤,包括添加划痕、纹理平移、脊线的膨胀/腐蚀、脊线的弹性形变、脊线的加噪和平滑、图像的平移和旋转、改变对比度、添加背景噪声,最终得到指纹的按压图像.一幅指纹模板图像相当于一个手指模板,由同一个模板图像生成的各个指纹按压图像,相当于从同一个手指采集到的不同指纹图像.

### 1.1 生成指纹模板图像

#### 1.1.1 指纹方向场生成

指纹方向场生成是指纹合成方法的基础之一,方向场的逼真与否直接影响到最后合成指纹的质量.在指纹

分类研究中,根据指纹奇异点的位置和数量,一般把指纹分成 5 类,分别是弓、尖弓、左旋、右旋和漩涡。

对于一幅指纹图像,脊线或谷线在每个像素点都有一个方向,将这些方向量化后可构成一个方向场图。在指纹识别中,方向场的正确与否直接影响到指纹识别算法的准确率。对于质量较差的指纹,直接求方向场的方法会有较大误差,因此十多年来,很多研究者都致力于指纹方向场规律的研究,试图用某种数学模型来表示方向场。Sherlock 和 Monro 率先于 1993 年提出一种简化模型<sup>[12]</sup>,忽略其他因素,仅根据中心点和三角区的位置计算出一致方向图,即一旦奇异点的类型和位置被确定,方向场也就被唯一确定。显然,这样的方法不够理想,与各式各样的真实指纹方向场有很大偏差。因此,Vizcaya 和 Gerhardt 于 1996 年在简化模型的基础上提出一种非线性模型<sup>[13]</sup>,引入更多的参数,使得各点方向场不只与奇异点位置和种类有关。Cappelli 等人的 SFINGE 软件即采用这一模型。在合成指纹研究过程中,Araque 等人于 2002 年的论文中提出基于简化模型<sup>[12]</sup>的另一种改进方向场模型<sup>[10]</sup>,这一模型是由 11 个以上系数控制的偏序模型,对于不同种类的指纹,模型中系数的个数是不同的,这些系数由真实数据拟合,但此方法计算量很大。

而 Gu 等人于 2003 年提出的联合方向场模型<sup>[11]</sup>采用多项式与简化模型的加权和来表示方向场,与其他模型相比,在方向场生成上能够获得更好的效果。因此,本文采用这一模型来生成指纹方向场。下面简要介绍该模型及其用于生成指纹方向场的方法。

用  $\alpha(x,y)$  和  $U(x,y)$  分别表示方向场函数和变换后的函数, $R(x,y)$  和  $I(x,y)$  分别为其实部和虚部。

$$U=R+iI=\cos 2\theta+i\sin 2\theta, \theta \in [0,\pi] \tag{1}$$

则指纹方向场可表示为一个多项式与一个受奇异点(包括中心点和三角区)影响的表达式之和的混合模型:

$$\begin{pmatrix} R(x,y) \\ I(x,y) \end{pmatrix} = \alpha_{PM} \begin{pmatrix} PR \\ PI \end{pmatrix} + \sum_{k=1}^K \alpha_{PC}^{(k)} \cdot \begin{pmatrix} H_1^{(k)} \\ H_2^{(k)} \end{pmatrix} \tag{2}$$

其中, $PR$  和  $PI$  分别为多项式的实部和虚部,表达式为

$$PR(x,y) = (1 \ x \ \dots \ x^n) \cdot P_1 \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ y \\ \vdots \\ y^n \end{pmatrix}, \quad PI(x,y) = (1 \ x \ \dots \ x^n) \cdot P_2 \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ y \\ \vdots \\ y^n \end{pmatrix} \tag{3}$$

根据经验, $n$  可以取 4。中心点和三角区对指纹方向场的影响体现在以下两式中, $H_1^{(k)}$  和  $H_2^{(k)}$  分别为公式的实部和虚部:

$$PC_{Core} = H_1 + iH_2 = \begin{cases} \frac{y-y_0}{r}Q - i\frac{x-x_0}{r}Q, & r \leq R \\ 0, & r > R \end{cases} \tag{4}$$

$$PC_{Delta} = H_1 + iH_2 = \begin{cases} \frac{-y-y_0}{r}Q - i\frac{x-x_0}{r}Q, & r \leq R \\ 0, & r > R \end{cases} \tag{5}$$

其中,  $r = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}$ , 即该点到奇异点的距离; $R$  为奇异点对指纹方向场产生影响的有效半径。

两个系数分别为  $\alpha_{PM}(x,y) = \max\left\{1 - \sum_{k=1}^K \alpha_{PC}^{(k)}, 0\right\}$ ,  $\alpha_{PC}^{(k)}(x,y) = 1 - \frac{r^{(k)}(x,y)}{R^{(k)}}$ 。这里, $K$  为奇异点个数,  $(x_0^{(k)}, y_0^{(k)})$  为第  $k$  个奇异点的坐标, $R^{(k)}$  为有效半径, $r^{(k)}(x,y)$  定义为

$$\min\left(\sqrt{(x-x_0^{(k)})^2 + (y-y_0^{(k)})^2}, R^{(k)}\right).$$

根据指纹奇异点的不同个数与位置,可生成不同类型指纹方向场。参数  $P_1, P_2, Q$  以及  $(x_0^{(k)}, y_0^{(k)})$  用于控制同类型指纹的个体差异。 $P_1, P_2, Q$  采用加权最小二乘方法对真实指纹拟合得到。

图 1 显示了根据该模型生成的 5 种类型指纹的方向场示例。从左至右分别为弓、尖弓、左旋、右旋、漩涡。中心点和三角区也在图中标出。

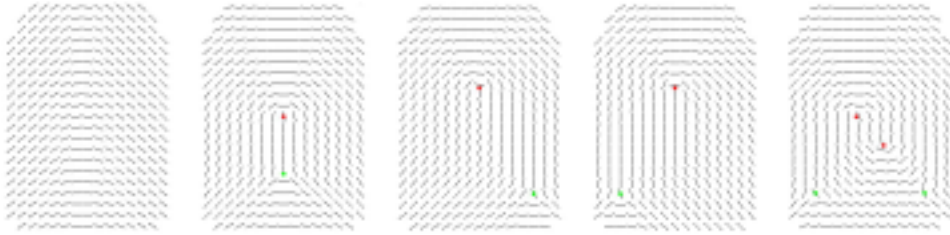


Fig.1 An example of direction maps of five types of fingerprints

图 1 5 种类型指纹的方向场示例

### 1.1.2 指纹密度图生成

生成密度图的目的是为了确定指纹脊线纹理(包括脊线和谷线)的宽度。

这里利用了一些启发式规则.通过对真实指纹的观察,有两点结论:(1) 在一幅指纹图像中,指纹的局部密度可能会有一定差异(这里的密度指的是指纹脊线与其相邻谷线宽度之和),并且在一些特定区域,此密度呈现一定的规律,如上中心点上方和三角区下方区域较之其他大部分区域有更小的密度;(2) 在一幅指纹图像中,局部密度相同的区域,脊线(或谷线)宽度也可能有所不同,有的区域脊线比谷线宽,有的区域脊线比谷线窄.Cappelli 等人的研究忽略了第 2 点,只考虑到第 1 点.但综合考虑两者,无疑会有助于生成更为逼真的指纹.

针对这两点结论,本文分别定义了能更加完整地描述指纹局部纹理信息的变量:指纹局部纹理密度  $D(x,y)$  及指纹脊线宽度比例  $W(x,y)$ . $D(x,y)$  表示图像上一点  $(x,y)$  处的局部纹理宽度(脊线与谷线之和),单位为像素. $W(x,y)$  表示点  $(x,y)$  处的局部脊线宽度占该脊线与其相邻谷线宽度之和的比例,于是有  $0 < W(x,y) < 1$ .若脊线与谷线宽度相等,则有  $W(x,y)=0.5$ .这样,图像上任一点  $(x,y)$  处的局部脊线宽度和谷线宽度可由  $W(x,y)$  和  $D(x,y)$  唯一确定.

生成指纹密度图  $W$  和  $D$  的实现步骤类似,在符合自然界规律的范围内(如  $D$  在 10 左右, $W$  初值选择 0.5),随机选择密度值并产生密度图,针对一些特定区域改变其值,并实现区域平滑.

$W$  和  $D$  将用于后面的脊线纹理生成步骤.

### 1.1.3 指纹脊线纹理生成

根据前面已经生成的方向场和密度图,可以生成脊线纹理的二值图像.用灰度值 0 和 255 分别表示脊线和谷线.

指纹脊线纹理生成步骤如下:首先随机产生若干种子点,从种子点开始,迭代增强初始图像,就可以得到逼真的脊线纹理图像,并产生随机位置上的各种类型的指纹细节点.关于指纹图像增强已有不少研究<sup>[14,15]</sup>,其中 Gabor 滤波器可用于产生指纹脊线纹理<sup>[7]</sup>,其表达式为

$$f(v) = \frac{1}{\sigma^2} e^{-\frac{\|v\|^2}{2\sigma^2}} \cdot \cos(k(x,y) \cdot v) \quad (6)$$

其中,  $(x,y)$  为图像上经滤波器增强的点;  $\sigma$  是高斯函数的均方差;  $k(x,y)$  是平面波的波矢量,  $k(x,y) = [k_x, k_y]^T$  由  $(x,y)$  点的脊线纹理方向  $O(x,y)$  和密度  $D(x,y)$  确定(这里的  $D(x,y)$  与第 1.1.2 节中定义的  $D(x,y)$  相同).

$$D(x,y) = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}, \tan(O(x,y)) = -\frac{k_x}{k_y} \quad (7)$$

但是,用 Gabor 滤波器生成的指纹脊线纹理,其脊线与谷线的宽度是固定相等的,这并不符合真实指纹的性质.为生成更为逼真的脊线,本文将 Gabor 滤波器加以改进,这样产生的脊线更加符合真实指纹纹理特征.

考虑到一般的 Gabor 滤波器函数为一个高斯函数与一个余弦平面波之积,其中,余弦平面波的周期对应于指纹脊线和谷线的宽度.对于脊线与谷线宽度相等的纹理,可采用普通余弦函数,其周期为脊线(或谷线)宽度的 2 倍;而对于脊线与谷线宽度不等的纹理,脊线和谷线可以分别采用周期不同的余弦函数来构造滤波函数.图 2 为周期与指纹脊线纹理和谷线纹理相对应的分段余弦函数的示意图.

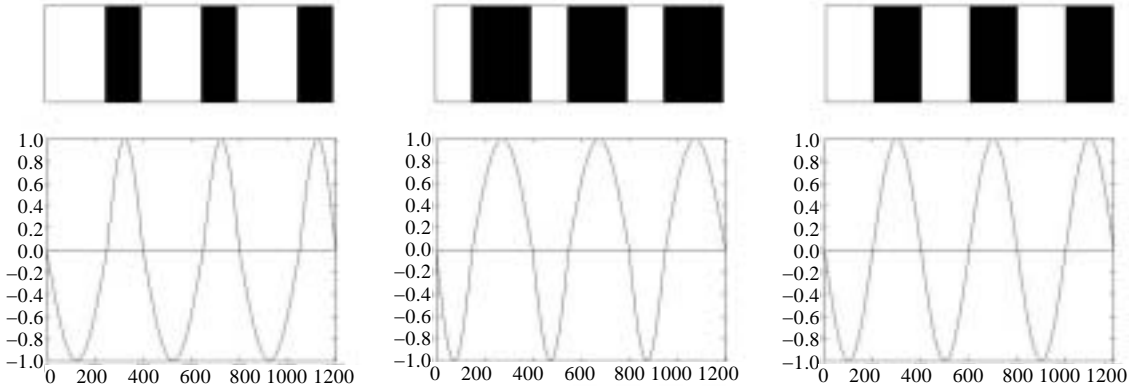


Fig.2 Segmented cosine function whose periods correspond to the ridge and valley respectively

图 2 周期与指纹脊线纹理和谷线纹理相对应的余弦函数

仍令 $(x,y)$ 为图像上经滤波器增强的点,根据前面定义的准则,定义改进滤波器为

$$f(v) = \frac{1}{\sigma^2} e^{-\frac{\|v\|^2}{2\sigma^2}} \cdot g(v; k(x, y), W(x, y)) \quad (8)$$

$k$  和  $\sigma$  的定义与式(6)相同, $W(x,y)$ 为 $(x,y)$ 处的指纹脊线宽度比例(已在第 1.1.2 中给出定义).分段函数 $g(v; k(x, y), W(x, y))$ 定义为

$$g(v; k(x, y), W(x, y)) = \begin{cases} \cos\left(\frac{k(x, y) \cdot v - [k(x, y) \cdot v]}{2W(x, y)}\right), & 0 \leq (k(x, y) \cdot v - [k(x, y) \cdot v]) \leq \frac{W(x, y)}{2} \\ -\cos\left(\frac{k(x, y) \cdot v - [k(x, y) \cdot v] - \frac{1}{2}}{2(1 - W(x, y))}\right), & \frac{W(x, y)}{2} < (k(x, y) \cdot v - [k(x, y) \cdot v]) \leq 1 - \frac{W(x, y)}{2} \\ \cos\left(\frac{k(x, y) \cdot v - [k(x, y) \cdot v] - 1}{2W(x, y)}\right), & 1 - \frac{W(x, y)}{2} < (k(x, y) \cdot v - [k(x, y) \cdot v]) \leq 1 \end{cases} \quad (9)$$

图 3 为分别用改进 Gabor 滤波器与原 Gabor 滤波器生成的部分脊线纹理的比较.图 3(a)由普通 Gabor 滤波器生成;图 3(b)和图 3(c)由改进 Gabor 滤波器生成.可以看到:图 3(a)的脊线与谷线宽度相等;图 3(b)的脊线比谷线要宽;图 3(c)的谷线比脊线要宽.由此可见,改进的 Gabor 滤波器能够生成更加符合真实指纹性质的指纹纹理.

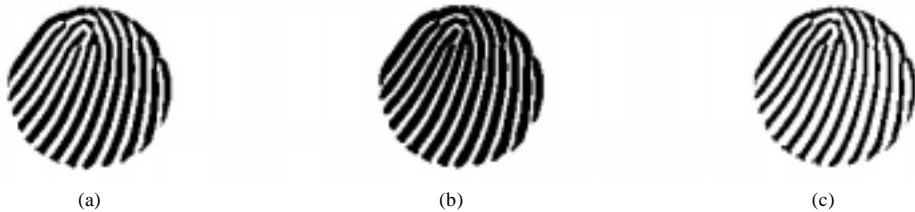


Fig.3 Comparison of the ridge patterns generated by the modified Gabor filter and the original one respectively

图 3 改进的 Gabor 滤波器与原 Gabor 滤波器生成的脊线纹理之比较

经过这一步生成的脊线纹理图像即为一个指纹模板图像.图 4 为脊线纹理生成过程的示意图.左边 4 幅图像是由单个种子点生成脊线的过程,右边 4 幅图像是由多个种子点生成脊线的过程.



Fig.4 Ridge pattern generation

图 4 脊线纹理生成过程

## 1.2 生成按压指纹图像

在实际情况下,由同一个手指按压出的指纹图像却是各式各样的,这主要是由以下原因造成的:(1)  $X$  和  $Y$  向上的平移和旋转;(2) 手指接触区域不同;(3) 由于指纹压力与采集仪不垂直而引起的非线性形变;(4) 由于手指干湿状态或按压强度不同而引起的脊线粗细差异;(5) 指尖的划痕或磨损;(6) 背景噪声和其他随机噪声.

对同一指纹模板图像,本文采用一系列变换步骤,生成不同的指纹按压图像.这里重点介绍指纹脊线的膨胀/腐蚀,弹性形变,加噪和平滑,生成背景噪声等方法.其他变换步骤将作简要说明.

### 1.2.1 指纹脊线的膨胀/腐蚀

手指皮肤的干湿状态和手指对采集仪的压力对于采集的指纹图像有相似的作用.在采集同一个手指的指纹时,如果手指压力小或皮肤干燥,则得到的指纹图像脊线较细;反之,如果手指压力大或皮肤湿润,则得到的指纹图像脊线较粗.

本文利用形态学的方法来模拟不同的手指干燥程度或压力对指纹的作用.对于手指干燥或低压力的情况,用腐蚀算法;对于手指较湿或高压力的情况,用膨胀算法.图 5 显示了不同程度的腐蚀和膨胀对同一幅指纹模板图像的作用.

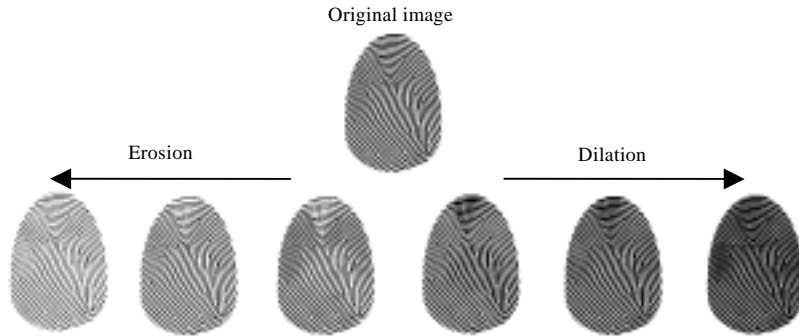


Fig.5 Different levels of erosion or dilation to the same fingerprint

图 5 对同一幅指纹模板图像不同程度的膨胀或腐蚀

### 1.2.2 指纹脊线的弹性形变

在自动指纹识别算法研究中,指纹的弹性形变一直都是一个很复杂的问题,许多研究者对此进行了大量研究<sup>[16,17]</sup>.本文采用一种非线性的指纹弹性形变模型<sup>[16]</sup>对指纹模板图像进行变换.该模型把指纹区域分成 3 部分:a 区为指纹的中心区域,指纹形变时该区不发生改变;c 区为指纹最外层的区域,指纹形变时仅仅发生平移和旋转;b 区为介于 a 和 c 之间的区域,在形变时发生了一个非线性的变化.

$v$  是指纹平面内一点.区域 a 近似为椭圆, $shapedist(\cdot)$  是描述区域 a 的形状关系函数,则弹性模型表达式为

$$distortion: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2, distortion(v) = v + \Delta(v) \cdot brake(shapedist_a(v), k) \quad (10)$$

$\Delta(v)$  为形变移动量. $brake(\cdot)$  是从区域 a 到区域 c 的梯度传递函数,为一个单调递增函数.参数  $k$  是传递区间的宽度.这里把指纹形变模型作用到整个指纹模板图像上并进行了插值,这样可令得到的指纹脊线更加平滑.图 6 显示了对指纹脊线纹理施加弹性形变前后的图像.



Fig.6 Fingerprint images before and after distortion

图 6 指纹弹性形变前和弹性形变后的结果

1.2.3 指纹脊线的加噪和平滑

真实的指纹是带有白斑的多个灰度级的噪声图像,而非二值图像,因而需要对脊线纹理的二值图像进行加噪和平滑,以达到逼真的效果.步骤是:首先提取脊线纹理图像的谷线,对脊线图像添加噪声,指纹轮廓边缘区域噪声渐进增大;然后对加噪图像进行中值滤波后重新添加谷线.图 7 显示了加噪和平滑前后的指纹图像.

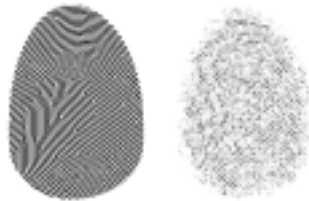


Fig.7 Fingerprint images before and after noising and rendering

图 7 指纹加噪和平滑前后的结果

1.2.4 添加背景噪声

为了使合成的指纹图像更加逼真,需要添加逼真的背景噪声.用不同指纹采集仪采集到的指纹图像,其背景噪声也各不相同.本文的指纹背景图像是基于光学采集仪.

为了生成背景噪声,本文采用的是一种基于 KL 变换的统计模型的方法.模型需要一组纯粹的背景图像作为训练集.计算训练背景中代表主方差的线性子空间,然后用它随机生成新的背景.

本文中的训练数据为 85 幅纯粹背景图像,由光学采集仪采集得到.所取的线性子空间的维数为 10.图 8 为背景图像示例,其中第 1 行的 3 幅图像是用于训练的纯粹背景图像,第 2 行的 3 幅图像是利用本文方法生成的背景图像.

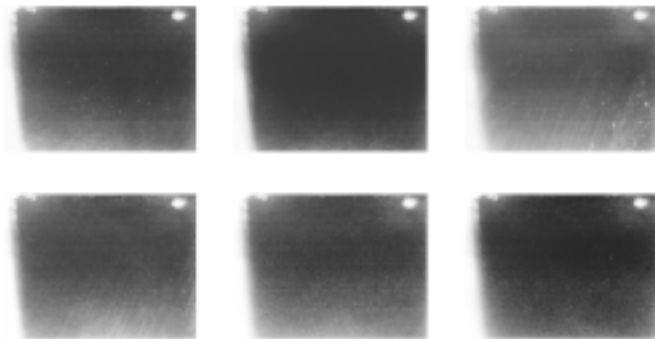


Fig.8 Examples of background images used for training data (top) and generated background images (bottom)

图 8 用作训练数据的背景图像(上)和生成的背景图像(下)示例

1.2.5 其他用于生成按压指纹的变换步骤

- 添加随机划痕:划痕的数量、长宽和位置在一定取值范围内随机生成,划痕的方向是随机的.

- 指纹脊线纹理的平移:图像中的指纹轮廓不动,脊线在一定取值范围内平移.
- 指纹图像的平移和旋转:指纹图像在一定取值范围内作平移和旋转变换.
- 改变对比度:按比例改变指纹图像灰度值.

## 2 实验结果

基于本文提出的算法,我们开发了一个指纹生成器平台.该平台既可以显示指纹合成的每个基本步骤,又可以根据所输入的各个参数生成合成指纹数据库,并且具有良好的用户界面、方便的输入/输出接口以及较高的程序运行速度.

在本文的实验中,使用 Pentium IV 2.4 的 PC,生成 2 200 幅指纹(380×460)的数据库耗时 56 分钟.图 9 显示了用指纹生成器平台生成的指纹图像,第 1 行的 4 个指纹由一个指纹模板图像产生,第 2 行的 4 个指纹由另一个指纹模板图像产生.

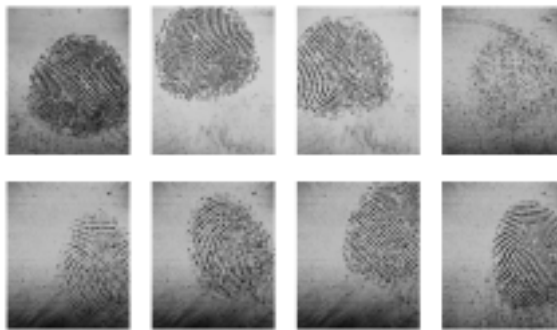


Fig.9 Examples of synthetic fingerprints

图 9 合成指纹图像示例

在首届中国生物特征识别竞赛(BVC 2004)中,本文的合成指纹算法得到了应用和检验.指纹竞赛共有 4 个测试库,其中的 DB4 为应用本文的指纹生成器平台产生的指纹数据库,另外 3 个指纹库分别通过 3 种指纹采集仪采集指纹建库.共有 6 个指纹参赛算法经过 DB1~DB4 的测试.根据竞赛结果,分别比较指纹识别算法的 4 个最重要的性能评价参数 EER,FMR100,FMR1000 和 ZeroFMR 在 6 个参赛算法上的平均值(Avr)、最大值(max)、最小值(min)和标准偏差(St.Dev.).表 1 给出了比较结果.

Table 1 Comparison of performance parameters of algorithms on each database

表 1 算法在各指纹库上的性能参数统计比较

Parameters		DB1	DB2	DB3	DB4
EER	Avr	0.127 8	0.260 7	0.183 8	0.186 9
	Max	0.332 4	0.349 1	0.392 7	0.371 3
	Min	0.028 3	0.153 0	0.078 8	0.047 7
	St.Dev.	0.114 0	0.072 1	0.112 4	0.124 8
FMR100	Avr	0.213 1	0.578 5	0.486 1	0.402 6
	Max	0.811 8	1.000 0	1.000 0	0.850 3
	Min	0.034 0	0.234 6	0.127 4	0.064 8
	St.Dev.	0.298 7	0.292 1	0.355 9	0.284 6
FMR1000	Avr	0.281 5	0.662 5	0.553 4	0.565 5
	Max	0.921 3	1.000 0	1.000 0	1.000 0
	Min	0.056 8	0.288 5	0.192 8	0.103 4
	St.Dev.	0.325 1	0.279 3	0.332 8	0.362 0
ZeroFMR	Avr	0.492 3	0.728 6	0.728 5	0.826 5
	Max	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
	Min	0.134 3	0.350 2	0.302 2	0.563 1
	St.Dev.	0.391 4	0.257 4	0.314 2	0.195 2

图 10 显示了所有算法在每个指纹库上的 ROC 曲线.

通过比较可以看出:本文的合成指纹数据库(DB4)与其他 3 个真实指纹数据库在指纹算法的性能参数和



ROC 曲线的趋势方面都非常相似.这一结果说明,通过本文方法合成的指纹能够较好地模拟自然界真实指纹的类内和类间变化.

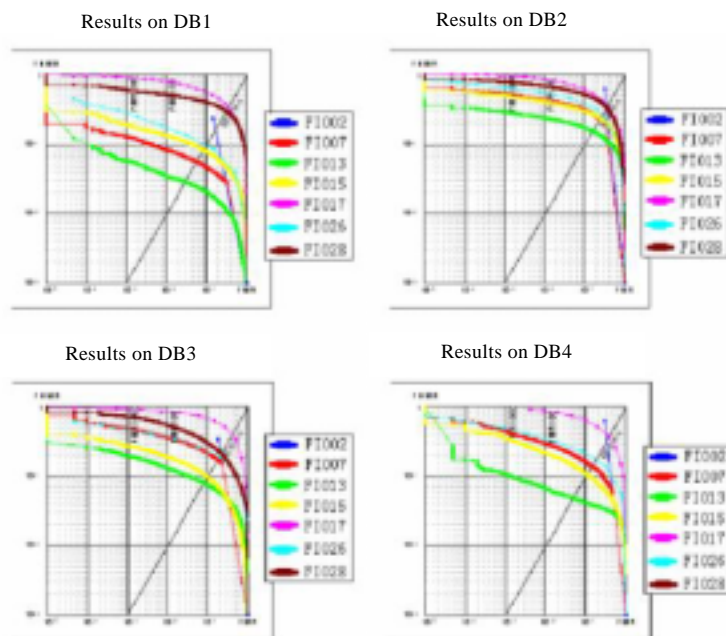


Fig.10 ROC curves of all fingerprint algorithms on each fingerprint database

图 10 各指纹识别算法分别在 4 个指纹数据库上的 ROC 曲线

### 3 结论与展望

以上的实验结果验证了本文提出的指纹合成新方法的有效性和鲁棒性,利用该算法生成的指纹建立的大规模指纹数据库表现出了较好的性能,并且采用合成指纹建库克服了传统的采集指纹建库方法的种种缺点.基于本文方法的指纹生成器平台已在首届中国生物特征竞赛中得到应用.虽然真实指纹数据库不能被完全替代,但是,合成指纹的方法对于测试和优化指纹识别算法在降低成本和缩减时间等方面还是具有重要意义的.

目前,已有文献的成型指纹合成算法只有 Cappelli 等人及 Araque 等人的研究<sup>[5,7-9]</sup>.两者大同小异,都忽略了密度图和脊线纹理中脊线和谷线不一定等宽的问题.并且他们采用的指纹方向场模型与真实指纹存在一定差距.本文的方法与之相比,由于决定指纹结构的 3 个重要因素——方向场模型、密度图模型和脊线纹理模型——都更加符合真实指纹的特点,因而合成的指纹在内部属性上更为逼真.

当然,本文的指纹合成方法还存在一些有待改进之处:首先是关于指纹的噪声.在真实情况中,从相同手指采集到的指纹会呈现大小和相对位置相同或相似的一部分噪声,如由于皮肤毛孔造成的白斑.而在指纹生成器中,对指纹脊线添加的噪声是随机产生的.另外,即便是同一幅指纹图像,其上的噪声也并非均匀分布的.为了使生成的指纹图像更为逼真,指纹噪声的性质应在未来工作中得到进一步研究.其次,指纹生成器中脊线的细节点都是随机产生的.在未来的工作中,有待进一步改进脊线纹理生成算法,例如,人为控制生成细节点的数量和位置等.

#### References:

- [1] Maio D, Maltoni D, Cappelli R, Wayman JL, Jain AK. FVC2000: Fingerprint verification competition. *IEEE Trans. on Pattern Analysis Machine Intelligence*, 2002,24(3):402-412.
- [2] Maio D, Maltoni D, Cappelli R, Wayman JL, Jain AK. FVC2002: Fingerprint verification competition. In: Kasturi R, ed. *Proc. of the 16th Int'l Conf. on Pattern Recognition*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2002. 811-814.

- [3] Maio D, Maltoni D, Cappelli R, Wayman JL, Jain AK. FVC2004: 3rd fingerprint verification competition. In: Proc. of the Int'l Conf. on Biometric Authentication. LNCS 3072, Springer-Verlag, 2004. 1-7.
- [4] Sherstinsky A, Picard RW. Restoration and enhancement of fingerprint images using M-lattice-A novel non-linear dynamical system. In: Proc. of the 12th ICPR. vol. 2. 1999. 195-200. <http://ieeexplore.ieee.org/iel2/4428/12512/00576903.pdf?arnumber=576903>
- [5] Optel Inc. <http://www.optel.pl/software/english/synt.htm>
- [6] Novikov SO, Glushchenko GN. Fingerprint ridges structure generation models. In: Proc. of the SPIE, vol. 3346. 1998. 270-274. <http://spiedl.aip.org/getabs/servlet/GetabsServlet?prog=normal&id=PSISDG003346000001000270000001&idtype=cvips&gifs=yes>
- [7] Cappelli R, Erol A, Maio D, Maltoni D. Synthetic fingerprint-image generation. In: Proc. of the 15th Int'l Conf. on Pattern Recognition. IEEE Computer Society Press, 2000. 475-478. [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?isNumber=19547 & arNumber=903586&isnumber=19547&arnumber=903586](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?isNumber=19547 & arNumber=903586&isnumber=19547&arnumber=903586)
- [8] Cappelli R, Maio D, Maltoni D. Synthetic fingerprint-database generation. In: Kasturi R, ed. Proc. of the 16th Int'l Conf. on Pattern Recognition. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2002. 744-747.
- [9] Maltoni D, Maio D, Jain AK, Prabhakar S. Handbook of Fingerprint Recognition. New York: Springer-Verlag, 2003. 204-231.
- [10] Araque JL, Baena M, Chalela BE, Navarro D, Vizcaya PR. Synthesis of fingerprint images. In: Kasturi R, ed. Proc. of the 16th Int'l Conf. on Pattern Recognition. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2002. 422-425.
- [11] Gu J, Zhou J, Zhang D. A combination model for orientation field of fingerprints. Pattern Recognition, 2004,37:543-553.
- [12] Sherlock B, Monro D. A model for interpreting fingerprint topology. Pattern Recognition, 1993,26(7):1047-1095.
- [13] Vizcaya P, Gerhardt L. A nonlinear orientation model for global description of fingerprints. Pattern Recognition, 1996,29(7): 1221-1231.
- [14] Hong L, Wan Y, Jain AK. Fingerprint image enhancement: Algorithm and performance evaluation. IEEE Trans. on Pattern Analysis Machine Intelligence, 1998,20(8):777-789.
- [15] Cheng J, Tian J. Fingerprint enhancement with dyadic scale-space. Pattern Recognition Letters, 2004,25(11):1273-1284.
- [16] Cappelli R, Maio D, Maltoni D. Modelling plastic distortion in fingerprint images. In: Proc. of the ICAPR 2001. 2001. 369-376. <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=646260.685117>
- [17] Chen H, Tian J. A fingerprint matching algorithm with registration pattern inspection. Journal of Software, 2005,16(6):1046-1053 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/16/1046.htm>

#### 附中文参考文献:

- [17] 陈宏,田捷.检验配准模式的指纹匹配算法.软件学报,2005,16(6):1046-1053. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/16/1046.htm>



胡瑾(1980 - ),女,北京人,博士生,主要研究领域为指纹识别,医学图像处理.



杨鑫(1972 - ),女,副研究员,主要研究领域为生物特征识别.



田捷(1960 - ),男,博士,研究员,博士生导师,主要研究领域为医学图像处理,生物特征识别.



时鹏(1980 - ),男,博士生,主要研究领域为指纹识别.



陈新建(1979 - ),男,博士生,主要研究领域为指纹识别.