

Journal of Image  
and Graphics

# 中国图象图形学报



ISSN1006-8961  
CN11-3758/TB

2013  
Vol.18 No.

1

中国科学院遥感应用研究所  
中国图象图形学学会主办  
北京应用物理与计算数学研究所

# 中国图象图形学报

Zhongguo Tuxiang Tuxing Xuebao

2013年1月 第18卷 第1期(总第201期)

## 目次

### 综述

- 正面人脸图像合成方法综述 ..... 赵林, 高新波, 田春娜(1)  
SAR 图像道路网提取方法综述 ..... 程江华, 高贵, 库锡树, 孙即祥(11)

### 图像处理和编码

- 头部缺失的 JPEG 文件碎片恢复 ..... 徐明, 黄立, 张海平, 徐建, 郑宁(24)  
安全高效的可撤销指纹模板构造 ..... 喻建平, 张鹏, 王瑶, 杨懿竣(36)  
基于残差的图像超分辨率重建 ..... 陈华华, 姜宝林, 刘超, 陈伟强, 陆宇, 张嵩(42)  
旋转的 Wang Tiles 纹理合成算法 ..... 王继东, 庞明勇, 赵瑞斌(49)  
基于圆形约束快速水平集的原生质体细胞分割 ..... 王晓飞, 庞全(55)

### 图像分析和识别

- 采用压缩传感的鲁棒的视频指纹方案 ..... 孙锐, 李超, 蒋飞云(62)  
基于图像显著性的路面裂缝检测 ..... 徐威, 唐振民, 吕建勇(69)  
基于局部熵的主动轮廓模型 ..... 潘改, 高立群, 赵爽(78)  
基于算子的图像分解 ..... 李峰, 曾晓辉, 陈盛霞, 沈玉娟(86)

### 图像理解和计算机视觉

- 中值流辅助在线多示例目标跟踪 ..... 王德建, 张荣, 尹东, 张智瑞(93)  
四叉树直方图的特殊方向关系表达 ..... 张珂, 王小捷, 靳越(101)

### 计算机图形学

- 协同进化的近似规则纹理合成 ..... 王相海, 陶兢喆(107)  
反走样直线的灰度循环生成算法 ..... 牛连强, 张胜男, 钟玲(115)

### 地理信息技术

- 微博客蕴含交通信息的提取 ..... 张恒才, 陆锋, 陈洁(123)

- 
- “计算机视觉前沿论坛”专栏征文通知 ..... (130)

# Journal of Image and Graphics

(Monthly, Started in 1996)

Vol. 18 No. 1 January 2013

## Contents

### Review

- Review of frontal face image synthesis methods ..... Zhao Lin, Gao Xinbo, Tian Chunna(1)  
Review of road network extraction from SAR images ..... Cheng Jianguhua, Gao Gui, Ku Xishu, Sun Jixiang(11)

### Image Processing and Coding

- Rrecovery method for JPEG file fragments with missing headers  
..... Xu Ming, Huang Li, Zhang Haiping, Xu Jiang, Zheng Ning(24)  
Secure and efficient scheme to construct a cancelable fingerprint template  
..... Yu Jianping, Zhang Peng, Wang Yao, Yang Yijun(36)  
Image super-resolution reconstruction based on residual error  
..... Chen Huahua, Jiang Baolin, Liu Chao, Chen Weiqiang, Lu Yu, Zhang Song(42)  
Texture synthesis using rotational Wang Tiles ..... Wang Jidong, Pang Mingyong, Zhao Ruibin(49)  
Protoplasm somatic cells segmentation based on circle dependent fast level-set segmentation ..... Wang Xiaofei, Pang Quan(55)

### Image Analysis and Recognition

- Robust video fingerprinting via compressed sensing ..... Sun rui, Li Chao, Jiang Feiyun(62)  
Pavement crack detection based on image saliency ..... Xu Wei, Tang Zhenmin, Lv Jianyong(69)  
Active contour model driven by local entropy energy ..... Pan Gai, Gao Liqun, Zhao Shuang(78)  
Operator-based image decomposition ..... Li Feng, Zeng Xiaohui, Chen Shengxia, Shen Yujuan(86)

### Image Understanding and Computer Vision

- Median flow aided online multi-instance learning visual tracking ..... Wang Dejian, Zhang Rong, Yin Dong, Zhang Zhirui(93)  
Expression of special directional relation based on quadtree histogram ..... Zhang Ke, Wang Xiaojie, Jin Yue(101)

### Computer Graphics

- Fast near-regular texture synthesis based on the concept of co-evolution ..... Wang Xianghai, Tao Jingzhe(107)  
Integral algorithm for generating anti-aliased straight line controlled by gray iteration  
..... Niu Lianqiang, Zhang Shengnan, Zhong Ling(115)

### Geoinformatics

- Extracting traffic information from massive micro-blog messages ..... Zhang Hengcai, Lu Feng, Chen Jie(123)

中图分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2013)01-0036-06

论文引用格式: 喻建平, 张鹏, 王瑶, 杨懿竣. 安全高效的可撤销指纹模板构造[J]. 中国图象图形学报, 2013, 18(1): 36-41.

## 安全高效的可撤销指纹模板构造

喻建平, 张鹏, 王瑶, 杨懿竣

深圳大学 ATR 国防科技重点实验室, 深圳 518060

**摘要:** 指纹特征加密是生物特征识别技术中最为活跃的研究领域之一。然而指纹特征是人体固有的特征, 具有唯一性与终身不变性, 一旦识别系统中的用户指纹模板丢失, 将是永久性的。为了避免用户指纹模板丢失, 基于巴特沃斯低通滤波器原型, 设计了一组不可逆转换函数, 将用户原始指纹模板转换为可撤销指纹模板, 不同识别系统中存储的可撤销指纹模板具有互异性与不可逆性, 进而有效规避原始指纹模板的不变性与公开性所带来的安全隐患。匹配精度、不可逆性、转换速度等方面的实验分析表明, 所构造可撤销指纹模板方案在认证效率、安全性、计算效率等方面具有良好性能。

**关键词:** 指纹特征加密; 可撤销指纹模板; 巴特沃斯低通滤波器; 不可逆转换函数

### Secure and efficient scheme to construct a cancelable fingerprint template

Yu Jianping, Zhang Peng, Wang Yao, Yang Yijun

ATR Key Laboratory of National Defense Technology, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China

**Abstract:** Fingerprint encryption is one of the most active research domains in biometrics recognition. However, fingerprints are human inherent characteristics, which are associated with one person permanently and cannot be changed. Once one fingerprint template is compromised, it is permanent. In order to avoid the loss of fingerprint templates, a set of irreversible transform functions, which are based on the Butterworth Low Pass Filter, are proposed. They transfer the original fingerprint templates to cancelable fingerprint templates. Those cancelable templates, stored in different recognition system, are different and irreversible, which can overcome the security limitations caused by the invariance and openness of the fingerprint templates. Experiments regarding matching precision, irreversibility and transform efficiency show that this scheme has high performance on authentication, security and computation.

**Key words:** fingerprint encryption; cancelable fingerprint template; Butterworth lowpass filter; irreversible transform function

## 0 引言

指纹特征加密技术<sup>[1]</sup>使用用户的指纹特征来保护加密系统的密钥, 实现加密密钥与用户指纹特征的关联, 综合展示了加密方案的安全性及指纹特征的唯一性、便捷性, 能够同时有效解决密钥管理与

生物特征模板保护两类问题。

模糊保险箱 (fuzzy vault)<sup>[2]</sup>方案是指纹特征加密领域最为经典的实用化方案, 此后大量研究工作<sup>[3-5]</sup>相继展开。该方案的认证结果独立于细节点的顺序, 且能够容忍细节点数目的变化以及位置的偏差, 加密算法的精确性与指纹特征的模糊性得到了很好地结合。然而, 此类方案均存在如下安全缺

收稿日期: 2012-05-10; 修回日期: 2012-07-18

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研项目(20094408110001); 国家自然科学基金项目(61171072)

第一作者简介: 喻建平(1968—), 男, 教授, 博士生导师, 1995年于西安电子科技大学获通信与电子学博士学位, 主要研究方向为生物特征加密、密码学与信息安全。E-mail: yujp@szu.edu.cn

陷<sup>[6]</sup>:由于指纹特征常用于绑定多个密钥以生成多个 vault,若攻击者截获同一指纹特征产生的两个 vault,通过交叉匹配即可获得指纹模板,进而解密密钥。

上述缺陷的根本原因在于指纹特征的终身不变性与公开性,其应对方案<sup>[7-10]</sup>被众多学者相继提出。Ratha 等人<sup>[7]</sup>提出了可撤销指纹模板(cancelable fingerprint template)的概念,其基本思想是通过某种不可逆手段将原始指纹模板转换为变换指纹模板。由于这种转换是单向的,因此变换指纹模板“可撤销”。文献[7]设计了两组以 2 维高斯函数为核的函数组,选用高斯核函数叠加的方法进行变换,其变换的不可逆性主要依赖于多对一的变换,但是该函数组需要进行多次指数运算,且需要对高斯函数求微分,指纹模板的转换效率较低。

巴特沃斯低通滤波器是一种应用十分广泛的滤波器,具有与混合高斯模型相似的空间分布特性,其频率响应在通频带内具有最大限度平坦幅频响应和良好的线性相位特性,具有结构简单、易于设计等优点。本文基于巴特沃斯低通滤波器原型,构造一组不可逆转换函数,将原始指纹模板转换为可撤销指纹模板。不同识别系统中存储的同一用户可撤销指纹模板互不相同,且从可撤销指纹模板求取原始指纹模板是计算上不可行的。较之文献[7]方案,本文方案具有更高的转换效率。

## 1 可撤销指纹模板实现原则

便于描述,记原始指纹模板为  $x$ , 指纹模板不可逆转换函数为  $C$ , 指纹图像匹配算法为  $M$ ,  $\tau$  为匹配阈值。使用界线盒匹配算法<sup>[11]</sup>进行指纹模板匹配。若  $M(x_i, x_j) \geq \tau$ , 则认为指纹模板  $x_i$  与  $x_j$  匹配;反之不匹配。

不可逆转换函数  $C$  应具备如下特性<sup>[7]</sup>:

1) 局部平滑特性,为了容忍要匹配的两个指纹间的内部误差,要求指纹模板中局部的小变化在变换后仍然维持小的变化。

2) 差异性,利用不可逆转换函数转换后的特征点必须在界线盒之外。换言之,原始指纹模板  $x$  与转换后的指纹模板  $C(x)$  不能相互匹配,即  $M(x, C(x)) < \tau$ 。

3) 互异性,为了避免数据库间转换模板的交叉匹配,由同一个指纹模板  $x$  转换而来的双重转换模

板  $C_1(x)$  与  $C_2(x)$  不能相互匹配,即  $M(C_1(x), C_2(x)) < \tau$ 。

4) 不可逆性,从转换后的指纹模板  $C(x)$  不能恢复出原始指纹模板  $x$ , 即  $C^{-1}(x)$  是计算上不可行的。该特性使得攻击者即便截获可撤销指纹模板、不可逆转换函数或参数也无法获知原始指纹模板。

## 2 巴特沃斯可撤销指纹模板方案

巴特沃斯低通滤波器函数原型为

$$|G(j\lambda)|^2 = \frac{1}{1 + (\Omega/\Omega_p)^{2N}} \quad (1)$$

式中,  $N$  表示巴特沃斯低通滤波器的阶数。 $\Omega$  和  $\Omega_p$  分别是滤波器的频率以及截止频率,其比值决定了巴特沃斯低通滤波器过渡带的宽度。

以巴特沃斯低通滤波器为核,设计关于  $T(x, y)$ 、 $\varphi(x, y)$  以及  $\theta(x, y)$  的函数组为

$$T(x, y) = (-1)^{\text{rand}(\cdot)} \frac{T_i}{2\pi\sigma_T^2} \times \sum_{i=1}^{N_T} \frac{1}{1 + [\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}/D_{T_0}]^{2n}} \quad (2)$$

$$\varphi(x, y) = (-1)^{\text{rand}(\cdot)} \frac{\varphi_j}{2\pi\sigma_\varphi^2} \times \sum_{j=1}^{N_\varphi} \frac{1}{1 + [\sqrt{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2}/D_{\varphi_0}]^{2n}} \quad (3)$$

$$\theta(x, y) = (-1)^{\text{rand}(\cdot)} \frac{\theta_k}{2\pi\sigma_\theta^2} \times \sum_{k=1}^{N_\theta} \frac{1}{1 + [\sqrt{(x-x_k)^2 + (y-y_k)^2}/D_{\theta_0}]^{2n}} \quad (4)$$

式中,  $\text{rand}(\cdot)$  表示随机数 0 或 1。 $n$  是巴特沃斯低通滤波函数的阶。 $(x_i, y_i)$ 、 $(x_j, y_j)$  以及  $(x_k, y_k)$  是在指纹细节点平面内随机选取的 3 个细节点。 $N_T$ 、 $N_\varphi$  和  $N_\theta$  决定了空间分布图中脉冲峰的个数。 $D_{T_0}$ 、 $D_{\varphi_0}$  以及  $D_{\theta_0}$  均为常数,调节它们可以改变对应巴特沃斯低通滤波函数过渡带的坡度。 $T_i$ 、 $\varphi_j$  和  $\theta_k$  亦可调,分别决定了细节点坐标值附加位移的幅度、位移的方向以及细节点方向值旋转角度的幅度。

记原始指纹模板的细节点以及转换后模板的细节点分别为  $(x, y, \theta)$  和  $(x', y', \theta')$ , 它们分别表示细节点的坐标和方向,按照式(5)不可逆转换函数将原始指纹模板转换为可撤销指纹模板。

$$\begin{cases} x' = x + T(x, y) + K\cos(\varphi(x, y)) \\ y' = y + T(x, y) + K\sin(\varphi(x, y)) \\ \theta' = (\theta + \varphi_{rand} + \theta(x, y)) \bmod (2\pi) \end{cases} \quad (5)$$

式(5)的转换意义是:将原始细节节点的平面坐标沿  $\varphi(x, y)$  方向移动一固定的长度  $K$ , 同时附加一段随细节节点位置变化的位移  $T(x, y)$ 。对于原始细节节点的方向旋转一固定随机角度  $\varphi_{rand}$ , 同时附加一个随机细节节点位置变化的角度  $\theta(x, y)$ 。 $\varphi(x, y)$ 、 $T(x, y)$  和  $\theta(x, y)$  可分别由式(2)—(4)计算得到。

### 3 实验结果与分析

为了验证基于巴特沃斯低通滤波器的可撤销指纹模板方案的正确性、安全性与有效性, 选用 FVC2004 DB2\_B 中的指纹图像进行测试, 其中包含有 80 幅指纹图像, 来自 10 个不同的用户, 每个用户采集 8 幅图像。实验参数设置如下:  $N_T$ 、 $N_\varphi$  和  $N_\theta$  都设置为 5;  $D_{T_0}$ 、 $D_{\varphi_0}$  以及  $D_{\theta_0}$  随机产生, 取值范围为 5~10;  $T_i$ 、 $\varphi_j$  和  $\theta_k$  亦随机产生, 取值范围为  $[-10, -5] \cup [5, 10]$ 。从如下几个方面实验说明所构造方案的正确性、安全性与有效性。

#### 3.1 局部平滑特征、差异性与互异性

将指纹库中的 80 幅指纹图像作为原始指纹图像, 利用本文设计的不可逆转换函数, 对每个原始指纹图像产生 3 个可撤销指纹图像。

从 FVC2004 DB2\_B 中任意选取一幅指纹图像, 对其进行预处理并提取细节节点而得到原始指纹模板。图 1 为原始指纹模板与它的 3 个可撤销指纹模板的细节节点平面分布情况。图 2 中的 3 条曲线分别表示 3 个可撤销指纹模板与原始指纹模板相应细节节点间的距离。图 3 的 3 条曲线是 3 个可撤销指纹模板两两间相应细节节点的距离。图 2 和图 3 中的横线表示文献[11]中界线盒的尺寸。

图 1 中原始指纹模板与可撤销指纹模板相应细节节点间的距离不大。图 2 定量地描述了细节节点间的距离(9~14 pixels), 从图 2 中可以看出转换前后, 细节节点间的距离均在一定的范围内(图 2 中为 14 pixels), 充分体现了不可逆转换函数局部平滑的特性。同时, 图 2 中细节节点间的距离又均大于界线盒尺寸 8 pixels, 充分说明了不可逆转换函数的差异性。图 3 中不同的可撤销指纹模板间细节节点间的距离绝大多数都大于界线盒尺寸 8 pixels, 充分体现了本文所设计的不可逆转换函数的互异性。

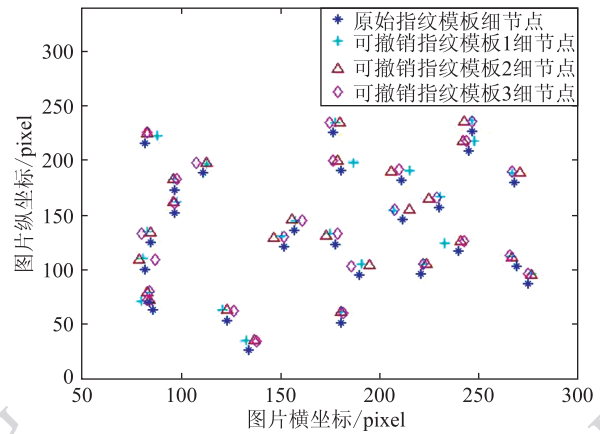


图 1 原始指纹模板与 3 个可撤销指纹模板的细节节点

Fig. 1 Minutiae of original fingerprint template and 3 cancelable fingerprint templates

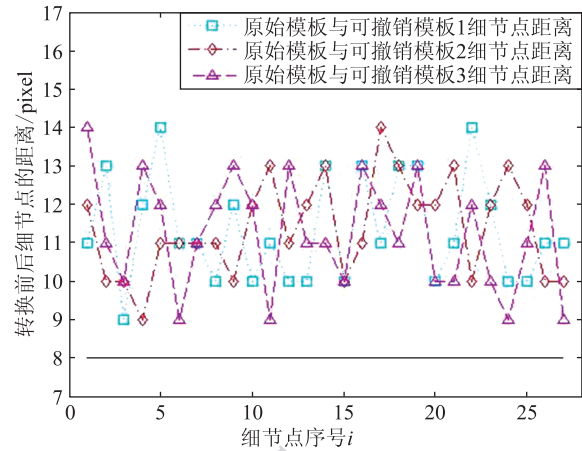


图 2 原始指纹模板与 3 个可撤销指纹模板细节节点间的距离

Fig. 2 Distance of minutiae between original fingerprint template and 3 cancelable fingerprint templates

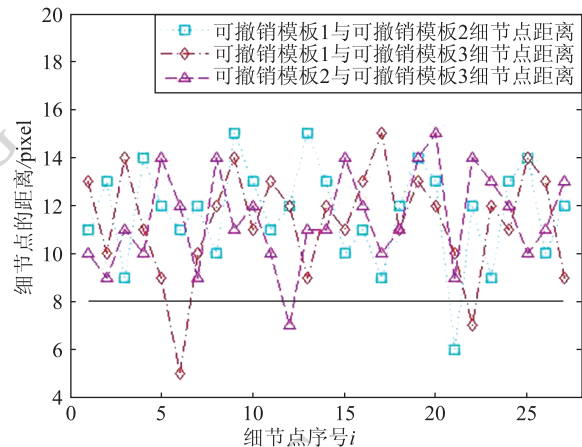


图 3 可撤销指纹模板相应细节节点间的距离

Fig. 3 Distance of minutiae between cancelable fingerprint templates

为了验证本文不可逆转换函数的一般性,利用文献[11]的界线盒匹配算法,求得指纹库中所有的原始指纹与其 3 个可撤销指纹模板间的匹配分数如表 1 所示,可撤销指纹模板彼此间的匹配分数如表 2 所示。其中,匹配分数阈值  $\tau$  设置为 0.5,若两个指纹模板  $x_1$  和  $x_2$  的匹配分数  $M(x_1, x_2) \geq 0.5$ ,则认为匹配;否则,不匹配,该不可逆转换函数具有良好的差异性与互异性。

表 1 原始指纹模板与可撤销指纹模板匹配的概率

Table 1 Probability of original fingerprint and cancelable fingerprint matched

	概率/%
$M(x, C_1(x)) > \tau$	2.5
$M(x, C_2(x)) > \tau$	1.25
$M(x, C_3(x)) > \tau$	3.75

表 2 可撤销指纹模板间匹配的概率

Table 2 Probability of cancelable fingerprints matched

	概率/%
$M(C_1(x), C_2(x)) > \tau$	1.25
$M(C_1(x), C_3(x)) > \tau$	0
$M(C_2(x), C_3(x)) > \tau$	2.5

### 3.2 匹配精度

从指纹库中任取一个用户的两幅指纹图像,一个作为注册指纹模板,另一个作为认证指纹模板。利用文献[11]中的界线盒匹配算法计算其匹配分数,图 4 显示了对齐上述两个指纹模板后匹配细节的详细情况,其中矩形框表示注册指纹模板的匹配界线盒,其尺寸为 8 pixels。从图 4 中可以看出,注册指纹图像中提取的细节点有 31 个,认证指纹图像中的细节点有 26 个,对齐后有 19 对细节点匹配,因此匹配分数  $M(x_1, x_2) =$

$$\frac{19}{\tau(31 - 26) + \min(31, 26)} = 0.67。$$

利用本文基于巴特沃斯低通滤波器设计的不可逆转换函数,将两个原始指纹模板分别转换,转换后的细节点详细分布情况如图 5 所示,其中矩形框表示转换后注册指纹模板的匹配界线盒,其尺寸同样为 8 pixels。从图 5 中可以看出,转换后的模板匹配细节点为 16 对,匹配分数  $M(C(x_1), C(x_2)) =$

$$\frac{16}{\tau(31 - 26) + \min(31, 26)} = 0.56。由于匹配分数大$$

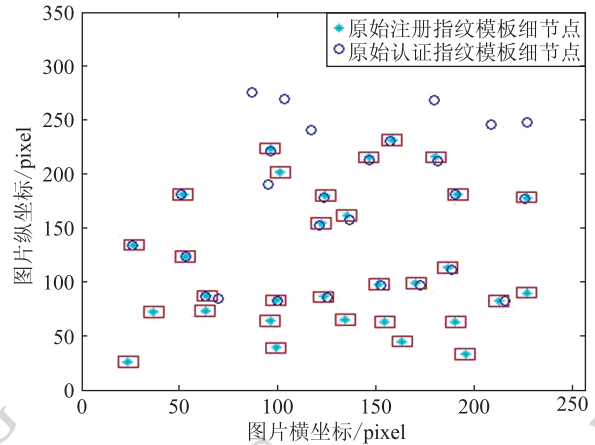


图 4 原始指纹模板间细节点匹配情况

Fig. 4 Minutiae matching detail between original fingerprint templates

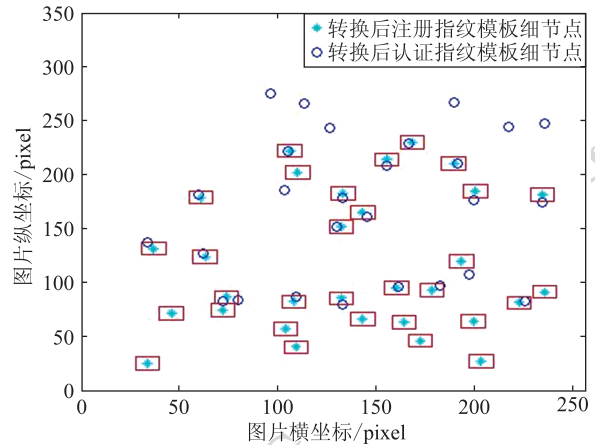


图 5 可撤销指纹模板间细节点匹配情况

Fig. 5 Minutiae matching detail between cancelable fingerprint templates

于阈值,因此转换前后来自同一个用户的指纹模板都能够成功匹配。

### 3.3 不可逆性

不可逆是指从转换后的指纹模板细节点信息恢复出原始指纹模板的细节点是计算上不可行的。对于不可逆转换函数,不可逆性在下面两种情形下最容易产生:1)若一个区域被映射成一个更小的区域,这种“区域缩水”能够引入细节点的不确定性;2)表面褶皱的转换模型出现的重叠。原始指纹模板中两个大的区域会在转换模板中重叠,如果攻击者选取了转换模板中位于这样区域的细节点,就不可能得知该细节点属于原始指纹模板的哪个区域。表面褶皱不同于“区域缩水”,是本文所构造转换函数不可逆的主要原因。

为了估计转换模板中这种褶皱的强度,统计每个细节节点转换前后的四邻域,构建一个关于该细节节点的网。若转换前后,此类网的连通性相同,则反转只是简单的“展平”;若此类网的连通性不同,则反转这个函数是很困难的。

使用本文不可逆转换函数测试 FVC2004 DB2\_B 中所有指纹,一共含有大概 2 500 个细节节点,对于每一个细节节点统计其转换前后邻域变化个数,如表 3 所示,指纹图像的整体结构很大程度上得到保持,但是有少部分的细节节点(大概 8%)至少有一个邻域在转换前后发生变化。理想的情况是更多比例的细节节点存在至少一个邻域的改变,邻域的改变是转换不可逆的主要原因。通过增加最小移动距离能够引起更大的形变,进而增强其不可逆性。

表 3 转换后细节节点邻域改变情况  
Table 3 Nearest neighbors changed detail after transformation of each minutiae

	改变的邻域数				
	0	1	2	3	4
细节节点数目/%	91.7	0.66	2.36	2.04	3.24

### 3.4 转换效率

为了比较本文设计的函数组与文献[7]设计的函数组的转换速度,在 Matlab 仿真环境下对两种模型进行了仿真,图 6 显示了文献[7]中混合高斯模型的空间分布图,图 7 为本文使用的巴特沃斯低通滤波器的空间分布图。从图中不难发现,本文设计的基于巴特沃斯低通滤波器的不可逆转换函数组与文献[7]所提出的基于混合高斯模型的不可逆转换函数组在空间分布上具有相似性。

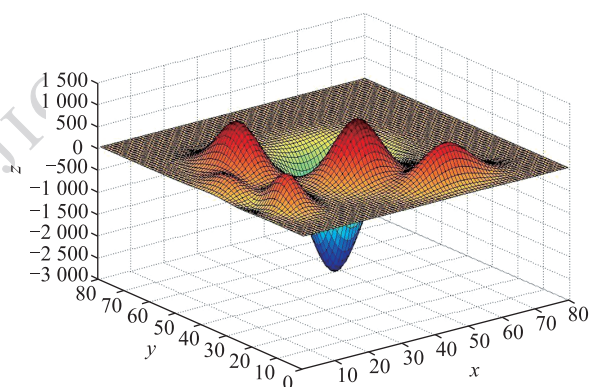


图 6 混合高斯模型空间分布图

Fig. 6 Space distribution of mixture Gaussian model

不可逆转换函数的运算速度试验结果如表 4 所

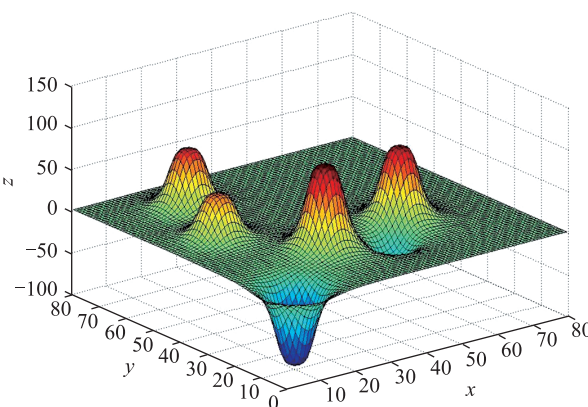


图 7 巴特沃斯低通滤波器空间分布图

Fig. 7 Space distribution of Butterworth Lowpass Filter

示,其中  $n$  为巴特沃斯低通滤波器的阶数,而  $N$  为图 6、图 7 中脉冲峰的个数。

从表 4 不难发现,在脉冲峰一定的情形下,文献[7]方案以 2 维混合高斯模型为原型构造的函数对原始指纹图像进行转换,所用的时间是三阶巴特沃斯低通滤波器耗时的 5 倍以上。产生这种差距的原因在于利用混合高斯模型进行转换时涉及多次指数运算,且需要对高斯函数求微分。

表 4 混合高斯模型与巴特沃斯低通滤波器转换耗时比较  
Table 4 Computing time comparison between mixture Gaussian model and Butterworth Lowpass Filter

	混合高斯模型	巴特沃斯低通滤波器			
		$n=1$	$n=2$	$n=3$	$n=4$
$N=5$	1.047	0.032	0.015	0.016	0.063
$N=10$	4.484	0.640	0.078	0.078	0.141
$N=15$	6.531	1.094	1.156	1.141	1.235
$N=20$	7.687	1.109	1.172	1.171	1.344
$N=25$	9.688	1.563	1.640	1.719	1.797

## 4 结论

可撤销指纹模板可以有效避免由于指纹终生不变性与公开性所带来的诸多安全隐患。以巴特沃斯低通滤波器为核,构造了一组不可逆转换函数,可将原始指纹模板转换为众多可撤销的指纹模板,用户可在认证系统中存储可撤销指纹模板。匹配精度分析表明,采用本文方案转换原始指纹模板对于认证精度影响不大;不可逆性分析表明,可撤销指纹模板不会

泄露原始指纹模板的任何信息;与文献[7]中方案的转换速度比较表明,本文方案具有较高的转换效率。

然而,本文算法基于注册模板与现场样本预先对齐的假设,这在实际应用中是非常困难的。文献[5]就自动对齐算法展开了研究,并取得了初步进展,自动对齐情形下的可撤销指纹模板构造将是进一步研究的方向。

### 参考文献(References)

- [ 1 ] Li P, Tian J, Yang X, et al. Biometric template protection[J]. Journal of Software, 2009, 20(6): 1553-1573. [李鹏,田捷,杨鑫,等. 生物特征模板保护[J]. 软件学报, 2009, 20(6): 1553-1573.]
- [ 2 ] Jules A, Sudan M. A fuzzy vault scheme[C]//2002 IEEE International Symposium on Information Theory. Lausanne, Switzerland: IEEE Press, 2002: 408.
- [ 3 ] Liu H L, Sun D M, Xiong K, et al. A new fuzzy vault method using cubic spline Interpolation[C]//Proceedings of 2010 International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence. Sanya, China: IEEE, 2010: 103-106.
- [ 4 ] Brindha V E. Biometric template security using fuzzy vault[C]//2011 IEEE the 15th International Symposium on Consumer Electronics. Singapore: IEEE, 2011: 384-387.
- [ 5 ] Li P, Yang X, Cao K, et al. An alignment-free fingerprint cryptosystem based on fuzzy vault scheme[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2010, 33(3): 207-220.
- [ 6 ] Scheirer W J, Boulton T E. Cracking fuzzy vaults and biometric encryption[C]//Univ. of Colorado at Colorado Spring, Tech. Rep., Biometrics Symposium. Baltimore: IEEE, 2007: 1-6.
- [ 7 ] Ratha N K, Chikkerur S, Connell J H, et al. Generating cancelable fingerprint templates[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2007, 29(4): 561-572.
- [ 8 ] Ahmad T, Hu J K, Wang S. String-based cancelable fingerprint templates[C]//Proceedings of 2011 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. Beijing: IEEE, 2011: 1028-1033.
- [ 9 ] Christian R, Andreas U. A survey on biometric cryptosystems and cancelable biometrics[J]. Journal on Information Security, 2011, 3:1-25.
- [ 10 ] Kenta T, Shinji H. Generating provably secure cancelable fingerprint templates based on correlation-invariant random filtering[C]//Proceedings of 2009 IEEE 3rd International Conference in Proc. of BTAS2009. Washington, DC: IEEE, 2009:1-6.
- [ 11 ] Ratha N K, Karu K, Chen S, et al. A real-time matching system for large fingerprint databases[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1996, 18(8): 799-813.