DOI: 10.11992/tis.201704034
网络出版地址: http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1538.TP.20180409.1727.016.html

基于 MB-CSLBP 的手指静脉加密算法研究

王科俊, 曹逸, 邢向磊
(哈尔滨工程大学 自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 为解决在传统的生物特征加密技术的安全性上的不足, 对手指静脉特征加密方法进行了探讨和研究。提出了基于 MB-CSLBP 编码的手指静脉加密方案。首先对 LBP 算子以及改进的 CSLBP、MB-CSLBP 算子进行了研究, 提取了手指静脉的 MB-CSLBP 二进制特征编码。然后研究了传统的模糊承诺加密方案, 在此基础上将提取的手指静脉 MB-CSLBP 二进制特征编码作为加密特征, 对加密信息进行 BCH 编码后与加密特征以异或的方式结合完成加密, 同时使用 SHA-1 散列算法对加密信息进行哈希变换, 保留得到的哈希值以用于解密。实验结果表明, 当密钥长度为 400 b 时, FAR 达到了 0.47%, 文中提出的基于 MB-CSLBP 编码的手指静脉加密方案具有很高的鲁棒性和安全性。

关键词: 生物特征加密; 指静脉; 模糊承诺; MB-CSLBP 编码; 模糊保险箱
中图分类号: TP391.41 **文献标志码**: A **文章编号**: 1673−4785(2018)04−0543−07

中文引用格式: 王科俊, 曹逸, 邢向磊. 基于 MB-CSLBP 的手指静脉加密算法研究[J]. 智能系统学报, 2018, 13(4): 543–549.
英文引用格式: WANG Kejun, CAO Yi, XING Xianglei. Finger-vein encryption algorithm based on MB-CSLBP[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2018, 13(4): 543–549.

Finger-vein encryption algorithm based on MB-CSLBP

WANG Kejun, CAO Yi, XING Xianglei
(College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: In this paper, we investigate and discuss the biometric encryption of the finger vein to address the limitations of traditional biometric encryption. We propose a finger-vein encryption scheme based on multiscale block–center-symmetric local binary pattern (MB-CSLBP) binary coding. First, we investigate the LBP operator, the improved CSLBP, and the MB-CSLBP operator, and extract the MB-CSLBP binary code of the finger vein. Next, we investigate the traditional fuzzy commitment encryption scheme, and, with the extracted finger-vein MB-CSLBP binary codes as the encryption feature, we perform Bose, Chaudhuri, and Hocquenghem (BCH) encoding of the encryption information. Then, we combine the encryption information and encryption feature in an exclusive-OR manner, use the SHA-1 hash algorithm to perform a Hash transform, and keep the obtained Hash value for encryption. The experimental results show that the false acceptance rate reached 0.47% for a key length of 400 b. Thus, the finger-vein encryption method proposed in this paper demonstrates high robustness and security.

Keywords: biometric encryption; finger vein; fuzzy commitment; MB-CSLBP codes; fuzzy vault

由于如手指静脉、指纹、虹膜等生物特征具有不易被伪造、唯一性且不易丢失等特性[1-2], 基于生物特征的识别技术目前已经是一项可靠的、可以替代传统密码识别的普及的技术[3-4]。

然而正因为生物特征的唯一性和不变性, 且一个人的生物特征有限, 一旦丢失就是永久丢失导致了安全和隐私方面的问题[5], 生物特征模板被窃取将会带来比传统身份识别丢失密码更为严

收稿日期: 2017−04−24. **网络出版日期**: 2018−04−10.
基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (61573114); 黑龙江省自然科学基金面上项目 (F2015033); 中央高校基本科研基金项目 (HEUCF160415).
通信作者: 邢向磊. E-mail: xingxl@hrbeu.edu.cn.

重的后果，由此提出了生物特征加密系统的概念[6-7]，该系统将被加密技术或其他特定的技术加密过的生物特征模板存储到数据库中[8]，这种不可逆的加密过程可以使非法用户无法直接从加密模板中得到原本的生物特征[9-10]。

手指静脉特征具有其他手部特征（如指纹[11]、手形[12]、掌纹[13]等）不具有的独特的优越性：1）非活体无法采集到静脉，所以更安全；2）手指内部的静脉不受到皮肤表面状况的影响，且十根手指均可以用于特征提取，灵活性高；3）静脉特征并不会如人脸一样受年龄影响，而且静脉纹路比指纹清晰，对相机的分辨率要求低于指纹特征采集；4）非接触采集可防止细菌传播且采集设备体积小，采集成本较低且易于被大众接受。

由于静脉识别在生物特征识别方面是后起之秀，尽管其具有良好性能，但是对其研究尚没有像指纹识别那样深入，目前对手指静脉加密的研究则是刚刚起步，公开发表的论文只有我们课题组提出的基于纠错码和细节点提取的指静脉加密算法[14]，该算法依赖于静脉图像的细节点，对图像质量要求较高，而在寒冷天气下由于手指冰凉，导致采集到的静脉图像对比度低，静脉不清晰就难以提取有效特征点，致使这种加密方案失效。而局部二进制编码（LBP）直接针对灰度图像进行编码提取图像的纹理特征的方法对图像的质量要求不高，而模糊承诺（fuzzy commitment）加密方案直接使用二进制编码，便于与 LBP 相结合，能够给出有效、简单快捷的指静脉加密方法。

基于上述考虑本文提出了对指静脉图像采用多尺度块中心对称局部二进制编码（MB-CSLBP）和模糊承诺相结合的手指静脉加密算法。

模糊承诺方案作为一种传统的加密方法，虽然加解密过程与其他方法相比而言更为简便，但是其效果却很好，因此我们提出将模糊承诺方案与手指静脉的局部二进制模式相结合，研究相关的手指静脉加密算法。局部二进制模式（local binary patem）是由 Ojala 等[15]提出的一种能有效地描述图像的纹理特征的纹理描述算子。纹理特征是对光照、姿态、背景或者成像等条件因素变化不敏感的图像固有属性，因此很适用于手指静脉特征提取。在改进的多尺度块中心对称的局部二进模式（MB- CSLBP）算法的基础上，利用提取出的二进制编码作为指静脉特征数据，在模糊承诺方案的框架上结合 BCH 编码和 SHA-1 安全散列算法对密钥进行加密。

1　局部二进制模式 (LBP)

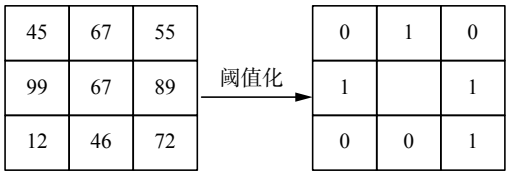
LBP 基本思想：在一个 3×3 的窗口中依次比较中心点像素灰度值与其相邻的 8 个点的灰度值，若该邻域位置点的灰度值小则将该像素点置为 0，否则置为 1，从左上角像素点的位置起依次顺时针（或逆时针）赋权值$2^i(i=0,1,\cdots,7)$并与对应二进制数（0 或 1）相乘，再依次相加得到这个 3×3 窗口中心像素点的 LBP 特征值，计算公式为

$$\mathrm{LBP}(x_c,y_c)=\sum_{i=0}^{7}s(g_i-g_c)2^i \tag{1}$$

$$s(x)=\begin{cases}1, & x\geqslant 0\\ 0, & \text{其他}\end{cases} \tag{2}$$

式中：g_c是 3×3 窗口中心像素点(x_c,y_c)的灰度值。$g_i(i=0,1,\cdots,7)$表示窗口中心像素点邻近 8 个像素点的灰度值。二值化函数$s(x)$使得当邻近像素点与中心像素点的灰度值之差大于等于 0，$s(x)$的值为 1，否则为 0，这样便得到图像的 LBP 码值。

如图 1 所示，一个 3×3 的窗口区域中中心像素点的灰度值为 67，把该值与邻近的 8 个像素点比较大小，顺时针得到一个 8 位的二进制串 01011001。



LBP码值：01011001

图 1　LBP 算子编码过程

Fig. 1　The encoding process of LBP

采用 LBP 算子遍历一幅大小为$M\times N$的图像可得到$8\times(M-2)\times(N-2)$位二进制数。

1.1　LBP 算子的优缺点

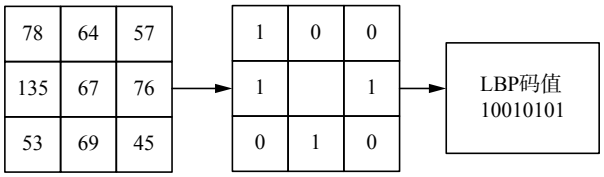
LBP 算子具有以下几个显著优点：1）该算子原理简单、运算简洁，且计算复杂度远低于离散小波变换、傅里叶变换等；2）LBP 二进制编码是由中心像素点和邻近像素点灰度值比较得到的，这种对图像纹理特征的描述方法对图中的亮暗点和边缘点等细节特征的描述能力较强，符合静脉特征提取的需求；3）基于传统子空间的方法，如 ICA（独立成分分析）、LDA（线性判别分析）、PCA（主成分分析）等均需要进行数据训练，而 LBP 提取到的二进制码或直方图向量不需要，因此便于推广。

虽然 LBP 算子运算简洁、原理简单、纹理特征描述能力强，但该算子在具体应用中仍存在很

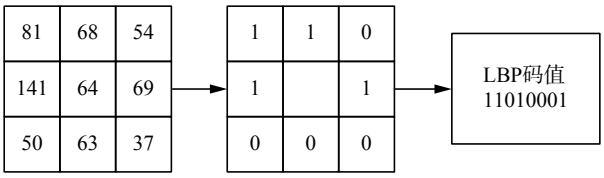
多问题, 如以下几个方面:

1) LBP 二进制特征编码模式过多: 在一个大小为 3×3 的窗口中求得的 LBP 编码特征是一个 8 位的二进制数, 所以对应的纹理模式有 2^8=256 种。虽然越多的纹理模式中提取的纹理细节也越多, 但过多的特征模式会降低 LBP 纹理描述的分辨能力, 且并不是所有的纹理细节都对图像信息的描述贡献很大, 其中有许多可以被舍弃的纹理特征。

2) LBP 算子对剧烈噪声和光照的鲁棒性差: 由于 LBP 码值是由两个单像素点的比较所得, 因此剧烈光照和噪声会影响相邻像素的大小比较结果, 从而会产生不同的 LBP 模式, 如图 2 所示。



(a) 原始图像中一个3×3窗口区域的LBP编码过程



(b) 加入噪声后的3×3窗口区域的LBP编码过程

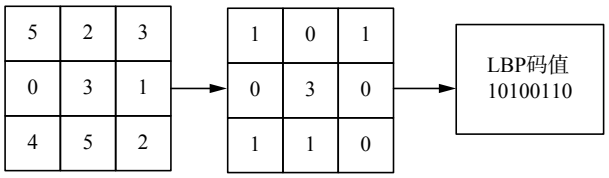
图 2　噪声对 LBP 算子的影响

Fig. 2　The impact of noise on LBP operator

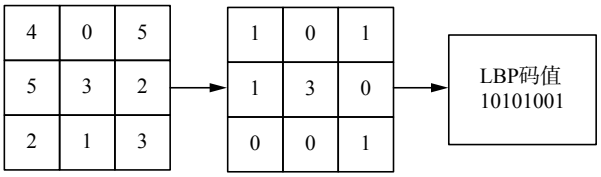
图 2(a) 和图 2(b) 分别表示原始图像和加入噪声后的图像, 对大小为 3×3 的区域采用 LBP 算子提取特征编码。图 2(a) 中阈值为中心像素值 67, 得到 LBP 编码值 10010101, 对应特征值 149。图 2(b) 加入噪声后阈值中心像素值 64, 得到 LBP 编码值 11010001, 对应特征值 209。图 2(a) 和图 2(b) 本是同一纹理特征, 但由于 LBP 编码值不同故而认为二者是不同纹理, 由此可见 LBP 算子对噪声和光照很敏感。

3) LBP 算子对图像拓扑变化 (如旋转变化等) 的鲁棒性差如图 3 所示。

采用窗口大小为 3×3 的 LBP 算子对原始图像 (图 3(a)) 和原图旋转 90°后的图像 (图 3(b)) 进行特征提取的过程。图 3(a) 与图 3(b) 中阈值均为 3, 但图 3(a) 的 LBP 编码值为 10100110, 对应特征值 166。图 3(b) 的 LBP 编码值为 10101001, 对应特征值 169。虽然是同一个纹理却被认为是不同的, 由此可见 LBP 算子对图像拓扑变化的鲁棒性较差。



(a) 原始图像中一个3×3的窗口区域的LBP编码过程



(b) 3×3的窗口区域向右旋转90°后的LBP编码过程

图 3　拓扑变化对 LBP 算子的影响

Fig. 3　The impact of topological changes on LBP operator

4) 当采用 LBP 直方图作为特征向量时, 模式种类过多, 过高的直方图维数会增大计算量, 且总特征点数是一定的, 使得每种模式特征点数少, 从而失去了统计意义降低了识别率。

5) 一般的 LBP 算子对局部区域像素点做的是稀疏采样[15], 虽采用了双线性差值方法来计算没有落到像素点上的邻域点的灰度值, 但采样过程仍不稳定[19]。

6) 专注于图像邻域间的纹理特征的 LBP 算子没有考虑到图像局部纹理间的联系, 并不能有效地处理大型复杂的纹理特征。

因此应当针对以上几点做出某方面性能上的改进, 也需要结合实际应用使 LBP 算子能够得到具有鲜明特征的纹理信息, 解决实际具体的问题。

1.2　改进的 LBP 算子

1.2.1　中心对称局部二进制模式

中心对称局部二进制模式 (center-symmetric local binary pattern, CSLBP) 的基本思想是基于 LBP 模式, 对关于中心点对称的一对像素灰度值做对比, 得到的二进制串长度是基本 LBP 算子的一半[20], 减小了需要的存储空间, CSLBP 算子计算方法如式 (3):

$$\mathrm{CSLBP}_{R,P,T}=\sum_{i=0}^{\frac{P}{2}-1}s(g_i-g_{i+\frac{P}{2}})2^i$$
$$s(x)=\begin{cases}1, & x>T\\ 0, & \text{其他}\end{cases} \tag{3}$$

式中: g_i和$g_{i+\frac{P}{2}}$是两个关于中心像素对称的点的灰度值, P 是除中心像素外的像素个数, 例如对于 3×3 区域, P=8。T 是一个用来增强 CSLBP 算子在平滑图像灰度差异的鲁棒性的较小的正数。

如图 4 中将阈值 T 置为 2, 依次比较 3×3 的窗口区域内关于中心对称的 4 对像素点的灰度差值, 小于阈值 T 时相应位置置 0, 否则置 1, 得到 CSLBP 码值 1011。

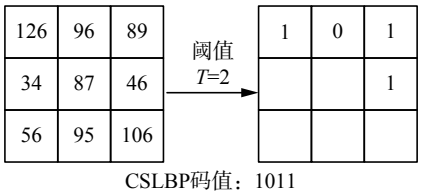


图 4　CSLBP 算子的编码过程

Fig. 4　The encoding process of CSLBP

CSLBP 算子提取的特征维数为$2^4 = 16$, 远小于$LBP_{8,1}$算子提取的特征维数$2^8 = 256$, 在统计直方图过程中大大降低了特征维数, 达到了减少存储空间占用和缩短计算时间的目的, 且得到了梯度方向上的信息。

1.2.2　多尺度块中心对称局部二进制模式 (MB-CSLBP)

LBP 算子和 CSLBP 算子计算简单且可以描述图像的微观结构特征, 但由于二者均是对图像单个像素点做对比, 对噪声和拓扑变化的鲁棒性差, 无法描述图像宏观结构特征, 影响了识别率。多尺度块中心对称局部二进模式 (multi-scale block center- symmetric local binary pattern)[21]用像素块区域的平均灰度值代替 CSLBP 算子中的单个像素点的灰度值进行编码的求取, MB-CSLBP 算子比 LBP 算子占用存储空间更小、受到噪声的影响更小, 同时该算子可同时提取图像的微观结构和宏观结构的特征, 可以减小图像宏观特征信息的损失, 完整表达图像的信息可增强分类效果, 弥补了 1.1 节中的 LBP 算子的不足。

MB-CSLBP 算子的计算如式 (4):

$$\begin{aligned} \text{MB-CSLBP} &= \sum_{n=0}^{3} s(B_n - B_{n+4})2^n \\ B &= \sum_{k=0}^{L^2-1} g_k \\ s(x) &= \begin{cases} 1, & x \geqslant T \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \end{aligned} \tag{4}$$

式中: L 表示像素块正方形区域的边长, g_k表示单个像素点的灰度值, B_i是第 i 个正方形区域的像素灰度值之和。阈值 T 可增强 MB-CSLBP 算子在平滑图像灰度差异的鲁棒性, T 的值过大会使提取出的特征值全被置为 0, 因此 T 应是一个较小的正数, 在本文针对静脉特征提取过程中经过大量的对比实验, 最终确定选择 T=0 时, 所提取的静脉纹理特征有最好的鲁棒性。图 5 给出了 MB-CSLBP 算子的编码过程。

如图 5 所示, 当阈值 T=0 时, 依次比较关于中心正方形区域对称的两个正方形区域的灰度值之和得到二进制编码 0001, 特征值为 1。

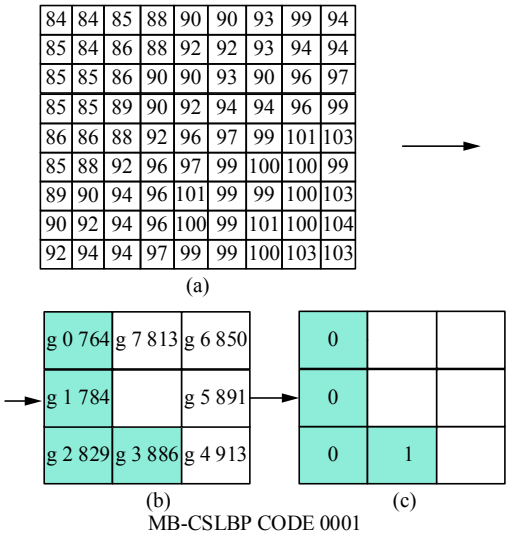


图 5　MB-CSLBP 算子的编码过程

Fig. 5　The encoding process of MB-CSLBP

2　基于 MB-CSLBP 的手指静脉特征加密方案

模糊承诺方案是利用纠错码的容错能力, 在基于汉明距离的度量空间内将生物特征信息和纠错码技术相结合的一种密钥绑定方案。

因为 MB-CSLBP 编码是长度固定的而本文使用的 BCH 编码是一种变长数字编码, 便于在整个加密解密的过程中进行处理, 因此, 可以发现基于 MB-CSLBP 的二进制手指静脉特征编码非常适合于模糊承诺方案的应用。

2.1　BCH 码和 SHA-1 安全散列算法简介

在模糊承诺方案中, 需要用到密码学中有关的知识和方法, 因此首先介绍在本节中需要用到的 BCH 码以及 SHA-1 安全散列算法的相关内容。

2.1.1　BCH 码

自 1959 年发展起来的 BCH 码 (Bose、Ray-Chaudhuri、Hocquenghem) 是一种能纠正多位错误的循环码[22]。这种用来校正多个随机错误的循环、多级、变长数字编码在编码理论尤其是纠错码方面中被广泛地研究和应用。

BCH 码把信源待发的信息序列划分为多个长度为固定的k位消息组,再将每一消息组独立变换成长为$n(n > k)$的二进制数字组码字的过程就是编码, 其逆过程称为译码。当消息组的数目为$m(m \leqslant 2)$,由此所获得的m个码字的全体便称为码长为 n、信息数目为m的分组码,记作n,m。

BCH 码的编码与解码是建立在有限域的域论和多项式基础上的。在编码过程中还可以构建一个检测多项式, 此多项式用于在接受端对接受到的码字进行检测, 看是否有错误。以基于有限

域GF(16)构建一个能够检测并校正两个错误的BCH码为例。若α是$m_1(x)=x^4+x+1$的一个根, 由于将α代入$m_1(x)$可得

$$m_1(x)=(x-\alpha)(x-\alpha^2)(x-\alpha^4)(x-\alpha^8)=x^4+x+1$$

所以$m_1(x)$是α的极小多项式, 用$m_1(x)$可以构建一个能够纠正一个错误的BCH码, 即所有满足$C(x)=0(\mathrm{mod}\, m_1(x))$且根为$\alpha$、$\alpha^2$、$\alpha^4$、$\alpha^8$的多项式$C(x)$。

BCH码的解码过程:

1) 计算接收到的向量$\boldsymbol{R}$的$2t$伴随矩阵;

2) 计算错误定位多项式;

3) 解多项式, 得到错误位置;

4) 计算非BCH码的错误位置的误差值。

2.1.2 SHA-1 安全散列算法

1993年美国国家标准和技术协会提出SHA算法, 这种数据加密算法[23]被定义为安全散列标准。多年来SHA算法经过了一系列的完善并被广泛应用到各个方面, 成为了世界公认的最安全的散列算法之一。SHA算法的主要思想: 将明文以某种不可逆的变换化为长度更短的一段密文, 简言之, 就是把一段输入码(预映射或信息)转换位数固定且短的输出序列(散列值或信息摘要)的过程。

1994年, 对SHA算法的一个未被公开的缺陷进行了纠正得到了SHA-1算法。该算法要求接收的输入文档大小小于2^{64} bit, 并产生160 bit的报文摘要[24]。在SHA-1安全散列算法中, 不存在一个文本可使得其散列值与已知文本的散列值相等, 举例来说就是如果A对应散列值$H(A)$, 理论上来讲不会找到一个B可使其散列值满足$H(B)=H(A)$, 找到满足上述条件且有特定内容的文档更是难上加难, 依次打成SHA-1安全散列算法的目的。

2.2 基于MB-CSLBP编码的手指静脉特征加解密过程

基于MB-CSLBP的手指静脉特征加密, 是在经过MB-CSLBP算子编码之后, 把得到的二进制编码作为手指静脉图像的特征与经过BCH编码的密钥结合, 对密钥进行加密。

加密阶段的具体步骤如图6。

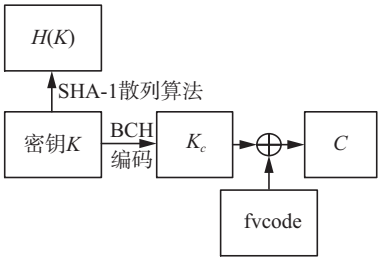


图 6　基于 MB-CSLBP 手指静脉特征加密流程

Fig. 6　The encryption process of finger vein feature based on MB-CSLBP

1) 将注册阶段的手指静脉图像进行尺寸归一化为96×64。利用式(4)中的MB-CSLBP算子对图像进行编码, 其中取像素块正方形区域的边长$L=6$, 这样我们会得到一个长度为448位的手指静脉二进制特征编码, 在后面附上一定数量的0, 使其长度变为511位, 这个511位二进制编码就是最终的手指静脉特征编码, 记为fvcode。

2) 假设需要加密的密钥为K, 长度为k, 首先通过SHA-1安全散列算法将K进行哈希变换, 结果记为$H(K)$保存起来。接着采用BCH(n,k,t)编码算法将密钥K编码成511位的二元序列K_c, 其中n, k, t分别表示编码后码字的长度、密钥的长度和容许错误的位数, 这里取n为511。

3) 把编码完成后的密钥K_c与手指静脉特征编码fvcode以某种方式结合, 在这里我们采用的是异或的方式, 得到最后的加密编码$C=\mathrm{fvcode}\oplus K_c$并保存起来。到这里加密过程便完成了。

解密阶段步骤如图7。

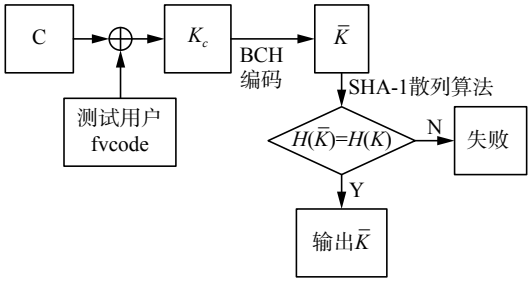


图 7　基于 MB-CSLBP 手指静脉特征解密流程

Fig. 7　The decryption process of finger vein feature based on MB-CSLBP

1) 与加密阶段一样将用于解密的手指静脉图像进行尺寸归一化处理并用MB-CSLBP算子从图像中提取出用于解密的手指静脉特征编码$\overline{\mathrm{fvcode}}$。

2) 将$\overline{\mathrm{fvcode}}$与$C$做异或运算得二元序列$\overline{K_c}=\overline{\mathrm{fvcode}}\oplus C$, 再对$\overline{K_c}$进行BCH解码得到待检验密钥$\overline{K}$。对$\overline{K}$通过SHA-1安全散列算法进行哈希变换得到哈希值$h(\overline{K})$并与之前保存的注册密钥的哈希值$h(K)$比较, 若$H(K)=H(\overline{K})$, 说明得到的密钥$\overline{K}$就是用于加密的密钥$K$, 解密成功。否则, 解密失败。

3 实验结果分析

哈尔滨工程大学指静脉库包含105人每人5幅, 共525幅大小为320像素×240像素的食指静脉图像, 其中每人1幅共105幅作为指静脉图像训练库, 用于加密, 每人另4幅共420幅图像作为验证库, 用于解密。使用BCH纠错编码来更正类内变化, 加密系统的性能取决于密钥长度和纠错位数。为了比较不同的密钥长度对系统性能的

影响，我们产生长度不同的密钥，用 BCH 编码对这些密钥分别进行处理，计算不同情况下的拒真率和误识率，计算结果记录在表 1 中。

表 1　不同密钥位数下的拒真率 (FRR) 和误识率 (FAR)
Table 1　FRR and FAR of different keys

密钥长度/b	纠错位数/b	FRR/%	FAR/%
112	45	6.89	3.86
184	40	8.74	2.74
256	35	9.23	1.49
328	30	15.66	0.98
400	24	22.47	0.47

由表 1 可以得到，密钥的长度越长，系统的误识率 FAR(系统错误识别非真实用户的概率) 越低，拒真率 FRR(系统不识别真实用户的概率) 越高。当密钥长度为 400 b 时，FAR 达到了 0.47%，充分说明该加密系统的加密效果非常好。

当密钥长度为 400 b，采用 $BCH(511, 400, 24)$ 来进行纠错编码，我们结合实验数据来分析在不同的可能存在的攻击下，系统的安全性能。

1) 若非法用户尝试使用多张手指静脉图像来尝试攻击系统，由于错误接受率为 0.47%，那么非法用户需要至少尝试使用 213(1/0.47%) 张不同的手指静脉图像对系统进行攻击，在短时间内一般不可能找到这么多张不同的手指静脉图像。

2) 若非法用户尝试直接生成手指静脉特征编码从而攻击系统的话，对于一个 511 b，容错位数为 24 b 的编码，需要生成 487 b 的正确序列才能成功，此概率为 2^{-487}，这是不太可能的。

3) 若非法用户想直接生成密钥的话，生成一个正确的长度为 400 b 的密钥的概率为 2^{-400}，这也是不太可能的。

4) 若非法用户想要通过生成 SHA-1 散列编码反求出正确的密钥来攻击系统，因为散列编码的长度为 128 b，所以生成正确密钥的概率为 2^{-128}，这几乎是不可能做到的。

通过结合实验数据，我们对不同的可能存在的非法用户的攻击尝试进行了可行性的分析，不管是哪一种攻击方式，想要成功攻击系统在一定程度上来说都是不可能的，也充分说明了基于 MB-CSLBP 编码的手指静脉特征加密系统有很好的安全性。

4　结束语

本文提出了基于 MB-CSLBP 编码的手指静脉加密方案。该方法弥补了 LBP 算子的不足，结合了 BCH 纠错码和 SHA-1 散列算法对指静脉图像进行了加密和解密，得到了很好的结果。首先，介绍了 LBP 算子以及 MB-CSLBP 算子。然后，把得到的手指静脉的 MB-CSLBP 二进制编码作为手指静脉图像的特征，与经过 BCH 编码之后的密钥结合，对密钥进行加密。最后对其进行解密，得到了密钥长度不同时，加密系统的拒真率和误识率。实验结果表明，密钥的长度越长，系统的误识率越低，满足了系统安全性要求。结合实验数据和理论数据对系统进行分析，结果表明本文提出的基于 MB-CSLBP 编码的手指静脉加密方案具有很高的鲁棒性和安全性。本文仅使用了 BCH 码进行编码，而实际还有几种纠错码可以应用于加密，使用多种纠错码进行对比实验是接下来要做的主要工作。

参考文献：

[1] DAUGMAN J G. High confidence visual recognition of persons by a test of statistical independence[J]. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 1993, 15(11): 1148–1161.

[2] AHADULLAH M, SAID M R M, BANERJEE S. History, development and trend of fractal based biometric cryptography[M]//ERÇETIN Ş Ş, BANERJEE S. Chaos, Complexity and Leadership 2013. Cham: Springer, 2015: 27–33.

[3] NAVEEN K H N, JAGADEESHA S, AMITH K J. Human facial expression recognition from static images using shape and appearance feature[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Applied and Theoretical Computing and Communication Technology. Bangalore, India, 2016: 598–603.

[4] HUANG Di, ZHANG Renke, YIN Yuan, et al. Local feature approach to dorsal hand vein recognition by centroid-based circular key-point grid and fine-grained matching[J]. Image and vision computing, 2017, 58: 266–277.

[5] RATHA N K, CONNELL J H, BOLLE R M. An analysis of minutiae matching strength[C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Audio- and Video-Based Biometric Person Authentication. Halmstad, Sweden, 2001: 223–228.

[6] JAIN A K, NANDAKUMAR K, NAGAR A. Biometric template security[J]. EURASIP journal on advances in signal processing, 2008, 2008: 279416.

[7] 张宁, 臧亚丽, 田捷. 生物特征与密码技术的融合——一种新的安全身份认证方案[J]. 密码学报, 2015, 2(2): 159–176.
ZHANG Ning, ZANG Yali, TIAN Jie. The integration of biometrics and cryptography—a new solution for secure identity authentication[J]. Journal of cryptologic reseatch,

2015, 2(2): 159–176.
[8] LI Peng, YANG Xin, CAO Kai, et al. An alignment-free fingerprint cryptosystem based on fuzzy vault scheme[J]. Journal of network and computer applications, 2010, 33(3): 207–220.
[9] CHUNG Y, MOON D, LEE S, et al. Automatic alignment of fingerprint features for fuzzy fingerprint vault[C]//Proceedings of the 5st SKLOIS Conference Information Security and Cryptology. Beijing, China, 2005: 358–369.
[10] ULUDAG U, PANKANTI S, PRABHAKAR S, et al. Biometric cryptosystems: issues and challenges[J]. Proceedings of the IEEE, 2004, 92(6): 948–960.
[11] PERALTA D, TRIGUERO I, SANCHEZ-REILLO R, et al. Fast fingerprint identification for large databases[J]. Pattern recognition, 2014, 47(2): 588–602.
[12] CHAUDHARY D R, SHARMA A. Hand geometry based recognition system[C]//Proceedings of 2012 Nirma University International Conference on Engineering. Ahmedabad, India, 2012: 1–5.
[13] JING Xiaoyuan, LI Sheng, ZHANG D, et al. Optimal subset-division based discrimination and its kernelization for face and palmprint recognition[J]. Pattern recognition, 2012, 45(10): 3590–3602.
[14] 王科俊, 曹逸, 姜博威, 等. 基于纠错码的指静脉加密算法[J]. 智能系统学报, 2017, 12(1): 55–59.
WANG Kejun, CAO Yi, JIANG Bowei, et al. Finger vain encryption algorithm based on an error-correcting code[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2017, 12(1): 55–59.
[15] YOU Lin, WANG Jiawan, YAN Bin. A secure finger vein recognition algorithm based on MB-GLBP and Logistic mapping[J]. Journal of information hiding and multimedia signal processing, 2016, 7(6): 1231–1242.
[16] ZHANG D, ZUO Wangmeng, YUE Feng. A comparative study of palmprint recognition algorithms[J]. ACM computing surveys (CSUR), 2012, 44(1): 2.
[17] OJALA T, PIETIKÄINEN M, HARWOOD D. A comparative study of texture measures with classification based on featured distributions[J]. Pattern recognition, 1996, 29(1): 51–59.
[18] OJALA T, PIETIKAINEN M, MAENPAA T. Multiresolution gray-scale and rotation invariant texture classification with local binary patterns[J]. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2002, 24(7): 971–987.
[19] AHONEN T, PIETIKÄINEN M. A framework for analyzing texture descriptors[C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Computer Vision Theory and Applications. Madeira, Portugal, 2008: 1.
[20] HEIKKILA M, PIETIKAINEN M. A texture-based method for modeling the background and detecting moving objects[J]. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2006, 28(4): 657–662.
[21] HEIKKILÄ M, PIETIKÄINEN M, SCHMID C. Description of interest regions with local binary patterns[J]. Pattern recognition, 2009, 42(3): 425–436.
[22] MALOFEY O P, MALOFEY A O, SHANGINA A E. Enhancing the functionality of the procedures of encoding and decoding BCH codes[C]//Proceedings of 2017 International Conference “Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies”. Petersburg, Russia, 2017: 243–246.
[23] SLIMANE N B, BOUALLEGUE K, MACHHOUT M. A novel image encryption scheme using chaos, hyper-chaos systems and the secure Hash algorithm SHA-1[C]//Proceedings of 2017 International Conference on Control, Automation and Diagnosis. Hammamet, Tunisia, 2017: 141–145.
[24] SLIMANE N B, BOUALLEGUE K, MACHHOUT M. Nested chaotic image encryption scheme using two-diffusion process and the Secure Hash Algorithm SHA-1 [C]//Proceedings of the 4th International Conference on Control Engineering and Information Technology. Hammamet, Tunisia, 2016: 1–5.
[25] MAKKAD R K, SAHU A K. Novel design of fast and compact SHA-1 algorithm for security applications[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information and Communication Technology. Bangalore, India, 2016: 921–925.

作者简介:

王科俊, 男, 1962 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为模糊混沌神经网络、自适应逆控制理论、可拓控制、网络智能控制、模式识别、多模态生物特征识别、联脱机指纹考试身份鉴别系统、微小型机器人系统。

曹逸, 女, 1993 年生, 硕士研究生, 主要研究方向为模式识别和生物特征识别。

邢向磊, 男, 1983 年生, 讲师, 博士后, 主要研究方向为多集合度量学习和远距离身份识别。