

文章编号 1004-924X(2009)08-2040-07

基于小波过零点位置不等长编码匹配的虹膜识别

苑玮琦, 李平, 柯丽

(沈阳工业大学视觉检测技术研究所, 辽宁沈阳 110178)

摘要:传统的 Boles 小波过零点方法在进行特征匹配时需将不等长编码化为等长, 由于造成编码不等长的原因十分复杂, 将不等长编码强行化为等长编码十分困难, 从而影响识别效果。针对此问题, 提出了一种基于小波过零点位置不等长编码匹配的虹膜识别方法。首先, 在小波变换第 4~8 分解级的每级分别计算出小波过零点的位置, 并以此作为编码; 然后, 使用一种移位匹配方法直接对不等长编码求取距离, 即将待匹配的两样本数据每进行一次相对移位就计算一次距离; 最后, 取最小距离作为两样本距离。在包含 800 张图片的虹膜图库上进行了实验, 识别率可达到 97.70%, 与 Boles 的小波过零点方法相比识别率提高了 5.16%, 一次完整的特征提取及匹配时间 < 0.2 s, 能够很好地满足虹膜识别系统对实时应用的要求。

关键词:生物特征; 虹膜识别; 小波变换; 过零点; 不等长编码

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A

Iris recognition based on zero-crossing position of wavelet transform and variable-length code matching

YUAN Wei-qi, LI Ping, KE Li

(Computer Vision Group, Shenyang University of Technology, Shenyang 110023, China)

Abstract: Changing a variable-length code into an equal-length code is required in the feature match process of a conventional algorithm based on the zero-crossing of the wavelet transform proposed by Boles. The factor for the variability of the code length is complex, so it is difficult to change the variable-length code into the equal-length code compulsively and to avoid the effect of feature matching on the final recognition rate. To solve the above problem, an iris recognition algorithm based on the zero-crossing position of wavelet transform and matching using a variable-length code is proposed. Firstly, The zero-crossing position of the wavelet transform at each level from the 4th to the 8th decompose level is calculated, and then shift-matching algorithm is used to directly calculate the distance of the variable-length code. That is to say that the distance between the two samples is calculated at each relative shift. Finally the minimal distance is chosen as the distance between the two sample. Experiments are done with iris database containing 800 images, and the experimental results show that the recognition rate obtained by this method reaches 97.70%, which is about 5.16% higher than that of Boles' method. For the feature extracting time and the match time is only 0.2 s, the proposed method

收稿日期: 2008-07-16; 修订日期: 2008-10-09.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 60472088)

can satisfy the system requirements of real time applications.

Key words: biometrics; iris recognition; wavelet transform; zero-crossing; variable-length code

1 引 言

虹膜、指纹、人脸、人耳等生物特征正逐步取代传统的密码、钥匙等,成为被人们广为接受的新的身份认证方式。证件、钥匙等身份标识物品易被伪造或遗失,用户名、密码等身份标识知识易被遗忘或记错,而生物特征的使用克服了这些传统身份认证方法的缺陷,最大限度地保证了个人资料的安全,防止各种犯罪活动的发生。

在诸多生物特征中,虹膜由于具有唯一性、稳定性、可采集性、非侵犯性等诸多优点成为了最热门的生物特征,虹膜识别相对于其他生物特征识别方法也有着更高的准确性^[1],是一项科技含量高、应用范围广、涉猎学科多的技术,具有很好的应用前景^[2]。

为了将虹膜识别应用于实际,Boles^[3]提出了一种基于小波过零点的虹膜识别方法,该方法将用小波变换后所得小波系数的过零点位置和两相邻过零点间的积分平均值作为特征进行编码,但相同分解级下各行的过零点数目一般并不相等,所以在接下来的特征匹配步骤中 Boles 使用了两种处理方法,一种是只选择过零点数目相同的分解级用于匹配,但在实际应用中经常会遇到各分解级过零点数目都不相同的情况,这种处理方式局限性很大。另一种则是采用某种算法先将过零点数目化为相等后再进行匹配,但过零点数目受图像平移、变形、伸缩、噪声等诸多因素影响,情况十分复杂,导致将不等长数据强行化为等长十分困难,对识别效果也有显著影响。Sanchez-Avila 等人^[4]改进了 Boles 的方法,他们使用了不同的相似度匹配方式,如 Euclidean 距离和 Hamming 距离;Ma 等人^[5]利用小波变换得到虹膜纹理的局部信息表示,利用 Hamming 距进行识别。但这些方法仍然使用等长编码匹配,并没有解决不等长编码的匹配问题。为了解决该问题,上海

交大的应忍冬等提出一种“有限变形相似度”算法^[6],用来匹配不等长编码。但此方法十分复杂,计算量较大,难以投入实际应用。

针对上述问题本文提出一种基于小波过零点位置不等长编码匹配的虹膜识别方法。该方法使用过零点位置作为特征,然后使用一种简单有效的不等长编码匹配方法——移位匹配方法来直接计算不等长编码间的距离。采用沈阳工业大学视觉检测技术研究所自采图库 800 副虹膜图片对该方法进行实验,结果证明该方法相对于 Boles 方法在识别效果和速度上都有显著提高。

2 Boles 的一维小波过零点方法

Boles 的方法是将预处理后的虹膜图片沿以虹膜中心为圆心的同心圆进行采样,从而把二维虹膜图像变为一维信号,然后对此一维信号进行小波变换,变换后得到一系列小波系数,再根据这些小波系数计算出过零点位置和两相邻过零点之间的积分平均值作为特征进行编码,如图 1 所示。

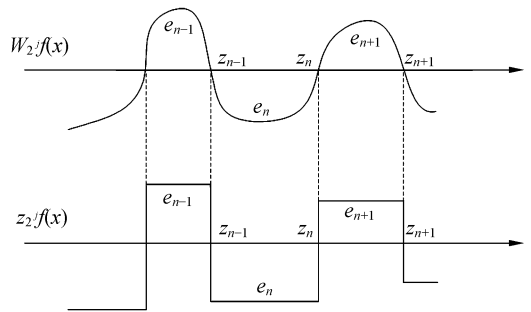


图 1 Boles 的小波过零点方法

Fig. 1 Algorithm based on zero-crossings of a wavelet transform of Boles

其中 z_n 为过零点位置, $e_n = \int_{z_{n-1}}^{z_n} WT_{2^j} f(x) dx$ 为两相邻过零点间的积分均值。再用相异度函数:

$$d_j(f, g) = \min_m \sum_{r=1}^{R_j} \left\{ \frac{([\Gamma e_j(r)]_f - \Gamma[e_j(r+m)]_g)^2}{\Gamma[e_j(r)]_f [e_j(r+m)]_g} + \frac{([\Gamma Z_j(r)]_f - \Gamma[Z_j(r+m)]_g)^2}{[\Gamma Z_j(r)]_f [Z_j(r+m)]_g} \right\}^{0.5} \quad m \in [0, R_j - 1]$$

或

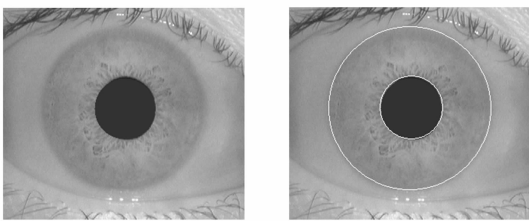
$$d_j(f, g) = \min_m \frac{\sum_{r=1}^{R_j} ([\mu_j(r)]_f [\rho_j(r)]_f - \Gamma [\mu_j(r+m)]_g [\rho_j(r+m)]_g)^2}{\Gamma \sum_{r=1}^{R_j} \left| [\mu_j(r)]_f [\rho_j(r)]_f \right| \left| [\mu_j(r)]_g [\rho_j(r)]_g \right|} \quad m \in [0, R_j - 1]$$

计算某一分解级 j 下的相异度值, 其中 f, g 是相匹配的两信号, N 为总数据点个数, R_j 是第 j 级的过零点个数。设选取的分解级范围 $Q \in [K, L]$, 则使用下式将各分解级相异度进行平均: $D = \sum_{j=K}^L \frac{d_j(f, g)}{Q}$, 最后根据相异度 D 进行分类。

3 基于小波过零点位置不等长编码匹配方法

3.1 预处理

虹膜图像的预处理包括虹膜定位、图像归一化和图像增强 3 个步骤。虹膜特征主要分布在靠近瞳孔一侧的神经圈上, 且眼毛眼皮可能遮盖住部分虹膜, 因此在提取虹膜区域时, 取靠近瞳孔一侧范围在 $-45 \sim 45^\circ$ 和 $135 \sim 225^\circ$ 之间的虹膜块, 然后展开并归一化为 $64 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ 的虹膜图像, 如图 2 所示。



(a) 原虹膜图像 (b) 虹膜内、外圆定位
(a) Original iris image (b) Inner-circle & outer-circle location of iris image



(c) 虹膜图像归一化
(c) Iris image normalization
图 2 虹膜图像及预处理结果

Fig. 2 Iris image and preprocessing results

3.2 对信号进行小波变换

小波变换在图像处理中是一种常用手段^[7-8],

在生物特征识别领域也获得了广泛应用^[9]。小波就是定义在有限区间上且均值为零的函数。小波变换的定义为: 设 $f(t)$ 为一平方可积函数, 记作 $f(t) \in L^2(\mathbf{R})$, $\psi(t)$ 是基本小波或母小波函数, $\bar{\psi}(t)$ 是 $\psi(t)$ 的复共轭, 则 $f(t)$ 的小波变换为: $WT_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{\mathbf{R}} f(t) \bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt$, $b \in \mathbf{R}, a > 0$, 式中 a 为尺度因子, b 为位移因子。小波变换就是将任意信号用小波函数的平移和伸缩进行表示。对于任意的参数对 (a, b) , 小波函数 $\psi_{a,b}(t)$ 只在 $t=b$ 的附近存在明显的波动, 因此小波变换的本质就是将原来的函数或信号 $f(t)$ 在 $t=b$ 点附近按 $\psi_{a,b}(t)$ 进行加权平均, 体现的是以 $\psi_{a,b}(t)$ 为标准的 $f(t)$ 的变化情况。

将预处理后的虹膜图片沿以虹膜中心为圆心的同心圆对虹膜图像采样, 也就是在归一化后的图片上按行采样, 如图 3 所示。



图 3 虹膜一维信号提取方法

Fig. 3 Method of extracting one-dimension signal of iris

这样就把二维的虹膜图像变为 64 行一维信号, 然后用 Mallat 算法^[10]对每一行信号进行小波变换。Mallat 算法是基于多分辨率分析思想下的一种小波分解快速算法。多分辨率分析思想即将 $L^2(\mathbf{R})$ 用它的子空间 V_j, W_j 表示, 其中 V_j, W_j 分别称为尺度空间和小波空间, 它们具有以下性质:

(1) $\dots \subset V_{-1} \subset V_0 \subset V_1 \subset \dots$, 空间 $L^2(\mathbf{R})$ 是所有尺度空间 V_j 的并。

(2) 小波空间 W_j 是 V_j 和 V_{j+1} 之间的差, 即 $V_j \oplus W_j = V_{j+1}$ 。它捕捉由 V_j 逼近 V_{j+1} 时丢失的信息。

使用 Mallat 算法对每一行信号进行小波变换, 如图 4 所示。

一行信号 C_k^0 分别经过低通滤波器 $h^*(-k)$

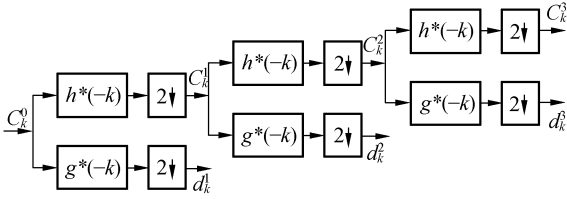


图 4 Mallat 算法的实现流程

Fig. 4 Flow chart of Mallat algorithm

与高通滤波器 $g^*(-k)$ 后进行二抽取得到第一级低频信号 C_k^1 和第一级高频信号 d_k^1 , 然后重复此过程再将 C_k^1 分解为 C_k^2 和 d_k^2 , 依此类推。其中 $d_k^{(n)}, n=0, 1, 2, 3, \dots$ 即为第 n 级小波变换系数。对每一行信号都进行此操作, 即可得到每一分解级下各 64 行的小波变换系数。

3.3 小波分解级的选择

本文对不同分解级下小波系数的识别效果进行了实验, 结果如表 1 所示。

表 1 使用不同级过零点信息的识别效果比较

Tab. 1 Comparison of recognition effect using zero-crossing information at different levels

小波过零点数	等错率	识别率(%)	小波过零点数	等错率	识别率
2	0.349	65.09	6~7	0.045	95.41
3	0.242	75.79	7~8	0.074	92.27
4	0.155	84.47	4~6	0.036	96.34
5	0.122	87.71	5~7	0.032	96.79
6	0.069	92.96	6~8	0.037	96.16
7	0.120	87.66	4~7	0.025	97.51
8	0.136	85.93	5~8	0.028	97.16
4~5	0.083	91.61	4~8	0.022	97.70
5~6	0.048	95.17			

前几级高频包含噪声较多, 识别效果不理想且数据量大, 故不使用 1~3 分解级。另一方面, 由于 Mallat 算法中每一级信号在滤波之后都要进行二抽取, 即数据量缩小一倍, 故第 8 分解级下过零点数目已经非常少, 如再继续分解可用特征数已不能满足识别需要, 故本实验只分解到第 8 级。根据实验结果, 本文采用第 4~8 五级小波过零点单独进行编码。这样既提高了识别率, 又大大减少了计算量。

3.4 特征提取

小波变换后每一尺度下得到 64 行的小波变换系数, 图 5 所示的为第 4 分解级某一行的小波系数。

如果两相邻小波系数正负不同, 就认为此两系数间存在一过零点。根据小波系数计算出过零点位置, 记录下所有行的过零点位置作为该级虹膜特征编码。

Logan 曾证明, 对窄带信号而言, 用信号本身的过零点可以完整地表征信号, 只是表征效果不够稳健。故 Mallat 提出除纪录过零点位置外, 另外增加一个补充特征, 即两相邻过零点之间小波

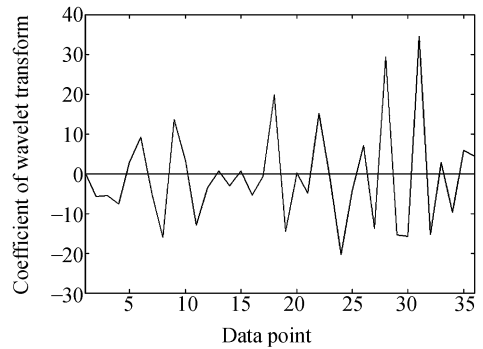


图 5 一行小波变换系数

Fig. 5 A line of coefficients of wavelet transform

变换结果的积分值: $e_n = \int_{z_{n-1}}^{z_n} WT_{2^j} f(x) dx$, 这样便能通过一定的迭代运算重构 $f(t)$ 。传统的一维小波过零点方法都是同时使用过零点和积分两种特征, 但考虑到信号本身的过零点已经可以完整地表征信号, 且虹膜识别也与一般的图像处理不同, 并不需要重构原信号, 再考虑到求取相邻过零点间积分均值的计算量也较大, 故本文尝试只使用过零点位置信息进行编码。

3.5 匹配

特征提取步骤总共得到 5 级小波过零点位置编码,本文先计算各个分解级下的样本距离,然后将得到的 5 个样本距离进行平均,作为最终用于匹配的距离。计算样本距离的常用方法很多,如欧氏距离、海明距离^[11]、相似度^[12]等等。但这些距离都是用于等长编码的匹配,而对于小波过零点方法,即使是两幅类内图像的相同行,在某一相同级下的小波变换过零点数目一般也是不相等的,所以特征提取后编码是不等长的。除应忍冬等提出使用“有限变形相似度”算法来匹配不等长编码外,其它基于小波过零点的方法都是先将不等长码化为等长后才能进行匹配。

Boles 在解决这个问题时使用了两种方法,一种是在某次实际匹配中先统计各级过零点数目,然后只使用过零点数目相同的小波级数计算相异度,但这样局限性很大。另一种是使用虚假过零点排除算法来除去不重要的或虚假的过零点,使得过零点数目相等。但在实际应用中过零点数目受图像平移、变形、伸缩、噪声等诸多因素的影响,有些多出的过零点并不是虚假的,要使用排除算法强行使过零点数目相等是很困难的,效果也不理想。变换为等长后计算距离时,Boles 的相异度函数又十分复杂,计算量大,匹配速度慢。而应忍冬等提出的“有限变形相似度”不等长编码匹配方法,在算法上也十分复杂,计算量仍然很大,难以投入实际应用。

针对此问题,本文提出了一种简单有效的移位匹配方法来计算不等长编码间的距离:假设待匹配的两行编码长度分别为 m, n (不妨设 $m \geq n$),先将第一行编码的前 n 位与第二行编码(共 n 位)求距离,如图 6(a)所示。然后将第一行编码的第 2 位到第 $n+1$ 位与第二行编码(共 n 位)求得另一个距离,如图 6(b)所示。依次类推,最后将第一行的第 $m-n+1$ 位到第 m 位与第二行编码(共 n 位)求得最后一个距离,如图 6(c)所示。即相当于第一行编码中一个长度为 n 的不断移位的块分别与第二行编码(共 n 位)求距离,如图 6 所示。

这样共得到 $m-n+1$ 个距离,取其中最小者作为此两行的距离。这样,在待匹配的行前部和后部多出的过零点对识别将不再造成影响。在速度方面,由于本文的移位匹配方法计算十分简单,不需要使用复杂的相异度函数,故计算量大大

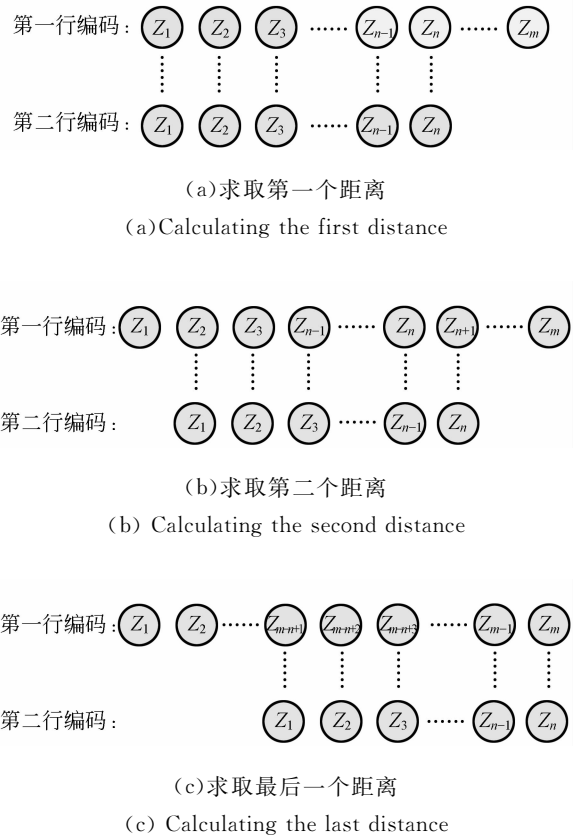


图 6 本文提出的移位匹配方法原理

Fig. 6 Principle of the proposed shift matching algorithm

减少,算法速度得到了很大提高。

4 实验结果

目前国内公开的标准虹膜图库只有中科院自动化所的竞赛图库,此图库中眼毛眼皮遮挡非常严重。各种传统虹膜识别方法在此图库上的实验都是取右上角 1/4 左右的无遮挡区域进行提取和识别,因为传统方法一般使用图像的所有或大部分数据点,所以取部分区域进行匹配对识别效果影响不大,但 Mallat 算法的小波过零点方法是一种抽样算法,每增加一个分解级都要减少一倍数据点数,而提取的过零点数目比数据点数还要少,故在第 4 级之后的可用特征点已经非常少,若再取部分区域进行匹配,特征点数目已经不能满足本方法的识别要求,故本文不使用自动化所图库而使用沈阳工业大学视觉检测技术研究所自采图库进行实验。图库包含 40 只眼睛,每只眼睛 20 幅图片,共 800 幅虹膜图片。图库中的图片包含光照不同、光照不均、光斑影响、平移、变形等各

种不同情况。

800 幅图片两两匹配,总匹配次数为 319 600 次。以下所有提及的识别率均为等错率下的识别率。

本方法与 Boles 方法的比较见表 2:

表 2 与 Boles 小波过零点方法的比较

Tab. 2 Comparison between our method and algorithm of Boles

	Boles 方法	本文方法
所用特征	过零点位置与过零点的积分均值	过零点位置
匹配方法	相异度函数	移位匹配
特征提取时间	0.219 s	0.156 s
匹配时间	0.032 s	0.015 s
识别率	92.54%	97.70%
测试环境	CPU:AMD Athlon 3000+;内存:1GB; 操作系统:Windows XP	

可以看出本文方法的识别率可达 97.70%,而 Boles 方法识别率为 92.54%,特征提取及匹配时间也大幅缩短,一次完整的特征提取及匹配只

参考文献:

- [1] 王蕴红,朱勇,谭铁牛. 基于虹膜识别的身份鉴别[J]. 自动化学报,2002,28(1):1-10.
WANG Y H, ZHU Y, TAN T N. Biometrics personal identification based on iris pattern [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2002, 28(1): 1-10. (in Chinese)
- [2] 浦昭邦,杨帆,陈炳义,等. 虹膜识别技术的发展与应用[J]. 光学精密工程, 2004,12(3):316-322.
PU ZH B, YANG F, CHEN B Y, et al.. Development and application of iris recognition technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(3): 316-322. (in Chinese)
- [3] BOLES W, BOASHAH B. A human identification technique using images of the iris and wavelet transform [J]. *IEEE Trans. On Signal Processing*, 1998,46(4):1185-1188.
- [4] SANCHEZ A C, SANCHEZ R R. Iris-based biometric recognition using dyadic wavelet transform [J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2002,17(10):3-6.

需不到 0.2 s 的时间,完全能够满足虹膜识别系统对实时应用的要求。

5 结 论

在基于小波过零点的虹膜识别方法中存在着如何匹配不等长编码的问题,按照 Boles 的传统方法,如果在某次实际匹配中经过统计后只选择过零点数目相同的小波级数计算相异度,那么局限性将会很大,很可能找不到过零点数目相同的小波级数,即使找到个别满足条件的级数,数据量也很可能无法满足识别需要;如果使用虚假过零点排除算法将不等长数据化为等长,其过程也是十分勉强的,识别效果会受到影响。本文提出了一种基于小波过零点位置不等长编码匹配的虹膜识别方法,只使用过零点位置信息,并提出一种移位匹配方法直接使用不等长编码计算样本距离,识别率可达 97.70%,与 Boles 的小波过零点方法相比识别率提高 5.16%,同时在提高识别效果的情况下也降低了算法的复杂度,使之更具有实际应用价值。

- [5] MA L, WANG Y, ZHANG D. Efficient iris recognition by characterizing key local variations [J]. *IEEE Transaction on Image Processing*, 2004, 13(6):739-750.
- [6] 应忍冬,徐国治. 基于小波变换过零检测的虹膜识别技术[J]. 上海交通大学学报,2002,36(3):355-358.
YING R D, XU G ZH. Recognition of iris using the wavelet transform zero-crossing detection [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2002, 36(3): 355-358. (in Chinese)
- [7] 孙辉. 基于小波变换的图像数据融合方法[J]. 光学精密工程,2000,8(6):551-553.
SUN H. Data fusion for image based on wavelet transform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(6): 551-553. (in Chinese)
- [8] 陈升来,黄康卿,郭静寰. 基于整型提升小波变换的图像处理及 DSP 实现[J]. 光学精密工程,2006,14(3):498-502.
CHEN SH L, HUANG L Q, GUO J H. Image processing based on integral lifting scheme and its implementation by dsp [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3): 498-502. (in Chinese)

- [9] 聂祥飞, 郭军. 利用 Gabor 小波变换解决人脸识别中的小样本问题[J]. 光学精密工程, 2007, 15(6): 973-977.
- NIE X F, GUO J. Solution of small sample size problem in face recognition using Gabor wavelet transform[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(6): 973-977. (in Chinese)
- [10] STEPHANE M. Zero-crossings of a wavelet transform [J]. *IEEE Transaction on Information Theory*, 1991, 37(4): 1019-1033.
- [11] 彭建, 朱峰, 李峰, 等. 一种新的基于小波过零检测的虹膜识别算法[J]. 计算机应用研究, 2005, 6: 125-126.
- PENG J, ZHU F, LI F, *et al.*. A new algorithm based on wt zero-crossing representation of iris recognition [J]. *Application Research of Computers*, 2005, 6: 125-126. (in Chinese)
- [12] 田启川, 潘泉, 程咏梅, 等. 基于过零检测的虹膜特征提取算法[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(8): 1452-1457.
- TIAN Q CH, PAN Q, CHENG Y M, *et al.*. Iris feature extracting algorithm based on zero-crossing detection [J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2006, 28(8): 1452-1457. (in Chinese)

作者简介:



苑玮琦(1960—),男,辽宁沈阳人,博士后,教授,博士生导师,主要从事机器视觉检测、图像处理与模式识别、生物特征识别、基于 DSP 的图像采集与处理系统的研究。E-mail: yuan60@126.com



李平(1981—)男,山东诸城人,硕士研究生,主要从事图像处理与模式识别、生物特征识别的研究。E-mail: nonlp@126.com

柯丽(1977—),女,辽宁庄河人,博士生,主要从事数字图像处理、图像实时压缩和小波变换技术的研究。E-mail: amykeli@hotmail.com

● 下期预告

丘形柔性神经微刺激电极阵列

孙晓娜^{1,2}, 李刚¹, 朱壮晖^{1,2}, 周洪波^{1,2}, 赵建龙¹, 任秋实³

(1. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039; 3. 上海交通大学激光与生物医学研究所, 上海 200030)

为了实现电极位点与靶细胞的良好接触, 改善刺激效果, 同时保证刺激电极的自身安全, 提出了一种具有圆滑外形的丘形柔性神经刺激微电极阵列。以光敏性聚酰亚胺(Durimide 7510)为基质材料, 利用光刻和金属层图形化结合电镀工艺, 本文制作了 6×6 丘形柔性神经刺激微电极阵列, 每个电极位点底面直径为 $150 \mu\text{m}$, 高度约为 $50 \mu\text{m}$, 并通过数值模拟、形貌观测和电学性能测试对制备的微电极进行了评价。实验结果表明: 相对于传统的平面微电极阵列(具有相同底面积), 三维丘形电极位点的阻抗(@1kHz)降低了约 4 倍, 可实现更有效的刺激; 而相对于塔形电极, 丘形电极则具有更均匀的表面电流密度分布, 有利于电极长期工作的安全性。