

## 基于 WBCT 的虹膜图像 质量评价方法

陈瑞<sup>1</sup> 林喜荣<sup>1</sup> 丁天怀<sup>2</sup>

**摘要** 基于小波分析的 Contourlet 变换 (Wavelet-based contourlet transform, WBCT) 能有效地反映虹膜图像纹理的视觉感知特性. 用级联 BP 神经网络确定图像的评估区域后, 对区域图像进行 WBCT 分解, 并分别定义和计算了 5 种质量评价指标来评估离焦模糊图像、运动模糊图像、佩带隐形眼镜图像、睫毛和眼睑遮挡图像. 实验结果表明, 定义的指标可以快速精确地评价这几种图像的质量. 并且评价结果与人眼主观评价一致, 优于其他评价算法.

**关键词** 图像质量评价, 评估区域, BP 神经网络, 基于小波分析的 Contourlet 变换  
中图分类号 TP391.41

### Assessment of Iris Image Quality Based on Wavelet-based Contourlet Transform

CHEN Rui<sup>1</sup> LIN Xi-Rong<sup>1</sup> DING Tian-Huai<sup>2</sup>

**Abstract** Wavelet-based contourlet transform (WBCT) can efficiently reflect visual characteristics of iris textures. After localizing a region of evaluation by using a cascaded BP neural network, the region of image is decomposed with WBCT. Then, 5 image quality assessment indices are defined and calculated for defocused images, motion blurred images, contact lens wear images, eyelash and eyelid occluded images, respectively. Experimental results indicate that these indices can precisely evaluate these cases with low computational cost. Moreover, the evaluation results have good consistency with subjective assessment of human beings. Compared with the existing methods, our method achieves better performance.

**Key words** Image quality assessment, region of evaluation, BP neural network, wavelet-based contourlet transform (WBCT)

虹膜识别作为一种高度可靠的身份鉴别方法, 在应用中的实际识别性能很大程度上与采集的虹膜图像质量密切相关. 通过研究虹膜图像质量评价方法去掉不符合识别要求的模糊、严重遮挡和变形等低质量虹膜图像, 可以有效地提高虹膜识别系统的性能. Daugman<sup>[1]</sup> 通过计算虹膜图像二维傅里叶频谱中的高频段能量来评估虹膜图像的清晰程度. Zhang<sup>[2]</sup> 在已完成虹膜定位的基础上通过虹膜与瞳孔之间边缘像素的灰度梯度来衡量图像的聚焦程度. Ma 等<sup>[3]</sup> 将虹膜图像的二维傅里叶频谱划分为高、中、低频段后, 用虹膜区域总的频谱能量来区分未遮挡和严重遮挡的虹膜图像, 用中频段能量与其他频率能量的比值来区分清晰和模糊的虹膜图像. 文献 [4] 提出对虹膜图像空间滤波后, 分别用傅里叶频谱高频、垂直高频能量来评估离焦模糊和运动模糊程度, 用虹膜区域的平均灰度值来判断虹膜是否存在遮挡. 文

献 [5] 提出用方向滤波器对虹膜图像滤波后, 通过计算运动方向角度来评估图像的运动模糊和变形情况. 文献 [6] 提出把虹膜区域划分为宽度固定的多个同心圆环带后, 再对这些圆环带进行小波分解, 计算这些圆环带的能量来评估图像质量. 文献 [7] 提出对虹膜图像进行二级小波分解后, 计算小波系数的方差来区分清晰和模糊图像, 用高频子带图像中小于某灰度阈值的像素个数来估计虹膜遮挡程度. 文献 [8] 提出对虹膜图像进行小波包分解, 选取高频分量分布最集中的子频带能量来评估虹膜纹理的清晰程度. 此外, 文献 [9] 提出利用人类视觉系统 (Human visual system, HVS) 模型来评价虹膜图像质量.

现有的虹膜图像质量评价方法主要是从虹膜图像的空间灰度信息和频谱信息中提取反映图像质量的特征向量. 虹膜包含许多类似于斑点、细丝、条纹等形状的细微特征, 拍摄到的图像有丰富的纹理几何结构, 现有的这些方法并不能很好地描述多纹理虹膜图像的质量. 这是由于传统的傅里叶和小波变换只能处理图像的低维特征, 不能有效捕捉虹膜图像的边缘和纹理等高维几何特征. WBCT (Wavelet-based contourlet transform)<sup>[10]</sup> 是一种用于稀疏表示高维空间中曲线或曲面奇异性的多方向多分辨率变换, 可以有效地表示轮廓和纹理丰富的图像, 能充分利用图像本身特有的几何特征, 形成最稀疏的图像表示, 很好地反映图像的视觉特性, 适合精确地描述虹膜图像的多种低质量情况.

本文基于 WBCT 分解提出了一种新的虹膜图像质量评价方法, 在用级联 BP 神经网络系统确定出包含虹膜的评估区域后, 对区域图像进行 WBCT 分解, 通过计算定义的图像质量评价指标, 可以实时地评价离焦模糊、运动模糊、佩带隐形眼镜、眼睑或睫毛遮挡过多的虹膜图像.

### 1 虹膜图像的 WBCT 分解

2002 年, Do 等<sup>[11]</sup> 提出了一种有效的图像稀疏表示方法: Contourlet 变换. 它能对图像进行多分辨率时频局部分析, 具有良好的各向异性特征, 能很好地捕获图像的边缘信息. 尽管 Contourlet 变换是一种有效的图像稀疏表示方法, 但在第一阶段的 LP (Laplacian pyramid) 变换中存在一定的冗余度, 并不是一种理想的图像稀疏表示. 2004 年, Eslami 等<sup>[10]</sup> 提出了一种新的无冗余的图像稀疏表示方法: 基于小波分析的 Contourlet 变换 (Wavelet-based contourlet transform, WBCT). WBCT 分为两个滤波阶段: 首先由小波实现对图像的多尺度分解; 然后对小波分解得到的每个高频子带应用方向滤波器组 (Directional filter bank, DFB) 做  $2^n$  个方向的分解, 将分布在同方向上的奇异点合成为一个系数.

对  $M \times N$  的图像  $f(x, y)$ ,  $W_{j,HL}$ 、 $W_{j,LH}$  和  $W_{j,HH}$  表示小波分解后的子空间, 分别代表图像的水平、垂直和对角方向的细节分量. 其中下标  $j$  为尺度, 它们的基函数分别为  $\Psi_{j,HL}(n)$ 、 $\Psi_{j,LH}(n)$  和  $\Psi_{j,HH}(n)$ . 当对这 3 个小波空间采用  $l_j$  级的方向滤波时, 得到的第  $k$  个方向子带空间分别记为  $W_{j,HL,k}^{(l_j)}$ 、 $W_{j,LH,k}^{(l_j)}$  和  $W_{j,HH,k}^{(l_j)}$  ( $0 \leq k < 2^{(l_j)}$ ), 它们与小波空间的关系为

$$W_{j,i} = \bigoplus_{k=0}^{2^{l_j}-1} W_{j,i,k}^{(l_j)}, \quad i = HL, LH, HH \quad (1)$$

式中,  $\bigoplus$  表示空间直和. 且方向子带空间的基函数分别为

$$\eta_{j,i,k}^{(l_j)}(n) = \sum_{m \in \mathbf{z}^2} g_k^{(l_j)}(n - S_k^{(l_j)} m) \Psi_{j,i}(m) \quad (2)$$

收稿日期 2008-05-27 收修改稿日期 2008-12-08  
Received May 27, 2008; in revised form December 8, 2008  
1. 清华大学深圳研究生院 深圳 518055 2. 清华大学精密测试技术及仪器国家重点实验室 北京 100084  
1. Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055 2. State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084  
DOI: 10.3724/SP.J.1004.2009.00618

式中,  $g_k^{(l_j)}$  是方向滤波器,  $S_k^{(l_j)}$  是下采样矩阵. 则经过  $l_j$  级的方向滤波后, 得到的子带为

$$c_{j,k}^{(l_j)}[n] = \langle f, \eta_{j,i,k}^{(l_j)}(n) \rangle \quad (3)$$

利用式 (1)~(3), 虹膜图像的 WBCT 分解采用两层小波分解和三级 DFB 相结合的方法. 小波变换采用“Haar”小波基, DFB 分解采用 McClellan 变换“9-7”滤波器<sup>[12]</sup>. 得到的各个方向的 48 个子带, 如图 1 所示.

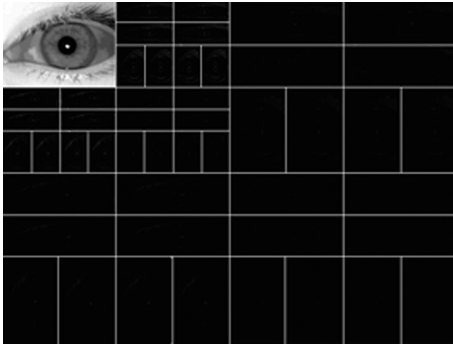


图 1 虹膜图像的 WBCT 分解

Fig. 1 WBCT decomposition for iris images

## 2 图像质量评价指标定义

采集到的离焦模糊图像是由于用户没有很好地配合采集设备的对焦操作, 对焦不准确造成的. 运动模糊图像是因为采集设备采用隔行扫描 PAL 制式 CCD 摄像头或者采集的过程中用户发生了移动而造成的. 眼睑或睫毛遮挡过多的图像是在采集的过程中, 用户眨眼或未充分睁开眼睛而造成的. 普通隐形眼镜佩戴不当时会造成镜面反光, 影响采集到的虹膜图像质量. 佩戴彩色隐形眼镜则会采集不到用户的真实虹膜图像. 这些不合格虹膜图像样本如图 2 所示.

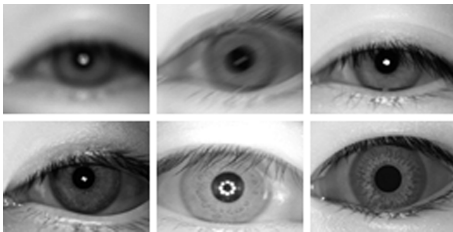


图 2 几种不合格虹膜图像

Fig. 2 Several types of poor quality iris images

### 2.1 离焦模糊评价指标

离焦成像系统具有低通滤波特性<sup>[13]</sup>, 抑制了原始图像的高频细节信息, 使得离焦图像变得模糊, 而聚焦良好的图像则具有丰富的细节信息. 因此, 可以根据区域纹理的细节能量确定图像的聚焦特性. 选取虹膜纹理细节完整丰富、高频噪声干扰小的子带, 定义离焦模糊评价指标  $Q_{\text{defocus}}$  为

$$Q_{\text{defocus}} = \sum_i \sum_{m=1}^{2^{-3} \times M} \sum_{n=1}^{2^{-4} \times N} \frac{(c_i(m, n) - \bar{c}_i)^2}{2^{-3} \times M \times 2^{-4} \times N} \quad (4)$$

其中

$$\bar{c}_i = \frac{\sum_{m=1}^{2^{-3} \times M} \sum_{n=1}^{2^{-4} \times N} c_i(m, n)}{2^{-3} \times M \times 2^{-4} \times N}$$

$i = 29, 30, 31, 32, 45, 46, 47, 48$

### 2.2 运动模糊评价指标

运动模糊图像实质是在运动方向上各像素点相互重叠造成的, 不同运动方向上相邻点的灰度差值可以反映模糊程度<sup>[14]</sup>. 运动使沿径向的虹膜纹理边缘被完整性破坏, 图像频谱缺少水平中频分量. 选取图像中频段各个方向的子带, 通过计算子带能量梯度, 定义运动模糊评价指标  $Q_{\text{motion}}$  为

$$Q_{\text{motion}} = \sum_i \sum_{m=1}^{2^{-3} \times M} \sum_{n=1}^{2^{-4} \times N} ([c_i(m, n) - c_i(m+1, n)]^2 + [c_i(m, n) - c_i(m, n+1)]^2), \quad i = 37, 38, 39, 40 \quad (5)$$

### 2.3 睫毛遮挡评价指标

眼睫毛通常呈细线状, 基本分布在  $\pm 45^\circ$  之内<sup>[15]</sup>. 遮挡虹膜的睫毛大多数沿垂直方向分布, 频谱会产生很高的区域垂直高频分量. 选取水平低频垂直高频区域内的子带, 用特定方向子带能量的比值可以粗略估计出睫毛遮挡的面积, 定义睫毛遮挡评价指标  $Q_{\text{eyelash}}$  为

$$Q_{\text{eyelash}} = \frac{\sum_i \sum_{m=1}^{2^{-3} \times M} \sum_{n=1}^{2^{-2} \times N} (c_i(m, n) - \bar{c}_i)^2}{\sum_j \sum_{m=1}^{2^{-2} \times M} \sum_{n=1}^{2^{-3} \times N} (c_j(m, n) - \bar{c}_j)^2} \quad (6)$$

其中,  $i = 9, 10, 11, 12$ ;  $j = 13, 14, 15, 16$ .

### 2.4 眼睑遮挡评价指标

在虹膜区域内, 眼睑部分灰度值较高且沿各个方向均匀分布. 选取水平高频垂直低频区域内的子带, 用特征子带的相对均值来估计眼睑遮挡程度, 定义的眼睑遮挡评价指标  $Q_{\text{eyelid}}$  为

$$Q_{\text{eyelid}} = \frac{\left| \sum_i \sum_{m=1}^{2^{-3} \times M} \sum_{n=1}^{2^{-2} \times N} c_i(m, n) - \sum_j \sum_{m=1}^{2^{-2} \times M} \sum_{n=1}^{2^{-3} \times N} c_j(m, n) \right|}{2^{-2} \times M \times 2^{-2} \times N} \quad (7)$$

其中,  $i = 1, 2, 3, 4$ ;  $j = 5, 6, 7, 8$ .

### 2.5 隐形眼镜评价指标

彩色隐形眼镜的纹理与高度随机的人眼虹膜纹理相比, 纹理基元的尺寸、形状、间距等一致性程度更高. 普通隐形眼镜由于佩戴不当产生的镜面反光, 会形成一定数量的光斑, 可以认为是一种基元高度一致的纹理. 因此, 通过描述纹理表面的复杂程度可以反映佩戴隐形眼镜的图像质量. 选取水平高频垂直高频区域内的子带, 定义隐形眼镜评价指标  $Q_{\text{lens}}$  为

$$Q_{\text{lens}} = \sum_i \sum_{m=1}^{2^{-3} \times M} \sum_{n=1}^{2^{-2} \times N} \frac{\ln[1 + c_i(m, n)]^2}{2^{-2} \times M \times 2^{-2} \times N} \quad (8)$$

其中,  $i = 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24$

### 3 图像质量评估区域选取

在评价虹膜图像质量时, 如果从整幅图像中确定出感兴趣的评估区域, 再对这部分区域图像进行质量评价, 则评价结果会更加客观准确. 因此, 我们设计了一个基于 BP 神经网络级联结构的检测系统, 可以快速、准确地在输入序列图像中确定出包含虹膜的有效质量评估区域. 该系统分为三级: 第一级分类器结构最简单, 分类精度最低, 承担了检测系统运算量的最主要部分; 第二级分类器用于对第一级分类器得到的虹膜候选区域的再次确认, 比第一级分类器结构复杂, 分类精度适中; 第三级分类器用于对第二级分类器得到的候选区域的再次确认, 结构最复杂, 分类精度最高, 所承担运算量很少.

级联 BP 神经网络输入层每个节点的输入是所在位置的矩形邻域灰度的均值, 在计算矩形灰度均值时, 采用 Paul 等<sup>[16]</sup> 提出的积分图像的方法. 首先使用金字塔的子采样方法将虹膜图像以一定比率重采样缩小, 在每一级尺度图像中以  $25 \text{ 像素} \times 25 \text{ 像素}$  的检测窗口扫描整幅图像. 所有子窗口作为输入, 依次通过各级神经网络, 如果某一子窗口被神经网络判定为真, 再继续转入下一级神经网络进行判断, 如果被神经网络判断为假, 则抛弃这一子窗口. 通过所有神经网络判断均为真的子窗口就是虹膜所在区域.

### 4 实验结果及分析

为了检验定义的虹膜图像质量评价指标的有效性, 我们从自建的虹膜数据库 THUIris1.0 和中国科学院自动化研究所公开的虹膜数据库 CASIA-IrisV3<sup>[17]</sup> 中分别选取虹膜图像样本. 实验算法用 Matlab 7 编写, 计算机硬件环境为 Petium 2.0 GHz CPU, 1 G RAM.

实验时根据人眼的主观评价挑选出的虹膜图像集包括: 质量合格的图像 2 800 幅, 其中佩带普通隐形眼镜的图像 300 幅; 离焦模糊程度不同的图像 800 幅; 运动模糊程度不同的图像 800 幅; 睫毛遮挡程度不同的图像 800 幅; 眼睑遮挡程度不同的图像 800 幅; 隐形眼镜存在反光的图像 200 幅; 佩带彩色隐形眼镜的图像 200 幅. 将一半的样本作为训练集, 另一半作为测试集. 在计算评价指标时, 先用设计的级联 BP 神经网络确定出每幅图像的质量评估区域作为输入, 每幅图像的平均定位时间为 18.6 ms.

#### 4.1 评价指标分类能力实验

计算各类训练样本的质量评价指标, 统计计算结果得到评价指标值的概率密度分布. 从图 3 中可以看出, 合格的虹膜样本和几种低质量虹膜样本的类间距较大, 类内距离较小, 两类图像的交叠区域较小, 说明定义的评价指标有很好的区分能力.

#### 4.2 评价指标敏感性实验

为了测试定义的指标描述虹膜图像质量变化的能力, 选取图像质量依次变化的 6 类虹膜图像. 由评价指标计算结果可知 (见表 1), 评价指标随各类图像的质量变化与人眼主观评价结果一致.  $Q_{\text{defocus}}$  和  $Q_{\text{motion}}$  随着图像逐渐变模糊, 其值很快变小, 能敏感反映出图像的这种模糊程度变化.  $Q_{\text{eyelash}}$  和  $Q_{\text{eyelid}}$  随着睫毛和眼睑对虹膜遮挡面积的增

加, 其值逐渐变大, 能反映出虹膜区域受遮挡情况.  $Q_{\text{lens}}^1$  和  $Q_{\text{lens}}^2$  随着隐形眼镜反光面积的增加和彩色隐形眼镜纹理更加规则一致, 其值逐渐变小. 定义的评价指标对噪声干扰不敏感, 并与采集图像的设备无关.

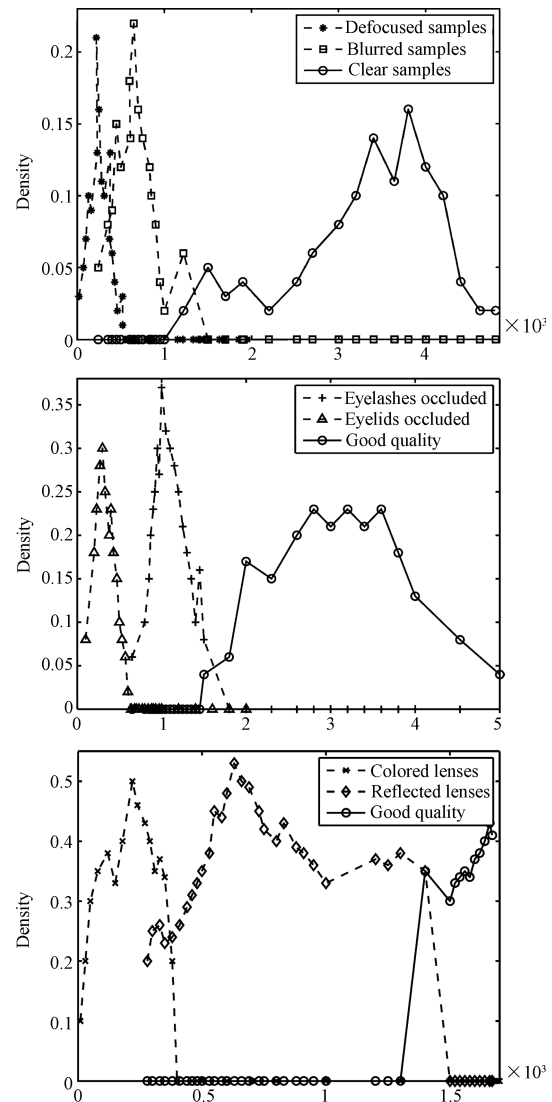


图 3 训练样本的质量评价指标值分布

Fig. 3 Distributions of quality evaluation indices

表 1 质量评价指标计算结果

Table 1 Computational results of quality evaluation indices

Number	$Q_{\text{defocus}}$	$Q_{\text{motion}}$	$Q_{\text{eyelash}}$	$Q_{\text{eyelid}}$	$Q_{\text{lens}}^1$	$Q_{\text{lens}}^2$
1	1 499	4 450	0.96	0.25	310	25
2	820	2 480	1.18	0.38	440	70
3	516	1 130	1.31	0.52	530	120
4	341	830	1.98	0.61	625	150
5	254	560	2.42	0.77	868	190
6	193	490	2.51	0.91	1 030	220
7	118	420	2.63	1.13	1 129	270
8	34	340	3.13	1.54	1 237	290

表 2 评价指标测试与对比结果  
Table 2 Testing results and performance comparison

指标	离焦模糊	运动模糊	睫毛遮挡	眼睑遮挡	隐形反光	彩色隐形	Daugman <sup>[1]</sup>	Zhang <sup>[2]</sup>	本文方法
CCR (%)	98.8	99.1	96.5	94.4	91.2	98.3	87.8	83.4	98.9
$\bar{t}$ (ms)	27.4	40.2	33.6	28.4	25.3	25.3	122	353	32

### 4.3 测试实验及与其他方法比较

使用测试样本实验得到的正确分类率 (Correct classification rate, CCR) 和平均计算时间 ( $\bar{t}$ ) 如表 2 所示. 可以看出, 定义的各项指标对模糊、遮挡、隐形眼镜反光和彩色隐形眼镜图像有很高的正确分类率, 每幅图像的平均处理时间很短, 满足了实时性的要求. 与 Daugman<sup>[1]</sup> 和 Zhang<sup>[2]</sup> 的方法相比, 本文方法有更高的正确分类率, 耗时更短, 优于其他方法.

## 5 结论

本文提出了一种基于 WBCT 分解的虹膜图像质量评价方法. 模糊、遮挡和佩带隐形眼镜的虹膜图像可以通过测量图像的纹理细节变化来反映图像质量, 利用 WBCT 分解后特定子带定义指标能很好地度量这几种图像的变化, 从而得到了一种更好的虹膜图像质量评价方法. 为了进一步优化和改进本文的方法, 我们将继续研究更多的低质量虹膜图像的特征, 寻找更有效的图像质量评价方法.

### References

- Daugman J. How iris recognition works. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2004, **14**(1): 21–30
- Zhang G H, Salganicoff M. Method of Measuring the Focus of Close-Up Image of Eyes, Technical Report U. S. Patent 5953440, Whittendale Drive Moorestown, USA, 1999
- Ma L, Tan T N, Wang Y H, Zhang D X. Personal identification based on iris texture analysis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2003, **25**(12): 1519–1533
- Wei Z S, Tan T N, Sun Z N, Cui J L. Robust and fast assessment of iris image quality. In: Proceedings of the International Conference on Biometrics. Hong Kong, China: Springer, 2006. 464–471
- Kalka N D, Zuo J Y, Schmid N A, Cukic B. Image quality assessment for iris biometric. In: Proceedings of the International Society for Optical Engineering. Kissimmee, USA: SPIE, 2006. 1–11
- Chen Y, Dass S C, Jain A K. Localized iris image quality using 2-D wavelets. In: Proceedings of the International Conference on Biometrics. Hong Kong, China: Springer, 2006. 373–381
- Pan L L, Xie M. The algorithm of iris image quality evaluation. In: Proceedings of the International Conference on Communications, Circuits, and Systems. Kokura, Japan: IEEE, 2007. 616–619
- Chen Ji, Hu Guang-Shu, Xu Jin. Iris image quality evaluation method based on wavelet packet decomposition. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2003, **43**(3): 377–380  
(陈戟, 胡广书, 徐进. 基于小波包分解的虹膜图像质量评价算法. 清华大学学报 (自然科学版), 2003, **43**(3): 377–380)
- Li Z H, Zhang C H, Ming X, Zhao Y H. Research iris serial images quality assessment method based on HVS. In: Proceedings of Optical Design and Fabrication. Changchun, China: SPIE, 2006. 461–466
- Eslami R, Radha H. Wavelet-based contourlet transform and its application to image coding. In: Proceedings of the International Conference on Image Processing. Singapore, Singapore: IEEE, 2004. 3189–3192
- Do M N, Vetterli M. The contourlet transform: an efficient directional multiresolution image representation. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2005, **14**(12): 2091–2106
- Lu Wen, Gao Xin-Bo, Wang Ti-Sheng. A natural image quality assessment metric based on wavelet-based contourlet transform. *Acta Electronica Sinica*, 2008, **36**(2): 303–308  
(路文, 高新波, 王体胜. 一种基于 WBCT 的自然图像质量评价方法. 电子学报, 2008, **36**(2): 303–308)
- Zhang Qiang, Guo Bao-Long. Fusion of multi-sensor images based on the nonsubsampling contourlet transform. *Acta Automatica Sinica*, 2008, **34**(2): 135–141  
(张强, 郭宝龙. 基于非采样 Contourlet 变换多传感器图像融合算法. 自动化学报, 2008, **34**(2): 135–141)
- Lu Guang-Ming, Qi Jia-Yin, Liao Qing-Min. Iris image quality assessment method. *Computer Engineering and Applications*, 2007, **43**(26): 197–199  
(卢光明, 戚佳音, 廖庆敏. 一种虹膜图像质量评价的方法. 计算机工程与应用, 2007, **43**(26): 197–199)
- Lai Yi, Lu Chen-Hong, Lu Zhao-Yang. Eyslid and eyelash occlusions detection for iris recognition. *Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics*, 2007, **19**(3): 346–350  
(来毅, 路陈红, 卢朝阳. 用于虹膜识别的眼睑及眼睫毛遮挡检测. 计算机辅助设计与图形学学报, 2007, **19**(3): 346–350)
- Paul V, Michael J. Robust real-time object detection. In: Proceedings of the 2nd International Workshop on Statistical and Computational Theories of Vision-modeling, Learning, Computing, and Sampling. Vancouver, Canada: IEEE, 2001. 1–25
- Center for Biometrics and Security Research. Note on CASIA-IrisV3 [Online], available: <http://www.cbsr.ia.ac.cn/IrisDatabase.htm>, November 1, 2008

陈 瑞 清华大学博士研究生. 主要研究方向为虹膜识别技术.  
E-mail: chen-r03@mails.tsinghua.edu.cn

(CHEN Rui Ph.D. candidate at Tsinghua University. His main research interest is iris recognition.)

林喜荣 清华大学教授. 主要研究方向为生物特征识别技术. 本文通信作者. E-mail: linxr@mail.tsinghua.edu.cn

(LIN Xi-Rong Professor at Tsinghua University. His main research interest is biometric technology. Corresponding author of this paper.)

丁天怀 清华大学教授. 主要研究方向为传感器与智能仪器.

E-mail: dlunj@mail.tsinghua.edu.cn

(DING Tian-Huai Professor at Tsinghua University. His research interest covers sensors and intelligent instruments.)