

基于三维色彩空间的表观检测照明评价方法

谢煜 叶玉堂 张静 刘霖

(电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054)

摘要 针对表观检测系统中照明效果评价和优化较困难的问题,分析了印刷电路板表观图像及其在三维色彩空间中的像素值分布,提出基于三维色彩空间的照明效果评价方法,以量化的色彩分离程度、像素值波动程度和缺陷色彩偏离程度来建立评价函数。实验结果表明,此方法可有效地量化照明效果并符合人眼视觉感受,量化的精度优于1%,根据评价函数进行照明优化可达到对于该电路板的适配照明效果。本方法也可用于类似的表观缺陷检测,如印刷质量检测 and 塑料产品缺陷检测。

关键词 机器视觉;照明评价方法;照明优化;电路板检测;表观缺陷检测

中图分类号 TP216 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0515002

Illumination Assessment Method Based on Three-Dimensional Color Space for Automatic Visual Inspection

Xie Yu Ye Yutang Zhang Jing Liu Lin

(School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)

Abstract Assessment and optimization of illumination are difficult issues in automatic visual inspection. After analyzing the images of visual inspection of printed circuit boards and their pixel value distribution in three-dimensional color space, an illumination assessment method is proposed. This merit function is based on quantitative analysis of Euclidean distance of color in red-green-blue (RGB) space, fluctuation extent of pixel value and deviation of defect color. The experimental results show that this method is suitable for evaluating the illumination effect and complies with subjective feeling of human visual system. It is also shown that the precision is better than 1%. An illumination optimization experiment is performed and the optimum lighting effect is obtained based on the merit function. This method can be applied to other visual inspection areas, such as color print quality inspection and plastic product defects inspection.

Key words machine vision; illumination assessment method; illumination optimization; printed circuit board defect inspection; automatic visual inspection

OCIS codes 150.2945; 110.3000; 120.4630; 150.3040

1 引言

在基于机器视觉的缺陷检查系统中,多层印刷电路板(PCB)的表观缺陷检测包含了复杂的照明设计和处理算法,这主要是由于多层电路板的几何形状复杂且各种材料具有不同的光学特性。当照明效

果较差时,被测物的缺陷信息无法被完整地记录在图像中。图像进入处理流程后,因为信息缺失而无法确认某个像素是否为缺陷像素,造成检出率较低。所以对照明效果的量化评价和优化在表观检查系统研究中有重要意义。

收稿日期: 2013-01-06; **收到修改稿日期**: 2013-01-29

基金项目: 国家自然科学基金(61205004)资助课题。

作者简介: 谢煜(1985—),男,博士研究生,主要从事现代光电测控仪器设计、机器视觉系统设计、照明设计、光学设计和图像处理等方面的研究。E-mail: xyxygood@gmail.com

导师简介: 叶玉堂(1946—),男,教授,博士生导师,主要从事集成光电子、红外传感器、微光光电传感器、激光微细加工、机器视觉系统和算法等方面的研究。E-mail: ytye@uestc.edu.cn

本文彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

Wasserman 等^[1]使用边缘灰度的梯度作为评价函数对多个光源位置和光强进行优化,但该方法没有反映被测物体表面的照明效果,只能用于边缘尺寸检测。Zhou 等^[2]基于人眼观察物体时分析物体的结构特性这一特点,用结构相似性(SSIM)指标来评价单幅图像的质量,但需要一个标准图像作为参考,检测应用中由于没有完全标准的被测物,需要不断迭代寻找更标准的图像造成标准不固定而无法稳定地评价。Ibrahim 等^[3]提出基于被测电路板不同材料的光谱反射率的多光谱成像方法,可根据光谱反射率优化光源波长,达到较好的图像分割效果,但对于线阵相机系统需要反复采集且必须采用亚像素的配准算法,所以时间消耗和计算量较大。Barnes 等^[4]用 193 nm 显微系统和不同入射角、偏振态和波长的光源对半导体器件成像并进行缺陷检测,结合器件几何形状优化光源照射方向,可检测小至几十纳米的缺陷。Ko 等^[5]根据光线追迹和蒙特卡洛模拟原理编制了可以仿真不同光源照射到不同物体上产生的图像的程序,但由于光源和物体的发射和散射特性都需要专用仪器测量,限制了实际应用的范围。袁江涛等^[6]用显微成像系统对高压喷雾系统的细水雾液滴进行图像采集后处理得到微液滴直径,获得优于 5% 的直径误差结果。如进行照明优化使得图像噪声降低且边缘锐利应能获得更高的精度。最近 Gruna 等^[7]使用投影仪产生不同波长和图样的光线,出射到菲涅耳透镜然后通过反射镜投射到物体上,采集多达几十张图像用于被测电路板材质分类,获得更好的分类效果。但图像采集和处理的时间过长使之仅能用于研究不同物体的最佳照明角度和光谱。向守兵等^[8]使用面阵相机对建筑用砖烧制前的码坯叠放异常进行检测,对多种异常情况的平均检出率为 98.2%,其中检出率相对较低的砖块倾斜有望通过高方向性的照明得到提高。张习文等^[9]利用零件在固定位置光源下的边缘 Roberts 梯度作为评价函数,可用于边缘检测类应用的自动光强调节,但缺少对于表面照明质量的评价。张学武等^[10]使用近红外成像和面阵相机结合小波变换解决高反射金属表面缺陷检测,缺陷平均识别率为 95.42%。龚芳等^[11]在太阳能电池表面缺陷检测中引入独立分量分析(ICA)模型和粒子群优化,获得了较好的检测效果。在 PCB 表观缺陷检查系统中,不仅需要某些边缘特征进行检测(如线路),更重要的是对焊盘层的表面缺陷进行检测,已有的照明或图像评价方法不适用于本系统。

由于电路板焊点性能直接决定电气信号的畅通性和电路板可靠性,焊盘的轻微缺陷如轻微划痕、污染和异物等都需要检出,相比一般的检测系统需要较高的照明质量。而目前还没有关于评价表观缺陷检测系统的照明效果的研究。由于照明优化在此类系统中的重要性,进行量化的照明效果评价方法的研究非常必要。本文分析了 PCB 表观检查原始图像的特点和处理算法的要求,通过提取照明效果的量化指标构建评价函数。实验结果表明,该方法可以较好地评价和区分表观缺陷检测的照明效果并可以用于照明优化。

2 PCB 表观检测的照明质量分析

在表观检测系统的研究中,按照信息流向可分为图像采集和图像处理两方面,前者主要包含照明配置和相机镜头,后者主要包含各种处理算法。为了保证处理算法对缺陷的检出率,对原始图像的要求一般是对焦清晰^[12]、亮度合适、各层色彩对比度高^[13,14]、定位特征明显^[15]和缺陷可见度高^[16,17]。

该系统典型的对焦清晰图像及其像素值在红绿蓝(RGB)三维色彩空间的分布如图 1 所示,图中被测板为高反射的镀金(ENIG)板,包含焊盘和绿油层,焊盘层有轻微划痕(短箭头所示,下同);圆点箭头表示各层对应的色彩位置,下同。可以看到较亮的焊盘层的 RG 通道几乎达到最亮处(255),而较暗的绿油层位于左下约 50 的位置,表明两层颜色区分良好,颜色交叠较少,但像素值分布呈长条状,说明还存在一定的图像条纹。图 1 中箭头所示轻微缺陷可被明显观察到,但由于均匀性未达到最优,所以会由此产生约 30% 的误检。图 2 为涂蓝油的有机保焊膜(OSP)的电路板,该类电路板的铜表面覆盖有 OSP 薄膜,反射率较低,易于获得均匀的焊盘图像^[18],但分布的顶端的灰度也只有 60 左右,需要增

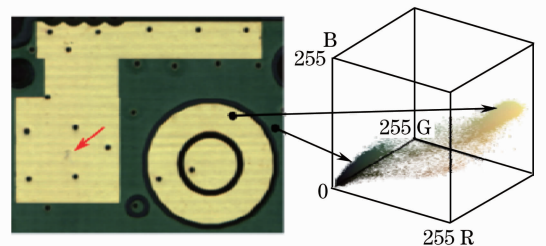


图 1 PCB 表观检查机典型采集图像及其在 RGB 空间的分布

Fig. 1 Typical images of automatic visual inspection of PCB and its distribution in RGB color space

加光源强度。由于焊盘层和蓝油层反射率较接近，所以两层颜色分离程度较小，存在较大重叠区域，使得图像分割算法不能够有效区分缺陷和背景^[19]。图3为普通绿油电路板，由于铜面反射率较低造成颜色分布的分离程度较低，所以需要增加光源亮度。且由于所用的LED光源的光谱和电路板反射光谱不匹配，白色字符层边缘误检较多。箭头所示缺陷对于背景的对比度较小不易分辨。

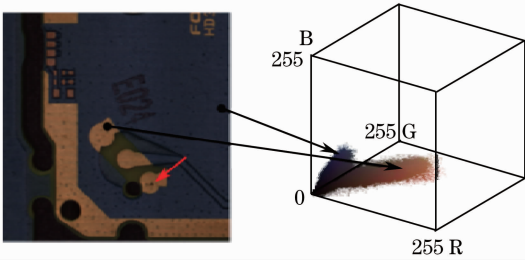


图2 照明不足的OSP铜板图像

Fig. 2 Images of OSP board with insufficient illumination

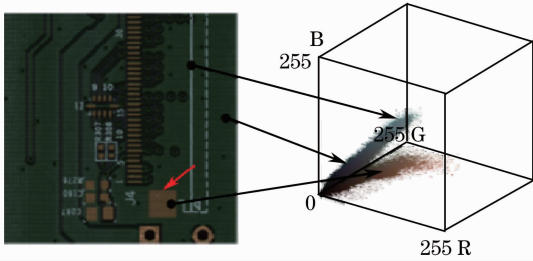


图3 照明不足的普通绿油铜板图像

Fig. 3 Images of ordinary board with insufficient illumination

通过以上分析可见，算法对于照明效果的要求为：图像清晰度高；色彩分布占据颜色空间坐标轴较大比例；各层色彩分离程度高；缺陷相对于其所在特征层颜色偏离程度高。

3 基于图像的三维色彩空间分布和统计的评价函数

在某个照明配置下的照明效果评价函数可以表示为

$$F(x) = \omega_1 D_1 + \omega_2 \sigma^{-1} + \omega_3 D_2, \quad (1)$$

评价函数由三个分量的加权求和构成。对于多变量评价函数，加权求和是常用的方法^[18]，权重 ω_i 用于适应不同类型电路板的评价。(1)式中平均颜色距离为

$$D_1 = \sum_{i=1}^m \frac{d_i}{m}, \quad (2)$$

中心颜色由三维直方图^[20,21]统计得到，然后计算在RGB空间中相互的欧氏距离之和，求和后除以常数 m 得到平均距离。求平均的作用是避免层数 n 变化的时候 D_1 发生数量级的变化而使得设置 ω_1 变得困难。由于相机工作在RGB色彩空间，相机的噪声和线性特性也是针对RGB色彩空间^[22,23]，转换到其他色彩空间会使得分布的形状变化(如HSB, HSL色域)，而某些色彩空间会存在对像素值的截断(如xyY色彩空间)影响计算结果。故 D_1 应在RGB空间下进行统计。平均颜色波动为

$$\sigma = \sum_{i=1}^n \sum_{RGB} \sigma[P_i(u, v)] / (\sigma_{CCD} \cdot 3n), \quad (3)$$

使用标准方差作为评价均匀性的指标^[24]，该指标越小表示照明均匀性越好，为了和其他两个分量的数值随照明效果变化的趋势一致，在(1)式中取 σ 的倒数。由于使用标准方差的前提是该分布可近似为高斯分布，使用MATLAB的曲线拟合工具对图1的焊盘层R通道的直方图进行拟合，目标函数为高斯函数，得到方程的确定系数为0.9935，显示出非常好的高斯函数拟合。因此标准方差指标可以真实反映照明的颜色波动程度。平均缺陷颜色偏差为

$$D_2 = \sum_{RGB} \{M_{avg} [|P_d(u, v) - H_{max}|]\}. \quad (4)$$

(1)式中 x 表示某个照明配置，其值为照明参数的集合， D_1 为平均颜色距离， σ 为平均颜色波动， D_2 为平均缺陷偏差；(2)式中， m 为所有层颜色中心两两连线的总线段数量，易知 $m = \sum_{i=1}^n (i-1)$ ， n 为总特征层数；(3)式中 $P_i(u, v)$ 为所有第 i 层第 u 列第 v 行像素的像素值， σ_{CCD} 为表征相机噪声大小的常数；(4)式中 $M_{avg}[\mathbf{X}(i, j)]$ 表示矩阵 $\mathbf{X}(i, j)$ 各元素的平均值， $P_d(u, v)$ 表示任意缺陷像素的像素值， H_{max} 为中心颜色。

计算每个缺陷像素相对于其背景层中心颜色的偏差程度并求平均值，结果越大则表明照明配置对于缺陷的表现程度越好。

4 照明评价方法的实验验证

将本方法在电路板表观检测系统上进行测试，采集两组照明配置 x_1 和 x_2 的图像分别如图4和图5所示，进行图像配准^[15]后提取具有代表性的计算区域，并进行图像分割^[25,26]将原始图像分割为焊盘、绿油和板材层，分别为图6中的L1、L2和L3。图7为图4和图5的缺陷像素局部放大图，由于缺

陷较轻微,故根据 PCB 板厂检测标准人工阈值分割并使分割出的缺陷像素完全包含实际缺陷。图 4 和图 5 的(1)式计算结果分别为

$$F(x_1) = 1 \times 205.45 + 1000 \times 0.1213 + 3 \times 38.59 = 442.52, \quad (5)$$

$$F(x_2) = 1 \times 210.72 + 1000 \times 0.1410 + 3 \times 72.36 = 568.8, \quad (6)$$

可得 x_1 比 x_2 的照明效果提高约 28%,其中 80%由平均缺陷颜色偏差 D_2 贡献,该结果和图 7 中缺陷对比度明显增大为主要变化趋势相一致。由于配置 x_2 是光源从配置 x_1 移动约 5 mm 后目视质量更高的照明配置,可见评价函数给出的数值和目视评价有很好的 consistency。

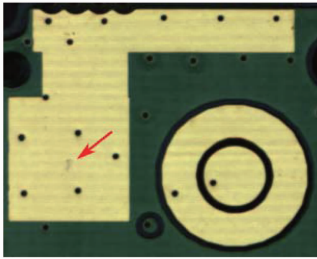


图 4 采用照明配置 x_1 的镀金电路板照明效果图
Fig. 4 Image of illumination setup x_1 of ENIG board

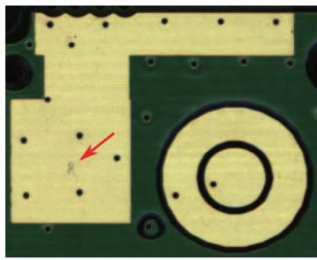


图 5 采用照明配置 x_2 的镀金电路板照明效果图
Fig. 5 Image of illumination setup x_2 of ENIG board

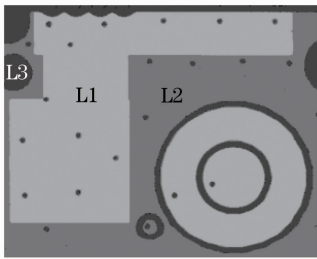


图 6 绿油镀金板分层图
Fig. 6 Segmentation image of green solder resist ENIG board

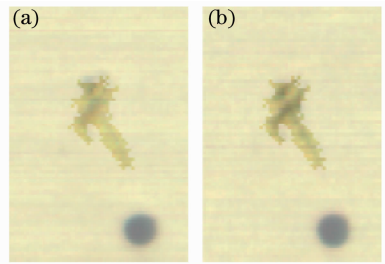


图 7 缺陷像素局部放大图。(a)照明配置 x_1 ; (b) x_2
Fig. 7 Magnified defect image. (a) Illumination setup x_1 ; (b) x_2

基于该方法进行照明优化实验,探索以某照明配置为起点到最佳照明的可行性,即循环进行图像采集、评价函数计算和光源移动。移动光源的方向为使得评价函数的数值增加即效果好转的方向,直到移动光源产生的评价函数变化小于 1%且在某值附近小范围波动。初始和优化后效果如图 8 和图 9 所示,评价函数数值分别为 365.24 和 395.53,显示照明效果优化约 8.3%,图 10 和图 11 分别为分层图和划痕分割图。达到优化照明的配置后,重复进行图像采集和评价函数计算 25 次,得到 25 次评价函数波动小于 1%。此时人眼已经不能分辨照明效果的波动,说明该方法可以获得比人眼更精确的评价效果。

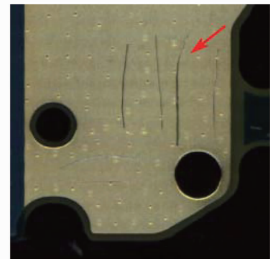


图 8 初始照明效果图
Fig. 8 Image of initial illumination setup

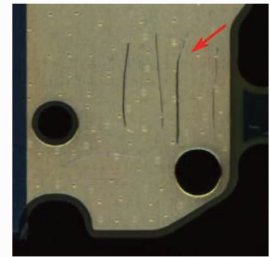


图 9 优化的光源配置下照明效果图
Fig. 9 Image of optimized illumination setup

5 结 论

分析了 PCB 表观缺陷检查系统需要的照明效

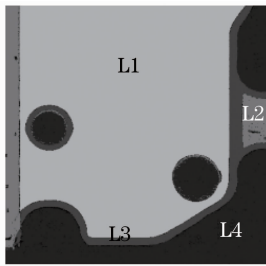


图 10 蓝油镀金板分层图

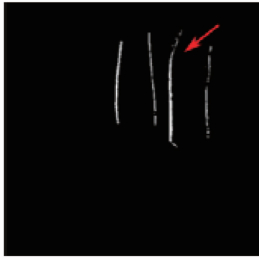
Fig. 10 Segmentation image of blue solder resist
ENIG board

图 11 划痕缺陷分割图

Fig. 11 Segmentation image of scratch defects

果,基于图像像素值在 RGB 空间的分布及其物理意义,提出一种新的照明评价方法,可以有效地量化 PCB 表观检测系统的照明效果。同时从效果良好的初始配置出发,可以将其优化到最优照明。该方法很大程度上降低了照明优化的难度和复杂度。结合电控移动平台作为光源架设平台,该方法可用于照明配置的自动调整和细微调整。照明优化后,检测系统可获得更好的图像、达到更高的检出率,对于检测系统具有重要意义。此方法可用于具有类似检测需求的表观缺陷检测系统,如印刷质量检测、塑料产品检测和铝带缺陷检测等。

参 考 文 献

- 1 R. M. Wasserman, A. D. Silber. Optimization of multiple-source illumination for machine vision inspection via visual simulation [C]. *SPIE*, 2002, **4772**: 37~46
- 2 W. Zhou, A. C. Bovik, H. R. Sheikh *et al.*. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity [J]. *IEEE Trans. Image Processing*, 2004, **13**(4): 600~612
- 3 A. Ibrahim, S. Tominaga, T. Horiuchi. Material classification for printed circuit boards by spectral imaging system [J]. *LNCS*, 2009, **5646**: 216~225
- 4 B. M. Barnes, R. Quinhanilha, Y. Sohn *et al.*. Optical illumination optimization for patterned defect inspection [C]. *SPIE*, 2011, **7971**: 79710D
- 5 N. Ko, Y. Lee, S. Jung *et al.*. Computational imaging in machine vision system for automated optical inspection [C]. *Computational Optical Sensing and Imaging*, 2009. JTuC13
- 6 Yuan Jiangtao, Yang Li, Wang Xiaochuan *et al.*. Measurement and analysis of water mist droplet size based on machine vision [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2842~2847

- 袁江涛,杨立,王小川等.基于机器视觉的细水雾液滴尺寸测量与分析[J].*光学学报*,2009,**29**(10):2842~2847
- 7 R. Grana, J. Beyerer. Feature-specific illumination patterns for automated visual inspection [C]. *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 2012. 360~365
- 8 Xiang Shoubing, Su Guangda, Chen Jiansheng *et al.*. Brick stack anomaly discovery and recognition based on machine vision [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 0715002
- 向守兵,苏光大,陈健生等.基于机器视觉的码坯异常检测与识别[J].*光学学报*,2011,**31**(7):0715002
- 9 Zhang Xiwen, Wang Xiaodong, Luo Yi *et al.*. Automatic illumination of microscopic machine vision optimization for precision miniature parts automatic assembly system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, **39**(4): 14~20
- 张习文,王晓东,罗怡等.精密微小零件自动装配系统显微机器视觉的照明自动优化[J].*光电工程*,2012,**39**(4):14~20
- 10 Zhang Xuewu, Ding Yanqiong, Yan Ping. Vision inspection of metal surface defects based on infrared imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0312004
- 张学武,丁燕琼,闫萍.一种基于红外成像的强反射金属表面缺陷视觉检测方法[J].*光学学报*,2011,**31**(3):0312004
- 11 Gong Fang, Zhang Xuewu, Sun Hao. Detection system for solar module surface defects based on constrained ICA model and PSO method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(4): 0415002
- 龚芳,张学武,孙浩.基于独立分量分析和粒子群算法的太阳能电池表面缺陷红外热成像检测[J].*光学学报*,2012,**32**(4):0415002
- 12 C. Chen, R. Hwang, Y. Chen. A passive auto-focus camera control system [J]. *Applied Soft Computing*, 2010, **10**(1): 296~303
- 13 C. Wang, B. C. Jiang, Y. Chou *et al.*. Multivariate analysis-based image enhancement model for machine vision inspection [J]. *International J. Production Research*, 2011, **49**(10): 2999~3021
- 14 D. Tsai, H. Tsai. Low-contrast surface inspection of mura defects in liquid crystal displays using optical flow-based motion analysis [J]. *Machine Vision and Applications*, 2011, **22**(4): 629~649
- 15 G. Tzimiropoulos, V. Argyriou, S. Zafeiriou *et al.*. Robust FFT-based scale-invariant image registration with image gradients [J]. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2010, **32**(10): 1899~1906
- 16 P. Gamage, S. Q. Xie. A real-time vision system for defect inspection in cast extrusion manufacturing process [J]. *International J. Advanced Manufacturing Technology*, 2009, **40**(1-2): 144~156
- 17 W. Zhou, D. Hart, N. Bock *et al.*. See-through-silicon inspection application studies based on traditional silicon imager [C]. *SPIE*, 2011, **8105**: 81050H
- 18 Xie Yu, Ye Yutang, Zhang Jing *et al.*. A shadow-free and uniform illumination method for automatic visual inspection of printed circuit boards [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2012, **23**(7): 1279~1284
- 谢煜,叶玉堂,张静等.一种PCB表观检查机的无阴影高均匀照明方法[J].*光电子·激光*,2012,**23**(7):1279~1284
- 19 E. Vázquez, R. Baldrich, J. van de Weijer *et al.*. Describing reflectances for colour segmentation robust to shadows, highlights and textures [J]. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, **33**(5): 917~930
- 20 K. S. Tan, N. A. M. Isa. Color image segmentation using histogram thresholding-fuzzy C-means hybrid approach [J]. *Pattern Recognition*, 2011, **44**(1): 1~15
- 21 M. Chien, C. Tien. Computational lighting by an LED-based system [C]. *SPIE*, 2012, **8486**: 84860R

- 22 B. Aiazzi, L. Alparone, S. Baronti *et al.*. Unsupervised estimation of signal-dependent CCD camera noise [J]. *EURASIP J. Advances in Signal Processing*, 2012, **2012**(1): 231~254
- 23 Ding Xiaohua, Li You, Yu Qifeng *et al.*. CCD noise calibration and its application in edge location [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 99~104
丁晓华, 李 由, 于起峰 等. CCD 噪声标定及其在边缘定位中的应用[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 99~104
- 24 M. A. Moiseev, L. L. Doskolovich, N. L. Kazanskiy. Design of high-efficient freeform LED lens for illumination of elongated rectangular regions [J]. *Opt. Express*, 2011, **19** (S3): A225~A233
- 25 L. Najman, M. Couprie. Watershed algorithms and contrast preservation [J]. *LNCS*, 2003, **2886**: 62~71
- 26 L. Vincent, P. Soille. Watersheds in digital spaces: an efficient algorithm based on immersion simulations [J]. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1991, **13** (6): 583~598

栏目编辑: 李文喆