

# 面向皮革缺陷检测的离轴 LED 曲面阵列照明设计

王德宇, 王雪琨, 于文文, 曹建军, 钱维莹, 高淑梅\*

江南大学理学院江苏省轻工光电工程技术研究中心, 江苏 无锡 214122

**摘要** 提出了一种曲面 LED 阵列设计方法。根据光线叠加原理, 将 LED 排列在自由曲面上, 通过曲率控制 LED 的出光角度。基于 LED 曲面阵列离轴照度分布的解析式, 引入了基于模拟退火的粒子群优化算法, 设定约束条件, 构建均匀度评价函数, 优化了 LED 曲面阵列的数值模型。制作出实物光源进行照度测量与缺陷检测。理论模拟和实物检测结果均显示, 倾斜角度为  $45^\circ$ , 目标面与发光面面积比值为  $1:0.85$  和  $1:4$  时, 照度均匀度分别达到  $91.79\%$  和  $98.4\%$ 。在皮革缺陷检测中的结果表明, 采用 LED 曲面阵列光源可凸显特定缺陷, 易于图像处理, 能快速准确地识别缺陷。

**关键词** 光学设计; 发光二极管(LED); 自由曲面阵列; 离轴均匀照明; 机器视觉; 缺陷检测

中图分类号 O435

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.082202

## Off-Axis LED Curved Array Lighting Design for Leather Defect Detection

Wang Deyu, Wang Xuekun, Yu Wenwen, Cao Jianjun, Qian Weiying, Gao Shumei\*

*Jiangsu Provincial Research Center of Light Industrial Optoelectronic Engineering and Technology, College of Science, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China*

**Abstract** A design method of curved light-emitting diode (LED) array is proposed. Based on the principle of light superposition, the LEDs are arranged on the free-form surface, and the LED light-emitting angle is controlled through curvature. Based on the analytical formula of off-axis illumination distribution of the LED curved array, a particle swarm optimization algorithm is introduced based on simulated annealing, the constraint conditions are set, a uniformity evaluation function is constructed, and the numerical model of LED curved array is optimized. A physical light source is produced for the illuminance measurement and the defect detection. Both the theoretical simulation and the real detection show that when the inclination angle is  $45^\circ$  and the ratios of the target surface area to the light-emitting surface area are  $1:0.85$  and  $1:4$ , the illumination uniformity is  $91.79\%$  and  $98.4\%$ , respectively. The results for leather defect detection show that the proposed curved LED array light source can highlight specific defects, quickly and accurately identify defects, and is easy for image processing.

**Key words** optical design; light-emitting diode (LED); free-form surface array; off-axis uniform illumination; machine vision; defect detection

**OCIS codes** 220.2740; 150.1835; 220.2945

## 1 引言

在生产加工过程中, 人造皮革表面易出现气泡、白斑、暗纹、划痕、污渍、印刷不均等缺陷<sup>[1]</sup>, 用机器视觉检测可提高生产效率和产品质量, 已经成为发展趋势。在视觉检测系统中图像采集是关键, 而光

源和光照方式会直接影响图像采集质量和检测效率<sup>[2]</sup>, 目标面照明均匀性和亮度是光源的重要指标。受纹理的影响, 常规照明检测方法很难准确识别具有纹理结构的皮革在印染过程中出现的印染或压痕等缺陷<sup>[3]</sup>。目前的研究主要集中在以各种算法甄别图像中的缺陷<sup>[4]</sup>, 而关于光照方式对缺陷图像采集

收稿日期: 2018-10-10; 修回日期: 2018-10-26; 录用日期: 2018-11-16

基金项目: 江苏省研究生培养创新工程(SJCX18\_0633)

\* E-mail: gaosm@jiangnan.edu.cn

的影响研究相对较少。

皮革缺陷检测中,常用的照明光源有高频荧光灯、节能灯和 LED 阵列灯等。高频荧光灯和节能灯适用于大面积照明,均匀性相对较差。发光二极管(LED)光源发光效率高、稳定性好,特别是发光面小,易于进行二次光学设计。目前,采用 LED 实现均匀照明的方法主要有:一是单颗 LED 芯片前加曲面透镜<sup>[5-6]</sup>,二是 LED 阵列分布<sup>[7]</sup>,两者均匀性均可以达到 90% 以上。在机器视觉系统中,目标面的照度直接影响检测效率(曝光时间),所以通常在保证均匀性的同时照度越高越好。虽然单颗大功率 LED 也可实现很好的均匀照明<sup>[8]</sup>,但对于检测物体缺陷来说光照方向相对单一,混光效果差,易对凹凸物体表面产生错误的阴影而造成误判,且照明系统发热量大,散热要求很高,很难达到工业检测中目标面照度大小的要求,因此目前在机器视觉检测系统中尚未发现使用单颗 LED 照明。LED 阵列发光面大且方便调整,散热好,均匀度高,混光性更好,可根据实际照明需求调整系统的光照强度和照射角度<sup>[9]</sup>。在现代的机器视觉检测系统中,光源几乎都是 LED 阵列系统,而且为提高光亮度,通常光源发光面积大于实测物体的面积,有的甚至大很多。目前市场上的机器视觉光源主要有:可改变照射角度的环形 LED 光源<sup>[10]</sup>、用多组光源组合照明的平面

和条形光源<sup>[11]</sup>、通过拱形内壁漫反射消除阴影的拱形光源<sup>[12]</sup>等,这些光源都能够很好地实现均匀高照度的照明,但都属于同轴照明系统,即照明光是总体对称分布的。而研究发现,对于一些纹理皮革的印染缺陷,只有通过单侧非对称均匀照明,即离轴照明才能凸显出来,这种 LED 阵列照明系统尚未见报道。单颗大功率 LED 虽然可通过自由曲面透镜实现小角度离轴均匀照明,但如果离轴角度过大,会大幅影响照度均匀性。

本文提出一种用 LED 自由曲面阵列实现离轴均匀照明的设计方法。基于单颗 LED 芯片同轴照明的照度分布,以照度均匀度最大为优化目标,以 LED 的间隔与角度差值为约束条件,引入基于模拟退火的粒子群优化算法(SimuAPSO),设计并制作出可实现离轴均匀照明的 LED 曲面阵列光源,将其用于皮革缺陷检测的机器视觉实测系统,最终达到快速检测皮革表面缺陷的目的。

## 2 数学模型的建立

### 2.1 LED 曲面阵列照度分布

单颗 LED 芯片发光面较小,可近似看作点光源<sup>[13]</sup>。令多颗 LED 分布在一个自由曲面上,用曲率控制 LED 的照射角度,通过调整 LED 在曲面上的空间位置和间隔实现均匀照明。

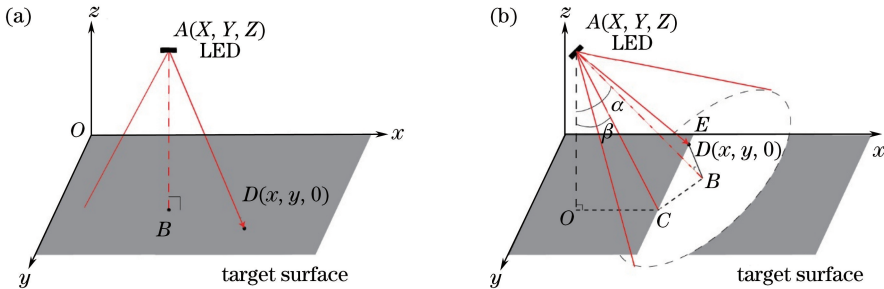


图 1 单颗 LED 照明。(a)同轴照明;(b)离轴照明

Fig. 1 Single LED lighting. (a) Coaxial illumination; (b) off-axis illumination

图 1 为 LED 的光照示意图,LED 位于点 A  $(X, Y, Z)$ ,AB 为其到目标面的垂直距离,设光轴与目标面法线夹角为  $\alpha$ 。当  $\alpha=0$  时称为同轴照射,即图 1(a),则目标面 I 上任意一点  $D(x, y, 0)$  处的照度为<sup>[14-16]</sup>

$$E(x, y, z) = \frac{Z^{m+1} I_0}{[(x-X)^2 + (y-Y)^2 + Z^2]^{(m+2)/2}}, \quad (1)$$

式中: $I_0$  为 LED 的中心光强;参数  $m = -\ln 2 / \ln(\cos \theta_{1/2})$ <sup>[17]</sup>,  $\theta_{1/2}$  为 LED 半角宽度; $Z = \overline{AB}$ 。

$\overline{AD} = \sqrt{(x-X)^2 + (y-Y)^2 + Z^2}$ ,这时(1)式可以改写成

$$E(x, y, z) = \frac{\overline{AB}^{m+1} I_0}{\overline{AD}^{m+2}}. \quad (2)$$

当  $\alpha \neq 0$  时,即图 1(b),图中 AC 垂直与于目标面 II 与 LED 垂直照度面 I 的交线 DC, $\beta$  是  $\angle OAC$ , $\beta = \arctan(x-X/Z)$ , $\overline{AB} = Z (\cos \beta)^{-1} \cos(\alpha - \beta)$ , (2)式仍然适用。则 LED 在面 II 上的离轴照度分布可表示为

$$\begin{cases} E(x, y, z, \alpha) = \\ \frac{\left[ \frac{Z \cos(\alpha - \beta)}{\cos \beta} \right]^{m+1} I_0}{[(x - X)^2 + (y - Y)^2 + Z^2]^{(m+2)/2}} \quad (3) \\ \beta = \arctan \frac{x - X}{Z} \end{cases}$$

考虑到 LED 为非相关光源和光的叠加性原理,若空间上分布有  $n_1 \times n_2$  颗 LED,则 LED 在目标区域照度满足线性叠加,LED 阵列的离轴照度分布表达式为

$$\begin{cases} E(x, y, z) = \\ \sum_i^{n_1} \sum_j^{n_2} \frac{\left[ \frac{Z_{ij} \cos(\alpha_{ij} - \beta_{ij})}{\cos \beta_{ij}} \right]^{m+1} I_0}{[(x - X_{ij})^2 + (y - Y_{ij})^2 + Z_{ij}^2]^{(m+2)/2}}, \\ \beta_{ij} = \arctan \frac{x - X_{ij}}{Z_{ij}} \\ m = -\ln 2 / \ln(\cos \theta_{1/2}) \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $(X_{ij}, Y_{ij}, Z_{ij})$  为第  $ij$  个 LED 的三维坐标;  $\beta_{ij}$  为第  $ij$  个 LED 对应的图 1(b) 中的  $\beta$ 。(4) 式表明,每颗 LED 需要有 4 个参量来确定  $E$ , 整个阵列需要  $4n_1n_2$  个参量来确定,数量非常大。

为了使推导结果可以被加工制作成实物,令 LED 沿  $Y$  方向均匀分布,间距为  $d$ ,均相对于阵列中心轴对称分布,阵列中心点偏转角为  $\alpha_0$ ,其相邻的 LED<sub>1</sub> 的角度为  $\alpha_1$ ,如图 2 所示,则有

$$\begin{cases} X_1 = X_0 + \frac{d}{2} (\cos \alpha_0 + \cos \alpha_1) \\ Y_1 = Y_0 \\ Z_1 = Z_0 + \frac{d}{2} (\sin \alpha_0 + \sin \alpha_1) \end{cases} \quad (5)$$

以此类推,可表达出每颗 LED 的位置和角度

$$\begin{cases} X_i = X_{i-1} + \frac{d}{2} (\cos \alpha_{i-1} + \cos \alpha_i) \\ Y_j = Y_{j-1} \\ Z_i = Z_{i-1} + \frac{d}{2} (\sin \alpha_{i-1} + \sin \alpha_i) \end{cases}, \quad (6)$$

式中:  $i$  代表沿  $y$  轴方向第  $i$  颗 LED,  $j$  代表沿  $x$  轴方向第  $j$  颗 LED,  $i = 1, \dots, n_1, j = 1, \dots, n_2$ 。由(4)式和(6)式即可构建出整个 LED 阵列的分布,这时需要求解的参量已经减少到  $n_1 + n_2$  个,得到了很大简化。要实现均匀照明,需要运用合适的算法、优化目标函数和约束条件找到一组最优参量。

## 2.2 算法与优化目标函数

### 2.2.1 基于模拟退火的粒子群优化算法

(4) 式是一个局部与全局平衡优化问题,且存在

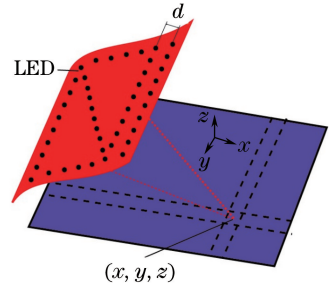


图 2 LED 曲面阵列分布及光照示意图

Fig. 2 Curved LED array distribution and lighting diagram  
局部多个极小点。粒子群算法(PSO)收敛速度快,调整参数少,易于工程实现,善于解决局部与全局平衡优化问题,但是缺乏动态调节,容易陷入局部最优。引入模拟退火机制,利用基于模拟退火的粒子群优化算法能够有效地调节全局搜索与局部搜索能力,不易陷入局部最优<sup>[18-20]</sup>。

### 2.2.2 优化目标函数

照度均匀度通常定义为

$$\mu = \frac{\bar{E}}{E_{\max}}, \quad (7)$$

式中:  $\bar{E}$  为目标面照度平均值;  $E_{\max}$  为目标面照度最大值。将  $\mu$  作为均匀度评价指标,以均匀度最大为优化目标,  $\mu$  最大为 1。运用 SimuAPSO 优化需要收敛的目标函数,即

$$F = 1 - \mu = 1 - \frac{\bar{E}}{E_{\max}}. \quad (8)$$

### 2.2.3 约束条件

考虑到 LED 曲面阵列应具有通用性和易安装性,所选光源为未加光学设计的 LED 芯片。令芯片的光轴与所在曲面法向重合,即用该点曲率控制  $a$ 。考虑到 LED 芯片有一定的大小,避免曲面阵列失控、曲率突变和不同 LED 之间发生重叠,设置优化约束条件,即

$$\begin{cases} Y_j \leq a \\ |Y_{j+1} - Y_j| \leq b, \\ |\alpha_i - \alpha_{i+1}| \leq \gamma \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $a$  为根据系统对照度的需求设定的值,以避免出现阵列的失控;  $b$  与 LED 芯片大小呈正相关关系;  $\gamma$  为避免 LED 阵列曲率突变设定的值。根据(4)、(6)、(8)式和(9)式进行编程优化,即可得到 LED 自由曲面阵列分布数值解。算法流程如图 3 所示。

## 3 验证与分析

### 3.1 理论模拟验证

目标面尺寸为  $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ ,光源为 5730

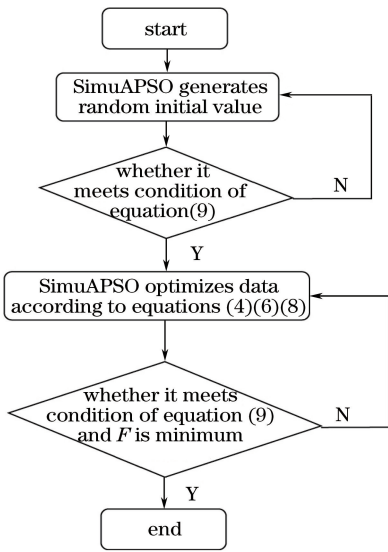


图3 LED阵列设计优化算法流程图

Fig. 3 Flow chart of LED array design optimization algorithm

SMD白光LED,  $\theta_{1/2} = 70^\circ$ , 额定电流为  $10 \mu\text{A}$ 。设

$Z_0 = 200 \text{ mm}$ ,  $\alpha_0 = 45^\circ$ ,  $a = 100 \text{ mm}$ , 取  $b = 5 \text{ mm}$ ,  $\beta = 30^\circ$ 。采用如图3所示的算法流程进行优化得到数值解, 可得到LED阵列大小为  $200 \text{ mm} \times 170 \text{ mm}$ , 其中长  $200 \text{ mm}$  与设定值  $a$  有关, 宽  $170 \text{ mm}$  是根据优化结果算得的。将数值解在TracePro中追光, 结果如图4所示。

很明显, LED的空间分布呈曲面结构, 图4(b)为其侧视图, 呈自由曲线分布。结果与设计初衷完全一致。对图4结果进行仿真追光, 得到照度分布如图5所示, 目标面面积与LED阵列面积比值为  $1 : 0.85$  时, 照度均匀度达到  $91.79\%$ 。通常机器视觉光源发光面积大于被测面, 以达到更高的照度、均匀性和混光性。如果选取目标面为  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ , 目标面面积与LED阵列面积比值为  $1 : 4$ , 所得到的LED阵列照度均匀度可达  $98.4\%$ 。可见, 设计方法合理有效, 用LED自由曲面阵列光源可实现离轴均匀照明, 如果检测目标面小于阵列的面积, 其照度均匀度会大大提高。

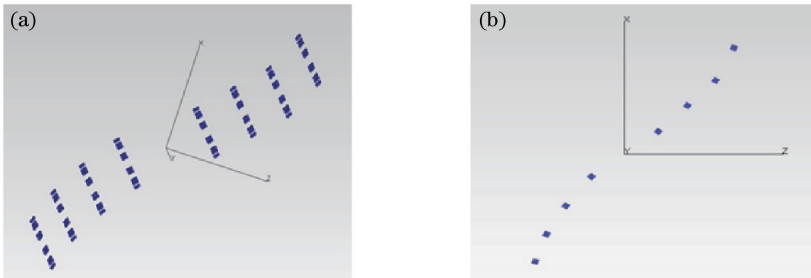


图4 LED自由曲面阵列模型。(a)阵列;(b)侧视图

Fig. 4 Free-form surface LED array model. (a) Arrays; (b) lateral view

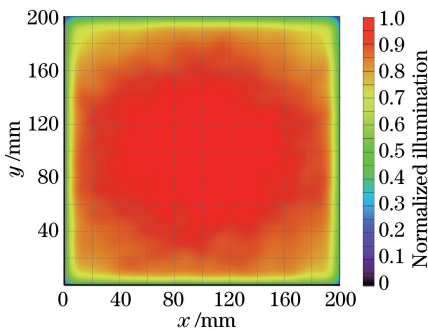


图5 目标照度分布

Fig. 5 Target illumination distribution

### 3.2 实验验证

根据图4结果制作出曲面阵列光源, 在二维电动平移台(GCD-302002M, 大恒光电, 北京)上进行照度多点测量。

考虑到LED需安装在铝基板上, 根据图4(b)设计一个曲面边框三维(3D)结构以固定铝基板并

控制LED角度, 如图6(a)所示。在边框上  $Y_j$  处预留  $10 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$  的嵌槽, 嵌槽底面与曲面相切, 铝基板嵌入槽内, 以准确控制LED的位置和角度。综合考虑LED发热及铝基板的质量, 选取抗拉伸强度高和耐热性好的尼龙材料, 通过3D打印得到曲型边框。

利用Altium Designer软件设计条形铝基板, 采用稳压电源(QJ3003H, 深圳博斯特电子仪器有限公司, 深圳)保持LED的电流不变, 采用照度计(SPIC-200, 远方光电, 杭州)进行照度测量。照度计固定在二维电动平移台上, 精度为  $0.05 \text{ mm}$ , 工作范围设为  $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ , 光源用  $45^\circ$  转接块和摆角器调节滑块固定在支杆上, 如图6(b)所示。实验在暗室中进行, 测量步距为  $4 \text{ mm}$ 。

图7为实测的照度分布, 照度均匀度达到  $91.86\%$ , 与理论结果完全吻合, 其照度值范围为

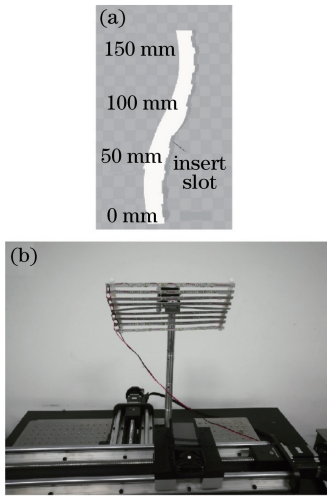


图 6 实验装置。(a)曲面边框 3D 结构;(b)照度测量平台  
Fig. 6 Experimental device. (a) 3D structure of curved border; (b) illuminance measuring platform

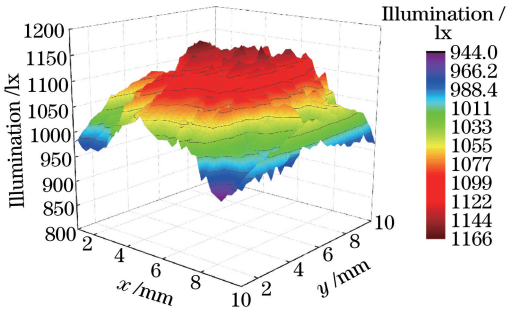


图 7 实际测量的照度分布

Fig. 7 Illumination distribution for actual measurement

841~1144 lx。根据工业检测中精细照明要求照度值大于 800 lx,所设计的光源完全满足照明要求。

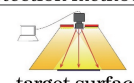


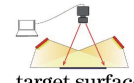


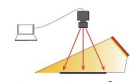


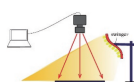


### 3.3 皮革缺陷检测

图像采集系统为电荷耦合器件 (CCD, 水星 MER-200, 大恒光电, 北京), 在 Halcon 平台上通过编程用 Laws 纹理滤波提取纹理特征, 利用高斯混合模型分类器进行缺陷检测。检测样品是由贝内克长顺公司 (常州) 提供的存在表面印染缺陷的单色纹理皮革。为了对比分析, 还选用了两条条形光源 (LTH-300, 东冠科技, 上海)。

采用 2 种光源 4 种照明方式分别进行检测, 见表 1。表 1(a)和(b)分别为直下式和双侧对称照明方式, 均无法识别出皮革表面的暗纹缺陷; 表 1(c) 双条形光源组成的平面光源单侧照射, 直观上可以看到表面的暗纹缺陷, 但是由于照度明显不均匀, 用软件识别缺陷时造成了误判; 表 1(d)为本文制作的曲面阵列光源, 目标面照度均匀, 直观和软件均能准确地识别出暗纹缺陷。

表 1 不同照明方式下的缺陷识别

Table 1 Defect recognition for each lighting mode

Light method	Lighting detection method	Captured image	Defect image processing
(a) Strip light source coaxial illumination	 target surface		
(b) Strip light source double off-axis illumination	 target surface		
(c) Double strip light source single side off-axis illumination	 target surface		
(d) Curved light source single-sided off-axis illumination	 target surface		

对于表 1(c) 出现误判的原因, 分析认为, 被测样品是单色皮革表面深浅不均的缺陷, 没有改变皮革表面本身的纹理结构, 只表现为图像灰度级的变化, 所以图像处理主要是通过对纹理进行滤波并用灰度级的筛选来完成。而光照不均匀同样会在图像上产生灰度级的变化, 从而影响判断。也有学者通过光强补偿方法使不均匀照明所获得的图像达到检测要求<sup>[21]</sup>, 但是这样不仅会增加运算时间, 而且稳定性较差。实际上, 皮革表面还会存在划痕、破损、污渍、压痕等缺陷, 检测时需根据实际情况选用不同的照明方式。

实验研究表明, 该 LED 自由曲面阵列安装误差的允许范围为: 照射角度偏差在  $\pm 3^\circ$ 、高度偏差在  $\pm 5$  mm 内时, 目标面照度变化均小于 0.6%。当照射角度、高度、目标面大小改变较大时, 本文设计方法仍然适用, 但需要通过调整 LED 阵列初始参数重新进行优化设计。

## 4 结 论

为解决机器视觉检测中用现有照明方式难以凸显的单色纹理皮革的印染缺陷问题, 设计并制作了 LED 自由曲面阵列, 实现了离轴均匀照明法检测印染缺陷。研究表明, 基于单颗 LED 的同轴照度分布式和光线传输特性, 可得 LED 的离轴照度分布式; 运用光线叠加原理, 可推导出 LED 自由曲面阵列的离轴照度解析式; 通过设置约束条件, 引入基于模拟退火的粒子群优化算法, 可求解出能实现离轴均匀照明的 LED 自由曲面阵列的数学模型; 运用 3D 软件设计出可精确控制曲面形状与 LED 的出光角度的嵌入式模型, 并可借助 3D 打印技术精确制作实物。理论模拟与实验结果精准吻合, 根据目标面大

小的不同,均匀度可达 92%~98%,照度达到机器视觉精密检测要求。对比实验表明,用本光源照明可以准确、快速地检测出其他照明方法难以检测的皮革印染缺陷,易于实现在线检测。本文的设计方法、制作方案和搭建可用于大面积的皮革缺陷检测照明系统设计,可根据实际需求自由调整 LED 阵列大小和 LED 数量,同时增加 LED 阵列与目标面面积比例可明显提高照度均匀度。

### 参 考 文 献

- [1] He F Q. Research and application of visual inspection technology for the large area of leather surface[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.  
贺福强. 大面积皮革表面的视觉检测技术与应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [2] Wang S G. Research and design of led light source for machine vision [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015.  
王帅贵. 面向机器视觉的 LED 光源研究与设计[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- [3] Vaideliene G, Valantinas J. The use of Haar wavelets in detecting and localizing texture defects[J]. *Image Analysis & Stereology*, 2016, 35(3): 195-201.
- [4] Li C R, Huang Y Y, Zhu L H. Color texture image retrieval based on Gaussian copula models of Gabor wavelets[J]. *Pattern Recognition*, 2017, 64: 118-129.
- [5] Wu R M. Research on the design method of free form illumination [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.  
吴仍茂. 自由曲面照明设计方法的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [6] Li X, Huang Y F, Tan Y Q, *et al.* Optimization method for compact lighting system based on SelPSO algorithm[J]. *Journal of Applied Optics*, 2016, 37(4): 595-601.  
李潇, 黄逸峰, 谭叶青, 等. 基于 SelPSO 算法的紧凑型照明器件优化方法[J]. *应用光学*, 2016, 37(4): 595-601.
- [7] Wang J W, Su Z P, Yuan Z J, *et al.* Study on uniformity of LED array illumination distribution on target plane [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(8): 0822004.  
王加文, 苏宙平, 袁志军, 等. LED 阵列模组化中的照度均匀性问题[J]. *光子学报*, 2014, 43(8): 0822004.
- [8] Tan Y Q, Li P, Li X, *et al.* Optimization of double freeform-surface lens with large view angle based on BreedPSO algorithm and overlapping method [J]. *Optical Technique*, 2018, 44(1): 123-128.  
谭叶青, 李萍, 李潇, 等. 基于 BreedPSO 算法及交叠法的紧凑型大角度双自由曲面透镜设计[J]. *光学技术*, 2018, 44(1): 123-128.
- [9] Tan Y Q, Li P, Li X, *et al.* Optimization of double freeform-surface lens with large view angle based on BreedPSO algorithm and overlapping method [J]. *Optical Technique*, 2018, 44(1): 123-128.  
谭叶青, 李萍, 李潇, 等. 基于 BreedPSO 算法及交叠法的紧凑型大角度双自由曲面透镜设计[J]. *光学技术*, 2018, 44(1): 123-128.
- [10] Zhu Z, Qu X H, Liang H Y, *et al.* Uniform illumination study by light-emitting diode ring array and diffuse reflection surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(1): 0115001.  
祝振敏, 曲兴华, 梁海昱, 等. 基于发光二极管环形阵列与漫反射表面的均匀照明光源研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(1): 0115001.
- [11] Dong J T. Optical design of color light-emitting diode ring light for machine vision inspection[J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(4): 043001.
- [12] Hao F, Shi J F, Zhu S Q, *et al.* Optimal positioning of forward installed square LED arrays for machine vision system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(12): 1215001.  
郝飞, 史金飞, 朱松青, 等. 机器视觉系统前置矩形 LED 阵列的优化布置[J]. *光学学报*, 2014, 34(12): 1215001.
- [13] Xu Y Y, Jing X L, Ding J G, *et al.* Reflector design for LED based on uniform illumination[J]. *Optical Technique*, 2012, 38(3): 345-349.  
许耀云, 井西利, 丁金刚, 等. 基于均匀照明的 LED 反射器的设计[J]. *光学技术*, 2012, 38(3): 345-349.
- [14] Wang X L. LED ring array light source design and uniform illumination properties analysis [J]. *Optik*, 2017, 140: 273-281.
- [15] Whang A J W, Chen Y Y, Teng Y T. Designing uniform illumination systems by surface-tailored lens and configurations of LED arrays [J]. *Journal of Display Technology*, 2009, 5(3): 94-103.
- [16] Su Z P, Xue D L, Ji Z C. Designing LED array for uniform illumination distribution by simulated annealing algorithm [J]. *Optics Express*, 2012, 20(S6): A843-A855.
- [17] Moreno I, Muñoz J, Ivanov R. Uniform illumination

- of distant targets using a spherical light-emitting diode array[J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(3): 033001.
- [18] Zheng Z R, Hao X, Liu X. Freeform surface lens for LED uniform illumination[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(35): 6627-6634.
- [19] Gao Y, Xie S L. Particle swarm optimization algorithms based on simulated annealing [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2004, 40(1): 47-50.  
高鹰, 谢胜利. 基于模拟退火的粒子群优化算法[J]. *计算机工程与应用*, 2004, 40(1): 47-50.
- [20] Ghoshal S P. Optimizations of PID gains by particle swarm optimizations in fuzzy based automatic generation control [J]. *Electric Power Systems Research*, 2004, 72(3): 203-212.
- [21] Chen G F. Research of function optimization of PSO based on simulated annealing[D]. Changsha: Central South University, 2013.  
陈国飞. 基于模拟退火的粒子群算法的函数优化研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- [22] Su G Y, Qu X H, Zhang F M. Experiments on metal surface characteristics' effect on differential visual measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1): 0115001.  
苏国营, 曲兴华, 张福民. 金属表面特性对差动式视觉测量的影响实验[J]. *光学学报*, 2013, 33(1): 0115001.