

机器视觉中均匀照明成像的 LED 环形阵列设计

史晨阳¹, 林燕丹^{1,2*}

¹复旦大学信息科学与工程学院电光源研究所, 上海 200433;

²复旦大学工程与应用技术研究院, 上海 200433

摘要 提出一种用于机器视觉的能获得高质量图像的发光二极管(LED)环形阵列结构的优化照明设计方法。所提方法由成像理论和 Taguchi 方法组成, 以获得均匀的照明分布。根据成像理论, 推导出图像对比度与照度均匀度之间的关系。在此基础上, 获得了影响照度分布的主要参数, 并在直交表中设计模拟实验的参数组合, 利用 TracePro 软件进行仿真模拟。然后, 得到各参数对均匀性的最佳参数组合和影响程度, 在模拟实验中优化后的参数组合的照度均匀度达 89.31%。最后, 设计了一种性能良好的机器视觉光源, 相关实验证明, 该灯具可以满足机器视觉的光照需求, 均匀度可达 80.35%。所提方法可有效解决关于机器视觉的光学设计问题。

关键词 成像系统; 照度设计; LED 环形阵列; 光学设计方法; 机器视觉

中图分类号 TB858.1; TN312.8

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.2011003

LED Ring Array Design for Uniform Illumination Imaging in Machine Vision

Shi Chenyang¹, Lin Yandan^{1,2*}

¹*Institute for Electric Light Sources, School of Information Science and Technology, Fudan University, Shanghai 200433, China;*

²*Academy for Engineering & Technology, Fudan University, Shanghai 200433, China*

Abstract This paper proposes an optimized lighting design method of light-emitting diode (LED) ring array structure for machine vision, which can obtain high-quality images. The proposed method consists of imaging theory and Taguchi method to obtain uniform illumination distribution. The relationship between image contrast and illumination uniformity is derived based on the imaging theory. Furthermore, the main parameters of illumination distribution are acquired, and simulation experiments are designed in a direct intersection table and simulated using TracePro software. Then, the best parameter combination and influence degree of each parameter on uniformity are obtained; the illumination uniformity of the optimized parameter combination is up to 89.31% in the simulation experiments. Finally, a kind of machine vision light source with excellent performance is designed. Relevant experiments show that the lamp can meet the lighting requirements of machine vision (uniformity is 80.35%). The proposed method is an effective strategy to deal with optical design for machine vision.

Key words imaging systems; illumination design; LED ring array; light design method; machine vision

OCIS codes 110.2945; 150.2945; 150.0155

1 引 言

随着图像处理、工业自动化、机器学习等技术的迅速发展^[1], 机器视觉^[2]在这些领域中发挥了重要作用。获取高质量的图像是机器视觉系统的基本目标, 因为图像质量将影响系统的准确性和可靠性^[3]。Tarabanis 等^[4]对计算机视觉中用于识别目标特征

的传感器系统进行了具体的研究, 认为成像的关键部分可以概括为环境信息(如对象、传感器、照明)及视觉系统的任务信息(如对象特征检测、基于模型的对象识别、场景重建)。

光源对机器视觉检测系统的性能起着重要作用^[5], 精确的光学结构设计可以提高捕获图像的质量, 准确地分离目标和背景信息^[6-7], 不充足的光线

收稿日期: 2020-06-02; 修回日期: 2020-07-02; 录用日期: 2020-07-10

基金项目: 宁波市科技创新 2025 重大专项(2019B10121)

* E-mail: ydlin@fudan.edu.cn

会使捕捉到的图像无法满足需求。在当下应用于机器视觉的光源中,发光二极管(LED)具有成本低和功率消耗小的优势,同时在光输出和使用寿命方面领先其他光源^[8]。尽管LED相比其他光源有更多的优点,但是单个LED的发光度较低,而且光斑呈圆形的斑点状,很难满足机器视觉的检测要求^[9]。因此,LED阵列设计应运而生,可针对不同的检测对象,把其设计成不同的形状。在机器视觉应用中,最常用的LED光源是环形阵列结构^[10]。

近年来,关于LED光学设计性能方面的研究有很多报道。Zhu等^[11]利用数学模拟算法在三环LED阵列上设计了一个球体的内表面,实现了均匀照明,此外,还提出一种能量守恒的反射自由曲面。Marchand^[12]提出了一种通过控制摄像机和光源的位置来改进机器视觉任务的方法。Li等^[13]利用一种基于反馈方法的自由曲面光学系统实现了均匀照度和高出光率。这些研究结果表明,不均匀光照会使图像失真,在特定对象的特征识别、机器人的路径检测、对象分析等应用中会出现误差。结合机器视觉成像质量的影响因子,可知,照度均匀性是机器视觉需要解决的问题,而LED环形阵列灯具的优化设计是解决该问题的重要步骤。

本文在分析三维空间成像过程和Taguchi实验设计方法^[14-16]的基础上,提出了一种LED环阵列设计方法,其中Taguchi方法是一种在不同领域解决复杂优化问题的实验设计方法。所提方法的目的是通过优化光源相关参数设置来提高机器视觉照明系统的一致性。通过一系列光线跟踪仿真和实验,验证了所提方法在机器视觉光学优化设计方面的有效性和优越性。

2 成像理论推导

在设计实验之前,需要定义用于机器视觉系统的LED环形阵列的光学性能指标和测量规则。

2.1 成像中的反射模型

彩色相机电子成像具有线性关系,三色通道($k=1,2,3$)相机传感器在像素处的响应可以表示为

$$v_k = \int_{\lambda_L}^{\lambda_H} f_k(\lambda) d(\lambda) R(\lambda) l_s(\lambda) d\lambda + n_k, \quad (1)$$

式中: $f_k(\lambda)$ 是第 k 个通道的颜色过滤器的光谱透射率; $d(\lambda)$ 是探测器的光谱灵敏度; $R(\lambda)$ 是拍摄对象的光谱反射率; $l_s(\lambda)$ 是成像光源的光谱辐射; n_k

是反应常数^[17]; λ_H 和 λ_L 分别是高和低的极限波长。对于普通相机,滤光片的透光率、传感器的灵敏度及光源的亮度是未知的。因此,(1)式可以简化为

$$v_k = \int_{\lambda_L}^{\lambda_H} m_k(\lambda) R(\lambda) d\lambda + n_k, \quad (2)$$

式中:参数 $m_k(\lambda) = f_k(\lambda) d(\lambda) l_s(\lambda)$ 。

对于光谱反射率,研究人员提出了一些基于物理光学的反射模型,本文选择Cook等提出的反射模型^[18]。在这个模型中,任意方向的反射强度依赖于入射能量,而不仅仅依赖于入射强度。双极性反射率 R 的定义是反射光强度(L_r)与给定方向(在一个小立体角 $d\omega_i$)的入射能量(E_i)的比值。反射光线可以分为两部分,即镜面反射 R_s 和漫反射 R_d 。表面反射的几何构型如图1所示。 R 的表达式为

$$R = \frac{L_r}{E_i} = \frac{L_r}{L_i \cos(\gamma - \delta) d\omega_i} = sR_s + dR_d, \quad (3)$$

式中: s ($s > 0$)和 d ($d > 0$)均是反射的两个分量的权值, $s + d = 1$; 2δ 是光和视觉方向的夹角; γ 是入射光和视觉方向的夹角的平分线与曲面法线之间的夹角; L_i 是入射光强度。

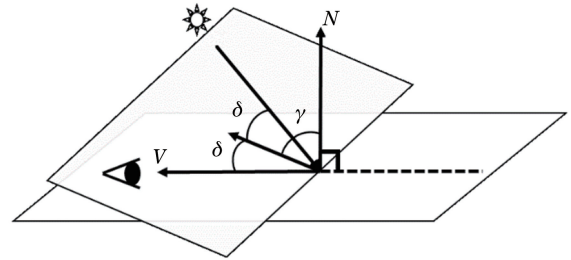


图1 表面反射的几何形状

Fig. 1 Geometry of surface reflection

基于能量和强度之间的关系,即 $E_i = L_i \cos \sigma d\omega_i$, σ 是光传播方向和表面法向之间的角度, η 个光源观察方向的反射光强度和反射能量可以分别被描述为

$$L_r = L_{ia} R_a + \sum_{i=1}^{\eta} L_{ii} \cos(\gamma - \delta) d\omega_{ii} (sR_s + dR_d) = \frac{E_r}{\cos(\gamma + \delta) d\omega_{ii}}, \quad (4)$$

$$E_r = E_{ia} R_a + \sum_{i=1}^{\eta} E_{ii} (sR_s + dR_d) = E_{ia} R_a + \sum_{i=1}^{\eta} E_{ii} R_s. \quad (5)$$

除了外设光源的照明外,环境光也会照亮物体。对于一个特定的观测方向,环境光的反射量非常小,环境反射率(R_a)与观测方向无关,在均匀漫反射的

条件下, $R_d = R_s$ [19]。

根据 Cook 公式 [18], R_s 的表达式 [19] 为

$$R_s = \frac{F(\delta, n)}{\pi} \times \frac{D(m, \gamma) \times G(\delta, \gamma)}{\cos^2 \delta} = R_s(\delta, \gamma, n, m), \quad (6)$$

式中: $F(\delta, n)$ 、 $D(m, \gamma)$ 、 $G(\delta, \gamma)$ 分别是菲涅耳反射系数、微面分布函数、几何衰减系数; n 是物体的折射率, m 是微面的方均根斜率, 该二参数均取决于物体表面的特性。

2.2 成像灰度等级

相机成像后, 传感器在像素处的响应用灰度级表示。对于彩色图像, 有 3×256 个不同的灰度级。但在单色图像中, 灰度级仅有 256 个。

在正常曝光条件下, 图像灰度 (G_{gray}) 与曝光量 (H) 之间存在关系 [20], 表达式为

$$G_{\text{gray}} = v \lg H + b = v \lg(I \cdot T) + b, \quad (7)$$

式中: v 和 b 都依赖于成像条件, 并且可以通过提取两个测试点来进行确定; 曝光量取决于传感器上的照度 (I) 和曝光时间 (T)。

$$H = I \times T = \frac{E}{S} \times \frac{\pi}{4} \times \tau \times \frac{1}{P^2} \times T = k \cdot \frac{E}{S}. \quad (8)$$

将(8)式代入(7)式, 得

$$G_{\text{gray}} = v \lg E_r - v \lg S + b' = v \lg E_r + b'', \quad (9)$$

式中: E 是拍摄对象反射回的能量 E_r ; S 是物体表面的区域, 对于确定对象, 可认为是一个常数; τ 是光学镜头的透光率; P 是相机的光圈; b' 和 b'' 在化简过程中都是常数。然后将(5)式代入(9)式中, 由于环境光在各个方向上是均匀的, 它不依赖于成像位置, 从而得到图像灰度级的影响因子, 表达式为

$$G_{\text{gray}} = v \lg(E_i R_s + K) + b'' = v \lg(I_i R_s S + K) + b'' = G_{\text{gray}}(I_i, \delta, \gamma, n, m), \quad (10)$$

式中: K 是环境光反射能量。

基于(10)式, 不同目标表面单元的灰度差可以表示为

$$\Delta G_{\text{gray}} = G_{\text{gray1}}(I_{i1}, \delta, \gamma, n_1, m_1) - G_{\text{gray2}}(I_{i2}, \delta, \gamma, n_2, m_2) = G_{\text{gray1}}(I_{i1}, R_{s1}) - G_{\text{gray2}}(I_{i2}, R_{s2}). \quad (11)$$

表面单元的最佳对比度 C_{max} 可以表示为

$$C_{\text{max}} = \max(\Delta G_{\text{gray}}/G_{\text{gray1}}, \Delta G_{\text{gray}}/G_{\text{gray2}}). \quad (12)$$

由(11)、(12)式可知, 在非过曝光照条件下, I_{i1} 与 I_{i2} 的差异较小(照度均匀度越高), 对于一个确定的物体, 灰度差可以较好地反映单元表面特性参数的不同, 即图像获得较高的对比度。具有较理想对比度的光环境可以使机器视觉的精度保持在较高的水平。若拍摄对象的反射率相同 ($R_{s1} = R_{s2}$), 即只设置单一背景, 无拍摄对象, 投射在背景面上的均匀度可以用成像灰度均匀度表示。

2.3 照度分布推导

为了避免检测对象(如不规则圆形目标、小尺寸目标)上的阴影, 光源对提高视觉检测性能具有重要意义 [21]。假设一个 LED 光源是一个朗伯体发射, 其照度分布是观察角度的余弦函数。照度分布 $I(\theta)$ 可表示为

$$I(\theta) = I_0 \cos^{\psi}(\theta), \quad (13)$$

式中: I_0 是入射角 $\theta = 0$ 时的照度; ψ 值取决于 LED 发射区与球形封装曲面的相对位置 [22]。通常情况下, ψ 值大于 30, 观测角度对于强度的影响较为明显 [23]。 ψ 值可以通过角度 $\theta_{1/2}$ ($\theta_{1/2}$ 定义为入视角为 0° 时的一半照度值对应的视角) 获得:

$$\psi = -\ln 2 / \ln(\cos \theta_{1/2}). \quad (14)$$

LED 的中心位置 ($x_0 = r \sin \theta \cos \varphi$, $y_0 = r \sin \theta \sin \varphi$, $z_0 = r \cos \theta$), 距平面屏幕的距离是 h 。每一个点 (x, y, z) 对应的照度 [24] 表示为

$$I(x, y, z; r, \theta, \varphi) = L_0 \frac{[(x - r \sin \theta \cos \varphi) \sin \theta \cos \varphi + (y - r \sin \theta \sin \varphi) \sin \theta \sin \varphi + (z - r \cos \theta) \cos \theta]^{\psi+1}}{[(x - r \sin \theta \cos \varphi)^2 + (y - r \sin \theta \sin \varphi)^2 + (z - r \cos \theta)^2]^{(\psi+3)/2}}, \quad (15)$$

式中: L_0 是 LED 的发光强度; φ 为 LED 位置的方位角; r 为环的半径。LED 环形阵列照明如图 2 所示, 其中, ρ 为 LED 法线方向的辐射角, r' 为相邻环之间的距离。光源投射于屏幕, 形成的一个点 (x, y, z) 的总照度可以表示为

$$I(x, y, z) = (I_{11} + I_{12} + \dots + I_{1\beta}) + (I_{21} + I_{22} + \dots + I_{2\beta}) + \dots +$$

$$(I_{\alpha 1} + I_{\alpha 2} + \dots + I_{\alpha \beta}) = \sum_{i=1}^{\alpha} \sum_{j=1}^{\beta} I_{ij}, \quad (16)$$

式中: α 为环的数量; β 为一个环的 LED 数量。

在成像过程中, 根据(15)、(16)式, 在均匀光照条件下, 得到不失真的清晰图像。LED 单元应安装在光基片上, 方便照明均匀性设计。在充分理解成像原理后, 根据(10)~(12)式、(15)式和(16)式, 需

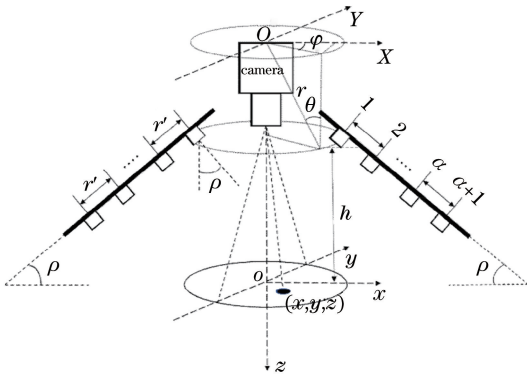


图 2 LED 环形阵列照明模型示意图

Fig. 2 Schematic of LED ring array illumination model

要结合成像系统的参数对 LED 环形阵列结构照明状况进行分析和研究,以获得更高的对比度。对于特定的拍摄对象,其表面参数(n 和 m)是确定的,所以其他参数是后续实验重点优化的对象。为了获得良好的相机视觉性能,LED 环形阵列的参数优化是成像系统光学设计的核心。

3 获得高质量图像的光环境设计方法

为了获得清晰的物体特征,机器视觉的输出光需要从不同的方向发出,以均匀照射光斑。从图 2 可以看出,在这个简单的模型中,影响光照分布的因子具有一定数量,且取值范围不同。显然,利用试错法来解决这类多参数优化问题在时间和费用上都是不切实际的。最近,Taguchi 实验设计方法^[14]被用于解决多参数优化问题,已在不同的领域得到了应用。

3.1 设计方法介绍

Taguchi 方法是一种有效的实验设计工具^[25]。该方法可以解决产品性能弱、质量低及成本高的工程问题。在此基础上,提出了一种 LED 环形阵列均匀照明的灯光设计方法,如图 3 所示。在设计过程中,该方法以正交设计的方式选取对目标效果影响程度较大的参数并将其用于实验中。在直交表中,利用 S/N(signal-to-noise)值计算每次得到的设计程序的质量。在本研究中,优化的对象是 LED 环形阵列结构,感兴趣的特性是测试样品上的照度均匀性。在进行基于正交设计的所有实验后,利用变异数分析(ANOVA)统计方法确定对设计结果有明显影响的参数。照度均匀性的计算公式为

$$I_{\text{uni}} = \frac{I_{\text{ave}}}{I_{\text{max}}}, \quad (17)$$

式中: I_{ave} 和 I_{max} 分别是测试平面上的平均照度和最大照度。对于均匀照明,平均照度与最大照度匹配,理想的均匀度比为 1。根据相关的组合结果,可以设计出一个 LED 照明灯具,同时,可以建立一个实验装置用来比较不同光照条件下的机器视觉成像结果。

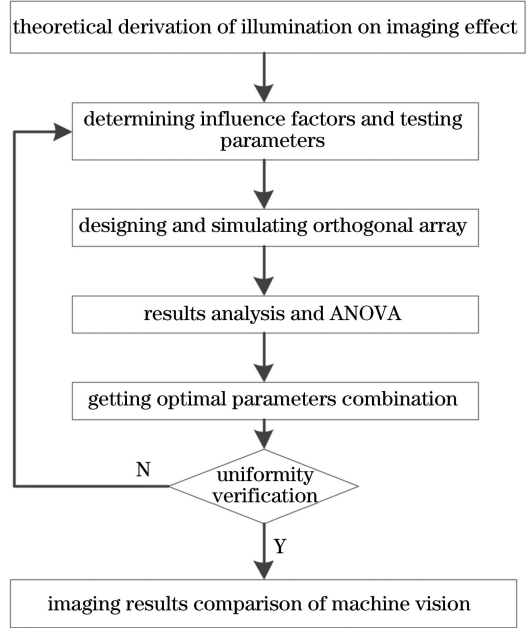


图 3 LED 环形阵列照明设计流程图

Fig. 3 Flow chart of LED ring array illumination design

3.2 影响因子选择

根据成像理论部分的公式推导,影响成像过程的参数有很多。为了简化设计,一些参数应设为常数值。按照成像模型的规律, δ 、 γ 、 r' 、 θ 、 φ 、 α 、 β 、 r 及 ρ 是所有与光源位置有关的参数,因此,主要优化参数应该从这些参数中选择。

通过 TracePro 软件进行一些仿真实验,初步探究参数对照度均匀度的影响。LED 的尺寸设置为 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$,LED 平面上设置每个单元的光线数量为 50000,平面屏幕的大小设置为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$,屏幕和环形阵列的距离是 200 mm。通过控制变量法测试相关参数与照度均匀度的关系,测试中设置仿真的恒定参数是 δ 、 γ 、 r' 、 θ 、 φ 、 α 和 ρ 。表 1 为当 $\rho = 0^\circ$ 时,LED 环形阵列照度均匀度分布。如表 1 所示, β 值越大,LED 阵列可以发出越多的光,且均匀性越好,与之相反, r 值的增大会使均匀度减小。如图 4 所示,设置恒定参数是 δ 、 γ 、 r' 、 θ 、 φ 、 α 和 ρ ,可以发现,环的半径 r 越大,单一环阵列模型的发射光到接收屏幕越少。少量参数变化可通过上述方法发现规律,但是如果该

模型的多个变量同时发生变化,则参数对应均匀度的影响程度将很难获得,而 Taguchi 方法是解决这类多参数优化问题的有效方法。

表 1 $\rho=0^\circ$ 时,LED 环形阵列照度均匀度分布

Table 1 Illumination uniformity distribution of LED ring array at $\rho=0^\circ$

β	$r=30\text{ mm}$	$r=70\text{ mm}$	$r=110\text{ mm}$
8	63.57%	63.07%	57.65%
16	71.58%	69.30%	66.71%

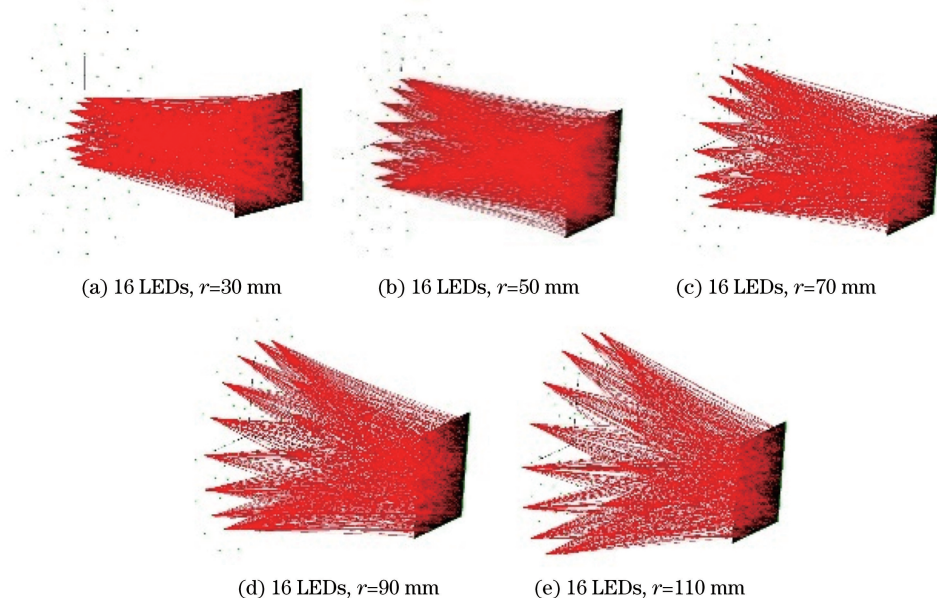


图 4 $\rho=0^\circ$ 时单环不同半径的照度分布。(a)~(e)照度均匀度分别是 23.85%, 22.50%, 20.35%, 17.79%, 15.51%

Fig. 4 Illumination distribution of different radius with $\rho=0^\circ$ in single ring. (a)~(e) Illumination uniformity is 23.85%, 22.50%, 20.35%, 17.79%, and 15.51%, respectively

(A)可设置为 8、12、16,相邻环之间的距离(B)分别设置为 20 mm、30 mm、40 mm,环数(C)可定义为 3、4、5,对于照射角度(D),其数值可以定义为 15° 、 30° 、 45° ^[21]。在规定了控制因子和水准值后,可以进行相关实验,以研究各控制因子和水准值对 LED 环形阵列的相对影响。LED 环形阵列在机器视觉中的均匀性由 4 个控制因子控制,每个控制因子有 3 个水准值,在后续模拟实验中,总光通量设为 3000 lm,每个 LED 的光线数设为 100000^[26]。

表 2 机器视觉光环境影响因子及其水准设置

Table 2 Influence factors and level setting for machine vision light environment

Symbol	Parameter	Number of levels	Level 1	Level 2	Level 3
A	β	3	8	12	16
B	r'/mm	3	20	30	40
C	α	3	3	4	5
D	$\rho/(^\circ)$	3	15	30	45

根据之前的分析,可以发现以下结果。当 α 、 β 、 r' 及 ρ 确定时,其他参数是可以通过计算得出的,所以,可以选择单一环的 LED 数量 β 、相邻环之间的距离 r' 、环数 α 、辐射角 ρ 作为 LED 环形阵列照明设计的主要参数。将各参数的水准值定在一个合适的范围内,如表 2 所示,其中 A、B、C、D 表示需要优化的参数,方便后续结果分析。在 Taguchi 实验设计中,参数相当于影响最终结果的控制因子,参数对应的取值是控制因子的不同水准值。单环 LED 数

4 实验结果和分析

4.1 模拟分析

选取控制因子和水准设置后,在直交表中设计组合仿真实验,如表 3 所示。直交表配置为 $L_9(3^4)$ 形状(9 次实验代替 81 次试错实验)。通过仿真模拟,用于量化质量特征的照明均匀度和 S/N 值也包含在表 3 中。照明均匀性的理想期望是越大越好。因此,均匀性的 S/N 值的表达式为

$$\epsilon = -10 \log \frac{\sum_{i'=1}^{s'} (1/y_{i'}^2)}{s'} \quad (18)$$

式中: $y_{i'}$ 是与第 i' 次实验对应的照度均匀度; s' 是实验总次数。

一个特定的参数对照明均匀性的影响可以通过计算该特定参数的三个水准相应的 S/N 值的平均值来评估。不同层次的 S/N 值如表 4 所示,其中每

表 3 仿真模拟直交表

Table 3 Simulation of direct intersection table

s'	A	B	C	D	Illumination uniformity /%	ϵ
1	1	1	1	1	80.76	38.14
2	1	2	2	2	79.62	38.02
3	1	3	3	3	77.91	37.83
4	2	1	2	3	80.82	38.15
5	2	2	3	1	81.40	38.21
6	2	3	1	2	81.17	38.19
7	3	1	3	2	80.84	38.15
8	3	2	1	3	80.82	38.15
9	3	3	2	1	82.29	38.31

个控制因子最大 S/N 值对应的水准值被认为是最

佳参数值,所以最优参数组合是 A3-B1-C1-D1。从表 4 中可以很直观地得到如下结果:因子 A 越大,光照分布越均匀;因子 B 对均匀性的影响与前文所示的结果相同;相反,随着环数的增加,因子 C 对均匀性的影响也不同;对于因子 D,照射角越小,均匀性越好。A3-B1-C1-D1 的仿真结果如图 5 所示,利用(17)式计算得到该组合的均匀度为 88.67%,为仿真实验中的最高值。

表 4 不同水准值对应的 S/N 值

Table 4 Corresponding S/N value of different level values

Control level	A	B	C	D
1	37.9987	38.1489	38.1607	38.2211
2	38.1836	38.1278	38.1593	38.1203
3	38.2033	38.1089	38.0656	38.0442

Normalized illumination

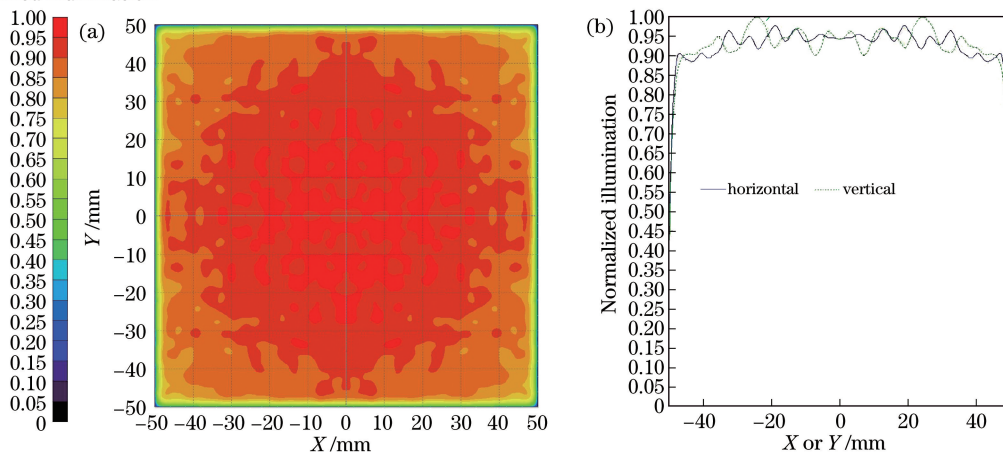


图 5 组合 A3-B1-C1-D1 对应的归一化后的照度分布和中间线的照度分布。(a)照度分布;(b)中间线的照度分布

Fig. 5 Normalized illumination distribution and illumination distribution of central line corresponding to the combination of

A3-B1-C1-D1. (a) Illumination distribution; (b) illumination distribution of central line

进一步,为了估量各参数对照度均匀性影响的贡献度,采用 ANOVA 方法进行分析。ANOVA 方法的主要目的是评估实验误差并以百分比的方式进行表征。在 Taguchi 方法中,一般将交互作用视为误差的一部分,当参数效应相比实验误差足够大时,才认定该参数效应为“有意义的”或是“重要的”。有了实验误差后,可以评估每一个参数效应相对于实验误差的“重要性”。只有“重要性”达到某一程度的参数效应,才会被用在预测的公式中;其他“重要性”没达到该程度的参数效应则视为可能只是实验误差造成的,不进行进一步讨论。“重要性”的强弱通过参数 ρ' 表示:

$$\rho' = \frac{S_d}{S_t}, \tag{19}$$

$$S_t = S_d + S_e, \tag{20}$$

式中: S_d 是方差和; S_e 是错误的方差和。在本次分析中, S_e 接近 0,这是因为实验运算的错误率极低,具有可重复性。方差 S_t 由 S/N 值的方差和计算得到:

$$S_t = S_d = \sum_{j'=1}^{q_j} (\epsilon_{j'} - \epsilon_q)^2, \tag{21}$$

式中: q 是单一水准的实验数; $\epsilon_{j'}$ 是每个因子第 j' 次实验的 S/N 值; ϵ_q 是 S/N 值的平均值。

采用 ANOVA 方法来估计设计参数与评价目标之间的因果关系,较高水平的显著性说明计算的

因子对评价目标有重要影响,参考(19)~(21)式。表5总结了照度均匀性的 ANOVA 结果。结果表明:单环 LED 数(因子 A, 53.10%)对均匀性影响最大,其次为照射角度(因子 D, 32.85%)和环数(因子 C, 12.38%);相邻环之间的距离对均匀性影响不大,这意味着相邻环之间的距离可以通过环形阵列光源的尺寸来调整。

表5 均匀性的 ANOVA 结果

Table 5 ANOVA results of uniformity

Parameter	A	B	C	D
S_d	0.0255	0.0008	0.0059	0.0158
Contribution /%	53.10	1.67	12.38	32.85

均匀性主要由单环 LED 数和照射角度决定。增加单环的 LED 数量可以改善均匀性,然而,这对应着散热器需要更大的尺寸,灯具的成本也会增加。此外,灯具的尺寸会限制 LED 的总数。由于 LED 数量的限制,辐照角度是唯一可以修改以达到高均匀性的参数。图6为均匀度与照射角度的关系,可

以看出,均匀性随辐照角的增大而变化。利用 MATLAB 软件进行平滑样条拟合,得到变化趋势($R^2=0.9477$)。当辐照角小于 25° 时,均匀度均大于 88%。为了获得最佳的均匀度,定义照射角为 20° 。另外,三种照射角度对应的光强如图 7 所示,最大的光强也在照射角度为 20° 时。最优化的 LED 环阵列性能如图 8 所示,单环 LED 数为 16,相邻环之间的距离为 20 mm,环数为 3,照射角度为 20° 。在所有实验中,通过优化设计出的参数组合对应的均匀度最好,达 89.31%。

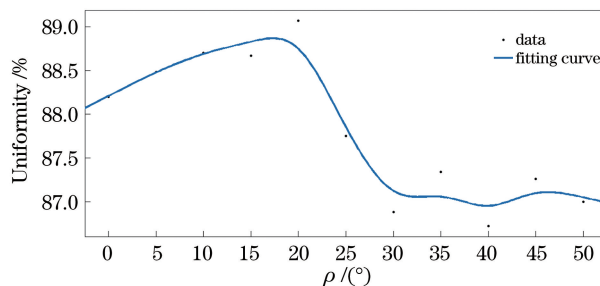


图6 均匀度与照射角度的关系

Fig. 6 Relation between uniformity and irradiating angle

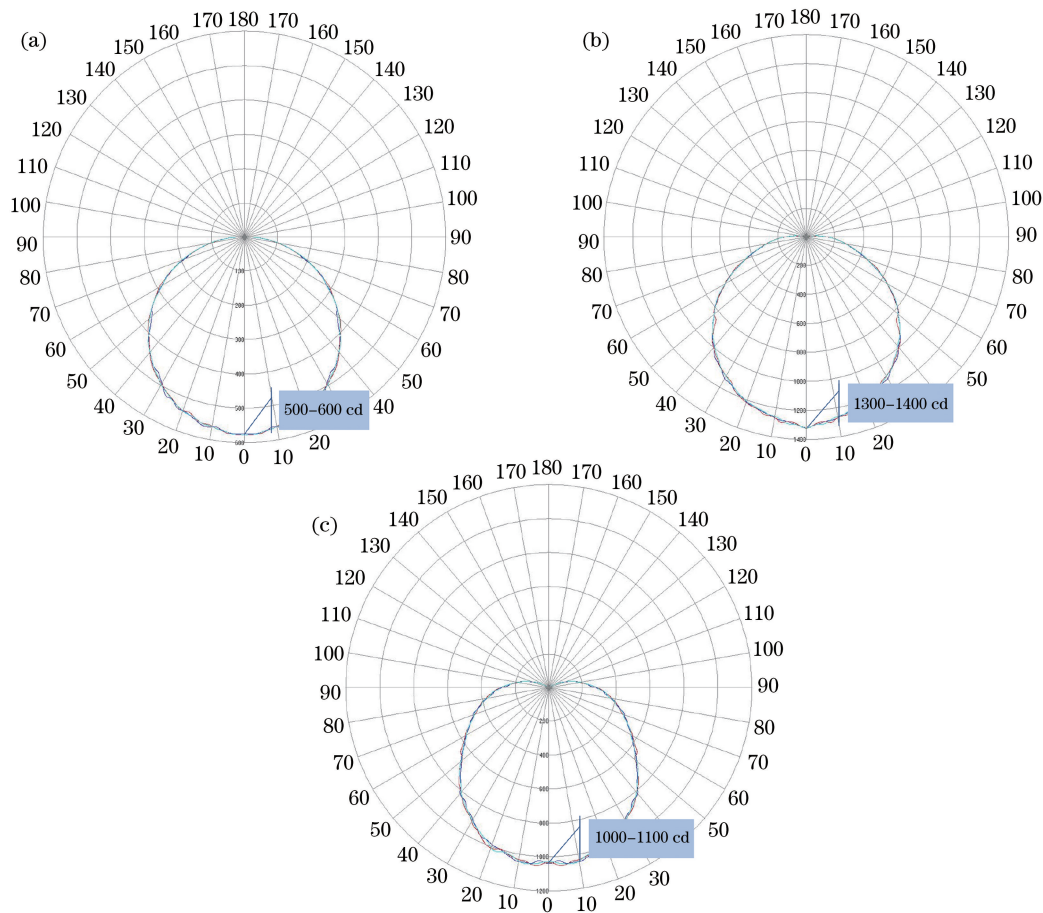


图7 不同照射角度下的光强值。(a) $\rho=0^\circ$; (b) $\rho=20^\circ$; (c) $\rho=40^\circ$

Fig. 7 Light intensity at different irradiating angles. (a) $\rho=0^\circ$; (b) $\rho=20^\circ$; (c) $\rho=40^\circ$

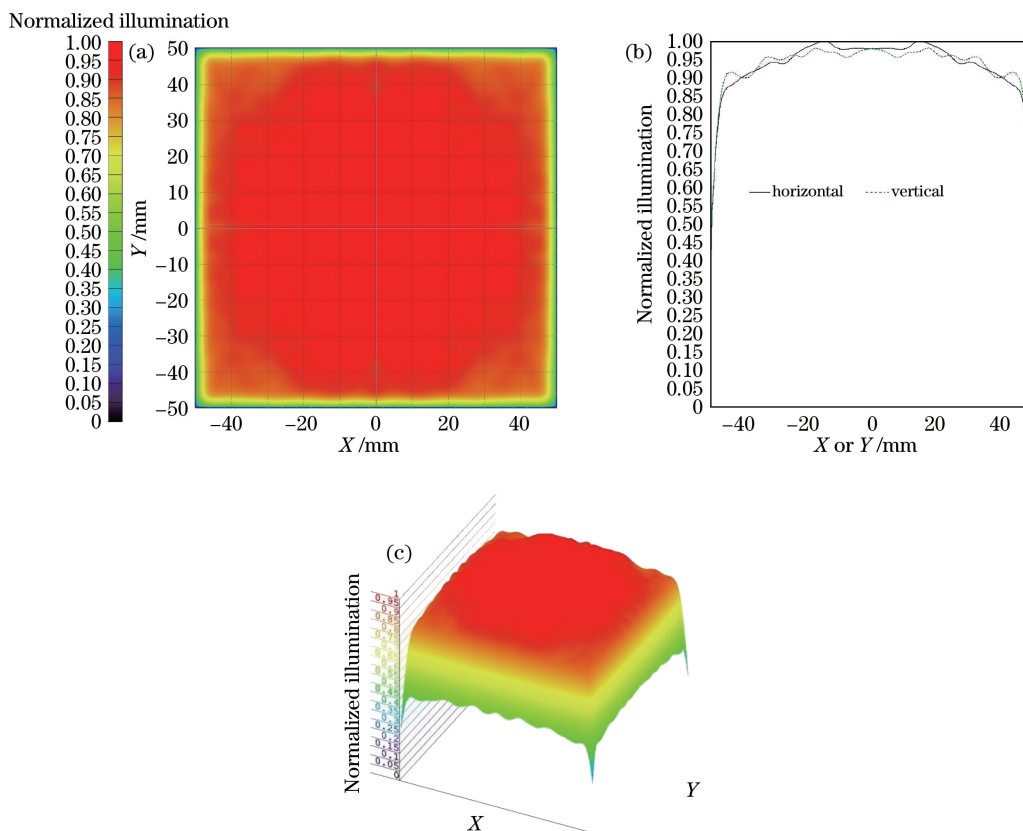


图 8 20°照射角下对应的归一化照度。(a) 2D 照度分布图;(b)中间线照度分布图;(c) 3D 照度分布图

Fig. 8 Normalized illumination corresponding to irradiating angle of 20°. (a) 2D map of illumination distribution; (b) illumination distribution map of central line; (c) 3D map of illumination distribution

4.2 实验验证与对比

为了验证所提方法的有效性,制作了一个如图 9(a)所示的测试样品,其包含一个具有细节纹理的 3D 黑色塑料测试样品。使用 CMOS Genie Nano M2420 Mono 摄像头检测样品,LED 环形阵列的参数设置如表 6 所示。为了满足实际机器视觉系统的要求,光源的排布应紧凑,因此,根据之前的分析结果,减少相邻环之间的距离。此外,灯具中 LED 的总数量为一较高的数值,为了避免热量和成本问题,灯具中的每个 LED 单元都为低功率光源 (0.04 W)。同时,采用其他类型的 LED 光源排布方式作为对比,如环形光源、点光源、远心光源等,通过点亮样品获取如图 10 所示的图像进行对比。可以看出:样品的详细信息不易被察觉,在某些情况下,样品周围有明显的多重阴影;而采用所设计的 LED 灯照射样品时,所拍摄到的图像与其他光源所拍摄到的有很大不同,样品的所有细节都可以识别,没有阴影,如图 10(b)所示。

为了说明在优化光照条件下捕获图像的对比度,利用 MATLAB 软件将捕获的三维样本图像转换为灰度图,如图 11 所示,两个图都放大了样本的

部分信息。可以看出,在优化后的光照条件下,没有过度曝光,可以清晰地计算出表面的细节信息,此外,样品边缘位置的对比度也很明显。

表 6 测试灯具参数

Table 6 Parameters of test luminaire

Parameter	Value
Total number of LEDs	96
α	3
$\rho / (^{\circ})$	20
Radius of inner ring / mm	35
Radius of outer ring / mm	50

为了测试灯具的照度均匀性,根据(11)式进行分析,采用设计的灯具对纯黑色不透明布(反射率为 0.03)进行照明。在相同条件下由 Genie Nano M2420 单镜头相机拍摄亮度图像,结果如图 12 所示,其像素分辨率为 2464×2056 ,视觉面积为 $100 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ 。根据(11)、(17)式,得到

$$U = \frac{\sum_{i_v}^V \sum_{j_w}^W G_{\text{gray}}(i_v, j_w)}{V \times W \times \max[G_{\text{gray}}(i_v, j_w)]}, \quad (22)$$

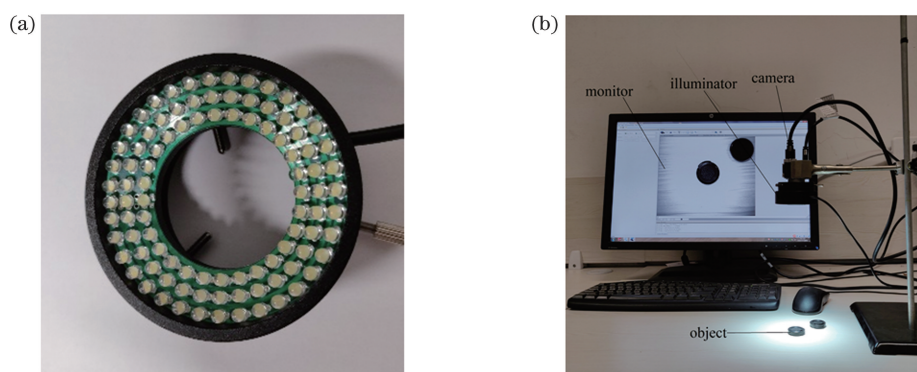


图 9 实验系统示意图。(a)设计的 LED 环形阵列;(b)实验装置

Fig. 9 Schematic of experimental system. (a) Designed LED ring array; (b) experimental setup

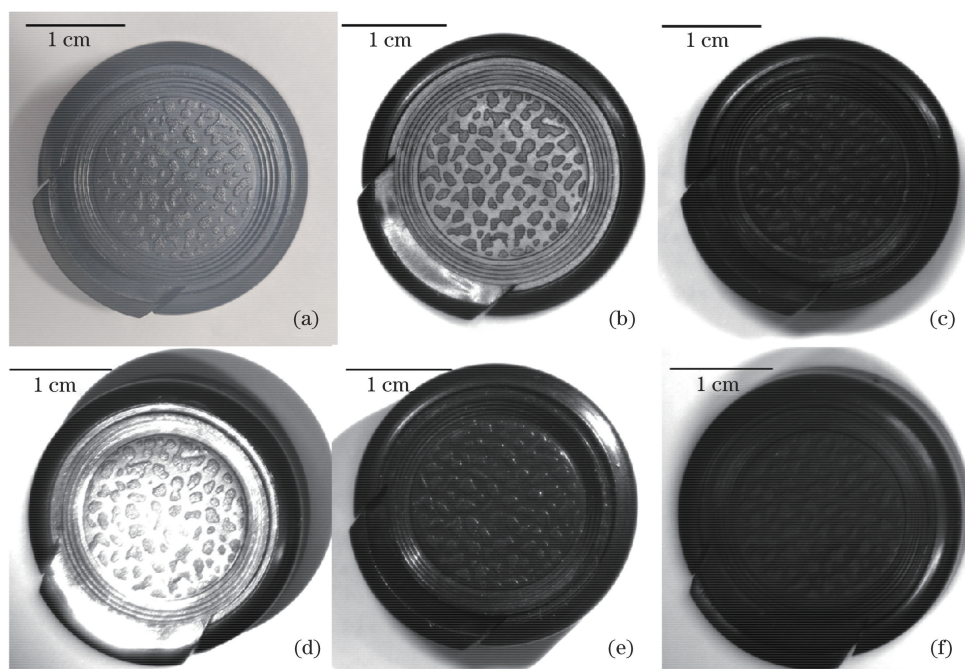


图 10 不同照明环境下的 3D 样品成像效果。(a)样品图像;(b)最优光环境下拍摄的图像;(c)~(f)非均匀光环境下的图像

Fig. 10 3D sample imaging effect under different illuminating conditions. (a) Sample image; (b) image taken in optimal light environment; (c)~(f) images in non-uniform light environment

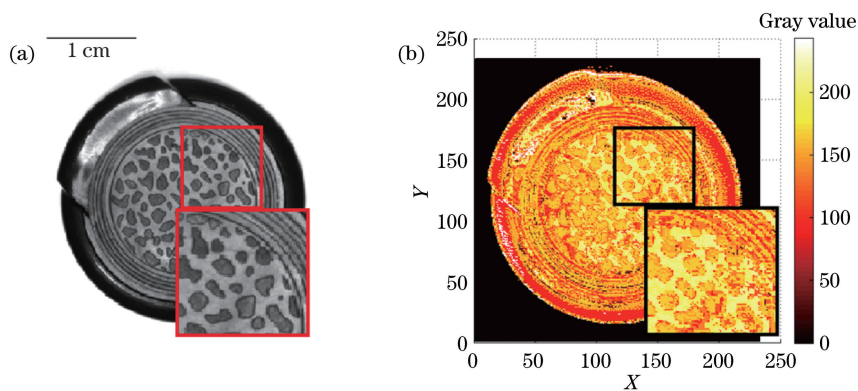


图 11 样品细节图。(a)最优光环境下的 3D 样品图像;(b)对应的灰度等级图

Fig. 11 Sample details. (a) 3D sample image in optimal light environment; (b) corresponding gray level map

式中: V 和 W 分别是图像沿垂直方向和水平方向的像素数; i_v 和 j_w 分别是像素沿水平方向和垂直方向的位置。并利用 MATLAB 软件对图像的灰度值均匀性进行分析计算。均匀度 U 由平均灰度值和最大灰度值计算得到。

优化后的照明灯具的灰度分布如图 12 所示(环境光照度为 0.1 lx)。从图 12(a)可以看出,中心区

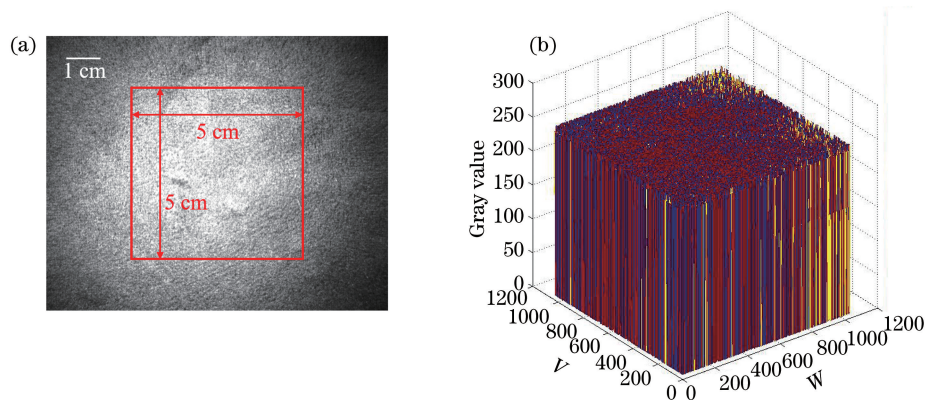


图 12 最优光环境下对应的光斑和灰度分布。(a)光斑;(b)中心区域的 3D 灰度等级分布

Fig. 12 Corresponding light spot and gray distribution; in optimal light environment.

(a) Light spot; (b) 3D gray level distribution in central area

5 结 论

提出了一种用于机器视觉的高质量成像 LED 环阵列结构的优化照明设计方法。首先,利用灯具结构参数与反射模型、图像灰度对比度之间的关系,找出影响图像质量的主要参数。在此基础上,提出了一种基于 Taguchi 实验设计方法的对 LED 环形阵列照度均匀性进行优化的方法,该方法很容易得到最优的设计参数组合。对模拟结果进行方差分析,得到各因子对性能的贡献,结果表明,单环 LED 数(贡献度为 53.10%)对均匀性的影响最大,其次是辐照角度(贡献度为 32.85%),照度均匀度达 89.31% 。然后,设计相关实验加以验证,实验结果表明,所提 LED 环形阵列光优化方法能够生成高均匀度的三维样品图像,同时照度均匀度可达 80.35% 。通过仿真和实验分析,可知所提方法可以高效快速地解决机器视觉无法获得高质量图像的 optical 设计问题。机器视觉进行光学检测准确性时需要高质量图像作为依据,所提方法通过优化照明设计,实现了均匀照度,还原了样品表面真实的对比度信息,可有效解决这方面的问题。在未来工作中,所设计的机器视觉光源可以满足更多针对不同特征对象的需求。

域非常均匀,但边界区域不均匀($U=57.88\%$)。对于机器视觉,均匀面积至少为 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$,如图 12(b)所示, $U=80.35\%$,其结果与文献[19,21]中的照度均匀度相近,但有效照明面积优于文献中的结果。摄像头捕获到的反射光的强度小于仿真结果的原因可能是黑布的表面结构不是理想的平整,吸收特性为不完全吸收。

参 考 文 献

- [1] Yin S B, Ren Y J, Liu T, et al. Review on application of machine vision in modern automobile manufacturing[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(8): 0815001.
尹仕斌,任永杰,刘涛,等. 机器视觉技术在现代汽车制造中的应用综述[J]. 光学学报, 2018, 38(8): 0815001.
- [2] Liang X M, Liu W T, Niu F S, et al. Research on measurement of volume and surface area of flotation bubbles based on machine vision[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(12): 1215009.
梁秀满,刘文涛,牛福生,等. 基于机器视觉的浮选气泡体积和表面积测量研究[J]. 光学学报, 2018, 38(12): 1215009.
- [3] Qu E S, Zhang H J, Cao J Z, et al. Discussion of illuminance formula in optical design[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(7): 1364-1368.
屈恩世,张恒金,曹剑中,等. 对光学设计中照度计算公式的讨论[J]. 光学学报, 2008, 28(7): 1364-1368.
- [4] Tarabani K A, Allen P K, Tsai R Y. A survey of sensor planning in computer vision [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1995, 11(1): 86-104.
- [5] Yi S K, Haralick R M, Shapiro L G. Optimal sensor

- and light source positioning for machine vision [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 1995, 61(1): 122-137.
- [6] Zhu Z M, Liu H, Chen S M. The design of diffuse reflective free-form surface for indirect illumination with high efficiency and uniformity [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(3): 1-10.
- [7] Smeulders A W M, Chu D M, Cucchiara R, et al. Visual tracking: an experimental survey [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2014, 36(7): 1442-1468.
- [8] Pimpurkar S, Speck J S, DenBaars S P, et al. Prospects for LED lighting [J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(4): 180-182.
- [9] Qian K Y, Hu X J. Study of the optical systems with illuminance and luminance uniformity simultaneously for LED lighting [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0208001.
钱可元, 胡晓佳. 同时实现路面照度与亮度均匀性的LED光源光学系统研究 [J]. *光学学报*, 2015, 35(2): 0208001.
- [10] Dong J T, Lu R S, Shi Y Q, et al. Optical design of color light-emitting diode ring light for machine vision inspection [J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(4): 043001.
- [11] Zhu Z M, Qu X H, Jia G X, et al. Uniform illumination design by configuration of LED array and diffuse reflection surface for color vision application [J]. *Journal of Display Technology*, 2011, 7(2): 84-89.
- [12] Marchand E. Control camera and light source positions using image gradient information [C]// *Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, April 10-14, 2007, Roma, Italy. New York: IEEE, 2007: 417-422.
- [13] Li H T, Chen S C, Han Y J, et al. A fast feedback method to design easy-molding freeform optical system with uniform illuminance and high light control efficiency [J]. *Optics Express*, 2013, 21(1): 1258-1269.
- [14] Taguchi G, Yokoyama Y, Wu Y. Taguchi methods, design of experiments [EB/OL]. [2020-06-01]. https://www.researchgate.net/publication/292446196_Taguchi_Methods_Design_of_experiments.
- [15] Chen Y C, Wen S S, Song P C. Design of a backlight module with a freeform surface by applying the Taguchi method [J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(3): 032302.
- [16] Shi C Y. Optical design and optimization of cured surface LED array based on Taguchi method [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
史晨阳. 基于 Taguchi 方法的曲面底板 LED 阵列光学设计与优化 [D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [17] Shen H L, Xin J H. Spectral characterization of a color scanner by adaptive estimation [J]. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, Image Science, and Vision*, 2004, 21(7): 1125-1130.
- [18] Cook R L, Torrance K E. A reflectance model for computer graphics [J]. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 1981, 15(3): 307-316.
- [19] Wu X J, Gao G M. LED light design method for high contrast and uniform illumination imaging in machine vision [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(7): 1694-1704.
- [20] Huang K. Study on measurement methods of road lighting [D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.
黄珂. 道路照明测量方法研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
- [21] Wu F P, Li S P, Zhang X M, et al. A design method for LEDs arrays structure illumination [J]. *Journal of Display Technology*, 2016, 12(10): 1177-1184.
- [22] 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.
- [23] Moreno I, Avendano-Alejo M, Tzonchev R I. Designing light-emitting diode arrays for uniform near-field irradiance [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(10): 2265-2272.
- [24] Shi C Y, Wen S S, Chen Y C. Study on curved surface LED array illumination problem based on taguchi method [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, 36(3): 651-656.
史晨阳, 文尚胜, 陈颖聪. 基于 Taguchi 方法的曲面 LED 阵列照度问题研究 [J]. *发光学报*, 2015, 36(3): 651-656.
- [25] Lin C F, Wu C C, Yang P H, et al. Application of Taguchi method in light-emitting diode backlight design for wide color gamut displays [J]. *Journal of Display Technology*, 2009, 5(8): 323-330.
- [26] Ramane D, Shaligram A. Optimization of multi-element LED source for uniform illumination of plane surface [J]. *Optics Express*, 2011, 19(14): A639-A648.