

# 空间高曲率金属线表面均匀化照明

杨泽宇, 叶一青, 蒋威, 朱星星, 易定容\*

华侨大学机电及自动化学院, 福建 厦门 361021

**摘要** 为了解决视觉检测中由光照不均引起的金属线形被测物表面亮度差异变化过大而导致的灰度图像不能正确显示的问题,提出一种用于空间高曲率金属线形被测物的均匀化照明光源优化分析及解决方案。首先,基于光度学理论建立照明空间内任意点的理想照明模型。之后,推导该点表面照度、反射率、空间坐标信息与图像灰度之间的数学关系模型,利用 MATLAB 软件进行仿真模拟,对数据进行分析获取影响被测物均匀化照明成像的主要因素,在此基础上采用穹顶光源对照明光源进行改进,改进后金属线形被测物表面均匀度达 92.85%。实验结果表明,该方案可以有效地提高金属线形被测物表面均匀度,较改进前提高 34.77%,可以有效解决该类型被测物视觉检测中的成像问题。

**关键词** 机器视觉; 机器视觉检测; 均匀光照明; 空间照度模型; 光源优化

中图分类号 TH741

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220433

## Surface Homogenization Illumination of Spatial High Curvature Metal Wire

Yang Zeyu, Ye Yiqing, Jiang Wei, Zhu Xingxing, Yi Dingrong\*

College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, Fujian, China

**Abstract** An optimization method and its derived solution for uniform lighting source of a metal linear test object with high curvature in space are proposed to solve the gray-scale image display problem attributed to the wide variations in brightness on the surface of the metal linear test object caused by uneven illumination in visual inspection. First, the ideal lighting model of any point in the lighting space is established using photometric theory. The mathematical relationship between the surface illuminance, reflectance, spatial coordinate information, and image gray level of the point is then derived, and the simulation is performed using MATLAB. Analyzing the data yielded the primary factors influencing uniform illumination and imaging of the measured object. On this premise, the dome light source is utilized to improve the illumination light source, and the surface uniformity of the metal linear measured object is 92.85%. The experimental findings demonstrate that this technique can effectively improve the surface uniformity of the metal linear object, up to 34.77% higher. Furthermore, it can effectively solve the imaging problem during visual inspection of this type of object.

**Key words** machine vision; machine vision inspection; uniform illumination; spatial illumination model; light source optimization

## 1 引言

视觉检测技术被广泛地应用于金属外壳、规则纹理表面<sup>[1]</sup>、半导体芯片等领域<sup>[2-3]</sup>,且由于被测物的特殊性往往需要选择特定的光源<sup>[4-6]</sup>。本实验使用雪崩光电二极管中的金线作为研究对象,雪崩二极管作为激光测距仪、共焦显微镜等仪器中的关键器件,在此类具有空间高曲率和纵向跨度较大的线形金属被测物的检测中,通常使用环形光源进行照明,由于其表面反射率不均,相机无法有效且正确地接收物体表面反射回的

亮度信息<sup>[7-8]</sup>,使得图像中被测物表面灰度变化差异较大,容易出现过曝和欠曝的现象,继而使得后续图像处理无法提取被测物表面准确的灰度信息,影响最终的缺陷检测或三维重建等工作。因此,为了获取准确的灰度图像,对被测物表面照明均匀化的分析是进行机器视觉检测的关键。

为获得清晰的检测图像,国内外现阶段研究主要围绕被测平面照度均匀化和成像端的图像处理展开。在照明光源研究方面:2011年,Zhu等<sup>[9-10]</sup>对发光二极管(LED)环形阵列与漫反射表面的均匀照明光源进

收稿日期: 2022-01-04; 修回日期: 2022-01-07; 录用日期: 2022-01-17; 网络首发日期: 2022-01-27

基金项目: 国家自然科学基金(51775200)、福建省自然科学基金(2020J02005)

通信作者: \*yidr@hqu.edu.cn

行研究,通过点光源直射到漫反射表面,在表面的反射下对被测平面进行照度分析;同年,Dong等<sup>[11]</sup>通过引入简化倾角形LED非旋转对称辐照度分布复杂性的简单模型,开发了一种简单实用的倾角形LED环形阵列近场均匀辐照度设计工具;2014年,刘百芬等<sup>[12]</sup>提出一种由平面LED阵列与高反射率自由曲面构成的间接照明方式,构建数学模型,并通过光学软件模拟检测区域照度;2020年,史晨阳等<sup>[13]</sup>设计了一种LED环形阵列,并通过理论和实验验证了环形光对环境照度均匀性的影响。上述对于照明光源的改进,大多对照明空间中被测平面进行分析,鲜有对空间异型结构被测物分析的模型。另一种获取清晰图像的途径是对于成像端的图像处理:2018年,祝振敏等<sup>[14]</sup>提出一种基于反向传播神经网络与高斯分布函数的图像高光去除模型,通过图像处理的方式去除成像高光;同年,Song等<sup>[15]</sup>通过卷积神经网络对金属螺纹表面进行检测;2019年,冯维等<sup>[16]</sup>采用改进相机曝光响应函数的方法获取像素值与曝光量之间关系,从而改进成像质量;2021年,贺嘉伟等<sup>[17]</sup>利用偏振镜对单色偏振光的选通性消除大面积高光,从而提出一种强化消光算法消除残余高光点。

但对于线形被测物,因其表面反射率不均的影响,成像端的基于图像处理的修正方法<sup>[18]</sup>并不能很好适用。本文结合物体表面反射模型和光度学理论,从被

测物表面特性出发,提出一种旨在解决空间高曲率金属线表面照明不均问题,获取线形金属被测物表面的灰度均匀图像的方法。首先,对图像灰度和被测物表面照度的关系进行分析,建立一种基于被测物表面特性计算照明空间内任意点在光源下的理想照度计算模型,通过模型解释被测物在成像端表面灰度差异较大的原因和均匀化照明的必要条件;然后,使用穹顶光代替传统的环形光作为金属线形被测的照明光源;最后,通过计算模拟和实验,验证所提方法对于解决该类被测物表面均匀化问题的有效性。

## 2 照明空间成像模型理论推导

彩色相机成像获得的是RGB三通道彩色图像,为了精简图像信息、提高运算速度,将彩色图像转化为灰度图像进行运算,所以图像上灰度值的变化反映了被测物表面的照度差异。因此,需建立灰度值与曝光时间、入射方向、物体表面反射特性、光源亮度等各项参数之间的关系。

### 2.1 照明模型的推导

首先建立被测物及空间照明模型,如图1所示。图1左侧为建立的被测物空间模型,设被测物表面点坐标为 $P(x, y, z, \mathbf{p})$ ,该坐标中包括点 $P$ 的空间坐标信息 $(x, y, z)$ 和表面法向量 $\mathbf{p}$ 。

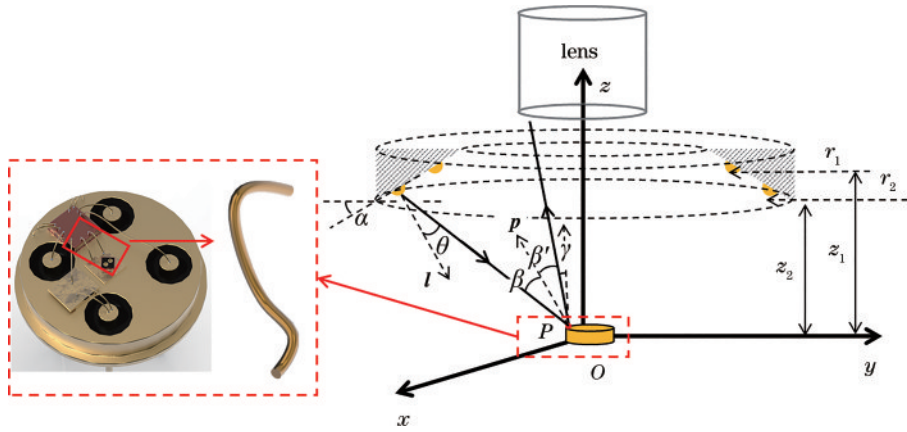


图1 被测物和环形光源空间照明模型

Fig. 1 Spatial lighting model of measured object and ring light source

根据光度学原理计算 $P$ 点表面照度:

$$E(x, y, z, \mathbf{p}) = \frac{I \cos^{\delta} \theta}{d_{\perp}^2}, \quad (1)$$

式中: $I$ 为单个点光源的发光强度; $\theta$ 为光源光轴方向与光线方向的夹角; $\delta$ 为由LED光源半衰角决定的指数,若光源接近朗伯辐射体, $\delta \approx 1$ ; $d_{\perp}$ 为以 $P$ 点为中心的微元面与光源之间的距离。针对该类型的被测物检测目前主要通过环形光照明方式照明,因此照明模型基于环形LED阵列<sup>[19]</sup>建立,如图1所示。光源朝向方向某一位置处建立3D笛卡儿直角坐标系,竖直向上为 $z$ 轴正方向,垂直纸面向外为 $x$ 轴正方向,水平向右为 $y$ 轴正方向。环形光照明模型的建立与很多参数有关,

光源底部所在平面与水平方向的夹角为 $\alpha$ ,在光源座中,存在 $N$ 圈LED光源环形阵列,每一圈中包含 $N_n$ 个环形LED光源,光源所在圆的半径为 $r_n$ ,距离 $xOy$ 平面的高度为 $z_n$ ,图1中只指出 $N=2$ 时的场景。根据所建立的坐标系表示出单个光源 $L_{m'} = (x_{m'}, y_{m'}, z_{m'})$ 的坐标,设单个光源垂直方向的投影落在 $x$ 轴正向上的光源点为起点,顺时针对光源坐标进行表示:

$$\begin{cases} x_{m'} = r_n \cdot \cos \frac{2\pi(n'-1)}{N_n} \\ y_{m'} = r_n \cdot \sin \frac{2\pi(1-n')}{N_n} \\ z_{m'} = z_n \end{cases} \quad (2)$$

因此,光源  $L_{m'}$  的法向量  $\mathbf{l}_{m'} = (x_{m'}, y_{m'}, r_n \tan \alpha)$ 。通过光源的坐标,易得光源入射  $P$  点的光线的方向向量  $\mathbf{l}_{in} = \overrightarrow{L_{m'}P} = (x - x_{m'}, y - y_{m'}, z - z_{m'})$ , 所以  $\theta$  的余弦可表示为

$$\cos^\theta \theta = \cos \langle \mathbf{l}_{m'}, \mathbf{l}_{in} \rangle = \left| \frac{\mathbf{l}_{m'} \cdot \mathbf{l}_{in}}{|\mathbf{l}_{m'}| \cdot |\mathbf{l}_{in}|} \right|^\theta. \quad (3)$$

$d_\perp$  为以  $P$  点为中心的微元面与光源之间的距离,该距离与微元表面法向量和光线之间的夹角相关,即

$$d_\perp^2 = (x - x_{m'})^2 + (y - y_{m'})^2 + (z - z_{m'})^2. \quad (4)$$

$\beta$  为被测物表面微元法向量与入射光线的夹角,即

$$\cos \beta = \cos \langle \mathbf{p}, (-\mathbf{l}_{in}) \rangle = \left| \frac{\mathbf{p} \cdot (-\mathbf{l}_{in})}{|\mathbf{p}| \cdot |(-\mathbf{l}_{in})|} \right|. \quad (5)$$

将式(3)~(5)代入式(1)可得

$$E_{in}(x, y, z, \mathbf{p}) = \mathbf{l} \cdot \sum_{n=1}^N \sum_{m'=1}^{N_n} \frac{\left| \frac{\mathbf{l}_{m'} \cdot \mathbf{l}_{in}}{|\mathbf{l}_{m'}| \cdot |\mathbf{l}_{in}|} \right|^\theta}{(x - x_{m'})^2 + (y - y_{m'})^2 + (z - z_{m'})^2}, \quad (6)$$

式(6)即为环形光下照明空间内任意点的照度公式。

## 2.2 成像模型的推导

观察面为竖直方向,观察方接收到的照度由点  $P$  处的反射光发出,被测物表面镜面反射作为主要的反射光来源,入射角  $\beta$  等于出射角  $\beta'$ ,即入射光线、出射光线与表面法向量的夹角相等。即

$$\cos \beta = \cos \langle \mathbf{l}_{out}, \mathbf{p} \rangle = \cos \langle \mathbf{l}_{in}, \mathbf{p} \rangle. \quad (7)$$

通过所建立的基于环形光照明的关于被测物表面  $P(x, y, z, \mathbf{p})$  入射光线方向上接收到的照度公式,计算点  $P(x, y, z, \mathbf{p})$  竖直向上位置处的出射度  $M_{out}(x, y, z, \mathbf{p})$ :

$$M_{out}(x, y, z, \mathbf{p}) = E_{out}(x, y, z, \mathbf{p}) \cdot \cos \gamma = \lambda E_{in}(x, y, z, \mathbf{p}) \cdot \cos \gamma, \quad (8)$$

式中: $\lambda$  为反射系数; $\gamma$  为光线出射方向与竖直方向的夹角。

$$\cos \gamma = \cos \langle \mathbf{V}, \mathbf{l}_{out} \rangle = \left| \frac{\mathbf{V} \cdot \mathbf{l}_{out}}{|\mathbf{V}| \cdot |\mathbf{l}_{out}|} \right|, \quad (9)$$

式中: $\mathbf{V}$  为垂直于  $xOy$  平面的向量,即  $\mathbf{V} = (0, 0, 1)$ 。因成像系统的存在,在正常曝光条件下,图像灰度  $G$  与曝光量  $H$  之间的关系为

$$G = \mu \lg H + m, \quad (10)$$

式中: $\mu$  和  $m$  为反差系数,两者与相机和成像条件有关。

$$H = E_{out}(x, y, z, \mathbf{p}) \cdot t, \quad (11)$$

式中: $t$  为曝光时间。在一次正常曝光时,图像上的灰度差异与曝光时间无关。结合式(7)~(11),即可得到成像中被测物表面空间信息与成像灰度之间的关系:

$$G(x, y, z, \mathbf{p}) = \mu \lg(E_{out} \cdot t) + m = \mu \lg E_{in} + \mu \lg E_{in}(\cos \gamma) + m', \quad (12)$$

式中: $m'$  为化简之后的常数项。由此建立了被测物表面上一点与图像灰度之间的关系。

## 2.3 模型评价与均匀度分析

评价照明系统的优劣主要根据照明的视场均匀度和被测物表面灰度的变化。照明视场的照度均匀度定义为

$$E_{uni} = \frac{E_{ave}}{E_{max}}, \quad (13)$$

式中: $E_{ave}$  为接收照度的平均值; $E_{max}$  为接收照度的最大值; $E_{uni}$  为视场内的照度均匀度。

对于灰度图像,图像上灰度均匀度的公式为

$$G_{uni} = \frac{G_{ave}}{G_{max}} \times 100\%, \quad (14)$$

式中: $G_{ave}$  为图像中灰度的平均值; $G_{max}$  为图像中灰度的最大值; $G_{uni}$  为视场内的灰度均匀度。

根据已经建立好的公式,代入本实验中常用的光源尺寸的初始数据,环形光源中有 2 个光源环,即  $N = 2, n = 1, 2$ 。每个环上有 36 枚 LED 光源,即  $N_n = 36$ , 两圈光源的直径分别为 66 mm 和 77 mm,距离被测平面距离分别为 30 mm 和 36 mm,光源底部所在平面与水平方向的夹角为  $30^\circ$ 。根据式(12)及各参数,通过 MATLAB 和 TracePro 软件计算出被测平面的平面灰度分布,如图 2 所示。此条件下,环形光照明随着光在同一个样本的一次成像中,对计算出的图像进行归一化处理,成像结果如图 2 所示。

根据灰度均匀度公式可得,环形光在  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  视场范围内均匀度为 84.77%。对于视场中放置的被测物,不同位置处的灰度值如图 3 所示。

在环形光光源照明条件下,图像中被测物表面均匀度为 67.98%,中间较亮两边较暗,中间位置处易过曝,且随着测量位置的改变灰度变化较大。由图 2、图 3 和式(12)可得,在视场中心附近,对于表面均匀的被测物,被测物表面接受照度  $E_{in}$  和出射度  $M_{out}$  对灰度均匀度的影响较小。根据图 3 可得,影响被测物表面灰度变化较大的主要原因为被测物表面高曲率半径和较大的纵向测量范围,使得被测物表面出射度方向与观察方的夹角  $\gamma$  有关。表 1 为图 3 中位置 2、3、4 处按照 S-S 截面上表面点 A~E 处的  $\gamma$  值与图像灰度的关系。3 个位置截面中心高度分别为 2.50、2.16、0.47 mm,纵向高度从上到下。

从表 1 可以得出,对于同一截面的位置处, $\gamma$  值越小,图像灰度越大。随着中心位置高度的降低,中心灰度值呈下降趋势。因此,综合式(12)和表 1 可以得到,当  $\gamma$  随着出射光线与竖直方向夹角的增大,灰度值也会减小。

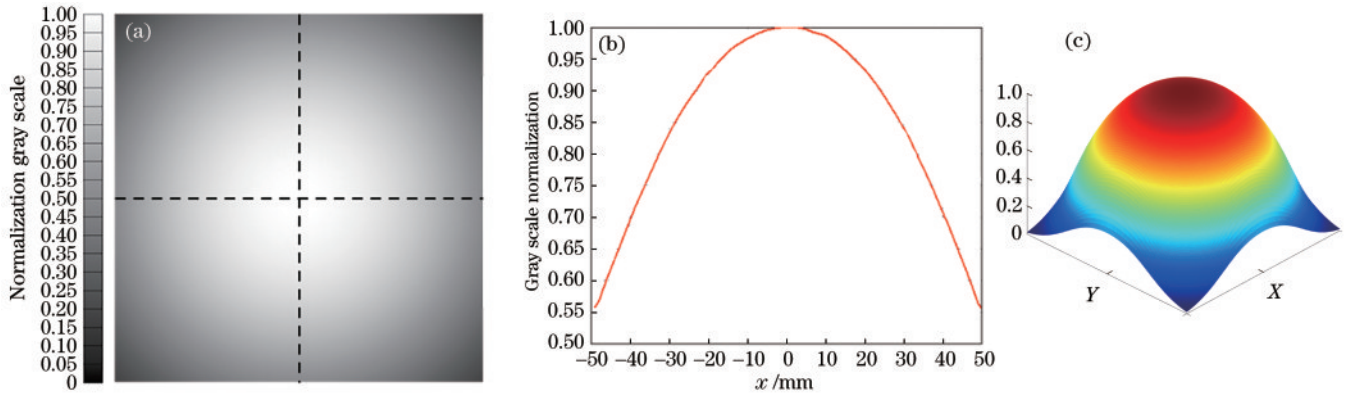


图2 环形光源下 100 mm×100 mm 视场内的灰度图。(a)平面灰度图;(b)归一化后视场中线上的灰度分布;(c)灰度图三维显示  
Fig. 2 Gray scale in 100 mm×100 mm field of view under ring light source. (a) Plane gray scale; (b) gray distribution of normalized median line in field of view; (c) 3D display of gray scale map

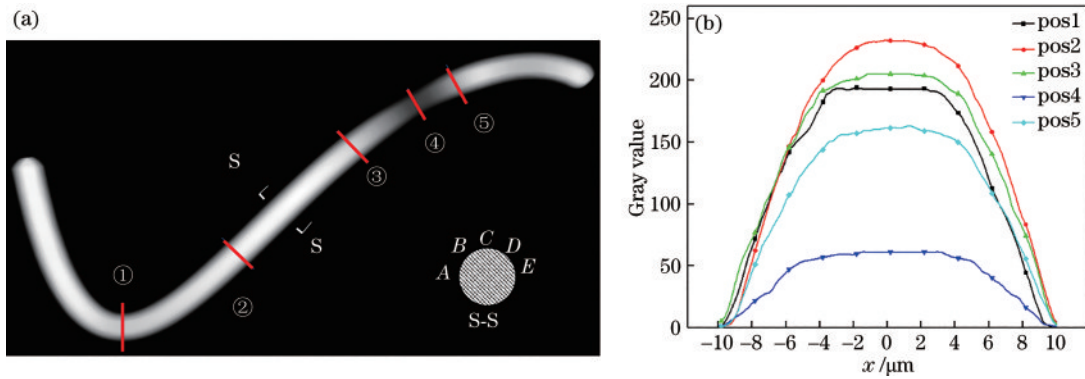


图3 环形照明下被测物模拟图像。(a)被测物灰度图像;(b)位置1~5截面的灰度分布  
Fig. 3 Simulation image of measured object under ring light illumination. (a) Gray image of measured object; (b) gray scale distribution of cross section at positions 1-5

表1 不同位置处  $\gamma$  与图像灰度值的关系

Table 1 Relationship between  $\gamma$  at different positions and image gray value

Point	Position 2		Position 3		Position 4	
	$\gamma / (^\circ)$	Gray value	$\gamma / (^\circ)$	Gray value	$\gamma / (^\circ)$	Gray value
A	83.69	2	82.93	15	78.44	4
B	29.47	189	47.01	178	36.62	54
C	11.55	232	28.80	205	11.60	61
D	27.86	177	40.54	154	29.47	45
E	68.84	56	79.05	20	69.58	10

### 3 照明模型的改进和成像对比

基于上述被测物表面出射度方向与观察方的夹角  $\gamma$  对成像灰度均匀度的影响,尝试通过增加光源环数、减小光线出射方向与观察方向的夹角及夹角  $\gamma$ ,从而提高图像均匀度。模拟增加光源环数进而增加光照角度的方法增加对被测物表面的影响,结果如图4所示。

从图4可以看出,光源环数的增加可以提高被测物截面的灰度均匀度。但是在实际应用中,通过改变光源环数从而减少被测物表面出射光与垂直方向的角度并不具有普适性。该照明方式受到成本、空

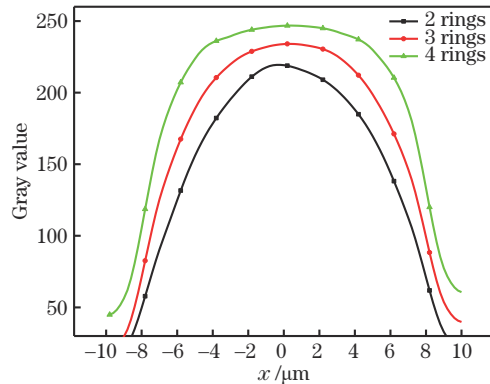


图4 被测物中心处截面在不同光源环数下的灰度分布  
Fig. 4 Gray distributions of cross section at the center of the measured object under different light source rings

间大小、单个光源体积的影响,并不能应用于微纳测量,而且被测物表面受直接照明方式的影响,镜面反射严重,仍然无法获得高质量图像。因此,为了兼顾增加照明角度和降低镜面反射的影响,选择漫反射板作为物体的间接照明光源,该光源由底部的LED圆形阵列和内部具有漫反射涂层的穹顶组成。

#### 3.1 穹顶光下的成像模型

穹顶光照明方式与环形光的区别在于环形光照明

方式为直接照明,穹顶光照明为间接照明。穹顶光照明是由光源内部的漫反射板通过吸收底部的光源发出的光辐射通过漫反射的方式使空间照明均匀化。图 5 为穹顶光源的空间模型<sup>[20]</sup>。

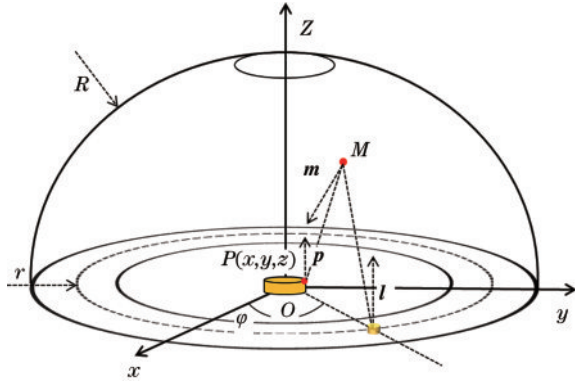


图 5 穹顶光源照明模型  
Fig. 5 Dome lighting model

与环形光类似,照明模型的建立与很多参数有关,设底部光源设为  $N$  圈,第  $n$  圈的半径为  $r_n$ ,距离  $xOy$  平面的高度为  $z_n$ ,第  $n$  圈上的 LED 光源的个数为  $N_n$ 。设每个光源的坐标为  $L_{nn'}$ ,  $L_{nn'} = (x_{nn'}, y_{nn'}, z_{nn'})$ ,假设存在一个光源的中心落在  $x$  轴的正向,以该光源为起点顺时针定义光源的坐标,坐标与式(2)相同,不同的是光源的纵向高度和法向量,  $xOy$  平面即为光源所在平面,即  $z_n = 0$ ,光源法向量  $l_{nn'} = l = (0, 0, 1)$ 。设  $M$  点为穹顶内表面漫反射曲面上的任意一点,穹顶内半径为  $R$ ,  $M(x_m, y_m, z_m)$  坐标可表示为

$$\begin{cases} x_m = R \sin \alpha \cdot \cos \varphi \\ y_m = R \sin \alpha \cdot \sin \varphi \\ z_m = R \cos \alpha \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $\alpha$  为  $M$  点与  $z$  轴的夹角;  $\varphi$  为  $M$  点与  $x$  轴正向的夹角。因为穹顶为半球,所以穹顶上  $M$  点处微元面的

法向量  $m = (-x_m, -y_m, -z_m)$ ,入射穹顶面的方向向量  $\overrightarrow{L_{nn'}M} = (x_m - x_{nn'}, y_m - y_{nn'}, z_m - z_{nn'})$ ,代入式(1)整理可得,穹顶上微元面接收的照度为

$$E(x_m, y_m, z_m) = I \cdot \sum_{n=1}^N \sum_{n'=1}^{N_n'} \frac{\left| \frac{l_{nn'} \cdot \overrightarrow{L_{nn'}M}}{|l_{nn'}| \cdot |\overrightarrow{L_{nn'}M}|} \right|^\delta}{(x_m - x_{nn'})^2 + (y_m - y_{nn'})^2 + (z_m - z_{nn'})^2} \quad (16)$$

由此,穹顶光内表面上任意一点照度可由式(16)表示。设  $P(x, y, z, p)$  为被检测物体表面上一点,穹顶内表面各微元面作为新光源影响被测物表面的照度分布,新光源可视为朗伯体,所以由双向反射分布函数(BRDF)可得

$$E(x, y, z, p) = \iint_{\Omega} \frac{E(x_m, y_m, z_m) \cdot B \cdot \cos \theta'}{d_{\perp}^2} dS \quad (17)$$

式中:  $B = \rho/\pi$ ;  $\rho$  为漫反射系数;  $\Omega$  为穹顶面积;  $dS$  为穹顶每个小的微元面的面积;  $\theta'$  为  $M$  点法向量与  $\overrightarrow{MP}$  的夹角。

$$\cos \theta' = \cos \langle m, \overrightarrow{MP} \rangle = \left| \frac{m \cdot \overrightarrow{MP}}{|m| \cdot |\overrightarrow{MP}|} \right| \quad (18)$$

同理,根据式(16)~(18)可得,穹顶光下被测物表面接收照度计算公式为

$$E_{in}(x, y, z, p) = E(x_m, y_m, z_m) \cdot B \cdot \left| \frac{m \cdot \overrightarrow{MP}}{|m| \cdot |\overrightarrow{MP}|} \right| \iint_{\Omega} \frac{1}{(x - x_{nn'})^2 + (y - y_{nn'})^2 + (z - z_{nn'})^2} dS \quad (19)$$

将式(19)代入式(12),即可得到穹顶光的图像灰度关系式,其形式与式(12)相同,结合实际光源,代入穹顶半径  $R = 46.5 \text{ mm}$ ,光源底部单环光源数量  $N_1 = 28$ ,通过 MATLAB 和 TracePro 软件模拟出  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  平面的照度分布,如图 6 所示。

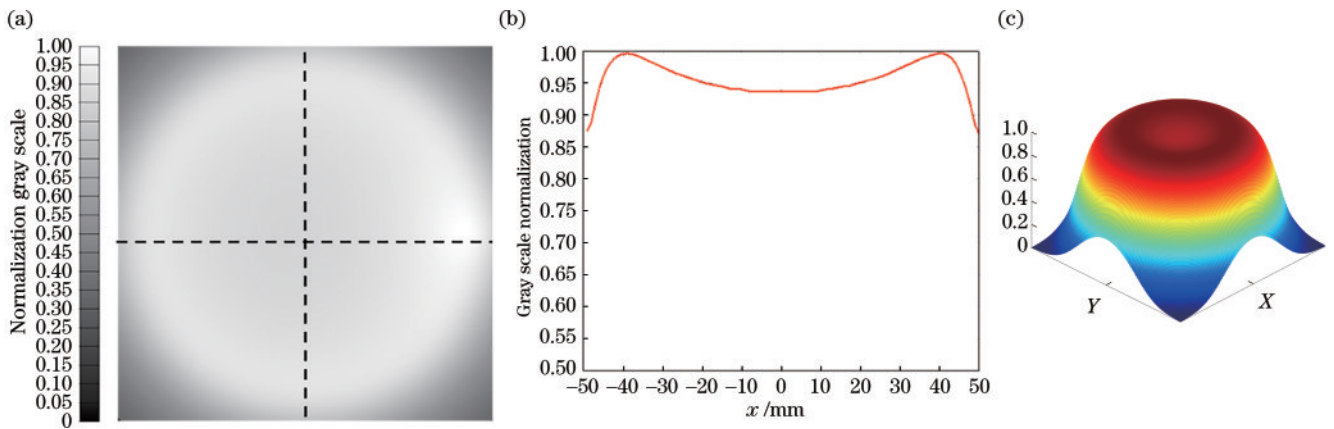


图 6 穹顶光源下  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  视场内的灰度图。(a)平面灰度图;(b)归一化后视场中线上的灰度分布;(c)灰度图三维显示  
Fig. 6 Gray scale map in  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  field of view under dome light source. (a) Plane gray scale map; (b) gray distribution of normalized median line in field of view; (c) three-dimensional display of gray scale map

根据式(14)可知,在视场范围内被测平面的灰度均匀度为 95.60%,较环形光照明提高了 10.83%。从图 6 可以看出,环形光下视场中间较亮,并向四周衰

减,而穹顶光中间较为平缓,均匀度更高。对被测物表面,不同位置处的灰度值分布如图 7 所示。

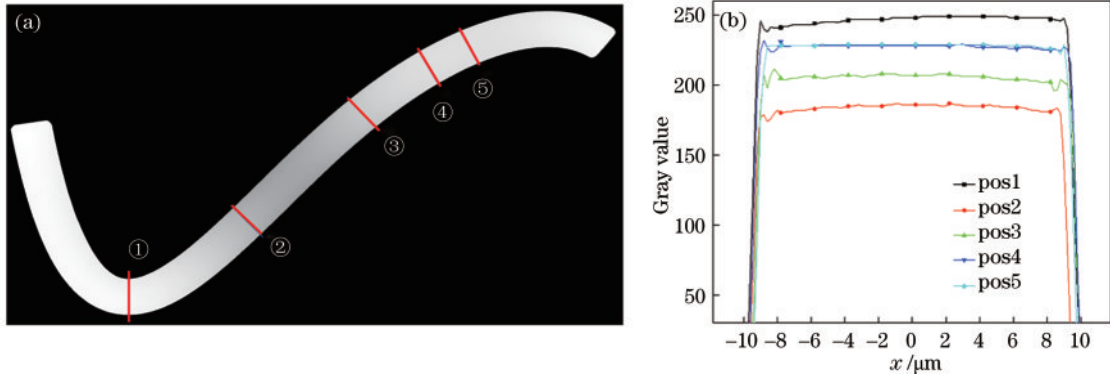


图 7 穹顶光照明下被测物模拟图像。(a)被测物灰度图像;(b)位置 1~5 截面的灰度分布

Fig. 7 Simulated image of measured object under dome lighting. (a) Gray image of measured object; (b) gray scale distribution of cross section at position 1-5

对比两种光源在同一位置处对被测物造成的灰度差异。穹顶光照明条件下,被测物表面模拟出的图像灰度值变化范围较小,均匀度更高,位置 2、3、4 处截面在两种光源下灰度值差异如图 8 所示。

根据式(14)可知,在穹顶光源照明条件下,图像上被测物表面灰度均匀度为 92.85%,较环形光提高了 24.87%,成像效果显著。

#### 4 实验结果和分析

为了验证所提模型的正确性和新的光源方案的正确性,设计了相关实验。为提高被测平面的照明均匀度,选用带有面光源的穹顶光源代替环形光源作为实验的照明光源,如图 9 所示。

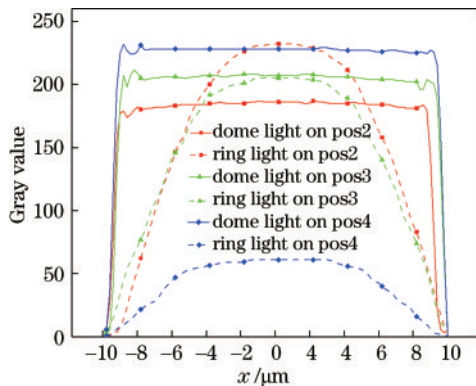


图 8 两种光源照明下不同位置处的灰度分布

Fig. 8 Gray distribution at different positions under two different light sources

实验中选用的同一光源中的各个 LED 照度趋于一致,且在照明时提供照明的电压保持稳定。从实验需要用到的穹顶光源和环形光源中随机抽取 10 个点光源,使用 DL333204 型号照度计分别测量选出的 10 个 LED 光源的照度。为了避免周围光源的影响,在测量时将照度计的测量面贴于光源处,并遮挡其他点光源,每个光源测量 5 次,取测量数据的平均值为单个 LED 光源的照度,测量时光源附近温度保持在  $(29 \pm 1)^\circ\text{C}$ ,图 10 为测

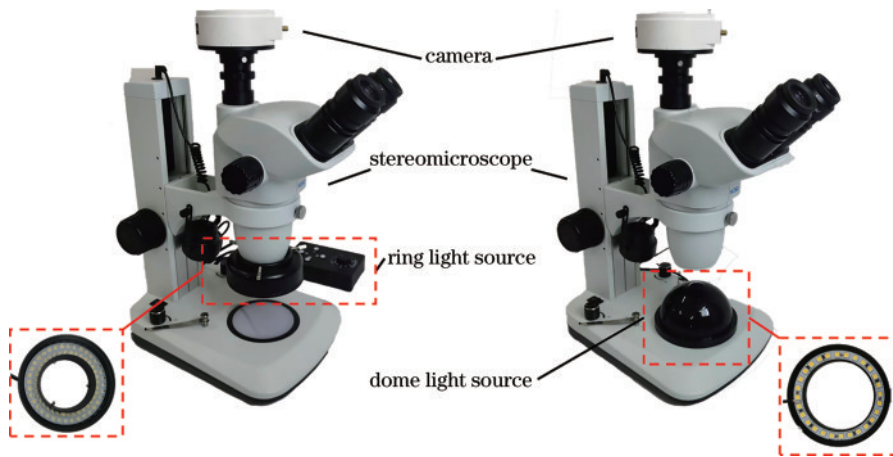


图 9 实验装置和光源

Fig. 9 Experiment and light source

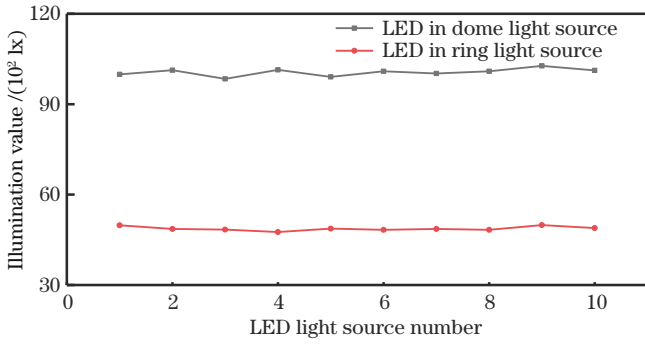


图 10 不同光源中单个 LED 的照度分布

Fig. 10 Illumination distribution of individual LED in different light sources

量结果照度分布图,易得各光源性能较为平均。

因为两种光源中的 LED 功率不同,所以在实验中通过调节电压的方式,保证被测平面中心照度相同。保持电压稳定,实验在暗室下并将光源预热 15 min 后进行,用鑫图公司的 DigiRetina16 相机分别使金线在两种光源下成像。在中心照度相同时,获取的图像如图 11 所示,且在图中取 5 处位置的灰度值进行对比,结果如图 12 所示。

图像的灰度变化可以视为被测物表面照度的变化,从图 12 可以看出,穹顶光源下金线较为清晰,边缘明显,而环形光下会随着金线纵向测量高度的改变而出现明暗交替,且局部位置金线顶部过曝。根据式(14)可知,在同一视场下,穹顶光源下的金线表面灰度均匀度为 91.46%,环形光源下的金线表面灰度均

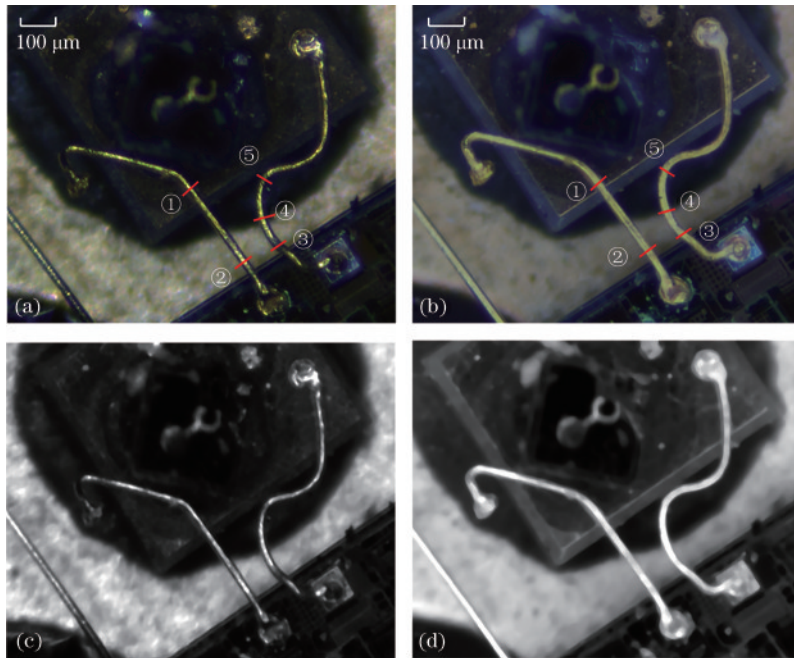


图 11 不同光源下的金线成像对比。(a) 环形光下金线图像;(b) 穹顶光下金线图像;(c) 环形光图像灰度图;(d) 穹顶光图像灰度图  
Fig. 11 Wire imaging contrast under different light sources. (a) Wire images under ring light; (b) wire images under dome light; (c) gray scales of ring light images; (d) gray scales of dome light images

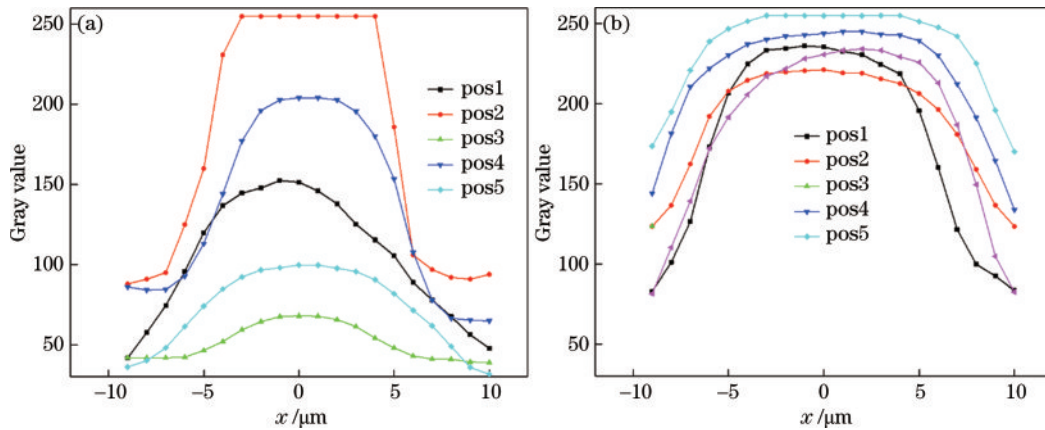


图 12 不同位置处的图像灰度对比。(a) 环形光下不同位置的灰度分布;(b) 穹顶光下不同位置的灰度分布

Fig. 12 Image gray scale comparison at different positions. (a) Gray scale distributions at different positions under ring light; (b) gray scale distributions in different positions under dome light

匀度为 56.69%，所提方案较之前均匀性提高 34.77%，由于实验中被测物在环形光照明条件下的成像效果较理论模型差，因此实验得出的照明均匀性结果要优于理论得出的 24.87%，符合理论推导。即对于此类表面高反射率、高曲率被测物，穹顶光源的成像效果要优于环形光源。除此之外，从图 12 中可以得到，穹顶光照明条件下，被测物所在纵向位置对图像灰度的影响较小。对于纵向测量范围较大的被测物，所提方案同样适用。

## 5 结 论

对具有空间高曲率金属线表面照度进行分析，建立被测物表面空间信息与照明空间下被测物表面接受照度之间的函数表达式，模拟出影响图像质量的主要原因在于出射光线与视场方向夹角过大。穹顶光源较环形光源不仅提高了照明角度，而且漫反射板作为二次光源提高了照明视场的均匀度。通过模拟结果可得，金属线形被测物在穹顶光源下表面灰度均匀度为 92.85%，较改进前提高了 24.87%。然后通过一系列设计实验加以验证。实验结果表明，被测物在穹顶光源下表面灰度均匀度为 91.46%，对比环形光源灰度均匀性提高 34.77%。实验验证了所提方法建立模型和光源改进方案的准确性，对于具有空间高曲率金属线表面，在中心照度相同时的两种照明条件下，穹顶光照明在截面方向和母线方向的成像效果要优于环形光，并在穹顶光照度对于高度的变化鲁棒性也更好，对后续的图像处理和缺陷检测工作具有重要意义。

## 参 考 文 献

- [1] 熊显名, 石红强, 曾星宇. 基于反射云纹的抛光曲面表面缺陷检测研究[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(14): 141501.  
Xiong X M, Shi H Q, Zeng X Y. Surface defect detection on polished surface based on reflection Moiré[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(14): 141501.
- [2] 汤勃, 孔建益, 伍世虔. 机器视觉表面缺陷检测综述[J]. 中国图象图形学报, 2017, 22(12): 1640-1663.  
Tang B, Kong J Y, Wu S Q. Review of surface defect detection based on machine vision[J]. Journal of Image and Graphics, 2017, 22(12): 1640-1663.
- [3] Qiu K P, Tian L, Wang P. An effective framework of automated visual surface defect detection for metal parts [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(18): 20412-20420.
- [4] 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.
- [5] 焦飞宇, 文尚胜, 马丙戌, 等. 立体化高空间照明均匀度 LED 植物光源的设计[J]. 光学学报, 2020, 40(18): 1822002.  
Jiao F Y, Wen S S, Ma B X, et al. Design of stereo LED plant light source system with high spatial illumination uniformity[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(18): 1822002.
- [6] 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.  
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.
- [7] 曲兴华, 何滢, 韩峰, 赵旭辉, 叶声华. 强反射复杂表面随机缺陷检测照明系统分析[J]. 光学学报, 2003, 23(5): 547-551.  
Qu X H, He Y, Han F, et al. Illumination system for detecting random defects on strongly reflective and complex surfaces[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(5): 547-551.
- [8] Qu X H, He Y, Jia G X, et al. Detection of random defects on highly reflective and complex surfaces[J]. Key Engineering Materials, 2005, 295/296: 233-238.
- [9] 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.
- [10] 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.  
Zhu Z M, 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.
- [11] 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.
- [12] 刘百芬, 金小龙, 祝振敏. 基于 LED 阵列与漫反射自由曲面的均匀照明光源设计[J]. 应用光学, 2014, 35(4): 598-602.  
Liu B F, Jin X L, Zhu Z M. Uniform illumination design based on LED array and diffuse reflection freeform surface [J]. Journal of Applied Optics, 2014, 35(4): 598-602.
- [13] 史晨阳, 林燕丹. 机器视觉中均匀照明成像的 LED 环形阵列设计[J]. 光学学报, 2020, 40(20): 2011003.  
Shi C Y, Lin Y D. LED ring array design for uniform illumination imaging in machine vision[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(20): 2011003.
- [14] 祝振敏, 裴爽, 陈世明, 等. 基于偏振信息的强反射工件高光去除及视觉测量方法[J]. 光学学报, 2018, 38(11): 1112005.  
Zhu Z M, Pei S, Chen S M, et al. Highlight removal of high reflectivity workpiece and vision measurement based on polarization information[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(11): 1112005.
- [15] Song L M, Li X Y, Yang Y G, et al. Detection of micro-defects on metal screw surfaces based on deep convolutional neural networks[J]. Sensors, 2018, 18(11): 3709.
- [16] 冯维, 刘红帝, 汤少靖, 等. 基于 HDRI 的高反光金属表面缺陷检测方法研究[J]. 仪表技术与传感器, 2019(8): 112-116.  
Feng W, Liu H D, Tang S J, et al. Research on defect detection method for high-reflective-metal surface based on HDRI[J]. Instrument Technique and Sensor, 2019(8): 112-116.



- 112-116.
- [17] 贺嘉伟, 许新科, 孔明, 等. 基于面结构光的金属表面高光抑制方法研究[J]. 中国测试, 2021, 47(10): 12-18.  
He J W, Xu X K, Kong M, et al. Research on highlight suppression method of metal surface based on surface structured light[J]. China Measurement & Test, 2021, 47(10): 12-18.
- [18] 郭碧茹, 孔韦韦, 陈斌. 导向滤波的高光去除改进算法[J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(20): 229-235.  
Guo B R, Kong W W, Chen B. Improved algorithm for removing highlights with guided filtering[J]. Computer Engineering and Applications, 2021, 57(20): 229-235.
- [19] Moreno I. Configurations of LED arrays for uniform illumination[C]//5th Iberoamerican Meeting on Optics, and 8th Latin American Meeting on Optics, Lasers, and their Applications, October 3-8, 2004, Porlamar, Venezuela. [S.l.:s.n.], 2004: 713-718.
- [20] Karaduta O K, Deon A F, Menyaev Y A. Designing the uniform stochastic photomatrix therapeutic systems[J]. Algorithms, 2020, 13(2): 41.