

# 金属桶内底部缺陷检测照明方案仿真研究

瞿永顺\*, 余桂英, 张宝武\*\*, 赵美丹, 林瑞杰

中国计量大学计量测试工程学院, 浙江 杭州 310018

**摘要** 针对大型金属桶内底部高反射表面缺陷检测难度大的问题,提出了一种内窥式的机器视觉检测方法。综合考虑金属桶的结构特性和表面特性,结合双向散射分布函数,对桶底的非正向照明方案进行了仿真研究。结果表明,在理论条件下,桶底照度呈现良好的均匀性。对应的实验验证结果显示,实际照明情况与仿真结果基本一致,相比于一般照明方式,图像的质量得到了有效提高。

**关键词** 光学设计; 机器视觉; 高反射表面; 照明设计; 缺陷检测

中图分类号 O435

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0822001

## Simulation Research on Illumination Scheme for Bottom Defect Detection of Metal Barrel

Qu Yongshun\*, Yu Guiying, Zhang Baowu\*\*, Zhao Meidan, Lin Ruijie

College of Metrology and Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China

**Abstract** In view of the difficulty in detecting the high reflective surface defects in the bottom of a large metal barrel, an endoscopic illumination scheme is proposed. Comprehensively considering the structural and surface characteristics of the metal barrel, a simulation study on the non-forward illumination scheme of the barrel bottom is conducted based on the bidirectional scattering distribution function (BSDF). The results show that the illuminance at the bottom of the barrel presents a good uniformity under theoretical conditions. The corresponding experimental verification results indicate that the actual illumination conditions are basically the same as the simulation results. The proposed scheme can obtain better image quality than the general illumination scheme.

**Key words** optical design; machine vision; highly reflective surface; illumination design; defect detection

**OCIS codes** 220.2740; 150.1835; 220.2945

## 1 引言

金属桶生产过程中会出现异物、油污、锈斑、划痕等缺陷,目前大多数企业仍采取效率较低的人工抽样检测法,工人需要在强光下从不同的角度进行观察,其视力容易受损。随着计算机硬件性能及理论算法研究的飞速发展,机器视觉检测技术凭借低成本、高稳定性、高效率等优势而逐步在工业生产中取代人工检测<sup>[1]</sup>。机器视觉检测金属桶内缺陷的主

要难点在于其自身几乎封闭的结构和桶内的高反射表面。

机器视觉检测的研究方向主要分为算法研究<sup>[2]</sup>和图像采集系统设计,后者包括成像系统、照明系统等硬件结构的设计,是整个视觉检测系统的基础。其中,合理设计照明系统对降低检测算法的难度和复杂性有着重要意义<sup>[3]</sup>。决定照明方式的主要因素是目标面的光学特性。目标面主要分为高反射面、漫反射面及透射面,其中高反射面有极强的反光特

收稿日期: 2020-07-27; 修回日期: 2020-08-26; 录用日期: 2020-09-22

基金项目: 国家自然科学基金(51875543)、浙江省自然科学基金(LY17E050014)、浙江省公益技术研究计划(LGG18F050001)、广西高校光电信息处理重点实验室开放基金(KFJJ2017-02)

\* E-mail: 125028120@qq.com; \*\* E-mail: zhangbaowu@126.com

性<sup>[4]</sup>,能够将环境影像倒映在光滑零部件表面上。在获取图像的过程中,镜面反光特性会使采集的图像局部区域出现曝光过度的现象,严重影响缺陷检测的精度<sup>[5]</sup>,是公认的照明设计难点。

针对高反射面缺陷检测的问题,已有大量学者进行了研究。张于北等<sup>[6-7]</sup>提出了基于正弦线条纹投影的反光表面缺陷检测方法,采用移相技术提取相位,从而计算三维形面信息,实现缺陷检测,此类方法操作复杂,计算量大,且对表面光滑程度要求苛刻。熊显名等<sup>[8]</sup>利用宽度相等、灰度阶跃变化的明暗条纹实现了单次图像采集,即可检测打磨抛光工件,但这种方案无法检测污渍等非形变缺陷。以上几种方法都以显示器作为光源,而屏幕本身的发光亮度有限,且需要较大的工位空间,这类方法都不太适用于工厂的在线检测。宋宇航等<sup>[9]</sup>设计了附条纹的穹顶漫射光源并将其用于钢球表面的缺陷检测,在照明时需要留出两个窗口供相机进行图采集,被测物的表面会出现阴影,容易漏检。JEON 等<sup>[10]</sup>提出了一种开关照明(DLSL)与次优滤波结合的检测方法,通过交替查找黑白图案以检测钢板表面缺陷,这种方法对硬件配合要求较高,稳定性较差。陈瀚等<sup>[11]</sup>利用多个线激光对铸钢车轮进行三维测量,该方法需要高精度转台,硬件成本高且检测效率较低。目前高反射表面缺陷的检测方法有多种,但都有一定的局限性。大型金属桶内的缺陷检测需在封盖后进行,这使得照明及图像采集难度加大,国内关于底部高反射面缺陷的机器视觉检测研究鲜有报道。

针对金属桶底部高反射表面缺陷检测的难点,本文提出了一种内窥式非正向均匀照明的机器视觉检测方案。仿真结果表明,该方案在不同光照距离下都可实现金属桶内底部的均匀照明,具有较好的稳定性。通过成像实验证明了仿真结果的正确性,相对于其他一般照明方案,图像的质量得到了有效提高。

## 2 方案设计

### 2.1 内窥式非正向均匀照明方案

在金属桶底缺陷检测的照明方案设计中,主要的设计指标是桶底的照明均匀性。常用的照明方式有环形光源暗场照明<sup>[12]</sup>、穹顶光源散射照明<sup>[13]</sup>及同轴光照明<sup>[14]</sup>,这类照明方式都需要将光源悬置于金属罐的正上方,只适用于结构简单的小型无盖罐体。鉴于金属桶特殊的生产工艺及结构,可通过外

摄式离轴照明方式及内窥式照明方式。前者会使桶壁产生大量的高光噪声;后者会使桶底中心区域出现过曝现象,而周围光照严重不足。为了解决以上不足,本文提出了一种内窥式非正向照明的机器视觉检测方案,其照明光路如图 1 所示。通过照明仿真实验,验证了本方案的可行性。为了进一步验证本方案的实用性,将其与其他常规照明方案进行了对比。

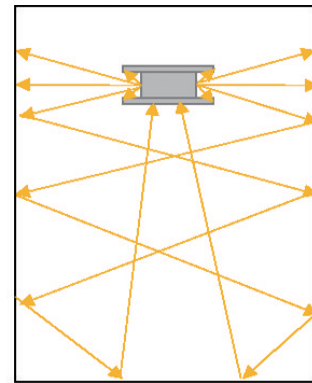


图 1 内窥式非正向照明光路图

Fig. 1 Optical path diagram for endoscopic non-positive illumination

### 2.2 表面散射光学模型

金属桶内底部的高反射表面在实际检测时既不是漫反射表面也不是理想镜反射表面,鉴于其特殊的复杂性,将双向散射分布函数<sup>[15]</sup>(BSDF,  $B_s$ )引入到目标表面材料特性中进行仿真。BSDF 是表面散射的通用函数,其模型的几何关系如图 2 所示,其中  $\theta_i, \varphi_i$  分别为入射光的入射角和方位角,  $\theta_r, \varphi_r$  分别为反射光的反射角和方位角,  $dL_r$  为面元  $dA$  在  $(\theta_r, \varphi_r)$  方向上的反射辐亮度,  $dE_i$  为  $(\theta_i, \varphi_i)$  方向上的入射辐照。

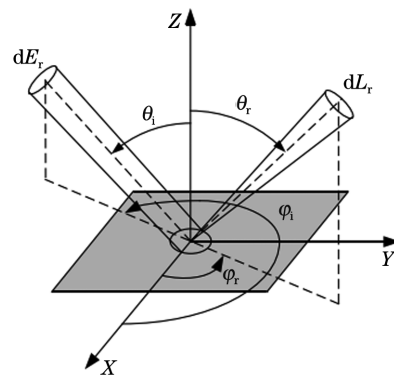


图 2 双向散射分布函数的几何关系图

Fig. 2 Geometric relationship of bidirectional scattering distribution function

在计算上,BSDF 定义为

$$B_s(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \frac{dL_r(\theta_r, \varphi_r)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i)} \quad (1)$$

根据表面特性的不同, BSDF 有三种特殊形态: 双向反射分布函数<sup>[16]</sup> (BRDF)、双向透射分布函数 (BTDF) 及双向衍射分布函数 (BDDF)。计算表面 BSDF 常采用实验测量法, 这种方式工作量庞大。因此学者们根据不同类型表面来构建不同的函数模型, 具有代表性的模型包括基于 BRDF 的 Lambert 模型、Oren-Nayar 模型、ward 模型<sup>[17]</sup> 和基于 BSDF 的 ABg 模型<sup>[18]</sup>。其中 ABg 模型为准幂数倒数模型, 可描述不同波长、不同角度的 BSDF 分布, 适用于多数表面, 尤其是高反射表面。其表达式为

$$B_s = \frac{A}{B + |\boldsymbol{\beta} - \boldsymbol{\beta}_0|^g}, \quad (2)$$

式中:  $A$ 、 $B$ 、 $g$  为待定参数;  $\boldsymbol{\beta}$  为散射方向单位向量在目标表面上的投影向量;  $\boldsymbol{\beta}_0$  为镜反射方向单位向量在目标表面上的投影向量。  $A$  表征散射最大值, 决定散射率,  $B$  和  $g$  决定散射特征, 分别表征曲线拐点位置及陡峭程度。

### 2.3 评价方法

当目标面与光源的距离大于面积平方根的 10 倍时, 可将光源视作点光源。在与照射方向垂直的平面上, 一个点光源产生的照度 ( $E_h$ ) 与光源至被照面的距离的平方 ( $l^2$ ) 成反比:

$$E_h = \frac{I(\theta)}{l^2}, \quad (3)$$

式中:  $I(\theta)$  为光源强度;  $\theta$  为入射光束与被照面法向之间的夹角。

LED 光源为非相关光源, 其光强分布是准 lambertian 分布, 可表示为

$$I(\theta) = I_0 \cos^{m+1} \theta, \quad (4)$$

式中:  $I_0$  为法向中心光强;  $m = -\ln 2 / \ln(\cos \theta_{1/2})$ , 其中  $\theta_{1/2}$  为光强为法向中心光强一半时所对应的角度。假设目标面上有一点  $P(x, y, z)$ , 单颗 LED 在  $P$  点处产生的照度<sup>[19]</sup> 为

$$E(x, y, z) = \frac{z^{m+1} I_0}{[(x - X)^2 + (y - Y)^2 + Z^2]^{\frac{m+2}{2}}}, \quad (5)$$

式中:  $(X, Y, Z)$  为光源的空间坐标;  $(x, y, z)$  为被照点的空间坐标。

为了进一步优化光路设计, 对照度图进行均匀性分析。评定照明面的照度均匀性常采用九点测试法<sup>[20]</sup>, 即将接受面分成均匀的九个区域, 利用照明区域中最小照度值 ( $E_{\min}$ ) 与平均照度值 ( $E_{\text{av}}$ ) 的比

值来表征照度均匀性 ( $U$ ):

$$U = \frac{E_{\min}}{E_{\text{av}}} \times 100. \quad (6)$$

根据仿真结果, 在图像检测时将图像分割为中心亮部区域和主体区域, 并对中心亮部区域进行光照补偿。因此, 在均匀性分析时只评价图像主体区域的光照度。仿真软件只能导出正方形目标面的表格数据, 而实际目标面为圆形, 因此目标面四个顶角数据是无效的。因此在光照度分析时, 将采样分析尺寸设置成  $256 \times 256$ , 在正方形目标面选取 13 个子区域, 其中 4 个顶角为无效区域, 中心亮部区域标注为 5, 其余为主体区域, 如图 3 所示。

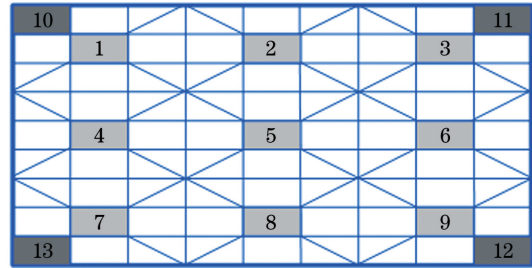


图 3 目标面测试区域的分布图

Fig. 3 Distribution map of target surface test areas

计算各个主体区域的照度平均值 [average ( $E_1, E_2, E_3, E_4, E_6, E_7, E_8, E_9$ )], 再计算最小照度值 [min ( $E_1, E_2, E_3, E_4, E_6, E_7, E_8, E_9$ )] 与平均照度值的比值以表征照度均匀性:

$$U = \frac{\min(E_1, E_2, E_3, E_4, E_6, E_7, E_8, E_9)}{\text{average}(E_1, E_2, E_3, E_4, E_6, E_7, E_8, E_9)} \times 100\%. \quad (7)$$

## 3 光学仿真

### 3.1 系统结构及表面材料仿真

本文研究对象的桶体直径为 58 cm、高度为 105 cm, 其中桶盖部分分别开设两个直径为 6.4 cm 和 3.1 cm 的进出孔, 大孔用来装卸油料, 小孔用来平衡气压。利用 Solid Works 建立目标的几何模型, 主要包括图像采集系统及桶体, 如图 4 所示。

图像采集系统主要由光源、板级相机和挡光板构成, 其中光源由 8 颗 LED 灯珠均匀排布而成, 模型如图 5 所示。将建立好的几何模型导入 Trace Pro 中进行表面材料特性设置。所研究的金属桶材质为铝, 内表面为镀锌表面, 其吸收率可以忽略, 反射率经验值为 53%~67%, 取其中间值 60%, 一定数量的光线照射至目标面后, 40% (能量占比) 的光线以散射的形式出射, 60% (能量占比) 光线以镜面



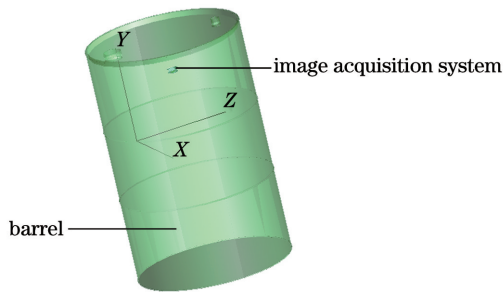


图 4 金属桶内底部照明系统的结构模型

Fig. 4 Structural model of bottom illumination system of metal barrel

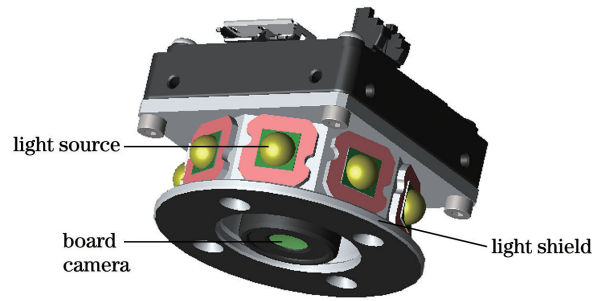


图 5 图像采集系统模型

Fig. 5 Model of image acquisition system

反射的形式出射,利用 Trace Pro 求解得出相关的 BSDF 系数: $A=0.175, B=0.12, g=0$ 。图像采集系统将表面设置为全吸收材料,内部介质设为理想真空状态。光源尺寸为  $3.45\text{ mm}\times 3.45\text{ mm}$ ,发光角为  $115^\circ$ ,单颗  $1\text{ W}$  的 LED 光源光通量为  $70\text{ lm}$ ,蓝光主波长为  $465\sim 485\text{ nm}$ 。

### 3.2 照明仿真及结果分析

本文采用蒙特卡罗光线追迹法对内窥式非正向

照明方案应用于金属桶缺陷检测的照明效果进行仿真。在不考虑界面光损失、光线数为 800 万条的条件下,对系统接受面的照明效果随光照距离的变化规律进行了研究。以  $50\text{ mm}$  为步长,将照明装置置于距桶底  $550\sim 800\text{ mm}$  处进行追光,得到目标平面照度分布图及照度分布曲线,仿真结果如图 6 所示。结果表明,在内窥式非正向照明条件下,桶底接受面的照度总体上呈现较好的均匀性,中心区域会出现

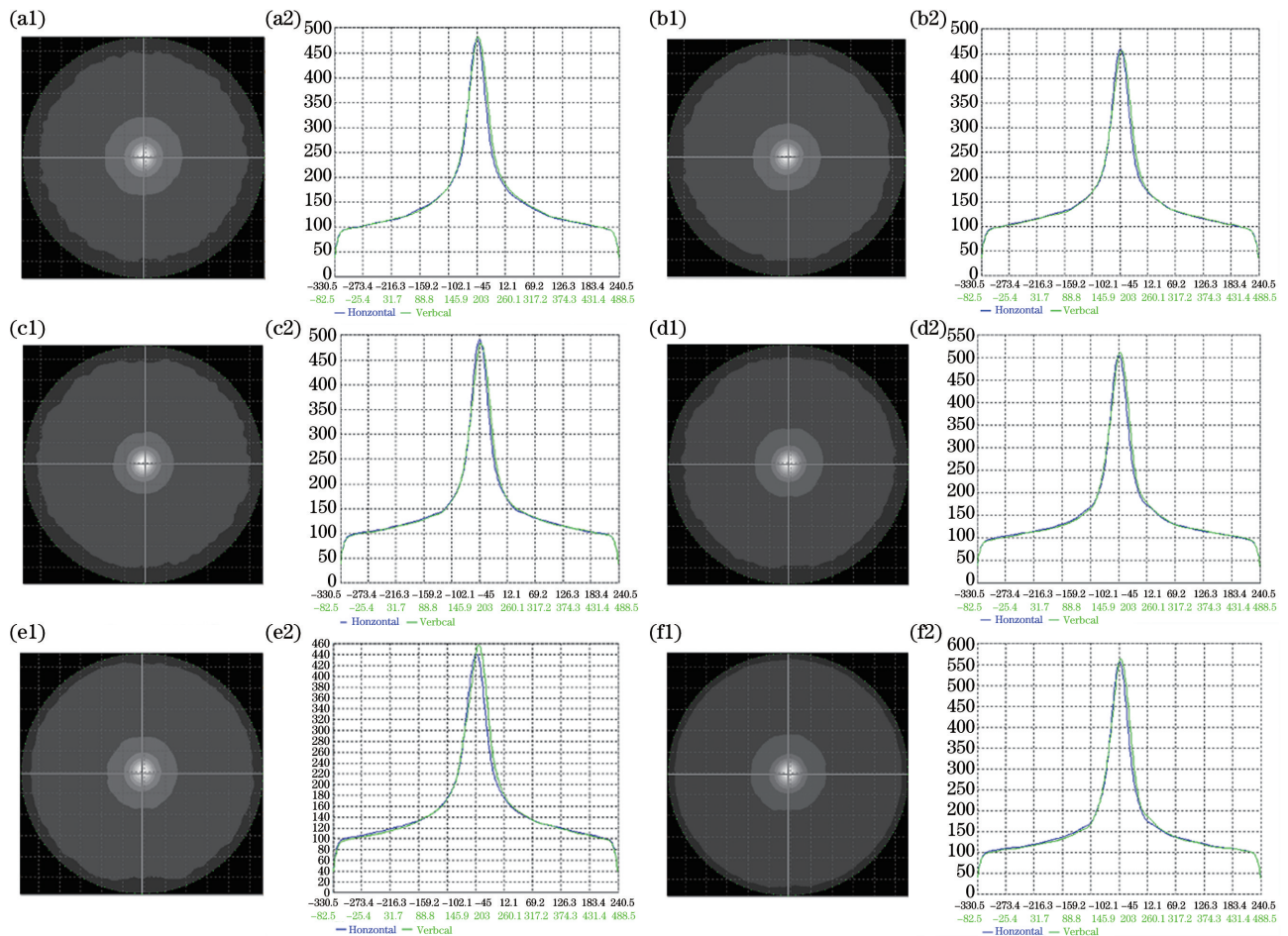


图 6 不同位置光照时目标平面照度分布及照度曲线图。(a1)(a2) 800 mm;(b1)(b2) 750 mm;(c1)(c2) 700 mm;

(d1)(d2) 650 mm;(e1)(e2) 600 mm;(f1)(f2)550 mm

Fig. 6 Illuminance distributions and illuminance curves of target plane illuminated at different positions. (a1) (a2) 800 mm; (b1) (b2) 750 mm; (c1) (c2) 700 mm; (d1) (d2) 650 mm; (e1) (e2) 600 mm; (f1) (f2) 550 mm

一个直径为 10 mm 左右的圆形微弱亮斑。亮斑越靠近圆心位置,照度越大,圆心处的照度峰值随着光照距离的增加呈现出先减小后增大的趋势,在 750 mm 处达到最低值 482.73 lux。另外,主体区域的边缘存在照度较低的环带,这是由桶底边缘的凹槽引起的,在实际检测时可利用该条件将桶底图

像与背景分离开。

根据九点测试法及变式后的计算方法,计算主体区域的照度均匀性及整体的照度均匀性,结果分别用照度平均值 1 和照度平均值 2 表示,如表 1 所示。结果表明,主体区域的照度均匀性及整体的照度均匀性分别大于 91.84% 与 74.62%。

表 1 不同位置光照时目标表面的照度均匀性

Table 1 Illuminance uniformity of object surface illuminated at different positions

Serial number	Distance/ mm	Minimum illuminance /lux	Average illuminance 1 /lux	Average illuminance 2 /lux	Subject area uniformity /%	Overall uniformity /%
1	550	105.08	113.12	140.12	92.89	74.99
2	600	102.11	110.13	133.22	92.72	76.65
3	650	99.13	107.55	132.84	92.17	74.62
4	700	98.46	106.51	130.78	92.44	75.29
5	750	98.38	107.12	129.97	91.84	75.69
6	800	98.03	106.13	129.32	92.37	75.80

## 4 验证及分析

### 4.1 验证实验

按照仿真时的照明方式进行验证实验。根据几何光学和光度学理论,选择合适的成像设备,理想情况下摄像系统像面照度的分布<sup>[21]</sup>为

$$E = \frac{\pi B_1}{4A_1^2} \left( \frac{L - f'}{f'} \right)^2 \cos^4(\omega), \quad (8)$$

式中: $B_1$ 为物体亮度; $L$ 为物距; $f'$ 为系统的焦距; $\omega$ 为视场角; $A_1 = f'/D$ 为镜头的光圈数,其中 $f'$ 为镜头焦距, $D$ 为物镜开口直径。根据所需视场直径为 650 mm、景深大于 10 mm 选型。相机采用海康威视的板级相机;靶面对角线长度为 1.49 mm,分辨率为 4032 pixel × 3036 pixel,像元尺寸为 1.85 μm × 1.85 μm;镜头采用璟扬安防镜头;焦

距为 8 mm,最大光圈数为 1.6。照明装置根据 3.1 节所述方法制作。以 50 mm 为步长,将实验装置置于距桶底 650~800 mm 处进行图像采集,并对图像进行光照补偿<sup>[22]</sup>,实验结果如图 7 所示。结果表明,实验装置在 800~650 mm 范围内移动时,桶底照明情况随距离的变化趋势与仿真结果基本一致,目标面的整体亮度随距离的减小而略微增大,照度均匀性基本不变,中心区域有一个微弱光斑,桶底边缘与背景存在明显的灰度差,主体区域照度均匀,照明效果较好,图像清晰。

实验结果表明,该内窥式非正向照明方案能被应用于金属桶内高反射表面缺陷的检测中。对于采集图像中出现的较弱光斑,可以通过光强补偿等图像处理法来提升图像质量,如图 7 所示。

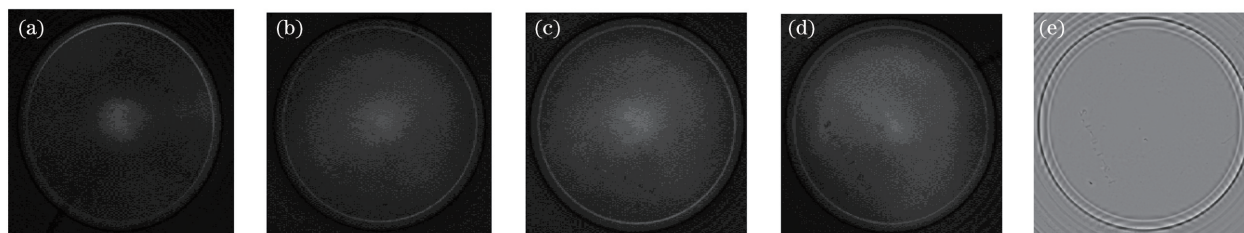


图 7 验证实验中不同位置光照时的桶底图像及光照补偿图。(a) 800 mm;(b) 750 mm;(c) 700 mm;(d) 650 mm;(e)光照补偿图

Fig. 7 Bottom images of barrel illuminated at different positions in verification experiment and illumination compensation map. (a) 800 mm; (b) 750 mm; (c) 700 mm; (d) 650 mm; (e) illumination compensation map

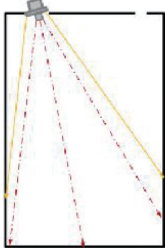
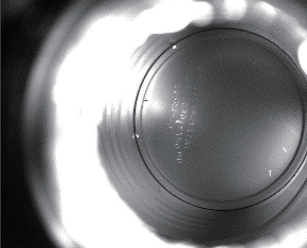
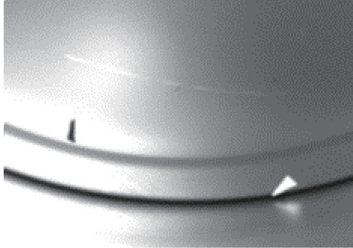
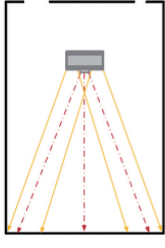
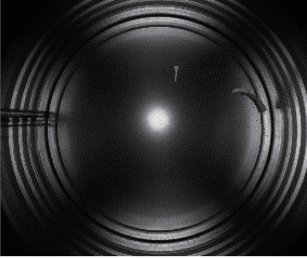
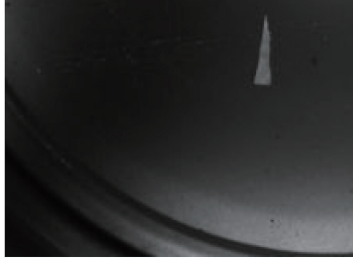
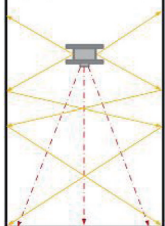
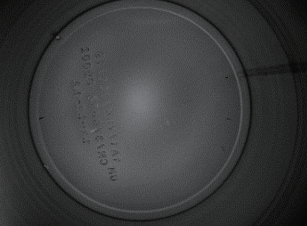

### 4.2 对比实验

为了进一步研究本方案的实用性,在三种照明

方式下分别对桶底进行图像采集,如表 2 所示。内窥式照明方案将气缸做成机械臂,将视觉模块固定



表 2 不同照明方式下的缺陷识别  
Table 2 Defect recognition for each illumination scheme

Illumination scheme	Light detection method	Captured image	Defect image
(a) Off-axis illumination by ring light source			
(b) Forward illumination by endoscopic ring light source			
(c) Non-forward illumination by endoscopic ring light source			

在机械臂上,机械臂连接气泵,当机械臂伸入桶内时,气泵充气加压,为气缸提供动力;机械臂弯曲,把成像模块置于桶内中心距桶底 650 mm 处。

表 2 中的方案均在镜头处放置偏振片进行初步高光削弱处理。由正向漫射式环形光源与工业面阵相机组成的外摄式离轴照明检测方案如表 2(a)所示,直观上可以看到金属桶底部部分缺陷,但是相机及光源只能倾斜工作,导致照度明显不均匀,桶底两侧出现大块高光区域,桶底外沿出现较大畸变,这些干扰因素不易于后期图像处理及检测。由小型正向漫射式环形光源与板级面阵相机组成的内窥式正向照明检测方案如表 2(b)所示,结果只能凸显大型瑕疵,由于金属桶的结构限制,小型环形灯会在桶底照射出一个高亮光斑,周围区域亮度较低,照度均匀性差,难以通过算法补偿。本文提出的由非正向环形光源与板级面阵相机组成的内窥式非正向照明检测方案如表 2(c)所示,直观上能准确识别出桶底缺陷,中心区域存在微弱的光斑,总体上目标照度均匀,易于后期图像处理及检测。

## 5 结 论

提出了一种用于机器视觉检测的内窥式非正向照明方案。基于 Trace Pro,进行了照度均匀性随光照距离变化的仿真,通过相应的实验验证了仿真结果。研究表明,在仿真条件下,将光源置于油桶中轴线处,灯珠面对桶壁,然后以 50 mm 步长在距桶底 800~650 mm 处进行非正向打光,光线经过桶壁多次反射后照射桶底,可实现桶底主体区域的均匀照明。成像实验结果表明,通过机械臂,将制作的检测装置伸入桶内以采集图像,该方法可以避免相机在桶口处倾斜拍摄带来的畸变影响,实际照明情况与仿真结果基本一致,所提方法能够获得清晰的桶内底部高反射表面信息完整的图像。综上所述,所提方案能够实现桶底均匀照明,下一步计划根据获取的图像进行图像质量评价及图像处理研究,并根据照明方案设计完整的检测系统以应用于实际检测中。

## 参 考 文 献

- [1] Lu R S, Wu A, Zhang T D, et al. Review on

- automated optical (visual) inspection and its applications in defect detection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(8): 0815002.
- 卢荣胜, 吴昂, 张腾达, 等. 自动光学(视觉)检测技术及其在缺陷检测中的应用综述 [J]. *光学学报*, 2018, 38(8): 0815002.
- [2] Macher J, Gruber D P, Altenbuchner T, et al. Detection of visually perceptible sink marks on high gloss injection molded parts by phase measuring deflectometry[J]. *Polymer Testing*, 2014, 34:42-48.
- [3] Wu X, Gao G. LED light design method for high contrast and uniform illumination imaging in machine vision[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(7): 1694-1704.
- [4] Huang L, Xue J P, Gao B, et al. Three-dimensional shape measurement with modal phase measuring deflectometry[J]. *SPIE*, 2017, 10449:1044909.
- [5] Liu T T, Wang P G, Zhang N. Subpixel defect detection in highly reflective workpieces based on Zernike moments [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(12): 121203.
- 刘婷婷, 王培光, 张娜. 基于 Zernike 矩亚像素的高反光金属工件缺陷检测 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(12): 121203.
- [6] Zhang Y B, Tang J, Yang D G. Detection of defects on a shining-metal surface using reflective fringe pattern[J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2013, 33(S1): 100-102.
- 张于北, 唐佳, 杨党纲. 对某金属件反光表面缺陷的反射条纹检测 [J]. *计测技术*, 2013, 33(S1): 100-102.
- [7] Zhao W C, Zhong X Y, Liu B. The surface flaws inspection of optical components based on the fringe reflection[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(9): 0912007.
- 赵文川, 钟显云, 刘彬. 基于条纹反射的光学表面疵病检测法 [J]. *光子学报*, 2014, 43(9): 0912007.
- [8] 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.
- 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.
- [9] Song Y H, Wang Z, Fu L H, et al. Detection of surface defect on highly reflective curved surface using reflective fringe pattern[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2017, 36(8): 1250-1254.
- 宋宇航, 王仲, 付鲁华, 等. 一种高反射曲面表面缺陷的反射条纹检测方法 [J]. *机械科学与技术*, 2017, 36(8): 1250-1254.
- [10] Jeon Y J, Choi D C, Lee S J, et al. Steel-surface defect detection using a switching-lighting scheme [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(1): 47-57.
- [11] Chen H, Zhang S J, Gao J, et al. Online three-dimensional measurement technology for steel wheel based on rotating scanning of multiple line-laser sensors[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(7): 0704006.
- 陈瀚, 张思瑾, 高见, 等. 基于多个线激光传感器旋转扫描的铸钢车轮在线三维测量技术 [J]. *中国激光*, 2019, 46(7): 0704006.
- [12] Chen T J, Wang Y N, Xiao C Y, et al. A machine vision apparatus and method for can-end inspection [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2016, 65(9): 2055-2066.
- [13] Hu X T, Dong Y Y. Detecting defects of metal cans' inner wall based on machine vision [J]. *Journal of Tianjin University of Science & Technology*, 2014, 29(3): 63-67.
- 胡晓彤, 董莹莹. 基于机器视觉的金属罐内壁缺陷检测 [J]. *天津科技大学学报*, 2014, 29(3): 63-67.
- [14] Zhang H Z. Research on online high speed defect detection system of empty cans [D]. *Guangzhou: Guangdong University of Technology*, 2018.
- 张宏钊. 易拉罐空罐在线高速缺陷检测系统研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2018.
- [15] Guo Y, Hasan M, Zhao S. Position-free Monte Carlo simulation for arbitrary layered BSDFs [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2019, 37(6): 1-14.
- [16] Lu M, Wang Z L, Gao P P, et al. A sub-aperture scanning Fourier transform system for fast BRDF measurements [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(13): 1329001.
- 陆敏, 王治乐, 高萍萍, 等. 用于快速 BRDF 测量的子孔径扫描傅里叶变换系统 [J]. *光学学报*, 2020, 40(13): 1329001.
- [17] Tong K J. Application research of machine vision non-Lambertian surface imaging theory in surface detection [D]. *Nanjing: Nanjing University of Science and Technology*, 2017.
- 童楷杰. 机器视觉非朗伯曲面成像理论在曲面检测中的应用研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
- [18] Stover J C. *Optical scattering: measurement and analysis* [M]. Washington, D.C.: SPIE, 1990.
- [19] 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.

- [20] Xu X B, Xu Z H, Mu D M, et al. Research on LED indoor lighting uniformity based on improved particle swarm optimization[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2019, 42(7): 918-923.  
徐晓冰, 徐治户, 穆道明, 等. 基于改进粒子群算法的 LED 室内照明光照均匀性研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2019, 42(7): 918-923.
- [21] Cai H Y, Liu T G, Fu W Q, et al. A system for examining the illumination uniformity of camera imaging planes [J]. Optical Technology, 2000, 26(5): 392-394, 399.  
蔡怀宇, 刘铁根, 傅维乔, 等. 一种照相机成像平面照度均匀度检测系统[J]. 光学技术, 2000, 26(5): 392-394, 399.
- [22] Zhang W, Guo J C. Low-illumination underwater image enhancement based on white balance and relative total variation[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(12): 121016.  
张薇, 郭继昌. 基于白平衡和相对全变分的低照度水下图像增强 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(12): 121016.