

文章编号 1004-924X(2015)11-3051-10

## 航天密封圈的曲面成像理论及其缺陷检测

何博侠\*, 张毅, 童楷杰, 李春雷, 刘若琳  
(南京理工大学机械工程学院, 江苏南京 210094)

**摘要:** 针对利用视觉图像技术检测 O 形(密封)圈这类全向曲面特征零件的表面缺陷时存在曲面成像一致性差的难题, 研究了曲面成像基础理论和航天系统用 O 形圈表面成像及其表面缺陷的全自动检测方法。首先, 把 O 形圈表面划分为细小网格状的曲面小块, 基于曲面小块的双向反射分布函数得到点光源辐照时曲面小块的辐射强度计算公式。然后, 通过半球积分求得空间连续光源辐照条件下曲面小块的辐射强度计算方法。最后, 结合 O 形圈曲面方程, 建立了 O 形圈表面成像理论, 并据此提出基于三镜头相机组的 O 形圈表面缺陷成像检测方法。对 O 形圈弧段曲面的成像实验表明: 理论计算的亮度分布与实际亮度分布一致, 垂直安装的镜头相机组对应的平均亮度误差为 6.8, 标准差为 12.6; 倾斜安装的镜头相机组相应的平均亮度误差最大为 19.4, 标准差为 10.3; 缺陷检测实验表明, 所提方法能可靠检测出 O 形圈表面任意位置的缺陷, 能够实现航天密封圈的全自动可靠检测。

**关键词:** 航天材料; 密封圈; 曲面成像; 缺陷检测; 双向反射分布函数; 自动检测

**中图分类号:** TP242.62; V253 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152311.3051

## Curved surface imaging theory and defect detection for sealing rings used in aerospace systems

HE Bo-xia\*, ZHANG Yi, TONG Kai-jie, LI Chun-lei, LIU Ruo-lin

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of  
Science and Technology, Nanjing 210094, China)

\* Corresponding author, E-mail: heboxia@163.com

**Abstract:** When machine vision technology is used to detect the surface defects of parts with omnidirectional curved surface characteristics such as 'O' sealing rings, it shows a poor consistency of surface imaging. To achieve the full-automatic and reliable detection of surface defects of 'O' rings used in aerospace systems, the curved surface imaging theory and the surface defect detecting methods of 'O' rings were investigated. Firstly, the surface of 'O' ring was divided into small pieces like small grids. Based on the bidirectional reflectance distribution function of surface pieces, the radiation strength calculation formula of surface pieces was derived under the condition of point light irradiation. Then, the radiation strength calculation method of surface pieces suitable for the space continuous light irradiation was obtained through a hemisphere integral. Finally, combining with the 'O' ring surface equation, the imaging theory of 'O' ring surface was established and the imaging and

收稿日期: 2015-07-13; 修订日期: 2015-09-12.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51175267, No. 51575281); 江苏省自然科学基金资助项目 (No. BK2010481); 教育部博士点基金资助项目 (No. 20113219120004)

detecting methods for ‘O’ ring surface defects based on three lens & camera units were proposed. The imaging experiment results of the segmental arc surfaces of ‘O’ rings indicate that the theoretical brightness distribution is consistent with the actual brightness. The average brightness error corresponding to the vertical lens & camera unit is 6.8 and its standard deviation is 12.6. The maximum average brightness error corresponding to the gradient lens & camera units is 19.4 and its standard deviation is 10.3. The defect detecting experiment results show that the proposed method detects reliably the defects in any location of the surface of ‘O’ rings and the proposed detecting system implements the automatic detection of the sealing rings in aerospace systems.

**Key words:** aerospace material; sealing ring; curved surface imaging; defect detection; bidirectional reflectance distribution function; automatic detection

## 1 引言

航天系统使用的密封圈不仅对材料和尺寸有着严格的要求,而且要严加控制表面缺陷。在各类密封圈中,O形橡胶密封圈(简称O形圈)是最常用的密封元件,其表面缺陷是影响密封系统可靠性的主要因素之一<sup>[1]</sup>。O形圈的表面缺陷主要有错位、错配、组合飞边、开模缩裂、过度修边、流痕、缺胶和凹痕等<sup>[2]</sup>。这些缺陷往往是引起密封泄漏和密封事故的起因,在航天系统中必须要做到零容忍<sup>[3]</sup>。密封圈表面缺陷的传统检测方法通常为目测法,发现问题后用工具显微镜或投影仪复查,但这种方法检测量大,工作强度高,眼睛容易疲劳,所以检测稳定性差且效率低<sup>[4]</sup>。

近年来,随着视觉图像技术的发展,基于机器视觉技术的检测系统成为工业检测领域的一种革新手段<sup>[5-6]</sup>。机器视觉具有非接触、信息量丰富、容易实现自动化和智能化等优点<sup>[7]</sup>。利用视觉图像技术可对密封圈的表面缺陷进行特征参数的自动提取和放大显示,解除了人眼直接观测的视疲劳及稳定性差的问题。此外,应用机器视觉技术还可对测检过程进行深度开发,构建专用的测检系统,从而实现智能化全自动检测<sup>[8]</sup>。

O形圈表面呈曲面外形,且具有外形尺寸与截面直径之比跨度较大的特点。在对O形圈表面进行视觉检测时,为了不漏检曲面上任意位置的缺陷,并获得较高的检测分辨率,需要解决曲面成像一致性差和全局成像时物面分辨率低的问题。本文针对航天密封系统用O形圈人工检测

效率低、可靠性不高的问题,研究了曲面成像理论,为构建可控环境以对O形圈表面进行全覆盖均匀成像提供了理论依据。并在此基础上提出了表面缺陷的高可靠性全自动检测方法,最后通过实验验证了所提方法的有效性。

## 2 曲面成像理论

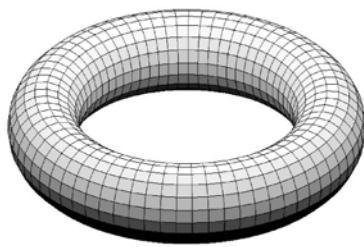
对O形圈表面成像时,图像中记录的亮度不仅与光源的辐照条件以及O形圈材料的反射特性有关,还与O形圈的表面形状有关。如图1(a)所示,O形圈表面是空间曲面,若将其划分为很细的网格,则每一格都是一个曲面小块,曲面小块的法向代表该小块的朝向。由于各曲面小块的朝向不同,成像时它们朝镜头方向辐射的光强不同,从而使图像探测器上对应的小块区域所接受的辐照强度也不同,最终形成与表面形状强相关的亮度不一致的图像,这会对表面缺陷的检测造成不利影响。

### 2.1 点光源曲面成像理论

为了掌握曲面成像规律,首先研究了曲面辐射与光源辐照和曲面朝向之间的关系,建立了曲面朝向的代数表达式。如图1(b)所示,在空间坐标系 $o-xyz$ 中, $\mathbf{n}$ 为曲面小块上某点的法向量,代表曲面小块在该点的朝向,曲面小块的单位法向量为:

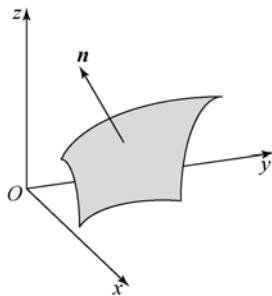
$$\hat{\mathbf{n}} = \frac{(-p, -q, 1)^T}{\sqrt{p^2 + q^2 + 1}}, \quad (1)$$

式中: $p$ 为曲面沿 $x$ 轴方向的斜率, $q$ 为曲面沿 $y$ 轴方向的斜率。



(a)O形圈曲面小块示意图

(a)Small pieces of curved surface of 'O' ring



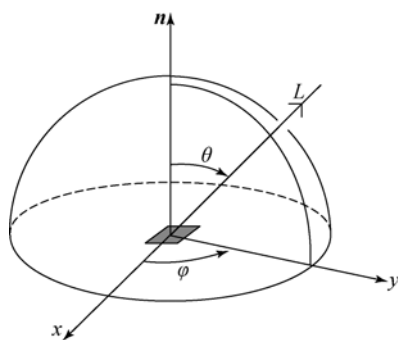
(b)曲面小块朝向示意图

(b)Orientation of small piece of curved surface

图 1 O形圈曲面小块及其朝向示意图

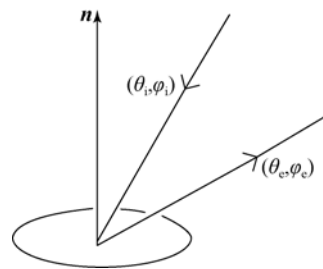
Fig.1 Curved surface pieces of 'O' ring and its orientation

光源辐照到物体表面的光线经表面材料的吸收和反射作用后向空间辐射。对空间曲面来说,各曲面小块的朝向不同,其接受光源辐照及自身辐射光线的作用也不同。因此,定义了以曲面小块朝向为基础的光线入射方向和出射方向的表示方法。如图 2(a)所示,设  $n$  为曲面小块的法向量,  $x$  为表面上的一条参考线,  $L$  为射入或者射出该小块的光线方向;  $\theta$  为该方向与曲面朝向之间的夹角,称为极角;  $\varphi$  表示该方向在曲面小块上的投影与参考线之间的夹角,称为方位角<sup>[9]</sup>。这样,入射光的方向可表示为  $(\theta_i, \varphi_i)$ , 出射光的方向表示为  $(\theta_e, \varphi_e)$ , 如图 2(b)所示。



(a)极角和方位角示意图

(a)Polar and azimuth angles



(b)入射光角度和出射光角度

(b)Incident light and emergent light angles

图 2 曲面小块的入射光及出射光方向示意图

Fig.2 Schematic diagram of directions of incident and emergent lights of small pieces of curved surfaces

如果沿着某一方向  $(\theta_i, \varphi_i)$  射入曲面小块的光的辐照强度为  $\Delta E(\theta_i, \varphi_i)$ , 从曲面小块沿着方向  $(\theta_e, \varphi_e)$  射出的光的辐射强度为  $\Delta I(\theta_e, \varphi_e)$ , 则该曲面小块的双向反射分布函数 (Bidirectional Reflection Distribution Function, BRDF) 为:

$$f(\theta_i, \varphi_i, \theta_e, \varphi_e) = \frac{\Delta I(\theta_e, \varphi_e)}{\Delta E(\theta_i, \varphi_i)} \quad (2)$$

从式(2)可以看出, 曲面小块的辐射强度  $\Delta I(\theta_e, \varphi_e)$  为光源辐照强度与 BRDF 的乘积。当沿着  $(\theta_e, \varphi_e)$  方向观测该曲面小块时,  $\Delta I(\theta_e, \varphi_e)$  即为曲面在该处的亮度。

O形橡胶密封圈由橡胶材料在磨具中压制成型, 其表面具有近似漫反射的光学性质<sup>[10]</sup>。这种性质的微表面的 BRDF 不是单独依赖于  $\varphi_i$  和  $\varphi_e$ , 而是依赖于入射光和反射光的方位角之差  $(\varphi_e - \varphi_i)$ <sup>[9]</sup>。因此, O形圈表面的 BRDF 是关于  $\theta_i, \theta_e$  及  $(\varphi_e, \varphi_i)$  的函数。Oren 等<sup>[11]</sup> 提出的漫反射表面 BRDF 为:

$$f(\theta_i, \varphi_i, \theta_e, \varphi_e) =$$

$$\frac{\rho}{\pi} (A + B \max[0, \cos(\varphi_e - \varphi_i)] \sin \alpha \tan \beta), \quad (3)$$

式中:  $\rho$  为漫反射率;  $A = 1 - 0.5 \frac{\sigma^2}{\sigma^2 + 0.33}$ ,  $B = 0.45 \frac{\sigma^2}{\sigma^2 + 0.09}$ ;  $\sigma$  为 Gauss 概率分布函数的标准差, 代表表面的粗糙程度;  $\alpha = \max[\theta_i, \theta_e]$ ,  $\beta = \min[\theta_i, \theta_e]$ 。

当光源的辐照强度为  $E_0$  时, 由式(2)、(3)可得曲面小块的辐射强度为:

$$\Delta I(\theta_i, \theta_e, \varphi_i, \varphi_e) = \frac{\rho}{\pi} E_0 \cos \theta_i \cdot$$

$$(A + B \max[0, \cos(\varphi_i - \varphi_e)] \sin \alpha \tan \beta). \quad (4)$$

由此可见,已知光源的辐照强度和角度以及曲面小块的朝向,即可根据式(4)求得曲面小块在 $(\theta_e, \varphi_e)$ 方向的辐射强度。

### 2.2 连续光源曲面成像理论

在点光源辐照条件下,曲面小块的辐射方程只考虑了一个方向的光线,而在实际工程环境中,成像条件要远比单点光源情况复杂,可能存在多个光源或者连续光源,此时需考虑各种类型光源的辐照及环境辐射条件。在这种情况下,曲面小块在 $(\theta_e, \varphi_e)$ 方向所成图像的亮度是式(4)在所有可能入射光方向所形成的半球上的积分。

如图 3 所示,设曲面小块受到来自连续光源各个方向的辐照,在 $(\theta, \varphi)$ 方向取极角为 $\Delta\theta$ ,方位角为 $\Delta\varphi$ 的微小区域,设光源沿 $(\theta, \varphi)$ 方向射入单位立体角的辐照强度为 $E(\theta, \varphi)$ ,则该微小区域对曲面小块的辐照强度为 $\Delta\theta\Delta\varphi E(\theta, \varphi) \sin \theta$ ,曲面小块受到的总的辐照强度为:

$$E_0 = \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} E(\theta, \varphi) \sin \theta \cos \theta d\theta d\varphi. \quad (5)$$

对于漫反射表面,曲面小块在 $(\theta_e, \varphi_e)$ 方向的辐射强度为:

$$I(\theta_e, \varphi_e) = \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} E(\theta, \varphi) \cos \theta \sin \theta \cdot (A + B \max[0, \cos(\varphi_e - \varphi)]) \sin \theta \tan \beta d\theta d\varphi. \quad (6)$$

根据式(6)即可分析和计算空间任意光源辐照情况下曲面小块在探测器上的辐射强度。

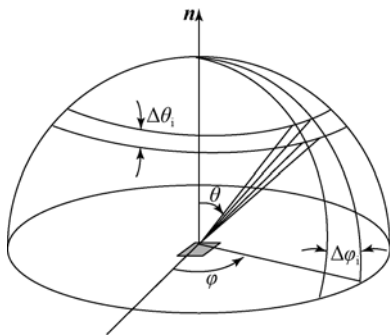


图 3 连续光源辐照曲面小块示意图

Fig. 3 Schematic diagram of curved surface piece irradiated by continuum light source

## 3 O 形圈表面缺陷检测方法

由于区域分割等用于缺陷识别的算法已有相

当多的报道<sup>[12]</sup>,O形圈曲面特征的缺陷检测的关键是如何获得能记录真实缺陷信息的比较均匀的原始图像。因此,需要建立 O 形圈表面成像理论,并依据该理论设计能满足航天密封圈高可靠检测的方案。

### 3.1 O 形圈表面成像理论

O 形圈表面是圆环面,设  $p(x, y, z)$  为其表面上任意一点,则它在图 4 所示的  $o-xyz$  坐标系中的曲面方程为:

$$(\sqrt{x^2 + y^2} - R)^2 + z^2 = r^2, \quad (7)$$

其中: $R = \frac{d_1 + d_2}{2}$ ,  $r = \frac{d_2}{2}$ ,  $d_1$  为 O 形圈内径,  $d_2$  为 O 形圈的截面直径。

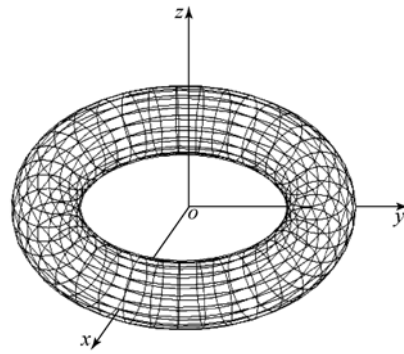


图 4 空间坐标系中的 O 形圈表面

Fig. 4 Surface of 'O' rings in space coordinate system

设 O 形圈表面上任一点  $p(x, y, z)$  处曲面小块的朝向  $\mathbf{n}$  为 $(-p, -q, 1)^T$ ,则由式(7)可得:

$$p = \frac{\partial z(x, y)}{\partial x} = \frac{x(R - \sqrt{x^2 + y^2})}{z \sqrt{x^2 + y^2}}, \quad (8)$$

$$q = \frac{\partial z(x, y)}{\partial y} = \frac{y(R - \sqrt{x^2 + y^2})}{z \sqrt{x^2 + y^2}}. \quad (9)$$

光源的入射方向  $\mathbf{s}$  为 $(-p_s, -q_s, 1)^T$ ,观测方向  $\mathbf{v}$  为 $(-p_e, -q_e, 1)^T$ ,则曲面小块的辐照极角  $\theta$ ,辐射极角  $\theta_e$  及入射光和反射光的方位角之差 $(\varphi_e - \varphi)$ 分别为:

$$\theta = \arccos \frac{\mathbf{n}^T \mathbf{s}}{\|\mathbf{n}\| \|\mathbf{s}\|} = \arccos \frac{p p_s + q q_s + 1}{\sqrt{p^2 + q^2 + 1} \cdot \sqrt{p_s^2 + q_s^2 + 1}}, \quad (10)$$

$$\theta_e = \arccos \frac{\mathbf{n}^T \mathbf{v}}{\|\mathbf{n}\| \|\mathbf{v}\|} = \arccos \frac{p p_c + q q_c + 1}{\sqrt{p^2 + q^2 + 1} \cdot \sqrt{p_c^2 + q_c^2 + 1}}, \quad (11)$$

$$\varphi_e - \varphi_i = \arccos \frac{(\mathbf{s} - \mathbf{n})^T (\mathbf{v} - \mathbf{n})}{\|\mathbf{s} - \mathbf{n}\| \|\mathbf{v} - \mathbf{n}\|} = \arccos \frac{(p - p_s)(p - p_c) + (q - q_s)(q - q_c)}{\sqrt{(p - p_s)^2 + (q - q_s)^2} \cdot \sqrt{(p - p_c)^2 + (q - q_c)^2}}, \quad (12)$$

将以上 3 式代入式(6),即可计算 O 形圈表面上任一点在任意光源辐照条件下在某方向的辐射强度,即该方向作为成像方向时图像上对应点的亮度。

从式(10)、(11)、(12)可以看出,O 形圈表面曲面小块的朝向随位置而变化,因此,在光源辐照方向和镜头成像方向一定时,其表面不同区域对应的图像亮度也不同。甚至在 O 形圈所成的全景图像中,由于不同区域入射极角和出射极角的变化很大,会在一些区域出现高亮饱和区,而在另一些区域出现图像黑暗区,这非常不利于表面缺陷的检测。

为了实现 O 形圈这类全向曲面特征零件的视觉图像检测,这里根据上述公式表达的光源辐照、曲面朝向及表面辐射之间的成像约束关系构建了可控环境,以对 O 形圈表面进行全覆盖均匀成像。

### 3.2 O 形圈表面缺陷成像检测方法

从 O 形圈表面成像理论可以看出,若要从一定角度获得 O 形圈的全局均匀图像,光源辐照强度  $E(\theta, \varphi)$  需随 O 形圈曲面面型而变化,这种理想光源在工程实际中很难实现。针对工程上常见的辐照强度不变的直线型光源,一种比较可行的方法是:缩小成像视场,对 O 形圈表面局部弧段成像,将短弧段近似为直线。如图 5 所示,从某一截面的上半周 3 个不同角度组合打光和成像,以获得亮度尽可能均匀的图像,同时控制 O 形圈绕

其几何中心旋转,这样便可对其上表面进行整圆周观测。检测完成后,将 O 形圈翻过来放置,重复上述过程,即可实现 O 形圈表面的全覆盖检测。这一方案通过缩小成像视场提高了物面分辨率,进而提高了对微小缺陷的识别能力。

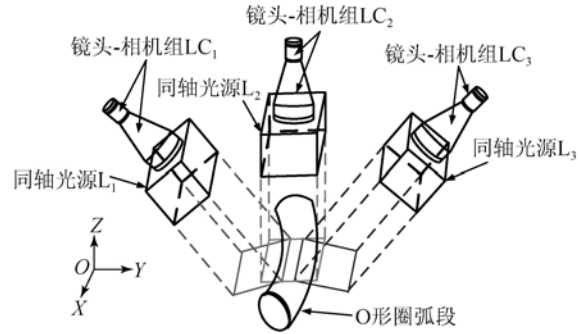


图 5 O 形圈弧段表面成像示意图

Fig. 5 Imaging scheme on surface of segmental arcs of O ring

图 5 中,LC<sub>1</sub> 镜头-相机组用于观测 O 形圈内侧面,所成图像的光强分布主要受同轴光源 L<sub>1</sub> 和 L<sub>2</sub> 的影响;LC<sub>2</sub> 镜头-相机组用于观测 O 形圈上表面,所成图像的光强分布同时受同轴光源 L<sub>1</sub>,L<sub>2</sub> 和 L<sub>3</sub> 的影响;LC<sub>3</sub> 镜头-相机组用于观测 O 形圈外侧面,所成图像的光强分布主要受同轴光源 L<sub>2</sub> 和 L<sub>3</sub> 的影响。设 O-XYZ 坐标系的原点位于 O 形圈的几何中心,并将同轴光源简化为平行光辐照,则 LC<sub>1</sub> 镜头-相机组和同轴光源 L<sub>1</sub> 的方向向量为  $(0, -1, 1)^T$ ,LC<sub>2</sub> 镜头-相机组和同轴光源 L<sub>2</sub> 的方向向量为  $(0, 0, 1)^T$ ,LC<sub>3</sub> 镜头-相机组和同轴光源 L<sub>3</sub> 的方向向量为  $(0, 1, 1)^T$ 。联列式(10)、(11)、(12)及(6),可得 O 形圈在 LC<sub>1</sub> 镜头-相机组所成图像的光强分布情况如下:

(1)当  $p^2 + q^2 - q \leq 0$  时,

$$I(p, q) = \frac{\rho}{\pi} E_0 \left[ A \frac{\sqrt{2} + 1 + q}{\sqrt{2(p^2 + q^2 + 1)}} + B \frac{2p^2 + (q-1)^2}{2(p^2 + q^2 + 1)} \right]; \quad (13)$$

(2)当  $p^2 + q^2 - q > 0$  且  $-1 < q < \sqrt{2} - 1$  时,

$$I(p, q) = \frac{\rho}{\pi} E_0 \left[ A \frac{\sqrt{2} + 1 + q}{\sqrt{2(p^2 + q^2 + 1)}} + B \left[ \frac{2p^2 + (q-1)^2}{2(p^2 + q^2 + 1)} + \frac{(p^2 + q^2 - q) \sqrt{(q-1)^2 + 2p^2}}{\sqrt{2(p^2 + q^2 + 1)} \sqrt{(q-1)^2 + p^2}} \right] \right]; \quad (14)$$

(3)当  $p^2 + q^2 - q > 0$  且  $q > \sqrt{2} - 1$  时,

$$I(p, q) = \frac{\rho}{\pi} E_0 \left[ A \frac{\sqrt{2} + 1 + q}{\sqrt{2(p^2 + q^2 + 1)}} + B \left[ \frac{2p^2 + (q-1)^2}{2(p^2 + q^2 + 1)} + \frac{(p^2 + q^2 - q) \sqrt{(q-1)^2 + 2p^2}}{(p^2 + q^2 + 1)(1 + q) \sqrt{(q-1)^2 + p^2}} \right] \right]. \quad (15)$$

同理,还可得到 O 形圈在 LC<sub>2</sub> 和 LC<sub>3</sub> 镜头-垂直安装镜头-相机组 LC<sub>2</sub> 所成图像的光强分布情况如下:

(1) 当  $q > 1$  时,

$$I(p, q) = \frac{\rho}{\pi} E_0 \left[ A \frac{\sqrt{2}+1+q}{\sqrt{2(p^2+q^2+1)}} + B \left[ \frac{p^2+q^2}{p^2+q^2+1} + \frac{(p^2+q^2-q)\sqrt{(q-1)^2+2p^2}}{\sqrt{2(p^2+q^2+1)}\sqrt{(q-1)^2+p^2}} \right] \right]. \quad (16)$$

(2) 当  $q < -1$  时,

$$I(p, q) = \frac{\rho}{\pi} E_0 \left[ A \frac{\sqrt{2}+1+q}{\sqrt{2(p^2+q^2+1)}} + B \left[ \frac{p^2+q^2}{p^2+q^2+1} + \frac{(p^2+q^2+q)\sqrt{(q+1)^2+2p^2}}{\sqrt{2(p^2+q^2+1)}\sqrt{(q+1)^2+p^2}} \right] \right]. \quad (17)$$

(3) 当  $0 < q < 1$  时,

① 当  $p^2+q^2-q \leq 0$  且  $p^2+q^2+q \leq 0$  时,

$$I(p, q) = \frac{\rho}{\pi} E_0 \left[ A \frac{\sqrt{2}+1}{\sqrt{p^2+q^2+1}} + B \frac{p^2+q^2}{p^2+q^2+1} \right]. \quad (18)$$

② 当  $p^2+q^2-q \leq 0$  且  $p^2+q^2+q \geq 0$  时,

$$I(p, q) = \frac{\rho}{\pi} E_0 \left[ A \frac{\sqrt{2}+1}{\sqrt{p^2+q^2+1}} + B \left[ \frac{p^2+q^2}{p^2+q^2+1} + \frac{(p^2+q^2+q)(1-q)\sqrt{(q+1)^2+2p^2}}{2(p^2+q^2+1)\sqrt{(q+1)^2+p^2}} \right] \right]. \quad (19)$$

③ 当  $p^2+q^2-q > 0$  时,

$$I(p, q) = \frac{\rho}{\pi} E_0 \left[ A \frac{\sqrt{2}+1}{\sqrt{p^2+q^2+1}} + B \left[ \frac{p^2+q^2}{p^2+q^2+1} + \frac{(p^2+q^2+q)(1-q)\sqrt{(q+1)^2+2p^2}}{2(p^2+q^2+1)\sqrt{(q+1)^2+p^2}} + \frac{(p^2+q^2-q)\sqrt{(q-1)^2+2p^2}}{\sqrt{2(p^2+q^2+1)}\sqrt{(q-1)^2+p^2}} \right] \right]. \quad (20)$$

(4) 当  $-1 < q < 0$  时,

① 当  $p^2+q^2-q \leq 0$  时,

$$I(p, q) = \frac{\rho}{\pi} E_0 \left[ A \frac{\sqrt{2}+1}{\sqrt{p^2+q^2+1}} + B \frac{p^2+q^2}{p^2+q^2+1} \right]. \quad (21)$$

② 当  $p^2+q^2-q \geq 0$  且  $p^2+q^2+q \leq 0$  时,

$$I(p, q) = \frac{\rho}{\pi} E_0 \left[ A \frac{\sqrt{2}+1}{\sqrt{p^2+q^2+1}} + B \left[ \frac{p^2+q^2}{p^2+q^2+1} + \frac{(p^2+q^2-q)(1+q)\sqrt{(q-1)^2+2p^2}}{2(p^2+q^2+1)\sqrt{(q-1)^2+p^2}} \right] \right]. \quad (22)$$

③ 当  $p^2+q^2-q \geq 0$  且  $p^2+q^2+q > 0$  时,

$$I(p, q) = \frac{\rho}{\pi} E_0 \left[ A \frac{\sqrt{2}+1}{\sqrt{p^2+q^2+1}} + B \left[ \frac{p^2+q^2}{p^2+q^2+1} + \frac{(p^2+q^2-q)(1+q)\sqrt{(q-1)^2+2p^2}}{2(p^2+q^2+1)\sqrt{(q-1)^2+p^2}} + \frac{(p^2+q^2+q)\sqrt{(q+1)^2+2p^2}}{\sqrt{2(p^2+q^2+1)}\sqrt{(q+1)^2+p^2}} \right] \right]. \quad (23)$$

右倾斜安装镜头-相机组 LC<sub>3</sub> 所成图像的光强分布情况如下:

(1) 当  $p^2+q^2+q \leq 0$  时,

$$I(p, q) = \frac{\rho}{\pi} E_0 \left[ A \frac{\sqrt{2}+1-q}{\sqrt{2(p^2+q^2+1)}} + B \frac{2p^2+(q+1)^2}{2(p^2+q^2+1)} \right]. \quad (24)$$

② 当  $p^2+q^2+q > 0$  且  $1-\sqrt{2} < q < 1$  时,

$$I(p, q) = \frac{\rho}{\pi} E_0 \left[ A \frac{\sqrt{2}+1-q}{\sqrt{2(p^2+q^2+1)}} + B \left[ \frac{2p^2+(q+1)^2}{2(p^2+q^2+1)} + \frac{(p^2+q^2+q)\sqrt{(q+1)^2+2p^2}}{\sqrt{2(p^2+q^2+1)}\sqrt{(q+1)^2+p^2}} \right] \right]. \quad (25)$$

③ 当  $p^2+q^2+q > 0$  且  $q < 1-\sqrt{2}$  时,

$$I(p, q) = \frac{\rho}{\pi} E_0 \left[ A \frac{\sqrt{2} + 1 - q}{\sqrt{2(p^2 + q^2 + 1)}} + B \left( \frac{2p^2 + (q+1)^2}{2(p^2 + q^2 + 1)} + \frac{(p^2 + q^2 + q) \sqrt{(q+1)^2 + 2p^2}}{(p^2 + q^2 + 1)(1-q) \sqrt{(q+1)^2 + p^2}} \right) \right]. \quad (26)$$

从上式可见,当 O 形圈表面存在缺陷时,缺陷处的曲面朝向将偏离正常方位,O 形圈所成图像在缺陷位置处将发生亮度突变,与周围正常区域形成反差,这便为本文缺陷检测的依据。

### 4 实验及结果

#### 4.1 O 形圈表面成像实验

根据前述方案组建的 O 形圈表面缺陷检测系统如图 6 所示。该系统主要由远心镜头和同轴光源组成的 3 套镜头-相机组以及回转工作台构成。其中,LC<sub>2</sub> 镜头-相机组垂直安装,LC<sub>1</sub>、LC<sub>3</sub> 镜头-相机组与工作台分别成 130°和 50°倾斜安装。表 1 为该系镜头-相机组的技术参数和标定参数。

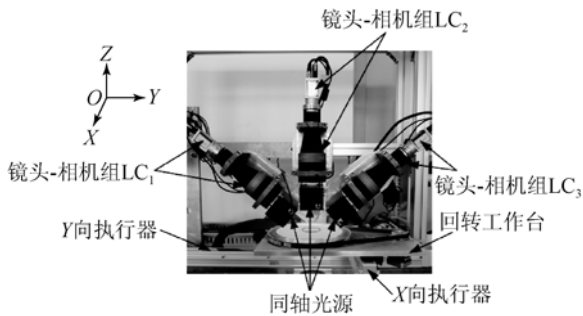


图 6 O 形圈表面缺陷检测实验系统

Fig. 6 Experimental system for surface defect detection of 'O' rings

表 1 镜头-相机组技术的参数及标定参数

Tab. 1 Technical and calibrating parameters of lens & camera units

镜头-相机组	技术参数		
	视场大小 H×W/mm	分辨率/ (pixel×pixel)	像素当量/ (mm·pixel <sup>-1</sup> )
LC <sub>1</sub> , LC <sub>2</sub> , LC <sub>3</sub>	22.1×29.3	1 200×1 600	δx = 0.018 3 δy = 0.018 3

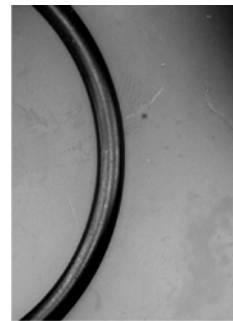
图 7 为 LC<sub>1</sub>, LC<sub>2</sub>, LC<sub>3</sub> 镜头-相机组分别采集的 O 形圈同一弧段表面的原始图像,图 8 为根据式(13)~(26)计算得到的理论亮度分布与实际亮度分布的曲面图(亮度取值为 0~255)。表 2 为

该弧段上每一像素点的理论亮度值与实际亮度值之差的均值和标准差。从这些图表可以看出,理论分布与实际分布的趋势基本一致,但理论计算所得平均亮度的误差与标准差还是比较大,平均亮度的最大误差和最大标准差分别为 19.4 和 13.1。这主要是由把同轴光源近似为平行光辐照,以及未考虑环境光辐照引起的。



(a)LC<sub>1</sub> 镜头-相机组所成图像

(a)Image captured by lens & camera unit LC<sub>1</sub>



(b)LC<sub>2</sub> 镜头-相机组所成图像

(b)Image captured by lens & camera unit LC<sub>2</sub>

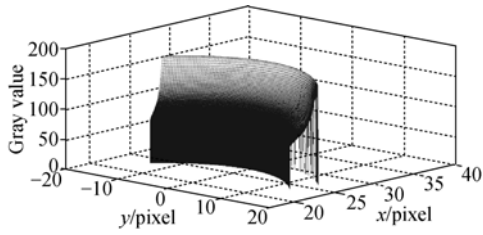


(c)LC<sub>3</sub> 镜头-相机组所成图像

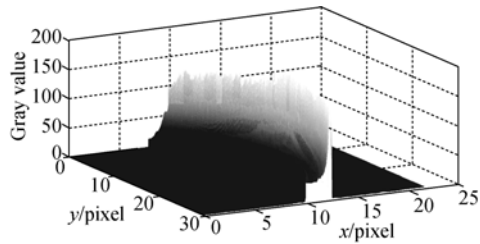
(c)Image captured by lens & camera unit LC<sub>3</sub>

图 7 O 形圈弧段在各镜头-相机组所成原始图像

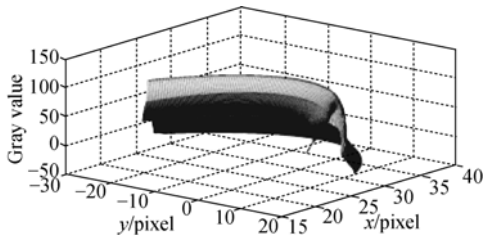
Fig. 7 Original images of segmental arc of 'O' ring captured by lens & camera units



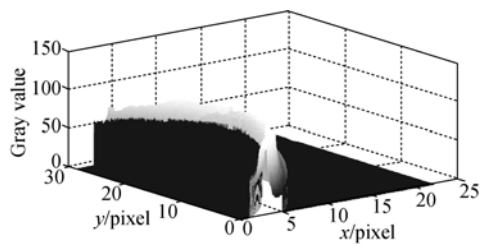
(a) LC<sub>1</sub> 单元所成图像的理论分布图  
(a) Theoretical distribution of image in unit LC<sub>1</sub>



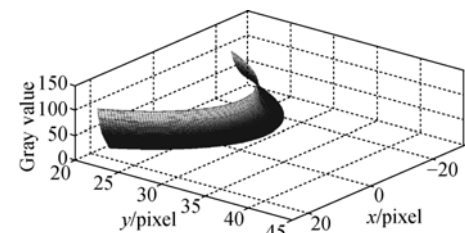
(b) LC<sub>1</sub> 单元所成图像的实际分布图  
(b) Actual distribution of image in unit LC<sub>1</sub>



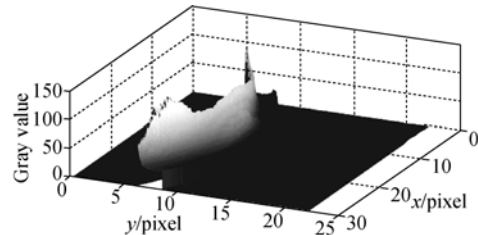
(c) LC<sub>2</sub> 单元所成图像的理论分布图  
(c) Theoretical distribution of image in unit LC<sub>2</sub>



(d) LC<sub>2</sub> 单元所成图像的实际分布图  
(d) Actual distribution of image in unit LC<sub>2</sub>



(e) LC<sub>3</sub> 单元所成图像的理论分布图  
(e) Theoretical distribution of image in unit LC<sub>3</sub>



(f) LC<sub>3</sub> 单元所成图像的实际分布图  
(f) Actual distribution of image in unit LC<sub>3</sub>

图 8 O 形圈表面成像的理论亮度与实际亮度分布对比  
Fig. 8 Comparison of distribution between theoretical brightness and actual brightness for surface imaging of O ring

表 2 O 形圈表面成像理论亮度与实际亮度误差表

Tab. 2 Errors between theoretical brightness and actual brightness for surface imaging of O ring

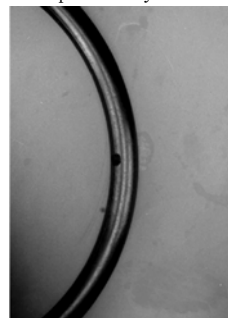
成像镜头-相机组	误差项目	
	平均亮度误差	误差的标准差
LC <sub>1</sub>	19.4	10.3
LC <sub>2</sub>	6.8	12.6
LC <sub>3</sub>	10.6	13.1

#### 4.2 O 形圈表面缺陷检测实验

图 9 为一凹坑缺陷分别在 LC<sub>1</sub>, LC<sub>2</sub>, LC<sub>3</sub> 镜头-相机组所成的原始图像。该凹坑位于 O 形圈内侧面, 从图中可以看出, 它在左侧镜头-相机组 LC<sub>1</sub> 中所成图像更接近正视投影。



(a) LC<sub>1</sub> 镜头-相机组获得的缺陷图像  
(a) Image of defect captured by lens & camera unit LC<sub>1</sub>



(b) LC<sub>2</sub> 镜头-相机组获得的缺陷图像  
(b) Image of defect captured by lens & camera unit LC<sub>2</sub>



(c)LC<sub>3</sub> 镜头-相机组获得的缺陷图像

(c)Image of defect captured by lens & camera unit LC<sub>3</sub>

图 9 O 形圈表面缺陷的原始图像

Fig. 9 Original images of surface defect of O ring

首先对原始图像预处理去除背景,得到 O 形圈弧段的图像,然后进行二值化、边缘检测和缺陷识别,最终处理得到的图像如图 10 所示。

从图 10 可以看出,对于 O 形圈内侧面的缺陷,利用左倾斜安装的镜头-相机组 LC<sub>1</sub> 观测最为有利,而右倾斜安装的镜头-相机组 LC<sub>3</sub> 由于只能获得遮挡的投影视图,所以不适合观测内侧面缺陷。竖直安装的镜头-相机组 LC<sub>2</sub> 可以用来观测内侧靠上的缺陷,此时,与 LC<sub>1</sub> 观测到的缺陷面积



(a)LC<sub>1</sub> 镜头-相机组对应图像

(a)Image corresponding to lens & camera unit LC<sub>1</sub>



(b)LC<sub>2</sub> 镜头-相机组对应图像

(b)Image corresponding to lens & camera unit LC<sub>2</sub>



(c)LC<sub>3</sub> 镜头-相机组对应图像

(c)Image corresponding to lens & camera unit LC<sub>3</sub>

图 10 表面缺陷图像处理结果

Fig. 10 Processing results of surface defect images

近似成 50° 夹角的投影关系;但当缺陷位于 O 形圈内径圆周附近时,由于遮挡投影的出现,LC<sub>2</sub> 观测的误差将会变大。表 3 中的实验数据证实了上述现象。其中,LC<sub>2</sub> 与 LC<sub>1</sub> 识别出的缺陷面积若按投影关系  $\cos 50^\circ$  计算,它与理论值的绝对误差为 0.14 mm<sup>2</sup>,相对误差为 13.7%。观察原始缺陷图像可以发现,LC<sub>2</sub> 识别出的缺陷面积误差较大是由于该缺陷局部接近 O 形圈内径圆周,在 LC<sub>2</sub> 镜头相机组中出现局部遮挡投影所致。

表 3 O 形圈表面缺陷识别结果

Tab. 3 Results of surface defect detection of O ring

成像镜头-相机组	特征参数		
	缺陷局域 最长方向 的长度/mm	与最长方向 正交方向 的长度/mm	缺陷面积 /mm <sup>2</sup>
LC <sub>1</sub>	1.54	1.26	1.59
LC <sub>2</sub>	1.26	1.03	0.88
LC <sub>3</sub>	1.12	0.18	0.15

## 5 结 论

本文从曲面成像基础理论入手,得到了 O 形圈表面在任意光源辐照条件下在某方向成像的亮度计算方法,为构建可控环境对 O 形圈表面进行全覆盖均匀成像奠定了基础。提出了以短弧段近似直线并从 3 个不同角度组合打光的成像检测方案。实验表明,O 形圈曲面成像亮度的理论计算结果与图像实际亮度分布基本一致,所建立的表

面缺陷检测系统能够实现航天密封 O 形圈的自动可靠检测。

然而,本文建立的曲面成像理论公式及 O 形圈表面成像理论公式在实际应用时需代入实际光源的辐照模型,因为实际光源的理想化会引入误差,加之很难准确估计环境光的辐射,同样会引入

误差。当这两项误差比较大时,理论计算结果与实际成像亮度会有较大误差,这在本文的实验结果中也有所体现,但并不影响理论模型应用于分析构建可控环境以解决特定问题的重要意义;同时,当光源辐照和环境辐射模型比较准确时,成像亮度的理论计算精度也会随之提高。

#### 参考文献:

- [1] GUO W, CUI W, YU T, *et al.*. O-ring static sealing reliability model and influence factors analysis [J]. *Arab. Gulf. Journal of Scientific Research*, 2013, 31(12):336-343.
- [2] GB/T 3452.2-2007. 液压气动用 O 形橡胶密封圈第 2 部分:外观质量检验规范[S]. 北京:中国标准出版社,2007.  
GB/T 3452.2-2007. *Fluid power systems-O-rings-Part 2: Quality acceptance criteria* [S]. Beijing: China Standard Press,2007. (in Chinese)
- [3] CHANDRASEKARAN V C. *Rubber Seals for Fluid and Hydraulic Systems* [M]. Burlington: Elsevier Inc., 2010.
- [4] 廖强,刘兆东,郭静,等. 主动视觉技术在精密测量中的应用研究[J]. *计算机工程与应用*, 2009, 45(10):218-220.  
LIAO Q, LIU ZH D, GUO J, *et al.*. Study of active vision technology in precision measurement [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2009, 45(10):218-220. (in Chinese)
- [5] WECKENMANN A, JIANG X, SOMMER K D, *et al.*. Multisensor data fusion in dimensional metrology[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2009, 58(2): 701-721.
- [6] MARN S S, YARLAGADDA P K D V, FOOKES C. Design and development of automatic visual inspection system for PCB manufacturing [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2011, 27(5): 949-962.
- [7] 何博侠,何勇,卜雄洙,等. 机器视觉多视场协同测量方法[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(12): 2821-2829.  
HE B X, HE Y, BU X ZH, *et al.*. Cooperative measurement method of multi-FOV for machine vision[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012,20(12):2821-2829. (in Chinese)
- [8] 叶声华,秦树人. 现代测试计量技术及仪器的发展[J]. *中国测试*, 2009,35(2): 1-6.  
YE SH H, QIN SH R. Development of modern measuring metrological and instrumental technologies [J]. *China Measurement & Test*, 2009, 35(2): 1-6. (in Chinese)
- [9] HORN B K P[美]. 机器视觉[M]. 王亮,蒋欣兰,译. 北京:中国青年出版社,2014:230-249.  
HORN B K P. *Robot Vision* [M]. WANG L, JIANG X L, Translate. Beijing: China Youth Press, 2014:230-249. (in Chinese)
- [10] 王国强,徐范. 漫反射 FTIR 法在橡胶制品增强纤维剖析中的应用[J]. *合成橡胶工业*, 1996, 19(2): 90-91.  
WANG G Q, XU F. Application of diffuse reflection FTIR method in analysis of rubber products reinforced fiber[J]. *China Synthetic Rubber Industry*, 1996, 19(2):90-91. (in Chinese)
- [11] OREN M, NAYAR S K. Generalization of the Lambertian model and implications for machine vision [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1995,14(3):227-251.
- [12] 赵勇,方宗德,田丽丽. 列车车轮踏面缺陷的图像区域提取[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(4): 901-908.  
ZHAO Y, FANG Z D, TIAN L L. Defect region extraction in images of train wheel tread [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(4):901-908. (in Chinese)

#### 作者简介:



何博侠(1972—),男,甘肃西和人,博士,副教授,硕士生导师,2009年于东南大学获得博士学位,主要从事光电测试技术、微纳米测量技术、机械动力学及先进制造技术的研究。E-mail: heboxia@163.com



张毅(1990—),男,河南洛阳人,硕士研究生,主要从事嵌入式系统、机器视觉方面的研究。E-mail: zy021019@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)