

# 全景结构光视觉测量通用畸变校正模型

孙军华\*, 刘畅, 张洲

北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191

**摘要** 现有的结构光视觉测量系统中,相机和结构光投射器安装在玻璃管内部以实现全景测量,但玻璃管会导致光发生折射而带来畸变。针对上述畸变,分析了光线在两个圆柱形表面折射的过程,研究了两个异面的折射平面所带来的畸变,建立了一种全景结构光视觉测量通用畸变校正模型。采用全景结构光视觉测量系统对内径为 288.50 mm 的铝管进行测量,基于全景结构光视觉测量通用畸变校正模型计算铝管的内径。实验结果表明,系统的重复性精度为 0.047 mm,测量精度为 0.23 mm,系统具有较好的稳定性和可靠性,所提出的全景结构光视觉测量通用畸变校正模型具有较高的准确性。

**关键词** 机器视觉; 畸变校正; 折射; 全景结构光视觉

**中图分类号** O435.1

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201939.0215003

## General Distortion Correction Model of Omnidirectional Structured-Light Vision Measurement

Sun Junhua\*, Liu Chang, Zhang Zhou

School of Instrumentation Science and Opto-Electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

**Abstract** In the existing structured-light vision measurement systems, the camera and the projector are installed inside a glass tube to cover the omnidirectional field of view, inevitably causing the refraction distortion. To address the distortion mentioned above, the refraction on two cylindrical interfaces is analyzed and the distortion caused by two non-coplanar refraction planes is investigated. A general distortion correction model of omnidirectional structured-light vision measurement is established. An aluminum tube with an internal diameter of 288.50 mm is measured by the omnidirectional structured-light vision measurement system and the internal diameter of this aluminum tube is calculated based on the proposed general distortion correction model. The experimental results indicate that the repeatability and precision reach 0.047 mm and 0.23 mm, respectively. The measurement system is stable and reliable, and the proposed general distortion correction model of omnidirectional structured-light vision measurement is highly accurate.

**Key words** machine vision; distortion correction; refraction; omnidirectional structured-light vision

**OCIS codes** 150.0155; 120.5710; 330.4060

## 1 引 言

结构光视觉测量是一种重要且常用的非接触测量方法,其中全景结构光视觉测量在非接触三维(3D)轮廓测量中优势显著<sup>[1]</sup>。目前全景结构光视觉测量系统大多采用圆结构光视觉传感器,以避免多线结构光视觉传感器或多视觉线结构光传感器中存在的需要装调和全局标定的问题<sup>[2-6]</sup>。通常将结构光投射器和相机放置在玻璃管内部,但当结构光投射到被测场景及光条投射到相机图像平面时,会

在玻璃管发生折射并引发畸变<sup>[7-8]</sup>。

为校正折射畸变,Zhang 等<sup>[9]</sup>建立了畸变校正模型的映射表,将畸变和对应未畸变的图像坐标一一对应起来,但并未建立几何畸变模型。针对结构光投射到被测场景时产生的折射畸变,Buschinelli 等<sup>[10-11]</sup>采用轴对称系统,将玻璃管、相机和结构光投射器同轴放置,保证结构光投射器投射出的光平面垂直入射进玻璃管,以消除畸变影响。针对光条透过玻璃管投射到相机图像平面时,光线在玻璃管外表面和内表面分别发生折射而带来的畸变,Yoshizawa

**收稿日期:** 2018-07-24; **修回日期:** 2018-08-31; **录用日期:** 2018-10-08

**基金项目:** 航空科学基金项目(2017ZE51062)

\* **E-mail:** sjh@buaa.edu.cn

等<sup>[12]</sup>、Wu 等<sup>[13]</sup>分别提出了一种畸变校正方法,但前提是相机光轴和玻璃管中轴线必须完全重合,即整个折射过程中的所有光线共面,这对系统的安装要求较高,因此难以获得广泛应用。目前,不限制安装位置的畸变校正模型仅适用于平面表面产生的畸变。Gong 等<sup>[14]</sup>利用平面几何关系建立多个平面玻璃板的折射畸变校正模型;Huang 等<sup>[15]</sup>借助平面折射关系,建立了空间点和图像点之间的数学关系;Feng 等<sup>[16]</sup>和 Huang 等<sup>[17]</sup>建立了平面折射的几何关系,确定了折射光线和入射光线之间的数学关系;Li 等<sup>[18]</sup>研究了光线依次经过水、玻璃和空气三种介质时造成的折射畸变,确定了水下空间点和对应图像点之间的关系,但需将这三种介质的表面看作平面。

针对现有全景结构光视觉测量的局限性,本文提出一种全景结构光视觉测量通用畸变校正模型,适用于相机位于玻璃管内部的所有情况,能够有效解决光条投射到图像平面时,在玻璃管外表面和内表面折射所带来畸变的问题。

## 2 全景结构光视觉测量通用畸变校正模型

全景结构光视觉测量通用畸变校正模型如图 1 所示,结构光投射器向被测场景投射结构光,相机透过玻璃管拍摄该结构光。设相机坐标系和图像坐标系分别为  $O_c-x_c y_c z_c$  和  $O'-uv$ 。结构光会经过空间点  $P$ ,其在图像平面的投影点为  $P'$ , $P$  投影到  $P'$  的过程中入射光线、折射光线和出射光线分别如图 1 所示。为了方便表达和计算,本研究利用光路的可逆性,沿整个折射过程的逆过程建立模型,分别将逆过程中的入射光线、折射光线和出射光线设为  $r_i$ 、 $r_r$  和  $r_e$ 。折射点  $Q_0$  是折射光线  $r_r$  和玻璃管外表面的交点, $Q_0$  处的法线设为  $n_0$ , $n_0$  与玻璃管中轴线形成平面  $\pi_0$ 。类似地,折射点  $Q_1$  是出射光线  $r_e$  和玻璃管内表面的交点, $Q_1$  处的法线设为  $n_1$ , $n_1$  与玻璃管中轴线形成平面  $\pi_1$ 。 $d$  和  $D$  分别表示玻璃管内外表面圆柱的半径。

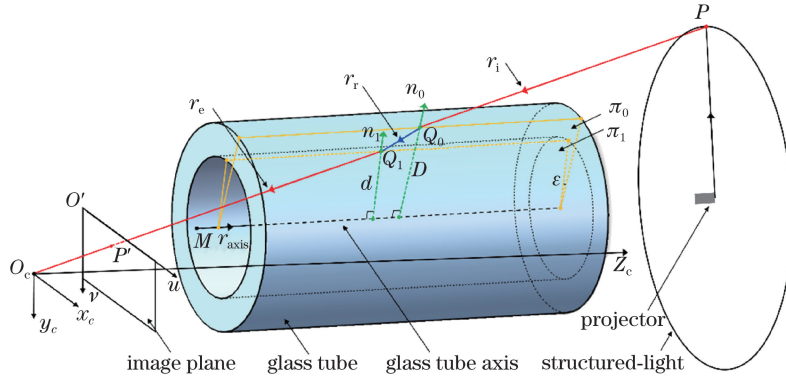


图 1 全景结构光视觉测量通用畸变校正模型

Fig. 1 Schematic of general distortion correction model of omnidirectional structured-light vision measurement

实际上, $r_e$  经过  $O_c$  且  $O_c$  不总在玻璃管中轴线上,因此  $r_e$  与玻璃管中轴线异面,设  $n_0$  和  $n_1$  的夹角为  $\epsilon$ ,则  $\pi_0$  和  $\pi_1$  间的夹角也为  $\epsilon$ 。 $n_0$  和  $n_1$  分别在两个折射平面上,故两个折射平面同样异面,但  $r_i$ 、 $r_r$  和  $r_e$  均不在  $\pi_0$  或  $\pi_1$  上,因此  $\pi_0$  和  $\pi_1$  并非折射平面。针对圆柱形表面折射造成的畸变,本研究建立了一种畸变校正模型。

根据镜头畸变模型和相机透视投影模型,通过实际获得的图像坐标,可求解  $r_e$  的单位矢量,设为  $\mathbf{r}_e = (x'_e \ y'_e \ z'_e)^T$ 。设玻璃管中轴线方向的单位矢量为  $\mathbf{r}_{axis} = (r_1 \ r_2 \ r_3)^T$ ,中轴线上一点  $M$  的坐标为  $(x_M \ y_M \ z_M)^T$ 。对于玻璃管内表面上任一点,设其空间坐标为  $\mathbf{x} = (x \ y \ z)^T$ ,对应的齐次坐标为  $\tilde{\mathbf{x}} = (x \ y \ z \ 1)^T$ ,则  $\tilde{\mathbf{x}}$  满足  $\|(\mathbf{x} - \mathbf{M}) \times \mathbf{r}_{axis}\| =$

$d$ ,因此玻璃管内表面方程为  $f_i(x, y, z) = 0$ ,其中  $f_i(x, y, z)$  可表示为

$$f_i(x, y, z) = \tilde{\mathbf{x}}^T \begin{bmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{S} \\ \mathbf{S}^T & -d^2 \end{bmatrix} \tilde{\mathbf{x}}, \quad (1)$$

式中

$$\begin{cases} \mathbf{C} = \begin{bmatrix} r_2^2 + r_3^2 & -r_1 r_2 & -r_1 r_3 \\ -r_1 r_2 & r_1^2 + r_3^2 & -r_2 r_3 \\ -r_1 r_3 & -r_2 r_3 & r_1^2 + r_2^2 \end{bmatrix} \\ \mathbf{S} = -\mathbf{C}\mathbf{M} \end{cases} \quad (2)$$

进一步,联立  $\mathbf{r}_e$  和(1)式可获得  $Q_1$ 。设  $\tilde{\mathbf{Q}}_1$  为  $Q_1$  的三维齐次坐标,则  $n_1$  的方向矢量可表示为  $\mathbf{n}_1 = [\mathbf{C} \ \mathbf{S}]\tilde{\mathbf{Q}}_1$ 。

类似地,玻璃管外表面方程为  $f_o(x, y, z) = 0$ ,其中  $f_o(x, y, z)$  可表示为

$$f_o(x, y, z) = \tilde{\mathbf{x}}^T \begin{bmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{S} \\ \mathbf{S}^T & -D^2 \end{bmatrix} \tilde{\mathbf{x}}. \quad (3)$$

$Q_0$ 可通过联立  $\mathbf{r}_r$  和(3)式获得。设  $Q_0$ 的三维齐次坐标为  $\tilde{Q}_0$ , 则  $n_0$ 的方向矢量可表示为  $\mathbf{n}_0 = [\mathbf{C} \ \mathbf{S}] \tilde{Q}_0$ 。

点  $Q_1$  处的折射如图 2(a)所示。折射角、出射角、空气折射率和玻璃折射率分别设为  $\theta_2$ 、 $\theta_3$ 、 $n_{\text{air}}$  和  $n_{\text{glass}}$ 。建立折射坐标系  $O_{r1}-x_{r1}y_{r1}z_{r1}$ , 原点  $O_{r1}$  与  $Q_1$  重合, 有  $\mathbf{x}_{r1} = \mathbf{n}_1 \times \mathbf{r}_e$ 、 $\mathbf{y}_{r1} = \mathbf{n}_1$  和  $\mathbf{z}_{r1} = \mathbf{n}_1 \times \mathbf{r}_e \times \mathbf{n}_1$ 。在  $O_{r1}-x_{r1}y_{r1}z_{r1}$  平面上, 有  $n_{\text{glass}} \cdot \sin\theta_2 = n_{\text{air}} \cdot \sin\theta_3$ 。在  $O_{r1}-x_{r1}y_{r1}z_{r1}$  中, 令  $\mathbf{r}_r = (0 \ 1 \ \tan\theta_2)^T$ ,

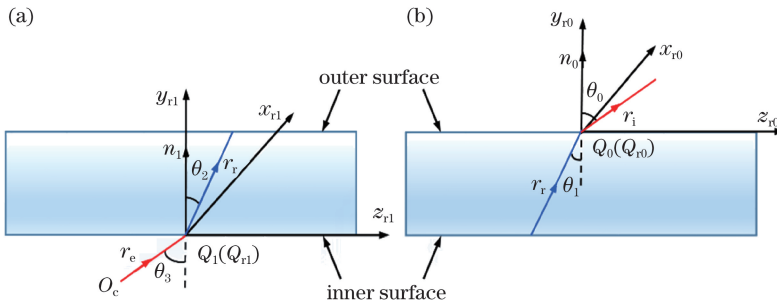


图 2 两个异面的折射平面。(a)点  $Q_1$  处的折射;(b)点  $Q_0$  处的折射

Fig. 2 Two non-coplanar refraction planes. (a) Refraction at  $Q_1$ ; (b) refraction at  $Q_0$

设结构光方程为  $F(x, y, z) = 0$ , 则全景结构光视觉测量的数学模型

$$\begin{cases} \mathbf{r}_i^T [x \ y \ z]^T = 0 \\ F(x, y, z) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

表示  $\mathbf{r}_i$  与结构光的交点。

### 3 实验结果与分析

在实验室搭建了如图 3(a)所示的全景结构光视觉测量系统, 系统由工业相机及镜头、玻璃管、结构光投射器和支架组成。采用中国大恒 MER-504-10GM-P 型号相机和 Schneider Cinegon 1.4/8 型号镜头, 相机的图像分辨率为  $2448 \text{ pixel} \times 2048 \text{ pixel}$ ,

则在  $O_c-x_cy_cz_c$  中,  $\mathbf{r}_r = [\mathbf{n}_1 \times \mathbf{r}_e \ \mathbf{n}_1 \ \mathbf{n}_1 \times \mathbf{r}_e \times \mathbf{n}_1] \times [0 \ 1 \ \tan\theta_2]^T$ 。

尽管两个折射平面异面, 点  $Q_0$  处的折射仍与点  $Q_1$  处的折射类似, 如图 2(b)所示, 入射角和折射角分别设为  $\theta_0$  和  $\theta_1$ 。建立新的折射坐标系  $O_{r0}-x_{r0}y_{r0}z_{r0}$ , 原点  $O_{r0}$  与  $Q_0$  重合,  $\mathbf{x}_{r0} = \mathbf{n}_0 \times \mathbf{r}_r$ 、 $\mathbf{y}_{r0} = \mathbf{n}_0$ 、 $\mathbf{z}_{r0} = \mathbf{n}_0 \times \mathbf{r}_r \times \mathbf{n}_0$ 。类似地, 在  $O_{r0}-x_{r0}y_{r0}z_{r0}$  平面上,  $n_{\text{air}} \cdot \sin\theta_0 = n_{\text{glass}} \cdot \sin\theta_1$ 。在  $O_{r0}-x_{r0}y_{r0}z_{r0}$  下, 令  $\mathbf{r}_i = (0 \ 1 \ \tan\theta_0)^T$ , 则在  $O_c-x_cy_cz_c$  下,  $\mathbf{r}_i = [\mathbf{n}_0 \times \mathbf{r}_r \ \mathbf{n}_0 \ \mathbf{n}_0 \times \mathbf{r}_e \times \mathbf{n}_0] [0 \ 1 \ \tan\theta_0]^T$ 。

镜头焦距为 8 mm。玻璃管内径约为 60 mm, 壁厚约为 2 mm。结构光投射器型号为 HB365050X, 工作波长为 650 nm。

采用上述全景结构光视觉测量系统, 将整周的结构光投射到被测铝管内表面, 形成闭合的环形光条, 由图像处理的方法获得光条点的像素坐标, 再采用全景结构光视觉测量模型重建出光条点的三维坐标, 得到铝管内壁四周三维数据, 实现对铝管内表面的全景测量。实验采用最小二乘法将上述光条点的三维坐标拟合为一个椭圆, 取椭圆的短轴长度作为测得的铝管内径, 再与游标卡尺的测得结果进行对比, 来评价全景结构光视觉的测量精度。

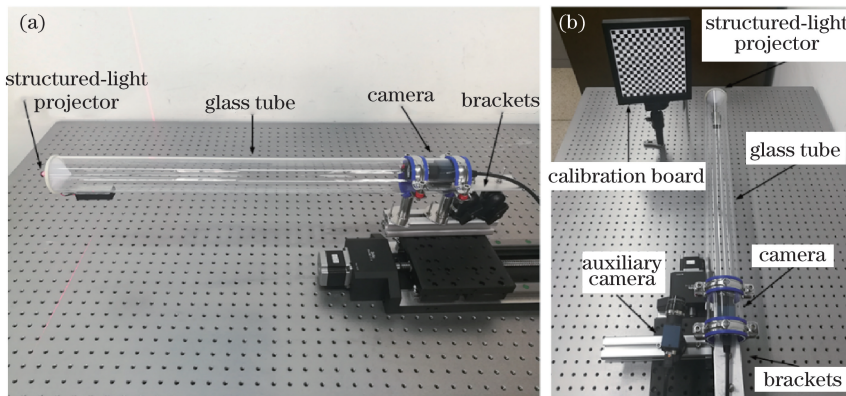


图 3 实验装置。(a)全景结构光视觉测量系统;(b)标定装置

Fig. 3 Experimental devices. (a) Omnidirectional structural-light vision measurement system; (b) calibration devices

标定时,采用文献[19]的方法标定相机模型参数;利用平面靶标,由视觉传感器相机获得基于畸变校正模型参数的特征点三维坐标  $\mathbf{x}_r$ ,同时借助放置在玻璃管外部的辅助相机,重建出相应的特征点三维坐标  $\mathbf{x}_c$ ,利用一一对应的  $\mathbf{x}_r$  和  $\mathbf{x}_c$ ,建立目标函数并进行优化,获得畸变校正模型参数;采用畸变校正模型和本课题组<sup>[20]</sup>提出的结构光视觉通用现场标定方法,获得结构光视觉模型参数。

### 3.1 标定结果

标定装置如图 3(b)所示,辅助相机与视觉传感器相机的配置完全相同。标定相机模型参数时用  $17 \times 17$  的棋盘格平面玻璃靶标,相邻特征点间距为 10 mm,结果如表 1 所示。

标定畸变校正模型参数时,平面靶标放置在 29 个不同位置,视觉传感器相机和辅助相机同时拍摄平面靶标,图像如图 4 所示。畸变校正模型参数的标定结果如表 2 所示。

表 1 相机模型参数的标定结果

Table 1 Parameter calibration results of camera model

Parameter	Vision sensor camera	Auxiliary camera
Intrinsic matrix	$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} 2401.9 & 0 & 1235.7 \\ 0 & 2401.8 & 1038.7 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\mathbf{A}_r = \begin{bmatrix} 2372.3 & 0 & 1231 \\ 0 & 2372.7 & 1059.3 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
Distortion coefficients	$k_{11} = -0.12 \quad k_{12} = 0.14$ $k_{13} = 3.1 \times 10^{-4} \quad k_{14} = 1.2 \times 10^{-5}$	$k_{r1} = -0.12 \quad k_{r2} = 0.14$ $k_{r3} = 3.5 \times 10^{-4} \quad k_{r4} = -2.9 \times 10^{-4}$
Rotation matrix	$\mathbf{R}_0 = \begin{bmatrix} 0.9966 & 0.0226 & -0.0785 \\ -0.0230 & 0.9997 & -3.7 \times 10^{-3} \\ 0.0784 & 5.5 \times 10^{-3} & 0.9969 \end{bmatrix}$	
Translation vector	$\mathbf{T}_0 = [82.9265 \quad -10.1160 \quad 39.0446]^T$	

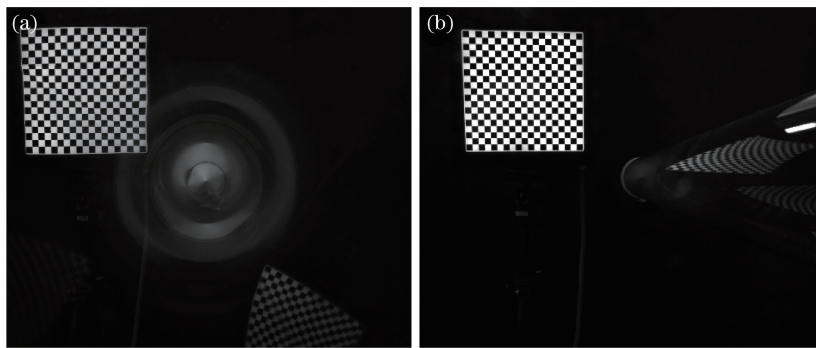


图 4 平面靶标图像。(a)由视觉传感器相机拍摄;(b)由辅助相机拍摄

Fig. 4 Image of calibration board. (a) Captured by vision sensor camera; (b) captured by auxiliary one

表 2 畸变校正模型参数的标定结果

Table 2 Parameter calibration results of distortion correction mode

Parameter of distortion correction model	Initial value	Optimal value
Direction of glass tube axis	$\mathbf{r}_{\text{axis}} = [0 \quad 0 \quad 1]^T$	$\mathbf{r}_{\text{axis}} = [0.1748 \quad 0.9782 \quad 0.1117]^T$
One point on glass tube axis	$\mathbf{M} = [0 \quad 0 \quad 1]^T$	$\mathbf{M} = [-0.0485 \quad 7.8 \times 10^{-3} \quad 1]^T$
Radius of cylinder formed by inner surface /mm	$d = 30$	$d = 29.9257$
Radius of cylinder formed by outer surface /mm	$D = 32$	$D = 31.7866$

使用平面陶瓷靶标标定结构光视觉模型参数,平面陶瓷靶标有  $4 \times 5$  个特征点,相邻特征点的间距

为 37 mm。标定出的结构光方程系数矢量  $\boldsymbol{\pi}$  可表示为

$$\pi = [-2.2580 \times 10^{-5} \quad -7.0373 \times 10^{-6} \quad -1.6 \times 10^{-3} \quad 633.8265]^T. \quad (5)$$

### 3.2 重复性实验

重复性实验结果如表 3 所示,系统的重复性精

度为 0.047 mm。实验结果表明全景结构光视觉测量系统具有较好的稳定性和可靠性。

表 3 重复性实验结果

Table 3 Results of repeatability measurement

Measurement number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Measurement value	288.210	288.271	288.257	288.200	288.269	288.339	288.324	288.230	288.305	288.288
Average value	288.270									
Standard deviation	0.047									

### 3.3 测量实验

图 5 所示为测量铝管内径的实验装置,结构光投射器位于铝管内部,实验时会向铝管内表面投射出闭合的明亮光条。图 6 所示为图像平面上畸变的光条点和校正后的光条点,图 7 所示为空间

中畸变的光条点和校正后的光条点。使用精度为 0.02 mm 的游标卡尺测得铝管内径为 288.50 mm。表 4 所示为十幅图像的测量结果。由表 4 可知,系统的测量精度为 0.23 mm,本研究提出的模型具有准确性。

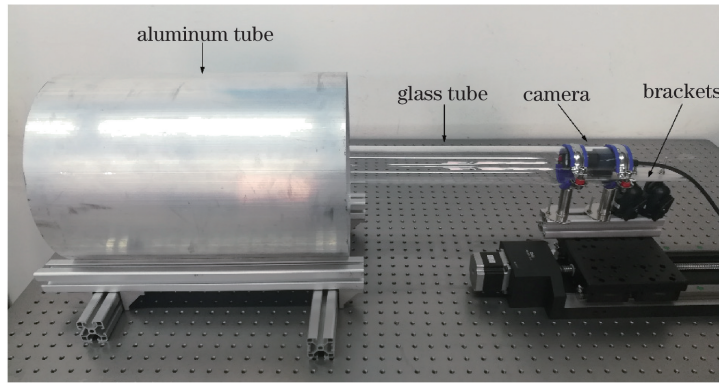


图 5 测量铝管内径装置

Fig. 5 Measurement device for internal diameter of aluminum tube

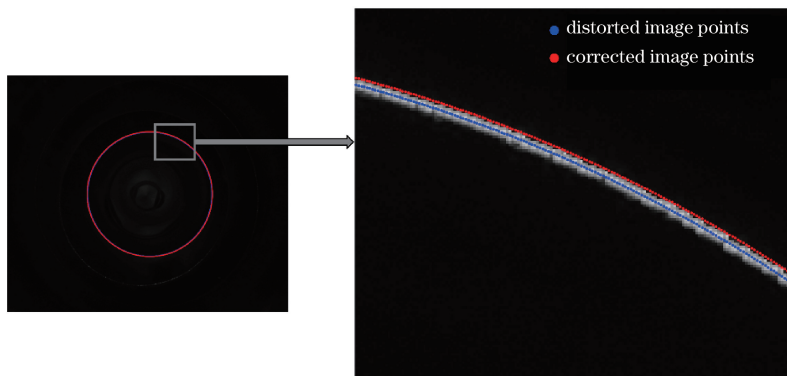


图 6 图像平面上的光条点

Fig. 6 Light stripe points on image plane

## 4 结 论

提出了一种全景结构光视觉测量通用畸变校正模型,解决了折射带来的畸变问题。畸变校正模型适用于两个异面的折射平面,避免了精确对准的要求,

并不限制相机的安装位置和方向,适用于实际应用。实验结果表明,提出的模型能够有效校正玻璃管畸变,进而提高系统测量精度。尽管本研究的畸变校正模型是在圆柱形表面建立的,但对于其他形状表面造成的折射畸变,本研究提出的模型仍能推广使用。

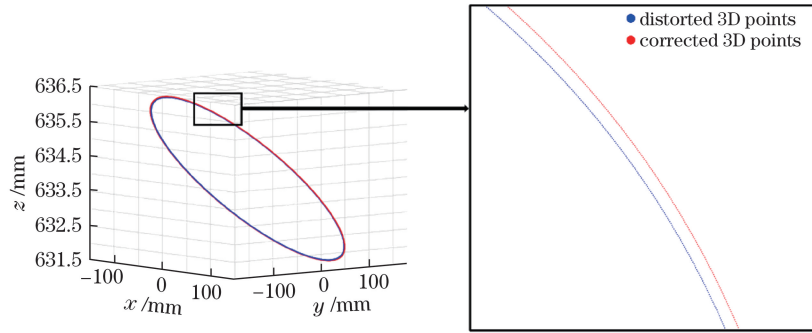


图 7 三维空间中的光条点

Fig. 7 Light stripe points in 3D space

表 4 实验测量结果

Table 4 Experimental measurement results

Picture number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Measurement value	288.20	288.28	288.34	288.24	288.31	288.21	288.29	288.33	288.25	288.27
Absolute error	0.30	0.22	0.16	0.26	0.19	0.29	0.21	0.17	0.25	0.23
Root mean square error	0.23									

参 考 文 献

[1] Ding S W, Zhang X H, Yu Q F, *et al.* Overview of non-contact 3D reconstruction measurement methods[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(7): 070003.  
丁少闻, 张小虎, 于起峰, 等. 非接触式三维重建测量方法综述[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(7): 070003.

[2] Leng H W, Xu C G, Feng Z W, *et al.* Applying PSD analysis in ring-structured-light 3D measurement [C]//2009 International Joint Conference on Artificial Intelligence, April 25-26, 2009, Hainan Island, China. New York: IEEE, 2009: 376-380.

[3] Zhu Y, Gu Y G, Jin Y, *et al.* Flexible calibration method for an inner surface detector based on circle structured light[J]. Applied Optics, 2016, 55(5): 1034-1039.

[4] Zhang W G, Zhao H, Zhou X. Multiresolution three-dimensional measurement system with multiple cameras and light sectioning method [J]. Optical Engineering, 2010, 49(12): 123601.

[5] Zhou F Q, Peng B, Cui Y, *et al.* A novel laser vision sensor for omnidirectional 3D measurement [J]. Optics & Laser Technology, 2013, 45: 1-12.

[6] Li T T, Yang F, Xu X L. Method of large-scale measurement based on multi-vision line structured light sensor[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(11): 1104003.  
李涛涛, 杨峰, 许献磊. 基于多视觉线结构光传感器的大尺度测量方法[J]. 中国激光, 2017, 44(11): 1104003.

[7] Feng Z W, Xu C G, Leng H W, *et al.* Calibration of circular structured light sensor[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2009, 29(9): 780-784.  
冯忠伟, 徐春广, 冷惠文, 等. 圆结构光传感器标定方法[J]. 北京理工大学学报, 2009, 29(9): 780-784.

[8] Wu T, Lu S H, Tang Y P. An in-pipe internal defects inspection system based on the active stereo omnidirectional vision sensor[C]//2015 12th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD), August 15-17, 2015, Zhangjiajie, China. New York: IEEE, 2015: 2637-2641.

[9] Zhang G J, He J J, Li X Z. 3D vision inspection for internal surface based on circle structured light[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2005, 122(1): 68-75.

[10] Buschinelli P D V, Melo J R C, Albertazzi A, *et al.* Optical profilometer using laser based conical triangulation for inspection of inner geometry of corroded pipes in cylindrical coordinates[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8788: 87881H.

[11] Buschinelli P, Pinto T, Silva F, *et al.* Laser triangulation profilometer for inner surface inspection of 100 millimeters (4") nominal diameter[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2015, 648: 012010.

[12] Yoshizawa T, Wakayama T. Development of an

- inner profile measurement instrument using a ring beam device[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7855: 78550B.
- [13] Wu E Q, Ke Y L, Du B J. Noncontact laser inspection based on a PSD for the inner surface of minidiameter pipes[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(7): 2169-2173.
- [14] Gong Z, Liu Z, Zhang G J. Flexible method of refraction correction in vision measurement systems with multiple glass ports[J]. Optics Express, 2017, 25(2): 831-847.
- [15] Huang L X, Zhao X, Cai S, *et al.* Plate refractive camera model and its applications[J]. Journal of Electronic Imaging, 2017, 26(2): 023020.
- [16] Feng M C, Huang S, Wang J S, *et al.* Accurate calibration of a multi-camera system based on flat refractive geometry[J]. Applied Optics, 2017, 56(35): 9724-9734.
- [17] Huang S, Feng M C, Zheng T X, *et al.* A novel multi-camera calibration method based on flat refractive geometry[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 320: 012016.
- [18] Li S Q, Xie X P, Zhuang Y J. Research on the calibration technology of an underwater camera based on equivalent focal length[J]. Measurement, 2018, 122: 275-283.
- [19] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [20] Sun J H, Zhang G J, Liu Q Z, *et al.* Universal method for calibrating structured-light vision sensor on the spot[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(3): 174-177.
- 孙军华, 张广军, 刘谦哲, 等. 结构光视觉传感器通用现场标定方法[J]. 机械工程学报, 2009, 45(3): 174-177.