

圆柱物体内壁的锥面折反射全景图像展开

景文博^{1*}, 高雪峰², 黄炳坤¹, 李世涛², 于洪洋³

¹ 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;

² 江苏北方湖光光电有限公司, 江苏 无锡 214035;

³ 中国电子科技集团公司第五十五研究所, 江苏 南京 210016

摘要 针对锥面折反射的全景成像系统采集的圆柱内壁全景图像存在畸变的问题, 提出锥面双向投影模型下的圆柱内壁全景图像展开方法。建立含有畸变参数的正向和逆向投影模型, 先将圆柱内壁全景图像的像素点逆向映射到展开图像, 再将展开图像中缺失的像素点正向映射到原全景图像, 通过全景图像和展开图像对应像素点的坐标映射关系, 实现圆柱内壁全景图像的展开。实验结果表明: 该方法较好地校正了圆柱内壁全景图像的切向和径向畸变, 锥面双向投影模型定位精度为亚像素级, 相比同心圆环近似展开法, 信息熵和平均梯度均有不同程度的提高, 能够有效应用于圆柱物体内壁全景图像的展开。

关键词 成像系统; 锥面折反射全景成像; 正向投影; 逆向投影; 全景图展开

中图分类号 O435.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0311002

Expansion of Conical Catadioptric Panoramic Image of Inner Surface of Cylindrical Objects

Jing Wenbo^{1*}, Gao Xuefeng², Huang Bingkun¹, Li Shitao², Yu Hongyang³

¹ School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

² Jiangsu North Huguang Opto-Electronics Co. Ltd., Wuxi, Jiangsu 214035, China;

³ The 55th Research Institute of China Electronic Technology Group Corporation, Nanjing, Jiangsu 210016, China

Abstract Aiming at the problem of distortion of the panoramic image collected by the conical catadioptric panoramic imaging system, a panoramic image expansion method of inner surface of cylindrical objects under the conical bidirectional projection model is proposed. Forward and reverse projection models with distortion parameters are established, first, the pixels of the panoramic image of cylindrical inner wall are reversely mapped to the expanded image, and then forward the missing pixels in the expanded image to the original panoramic image, through the panoramic image and the expanded image corresponding to the coordinate mapping relationship of the pixels, the expansion of the panoramic image of cylindrical inner wall is realized. The experimental results show that the tangential and radial distortion of the panoramic image of cylindrical inner wall are corrected better, the positioning accuracy of the bidirectional projection model of the cone surface is sub-pixel level, comparing with the approximate expansion method of concentric rings, the information entropy and the average gradient are both improved to different extents, it can be effectively applied to the expansion of panoramic images of cylindrical inner wall.

Key words imaging systems; catadioptric panoramic imaging of cone; forward projection; reverse projection; expansion of panorama image

OCIS codes 100.2000; 150.1135; 220.1250

收稿日期: 2020-05-07; 修回日期: 2020-09-04; 录用日期: 2020-09-15

基金项目: 科技部项目(2018YFB1107600)、吉林省科技厅项目(20160204009GX, 20170623004TC, 20170204014GX)

* E-mail: wenbojing@cust.edu.cn

1 引 言

目前,实现全景成像的方式主要有:鱼镜头成像^[1]、多图像拼接技术^[2]、环形透镜系统^[3]以及折反射全景成像系统^[4]。折反射全景成像系统将反射镜与传统透镜结合,通过一次拍摄就可实现 360°范围的无缝全景成像,因此逐渐被应用于钻孔^[5]、管道^[6]等圆柱物体内壁图像的采集。根据是否满足单视点(SVP)约束,折反射全景成像系统可以分为两类:单视点和非单视点折反射成像系统。

美国 Baker 等^[7-8]对不同面形 SVP 全景成像系统进行理论研究,得到与之对应的成像约束条件,在此基础上,Agrawal 等^[9]又对非 SVP 全景成像系统的成像理论进行研究,以获取成像质量良好的全景图。满足 SVP 约束的全景成像系统,对光学组件装配精度要求较高,而实际工程中难以保证,故非单视点全景成像系统成为较好的选择。全景图像存在严重畸变、变形等问题,需展开成符合人眼观察的矩形图像。法国的 Reategui 等^[10]采用查表法(即将图像展开前后对应的像素数据值存储在表格中)展开全景图像。这种方法需要通过查表法针对特定的成像系统和成像目标进行标定查表所需参数,一案一套参数,对实际应用于全景图像展开的成像系统而言,缺少灵活性。上海交通大学的游睿等^[11]在小孔径工件内壁全景图像上采用同心圆环近似展开法获取工件内壁的展开图像,但由于其坐标映射不满足一一对应的关系,故图像展开精度不高。曾吉勇等^[12-13]基于抛物面、林锦国等^[14]基于双曲面单视点折反射全景成像系统分别建立逆投影模型展开全景图像。肖潇等^[3, 15]基于球面、柱面透视投影模型对全景图像的切向和径向畸变进行校正。吴晓军等^[16]基于椭圆镜面模型设计了一种能检测圆柱物体 360°外观的全景成像装置,为机器视觉提供了一种圆柱物体外侧表面 360°成像镜面设计方法。上海交通大学的周明晖等^[17]基于双曲面折反射全景成像系统对柱面全景图像展开进行了研究,提出了一种将快速展开法和双线性插值法结合的快速、高还原度的全景图像展开方法。相比于其他二次曲面反射镜,锥面反射镜面形结构简单,具有更高的垂直分辨率和较低的光学畸变,且适用于小口径的圆柱物体,应用较为广泛。Bermudez-Cameo 等^[18]基于锥面逆投影模型对线像进行研究。若直接通过锥面逆投影成像模型对全景图像进行展开,将产生“黑

洞”现象。基于锥面折反射的全景成像系统与传统的成像系统均存在切向和径向畸变的问题,同时由于锥面折反射全景成像系统实际成像面与理想成像面不重合,因此又会产生横纵比失真的问题。

本文以提高非单视点折反射正逆双向投影模型的像素点定位精度为目标,通过对锥面全景成像原理深入分析,结合系统的各部分参数,根据光线的可逆性与视点的轨迹变化规律分别建立正向和逆向投影成像模型,并在正逆模型公式中引入畸变参数对全景图像进行径向畸变校正,无需通过标准网格纸对展开后的图像进行横纵比失真的校正。通过含有畸变参数的双向投影模型实现了全景图和展开图像的像素点位置的精确对准,双向投影模型的定位精度为亚像素级,准确还原了原图像的真实比例关系,弥补了像素缺失对展开效果的影响。

2 锥面全景成像投影模型

圆柱物体 360°内壁信息通过锥面镜反射后,入射到常规的光学成像系统,将 360°内壁信息压缩到像面的环形区域内即全景图像,需将其展开为适合人眼观察的柱面全景图像。同心圆环近似展开法因坐标映射不是一一对应关系,存在较大变形问题,故基于锥面全景成像原理分别建立物像之间的正向和逆向投影模型,求解物点和像点之间的一一对应关系。

2.1 正向投影模型

圆柱物体内壁物点经锥面折反射全景成像系统后成像在探测器的过程称为正向投影过程,其模型如图 1(a)所示。内壁物点 M 在世界坐标系 $O_w X_w Y_w Z_w$ 下的坐标为 $(M_{x_w}, M_{y_w}, M_{z_w})$,经旋转与平移后转换到摄像机坐标系 $OXYZ$ 下对应的物点 M 的坐标为 (M_x, M_y, M_z) ,采用齐次坐标与变换矩阵相结合的表达形式,得到坐标转换关系为

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{x_w} \\ M_{y_w} \\ M_{z_w} \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K}(\mathbf{R} | \mathbf{t}) \cdot \mathbf{P}_{M_w}, \quad (1)$$

式中: $\mathbf{K}(\mathbf{R} | \mathbf{t})$ 为变换矩阵。该系统为非单视点全景成像系统,其视点轨迹是一个半径为 R_M 的圆,在 OZ 方向该圆到摄像机模型透视中心 O 的距离为 Z_M ,根据图 1(a)中关系可得:

$$\begin{cases} R_M = h_{focous} \sin(2\delta) \\ Z_M = h_{focous} \{1 - \cos(2\delta)\} \end{cases} \quad (2)$$

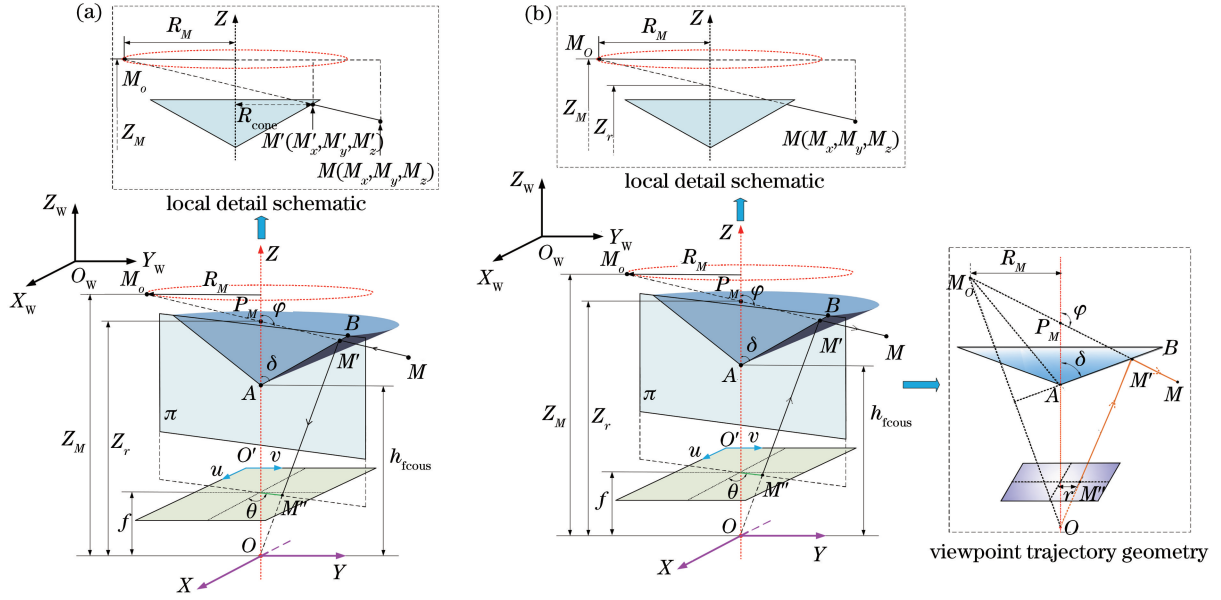


图 1 点 M 的锥面投影模型原理图。(a)正向模型;(b)逆向模型

Fig. 1 Schematic of the projection model of the cone of point M. (a) Forward model; (b) reverse model

物点 M 和 OZ 轴构成的平面定义为平面 π , 平面 π 与 OXY 面垂直, 其投影与 X 轴正半轴夹角为 θ , 且 $\theta = \arctan(M_y/M_x)$, 可得视点 M_O ($R_M \cdot \cos \theta, R_M \cdot \sin \theta, Z_M$)^[19]. 在平面 π 内, 物点 M 所在直线 MM_O 与圆锥母线 BA 交于锥面反射点 M' , 且 $M'(R_{\text{cone}} \cdot \cos \theta, R_{\text{cone}} \cdot \sin \theta, M'_z)$, R_{cone} 为该点圆锥半径. 结合图 2 中局部细节图的几何关系和锥

面镜面形参数表达式, 可得:

$$\begin{cases} \frac{R_M + \sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{Z_M - M_z} = \frac{R_M + R_{\text{cone}}}{Z_M - M'_z}, \delta \geq 60^\circ. \\ M'_z = h_{\text{focous}} + R_{\text{cone}} \cdot \cot \delta \end{cases} \quad (3)$$

整理(3)式, 其化简形式为

$$\begin{cases} R_{\text{cone}}(M_x, M_y, M_z) = \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2} \cdot (Z_M - h_{\text{focous}}) - R_M \cdot (h_{\text{focous}} - M_z)}{Z_M - M_z + \cot \delta \cdot (R_M + \sqrt{M_x^2 + M_y^2})} \\ M'_z(M_x, M_y, M_z) = h_{\text{focous}} + \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2} \cdot (Z_M - h_{\text{focous}}) - R_M \cdot (h_{\text{focous}} - M_z)}{Z_M - M_z + \cot \delta \cdot (R_M + \sqrt{M_x^2 + M_y^2})} \cdot \cot \delta \end{cases}, \delta \geq 60^\circ. \quad (4)$$

根据针孔相机模型的成像特点, 反射点 M' 投影到像素平面 M'' 点的表达式为

$$M'_z \begin{bmatrix} u_m \\ v_m \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_v & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M'_x \\ M'_y \\ M'_z \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K}_c \cdot \mathbf{P}_{M'} \quad (5)$$

式中: f 为焦距; μ_u 和 μ_v 分别为水平和垂直像元尺寸, $f_u = f/\mu_u, f_v = f/\mu_v$; (u_0, v_0) 为像素平面下主点坐标; \mathbf{K}_c 为相机内参矩阵; $\mathbf{P}_{M'}$ 为反射点 M' 齐次坐标的矩阵.

将(4)式代入锥面反射点 M' 的坐标表达式后, 结合(5)式整理可得

$$\begin{bmatrix} u_m \\ v_m \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{M'_z(M_x, M_y, M_z)} \cdot \mathbf{K}_c \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sin \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{\text{cone}}(M_x, M_y, M_z) \\ R_{\text{cone}}(M_x, M_y, M_z) \\ M'_z(M_x, M_y, M_z) \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{\mathbf{K}_c \cdot \mathbf{K}_\theta \cdot \mathbf{E}_r(M_x, M_y, M_z)}{M'_z(M_x, M_y, M_z)}, \quad (6)$$

式中: \mathbf{K}_θ 为锥面反射点的三角函数变换矩阵; $M'_z(M_x, M_y, M_z)$ 和 $\mathbf{E}_r(M_x, M_y, M_z)$ 分别为带有物点 M 坐标参数 (M_x, M_y, M_z) 的表达式和齐次坐标矩阵, 其参数表达式如(4)式所示。将(4)式代入(6)式中即可求解出摄像机坐标系下物点 $M(M_x, M_y, M_z)$ 对应的像素平面坐标系下像点 $M''(u_m, v_m)$ 的坐标。联立(1)式和(6)式可得正向投影模型中三维空间的圆柱物体内壁物点 $\mathbf{P}_{M_w}(M_{x_w}, M_{y_w}, M_{z_w})$ 经锥面全景成像系统到像点 $M''(u_m, v_m)$ 的坐标映射关系。

2.2 逆向投影模型

经锥面折反射全景成像系统后成像在探测器的圆柱物体全景图像, 通过光路逆追迹得到与之对应的 360° 内壁物点的过程称为逆向投影过程, 其逆向投影模型如图 1(b) 所示。全景图像的像点 M'' 由像素坐标系转换到摄像机模型的物理坐标系的关系表达式为

$$\begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/\mu_u & 0 & u_0 \\ 0 & 1/\mu_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} u_m \\ v_m \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

在摄像机坐标系 $OXYZ$ 下, 像点 M'' 与 OZ 轴构成的平面定义为平面 π 。在该平面内, 视点 M_0 所在直线 MM_0 与 Z 轴交点为 P_M , 其坐标为 $(0, 0, Z_r)$, Z_r 的求解表达式为

$$Z_r = Z_M + R_M \cot \varphi \quad (8)$$

根据图 1(b) 视点轨迹几何关系可得: $\varphi = 2\delta - |\arctan(r/f)|$, 其中 $r = \sqrt{(x_m^2 + y_m^2)}$, 将其代入(8)式中得到:

$$Z_r = Z_M + R_M \cot [2\delta - |\arctan(r/f)|] \quad (9)$$

通过(2)式可计算出视点轨迹圆的半径 R_M 和 Z 轴方向到原点的距离为 Z_M 。在 Z 轴方向物点 M 到原点的距离为 M_z , 其表达式为

$$\frac{R_M}{Z_M - Z_r} = \frac{R_M + D_{\text{cld}}/2}{Z_M - M_z} \quad (10)$$

将(9)式代入(10)式中, 可得:

$$M_z(x_m, y_m) = Z_M - \frac{\{-R_M \cot [2\delta - |\arctan(\sqrt{(x_m^2 + y_m^2)}/f)|]\}}{R_M} (R_M + D_{\text{cld}}/2) \quad (11)$$

平面 π 与 OXY 面垂直, 其投影与 X 轴正半轴的夹角为 θ , 且 $\theta = \arctan(y_m/x_m)$ 。根据柱面坐标和直角坐标的转换关系, 可知 $OXYZ$ 坐标系下物点 $M(M_x, M_y, M_z)$ 的表达式为

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sin \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_{\text{cld}}/2 \\ D_{\text{cld}}/2 \\ M_z(x_m, y_m) \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K}_\theta \cdot \mathbf{E}_d(x_m, y_m) \quad (12)$$

式中: $\mathbf{E}_d(x_m, y_m)$ 为带有像点坐标 $M''(x_m, y_m)$ 参数的齐次坐标矩阵, 将(11)式代入(12)式中即可求解出物点坐标 $M(M_x, M_y, M_z)$ 。将(12)式代入(1)式可得:

$$\mathbf{P}_{M_w} = \mathbf{K}(\mathbf{R} | \mathbf{t})^{-1} \cdot \mathbf{K}_\theta \cdot \mathbf{E}_d(x_m, y_m) \quad (13)$$

联立(7)式和(13)式可得逆向投影模型中像素平面像点 $M''(u_m, v_m)$ 经过锥面全景成像系统逆追迹到世界坐标系下物点 $\mathbf{P}_{M_w}(M_{x_w}, M_{y_w}, M_{z_w})$ 的坐标映射关系。

3 锥面双向投影模型下的畸变校正

锥面双向投影模型下全景图像展开的过程如图 2 所示。先将全景图像的所有像素点逆向投影映射

到柱面全景图像上, 通过像素搬移将灰度值赋值到柱面全景图像对应的像素点上, 如图 2 左侧逆向投影过程所示; 然后将柱面全景图像上缺失的像素点通过正向投影映射到全景图像上, 映射后的坐标值为浮点型, 确定其邻域后, 通过插值算法得到对应的像素值, 如图 2 右侧正向投影过程所示, 从而获取一幅畸变较小, 成像质量较好的柱面全景图像。

全景图像的像点通过逆投影过程后映射到柱面全景图像, 其定位过程的主要步骤如下。

1) 像素平面坐标系 $o'uv$ 下的全景图像的像点 $M''_1(u_{1m}, v_{1m})$ 通过锥面逆投影模型映射到世界坐标系 $O_w X_w Y_w Z_w$ 下的圆柱物体内壁物点 $M_1(M_{1x_w}, M_{1y_w}, M_{1z_w})$ 。

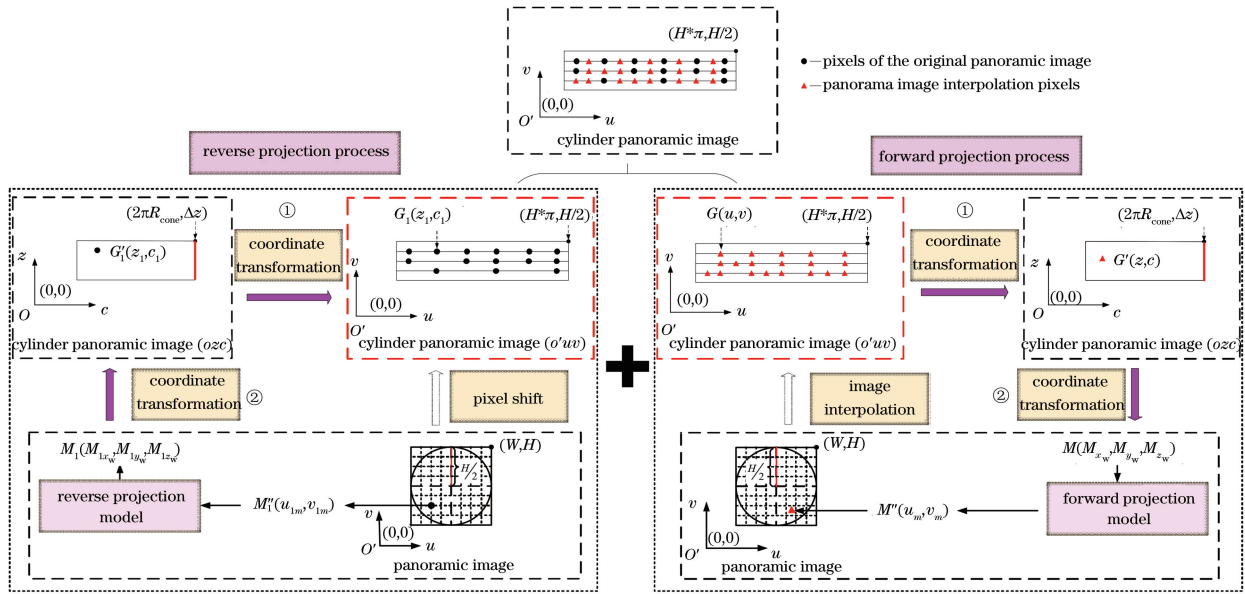


图 2 双向投影的全景图像展开过程图

Fig. 2 Expansion process of panoramic image of the bidirectional projection

2) 物点 $M_1(M_{1x_w}, M_{1y_w}, M_{1z_w})$ 转换到柱面坐标的形式为 (θ, r, z) , 即 $M_1(\theta_w, D_{\text{cld}}/2, M_{1z_w})$, 将物点 M_1 转换到 ozc 坐标系下对应点的坐标为 $G'_1(z_1, c_1)$, 故坐标转换②的表达式为

$$\begin{bmatrix} z_1 \\ c_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -z_{\min} \\ D_{\text{cld}}/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_w \\ M_{1z_w} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

式中: z_{\min} 为轴向物距最低点的坐标; D_{cld} 为圆柱物体口径; $\theta_w = \arctan(M_{1y_w}/M_{1x_w})$ 。若通过 G'_1 和 G_1 所在坐标系的对应关系直接转换, 则存在径向畸变, 即图像纵横比失真。

3) 纵横比失真与两个方向像元尺寸不一致有

关, 从锥面全景成像原理上分析纵横比失真问题, 可知影响径向像元尺寸的因素为锥面镜、圆柱物体口径, 引入畸变参数 $k = D_{\text{cld}}/D_{\text{cone}}$, 将 ozc 坐标系下像点 $G'_1(z_1, c_1)$ 经坐标转换①变换到 $o'uv$ 坐标系下像点 $G_1(u_1, v_1)$ 的过程为

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ u_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H/(2 \cdot \Delta z \cdot k) & 0 & 0 \\ 0 & H/D_{\text{cld}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ c_1 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

联立(14)式和(15)式可将上述两次坐标转换关系表示为

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ u_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & H/(2 \cdot \Delta z \cdot k) & -z_{\min} \cdot H/(2 \cdot \Delta z \cdot k) \\ H/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_w \\ M_{1z_w} \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

联立(1)、(6)和(16)式可求解出像素平面坐标下全景图像的像点 $M''(u_m, v_m)$ 对应柱面全景图像的像点 $G_1(u_1, v_1)$, 通过像素搬移给柱面全景图像对应位置赋予像素值。

在逆投影坐标转换过程的分析基础上, 其正向投影过程为: 令柱面全景图像缺失的像素点为 $G(u, v)$, 该点先通过坐标转换①由 $o'uv$ 坐标系转至 ozc 坐标系下, 然后通过坐标转换②由 ozc 坐标系转至世界坐标系下, 经两次坐标转换后为 $M(\theta_w, D_{\text{cld}}/2, M_{z_w})$, 其表达式为

$$\begin{bmatrix} \theta_w \\ M_{z_w} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 2/H & 0 \\ (2 \cdot \Delta z \cdot k)/H & 0 & z_{\min} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ u \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (17)$$

结合(17)式和 $\begin{cases} M_{x_w} = D_{\text{cld}}/2 \cdot \cos(\theta_w) \\ M_{y_w} = D_{\text{cld}}/2 \cdot \sin(\theta_w) \end{cases}$ 可得到

物点 $M(M_{x_w}, M_{y_w}, M_{z_w})$ 的坐标, 并联立(1)式和(6)式可求解出柱面全景图像缺失的像点 $G(u, v)$ 对应全景图像上的像素点坐标为 $M''(u_m, v_m)$, 通过

插值算法来还原缺失的像素值,实现锥面双向投影模型下全景图像的畸变校正。

4 实验结果及分析

通过仿真分析和实验测试验证锥面双向投影模

表 1 锥面全景成像系统相关参数

Table 1 Related parameters of cone panoramic imaging system

System parameter	Value	System parameter	Value
Conical aperture $D_{\text{cone}}/\text{mm}$	68	System axial dimensions $H=2D_{\text{cone}}f/d/\text{mm}$	138.35
Conical vertex angle $\delta/(\circ)$	60	Focal length of lens f/mm	25
Conical thickness $h_{\text{cone}}/\text{mm}$	20	Detector size $/\mu\text{m}$	$2560 \times 2048 \times 6$

4.1 仿真分析

为了模拟实际内窥装置的全景成像过程,仿真过程中给定锥面全景成像系统的相关参数如表 1 所示,探测器的分辨率为 $2048 \text{ pixel} \times 2048 \text{ pixel}$,圆柱

型下全景图像展开法的可行性和有效性。锥面全景成像系统的相关参数如表 1 所示,其中, $d=2048 \times 6 \mu\text{m}=12.288 \text{ mm}$ 为相机短边尺寸。

体直径为 120 mm 。根据 2.1 和 2.2 节推导的正向和逆向投影模型得到仿真结果如图 3 所示。图 3(a) 和 (b) 中正向和逆向投影模型能够实现物点和像点的一一对应,证明了正向和逆向投影模型的准确性。

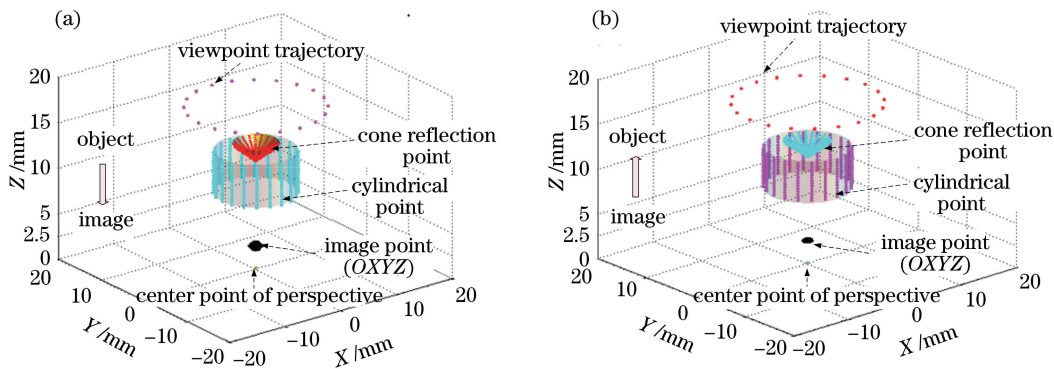


图 3 双向投影模型仿真结果图。(a)正向模型;(b)逆向模型

Fig. 3 Simulation results of bidirectional projection model. (a) Forward model; (b) reverse model

离散的圆柱物点经过正向投影模型得到如图 4(a) 所示像素坐标下的全景图像。在将展开图像由物理坐标系转换为像素坐标系的过程中,若直接通过两坐标系的对应关系进行离散点的转换,则得到的像素坐标系下的展开图像存在纵横比失真的情况如图 4(b) 所示,点 A'' 、 B'' 、 C'' 、 D'' 不再是正方形,而是矩形。通过(16)式对两个坐标系对应位置的像素点进行坐标转换,得到像素坐标系下的展开图像如图 4(c) 所示,图中点 A'' 、 B'' 、 C'' 、 D'' 仍能构成正方形,证明纵横比失真情况得到较好的校正。对比图 4(c) 与 (d) 可知,引入比例参数可以调节纵向像元尺寸值,恢复理想的纵横比。

将逆投影展开后的柱面全景图像和理想柱面全景图像即图 4(c) 和 (d) 对应位置的像素点坐标进行比较,1~140 和 140~280 个像素点定位误差结果如图 5(a) 和 (b) 所示。圆柱内壁展开图像由物理坐标系 ozc 转换为像素坐标系 $o'uv$ 的过程中, u 轴和 v 轴分别对应圆锥的圆周长和半径长, u 轴方向的

像素相对 v 轴的像素个数更多,即导致 u 轴和 v 轴方向的展开分辨率不一样,最终造成图 5 的逆向投影模型中展开图像 u 轴和 v 轴的各自定位误差值波动范围相差比较大,且 u 轴和 v 轴方向的 80% 像素点定位误差波动范围分别为 $[-2, 2]$ 、 $[-0.5, 0.5]$, 结合数据波动范围可知越靠近锥顶定位误差越大,两个方向的误差均值分别为 0.614 pixel 和 0.107 pixel 。

为了衡量正向投影模型的定位精度,将图 4(d) 理想柱面全景图像的像素点坐标通过正向投影模型映射到全景图像的像素点坐标,将其与原全景图像像素点坐标进行对比,1~150 和 150~300 个像素点定位误差结果如图 6(a) 和 (b) 所示。 u 轴和 v 轴方向的像素点定位误差波动范围均为 $[-0.5, 0.5]$, 两个方向的误差均值分别为 0.164 pixel 和 0.158 pixel , 正向投影模型的定位精度较高。数据结果表明:正向和逆向投影模型的坐标映射精度均为亚像素级。

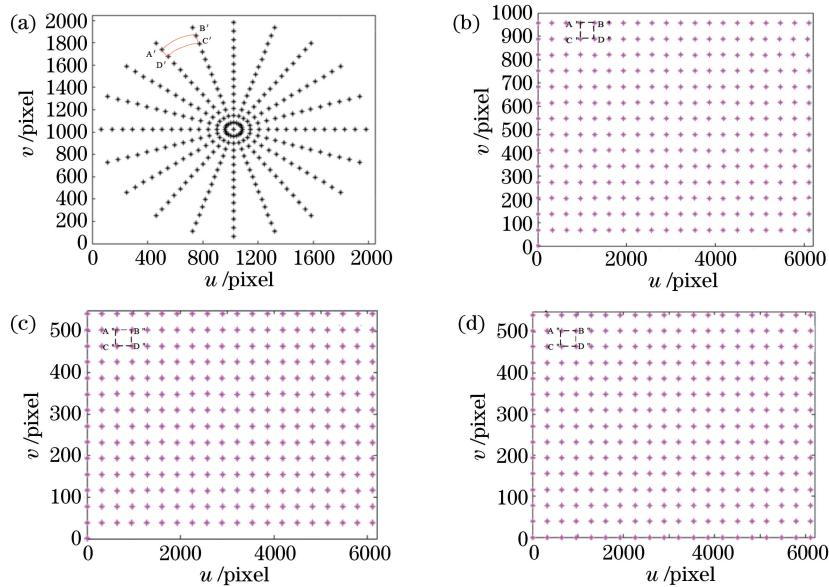


图 4 全景图像展开仿真结果图。(a)全景图;(b)比例失真的柱面全景图;(c)校正后的柱面全景图;(d)理想柱面全景图
Fig. 4 Simulation results of panoramic image expansion. (a) Panoramic image; (b) proportionally distorted cylindrical panoramic image; (c) corrected cylindrical panoramic image; (d) ideal cylindrical panoramic image

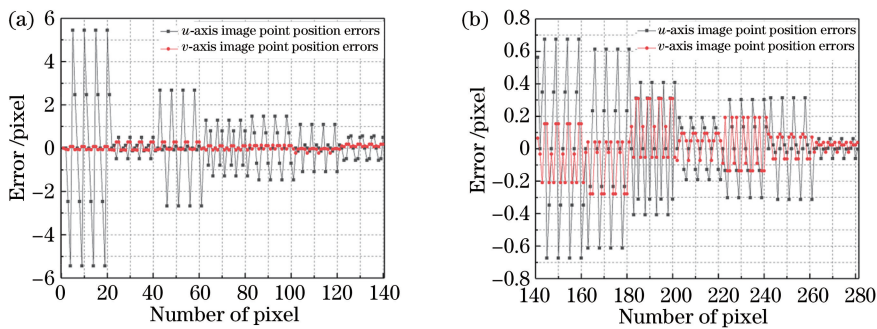


图 5 逆向投影模型像素点定位误差结果图。(a) 1~140 pixel;(b) 140~280 pixel
Fig. 5 Results of reverse projection model pixel positioning error. (a) 1–140 pixel; (b) 140–280 pixel

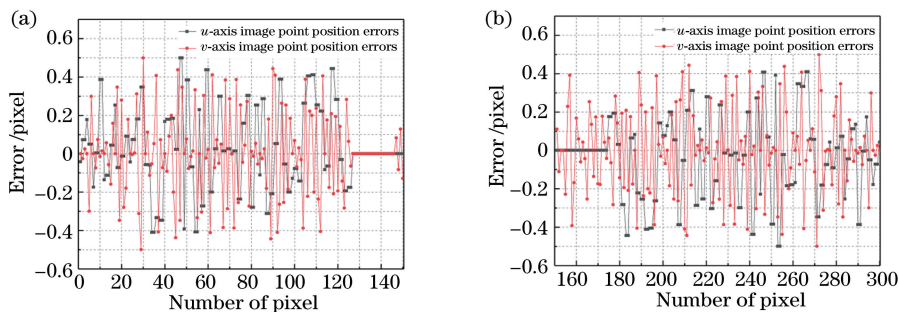


图 6 正向投影模型像素点定位误差结果图。(a) 1~150 pixel;(b) 150~300 pixel
Fig. 6 Results of forward projection model pixel positioning error. (a) 1–150 pixel; (b) 150–300 pixel

4.2 实验

实验平台的搭建过程如图 7(a)所示。

激光器用来对准,保证锥面反射镜、圆柱筒和摄像机(即镜头和相机)的轴线一致,通过前后移动遮光板判断激光光束是否发生偏移,用直尺测量全景

成像系统轴向尺寸以确定摄像机位置,将标定纸附于圆柱筒内壁上,采集的全景图像如图 7(b)所示,并设计正方形网格和长宽比为 2:1 的矩形等图像特征,以充分验证锥面双向投影展开法的畸变校正情况。

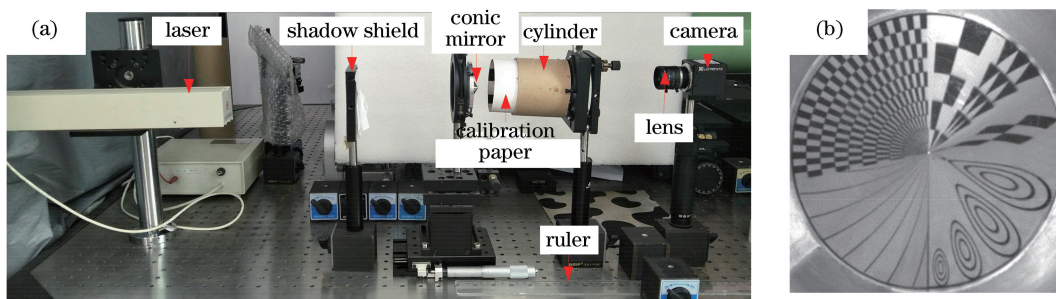


图 7 采像装置和结果图。(a)实验平台搭建图;(b)全景图像

Fig. 7 Image acquisition device and result graph. (a) Diagram of experimental platform; (b) panoramic image

通过同心圆环近似展开法和锥面双向投影结合双线性插值展开法对标定纸全景图像进行展开,其实验结果分别如图 8(a)和(b)所示。截取其局部细节图并进行像素位置坐标的标注,如图 9(b)和(c)所示,图 9(a)为标定纸图像局部细节图。图 9(b)中矩形像素位置尺寸为 $38:35 \neq 2:1$,方格像素位置尺寸

为 $10:19 \neq 1:1$,图 9(c)中的矩形的像素位置尺寸为 $38:18 \approx 2:1$,方格像素位置尺寸为 $10:11 \approx 1:1$ 。同时比较图 9(a)和图 9(b)、(c)的整体形貌可知:同心圆环近似展开后的图像存在比例失真、变形等问题,锥面双向投影展开法能够较好地校正全景图像存在的变形和比例失真等问题,准确反映原图像形状比例。

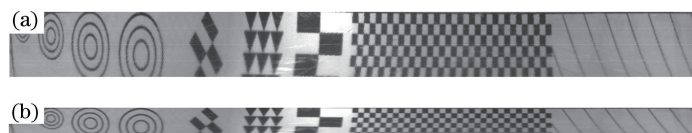


图 8 标定纸全景图像展开结果对比图。(a)同心圆环近似展开法;(b)锥面双向投影模型展开法

Fig. 8 Comparison of calibration paper panoramic image expansion results. (a) Approximate expansion method of concentric rings; (b) expansion method under conical bidirectional projection model



图 9 局部细节对比图。(a)标定纸图像;(b)同心圆环近似展开结果图;(c)锥面双向投影模型展开结果图

Fig. 9 Comparison of local details. (a) Calibration paper image; (b) approximate expansion result of concentric rings; (c) expansion result under conical bidirectional projection model

同时,通过同心圆环近似展开法、锥面双向投影展开法对实际圆柱物体内壁(某型设备身管)全景图像进行展开,其实验结果分别如图 10(a)和(b)所示。由于设备身管内壁的膛线具有一定的缠角,若展开图像存在横纵比失真、变形等问题,则导致设备身管展开图像的膛线倾斜角存在偏差,直接影响后续参数的检测精度。通过观察图 10(a)和(b)可知,同心圆环近似展开法展开后的图像存在倾斜角偏

差,结合标定纸的实验结果进一步证明:锥面双向投影模型展开法能够准确还原设备身管的内壁图像信息。

为了使实验结果不受主观意识的影响,采用信息熵(IE)^[20]和平均梯度(AG)^[21]来衡量不同方法的展开图像的质量差异,其计算结果如表 2 所示。相比于同心圆环近似展开法,改进后的展开方法标定纸展开图信息熵和平均梯度值分别提高了 3.2%

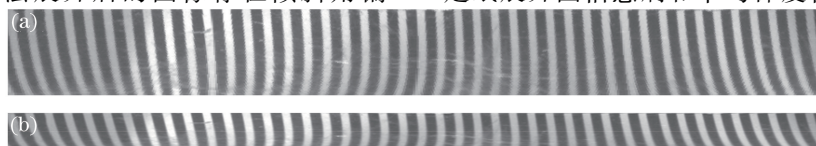


图 10 设备身管全景图像展开结果对比图。(a)同心圆环近似展开结果;(b)锥面双向投影模型展开结果图

Fig. 10 Comparison chart of barrel panoramic image expansion results. (a) Approximate expansion result of concentric rings; (b) expansion result under conical bidirectional projection model

和 20.8%,设备身管展开图信息熵和平均梯度值分别提高了 1.5%和 14.4%,其展开图像所包含的信

息丰富度和图像清晰度方面均优于同心圆环近似展开法。

表 2 不同展开方法实验结果数据表

Table 2 Data of experimental results of different expansion methods

Item	Evaluation	Approximate expansion method	Expansion method under
		of concentric rings	conical bidirectional projection model
Calibration paper	IE	6.9142	7.1382
	AG	6.6722	8.0628
Barrel	IE	6.8911	6.9947
	AG	7.9666	9.1138

5 结 论

通过建立正向投影和逆向投影模型,提出了一种含有畸变参数的双向投影模型展开方法,通过全景图像和展开图像的双向映射关系,既提高了对应像素点的定位精度,又有效改善了图像展开过程中的畸变。仿真分析结果表明: u 轴和 v 轴方向正向和逆向投影误差均值分别为 0.614 pixel、0.107 pixel 和 0.164 pixel、0.158 pixel,定位精度为亚像素级。实验结果表明,改进后的算法较好地抑制了比例失真、变形等问题,展开图像包含的信息丰富、图像清晰度较高。

参 考 文 献

- [1] Wu J, Wang L R, Huang M Y, et al. High precision calibration of fisheye camera with single image under multiple geometric constraints [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(11): 1115001.
吴军, 王玲容, 黄明益, 等. 多几何约束下的鱼眼相机单像高精度标定[J]. *光学学报*, 2018, 38(11): 1115001.
- [2] Wang P, Zhang Y J, Sun C K, et al. Multi-camera three-dimensional measurement system using an image stitching method based on flexible calibration target positioning [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(4): 0412003.
王鹏, 张颖杰, 孙长库, 等. 基于柔性靶标定位实现图像拼接的多相机三维测量系统[J]. *光学学报*, 2020, 40(4): 0412003.
- [3] Xiao X, Yang G G, Bai J. Panoramic-annular-lens distortion correction based on spherical perspective projection constraint [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(4): 675-680.
肖潇, 杨国光, 白剑. 基于球面透视投影约束的全景环形透镜畸变校正[J]. *光学学报*, 2008, 28(4): 675-680.
- [4] Bermudez-Cameo J, Lopez-Nicolas G, Guerrero J J. Fitting line projections in non-central catadioptric cameras with revolution symmetry [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2018, 167: 134-152.
- [5] Wu B, Han W Q, Shao Z Y. Surface defects inspecting inside small bores based on machine vision [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2012, 23(11): 2137-2141.
吴斌, 韩文强, 邵震宇. 基于机器视觉的微细孔壁缺陷检测[J]. *光电子 • 激光*, 2012, 23(11): 2137-2141.
- [6] Tang Y P, Wu T, Yuan G P, et al. 3D Omnidirectional vision sensor for morphology defects detection in pipelines [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(3): 726-733.
汤一平, 吴挺, 袁公萍, 等. 适用于管道内形貌检测的 3D 全景视觉传感器[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(3): 726-733.
- [7] Baker S, Nayar S K. A theory of single-viewpoint catadioptric image formation [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1999, 35(2): 175-196.
- [8] Baker S, Nayar S K. *Single viewpoint catadioptric cameras* [M]. New York: Springer, 2001: 39-71.
- [9] Agrawal A, Ramalingam S. Single image calibration of multi-axial imaging systems [C] // 2013 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 23-28, 2013, Portland, OR, USA. New York: IEEE Press, 2013: 1399-1406.
- [10] Reategui J, Rodríguez P, Ragot N. Fast omni-image unwarping using pano-mapping pointers array [C] // 2014 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), October 27-30, 2014, Paris, France. New York: IEEE Press, 2014: 5811-5815.
- [11] You R, Wu J J, Chen X, et al. An image detection method for inside wall of small-hole workpiece based on cone reflect [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2016, 35(8): 8-11.
游睿, 吴俊杰, 陈欣, 等. 基于圆锥反射微小孔径工件内壁图像检测方法[J]. *传感器与微系统*, 2016, 35(8): 8-11.
- [12] Zeng J Y, Su X Y. Catadioptric omnidirectional

- system with undistorted imaging for horizontal scene [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(5): 636-640.
- 曾吉勇, 苏显渝. 水平场景无畸变的折反射全景成像系统[J]. *光学学报*, 2003, 23(5): 636-640.
- [13] Zeng J Y, Su X Y. Catadioptric omnidirectional imaging system[J]. *Laser Journal*, 2004, 25(6): 62-64.
- 曾吉勇, 苏显渝. 折反射全景成像系统[J]. *激光杂志*, 2004, 25(6): 62-64.
- [14] Lin J G, Qian H L, Mei X, et al. Cylindrical calculation research on hyperbolic-catadioptric omnidirectional image[J]. *Computer Engineering*, 2010, 36(12): 204-206.
- 林锦国, 钱厚亮, 梅雪, 等. 双曲面折反射全景图像的柱面解算研究[J]. *计算机工程*, 2010, 36(12): 204-206.
- [15] Xiao X, Wang W, Bi K. Panoramic annular lens distortion correction using the cylinder perspective projection model[J]. *Journal of Xidian University*, 2013, 40(1): 87-92.
- 肖潇, 王伟, 毕凯. 柱面透视投影模型下的全景环形透镜畸变校正[J]. *西安电子科技大学学报*, 2013, 40(1): 87-92.
- [16] Wu X J, Guo Y X. An 360° panoramic imaging design method for cylindrical object[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(9): 0923002.
- 吴晓军, 郭亚雪. 一种圆柱物体 360°全景成像装置设计方法[J]. *光学学报*, 2015, 35(9): 0923002.
- [17] Zhou M H, Hu S Q, Chen S C. Cylinder unwarping and real-time target tracking based on omnidirectional camera[J]. *Computer Engineering*, 2013, 39(11): 1-4.
- 周明晖, 胡士强, 陈思聪. 基于全景摄像头的柱面展开及实时目标跟踪[J]. *计算机工程*, 2013, 39(11): 1-4.
- [18] Bermudez-Cameo J, Lopez-Nicolas G, Guerrero J J. Line-images in cone mirror catadioptric systems[C]// 2014 22nd International Conference on Pattern Recognition, August 24-28, 2014, Stockholm, Sweden. New York: IEEE Press, 2014: 2083-2088.
- [19] López-Nicolás G, Sagüés C. Catadioptric camera model with conic mirror [C] // Proceedings of the British Machine Vision Conference 2010, Aberystwyth. British Machine Vision Association, 2010.
- [20] Barnum H, Barrett J, Clark L O, et al. Entropy and information causality in general probabilistic theories [J]. *New Journal of Physics*, 2010, 12(3): 033024.
- [21] Huang W, Jing Z L. Evaluation of focus measures in multi-focus image fusion [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2007, 28(4): 493-500.