

文章编号 1004-924X(2024)16-2577-13

任意位姿圆柱曲面透视投影失真的图像校正

段智威, 夏晓华*, 贺鹏程, 胡 鹏

(长安大学 道路施工技术与装备教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘要: 机器视觉是检测圆柱物体表面缺陷的重要手段, 正对圆柱物体拍摄图像的透视投影失真易于校正但拍摄条件十分苛刻, 倾斜状态是圆柱物体视觉检测的常态。针对任意位姿圆柱物体表面透视投影导致的失真变形问题, 提出一种基于圆柱曲面位姿估计的图像校正方法。该方法在提取圆柱图像两侧边线的基础上, 利用圆柱半径和系统成像参数估计圆柱曲面与相机之间的位姿关系, 通过建立的圆柱曲面位姿变步长优化迭代算法, 实现圆柱曲面位姿精确计算。在此基础上, 构建圆柱曲面细分网格点与原始图像像素坐标点的对应关系, 然后将曲面展开为平面, 建立展开的细分网格点与校正图像像素坐标点的对应关系, 从而创建校正图像像素坐标点与原始图像像素坐标点的映射关系, 对原始图像进行重采样得到校正图像。实验结果表明, 圆柱曲面位姿估计的平均距离误差为 0.3 mm、平均角度误差为 0.60°; 表面贴有棋盘格圆柱物体的图像相邻角点的平均距离标准差从校正前的 12.2 pixels 降至校正后的 0.8 pixels; 校正后的实际场景图像能有效识别出圆柱表面上的文字, 圆柱曲面上缺陷的测量误差不超过 0.1 mm。校正后的圆柱物体图像消除了圆柱曲面倾斜投影失真和“近大远小”透视变形, 验证了提出方法的有效性。

关键词: 计算机视觉; 图像校正; 任意位姿圆柱曲面; 透视投影失真; 位姿估计

中图分类号: TP394.1; TN911.73 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20243216.2577

Image correction for perspective distortion of cylindrical surfaces at arbitrary poses

DUAN Zhiwei, XIA Xiaohua*, HE Pengcheng, HU Peng

(Key Laboratory of Road Construction Technology and Equipment, Ministry of Education,
Chang'an University, Xi'an 710064, China)

* Corresponding author, E-mail: xhxia@chd.edu.cn

Abstract: Machine vision is crucial for detecting surface defects on cylindrical objects. While correcting the perspective distortion of images of cylindrical objects is feasible, shooting conditions pose challenges. Cylindrical objects are often observed in tilted positions. To address distortion caused by the perspective projection of inclined cylindrical object surfaces, a method for image correction based on cylindrical surface pose estimation was proposed. This method first extracted the side edges of cylindrical images and then estimated the pose relationship between the cylindrical surface and the camera by using the cylinder radius and the system's imaging parameters. An iterative algorithm with variable step size was employed to precisely calculate the cylindrical surface pose. Subsequently, a correspondence relationship between the subdivision mesh points of

收稿日期: 2024-03-11; 修订日期: 2024-05-31.

基金项目: 陕西省重点研发计划项目 (No. 2024GX-YBXM-197); 陕西省交通运输厅科研项目 (No. 23-10X); 秦创原
引用高层次创新创业人才项目 (No. QCYRCXM-2022-352)

cylindrical surface and the original image pixel coordinates was established. The surface was unfolded into a plane, and a correspondence relationship between the unfolded subdivision mesh points and the corrected image pixel coordinates was established. This created a mapping relationship between the corrected image pixel coordinates and the original image pixel coordinates, allowing for resampling of the original image to obtain the corrected image. Experimental results demonstrate that the average distance error of cylindrical surface pose estimation is 0.3 mm, and the average angle error is 0.60° . The average distance standard deviation of adjacent corner points of a chessboard-patterned cylindrical object surface decreases from 12.2 pixels pre-correction to 0.8 pixels after correction. The corrected image effectively identifies text on the cylindrical surface, with a measurement error of defects on the cylindrical surface not exceeding 0.1 mm. The corrected image eliminates the inclined projection distortion and "near large, far small" perspective deformation of the cylindrical surface, validating the effectiveness of the proposed method.

Key words: computer vision; image correction; inclined cylindrical surface; perspective projection distortion; pose estimation

1 引言

圆柱物体在工业领域扮演着重要角色,被广泛应用于机械、运输、化工等领域,涵盖机械传动轴、运输管道、化工罐体、桥梁缆索等方面,其表面质量^[1-3]关系到产品的使用性能和耐久性。机器视觉^[4-6]是产品表面质量检测的常用方式,由于圆柱物体表面的非平面特征,圆柱曲面在透视投影成像中会存在“近大远小”透视变形,同时由于圆柱曲面相对相机的角度变化,圆柱曲面会以一定倾斜角度成像,不同的成像曲面区域与实际物理尺寸有着不同的对应关系,从而产生复杂的透视投影失真。该失真会导致柱体表面标签文字扭曲无法识别、表面腐蚀位置和大小误判、裂纹长度测量不准确等问题,从而影响维护和修复工作的及时性和准确性,因此有必要对圆柱曲面透视投影失真进行校正。

为解决圆柱曲面透视投影导致的失真变形,Xu等^[7]在圆柱曲面正对相机的情况下,测量获得圆柱曲面半径、位姿和相机内参等参数,构建圆柱曲面三维模型,并将三维模型展开以获取畸变校正后的标签图像。该方法需要确保圆柱曲面正对相机,圆柱曲面的位姿等参数需要人工测量,校正效率低,无法进行实时处理。Li等^[8]通过定位圆柱曲面上QR码的特征点,利用交叉比例法计算出QR码的标准尺寸,通过透视投影对畸变的QR码图像进行校正。该方法依赖于图像的几何纹理,仅适用于校正表面具有QR码的圆柱曲面,适用范围较小。Zhang等^[9]通过顶部的定位相机拍

摄圆柱端面来对圆柱曲面进行定位,并利用置于被测圆柱曲面四周的多个相机建立圆柱曲面的三维模型并展开。该方法可实现对竖直圆柱曲面的定位并校正,但相机成本过高,并且无法实现任意位姿圆柱曲面的定位。Zhu等^[10]取消了顶部的定位相机,使用环绕圆柱曲面布置的四个相机计算出圆柱物体的相对位姿,并根据映射关系对柱体侧面进行展开。该方法对相机位置布置要求高,不同相机的位置误差会直接影响物体位姿的计算。夏晓华等^[11]提出一种不需要纹理或端面参考信息的校正方法,通过将圆柱图像失真分解为横向变形和轴向变形,建立坐标转换关系进行像素重采样实现校正。该方法算法实现简单,运算速度快,但无法对倾斜的圆柱曲面进行校正。

针对上述问题,本文提出一种无需在圆柱表面布置特殊纹理,使用单个相机对圆柱曲面实现位姿估计,适用于倾斜圆柱曲面的透视投影失真图像校正方法。该方法所需的系统成像参数和圆柱半径易于获得,不依赖图像的几何纹理,不需要提前获取图像的深度信息等特征,能够有效校正处于倾斜位姿的圆柱曲面,提高了圆柱曲面校正的适用范围。

2 任意位姿圆柱曲面透视投影失真校正

2.1 任意位姿圆柱曲面透视投影失真校正流程
如图1所示,受透视投影失真的影响,圆柱曲

面在图像中的透视投影变形程度会沿圆柱曲面径向逐渐加剧,扭曲变形在圆柱边缘处尤为严重。此外,由于圆柱曲面相对镜头平面存在倾斜,曲面会因其距离镜头的位置而产生“近大远小”的成像效果,会对圆柱曲面的检测精度造成影响。在多数情况下,圆柱表面上的缺陷凹凸程度相对较小,可以合理地假设圆柱曲面为光滑表面。

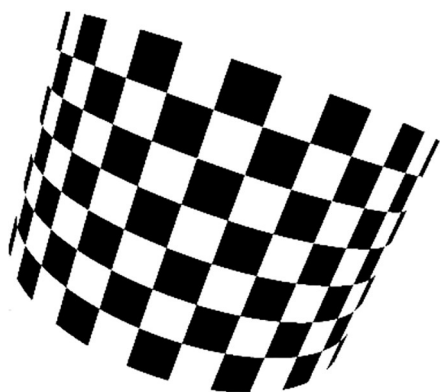


图1 圆柱曲面透视投影效果图

Fig. 1 Perspective Imaging Effect of Cylindrical Surface

圆柱曲面透视投影失真校正的流程如图2所示,①为校正前图像,②为圆柱曲面三维点集,③为剔除掉圆柱曲面不可视面后的三维点集,④为具有图像像素信息的圆柱曲面三维点集,⑤为将圆柱曲面展开为平面的三维点集,⑥为具有图像像素信息的平面三维点集,⑦为校正后图像。主要步骤如下:

(1)首先,获取校正参数。通过仪器测量得到圆柱半径信息,再利用目前成熟的相机标定算法^[12]对相机进行标定得到相机成像参数,同时对采集的图像做镜头畸变校正。

(2)利用边缘检测算法提取到圆柱曲面图像的两条边缘轮廓直线。再根据图像中边缘轮廓直线与圆柱曲面空间位置姿态的关系,建立圆柱曲面实际位姿优化搜索算法,获得圆柱曲面在相机坐标系下的具体位置和姿态。

(3)根据位姿估计算法得到的圆柱曲面位姿信息同相机参数建立圆柱曲面细分网格点,去除圆柱曲面的投影不可视点,得到圆柱曲面细分网格点与原始图像像素坐标点的对应关系,并在指定物距下进行展开。

(4)通过展开前后的圆柱曲面细分网格点之间的联系,建立圆柱曲面展开后细分网格点与校正图像像素坐标点的对应关系,从而创建校正图像像素坐标点与原始图像像素坐标点的映射关系,对原始图像进行重采样,赋予校正图像像素信息,完成圆柱曲面的矫正。

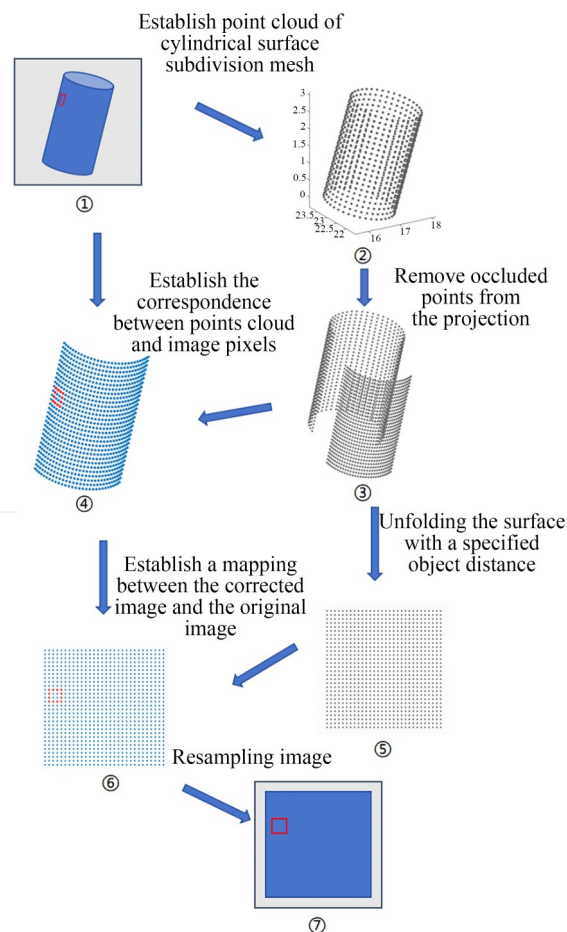


图2 圆柱曲面透视投影失真图像校正流程

Fig. 2 Process of correcting perspective projection distortion in cylindrical surface images

2.2 透视投影失真校正方法

本文对圆柱曲面进行位姿估计及其校正过程涉及的各坐标系间关系,可以由图3所示的针孔透视投影模型^[13-15]来描述。图3中,主要涉及相机坐标系 $O_c-X_cY_cZ_c$ 、世界坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$ 和像素坐标系 O_0-uv 三个坐标系,并将相机坐标系作为本文坐标系的基础,其他三个坐标系在相机坐标系的基础上变化。其中坐标系之间的变换表示为 (R, t) , R 为 3×3 的旋转矩阵, t 为 3×1

的平移向量,定义世界坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$ 以圆柱曲面在相机坐标系 $X_cO_cZ_c$ 基准面与圆柱轴线的交点作为原点 O_w ,并以圆柱轴线作为 Z_w ,对圆柱曲面的平移旋转均以 O_w 作为基准点。

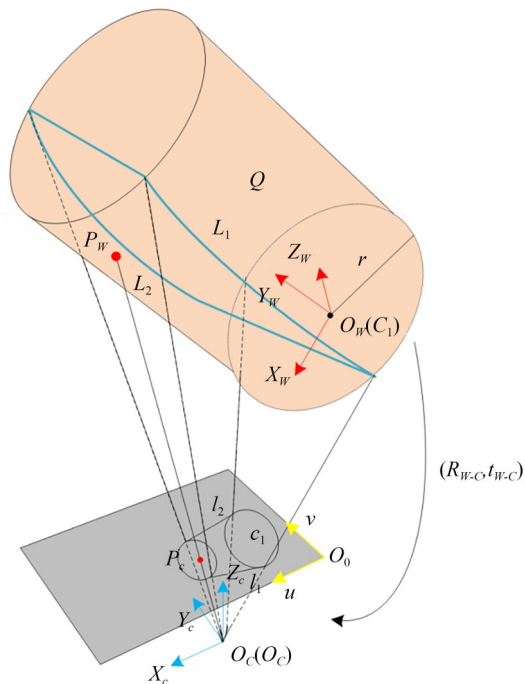


图3 圆柱曲面透视投影模型

Fig. 3 Perspective projection model of cylindrical surface

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_w^c & t_w^c \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

然后将相机坐标系转换到图像坐标系:

$$Z_c \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

设像素坐标系下的点对应表示为 $u=(u, v)$, 则 p_c 和 u 之间的坐标转换关系表达为:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_x & 0 & u_0 \\ 0 & k_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中: X 轴尺寸放大系数 $k_x=1/dx$, Y 轴尺寸放大系数 $k_y=1/dy$ 。

由上式可得相机模型:

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = M_{in}^c M \begin{bmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中: M_{in} 是包括了相机的焦距以及图像中心点等参数的相机内参矩阵, M 为包含了旋转矩阵和平移向量的相机外参矩阵。

考虑到圆柱曲面的特征,其绕自身轴线旋转角度和沿 Y 轴偏移距离不会对透视投影产生影响,因此在位姿估计中忽略这些参数,从而简化模型,降低计算复杂度,在相机坐标系下,令圆柱曲面轴线的位姿 ϖ :

$$\varpi = f(d, \phi, \alpha, \beta), \quad (5)$$

其中:物距 d 和偏移 ϕ 分别表示圆柱中心 O_w 与 O_c 在 Z 轴和 X 轴方向的距离,单位为 mm; α 和 β 分别表示圆柱轴线在绕 X_c 轴和 Z_c 轴的旋转角度,单位为度。

通过式(6)得圆柱曲面轴线的空间单位向量 n :

$$n = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & -\sin(\beta) & 0 \\ \sin(\beta) & \cos(\beta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

首先根据位姿信息,得到成像区域圆柱曲面的实际高度:

$$H = \frac{(d-r)\varphi}{\cos\alpha - \varphi\sin\alpha} + \frac{(d-r)\varphi}{\cos\alpha + \varphi\sin\alpha}, \quad (7)$$

其中, φ 为相机传感器上下边缘与光心的夹角。

将圆柱曲面按照垂直于曲面法线方向进行网格化,网格尺寸 dm 小于图像像素点对应的实际尺寸,每个网格点代表圆柱曲面的一个区域,得到点信息矩阵的行数 w_1 和列数 w_2 :

$$\begin{cases} w_1 = H/d_m \\ w_2 = 2\pi r/d_m \end{cases}. \quad (8)$$

进一步建立圆柱曲面在相机坐标系下的原始细分网格点矩阵 P_0 , 其中任意一点 $p_0(i, j)$ 的坐标信息如下:

$$p_0(i, j) = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_o \cos(\theta_j - 180) \\ R_o \sin(\theta_j - 180) \\ (w_1/2 - i)d_m \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中: $\theta = 2\pi/j; i = 1, 2, \dots, w_1; j = 1, 2, \dots, w_2$ 。

然后从相机坐标系投影到图像坐标系中,得到不考虑 z 值的圆柱曲面二维投影点集 $P_{0_{2D}}$ 。

并根据初始位姿 ϖ_0 对原始细分网格点矩阵 P_0 作平移旋转变换,得到对应位姿的矩阵 A ,其中任意一点 a 的变换公式如下:

$$a(i, j) = T(\varpi, p_0 | p_0 \in P_0) = \begin{bmatrix} C_z & -S_z C_x & S_z S_x & d \\ S_z & C_z C_x & -C_z S_x & 0 \\ 0 & S_x & C_x & \phi \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

式中: C_z, S_z 分别为 Z 轴旋转角的余弦值和正弦值, C_x, S_x 为 X 轴旋转角的余弦值和正弦值。

通过判断靠近边缘的点与圆柱曲面中心轴线的距离来甄别出相机视角中被遮挡的不可视点,并将其剔除,得到由圆柱曲面可视面组成的点集 A_{2D} :

$$A_{2D} = \{A_{2D} \in P_{0_{2D}} : l_{(i+1)j} \leq l_{ij}\}, \quad (11)$$

其中, l_{ij} 表示点 P_{ij} 到直线 L 的距离按式 (12) 计算:

$$l_{ij} = \frac{|Ax_{ij} + By_{ij} + C|}{\sqrt{A^2 + B^2}}. \quad (12)$$

根据点集 $P_{0_{2D}}, A$ 和 A_{2D} 三者之间的关联性,去除点集 A 中的不可视点得到圆柱曲面三维可视面点集 A_{3D} :

$$A_{3D} = \{A \cap (A_{2D} \cap P_{0_{2D}}) | A_{3D} \in A\}. \quad (13)$$

通过式 (3) 投影变换将点集 A_{2D} 变换到像素坐标系,得到二维可视面逐像素映射点集 P_m 。

然后通过透视投影变换将 P_m 同原始图像 P_{img} 的像素点进行对应,将读取到的圆柱曲面像素值 I 赋值给对应的三维可视面矩阵点。

$$I_{P_{3D}}(i, j) = I_{img}(\frac{i}{j} x_{2D}/dx + u_0, \frac{i}{j} y_{2D}/dy + v_0). \quad (14)$$

并以圆柱曲面的物距 d 为基准,在指定距离下将圆柱曲面展开为平面,得到圆柱曲面可视面展开后的点集 P_{2D} ,具体公式为:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (i - w_1/2) * dm \\ (j - w_2/2) * dm \\ d \end{bmatrix}. \quad (15)$$

根据具有色彩信息三维可视面矩阵,将原始图像的颜色或灰度值映射到展开平面上的对应点。

$$I_{unfold}(i, j) = I_{P_{3D}}(i, j). \quad (16)$$

最后通过透视投影变换,将展开平面投影到像素坐标系,完成原始图像的重采样,得到带有原始图片颜色信息的校正图片。

2.3 圆柱曲面位姿估计算法

为获得原始图像与校正图像的映射关系,需要获取相机内参和圆柱曲面姿态信息,在已知圆柱半径情况下,其相机内参通过相机标定获得,通过建立圆柱曲面实际位姿优化搜索算法,求解圆柱轴线空间信息,以解决其在相机坐标系下的位姿问题。

对于固定直径的圆柱曲面,其投影边线是固定唯一的,圆柱曲面在三维空间中的视觉边线在二维平面上的投影为一条直线,本文基于该特性推导,得到圆柱曲面的投影轮廓和位姿之间存在以下规律:

圆柱两边线的间距同物距 d 呈正相关;边线的位置同圆柱曲面沿 X 轴的偏移量 ϕ 呈正相关;两边线的夹角同 X 轴旋转角度 α 呈正相关;中轴线的角度同圆柱绕 Z 轴旋转角度量 β 呈正相关。

结合以上四个条件,建立包含四个未知参数位姿估计优化搜索算法。首先采用边缘提取算法获取图像上圆柱的两侧边线边缘信息 (γ, b) , b 为边线与图像坐标 X 轴的交点, γ 为边线相对图像坐标系 Y 轴的偏转角。

为了简化问题,本文通过初始化圆柱曲面位姿参数优化算法计算量,假定 $X_c O_c Z_c$ 面上圆柱曲面横截面为圆形,取 $X_c O_c Z_c$ 面圆柱曲面边线间距为弧长,通过几何关系易得近似物距 d_0 ;取两边线交点的中点相对图像坐标系 Y 轴的位置为 X 轴的近似偏移量 ϕ_0 ;取两边线的夹角为 X 轴近似偏转量 α_0 ;取中轴线的角度作为圆柱绕 Z 轴近似偏转量 β_0 ,得到初始位姿 ϖ_0 。

根据针孔成像原理,圆柱曲面边线投影为直线,所以圆柱曲面矩阵在 Y 轴方向只需要两层点阵数据便可获得所求投影边线参数,本文建立两层以 Y_c 轴为轴线、 r 为半径、相邻两点角度为 θ 的点集 P_0 来模拟圆柱曲面:

$$P_0 = \begin{pmatrix} p_{0_{11}} & \cdots & p_{0_{1j}} \\ p_{0_{21}} & \cdots & p_{0_{2j}} \end{pmatrix}, j \in col. \quad (17)$$

点集 P_0 中任意一点 $p_{0_{ij}}$ 坐标可表示为:

$$p_{0j} = \begin{bmatrix} {}^j x_0 \\ {}^j y_0 \\ {}^j z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_o \cos(j\theta - 180) \\ R_o \sin(j\theta - 180) \\ 10 - 20i \end{bmatrix}, \quad (18)$$

式中: $j=1, 2, \dots, 180/\theta, \theta$ 取 0.01° 。

根据初始位姿 ϖ_0 对点集中的坐标点作平移旋转变换, 输出指定位姿 ϖ_0 的圆柱曲面点集 P_e :

$$P_e(i, j) = \begin{bmatrix} {}^i x_e & {}^i y_e & {}^i z_e & 1 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} C_Z & -S_Z C_X & S_Z S_X & \Delta x \\ S_Z & C_Z C_X & -C_Z S_X & 0 \\ 0 & S_X & C_X & \Delta z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^j x_0 \\ {}^j y_0 \\ {}^j z_0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (19)$$

将仿真圆柱的投影边线与从图像中获取的目标圆柱曲面边线进行比较, 建立变步长迭代函数对圆柱曲面位姿进行求解:

$$\varpi_{k+1} = \begin{bmatrix} d_{k+1} & \psi_{k+1} & \alpha_{k+1} & \beta_{k+1} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \rho_d d_k \\ \rho_\psi \psi_k \\ \rho_\alpha \alpha_k \\ \rho_\beta \beta_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Lambda_d \tau_d \Delta d_k \\ \Lambda_\psi \tau_\psi \Delta \psi_k \\ \Lambda_\alpha \tau_\alpha \Delta \alpha_k \\ \Lambda_\beta \tau_\beta \Delta \beta_k \end{bmatrix}, \quad (20)$$

其中, τ 为加权系数对角矩阵, 根据各个位姿参数的估计值, 赋予不同权值, 加快迭代的收敛, 本文 $\tau_{d,0}$ 取值为 1:

$$\tau_k = \text{diag}[\tau_{d,k} \quad \tau_{\psi,k} \quad \tau_{\alpha,k} \quad \tau_{\beta,k}], \quad (21)$$

$$\tau_{d,k+1} = \begin{cases} \frac{1}{2} \tau_{d,k} & d_k \times d_{k-1} < 0 \\ \tau_{d,k} & d_k \times d_{k-1} > 0 \end{cases}, \quad (22)$$

Λ 为判定系数对角矩阵, 以 Λ_d 为例: 边线间距 $b_{1k} b_{2k}$ 小于 $B_1 B_2$, 表明圆柱曲面物距大于理想物距, 需要减小物距 d , 则 Λ_d 取 -1 , 反之取 1 :

$$\Lambda = \text{diag}[\Lambda_d \quad \Lambda_\psi \quad \Lambda_\alpha \quad \Lambda_\beta], \quad (23)$$

$$\Lambda_d = \begin{cases} 1 & b_{1k} b_{2k} > B_1 B_2 \\ -1 & b_{1k} b_{2k} < B_1 B_2 \\ 0 & b_{1k} b_{2k} = B_1 B_2 \end{cases}. \quad (24)$$

$\Delta \varpi$ 为迭代步长, 本文初始参数均设为 1:

$$\Delta \varpi = [\Delta d \quad \Delta \psi \quad \Delta \alpha \quad \Delta \beta]^T. \quad (25)$$

设计如式(26)所示收敛判定函数, 用于评估当前迭代结果是否满足收敛条件:

$$S_w = \sum_i (\gamma_{i,k} - \gamma_i^* + \eta(b_{i,k} - b_i^*)), \quad (26)$$

其中: γ 和 γ^* 分别表示投影边线和实际边线在 X 轴交点处的角度。 b 和 b^* 分别表示投影边线和实际边线的 X 轴交点位置。 η 是一个权重参数, 用

于平衡位置误差和角度误差的影响。

重复以上步骤直至 S_w 小于预设阈值或抵达迭代次数上限, 得到当前仿真圆柱对应位姿 ϖ 。

3 实验结果及分析

3.1 实验条件

为了验证校正算法的实际性能, 搭建了如图 4 所示的实验平台。该平台由成像相机、移动平台和角度传感器构成。其中相机采用 2448×2048 分辨率、 $3.45 \mu\text{m} \times 3.45 \mu\text{m}$ 像元尺寸的工业相机; 移动平台可控制圆柱转动以及定向移动, 平移精度为 $\pm 0.1 \text{ mm}$; 角度传感器固定在圆柱端面, 用于获取圆柱的角度变化, 精度可达 $\pm 0.01^\circ$; 移动平台和角度传感器用于检验本文位姿估计方法的精度。实验前已完成对成像相机的标定, 并对角度传感器进行校准和重力补偿。

本文所有实验均在 Win10 操作系统下进行, 计算机的处理器是 Intel Core i5-12400, 内存为 16 GB, 显卡为 NVIDIA GeForce GTX 1650, 算法基于 Visual Studio 搭建。

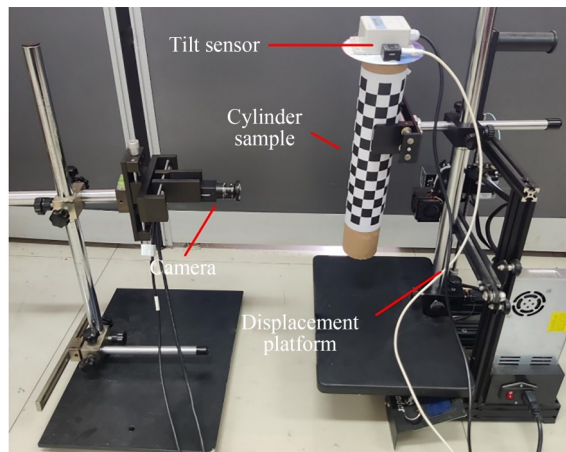


图 4 实验平台

Fig. 4 Experimental Platform

3.2 位姿估计精度分析实验

由于空间中圆柱曲面的真实位姿无法获取, 并且位置和角度各自的误差会对对方造成影响, 为此本文将位姿从距离和角度两个部分分别验证, 并以不同位姿圆柱体之间的距离差和角度差来衡量位姿估计算法的准确性。

实验中使用 4 组半径分别为 45 mm, 37.5 mm, 30 mm 和 25 mm 的圆柱体进行上述实验。移动平台沿水平面定向移动被测圆柱体,并采集圆柱图像,以位移平台的平移量作为不同姿态之间的距离差 M^* ,之后对圆柱体进行旋转操作,由倾角传感器得到的不同倾斜状态间的角度差 N^* ,作为标准值与根据位姿估计算法对采集的圆柱图像计算得到的位姿差值作对比。

对每种圆柱体分别在不同位姿下进行了 11 组采样实验,每组重复 3 次取平均值作为最终结果,来验证本文所提出的位姿估计算法的有效性与精确性,不同位姿圆柱体的距离差与角度差通过下式计算:

$$M_i = \sqrt{\sum_{j=1}^k ((d_{i,j} - d_{i-1,j})^2 + (\phi_{i,j} - \phi_{i-1,j})^2)}, \quad (27)$$

$$N_i = \arccos \left(\frac{\sum_{j=1}^k \mathbf{n}_{i,j} \cdot \mathbf{n}_{i-1,j}}{\sqrt{\sum_{j=1}^k \mathbf{n}_{i,j}^2} \cdot \sqrt{\sum_{j=1}^k \mathbf{n}_{i-1,j}^2}} \right), \quad (28)$$

式中: $\mathbf{n}$ 为圆柱曲面轴线的方向向量, i 指圆柱曲面所在的位置序列, j 指对圆柱曲面的第 j 次测量。

随机选取实验中一张图像,其位姿估计迭代结果如表 1 所示。将初始圆柱曲面位姿参数代入

表 1 单一圆柱曲面位姿估计迭代表

Tab.1 Iterative table for single cylindrical surface pose estimation

Iterations	d/mm	ϕ/mm	$\alpha/(^{\circ})$	$\beta/(^{\circ})$	S_w
0	187.33	10.81	-7.105	0.3436	-89.687
1	187.83	9.81	-8.106	0.844	-56.527
2	188.33	10.31	-7.606	1.344	-25.528
3	188.83	10.81	-37.856	1.844	-19.970
4	189.33	10.56	-8.106	2.344	-15.523
5	189.08	10.69	-7.981	2.094	3.008
6	189.08	10.69	-8.043	2.219	-6.288
7	189.08	10.69	-8.012	2.344	-2.953
8	189.08	10.81	-8.012	2.344	0.494
9	189.08	10.75	-8.012	2.469	-1.833
10	189.08	10.69	-8.012	2.406	2.733
11	189.08	10.72	-8.012	2.344	2.208
12	189.08	10.72	-8.012	2.344	-0.084

迭代算法,迭代过程中,参数的调整会考虑各参数之间的耦合作用,保证整体趋于收敛,通过 12 轮迭代,各个参数逐步收敛,目标优化函数 S_w 趋近于 0,实现圆柱曲面的位姿估计。

不同半径圆柱体位姿测量的角度误差和距离误差结果如图 5~图 6 所示,从 45 mm 到 25 mm 的四组不同半径圆柱曲面的最大角度误差为 0.89° ,平均角度误差小于 0.60° ;最大距离误差小于 0.6 mm,平均距离误差小于 0.3 mm。

使用传感器得到的相对位姿和估计相对位姿来计算不同半径圆柱曲面的位姿估计均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE),来评估估计结果的稳定性:

$$RMSE_{\Delta d} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_i - M_i^*)^2}, \quad (29)$$

$$RMSE_{\Delta \theta} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (N_i - N_i^*)^2}. \quad (30)$$

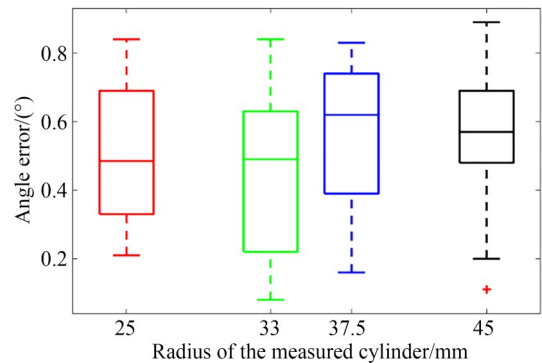


图 5 不同半径圆柱体位姿测量的角度误差

Fig.5 Angular error in pose measurement of cylinders with different radii

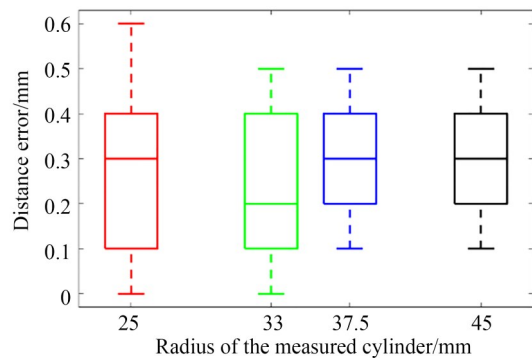


图 6 不同半径圆柱体位姿测量的距离误差

Fig.6 Distance error in pose measurement of cylinders with different radii

结果如表 2 所示,在使用 4 种不同半径圆柱曲面实验的情况下,本文方法估计的不同半径圆柱曲面位姿的最大角度均方根误差小于 0.65° ,角度平均均方根误差为 0.58° ,距离误差结果跟移动平台的控制精度接近,距离平均均方根误差为 0.3 mm ,结果稳定。通过以上实验结果,可以证明本文方法对圆柱曲面位姿的估计具有良好的适用性和精确性。

表 2 不同半径圆柱曲面的位姿估计误差结果

Tab. 2 Pose estimation error results for cylindrical surfaces with different radii

Radius/mm	RMSE $\Delta\theta/(^\circ)$	RMSE $\Delta d/\text{mm}$
45	0.56	0.3
37.5	0.50	0.3
33	0.61	0.3
25	0.65	0.3

3.3 圆柱曲面透视失真校正实验

为验证本文方法对圆柱曲面透视投影失真校正的有效性,设计了第一组实验,采用不同直径圆柱作为校正对象,为直观反映失真的校正效果,其表面贴有方块边长为 10 mm 的棋盘格标定物。目前,针对圆柱透视投影失真校正的研究不多,挑选目前圆柱曲面透视投影失真方面较为先进的校正方法,将夏晓华等^[11]提出的通过将圆柱图像失真分解为横向变形和轴向变形,建立坐标转换关系进行像素重采样实现校正的圆柱曲面校正算法作为对比方法 1,将 Zhu 等^[10]提出的使用四个相机计算圆柱位姿,并根据映射关系对圆柱曲面进行展开的圆柱曲面校正算法作为对比方法 2,将 Zhang 等^[9]使用摄像头从上方来确定圆柱曲面的位置,建立圆柱体的三维模型,对圆柱曲面进行校正的算法作为对比方法 3。将目标圆柱夹持在上述实验平台上,在不同的位置、不同的角度以及不同焦距下对圆柱曲面进行取样,作为校正实验的标准样本。原始图像如图 7 所示,其中,图 7(a)~7(c)和图 7(e)~7(g)分别展示了半径为 66 mm 和 158 mm 的圆柱曲面正对相机、相对相机偏移以及相对相机偏转三种特定位置时的图像,其圆柱轴线与相机光轴近似垂直;图 7(d)和图 7(h)展示了圆柱曲面在空间中自由放置的图像。值得注意的是,贴在圆柱曲面表面的棋

盘格标定物仅衡量校正效果,并不影响本方法对未贴有棋盘格标定物的圆柱曲面进行图像校正。

图 7 中分别展示了使用本文方法和对比方法的校正结果。对比校正前后图像可知,在未校正的图像中,由于透视投影失真,黑白方块大小分布不均,图像边缘的横向直线弯曲严重。在经过校正后的图像中,使用本文方法校正后的棋盘格纹理未发生明显变形,黑白方块大小匀称,由于透视投影失真造成的圆柱曲面纹理变形在校正后得到改善。而为了客观评估校正前后透视投影失真对圆柱曲面成像的影响,使用棋盘格相邻角点的最大误差与标准差来评价图像校正前后边长测量的精确度,其计算公式为:

$$\begin{cases} e = \frac{|x_i - \bar{x}|_{\max}}{\bar{x}} \times 100\% \\ S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \end{cases}, \quad (31)$$

式中: x_i 为相邻角点的距离, $\bar{x}$ 为相邻角点距离的均值。

由表 2 结合校正图像可知,对于圆柱轴线与相机光轴近似垂直的图 7(a)~7(c)和图 7(e)~7(g)六张图像,使用本文方法校正后的棋盘格相邻角点距离标准差平均为 0.8 pixels 。但由于圆柱体实际放置不会严格垂直,对比方法 1 和对比方法 2 两种校正方法校正后的效果较差,棋盘格相邻角点距离标准差平均分别为 2.0 pixels 和 1.6 pixels ,其中对比方法 1 在处理如图 7(b)和图 7(f)所示的圆柱曲面相对相机存在偏移的图像时,原本应该为正方的棋盘格方块出现了梯形拉伸现象。并且如图 7(d)和图 7(h)的校正结果所示,当圆柱曲面处于自由状态,圆柱轴线与相机光轴偏离垂直的倾斜角度较大时,校正结果的差距表现更为明显,使用本文方法校正后的棋盘格相邻角点距离标准差仅为 0.8 pixels 和 0.5 pixels ,校正效果与处于垂直状态的圆柱曲面无明显差异。使用对比方法 1 校正后的棋盘格相邻角点距离标准差分别为 6.9 pixels 和 7.6 pixels ,使用对比方法 2 校正后的棋盘格相邻角点距离标准差分别为 9.0 pixels 和 7.8 pixels ,棋盘格标定物的线条仍然存在明显的变形,显然不能有效地对圆柱曲面的透视投影失真和倾斜投影变形进行校正。而对比方法 3 由于不能获取圆柱体在空

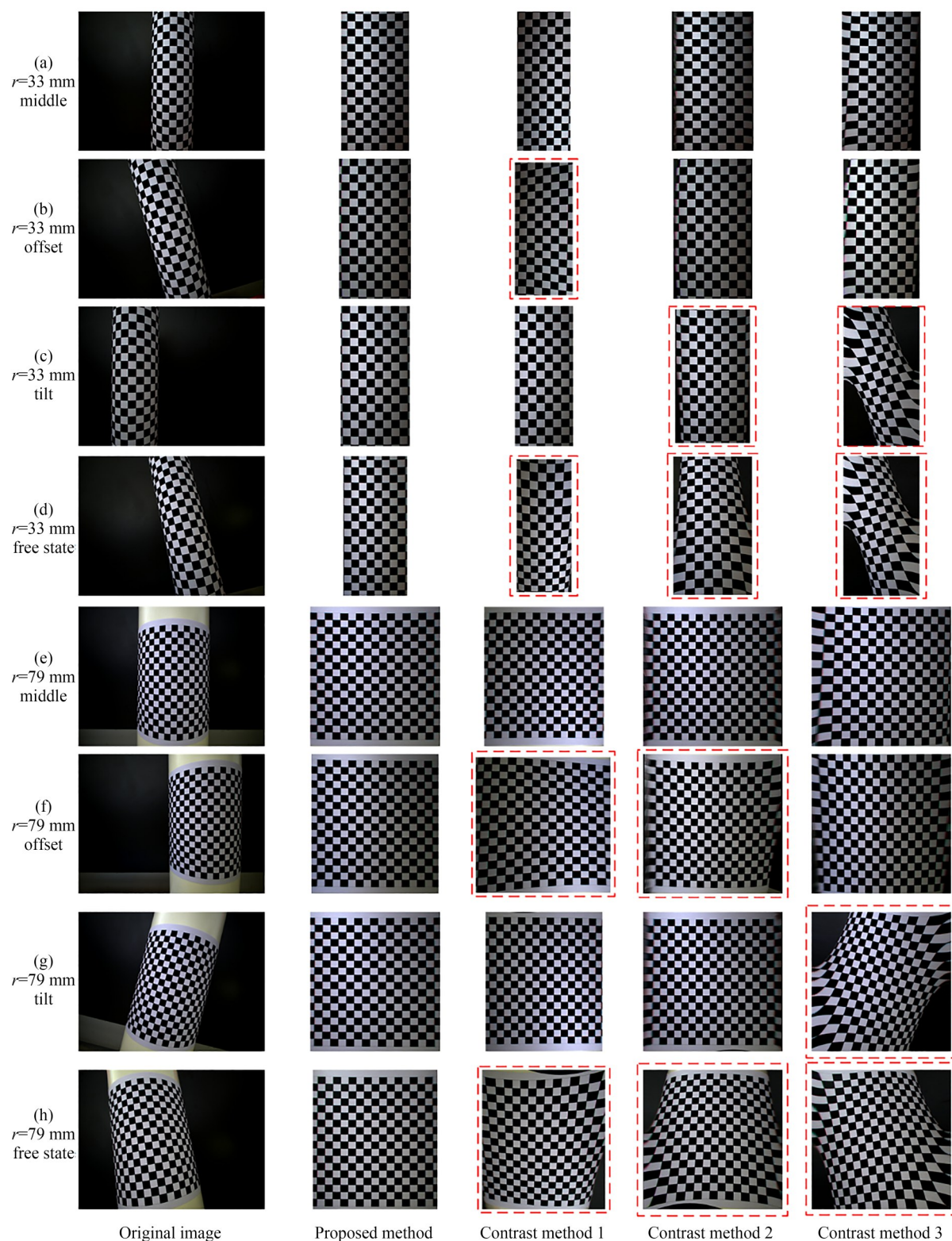


图 7 圆柱曲面透视投影失真校正结果对比

Fig. 7 Comparison of correction results for cylindrical surface perspective distortion

间中的倾斜角度,其校正效果整体不如其他算法,在处理圆柱轴线与相机 Y 轴近似平行的图 7

(a)~7(b)和图 7(e)~7(f)四张图像时,由于轴线并不绝对垂直,其校正图像边缘会存在拉伸变形

现象,校正后的棋盘格相邻角点距离标准差平均为 1.7 pixels,高于本文方法的 0.8 pixels。在处理圆柱轴线处于倾斜状态的图像时,校正效果如图 7(c)~7(d)和图 7(g)~7(h)所示,校正后的图像的整体畸变十分明显,棋盘格图案的线条未能恢复成直线状态,角点检测算法无法检测到有效角点,显然该算法不能有效校正倾斜状态的圆柱体。通过以上校正结果,可以看出本文方法可以较好地对圆柱曲面的透视投影失真进行校正,尤其是在圆柱处于倾斜状态和消除边缘区域失真方面,本文方法明显优于对比方法。

此外,棋盘格相邻角点距离最大误差结果如表 3 所示,原图圆柱曲面的最大误差为 55.3%,整组图片平均最大误差为 39.4%。经过本文方法校正后,最大误差为 6.9%,整组图片平均最大误差仅为 4.6%,经过对比方法 1 校正后整组图片平均最大误差为 14.8%,最大误差为 49.4%,而对比方法 2 整组图片平均最大误差为 14.8%,

其中图 7(d)与图 7(h)的最大误差分别为 48.3%和 61.2%,甚至高于原始图像的最大误差,并且如图 9(c)和图 9(f)所示,由于被检测的圆柱曲面存在不可避免的微小倾斜,对比方法 2 校正后的棋盘格边角仍然存在弯曲现象,校正效果不理想。对比方法 3 在圆柱体处于近似垂直的情况下,棋盘格相邻角点距离最大误差受细微倾斜角度的影响也十分明显,可以检测出角点的四幅图像的平均误差为 14.1%,远高于本文方法,校正效果明显不能满足测量需求。

在使用本文方法对原始图像进行校正后,棋盘格横向直线未出现明显弯曲,方块大小匀称,棋盘格相邻角点距离标准差最高为 1.1 pixels,平均距离标准差为 0.8 pixels,并且在处理图 7(d)和图 7(h)所示的处于自由状态的圆柱曲面时,校正效果稳定,圆柱曲面的倾斜对校正准确性没有明显影响,显著优于两个对比方法,验证了本文方法在圆柱曲面透视投影失真校正过程中的有效性。

表 2 棋盘格相邻角点距离标准差结果对比

Tab. 2 Comparison of standard deviations of checkerboard corner distances (pixels)

Image Number	Original image Standard deviation	Proposed method Standard deviation	Contrast method 1 Standard deviation	Contrast method 2 Standard deviation	Contrast method 3 Standard deviation
Fig. 7(a)	12.6	0.8	1.6	2.8	1.8
Fig. 7(b)	13.2	1.1	3.9	1.3	1.4
Fig. 7(c)	10.9	0.8	1.1	2.8	—
Fig. 7(d)	9.9	1.2	6.9	9.0	—
Fig. 7(e)	13.3	0.8	1.4	0.7	2.4
Fig. 7(f)	13.4	0.7	2.7	1.7	1.3
Fig. 7(g)	9.3	0.7	1.5	0.6	—
Fig. 7(h)	14.7	0.5	7.6	7.8	—

表 3 棋盘格相邻角点距离最大误差结果对比

Tab. 3 Comparison of maximum errors in checkerboard corner distances

Image Number	Original image Maximum errors	Proposed method Maximum errors	Contrast method 1 Maximum errors	Contrast method 2 Maximum errors	Contrast method 3 Maximum errors
Fig. 7(a)	40.4%	3.4%	5.1%	12.8%	11.3%
Fig. 7(b)	32.2%	6.9%	10.2%	7.9%	8.6%
Fig. 7(c)	29.0%	3.8%	2.3%	13.0%	—
Fig. 7(d)	24.2%	6.1%	19.6%	48.3%	—
Fig. 7(e)	52.8%	6.6%	11.4%	4.2%	26.3%
Fig. 7(f)	55.3%	3.9%	12.4%	10.1%	10.0%
Fig. 7(g)	30.4%	3.7%	7.8%	3.8%	—
Fig. 7(h)	51.2%	2.2%	49.4%	61.2%	—

为了验证本文方法在实际应用中的效果,设置第二组实际场景应用测试实验,选取如图 8(a)和图 8(b)所示表面存在文字的圆柱物体使用微信自带 OCR 识别算法进行光学字符识别(OCR)实验,选取如图 8(c)和图 8(d)所示存在表面缺陷的圆柱物体进行测量实验,经过实际测量,图 8(c)表面最大损伤尺寸为 28.6 mm,图 8(d)两条划痕长度依次为 117.1 mm 和 119.0 mm。

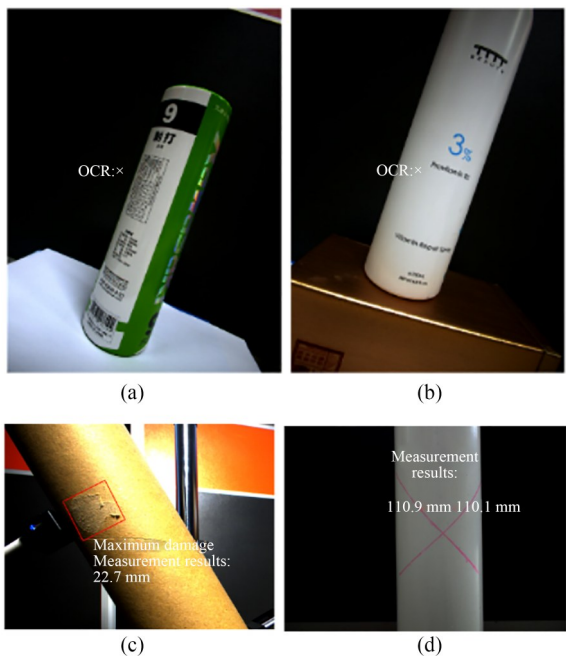


图 8 部分实际场景图像

Fig. 8 Partial images of actual scenes

图 9 和表 4 分别为校正效果和应用测试结果。从图 9(a)和图 9(b)可以看出,圆柱曲面上校正前无法完成 OCR 识别的文字经校正后扭曲失真得以校正,可以通过现有 OCR 技术对文字进

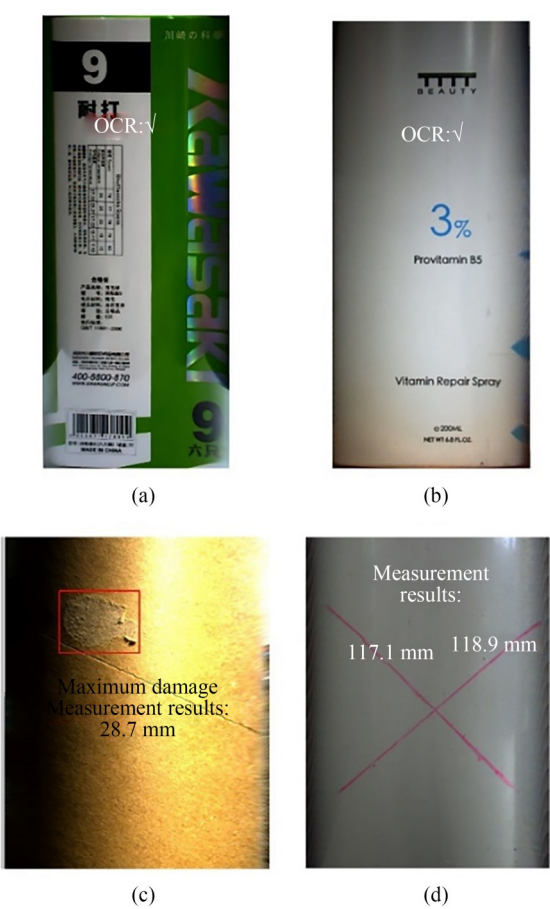


图 9 部分实际场景图像校正结果

Fig. 9 Partial images of actual scene with correction results

行有效识别。此外,由于圆柱曲面透视投影失真造成原图像缺陷测量误差严重,图 8(c)表面最大损伤尺寸直接测量为 22.7 mm,测量误差高达 20.6%,经过校正,图 9(c)表面最大损伤尺寸为 28.7 mm,测量误差仅为 0.3%;图 8(d)两条划痕长度为 110.9 mm 和 110.1 mm,测量误差分别为

表 4 实际场景图像校正前后检测结果对比

Tab. 4 Comparison of Detection Results Before and After Image Correction in Actual Scenes								
Image number	Correction target	Truth value / mm	Measured mean value /mm		Error/%		OCR recognition	
			Before correction	After correction	Before correction	After correction	Before correction	After correction
Fig. 8(a)	Distorted text	—	—	—	—	—	Failure	Successful
Fig. 8(b)	Distorted text	—	—	—	—	—	Failure	Successful
Fig. 8(c)	Surface damage	28.6	22.7	28.7	20.6%	0.3%	—	—
Fig. 8(d)	Surface scratch 1	117.1	110.9	117.1	5.3%	0.0%	—	—
	Surface scratch 1	119	110.1	118.9	7.5%	0.1%	—	—

5.3% 和 7.5%, 校正后两条划痕长度依次为 117.1 mm 和 118.9 mm, 与实际损伤测量结果接近, 从而验证了本文方法在实际应用中的有效性。

4 结 论

本文提出了一种任意位姿圆柱曲面透视投影失真的图像校正方法。该方法不需要圆柱表面纹理信息以及深度信息, 利用圆柱半径和圆柱边线信息对圆柱曲面进行精准的位姿估计, 建立了圆柱曲面细分网格点与原始图像的对应关系,

通过像素映射对圆柱曲面由于透视投影变形导致的图像畸变进行校正。实验结果表明, 本文方法估计出的圆柱位姿的平均距离误差为 0.3 mm, 平均角度误差为 0.60° ; 校正后的图像消除了圆柱曲面的透视投影变形, 对校正后的棋盘格曲面展开测量时, 平均距离标准差为 0.8 pixels, 平均最大相对误差为 4.6%; 在实际场景实验中, 校正前圆柱表面无法通过 OCR 算法进行文字识别的文字经校正后实现了 OCR 算法文字识别, 表面存在缺陷圆柱物体的图像经校正后测量误差不超过 0.1 mm。校正后的图像消除了透视投影失真, 验证了本文方法的有效性。

参考文献:

- [1] XU L M, YANG Z Q, JIANG Z H, *et al.* Light source optimization for automatic visual inspection of piston surface defects[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 91(5): 2245-2256.
- [2] YE M, ZHANG W W, CUI G H, *et al.* Surface defects inspection of cylindrical metal workpieces based on weakly supervised learning[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 119(3): 1933-1949.
- [3] 刘宇飞, 冯楚乔, 陈伟乐, 等. 基于机器视觉法的桥梁表面病害检测研究综述[J]. *中国公路学报*, 2024, 37(2): 1-15.
LIU Y F, FENG C Q, CHEN W L /Y), *et al.* Review of bridge apparent defect inspection based on machine vision[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2024, 37(2): 1-15. (in Chinese)
- [4] TORIUMI F Y, BITTENCOURT T N, FUTAI M M. UAV-based inspection of bridge and tunnel structures: an application review[J]. *Revista IBRACON De Estruturas e Materiais*, 2023, 16(1): 1-9.
- [5] TANG B, CHEN L, SUN W, *et al.* Review of surface defect detection of steel products based on machine vision[J]. *IET Image Processing*, 2023, 17(2): 303-322.
- [6] SMITH M L, SMITH L N, HANSEN M F. The quiet revolution in machine vision - a state-of-the-art survey paper, including historical review, perspectives, and future directions[J]. *Computers in Industry*, 2021, 130: 103472.
- [7] XU J M, CHEN C G, XIE H W, *et al.* Cylindrical Product Label Image Stitching Method [C]. 2017 2nd IEEE International Conference on Computational Intelligence and Applications (ICCIA). Beijing, China. IEEE, 2017: 331-335.
- [8] LI K J, MENG F W, HUANG Z P, *et al.* A correction algorithm of QR code on cylindrical surface [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1237(2): 022006.
- [9] ZHANG Z L, XU M, CHEN S. Research On Cylindrical Labels Unfolding Algorithm Based On Machine Vision [C]. 2021 IEEE 5th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC). Chongqing, China. IEEE, 2021: 2568-2572.
- [10] ZHU X, LIU Z X, ZHANG X, *et al.* A very fast image stitching algorithm for PET bottle caps [J]. *Journal of Imaging*, 2022, 8(10): 275.
- [11] 夏晓华, 李玉强, 邹易清, 等. 圆柱曲面透视投影失真的图像校正 [J]. *光学 精密工程*, 2023, 31(11): 1691-1699.
XIA X H, LI Y Q, ZOU Y Q, *et al.* Image correction for perspective projection distortion of cylindrical surface [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(11): 1691-1699. (in Chinese)
- [12] URBAN S, LEITLOFF J, HINZ S. Improved wide-angle, fisheye and omnidirectional camera calibration [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, 108: 72-79.
- [13] YANN O, LUDOVIC A, ANNE A, *et al.* Information-geometric optimization algorithms: a unifying picture via invariance principles [J]. *Journal of*

- Machine Learning Research*, 2017, 18: 1-65.
- [14] LONG W, JIAO J J, LIANG X M, *et al.* Pin-hole-imaging-based learning butterfly optimization algorithm for global optimization and feature selection [J]. *Applied Soft Computing*, 2021, 103: 107146.
- [15] 赵春华, 贾明泽, 谭金铃, 等. 基于机器视觉的轴承外圈表面图像拼接方法[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(14): 5729-5736.
- ZHAO CH H, JIA Y Z, TAN J L, *et al.* Image mosaic method of bearing outer ring surface based on machine vision [J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(14): 5729-5736. (in Chinese)

作者简介:

段智威(2000—),男,陕西渭南人,硕士研究生,2021年于长安大学获得学士学位,主要从事机器视觉及自动控制方面的研究。E-mail:Amber_D@163.com

通讯作者:

夏晓华(1987—),男,山东临沂人,博士,副教授,2009年于中国石油大学(华东)获得学士学位,2015年于西安交通大学获得博士学位,主要从事机器视觉与光机电一体化方面的研究。E-mail:xhxia@chd.edu.cn