

基于双目视觉的薄壁零件圆孔轮廓测量

解则晓, 王晓东*, 官韩磊

中国海洋大学工程学院, 山东 青岛 266100

摘要 针对工业现场的薄壁类零件圆孔轮廓的测量问题, 构建一套基于双目视觉的测量系统。以双目摄像机作为视觉传感器, 通过检测圆孔内部和零件表面灰度值, 实现光源亮度的自动调节, 使左右相机同时采集到最清晰的圆孔图像。通过圆孔轮廓识别和基于外极线约束的匹配, 继而实现圆孔轮廓三维重建, 从而获取圆孔的孔径信息和三维坐标。实验结果表明, 系统具有较高的测量精度, 其稳定性与精确性满足工业现场的应用。

关键词 测量; 双目视觉; 外极线约束; 双目立体匹配; 三维重建

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1204004

Round-Hole Profile Measurement of Thin-Walled Parts Based on Binocular Vision

Xie Zexiao, Wang Xiaodong*, Gong Hanlei

College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China

Abstract In this study, a measurement system is constructed based on binocular vision to enable round-hole profile measurement of the thin-walled parts in the industrial field. Using a binocular camera as the vision sensor, the brightness of light source can be automatically adjusted by detecting the gray value of the hole's inner portion or the part's exterior, enabling the left and right cameras to simultaneously obtain the clearest round-hole image. Three-dimensional reconstruction can be realized through round-hole profile detection and matching based on epipolar restriction; further, the aperture information and three-dimensional coordinates can be acquired. The experimental results denote that the system exhibits high accuracy and that its stability and accuracy satisfy the requirements of industrial applications.

Key words measurement; binocular vision; epipolar restriction; binocular stereo matching; three-dimensional reconstruction

OCIS codes 120.6650; 120.4820; 150.0155; 150.1135

1 引言

随着国家制造强国战略的提出, 工业生产对工件尺寸的精度提出了更高的标准, 在汽车、航空航天等领域, 薄壁零件具有结构紧凑、质量小等优点, 得到广泛应用。生产过程中要求对薄壁零件孔位特征进行高精度的检测, 但薄壁件刚性弱, 易变形, 且形状复杂, 不利于接触测量。然而机器视觉测量技术具有非接触、精度好的优点, 一直以来深受研究人员的关注。

目前针对薄壁件的测量多使用三坐标测量机和光学影像仪等。徐亚^[1]在建立坐标系后, 利用三坐

标测量机的探针对薄壁件的圆孔进行尺寸检测。解希娟^[2]使用三坐标测量机对汽车薄壁件孔位测量, 当遇到较小孔需要测量时, 使用搜索孔的方法, 采用非接触探针, 对每个孔位测量多个点, 构造出完整的圆孔特征后进行测量。刘珊珊等^[3]基于光学影像仪研究非接触测量技术, 将单目摄像机与三维运动控制平台相结合, 使用三倍物镜和底光照明的方式获取清晰薄壁件图像, 从而对薄壁圆环进行准确测量。采用三坐标测量机对薄壁件上的单个圆孔进行测量时, 由于薄壁件表面容易变形, 接触式的测量可能会对工件表面产生损伤, 从而产生误差。当薄壁件上

收稿日期: 2019-07-10; 修回日期: 2019-08-11; 录用日期: 2019-08-19

基金项目: 国家自然科学基金(61571408)

* E-mail: xiaodongqingdao@126.com

的圆孔过小时,采点时无法精确获得圆孔周围的点,从而影响测量精度^[4]。采用光学影像仪进行测量时,使用单目摄像机作为视觉传感器,存在 Z 向测量的问题,且对摄像机的固定方向有严格要求,适应范围较窄。

针对三坐标测量机和光学影像仪在测量单个圆孔时存在的问题,本文提出基于双目视觉的圆孔测量方式,不仅可以避免接触薄壁件,还可以获得灵活的摄像机位置,且双目视觉的方式较易获得轮廓在摄像机坐标系下的三维坐标。本文基于双目视觉,使用均匀分布在摄像机镜头外部的环形 LED 进行照明,搭建一套面向工业现场的薄壁类零件圆孔轮廓测量系统,通过相机标定、光源亮度实验与自动调

节、圆孔边缘检测、基于外极线的双目匹配、三维重建等方式获取薄壁件中单个圆孔的尺寸及其在摄像机坐标系下的三维坐标。

2 双目视觉测量系统

2.1 系统构成

双目视觉测量系统主要应用于薄壁类零件圆孔特征测量。图 1 为系统构成图,系统主要由 WAT-902HB3/3S 型双目摄像机、环状 LED 光源、工作台、图像采集卡等构成。利用双目摄像机对圆孔周围零件表面的亮度进行检测,能自动调整光照强度,捕捉到清晰明确的圆孔边缘,进而对边缘轮廓进行提取、匹配和三维重建。

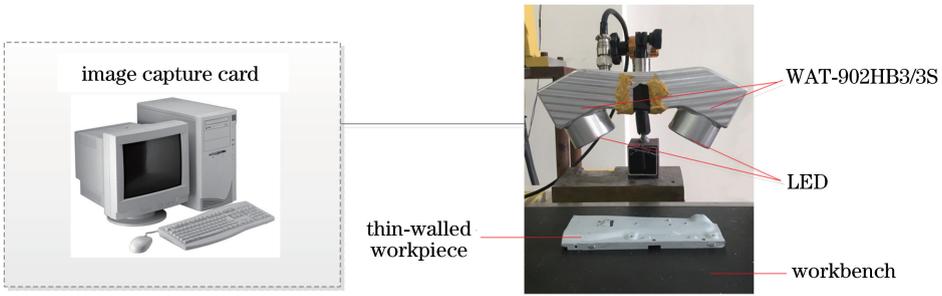


图 1 视觉测量系统的构成

Fig. 1 Composition of visual measurement system

2.2 双目视觉测量模型及标定

图 2 为双目立体视觉的测量模型^[5],假设点 P 在右摄像机坐标系中的坐标为 (x_r, y_r, z_r) ,在左摄像机坐标系下的坐标为 (x_l, y_l, z_l) ,其中 $o_l x_l y_l z_l$ 和 $o_r x_r y_r z_r$ 分别为左摄像机和右摄像机的坐标系。世界坐标系表示的 P 点坐标与在左摄像机的投影点的坐标 $u_l v_l$ 之间的关系为

$$s_l \begin{bmatrix} u_l \\ v_l \\ 1 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} N_x & 0 & u_{o_l} \\ 0 & N_y & v_{o_l} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_l & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f_l & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_l & \mathbf{T}_l \\ \mathbf{0}_{3 \times 1}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

对于右摄像机,该关系为

$$s_r \begin{bmatrix} u_r \\ v_r \\ 1 \end{bmatrix} =$$

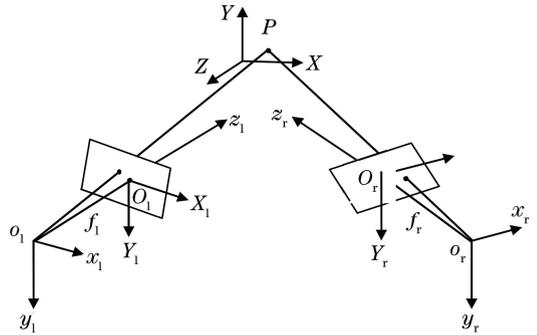


图 2 双目立体视觉测量模型

Fig. 2 Model of binocular stereo vision measurement

$$\begin{bmatrix} N_x & 0 & u_{o_r} \\ 0 & N_y & v_{o_r} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_r & \mathbf{T}_r \\ \mathbf{0}_{3 \times 1}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中, S_l, S_r 为比例因子, f_l, f_r 分别为左右摄像机的焦距, $\mathbf{R}_l, \mathbf{R}_r$ 分别为两摄像机的旋转矩阵, $\mathbf{T}_l, \mathbf{T}_r$ 分别为两相机的平移矩阵

假设左摄像机光心为世界坐标系的原点,则 \mathbf{R}_l 为 3×3 单位矩阵, \mathbf{T}_l 为 3×1 的 $\mathbf{0}$ 矩阵,此时,设

$R_r = R, T_r = T$, 则

$$s_l \begin{bmatrix} u_l \\ v_l \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_x & 0 & u_{0l} \\ 0 & N_y & v_{0l} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_l & 0 & 0 \\ 0 & f_l & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$s_r \begin{bmatrix} u_r \\ v_r \\ 1 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} N_x & 0 & u_{0r} \\ 0 & N_y & v_{0r} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_r & 0 & 0 \\ 0 & f_r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ \mathbf{0}_{3 \times 1}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中, $R = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix}, T = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}$.

使用最小二乘法, 便可解出 x_w, y_w, z_w , 进而确定点 P 在左摄像机坐标系下的三维空间坐标。

平面圆形编码点标定靶标如图 3(a) 所示, 利用环状编码标记点的提取与识别算法^[6]进行编码点的识别, 从而确定每一个编码点的唯一性。标定时, 手持靶标从不同角度、不同高度采集靶标图像, 并进行畸变校正^[7], 建立图像坐标系与靶标坐标系的转换关系。共采集 16 幅图像, 通过自定义的世界坐标系, 从而得到靶标编码点圆心在世界坐标系中的坐标, 在此基础上, 通过左右相机采集靶标得到的图像, 可得到圆心的世界坐标与圆心在左右像面上的像面坐标之间的关系, 采用张正友标定法^[8]进行标定。利用 OpenCV 的单目标定和立体标定函数, 可以得到双目立体视觉测量系统的内部参数和外部参数。

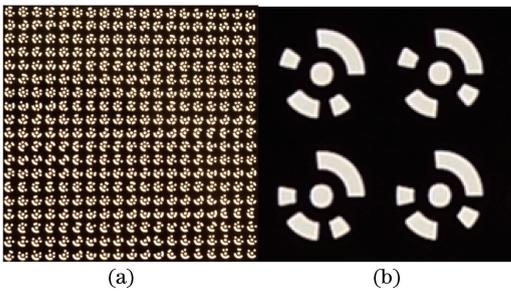


图 3 环状编码点靶标。(a) 靶标整体图; (b) 编码点放大图
Fig. 3 Annular coding point target. (a) Overall image of target; (b) magnified image of coding points

2.3 光源亮度调节与轮廓提取

圆孔轮廓的检测是视觉检测中的重要环节,

其精确程度决定了双目匹配、三维重建后测量结果的精确性。本方法采用明域照明^[9]的方式, 即令光源以一定倾斜角照射被测零件, 同时使摄像机放置在光源反射的回路上, 如图 4 所示。当右光源照明时, 左相机采集圆孔图像, 如图 4(a) 所示, 当左光源照明时, 右相机采集圆孔图像, 如图 4(b) 所示。图 5 是摄像机内部光源的构造图, 采用环形光照明, 光源由均匀分布在镜头周围的数颗可调亮度的 LED 组成, 在提高光照亮度的同时使光线均匀分布。

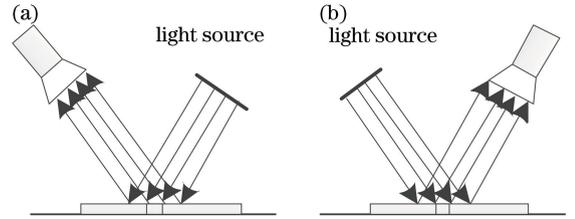


图 4 明域照明示意图。(a) 左相机采集时光线示意图; (b) 右相机采集时光线示意图

Fig. 4 Schematic of bright-field illumination. (a) Light schematic as left camera is grabbing; (b) light schematic as right camera is grabbing

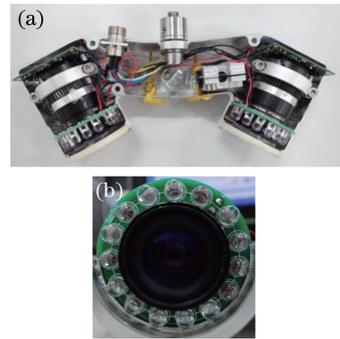


图 5 摄像机内部结构。(a) 整体结构; (b) 环形光源结构

Fig. 5 Internal structure of camera. (a) Overall structure; (b) structure of annular light source

薄壁件位置固定, 若光照强度发生改变, 则圆孔边缘和圆孔半径会产生细微变化。如图 6 虚线处所示, 通过多组实验, 求取以 O 为圆心, 以 L 为半径的圆轮廓的灰度平均值, 以该灰度平均值表征光照强度, 图 6 中每幅图右上角为近似平均灰度值。圆孔真实半径为 3.1 mm, 在不同光照强度下, 圆孔边缘内侧与外侧的对比度发生改变, 光照强度对薄壁件圆孔半径测量结果准确性的影响如表 1 所示, 逐渐降低光照强度, 则圆孔半径测量值逐渐变大, 实验结果说明, 圆孔半径最接近实际情况时, 灰度平均值约为 190。

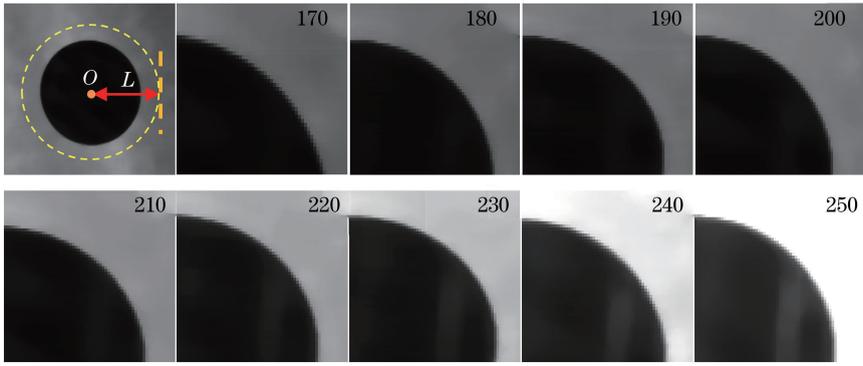


图 6 不同光强下的圆孔边缘影像

Fig. 6 Images of edge of round hole under different light intensities

表 1 光强对薄壁件圆孔半径测量结果准确性的影响

Table 1 Influence of light intensity on accuracy of measurement results of round-hole radius of thin-walled parts mm

Number	Surface average gray value								
	170	180	190	200	210	220	230	240	250
1	3.1102	3.1071	3.1035	3.0997	3.0950	3.0921	3.0832	3.0730	3.0550
2	3.1371	3.1062	3.0981	3.0972	3.0943	3.0906	3.0839	3.0692	3.0519
3	3.1230	3.1015	3.0987	3.0969	3.0954	3.0924	3.0723	3.0645	3.0429
4	3.1129	3.1063	3.1025	3.0982	3.0945	3.0904	3.0859	3.0735	3.0588
5	3.1235	3.1017	3.0989	3.0971	3.0955	3.0926	3.0732	3.0647	3.0432
6	3.1226	3.1066	3.1031	3.0986	3.0942	3.0845	3.0774	3.0648	3.0464
Average value	3.1216	3.1049	3.1008	3.0980	3.0948	3.0904	3.0793	3.0683	3.0497

图 7 为薄壁件圆孔。光源亮度由明到暗可调整 10 级,移动薄壁件,使圆孔位于左右摄像机图像画面中心。光源开启时亮度最高,圆孔内会出现过亮的情况,圆孔边缘检测失败,此时将光源亮度降低 1 级,利用六点法提取中心圆孔边缘点^[10],如果提取失败则继续降低光源亮度,直至成功。拟合椭圆,得到粗圆心 O 和粗半径 R 。取适当的 Δ 值,获得以粗圆心为圆心,以 $R - \Delta$ 为半径的圆,计算该圆边缘点的灰度平均值,不断降低光照亮度,使其保持在较低水平。然后取以粗圆心 O 为圆心,以 $R + \Delta$ 为半径的圆,计算该圆边缘点的平均灰度值,不断降低亮度,直至平均灰度值处在 180~200 范围内。

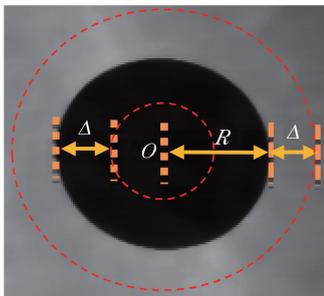


图 7 圆孔放大图

Fig. 7 Magnified image of round hole

为减少噪声对圆孔边缘提取的影响,采用中值滤波对图像进行处理^[11],中值滤波采用 11×11 的模板,以去除噪声,平滑轮廓边缘。一般像素级边缘检测算法有 Roberts 算法、Prewitt 算法、Canny 算法、Sobel 算法等^[12],其中 Canny 算法^[13]应用广泛,能够得到像素边缘,但存在噪声敏感问题。隔行隔列扫描法^[6]相对传统方法速度快、定位准,但在得到圆孔拟合椭圆的近似中心坐标后,限制左右扫描范围,在圆孔周围区域进行上下搜索,将满足条件的像素点进行记录。左右的方向原理同上下方向一致。按照图 8 所示的方向在上下左右方向搜索边缘点。

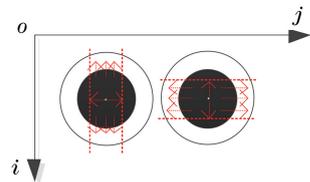


图 8 像素级边缘检测示意图

Fig. 8 Schematic of pixel-level edge detection

亚像素级边缘点的提取能够进一步提高圆孔轮廓边缘的精度。这里采用 7×7 的 Zernike 矩^[14]模板系数进行亚像素边缘点的定位。在经过亚像素边缘点提取后,为减少图像内的噪声对提取结果的影

响,需对得到的亚像素边缘点进行评估,从而确定其是否为预期的边缘拟合点^[15-17]。图 9 为边缘点筛选流程,从而得到最终的亚像素级边缘点。

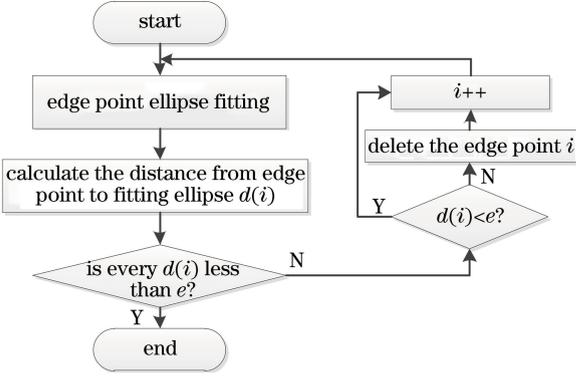


图 9 亚像素级边缘点筛选过程

Fig. 9 Filtering process for sub-pixel edge points

2.4 基于半圆的双目立体匹配

在得到圆孔的亚像素边缘点之后,便可利用外极线几何约束对左右摄像机采集的圆孔边缘进行匹配。两摄像机已经提前标定完成,得到了摄像机内部参数和外部参数。如图 10 所示,薄壁件圆孔边缘某一点三维坐标用 P 点表示。根据外极线几何约束的定义, O_1 和 O_r 分别为左右摄像机坐标系的原点,光心连线与左右像平面 F_1 、 F_r 的交点 E_1 、 E_r 分

别为左右像平面的外极点。 P 点在左相机中的投影点 P_1 ,在右相机的像平面中也有对应的 P_r 点,且 P_r 必定在外极线 L_r 上^[18]。

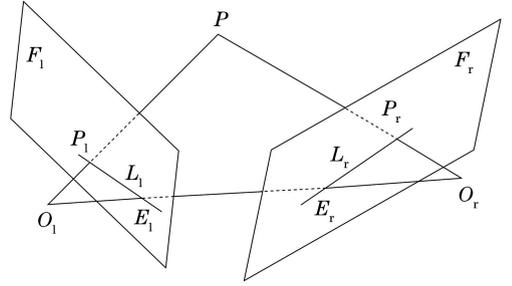


图 10 外极线几何约束示意图

Fig. 10 Schematic of geometric restrictions of epipolar line

将每个像平面圆孔轮廓分为左右两部分,确定外极点的位置后,得到外极线 L_1 、 L_r 近似水平,故圆孔顶部边缘点无法通过外极线准确匹配,此处只取 $0.75R$ 以内的左右圆弧进行匹配,图 11(a)为左半圆在左右像平面中的对应情况,在获得左摄像机的图像坐标 P_1 后,根据外极线几何约束,便可确定该点在右摄像机对应的极线 L_r ,局部放大如图 11(b)所示。考虑到在左右摄像机标定、滤波、圆孔边缘提取的过程中会出现误差,所以边缘特征点不会刚好位于外极线 L_r 上。

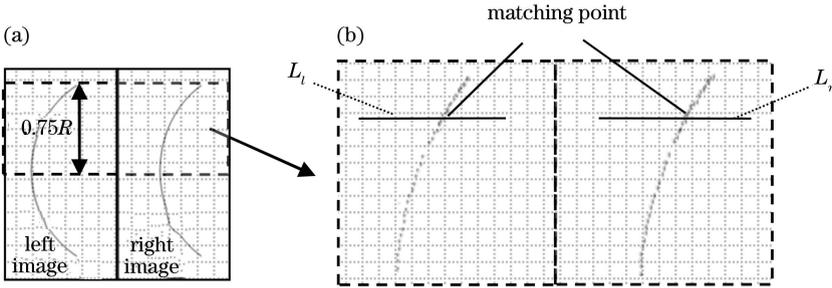


图 11 圆孔匹配图。(a)两像面左轮廓对应图;(b)局部轮廓匹配

Fig. 11 Diagrams of round-hole matching. (a) Left contour mapping of two images; (b) partial contour matching

在右像面中对 P_r 进行搜索,寻找距离外极线 L_r 小于 0.01 mm 的两个点,且要求这两个点必须位于外极线两侧,将这两个点的连线与外极线的交点作为右摄像机图像真正的匹配点 P_r 。将得到的两个半圆匹配点结合,进行三维重建,空间点的三维坐标可表示为

$$\begin{cases} x = zX_1/f_1 \\ y = zY_1/f_1 \\ z = [f_1(f_r t_x - X_r t_z)] / [X_r(r_7 X_1 + r_8 Y_1 + f_1 r_9) - f_r(r_1 X_1 + r_2 Y_1 + f_1 r_3)]. \end{cases} \quad (5)$$

3 实验结果及数据分析

3.1 实验具体过程

基于双目视觉的薄壁零件圆孔轮廓的测量系统流程如图 12 所示。

1) 搭建实验平台并标定,实验中使用 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 的高精度圆形编码点靶标,靶标位置只要满足部分编码点位于双目相机的共同视野内即可。移动靶标位置,在不同位姿处拍摄标定图片 16 组。利用 OpenCV 的 CVStereo Calibrate 函数,得到标定结果。重新拍摄 16 组靶标图像分别进

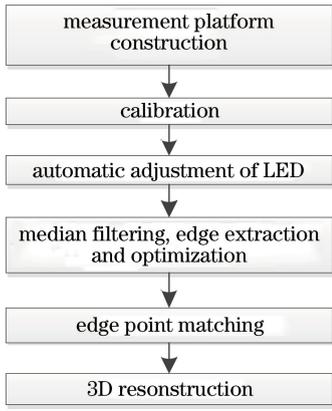


图 12 双目立体视觉测量系统流程图

Fig. 12 Flowchart of binocular stereo vision measurement system

行靶标圆心点三维重建,根据三维重建结果,求取靶标编码点任意两圆心之间的距离,并与实际距离比较,得到其平均误差和最大误差分布图,如图 13 所示,最大误差在 0.008 mm 以内,可以证明内、外部参数的标定结果准确。

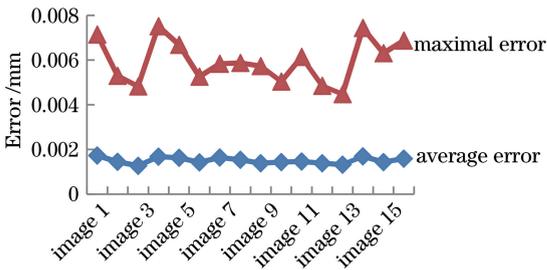


图 13 靶标标准距离误差分布图

Fig. 13 Distribution of target's standard distance error

2) 调整零件位置与姿态,使圆孔分别处于左右摄像机像平面中心。再根据光源亮度调节方法自动调整光源亮度,利用两摄像机捕捉圆孔图像,进行圆孔轮廓提取。将得到边缘点的像平面坐标,导入逆向工程软件 Imageware 中,左右摄像机提取所得轮廓如图 14 所示。

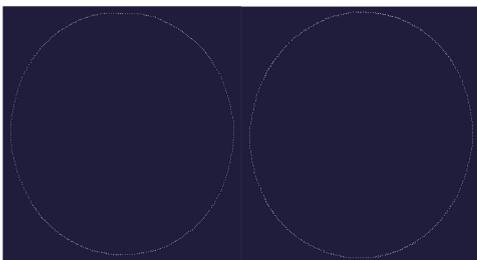


图 14 轮廓提取结果

Fig. 14 Result of contour extraction

3) 对采集的图像进行畸变校正后,采用本文外极线匹配算法进行匹配,并将得到的圆孔轮廓的三

维坐标 (x, y, z) 导入 Imageware 软件中,平面度如图 15 所示。负法向偏差最大为 -0.0211 mm,平均为 -0.0088 mm,正法向偏差最大为 0.0364 mm,平均为 0.0095 mm。该平面度证明将两个半圆分别匹配后再结合,三维重建后的两部分圆孔边缘仍位于一个平面内。

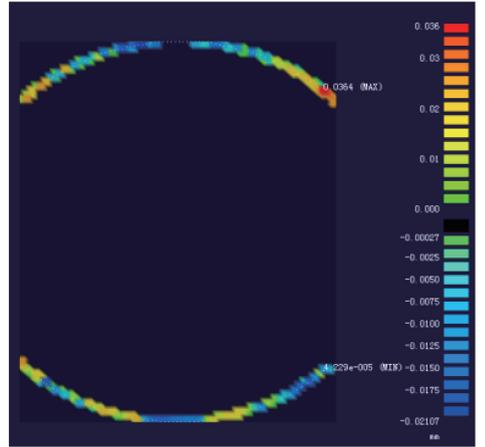


图 15 三维重建后圆孔的平面度

Fig. 15 Flatness of round hole after three-dimensional reconstruction

对该圆孔轮廓点进行圆拟合,多次实验后,得到的圆孔半径测量值如表 2 所示。

表 2 圆孔半径测量结果

Table 2 Measurement results of round-hole radius

Real value /mm	Measured value /mm	Error / mm	Relative error /%
3.1	3.1089	0.0089	0.2871
	3.1069	0.0069	0.2225
	3.1034	0.0034	0.1097
	3.1031	0.0031	0.1000
	3.1017	0.0017	0.0548
	3.0978	-0.0022	-0.0710
	3.0950	-0.0050	-0.1613

4) 考虑到薄壁件相对于摄像机的位置可能会发生变化,在保证薄壁件表面灰度几乎不变的情况下,将其进行图 16 所示的旋转,旋转轴与外极点

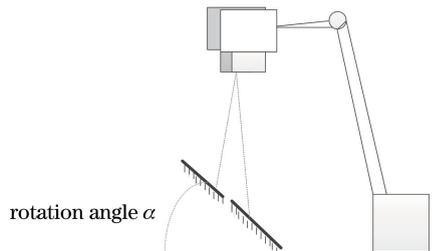


图 16 工件旋转时系统侧视图

Fig. 16 System side view of rotating workpiece

E_l 、 E_r 的连线平行。将旋转角设为 0° 、 8° 、 16° ，可以看到圆孔逐渐变成椭圆，如图 17 所示。若角度继续变大，会加剧工件表面光照不均匀程度，从而影响到系统对圆孔的提取。进行图像采集、圆孔提取、匹配和三维重建工作，多次实验后，得到的圆孔半径测量值如表 3 所示。

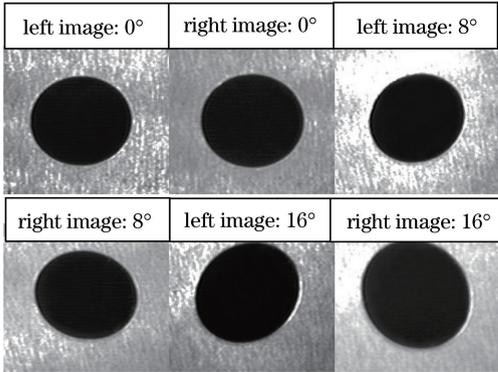


图 17 工件旋转对左右图像的影响

Fig. 17 Influence of workpiece's rotation on left and right images

表 3 旋转角度对测量结果的影响

Table 3 Influence of rotation angle on measurement results

Rotation angle / ($^\circ$)	Measured value / mm	Error / mm	Relative error / %
0	3.0979	-0.0021	-0.0678
	3.1017	0.0017	0.0548
	3.0968	-0.0032	-0.1032
	3.1029	0.0029	0.0935
8	3.1032	0.0032	0.1032
	3.0985	-0.0015	-0.0484
	3.0967	-0.0033	-0.1065
	3.1045	0.0045	0.1452
16	3.0975	-0.0025	-0.0806

3.2 实验结果分析

经过外极线匹配、三维重建后，将得到的边缘点在逆向工程软件 Imageware 中打开，圆孔平面度良好，边缘点大致位于同一个平面内，为边缘点拟合圆奠定了基础。拟合圆后，该双目视觉测量系统测量的相对误差在 2.9% 以内，多次测量绝对误差在 0.009 mm 以内，保持双目摄像机不动，改变薄壁件放置角度并进行多次测量，误差变化不明显。

4 结 论

应用双目视觉测量系统对薄壁类零件的圆孔特征进行测量，搭建双目视觉测量系统，采用与双目相机相适应的照明方式，通过对不同光照条件下薄壁件圆孔的测量值与真实值的比较实验，寻找最适合

的光照强度，并以此光照强度为标准，对系统光源亮度进行自动调节，获取最接近真实情况的图像。并通过分割圆孔、外极线匹配搜索的方法进行匹配，将匹配的轮廓点进行三维重建，得到单个圆孔的三维坐标和孔径尺寸。未来将此设备安装在工业机器人末端，在确定从摄像机坐标系到机器人末端关节坐标系的变换关系后，通过机器人的运动，可以测量全部圆孔的孔径大小并获得在机器人基坐标系下的三维坐标。实验结果表明，本双目视觉测量系统满足工业现场检测的精度要求，在工业生产中有一定的应用价值。

参 考 文 献

- [1] Xu Y. Application of thin-walled multi-space CMM [J]. Technology Innovation and Application, 2013 (24): 44.
徐亚. 薄壁多孔件三坐标测量的应用[J]. 科技创新与应用, 2013(24): 44.
- [2] Xie X J. CMM in car inspection product line [D]. Tianjin: Tianjin University, 2004: 7-9.
解希娟. 三坐标测量机在汽车检测生产线的应用 [D]. 天津: 天津大学, 2004: 7-9.
- [3] Liu S S, Liu D L, Liu Z B, *et al.* Research on non-contact measurement technology for thin-walled ring parts [J]. Industrial Metrology, 2017, 27 (S2): 37-40.
刘姗姗, 刘大亮, 刘兆宾, 等. 薄壁圆环类零件非接触测量技术研究 [J]. 工业计量, 2017, 27 (S2): 37-40.
- [4] Li Y, Nomula P R. Surface-opening feature measurement using coordinate-measuring machines [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 79: 1915-1929.
- [5] Zhou F Q, Wang Y X, Chai X H, *et al.* Review on precise measurement technology based on mirror binocular vision [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38 (8): 0815003.
周富强, 王晔昕, 柴兴华, 等. 镜像双目视觉精密测量技术综述 [J]. 光学学报, 2018, 38(8): 0815003.
- [6] Xie Z X, Gao X, Zhu R X. Efficient extraction and robust recognition algorithm of circular coded target [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2015, 26 (3): 559-566.
解则晓, 高翔, 朱瑞新. 环状编码标记点的高效提取与鲁棒识别算法 [J]. 光电子 • 激光, 2015, 26(3): 559-566.
- [7] Xie Z X, Zhou Z Q. Method of space point positioning based on structure-from-motion [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(8): 081502.

- 解则晓, 周作琪. 基于运动恢复结构的空点定位方法[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(8): 081502.
- [8] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [9] Guo P. Research of technology on surface defects detection for steel plate based on machine vision[D]. Nanchang: Nanchang University, 2010: 14-17.
郭平. 基于机器视觉的钢板表面缺陷检测技术研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2010: 14-17.
- [10] Xie Z X, Gao X, Cui J. Extraction algorithm of circular targets used for mobile three-dimensional measurement[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(12): 1208002.
解则晓, 高翔, 崔健. 移动式三维测量用圆形标记点提取算法[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1208002.
- [11] Song Y. Optimizing and realization of median filtering algorithm in image processing[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2011: 28-50.
宋洋. 图像处理的中值滤波算法优化与实现[D]. 北京: 北京邮电大学, 2011: 28-50.
- [12] Duan R L, Li Q X, Li Y H. Summary of image edge detection[J]. Optical Technique, 2005, 31(3): 415-419.
段瑞玲, 李庆祥, 李玉和. 图像边缘检测方法研究综述[J]. 光学技术, 2005, 31(3): 415-419.
- [13] Canny J. A computational approach to edge detection [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, PAMI-8(6): 679-698.
- [14] Ghosal S, Mehrotra R. Orthogonal moment operators for subpixel edge detection [J]. Pattern Recognition, 1993, 26(2): 295-306.
- [15] Liu G D, Liu B G, Chen F D, *et al.* Study on the method of the accuracy evaluation of sub-pixel location operators[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(12): 3446-3451.
刘国栋, 刘炳国, 陈凤东, 等. 亚像素定位算法精度评价方法的研究[J]. 光学学报, 2009, 29(12): 3446-3451.
- [16] Lin X T, Wang Z Y. A novel universal and fast algorithm for two-dimensional subpixel edge detection [J]. Applied Science and Technology, 2010, 37(8): 35-39.
林欣堂, 王宗义. 一种新的快速通用二维图像亚像素边缘检测算法[J]. 应用科技, 2010, 37(8): 35-39.
- [17] Han J D, Yang H J, Lü N G. Automated ellipse detection and location method in 3D visual inspection [J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(17): 169-171, 191.
韩建栋, 杨红菊, 吕乃光. 视觉测量中椭圆自动检测与定位方法[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(17): 169-171, 191.
- [18] Zhang G J. Machine vision [M]. Beijing: Science Press, 2005: 109-112.
张广军. 机器视觉[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 109-112.