

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209621

大跨距孔同轴度误差快速视觉测量方法*

张国锋, 杨树明, 胡鹏宇, 邓惠文, 段宇

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室 西安 710049)

摘要:为快速、准确测量大型零件大跨度孔的同轴度误差,设计了对侧布置的线激光扫描四目视觉测量系统,通过两套视觉测量单元分别采集两孔端面点云数据,进一步拟合端面圆心和端面法线,得到两个独立的单侧孔轴线。提出了大跨距无公共视场视觉系统标定方法,设计了多标定板相固连的靶标,通过4块标定板的位姿关系传递,得到两套视觉测量单元的坐标系转换关系,实现了两侧孔测量数据的坐标系统一。精度验证实验表明,该系统对于1.15 m跨距的标准球组球心距测量均方根误差为0.161 mm。使用该系统对一压路机振动轮两侧轴承孔的同轴度进行了测量,并与三坐标测量机的测量结果进行了对比,结果表明两者测量结果偏差小于5%,测量精度能够满足工业生产需求。

关键词:大跨距孔;同轴度;视觉测量;系统标定;线激光扫描

中图分类号: TH7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460

Fast vision-based measurement method for coaxiality error of long-span holes

Zhang Guofeng, Yang Shuming, Hu Pengyu, Deng Huiwen, Duan Yu

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A vision-based measurement (VBM) system composed of two oppositely placed VBM units is designed to rapidly and accurately measure the coaxiality error of large-scale parts with long-span holes. The VBM unit is a line laser scanning stereo vision system, and two VBM units are used to obtain the point clouds of the end faces of the two holes. The two-point clouds are then used to calculate the centers of the circles and the normal directions on the end faces, respectively, as well as the two hole axes. The calibration method, using a specially designed target made up of four fixedly connected calibration boards whose position and orientation relations are accurately calibrated beforehand, is proposed to realize the unification of the coordinate systems of the two VBM units. These two independent axes are then merged into a common coordinate system. Finally, the coaxiality evaluation parameters are given. The accuracy verification experiment shows that the RSME of the center distance of the standard ball set with 1.15 m span is 0.161 mm. The proposed system is applied to measure the coaxiality of the bearing holes on both sides of the vibrating wheel of a roller, and the results are compared with those of the CMM. Results show that the deviation of the two measurement results is less than 5%, and the measurement accuracy can meet the needs of industrial production.

Keywords: long-span holes; coaxiality; vision-based measurement; system calibration; line laser scanning

0 引言

机械传动设备通常采用轴系来传递运动和转矩,设备主传动轴带动副传动轴以实现力与运动的传递和能量的转换,例如航空发动机涡轮带动压气机转动、水轮机驱动水利发电机组发电、压路机电机带动振动轮振动等。

在实际作业中,孔系零部件同轴度误差超差是导致机械传动系统工作失效,引起设备工作失常的主要因素。因此,在轴承孔加工环节对其同轴度进行测量,控制同轴度水平对提高机器性能和可靠性具有重要意义。

目前所采用的同轴度测量方法大多属于间接测量,包括回转轴线法、准直法、坐标法、模拟法和功能量规检测法等,这些方法可基本满足一般孔类零件的同轴度测

量要求,但都存在着操作繁琐、效率低、人为误差大、难以测量大跨距孔等缺点,无法满足企业实际生产需求^[1]。针对大跨距孔类零件同轴度测量,文献[2-3]以激光作为准直基准,通过在孔系内布置可探测激光光斑位置的测头来确定各孔截面中心坐标,并由此评价孔系的同轴度误差;文献[4-6]采用激光位移传感器在被测孔内旋转进行数据采集并计算轴线和同轴度误差的方法。以上研究为大跨距孔系同轴度测量提供了可行的手段,但需要设计精密夹具和辅助旋转平台,且需要大量的人工操作才能完成,自动化程度不高,目前尚未有标准化的产品面世。

三维视觉测量方法^[7]具有非接触、高精度、高效率的优点,将其引入同轴度测量系统,可以有效提高测量过程的自动化程度,减少人为误差,提高测量精度。文献[8]将结构光视觉系统用于轴系零件的同轴度测量,通过采集轴系零件圆柱面点云数据来拟合轴线。但是,对于孔系零件,尤其是大跨距孔的同轴度测量,由于存在视觉盲区,因此难以将三维视觉方法应用于此类零件的测量。本文设计了对侧布置的线激光扫描双目视觉测量系统方案,通过两套视觉测量单元分别采集两孔端面点云数据;同时提出了大跨距无公共视场视觉系统标定方法,得到两套视觉测量单元的坐标系转换关系,实现了两侧孔测量数据的坐标系统一,最终计算出同轴度误差评价参数。

1 系统方案设计

用于大跨距孔同轴度误差测量的系统方案如图1所示,在被测工件两端孔外侧相对布置两套视觉测量单元用于获取被测孔端面点云数据,视觉测量单元通过云台安装在三维调整架上,可以灵活地进行位姿调整。由于被测机械零件具有较高的表面反射率且特征较少,因此视觉测量单元采用线激光扫描结合双目立体视觉的方案^[9-10]。具体测量步骤如下:

1) 根据两个轴承孔的位置和尺寸,选择合适的镜头,调整视觉测量单位的位姿,使得视觉测量单元能够完整采集包含轴承孔的端面图像。

2) 对由相对布置的两套视觉测量单元构成的无公共视场多视觉系统进行标定,得到两套视觉测量单元的内外参数以及它们之间的相对位置关系。

3) 两套视觉测量单元分别获取对应轴承孔外端面的点云数据,拟合轴承孔在端面上的圆心坐标以及端面法线,分别计算得到两轴承孔的轴线方程。

4) 根据标定得到的两套视觉测量单元之间的坐标系旋转和平移矩阵,将两套视觉测量单元分别测量得到的两个不同坐标系的轴线方程转化到统一坐标系,进一步计算得到两轴线的空间距离和夹角^[11],最终给出同轴度误差评价参数。

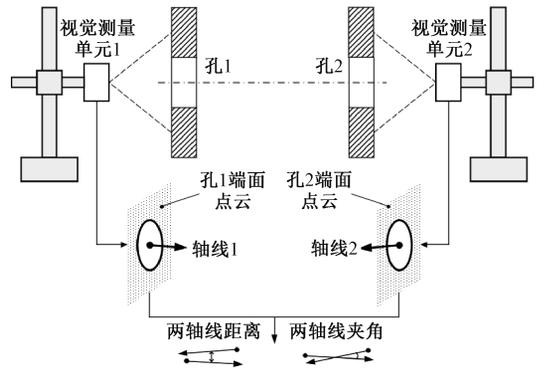


图1 大跨距孔同轴度测量方案

Fig. 1 Coaxiality measurement scheme of long-span holes

根据国家标准 JB/T 7557-1994,本文采用坐标法对同轴度误差进行测量^[13]。由于本文的测量对象为大跨距孔,且孔壁较薄,孔内测数据难以获取,因此将精加工的端面作为基准要素,通过计算回转圆心与端面法线来近似模拟基准轴线。

2 视觉测量方法

2.1 激光中心线提取

线激光扫描双目视觉测量系统利用激光线条进行双目匹配。理想线激光在光条纹截面光强是呈高斯分布的,但受物体表面反射状况、相机离散成像、线激光发射角度等因素的影响,实际的线激光图像上的光条纹截面光强分布不对称,并且光条纹在图像中占有一定像素的宽度,故需要对光条纹图像进行滤波、阈值分割后再进行中心线提取。采用高斯滤波法和最大类间方差阈值分割法^[13]对线激光图像进行预处理。

线激光具有一定带宽,光带中心线上的点才是携带被测物体表面三维信息最准确的点,对激光中心线坐标的提取偏差将直接影响三维重建精度^[14]。中心线提取常用的方法有极值法、灰度重心法^[15]、梯度重心法和高斯拟合法,分别采用上述方法提取光条纹中心线并进行拟合,结果如图2所示。综合考虑,灰度重心法兼具提取效率和精度,且提取点离散程度低,是最佳选择。为进一步提高精度,可对提取的中心线进行最小二乘曲线拟合。

2.2 图像匹配与三维重建

双目视觉系统之间存在极线约束,如图3所示,三维点 P 在两个相机图像上的二维投影点分别为 p_1 和 p_2 , O_1 和 O_2 为两相机坐标系原点, O_1O_2P 为外极平面, e_1 和 e_2 为极点, l_1 和 l_2 为极线, R 和 t 为左相机到右相机的旋转和平移矩阵,点 p_1 和 p_2 之间存在以下约束:

$$x_2^T E x_1 = p_2^T F p_1 = 0 \quad (1)$$

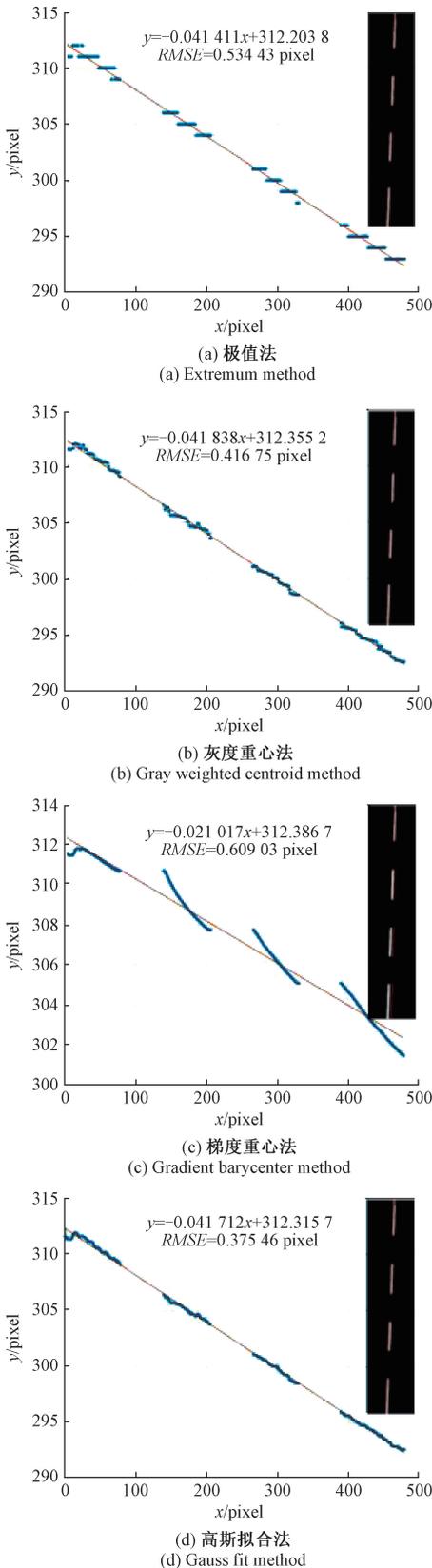


图 2 光条纹中心线的提取与拟合

Fig. 2 Extraction and fitting of center line of light stripe

式中: E 为本质矩阵且 $E = t \times R$, F 为基础矩阵。对于图 3 左图像坐标上的每个像素点为 p_1 , 其在右图像上对应的点 p_2 必定位于极线 l_2 上。

在图像匹配过程中, 对极几何的约束可以将对应点的计算空间从二维线性空间减小到一维线性空间, 大大降低了多视图图像匹配的计算量。双目视觉系统通过标定可以得到包含两个摄像机之间旋转 R 和平移 t 的刚体变换矩阵, 因此可以通过三角剖分直接得到给定一对匹配点的三维数据。

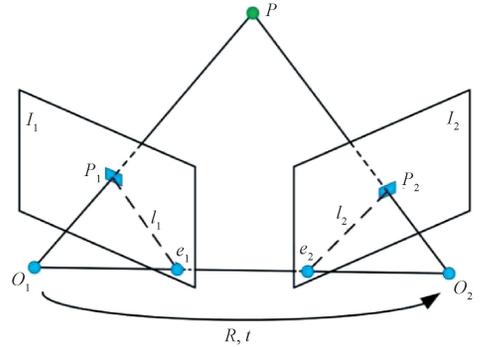


图 3 双目极线约束

Fig. 3 Binocular epipolar constraint

双目匹配是立体视觉的关键步骤, 为了提高立体对应点的搜索速度, 首先对立体图像进行立体校正, 使立体图像处于同一平面, 使极线 l_1 和 l_2 水平对齐, 如图 4 所示。点对 (p_l, p_r) 对应的三维点 $P(X, Y, Z)$ 可由式 (2) 求得。

$$\begin{aligned}
 X &= \frac{Z(u_l - c_x)}{f} \\
 Y &= \frac{Z(v_l - c_y)}{f} \\
 Z &= \frac{B \cdot f}{-[d - (c_x - c'_x)]'}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

式中: B 为两台相机的基线; f 为焦距; (c_x, c_y) 为相机左中心; d 为视差, $d = x_l - x_r$ 。

2.3 系统标定方法

为了评价两个轴承孔的同轴度误差, 还需将两套视觉测量单元的测量结果统一到同一坐标系。针对大跨度双轴承孔视觉测量系统, 设计了多标定板固连的靶标并提出了标定方案, 如图 5 所示。用于系统标定的靶标由四个标定板机械固连而成, 标定板 1 位于视觉测量单元 1 的视场范围内, 标定板 4 位于视觉测量单元 2 的视场范围内, 标定板 1 和标定板 2、标定板 3 和标定板 4 分别以一定夹角固连, 标定板 2 和标定板 3 同处于大视场相机视场范围内。

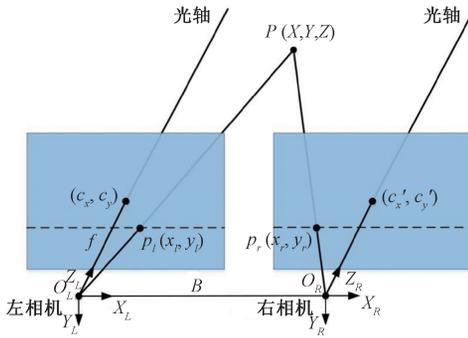


图4 平行双目测量模型

Fig. 4 Parallel binocular measurement model

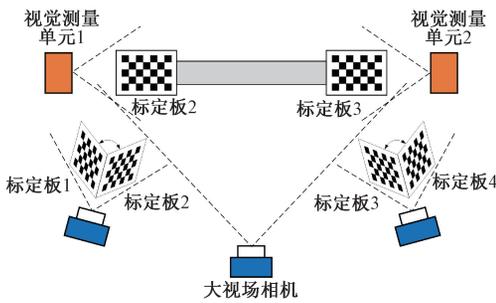


图5 系统标定方案

Fig. 5 System calibration solution

系统标定步骤如下:

1) 标定大视场相机, 利用大视场相机分别采集标定板1和标定板2处于同一视场的图像、标定板3和标定板4处于同一视场的图像, 再次标定大视场相机并采集标定板2和标定板3处于同一视场的图像, 利用大视场相机参数和PnP (perspective-n-point) 原理分别求解各个标定板与大视场相机的外参, 得到标定板1和标定板2、标定板2和标定板3、标定板3和标定板4之间的旋转矩阵和平移矩阵, 进而求解标定板1和标定板4的旋转矩阵和平移矩阵。

2) 利用双目标定方法分别标定视觉测量单元1和2的内外参数。

3) 固定视觉测量单元1和视觉测量单元2之间的位姿关系, 分别同时用视觉测量单元1采集标定板1的图像、视觉测量单元2采集标定板4的图像, 利用PnP原理求解标定板1与视觉测量单元1之间、标定板4与视觉测量单元2之间的旋转矩阵和平移矩阵。

4) 通过步骤1) 求解标定板1与标定板4之间的旋转矩阵和平移矩阵, 通过步骤3) 求解视觉测量单元1与标定板1之间的旋转矩阵和平移矩阵以及视觉测量单元2与标定板4之间的旋转矩阵和平移矩阵, 最终求解视觉测量单元1与视觉测量单元2之间的旋转矩阵与平移矩阵。

以上标定方案的数学推导过程如下:

$$\begin{bmatrix} x_{bj} \\ y_{bj} \\ z_{bj} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{ij} & T_{ij} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{bi} \\ y_{bi} \\ z_{bi} \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} R_{14} & T_{14} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{34} & T_{34} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{23} & T_{23} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{12} & T_{12} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} x_{sj} \\ y_{sj} \\ z_{sj} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{bisj} & T_{bisj} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{bi} \\ y_{bi} \\ z_{bi} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} x_{s1} \\ y_{s1} \\ z_{s1} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{b1s1} & T_{b1s1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{14} & T_{14} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x_{s2} \\ y_{s2} \\ z_{s2} \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} R_{b4s2} & T_{b4s2} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} R_{s1s2} & T_{s1s2} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{b1s1} & T_{b1s1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{14} & T_{14} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} R_{b4s2} & T_{b4s2} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1}$$

其中, (x_{bi}, y_{bi}, z_{bi}) 、 (x_{bj}, y_{bj}, z_{bj}) 为标定板 i 和标定板 j 的世界坐标系, 两者之间的旋转和平移变换分别为 R_{ij} 和 T_{ij} ; (x_{sj}, y_{sj}, z_{sj}) 为对应的视觉测量单元 j 的测量坐标系, 标定板 i 与测量单元 j 之间存在旋转 R_{bisj} 和平移 T_{bisj} ; R_{s1s2} 和 T_{s1s2} 分别为视觉测量单元1到视觉测量单元2的旋转和平移变换矩阵。

3 实验验证与误差分析

3.1 系统标定方法

评价同轴度误差视觉测量系统的精度需要从两个方面考虑: 视觉测量单元的测量精度直接影响其对应轴承孔轴线的计算精度; 两套视觉单元之间的标定精度影响同轴度误差的计算精度。

1) 系统标定

如图6所示, 视觉测量单元采用的相机 (DAHENG MER-131-210U3M) 分辨率为 1280×1024 pixels, 像素尺寸 $4.8 \mu\text{m} \times 4.8 \mu\text{m}$, 镜头 (CHIOPT FA1201C) 焦距 12 mm ; 线激光器 (波长 450 nm , 最小线宽 0.2 mm) 安装于两相机之间的舵机上实现扫描功能。标定板均为 12×9 的棋盘格, 格子边长为 10 mm 。采用张正友标定法

分别得到两套视觉测量单元的相机参数,然后采用 2.3 节的系统标定方法得到两套视觉测量单元之间的相对位姿关系。系统标定结果如表 1 所示,其中,相机标定的平均重投影误差为 0.051 pixel,表明相机参数标定精度较高。

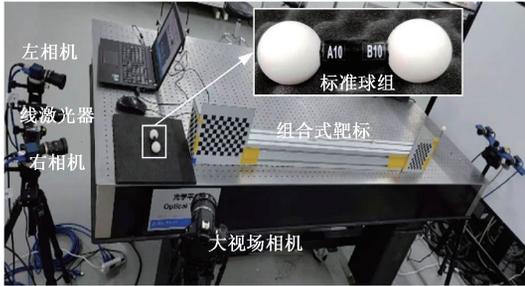


图 6 精度验证实验

Fig. 6 Accuracy evaluation experiment

2) 视觉测量单元精度验证

本文参考 VDI/VDE 标准中光学三维测量系统检测规范和锻压件几何光学检测标准 GB/T 25134-2010,基于上述两套视觉测量单元的标定结果,分别对标准球(球 A 直径 29.993 2 mm,球 B 直径 30.005 5 mm,球心距 59.955 0 mm)进行测量。两个陶瓷标准球通过精密车床加工制备,然后使用三坐标测量机获得其直径、圆度以及球心距等几何参数,测量基准从三坐标测量机传递到标准球。单个测量单元的测量精度与其视场大小呈负相关,本文根据被测轴承孔大小,视场设置为 300 mm×240 mm。在测量视场内移动标准哑铃球,分别在不同位置扫描 10 次,对得到的点云数据拟合球面,计算直径和球心距,其平均绝对误差(MAE)和均方根误差(RMSE)如表 2 所示。可以看出,两套视觉测量单元分别具有较高的测量精度且基本一致,测量标准球直径的 MAE 均小于 40 μm, RMSE 小于 30 μm,测量球心距的 MAE 和 RMSE 均小于 20 μm。

表 1 系统参数标定结果

Table 1 Calibration results of system parameters

参数类型		标定结果	
视觉测量单元 1	左相机内参	$K_{1L} = \begin{bmatrix} 2\ 554.977 & 0 & 624.659 \\ 0 & 2\ 555.451 & 473.248 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	
	右相机内参	$K_{1R} = \begin{bmatrix} 2\ 557.136 & 0 & 619.162 \\ 0 & 2\ 555.935 & 451.459 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	
	左右相机的旋转和平移矩阵	$R_1 = \begin{bmatrix} 0.934 & -0.008 & 0.358 \\ 0.010 & 0.999 & 0.004 \\ 0.358 & -0.007 & 0.934 \end{bmatrix}, t_1 = \begin{bmatrix} -142.482 \\ -0.018 \\ 25.308 \end{bmatrix}$	
视觉测量单元 2	左相机内参	$K_{2L} = \begin{bmatrix} 2\ 555.217 & 0 & 620.472 \\ 0 & 2\ 556.304 & 463.751 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	
	右相机内参	$K_{2R} = \begin{bmatrix} 2\ 556.084 & 0 & 624.659 \\ 0 & 2\ 557.467 & 467.209 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	
	左右相机的旋转和平移矩阵	$R_2 = \begin{bmatrix} 0.894 & 0.002 & 0.447 \\ -0.003 & 0.999 & 0.002 \\ -0.447 & -0.003 & 0.894 \end{bmatrix}, t_2 = \begin{bmatrix} -185.237 \\ -0.495 \\ 41.726 \end{bmatrix}$	
视觉测量单元 1 和 2 的旋转和平移矩阵		$R_{12} = \begin{bmatrix} -0.999 & -0.006 & 0.054 \\ -0.004 & 0.999 & 0.039 \\ -0.054 & 0.039 & -0.998 \end{bmatrix}, t_{12} = \begin{bmatrix} 165.195 \\ -54.159 \\ 1\ 829.054 \end{bmatrix}$	

3) 系统测量精度验证

采用已知球心距的大跨距标准球组对由两套视觉测量单元构成的系统整体测量精度进行评估。球 A 位于视觉测量单元 1 的测量空间内,球 B 位于视觉测量单元 2

的测量空间内,球心距的标称值为 1 150.063 5 mm。将标准球组随机放置在系统测量空间内的 5 个位置,在每个位置由视觉测量单元 1 对球 A、视觉测量单元 2 对球 B 分别连续采集 2 组点云数据,共得到 10 组测量数据。

表2 视觉测量单元精度验证实验结果

Table 2 Experimental results of accuracy verification of VBM unit

视觉测量单元编号	球 A 直径		球 B 直径		球心距	
	MAE	RMSE	MAE	RMSE	MAE	RMSE
1	29.8	24.6	28.3	28.0	15.3	16.3
2	31.2	27.1	33.6	29.5	12.9	13.7

表3 测量系统精度验证结果

Table 3 Accuracy verification results of measurement system

序号	球 A 坐标	球 B 坐标	球心距	误差
1	(45.071, 30.702, 385.651)	(51.619, -9.710, 1 535.137)	1 150.215	0.148
2	(45.086, 30.694, 385.637)	(51.625, -9.705, 1 535.116)	1 150.207	0.143
3	(80.440, 30.234, 386.967)	(90.221, -9.195, 1 536.143)	1 149.894	-0.169
4	(80.447, 30.226, 386.976)	(90.204, -9.214, 1 536.128)	1 149.870	-0.193
5	(98.593, 25.716, 318.682)	(86.480, -7.673, 1 468.304)	1 150.171	0.107
6	(98.585, 25.733, 318.681)	(86.471, -7.681, 1 468.291)	1 150.159	0.095
7	(119.238, 26.573, 303.921)	(105.504, -8.043, 1 453.240)	1 149.922	-0.142
8	(119.237, 26.556, 303.923)	(105.516, -8.055, 1 453.231)	1 149.911	-0.153
9	(138.303, 27.322, 288.528)	(121.253, -8.139, 1 438.142)	1 150.287	0.224
10	(138.311, 27.326, 288.545)	(121.272, -8.140, 1 438.126)	1 150.254	0.190

3.2 测量实例与误差分析

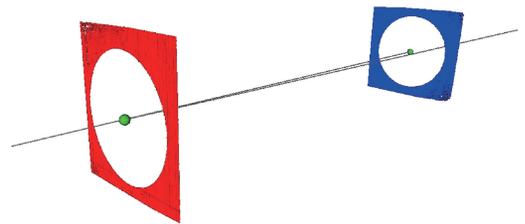
压路机的振动轮轮体是一种典型的大跨距轴承孔零部件,在实际生产中通常采用三坐标测量机(Coordinate measuring machine, CMM)对其同轴度误差进行离线抽检,目前尚无其他有效测量手段。采用本系统对一孔径200 mm,跨距1 m的振动轮同轴度进行测量,测量系统布置及测量结果如图7所示。为进一步验证视觉系统的测量精度,使用CMM对该振动轮同轴度误差以同样的方法进行测量,即在轴承孔内表面取点拟合截面圆并求取圆心坐标,在端面取点拟合端面法线作为轴线方向,分别得到两轴承孔的轴线方程。两种方法各测10组数据,以两轴线空间距离和夹角作为对比参数,如表4所示。

由表4可知,采用本文系统测量得到振动轮两端轴承孔轴线空间距离平均值为0.317 mm、轴线夹角平均值为0.0081°;采用CMM得到的两轴线空间距离平均值为0.305 mm、轴线夹角平均值为0.0078°。两者测量结果平均值偏差小于5%,本文系统的测量精度能够满足工业生产需求。

根据标定得到的两套视觉测量单元的位姿关系,将视觉测量单元2测得的球B点云数据坐标变换到视觉测量单元1的坐标系下,计算两球球心坐标和球心距,如表3所示。进一步分析可知,球心坐标测量重复性误差小于0.02 mm,10次测量得到的球心距均值为1 150.089 mm,平均绝对误差为0.026 mm,均方根误差为0.161 mm,表明系统具有良好的测量精度。



(a) 测量系统装置
(a) Measurement system setup



(b) 测量结果
(b) Measurement result

图7 压路机振动轮同轴度测量

Fig. 7 Coaxiality measurement of the vibrating wheel of a roller

表4 视觉测量系统与CMM测量结果对比
Table 4 Comparison of measurement results between VBM system and CMM

测量方法	序号	同轴度误差		平均值	
		轴线距离/mm	轴线夹角/(°)	轴线距离/mm	轴线夹角/(°)
视觉测量系统	1	0.317	0.007 6		
	2	0.303	0.008 3		
	3	0.296	0.008 1		
	4	0.345	0.007 7		
	5	0.321	0.007 9		
	6	0.334	0.008 0	0.317	0.008 1
	7	0.298	0.009 1		
	8	0.307	0.007 5		
	9	0.315	0.008 4		
	10	0.332	0.008 8		
CMM	1	0.294	0.007 5		
	2	0.292	0.007 8		
	3	0.302	0.007 9		
	4	0.297	0.007 4		
	5	0.320	0.008 1		
	6	0.297	0.007 9	0.305	0.007 8
	7	0.319	0.007 3		
	8	0.305	0.008 1		
	9	0.303	0.007 8		
	10	0.317	0.008 0		

4 结 论

本文设计了一套基于线激光扫描双目视觉的大跨距轴承孔同轴度误差测量系统,使用对侧布置的两套视觉测量单元分别采集轴承孔端面点云数据,求解端面圆心并拟合出两侧轴承孔轴线,进一步通过本文提出的大跨距无公共视场视觉系统标定方法,将两套视觉测量单元的测量结果统一到同一坐标系,实现了大跨距孔同轴度的快速测量。相比现有的百分表法和三坐标法,避免了采用精密的机械系统和过多的人工操作,自动化程度高,有望实现在线测量。精度验证实验表明,该系统对于1.15 m跨距的标准球组球心距测量均方根误差为0.161 mm。最后,使用该系统测量了某压路机振动轮两侧轴承孔的同轴度误差,并与三坐标测量机的结果进行了对比,两者测量结果偏差小于5%,测量精度和效率满足工业生产需求。

本文提供了一种用于大跨距孔同轴度误差的快速简易视觉测量方法,但并未对同轴度误差的计量问题进行探讨,今后可进一步建立更加规范的计量标准来更加合理地评估大跨距孔类零件的同轴度误差。此外,本文提出的方法和系统还可扩展到大型零件的表面测量中,无需借助拼接手段,即可将无公共视场的两个区域的测量结果统一到一个坐标系。

参考文献

- [1] 雷建波,王双不. 高精度多孔大跨距同轴度测量关键技术综述[J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(5): 136-139.
LEI J B, WANG SH B. Research on key technologies of high precision coaxiality measurement for long-span porous parts [J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2017, 38(5): 136-139.
- [2] 胡廷智,张忠清,肖木峥,等. 基于激光自准直的发动机轴孔同轴度在线检测方法[J]. 推进技术, 2019, 40(9): 2099-2104.
HU T ZH, ZHANG ZH Q, XIAO M ZH, et al. Online detection method for shaft holes coaxiality of engine based on laser autocollimation [J]. Journal of Propulsion Technology, 2019, 40(9): 2099-2104.
- [3] 余厚云,赵转萍,陆永华. 基于PSD的长跨度孔系同轴度误差测量系统[J]. 传感器与微系统, 2013, 32(2): 70-73.
YU H Y, ZHAO ZH P, LU Y H. Error measurement system of coaxiality for long-span holes based on PSD [J]. Transducer and Microsystem Technology, 2013, 32(2): 70-73.
- [4] WANG L, YANG T, WANG Z, et al. Simple measuring rod method for the coaxiality of serial holes [J]. Review of Scientific Instruments, 2017, 88: 113110.
- [5] 颜敏炜,张英杰,代博超,等. 采用激光传感器的同轴度检测技术研究[J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(10): 27-32.
YAN M W, ZHANG Y J, DAI B CH, et al. Research on coaxiality detection technology based on laser sensor [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(10): 27-32.
- [6] ZHANG Y, GE L. A novel geometry error measurement methodology for coaxiality evaluation [C]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2021, 235(4): 627-639.
- [7] ZHANG G, YANG S, HU P, et al. Advances and prospects of vision-based 3D shape measurement methods[J]. Machines, 2022, 10(2): 124.

- [8] LI C, XU X, SUN H, et al. Coaxiality of stepped shaft measurement using the structured light vision [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, DOI: 10.1155/2021/5575152.
- [9] 李文涛, 王培俊, 陈亚东, 等. 钢轨全轮廓线结构光双目视觉测量系统标定 [J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(3): 203-211.
LI W T, WANG P J, CHEN Y D, et al. Calibration of binocular vision measurement system by line structured light for rail full profile [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(3): 203-211.
- [10] VILACA J L, FONSECA J C, PINHO A M. Calibration procedure for 3D measurement systems using two cameras and a laser line [J]. *Optics and Laser Technology*, 2009, 41(2): 112-119.
- [11] 易亚星, 安郁虹, 李忠科, 等. 同轴度测量的原理与方法 [J]. *仪器仪表学报*, 2002, 23(S1): 39-41.
YI Y X, AN Y H, LI ZH K, et al. Principle of coaxiality measurement [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2002, 23(S1): 39-41.
- [12] 张珂, 张玮, 成果, 等. 支持向量机评定同轴度误差测量不确定度 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2020, 34(5): 29-36.
ZHANG K, ZHANG W, CHENG G, et al. Evaluation of coaxiality error measurement uncertainty by support vector machine [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2020, 34(5): 29-36.
- [13] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. *IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics*, 2007, 9(1): 62-66. 9.
- [14] XU X, FEI Z, YANG J, et al. Line structured light calibration method and centerline extraction: A review [J]. *Results in Physics*, 2020, DOI:10.1016/j.rinp.2020.103637.

- [15] 张小艳, 王晓强, 白福忠, 等. 基于改进灰度重心法的光带中心提取算法 [J]. *激光与红外*, 2016, 46(5): 622-626.

ZHANG X Y, WANG X Q, BAI F ZH, et al. Improved gray centroid method for extracting the centre line of light stripe [J]. *Laser and Infrared*. 2016, 46(5): 622-626.

作者简介



E-mail: guofeng.zhang@xjtu.edu.cn

Zhang Guofeng received his B. Sc. Degree from Xi'an Technological University in 2013, and M. Sc. degree and Ph. D. degree both from Xi'an Jiaotong University in 2015 and 2020, respectively. He is currently an assistant professor at Xi'an Jiaotong University. His main research interests include micro/nano measurement and machine vision.



E-mail: shuming.yang@mail.xjtu.edu.cn

Yang Shuming (Corresponding author) received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Xi'an Jiaotong University in 2002 and 2005, and Ph. D. degree from University of Huddersfield, UK in 2009. He is currently a professor at Xi'an Jiaotong University. His main research interests include micro/nano fabrication and measurement.

张国锋, 2013年于西安工业大学获得学士学位, 2015年于西安交通大学获得硕士学位, 2020年于西安交通大学获得博士学位, 现为西安交通大学助理教授, 主要研究方向为微纳测量与机器视觉。

杨树明 (通信作者), 2002年于西安交通大学获得学士学位, 2005年于西安交通大学获得硕士学位, 2009年于英国哈德斯菲尔德大学获得博士学位, 现为西安交通大学教授, 主要研究方向为微纳制造与测量。