

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2513791

基于双目视觉的大直径零件转角高精度测量方法*

杜坡^{1,2}, 段振云¹, 张静¹, 赵文辉¹, 莱恩刚²

(1. 沈阳工业大学机械工程学院 沈阳 110870; 2. 沈阳工业大学工程实训中心 沈阳 110870)

摘要: 角度测量作为精密计量领域的关键技术,在航空航天、装备制造、高精度检测等现代工业中具有重要应用价值。为了解决大齿轮等大直径零件在精密制造、装配过程中小角度高精度测量的问题,故提出基于一种基于双目视觉协同的扩展视场高精度转角测量方法。首先,基于改进的二维四参数坐标变换算法建立测量基准板标定模型,实现测量基准板的高精度标定,为转角测量提供可靠的参考基准。其次,针对大尺寸工件测量时单相机视场受限的问题,通过构建具有空间视场互补特性的双目视觉测量系统,提出基于特征点匹配的视野中心坐标解算算法,实现相机视野中心在测量基准板坐标系下的坐标求解,为转角测量奠定了理论基础。最后,基于上述方法研制了双目视觉转角测量系统。并以模数为20 mm、齿数30的大齿轮为验证对象,在0°~20°转角范围内进行了系统的精度测试和重复性验证。结果表明,测量系统的绝对测量精度达到6",测量重复精度为5",具有较高的测量精度和稳定性,所提方法和设计的系统满足了大直径零件转角高精度动态测量的需求,为大直径零件转角测量提供了新的技术手段。

关键词: 双目视觉; 转角测量; 坐标变换; 测量精度

中图分类号: TH172 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

A high-precision measurement method for rotation angles of large-diameter components based on binocular vision

Du Po^{1,2}, Duan Zhenyun¹, Zhang Jing¹, Zhao Wenhui¹, Lai Engang²

(1. School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

2. Engineering Training Centre, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: Angle measurement, as a pivotal technology in the field of precision metrology, holds significant application value in modern industries, such as aerospace, equipment manufacturing, and high-precision inspection. To address the challenge of high-precision small-angle measurement in the precision manufacturing and assembly of large-diameter components such as large gears, this article proposes an extended-field-of-view high-precision rotation angle measurement method based on binocular vision collaboration. Firstly, an improved two-dimensional four-parameter coordinate transformation algorithm is employed to formulate a calibration model for the measurement reference plate, achieving high-precision calibration and providing a reliable reference basis for angle measurement. Secondly, to overcome the limited field of view of a single camera when measuring large-scale workpieces, a binocular vision measurement system with complementary spatial fields of view is established. A feature point matching-based algorithm for solving the field-of-view center coordinates is proposed, enabling the determination of the camera's field-of-view center coordinates in the measurement reference plate coordinate system. Thereby, a theoretical foundation for angle measurement is achieved. Finally, based on the aforementioned methods, a binocular vision-based rotation angle measurement system is developed. A large gear with a modulus of 20 mm and 30 teeth is used as the test object. Systematic accuracy tests and repeatability verification are conducted within a rotation range of 0° to 20°. The results show that the system achieves an absolute measurement accuracy of 6" and a repeatability accuracy of 5", demonstrating high measurement precision and stability. The proposed method and the designed system meet the requirements for high-precision dynamic angle measurement of large-diameter components, providing a new technical approach for such applications.

Keywords: binocular vision; rotation angle measurement; coordinate transformation; measurement accuracy

收稿日期: 2025-03-02 Received Date: 2025-03-02

* 基金项目: 辽宁省教育厅科学研究经费(LJGD2020003, LJKZ0160)项目资助

0 引言

角度测量是计量科学的重要组成部分,零件的转角测量在航空航天、机械制造、高精度检测等诸多领域中已得到了广泛的应用^[1],其技术要求测量精度高、自动化程度高^[2]。目前转角测量方法按照测量原理大致可分为机械测量法^[3-5]、电磁测量法^[6]、光学测量法^[7-8]以及机器视觉测量法^[9-11]等方式。机械测量法和电磁测量法作为当前主流的接触式测量技术,具有原理直观、设备成熟等优势,但其测量过程与结果易受外部环境因素制约。对于机械测量法,环境温度变化会导致测量基准件与被测零件产生差异化的热膨胀^[12],机械振动可能引起测头与工件接触力的波动^[13]。在电磁测量领域,强电磁干扰环境会显著降低编码器信号信噪比^[14]。光学测量法测量精度较高,但存在测量范围有限,系统结构复杂等缺点。随着计算机技术和工业相机的发展,机器视觉测量作为一种新兴的非接触式测量手段,越来越受到关注,通过特征图像分析实现空间角度解算,避免了接触式测量中的力变形、电磁干扰等误差源,具有精度高、可靠性强、可实时测量等优点,逐渐成为一种重要的测量手段,现已广泛应用于空间运动分析、距离测量等诸多领域^[15]。

针对应用机器视觉测量零件转角,吴常铨等^[16]提出一种基于单目视觉和最大长度序列的旋转角度测量系统,利用摄像头从侧面拍摄柱状旋转体周向的靶标图像实现角位移的测量。侣明华等^[17]提出一种基于非合作目标视觉跟踪的光电测量方法并研制了基于光电伺服平台的动态角度测量装置。纪贤瑞等^[18]提出了一种单相机面内几何量测量方法,采用光学成像镜头、面阵摄像机和带发光点阵的标准点阵平面靶组成一套基于视觉的面内转角测量系统。张玉杰等^[19]提出了一种基于特征匹配与径向基神经网络的衬套偏转角度测量方法,偏转角度测量的最大平均相对误差为2.72%,满足衬套偏转角度测量要求。Shan等^[20]提出了基于单目视觉与合作目标的姿态测量方法,通过设计圆环平面靶标及特征点提取算法,结合随机抽样一致性算法和拓扑拟合优化,实现俯仰角和滚转角的测量。Zhang等^[21]提出了一种基于旋转光斑图像和机器视觉的非接触式角度测量方法,通过椭圆轨迹拟合来实现角度检测。Li等^[22]提出了一种单目视觉的高精度旋转角度测量方法,基于坐标旋转方程实现标定板旋转角度的检测。

现有基于单目视觉的转角测量方法受限于小尺度测量场景,在大尺寸零件的高精度检测中存在显著局限性。尤其是在大齿轮齿廓高精度测量中,单目系统因大视场畸变与边缘分辨率衰减导致转角测量误差累积,难以满足大齿轮齿廓偏差的检测需求。针对传统单目视觉系统

在图像边缘区域存在的分辨率衰减,其边缘成像质量难以满足高精度测量需求的问题,故提出基于双目协同视觉的扩展视场的测量方法。通过构建双目相机系统,突破单目成像的视场限制与边缘畸变瓶颈,利用双相机的空间互补特性实现测量范围的有效扩展,实现大直径零件转角高精度测量。

1 理论分析

为了精确测量大直径零件转角 θ ,拟在大直径零件近似径向方向上找到一条与大直径零件固连的直线 $PQ(P(X_P, Y_P), Q(X_Q, Y_Q))$,当零件回转时,直线 PQ 由初始位置转至终止位置 $P'Q'(P'(X_{P'}, Y_{P'}), Q'(X_{Q'}, Y_{Q'}))$,则直线 PQ 和直线 $P'Q'$ 之间的夹角即为大直径零件回转角度,测量原理如图1所示。

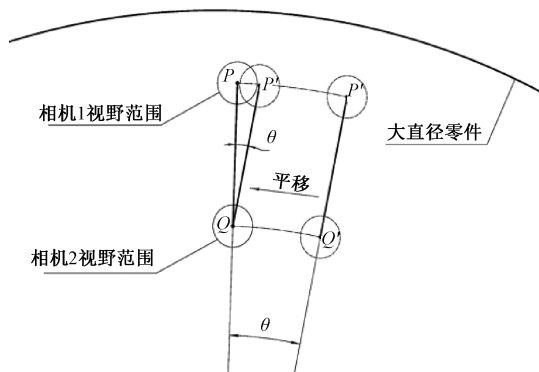


图1 转角测量基本原理

Fig. 1 Basic schematic of rotating angle measurement

回转角度计算公式如式(1)~(3)所示。

$$K_{PQ} = \frac{Y_P - Y_Q}{X_P - X_Q} \quad (1)$$

$$K_{P'Q'} = \frac{Y_{P'} - Y_{Q'}}{X_{P'} - X_{Q'}} \quad (2)$$

$$\theta = \arctan \left| \frac{K_{PQ} - K_{P'Q'}}{1 + K_{PQ} \times K_{P'Q'}} \right| \quad (3)$$

基于上述转角测量基本原理,本研究提出了大直径零件转角高精度测量方法并研制了测量装置,其结构如图2所示。

双目视觉转角测量装置主要是由互补金属氧化物半导体(complementary metal oxide semiconductor, CMOS)相机、双远心镜头、测量基准板和二维点阵标定板构成,如图2所示。系统工作时,首先通过调平装置将测量基准板调整水平并固定于待测大直径零件表面,使其随工作同步回转。以二维点阵标定板作为空间特征基准,双目相机在零件回转前后对测量基准板进行连续图像采

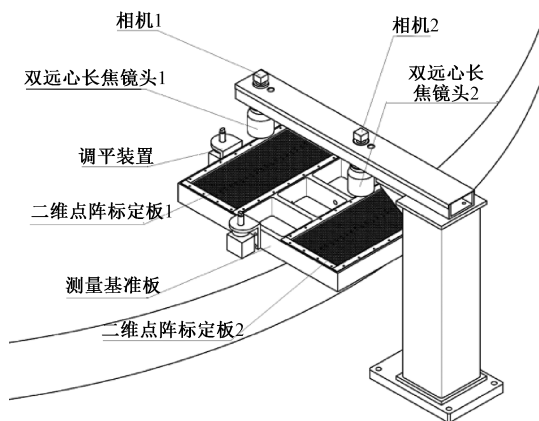


图2 大直径零件转角测量装置结构

Fig. 2 Structure of large diameter component angle measuring device

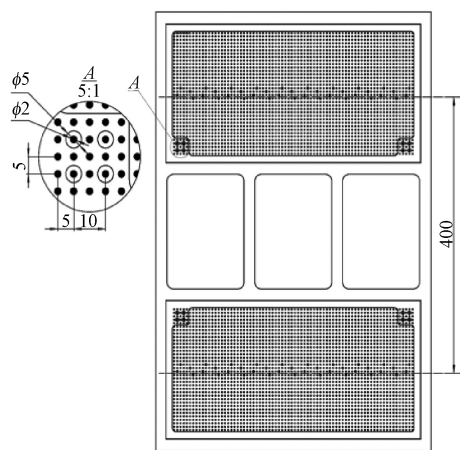


图3 测量基准板设计

Fig. 3 Structure of reference plate

集。通过解算双目相机视场中心在测量基准板坐标系中的坐标变化量,最终实现转角值的精确测量。

2 测量基准板设计与标定原理

2.1 测量基准板设计

由于采用双目相机来获取图像,需要较大的二维点阵标定板作为测量基准与之对应,但是由于较大的二维点阵标定板加工难度大、标定板上的标定圆累计误差大、制造成本高等原因,采用双二维点阵标定板集成在同一测量基准板上的方式,通过对测量基准板高精度标定,实现与其相同的功能。二维点阵标定板上由36行76列的标定圆组成,标定圆行列之间相互正交,标定圆直径为2 mm,相邻标定圆间距为5 mm,两个二维点阵标定板中心距离为400 mm。测量基准板主体框架上有16个高精度定位孔,作用是在二维点阵标定板与测量基准板之间搭建桥梁,建立两者之间的坐标联系,完成二维点阵标定板坐标系到测量基准板坐标系的转换,两个二维点阵标定板嵌入式平行安装于测量基准板框架上,其结构如图3所示。

2.2 测量基准板标定原理

测量基准板作为转角测量系统的关键组成部分,其标定结果的准确度会对图像中坐标值提取的准确性产生重要影响,进而影响系统的整体测量精度。在测量过程中,双目相机直接获得的是相机视野中心的图像像素坐标,而非是相机视野中心在测量基准板上的坐标,这就涉及图像像素坐标系 $O_1(X^{(1)}, Y^{(1)})$ 、图像物理坐标系 $O_2(X^{(2)}, Y^{(2)})$ 、二维点阵标定板坐标系 $O_3(X^{(3)}, Y^{(3)})$ 、测量基准板坐标系 $O_4(X^{(4)}, Y^{(4)})$ 4个不同层次坐标系之间的转换,建立的4个不同层次的坐标系之间的关系如图4所示。

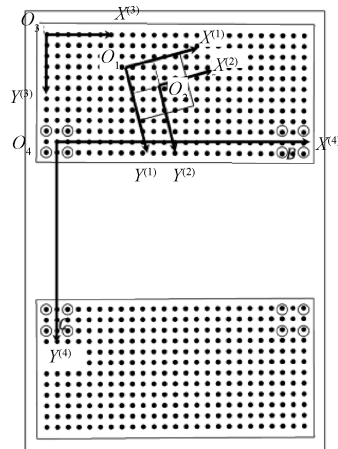


图4 坐标系之间的关系

Fig. 4 The relationship between coordinate systems

标定主要采用改进的二维四参数法完成多次坐标变换。其核心是通过两个特征点在不同坐标系下的坐标计算其坐标变换四参数,进而建立二维坐标系转换关系。设点A在变换前坐标系 $O_i(X^{(i)}, Y^{(i)})$ 中的坐标为 $A(X_i, Y_i)$,在变换后的坐标系 $O_{i+1}(X^{(i+1)}, Y^{(i+1)})$ 中的坐标为 $A'(X_{i+1}, Y_{i+1})$,则两者存在的关系,如式(4)所示。

$$\begin{bmatrix} X_{i+1} \\ Y_{i+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \end{bmatrix} + m \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, m 为尺度因子, α 为坐标系的旋转参数,即坐标轴 X_i 与 X_{i+1} 的夹角,逆时针为正; ΔX 和 ΔY 为平移参数。为求得 ΔX 、 ΔY 、 m 、 α 这4个参数,需要已知两个特征点分别在 $O_i(X^{(i)}, Y^{(i)})$ 坐标系下和 $O_{i+1}(X^{(i+1)}, Y^{(i+1)})$ 坐标系下的坐标。

根据式(4),构造条件方程,如式(5)所示。

$$\begin{bmatrix} X_{i+1} \\ Y_{i+1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} m\cos\alpha - 1 & -m\sin\alpha \\ m\sin\alpha & m\cos\alpha - 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \end{bmatrix} \quad (5)$$

令 $a = m\cos\alpha - 1, b = m\sin\alpha$, 式(5)可改写为:

$$\begin{bmatrix} X_{i+1} \\ Y_{i+1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_i & -Y_i \\ Y_i & X_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} \quad (6)$$

式(6)的等价表达式如式(7)所示。

$$\begin{bmatrix} X_{i+1} \\ Y_{i+1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & X_i & Y_i \\ 0 & 1 & Y_i & X_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ a \\ b \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中, $L = \begin{bmatrix} X_{i+1} \\ Y_{i+1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & X_i & Y_i \\ 0 & 1 & Y_i & X_i \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ a \\ b \end{bmatrix}, P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

根据最小二乘原理计算 X 值,如式(8)所示。

$$X = (B^T P B)^{-1} B^T P L \quad (8)$$

解得 X 后,根据 a 和 b ,可求得 m 和 α ,如式(9)、(10)所示。

$$\alpha = \arctan \frac{b}{a + 1} \quad (9)$$

$$m = \sqrt{(a + 1)^2 + b^2} \quad (10)$$

3 实验分析

本研究以渐开线圆柱斜齿轮为实验对象,其主要参数如表 1 所示,采用本研究所提出的测量方法对其转角进行测量和分析。

表 1 渐开线圆柱斜齿轮主要参数

Table 1 Main parameters of involute cylindrical helical gears	
参数	数值
齿数	30
模数/mm	20
压力角/(°)	20
螺旋角/(°)	8
齿宽/mm	60
旋向	右旋

视觉测量单元采用分辨率为 $2\,248\text{ pixels} \times 2\,048\text{ pixels}$ 的 CMOS 相机 (MV-E EM HS)、双远心长焦

镜头 (opto TC12-48) 焦距为 131.4 mm 、LED 白色光平行光源及数字光强控制器等搭建的转角测量装置。为验证实验装置测量转角的准确性,被测齿轮装置回转台选择高精度转台 (GTN-250R),转台采用标准脉冲控制转角值,转台内部用圆光栅作为角度测量标准,实时读取标准转台所转过的角度值。大齿轮与高精度转台固连,实验装置如图 5 所示。

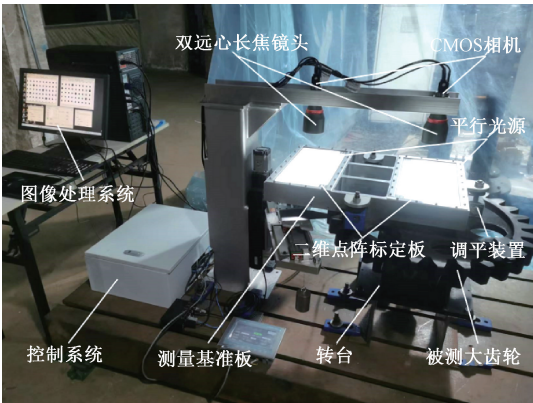


图 5 实验装置
Fig. 5 Experimental device

3.1 测量基准板标定实验

1) 图像像素坐标 $O_1(X^{(1)}, Y^{(1)})$ 到图像物理坐标系 $O_2(X^{(2)}, Y^{(2)})$ 转换

对图 6 中图像①进行处理,可得到测量基准板上 4 个定位孔圆心 $A_{11}, A_{12}, A_{21}, A_{22}$ 在图像像素坐标系下的坐标。根据双目相机标定的像素当量值,分别求出 $A_{11}, A_{12}, A_{21}, A_{22}$ 在图像物理坐标系的坐标值,根据均值公式,可求点 A 在图像物理坐标下的坐标值。同理,对图 6 中图像②、③、④进行处理,可求点 B, C 和 D 在图像物理坐标下的坐标值,计算结果如表 2 所示。

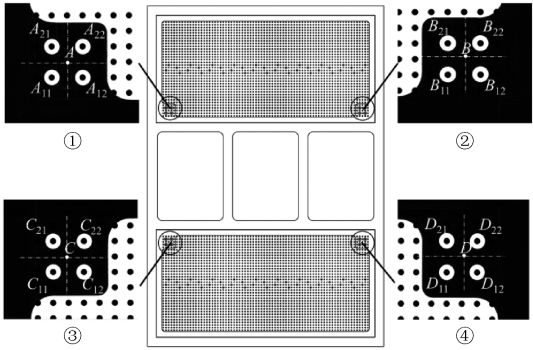


图 6 测量基准板标定
Fig. 6 Calibration of reference plate

表 2 选取点在图像物理坐标系下的坐标值
Table 2 Coordinate values of selected points in the image physical coordinate system of the image

坐标点	图像物理坐标值/(mm, mm)
A	(-2.751 8,-0.364 7)
B	(-2.770 3,-1.483 4)
C	(-1.885 6,-0.868 3)
D	(-1.934 6,-0.923 6)

2) 图像物理坐标系 $O_2(X^{(2)}, Y^{(2)})$ 到二维点阵标定板坐标系 $O_3(X^{(3)}, Y^{(3)})$ 转换

为减小转换过程中的系统误差,保证标定结果的准确性,分别在点 A、B、C、D 所在位置区域范围内选取两个对角点,根据式(4)求出其在图像物理坐标系和二维点阵标定板坐标系下的坐标。图像物理坐标系到二维点阵标定板坐标系转换四参数 ΔX 、 ΔY 、 m 、 α 计算结果如表 3 所示。

表 3 图像物理坐标系到二维点阵标定板坐标系转换四参数
Table 3 Four parameters from the image physical coordinate system to the calibration board coordinate system

坐标点	ΔX	ΔY	m	α
A	12.832 8	165.407 5	-0.999 9	3.139 4
B	367.747 4	166.399 7	-0.999 9	3.139 1
C	11.936 7	10.899 3	-0.999 9	3.139 5
D	366.981 1	10.888 4	-0.999 9	3.138 6

通过点 A 在图像物理坐标系中的坐标 $A(X_A^{(2)}, Y_A^{(2)})$ 与四参数 ΔX 、 ΔY 、 m 、 α 的结果,可得到点 A 在二维点阵标定板坐标系下的坐标 $A(X_A^{(3)}, Y_A^{(3)})$ 。对图 6 中的图像②、③、④分别进行上述转化过程,分别求出四参数 ΔX 、 ΔY 、 m 、 α ,进而求出点 B、C、D 在二维点阵标定板坐标系下的坐标,计算结果如表 4 所示。

表 4 选取点在二维点阵标定板坐标系下的坐标
Table 4 Coordinate of selected points in the calibration board coordinate system

坐标点	二维点阵标定板坐标值/(mm, mm)
A	(10.081 96,165.036 900)
B	(364.981 10,164.909 600)
C	(10.053 11,10.027 080)
D	(365.044 00,9.970 665)

3) 二维点阵标定板坐标系 $O_3(X^{(3)}, Y^{(3)})$ 到测量基准板坐标系 $O_4(X^{(4)}, Y^{(4)})$ 的转换

通过三坐标测量机测量基准板上 A_{11} - A_{22} 、 B_{11} - B_{22} 、 C_{11} - C_{22} 和 D_{11} - D_{22} 这 16 个高精度定位孔圆心在测量基准

板坐标系下的坐标值,根据均值公式,可求点 A、B、C、D 在测量基准板坐标系下的坐标值,测量结果如表 5 所示。

表 5 选取点在测量基准板坐标系下的坐标
Table 5 Coordinate of selected points in the reference plate coordinate system

坐标点	测量基准板坐标值/(mm, mm)
A	(-0.414,-0.194 4)
B	(354.529 8,0.013 6)
C	(-0.280 0,244.786 5)
D	(354.737 1,244.979 2)

通过点 A、B、C、D 在二维点阵标定板和测量基准板坐标系下的坐标,分别求出两个二维点阵标定板坐标系到测量基准板坐标系转换的四参数 ΔX 、 ΔY 、 m 、 α ,计算结果如表 6 所示。

表 6 二维点阵标定板坐标系到测量基准板坐标系转换四参数值

Table 6 Four parameter values from calibration board coordinate system to the reference board coordinate system

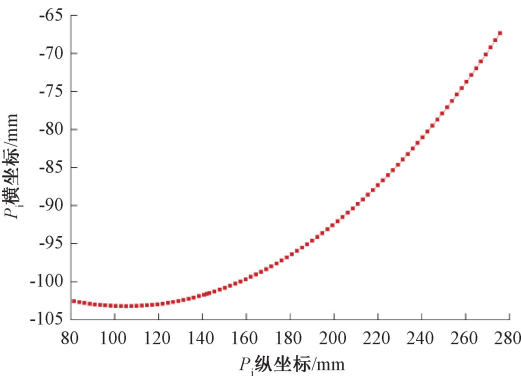
二维点阵标定板	ΔX	ΔY	m	α
1	-10.326 8	-165.261 5	-1.000 3	3.140 6
2	-10.324 7	234.751 6	-1.000 1	3.140 9

3.2 转角测量实验

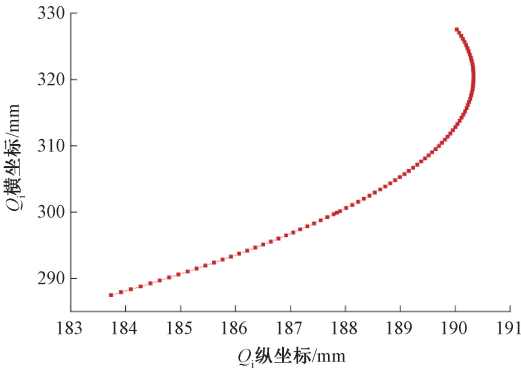
通过磁力吸座将测量基准板固定在大齿轮上,通过三点调平装置将测量基准板调整水平。启动测量程序前,记录当前图像中最靠近视野中心的标定圆圆心和右侧相邻的标定圆圆心在二维点阵标定板坐标系下的初始坐标值 $a_0(X_{a_0}^{(3)}, Y_{a_0}^{(3)})$ 、 $b_0(X_{b_0}^{(3)}, Y_{b_0}^{(3)})$ 。通过测量程序启动回转台匀速旋转,并同时触发双目相机连续拍照。双目相机以固定间隔时间同时对测量基准板连续拍照,分别输出图像 $P_i(i=1,2,3,\cdots,n)$ 、 $Q_i(i=1,2,3,\cdots,n)$ 。根据测量程序对多图像快速处理,输出 1 号和 2 号相机中心点在基准板坐标系下的坐标 $P_i(X_{P_i}^{(4)}, Y_{P_i}^{(4)})$ 、 $Q_i(X_{Q_i}^{(4)}, Y_{Q_i}^{(4)})$,如图 7(a)、(b)所示。

根据图像和测量程序处理得到的相机中心点在基准板坐标系下的坐标值,结合大直径零件转角测量原理,求得其转角值。为了验证测量结果的准确性,在相同环境下,测量系统在 $0^\circ \sim 20^\circ$ 范围内进行 5 次测量实验,以圆光栅测量的转角值作为理论值,比较本方法测量的转角值,得到的转角误差曲线如图 8 所示。

实验结果表明,实际转角与理论转角的最大误差为 $0.001\ 64^\circ$,即 $6''$ 以内。



(a) 1号相机中心点在基准板坐标系下的坐标曲线
(a) The coordinate curve of camera #1's center point in the reference plate coordinate system



(b) 2号相机中心点在基准板坐标系下的坐标曲线
(b) The coordinate curve of camera #2's center point in the reference plate coordinate system

图 7 相机中心在测量基准板坐标系下坐标轨迹
Fig. 7 The coordinate trajectory of the camera center in the reference plate coordinate system

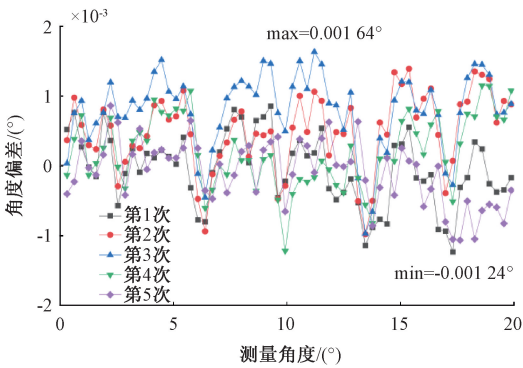


图 8 系统测量误差曲线

Fig. 8 Verification results of measurement system accuracy

为了验证测量系统的可靠性和稳定性,在相同测量条件下,测量系统在 $0^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 内重复进行了 15 次测量,每次记录 40 个测量角度值,部分测量角度记录值如表 7 所示。

对转角测量数据 $\{r_i\}$, 计算样本数据的算数平均值 R , 如式 (13) 所示。

$$R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i \tag{11}$$

计算样本数据的标准差, 如式 (12) 所示。

$$\hat{a} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (r_i - R)^2} \tag{12}$$

计算样本数据的算数平均值误差, 如式 (13) 所示。

$$S = \frac{\hat{a}}{\sqrt{n}} \tag{13}$$

表 7 大齿轮转角部分测量数据

Table 7 Partial measurement data of large gear angle

组别	角度测量值/(°)									
	测点 1	测点 5	测点 9	测点 13	测点 17	测点 21	测点 25	测点 29	测点 33	测点 37
1	0.321 4	1.602 8	2.883 1	4.807 8	6.084 5	7.368 9	9.296 4	11.864 6	13.144 5	16.675 0
2	0.321 1	1.601 5	2.882 1	4.806 4	6.085 4	7.367 2	9.294 7	11.860 6	13.139 5	16.670 3
3	0.320 8	1.602 3	2.882 5	4.807 4	6.086 0	7.366 8	9.294 0	11.861 5	13.141 5	16.673 0
4	0.320 1	1.603 0	2.883 7	4.808 2	6.086 7	7.368 1	9.295 9	11.863 0	13.142 2	16.673 6
5	0.320 4	1.603 1	2.883 5	4.808 4	6.086 9	7.367 5	9.295 9	11.864 2	13.144 2	16.676 4
6	0.319 8	1.601 9	2.881 7	4.807 5	6.087 3	7.365 9	9.293 3	11.861 1	13.142 2	16.673 7
7	0.319 1	1.600 6	2.880 2	4.804 9	6.084 6	7.363 3	9.291 5	11.859 7	13.140 5	16.671 3
8	0.319 3	1.601 5	2.881 5	4.806 3	6.087 5	7.365 4	9.293 7	11.862 5	13.143 8	16.672 1
9	0.319 6	1.602 0	2.881 8	4.807 2	6.089 4	7.367 1	9.295 2	11.863 4	13.144 6	16.674 1
10	0.319 1	1.600 7	2.880 8	4.804 7	6.086 8	7.365 0	9.293 1	11.861 0	13.144 0	16.672 1
11	0.319 0	1.601 0	2.882 6	4.806 8	6.089 3	7.366 2	9.293 9	11.861 8	13.145 3	16.672 0
12	0.319 6	1.601 3	2.882 3	4.805 6	6.088 3	7.365 2	9.293 0	11.861 1	13.143 3	16.671 5
13	0.319 4	1.601 4	2.881 6	4.803 9	6.087 7	7.364 2	9.290 6	11.858 0	13.142 0	16.671 6
14	0.319 1	1.601 0	2.882 3	4.805 1	6.087 8	7.365 5	9.291 5	11.860 7	13.143 8	16.670 3
15	0.320 0	1.601 4	2.882 2	4.805 3	6.088 1	7.365 7	9.291 6	11.860 9	13.143 3	16.671 4

计算算术平均值的测量数据极限误差,如式(14)所示。

$$\delta_{\lim(r)} = \pm 3S \quad (14)$$

对于直接测量的大齿轮转角数据,符合正态分布原则,对测量的每个角度分别计算其样本标准差 δ 、算术平均值的标准误差 S 、算术平均值的测量数据极限误差 $\delta_{\lim(r)}$,计算结果如图9所示。

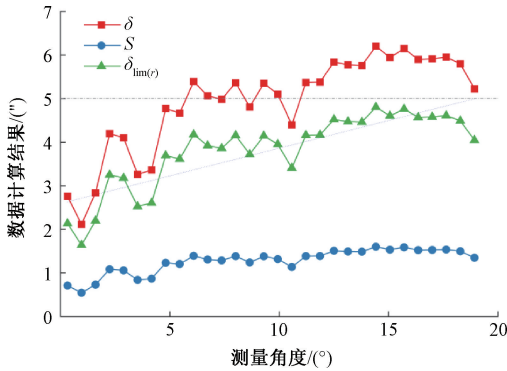


图9 角度测量数据计算结果

Fig. 9 Calculation results of angle measurement data

根据大齿轮测量误差结果可知,测量系统的最大重复精度在5"以内。测量结果的波动性表明,测量小角度时,系统的重复精度较高,随着测量角度增大,系统的重复精度略有变大趋势。这一现象可能源于测量系统在较大角度下的机械回差补偿机制与光电传感器的非线性响应特性共同作用所致。

4 结 论

根据大直径零件转角测量需求,本研究提出了一种基于双目视觉协同的扩展视场高精度转角测量方法。以测量基准板作为双目相机的唯一测量基准,依据二维四参数法坐标系转换算法,完成了测量基准板的高精度标定。搭建了双目视觉测量系统,并以大齿轮为测量对象,动态测量大齿轮转角。实验结果表明,在0°~20°转角范围内,测量转角的最大误差为0.00164°,测量精度为6",系统的测量重复精度为5",系统具有较高的测量精度和稳定性,适用于大直径零件的高精度转角测量。本系统提供的转角测量结果可作为大齿轮齿廓偏差测量的角度基准,与光栅测距仪组成齿廓偏差测量系统可完成大齿轮齿廓偏差精度评价,通过建立误差补偿模型,可将齿廓偏差的测量不确定度控制在GB/T 10095.1—2008标准规定的7级精度要求内。

参考文献

- [1] 马新宇,朱维斌,黄焱,等. 基于Kalman的动态角度测量方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(3): 119-127.
MA X Y, ZHU W B, HUANG Y, et al. Research on the dynamic angle measurement method based on Kalman[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(3): 119-127.
- [2] 任群亭,武自卫,荆惠连,等. 舰船目标RCS动态测量数据角度修正方法[J]. 微波学报, 2023, 39(1): 41-44, 50.
REN Q T, WU Z W, JING H L, et al. Angle correction method of ship target RCS dynamic measurement data[J]. Journal of Microwaves, 2023, 39(1): 41-44, 50.
- [3] 杨鹏,林虎,杨禹,等. 基于球盘的转台多自由度几何误差测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(11): 70-76.
YANG P, LIN H, YANG Y, et al. Geometric errors measurement of rotary table based on a ball plate artifact[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(11): 70-76.
- [4] 黄明,刘品宽,夏仰球,等. 自研角度计量转台在圆分度器件校准中的应用[J]. 光学精密工程, 2019, 27(1): 110-120.
HUANG M, LIU P K, XIA Y Q, et al. Calibration of circular division artifacts using a self-developed angle comparator[J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(1): 110-120.
- [5] XIA Y Q, WU Z H L, HUANG M, et al. An improved angle calibration method of a high-precision angle comparator[J]. Metrology and Measurement Systems: Metrologia i Systemy Pomiarowe, 2021, 28(1): 181-190.
- [6] 江兵,王子博,俞子豪,等. MCR-WPT系统接收线圈偏移角度的测量方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(9): 1-7.
JIANG B, WANG Z B, YU Z H, et al. Research on the measurement method of receive coil offset angle in MCR-WPT system[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(9): 1-7.
- [7] CHEN H F, JIANG B, LIN H, et al. Calibration method

- for angular positioning deviation of a high-precision rotary table based on the laser tracer multi-station measurement system[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(16): 3417.
- [8] ZHA J, LI L H, HAN L, et al. Four-station laser tracer-based geometric error measurement of rotary table[J]. *Measurement Science and Technology*, 2020, 31(6): 065008.
- [9] 俞翔栋, 于文峰, 柯瑞庭, 等. 基于复数神经网络的双视角视觉转角测量方法[J]. *电子测量技术*, 2024, 47(18): 9-14.
- YU X D, YU W F, KE R T, et al. Double-perspective visual angular measurement method based on complex neural networks[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2024, 47(18): 9-14.
- [10] 缪东言, 陈念年, 巫玲, 等. 可用于狭小空间的单目主动视觉姿态测量方法[J]. *现代制造工程*, 2024(1):110-117.
- MIAO D Y, CHEN N N, WU L, et al. Monocular active vision attitude measurement method can be applied in tight spaces [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2024(1):110-117.
- [11] 吴昆鹏, 王孝敏, 崔广礼, 等. 粗轧板坯自动转钢系统研究与应用[J]. *电子测量与仪器学报*, 2024, 38(1):114-123.
- WU K P, WANG X M, CUI G L, et al. Research and application of automatic steel transfer system for rough rolling billets[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2024, 38(1):114-123.
- [12] 凌明, 凌四营, 张衡, 等. 环境温度对双滚轮-导轨式渐开线测量仪的影响[J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(12): 104-111.
- LING M, LING S Y, ZHANG H, et al. Effect of ambient temperature on the double roller-guide involute measurement instrument[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(12):104-111.
- [13] 曾彪, 周元生, 王圣晖, 等. 基于通用三坐标测量机的面齿轮齿形误差测量[J]. *航空动力学报*, 2022, 37(4): 856-868.
- ZENG B, ZHOU Y SH, WANG SH H, et al. Tooth profile error measurement of face gear based on general coordinate measuring machine[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2022, 37(4):856-868.
- [14] 徐煦源, 涂君, 张旭, 等. 用于钢板厚度测量的常用电磁超声线圈特性研究[J]. *中国测试*, 2020, 46(4):143-147.
- XU X Y, TU J, ZHANG X, et al. Study on characteristic of the common electromagnetic acoustic coils for thickness measurement of steel plates[J]. *China Measurement & Test*, 2020, 46(4):143-147.
- [15] 胡文川, 裘祖荣, 张国雄. 大尺寸空间异面直线夹角的检测[J]. *光学 精密工程*, 2012, 20(7):1427-1433.
- HU W CH, QIU Z R, ZHANG G X. Measurement of large-scale space angle formed by non-uniplanar lines[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(7):1427-1433.
- [16] 吴常钺, 杨德华, 曹青青, 等. 基于视觉和最大长度序列的旋转角度测量系统[J]. *中国测试*, 2022, 48(1):122-128.
- WU CH CH, YANG D H, CAO Q Q, et al. Rotation angle measurement system based on visual and maximum length sequence[J]. *China Measurement & Test*, 2022, 48(1):122-128.
- [17] 倡明华, 王伟明, 张勇, 等. 基于光电伺服平台的动态角度测量方法研究[J]. *光电工程*, 2019, 46(10): 12-18.
- SI M H, WANG W M, ZHANG Y, et al. Research on dynamic angle measurement method based on electro-optical servo platform[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(10):12-18.
- [18] 纪贤瑞. 单相机面内几何量测量方法的研究[J]. *工业控制计算机*, 2014, 27(9):72-73.
- JI X R. Measurement method of amount of two-dimensional plane geometry by single camera [J]. *Industrial Control Computer*, 2014, 27(9):72-73.
- [19] 张玉杰, 谢兴龙. 基于机器视觉的汽车压装衬套偏转角度测量[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2024(9):118-122,127.
- ZHANG Y J, XIE X L. Machine vision-based measurement of deflection angle in automotive press-fit bushings [J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2024(9):118-122,127.
- [20] SHAN D R, ZHU ZH H, WANG X F, et al. Pose measurement method based on machine vision and novel directional target[J]. *Applied Sciences*. 2024, 14(5): 1698.
- [21] ZHANG F, WANG L, ZHANG J H. A visual-based angle

measurement method using the rotating spot images; Mathematic modeling and experiment validation[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(15): 16576-16583.

[22] LI W M, JIN J, LI X F, et al. Method of rotation angle measurement in machine vision based on calibration pattern with spot array [J]. Applied Optics, 2010, 49(6):1001-1006.

作者简介



杜坡,2012 年于辽宁工业大学获得学士学位,2015 年于沈阳工业大学获得硕士学位,现为沈阳工业大学博士研究生,主要研究方向为机器视觉检测。
E-mail:dupo@sut.edu.cn

Du Po received his B.Sc. degree from Liaoning University of Technology in 2012, and received his M.Sc. degree from

Shenyang University of Technology in 2015. He is currently a Ph. D. candidate at Shenyang University of Technology. His main research interest includes machine vision inspection.



段振云(通信作者),2002 年于大连理工大学获得博士学位,现为沈阳工业大学教授、博士生导师,主要研究方向为复杂曲面加工技术和机器视觉检测。
E-mail:13604045543@139.cm

Duan Zhenyun (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Dalian University of Technology in 2002. He is currently a professor and a Ph. D. degree advisor at Shenyang University of Technology. His main research interests include complex surface machining technology and machine vision inspection.