

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2513988

基于机器视觉的管路空间参数测量方法^{*}

田慧慧^{1,2}, 苏松波¹, 何博博¹, 王洪喜^{1,2}

(1. 西安工业大学机电工程学院 西安 710021; 2. 精密与超精密加工及测量国家地方联合工程研究中心 西安 710021)

摘要:管路的加工回弹严重影响了管路空间形态的加工精度,由管路空间形态误差产生的装配应力增加了管路发生故障的概率。为确保管路的无应力装配,需要对成型后的管路空间参数进行精确测量。受安装空间的限制,管路空间形态越来越复杂,测量难度也越来越大。针对复杂管路空间形态测量难度大、测量精度和测量效率低的问题,提出了一种基于单目视觉的管路空间参数测量方法。首先,通过拍摄的二维图像测得一个平面内管路的相关参数,基于测得的参数信息建立平面管路局部坐标系;然后,确定像素坐标系与平面管路局部坐标系的转换关系以及两个相邻平面管路局部坐标系之间的转换关系;最后,通过统一坐标系获得空间管路在全局坐标系下的参数数据并完成三维重建。设计并搭建了管路空间参数视觉测量实验装置,对两种不同类型的管路分别进行8次重复实验,长度重复测量精度为0.305 mm,弯曲角重复测量精度为0.033°,旋转角重复测量精度为0.263°,节点位置重复测量精度为0.325 mm。为了验证所提测量方法的准确性,与三坐标测量结果进行了对比,长度偏差在1 mm以内,角度偏差在0.5°以内。详细分析并讨论了所提测量方法各环节引入的误差。结果表明,该方法操作简单、测量精度高,能够满足管路的自动化检测要求,为实现管路数字化在线测量提供了新方案。

关键词: 管路测量; 机器视觉; 坐标转换; 三维重建

中图分类号: TH71 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

Pipe spatial parameter measurement method based on machine vision

Tian Huihui^{1,2}, Su Songbo¹, He Bobo¹, Wang Hongxi^{1,2}

(1. School of Mechatronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China; 2. National and Local Joint Engineering Research Center for Precision and Ultra-precision Machining and Measurement, Xi'an 710021, China)

Abstract: The springback during production causes spatial deformation in pipes, and the generated assembly stress increases the probability of pipe failure. Considering the safety of pipes, it is quite important to measure the geometric error between the design and the actual pipe before installation in order to prevent potential hazards caused by excessive assembly stresses. However, it is difficult to measure the spatially complex pipes caused by the installation space. In this paper, a monocular vision-based method is proposed for automatic, highly accurate and efficient measurement of spatially complex pipes. The mono-camera is designed to acquire the pipe 2D images, from which local coordinate systems are established based on the measured pipe parameters. Then importantly, transformation matrixes are established, including the transformation between the pixel coordinate system and the local coordinate system, as well as between adjacent local coordinate systems. Next, spatial parameters of pipes in the global coordinate system are obtained through coordinate unification, and 3D models of spatial pipes are reconstructed. Finally, the measurement system is developed and eight repeated experiments of two different types of pipes are performed to verify the precision of the proposed method. The results show that the repeatability deviations of length, bending angle, rotation angle and node coordinate are 0.305 mm, 0.033°, 0.263°, and 0.325 mm, respectively. Compared with the measurement results of the three-coordinate measuring machines, the deviations of length and angle are within 1 mm and 0.5°, respectively. A detailed analysis and discussion of measurement errors are conducted. This study provides a simple technique for automatic, highly accurate, online measurement of pipes.

Keywords: pipe measurement; machine vision; coordinate transformation; 3D reconstruction

收稿日期: 2025-04-29 Received Date: 2025-04-29

^{*} 基金项目: 新疆维吾尔自治区重大科技专项(2023A02010-2)项目资助

0 引言

管路系统广泛应用于航空、航天、汽车产品等领域,是冷却装置、动力装置和控制装置的重要附件,主要用于输送流体形式的冷却剂、燃油和液压油等^[1-3]。管路由数控弯管机经过进给、旋转和弯曲加工而成,由材料性能、管路壁厚和管径、弯曲角度等因素产生的加工回弹严重影响了管路空间形态的加工精度。管路工作环境常伴随强振以及温度、压力的剧烈变化,管路发生断裂、破裂等故障的情况时有发生,而管路空间形态误差产生的装配应力大大增加了管路发生故障的概率^[4-5]。工程上,为了确保管路的无应力装配,一般需要对成型后的管路空间参数进行精确测量和修正。

随着复杂机电产品向轻量化、小型化、结构一体化方向发展,管路的安装空间受到限制,管路空间形态越来越复杂,测量难度也越来越大。目前,管路空间形态的测量方法主要有靠模法、三坐标测量法、基于激光扫描技术的测量方法和基于机器视觉技术的测量方法^[6-8]。靠模法是将管路放置到相应的仿形模具中,通过人工观察判断加工是否合格。该测量方法只能对管路空间形态进行定性判断,不能进行定量测量,无法给数控弯管机提供加工参数补偿值。三坐标测量机通过控制测头在管路表面取点能够测量管路全部尺寸,精度可以达到微米级。但是这种测量方法对测量环境要求高,需要专门的测量室,逐点采集数据的方式导致测量效率低、测量难度大、测量范围有限,只能用于产品抽检。相较于三坐标测量方式,基于激光扫描技术的测量极大的提高了点云数据的采集效率,但是测量设备对光照环境敏感,点云数据易出现难以修正的错误,数据处理效率低,测量精度可以达到亚毫米级。

机器视觉技术近些年发展势头迅猛,已经广泛应用于检测、测量、定位、识别等领域^[9-13]。基于机器视觉技术的测量方法也成为管路测量的一个重要研究方向。赵玉芹等^[14]采用一个相机对贴有标记条的管路进行多角度拍摄,基于多幅图像进行三维物体重建实现了空间管路几何参数测量。然而管路在实际工程应用中一般不允许人为添加标记,去除标记条增加了工作量。Borkowski等^[15]采用单目视觉系统实现了大口径平面弯曲管路参数的测量,该方法对图像噪声具有较强的鲁棒性,可用于工业环境下管路参数的测量。姚旭^[16]基于双目立体视觉原理重建了管路中心线三维点云,通过处理中心线点云数据得到了管路空间参数。Zhang等^[17]建立了一个八目相机管路空间参数测量系统,基于立体匹配和拼接技术重建了管路的三维模型。Pai等^[18]基于立体视觉技术采用多目相机实现了三维空间管路的轮廓测量,测量方

法对管路在工作台上的摆放位置具有更大的柔性。多目视觉测量可以突破双目视觉测量存在的测量范围有限、管路存在自遮挡时图像不易采集的问题,但是由图像匹配和拼接引入的误差会影响最终的测量精度。Huang等^[19]将多目立体视觉管路测量系统的测量误差分为标定、匹配和重建这3类,建立了误差传递模型和系统误差模型,可用于分析各类误差对管路重建精度的影响。胡佳等^[20]提出一种基于自适应卷积和潜在表征的航天器管路位姿估计方法,位姿估计精度为 2.445 mm 和 1.074°,能够满足管路自动化装配中位姿估计的精度要求。

围绕管路空间形态的高精度自动化测量,本文提出一种新的基于机器视觉的管路空间参数测量方法。利用一个相机,采用背光照明方式,采集相邻两圆弧段所在平面的管路二维(2 dimensional, 2D)图像,根据建立的坐标转换关系,实现从管路二维图像边缘像素点到三维(3 dimensional, 3D)中心线点云的重建,进而完成管路空间形态的测量。该方法测量装置简单,数据处理简便,测量精度高,为实现管路空间参数的数字化在线测量提供了一种新思路。实验结果验证了本文所提测量方法的可行性。

1 管路测量系统

1.1 管路空间形态表达

管路的空间形态是指管路在三维空间内的走向,通常采用管路的 YBC 参数和管路节点坐标来表达,两种表达方式之间可以相互转换。管路的 YBC 参数是数控弯管机加工管路时的工艺参数:参数 Y 为管路加工时的进给量,即管路直线段的长度;参数 B 是加工时的旋转量,即相邻两圆弧段所在平面的夹角;参数 C 是加工时的弯曲角度,如图 1 所示。

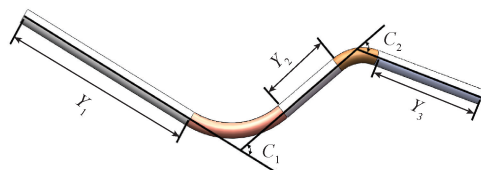


图1 管路 YBC 参数

Fig. 1 Pipe YBC parameters

这种表达方式利用 YBC 参数测量值与设计值的偏差量评价管路加工的合格性。管路的节点坐标是管路的设计参数,节点包括相邻两直线段中心线的交点以及管路两端端点,如图 2 所示。这种表达方式通过计算测量节点与设计节点的位置偏差判断管路是否合格。

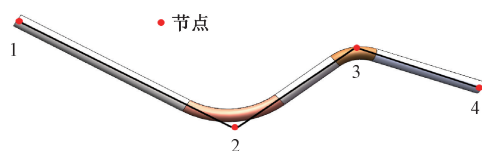


图 2 管路节点

Fig. 2 Pipe nodes

管路空间形态两种表达方式的参数数据都可由管路中心线的位置来得到,因此在测量时,只需要重建管路中心线点云的三维坐标,而不需要测量整个管路表面的三维点云数据。管路表面一般自然纹理少、且光滑的金属材料表面易反光,这种测量方法解决了管路表面无标记特征匹配的难点问题,简化了数据处理工作量,提高了测量效率。

1.2 管路测量系统及测量流程

管路测量系统包括硬件和软件两部分。硬件部分用于采集管路图像;软件部分负责处理、分析采集到的图像,输出测量结果。测量系统硬件安装原理如图 3 所示,主要包括由工业相机、镜头、光源组成的图像采集模块以及由回转工作台、支架、直线运动平台构成的机械运动模块。

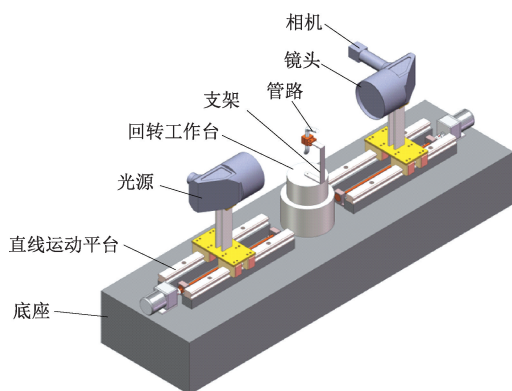


图 3 管路测量系统硬件安装示意图

Fig. 3 Sketch of the vision measurement system for pipes

镜头选用分辨率高、失真率低、景深宽的双远心镜头,这种镜头特别适合三维物体形状和尺寸的测量。镜头的视野范围要大于被测管路尺寸。工业相机选用灵敏度高、功耗低、信噪比高的面阵电荷耦合器件(charge coupled device, CCD)黑白相机。CCD 的分辨率根据镜头的视野范围及所要求的检测精度来确定。光源采用能够提供均匀、一致照明的平行光源。为了获取管路清晰的轮廓,测量系统采用背光照明方式。支架一端与回转工作台固连,另一端夹持管路相邻两弯曲段中间的直线段,并使直管段轴线与工作台回转轴线重合以保证可以采集到与光路垂直的包含一个圆弧段与两个直线段的平

面管路图像。直线运动平台用来调整 CCD 相机和被测管路的相对位置,使管路处于最佳物距,从而确保获取高质量的被测管路图像。

测量流程步骤为:

1) 采集平面管路图像。先将被夹持的管路直线段与下侧圆弧段所构成的平面管路置于相机景深范围内,随着工作台回转采集一组图像,然后将直线段与上侧圆弧段所构成的平面管路置于相机景深范围内,以同样的方式采集另一组图像。工作台光栅记录每幅图像所对应的回转角度。通过比较一组图像中管路的弯曲角度找到一幅与光路垂直的图像,该图像即为用于后续图像处理来获取管路空间参数的有效平面管路图像,下文简称平面管路图像。两组图像中的两幅平面

管路图像所对应的回转角度之差即为管路的旋转角参数 B 。

2) 提取边缘像素点列。亚像素边缘检测算法能够提取亚像素级的边缘,提高检测精度^[21-23]。采用 Zernike 矩方法检测平面管路图像中管路的亚像素边缘^[24],并将管路两侧边缘像素点列分别存放在两个数组中。

3) 提取中心线点列。根据管路两侧对应的边缘像素点,确定中心线点列。

4) 查找分界点。通过斜率和曲率双重筛选查找管路中心线点列直线段和圆弧段的精确分界点。

5) 计算平面管路参数。根据最小二乘直线拟合和圆弧拟合算法,计算每幅平面管路图像中直管段的长度 Y 、弯曲角度 C 、节点在像素坐标系中的坐标,至此测得了管路的 YBC 参数。

6) 建立平面管路局部坐标系。基于测得的平面管路参数信息建立局部坐标系,并确定局部坐标系与像素坐标系的转换关系。详细过程在 2.1 节阐述。

7) 统一局部坐标系。确定相邻两局部坐标系的转换关系,并将两局部坐标系统一到全局坐标系,获得管路节点的三维坐标,重建管路三维模型。详细过程在 2.2 节阐述。

2 管路空间参数测量

2.1 局部坐标系建立

管路在装夹时由于圆弧段的朝向不同,拍摄到的上下两幅平面管路图像各有两种姿态,上侧管路的两种姿态如图 4(a) 和 (b) 所示,下侧管路的两种姿态如图 4(c) 和 (d) 所示。针对管路的各种姿态建立局部坐标系,如图 4 所示。坐标系 \sum_o 为二维像素坐标系在三维空间的扩展, z 轴正方向满足右手法则。坐标系 \sum_{o_i} 为平面管路局部坐标系:两直线段中心线的交点即管路节点为

原点, x_i 轴过圆弧段的拟合圆心, z_i 轴方向与像素坐标系 z 轴方向一致, y_i 轴正方向满足右手法则。 $(x_o, y_o, 0)$ 为局部坐标系原点在像素坐标系 \sum_o 中的坐标。 k_1, k_2, k 分别为两直管段中心线和 x_i 轴在像素坐标系 \sum_o 中的斜率, 其中 $k = (k_2 - k_1) / (1 + k_1 k_2)$ 。 以上参数均可通过步骤 5) 直线拟合计算得到。

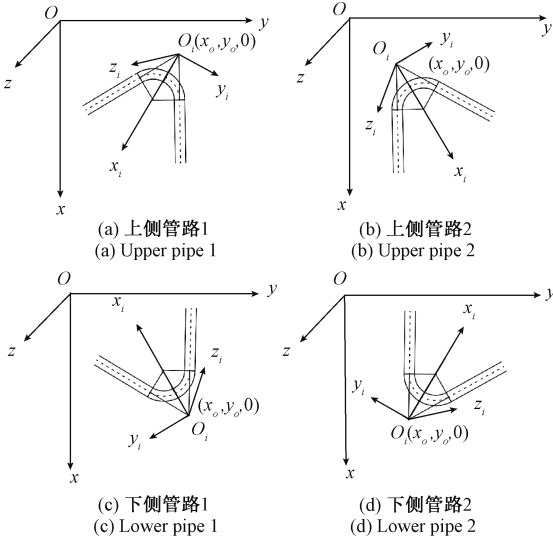


图4 管路局部坐标系

Fig. 4 Pipe local coordinate system

像素坐标系 \sum_o 绕其 z 轴逆时针旋转角度 α , 绕其 x, y 轴分别平移 $x_o - 1, y_o - 1$ 得到局部坐标系 \sum_{o_i} 。 则 \sum_{o_i} 相对于 \sum_o 的旋转变换矩阵为:

$$R(z, \alpha) = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中, 4 种管路姿态 (图 4(a) ~ (d)) 对应的角度 α 分别为 $360 + \arctan(k)$ 、 $\arctan(k)$ 、 $180 + \arctan(k)$ 和 $180 + \arctan(k)$ 。 \sum_{o_i} 相对于 \sum_o 的平移变换矩阵为:

$$T(x, x_o) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & x_o - 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$T(y, y_o) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y_o - 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

因此, 已知管路上任一点在像素坐标系中的坐标 ${}^oP = (x, y, z)$, 根据如下齐次变换式(4) 可求出该点在局

部坐标系中的坐标 ${}^{o_i}P = (x_i, y_i, z_i)$, 即:

$$\begin{bmatrix} {}^{o_i}P \\ 1 \end{bmatrix} = R^{-1}(z, \alpha) T^{-1}(x, x_o) T^{-1}(y, y_o) \begin{bmatrix} {}^oP \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

2.2 局部坐标系统一

为了表达管路的三维空间形态, 将相邻两个局部坐标系统一到一个坐标系。 根据拍摄平面管路图像时管路呈现的不同姿态, 含有两个弯曲段的空间管路有 4 种形态, 如图 5 所示。

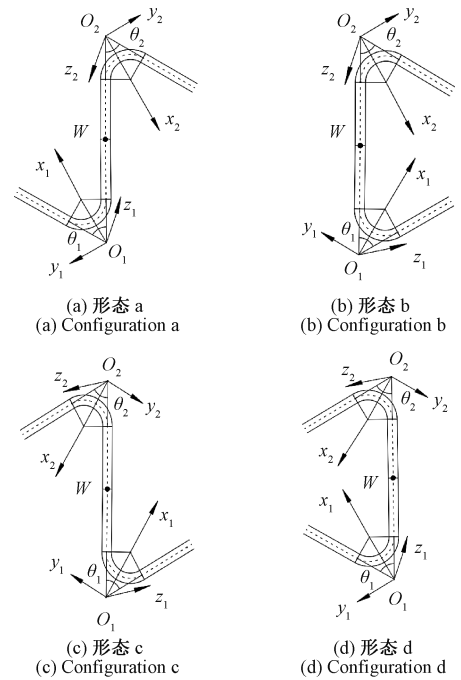


图5 管路空间形态

Fig. 5 Pipe spatial configuration

\sum_{o_1} 为下侧管路的局部坐标系, 两直线段中心线的夹角 $\theta_1 = 180 - C_1$, \sum_{o_2} 为上侧管路的局部坐标系, 两直线段中心线的夹角 $\theta_2 = 180 - C_2$, 弯曲角度 C_1, C_2 由步骤 5) 计算得到。 上侧管路相对于下侧管路的旋转角 B 由步骤 1) 获得。 上下两幅平面管路图像包含的共同特征点 W 为夹具边缘与中间直管段中心线的交点, W 在坐标系 \sum_{o_1}, \sum_{o_2} 中的坐标分别为 $(x_{w1}, y_{w1}, 0), (x_{w2}, y_{w2}, 0)$, 由式(4) 计算得到, W 到 \sum_{o_2} 坐标原点的距离 $d = \sqrt{x_{w2}^2 + y_{w2}^2}$ 。 形态 a、d 中 \sum_{o_2} 的坐标原点在 \sum_{o_1} 中的坐标 1P 为 $(x_{w1} + d\cos(\theta_1/2), y_{w1} - d\sin(\theta_1/2), 0)$, 形态 b、c 中 \sum_{o_2} 的坐标原点在 \sum_{o_1} 中的坐标 1P 为 $(x_{w1} + d\cos(\theta_1/2), y_{w1} + d\sin(\theta_1/2), 0)$ 。

坐标系 \sum_{o_2} 相对于坐标系 \sum_{o_1} 的转换矩阵包括:

绕 z_1 轴的旋转矩阵 ${}^{o_1}_2\mathbf{R}$ 、绕 x_1 轴和 y_1 轴的平移矩阵 ${}^{o_1}_2\mathbf{T}$ 、绕矢量 $\vec{O_1W}$ 的旋转矩阵 \mathbf{R} 。

旋转矩阵 ${}^{o_1}_2\mathbf{R}$ 为:

$${}^{o_1}_2\mathbf{R} = \begin{pmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

其中, γ 在管路形态 a~d 中的取值分别为 $180 - \theta_1/2 + \theta_2/2$ 、 $180 + \theta_1/2 + \theta_2/2$ 、 $180 + \theta_1/2 - \theta_2/2$ 和

$180 - \theta_1/2 - \theta_2/2$ 。

平移矩阵 ${}^{o_1}_2\mathbf{T}$ 为:

$${}^{o_1}_2\mathbf{T} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & {}^1P(1) \\ 0 & 1 & 0 & {}^1P(2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

矢量 $\vec{O_1W}$ 在坐标系 \sum_{o_1} 中的归一化坐标 1P_w 为 $(x_{w1}/\sqrt{x_{w1}^2 + y_{w1}^2}, y_{w1}/\sqrt{x_{w1}^2 + y_{w1}^2}, 0)$, 则旋转矩阵 \mathbf{R} 为:

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} \left(\frac{x_{w1}}{\sqrt{x_{w1}^2 + y_{w1}^2}}\right)^2 (1 - \cos(B)) + \cos B & \frac{x_{w1}}{\sqrt{x_{w1}^2 + y_{w1}^2}} \frac{y_{w1}}{\sqrt{x_{w1}^2 + y_{w1}^2}} (1 - \cos(B)) & \frac{y_{w1}}{\sqrt{x_{w1}^2 + y_{w1}^2}} \sin B & 0 \\ \frac{x_{w1}}{\sqrt{x_{w1}^2 + y_{w1}^2}} \frac{y_{w1}}{\sqrt{x_{w1}^2 + y_{w1}^2}} (1 - \cos(B)) & \left(\frac{y_{w1}}{\sqrt{x_{w1}^2 + y_{w1}^2}}\right)^2 (1 - \cos(B)) + \cos B & -\frac{x_{w1}}{\sqrt{x_{w1}^2 + y_{w1}^2}} \sin B & 0 \\ -\frac{y_{w1}}{\sqrt{x_{w1}^2 + y_{w1}^2}} \sin B & \frac{x_{w1}}{\sqrt{x_{w1}^2 + y_{w1}^2}} \sin B & \cos B & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

管路中任一点 P_i 在坐标系 \sum_{o_2} 中的坐标 ${}^2P_i = (x_{o2}, y_{o2}, z_{o2})$, 则 P_i 在坐标系 \sum_{o_1} 中的坐标 ${}^1P_i = (x_{o1}, y_{o1}, z_{o1})$ 可由齐次变换求得, 即:

$$\begin{bmatrix} {}^1P_i \\ 1 \end{bmatrix} = {}^{o_1}_2\mathbf{R} {}^{o_1}_2\mathbf{T} \begin{bmatrix} {}^2P_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

至此, 将上下两个平面管路局部坐标系统一到坐标系 \sum_{o_1} , 此时 \sum_{o_1} 成为全局坐标系。从平面管路图像可以读出管路节点在像素坐标系中的坐标, 根据式(4)确定节点在局部坐标系中的坐标, 然后根据式(8)计算管路所有节点在 \sum_{o_1} 中的三维坐标。从而实现管路空间形态的节点坐标表达。值得注意的是: 测量系统测得的管路节点坐标定义在坐标系 \sum_{o_1} 下, 管路节点的设计坐标定义在设定的世界坐标系下, 评价管路合格性时在不同坐标系间需要进行坐标转换, 配准统一到设计坐标系后再计算误差。

3 管路空间参数测量实验

本文搭建的管路空间参数测量实验装置如图 6 所示。CCD 面阵相机的最高分辨率为 6576×4384 , 像元尺寸为 $5.5 \mu\text{m} \times 5.5 \mu\text{m}$, 标定后的像素当量为 $29.4 \mu\text{m}$ 。镜头选用的是畸变 $<0.05\%$ 、放大倍率为 0.187、视场为 $192.5 \text{ mm} \times 128.3 \text{ mm}$ 的双远心镜头, 能够有效降低成像过程中的透视误差。成像系统采用发光二极管 (light

emitting diode, LED) 平行光源进行背光照明。管路夹具使用三爪卡盘代替。

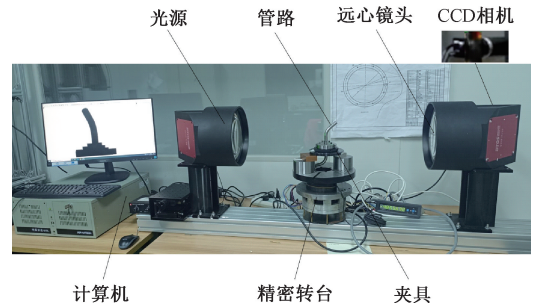


图 6 实验装置

Fig. 6 Experimental system configuration

测量对象选用管径分别为 15 和 6 mm 的液压管路, 管路的待测 YBC 参数及节点如图 7、8 所示。管路 II 只测虚线框内含有两个弯曲段部分的管路参数。

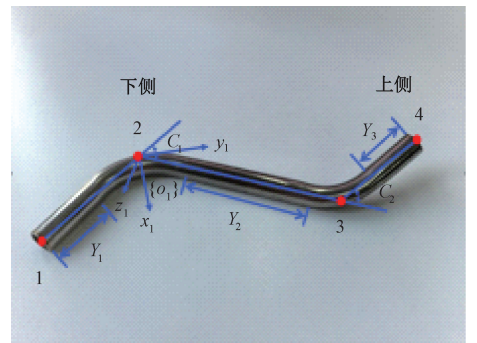


图 7 待测管路 I

Fig. 7 Tested pipe I

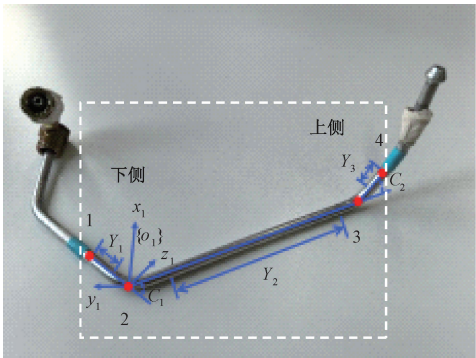


图 8 待测管路 II
Fig. 8 Tested pipe II

测量时,夹具夹持管路中间直管段,直管段轴线与回转轴线重合,调整待测管路置于最佳物距和镜头景深范围内,按步骤 1)所述采集图像。回转工作台每旋转 1° 采集一幅图像,管路上下侧各拍摄一组 10 幅图像。每根管路重复测量 8 次,其中一次图像的筛选过程如图 9 所示,根据弯曲角度的极值选出的与光路垂直的平面管路图像如图 10 所示。

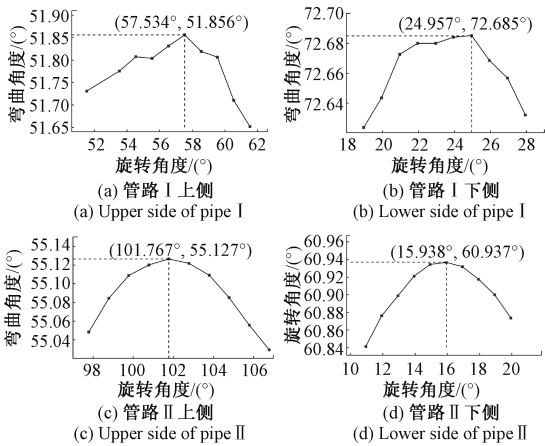


图 9 管路图像筛选
Fig. 9 Pipe image acquisition

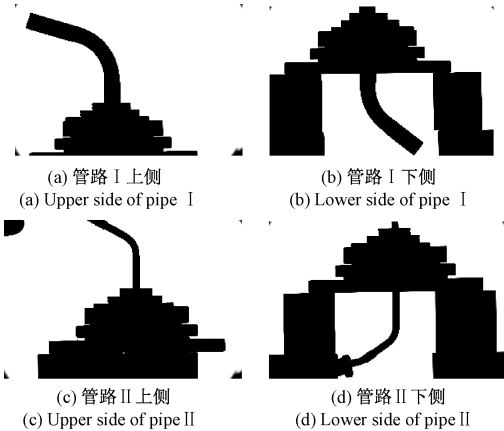


图 10 管路图像
Fig. 10 Pipe image

管路的 YBC 参数测量结果如表 1、2 所示。综合表 1 和 2 数据可见,直管段长度 Y 的重复测量精度为 0.305 mm ,弯曲角度 C 的重复测量精度为 0.033° ,旋转角 B 的重复测量精度为 0.263° 。

表 1 管路 I YBC 参数
Table 1 YBC parameters of pipe I

| 次数 | Y_1/mm | Y_2/mm | Y_3/mm | $C_1/(^{\circ})$ | $C_2/(^{\circ})$ | $B/(^{\circ})$ |
|-----|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|----------------|
| 1 | 37.497 | 73.497 | 30.327 | 72.685 | 51.856 | 32.577 |
| 2 | 37.363 | 73.421 | 30.258 | 72.652 | 51.826 | 32.110 |
| 3 | 37.071 | 73.160 | 30.925 | 72.670 | 51.859 | 32.698 |
| 4 | 37.336 | 73.540 | 30.999 | 72.666 | 51.837 | 32.262 |
| 5 | 37.321 | 73.155 | 30.966 | 72.652 | 51.862 | 32.447 |
| 6 | 37.239 | 73.479 | 30.832 | 72.673 | 51.830 | 32.466 |
| 7 | 37.425 | 73.019 | 30.902 | 72.677 | 51.850 | 32.478 |
| 8 | 37.906 | 73.052 | 30.667 | 72.688 | 51.864 | 32.138 |
| 均值 | 37.395 | 73.290 | 30.735 | 72.670 | 51.848 | 32.397 |
| 标准差 | 0.293 | 0.183 | 0.260 | 0.013 | 0.013 | 0.206 |

表 2 管路 II YBC 参数
Table 2 YBC parameters of pipe II

| 次数 | Y_1/mm | Y_2/mm | Y_3/mm | $C_1/(^{\circ})$ | $C_2/(^{\circ})$ | $B/(^{\circ})$ |
|-----|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|----------------|
| 1 | 16.820 | 104.920 | 13.863 | 60.903 | 55.101 | 85.482 |
| 2 | 16.929 | 104.919 | 13.910 | 60.927 | 55.101 | 85.436 |
| 3 | 16.061 | 104.503 | 13.420 | 60.954 | 55.133 | 85.892 |
| 4 | 16.157 | 104.445 | 13.054 | 60.996 | 55.139 | 85.693 |
| 5 | 16.373 | 104.709 | 13.134 | 60.995 | 55.144 | 85.190 |
| 6 | 16.869 | 104.815 | 13.522 | 60.937 | 55.127 | 85.830 |
| 7 | 16.724 | 104.971 | 13.388 | 60.978 | 55.142 | 85.432 |
| 8 | 16.341 | 104.723 | 13.621 | 60.935 | 55.106 | 85.143 |
| 均值 | 16.534 | 104.751 | 13.489 | 60.953 | 55.124 | 85.512 |
| 标准差 | 0.305 | 0.185 | 0.300 | 0.033 | 0.015 | 0.263 |

管路的节点测量结果如表 3、4 所示。坐标列显示的是各节点在坐标系 $\sum o_i$ 中的像素坐标,间距列指的是同一节点每次测量的坐标值与第 1 次测量坐标值间的距离。由表 3 和 4 数据可知,节点位置重复测量精度为 0.325 mm 。管路实物图及重建后的管路图像如图 11、12 所示。

由实验结果可见,本文所提出的测量方法可以实现管路空间参数的测量,测量精度能够满足工程应用。做实验时采用三爪卡盘代替专用夹具装夹管路,管路轴线与转台轴线的同轴度误差导致管路平面无法与光路完全垂直,从而影响了最终的测量精度。采集图像时,回转

表 3 管路 I 节点测量
Table 3 Nodes measurement of pipe I

| 次数 | 节点 1 | | 节点 2 | | 节点 3 | | 节点 4 | |
|-----|------------------------|-------|---------|-------|-------------------------|-------|-------------------------------|-------|
| | 坐标/px | 间距/mm | 坐标/px | 间距/mm | 坐标/px | 间距/mm | 坐标/px | 间距/mm |
| 1 | (824.391,-1 650.280,0) | | (0,0,0) | | (1 918.190,4 091.800,0) | | (412.618,5 617.420,1 291.510) | |
| 2 | (833.312,-1 660.010,0) | 0.388 | (0,0,0) | 0 | (1 912.260,4 091.710,0) | 0.174 | (402.089,5 614.040,1 277.040) | 0.350 |
| 3 | (831.753,-1 658.560,0) | 0.326 | (0,0,0) | 0 | (1 918.010,4 091.610,0) | 0.008 | (405.473,5 617.480,1 294.920) | 0.233 |
| 4 | (830.876,-1 658.550,0) | 0.309 | (0,0,0) | 0 | (1 918.330,4 091.420,0) | 0.012 | (406.890,5 619.520,1 288.340) | 0.202 |
| 5 | (824.665,-1 662.150,0) | 0.349 | (0,0,0) | 0 | (1 934.660,4 080.140,0) | 0.594 | (419.405,5 609.580,1 287.070) | 0.332 |
| 6 | (824.544,-1 658.650,0) | 0.246 | (0,0,0) | 0 | (1 933.000,4 086.890,0) | 0.459 | (415.105,5 612.870,1 288.740) | 0.173 |
| 7 | (812.289,-1 659.000,0) | 0.439 | (0,0,0) | 0 | (1 916.420,4 091.870,0) | 0.052 | (402.745,5 621.220,1 285.440) | 0.359 |
| 8 | (830.227,-1 659.170,0) | 0.313 | (0,0,0) | 0 | (1 930.260,4 064.210,0) | 0.886 | (405.746,5 604.050,1 277.420) | 0.255 |
| 均值 | | 0.339 | | 0 | | 0.312 | | 0.272 |
| 标准差 | | 0.071 | | 0 | | 0.325 | | 0.069 |

表 4 管路 II 节点测量
Table 4 Nodes measurement of pipe II

| 次数 | 节点 1 | | 节点 2 | | 节点 3 | | 节点 4 | |
|-----|---------------------|-------|---------|-------|--------------------------|-------|--------------------------------|-------|
| | 坐标/px | 间距/mm | 坐标/px | 间距/mm | 坐标/px | 间距/mm | 坐标/px | 间距/mm |
| 1 | (353.969,688.422,0) | | (0,0,0) | | (2 027.180,-3 800.500,0) | | (2 303.500,-4 171.050,816.716) | |
| 2 | (353.887,688.293,0) | 0.004 | (0,0,0) | 0 | (2 029.670,-3 801.120,0) | 0.075 | (2 302.810,-4 173.260,821.836) | 0.165 |
| 3 | (353.972,688.342,0) | 0.002 | (0,0,0) | 0 | (2 029.360,-3 802.300,0) | 0.083 | (2 297.310,-4 177.720,817.669) | 0.269 |
| 4 | (354.556,689.609,0) | 0.039 | (0,0,0) | 0 | (2 028.680,-3 801.530,0) | 0.054 | (2 303.550,-4 170.410,817.910) | 0.040 |
| 5 | (354.842,689.818,0) | 0.048 | (0,0,0) | 0 | (2 028.110,-3 801.070,0) | 0.032 | (2 296.710,-4 173.520,818.303) | 0.218 |
| 6 | (354.581,689.512,0) | 0.037 | (0,0,0) | 0 | (2 027.670,-3 802.910,0) | 0.072 | (2 294.340,-4 178.180,817.988) | 0.343 |
| 7 | (353.637,688.178,0) | 0.012 | (0,0,0) | 0 | (2 028.250,-3 802.450,0) | 0.065 | (2 301.750,-4 176.240,819.418) | 0.180 |
| 8 | (351.690,688.929,0) | 0.069 | (0,0,0) | 0 | (2 034.690,-3 799.290,0) | 0.224 | (2 308.710,-4 173.780,819.610) | 0.193 |
| 均值 | | 0.030 | | 0 | | 0.086 | | 0.201 |
| 标准差 | | 0.025 | | 0 | | 0.071 | | 0.112 |

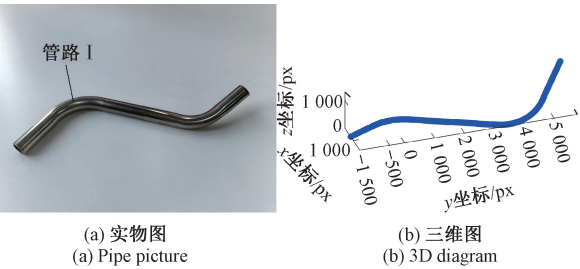


图 11 管路 I 三维图
Fig. 11 3D diagram of pipe I

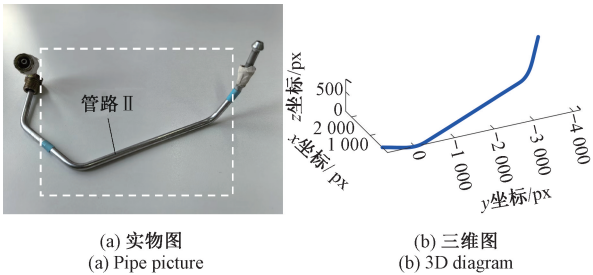


图 12 管路 II 三维图
Fig. 12 3D diagram of pipe II

工作台的步长选择也会影响管路测量精度,过大的步长,容易导致采集不到管路平面与光路垂直的图像,降低测量精度,步长太小影响测量效率。但由图 9 可见,工作台旋转步长对弯曲角度的影响不大,两者相差两个数量级,工程应用时可根据测量精度要求选择合适的采集步长。

为了验证所提测量方法的准确性,使用 FLY1086 移动桥式三坐标测量机对管路 I 进行了测量。该测量机探测误差为 2.8 μm。分别采集管路 I 对称的两条轮廓母线上的 80 个点,根据 1.2 节测量流程步骤 3)~5) 进行数据处理,得到管路的 YBC 参数。测量过程及采集到的轮廓线如图 13 和 14 所示。测量结果如表 5 所示。由此可见,本文所提测量方法与三坐标测量的长度偏差在 1 mm 以内,角度偏差在 0.5° 以内,满足管路的自动化检测要求。

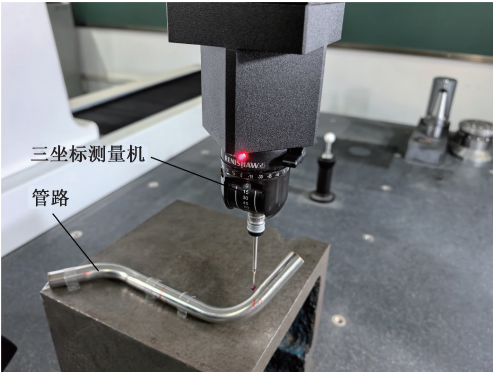


图 13 三坐标测量管路 I 参数

Fig. 13 Measurement of pipe I using the coordinate measuring machine

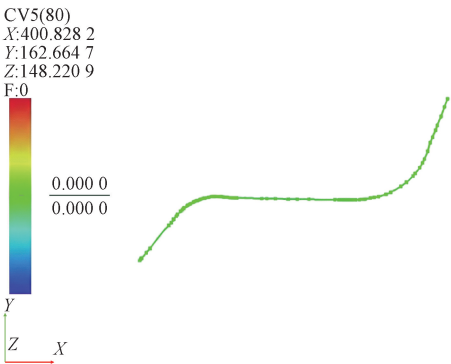


图 14 管路 I 轮廓线

Fig. 14 Contour line of pipe I

表 5 管路 I YBC 参数测量结果比较

Table 5 Comparison of measurement results for pipe I YBC parameters

| 测量方法 | Y_1/mm | Y_2/mm | Y_3/mm | $C_1/(\text{^\circ})$ | $C_2/(\text{^\circ})$ | $B/(\text{^\circ})$ |
|------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|
| 本文均值 | 37.395 | 73.290 | 30.735 | 72.670 | 51.848 | 32.397 |
| 三坐标 | 38.033 | 73.946 | 30.674 | 72.543 | 51.755 | 32.035 |
| 偏差 | 0.638 | 0.656 | 0.061 | 0.127 | 0.093 | 0.362 |

4 讨 论

1.2 节测量流程步骤 1) 中平面管路图像的采集方法是影响测量效率和测量精度的重要因素。通过以下方法可以快速自动的将管路置于镜头景深范围内。如图 15 所示, y 轴为工作台的回转轴, x 轴与光路平行。 $p(0, y_0, z_0)$ 为管路中心线上的一点, C_0 为管路弯曲角度的设计值, $p'(0, y, z)$ 为管路绕 y 轴旋转角度 β 后 p 点在 $yo z$ 平面的投影坐标。

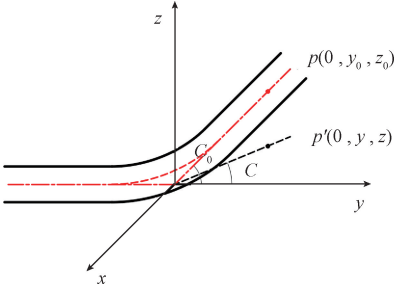


图 15 管路投影变换

Fig. 15 Pipe projection transformation

绕 y 轴的旋转矩阵为:

$$R(y, \beta) = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (9)$$

则 p 点绕 y 轴旋转角度 β 后的坐标为:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = R(y, \beta) \begin{pmatrix} 0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} \quad (10)$$

可得 $y = y_0, z = z_0 \cdot \cos \beta$ 。又因为:

$$\tan C = \frac{z}{y} = \frac{z_0 \cdot \cos \beta}{y_0} = \tan C_0 \cdot \cos \beta \quad (11)$$

由此可得:

$$\beta = \arccos\left(\frac{\tan C}{\tan C_0}\right) \quad (12)$$

由式 (12) 可知根据计算出的管路初始位置处的弯曲角度,结合弯曲角度的设计值,可以计算出将管路平面调整到与光路垂直时工作台需要回转的角度。如此可以实现管路与相机的高效对准。如需进一步提高测量精度,如实验部分所述让工作台在相机景深范围内回转一定角度范围拍摄一组照片,通过比较该组图像中管路的弯曲角度可以找到与光路精确垂直的管路图像。

管路装夹时中间直管段的中心线和工作台回转轴线的同轴度误差是影响图像采集精度的关键,设计恰当的管路夹具是保障本文测量方法能够高效高精度应用的基础。图像处理时直管段与弯管段分界点的精确查找是影响管路 YBC 参数测量精度的重要因素,探索高精度的分界点查找算法有利于提高测量精度。局部坐标系一时

用到的共同特征点 W 实际上不是管路同一位置的投影,通过夹具设计可以保证两幅图像中的特征点尽量重合,从而减小坐标转换误差。整个测量过程引入的随机误差通过上述实验结果的标准差得以验证,还需进一步对各环节引入的系统误差进行深入的理论和实验验证。

5 结 论

本文提出了一种基于单目相机的管路空间参数测量方法。所提方法使用一个相机结合工作台回转采集平面管路图像,在平面管路图像上建立局部坐标系,结合图像处理数据确定局部坐标系间的转换关系,进而通过坐标系统一得到管路的形态。实验结果表明该方法操作简单、测量精度较高,能够满足工程应用要求,为实现管路数字化在线测量提供了新思路。

该测量方法通过连续加持管路直管段并拍摄相应上下侧平面管路图像,结合图像处理及坐标转换可以测量含有多个圆弧段的复杂空间管路参数。实现管路自动化快速装夹,分析图像采集、图像处理及坐标转换引入的误差,完成测量误差补偿是下一步的研究重点。

参考文献

- [1] JIA H, LIU SH L, LIU J H, et al. Pipe pose estimation based on machine vision[J]. *Measurement*, 2021, 182: 109585.
- [2] 张天,唐承统,刘检华. 基于多目视觉的弯管空间参数测量方法[J]. *仪器仪表学报*, 2013, 34(2): 260-267.
ZHANG T, TANG CH T, LIU J H. Spatial parameter measurement method for bent pipes based on multi-vision[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(2): 260-267.
- [3] 庄金雷,李瑞峰,曹维清,等. 3 维细长管路测量系统扫描路径自主规划[J]. *机器人*, 2019, 41(5): 628-636.
ZHUANG J L, LI R F, CAO CH Q, et al. Autonomous scanning path planning for 3D slender pipeline measurement system[J]. *Robot*, 2019, 41(5): 628-636.
- [4] 彭刚,于乃江,贾文强. 航空发动机外部管路的结构与动力学特征参数分析[J]. *航空发动机*, 2017, 43(5): 1-6.
PENG G, YU N J, JIA W Q. Structural and dynamic characteristic parameter analysis of aero-engine external pipelines[J]. *Aeroengine*, 2017, 43(5): 1-6.
- [5] 田中礼,王少波,曹阳,等. 航空发动机燃油分管断裂故障分析[J]. *沈阳航空航天大学学报*, 2022, 39(2): 14-20.
TIAN ZH L, WANG SH B, CAO Y, et al. Fracture failure analysis of aero-engine fuel branch pipes[J]. *Journal of Shenyang Aerospace University*, 2022, 39(2): 14-20.
- [6] KAWASHIMA K, KANAI S, DATE H. As-built modeling of piping system from terrestrial laser-scanned point clouds using normal-based region growing[J]. *Journal of Computational Design and Engineering*, 2014, 1(1): 13-26.
- [7] VELDHUIS H, VOSSelman G. The 3D reconstruction of straight and curved pipes using digital line photogrammetry[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 1998, 53(1): 6-16.
- [8] BÖSEMANN W. The optical tube measurement system OLM photogrammetric methods used for industrial automation and process control[J]. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1996, 31: 55-58.
- [9] LI Y F, XIN ZH B, ZHANG H J, et al. Machine vision-based tree-ring image analysis for the measurement of ring width in ancient larch stem disks[J]. *Measurement*, 2025, 244: 116465.
- [10] SRISTI S, NOBORU N. Smart vineyard row navigation: A machine vision approach leveraging YOLOv8[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2025, 229: 109839.
- [11] POYRAZ A G, KACMAZ M, GURKAN H, et al. Sub-Pixel counting based diameter measurement algorithm for industrial machine vision[J]. *Measurement*, 2024, 225: 114063.
- [12] FLORES-FUENTES W, TRUJILLO-HERNANDEZ G, ALBA-CORPUS I Y, et al. 3D spatial measurement for model reconstruction: A review[J]. *Measurement*, 2023, 207: 112321.
- [13] 支珊,张宇航,廖宇杰,等. 基于机器视觉的飞机连接件识别与分类算法[J]. *仪器仪表学报*, 2025, 46(9): 102-109.
ZHI SH, ZHANG Y H, LIAO Y J, et al. Machine vision-based algorithm for recognition and classification of aircraft connecting components[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2025, 46(9): 102-109.
- [14] 赵玉芹,张丽艳. 基于摄影测量的管路参数确定[J]. *机械制造与自动化*, 2008(6): 114-117.
ZHAO Y Q, ZHANG L Y. Determination of pipeline parameters based on photogrammetry[J]. *Machine Building & Automation*, 2008(6): 114-117.
- [15] BORKOWSKI K, JANECKI D, ZWIERZCHOWSKI J, et al. Geometric parameter identification of large bent pipes using a single-view vision system[J]. *Sensors*, 2025, 25(17): 5420.
- [16] 姚旭. 基于双目视觉的弯管测量技术研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2021.
YAO X. Research on bent pipe measurement technology based on binocular vision[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2021.

[17] ZHANG T, LIU J H, LIU SH L, et al. A 3D reconstruction method for pipeline inspection based on multi-vision[J]. Measurement, 2017, 98: 35-48.

[18] PAI W Y, LIANG J, ZHANG M K, et al. An advanced multi-camera system for automatic, high-precision and efficient tube profile measurement[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2022, 154: 106890.

[19] HUANG H, LIU J H, LIU SH L, et al. Error analysis of a stereo-vision-based tube measurement system [J]. Measurement, 2020, 157: 107659.

[20] 胡佳,刘检华,刘少丽,等. 基于自适应卷积和潜在表征的航天器管路位姿估计方法[J]. 机械工程学报, 2025, 61(14): 150-165.

HU J, LIU J H, LIU SH L, et al. Pose estimation method for spacecraft pipe based on adaptive convolution and latent representation [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2025, 61(14): 150-165.

[21] HE Q, JI ZH W, YU P, et al. A unified and accurate subpixel detector of control points for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 5020712.

[22] LU X Q, YANG J W. Image analysis with logarithmic Zernike moments[J]. Digital Signal Processing, 2023, 133: 103829.

[23] MEI ZH H, SHEN T, ZHANG H, et al. A subpixel visual measurement method for shaft manufacturing process[J]. Measurement, 2025, 256: 118349.

[24] CHEN W M, WANG H X, TIAN H H, et al. The global pixel size calibration method for a dual telecentric imaging system based on a sphere array[J]. Measurement, 2025, 254: 117919.

作者简介



田慧慧,2008 年于河南科技学院获得学士学位,2014 年于西安电子科技大学获得博士学位,现为西安工业大学副教授,主要研究方向为精密测量理论、精密仪器及机械、视觉测量。

E-mail:yezifairy@163.com

Tian Huihui received her B. Sc. degree from Henan Institute of Science and Technology in 2008, and her Ph. D. degree from Xidian University in 2014. She is currently an associate professor at Xi'an Technological University. Her main research interests include precision measurement theory, precision instruments and machinery, and vision measurement.



王洪喜(通信作者),1994 年于大庆石油学院获得学士学位,1997 年于西安石油学院获得硕士学位,2006 年于西安电子科技大学获得博士学位,现为西安工业大学教授,主要研究方向为精密测量理论与仪器设计、柔性机构。

E-mail:wanghongxi@xatu.edu.cn

Wang Hongxi (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Daqing Petroleum Institute in 1994, his M. Sc. degree from Xi'an Shiyou Institute in 1997, and his Ph. D. degree from Xidian University in 2006. He is currently a professor at Xi'an Technological University. His main research interests include precision measurement theory and instrument design, and compliant mechanism.