

融合多组双目视觉系统的管道尺寸测量技术研究^{*}

章家威 李昊冉 罗天慧 张烈山

(浙江理工大学 杭州 310018)

摘要: 针对工业管道尺寸偏差的在线测量问题,本文提出一种融合多组双目视觉系统的管径测量方法。该方法通过使用多组双目摄像机对管道测量截面上投影的多个激光标记进行图像采集、三维重建和坐标融合,通过椭圆拟合得到外管径、椭圆度等尺寸参数。该方法通过仿射距离变换算法实现特征点的自动匹配,并采用具有法向量约束的优化点云配准算法保证坐标融合的准确性。为了验证该方法的可行性,搭建多组双目视觉实验系统,对3种公称外径分别为285、299和325 mm的管道进行了外尺寸测量实验。实验结果表明,系统测量的相对误差在 $\pm 0.570\%$ 范围内,最大重复性标准差为0.551 mm,最长测量耗时为1.5 s。该方法和系统基本符合工业管道在线检测需求,具有良好的应用前景。

关键词: 大型管道;三维重建;仿射距离变换;特征点匹配;点云配准

中图分类号: TH89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4030

Research on the external size measurement for industrial pipes
using multi-group binocular vision system

Zhang Jiawei Li Haoran Luo Tianhui Zhang Lieshan

(Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: For the online measurement of size deviation in industrial pipelines, this paper proposes a pipe diameter measurement method integrated with multigroup biocular visual system. This method uses image acquisition, 3 D reconstruction and coordinate fusion through multiple laser markers projected on the pipeline measurement section, obtaining dimensional parameters such as outer tube diameter and ellipticity by ellipse fitting. This method realizes the automatic matching of feature points through the affine distance transformation algorithm, and adopts the optimized point cloud registration algorithm with normal vector constraints to ensure the accuracy of coordinate fusion. To verify the feasibility of this method, a multi-group binocular visual experiment system was constructed on three pipelines with nominal external diameter of 285, 299 and 325 mm. The experimental results show that the relative error of the systematic measurement is in the $\pm 0.570\%$ range, with the maximum standard deviation of repeatability of 0.551 mm and the longest measurement time consumption of 1.5 s. The method and system basically meet the needs of industrial pipeline online detection, and have good application prospects.

Keywords: large pipes; 3D reconstruction; affine distance transform; feature points matching; point cloud registration

0 引言

大型管道被广泛应用于建筑、化工、石油和天然气等领域,用于传输流体介质^[1-3]。随着生产率的提高,用户和生产厂家都对管道产品的质量提出了更高的要求。管道尺寸参数的在线检测可以提供早期生产阶段的生产状态反馈,从而帮助制造商降低生产成本,提高生产合格率。管道的直径和周长是管道的重要质量参数,对保证管道施工的进

度和质量起着关键作用。在管径超出规格的情况下,管道焊接过程中产生较大的残余应力,导致焊缝机械性能下降,管道安全性受损^[4]。然而,目前大多数生产线仍使用大型千分尺或 π 卷尺进行人工管道测量,缺乏有效的在线监测系统^[5]。因此,在大型管道的生产过程中,对其尺寸参数的实时精确测量和控制已成为一项紧迫的任务。目前,考虑避免对被测量对象造成损伤、操作方便等多方面因素,非接触测量已成为管道尺寸参数测量研究领域的热点课题。

收稿日期:2022-07-25

^{*} 基金项目:浙江省大学生科技创新活动计划项目(2021R406006)、浙江省教育厅科研项目(20020059)资助

管道尺寸的非接触式测量法根据原理的不同,主要分为激光扫描测量法、激光测距测量法、结构光测量法以及视觉测量法等^[6-7],国内外学者针对管道的尺寸参数测量问题展开了大量研究工作。Mekid 等^[8]基于激光扫描法原理提出了一种通过对位移与散射光强度关系的分析来实现管道圆度测量的巧妙方法。但是,它并没有充分解决测量范围不足、维护复杂等问题。Schoch 等^[9]则基于激光三角测距原理提出了一种由两个主要子系统组成的三维坐标测量系统:一个能够扫描零件完整截面的二维激光三角测量系统以及一个在测量平面中移动零件的移动平台。虽然激光测距仪的精度较高,但其维护复杂且成本较高。这些缺点可以用最先进的视觉测量技术来克服,机器视觉技术因其精度高、非接触、效率高等特点已被广泛应用于各种机械量的测量中^[10-11]。在管道尺寸视觉测量方面,国内外学者们提出了各种基于单目视觉的快速测量旋转对称工件的直线度或圆度的解决方案^[12-13]。在这些解决方案中,相机首先用于获取旋转工件的连续图像,然后对采集到的图像进行图像处理 and 建模分析,最后得到测量结果。Zatocilova 等^[14]和 Zhou 等^[15]基于从两幅图像中捕获的锻件的边界曲线或基线构建的三维模型,提出了一个类似的测量系统,使用两个高分辨率单镜头反射相机来计算旋转对称锻件的直线度。但是,由于管道的表面纹理较弱,往往很难达到理想的特征点匹配。因此,一些学者将结构光技术应用于管道测量^[16]。将结构光投影至被测管道表面,根据成像系统和投影系统的空间几何关系,投影在整个管道表面的特定图像可以转换为三维空间信息。在此基础上,为了获得更大的测量范围,有研究人员在伺服电机上安装带有电荷耦合器件(charge-coupled device, CCD)的线结构光,允许沿管道轴线运动和测量,使用全向激光器和全向相机进行测量,并将多组结构光获取的管道轮廓信息合并^[17]。由于伺服运动机构的增加,管道尺寸及形貌的测量中往往还附加了运动机构的误差,而且测量系统的结构也更加复杂,使得系统成本也大幅增加。

双目视觉测量技术^[18-19]能够利用左右相机的视差得到被测物的三维坐标,该技术已被广泛应用于几何量的测量中。不同于以往的研究,本项目将多目视觉测量技术应用于管道尺寸的测量中,为了扩展被测范围本文设计了一种融合多组双目视觉系统的管径尺寸在线测量方案。该方案采用均匀分布的多组双目摄像机对被测管道横截面上投影的激光标记进行三维重建、点云配准和坐标融合,以实现管道外尺寸参数的快速现场测量。本文利用仿射距离变换设计特征点匹配算法,实现特征点的精确匹配;采用奇异值分解(singular value decomposition, SVD)求解刚体变换,然后加入法向量约束,采用高斯-牛顿法提高测量算法的鲁棒性和精度。搭建实验系统对本文所述测量方案进行了测试,验证了方案的可行性。

1 测量原理

1.1 测量系统方案

针对工业管道外尺寸参数的测量,提出了如图 1 所示的测量系统方案,它包括一个由三组双目摄像机组成的数字图像采集单元、一个由多个激光器组成的标记投影单元、一台负责数据处理的计算机以及用于设备安装的支架。支架横跨被测管道,并尽可能保持垂直于管道的中心轴线。固定在支架上的多种激光器从不同的角度在管道表面投射出一圈激光标记,作为横截面的特征点。同时,多组双目摄像机从不同位置捕捉管道的图像,并通过 USB 电缆与计算机进行实时通信。

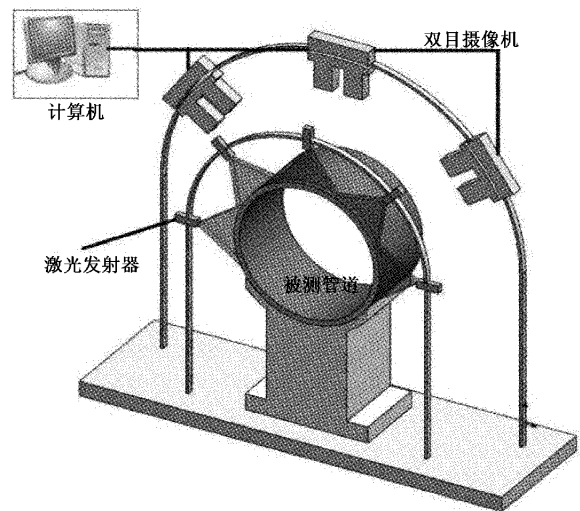


图 1 测量系统示意图

整体测量过程如图 2 所示,使用多组双目摄像机捕获的原始图像作为输入,对图像进行预处理,提取出特征点;再采用特定的匹配算法实现特征点匹配和三维重建,得到多组点云;然后,基于每组点云之间的隐式关系,对相应的匹配点进行匹配,并求解刚体变换,实现点云配准;最后,利用空间圆拟合的点云配准算法来计算被测管道截面的外尺寸参数。

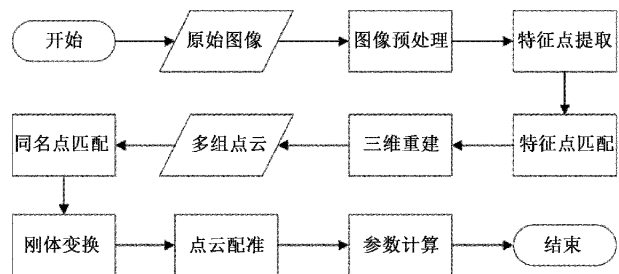


图 2 测量流程

测量流程中图像预处理包括照相机标定、图像降噪和立体校正等步骤。其主要功能是将原始图像转换为与仿射线水平对齐的清晰图像,这是整个测量算法的基础。本文

通过用高斯差值(difference of Gaussian, DoG)识别图像中的斑点特征的中心来提取特征点,其详细过程在此不予赘述。在图像预处理的基础上,可以根据先验知识设置高斯标准差范围、椭圆区间、判断阈值等参数,从而准确有效地提取作为特征点的激光标记点。

1.2 相机标定

在图像测量过程中,为了确定空间物体表面某一点的三维几何位置与图像中对应点的相互关系,需要建立相机成像的几何模型,如图3所示。求解这些几何模型的参数的过程就称之为相机的几何标定。本文采用张正友相机标定法获得相机的内参和外参,对具体内容不做阐述。

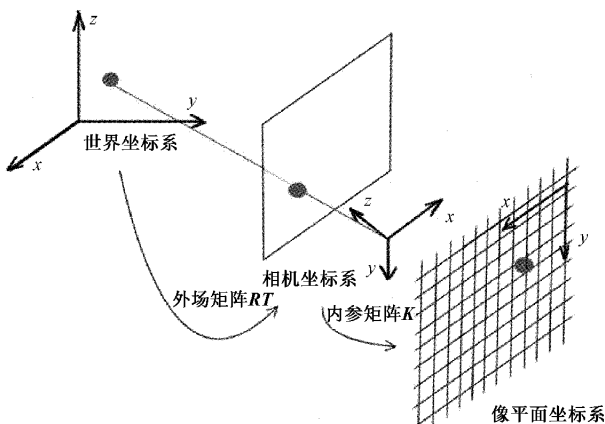


图3 坐标系转换

在得到系统的内参和外参后,三维点 $M = [X_M, Y_M, Z_M, 1]^T$ 投影到二维像平面上得到点 $m = [u_m, v_m, 1]^T$ 的投影方程可以表达如下:

$$\begin{bmatrix} u_m \\ v_m \\ 1 \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} f_x & s & u_o \\ 0 & f_y & v_o \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_M \\ Y_M \\ Z_M \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$m \sim K[R \ T]M \quad (2)$$

其中, K 为内参矩阵, $[R \ T]$ 为外参矩阵, 包括旋转和平移。

1.3 双目立体视觉系统立体校正

双目立体视觉的原理与人眼成像的原理相似。同一物体在左右摄像机中三维空间的成像差异,通过计算空间点的在两幅图像中的视差,并基于三角剖分原理能够重建物体的三维几何信息,获得该点的三维坐标值。如图4所示双目系统,根据左图像中 P_l 点与实际点 P 在右图像中根据极线约束^[20]寻找对应点 P_r ,但极线倾斜使对应点的二维搜索较为困难,因此需要先对图像进行立体校正,使左右图像极线平行。

假设参考图像(左图像)的旋转矩阵和平移矩阵为:

$$R_l = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, T_l = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

由立体校正后两图像对应关系可得右图像的旋转矩阵与左图像相同,平移矩阵只有 X 方向的位移。

$$R_r = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, T_r = \begin{bmatrix} t_r \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

由相机标定已知外参矩阵,可得本质矩阵:

$$E = t \times R = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -T \\ 0 & T & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

对本质矩阵始终成立对极约束:

$$x^T E x' = 0 \quad (6)$$

展开得:

$$(u \ v \ 1) \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -T \\ 0 & T & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u' \\ v' \\ 1 \end{pmatrix} = 0 \quad (7)$$

$$(u \ v \ 1) \begin{pmatrix} 0 \\ -T \\ T v' \end{pmatrix} = 0 \quad (8)$$

则有:

$$T v = T v' \quad (9)$$

约束始终成立,说明对应点 Y 方向始终相等,即两点在同一水平线上。

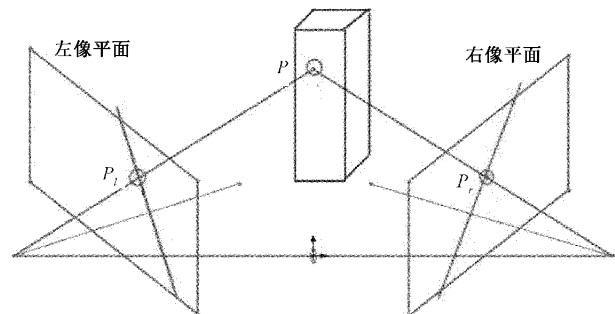


图4 校正前双目立体视觉成像平面

因此对图像的校正操作如下:

- 1) 旋转右图像,使左右图像坐标系两两平行;
- 2) 由外参矩阵 R, T 计算本质矩阵 E ;
- 3) 对两幅图像进行矫正,使极点处于无穷远处。

这样如图5所示,只需在左图像中选择点,在第二张图中形成该点的极线,再沿着直线寻找匹配点,简化匹配过程方便三维重建。

1.4 三维重建

图6所示为基于三角测距原理的双目相机拍摄的图像的三维重建过程。 O_l 和 O_r 分别为左右摄像机的光学中心, f 为摄像机的焦距, B 为两个摄像机之间的中心距离。

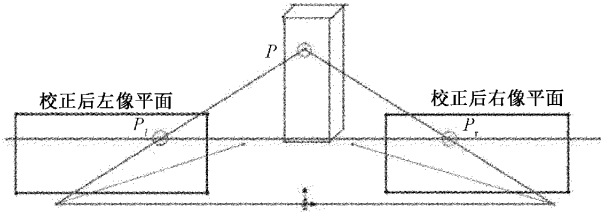


图 5 校正后像平面

对于空间中的一个点 $P(x, y, z)$, 其在左侧相机和右侧相机的成像平面上的投影点分别为 $P_L(x_L, y_L)$ 和 $P_R(x_R, y_R)$, 各自通过三角形的相似关系, 可以得到测量点 P 与相机基线之间的距离 Z 为:

$$Z = \frac{fB}{x_l - x_r} \quad (10)$$

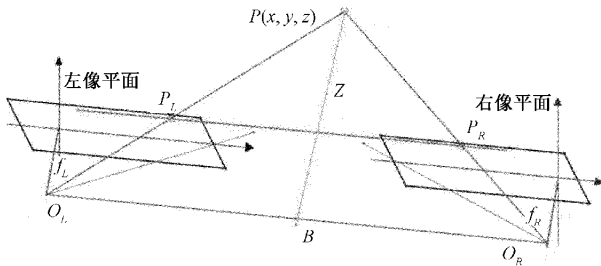


图 6 基于三角测距原理的三维重建示意图

在左摄像机坐标系中, 对被测点 P 进行三维重建, 并将其坐标 (x_c, y_c, z_c) 表示为:

$$\begin{cases} x_c = \frac{Bx_l}{x_l - x_r} \\ y_c = \frac{By_l}{x_l - x_r} \\ z_c = \frac{Bf_l}{x_l - x_r} \end{cases} \quad (11)$$

对于左相机图像平面上的任何点, 只要能在右相机的图像平面上识别出匹配点, 就可以通过点对点操作推导出点的三维坐标。本文所述管道外尺寸测量方法利用多组双目系统对被测管道进行同步图像采集, 用结构光对被测截面进行标记, 通过特征点提取、三维重建, 再结合点云配准方法能够将多组双目视觉系统测量到的特征点进行坐标融合, 最后根据空间几何特征拟合算法即可得到被测管道外尺寸参数。

2 测量算法

2.1 特征点提取与匹配算法

在特征点匹配过程中, 一对图像之间的匹配关系是确定的。在本文提出的测量方法中, 将被测管道表面的标记点作为提取和匹配的特征点。特征点的低密度自然导致传统的特征点提取和匹配算法的效率较低。因此, 本文设计了一种特殊的特征点提取与匹配算法, 利用 DoG 算法筛选斑点特征进行特征点提取, 并基于仿射距离变换实现特征点匹配。

射影变换使射影空间之间的映射关系, 具有下列不变性:

- 1) 共点不变性: 两条直线经过同一个点;
- 2) 共线不变性: 两个点在同一条直线上;
- 3) 交比不变性: 如图 7 所示, 在一个图形中, S 为中心点, 从 S 画出 4 条射线组成一个固定的线束。另一条直线与线束分别交于 A, B, C, D , 则有:

$$\frac{AB}{AD} = \frac{A'B'}{A'D'} = \frac{A''B''}{A''D''} \quad (12)$$

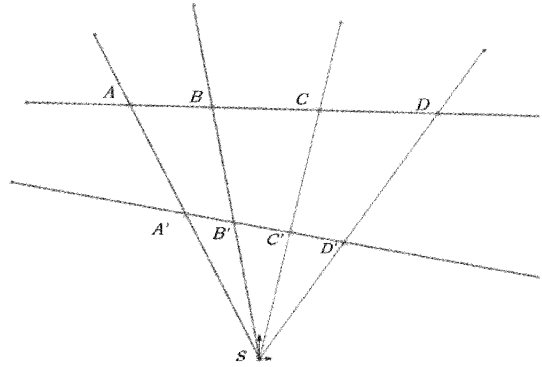


图 7 交比不变性示意图

如图 8 所示, POQ 是空间上的一个直线段, 其在左右摄像机 C_l 和 C_r 中的投影线段分别为 $P_lO_lQ_l$ 和 $P_rO_rQ_r$ 。根据仿射变换的性质, 在同一条线上的点的位置顺序和长度比例保持不变, 即:

$$\frac{\|P_L - O_L\|}{\|Q_L - O_L\|} = \frac{\|P_R - O_R\|}{\|Q_R - O_R\|} \quad (13)$$

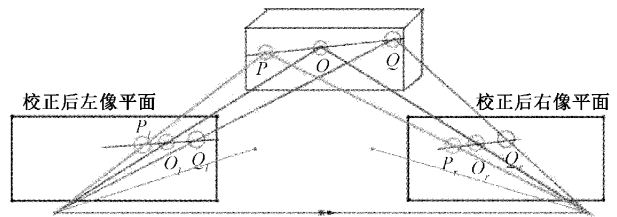


图 8 仿射距离变换示意图

如图 9 所示为本文所设计的激光标记点在管道表面的分布情况。当光束轴垂直于该平面时, 一排等距的激光标记点通过激光投射到该平面的表面上。然而, 当激光被投射到一个曲率较大的管道表面时, 激光标记物的分布会受到曲率的影响。因此, 不同间距的激光标记在管道表面形成。同时, 由多种激光器投影的标记也有重叠的区域, 在管道表面形成非等距的标记特征。另一方面, 由于被测管的曲率大, 激光标记之间的间隔小, 3 个相邻激光标记形成的线段可以近似视为直线段, 满足上述仿射距离变换的条件。

综上所述, 当激光标记作为特征点时, 激光标记的间距和仿射变换特性为特征点的匹配提供了依据。以左相机捕获的图像为例, 对于沿一维激光标记方向的 3 个相邻激光标记 $P_lO_lQ_l$, 其中间点的匹配基元定义为 P_lO_l 像素长

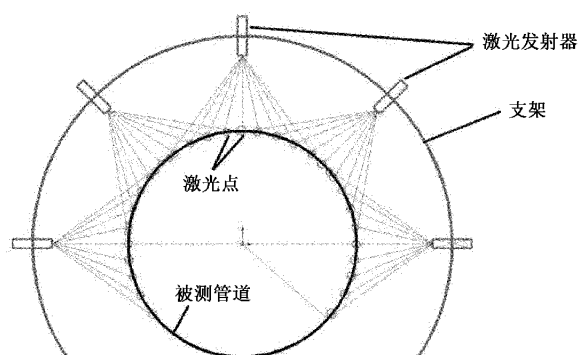


图9 激光标记分布(需要标注)

度与 $P_L Q_L$ 像素长度之比值,即:

$$F_L(O) = \frac{\|P_L - O_L\|}{\|P_L - Q_L\|} \quad (14)$$

记 $F_L[i]$ 和 $F_R[j]$ 分别是左右摄像机捕获的图像的匹配基元集。为了得到左右相机特征点匹配序列的最长段,本文采用动态规划进行匹配:

$$dp[i][j] = \begin{cases} 0, & i=0 \text{ 或 } j=0 \\ dp[i-1][j-1]+1, & |F_L[i]-F_R[j]| \leq \text{threshold} \\ 0, & |F_L[i]-F_R[j]| \geq \text{threshold} \end{cases} \quad (15)$$

其中, dp 为状态变量矩阵, $dp[i][j]$ 为当前状态,表示 F_L 的前 i 匹配基元和 F_R 的前 j 匹配基元的最长匹配长度, $dp[i-1][j-1]$ 为前一个状态。然后用 dp 状态变量矩阵中最大值对应匹配序列作为粗匹配的最优解进行输出。特征点匹配的算法流程如图10所示。

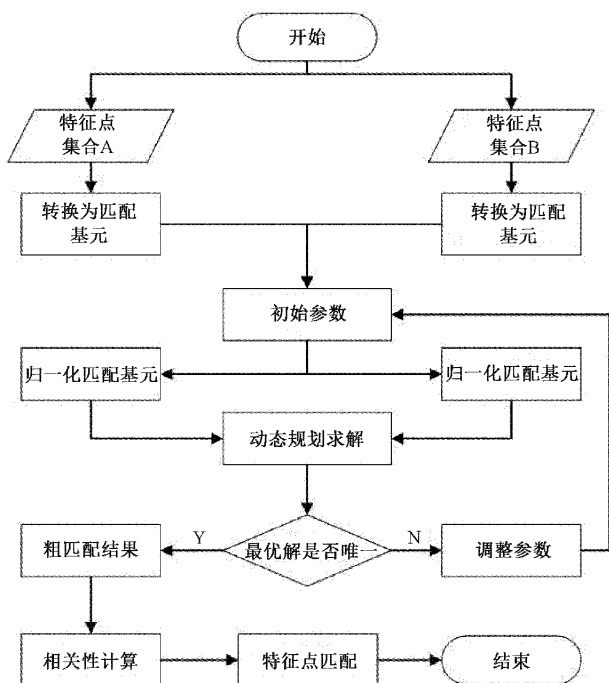


图10 特征点匹配流程

具体的粗匹配步骤如下:

1) 根据式(14), 从左右摄像机拍摄的图像中提取的特征点 A 、 B 分别转换为匹配基元 F_L 和 F_R ;

2) 匹配基元 F_L 和 F_R 按照正态分布进行归一化。然后计算两个匹配基元之间的斜率。基于初始参数 n , 将完整的斜率空间均匀划分为 n 个区域, 分别为 $[0, 1, 2, n-1]$;

3) 根据斜率序列中每个斜率对应的区域对匹配基元进行符号化通过将斜率转为斜率所在区域对应的标签来对匹配基元进行粗分类;

4) 符号化后对两组匹配基元进行动态规划。如果 dp 矩阵中的最大值出现不止一次, 即最优解不唯一, 则调整参数 n , 过程返回到第二步。这种迭代持续到得到唯一最优解;

5) 为了保证匹配的准确性, 当满足结束迭代的条件时, 选择最优解和次优解对应的匹配序列号作为粗匹配的结果。值得注意的是, 次优解是与 dp 矩阵中次最大值对应的匹配序列。在精确匹配过程中, 对粗匹配的候选匹配结果进行相关计算, 并以相关程度最高的组的结果作为最终匹配结果。

2.2 点云配准算法

每组双目摄像机最终提供了被测管道截面圆弧上一组点云。不同组的双目视觉系统得到的点云有自己的坐标系, 需要将不同组的点云数据在一个标准化坐标系内配准。点云配准流程如图11所示, 分为同名点匹配和刚体变换求解两部分。

在实际应用场景中, 每组双目摄像机之间的近似关系是已知的: 左摄像机获得的特征点的右半部分和右摄像机获得的特征点的左半部分是对应的点。因此, 在同名点匹配过程中, 基于对每组点云的圆心 C 的拟合, 计算出源点云和目标点云中两个相邻点和拟合圆心所成向量之间的夹角, 得到角度特征序列 θ 。然后对两组角度特征序列进行互相关运算。以相关程度最高的匹配结果作为对应点的最终匹配结果。

SVD 是一种广泛应用于求解刚体变换的方法。它不仅利用主成分分析 (principal component analysis, PCA) 构造点云之间的距离误差, 而且利用最小二乘法求解旋转矩阵和平移向量。然而, 由于环境光和特征点提取精度等因素, 在重建的三维点云中存在噪声。也就是说, 三维点并不是严格地在一个平面上。在截面圆的点云配准中, 两组点云的理想变换结果在同一平面上, 形成一个弧。但是, 由于传统的奇异值分解只考虑对应点之间的欧氏距离, 很容易落入局部最小值, 造成转换后两组点云之间的角度差异, 影响测量精度。因此, 本文利用奇异值变换得到的刚体变换结果作为初值, 以两组点云的平面法向量之差作为约束条件, 构造了一种牛顿-高斯求解算法, 该算法的示意图如图12所示。

点 P_a 和 P_b 分别是点云 A 和 B 上的同名点, n_A 和 n_B

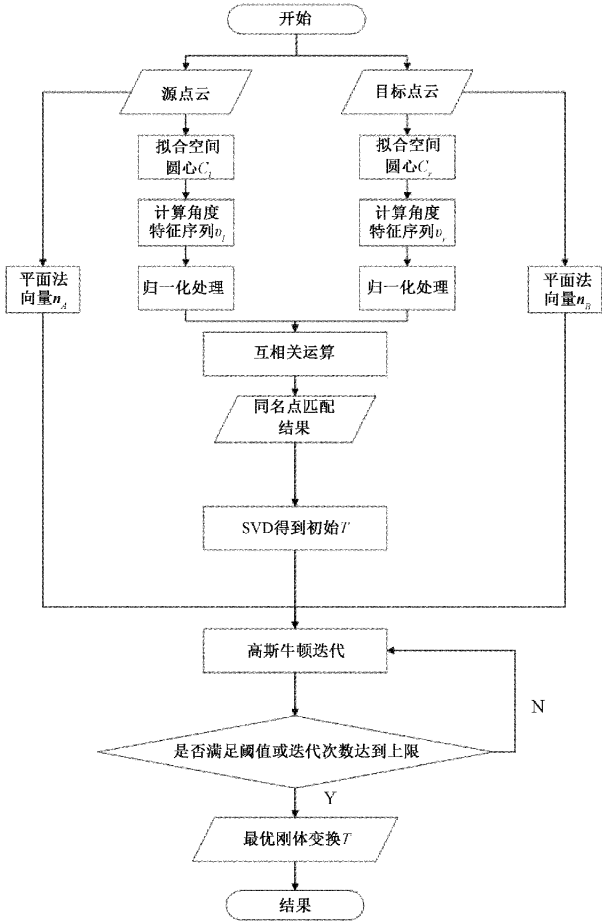


图 11 点云配准的流程

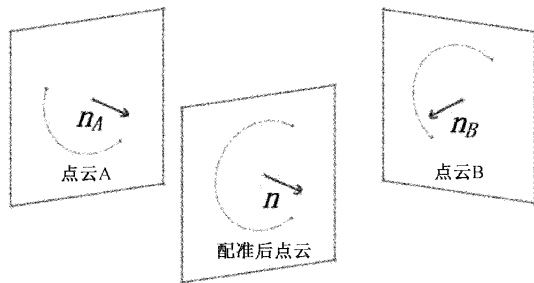


图 12 点云配准示意图

是整个点云 A 和 B 的法向量。将匹配向量扩展为 $P = [p^T \ n^T]^T$ 。在误差函数 $e_i(T)$ 的基础上,构造了一个目标函数:

$$\begin{cases} e_i(T) = P_i^B - T \otimes P_i^A \\ T^* = \sum e_i(T)^T \Omega e_i(T) \end{cases} \quad (16)$$

其中:

$$T \otimes P_i^A = \begin{bmatrix} Rp + t \\ Rn \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\Omega = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & \lambda I \end{bmatrix} \quad (18)$$

法向量约束的权值是通过改变 λ 来确定的。利用高

斯-牛顿迭代方法,通过使用增量扰动的局部参数,使目标函数最小化,并通过迭代求解最优。增量方程表示为:

$$(H + I)\Delta T = b \quad (19)$$

其中, $H = \sum J_i^T \Omega J_i$ 是近似的海森矩阵, J_i 关于扰动误差的雅可比矩阵;

$$\Delta T = [\Delta t_x, \Delta t_y, \Delta t_z, \Delta q_x, \Delta q_y, \Delta q_z] \quad (20)$$

包括四元旋转单元的平移向量 Δt 和虚部 Δq ;且 $b = \sum J_i^T \Omega e_i(T)$ 。变换求解步骤描述如下:利用 SVD 得到初始变换。基于两组对应点的法向量构造了一个目标函数。对于第 k 次迭代,计算增量。如果足够小,小于预设阈值,则结束迭代过程,并以最终的刚体变换作为输出。否则,使用从第三步开始重复迭代过程。

2.3 尺寸参数计算

通过对特征点的三维重建和点云配准,得到了被测管道横截面的三维点云。然而,仍需要拟合一个三维圆,以获得测量截面的几何中心和直径以及其他几何信息。本文使用最小二乘法来进行空间圆的拟合。对于三维点集 $X \{[x_1, y_1, z_1], [x_2, y_2, z_2] \dots [x_n, y_n, z_n]\}$,可以用最小二乘建立超定方程,得到其平面法向量 N :

$$\begin{cases} N = (M^T M^{-1}) M^T L_2 \\ M = \begin{bmatrix} x_1 & \dots & x_n \\ y_1 & \dots & y_n \\ z_1 & \dots & z_n \end{bmatrix} \\ L_2 = [1, 1, \dots, 1]^T \end{cases} \quad (21)$$

由于连接平面圆的任意两点的段的垂直平分线总是经过圆心,因此再次构造超定方程,得到圆心的坐标:

$$\begin{cases} C = \left(\begin{bmatrix} B^T B \\ A \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} B^T B \\ A \end{bmatrix} \right)^{-1} \begin{bmatrix} B^T B \\ A \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} B^T L_2 \\ 1 \end{bmatrix} \\ B = \begin{bmatrix} \Delta x_{12} & \dots & \Delta x_{(n-1)n} \\ \Delta y_{12} & \dots & \Delta y_{(n-1)n} \\ \Delta z_{12} & \dots & \Delta z_{(n-1)n} \end{bmatrix}^T \\ L_2 = \begin{bmatrix} l_1 \\ \vdots \\ l_{n-1} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (22)$$

其中:

$$\Delta x_{(n-1)n} = x_n - x_{n-1} \quad (23)$$

$$l_i = \frac{x_{i+1}^2 + y_{i+1}^2 + z_{i+1}^2 - x_i^2 - y_i^2 - z_i^2}{2} \quad (24)$$

最后,用从所有点到圆心的平均距离的两倍作为拟合圆的直径 d :

$$d = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} \quad (25)$$

3 不同圆心角条件下管径测量误差仿真

值得注意的是,本文提出的测量方法仅使用管道的上轮廓来计算直径。在精确坐标测量中,采用最小二乘法计

算直径时,采样点的弧长和椭圆度的差异导致了不同程度的偏差。因此,进行了仿真和分析,以研究它们之间的关系,并验证了系统设计的合理性。

在仿真中,椭圆的主轴设置为 300 mm,椭圆度的取值范围是 $[0, 35\%]$ 、步长为 2.5%,仰角的取值范围是 $[1^\circ, 180^\circ]$ 、步长间距为 1° ,且每度圆心角对应着三个轮廓点。利用所提出的方法计算模拟管径,管径的误差分布如图 13 所示。

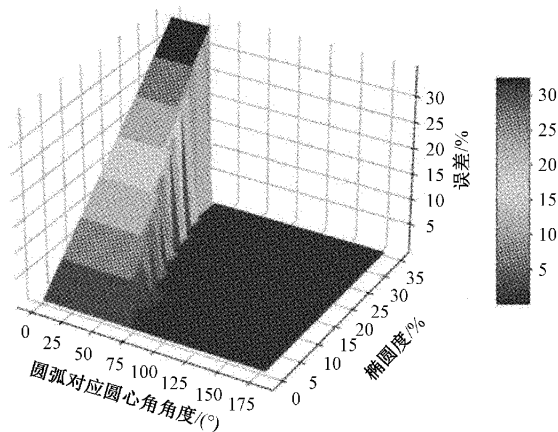


图 13 管径的误差分布

设被测管道直径的允许误差在 1 mm 以内,考虑截面圆椭圆度的取值范围在 0.0%~1.5%之间,对所需被测圆弧的圆心角进行数值仿真研究,可知所需要截面圆弧的最大圆心角为 168° 。也就是说,为了保证直径测量精度,包裹采样点的圆心角度必须大于 168° 。

4 实验

4.1 实验系统

为了验证提出方法的可行性,搭建了一个如图 14 所示的实验系统,主要包括三组双目相机组成的成像模块,由五个激光器组成的标记投影模块,一台高性能计算机组成的数据处理模块以及设备安装支架。实验系统采用 QJY0816 型图像尺寸为 2/3 英寸的工业相机,每个相机均配备 8 mm 定焦镜头,视场角为 $56.5 \times 43.9^\circ$ 。根据上述仿真的结论,保持轮廓点所覆盖角度大于 168° 是实现直径测量的高精度的先决条件。因此,在本研究中考虑到典型工业摄像机的场角和最终成本控制,选择三组双目摄像机组成实验系统,并将测量点对应的中心角设置在 180° 左右。

此外,为了获得高精度的测量结果作为参考,使用 Hexagon 的 Inspector Performance 系列三坐标测量机 (coordinate measuring machining, CMM) 对管道进行了测量。图 15 所示为利用龙门式三坐标测量机对管道直径进行的测量实验。这种类型的三坐标测量机的坐标测量精度达到了 0.001 mm。

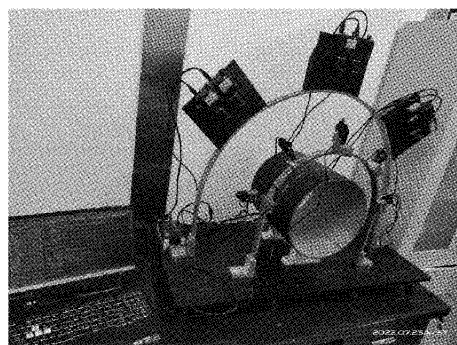


图 14 基于多组双目视觉的管道尺寸参数测量系统

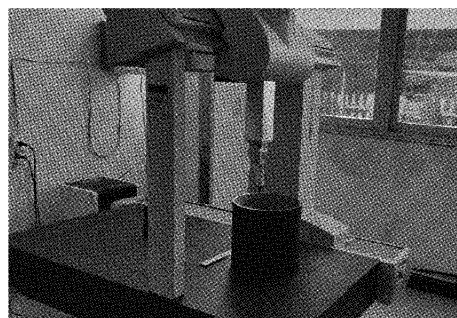
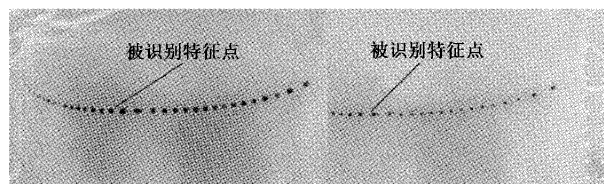


图 15 三坐标测量机比对实验

4.2 特征点匹配算法的效果

该方法以激光投影的标记作为特征点,用 DoG 算子识别斑点特征,提取标记的中心。选择管道中间一个外径为 299 mm 的截面进行测试,实际的特征点提取结果如图 16 所示,其中图 16(a)和(b)分别为左相机和右相机的特征点提取结果。从图中可以看出,投射在管道表面的标记几乎完全被识别和提取出来,达到了预期的效果。



(a) 左相机特征点提取

(b) 右相机特征点提取

图 16 左、右相机特征点提取结果

通过所提出的基于仿射距离变换的特征点匹配算法,在准确提取特征点后,根据式(14)将左右摄像机提供的特征点分别转换为匹配基元 F_L 和 F_R ,如图 17、18 所示。不难发现,经过仿射距离变换后,出现了明显的振幅变化,不再遵循原来看似单一雷同的分布。特别是,在第 21 个匹配基元附近,出现振幅振荡。这些明显的特征为匹配提供了依据。

最终的匹配效果如图 19 所示。刷亮区域将显示最终的匹配结果。结果表明,尽管匹配基元存在噪声,但本文提出的算法仍能较满意地实现特征点的正确匹配。许多实验也证明,该方法的精确匹配率可达到 98%以上。

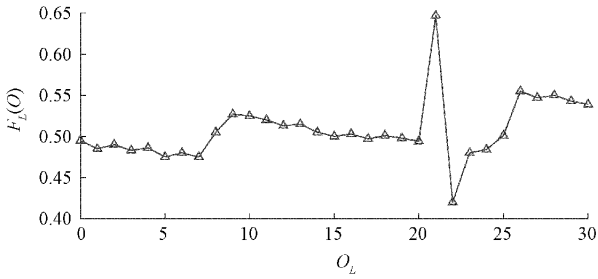


图 17 左相机特征点匹配基元

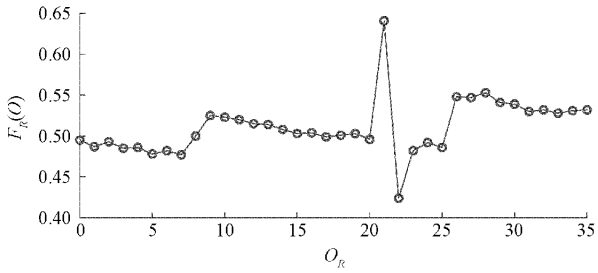


图 18 右相机特征点匹配基元

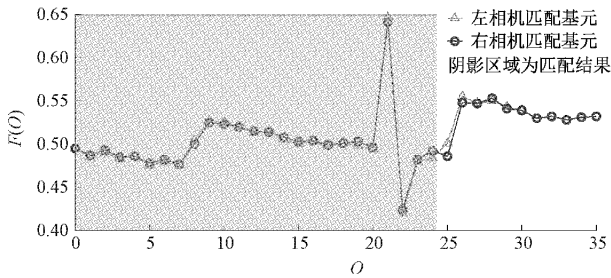


图 19 特征点匹配结果

4.3 点云配准算法的效果

对于大多数系统的运行时间,简单地使用 SVD 来求解点云中的对应点就可以达到预期的效果。但是,由于噪声的影响或同名点的数量较少等因素,刚体变换解有时属于局部最小值,经过刚体变换后的两组点云存在明显的角度差异,说明传统 SVD 算法的稳定性较差。图 20 显示了使用传统的 SVD 算法来求解刚体变换的效果。不难看出,这两组点云的配准并没有达到预期的效果,而且它们所在的平面之间存在明显的角差。在应用了本文提出的改进后,从图 21 中可以清楚地发现,此时的匹配效果更好。这两组点云在点之间的误差较小,它们的平面法向量也几乎是平行的。

在图 14 所示的管道截面测量过程中,3 组双目摄像机产生了 3 个不在同一坐标系中的特征点云。为了减少点云配准过程中产生的误差,以第 2 组点云参考系为基准,将 3 组点云均转换在同一坐标系,结果如图 22、23 所示。图 22 显示了在点云配准之前的 3 组原始点云。经过点云配准后,生成了如图 23 所示的半圆弧,证明了点云配准算法的有效性。

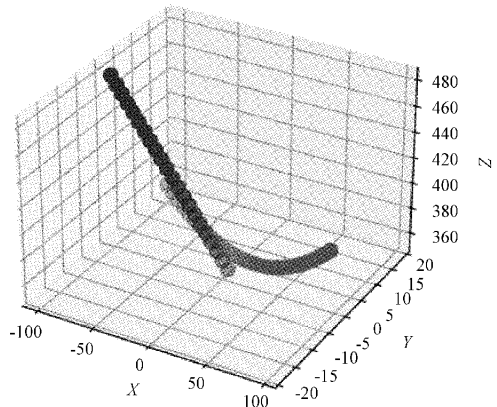


图 20 传统的 SVD 算法来求解刚体变换的效果

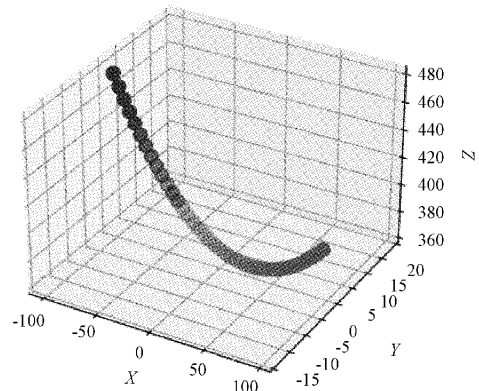


图 21 改进的 SVD 算法来求解刚体变换的效果

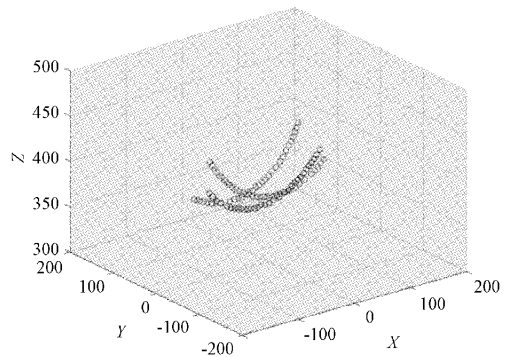


图 22 原始点云

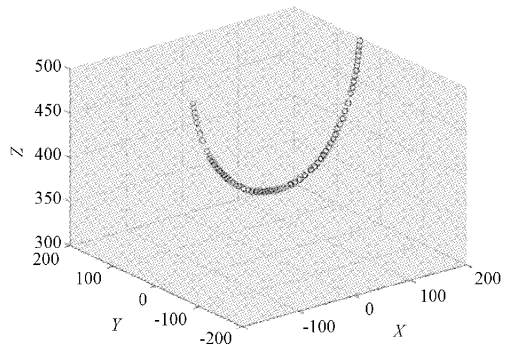


图 23 点云配准后的点云

4.4 验证实验

在验证实验中,采用市场上常见的无缝钢管作为试验对象,取10个管道横截面进行直径测量。以三坐标测量机

的测量值作为参考。在这个实验系统中,以5次测量的平均值作为最终测量结果,表1给出了公称尺寸为299 mm的管道测量实验的结果。

表1 公称外径299 mm管道横截面直径测量结果

横截面编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CMM测量值/mm	299.514	299.501	299.494	299.493	299.493	299.500	299.545	299.167	299.512	299.514
本系统测量值/mm	298.454	298.565	298.790	299.255	300.586	299.355	297.837	298.561	298.185	300.171
绝对误差/mm	-1.06	-0.933	-0.704	-0.238	1.09	-0.145	-1.71	-0.606	-1.33	0.657
相对误差/%	-0.354	-0.313	-0.235	-0.079	0.365	-0.048	-0.570	-0.203	-0.443	0.219

观察实验结果可知在10个截面的测量中,最大绝对误差和平均绝对误差分别为-1.71和0.847 mm,相对误差则在 $\pm 0.570\%$ 以内,与典型的 π 尺手工测量精度相当。

4.5 管径重复性测试

为了分析测量的可重复性,对公称外径分别为285、299和325 mm的3种常见无缝钢管进行重复测量试验。每根钢管选择一个截面并测量20次。最终的测量结果如图24所示。

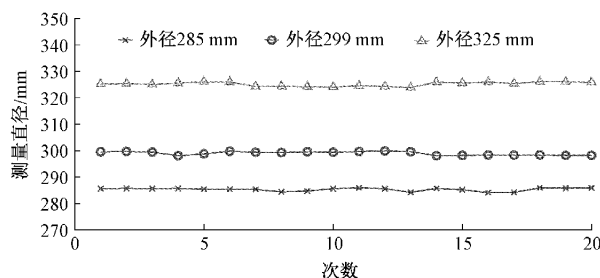


图24 管道重复实验结果

若以公称值为相对真值,从结果中可以看出,绝对误差的最大值,即测量值与其公称值之间的最大差值分别是+0.605、+0.890和+0.8795 mm,对于这3种类型的钢管。根据贝塞尔公式计算,本实验系统测量的3种管道的直径测量标准偏差分别为0.687、0.686和0.819 mm,这说明该系统具有良好的测量重复性。对于直径范围为285~325 mm的管道,最大重复性标准差为0.819 mm,基本满足工业生产的测量需要。

为了分析实验系统的测量效率,对上述3种管道类型进行了90次测量,并记录了测量耗时。结果如图25所示,发现3种类型管道的平均测量时间分别为1.254、1.361和1.418 s,最大测量时间为1.496 s,其效率远远超过人工测量,这也能满足管道生产中外尺寸参数在线测量的需求。

将本文所述方法与管道直径测量常采用的激光三角法和 π 卷尺方法进行比对,主要从单次测量误差和测量速度两个维度进行比较,结果如表2所示。其中激光三角法技术指标引用自文献[21], π 卷尺法指标源于实测。由表2可知,本文所述方法较好地兼顾了测量速度和测量精度的问题,能够较好地满足工业生产过程在线测量的要求。

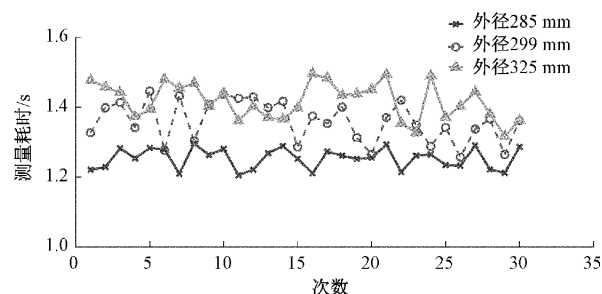


图25 测量耗时测试

表2 现有管道测量方法与本文方法技术指标

	激光三角法	π 卷尺法	本文方法
单次测量误差/mm	优于 ± 0.05	优于 ± 1.5	优于 ± 1
测量速度/s	单次耗时 >25	根据人工熟练程度而定	<1.5

5 结 论

为了解决目前工业管道在生产过程中的外尺寸参数的在线测量问题,本文提出了一种融合多组双目视觉系统的测方案,并建立了一套实验系统来验证所提出解决方案的有效性。实验结果表明,与三坐标测量机测量结果相比,该测量系统的相对误差在 $\pm 0.570\%$ 以内,最大绝对误差为-1.71 mm。在重复性测量试验中,对公称尺寸为285、299和325 mm的3种工业钢管进行多次等精度等条件重复测量,最大重复性标准偏差为0.551 mm。该系统方案在保证一定测量精度的同时,能够实现高效率的管道尺寸测量,最大单次测量耗时小于1.5 s,满足了实际生产应用中对管道在线测量的需要,具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 邓湘君. 大直径钢管在顶管工程中的应用[J]. 工程技术研究, 2020, 5(14): 127-128.
- [2] 胡松林. 焊管在海底管道中的应用探讨[J]. 焊管, 2019, 42(11): 1-5.
- [3] 杨伟芳, 李记科, 顾苏民. 高性能油气输送用螺旋缝

- 埋弧焊钢管生产技术[J]. 钢管, 2012, 41(5): 10-14.
- [4] 吕浩, 谢柳辉, 侯冀川, 等. 石化炼油部压力管道直径测量方法研究[J]. 广州化工, 2020, 48(15): 161-162, 200.
- [5] 于海征. 长输天然气管道焊接裂纹成因及其控制措施[J]. 化工管理, 2022(12): 121-124.
- [6] WAN X, LIU J H. Accurate radius measurement of multi-bend tubes based on stereo vision [J]. Measurement, 2018(117): 326-338.
- [7] 程锦, 何平安, 吴俊杰. 基于三线结构光的大型圆柱工件直径测量系统[J]. 光学与光电技术, 2021, 19(4): 30-36.
- [8] MEKID S, VACHARANUKUL K. In-process out-of-roundness measurement probe for turned workpieces[J]. Measurement, 2011, 44(4): 762-766.
- [9] SCHOCH A, SALVADORI A, GERMANI I, et al. High-speed measurement of complex shaped parts at elevated temperature by laser triangulation [J]. International Journal of Automation Technology, 2015, 9(5): 558-566.
- [10] 毛卫平, 高伟, 顾寄南, 等. 基于机器视觉的圆柱形蜂窝陶瓷侧面裂隙检测[J]. 电子测量技术, 2022, 45(2): 117-122.
- [11] 李纪强, 孔令华, 花海燕. 基于图像拼接的直线轴承长度测量方法[J]. 电子测量技术, 2022, 45(8): 148-154.
- [12] CAVEDO F, NORGIA M, PESATORI A, et al. Steel pipe measurement system based on laser rangefinder[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2016, 65(6): 1472-1477.
- [13] FU X, ZHANG Y, TAO K, et al. The outer diameter detection and experiment of the circular forging using laser scanner[J]. Optik, 2017(128): 281-291.
- [14] ZATOILOVA A, PALOUSEK D, BRANDEJS J. Image-based measurement of the dimensions and of the axis straightness of hot forgings[J]. Measurement, 2016, (94): 254-264.
- [15] ZHOU Y, WU Y, LUO C. A fast dimensional measurement method for large hot forgings based on line reconstruction [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 99(5-8): 1713-1724.
- [16] ZHANG Y C, LUO C, FU X B, et al. Automatic measurement method for the size of large forgings based on scattering on rough surface[J]. IET Science, Measurement and Technology, 2017, 11(1): 118-124.
- [17] 王龙华, 曾国华, 胡华锋, 等. 精确三维数据测量的双目视觉系统优化设计[J]. 电子测量技术, 2022, 45(7): 99-109.
- [18] 付朋, 陈新度, 吴磊. 基于角点的双目视觉绝对定位研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(3): 1-8.
- [19] 崇爱新, 尹辉, 刘艳婷, 等. 基于双目视觉的无缝线路路钢轨纵向位移测量方法研究[J]. 2019, 40(11): 82-89.
- [20] 王宏志, 张金栋, 胡黄水, 等. 基于感知 Hash 和极线约束的改进 AKAZE 算法[J]. 吉林大学学报(理学版), 2022, 60(3): 647-654.
- [21] 梅剑春, 叶青, 田建国. 钢管管端内外径测量系统的设计与实现[J]. 光学精密工程, 2014, 22(4): 815-821.

作者简介

章家威, 本科, 主要研究方向为双目立体视觉、无线传感器网络技术。

E-mail: zhangjiawei00161@163.com

张烈山(通信作者), 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为机器视觉测量技术、激光多普勒干涉振动测量技术等。

E-mail: zhanglieshan@163.com