

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514819

视觉引导与激光跟踪的大型轴类零件直径测量方法*

陈本永, 胡格菲, 刘峻豪, 杨 晔, 严利平

(浙江理工大学信息科学与工程学院(网络空间安全学院) 杭州 310018)

摘 要:为实现大型轴类零件直径的自动化、高精度在位测量,设计并构建了一套视觉引导与激光跟踪相结合的机器人测量系统,解决了机械臂与待测零件大初始姿态偏差与强反光表面等复杂工况下的激光投射点引导对准与稳定测量难题。通过融合语义分割与时间先验信息,建立具有安全裕度的鲁棒目标测量区域,进而设计了基于图像的视觉伺服(IBVS)预对准策略,实现对激光投射点的闭环引导与实时调整,确保其稳定、准确地进入目标测量区域。在此基础上,采用双边缘联合加权鲁棒拟合与几何解算方法获取零件轴向及接触点处表面外法向,并通过迭代闭环控制完成机械臂末端的姿态调整,实现滚轮与零件表面的稳定接触与可靠贴合。利用激光跟踪仪采集置于滚轮上的靶球三维坐标作为测量点,驱动机械臂在测量区域内进行多点数据采样,结合圆柱拟合算法,可实现不同轴段或同一轴段内测量区域的自动选取与直径估计。实验结果表明:采用所提方法得到的拟合直径相对于零件标称直径的最小绝对偏差为 0.108 7 mm,最大绝对偏差不超过 0.240 0 mm,5 次重复测量直径的标准差均低于 0.180 0 mm,且与千分尺的实测值具有较好的一致性。该方法适用于大型轴类零件的自动化高精度直径测量工程应用,具有较好的工程适用性与实际应用价值。

关键词: 大型轴类零件;在位直径测量;视觉引导;加权鲁棒拟合;激光跟踪仪

中图分类号: TH711 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

A diameter measurement method for large-scale shafts based on vision guidance and laser tracking

Chen Benyong, Hu Gefei, Liu Junhao, Yang Ye, Yan Liping

(School of Information Science and Engineering (School of Cyber Science and Technology),
Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: To achieve automated, high-precision in-situ diameter measurement of large-scale shaft parts, a robot-based measurement system integrating visual guidance and laser tracking is designed and constructed. The proposed system addresses the challenges of laser point guidance, alignment, and stable measurement under complex operating conditions, including significant initial pose deviations between the robotic arm and the workpiece, as well as highly reflective surfaces. By fusing semantic segmentation with temporal prior information, a robust target measurement region with a safety margin is established. On this basis, an image-based visual servoing (IBVS) pre-alignment strategy is designed to realize closed-loop guidance and real-time adjustment of the laser projection point, ensuring its stably and accurately entry into the target measurement region. Furthermore, a dual-edge joint weighted robust fitting and geometric solution method is employed to obtain the axial direction of the part and the surface normal at the contact point, and the end-effector posture is adjusted through iterative closed-loop control to achieve stable contact and reliable conformance between the roller and the workpiece surface. By utilizing a laser tracker to collect the 3D coordinates of a spherically mounted retroreflector attached to the roller as measurement points, the robotic arm is driven to perform multi-point data sampling within the measurement region. Combined with a cylinder fitting algorithm, this approach enables the automatic selection of measurement regions and diameter estimation across different or identical shaft segments. Experimental results indicate that the minimum absolute deviation between the fitted diameter fitted by the proposed method and the nominal diameter of the part is 0.108 7 mm, with the maximum absolute deviation not exceeding

收稿日期: 2025-12-30 Received Date: 2025-12-30

* 基金项目: 国家自然科学基金(52375552, 52427808)、浙江省科技计划(2024C01174, 2025C01051, 2022R52052)项目资助

0.240 0 mm. The standard deviation of the diameter across five repeated measurements remains below 0.180 0 mm, and the results show good consistency with the measured values obtained using a micrometer. The proposed method is suitable for automated, high-precision diameter measurement of large-scale shaft parts in engineering applications, demonstrating good engineering applicability and practical value.

Keywords: large-scale shaft parts; in-situ diameter measurement; vision guidance; weighted robust fitting; laser tracker

0 引言

大型轴类零件广泛应用于航空航天、风力发电、船舶与重型机械等高端装备,其直径等关键几何参数直接影响整机的传动效率与使用寿命。此类零件通常具有大直径(300 mm 以上)与长轴线(数米以上)的物理特征,且由于其体积巨大、质量沉重,往往难以搬运进行离线检测。因此在位条件下实现高精度、高效率的直径测量具有重要的工程意义。传统机械式量具(如千分尺)极度依赖操作人员的经验与主观判断,导致测量重复性较低,且受限于人工取放与逐点采样,效率低下。三坐标测量机具有高精度优势,但其测量空间受机械导轨行程限制,且对恒温、减震等环境要求苛刻,难以部署于生产车间或针对大型工件进行原位测量。因此,传统手段均难以满足大型工件在线检测与闭环加工控制的实时性与灵活性需求。

目前,基于光学或激光原理的在线测径仪已广泛应用于线材、管材及轴类零件的尺寸检测^[1-2]。此类设备虽具备较高采样频率与优异的重复性,但多采用固定工位式布置,且缺乏对大初始姿态偏差下的动态对准机制研究。因此,在应对超大尺度工件的原位测量及强反光表面等复杂工况时,其环境适应性与测量稳健性仍存在明显局限^[3-4]。

为提升复杂工况下直径测量的在位适配性,研究者常采用线结构光三维测量方案^[5-7]。该方案通过采集线激光在轴类零件表面投影形成的光条纹图像,利用相机与激光平面的标定关系进行三维点云重建,进而通过对局部截面的圆或圆柱几何建模实现外径估算。双线激光基准视觉测量方法通过构造稳定的激光观测基准,并结合图像处理与误差补偿实现目标间隙的实时测量,为激光视觉方法在复杂工况下的工程应用提供了参考^[8]。围绕该类测量方法,近年来的研究主要聚焦于成像质量增强^[9]、亚像素特征提取与系统误差补偿等关键环节^[10-12],从而提升强反光、低信噪比等极端条件下的测量精度与鲁棒性^[13-14]。

然而,在大型轴类零件的在位测量中,除成像退化外,还普遍面临初始姿态偏差大、近场视角变化快等问题,易使光条偏离有效测量区域,导致测量失效或结果波动。针对圆/环类构件的快速测量与圆柱外表面巡检,尽管已有

研究提出了亚像素级直径估计方法和单帧/快速成像的激光三角测量方案,但现有方法仍多以稳定观测条件下的数据采集与后处理拟合为主,对在线对准、特征可见性保持等关键环节,仍缺乏系统性的处理与优化^[15-17]。

在系统实现层面,采用工业机器人搭载光学或激光测量单元,可显著提升在位测量任务的空间可达性与多视角采样灵活性^[18-20]。机器人作为可移动的扫描机构,支持三维数据的动态获取,从而为实现从固定工位测量向可移动、在位式几何测量拓展提供了工程可行路径^[21]。然而,现有系统多依赖基于零件计算机辅助设计(computer-aided design, CAD)模型的离线轨迹规划方法,在诸如强反射表面^[22]、被测零件位姿不确定等复杂工况下,预设运动轨迹易与实际测量场景发生偏离,进而影响测量过程的可靠性与稳定性^[23]。

因此,有必要在机器人移动测量平台中引入基于图像特征的在线闭环对准机制,从而在运动过程中实时确保测量特征位于有效观测区域内。基于图像的视觉伺服(image-based visual servoing, IBVS)为此提供了可行的理论依据^[24];该方法通过在图像平面构造特征误差,并利用交互矩阵将该误差映射为机器人末端的调整速度,进而实现测量特征的闭环引导与动态稳定控制。

综上,围绕大型轴类零件的直径测量,已有研究取得了多方面进展。但要实现“鲁棒观测、连续对准、安全接近”三者协同、形成可复现的工程闭环,并在真实车间环境中完成从初始位姿偏差到最终接触邻近的端到端验证,仍需要更深入的系统化实验与工程化评估。

针对上述需求,本文提出一套激光-视觉融合的机器人直径测量方法,首先基于 IBVS 实现激光投射点的引导,再通过迭代闭环控制完成机械臂末端的姿态调整,实现滚轮与零件表面的稳定接触,进一步利用激光跟踪仪采集待测轴段表面多个靶球点的三维坐标,进行圆柱拟合测得轴类零件的直径。

1 测量系统与测量方法

1.1 测量系统构成及工作原理

本测量系统采用“眼在手上(Eye-in-Hand)”构型,由六自由度机械臂搭载集成化末端测量工具实现。该工具集成了工业相机、点式激光测距仪、测量滚轮、压力传感器及激光跟踪仪靶球。通过多传感器协同并配合外部激

光跟踪仪,系统能够实现大型轴类零件直径的自动化在位测量,其工作原理如图1所示。

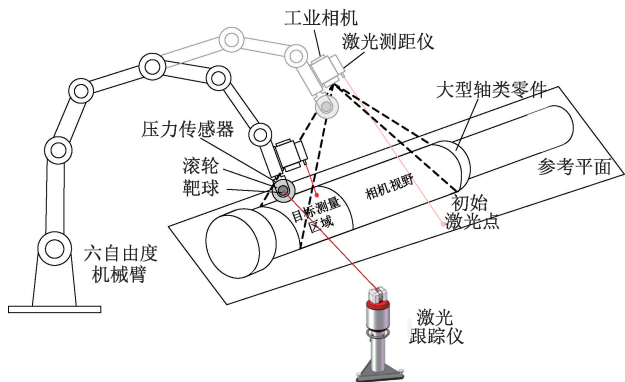


图1 视觉引导与激光跟踪的大型轴类零件直径测量系统工作原理示意图

Fig.1 Schematic of the working principle of a vision-guided and laser-tracking diameter measurement system for large-scale shafts

其核心工作流程为:

1) 视觉引导与预对准:系统首先利用工业相机获取待测轴段的全局图像信息,通过语义分割与特征提取构建目标测量区域。随后,采用IBVS策略,识别并锁定激光测距仪投射点在图像中的位置,通过闭环引导驱动机械臂末端,确保激光投射点稳定进入目标测量区域,完成测量前的空间预对准。

2) 多信息融合与末端逼近:在空间预对准基础上,系统融合工业相机捕获的二维图像特征与点式激光测距仪反馈的实时距离数据,通过坐标变换解算出目标轴段的轴线矢量、激光投射点的三维空间坐标及其局部外法向。基于上述几何约束,系统进一步推算测量滚轮在目标接触点处的期望位姿。随后,利用迭代闭环控制算法驱动机械臂末端带动测量滚轮逐步向零件表面逼近。在此过程中,集成于末端的压力传感器对接触状态进行实时监测;当感知的接触力达到预设压力阈值时,系统判定滚轮与零件表面已建立稳定的物理接触条件,为后续的精密坐标采集提供基准。

3) 精密坐标采集与直径解算:在稳定的接触状态下,利用激光跟踪仪高精度追踪置于滚轮上的靶球,实时采集测点的三维空间坐标。上位机作为核心处理单元,负责调度多源传感器信息并执行运动控制指令,最终通过圆柱拟合算法对多点采样数据进行几何建模,实现对待测轴段直径的精密解算。

1.2 视觉引导滚轮-零件迭代逼近与接触控制

1) 融合时间先验的轴类零件目标测量区域构建

针对工业现场中光照波动、镜面反射与遮挡等干扰

因素易导致单帧分割结果出现抖动与身份跳变的问题^[2],以及IBVS在迭代过程中因视角持续变化而引起的目标测量区域在图像平面内迁移的挑战^[12,14],为降低分割不稳定与视角变化对控制环节的干扰,本文提出一种在图像平面内自适应维护可见且具有安全裕度的目标测量区域方法,并将该区域定义为感兴趣区域(region of interest, ROI)。该方法结合时间先验进行在线更新,确保后续误差计算与梯度求解始终处于噪声较低、边界明确的子区域内,为后续基于势场驱动的IBVS预对准提供稳定的几何参考。

首先,基于当前帧语义分割结果构建用于控制与度量的ROI。当相机视野中仅含单段轴实例时,为实现不同区域的直径测量,首先依据掩膜边界点云的协方差矩阵主特征向量估计图像中的主轴方向,将掩膜的点沿该方向进行一维投影,并通过分位数阈值将投影区间划分为3个子段,分别对应靠近支撑端、中部和远端的3个候选子掩膜。操作者选定待控制的分区后,在该分区内施加内部厚度约束,并进行一次半径为 r_s 的形态学腐蚀操作以收缩边界,最终得到用于计算误差与梯度的子区域 Ω 。

当相机画面存在直径不同的多段轴实例时,记图像像素网格为 G ,目标轴段掩膜为 M ,其补集为 M^c ,其余轴段实例合并为 M_o 。在每个像素上分别计算其到 M^c 与 M_o 的欧氏距离^[12],用以表征该像素到自身边界的内部厚度以及到其他实例的最小间隙。随后,在候选区域上同步施加内部厚度下限与外部间隙下限约束,仅保留那些远离自身边界且与其他实例保持安全距离的像素,构成最终的ROI。

2) 势场驱动的IBVS预对准

预对准阶段基于前文构建的ROI,采用势场驱动的IBVS控制方法对激光投射点进行伺服引导,以确保其始终位于轴体轮廓内部且远离边缘,保障激光在有效量程内工作,从而为后续三维测量提供稳定基准。具体实现上,在每帧ROI中基于符号距离函数(signed distance function, SDF)构建势场,并据此定义尺度无关的任务误差。

记ROI为 R_i ,在图像像素网格 G 上分别对集合 R_i 及其补集进行欧氏距离变换,得到像素点 $\mathbf{x}$ 到 R_i 补集的最近距离 $d_i^+(\mathbf{x})$ 和到 R_i 的最近距离 $d_i^-(\mathbf{x})$ 。据此定义符号距离函数:

$$s_i(\mathbf{x}) = d_i^+(\mathbf{x}) - d_i^-(\mathbf{x}) \quad (1)$$

其中, $s_i > 0$ 和 $s_i < 0$ 分别表示点 $\mathbf{x}$ 位于 R_i 内部和外部,边界附近 $s_i \approx 0$ 。

令 $\mathbf{x}_1$ 为当前帧激光点像素位置,取 s^* 为参考符号距离,定义归一化裕度:

$$m_i = \min\left(\frac{s_i(\mathbf{x}_L)}{s^*}, 1\right) \quad (2)$$

预对准任务误差定义为:

$$e_i = m^* - m_i \quad (3)$$

式中: m^* 为期望的归一化目标裕度。

误差 e_i 的构建具有尺度无关性。离散实现中,对误差 e_i 施加一阶低通平滑以抑制分割噪声与抖动。

为使激光点的归一化裕度 m_i 逐渐收敛并稳定在期望目标值 m^* ,需控制相机沿成像平面内由符号距离函数在激光点处的梯度 $\nabla s_i(\mathbf{x}_L)$ 所确定的方向运动,其运动速度由平滑处理后的任务误差经比例反馈生成,并受限于预设的幅值约束。该运动速度可表示为:

$$\mathbf{v}_e = -k_p \cdot \text{sat}(e_i) \cdot \frac{\mathbf{K}^{-1} \nabla s_i(\mathbf{x}_L)}{\|\mathbf{K}^{-1} \nabla s_i(\mathbf{x}_L)\| + \varepsilon} \quad (4)$$

式中: k_p 为比例增益; $\text{sat}(\cdot)$ 为限幅函数; $\mathbf{K}$ 为相机内参矩阵; ε 为防止除数为零的极小量。

相机速度经手眼变换及机器人运动学链传递至机械臂的基坐标系后,采用阻尼最小二乘法(damped least squares, DLS)求相应的关节速度,并在对关节速度及其积分步长进行限幅处理后,更新关节状态。当误差 e_i 连续多帧满足 $e_i \leq 0$ 时,判定预对准完成,此时系统已满足激光测距模块输出有效三维坐标所需的最小几何条件,进而转入轴向估计与迭代逼近阶段。

3) 基于线特征的轴向估计与迭代逼近

在轴向估计阶段,需从图像中稳健提取轴类零件的边缘线特征^[9],以准确估计其几何轴向,从而为机械臂提供安全、渐进的位姿逼近所需的几何约束与引导信息。

针对零件表面强反光与复杂背景易引入的伪边缘干扰问题^[17],为实现边缘线的稳健提取,本文在分割先验约束下构造受限带状区域。在该区域内,首先通过定向去噪并结合 Canny 算法提取候选边缘点^[25],再采用概率霍夫变换进行几何一致性筛选,以抑制背景噪声。对于筛选后的候选点集,本文采用迭代重加权最小二乘法(iteratively reweighted least squares, IRLS)进行鲁棒直线拟合^[26],并在此基础上进一步构造双边联合优化模型,以提高两侧边缘估计的稳定性与几何一致性。

具体而言,设参与边缘线拟合的候选像素点齐次坐标为 $\mathbf{x} = [u, v, 1]^T$,待拟合的两条边缘线表示为 $\mathbf{l}_i = [a_i, b_i, c_i]^T$, ($i = 1, 2$),则点 $\mathbf{x}$ 到边缘线 $\mathbf{l}_i$ 的代数残差为 $\mathbf{l}_i^T \mathbf{x}$ 。当满足归一化条件 $\sqrt{a_i^2 + b_i^2} = 1$ 时, $\mathbf{l}_i^T \mathbf{x}$ 可表征点到直线的有符号几何距离。

在理想无噪声条件下,单条边线拟合可表述为点到直线残差平方和最小。考虑到实际图像中反光、遮挡及复杂背景会引入伪边缘与离群点,普通最小二乘易导致

拟合偏移。为提高鲁棒性,本文引入 Tukey 双平方损失函数 $\rho(\cdot)$ 对残差进行抑制。

进一步,考虑到边缘点图像质量的差异性及归属的不确定性,本文为候选点引入联合权重。首先定义复合权重 $w(\mathbf{x})$,用于衡量像素点本身的可靠度,其由边缘显著性、结构稳定性、抑光性能及时序一致性 4 个子权重融合而成:

$$w(\mathbf{x}) = w_{\text{sal}}(\mathbf{x}) \cdot w_{\text{str}}(\mathbf{x}) \cdot w_{\text{ill}}(\mathbf{x}) \cdot w_{\text{time}}(\mathbf{x}) \quad (5)$$

式中:边缘显著性权重 $w_{\text{sal}}(\mathbf{x})$ 用于突出梯度响应明显的候选点,定义为:

$$w_{\text{sal}}(\mathbf{x}) = \exp(-(1 - S(\mathbf{x}))^2 / 2\sigma_{\text{sal}}^2) \quad (6)$$

式中: $S(\mathbf{x})$ 为像素点 $\mathbf{x}$ 处的边缘显著性值; σ_{sal} 为控制边缘显著性权重变化范围的参数。

结构稳定性权重 $w_{\text{str}}(\mathbf{x})$ 用于表征局部区域的线性结构强弱。设像素点邻域结构张量的两个特征值 λ_1 和 λ_2 满足 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq 0$,则定义:

$$w_{\text{str}}(\mathbf{x}) = \exp(-(1 - \lambda_2 / \lambda_1)^2 / 2\sigma_{\text{str}}^2) \quad (7)$$

抑光性能权重 $w_{\text{ill}}(\mathbf{x})$ 用于削弱强反光区域对拟合结果的干扰,定义为:

$$w_{\text{ill}}(\mathbf{x}) = \exp(-(I(\mathbf{x}) - I_{\text{avg}})^2 / 2\sigma_{\text{ill}}^2) \quad (8)$$

式中: $I(\mathbf{x})$ 表示像素点 $\mathbf{x}$ 的灰度值; I_{avg} 为局部区域平均灰度; σ_{ill} 为控制抑光性能权重变化范围的调节参数。

时序一致性权重 $w_{\text{time}}(\mathbf{x})$ 用于增强边线结果的帧间连续性,抑制时序抖动。记上一有效帧边线为 $\hat{\mathbf{l}}_{t-1}$,则可定义:

$$w_{\text{time}}(\mathbf{x}) = \exp\left(-\frac{(\hat{\mathbf{l}}_{t-1}^T \mathbf{x})^2}{2\sigma_{\text{time}}^2}\right) \quad (9)$$

式中: σ_{time} 为时序一致性调节参数。该定义表明,当候选点更接近上一有效帧边线时,其权重更高。

除复合权重外,为描述候选点对左右两条边线的归属模糊性,进一步引入软分配系数 $\pi_i(\mathbf{x})$,采用 Softmax 函数定义为:

$$\pi_i(\mathbf{x}) = \frac{\exp(-|\mathbf{l}_i^T \mathbf{x}|/\tau)}{\sum_{j=1,2} \exp(-|\mathbf{l}_j^T \mathbf{x}|/\tau)}, \quad i = 1, 2 \quad (10)$$

式中: τ 为平滑参数。将上述软分配系数与复合权重共同引入鲁棒损失函数,可得到第 i 条边线对应的单侧加权鲁棒拟合项:

$$E_i = \sum_{\mathbf{x} \in P_i} \rho\left(\frac{\sqrt{\pi_i(\mathbf{x})} \sqrt{w(\mathbf{x})} \mathbf{l}_i^T \mathbf{x}}{\sigma}\right), \quad i = 1, 2 \quad (11)$$

式中: P_i 表示与第 i 条边线相关联的候选点集; σ 为损失函数 $\rho(\cdot)$ 的中位绝对偏差估计稳健尺度因子。

进一步地,考虑到轴类零件两侧轮廓在局部区域内近似平行,本文引入法向一致性先验。设两条边缘线的法向量分别为 $\mathbf{n}_1$ 和 $\mathbf{n}_2$,通过二范数约束其方向差异。最终,双直线联合优化模型的目标函数表示为:

$$\begin{cases} J(l_1, l_2) = \sum_{i=1,2} \sum_{x \in P_i} \rho \left(\frac{\sqrt{\pi_i(x)} \sqrt{w(x)} l_i^T x}{\sigma} \right) + \\ \lambda \|n_1 - n_2\|^2 \\ (l_1^*, l_2^*) = \arg \min_{l_1, l_2} J(l_1, l_2) \end{cases} \quad (12)$$

式中: λ 为法向一致性约束权重。式(12)第2式给出使式(12)第1式目标函数取最小值的两侧边线最优解。

为保证线特征在时序上的稳定性,设置有效边缘覆盖率、拟合残差及相邻帧法向变化3项质量控制(quality control, QC)阈值。仅当三者均满足预设条件时,当前帧提取的边线方可用于后续的轴向估计与位姿解算;否则,系统将沿用上一有效帧的边线结果。

在获得稳定的成对边线后,将其反投影至相机光心,可分别确定与零件圆柱面相切的两个平面,两平面的交线即为零件轴线在相机坐标系C下的方向:

$$a_c = n_{p_1} \times n_{p_2} \quad (13)$$

式中: $n_{p_i} = K^T l_i$ 为切平面法向。

基于估计的轴向,并参考约定方向统一外法向符号后,设定工具坐标系的 z 轴与圆柱外法向一致, y 轴与轴向平行,再依据右手定则确定 x 轴,由此得到期望的接触姿态 R_B^* 。

确定接触姿态后,利用激光测距数据反投影,得到接触点在相机坐标系下的位置 P_C ,再通过手眼标定与机器人正运动学转换至基座标系,得到接触点位置 $P_B^{[2]}$ 。为避免末端滚轮直接贴近引起碰撞,并为建立可控的逼近起点,沿外法向设置退避距离 d ,生成预停靠点 P_B^* 。结合 P_B^* 与 R_B^* ,即可构成当前迭代轮次的目标位姿 T_B^* 。迭代过程中,每轮首先执行IBVS预对准,使激光点回到ROI内,随后更新目标位姿。基于DLS伺服框架,通过位姿残差求解关节速度增量,实现位姿的闭环修正^[13]。迭代在姿态与位置误差均低于设定阈值,或达到最大迭代次数时终止。若视觉失效,系统切换至本节第4)部分所述的姿态锁定与力联锁策略,以保障接触过程的安全与稳定。

4) 视觉失效下的安全接触控制与联锁

在近场逼近阶段,为解决因边线特征退化与图像分割失稳所导致的视觉失效问题,本文设计了一种基于姿态锁定的接触模式转换机制,以实现从视觉闭环迭代到安全接触推进的平滑过渡。该模式转换以下任一条件触发:(1)迭代收敛失败,即连续多帧提取的线特征均不满足第3)部分所述的QC判据;(2)安全距离阈值触发,即末端滚轮中心到目标接触点的距离小于设定的视觉安全阈值。当满足任一触发条件时,系统将立即锁定最近一帧有效视觉数据解算出的零件轴向与外法向,并据此固定滚轮接触姿态,确保滚轮轴线与零件轴向始终保持精确对齐。在姿态锁定模式下,滚轮仅沿锁定的内法向,以

自适应小步长缓慢推进,从而在视觉引导不可靠的情况下,仍能安全、稳定地逼近零件表面。此外,系统引入压力传感器作为硬件安全联锁单元^[3]。一旦传感器检测到接触信号,系统立即控制机械臂紧急停止,并利用激光跟踪仪采集安装在滚轮上的靶球三维坐标,将该点记录为最终的精确测量点。

1.3 基于激光跟踪的多点坐标测量与圆柱直径拟合

为获取轴类构件的几何尺寸,本文采用一种轴向-切向二维网格规划的多点接触测量方法。首先在目标轴段的圆柱面上构建二维测量网格,并在网格的各节点依次执行1.2节所述的视觉引导接触控制流程,从而获取一组覆盖待测区域的离散接触点坐标^[15]。如式(14)所示,激光跟踪仪在各接触位姿下采集机械臂末端靶球中心的三维坐标,形成用于圆柱面拟合的离散点集。由于该点集在圆柱表面上分布稀疏,常规的点云拟合方法在此条件下易导致直径估计结果波动较大。为此,本文采用角度投影法对拟合过程进行优化,以提升直径估计的稳健性与精度。该方法首先在单位球面上进行均匀旋转采样,生成一组均匀分布的单位方向向量,构成候选的轴线方向集合:

$$\begin{cases} x_{j,\ddot{j}} = \sin(\phi_j) \cos(\theta_{\ddot{j}}) \\ y_{j,\ddot{j}} = \sin(\phi_j) \sin(\theta_{\ddot{j}}) \\ z_{j,\ddot{j}} = \cos(\phi_j) \end{cases} \quad (14)$$

式中: $j = 1, 2, 3, \dots, N$ 和 $\ddot{j} = 1, 2, 3, \dots, M$ 分别为垂直方向和水平方向的采样点数; $\phi_j = \frac{\pi}{2} \times \frac{j}{N}$ 为俯仰角且 $\phi_j \in [0, \frac{\pi}{2}]$; $\theta_{\ddot{j}} = 2\pi \times \frac{\ddot{j}}{M}$ 为水平角且 $\theta_{\ddot{j}} \in [0, 2\pi)$ 。

在水平角和俯仰角的离散取值区间内,通过对所有角度组合进行遍历,可在单位半球面上均匀生成 $M \times N$ 个方向向量 u ,从而覆盖空间中全部可能的朝向,如图2所示。

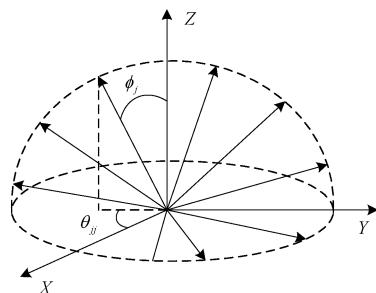


图2 投影范围示意图

Fig. 2 Projection range diagram

针对每个生成的单位方向向量 u_k ,在其正交平面上构建二维局部坐标系,从而生成 $M \times N$ 个投影平面。将

N_s 个三维采样点分别投影至各投影平面后,使用最小二乘法在二维投影点集上拟合圆模型,得到拟合圆心 (x_{0k}, y_{0k}) 和拟合半径 r_k ,定义该投影面的圆度评分 S_k 作为投影误差的度量,其计算公式为:

$$S_k = \sigma_k = \sqrt{\frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} (d_{i,k} - \bar{d}_k)^2} \quad (15)$$

式中: $k = 1, 2, 3, \dots, M \times N$ 表示投影平面的序号; $d_{i,k}$ 表示在第 k 个投影平面上,采样点 P_i 的投影点到拟合圆心 (x_{0k}, y_{0k}) 的距离; $\bar{d}_k$ 和 σ_k 分别为所有 $d_{i,k}$ 的均值和标准差,反映了投影点分布于理想圆形的偏离程度。

圆度评分 S_k 越小,表明在该投影平面上点的分布越接近理想圆形,所对应的轴向估计越准确。

选取圆度评分 S_k 最小的投影结果,将其拟合圆心 (x_0, y_0) 、拟合半径 r_0 及对应的方向向量 u_0 作为初始值,

代入目标函数进行圆柱几何参数的精确拟合^[27],即:

$$\begin{cases} E(P_{e0}, U_e, R_e) = \sum_{k=1}^n (\| (P_k - P_{e0}) \times U_e \| - R_e)^2 \\ (P_{e0}^*, U_e^*, R_e^*) = \arg \min_{P_{e0}, U_e, R_e} E(P_{e0}, U_e, R_e) \end{cases} \quad (16)$$

式中: P_k 为采样点; P_{e0} 为圆柱轴线上一点(初始值为 (x_0, y_0) 所对应的三维点); U_e 为圆柱单位轴向向量(初值为 u_0); R_e 为圆柱半径(初始值为 r_0)。式(16)第2式给出了使式(16)第1式取最小值的圆柱参数最优解。

为保证优化过程的数值稳定性并满足单位向量约束,采用信赖域反射算法(trust-region reflective, TRR)进行求解,并在每次迭代中对轴向向量 U_e 进行归一化。直径测量总体流程如图3所示。

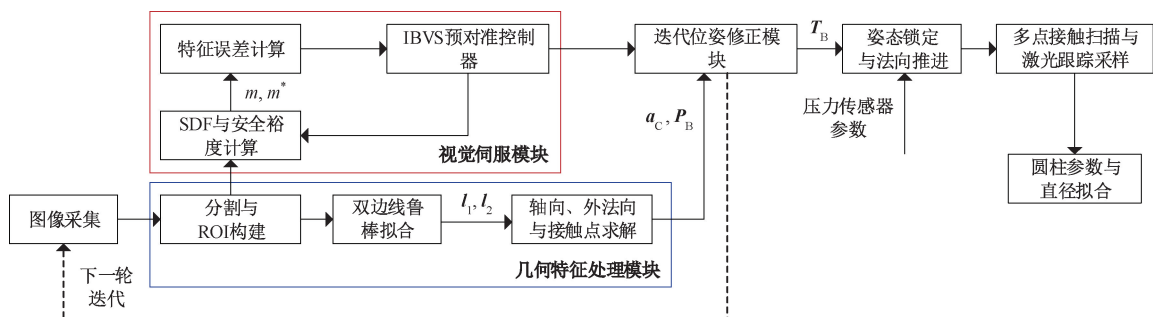


图3 视觉引导的激光跟踪机器人直径测量总体流程

Fig. 3 Overall flowchart of visual-guided laser tracking robot diameter measurement

2 实验验证

实验在自主搭建的重复定位精度为 ± 0.10 mm的六自由度机械臂测量平台上开展,如图4所示。机械臂末端安装滚轮式接触工具,且集成了工业相机(水平视场角 75° ,垂直视场角 50° ,分辨率 $1920 \text{ pixels} \times 1080 \text{ pixels}$)、点式激光测距传感器(量程 $0.03 \sim 40$ m,测量精度 ± 0.05 mm)和压力传感器(量程 $0 \sim 50$ N,灵敏度 0.1 N)。实验过程中,相机持续采集校正后的图像,测距传感器同步获取激光投射点深度信息;上位机在C++/Python环境下融合视觉与测距数据,实时完成位姿解算与控制指令生成,实现机械臂的视觉引导与逼近控制。接触状态由压力传感器判定,接触触发后由激光跟踪仪Leica AT960($U(x, y, z) = \pm 15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m/m}$, $k=2$)记录末端靶球三维坐标,作为后续圆柱直径拟合的测量点。

2.1 IBVS预对准性能分析

在开展基于尺度无关安全裕度的IBVS预对准性能评估之前,首先利用实验采集的200张零件图像对

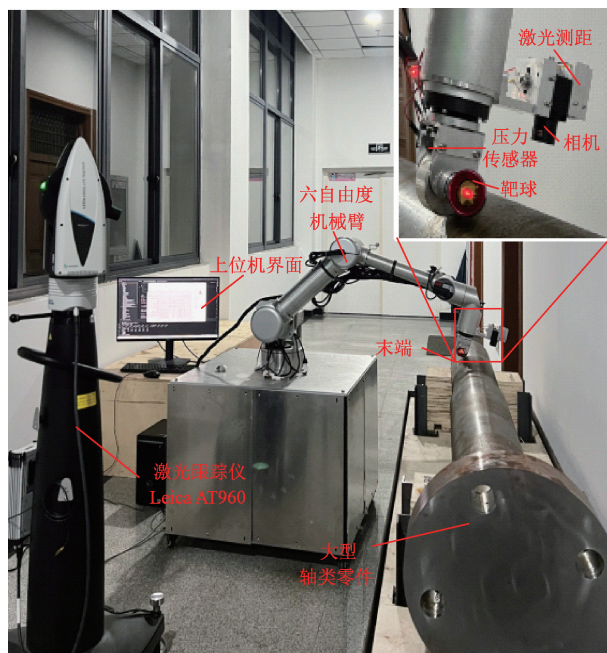


图4 直径测量实验平台

Fig. 4 Diameter measurement test platform

YOLOv8s-seg 分割模型进行训练。实验结果显示,该模型的分割准确率达到 98.4%,可为后续的视觉伺服任务提供可靠的感知。随后,本文选取一次典型工况进行基于尺度无关安全裕度的 IBVS 预对准性能评估,该过程中激光点由轴体外侧收敛至安全工作域。图 5 展示了其安全裕度 m 、目标裕度 m^* 及任务误差 e 随迭代步数 $Step$ 的变化曲线,对应关键帧图像见图 6。在图 5 中,目标裕度 m^* 恒定为 1.0, m 从初始负值单调上升,在迭代中期迅速趋近 1.0,并在 $Step \geq 6$ 后与 m^* 基本重合;任务误差 e 则从 1.095 单调衰减,在 m 快速上升阶段急剧下降,并最终收敛至 0。整个曲线呈现平稳收敛趋势,未出现明显振荡或超调。

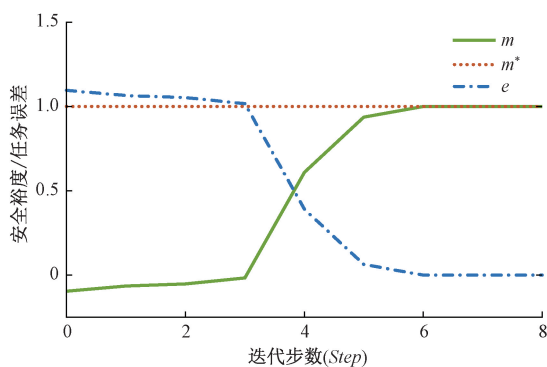


图5 安全裕度 m 与任务误差 e 的收敛曲线

Fig. 5 Convergence curve of safety margin m versus task error e



图6 IBVS 预对准过程关键帧

Fig. 6 Key frames in the IBVS pre-alignment process

图6中的关键帧进一步说明了该过程:当 $Step = 0$

时,激光投射点明显处于 R_t 之外;经 $Step = 1 \sim 3$ 步迭代,投射点逐步向 R_t 内部靠拢;在 $Step = 4 \sim 5$ 时,投射点跨越 R_t 边界;至 $Step \geq 6$ 后,投射点已稳定位于 R_t 内部,仅存在微小波动。结果表明,基于尺度无关安全裕度的 IBVS 控制律具有良好的收敛性与稳定性。

2.2 边线鲁棒提取与轴向估计精度验证

为验证本文提出的加权鲁棒边线提取方法在零件表面强反光、弱纹理及复杂背景下的有效性,选取一帧典型工况图像进行处理,其完整流程及结果如图 7 所示。具体步骤包括:1)输入经过畸变校正的原始图像,图中轴体表面覆有防护油膜并存在局部镜面反射;2)基于 YOLOv8-seg 分割模型获取轴类实例的像素级掩膜;3)沿掩膜轮廓向内外两侧扩展,构建能够包络上下边缘的非对称窄带区域;4)在窄带内融合灰度抑制、局部对比度增强及方向一致性约束,生成用于边缘加权的权重图;5)在权重图的引导下进行 Canny 边缘检测,提取候选边缘点;6)最后结合权重与法向一致性约束,采用 IRLS 拟合得到工件两侧的成对边线。

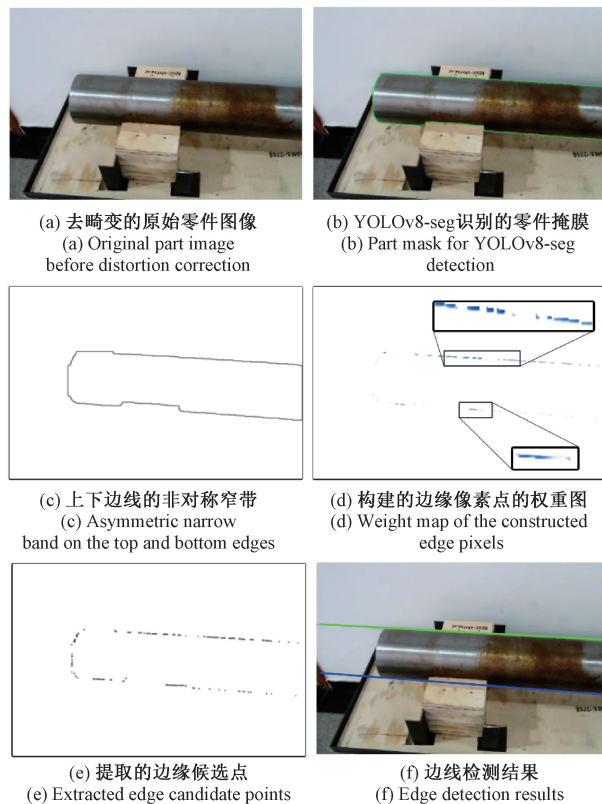


图7 单帧图像边线鲁棒提取处理流程

Fig. 7 Robust edge detection and processing workflow for single-frame images

图8对比了在靠近支撑座轴段、轴体中段及端部法兰3个典型视角下,Canny-Hough(左)、最小二乘拟合(中)与本文加权鲁棒拟合(右)3种方法提取的结果。可

以看出,Canny-Hough 方法在支撑座轴段与高亮反射区域容易出现边线断裂与轮廓偏离;最小二乘拟合虽能保持边线连续性,但在油膜覆盖与台阶过渡区域易受异常边缘干扰,产生明显的拟合偏差;本文方法通过引入窄带内加权机制与法向一致性约束,有效抑制了上述干扰,在各检测段内均获得了更贴合轮廓、方向一致性更优的边线结果。

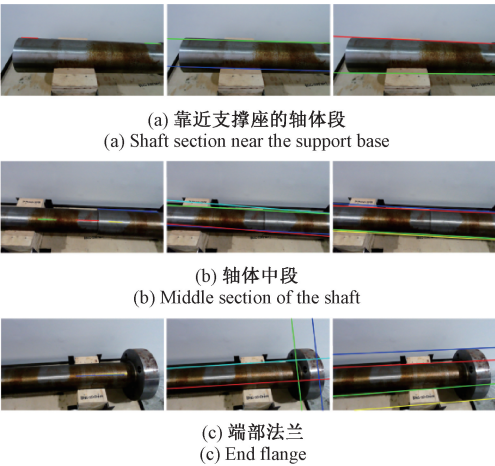


图 8 3 种边线提取方法的检测结果

Fig. 8 Detection results of three edge detection methods

为定量评价上述 3 种方法的几何精度与时序稳定性,本文选取有效边缘覆盖率、拟合残差和法向稳定性作为评价指标。以图 8(c)的非对称窄带为评估区域,各指标定义分别为:

1)有效边缘覆盖率 η_{cov} :用于表征检测边线在评价区域内的覆盖完整度。设有效边缘像素数为 N_{edge} ,评价区域内总像素数为 N_{all} ,则:

$$\eta_{\text{cov}} = \frac{N_{\text{edge}}}{N_{\text{all}}} \tag{17}$$

η_{cov} 越大,表明在测量区域内被连续、有效边线覆盖的比例越高。

2)拟合残差 ε_{rms} :反映检测边线对轴类轮廓的几何贴合精度。设参与直线拟合的边缘点集合为 P_{edge} ,第 i_{edge} 个点到对应拟合直线的垂直距离为 $D_{i_{\text{edge}}}$,定义均方根残差:

$$\varepsilon_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{|P_{\text{edge}}|} \sum_{i_{\text{edge}}=1}^{|P_{\text{edge}}|} D_{i_{\text{edge}}}^2} \tag{18}$$

ε_{rms} 越小,说明边线越接近理想直线。

3)法向稳定性 σ_{θ} :用于衡量由边线解算所得外法向在时间序列上的一致性。记第 kk 帧的单位外法向为 $\mathbf{n}_{kk}$,其与前一帧外法向 $\mathbf{n}_{kk-1}$ 之间的夹角为 θ_k ,令 $\bar{\theta}$ 为连续多帧 θ_k 的均值,则法向稳定性指标定义为:

$$\sigma_{\theta} = \sqrt{\frac{1}{KK-1} \sum_{k=2}^{KK-1} (\theta_k - \bar{\theta})^2} \tag{19}$$

式中: KK 表示用于评估法向稳定性的连续帧数量。

σ_{θ} 越小,表示相邻帧间外法向变化越平缓,时序稳定性越好。

针对图 8 所示的 3 个典型视角,对连续多帧图像分别采用 3 种方法进行边线提取,计算各项指标的多帧平均值,结果如表 1 所示,表 1 中方法 A、B、C 分别代表 Canny-Hough、最小二乘拟合、本文加权鲁棒拟合。

表 1 3 种边线提取方法的性能对比

Table 1 Performance comparison of three edge detection methods

方 法	near support base								
	Shaft section near the support base			Middle section of the shaft			End flange		
	η_{cov}	$\varepsilon_{\text{rms}}/\text{pixels}$	$\sigma_n/(\text{ }^\circ)$	η_{cov}	$\varepsilon_{\text{rms}}/\text{pixels}$	$\sigma_n/(\text{ }^\circ)$	η_{cov}	$\varepsilon_{\text{rms}}/\text{pixels}$	$\sigma_n/(\text{ }^\circ)$
A	0.62	0.45	0.92	0.55	0.53	1.15	0.51	0.57	1.26
B	0.78	0.31	0.67	0.74	0.38	0.82	0.69	0.42	0.91
C	0.86	0.24	0.41	0.89	0.27	0.46	0.83	0.30	0.52

由表 1 可知,本文方法在各视角下的有效边缘覆盖率均为最高,表明其在评价区域内提取的边线更长、连续性更好;本文方法的拟合残差约为 0.30 pixels,低于 Canny-Hough (0.45 ~ 0.57 pixels) 与最小二乘拟合 (0.31~0.42 pixels);在法向稳定性方面,本文方法所得结果约为 Canny-Hough 的一半,即便在油膜与端部结构干扰下仍保持较小波动。

综上,本文提出的加权鲁棒直线拟合方法在边线检测的连续性、几何贴合精度及时序稳定性方面均表现更优,具有更高的综合检测质量与鲁棒性。

2.3 接触过程运动轨迹与直径拟合结果分析

本节从接触过程的轨迹跟踪性能与直径测量精度两个方面对系统进行综合评估。在一次完整的接触实验中,记录了从视觉预判启动到接触触发全过程中,机械臂末端在基坐标系下的期望轨迹与实际运动轨迹。图 9 对比了 x 、 y 、 z 这 3 个方向上的位置跟踪情况(其中,标记 d 的曲线表示期望轨迹)。可以看出,末端在 x 轴方向呈近似单向平移,在 y 轴方向位置基本保持稳定,在 z 轴方向实现平滑进给,且实际轨迹与期望轨迹吻合良好,未出现明显振荡或超调。

表 2 列出了各轴位置跟踪误差的均方根值 (root mean square error, RMSE)。其中 z 轴误差略大,这与接触阶段主要沿零件表面法向推进的运动特性相符;整体跟踪误差处于较低水平,能够满足后续直径拟合对点位精度的要求。

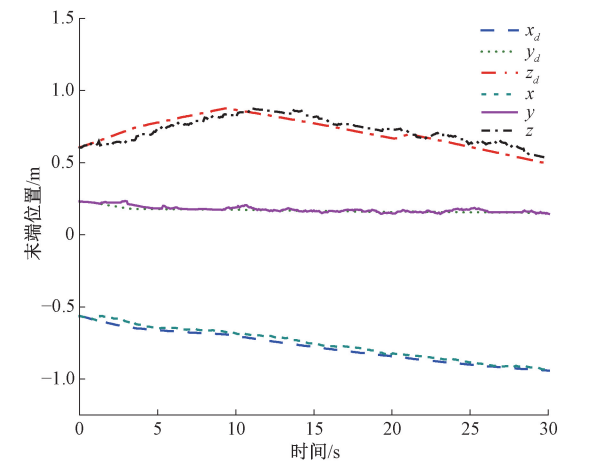


图9 接触过程中机械臂末端期望轨迹与实际轨迹对比

Fig.9 Comparison of the desired trajectory and actual trajectory of the robotic arm's end effector during contact

表2 接触过程末端位置均方根误差

Table 2 Root mean square error at the end position of the contact process	
坐标分量	RMSE/mm
x	5.603
y	9.800
z	16.170

在完成轨迹跟踪评估后,为验证基于多点接触采样的圆柱直径拟合性能,对大型轴类零件的3段直径不同的轴段进行了测量实验;每段轴体单次采集15个测量点坐标,在相同条件下独立重复5次,并采用本文的圆柱拟合算法求解轴线与直径参数。图10展示了3段轴体的点云及圆柱拟合结果(图中选取了拟合残差最小的一组点云进行可视化)。可以看出,各段测量点在其对应圆柱表面的一定弧度范围内分布较为均匀,拟合出的圆柱面与点云贴合良好,且3段拟合出的轴线在空间上呈现出良好的连续性。

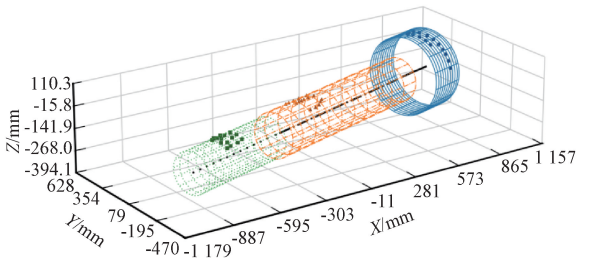


图10 3段轴体测量点云及圆柱拟合结果

Fig.10 Measurement point cloud and cylindrical fitting results for the three-segment shaft body

表3进一步统计了3段轴体在5次重复实验中的直径拟合结果,包括均值、标准差及其与零件标称直径的偏差,并与商用软件PolyWorks的拟合结果进行了对比。结果显示,本文方法在3段轴体上得到的直径均值与PolyWorks拟合结果高度一致,最大差值不超过0.0003mm;相对于标称直径,3段轴体直径的绝对偏差分别为0.1736、0.2359和0.1087mm,最大绝对偏差小于0.2400mm;5次重复测量的直径标准差均小于0.1800mm,表现出良好的测量重复性。

结合图10的可视化结果与表3的定量数据可知,即使在测量点云较为稀疏的条件下,本文方法仍能实现较高的直径拟合精度与良好的重复性,能够为本文圆柱拟合算法的有效性 with 稳定性提供支撑。

表3 5次重复实验直径拟合结果对比

Table 3 Comparison of diameter fitting results from five replicate experiments (mm)

轴段	方法	拟合直径均值	与标称直径偏差	标准差
靠近支撑座轴体段	PolyWorks	179.8264	-0.1736	0.1722
	本文方法	179.8264	-0.1736	0.1721
轴体中段	PolyWorks	200.2362	0.2362	0.1419
	本文方法	200.2359	0.2359	0.1420
端部法兰	PolyWorks	399.8912	-0.1088	0.1584
	本文方法	399.8913	-0.1087	0.1584

表4对比了本文方法与千分尺在3个典型轴段的直径测量结果。实验以高精度千分尺(测量精度为0.001mm)的实测值作为参考基准,测量结果取各轴段5次重复测量的均值,并据此开展对比分析。结果表明,本文方法测得的直径结果与千分尺实测值具有较好一致性。在靠近支撑座轴体段、轴体中段及端部法兰这3处,直径测量的绝对误差分别为0.0936、0.1859和0.0767mm,最大绝对误差控制在0.1900mm以内;对应的最大相对误差仅为0.093%。实验数据表明,该测量方法拥有可靠的测量精度,能够满足实际工程中对大尺寸轴类零件的直径检测需求。

为评估系统的工程实用性,对单次测量任务中的5个核心算法模块进行了耗时分析。实验在统一硬件平台上连续运行100次并取平均值,以规避偶然误差的影响,统计结果详见表5。

表 4 本文方法与千分尺直径测量结果的对比

Table 4 Comparison of diameter measurement results between the proposed method and the micrometer

轴段	千分尺测量值/mm	本文方法测量值/mm	绝对误差/mm	相对误差/%
靠近支撑座轴体段	179.920 0	179.826 4	0.093 6	0.052
轴体中段	200.050 0	200.235 9	-0.185 9	-0.093
端部法兰	399.968 0	399.891 3	0.076 7	0.019

表 5 主要算法模块运行时间统计

Table 5 Runtime statistics of main algorithm modules

模块	平均耗时/ms
语义分割与 ROI 更新	38.6
边缘提取与鲁棒拟合	14.2
接触位姿解算	6.8
控制指令更新	4.7
圆柱拟合	5.9

结果显示,单次闭环流程(前 4 个模块)的累计耗时为 64.3 ms,等效刷新频率约为 15.6 Hz。其中,语义分割与 ROI 更新模块的计算开销最大,达 38.6 ms;相比之下,位姿解算与指令更新等几何计算模块耗时均控制在 7 ms 以内。此外,后续圆柱拟合计算仅需 5.9 ms。实验数据表明,该系统的算法效率能够满足复杂工况下大型轴类零件稳定闭环调节与在线测量的实时性需求。

2.4 测量不确定度分析

根据上述轴类零件测量原理,直径测量不确定度可表示为:

$$u(D) = \sqrt{\Delta D_{\text{fit}}^2 + \Delta D_{\text{align}}^2 + \Delta D_{\text{struc}}^2}$$
 (20)

式中: ΔD_{fit} 表示圆柱直径拟合误差; ΔD_{align} 表示接触姿态对准偏差引入的测量误差; ΔD_{struc} 表示滚轮结构偏差引入的测量误差。

直径拟合精度受激光跟踪仪采样点的空间坐标误差与点集几何分布规律的共同影响。通常,基于 N 个采样点的圆柱拟合误差可由式(21)估算,即:

$$\Delta D_{\text{fit}} = \pm k \cdot \frac{u_p}{\sqrt{N}}$$
 (21)

式中: u_p 为采样点的空间位置标准差; k 为拟合放大系数(取值范围通常为 1.5~4)。实验条件下,对于直径为 180、200 和 400 mm 的 3 段轴径,采样点与激光跟踪仪的平均距离分别为 3.786、3.131 和 2.139 m,对应的测量标准差 u_p 分别为 0.037 7、0.033 8 和 0.027 8 mm。当 k 取 4 时,3 段直径的拟合误差 ΔD_{fit} 分别约为 ± 0.039 0、 ± 0.034 9 和 ± 0.028 7 mm。

接触姿态对准误差主要源于视觉法向估计偏差与执行器末端运动误差,最终表现为实际法向相对于理想径向的偏离。若滚轮实际法向与理想接触法向之间的倾角误差为 θ ,则其引入的直径误差 ΔD_{align} 可表示为:

$$\Delta D_{\text{align}} = 2R_r(1 - \cos \theta)$$
 (22)

式中: R_r 为滚轮名义半径(取 55.17 mm)。结合实验平台的物理约束,倾角误差 θ 在实际测量中通常分布在 $\pm 2.5^\circ \sim \pm 3.5^\circ$ 范围,对应的直径误差约为 0.105~0.206 mm。该项误差达到 10^{-1} mm 量级,是制约系统最终测量精度的主要因素。

此外,滚轮结构偏差 ΔD_{struc} 主要由滚轮直径加工偏差(± 0.05 mm)和靶球安装偏差(± 0.010 mm,映射至直径偏差约 ± 0.020 mm)构成,两者对直径测量精度的合成影响约为 0.054 mm。

因此,综合上述各项直径测量不确定度影响因素,本文所设计方法的直径测量不确定度变化区间约为 0.121~0.216 mm,与表 3 和 4 所示测量结果基本一致。此外,根据上述分析,接触姿态的法向倾角误差是影响系统精度的关键因素。后续研究将重点引入六维力/力矩传感器以构建力/位混合控制策略,从物理接触层面减小姿态偏差,从而进一步提升测量精度。

3 结 论

本文针对大型轴类零件在位直径测量自动化与高精度的需求,提出了一种视觉引导与激光跟踪的机器人测量方法,建立了从视觉预对准、位姿迭代逼近、多点接触扫描采样及直径拟合的全流程闭环系统。实验结果表明,在强反光、大初始姿态偏差等复杂工况下,系统能稳定地完成不同轴段的多点采样任务,所得直径拟合结果与标称值的绝对偏差最小为 0.108 7 mm,重复测量标准差小于 0.180 0 mm。

尽管本文方法在实验室条件下表现出较好的稳定性与测量一致性,但面向工业现场应用仍存在进一步提升空间。首先,本文实验主要在实验室走廊环境完成,对于机械振动、粉尘污染及环境光波动等复杂工况下系统稳定性的验证仍不充分,后续需围绕动态扰动下的视觉测量补偿及多源信息融合方法开展研究,以提升系统环境适应性及鲁棒性。其次,为进一步提高测量精度和系统稳定性,仍需对测量链各环节开展更深入的误差灵敏度分析,并围绕末端测量单元的结构刚度、装配一致性及系统误差补偿模型进行优化设计。最后,针对工业现场自动化测量需求,后续可进一步研究测量任务规划、自动路径生成方法,以提升系统的自动部署与连续测量能力。总体而言,本文工作为大型轴类零件的快速在位尺寸评估与自动化测量提供了可行的技术途径。

参考文献

- [1] ZHAO F Y, TANG H Y, ZOU X R, et al. A review of optical metrology techniques for advanced manufacturing applications[J]. *Micromachines*, 2025, 16(11): 1224.
- [2] 章家威,李昊冉,罗天慧,等. 融合多组双目视觉系统的管道尺寸测量技术研究[J]. *电子测量技术*, 2023, 46(6): 137-146.
- ZHANG J W, LI H R, LUO T H, et al. Research on the external size measurement for industrial pipes using multi-group binocular vision system[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2023, 46(6): 137-146.
- [3] AN H J, KONG L B, CAI ZH X. Improving laser triangulation measurement on specular surfaces via modified U-net and padding-based centre extraction[J]. *Measurement*, 2025, 255: 118074.
- [4] GONG J X, SONG Q H, FU H, et al. Systematic error reduction in laser triangulation OMM: A study on measurement parameters and compensation techniques[J]. *Measurement*, 2025, 247: 116802.
- [5] DAI G H, ZHANG Q Q, XU X Y, et al. A calibration method of line-structured light system for measuring outer circle dimension during machining [J]. *Results in Engineering*, 2024, 23: 102525.
- [6] SUN J H, DING D L, CHENG X Q, et al. Calibration of line-structured light vision sensor based on free-placed single cylindrical target [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 152: 106951.
- [7] WU Z J, ZHANG Z M, WU Y N, et al. Calibration of the line-structured light measuring system by combining a cylinder target and four coplanar control points [J]. *Measurement*, 2026, 257(Part A): 118628.
- [8] 黄喆,王浩森,胡成军,等. 基于双线激光基准的盾尾间隙测量方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(7): 85-92.
- HUANG ZH, WANG H S, HU CH J, et al. Research on the measurement method of shield tail clearance based on double line laser datum[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(7): 85-92.
- [9] LI CH F, XU X P, LIU S Y, et al. A method for measuring shaft diameter based on light stripe image enhancement[J]. *Sensors*, 2024, 24(1): 303.
- [10] ZHAO H Y, LIU X J, WANG SH, et al. An enhanced centerline extraction algorithm for complex stripes in linear laser scanning measurement[J]. *Precision Engineering*, 2024, 91: 199-211.
- [11] BO Q L, HOU B, MIAO Z J, et al. Laser stripe center extraction method base on Hessian matrix improved by stripe width precise calculation[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2024, 172: 107896.
- [12] JIANG H, FU W J, ZHANG X M, et al. Extraction of laser stripe centerlines from translucent optical components using a multi-scale attention deep neural network[J]. *Measurement Science and Technology*, 2024, 35(8): 085404.
- [13] ZHONG K F, XU J X, GONG T, et al. Hand-eye calibration method for a line structured light robot vision system based on a single planar constraint[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2025, 91: 102825.
- [14] 王志永,于宇,王武越,等. 基于改进 Steger 算法流程的线激光中心提取[J]. *电子测量技术*, 2023, 46(1): 84-89.
- WANG ZH Y, YU Y, WANG W Y, et al. Line laser center extraction based on improved Steger algorithm[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2023, 46(1): 84-89.
- [15] HESHMATI-ALAMDARI S, SHARIFI M, KARRAS G C, et al. Control barrier function based visual servoing for mobile manipulator systems under functional limitations[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2024, 182: 104813.
- [16] HAQ I U, CARNI D L, LAMONACA F. Intelligent robotic positioning through AI-enhanced metrology: Integration of standards, sensor fusion, and adaptive calibration[J]. *Acta IMEKO*, 2025, 14(3): 1-14.
- [17] ROBIC M, FRAISSE R, MARCHAND E, et al. QP-based visual servoing under motion blur-free constraint[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2024, 9(10): 8738-8745.
- [18] GILL C, HAYNES A, JUSTHAM L, et al. A novel robot-assisted calibration procedure for optical coordinate measuring systems based on triangulation of a single ball bar artefact[J]. *Precision Engineering*, 2025, 96: 55-64.
- [19] CHEN T H, YANG W Y, LI SH, et al. Data-driven calibration of industrial robots: A comprehensive survey[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2025, 12(8): 1544-1567.
- [20] 郭隆强,何赞泽,杜旭,等. 基于视觉修正的激光雷达体积测量方法[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(10): 48-59.
- GUO L Q, HE Y Z, DU X, et al. Volumetric measurement of Lidar based on visual correction [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(10): 48-59.
- [21] 王卓群,谢福贵,解增辉,等. 机器人化装备测量-加

工一体化技术现状及展望[J]. 机器人,2024,46(1): 118-128.

WANG ZH Q, XIE F G, XIE Z H, et al. Technical status and prospect of measurement and machining integration technology for robotized equipment [J]. Robot, 2024, 46(1): 118-128.

[22] AN H J, KONG L B, XU M, et al. A modified multi-exposure fusion method for laser measurement of specular surfaces [J]. Optics Communications, 2023, 545: 129627.

[23] 蒋欣怡, 乔贵方, 聂新港, 等. 基于拉线传感器的位姿测量及精度补偿方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2025, 39(5): 59-66.

JIANG X Y, QIAO G F, NIE X G, et al. Research on the pose measurement and accuracy compensation method based on draw-wire sensors [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2025, 39(5): 59-66.

[24] HUTCHINSON S, HAGER G D, CORKE P I. A tutorial on visual servo control [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1996, 12(5): 651-670.

[25] CANNY J. A computational approach to edge detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, 8(6): 679-698.

[26] HOLLAND P W, WELSCH R E. Robust regression using iteratively reweighted least-squares [J]. Communications in Statistics-Theory and Methods, 1977, 6(9): 813-827.

[27] LUKÁCS G, MARTIN R, MARSHALL D. Faithful least-squares fitting of spheres, cylinders, cones and tori for reliable segmentation[C]. Computer Vision — ECCV'98, 1998: 671-686.

作者简介



陈本永,2000 年于浙江大学获得博士学位,现为浙江理工大学教授,博导。主要研究方向包括纳米位移测量与仪器、微纳驱动及精密测控技术。

E-mail:chenby@zstu.edu.cn

Chen Benyong received his Ph.D. degree from Zhejiang University in 2000. He is currently a professor and Ph.D. supervisor at Zhejiang Sci-Tech University. His main research interests include nanometer displacement measurement and instruments, micro-actuators, and precision measurement and control technology.



严利平(通信作者),2000 年、2003 年分别于重庆大学分别获得学士和硕士学位,2014 年浙江理工大学获得博士学位,现为浙江理工大学教授,博士生导师。主要研究方向为光学精密测量技术、智能光电信息处理技术。

E-mail:yanliping@zstu.edu.cn

Yan Liping (Corresponding author) received her B.Sc. and M.Sc. degrees both from Chongqing University in 2000 and 2003, respectively, her Ph.D. degree from Zhejiang Sci-Tech University in 2014. She is currently a professor and Ph.D. supervisor at Zhejiang Sci-Tech University. Her main research interests include optical precision measurement technology and intelligent optical-electronic information processing.