

文章编号: 1002-1582(2026)04-0452-07

基于单目旋转视觉的几何公差评定方法研究

吴恩启*, 于贵邦, 刘琪, 卢鼎
(上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093)

摘 要: 针对单目相机在几何公差测量中面临的深度信息缺失与抗噪能力弱等问题, 提出了一种基于单目旋转视觉结构的几何公差综合测量系统。在算法层面, 为突破工业图像欠采样导致的细节丢失限制, 构建了融合SwinIR超分辨率网络的亚像素边缘提取框架; 针对微小离群点干扰大量点云计算负荷, 提出融合信任点机制与同伦法的改进迭代重加权最小二乘法, 在加速非线性收敛的同时显著提升了形状拟合的精度; 进一步利用单应变换建立多视角特征匹配约束, 并推导双目视锥交线算法, 从底层投影机理上消除了透视畸变引发的空间圆心漂移, 重建了高精度的空间几何特征参数。实验结果表明, 系统对定位块与阶梯轴的各项几何公差测量结果与三坐标测量机高度一致, 绝对误差稳定控制在0.04 mm以内。研究基于单目旋转视觉结构实现了三维特征重建与多类几何公差综合评定, 在保证较高测量精度的同时提升了检测效率, 可为精密制造产线在线质量控制提供有效方案。

关 键 词: 旋转视觉; 几何公差; 改进IRLS算法; 三维重建

中图分类号: TH74

文献标识码: A

Study on a method for evaluating geometric tolerances based on monocular rotational vision

WU Enqi*, YU Guibang, LI Qi, LU Ding

(School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: To address the lack of depth information and weak noise resistance of monocular cameras in geometric tolerance measurement, a comprehensive geometric tolerance measurement system based on monocular rotational vision is proposed. At the algorithm level, a sub-pixel edge extraction framework integrated with the SwinIR super-resolution network is constructed. It is used to overcome the loss of image details caused by undersampling in industrial images. To reduce the influence of small outliers and the computational burden in large-scale point cloud processing, an improved iterative reweighted least squares method is proposed. This method combines a trust-point mechanism with the homotopy method. It accelerates nonlinear convergence and significantly improves the accuracy of shape fitting. Furthermore, homography transformation is used to establish multi-view feature matching constraints. A stereo view-cone intersection algorithm is also derived. This method eliminates the spatial circle-center drift caused by perspective distortion from the underlying projection mechanism. It also reconstructs high-precision spatial geometric feature parameters. Experimental results show that the geometric tolerance measurements of positioning blocks and stepped shafts are highly consistent with those obtained by a coordinate measuring machine. The absolute errors are stably controlled within 0.04 mm. This study realizes three-dimensional feature reconstruction and comprehensive evaluation of multiple geometric tolerances based on monocular rotational vision. It improves inspection efficiency while maintaining high measurement accuracy. It can provide an effective solution for online quality control in precision manufacturing production lines.

Keywords: rotary vision; geometric tolerances; improved IRLS algorithm; 3D reconstruction

收稿日期: 2026-04-12; 收到修改稿日期: 2026-05-26

基金项目: 国家自然科学基金 (52375257)

作者简介: 吴恩启 (1973—), 男, 副教授, 硕士生导师, 从事精密测量方面的研究。

* 通讯作者: wuenqi@usst.edu.cn

0 引言

零部件的尺寸与几何公差直接决定了产品的互换性精度与装配性能。在轴类零件与定位块等关键部件的制造中,往往需要对直径、长度等基础尺寸,以及同轴度、垂直度等多维复杂公差进行协同检测。然而,传统三坐标测量机(Coordinate Measuring Machine, CMM)受限于低效率与高昂成本^[1],激光干涉技术则对表面环境过于敏感^[2],两者均难以满足现代产线低成本、高效率的在线全检需求。

近年来,机器视觉技术凭借其非接触式、高效率的优势为公差测量提供了新的解决方法^[3,4]。肖刚锋等人研发的锥形工件在线视觉检测系统,成功实现了旋转工况下圆度与直线度的动态实时测量。该系统采用最小二乘圆拟合算法,将圆度与直线度测量误差控制在0.05mm范围内,平均检测时间分别达到69.3ms和98.5ms,有效验证了视觉技术工程适用性^[5,6]。张伟等进一步改进粒子群优化算法,将直线度测量精度提升至微米级,显著优于传统千分表测量结果^[7]。林恩宇等基于霍夫变换构建的螺母多参数二维检测系统,实现了平行度、同心度等简单公差参数的初步评估,证明了视觉方法在多参数协同测量中的潜力^[8]。

尽管如此,在面对垂直度、同轴度等具有空间几何特征的复杂公差时,现有技术仍存在显著短板:一方面,单一视角成像难以解析复杂的空间几何关系与深度信息,导致三维要素无法精确重构;另一方面,工业现场的划痕与油污容易干扰特征提取,而传统拟合算法对离群点较为敏感,往往导致评定结果产生偏差。针对上述问题,本文提出一种基于旋转视觉的综合测量系统。该系统融合了从轮廓提取、二维解算到三维重构的全流程算法优化:通过引入抗噪性较强的特征拟合策略,有效抑制环境干扰;结合空间几何变换理论,改善了单一视角的测量局限,实现了三维复杂特征的较完整复现。为了验证系统在实际工业应用中的有效性,本文选取了精密制造中较为典型的定位块与阶梯轴作为研究载体,针对其尺寸及几何公差进行综合评定。该研究形成了一套几何特征综合测量框架,提升了复杂工业环境下质量控制的自动化水平与可靠性。

1 图像增强与轮廓提取

受限于成像硬件的物理分辨率,视觉测量方法往往难以捕捉微米级的微小几何特征,这已成

为制约视觉测量精度的首要瓶颈。为解决这一问题,本文引入了在图像重建领域表现较好的SwinIR(Swin Transformer for Image Restoration)生成式模型^[9],将该模型用于边缘提取前的图像预处理环节,并构建了包含自适应感兴趣区域提取与四倍超分辨率重建的增强链路。该算法充分利用SwinIR模型在细节恢复方面的优势,显著增加了待测特征区域的像素密度,从算法层面有效弥补了光学成像硬件在物理分辨率上的不足,将原本模糊的边缘转化为清晰、锐利的几何轮廓。具体增强前后的边缘细节对比如图1所示。

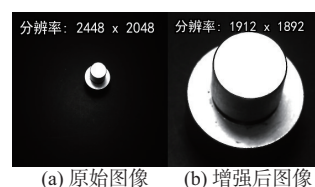


图1 基于SwinIR模型的图像增强效果对比

尽管图像的物理分辨率得以重构增强,但要实现较高的测量精度,仍需对零件的边缘轮廓进行精确提取。为此,本文在图像增强的基础上构建了一种基于Helmholtz原理的自适应亚像素轮廓提取策略。该策略不再依赖经验阈值,而是通过建立梯度场的统计显著性模型,并辅以基于矢量特性的边缘跟踪算法^[10],在无需人工干预的情况下实现了对物理边缘的精准捕捉与伪边缘的有效剔除,如图2所示。

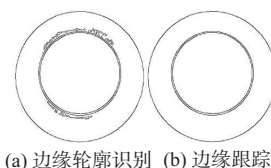


图2 边缘检测效果图

2 二维几何要素拟合算法

在圆度、直线度等形状公差评定中,拟合算法的鲁棒性与效率直接决定了测量结果的可信度。尽管最小二乘法(Least Squares Method, LSM)计算简便,但其对离群噪声缺乏抵抗力^[11];而传统的迭代重加权最小二乘法(Iteratively Reweighted Least Squares, IRLS)虽通过权重调整提升了鲁棒性,却因高频的矩阵求逆运算导致收敛缓慢,难以满足在线检测的实时性需求^[12]。针对上述局限,本文对IRLS算法进行改进:其一,构建基于分位数分类的信任点机制,动态筛选高置信度数据点并降低异常点的计算权重。该机制依据残差分布将边缘点集划分为三个特征类别,实施差异化权重更新策略,具体公式为

$$\omega_i = \begin{cases} \frac{\zeta \cdot e_i^{(p-2)/2} + \beta}{1 + e_i^{-(p-2)/2}} & (i \in S_{\text{trust}}) \\ e_i^{(p-2)/2} & (i \in S_{\text{normal}}) \\ \frac{1}{\zeta(e_i^{(p-2)/2} + \gamma)} & (i \in S_{\text{outlier}}) \end{cases} \quad (1)$$

式中, e_i 为残差; p 为 L_p 范数; ζ 为权重调整因子; β 和 γ 作为稳定因子, 用于确保算法的稳定性, 并调节权重对误差变化的敏感性; S_{trust} 、 S_{normal} 和 S_{outlier} 分别代表信任点集、普通点集和异常点集。该算法对于连续迭代中残差较小的数据点, 通过权重加速机制强化其拟合主导权; 反之, 对残差持续偏大的点则实施指数型权重衰减, 以快速降低其计算干扰。该策略有效减少了无效迭代, 显著提升了算法的收敛速度。

其二, 引入同伦法^[13]及同伦调整因子 q , 用于解的更新策略

$$x_i = \begin{cases} x_{i+1} \cdot q + x_i \cdot (1 - q) & p > 2 \\ x_{i+1} & p \leq 2 \end{cases} \quad (2)$$

通过对解的加权平均, 在迭代初期采用较大搜索步长以避免陷入局部极值, 在迭代后期则通过步长自适应收缩实现快速收敛。

通过上述信任点机制与同伦更新策略, 改进 IRLS 算法在理论上可降低离群点对拟合结果的影响, 并减少无效迭代次数。其不同噪声条件下的拟合稳定性与计算效率将在实验章节中进一步验证。

3 基于单应约束的三维空间特征重建

3.1 特征匹配与空间坐标解算

空间几何公差的精确测量依赖于高保真的三维边缘数据。针对传统双目系统硬件成本高且局限性较高^[14], 本研究采用旋转视觉模拟双目成像策略, 通过单一相机在不同旋转位姿下获取待测特征的特征匹配至空间三维测量的计算框架。与传统双目视觉不同, 本文通过工件旋转形成多视角观测, 将不同旋转位姿下的二维边缘特征统一映射至同一测量坐标系。基于旋转中心和相机成像模型建立空间对应关系, 可在单目条件下获得等效视差约束, 实现点、线、面及圆特征的三维重建, 并为后续几何公差评定提供统一坐标基础。

在多视角视觉模型中, 传统的对极几何约束^[15]仅能建立点到线对应关系 ($p_2^T F p_1 = 0$), 在工业零件常见的纹理重复区域极易引发匹配歧义。为提升特征匹配的唯一性与鲁棒性, 本文利用旋转前

后两个视角的单应性变换^[16]建立严格的点到点映射约束, 如图 3 所示。

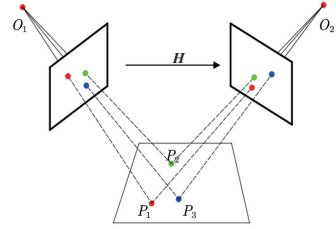


图 3 单应变换模型

当相机在不同位姿下观测同一空间平面特征时, 两个视角下的同名点 p_1, p_2 满足如下映射关系

$$p_2 = H p_1 \quad (3)$$

式中, H 为包含旋转姿态差异的单应矩阵。该约束显著收敛了特征搜索空间, 结合基于 KD 树 (K-dimensional tree)^[17]的高维空间索引算法, 通过递归的超平面划分实现层次化的空间分区, 显著提升了最近邻搜索的效率, 有效解决了高维点云匹配中的效率问题。

尽管单应性约束能够提高匹配效率, 但受图像量化噪声、局部纹理相似性及边缘提取误差影响, 仍可能产生伪匹配点。为保证三维重建的可靠性, 本文引入基于空间解析几何的校核机制。理想情况下, 同名点对应的两条空间视线应相交于同一点; 但受标定误差和亚像素定位误差影响, 实际视线通常表现为异面直线。因此, 本文以两条视线间的最短欧氏距离作为匹配有效性的判据, 用于剔除几何位置不一致的误匹配点。设 o_1, o_2 为两个视角的相机光心, s_1, s_2 为对应的归一化视线方向向量。依据向量混合积的几何意义, 两条异面直线的公垂线距离计算公式

$$\left| (o_2 - o_1) \cdot \frac{s_1 \times s_2}{\|s_1 \times s_2\|} \right| < \delta \quad (4)$$

式中, δ 为预设的距离阈值。该不等式强制要求两条视线在空间中高度共面, 从而有效剔除了虽满足单应性映射但几何位置不符合的离群点。

针对通过上述几何校验的有效点对, 需进一步解算其唯一的三维坐标。由于空间视线通常无法严格相交, 直接联立方程组难以获得精确解, 该问题转化为求解两条异面直线的公垂线以最小化几何误差。为此, 建立视线参数方程

$$P_i(t_i) = o_i + t_i s_i \quad (i = 1, 2) \quad (5)$$

依据公垂线向量需同时垂直于两条视线方向向量的约束, 构建线性方程组

$$\begin{cases} [(o_2 + t_2 s_2) - (o_1 + t_1 s_1)] \cdot s_1 = 0 \\ [(o_2 + t_2 s_2) - (o_1 + t_1 s_1)] \cdot s_2 = 0 \end{cases} \quad (6)$$

求解该方程组得到参数 t_1 和 t_2 , 代入参数方程可得两个垂足坐标 $P_1(t_1)$ 和 $P_2(t_2)$, 取其连线中点作为所求同名点的三维坐标, 从而实现从二维图像到三维实体的高精度重建。

3.2 三维几何要素参数化重建

对于由边缘点构成的空间平面, 由于观测数据中不可避免的离群值干扰, 本文采用RANSAC (Random Sample Consensus) 算法进行空间平面拟合。通过迭代优化内点集比例, 确立最优空间平面方程

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (7)$$

式中 $n = (A, B, C)$ 为平面的法向量。

对于空间线段特征的重建, 本研究将其建模为两个相机视平面的交线。依据针孔相机成像模型^[18], 设像素坐标系下拟合直线的参数向量为 l , 结合投影矩阵 M , 空间点 j 与图像直线 l 之间的共面约束可表述为

$$lMj = 0 \quad (8)$$

令 $L = lM$, 该式在几何上代表了一个通过相机光心与图像直线的空间平面。因此, 空间直线即为两个不同视角下视平面 L_1 与 L_2 的唯一几何交线。通过联立两组平面方程进行奇异值分解, 即可解算出包含定点 p_0 与方向向量 s 的空间直线参数化方程

$$l = p_0 + t \cdot s \quad (9)$$

虽然该式确立了直线的空间姿态, 但实际待测工件边缘仅表现为具有边界的线段, 且原始离散观测点受成像噪声干扰, 往往并不严格落在理论直线上。为精确界定线段的几何端点并修正测量偏差, 需将离散边缘点 p_e 映射至拟合直线上, 计算其对应的正交投影垂足坐标

$$l_{\text{proj}} = p_0 + \frac{(p_e - p_0) \cdot s}{\|s\|} s \quad (10)$$

通过遍历投影点序列, 检索沿方向向量 s 延展距离最大的两个极值点, 即可确定空间线段的物理边界, 完成空间线段的高精度重建。

空间圆特征的重建更为复杂, 由于其在成像平面上的投影通常退化为椭圆, 其三维重建本质上是求解两个广义椭圆锥面的公共截平面问题^[19]。为恢复这一空间几何约束, 本研究利用图像平面拟合的二次曲线矩阵 θ 与相机投影矩阵 M , 反向构造出三维空间中的椭圆锥面二次型矩阵 $Q = M^T \theta M$ 。为了从两个不同视角下的视锥面 Q_1, Q_2 中分离出包含真实圆特征的平面, 需构造线性组合矩阵束

$$C(\lambda) = Q_1 - \lambda Q_2 \quad (11)$$

由射影几何原理可知, 两个二次曲面的公共截平面必然对应于该矩阵束的秩亏状态。因此,

问题转化为寻找特定的广义特征值 λ , 使得矩阵束的行列式为零

$$\det(C(\lambda)) = \det(Q_1 - \lambda Q_2) = 0 \quad (12)$$

该式为关于 λ 的四次多项式方程。求解该方程得到特征根 λ_0 后, 矩阵 $C(\lambda_0)$ 的秩下降为 2, 此时该矩阵在几何上可分解为两个平面的量积。通过对退化矩阵进行特征值分解, 即可解析出描述截平面的线性方程 π

$$\pi_i = \sqrt{\mu_1} v_1 \pm \sqrt{\mu_2} v_2 \quad (13)$$

式中, $\{(\mu_k, v_k)\} (k=1, 2)$ 为 $C(\lambda_0)$ 的特征值及特征向量。最终确定的平面 π 与任意一视锥面 Q_i 的截线, 即为待求的空间椭圆, 从而完整恢复出空间圆特征的中心坐标、法向量及半径参数。

4 几何公差评定模型与系统误差补偿

几何公差评定不仅是量化零件加工质量的关键环节, 更是连接视觉测量数据与设计标准的关键步骤。尽管本研究已构建了高精度视觉测量系统, 但在实际测量过程中, 测量结果不可避免地受到运动平台累积误差、相机标定残差及光学畸变的多重耦合影响。针对测量系统中存在的此类非随机性系统误差, 本研究引入误差补偿模型进行修正。该模型通过增益系数 K 与零偏系数 Δ , 分别对由机械传动导致的尺度缩放误差及由装配不对中引起的固定零点漂移进行补偿。经此标定修正后的几何参数, 有效剔除了确定性误差分量, 为后续形状、方向及位置公差的高精度评定提供了可靠的数据基准。

4.1 形状公差评定

形状公差约束单个几何要素的自身形状偏差, 无需基准参考。本文建立了圆度与直线度的公差评定方法。圆度是描述回转体截面轮廓与理想圆的接近程度。圆度误差 ΔR 定义为轮廓点到拟合圆的最大正向偏差与最大负向偏差绝对值之和, 令拟合圆半径为 r_f , 计算公式为

$$\Delta R = K \cdot (|\max(r_{\text{out}} - r_f)| + |\max(r_{\text{in}} - r_f)|) + \Delta \quad (14)$$

直线度是描述线状几何要素的直线性, 评定逻辑与圆度一致。直线度误差定义为垂直于拟合直线的两条平行直线间的最小距离, 即测量点沿法线方向至拟合直线的距离极差, 计算公式为

$$\Delta L = K \cdot \left(\max \left(\frac{|Ax_i + By_i + C|}{\sqrt{A^2 + B^2}} \right) - \min \left(\frac{|Ax_i + By_i + C|}{\sqrt{A^2 + B^2}} \right) \right) + \Delta \quad (15)$$

4.2 方向公差评定

方向公差约束被测要素相对于基准的方向偏差。本文建立了平行度和垂直度误差的评定模型。

垂直度误差旨在定量判断被测平面特征的法向量相对于基准平面法向量是否满足理想的垂直关系。垂直度误差 ΔV 定义为两个平面法向量夹角与理想垂直角度的偏差,令基准平面的法向量为 $\mathbf{n}_b$,被测平面法向量为 $\mathbf{n}_t$,则计算公式如为

$$\Delta V = K \cdot \left| 90^\circ - \arccos \left(\frac{(\mathbf{n}_b \cdot \mathbf{n}_t)}{(|\mathbf{n}_b| \times |\mathbf{n}_t|)} \right) \right| + \Delta \quad (16)$$

平行度误差 ΔP 评定旨在定量判断被测要素相对于基准要素是否满足理想的平行关系。评定逻辑与垂直度类似,其定义为两个空间直线的方向向量 $\mathbf{v}_b$ 和 $\mathbf{v}_t$ 的角度偏差,其计算公式为

$$\Delta P = K \cdot \left| \arcsin \left(\frac{(|\mathbf{v}_b| \times |\mathbf{v}_t|)}{(\mathbf{v}_b \cdot \mathbf{v}_t)} \right) \right| + \Delta \quad (17)$$

4.3 位置公差评定

位置公差约束被测要素相对于基准的位置偏差,包括其中心或轴线的位置。本文建立了同心度误差和同轴度误差的量化评定模型。

同心度误差旨在评定多个同心圆在统一平面内,其几何中心位置的一致性。以基准圆心 (x_b, y_b) 为参考,计算其他被测圆心 (x_i, y_i) 相对于该基准圆心的最大径向偏移量。同心度误差 ΔC 定义为最大径向偏移量的两倍,计算公式为

$$\Delta C = K \cdot \left(2 \cdot \sqrt{(x_b - x_i)^2 + (y_b - y_i)^2} \right) + \Delta \quad (18)$$

同轴度误差旨在评定被测特征轴线相对于基准轴线的径向偏移程度,以基准特征的中心点 c_b 为基准轴线的起点,其法向量 $\mathbf{n}_b$ 为轴线方向;计算被测椭圆中心 c_t 到基准轴线的径向距离。同轴度误差 ΔT 定义为径向距离的两倍,其计算公式为

$$\Delta T = K \cdot \left(2 \cdot \frac{|(c_t - c_b) \times \mathbf{n}_b|}{|\mathbf{n}_b|} \right) + \Delta \quad (19)$$

5 系统集成与实验验证

5.1 实验平台搭建与测试环境

为全面验证本文提出的多视几何重建算法及公差评定模型,本研究构建了一套集精密机械运动、高分辨率成像与自动化测控于一体的旋转视觉测量平台。该平台设计旨在紧凑空间内实现对复杂工件的高精度、全方位主动测量,测量系统架构如图4所示,实验装置整体尺寸约为340mm×320mm×520mm。硬件架构采用相机静止而工件旋转的主动扫描模

式。核心成像单元由大恒工业相机MER2-502与高分辨率定焦镜头ZX-SF1214B构成中相机分辨率为2448×2048,最高帧率为79.1fps;镜头焦距为12mm,视场角为39°×30.3°。通过调整相机支架以适配不同视场需求,光源采用自然光,来模拟实际工业场景。运动控制单元利用高精度步进电机驱动旋转支架,结合限位开关完成零位校准,确立多视角图像序列采集的空间基准。旋转平台采用间歇式低速旋转采集方式,步进电机步进角为1.8°,即电机旋转一周对应200个基本步距角;实验过程中每旋转至设定角度后停止并触发相机采集图像,以减小运动模糊对边缘提取和三维重建精度的影响。电机保持转矩为8.5N·m,可满足实验工件稳定旋转的需求。

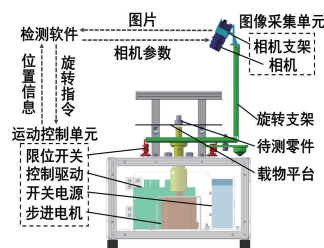


图4 测量系统结构图

软件层面,基于C++开发的上位机测控系统应用多线程技术,保障了图像传输与电机控制的严格时序同步,用户操作界面如图5所示。系统提供相机曝光、增益、亮度等成像参数调节功能,可根据不同工件表面特性及环境光条件对采集图像进行适配。系统集成亚像素边缘提取与三维重建算法,实现了从旋转触发采集到圆度、直线度等公差即时解算的自动化闭环测量。

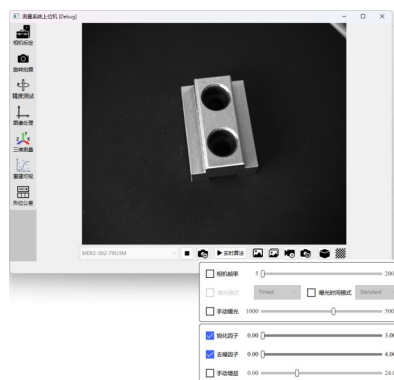


图5 测量系统用户操作界面

基于上述系统集成方案,本研究搭建了如图6所示的测量平台实物,该测量平台主体采用高刚性铝型材搭建,以保障测量系统的结构稳定性。实验均在受控光照条件下进行,配合严格的相机内参标定,有效抑制了环境噪声与成像畸变。这一高稳定性的硬件集成环境,最大程度降低了系

统性误差，为后续针对复杂工件的几何公差高精度评定及实验验证提供了可靠的物理支撑。

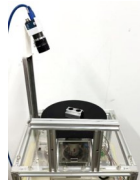


图6 旋转视角测量实验平台

5.2 改进 IRLS 算法拟合性能验证

为全面评估改进算法在不同噪声下的稳定性，本文构建了三组不同的数据集进行对比实验：数据集1模拟低干扰环境（含少量离群点）；数据集2模拟中等干扰环境；数据集3则模拟高噪极端环境（含大量离群点及高斯噪声混合干扰）。

如图7所示，LSC算法在离群点干扰下拟合误差较大，而改进 IRLS 算法则保持了稳定的拟合性能，受影响极小。此外，表1数据表明，改进算法较原 IRLS 算法在计算效率上实现了显著提升。

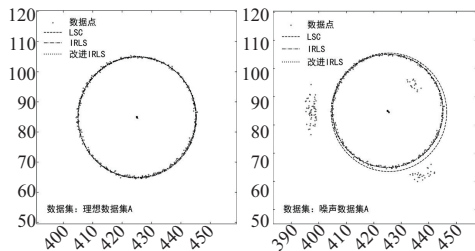


图7 拟合结果示意图

表1 IRLS与本文方法计算效率对比/ms

算法	计算时间		
数据集	1	2	3
IRLS	1221.07	422.81	959.16
本文算法	504.57	298.65	606.94

5.3 关键几何特征测量精度验证

根据前文构建的实验环境与测量平台，本文选取包含平面与回转体特征的定位块及阶梯轴作为实验对象，验证范围覆盖尺寸、形状、方向及位置公差，如图8所示。

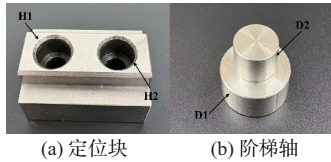


图8 实验测量对象实物

为考察测量系统对微小加工偏差的敏感度，本文对相同零件的两个实体进行了对比验证，并且针对每个关键几何特征，本文方法均进行了30次独立重复测量，并计算其均方根误差。此外，引入高精度三坐标测量机对实验对象进行测量，将其结果作为评估本系统测量精度的对比参照；同

时，严格遵循零件设计图纸及国家标准确定了各项目的公差规定值。详细的测量数据对比及误差统计结果如表2和表3所示。

表2 定位块关键几何特征测量结果对比/mm

几何特征	设计值	样本	CMM 测量值	本文 方法	误差	均方根 误差
直径(H1)	14	1	14.1101	14.1029	0.0072	0.0084
		2	14.0883	14.0963	0.0081	0.0095
直(H2)	14	1	14.1089	14.1008	0.0083	0.0096
		2	14.0865	14.0937	0.0072	0.0091
圆度(H1)	0.1	1	0.0212	0.0277	0.0065	0.0069
		2	0.0144	0.0254	0.0110	0.0111
圆度(H2)	0.1	1	0.0387	0.0263	0.0124	0.0125
		2	0.0332	0.0280	0.0052	0.0054
直线度	0.1	1	0.0735	0.0599	0.0136	0.0141
		2	0.0552	0.0606	0.0057	0.0064
垂直度	0.1	1	0.0579	0.0539	0.0040	0.0042
		2	0.0483	0.0523	0.0040	0.0045
平行度	0.1	1	0.0395	0.0533	0.0138	0.0142
		2	0.0709	0.0571	0.0138	0.0151

由上表可得，该测量系统首先在尺寸测量上与三坐标测量值高度吻合。在此基础上，针对难度更高的几何公差评定，系统同样表现优异：其不仅在基于二维特征分析的形状公差上展现出极高的特征还原度，更在依赖三维重建算法的方向与位置公差评定中保持了较高的精度。各项几何公差的测量绝对误差均稳定小于0.04mm，且多数指标控制在0.01mm内，全过程未出现明显离群值。值得注意的是，传统CMM在完成上述零件的全项公差检测时，不仅对环境温湿度有严格要求，且平均耗时约20~30分钟；而本系统得益于旋转视觉架构与并行计算优化，单件检测全流程耗时仅为3分钟。这表明在保证精度满足公差要求的前提下，本系统能大幅提升检测效率，不仅克服了接触式测量对环境的依赖，更能满足产线节拍的需求。综上所述，该系统具备高度稳定的测量精度与显著的效率优势，并且具有实现高效在线精密检测的实用价值。

表3 阶梯轴关键几何特征测量结果对比/mm

几何特征	设计值	样本	CMM 测量值	本文 方法	误差	均方根 误差
直径(D1)	20	1	19.9774	19.9782	0.0008	0.0691
		2	19.9798	19.9964	0.0166	0.0693
直径(D2)	12	1	11.9735	11.9672	0.0063	0.0340
		2	11.974	11.9818	0.0078	0.0585
圆度(D1)	0.2	1	0.1475	0.1253	0.0222	0.0285
		2	0.1120	0.1498	0.0378	0.0414
圆度(D2)	0.2	1	0.1043	0.1224	0.0181	0.0208
		2	0.1018	0.1293	0.0277	0.0313
同轴度	0.3	1	0.2606	0.2984	0.0378	0.0378
		2	0.3224	0.2990	0.0234	0.0235

6 结 论

本文构建了一种基于单目旋转视觉的几何公

差综合测量系统,实现了形状、方向及位置公差的一致评定。研究表明,通过构建SwinIR超分辨率亚像素边缘提取框架与双目视锥交线模型,能有效克服工业图像欠采样与单目深度缺失带来的测量限制。同时,提出的融合信任点机制与同伦法的改进IRLS算法,有效抑制了微小离群点对计算的干扰,解决了大量点云下非线性形状拟合的收敛难题与精度瓶颈。实验证实,系统在面临加工偏差与环境噪声时具备优异的稳定性,各项测量结果与CMM高度一致,绝对误差稳定控制在0.04mm以内。该系统对典型回转体与块类零件具有一定通用性,可为精密制造产线中的非接触式在线质量检测提供参考。未来将进一步从高精度旋转平台、系统坐标系与旋转中心标定、相机相对位置标定以及成像环境控制等方面优化系统精度。同时,可结合双目视觉或多相机测量方案,并采用更高精度标准样件进行验证,以进一步提升系统在复杂自由曲面零件及高精度检测场景下的适用能力。

参考文献:

- [1] 何亚雄,李瑞君,黄强先,等.微纳米三坐标测量机的技术发展[J].光学精密工程,2025,33(23):3672—3690.
He Yaxiong, Li Ruijun, Huang Qiangxian, et al. Technical progress of micro-nano coordinate measuring machine[J]. Optics and Precision Engineering, 2025, 33(23): 3672—3690.
- [2] 罗鹏煌,程银宝,罗哉,等.PSD几何误差测量系统及不确定度分析[J].光学技术,2024,50(05):634—640.
Luo Penghuang, Cheng Yinbao, Luo Zai, et al. Uncertainty analysis of geometrical errors measurement system based on PSD[J]. Optical Technique, 2024, 50(05): 634—640.
- [3] 孔明,徐志玲,徐勇,等.实际边缘轮廓下的螺栓综合尺寸质量检测[J].计量学报,2021,42(06):724—730.
Kong Ming, Xu Zhiling, Xu Yong, et al. Comprehensive dimensional quality inspection of bolts based on actual edge contours[J]. Acta Metrologica Sinica, 2021, 42(06): 724—730.
- [4] 尹婉婉,赵文辉,张静.基于机器视觉的摆线轮精度综合测量[J].计量学报,2023,44(06):844—851.
Yin Wanwan, Zhao Wenhui, Zhang Jing. Comprehensive precision measurement of cycloidal gear based on machine vision[J]. Acta Metrologica Sinica, 2023, 44(06): 844—851.
- [5] Xiao G, Zhong X, Shen W, et al. Research on the dimensional accuracy measurement method of cylindrical spun parts based on machine vision[C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Mechanical, Manufacturing, Modeling and Mechatronics and the 3rd International Conference on Design, Engineering and Science. Barcelona, Spain, 2018.
- [6] Xiao G, Li Y, Xia Q, et al. Research on the on-line dimensional accuracy measurement method of conical spun workpieces based on machine vision technology[J]. Measurement, 2019, 148(000): 9.
- [7] Zhang W, Han Z C, Li Y, et al. A method for measurement of workpiece form deviations based on machine vision[J]. SSRN Electronic Journal, 2022. DOI:10.2139/ssrn.4115759.
- [8] Lin E Y, Tu C T, Lien J J J. Nut geometry inspection using improved hough line and circle methods[J]. Sensors (14248220), 2023, 23(8).DOI:10.3390/s23083961.
- [9] 王进花,魏婷,曹洁,等.改进SwinIR的多特征融合图像超分辨率重建[J].西安电子科技大学学报,2024,51(06):171—181.
Wang Jinhua, Wei Ting, Cao Jie, et al. Multi-feature fusion image super-resolution reconstruction based on improved SwinIR[J]. Journal of Xidian University, 2024, 51(06): 171—181.
- [10] 邵鹏.基于边缘计算的目标检测与跟踪算法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2024.
Shao Peng. Study on bi-modal object detection and tracking algorithm based on edge computing[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2024.
- [11] 袁奎,付恒勋,谌立贵,等.轴类工件圆度误差亚像素视觉检测和评定方法研究[J].现代制造工程,2025,(02):94—100.
Yuan Kui, Fu Hengxun, Chen Ligui, et al. Research on sub-pixel visual detection and evaluation method of roundness error of shaft workpiece[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2025, (02): 94—100.
- [12] 杨海蓉,金辉.改进的迭代重加权最小二乘非凸压缩感知算法[J].计算机工程与应用,2018,54(24):46—51.
Yang Hairong, Jin Hui. Improved iterative reweighted least squares non-convex compressed sensing algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2018, 54(24): 46—51.
- [13] 廖世俊,刘曾.同伦分析方法进展综述[J].力学进展,2019,49(00):237—273.
Liao S J, Liu Z. Review on the progress of homotopy analysis method[J]. Advances in Mechanics, 2019, 49(00): 237—273.
- [14] 李柏雄,刘俊杰,刘建青,等.基于非接触式的三维重建技术综述[J].机电工程技术,2024,53(05):1—5+42.
Li Boxiong, Liu Junjie, Liu Jianqing, et al. Review on non-contact 3D reconstruction technology[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2024, 53(05): 1—5+42.
- [15] 刘祥.基于双目视觉的空间非合作目标位姿测量方法[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.
Liu Xiang. Non-cooperative target pose estimation based on stereo vision[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [16] 韦争亮,古耀达,黄志斌,等.双目立体视觉中特征点三维坐标重构校准研究[J].计量学报,2014,35(02):102—107.
Wei Z L, Gu Y D, Huang Z B, et al. Research on calibration of 3D coordinate reconstruction of feature points in binocular stereo vision[J]. Acta Metrologica Sinica, 2014, 35(02): 102—107.
- [17] 夏军勇,高睿杰,钟飞.基于KDTree改进的Super-4PCS+ICP算法在点云配准中的应用研究[J].激光与红外,2023,53(09):1333—1338.
Xia J Y, Gao R J, Zhong F. Application research of improved Super-4PCS+ICP algorithm based on KDTree in point cloud registration[J]. Laser & Infrared, 2023, 53(09): 1333—1338.
- [18] 张焱鑫.基于直线特征的多视图几何三维重建算法研究与实现[D].秦皇岛:燕山大学,2019.
Zhang Yanxin. Research and implementation of multi-view geometric 3d reconstruction algorithms based on linear features[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2019.
- [19] 李志扬.基于轮廓增强超分辨率重建的工件圆孔位姿双目视觉测量技术研究[D].杭州:浙江大学,2024.
Li Zhiyang. Research on binocular vision measurement technology for workpiece circular hole pose based on contour-enhanced super-resolution reconstruction[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2024.