

文章编号 1004-924X(2026)04-0536-12

基于线结构光的滚动直线导轨型面精密测量与 场景化算法研究

李金峰^{1,2}, 马紫瑞^{1,2,3}, 王海同^{3*}, 张泽阳^{1,3}

- (1. 雁栖湖基础制造技术研究院(北京)有限公司, 北京 100044;
2. 国家市场监督管理总局重点实验室(工业母机功能部件性能测试与评价), 北京 100044;
3. 北京交通大学机械与电子控制工程学院, 北京 100044)

摘要:为提升滚动直线导轨副中含微小圆弧特征复杂曲面的制造精度,保障滚动功能部件的刚度、摩擦力矩等服役性能,本文提出一种基于线结构光的滚动直线导轨型面精密高效测量方法。针对导轨型面的独特场景,构建了一套场景化改进算法的型面点云拟合体系,包括滚道区域加权的自适应体素滤波算法、多特征融合的 PCA-K 邻域拐点辨识算法及自适应半径约束的改进 RANSAC 圆弧拟合算法等。通过与三坐标测量机、影像测量仪的对比实验,验证该测量系统的测量精度优于 $5\text{ }\mu\text{m}$,达到 SP 级测量标准,能够实现导轨型面全轮廓检测,测量效率较三坐标测量机提升 15 倍以上,为滚动直线导轨型面的高精度、高效检测提供了理论支撑与技术方案。

关键词:线结构光;直线导轨;型面检测;点云算法

中图分类号:TH161+.24 **文献标识码:**A

doi:10.37188/OPE.20263404.0536 **CSTR:**32169.14.OPE.20263404.0536

Research on precise measurement and scene-based algorithm for rolling linear guide rail profile based on line structured light

LI Jinfeng^{1,2}, MA Zirui^{1,2,3}, WANG Haitong^{3*}, ZHANG Zeyang^{1,3}

- (1. Yanqi Lake Institute of Basic Manufacturing Technology Research Co., Ltd.,
Beijing 100044, China;
2. Key Laboratory of Machine Tool Functional Parts Performance Test and Evaluation,
State Administration for Market Regulation, Beijing 100044, China;
3. College of Mechanical and Electronic Control Engineering, Beijing Jiaotong University,
Beijing 100044, China)

* Corresponding author, E-mail: htwang@bjtu.edu.cn

Abstract: In order to improve the manufacturing accuracy of the complex curved surface with small arc characteristics in the rolling linear guide pair, and ensure the service performance of the rolling functional components such as stiffness and friction torque, a precise and efficient measurement method of the rolling

收稿日期:2025-10-29;修订日期:2025-11-26.

基金项目:中国机械总院技术发展基金项目(No. J242202Y);国家自然科学基金(No. 52475507);北京交通大学基础研究基金(No. 2024JBMC017)

linear guide surface based on line structured light was proposed in this paper. Aiming at the unique scene of the guide rail profile, a set of point cloud fitting system of the improved scene algorithm was constructed, including the adaptive voxel filtering algorithm weighted by the raceway area, the PCA-K neighborhood inflection point identification algorithm with multi-feature fusion and the improved RANSAC arc fitting algorithm with adaptive radius constraint. Through the comparison experiment with the three-coordinate measuring machine and the image measuring instrument, it is verified that the measurement accuracy of the measurement system is better than $5\text{ }\mu\text{m}$, which reaches the SP level measurement standard, and can realize the full contour detection of the guide rail surface. The measurement efficiency is more than 15 times higher than that of the three-coordinate measuring machine, which provides theoretical support and technical scheme for the high-precision and efficient detection of the rolling linear guide rail profile.

Key words: line structured light; linear guide rail; surface detection; point cloud algorithm

1 引言

以滚珠丝杠副、滚动直线导轨副为代表的滚动功能部件,是保障数控机床系统刚性和加工精度保持性的核心部件,也是军民两用高端装备的关键基础部件^[1-3]。对于滚动导轨而言,滑块与导轨间常利用多组微小型的球、柱滚动体支撑与传递载荷,使得导轨表面形成了含有微小圆弧特征的复杂曲面。此类复杂型面一般通过精密铣磨工艺制造形成,其制造精度对滚动功能部件的刚度、摩擦力矩等服役性能有着严重影响^[2,4-7]。因此,精密、高效的导轨型面测量技术对提升导轨服役性能具有重要意义。

导轨型面精度测量可分为接触与非接触式两类。接触式测量技术以千分表测量法为代表,通过触头直接接触待测表面获取数据,虽具备较高精度,但易受人为操作、环境振动等因素干扰,且检测流程繁琐,难以实现导轨型面的全面指标检测。相比之下,非接触式检测方法如激光干涉法、激光准直法、激光三角法及电磁测量法等,凭借多参量同步高效测量、无磨损和广泛的尺寸适用范围等优势,成为近年来的研究热点。国立虎尾科技大学与国立中兴大学^[8]基于电涡流传感器合作研发出一台静/动态测量直线导轨副运行平行度误差的检测装置,以滑块为间接测量对象,利用两个电涡流传感器测量直线导轨的水平和垂直两个方向的平行度误差,但仅针对单一参数,无法覆盖型面整体特征。广东凯特^[9]基于非接触式气电传感器探测头与导轨底面距离位移

信号的转换,实现直线导轨行走平行度的误差测量,同样存在检测维度有限的问题。南理工冯虎田等^[10,11]结合国内外大型筒类工件半径测量技术原理,提出的点激光型面检测方法,虽能获取三维空间误差,但单点扫描效率较低,难以满足批量检测需求。

近年来,线结构光技术日益进步,其非接触、多点同步测量特点极大提高了现有专用量仪的测量效率,已在齿轮、轴承、航空薄壁件等领域取得了诸多成功应用^[12-14]。北京理工大学刘少丽等^[15]设计了一套用于大型构件的主动式线结构光旋转扫描检测系统,系统有效扫描范围大于 $300\text{ mm}\times 300\text{ mm}$,构件表面栅格宽度、栅格筋厚度等尺寸的检测误差小于 0.05 mm ,但所能检测的特征较为简单,对于复杂特征的评估及相关算法的开发存在不足。湖南大学马子骥等^[16]提出一种基于多线结构光视觉的钢轨波磨精确测量方法,利用平行多线结构光来校准失真钢轨断面轮廓,60轨 1/3 轨头宽度处的单点测量精度低于 0.3 mm ,但评估指标较为单一,仍难以满足微米级的测量要求。西南交通大学李文涛等^[17]为解决钢轨断面全轮廓测量和线结构光测量系统现场标定困难的问题,提出了一种基于自由平面靶标的线结构光双目现场标定方法,总体测量误差约为 0.542 mm ,但标定过程较为繁琐。北京交通大学祝祥等^[18]建立了一种基于线结构光传感器的轨道板测量系统,利用轨道板中特殊位置对整个点云数据进行位置和姿态的校正,实现轨道板

四项关键几何参数的快速非接触测量,钳口高度和钳口距离测量精度 0.2 mm,但对于复杂微小特征,检测精度有待提高。北京工业大学石照耀等^[19]基于激光三角测量原理,研制出齿轮线激光三维测量仪,可实现齿轮齿廓偏差、齿距偏差、拓扑偏差等项目的测量与评定,能够满足 5 级精度($7.14\text{ }\mu\text{m}$)齿轮的检测要求,但仍存在很多未解构的齿面数据,如齿面螺旋线偏差的测量。线结构光技术在齿轮、钢轨等工业检测中展现出良好的应用价值,但仍存在检测指标不完全、微米级精度难以保证、算法开发不足等问题。

针对上述问题,本文提出一种基于线结构光点云技术的非接触式导轨型面检测方案,实现滚动导轨的高效测量与评价。首先,开展基于线结构光的非接触多点可移动测量方法研究,设计导轨型面自动检测装置方案。随后,运用点云处理技术,构建了一套融合场景化改进算法的型面点云拟合体系。最后,进行非接触式线结构光检测方法 with 接触式三坐标导轨检测方法的对比实验,验证测量系统的精度与稳定性。

2 基于线结构光的导轨型面测量方法

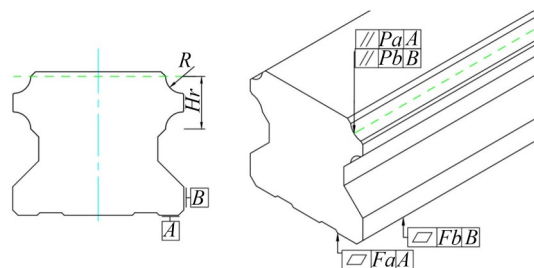
本文提出一种非接触式线结构光的滚动直线导轨型面精密高效测量方法,通过线结构光拼接扫描技术实现导轨型面的全面测量,并对采集点云利用点云滤波、簇类分割、特征拟合等技术实现评价。

2.1 测量系统构架与检测指标

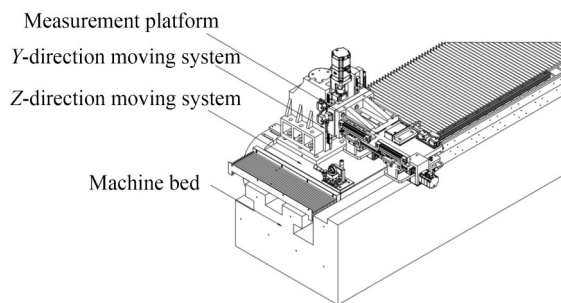
根据国内外高认可度滚动直线导轨生产厂家制定的选型手册,调研滚动直线导轨各规格使用情况,制定四列式单圆弧直线导轨型面检测指标,如图 1(a)所示,待测型面参数主要包括滚道圆弧半径 R 、滚道中心距 Hr 、底面基准和侧面基准的平面度 Fa, Fb 和平行度 Pa, Pb 等。

检测装置采用“三向移动+多传感器协同”架构,如图 1(b)所示,其中, Y 向移动系统由直线电机驱动,气浮导轨导向,定位精度 $\pm 0.1\text{ }\mu\text{m}/\text{m}$,是导轨型面扫描任务的主要运动轴; X, Z 向移

动系统由伺服电机驱动,滚珠丝杠传动,直线导轨导向,用于线激光测量仪与不同规格导轨的基准配准;测量平台布置三台线激光测量仪(量程 $\pm 7.4\text{ mm}$,分辨率 $0.05\text{ }\mu\text{m}$),分别扫描导轨的底面、两侧滚道面,获取导轨型面完整的高精度三维数据。



(a) 四列式单圆弧直线导轨检测参量
(a) Detection parameters of four-row single arc linear guideway



(b) 线结构光导轨型面检测试验台
(b) Line structured light guide rail surface detection test bench

图 1 导轨型面测量系统

Fig. 1 Guide rail profile measurement system

2.2 多传感器坐标对齐与点云配准实现

三台线激光测量仪独立安装,其自身坐标系存在差异,在导轨型面拟合之前,首先要对初始点云实现坐标对齐。

首先进行坐标粗对齐,以高精度标准量块(粗糙度 $R_a = 0.01$)为基准,通过千分表手动定位确保量块长度方向与进给轴方向平行。数控系统控制三轴联动,三台传感器同步采集量块点云。以数控系统输出的三轴定位坐标作为基准,建立传感器与世界坐标系的对应关系,求解旋转矩阵 (R_1, R_2, R_3) 和平移向量 (T_1, T_2, T_3) ,确定初始变换矩阵完成粗对齐。

其次进行点云精配准,针对机械安装误差导

致的重叠区域微小偏差,采用ICP算法优化。读取粗对齐后的源/参考点云并计算法向量,配置核心配准参数,迭代最小化欧式距离误差直至收敛,输出最终变换矩阵完成精配准。其中,变换收敛阈值通常取值范围为 $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-10}$,取

值越小,配准效果越好;最大对应点距离取值0.01 mm,通常为点云间距的2~3倍。

点云坐标粗对齐效果如图2(b)所示,精配准效果如图2(c)所示,对三台传感器采集到的数据整体对齐,效果如图2(d)所示。

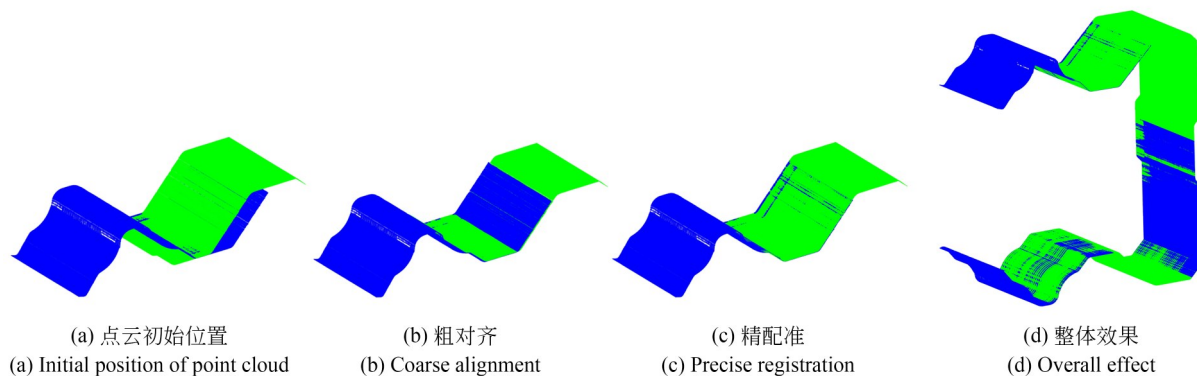


图2 点云配准效果

Fig. 2 Point cloud registration effect

3 导轨型面点云场景化改进算法

针对导轨型面“微小圆弧密集、基准面与滚道耦合干扰”的独特场景,构建了一套融合场景化改进算法的型面点云拟合体系,如图3所示,为

滚动直线导轨型面的高精度、高效检测提供了理论支撑与技术方案。

3.1 滚道区域加权的自适应体素滤波

线激光位移传感器采集到的点云数据高达数百万个点,巨大的数据量会增加后续运算时

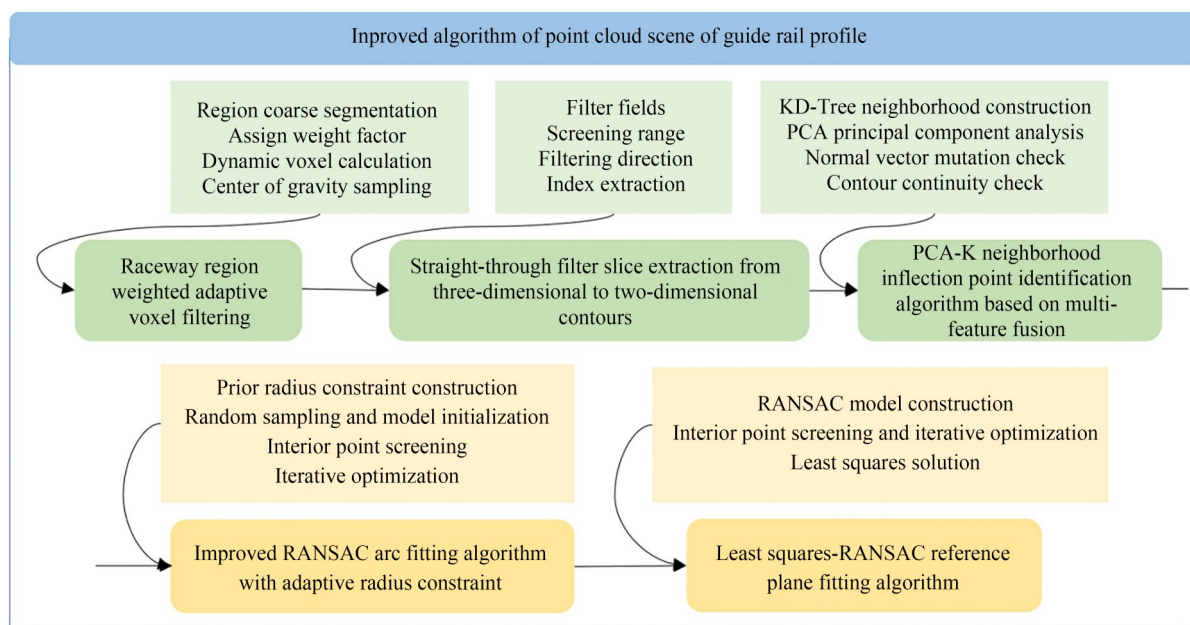


图3 导轨型面点云场景化改进算法

Fig. 3 Improved algorithm of point cloud scene of guide rail profile

间,降低计算效率,甚至对运算设备提出较高要求。体素滤波(Voxel Filtering)是针对三维点云的滤波手段,可实现点云去噪与质量优化,其原理是在点云模型中构建三维体素栅格,并将每个栅格内的点替换为重心点,以此完成密集点云的精简,同时滤除部分漂移噪声。

传统体素滤波采用均匀体素尺寸,在导轨型面检测中存在两大问题:一是曲率较大的滚道圆弧区域需保留更多细节,但均匀体素易导致点云稀疏,影响拟合精度;二是基准面区域形貌平坦且数据冗余度高,增加后续计算量。以 2.5 mm 滚道半径为例,导轨滚道段的点云覆盖率仅 12.8%,采用均匀体素滤波,取体素尺寸 0.1 mm 时,拟合半径误差达 16 μm 。

本文提出一种提出“区域权重因子+动态体素尺寸”的自适应滤波方法。首先进行区域粗分割,基于线激光点云分布特征,将导轨侧面点云划分为滚道区域与基准面区域两部分。其中,滚道区域点云 X 轴坐标处于 $[Hr/2 - R, Hr/2 + R]$ 区间,其余部分为基准面区域。此处分割仅用于权重分配,无需精确分割。

分配权重因子时,滚道区域优先保留细节,基准面区域侧重数据精简。定义滚道区域权重因子 ω_1 ,基准面区域权重因子 ω_2 。滚道区域是导轨承载与传动的核心功能区,其点云细节直接决定滚道圆弧半径、中心距等关键参数的拟合精度,基准面仅作为测量定位的辅助基准,形貌平坦无复杂特征,核心需求是精简数据以提升计算效率。因此权重分配遵循“滚道区域优先保细节,基准面区域优先做精简”原则,满足 $\omega_1 > 1, \omega_2 < 1$ 。

具体取值范围通过预实验确定,对 25#导轨测试,当 $\omega_1 < 1.2$ 时,滚道点云过度稀疏,导致拟合误差显著增大($>10 \mu\text{m}$);当 $\omega_1 > 1.8$ 时,数据精简效果有限,计算效率提升不明显。因此,确定 ω_1 取值区间为 $[1.2, 1.8]$ 。同理, ω_2 取值区间为 $[0.3, 0.8]$,确保基准面在精简后仍保有足够的点进行稳定可靠的平面度与平行度评估。

以滚道拟合误差最小为目标,通过正交实验对 ω_1 和 ω_2 水平组合进行寻优。对每个因素在区间内设置 3 个水平, ω_1 分别取 1.2, 1.5, 1.8, ω_2 分

别取 0.3, 0.5, 0.8, 采用 $L_9(3^4)$ 正交表,对 9 组 (ω_1, ω_2) 组合执行自适应体素滤波后,取最优组合。

设基础体素尺寸 $L_0 = \sqrt{V/N}$, 其中 V 为点云包围盒体积, N 为点云总数,由点云密度确定。计算实际动态体素尺寸,滚道区域 $L_1 = L_0/\omega_1$, 基准面区域 $L_2 = L_0/\omega_2$ 。对点云中每个体素,计算内部所有点的重心坐标,保留离重心最近的点作为体素代表,完成下采样。

以某四列式单圆弧导轨为例,对比传统滤波与改进滤波的效果,如图 4 所示。取最优组合 $(\omega_1 = 1.5, \omega_2 = 0.8)$, 体素尺寸 $(L_1 = 0.05, L_2 = 0.093)$, 应用改进算法在滚道区域的点云覆盖率由 12.8% 提升至 33.5%, 数据量减少 99.2%, 同时兼顾了细节保留与计算效率。

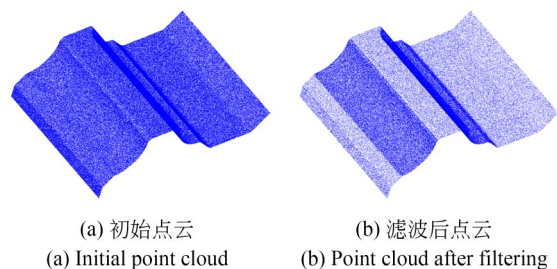


图 4 自适应体素滤波

Fig. 4 Adaptive voxel filtering

3.2 导轨型面点云切片提取

导轨型面检测中,滚道圆弧的精确拟合直接影响着滚道自身半径参数的计算和基准面平行度的测量精度。若直接将导轨滚道面看作一个不完整的圆柱进行拟合,常见的拟合算法中,最小二乘法需要大量的数学计算, RANSAC 算法对外部参数的输入高度依赖。因此在未知半径、未知法向量的情况下,直接对滚道点云进行圆柱拟合的效果不佳。

切片提取是将三维点云转换为二维轮廓的关键环节,本文提出一种对导轨型面点云切片处理,将滚道圆柱面的拟合转换为平面圆的拟合思路。线结构光采集的导轨点云 Y 轴坐标对应激光器运动位移,连续触发模式下其组内差值固定,基于此特征采用直通滤波器(Pass-Through Filtering)可实现导轨的轮廓切片提取,提取效果见图 5 所示。

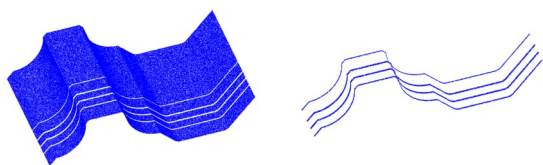
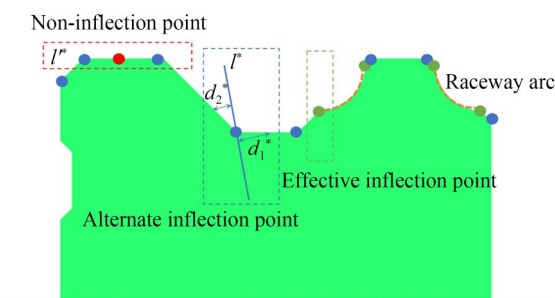


图5 导轨型面点云切片提取

Fig. 5 Point cloud slice extraction of guide rail surface

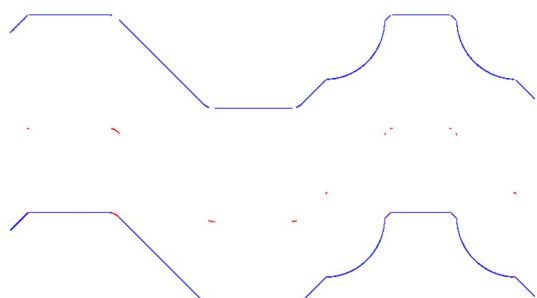
3.3 基于PCA-K领域的拐点辨识算法

导轨切片提取完成后,需要对导轨轮廓拐点进行辨识,方便滚道圆弧段的分割与拟合。本文根据“主成分分析+法向量突变+轮廓连续性”三个特征,提出一种拐点辨识算法,提取原理及效果如图6所示。



(a) 拐点提取原理

(a) Inflection point extraction principle



(b) 拐点提取效果

(b) Inflection point extraction effect

图6 拐点辨识算法

Fig. 6 Inflection point identification algorithm

主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)是一种常用的数据降维方法,新坐标系下各维度数据量的大小反映在样本特征值的方差上,方差最大的方向作为第一主成分方向。本文采用KD-Tree的方式建立点之间的拓扑关系,对切片点云上每个点的K邻域点集进行PCA分

析。设数据集中目标点 $p_i(x_i, y_i, z_i)$, 其中 $i \in [1, 2, \dots, n]$, n 为邻域内点的总数。

(1) 潜在拐点判断

计算主成分向量 v_1 , 根据质心和特征向量 v_1 拟合一条直线 l^* 。计算领域内所有点到 l^* 的距离集合 $\{d_i\}$ 和距离标准差 σ_i , 反映点云偏离局部拟合直线的程度。若:

$$\sigma_i > \sigma_r. \quad (1)$$

则将该点标记为潜在拐点。其中, σ_r 为距离标准差阈值, 统计初始点云的噪声标准差 σ_0 , 依据 3σ 原则, 取 $\sigma_r = 3\sigma_0$ 。

(2) 候选拐点判断

对所有潜在拐点进行法向量突变校验, 导轨基准面的法向量方向基本一致, 而滚道圆弧与基准面过渡处法向量会发生显著偏转。计算潜在拐点与其邻域的法向量夹角 θ_i , 若:

$$\bar{\theta}_i > \theta_r. \quad (2)$$

则将该点保留为候选拐点。其中, θ_r 为法向量夹角阈值, 统计标准导轨型面过渡区的法向量夹角均值 θ_0 , 取 $\theta_r = \theta_0 - 5^\circ$, 确保既能捕捉法向量突变特征, 同时避免误判某些微小波动点。

(3) 有效拐点判断

判断候选拐点的轮廓连续性, 沿导轨截面轮廓方向, 基准面区域的坐标变化率近似为常数, 滚道圆弧区域的坐标变化率随曲率变化, 当变化率 λ_i 从线性转为非线性, 即从轮廓面转为滚道圆弧。以相邻点曲率差与间距的比值定义轮廓坐标变化率, 计算候选拐点前后5个点的坐标变化率 λ_i , 若:

$$|\lambda_{i+1} - \lambda_i| > 0, \quad (3)$$

则确认该点为有效拐点。

3.4 导轨型面点云特征拟合

3.4.1 自适应半径约束的改进RANSAC滚道拟合算法

随机抽样一致性(RANSAC)的基本思想是在假设数据集中包含正确数据(内点)和异常数据(外点)的前提下, 通过随机采样和迭代的方式, 找到能够最好地描述内点数据的数学模型。为了剔除轮廓连接处倒角等微小干扰区域的影响, 本文引入先验半径约束, 提出一种改进RANSAC算法。

首先构建先验半径约束, 假设圆弧点云集 P

包含 n 个点, 每个点表示为 $p_i(x_i, y_i, z_i)$, 其中 $i \in [1, 2, \dots, n]$ 。基于导轨设计图纸的滚道理论半径 R_0 , 结合同类导轨的加工工艺误差 ΔR , 构建动态半径区间 $[R_0 - \Delta R, R_0 + \Delta R]$ 。

对点云集随机采样与模型初始化, 设迭代次数为 K , 从圆周点集 P 中随机选取 s 个点, 拟合初始圆模型, 记为 M ; 若圆半径不在约束区间内, 直接舍弃该模型, 减少无效迭代。

筛选内点, 设定偏差阈值 ϵ , 计算 P 中每个数据点到初始圆的距离, 将距离 $\leq \epsilon$ 的点纳入内点集 S 。重复迭代上述步骤, 不断更新内点集 S , 保

留内点数量最多的模型作为最终拟合结果, 迭代次数 K 由外点概率 q 和模型置信度 H 以及初始点个数 s 共同决定, 如式(4)计算:

$$K = \ln(1 - H) / \ln[1 - (1 - q)^s]. \quad (4)$$

对同一导轨的 10 个滚道截面进行拟合实验, 如 $R_0 = 2.5 \text{ mm}$ 时, 导轨的工艺误差 $\Delta R = 5 \text{ }\mu\text{m}$, 动态半径区间为 $[2\,495 \text{ }\mu\text{m}, 2\,505 \text{ }\mu\text{m}]$; 设定偏差阈值 $\epsilon = 3 \text{ }\mu\text{m}$, 取置信度 $H = 99.9\%$, 外点率 $q = 0.2$, 采样点数 $s = 3$, 对比传统 RANSAC 与改进算法的结果, 如表 1 所示, 改进算法的拟合半径误差均值降至 $2 \text{ }\mu\text{m}$ 以内, 稳定性显著提升。

表 1 改进 RANSAC 滚道圆弧拟合算法对比结果

Tab. 1 Improved RANSAC raceway arc fitting algorithm comparison results

	Traditional RANSAC		Improved RANSAC	
	Fitting radius /mm	Fitting error / μm	Fitting radius /mm	Fitting error / μm
1	2.517 96	17.96	2.496 26	-3.74
2	2.506 27	6.27	2.497 37	-2.63
3	2.516 80	16.80	2.501 27	1.27
4	2.504 74	4.74	2.497 33	-2.67
5	2.498 38	-1.62	2.496 24	-3.76
6	2.506 54	6.54	2.497 33	-2.67
7	2.515 99	15.99	2.502 45	2.45
8	2.513 35	13.35	2.498 91	-1.09
9	2.498 91	-1.09	2.497 86	-2.14
10	2.523 98	23.98	2.495 77	-4.23
Mean value	2.510 29	10.29	2.498 08	-1.92

3.4.2 基于最小二乘-RANSAC 的基准平面拟合算法

导轨型面检测中, 由于基准平面点云形貌结构较为简单, 并未对其进行分割、聚类等前置处理, 故提出一种改良的平面提取方法, 在传统 RANSAC 方法拟合完成后, 重新对 RANSAC 评估的最大内点模型进行最小二乘拟合。

假设平面点云集 P 包含 n 个点, 每个点表示为 $p_i(x_i, y_i, z_i)$, 其中 $i \in [1, 2, \dots, n]$ 。待拟合平面方程为 $p(x, y, z) = ax + by + cz + 1 = 0$, 点集 $M\{(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), \dots, (x_n, y_n, z_n)\}$, 为得到最佳拟合平面, 应满足:

$$f = \sum_{i=1}^n [p(x, y, z) - p(x_i, y_i, z_i)]^2 = \min. \quad (5)$$

使点集中每个点到该平面的距离尽可能最小。分别对 a, b, c 求偏导数, 满足 $(\partial f / \partial a = 0, \partial f / \partial b = 0, \partial f / \partial c = 0)$, 整理后求解平面系数方程 $X = Q^{-1}K$, 其中:

$$Q = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n x_i z_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n y_i^2 & \sum_{i=1}^n y_i z_i \\ \sum_{i=1}^n x_i z_i & \sum_{i=1}^n y_i z_i & \sum_{i=1}^n z_i^2 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

$$X=(a,b,c)^T,k=(-\sum_{i=1}^n x_i,-\sum_{i=1}^n y_i,-\sum_{i=1}^n z_i)^T.$$
(7)

对于导轨基准平面拟合,除传统最小二乘法与 RANSAC 算法外,最大似然估计抽样一致性(MLESAC)与 Hough 变换(Hough Transform)也是常用的拟合方法。分别使用最小二乘法、

RANSAC 拟合法、MLESAC 法、Hough 变换及改良算法对平面点云拟合,从拟合精度、运行效率、稳定性三方面对比评价,单次实验结果如表 2 所示,10 次重复实验的稳定性指标如图 7 所示。实验中,测试点云 $n=1\,000$,平面方程为 $p(x,y,z)=0.2x+0.4y-2z+1=0$,外点比例 20%,高斯噪声标准差为 0.05。

表 2 五种算法的基准平面拟合结果
Tab. 2 Reference plane fitting results of the five algorithms

Method	Plane equation coefficients[abc]	Flatness/ μm	Running times/ms
Least squares	[0.211 0.414 -2.057]	2.127	1.4
RANSAC	[0.202 0.403 -2.016]	2.120	11.3
MLESAC	[0.204 0.406 -2.033]	2.121	29.0
Hough transform	[0.500 0.500 -1.501]	4.319	1072.6
Improved method	[0.198 0.398 -1.996]	0.207	11.3

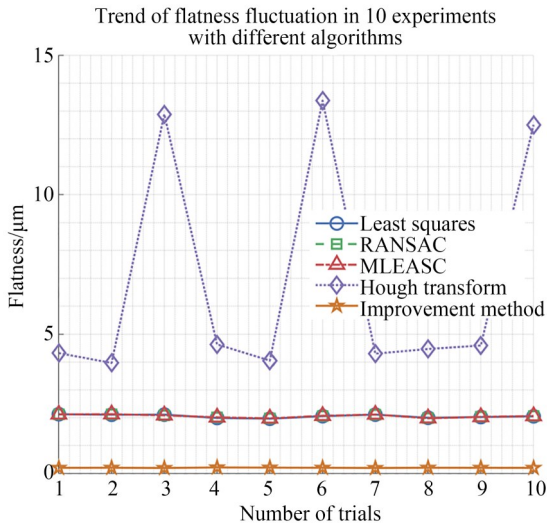


图 7 10 次重复拟合的稳定性指标
Fig. 7 Stability indicators for 10 repeated fits of five algorithms

由实验可知,改良算法结合了 RANSAC 剔除外点与最小二乘精修内点的组合优势,实现了精度、效率与稳定性的平衡:既保留了 RANSAC 法的抗干扰能力,又通过最小二乘提升了拟合精度,平面度降至 0.207 μm 的同时,耗时 11.3ms 与基础 RANSAC 法持平。对比来看,

基础 RANSAC 和 MLESAC 法精度中等、效率尚可,但稳定性与精度均不及改良算法;最小二乘法适配无外点、低噪声的理想点云环境;Hough 变换的参数与真实值偏差极大,稳定性弱,效率较其他方法低 2 个数量级。因此,改良算法是适配滚动直线导轨基准平面拟合的最优算法。

4 导轨型面点云检测方法验证实验

4.1 有效性验证

为验证导轨型面点云的拟合算法的有效性,设计非接触式线结构光检测系统、接触式三坐标测量机与影像测量仪的对比实验,实验装置如图 8 所示。其中,三坐标测量机为海克斯康 Leitz Reference 系列,探针直径 1 mm,单点测量精度至亚微米级别,用于提供高精度基准数据;影像测量仪为中旺 MVA-4030 系列,辅助验证滚道半径、中心距等关键参数,测量精度 1.8 μm ;线激光位移传感器采用基恩士 8060 系列,点云间隔 5 μm ,采集频率 100 Hz,扫描进给速度 25 mm/s,实现全轮廓快速扫描。实验结果对比如表 3 所示。

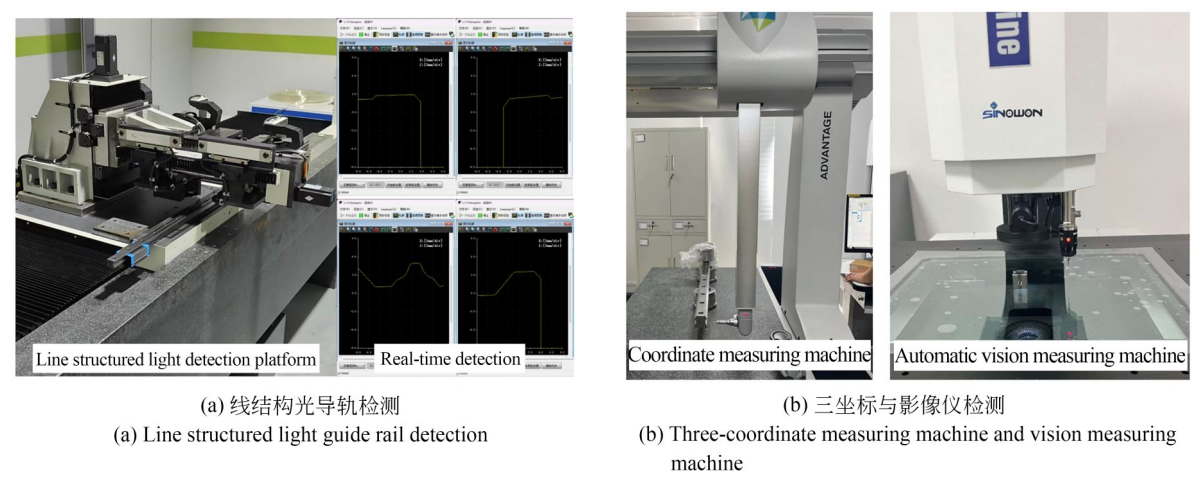


图 8 实验装置图

Fig. 8 Diagram of experimental device

表 3 三种测量方法的性能比较

Tab. 3 Performance comparison of three measurement methods

		Three-coordinate measuring machine	Vision measuring machine	Line structured light	
				Measured value	Measured error
$R/\mu\text{m}$	2 408. 7		2 444. 9	2 411. 2	3. 50
$Hr/\mu\text{m}$	7 376. 8		7 282. 8	7 379. 5	2. 73
$Pb/\mu\text{m}$	0. 005		/	1. 573	1. 57
$Fb/\mu\text{m}$	0. 001		/	2. 000 2	1. 99

对三种测量方式的测量性能综合对比,以三坐标测量值为测量基准,线结构光测量系统滚道半径误差 3. 50 μm ,滚道中心距误差 2. 73 μm ,核心型面参数测量误差均控制在 5 μm 以内,已达到 SP 级测量标准;影像测量仪需将导轨切断后获取截面进行二维成像测量,其测量值与三坐标基准值偏差显著,源于切断过程中没有保证切口与导轨轴线完全垂直,导致截面轮廓产生倾斜畸变,造成测量数据偏离真实值。

另外,三坐标虽能实现全参数测量,但依赖复杂的逐点路径规划与编程,效率极低,且探针与导轨的轻微接触会产生累积性磨损,长期使用可能影响被测件的服役性能,更换不同规格导轨时还需重新调整设备参数与测量路径;影像测量仪样品切断破坏的测量方式完全不适用于批量检测与在役导轨检测场景,并且仅能获取二维截

面信息,无法还原导轨三维型面的整体特征;线结构光扫描技术既避免了接触磨损与样品破坏,又能一次性获取导轨全轮廓三维数据,测量效率较三坐标提升数倍,能够实现对导轨型面的高精度快速检测。

4. 2 重复性验证

为验证导轨型面点云的拟合算法的稳定性,在相同的实验条件下,对直线导轨型面的每个参数指标进行 10 次独立测量,测量结果如表 4 所示。

重复性实验中,测量标准差反映了测量过程中的随机波动。表 4 中导轨型面各参数的测量标准差均较小,表明线结构光导轨型面检测方法的重复性较好,点云的拟合算法的稳定性较高。

表 4 重复性实验测量结果
Tab. 4 Repeatability experimental measurement results.

	<i>R</i> /mm	<i>Hr</i> /mm	<i>Fb</i> /μm	<i>Fa</i> /μm	<i>Pb</i> /μm	<i>Pa</i> /μm
1	2.410 1	7.399 3	2.730 6	1.850 3	2.727 4	2.560 7
2	2.408 7	7.425 4	2.731 7	1.851 9	2.727 4	2.560 7
3	2.418 3	7.424 1	2.730 0	1.849 6	2.721 2	2.562 6
4	2.408 4	7.403 2	2.737 6	1.852 5	2.722 7	2.564 2
5	2.409 9	7.405 3	2.734 4	1.848 8	2.727 9	2.568 4
6	2.394 9	7.418 4	2.734 2	1.854 1	2.732 6	2.557 0
7	2.425 1	7.391 0	2.730 6	1.853 4	2.732 6	2.567 0
8	2.409 3	7.400 2	2.730 3	1.850 8	2.719 4	2.562 6
9	2.390 3	7.390 7	2.733 8	1.851 1	2.699 1	2.542 0
10	2.406 3	7.408 7	2.732 7	1.848 3	2.724 2	2.570 3
Mean value	2.408 1	7.406 6	2.732 6	1.851 1	2.723 4	2.561 5
Standard deviation	0.009 9	0.012 5	0.002 4	0.001 9	0.009 6	0.007 9

5 结 论

为解决滚动直线导轨含微小圆弧特征复杂型面的高精度高效测量问题,本文围绕线结构光非接触测量技术展开研究,完成了测量方案设计、场景化算法体系构建及实验验证,主要结论如下:

(1)提出了“三向移动+多传感器协同”的线结构光测量方案,通过 Y 向高精度气浮导轨、X/Z 向伺服配准系统及高分辨率线激光测量仪,实现导轨型面全轮廓检测,解决传统接触式测量无法覆盖完整轮廓、易磨损、效率低的问题。

(2)构建了场景化点云改进算法体系,滚道加权自适应体素滤波平衡了细节保留和数据精简的需求,PCA-K 邻域拐点辨识实现了滚道与基准面精准分割,改进 RANSAC 圆弧拟合、最小二

乘-RANSAC 基准平面拟合误差均值 $<2\text{ }\mu\text{m}$,显著提升了处理精度与效率。

(3)验证了线结构光导轨型面测量系统具备高精度、高稳定性与强适用性,系统测量误差 $<5\text{ }\mu\text{m}$,达 SP 级标准,测量效率较三坐标测量机提升 15 倍以上,为滚动直线导轨型面检测提供高精度、高效的技术方案。

作者贡献声明:

李金峰:监督和领导研究活动的策划与执行;

马紫瑞:研究现状的调研分析,测量方法的提出,算法开发与程序编写,论文构思与撰写,测量实验的设计及数据整理和分析;

王海同:研究活动的管理,论文审核与修改;

张泽阳:实验平台的搭建。

参考文献:

[1] 李云峰. 设计参数不确定条件下滚动直线导轨运动性能分析[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2024(3): 68-72.
LI Y F. Analysis of motion performance of rolling linear guide under uncertain design parameters[J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2024(3): 68-72. (in Chinese)
[2] 周长光,王晓艺,冯虎田,等. 基于 THK-SHS35V

型号的滚动直线导轨副预紧力精确计算方法研究[J]. 机械工程学报, 2023, 59(3): 208-217.
ZHOU C G, WANG X Y, FENG H T, *et al.* Research on an explicit preload calculation method of linear rolling guide THK-SHS35V [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59(3): 208-217. (in Chinese)
[3] 梁医,王旭东,王晓艺,等. 滚动直线导轨副的滚道中心距误差与承载性能的关系[J]. 中国机械工

- 程, 2021, 32(18): 2254-2261, 2267.
- LIANG Y, WANG X D, WANG X Y, *et al.* Relationship of raceway center distance errors and load-bearing performance of rolling linear guide pairs[J]. *China Mechanical Engineering*, 2021, 32 (18): 2254-2261, 2267. (in Chinese)
- [4] 任士豪, 周长光, 叶坤奇, 等. 滚动直线导轨副摩擦系数试验研究[J]. *摩擦学学报*, 2022, 42(2): 305-313.
- REN S H, ZHOU C G, YE K Q, *et al.* Calculating and experiment study on friction coefficient of linear rolling guide[J]. *Tribology*, 2022, 42(2): 305-313. (in Chinese)
- [5] 陈虎, 周长光, 梁医, 等. 滚柱直线导轨副磨损系数计算与试验研究[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2023(4): 14-18.
- CHEN H, ZHOU C G, LIANG Y, *et al.* Calculation and experimental research of linear motion roller bearing wear coefficient[J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2023(4): 14-18. (in Chinese)
- [6] LIU W J, ZHANG S, LIN J H, *et al.* Investigation of static characteristics for linear rolling guide with considering geometric errors[J]. *Tribology International*, 2023, 187: 108698.
- [7] LIU W J, ZHANG S, LIN J H, *et al.* Effect of combined geometric errors on static load distribution and deformations for linear rolling guide[J]. *Tribology International*, 2024, 191: 109079.
- [8] HSIEH T H, HUANG H L, JYWE W Y, *et al.* Development of a machine for automatically measuring static/dynamic running parallelism in linear guideways [J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(3): 035115.
- [9] 叶飞原, 张艳红, 杨炫召. 滚动直线导轨副滑块精度检测仪的研制[J]. *制造技术与机床*, 2016(5): 109-111.
- YE F Y, ZHANG Y H, YANG X Z. Research and development of precision measuring instrument for the slider of linear rolling guideway[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2016(5): 109-111. (in Chinese)
- [10] 陈子健, 梁医, 欧屹. 滚动直线导轨型面测量的误差分析与试验验证[J]. *机床与液压*, 2019, 47(22): 13-19.
- CHEN Z J, LIANG Y, OU Y. Error analysis and experimental verification of linear guide profile measurement[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2019, 47(22): 13-19. (in Chinese)
- [11] 李泽宇, 欧屹, 王凯, 等. 导轨型面检测装置不确定度分析[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2021(6): 104-108, 115.
- LI Z Y, OU Y, WANG K, *et al.* Uncertainty analysis of detection device of guide profile [J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2021(6): 104-108, 115. (in Chinese)
- [12] 石照耀, 孙衍强. 齿轮三维测量中线激光传感器位姿标定方法[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(12): 39-46.
- SHI Z Y, SUN Y Q. A position and attitude calibration method for the linear laser sensor in gear 3D measurement[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(12): 39-46. (in Chinese)
- [13] 李茂月, 马康盛, 王飞, 等. 基于结构光在机测量的叶片点云预处理方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(8): 55-66.
- LI M Y, MA K S, WANG F, *et al.* Research on the preprocessing method of blade point cloud based on structured light on-machine measurement [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(8): 55-66. (in Chinese)
- [14] 荆颖春, 何启欣, 崔建英, 等. 道岔参数在线测量中激光条纹中心自适应提取[J]. *光学精密工程*, 2025, 33(15): 2414-2423.
- JING Y C, HE Q X, CUI J Y, *et al.* Adaptive extraction of laser stripe center for on-line measurement of turnout parameters [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2025, 33(15): 2414-2423. (in Chinese)
- [15] 刘少丽, 杜浩浩, 何楠, 等. 基于线结构光的大型构件表面尺寸加工质量检测方法[J]. *北京理工大学学报*, 2024, 44(7): 701-711.
- LIU S L, DU H H, HE N, *et al.* Machining quality inspection method based on line structured light for surface dimension of large structural parts[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2024, 44(7): 701-711. (in Chinese)
- [16] 马子骥, 董艳茹, 刘宏立, 等. 基于多线结构光视

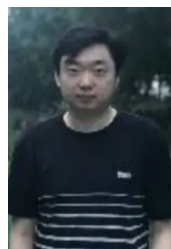
- 觉的钢轨波磨动态测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(6): 189-197.
- MA Z J, DONG Y R, LIU H L, *et al.* Rail corrugation dynamic measurement method based on multi-line structured-light vision[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(6): 189-197. (in Chinese)
- [17] 李文涛, 王培俊, 陈亚东, 等. 钢轨全轮廓线结构光双目视觉测量系统标定[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(3): 203-211.
- LI W T, WANG P J, CHEN Y D, *et al.* Calibration of binocular vision measurement system by line structured light for rail full profile[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(3): 203-211. (in Chinese)
- [18] 祝祥, 邵双运, 宋志军. 基于线结构光传感器的轨道板几何形貌检测方法[J]. 中国光学, 2018, 11(5): 841-850.
- ZHU X, SHAO S Y, SONG Z J. A detection method based on line-structured light sensor for geometrical morphology of track slab[J]. *Chinese Journal of Optics*, 2018, 11(5): 841-850. (in Chinese)
- [19] 石照耀, 李美川, 孙衍强, 等. 齿轮线激光三维测量仪的研制[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(4): 95-103.
- SHI Z Y, LI M C, SUN Y Q, *et al.* Development of three-dimensional gear measuring instrument with line laser [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, 45(4): 95-103. (in Chinese)

作者简介:



李金峰(1987—),男,博士,2008年于大连理工大学获得学士学位,2015年于清华大学获得博士学位,现为雁栖湖基础制造技术研究院(北京)有限公司副总工程师、科技发展部部长,主要研究方向为智能检测装备,工业母机及核心部件,可靠性测评等。E-mail: lijinfeng@pcmi.com.cn

通讯作者:



王海同(1988—),男,博士,2010年于大连理工大学获得学士学位,2016年于清华大学获得博士学位,现为北京交通大学机械与电子控制工程学院教授、博士生导师,主要研究方向为机器人与智能制造技术、先进加工与智能制造、智能装备技术与工程等。E-mail: htwang@bjtu.edu.cn。