

线激光传感器的边缘偏差修正方法

赵洪楠¹, 江文松¹, 杨力¹, 罗哉^{1*}, 李泓洋²

(1. 中国计量大学 计量测试工程学院, 浙江 杭州 310018;

2. 中国运载火箭技术研究院 空间物理重点实验室, 北京 100076)

摘要: 为了修正线激光传感器在轮廓测量中的边缘偏差, 提出了一种边缘偏差修正方法。该方法通过分析边缘偏差的主要误差来源, 建立一种基于曼哈顿距离和切比雪夫距离的混合去噪模型, 实现杂散噪声的滤除; 采用最小二乘法对线激光轮廓测量误差模型进行补偿。为了验证该方法的有效性, 以量块的标称尺寸作为评价指标进行测量校准实验。实验结果表明: 该修正方法对杂散噪声的滤除效果显著; 其中, 未经补偿的尺寸测量误差为 0.43 mm, 经修正方法补偿后的尺寸测量误差最小达 0.04 mm, 比前者降低了一个数量级。因此, 该方法可有效修正边缘偏差, 提高线激光传感器的轮廓测量精度。

关键词: 线激光; 轮廓测量; 误差补偿; 点云; 算法

中图分类号: TB921 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210317

Correction method for edge deviation of line laser sensor

Zhao Hongnan¹, Jiang Wensong¹, Yang Li¹, Luo Zai^{1*}, Li Hongyang²

(1. College of Metrology and Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;

2. Science and Technology on Space Physics Laboratory, China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: In order to correct the edge deviation of the line laser sensor in profile measurement, an edge deviation correction method was proposed. This method established a hybrid denoising model based on Manhattan distance and Chebyshev distance by analyzing the main error sources of edge deviation, and have achieved the filtering of spurious noise. In addition, the error model of line laser profile measurement was compensated by the least square. In order to verify the effectiveness of this method, the nominal size of the gauge block was used as an evaluation index to carry out measurement and calibration experiments. The experimental results show that the correction method has a significant effect on filtering stray noise. Among them, the uncompensated size measurement error is 0.43 mm, and the size measurement error is compensated is as small as 0.04 mm after the correction method, which is an order of magnitude lower than the former. Therefore, this method can effectively correct the edge deviation and improve the profile measurement accuracy of the line laser sensor.

Key words: line laser; profile measurement; error compensation; point cloud; algorithm

收稿日期: 2021-05-17; 修订日期: 2021-08-03

基金项目: 国家自然科学基金 (52075511, 52005471, 51927811, 51675499); 中央高校基本科研业务费专项 (PA2020GDSK0072); 浙江省自然科学基金 (LQ20E050016)

作者简介: 赵洪楠, 男, 硕士生, 主要从事机器视觉和几何量测量等方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 罗哉, 男, 教授, 博士, 主要从事机器视觉的移动测量机器人关键技术的研究及设备开发。

0 引言

三维轮廓测量被广泛应用于工业检测、机械加工、逆向工程等领域,目前已发展了三坐标测量机、电磁学测量法、声学测量法、光学测量法等^[1-2]。其中,基于光学测量法的线激光测量技术具有非接触、高精度、高分辨率等优点,已渗透到诸多行业中^[3]。基于线激光测量技术的线激光传感器通过相机光心、投影仪光心、物体表面待测点构成交叉光轴式结构实现物体三维信息的获取^[4],从相机拍摄的图像中提取光条轮廓与中心是影响其测量精度的关键因素^[5]。目前,国内外学者对线激光测量系统取得了一些不错的研究成果^[6-7]。

线激光传感器在轮廓测量中受到扫描视场、被测物、环境等影响,轮廓边缘处的条纹容易产生亮度不均匀、形状不规则、光场偏移等问题,导致图像出现位置模糊、偏移或薄弱现象,产生明显的测量偏差,降低了轮廓测量精度^[8-9],而传统边缘检测算法存在容易产生虚假边缘和边缘信息缺失的问题^[10]。对此,何立红等人^[11]提出了一种检测线激光带边缘的新算法,利用统计跳变回归分析和格式塔理论拟合光条边缘线,提高了线激光带边缘检测的精度和速度,但对噪声的抑制效果不佳;陈黎艳等人^[12]提出了一种激光图像亚像素边缘高精度自适应检测方法,有效提高了检测精度,对噪声的抑制效果较好,但阈值需要人工反复调整,且适用理想激光光条;伍非凡等人^[13]针对钢板轮廓检测中的线激光端点提取,提出了一种基于二次投影的边缘信息提取算法,重复检测精度高,但实际效果不明显。目前,针对线激光传感器的边缘偏差研究主要集中在光条图像边缘的精确提取上,但其只是边缘偏差的主要误差来源之一,因此对于线激光传感器的边缘偏差修正,仍有待更深入的研究。

针对线激光传感器在轮廓测量中存在的边缘偏差问题,文中通过分析边缘偏差的主要误差来源,分别提出相对应的修正算法,并进行实验以验证算法的有效性。

1 轮廓边缘测量误差源分析

1.1 线激光传感器

基于激光三角法的线激光传感器如图 1 所示。

传感器内的激光发射系统将线型激光投射到被测物表面上,反射光经成像透镜组后被传感器内另一端的相机接收并形成条纹图像,根据条纹图像在相机上的成像位置可计算得到被测物表面的三维轮廓信息。

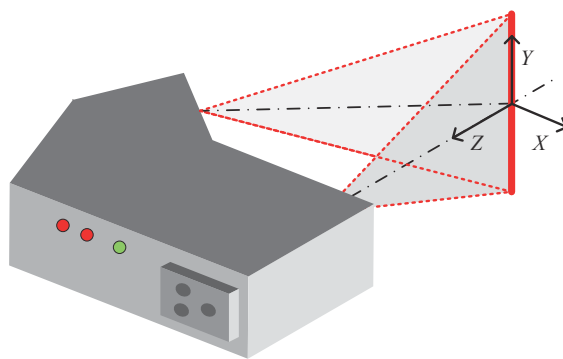


图 1 线激光传感器示意图

Fig.1 Schematic diagram of line laser sensor

1.2 边缘检测与提取误差

线激光传感器的边缘检测与提取误差是指在轮廓测量时,轮廓边缘处微倒角的倾斜度和光条图像边缘的提取算法等对边缘测量结果产生的偏差,可分别概括为边缘特征误差和图像处理误差。

(1) 边缘特征误差

被测物边缘特征是指被测物轮廓边缘处的微倒角或微圆角,对其测量时的倾斜度或曲率较大,降低了该处被测点的成像精度,影响轮廓边缘检测精度,产生测量误差。在激光三角测量中,由于被测面倾斜所产生的误差一般可达 $10\sim 10^3 \mu\text{m}$ 。

如图 2 所示,线激光传感器在测量距离 H 下对工件进行轮廓测量,图 2(b) 中的阴影区域为工件轮廓边缘处的微倒角,被测点 P 的反射光线与所在平面法线的夹角为倾斜角 θ ,在倾斜角 θ 的影响下,点 P 处的光斑质心在成像平面上的位置被改变,使测量结果发生偏移或缺失,产生边缘特征误差。

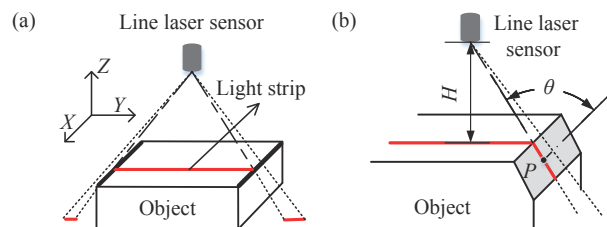


图 2 (a) 线激光轮廓扫描;(b) 边缘放大

Fig.2 (a) Line laser contour scanning; (b) Edge enlargement

(2) 图像处理误差

图 3 所示为线激光传感器在轮廓测量时其内部相机拍摄被测物表面光条得到的条纹图像。在像平面 UOV 上形成灰色区域所包围的初始条纹, 测量系统根据设定的阈值对条纹图像进行二值化分割, 可得到黑色区域的粗提取条纹, 并在此基础上进一步获取条纹中心坐标以实现精确测量。

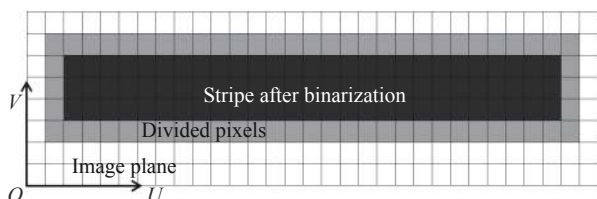


图 3 图像处理误差

Fig.3 Image processing error

目前越来越多的条纹中心提取算法被提出, 但对算法的提取精度和有效性没有统一的评价标准, 加上图像分割时的阈值设定的不准确性, 使条纹图像在 U 轴方向两端的像素点极易被剔除, 如图 3 所示, 图中的黑色条纹相比灰色条纹在 U 轴方向上缺失了 2 个像素点, 产生了测量误差。像素点的缺失会导致尺寸测量结果的偏小, 单位像素点剔除误差等于 Y 轴数据点间距 δ_y , 即 Y 轴精度, 其值取决于像素尺寸和物距, 可用测量结果中的相邻点间距的均值表征:

$$\delta_y = \frac{\sum_{i=2}^N (|y_i - y_{i-1}|)}{N} \quad (1)$$

式中: N 表示数据点个数; y_i 表示第 i 个点的 Y 轴坐标。若图像处理剔除了 x 个像素点, 则图像处理误差可表示为:

$$\delta_{image} = x \cdot \delta_y \quad (2)$$

边缘特征误差和图像处理误差均会导致轮廓边缘信息的偏移和缺失, 因此一般测量时边缘检测与提取误差会使尺寸测量结果偏小。

1.3 垂直侧面噪声

如图 2(a) 所示, 线激光传感器在对工件表面测量时, 扇形激光面无法投射到垂直侧面上, 因此理论上传感器无法得到工件垂直侧面处的点云数据, 且根据线激光传感器的测量原理可知, Y 轴数据点间距为微米级。但由于实际测量活动受到环境光、空间位置、电磁辐射等因素的干扰, 在被测工件的垂直侧面处会

出现毫米级间距的点云数据, 即出现了“伪侧面”现象, 如图 4(a) 所示, 选取图中的三维点云模型在 X 轴方向上中间处的某帧点云, 其边缘放大图如图 4(b) 所示。

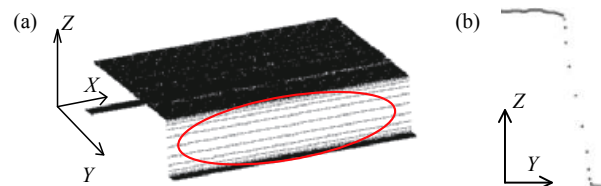


图 4 (a) 垂直侧面噪声; (b) 边缘放大

Fig.4 (a) Vertical side noise; (b) Edge enlargement

“伪侧面”就是离散的垂直侧面噪声, 其并非是被测物的真实轮廓信息, 它的产生具有一定的随机性, 需对其进行滤除。

2 轮廓边缘偏差的修正模型

针对线激光传感器在工件轮廓测量中出现的边缘偏差, 需先滤除垂直侧面噪声, 再对边缘检测与提取误差进行补偿。

2.1 垂直侧面噪声滤除算法

垂直侧面噪声中相邻两点的间距均远大于传感器的 Y 轴数据点间距, 因此提出一种基于曼哈顿距离和切比雪夫距离的去噪算法, 搜索每一帧数据中的垂直侧面噪声并对其进行滤除。

(1) 遍历点 $P_i (y_i, z_i) (i=2, 3, \dots, N-1)$ 与其相邻两点 $P_{i-1} (y_{i-1}, z_{i-1})$ 和 $P_{i+1} (y_{i+1}, z_{i+1})$ 的曼哈顿距离 M_i^- 、 M_i^+ 和切比雪夫距离 Q_i^- 、 Q_i^+ :

$$\begin{cases} M_i^- = |y_i - y_{i-1}| + |z_i - z_{i-1}| \\ M_i^+ = |y_i - y_{i+1}| + |z_i - z_{i+1}| \\ Q_i^- = \max(|y_i - y_{i-1}|, |z_i - z_{i-1}|) \\ Q_i^+ = \max(|y_i - y_{i+1}|, |z_i - z_{i+1}|) \end{cases} \quad (3)$$

(2) 根据 Y 轴数据点间距 δ_y 设置过滤系数 R , 判断切比雪夫距离 Q_i 是否存在异常:

$$V_i = \begin{cases} 1, & Q_i^- > R \cap Q_i^+ > R \\ 0, & Q_i^- < R \cup Q_i^+ < R \end{cases} \quad (4)$$

(3) 若 $V_i=0$, 说明 P_i 为有效点, 保留 P_i 并根据步骤 (2) 对下一个点继续检测; 若 $V_i=1$, 说明 P_i 为可疑点, 进一步对其判断:

$$U_i = \begin{cases} 1, & (M_i^- - Q_i^-) > R \cap (M_i^+ - Q_i^+) > R \\ 0, & (M_i^- - Q_i^-) < R \cup (M_i^+ - Q_i^+) < R \end{cases} \quad (5)$$

(4) 若 $U_i=0$, 说明 P_i 为有效点, 保留 P_i 并根据步骤 (2) 继续对下一个点检测; 若 $U_i=1$, 说明 P_i 为噪声点, 对其滤除并根据步骤 (2) 对下一个点继续检测。

式中, N 为每一帧的测量数据点个数; V 为可疑点筛选函数; U 为噪声点确定函数。算法的具体实现流程如图 5 所示。

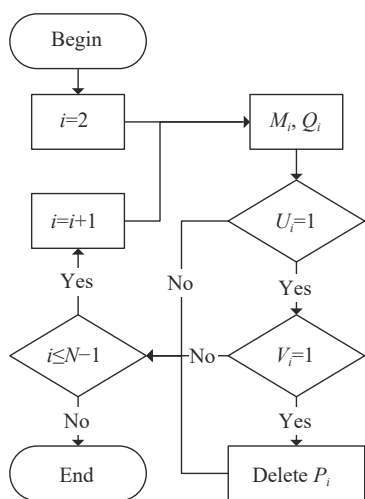


图 5 垂直侧面噪声滤除流程

Fig.5 Filtering process of vertical side noise

2.2 边缘检测与提取误差补偿算法

轮廓边缘点及其附近点包含轮廓边缘丰富的几何特征信息, 因此针对滤噪后的每一帧测量数据, 以轮廓边缘点 P_{edge} 为核心, 通过邻域点 P_{next} 构建基于最小二乘法的边缘轮廓曲线, 通过插值补偿缺失数据点, 实现边缘检测与提取误差的补偿。

(1) 遍历点 $P_i (y_i, z_i) (i=2, 3, \dots, N)$ 的高度突变信号:

$$W_i = \begin{cases} 1, & z_i - z_{i-1} > R \\ -1, & -(z_i - z_{i-1}) > R \\ 0, & |z_i - z_{i-1}| < R \end{cases} \quad (6)$$

(2) 若 $V=\pm 1$, 表示 P_i 的高度发生突变, 此时存在轮廓边缘点:

$$P_{edge} = \begin{cases} P_i, & W = 1 \\ P_{i-1}, & W = -1 \end{cases} \quad (7)$$

(3) 搜索边缘点在领域 T 内的第 t 个相邻点:

$$P_{next}^{(t)} = \begin{cases} P_{i+t}, & W = 1 \\ P_{i-1-t}, & W = -1 \end{cases} \quad (8)$$

(4) 根据边缘点 P_{edge} 与其 T 个相邻点 P_{next} 构建

基于最小二乘法的多项式拟合函数:

$$\begin{cases} z(y) = \sum_{j=0}^T a_j y^j \\ P_0 = P_{edge}, P_1 = P_{next}^{(1)}, \dots, P_T = P_{next}^{(T)} \end{cases} \quad (9)$$

(5) 根据所拟合的多项式 $z(y)$, 设置插值点 Y 轴间距 y_a , 进行插值补偿, 得到补偿点:

$$\begin{cases} P_{add}^{(k)}((y_i - k \cdot y_a), z(y_i - k \cdot y_a)), W = 1 \\ P_{add}^{(k)}((y_{i-1} + k \cdot y_a), z(y_{i-1} + k \cdot y_a)), W = -1 \end{cases} \quad (10)$$

式中: W 为高度突变信号函数; P_{edge} 为轮廓边缘点; T 为邻域内点数, 表示邻域半径; $P_{next}^{(t)}$ 表示轮廓边缘点的第 t 个相邻点, $t \in [1, T]$; $z(y)$ 为多项式拟合函数; $a_j (j=0, 1, \dots)$ 为其系数; $P_{add}^{(k)}$ 为边缘点的第 k 个插值补偿点, $k \in [1, K]$, K 为补偿系数。图 6 为 $y_a = \delta_y$, $T=2$, $K=2$ 的插值补偿示意图。

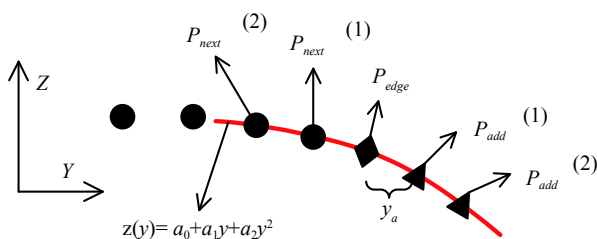


图 6 插值补偿示意

Fig.6 Illustration of interpolation compensation

3 算法实测性与误差补偿

为了验证文中所提算法的有效性, 以二级标准量块作为被测工件, 选择 nxSensor-I90 线激光扫描仪作为测试对象, 以 MERA60 高精度电控转台作为尺寸测量辅助设备, 利用上位机实现线激光传感器对量块三维轮廓数据的采集和优化。相关设备参数如表 1 所示, 实验环境为光线较暗的室内。

表 1 设备参数指标

Tab.1 Parameters of equipment

Module	Indicators and parameters
Standard gauge block	Limit deviation: $\pm 0.6 \mu\text{m}$
	Edge feature: Chamfer
Line laser sensor	Y axis accuracy: 0.045 mm
	Z axis range: $-60 \sim 40 \text{ mm}$
High-precision rotary table	Resolution: 0.02°
	Positioning accuracy: 0.05°

3.1 垂直侧面噪声滤除算法实测

实验平台和装置如图 7 所示,将线激光传感器沿其 X 轴方向对量块表面进行扫描,测量结果产生了垂直侧面噪声,如图 4 所示。

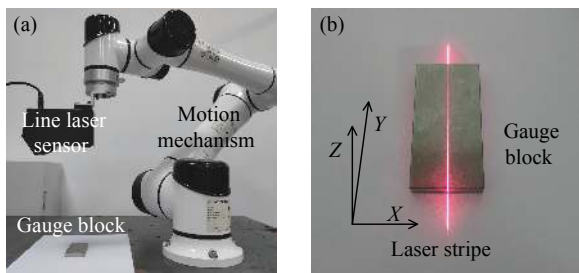


图 7 (a) 实验平台; (b) 扫描实物

Fig.7 (a) Experiment platform; (b) Scanned object

通过文中的垂直侧面噪声滤除算法,设置过滤系数 $R=0.10\text{ mm}$,再次测量得到如图 8 所示的结果。通过与图 4 对比显示,垂直侧面噪声已被滤除,表明了文中算法对于噪声滤除的可行性和有效性。

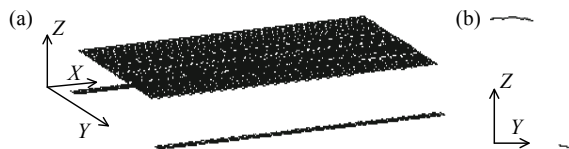


图 8 (a) 去噪效果; (b) 边缘放大

Fig.8 (a) Noise removal effect; (b) Edge enlargement

3.2 边缘检测与提取误差补偿算法实测

针对线激光传感器提出了一种基于高精度转台的量块尺寸测量方法,以准确获得量块的尺寸测量值,进而可计算边缘检测与提取误差。

3.2.1 标准量块尺寸的精确测量方法设计

标准尺寸测量方案设计如图 9 所示。将标准量块固定于高精度转台中心处,线激光传感器固定于机械臂末端并保持静止,确保激光光条覆盖量块的被测宽度,通过上位机连接运动控制器并控制转台转动,如图 10 所示,具体流程如下:

(1) 控制转台使光条在量块表面以角速度 ω 保持顺时针转动,在光条与量块表面中心线平行前,启动线激光传感器采样共 M 帧;

(2) 根据第 m 帧 ($m=1,2,\dots,M$) 采样所得点云数据中的边缘点 $A_m(0,y_{Am},z_{Am})$ 和 $B_m(0,y_{Bm},z_{Bm})$ 的距离表征第 m 帧的宽度测量值 l_m ;

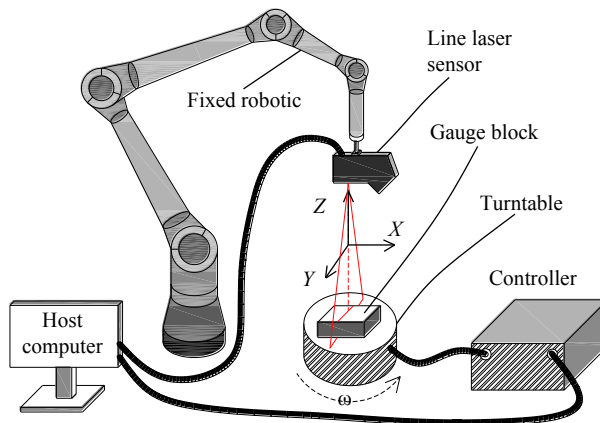


图 9 尺寸测量方案设计

Fig.9 Design of dimensional measurement scheme

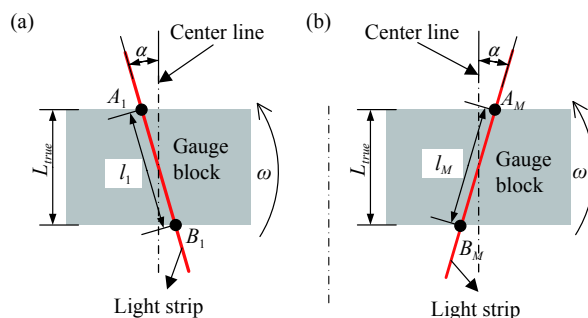


图 10 (a) 第 1 次采样; (b) 第 M 次采样

Fig.10 (a) First sampling; (b) Mth sample

$$l_m = \sqrt{(y_{Am} - y_{Bm})^2 + (z_{Am} - z_{Bm})^2} \quad (11)$$

设边缘检测与提取误差服从均匀分布,则尺寸测量值 L_{meas} 和宽度测量值 l_m 满足:

$$L_{meas} = l_m \cdot \cos(-\alpha + \frac{\omega}{F}(m-1)) \quad (12)$$

式中: F 表示线激光传感器的采样频率; α 表示光条与量块表面中心线的夹角;

(3) 对公式 (12) 采用最小二乘拟合可得到尺寸测量值 L_{meas} , 则边缘检测与提取误差 Δ 可用尺寸测量误差的均方根值表征:

$$\Delta = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (L_{meas}^{(i)} - L_{true})^2} \quad (13)$$

式中: n 表示测量次数; L_{true} 表示量块的标称尺寸。

3.2.2 尺寸测量与误差补偿结果比较

分别对标称尺寸为 20 mm、40 mm 和 60 mm 的标准量块进行尺寸测量实验,其中根据公式 (12) 采用最小二乘法拟合得到了单次尺寸测量值 L_{meas} 的结果如

图 11 所示, 图中采样帧数 $M=150$ 。尺寸测量结果如表 2 所示, 表中边缘误差结果包括量块宽度方向上两

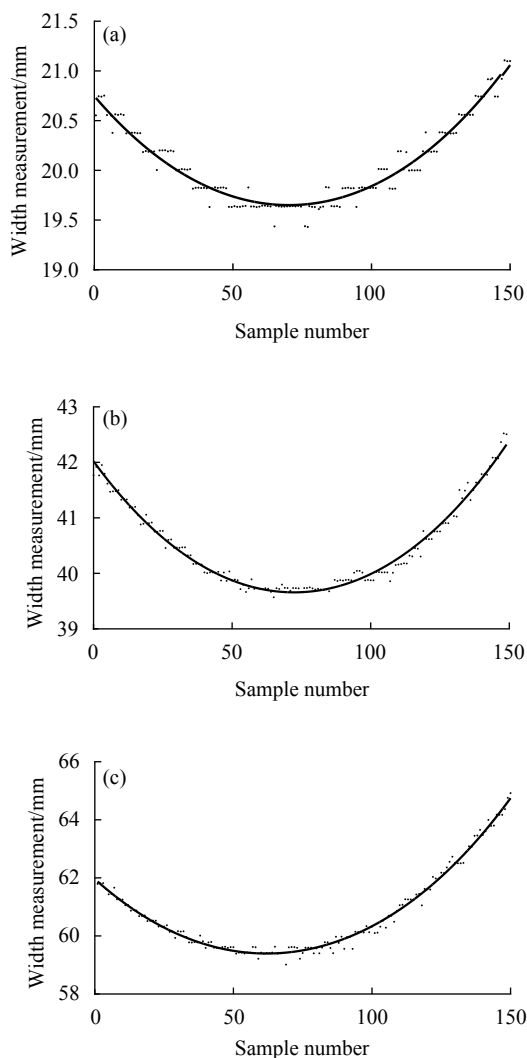


图 11 (a) 20 mm 量块尺寸测量; (b) 40 mm 量块尺寸测量; (c) 60 mm 量块尺寸测量

Fig.11 (a) Dimension measurement of 20 mm gauge block; (b) Dimension measurement of 40 mm gauge block; (c) Dimension measurement of 60 mm gauge block

表 2 误差补偿前后的尺寸测量结果 (单位: mm)

Tab.2 Dimension measurement results before and after error compensation (Unit: mm)

Size of gauge block	No compensation		$y_a=0.078$ mm, $K=2$		$y_a=0.039$ mm, $K=5$	
	L_{meas}	Δ	L_{meas}	Δ	L_{meas}	Δ
20	19.59		19.90		19.96	
40	39.57	0.43	39.91	0.10	39.98	0.04
60	59.55		59.89		39.95	

端边缘误差之和。设定边缘检测与提取误差补偿算法的领域半径 $T=3$, 根据公式 (1) 计算得到 Y 轴精度 $\delta_y \approx 0.078$ mm, 分别选择 $y_a=\delta_y$ 、 $K=2$ 和 $y_a=\delta_y/2$ 、 $K=5$, 加入补偿算法后再次进行测量实验, 结果如表 2 所示。

根据表 2 结果可知, 未经优化前, 线激光传感器对标准量块的尺寸测量误差均值为 0.43 mm, 经算法在不同参数下补偿后的尺寸测量误差均值为 0.10 mm 和 0.04 mm, 比优化前分别降低 4 倍和 10 倍, 测量误差降低了一个数量级; 图 12 所示为不同量块的尺寸测量误差在补偿前后的对比, 直观表现了算法对误差补偿的显著效果, 说明了边缘检测与提取算法对误差补偿的可行性与有效性。

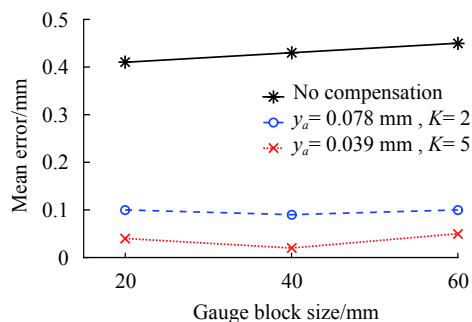


图 12 补偿前后的尺寸测量误差

Fig.12 Dimension measurement error before and after compensation

4 结 论

针对线激光传感器在轮廓测量中的边缘偏差问题, 文中分析了边缘偏差的主要误差来源, 针对垂直侧面噪声提出了一种基于曼哈顿距离与切比雪夫距离的混合去噪模型, 通过量块表面扫描实验实现了垂直侧面噪声的滤除; 提出了一种基于最小二乘法的误差补偿算法, 以量块的标称尺寸为评价指标进行尺寸测量实验验证了算法的有效性。结果表明: 未经算法优化前的尺寸测量误差为 0.43 mm, 经补偿算法在不同参数下优化后的尺寸测量误差均值分别为 0.10 mm 和 0.04 mm, 比未补偿前的边缘偏差分别降低 4 倍和 10 倍。因此, 文中方法可有效滤除边缘偏差中的杂散噪声并实现误差补偿, 提高了线激光传感器的轮廓测量精度。基于单帧测量数据的滤噪与误差补偿的算法可与线激光传感器的数据采集同时进行, 避免了后期点云拼接对算法的影响, 该方法对外轮廓视觉定

位、基准孔位检测、特征线提取等工程具有较为广泛的适用性。

参考文献:

- [1] Ma G Q, Liu L, Yu Z L, et al. Application and development of three-dimensional profile measurement for large and complex surface [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(2): 214-228. (in Chinese)
- [2] Zhou Z, Liu W, Wu Q, et al. A combined measurement method for large-size aerospace components [J]. *Sensors*, 2020, 20(17): 4843.
- [3] Zhang T, Li B, Zou Y B. Scanning imaging system based on stripe type laser sensor and robot [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 53-58. (in Chinese)
- [4] Wang Y H, Zhang Q, Hu Y, et al. 3D small-field surface imaging based on microscopic fringe projection profilometry: a review [J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(3): 447-457. (in Chinese)
- [5] Song X F, Li J P, Chen H J, et al. Laser centerline extraction method for 3D measurement of structured light in multi-scenarios [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(1): 0113004. (in Chinese)
- [6] Wu X J, Tang N, Liu B, et al. A novel high precise laser 3D profile scanning method with flexible calibration [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 132: 105938.
- [7] Pan H H, Wang Y W, Xu D B, et al. Calibration of line-structure light plane using non-specific target [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(1): 54-60. (in Chinese)
- [8] Tang J, Tan X, Li X, et al. Research on edge detection algorithm based on line laser scanning [J]. *Procedia CIRP*, 2019, 84: 1101-1106.
- [9] Wang C J, Shi N N, Sun T, et al. Image deblurring for laser active illumination based on light vein features [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(5): 1159-1167. (in Chinese)
- [10] Zhang H X, Wang Q, Zhang T F, et al. Detection algorithm of image edge for laser active imaging [J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(6): 755-760. (in Chinese)
- [11] He L H, Zhang J Z, Zhang L. Fast and robust edge detection method for line laser strip [J]. *Application Research of Computers*, 2018, 35(10): 3173-3175. (in Chinese)
- [12] Chen L Y, Xiong Q Q. High precision adaptive detection of sub-pixel edge of laser image [J]. *Laser Journal*, 2020, 41(11): 86-90. (in Chinese)
- [13] Wu F F, Hu X X, Hu Y, et al. Research on medium thickness plate laser line endpoint extraction algorithm of contour detection. [J]. *Group Technology & Production Modernization*, 2017, 34(3): 58-62. (in Chinese)