

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2208911

# 基于点云处理的小型工业零件高度精密测量\*

张潇丹 单彦虎 储成群  
(中北大学仪器与电子学院 太原 030051)

**摘要:** 针对很多小型工业零件存在微米级测量的需求,提出了一种点云多次滤波与平面拟合相结合的测量方法。以上下平面平行的规则直三棱柱体工件作为测量对象,使用3D线激光传感器获取工件的点云模型并传输到计算机中进行处理,将点云数据首先通过统计滤波剔除噪声和离群值;其次利用体素滤波降采样精简点云数量;然后采用直通滤波分离出工件点云的上下表面;再分别对上下表面的点云通过随机抽样一致性(RANSAC)算法拟合出平面方程;最后计算上下平面之间的间距即为被测工件的高度信息。将该方法测得的高度与激光三角法原理测得的高度数据进行对比,结果表明,该方法测量精度提高了72.33%;同时对于不同的点云密度,利用所提出的方法进行测量,测得当降采样中体素立方体的边长为15 cm时(点云数量精简了98.3%时)测量的误差最小,最小能达到5.1  $\mu\text{m}$ 。该方法大大提高了工件的测量精度,可以广泛应用于工业测量中。

**关键词:** 激光三角法;点云统计滤波;点云体素滤波;点云直通滤波;点云平面拟合;工件测量

**中图分类号:** TP391 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

## Highly precise measurement of small industrial parts based on point cloud processing

Zhang Xiaodan Shan Yanhu Chu Chengqun

(School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** In order to meet the requirement of micron scale measurement for many small industrial parts, a measuring method combining point cloud multiple filtering and plane fitting was proposed. A 3D line laser sensor was used to obtain the point cloud model of the regular triangular prism, which was parallel to the upper and lower planes, and the point cloud model was transferred to the computer for processing. Firstly, the noise and outliers were removed by statistical filtering. Secondly, the number of point clouds is reduced by voxel filtering and down-sampling. Then the upper and lower surfaces of the workpiece point cloud are separated by straight-through filtering. Then, the point clouds on the upper and lower surfaces are fitted with the plane equation by RANSAC algorithm. Finally, the distance between the upper and lower planes is calculated as the height information of the measured workpiece. The height measured by this method is compared with that measured by laser triangulation. The results show that the accuracy of this method is improved by 72.33%. At the same time, for different point cloud densities, the proposed method is used to measure, and the measurement error is minimum when the side length of the voxel cube in the sample is 15 cm (when the number of point clouds is reduced by 98.3%), and the minimum can reach 5.1  $\mu\text{m}$ . This method greatly improves the measuring accuracy of workpiece and can be widely used in industrial measurement.

**Keywords:** laser triangulation; point cloud statistical filtering; point cloud voxel filtering; point cloud passthrough filtering; point cloud plane fitting; workpiece measurement

## 0 引言

小型工业零件几何尺寸的测量是工业生产中至关重要的一步,特别是工件高度的测量是长期以来的一项研究热

点。对于工业零件的高度精密测量,要求实现高准确度、高精度、高效率。现在最常用的测量几何尺寸的方法主要包括接触式测量<sup>[1]</sup>和非接触式测量<sup>[2]</sup>,接触式主要是通过游标卡尺、螺旋测微仪和三坐标测量机等设备进行测量,测量

收稿日期:2022-01-21

\* 基金项目:国家自然科学基金面上项目(62075199)资助

准确度高但是长期触摸后可能会对零件表面产生一定的磨损。非接触式测量中最常用的是机器视觉法和光传感器技术,采用激光扫描法或图像处理等计算机测量的方法避免了对工件表面的接触,同时对被测零件的形状也没有过高的要求。其中激光三角法<sup>[3]</sup>利用光学成像的空间三角原理,实现了尺寸测量的需求,但是传统单一的激光三角测量对光学系统要求过高,且计算复杂,所以目前很多研究都将其与机器视觉、点云处理<sup>[4-5]</sup>等结合起来,应用在物质测量的领域。机器视觉具有类似人眼视觉的效果,被广泛应用于工业零件的尺寸测量,燕必希等<sup>[6]</sup>结合激光三角法和二维机器视觉测量技术,实现了对多个高度零件的二维尺寸测量,首先使用激光三角法对不同平面进行测量,通过两步结合实现了对处于不同高度平面尺寸的快速测量,测量结果与三坐标仪测试数据相比最大误差小于 0.08 mm。但该方法受激光三角不同高度的标定影响较大,且需要先进的图像处理算法提高测量精度。而三维线激光扫描技术能快速高效地获取到工件的表面点云,由于点云数据中包含有被测零件的三维坐标信息,这就使得通过一些特定的点云处理算法来实现对工件高度尺寸的精密测量成为新的研究趋势,刘源等<sup>[7]</sup>等将线激光三角法和点云处理结合,对标准件上的圆孔尺寸进行了测量及误差分析,待测标准件被置于线激光三角测距传感器的测试平台上,首先仅设置圆孔周围为目标区域,然后对圆孔三维点云数据进行采集,最后采用最小二乘和最小距离拟合法,实现了对小圆孔尺寸的高效精准测量,测得的最小直径的误差仅为 2  $\mu\text{m}$ 。该方法在满足测量效率的同时,测量精度显著提高,验证了结合激光三角和点云处理的尺寸测量方法的可行性和有效性。

为了提高小型工件高度测量的精度,本文在利用激光三角法原理采集到点云数据后,提出了结合点云多次滤波与平面拟合的测量方法,通过实验验证了方案的可行性。该方法相较于 3D 传感器测量软件“SR\_Studio\_4”的测量结果,精度大大提高;还研究了不同点云密度下拟合出平面后测量的精度,找出了最佳点云密度。

## 1 点云采集

利用激光三角法原理搭建点云的采集系统,工件的点云数据采集示意图如图 1 所示,线激光 3D 传感器固定在视觉支架上,置于在被测工件的正上方,被测零件放置于能匀速直线运动的步进电机上的载物台处,红色线激光垂直射在待测物的上表面并产生漫反射,在复杂的光学系统的设计下,反射光能被 3D 传感器中的相机镜头捕捉到,最后通过镜头反射到感光芯片上,这些反射成像的数据信号会被信号传输线传输到控制器端并存储为带有坐标信息的点云数据。本文就是在利用激光三角法硬件平台获取到点云数据后,通过对后续点云的多次滤波和平面拟合处理来获得更高精度的高度信息。

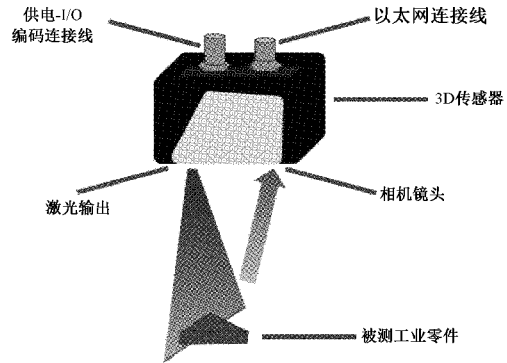


图 1 点云采集示意图

## 2 点云测量

### 2.1 点云测量整体流程

得到被测工件的点云数据之后,首先通过统计滤波器去除大量的离群点;其次利用点云体素网格降采样来减少点云的数量,以提高后续点云测量的效率;再通过直通滤波分割出工件的上表面和底面;结合随机抽样一致性(random sample consensus, RANSAC)算法能够拟合出上下表面的平面方程;最后利用求面到面的间距以获得工件的高度数据。整体点云测量的步骤如图 2 所示。

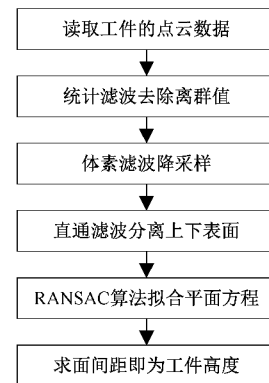


图 2 点云测量方法步骤

### 2.2 点云的统计滤波

对点云数据的采集过程中,由于受到周围环境以及采集装置的精度等影响,使得获取到的点云数据会存在一些噪声点和离群点<sup>[8]</sup>,统计滤波器<sup>[9]</sup>相比于其它滤波器,对于分布明显的离群点有很好的剔除效果。离群点的特点是相对远离大量密集的点云群,在空间中分布相对稀疏。鉴于该特征,统计滤波器通过比较点云的密度实现滤波效果,当某处的点云密度小于规定的阈值时,该处的点云即可被滤除。具体的实现方法如下:

计算点云模型中每一个点距离其自身最近的  $m$  个点的平均距离,则点云模型中所有点计算出的平均距离值会满足高斯分布;根据给定的均值和方差,便能够滤除方差之外的离群点<sup>[10]</sup>。

将原始工件点云数据通过统计滤波器进行滤波。本方案中取  $m=20$ , 即计算点云模型中每一个点到其最近邻的 20 个点的平均距离以构成高斯分布, 将判断是否为离群点的阈值设置成 5, 根据该密度能够对三棱柱体工件点云的离群值有明显的去除效果。如图 3 所示 (a) 为工件原始点云图, 点的数量为 1 732 538, 图 3 (b) 为经过统计滤波后去除明显的一些离群值后的点云图, 点云数量为 1 730 609, 去除了将近 2 000 个噪声点和离群点。图中所框部分局部放大对比, 可见去除了一些工件侧面的离群点, 提高了后续的点云上下表面分离以及平面拟合的精度。

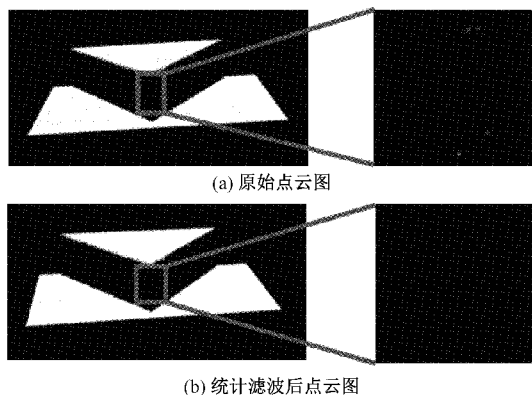


图 3 工件点云经过统计滤波前后对比图

### 2.3 点云的体素滤波

由线激光这种高精度的三维扫描设备获取的原始点云模型具有数据规模庞大的特点<sup>[11]</sup>。即使对工件点云进行统计滤波去除离群点后, 点云的数量仍然多达上百万, 测量效率并不高。体素化网格<sup>[12]</sup>方法满足在对点云数据实现整体降密度采样, 即精简点云数量的同时, 还能够不破坏原始点云数据的表面形状和特征, 有效地提高后续点云处理算法的运行效率。该方法具体过程如下所述:

假设工件的点云数据在三维坐标轴  $x, y, z$  方向上的范围分别为  $m_x, m_y, m_z$ 。首先, 创建一个能够完全包含所有点云的最小长方体盒子, 那么该盒子的体积为  $V = m_x * m_y * m_z$ 。长方体盒子内部需要继续栅格体素划分成若干个小长方体, 这些小长方体即为体素<sup>[13]</sup>, 根据滤波需求可以设置体素的长  $l_x$ , 宽  $l_y$  和高  $l_z$ 。每个体素中都包含着若干个点云数据, 体素滤波方法就是计算每个体素内所有点云数据的重心<sup>[14-15]</sup>, 直接用该重心点代替体素中所有的点, 从而实现了把体素中若干个点精简为一个点来减少点云个数。假设每个体素内的点云集合为  $P\{x_i, y_i, z_i\}$  ( $i = 1, 2, \dots, k$ ), 则重心坐标的计算公式为:

$$x = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x_i, y = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k y_i, z = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k z_i \quad (1)$$

为了点云密度的均匀性, 本文在进行点云体素网格降采样时, 取  $l_x = l_y = l_z = l$ , 即体素都是均匀的小立方体。通过改变  $l$  的值来改变体素的大小, 从而改变滤波程度。如图 4 所示, 是  $l$  取不同值时, 直三棱柱体工件点云的疏密

程度对比, 结果表明: 体素越大, 滤波后得到的点云数据就越稀疏。通过改变体素边长  $l$  的大小, 能够比较不同点云密度下平面的拟合效果以及工件的测量精度。

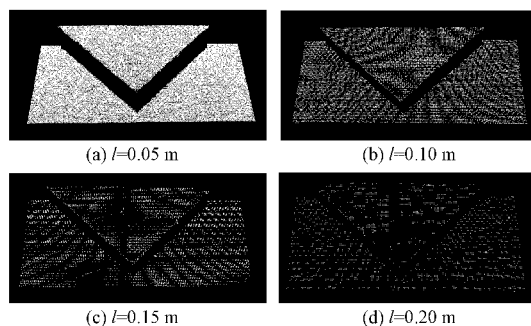


图 4  $l$  取不同值时工件点云密度对比图

### 2.4 点云的直通滤波

工业零件上表面有的较为平整规则, 有的形状尖锐奇特。针对它们高度测量的问题, 本文提出由点到面测距和面到面测距的方法。对所有零件都可以通过平面拟合算法得出下表面的平面方程, 即载物台平面方程; 而上表面不平整的零件, 就可以直接利用上表面的待测位置处点云坐标, 通过点到面的距离公式, 求得待测位置的高度信息。对于直三棱柱工件而言, 它的上表面平整且上下表面平行, 则对上下表面分别拟合出平面方程后再求面间距便可以更好的提高测量精度。

将体素滤波后的点云数据, 通过直通滤波器<sup>[16]</sup>能够很好地分离出直三棱柱体的上表面和下表面, 直通滤波器对  $z$  坐标设定 0.5~10.0 的滤波范围, 如图 5 所示是体素降采样中  $l=0.05$  m (点云数量为 260 786) 时, 通过直通滤波后分离出的上下表面点云, 分离后上表面点云数量为 84 303, 下表面点云数量 176 483, 完整地保留了点云信息。

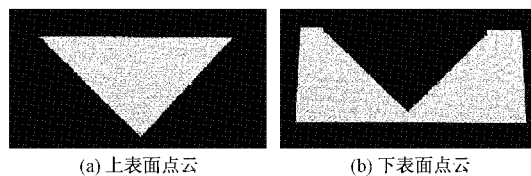


图 5 点云通过直通滤波后分离出的上下表面图

### 2.5 点云的平面拟合

小型工业零件的精密测量中, 点云的平面拟合<sup>[17]</sup>是至关重要的一步, 是拟合平面后求面间距的基础。随机抽样一致性算法 (RANSAC)<sup>[18]</sup>是一种经典的平面拟合算法, 该算法用尽量最少的初始数据生成初始解, 然后使用一致性数据集去扩大它, 具体拟合的过程如下:

1) 在输入的初始点云数据中随机选择 3 个点, 计算由这三个点构成的平面方程:

$$Ax + By + Cz + D = 0. \quad (2)$$

2) 计算剩余的所有点到该平面的距离, 公式为:

$$d_i = \frac{|Ax_i + By_i + Cz_i + D|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \quad (3)$$

选取阈值  $d_{\text{threshold}}$ , 若  $d_i \leq d_{\text{threshold}}$ , 则该点被认为是模型内样本点, 否则为模型外样本点, 记录当前内点的个数, 本方案中设置阈值为  $d_{\text{threshold}} = 0.01$ , 即与平面距离小于 0.01 的点作为内点。

3) 重复以上步骤, 选取内点数量最多的平面对应的模型参数, 即为最佳拟合参数, 每次迭代末尾都会根据具体情况计算出一个迭代结束评判因子, 来决定是否停止迭代。

4) 迭代结束后, 最佳模型参数就是最终的参数估计值。输出 A、B、C、D 值, 即可得到最佳拟合平面的平面方程。

在体素降采样中  $l = 0.05 \text{ m}$  时, 点云经过 RANSAC 算法平面拟合后, 工件上表面方程为  $0.0195x - 0.0460y + 0.9988z - 5.5152 = 0$ , 下表面方程为  $0.0199x - 0.0495y + 0.9986z + 0.4805 = 0$ 。表 2 中通过改变  $l$  的大小, 能够得到不同点云密度下拟合出的平面方程。

### 3 实验过程及结论

#### 3.1 实验目的

本文拟在实验室环境中实现对工业零件高度的精密测量, 采用标准高度为 6.0000 mm 的直三棱柱体工业零件作为测量对象。首先直接使用 SmartRay3D 相机测量软件“SR\_Studio\_4”进行测量, 其次采用本文所提出的综合激光三角和点云处理的方法进行测量, 得出两种方法的测量结果并对比分析精度和误差。以此验证本文测量方法的精度高且误差小, 为工业零件的高度精密测量提供一种新的思路。

#### 3.2 系统装置组成

在实验室中搭建测量装置, 总体结构如图 6 所示, 选用 SmartRayECCO\_95.200 型号的 3D 传感器, 相机的最佳视野为 190 mm, 近视野 125 mm, 远视野 250 mm, 高度测量范围为 250 mm, 最佳工作距离为 325 mm。由于被测工件高度 6 mm, 因此, 安装时传感器用视觉支架固定于载物平台正上方 322 mm, 即为最佳工作距离, 并使用 20 V 电压供电工作。选用电流为 1.2 A, 步距角  $1.8^\circ$ , 200 秒冲/圈的三线制 PNP 或 NPN 常开的步进电机作为平移运动机构, 用于搭载被测工件做匀速直线运动。选配光电增量式 AB 两相 600 脉冲的编码器来触发相机拍照。其中, 步进电机经 TB6600 型驱动器由 STM32F4072GT6 板卡控制。相机通过以太网接口连接至计算机, 将点云数据传输到计算机进行后续处理。计算机的实验运行环境为: Intel(R) Core (TM) i7-9700 CPU@3.00 GHz 3.00 GHz, 运行内存为 16 GB, 实验平台为 Visual Studio 2019 以及 PCL 点云库版本为 1.8.1。采用标准高度为 6.0000 mm 的直三棱柱体工业零件作为测量对象。

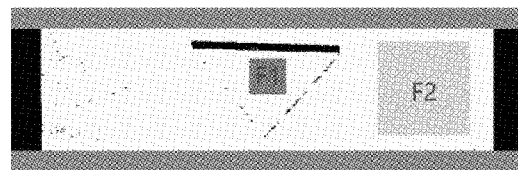
#### 3.3 “SR\_Studio\_4”测量过程及结果

首先直接使用 SmartRay3D 相机测量软件“SR\_Studio\_4”



图 6 系统装置组成

进行工件的高度测量, 该测量方法就是利用激光三角法测量原理获得工件的高度, 如图 7(a) 中区域 F1 放置于直三棱柱的上表面, 区域 F2 位于底平面, 打开测量功能, 如图 7(b) 所示, 则能够分别显示出区域 F1 和区域 F2 的所有点的  $z$  坐标值的平均值, 做差即为被测工件的高度。



(a) 区域选择图

Feature	Type	Tool	Result
F1	2D	Average	315.5829 mm
F2	2D	Average	321.2979 mm

(b) 区域  $z$  坐标均值图

图 7 “SR\_Studio\_4”测量过程

区域 F1 始终在三棱柱工件的上表面, 区域 F2 始终位于底平面, 改变区域 F1 和区域 F2 的位置以及范围的大小, 便可以改变所包含的点数。分别测量 10 组两个区域不同位置和不同大小时的  $z$  坐标均值, 并求出高度信息和测量误差, 测量结果如表 1 所示。

#### 3.4 本文提出的测量方法及结果

在由搭建好的激光三角平台得到工件的点云数据后, 首先把点云模型通过统计滤波器处理, 去除了将近 2 000 个离群点和噪点后, 此时模型点云数量为 1 730 609。改变降采样过程中体素立方体的边长  $l$  的数值, 测得 10 组不同点云密度下拟合平面的平面方程和高度数据, 并求出测量误差, 测量数据如表 2 所示, 求面间距计算过程如下:

设上表面的方程为  $A_1x + B_1y + C_1z + D_1 = 0$ , 下表面方程为  $A_2x + B_2y + C_2z + D_2 = 0$ , 理论上拟合出的两

表 1 “SR\_Studio\_4”测量结果

序号	F1 区域 z 坐标均值/ mm	F2 区域 z 坐标均值/ mm	差值 (高度)/ mm	误差的 绝对值/ mm
1	315.382 9	321.297 9	5.915 0	0.085 0
2	315.382 6	321.411 6	6.029 0	0.029 0
3	315.363 8	321.294 8	5.931 0	0.069 0
4	315.379 6	321.297 6	5.918 0	0.082 0
5	315.377 9	321.322 9	5.945 0	0.055 0
6	315.384 0	321.301 0	5.917 0	0.083 0
7	315.390 2	321.426 2	6.036 0	0.036 0
8	315.366 5	321.303 5	5.937 0	0.063 0
9	315.379 6	321.323 6	5.944 0	0.056 0
10	315.388 9	321.350 9	5.962 0	0.038 0
平均误差/mm			0.058 6	

个平面应该满足  $\frac{A_1}{A_2} = \frac{B_1}{B_2} = \frac{C_1}{C_2} = \text{常数}$ , 由于测量平台运动时的振动、光照对激光线的影响以及环境等因素, 导致拟合平面后的上下表面并不是完全平行的。本文提出采用实际拟合出的平面方程的三对系数之比的平均值作为两平面法向量的倍数, 即令:

$$a = \left( \frac{A_2}{A_1} + \frac{B_2}{B_1} + \frac{C_2}{C_1} \right) / 3 \quad (4)$$

则上平面方程为  $A_1x + B_1y + C_1z + D_1 = 0$ , 而下平面方程可以近似表示为  $A_1x + B_1y + C_1z + \frac{D_2}{a} = 0$ , 那么上下表面的间距公式为:

$$d = \frac{|D_1 - \frac{D_2}{a}|}{\sqrt{A_1^2 + B_1^2 + C_1^2}} \quad (5)$$

表 2  $l$  取不同数值时采用本文方法测量的结果

序号	$l$ 取值	降采样后 的点数	平面拟合出上表面方程	平面拟合出下表面方程	面间距 (高度)/ mm	误差的 绝对值/ mm
1	0.05	260 786	$0.019\ 5x - 0.046\ 0y + 0.998\ 8z - 5.515\ 2=0$	$0.019\ 9x - 0.049\ 5y + 0.998\ 5z + 0.480\ 5=0$	5.980 7	0.019 3
2	0.07	133 478	$0.019\ 9x - 0.045\ 7y + 0.998\ 8z - 5.523\ 9=0$	$0.020\ 0x - 0.050\ 5y + 0.998\ 5z + 0.480\ 9=0$	5.982 8	0.017 2
3	0.10	66 647	$0.019\ 5x - 0.046\ 8y + 0.998\ 8z - 5.505\ 0=0$	$0.019\ 9x - 0.049\ 5y + 0.998\ 6z + 0.481\ 0=0$	5.973 8	0.026 2
4	0.15	29 855	$0.019\ 8x - 0.045\ 2y + 0.998\ 8z - 5.532\ 3=0$	$0.019\ 4x - 0.048\ 4y + 0.998\ 6z + 0.481\ 4=0$	6.005 1	0.005 1
5	0.20	16 979	$0.019\ 6x - 0.045\ 8y + 0.998\ 8z - 5.520\ 0=0$	$0.020\ 1x - 0.050\ 1y + 0.998\ 5z + 0.479\ 9=0$	5.982 8	0.017 2
6	0.25	10 926	$0.019\ 6x - 0.046\ 2y + 0.998\ 7z - 5.514\ 5=0$	$0.019\ 7x - 0.048\ 7y + 0.998\ 6z + 0.479\ 7=0$	5.984 9	0.015 1
7	0.30	7 636	$0.019\ 8x - 0.045\ 4y + 0.998\ 8z - 5.526\ 4=0$	$0.020\ 0x - 0.051\ 1y + 0.998\ 5z + 0.484\ 5=0$	5.989 9	0.010 1
8	0.35	5 665	$0.019\ 0x - 0.046\ 1y + 0.998\ 8z - 5.506\ 4=0$	$0.019\ 8x - 0.049\ 8y + 0.998\ 6z + 0.482\ 8=0$	5.989 2	0.010 8
9	0.40	4 420	$0.020\ 0x - 0.045\ 6y + 0.998\ 8z - 5.530\ 6=0$	$0.020\ 1x - 0.049\ 8y + 0.998\ 6z + 0.478\ 8=0$	6.009 4	0.009 4
10	0.45	3 467	$0.018\ 6x - 0.047\ 3y + 0.998\ 7z - 5.486\ 4=0$	$0.019\ 9x - 0.049\ 3y + 0.998\ 6z + 0.479\ 2=0$	5.965 5	0.034 5
平均误差/mm					0.015 2	

3.5 实验结论

两种方法测得的高度数据和误差的对比折线图如下图 8 中(a)和(b)所示, 由对比折线图, 能得出以下结论:

1) 由“SR\_Studio\_4”激光三角法测量直三棱柱工件的高度, 改变上下表面所选中区域的位置和大小, 10 次测量

的平均误差为 58.6  $\mu\text{m}$ ; 本文提出的方法通过改变体素边长  $l$  的大小拟合出上下表面的平面方程再计算面间距求高度, 10 次测量的平均误差为 15.2  $\mu\text{m}$ , 测量精度提高了 72.33%。

2) 通过改变点云体素滤波降采样中体素立方体的边

长  $l$  的值,能够改变工件的点云密度,测得在  $l = 0.15 \text{ m}$  (点云数量精简了 98.3%) 时,既能保持工件的表面特征,又取得了最小的测量误差,最小误差仅为  $5.1 \mu\text{m}$ ,实现了工业微米级测量的需求。

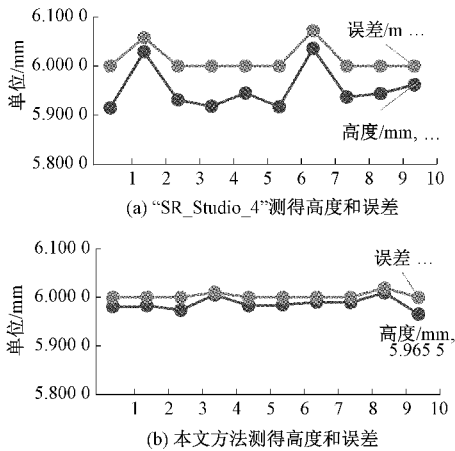


图 8 两种方法测量结果和误差的折线图

## 4 结 论

本文利用激光三角法原理搭建硬件平台以采集工件点云,面向点云进行相关的算法处理实现高度的高精度测量。首先将原始点云模型通过统计滤波器滤波去除离群点,其次过大的点云数据在后续处理中的时间过长,因此通过点云的体素降采样实现在不破坏点云模型的外形特点的基础上减少点云数量,然后利用直通滤波器的截断特性,将点云上下表面分离,再使用 RANSAC 算法分别拟合出两个平行平面的方程,最后求平面间距即为工件的高度信息。通过实验验证了方案的可行性,较于采用了激光三角法的 SmartRay“SR\_Studio\_4”测量结果,本文提出方法的测量方法精度提高了 72.33%。还研究了不同点云密度下拟合出平面后测量的精度,找出了最佳点云密度,测量精度最小达到了  $5.1 \mu\text{m}$ ,该方法能广泛应用于工业微米级测量。本文方法的不足之处在于对点云的滤波以及平面拟合都采用了较为传统的算法,后续研究可以在这些算法上做出改进,以更进一步地提高测量精度。

## 参考文献

[1] 林希萌,禹静,杨艳玲,等.高精度三维螺纹测量机接触式扫描测头动态特性研究[J].仪器仪表学报,2021,42(1):92-98.

[2] 梁天为,朱呈祥,陈浩.基于点云处理的 QFP 芯片引脚三维测量[J].应用激光,2021,41(3):556-560.

[3] 孙有春,庞亚军,白振旭,等.激光三角测量法应用技术[J].激光杂志,2021,42(4):1-8.

[4] 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.

[5] 王琼,王海燕,孙保群,等.车辆曲面重构中点云精简算法的研究与改进[J].电子测量与仪器学报,2017,31(11):1693-1701.

[6] 燕必希,董明利,宗敏.多高度小零件视觉测量方法设计[J].机械设计与制造,2017,(4):140-143.

[7] 刘源,沈小燕,陈爱军,等.基于线激光三角法的圆孔尺寸测量研究[J].应用激光,2020,40(2):308-314.

[8] 刘辉,王伯雄,任怀艺,等.基于三维重建数据的双向点云去噪方法研究[J].电子测量与仪器学报,2013,27(1):1-7.

[9] XIANG S, PAN F, XIANG K, et al. Melt level measurement for the CZ crystal growth using an improved laser triangulation system[J]. Measurement, 2017,103: 27-35.

[10] 陈世海,李俊明,王雯.基于 3D 点云的电缆自适应多尺度去噪算法研究[J].国外电子测量技术,2020,39(10):115-118.

[11] 焦晨,王宝锋,易耀华.点云数据滤波算法研究[J].国外电子测量技术,2019,38(11):18-22.

[12] 赵浚壹,马峻,陈寿宏,等.场景导向的 kd-tree 点云滤波算法[J].激光杂志,2021,42(11):74-78.

[13] 陈超,李肖敏,董恩增,等.基于梯度分块的自适应点云滤波方法[J].电子测量技术,2018,41(19):79-83.

[14] 李佩佩,崔凤英.基于二分 K-means 聚类的曲率分级点云数据精简优化算法研究[J].电子测量技术,2022,45(4):66-71,DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108293.

[15] 肖正涛,高健,吴东庆,等.面向三维点云识别的体素网格降采样[J].组合机床与自动化加工技术,2021,(11):43-47.

[16] 刘永治,张周强,郭志超,等.基于线激光扫描的零件三维表面检测系统研究[J].国外电子测量技术,2021,40(2):67-72.

[17] DONADELLO S, MOTTA M, DEMIR A G, et al. Monitoring of laser metal deposition height by means of coaxial laser triangulation[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2019,112:136-144.

[18] 李希,韩燮,熊风光.基于 RANSAC 和 TLS 的点云平面拟合[J].计算机工程与设计,2017,38(1):123-126,143.

## 作者简介

张潇丹,硕士研究生,主要研究方向为机器视觉。

E-mail:ZXD980905@163.com

单彦虎,博士,讲师,硕士生导师,主要研究方向为动态测试技术、机器视觉。

E-mail:shanyanhu@nuc.edu.cn

储成群,博士,讲师,主要研究方向为恶劣环境下动态存储测试、机器视觉。

E-mail:chuchengqun@nuc.edu.cn