

基于单点激光测距的扫描成像技术

何巧莹^{1,2}, 黄林海^{1*}

¹中国科学院光电技术研究所自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为了提高科考人员探测未知环境时的安全系数, 实现无接触测量, 同时解决二维平面成像无法获取物体距离信息和尺寸信息的问题, 设计并实现了一套基于单点脉冲激光测距仪的三维扫描成像系统。首先, 利用方差过滤和高斯拟合提高单点激光测距的精度。其次, 修正云台角度偏差后通过云台的转动有序扫描并获取物体表面的点云数据。最后, 利用具有噪声的基于密度的聚类算法对获取的点云噪声进行滤波, 得到轮廓分明、角度清晰、距离准确的三维点云图像。在室内对普通纸盒的成像实验结果表明, 该系统测量距离、物体面积以及角度拟合的误差均小于 5%; 在室外对 200 m 内的大型建筑进行成像, 结果表明, 该系统能有效探测未知环境和感知障碍物。

关键词 激光技术; 激光测距仪; 三维点云成像; 点云过滤; 云台

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0628002

Imaging Technology Based on Single-Point Laser Scanning

He Qiaoying^{1,2}, Huang Linhai^{1*}

¹Key Laboratory on Adaptive Optics, The Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In order to improve the safety factor of scientific expedition personnel when detecting unknown environment, realize non-contact measurement, and to solve the problem that two-dimensional planar imaging cannot obtain the distance information and size information of the object, a set of three-dimensional scanning imaging system based on single-point pulsed laser rangefinder is designed and realized. First, variance filtering and Gaussian fitting are used to improve the accuracy of single-point laser ranging. Second, after correcting the angle deviation of the pan-tilt, the point cloud data on the surface of the object can be obtained through the rotation of the pan-tilt. Finally, density-based spatial clustering of applications with noise (DBSCAN) algorithm is used to filter the acquired point cloud noise to obtain a three-dimensional point cloud image with clear outline, clear angle, and accurate distance. Indoor imaging experiments on ordinary paper boxes show that the system distance measurement error, object area size measurement error, and angle fitting error are all within 5%; and outdoor imaging experiments on large buildings within 200 m show that the system can effectively detect unknown environments and perceive obstacles.

Key words laser technique; laser range finder; three-dimensional point cloud imaging; point cloud filtering; pan-tilt

OCIS codes 280.3400; 110.6880; 120.2440

收稿日期: 2020-07-31; 修回日期: 2020-08-19; 录用日期: 2020-08-27

* E-mail: hlhai@ioe.ac.cn

1 引言

科考人员对未知环境进行探测时,通常用摄像机获取环境的二维(2D)外观信息,但人工探测的危险系数高,对未知物空间尺寸的把握需要近距离接触测量,且对物体距离的估计也比较复杂。目标探测技术要扩展到更多前沿的探测场景中,仅靠 2D 数据提供的信息无法满足现代科学领域的应用需求^[1]。激光测距可通过无接触测量获取精确的距离信息,从而被应用到三维(3D)成像领域。3D 成像可理解为对每个 2D 像素点的激光测距,在单点激光测距的基础上同步测量每个测距点的方位信息,即可实现 3D 成像^[2]。李小路等^[3]设计并实现了一套 3D 扫描激光雷达系统,该系统为激光单点扫描,利用数据采集与控制系统实现点云的 3D 成像,平面拟合精度在 20 m 扫描范围内为厘米量级,但仅能对平面进行拟合成像,成像对象为室内的墙面;同时剔除了近距离成像点。该系统难以有效探测小型障碍物和估计物体尺寸,室外成像的有效性也未进行验证,存在一定的局限性。目前市面上用于成像的激光测距仪通常为面阵式激光 3D 成像,由多达几十束的激光束同时获取多点信息,3D 激光雷达在环境感知中主要用于障碍物的检测、跟踪以及定位构图^[4],多应用于无人驾驶领域,如车载激光雷达,

但 3D 激光雷达价格昂贵,对于远距离跟踪或实时性要求不高的静态环境感知,远超出了使用者的预算范围。且随着激光束的增多,系统的整体能耗及复杂度上升,单束激光的能量也会随之下降,从而缩短了检测距离。因此,面阵成像系统的探测距离远远小于单点探测系统,一般仅适用于近距离的成像探测^[2]。

本文设计实现了一套基于单点激光扫描的成像系统,采用的单点激光在精度、距离和能耗上具有较大优势,不仅能实现大面积的墙面拟合,获取物体的具体形状,还能用于室外远距离成像,并通过实验验证了该系统的有效性。

2 基本原理

2.1 激光扫描系统实验平台

对目标物体扫描成像的实验器材包括国产 CD-200B 单点激光测距仪、二轴云台和带有 Python 环境的普通计算机。测距仪安装在云台上,确保测距仪与云台的中心在同一垂直线上,实物如图 1(a)所示。激光测距仪和云台的形状尺寸分别如图 1(b)、图 1(c)所示。CD-200B 单点激光测距仪的有效探测距离为 200 m,重复测距精度为 10 cm。二轴云台可在水平方向 $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$,垂直方向 $+20^{\circ} \sim -60^{\circ}$ 范围内旋转,角度定位精度最高为 $\pm 0.1^{\circ}$ 。

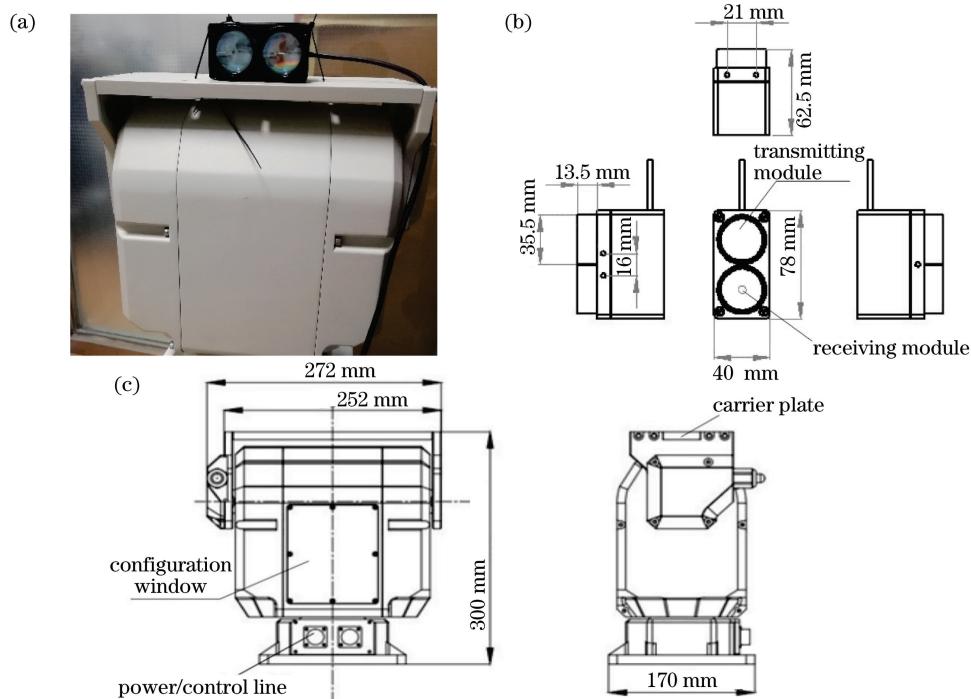


图 1 实验平台。(a)实物图;(b)激光测距仪的尺寸;(c)云台的尺寸

Fig. 1 Experimental platform. (a) Physical image; (b) size of the laser rangefinder; (c) size of the pan-tilt

2.2 整体框架设计

单点激光扫描成像系统以激光测距仪为核心对待测物体进行成像,并在二轴云台的配合下将角度信息与距离信息整合成 3D 坐标点,整体框架如图 2 所示。系统上电后,测距仪自动开始工作,通过串口不断将距离信息发送给主控,主控通过程序对数据进行初步筛选,主要判断是否为有效数据(无效数据为 0.0)或方差过大的数据,并将数据点存入 Excel 中。主控通过串口给云台发送指令,云台以最小角度分辨率(0.1°)为步进值改变定位角度,按照 S 型扫描顺序有序获取点云。通过对扫描装置的有序控制(水平和垂直方向上的偏转控制),对扫描区域中每个点进行重复激光测距和偏转控制,完成整个目标物体的点云获取^[5]。云台与测距仪的中心保持在同一垂直线上,云台转动带动测距仪转动,测距仪测量下一个点,同时将距离数据传回主控。循环进行上述操作,扫描完一定视野面内所有的点后,检测结束。对点云数据进行优化时从 Excel 中读取数据,并对数据进行聚类、过滤,绘制成 3D 点云图。

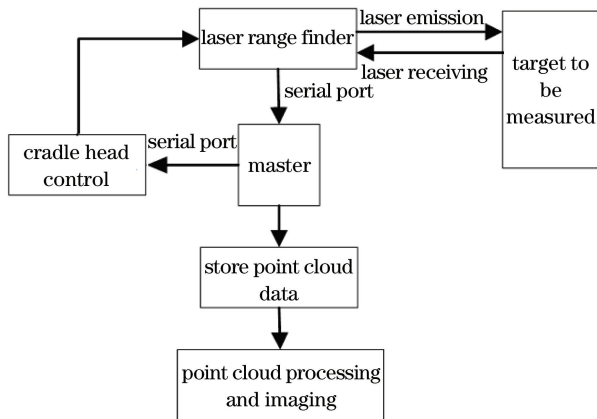


图 2 本系统的框架

Fig. 2 Framework of our system

2.3 系统定标与点云处理

成像精度由测距精度与角度定位精度共同决定,而云台在连续定位过程中,给定的定位角度与实测的定位角度存在一定偏差,因此需要对系统进行定标。在控制云台转动的过程中,由主控发出定位角度的控制命令后,再从云台读取当前角度值,经对比发现角度具有固定偏差量,水平角度的偏差量为 0.276°,垂直角度的偏差量为 0.402°,从而对成像实验过程中的角度进行修正。获取点云时,测距仪获得的距离数据以及云台获得的角度数据是球坐标系下的位置 $P(s, \alpha, \beta)$,如图 3 所示,需先将其转换到直角坐标系下再进行处理。

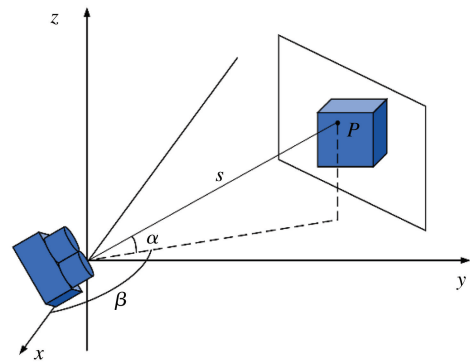


图 3 本系统获取的 3D 点云

Fig. 3 3D point cloud obtained by our system

以光源为坐标原点建立坐标系,激光测距仪得到 P 点与光源的距离为 s,垂直偏转角为 α ,水平偏转角为 β ,转换关系可表示为

$$\begin{cases} x_P = s \times \sin \alpha \times \cos \beta \\ y_P = s \times \sin \alpha \times \sin \beta \\ z_P = s \times \cos \alpha \end{cases} \quad (1)$$

得到 3D 坐标点 $P(x_P, y_P, z_P)$ 后,将数据存储在 Excel 表格中,格式为 n 行、3 列,n 为测量点的总数,1~3 列分别为 x、y、z 的值,以方便后期数据的优化。

在测量过程中,对于同一个点,距离测量值为 s,测距仪重复测量 20 次,并求其方差。图 4 为实验中任意连续的 760 组数据的方差,每组 20 个数据,横坐标为组序号,纵坐标为该组数据对应的方差。若本组数据方差过大,则表示数据点分布离散,数值间存在跳跃,可能存在粗大误差,此时则用上一组测量数据替代本组测量数据。实验首先不采取方差过滤,得到大量实测的方差数据,再将该方差数据作为样本变量集合 D,其标准差 $\sigma \approx 0.009966$,在统计学

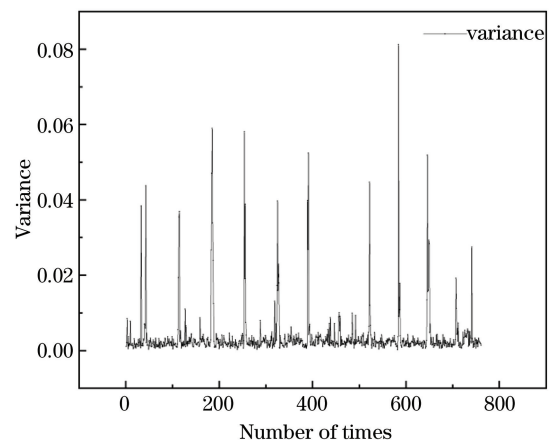


图 4 760 组数据的方差

Fig. 4 Variance of 760 sets of data

中,大量含有随机误差的样本数据近似满足正态分布,样本数据大于 2σ 的概率不到 4.6%,再结合多次实测的数据分析,令方差阈值 $2\sigma \approx 0.02$ 。点云数据的随机误差服从正态分布^[6],利用高斯拟合求得的数学期望 μ 可用来表示随机变量 s 分布的重心。在忽略系统误差的基础上,可将 20 次实验数据的期望 μ 作为该点测量的实际结果。

2.4 点云过滤

激光测距仪在测距过程中,会因硬件、光照、目标材质和反射面角度等因素产生误差,从而导致噪点。噪点多分布在边界、缝隙处,并不影响物体原本的形状,因此使用聚类算法对点云数据进行后期处理。具有噪声的基于密度的聚类(DBSCAN)算法^[7]利用类的高密度连通性,快速发现任意形状的点云^[8]。该算法在使用时需要自行调节两个参数,分别是半径值(Eps)和邻域密度阈值(MinPts)。Eps 描述的是某一样本的邻域距离阈值,MinPts 描述的是某一样本距离为 Eps 的邻域中样本个数的阈值,这两个参数均需要根据经验初始化以及调参。

DBSCAN 算法的输入为数据集 D 、Eps、MinPts,输出为簇划分点集 C 、噪声点集。具体步骤:1)在给定数据集 D 中,任选一个未被处理的对象 p ,从 p 开始遍历所有密度可达的对象;2)若 p 是一个核对象,遍历过程会形成一个新的簇 c ,若找不到其他对象,则 p 是一个边界点,继续检索 D 中的下一个对象;3)重复步骤 1)和步骤 2),直到处理完数据集 D 中所有的对象;4)没有分到任何簇的对象为噪点,标签为 -1,并将其从原始点云中剔除。

实验使用 DBSCAN 算法对原始点云数据进行了聚类 and 噪点过滤,相比其他聚类算法,DBSCAN 算法不需要指定簇的个数,可作用于非凸数据集,也可以过滤离群点且可调参数少、收敛速度较快、聚类效果好。

3 实验结果与分析

3.1 实验流程

实验在室内和室外开展,代码流程如图 5 所示。共开展三次实验,第一次对室内物体的平面进行成像,如图 6(a)和图 6(b)所示,待测物为普通纸盒,纸

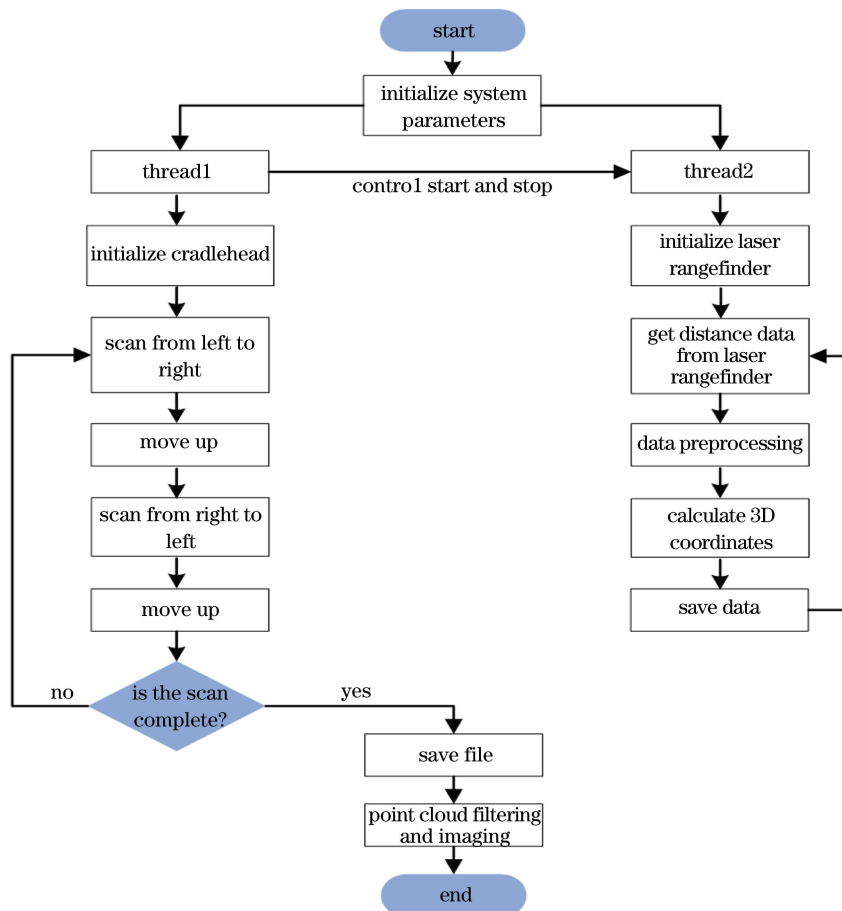


图 5 本算法的流程图

Fig. 5 Flow chart of our algorithm

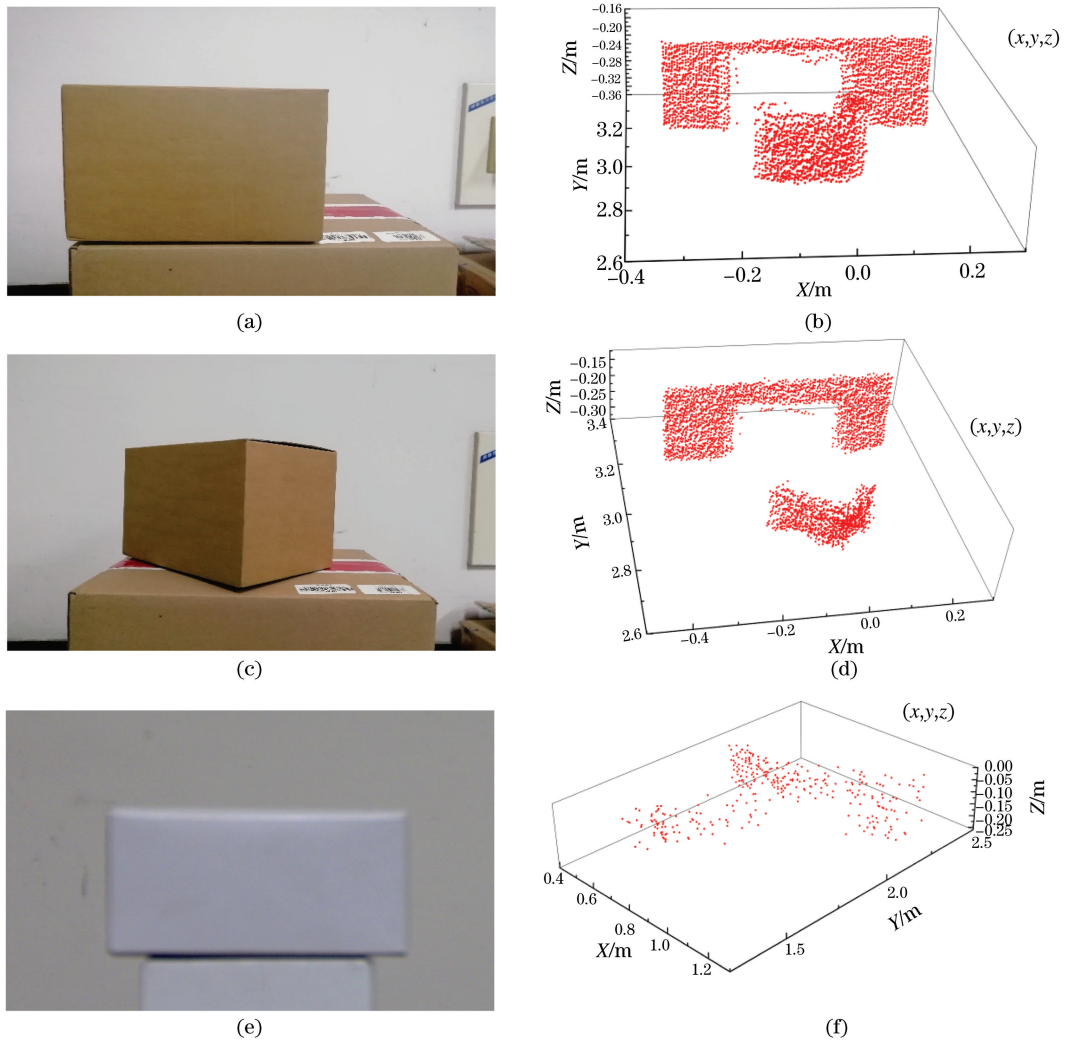


图 6 实验数据。(a)平面成像场景;(b)平面成像点云;(c)棱角成像场景;(d)棱角成像点云;(e)实验初期场景;
(f)未处理的点云

Fig. 6 Experimental data. (a) Planar imaging scene; (b) planar imaging point cloud; (c) angular imaging scene;
(d) angular imaging point cloud; (e) early experiment scene; (f) unprocessed point cloud

盒正对实验平台,背景为墙面。第二次对室内物体的棱角进行成像,如图 6(c)和图 6(d)所示,将纸盒倾斜放置,背景为墙面,得到的点云图像中墙面和待测物体有明显的分割感,墙面平整,物体正面轮廓清晰。第三次为室外实验,对远距离的大型建筑物进行成像,场景如图 7 所示,从相机拍摄的平面图像可以发现,无法感知建筑物的大小、距离以及前后建筑物的距离差。本算法处理后的结果如图 8 所示,可以发现,视野中部的大楼轮廓形状清晰,近处的大楼边角以及远处的背景成像都清晰有层次,可为夜间或未知环境中的感知提供有效的探测数据。在实验初期,如图 6(e)和图 6(f)所示,未经过系统定标、点云预处理、过滤的情况下,点云图反映出的重复数值误差大,物体形状不清晰,墙面不平整。此外,实验

初期未使用多线程编程,导致速度慢,相同时间内采样的点数较少,点云数据相对稀疏。这表明本算法可以清楚地获取物体点云,反映物体的外观与位置信息。



图 7 室外成像场景
Fig. 7 Outdoor imaging scene

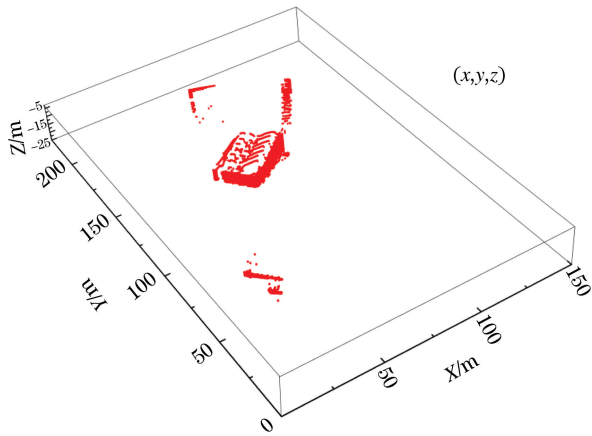


图 8 室外成像结果

Fig. 8 Outdoor imaging result

3.2 实验结果分析

在室内小型物体的实验中,图 6(a)的场景一为平面成像,可通过实地测量与测距仪成像对比本算法在测量距离和尺寸时的误差。棱角角度的拟合则需要借助 DBSCAN 算法提取部分点云块。实验得到的点云数据是有序的 S 型扫描数据,在同一行中可能包含物体和背景的点云,而 DBSCAN 算法得到不同簇中的对象点有不同的序号。如图 6(d)所示,墙面和物体为两个簇,且同一个簇中的点序号相同,墙面的序号为 0,物体的序号为 1,可将相同序号的点云块单独提取出来进行角度拟合与误差评估。距离误差可由测距仪直接反映,实验测量得到的距离误差如表 1 所示。

表 1 距离测量误差

Table 1 Distance measurement error unit: cm

Types of target object	Wall distance	Yellow box distance
Ruler measurement	307.20	269.70
Laser rangefinder measurement	319.90	280.66
Measurement error	12.70	10.96

物体的尺寸误差由测距精度与云台转角精度共同反映,云台转角步进值为 0.1° ,相邻两点与光源点可近似为直角三角形,如图 9 所示。

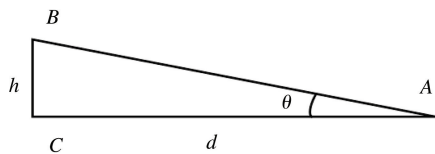


图 9 相邻两点的间隔示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the interval between two adjacent points

以点 A 为光源点,点 B 和点 C 为云台转动测距中相邻的两点, θ 为云台转角, d 为当前测距值, h 为相邻两点的距离,可表示为

$$h = d \times \tan \theta. \tag{2}$$

由于测距与角度定位均存在误差,误差值 Δh 、 Δd 、 $\Delta \theta$ 的关系可表示为

$$h + \Delta h = (d + \Delta d) \times \tan (\theta + \Delta \theta). \tag{3}$$

实验中,由于 $\Delta \theta = 0.1^\circ$,且扫描视野范围不宽,进行远距离成像时扫描角度更小,因此,可近似

$$\tan (\theta + \Delta \theta) \approx \tan \theta + \tan \Delta \theta. \tag{4}$$

将(2)式、(4)式带入(3)式,得到

$$\Delta h = \Delta d \tan \theta + \Delta d \tan \Delta \theta + d \tan \Delta \theta, \tag{5}$$

式中, Δd 和 $\Delta \theta$ 为固定值, $\Delta \theta = 0.1^\circ$, $\Delta d = 20$ cm。室内实验的距离约为 300 cm,因此取 $d = 300$ cm,物体尺寸的角度覆盖范围约为 4° ,即 $\theta = 4^\circ$,得到 $\Delta h = 0.583$ cm。

实验中,物体的宽度由三维坐标点 (x, y, z) 中的 x 反映,高度信息由 z 反映,实验得到的物体尺寸测量误差如表 2 所示。可以发现,本算法得到的结果与理论计算值相符。

表 2 物体的尺寸测量误差

Table 2 Size measurement error of the object

Measurement data	Yellow box size	
	Length	Height
Ruler measurement	20.00	14.00
Laser rangefinder measurement	20.70	14.40
Measurement error	0.70	0.40

图 6(c)为棱角成像,使用的是普通纸盒(标准的长方体),棱角角度均为 90° 。由于纸盒面垂直于地面,因此,仅需提取出一行数据,再由三维坐标点 (x, y, z) 中的 x, y 利用最小二乘法拟合出投影在 z 平面的直线,得到 2 条直线方程,如图 10 所示。

利用点斜式方程的斜率可获得两直线的夹角,在点云中抽取多行数据拟合,每行数据可得到一个角度拟合值,最大拟合角度为 89.089° ,从目标物点云中中部抽出 5 行数据拟合角度,其均值为 85.7302° ,得出的角度拟合误差如表 3 所示。

表 3 角度拟合误差

Table 3 Angle fitting error unit: ($^\circ$)

Measurement data	Cube angular
Angle	90.00
Point cloud fitting angle	85.73
Fitting error	-4.27

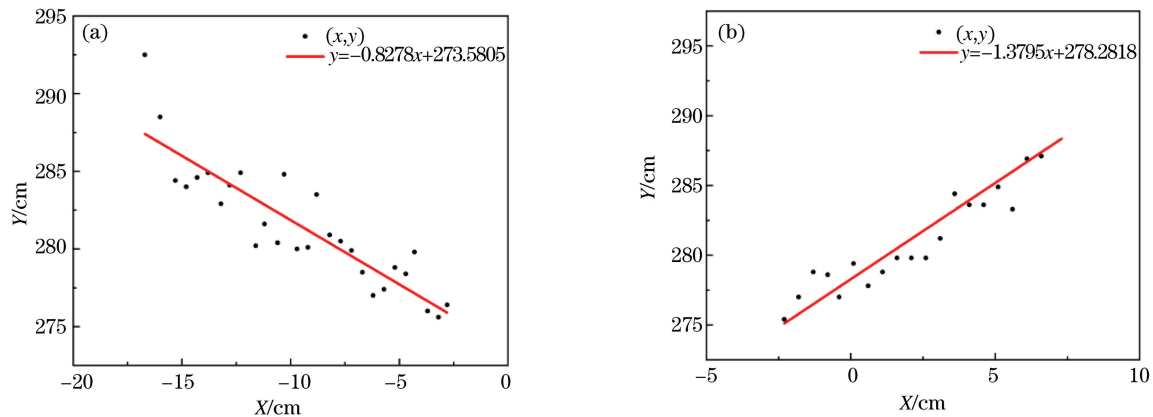


图 10 直线的拟合图。(a)直线 1;(b)直线 2

Fig. 10 Fitting graph of straight. (a) Straight line1; (b) straight line2

将实验初期未经过系统定标、点云预处理、过滤情况下得到的点云图与最终实验结果进行对比,在平面成像方面,得到的精度如表 4 所示,表中数据为实验测量误差值与标尺测量值的百分比。可以看出,实验初期误差在 10% 以上,经本算法处理后,测量精度均有所提升,误差下降到 5% 以内,验证了本算法的可行性。

表 4 实验初期与处理后的精度

Table 4 Accuracy at the beginning of the experiment and after treatment unit: %

Measurement data	Wall distance measurement	Box length measurement
Early experimental measurement error	11.52	12.59
Final experimental measurement error	4.13	3.50
Error reduction	64.15	72.20

从室内实验结果来看,误差来源可能有多种,如仪器本身引起的固定误差,反射面材质和倾斜角度引起的误差以及激光光束在周围物体上发生二次反射引起的误差。在分析和完善室内实验的基础上,开展的室外成像实验也取得了不错的效果,这表明基于单点脉冲激光成像系统能实现远距离静态物体的 3D 点云成像,反映目标物体的距离、形状和尺寸信息。

4 结 论

以环境感知为背景,设计并实现了一套基于单点脉冲激光测距仪结合二轴云台的 3D 成像系统。利用方差和高斯拟合实现了测距数据的精度优化,利用二轴云台实现了一维到 3D 成像,利用 DBSCAN 算法实现了对点云数据的分块和过滤,最

终形成了比较平滑和清晰的 3D 点云成像图,距离测量误差、物体尺寸测量误差、角度拟合误差均在 5% 以内,且在室外也能进行有效探测,探测距离约为 200 m,为未知环境和障碍物的感知提供了有效的参考信息。

参 考 文 献

- [1] Wang S J. Pose measurement of the target based on planar array 3D imaging LiDAR [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020: 4.
王盛杰. 基于面阵三维成像激光雷达的目标姿态测量[D]. 成都: 电子科技大学, 2020: 4.
- [2] Liu B, Yu Y, Jiang S. Review of advances in LiDAR detection and 3D imaging [J]. Opto-Electronic Engineering, 2019, 46(7): 190167.
刘博, 于洋, 姜朔. 激光雷达探测及三维成像研究进展[J]. 光电工程, 2019, 46(7): 190167.
- [3] Li X L, Zeng J J, Wang H, et al. Design and real-time imaging technology of three-dimensional scanning LiDAR[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(5): 0503004.
李小路, 曾晶晶, 王皓, 等. 三维扫描激光雷达系统设计与实时成像技术[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(5): 0503004.
- [4] Zhang Y, Ren G Q, Cheng Z Y, et al. Application research of there-dimensional LiDAR in unmanned vehicle environment perception [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(13): 130001.
张银, 任国全, 程子阳, 等. 三维激光雷达在无人车环境感知中的应用研究[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(13): 130001.
- [5] Pan D F. Design and implementation of 3D color imaging based on laser scanning[D]. Beijing: Beijing

University of Posts and Telecom, 2015: 12-13.

潘大发. 基于激光测距的三维彩色成像的设计与实现[D]. 北京: 北京邮电大学, 2015: 12-13.

- [6] Wang H Y, Wang R H. Application of error theory in 3D laser scanning of point cloud data processing [J]. Geospatial Information, 2019, 17(10): 45-48, 10-11.

王宏宇, 王瑞华. 误差理论在三维激光扫描点云处理中的应用[J]. 地理空间信息, 2019, 17(10): 45-48, 10-11.

- [7] Zheng W C. Research on efficient time series

clustering algorithms[D]. Xi'an: Xidian University, 2019: 3-7.

郑炜超. 高效时间序列聚类算法的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019: 3-7.

- [8] Rong Q S, Yan J B, Guo G Q. Research and implementation of clustering algorithm based on DBSCAN[J]. Computer Applications, 2004, 24(4): 45-46, 61.

荣秋生, 颜君彪, 郭国强. 基于 DBSCAN 聚类算法的研究与实现[J]. 计算机应用, 2004, 24(4): 45-46, 61.