

基于双振镜的多元并扫成像激光雷达的扫描特性分析与系统误差标定

徐卫明¹ 刘 军² 姜紫庆¹ 栾奎峰³ 舒 嵘¹

¹ 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083
² 信息工程大学测绘学院, 河南 郑州 450052
³ 同济大学测量与国土信息工程系, 上海 200092

摘要 设计了一种基于双振镜的多元并扫激光雷达,能够实现 $30^\circ \times 30^\circ$ 的视场,成像帧速率最大可以达到 10 Hz。详细分析了该激光雷达的发射和接收光学对于振镜的不同需求,计算出不影响系统性能情况下的最小振镜几何形状,为振镜小型化设计提供了理论依据;同时通过激光雷达坐标计算的理论公式推导并分析了系统的误差影响,根据分析结果设计了系统误差标定实验,实验获得的图像的平面共面精度达到 3.6 cm,和理论计算值相符。

关键词 遥感; 激光雷达; 振镜; 扫描; 误差标定

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0214002

Scanning Property Analysis and System Error Calibration of Dual Galvanometers Based Multi-Points Parallel Scanning Imaging Lidar

Xu Weiming¹ Liu Jun² Jiang Ziqing¹ Luan Kuifeng³ Shu Rong¹

¹ Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

² Institute of Surveying and Mapping, Information Engineer University, Zhengzhou, Henan 450052, China

³ Department of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China

Abstract A dual galvanometer based multi-points parallel scanning lidar is designed, which provides $30^\circ \times 30^\circ$ field of view (FOV) and maximum 10 Hz imaging frame rate. We analyze the lidar's emitting and receiving optic different demands for galvanometers, and figure out geometric minimum shapes of galvanometers without reducing the system performance, which provides theoretical basis to design smaller galvanometers. Moreover, we analyze the system errors through the footprint coordinate formula of the lidar, and carry out a systematic error calibration experiment according to the analysis results. The co-planarity errors of images acquired in the experiment are 3.6 cm after post-processing, which correspond to theoretical calculations.

Key words remote sensing; lidar; galvanometer; scanning; error calibration

OCIS codes 280.3640; 110.2970; 110.4280; 110.6880; 140.3538

1 引 言

激光雷达技术是近年来发展较为迅速的遥感技术之一,由于激光雷达可以提供目标场景的三维高程,因此广泛应用于城市测绘、数字地图、空间交会对接、深空探测着陆导航和直升机低空避障等方面^[1]。目前商业应用比较成熟的机载激光雷达主要

有 Leica 公司的 ADS60、Optech 公司和 Reigl 公司的激光扫描成像系列产品;而深空探测自主着陆导航应用方面,比较有影响的主要有 Optech 公司为火星开发的激光导航行星自主着陆系统(LAPS),美国小卫星演示项目 XSS-11 设计的空间扫描激光雷达(SSLS),和美国 NASA 的自主着陆避障项目

收稿日期: 2013-06-24; 收到修改稿日期: 2013-09-19

作者简介: 徐卫明(1977—),男,博士,副研究员,主要从事激光雷达方面的研究。E-mail: xuwm@mail.sitp.ac.cn

(ALHAT)研制的闪光激光雷达^[2,3]。

无论是机载还是星载激光雷达,小型化和快速成像都是其重要的技术发展方向。脉冲激光雷达的成像方式一般可以分为单元扫描、多元并扫和面阵成像,单元扫描成像速度较慢,面阵成像可以实现高帧频,但视场依赖于探测器尺寸规模,在当前的技术条件下,多元并扫成像方式是能同时满足快速成像和大视场的折中方式。本文设计了一种基于双振镜的多元并扫成像激光雷达,能够实现 $30^{\circ} \times 30^{\circ}$ 的视场,成像帧速率最大可以达到10 Hz,详细分析了该激光雷达设计的最小化的振镜尺寸、扫描特性,并分析了误差影响。

2 系统结构

基于双振镜的多元并扫激光雷达可以实现目标场景的较大覆盖和快速扫描,本课题组设计的激光雷达在100 m距离处激光光斑直径为10 cm,光学设计采用发射和接收共光路,如图1所示。激光器发射的脉冲激光经过光栅分束器分束成16束激光,采用多元阵列探测器并行接收,接收的激光回波经过接收电子学调理后发送到计时电路,经计时电路处理后得到测距信息。光路前端采用双振镜实现二维视场扫描,双振镜最快能在0.1 s时间内实现 $30^{\circ} \times 30^{\circ}$ 全视场扫描。

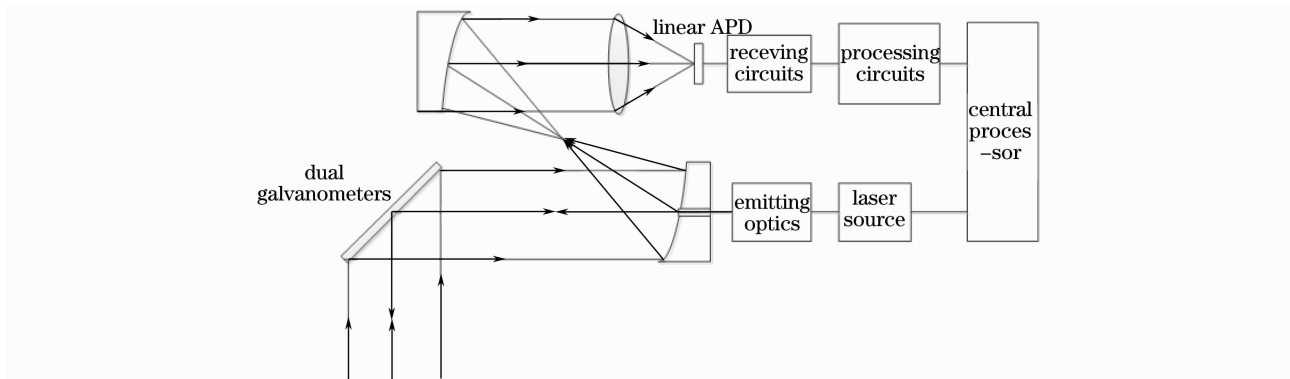


图1 基于双振镜的激光雷达系统示意图

Fig. 1 Schematic of dual galvanometers based lidar systems

3 双振镜的扫描特性

振镜采用动磁式结构,其特点是尺寸小、易于散热、频率特性好,能够实现快速摆动。多元并扫激光雷达的发射激光是16束等角间距的线列点状激光,通过振镜的中心区域反射后出射,激光回波接收的有效口径为30 mm。

双振镜的安装如图2(a)所示(为标识方便,仅显示了振镜的旋转轴和反射镜),两台振镜电机的安装轴线垂直,图2(a)中下方扫描镜记为X扫描镜,上方扫描镜记为Y扫描镜,建立OXYZ右手直角坐标系。X、Y扫描镜的初始位置与XOZ平面成 45° 角,扫描镜可沿其轴线摆动,发射的16点线列激光的角间距为

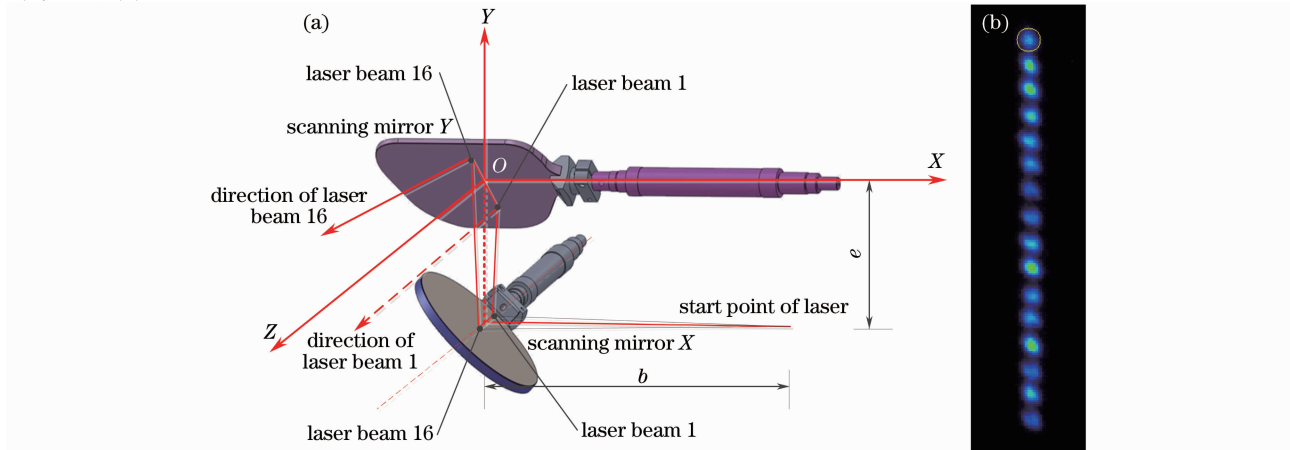


图2 (a) 双振镜扫描方式示意图;(b) 16元发射激光的远场分布图

Fig. 2 (a) Schematic of dual galvanometers scanning; (b) far-field distribution of 16 points emitting laser

2 mrad, 16 点激光线排列方向平行于 X 扫描镜, 理想情况下, 线列激光将入射到 X 扫描镜的轴线上, 反射后经过 Y 扫描镜再次折射后照射到成像目标。X 扫描镜实现正弦往复摆动, Y 扫描镜实现由负的最大角度到正的最大角度的单向运动, 从而实现二维场景覆盖。在每次激光发射时采集 X 扫描镜和 Y 扫描镜的摆动角度, 记为 θ_x 和 θ_y 。

3.1 出射激光在扫描镜上的分布

由图 2(b) 可知, 激光点在 X 扫描镜上的分布为 16 个点, 等角间距分布在 X 扫描镜的旋转轴上, 平行于 OZ 方向, 坐标为 $(0, -e, b \tan \theta_k)$ [b 和 e 的定义见图 2(a) 中的标示], θ_k 的取值在 $k = 1, 2, \dots, 15, 16$ 时依次表示第 1 元、第 2 元、...、第 16 元的激光发射光线和 X 轴的夹角, 对应数值依次为 $-15, -13, \dots, 13$ 和 15 mrad, b 取值 136.0 mm, e 取值 59.0 mm。因此, 第 1 点坐标为 $(0, -59.0, -2.0)$, 第 16 点坐标为 $(0, -59.0, 2.0)$, 激光点分布长度为 4.0 mm, 发射激光使用的是 X 扫描镜的中心轴线

上的 4.0 mm 长度区域, 该区域的面型直接影响发射激光的测角精度。

激光点经过 X 扫描镜反射后, 可计算出 16 点激光在 Y 扫描镜上的坐标, 即

$$\begin{cases} X'_{s_k} = \frac{-\sin 2\theta_x [b \tan \theta_k + e \tan(\pi/4 + \theta_y)]}{\cos 2\theta_x \tan(\pi/4 + \theta_y) - \tan \theta_k} \\ Y'_{s_k} = \frac{\tan \theta_k (e + b \cos 2\theta_x)}{\cos 2\theta_x \tan(\pi/4 + \theta_y) - \tan \theta_k} \\ Z'_{s_k} = \frac{\tan \theta_k \tan(\pi/4 + \theta_y) (e + b \cos 2\theta_x)}{\cos 2\theta_x \tan(\pi/4 + \theta_y) - \tan \theta_k} \end{cases}, \quad (1)$$

θ_x 和 θ_y 为反射镜在 $30^\circ \times 30^\circ$ 视场内摆动时对应的激光点发射时的采样角度值。

根据(1)式可以计算出 16 束激光点在 Y 扫描镜上的扫描区域为等腰梯形, 等腰梯形长底边为 37.4 mm, 短底边为 33.3 mm, 梯形高度为 9.5 mm, 该区域的面型直接影响发射激光的测角精度。

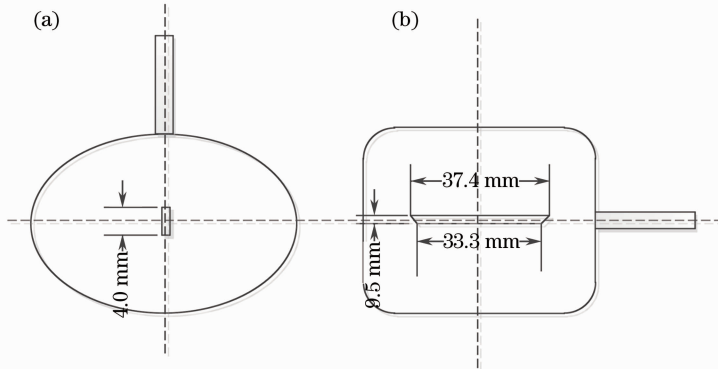


图 3 (a) 出射激光在 X 扫描镜上的分布; (b) 出射激光在 Y 扫描镜上的分布(未按比例)

Fig. 3 (a) Distribution of emitting laser on scanning mirror X; (b) distribution of emitting laser on scanning mirror Y (no scale)

3.2 出射激光在远场的分布

在图 2(a) 中所建立的坐标系 OXYZ 中, 可建立出射激光方程

$$\begin{cases} X = \sin 2\theta_x \cdot t + X'_{s_k} \\ Y = (\cos 2\theta_x \sin 2\theta_y + \cos 2\theta_y \tan \theta_k) t + Y'_{s_k} \\ Z = (-\cos 2\theta_x \cos 2\theta_y + \sin 2\theta_y \tan \theta_k) t + Z'_{s_k} \end{cases} \quad (2)$$

假设测量平面 $Z=100$ m, 则根据(2)式可以计算出发射多元激光点的场景分布情况。

由图 4 可知, 发射的 16 元激光在远场形成方形区域, 但是该方形区域存在畸变, 图像的左右两边中间部分凹陷, 该畸变会导致边缘采样点分布不均匀,

但是不影响激光雷达的图像获取, 并不需要进行校正^[4-6]。

3.3 双振镜的激光接收特性

有效接收光学口径为 30 mm, 根据光路可逆原理, 可以计算出接收使用的振镜有效区域, 如图 5 所示, X 振镜上接收面积近似为椭圆形, 椭圆长轴为 50.0 mm, 短轴为 34.1 mm; Y 振镜上的接收面积近似为梯形, 但是上边长和下边长中间部分分别向里凹陷 5.5 mm 和 4.3 mm, 中间部分实际长度为 49.3 mm, 外框长度方向最长为 72.3 mm, 高度为 59.1 mm, 振镜上安装的反射镜可以按照计算外形进行精确设计, 尽量减小负载, 从而提高振镜的摆动频率。

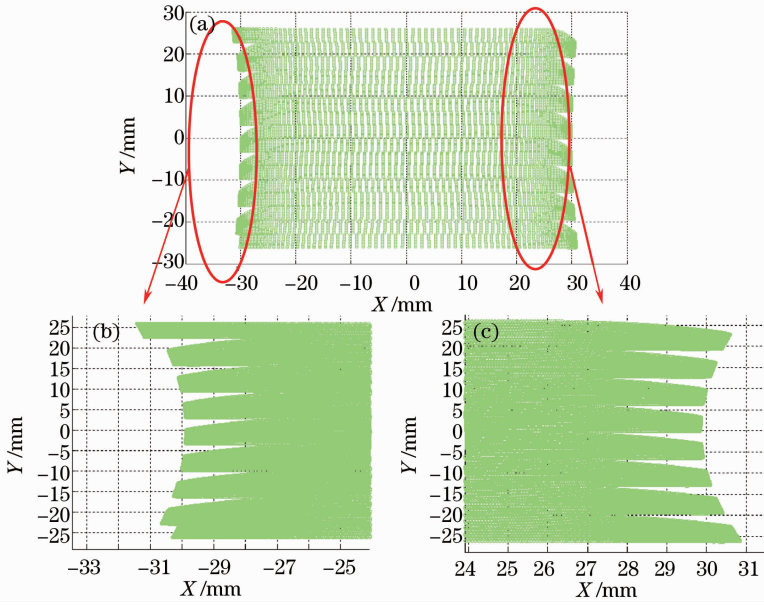


图 4 多元发射激光束的场景分布示意图。(a)全局分布;(b)左侧畸变;(c)右侧畸变

Fig. 4 Distribution chart of multipoints emitting laser. (a) Global distribution; (b) left side aberration; (c) right side aberration

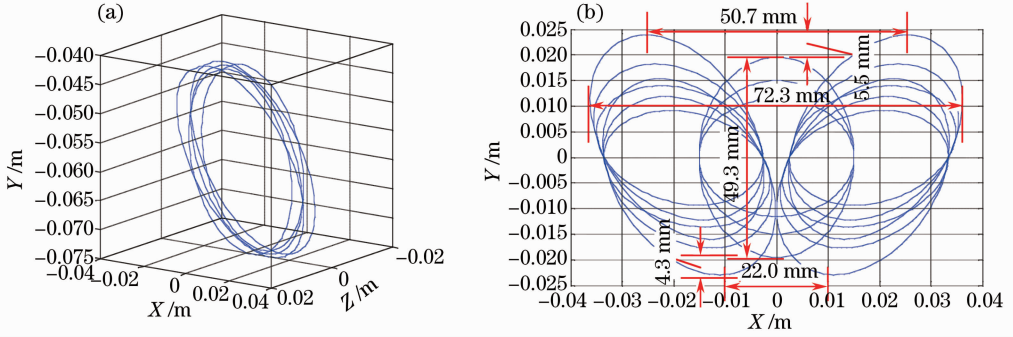


图 5 激光回波在振镜上的有效接收面积示意图。(a) X 振镜;(b) Y 振镜

Fig. 5 Effective receiving area of galvanometer for laser echoes. (a) Galvanometer X; (b) galvanometer Y

4 误差分析

4.1 激光脚印坐标公式

在图 2(a)坐标系中,激光从 Y 扫描镜上出射到目标的距离为

$$L_k = R_k - \frac{b}{\cos \theta_k} - \sqrt{(X'_{s_k} - 0)^2 + (Y'_{s_k} + e)^2 + (Z'_{s_k} - b \tan \theta_k)^2}, \quad (3)$$

式中 R_k 为激光光束飞行距离。

联立(1)式和(2)式可以得到激光脚印点的空间坐标为

$$\begin{bmatrix} X_k \\ Y_k \\ Z_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X'_{s_k} \\ Y'_{s_k} \\ Z'_{s_k} \end{bmatrix} + L_k \mathbf{n} = \begin{bmatrix} X'_{s_k} \\ Y'_{s_k} \\ Z'_{s_k} \end{bmatrix} + \frac{L_k}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2}} \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X'_{s_k} \\ Y'_{s_k} \\ Z'_{s_k} \end{bmatrix} - L_k \cos \theta_k \begin{bmatrix} \sin 2\theta_x \\ \cos 2\theta_x \sin 2\theta_y + \cos 2\theta_y \tan \theta_k \\ -\cos 2\theta_x \cos 2\theta_y + \sin 2\theta_y \tan \theta_k \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中 θ_x 为 X 扫描镜的光学角; θ_y 为 Y 扫描镜的光学角; R_k 为测量的激光飞行距离。

4.2 误差分析

在上述得到的激光脚印点坐标的计算公式中,观

测量包括 16 个通道的测距值 $R_k (k = 1, 2, \dots, 16)$ 、 X 扫描镜的摆动角度 θ_x 、 Y 扫描镜的摆动角度 θ_y 。观测量的误差包含系统误差和随机误差,误差模型为

$$\begin{cases} R_k = R_{k0} + \Delta R_k + R_{k\varepsilon}, \\ \theta_x = \theta_{x0} + \Delta\theta_x + \theta_{x\varepsilon}, \\ \theta_y = \theta_{y0} + \Delta\theta_y + \theta_{y\varepsilon} \end{cases}, \quad (5)$$

式中 R_{k0} 、 θ_{x0} 、 θ_{y0} 分别为对应观测量的真值, ΔR_k 、 $\Delta\theta_x$ 、 $\Delta\theta_y$ 为测量值的系统误差, $R_{k\varepsilon}$ 、 $\theta_{x\varepsilon}$ 、 $\theta_{y\varepsilon}$ 为测量值的随机误差。

假设测量场景为平面,距离为 100 m,振镜角度

表 1 基于双振镜的多元并扫激光雷达误差分析

Table 1 Error analysis of dual galvanometers based multi-points parallel scanning lidar

Standard deviation	Only X scanning	Only Y scanning	Only range	Both scanning
	error /m	error /m	error /m	and range error /m
X	0.0292	0.0000	0.0081	0.0307
Y	0.0001	0.0292	0.0057	0.0296
Z	0.0061	0.0043	0.0387	0.0394

5 系统误差标定

基于双振镜的多元并扫激光雷达有多达 18 个系统误差参数需要标定,由于激光雷达进行标定时无法精确找到同名点,因此采用多个平面目标进行标定。

激光雷达的视场为 $30^\circ \times 30^\circ$,在 100 m 距离处

测量的标准偏差为 $30''$,各通道距离测量的标准偏差都为 4 cm,用随机函数产生确定标准偏差和均值代入(4)式可以计算出系统的随机误差。

由表 1 可看出, X 扫描角、 Y 扫描角和距离误差都值分别在 X 、 Y 和 Z 向上产生主要误差,在其他方向上产生的误差最大为 0.0081 m,远小于距离测量误差 4 cm。由表 1 可知,如果将激光雷达的扫描角度误差和距离误差解耦分别进行误差标定,将会增加小于 1 cm 的误差,但能显著降低误差标定的难度和复杂度,否则,需要采用下节所述的平差方法进行标定。



图 6 系统误差标定场

Fig. 6 System error calibration field

以钢板平面作为误差标定的基准,在地面测量坐标系中列出平面方程^[7]

$$s_1 X + s_2 Y + s_3 Z + s_4 = 0, \quad (6)$$

式中 $\mathbf{s} = [s_1, s_2, s_3]$ 为平面的法向量, s_4 为平面的截距 0。

把成像坐标系中计算获得的激光点云坐标转换成地面测量坐标系坐标,并代入平面方程得到

$$F(R, \theta_x, \theta_y) = s_1 X'_k + s_2 Y'_k + s_3 Z'_k - L_k \cos(\theta_k) (s_1 n_x + s_2 n_y + s_3 n_z) + s_4 = 0. \quad (7)$$

对(7)式线性化并求偏导,构建误差方程

$$v = \frac{\partial F}{\partial R_k} \Delta R_k + \frac{\partial F}{\partial \theta_x} \Delta \theta_x + \frac{\partial F}{\partial \theta_y} \Delta \theta_y, \quad (8)$$

进行全视场标定需要 $53.6 \text{ m} \times 53.6 \text{ m}$ 的场景,难以实现。本课题组设计的方案在 100 m 处 20 m 纵深范围内摆放 11 块 $2 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ 的钢板,水平覆盖约 50 m 宽度,每块钢板的平面度优于 0.5 cm。激光雷达安装在转台上,可以通过俯仰转动多次成像的方式覆盖垂直视场区域。

式中 $R_k (k = 1, 2, \dots, 15, 16)$ 为 16 个通道的激光测距值, $\Delta R_1, \Delta R_2, \dots, \Delta R_{16}$ 为 16 个通道对应的测距误差, $\Delta\theta_x$ 和 $\Delta\theta_y$ 为双振镜的测角误差。每个激光脚点都可按照上式列出一个误差方程。当有足够的平面且平面上有足够的激光脚印点时,可以通过最小二乘平差方法求解出 16 个测距误差 $\Delta R_1, \Delta R_2, \dots, \Delta R_{16}$ 和两个测角误差 $\Delta\theta_x$ 和 $\Delta\theta_y$ 。

6 实验分析

根据第 4 节的系统误差标定原理设计了误差标定实验,图 7 是误差标定前后的数据对比。

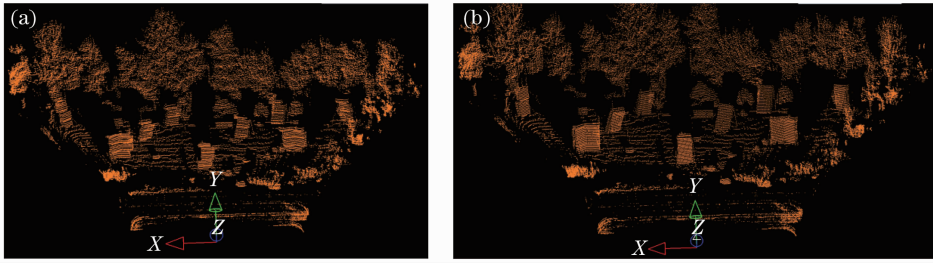


图 7 (a) 原始激光点云图像;(b) 标定后的激光点云图像

Fig. 7 (a) Original laser point cloud image; (b) laser point cloud image after calibration

原始激光点云上的平面靶板存在明显变形,经过误差标定后能够很好地重建原始图像。利用系统误差标定结果,对两组数据分别进行了绝对共面精度统计,绝对坐标由全站仪测量获取,结果如表 2 所示。共面均方差达到 3.6 cm,和 3.2 节中分析的误差相当。

表 2 误差标定后的绝对共面精度统计

Table 2 Absolute co-planarity accuracy statistics after error calibration

Data	Number of planes	Number of laser points	Co-planarity errors /m
1	9	2957	0.036
2	9	2938	0.035

7 结 论

设计了一种基于双振镜的多元并扫激光雷达,通过建立激光脚印点的坐标方程,详细分析了二维扫描激光点在振镜和目标场景的分布,并根据建立的方程进行了系统误差分析。在误差分析的基础上,设计系统误差标定方案,进行了误差标定实验,对获取的数据进行处理获得了系统误差标定参数,用标定参数对获取数据进行统计得到成像共面均方差为 3.6 cm。本文设计的激光雷达可用于凝视面阵成像和快速获取三维场景点云图像,应用前景广阔。

参 考 文 献

- 1 Meng Qingji, Zhang Xuyan, Zhou Ling, *et al.*. Key technologies of airborne laser 3D detection imaging system [J]. Chinese Optics, 2011, 4(3): 327-339.
孟庆季, 张续严, 周 凌, 等. 机载激光 3D 探测成像系统的关键技术[J]. 中国光学, 2011, 4(3): 327-339.
- 2 T Mizuno, M Mita, Y Kajikawcl, *et al.*. Study of two-dimensional scanning LIDAR for planetary explorer[C]. SPIE, 2008, 7106: 71061A.
- 3 C D Epp, E A Robinson, T B Smith. Autonomous precision landing and hazard avoidance technology (ALHAT)[C]. IEEE Aerospace Conference, 2007. 1-7.
- 4 Zhao Qun, Wang Chao, Yang Jinhua. Graphic distortion analysis and correction arithmetic research on laser galvanometer scanning [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2012, 35(4): 63-65.
赵 群, 王 超, 杨进华. 激光振镜扫描图形失真分析及校正方法研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2012, 35(4): 63-65.
- 5 Wan Zhi, Du Wenxi. Calibration of graphic distortion and compensation of exposure for dual galvanometer scanning [J]. Optics & Precision Engineering, 2000, 8(2): 106-109.
万 志, 杜温锡. 振镜二维扫描的图形畸变校正和曝光量补偿 [J]. 光学 精密工程, 2000, 8(2): 106-109.
- 6 Zhao Yi, Lu Bingheng. Pillow-shaped distortion correction algorithm of galvanometric scanning system [J]. Chinese J Lasers, 2003, 30(3): 216-218.
赵 毅, 卢秉恒. 振镜扫描系统的枕形畸变校正算法[J]. 中国激光, 2003, 30(3): 216-218.
- 7 D D Lichti, Error modelling, calibration and analysis of an AM-CW terrestrial laser scanner system [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2007, 61(5): 307-324.

栏目编辑:张 腾