

无人机机载激光雷达四面塔镜三维成像方法

胡雪晴¹, 毛庆洲^{1,2*}, 胡庆武¹, 周昊¹, 吴安磊³¹武汉大学遥感信息工程学院, 湖北 武汉 430079;²武汉量子技术研究院, 湖北 武汉 430061;³武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430072

摘要 针对当前 45° 镜转扫模式的无人机机载激光雷达扫描效率低、视场角小的问题, 提出一种四面塔镜扫描高精度三维成像方法。首先, 设计一种面向无人机机载激光雷达扫描的四面塔镜结构; 其次, 建立四面塔镜扫描成像模型, 推导四面塔镜扫描坐标方程; 再次, 分析四面塔镜的轨迹特点和影响因素, 并与 45° 镜的扫描轨迹进行对比; 最后, 通过实验对比四面塔镜和 45° 镜扫描无人机机载激光雷达获取的三维激光点云质量。结果表明, 在相同转速下四面塔镜的扫描效率为 45° 镜的三倍以上, 扫描点云密度高、厚度小、穿透性好, 在高精度地形测绘中具有广泛应用前景。

关键词 遥感; 激光扫描; 塔式转镜; 扫描轨迹; 点云质量

中图分类号 TN958.98

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222055

Three-Dimensional Imaging Method of Four-Sided Tower Mirror Scanning for Unmanned Aerial Vehicle Airborne LiDAR

Hu Xueqing¹, Mao Qingzhou^{1,2*}, Hu Qingwu¹, Zhou Hao¹, Wu Anlei³¹School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, Hubei, China;²Wuhan Institute of Quantum Technology, Wuhan 430061, Hubei, China;³State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei, China

Abstract A high-precision three-dimensional (3D) imaging method using four-sided tower mirror scanning is proposed, herein, with the aim of solving the problems of low scanning efficiency and small angle of view of unmanned aerial vehicle (UAV) airborne lidar in the current 45° mirror scanning mode. First, a four-sided tower mirror structure for unmanned airborne LiDAR scanning was designed. Second, the scanning imaging model of this tower mirror was established, and its scanning coordinate equation was thus derived. Third, the track characteristics and influencing factors of the tower mirror were analyzed and compared with the scanning track of the 45° mirror. Finally, the qualities of the 3D laser point clouds obtained by the four-sided tower mirror and 45° mirror scanning UAV airborne laser radar were compared through experiments; the results indicate that the scanning efficiency of the former is more than three times that of the latter at the same speed. Additionally, the scanning point cloud has high density, small thickness, and good penetrability; it has broad application prospects in high-precision topographic mapping.

Key words remote sensing; laser scanning; tower mirror; scanning trace; point cloud quality

1 引言

无人机机载激光雷达 (LiDAR) 测量技术是一种主动对地观测技术, 具有精度高、可穿透植被、成本低、灵活性高等特点^[1-3], 被广泛应用于地质调查、灾害监测及评估、公路勘测等领域^[4-6]。扫描系统是机载

LiDAR 的重要组成部分, 负责改变激光指向, 实现高精度、宽视场扫描, 不同扫描系统的扫描速度和视场角有较大差异^[7]。无人机机载 LiDAR 系统对视场覆盖度要求不高, 可采用振镜扫描、楔形棱镜扫描、四棱镜扫描和 45° 镜扫描等多种扫描方式^[8-10]。

振镜扫描光学效率高、系统体积小^[11-12], 但受转动

收稿日期: 2022-07-12; 修回日期: 2022-07-21; 录用日期: 2022-08-04; 网络首发日期: 2022-08-14

基金项目: 国家自然科学基金 (41971413, U1934215)

通信作者: *qzhmao@whu.edu.cn

惯量限制,扫描角度较小、扫描光斑中间疏且两头密^[13]。楔形棱镜结构简单^[14],透射式光路能减小系统整体体积^[15],其圆锥扫描轨迹可实现对地物饱和覆盖式扫描^[16],但扫描速度较低且视场角小。四棱镜扫描点云分布均匀,但有效视场小、光学效率低,且激光器只能间歇发射激光。45°镜扫描成像均匀、结构简单、稳定度高,广泛应用于三维激光扫描系统^[17],但对于主要探测地物目标的机载激光扫描系统,45°镜扫描实际视场远小于设计视场。

传统扫描镜应用于无人机机载 LiDAR 系统存在扫描效率低、视场角小等问题。2009 年,中科院光电研究院研制出的轻小型机载 LiDAR 系统 Lair-LiDAR 采用塔镜作为激光扫描镜,塔镜凭借其独特的外形结构,增大了机载 LiDAR 的有效扫描角,且转速高、驱动方式简单,具有良好的应用前景。目前,国内外对于塔镜扫描 LiDAR 系统的研究和应用较少:文献[18]介绍了 Lair-LiDAR 的扫描轨迹和实际视场角,但没有建立数学模型进行理论分析;文献[19-20]建立了四面塔镜扫描 SW-LiDAR 的定位模型,并将测距误差、安置误差等引入模型,但没有对四面塔镜的扫描轨迹进行详细分析,没有体现其实际扫描性能以及应用于机载 LiDAR 系统时相对于其他扫描方式的优势。

扫描镜类型对 LiDAR 的扫描效率、精度和稳定性有重要的影响,另外,小型化和轻量化也是无人机机载 LiDAR 系统的重要设计标准。扫描镜结构决定了扫描模块和测距模块中各机械元件的体积和质量。因此,扫描镜结构设计非常重要。

本文设计了一种面向无人机机载 LiDAR 扫描的四面塔镜结构,建立了四面塔镜的扫描模型,推导了测

量点坐标计算公式。在此基础上,详细分析塔镜结构和激光发射点位置对扫描轨迹的大小、对称性、曲率等特征的影响,对比分析较成熟的 45°镜和四面塔镜扫描方式的特点。并通过实验验证塔镜应用于机载 LiDAR 系统的实际扫描性能。

2 无人机机载 LiDAR 三维成像

无人机机载 LiDAR 一般采用单束、窄束激光作为光源,激光在目标上呈现为一个激光光点,获取的信息有限。为增大 LiDAR 的视场角、高效获取探测区域的信息,需要借助扫描系统改变激光的指向并结合飞机的高速位移,完成探测区域的三维成像。

无人机机载 LiDAR 常用的扫描方式包括振镜扫描、楔形镜扫描、四棱镜扫描和 45°镜扫描等,不同扫描方式的扫描效率、视场角不同,扫描装置也存在较大差异。工作过程中,扫描镜高速转动,其机械结构越复杂,扫描过程越容易偏离平稳状态^[21]。

以奥地利的 RIEGL VUX-1LR 激光扫描仪为例,RIEGL VUX-1LR 采用 45°镜扫描,如图 1(a)所示,入射激光 SR 与 45°镜转轴共线。工作过程中,反射面转动改变出射激光 RA 的指向,激光在空间中形成一条扫描线。随飞机的运动,激光扫描线在探测区域内不断移动,完成对地物目标的三维扫描,如图 1(b)所示。RIEGL VUX-1LR 设计视场角为 360°,搭载在无人机上对地物进行遥感探测时,实际视场角仅有 $\pm 45^\circ$,存在无效扫描问题,光学效率较低。四面塔镜可视为 4 个 45°镜反射面的组合,如图 1(c)所示,塔镜旋转一周,每个反射面的扫描角 ψ 为 $\pm 45^\circ$,出射激光均指向地面探选区域,扫描效率高。

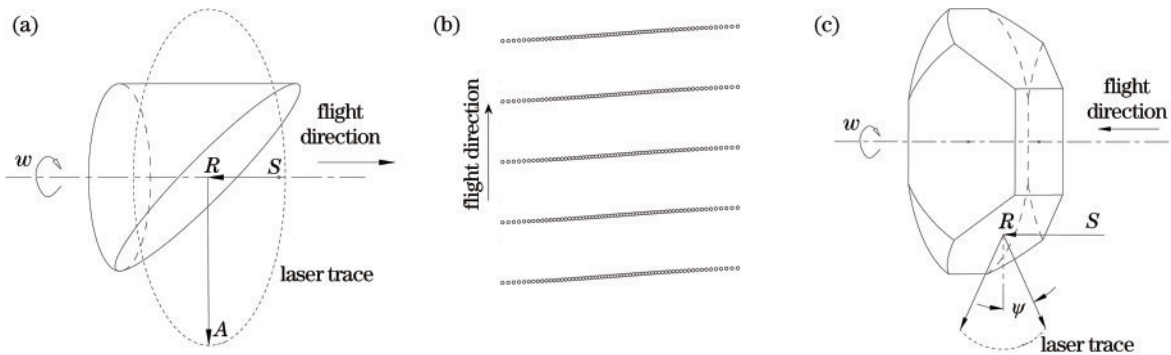


图 1 45°镜扫描示意图。(a) 45°镜扫描原理;(b) 45°镜扫描轨迹示意图;(c) 四面塔镜扫描原理

Fig. 1 Schematic diagrams of 45° mirror scanning. (a) Principle of 45° mirror scanning; (b) schematic diagram of 45° mirror scanning trajectory; (c) principle of four-sided tower mirror scanning

四面塔镜扫描出射激光与入射激光的夹角为定值且较大,发射系统可以连续发光,高功率的出射激光不会直接进入接收光学系统损坏探测器等元件。综上所述,四面塔镜扫描用于无人机机载 LiDAR 系统可有效提高扫描效率。

3 四面塔镜扫描坐标方程与结构

3.1 四面塔镜扫描模型

建立四面塔镜的扫描模型,如图 2 所示。定义坐标系如下:1)原点 O 位于塔镜底面与轴线的交点处, X

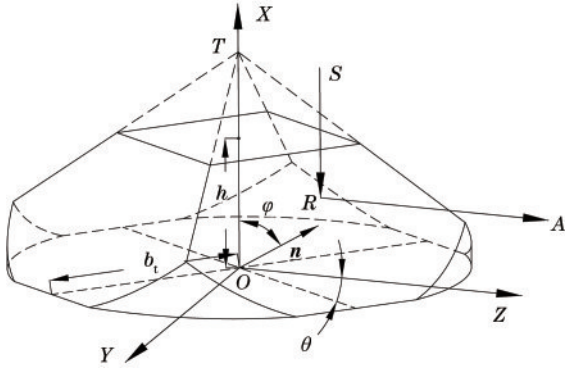


图2 四面塔镜扫描模型

Fig. 2 Four-sided tower mirror scanning model

轴与塔镜轴线重合,飞机飞行方向与X轴平行,Y轴为飞机左翼方向,Z轴指向地面,X、Y、Z构成右手系;2)塔镜4条棱线与X轴交于点T, b_t 为塔镜底边与转轴的垂直距离, h 为塔镜高度, φ 为塔镜反射面法线与轴线的夹角, θ 为塔镜旋转时反射面相对于初始位置的转角;3)定义塔镜各反射面对称轴在XOZ平面内的位置为该反射面的初始位置。在理想情况下,入射激光SR与塔镜轴线平行,塔镜轴线与实际转轴共线。

结合几何光学理论^[22]可知,四面塔镜扫描时的测量点坐标公式如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} \overline{SR} = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ T = \begin{bmatrix} b_t \tan \varphi \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ R = \begin{bmatrix} b_t \tan \varphi - \tan \varphi (S_y \sin \theta + S_z \cos \theta) \\ S_y \\ S_z \end{bmatrix} \\ n = \begin{bmatrix} \cos \varphi \\ \sin \theta \sin \varphi \\ \cos \theta \sin \varphi \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\overline{RA} = \overline{SR} - 2(\overline{SR} \cdot \mathbf{n}) \cdot \mathbf{n}, \quad (2)$$

$$\mathbf{A} = [d0 - (S_x - R_x)] \overline{RA} + \mathbf{R}, \quad (3)$$

式中: $\mathbf{S} = [S_x \ S_y \ S_z]^T$,为激光发射点; $\mathbf{R} = [R_x \ R_y \ R_z]^T$,为激光反射点; \mathbf{n} 为反射面单位法向量; \overline{SR} 为入射激光单位方向向量; \overline{RA} 为出射激光单位方向向量; \mathbf{A} 为测量点坐标; $d0$ 为LiDAR测距值。

3.2 四面塔镜扫描轨迹分析

塔镜扫描应用于机载LiDAR对地物目标进三维成像时,定义飞机航高为 H 。由于四面塔镜的4个反射面相同,且相对于塔镜轴线中心对称分布,每个反射面的扫描轨迹相同,因此对四面塔镜扫描轨迹的分析主要基于塔镜1个反射面在 $Z=H$ 平面上的扫描轨迹展开。

扫描轨迹的主要特征有:轨迹长度、对称性、曲率半径、角分辨率和有效扫描角。由扫描模型可知,影响塔镜扫描轨迹的主要参数包括激光发射点坐标、塔镜的几何尺寸、塔镜反射面倾角和飞机航高。

分析各参数对扫描轨迹的影响:

1)扫描轨迹方程:

$$A_x = (H - S_z) \sec \theta \cdot \cot 2\varphi + R_x, \quad (4)$$

$$A_y = (H - S_z) \tan \theta + S_y, \quad (5)$$

式中: A_x 、 A_y 为扫描轨迹在 $Z=H$ 平面上的X、Y坐标。

轨迹长度的主要影响因素为反射面倾角 φ 和飞机航高 H 。 $\varphi = 45^\circ$ 时,扫描轨迹在垂直于飞行方向的总长度 L_V 与航高 H 近似成正比,在飞行方向的总长度 L_H 与 H 无关(如图3所示); $\varphi \neq 45^\circ$ 时,两个方向的长度均与 H 近似成正比。

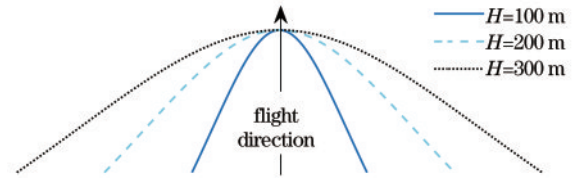


图3 不同航高对应的扫描轨迹对比

Fig. 3 Comparison of scanning trajectories corresponding to different altitudes

2)扫描轨迹对称性

由式(5)可知,塔镜扫描轨迹的对称性只取决于激光发射点坐标 S_y 。当 $S_y = 0$ 时,扫描轨迹关于 $Y=0$ 对称,反之不对称。

在此基础上,若满足条件: $S_y = 0$ 且 $S_z = b_t - h \cdot \cot \varphi / 2$,可构成发射、接收共轴光路。共轴光路的特点是系统体积小、定位精度高,LiDAR系统通常采用此光路。

LiDAR系统探测近距离目标时,激光回波信号功率较高,可通过改变激光发射点的坐标构成旁轴光路,使激光聚焦在探测器边缘,避免损坏探测器等元件,但旁轴光路的定位精度较低。

3)扫描轨迹的曲率半径 K :

$$K(\theta) = \frac{|A_x'(\theta) \cdot A_y''(\theta) - A_y'(\theta) \cdot A_x''(\theta)|}{[A_x'^2(\theta) + A_y'^2(\theta)]^{3/2}}. \quad (6)$$

曲率半径 K 的主要影响因素为反射面倾角 φ :

当 $\varphi = 45^\circ$ 时,出射激光垂直于飞机飞行方向,可探测地物目标的形状和相对空间信息。特点是扫描轨迹的曲率极小、点云分布均匀、应用场景广泛。

当 $\varphi \neq 45^\circ$ 时,出射激光与飞机飞行方向的夹角为钝角($\varphi < 45^\circ$)或锐角($\varphi > 45^\circ$),可探测地物目标侧面的信息,实现饱和覆盖式扫描。但 $|\varphi - 45^\circ|$ 越大,扫描轨迹的曲率越大(如图4所示),且点云分布不均匀、系统的标定难度增大、应用场合有限。

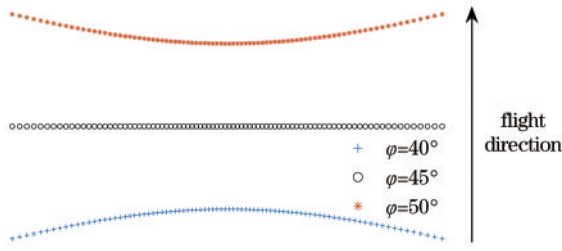


图 4 φ 对扫描轨迹曲率半径的影响

Fig. 4 The influence of φ on the radius of curvature of scanning trajectory

4) 角分辨率

LiDAR 系统的角分辨率理论上取决于扫描镜转速和激光发射频率。机载 LiDAR 一般采用脉冲式测距,要求系统接收到上一束激光的回波信号后才能发射下一束激光。由于光速限制,系统实际角分辨率主要受航高 H 影响:

$$f < c_0/d_0 \approx c_0/[2H/\cos(2\varphi - \pi/2)], \quad (7)$$

$$A_r = 360 \cdot n_t/f, \quad (8)$$

式中: c_0 为光速; f 为激光发射频率; A_r 为系统角分辨率; n_t 为扫描镜转速。

5) 有效扫描角

激光器发射的激光具有一定宽度和发散角,激光在塔镜反射面边缘反射时会分裂为两束光线,导致出射光线不可追踪、扫描过程存在扫描间歇^[23]。因此,扫描过程中,激光反射点与塔镜棱线的距离大于激光光束半径时为有效扫描。

由扫描模型可知,塔镜棱线的方向向量 \mathbf{s} 和棱线方程分别为

$$\mathbf{s} = \begin{bmatrix} (\sin \varphi)^2 \\ \sin \varphi \cos \varphi (\cos \theta - \sin \theta) \\ -\sin \varphi \cos \varphi (\cos \theta + \sin \theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m \\ n \\ p \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$\frac{x - b_t}{m} = \frac{y}{n} = \frac{z}{p} = t_0. \quad (10)$$

由空间几何关系可知:

$$\begin{cases} (\mathbf{R} - \mathbf{Q}) \cdot \mathbf{s} = 0 \\ [d = R - Q \leq r] \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\mathbf{Q} = [Q_x \quad Q_y \quad Q_z]^T$, 为反射点 R 在棱线上的垂足; d 为激光点中心与塔镜棱线的垂直距离; r 为反射面上激光光束半径。

由式(9)~(11)可获得扫描过程的最大有效扫描角 θ_{\max} 。当激光器参数和位置一定时, θ_{\max} 主要受塔镜底边尺寸 b_t 的影响,增大 b_t 可有效增大 θ_{\max} ,但同时会引起塔镜质量和转动惯量的增加,增大系统功耗、降低扫描过程的稳定性。

3.3 四面塔镜结构设计和扫描轨迹分析

3.3.1 四面塔镜结构设计

四面塔镜主要面向无人机机载 LiDAR 系统,工作时飞机航高为 80~300 m,结合激光器和探测器参数,根据 LiDAR 测距方程确定系统的收光口径 D 为 40 mm。系统采用共轴光路,激光回波信号经塔镜反射后到达接收光学系统,塔镜反射面在接收光学系统上的投影面积决定系统收光效率。同时, LiDAR 系统搭载于无人机平台,应满足小型化、轻量化设计标准,以提高探测效率、降低作业成本。

综合以上因素,设计了一种四面塔镜结构,如图 5 和表 1 所示。四面塔镜主体为四棱台结构,相邻反射面之间采用圆柱面过渡,以减小旋转时的空气阻力;塔镜内部的轴孔与电机模块精密配合保证相对位置精度和旋转精度;去除内部多余材料并增加数个中心对称的加强筋保证结构的强度和刚度,减小装配后反射面的变形。

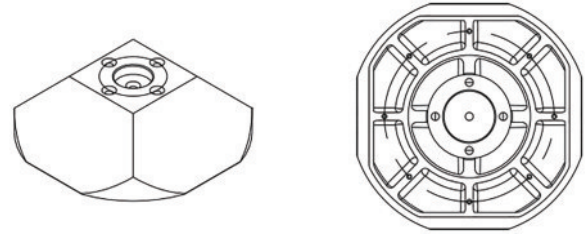


图 5 塔镜结构

Fig. 5 Structure of tower mirror

表 1 四面塔镜几何尺寸

Table 1 Geometric dimensions of four-sided tower mirror

$\varphi /(^{\circ})$	b_t / mm	H / mm	$n_t / (\text{r/s})$
45	50	30	75

四面塔镜的主体结构采用 6061 铝合金材料,6061 铝合金的密度小、加工性能好,具有优良的力学和耐腐蚀性能^[24-26],可以保证塔镜工作时的稳定性,并满足无人机机载 LiDAR 系统轻量化要求^[27,28]。塔镜 4 个反射面用精密机床抛光后镀金膜以提高激光反射率,金膜反射率高、性质稳定、不易因环境温湿度的变化而潮解。

LiDAR 工作中,四面塔镜绕转轴高速转动,4 个反射面依次交替反射激光,扫描效率高、垂直视场大、驱动简单,但塔镜结构的几何精度要求高、加工难度较大。

3.3.2 四面塔镜与 45° 镜扫描轨迹对比

对于 45° 镜扫描,以反射面中心作为坐标原点 O 建立坐标系,如图 6 所示。入射激光 SR 与扫描镜转轴共线,激光发射点 $\mathbf{S} = [S_x \quad 0 \quad 0]^T$,反射激光的单位方向向量与式(2)相同,但反射点 R 始终与原点 O 重合,激光测量点 \mathbf{A} 的坐标为

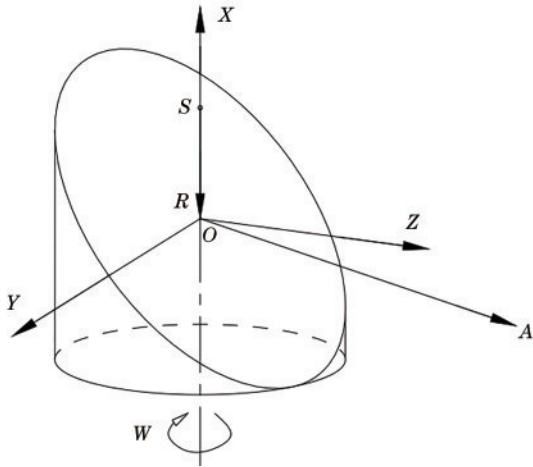


图 6 45°反射镜扫描模型

Fig. 6 45° reflector mirror scanning model

$$A = (d0 - S_x) \overrightarrow{RA}. \quad (12)$$

$H=200\text{ m}$ 时,两种扫描方式的扫描轨迹特点如图7所示。45°镜扫描的理论扫描角为360°,有效扫描角为±45°,视场角为90°,扫描效率为0.25,扫描轨迹为严格的直线。四面塔镜每个反射面的有效扫描角为±42.5°,视场角为85°,扫描效率为0.94,扫描轨迹为曲率极小的弧线。

4 实验分析

4.1 实验仪器及试验数据获取

4.1.1 实验设备

集成了 RIEGL VUX-1UAV 机载激光扫描头的 LiDAR 如图 8(a) 所示, RIEGL VUX-1UAV 采用 45° 镜扫描, 最大测量范围为 1845 m。

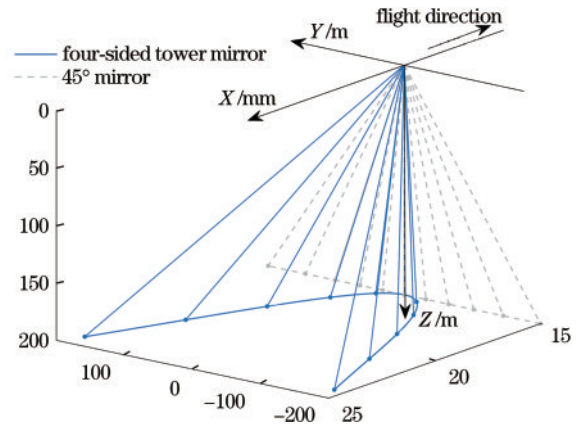


图 7 两种扫描镜扫描视场对比

Fig. 7 Comparison of scanning field of view of two scanning mirrors

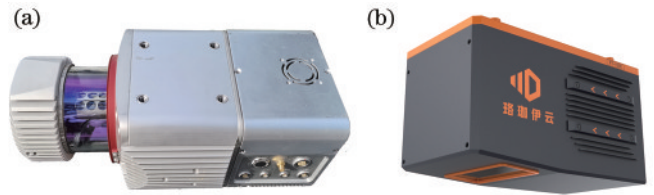


图 8 实验采用的机载 LiDAR。(a) RIEGL VUX-1UAV; (b) 珞珈伊云 FT-1500

Fig. 8 Airborne LiDAR used in experiment. (a) RIEGL VUX-1UAV; (b) LuoJia Yiyun FT-1500

武汉大学团队研发的珞珈伊云 FT-1500 机载 LiDAR 如图 8(b) 所示, 珞珈伊云 FT-1500 采用四面塔镜扫描, 最大测量范围为 1500 m。

两种机载激光扫描仪参数如表 2 所示。无人机飞行平台采用耀宇 LONG120 无人机。

表 2 扫描仪参数

Table 2 Scanner parameters

Scanner	Scanning mirror	Laser pulse repetition rate /kHz	Laser divergence angle /mrad	Scanning mirror rotation speed /(r/s)	Scan speed / s ⁻¹
RIEGL VUX-1UAV	45° mirror	550	0.5	200	200
LuoJia Yiyun FT-1500	four-sided tower mirror	400	0.5	75	300

4.1.2 实验区域及数据获取

实验区域为湖北省武汉市郊区, 如图 9 所示, 有瓦房、树林、草地、田地和池塘等多种地物, 无大型建筑物阻挡、视野开阔, 适合进行机载 LiDAR 飞行测试实验。

耀宇 LONG120 无人机分别搭载 2 种 LiDAR 设备, 从同一地点起飞, 飞行高度为 200 m, 飞行速度为 6 m/s, 飞行相同航线。

4.2 评价指标

本实验对单航带点云质量的主要评价指标为: 与外业 real-time kinematic (RTK) 点相比的精度、点云密度、点云厚度和点云穿透性, 这 4 个指标可以较充分地反映机载 LiDAR 的点云质量。



图 9 实验区域正射影像图

Fig. 9 Orthophotograph of experimental area

1) 点云精度

由机载 LiDAR 点云与外业 RTK 点的高程差可定量分析 LiDAR 点云的精度,本实验在实验区域人工测量了 18 个 RTK 点, LiDAR 点云与 RTK 点的高程差 dZ 为

$$dZ = d_{Las} - d_{RTK}, \quad (13)$$

式中: d_{Las} 为 LiDAR 点云高程值; d_{RTK} 为 RTK 外业点高程值。

2) 点云密度和厚度

选取实验区域某条航带正下方的 5 个小区域和边缘的 6 个小区域, 分别记为 $A_1 \sim A_5$ 和 $B_1 \sim B_6$, 如图 10 所示。

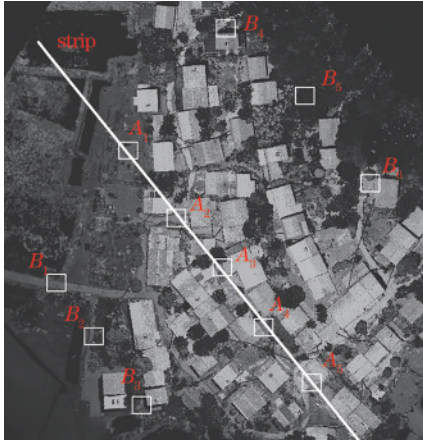


图 10 选区示意图

Fig. 10 Constituency diagram

点云密度是机载 LiDAR 点云数据的重要属性, 反映激光脚点的密集程度和空间分布特点。点云密度越大, LiDAR 能探测的极限目标体积越小, 探测性能越好。实验采用 LiDAR360 软件处理 LiDAR 点云数据, 在软件中框选图 10 的各选区, 测量选区内的点云密度, 如图 11 所示。将软件计算的“density”记为点云密度 D_{cloud} , 计算方式如下:

$$D_{cloud} = N_{Count} / S, \quad (14)$$

式中: N_{Count} 为选区内点的总数; S 为选区总面积。

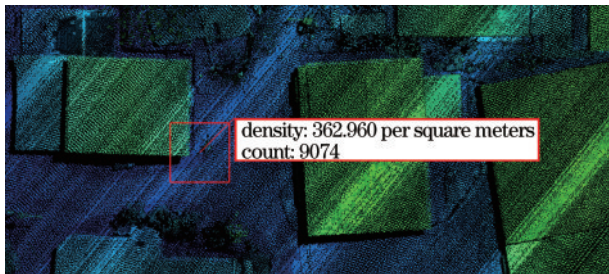


图 11 点云密度测量

Fig. 11 Point cloud density measurement

点云厚度为点云在水平、平坦地表的平整度, 是衡量点云质量和条带内部点云可重复性的重要指标之一。如图 12 所示, 在软件中框选各选区, 查看选区的剖面视图, 测量剖面视图中一段较平坦地面的点云厚度,

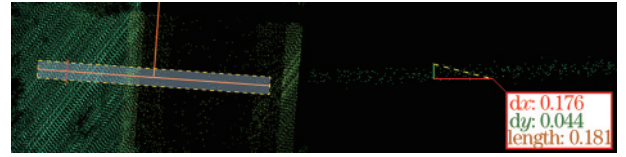


图 12 点云厚度测量

Fig. 12 Point cloud thickness measurement

将测量得到的“dy”记为该选区的点云厚度 T 。

3) 点云穿透性

点云穿透性是机载 LiDAR 测绘的重要特点和优势之一, 点云穿透性越好, 可获取的地表信息越完整。

点云穿透性的分析流程如下: 1) 选取飞测区域树林中较茂密的 n 个小区域 $T_{1,2,\dots,n}$, 如图 13(a) 所示, 选区的数目由飞测区域中树林的面积、树木的种类和疏密程度等决定, 树林面积越大、树木种类越多, 选区数目越多; 2) 截取每个区域的点云, 根据点云垂直分布的均匀程度将点云根据高程均分为 k 个区间 $H_{1,2,\dots,k}$, 如图 13(b) 所示, 若截面中点云在地表或树木主干部分缺失较严重, 则应相应增加区间数; 3) 导出每个选区 T 的点云坐标格式文件, 利用 Access 统计每个高程区间 H 内的点数, 并计算其占选区内总点数的比例 P_j :

$$P_j = Q_j / Q_{sum}, \quad (15)$$

式中: Q_j 为区间内点数; Q_{sum} 为该区间所在区域内总点数; j 表示不同区间, $j = 1, 2, \dots, k$ 。

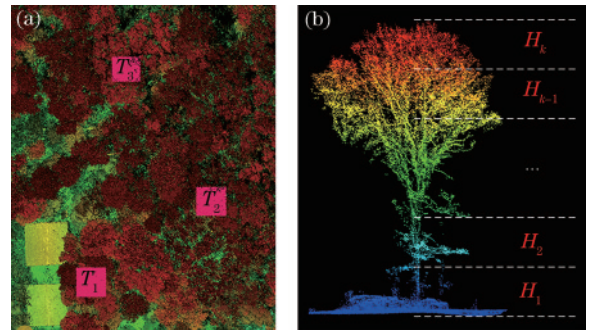


图 13 点云穿透性分析。(a) 穿透性分析选区; (b) 高程区间划分
Fig. 13 Point cloud penetration analysis. (a) Penetration analysis selection area; (b) elevation interval division

树林可分为树冠层、树干层和地面层这 3 部分。树冠层的树叶和树枝较多, 入射激光大部分在树冠层发生反射, 少部分穿透该层到达树干层和地面层; 树干层包括多个高程区间, 区间内的反射面积较小; 地面层有草丛和灌木等植物, 反射面积大。设地面层包含高程区间 $H_1 \sim H_a$, 树干层包含区间 $H_{a+1} \sim H_b$, 树冠层包含高程区间 $H_{b+1} \sim H_k$, 则地面层、树干层和树冠层的点云数占选区内点云总数的比例分别为 P_a 、 P_b 和 P_c :

$$\begin{cases} P_a = \sum_{j=1}^a P_j \\ P_b = \sum_{j=a+1}^b P_j \\ P_c = \sum_{j=b+1}^k P_j \end{cases} \quad (16)$$

根据树木的外形特点,认为点云在各个区间内分布相对均匀,且 $P_a \geq 0.2$ 、 $P_b \geq 0.2$ 时,激光点云的穿透性较好。

4.3 实验结果分析

实验主要目的是通过对比分别采用四面塔镜和 45° 镜扫描的无人机机载 LiDAR 单航带点云的质量,验证四面塔镜用于无人机机载 LiDAR 的实际扫描性能。两种 LiDAR 扫描的单航带点云图像如图 14、15 所示。珞珈伊云 FT-1500 机载 LiDAR 获取的激光地面脚点分布密集、均匀,点云覆盖完整性、旁向重叠度、点云平面相对精度和高程相对精度均较好,点云噪声较小,点云图像中可清晰地分辨出各种地物特征,点云整体质量较好,且单航带点云密度远高于 RIEGL VUX-1UAV。

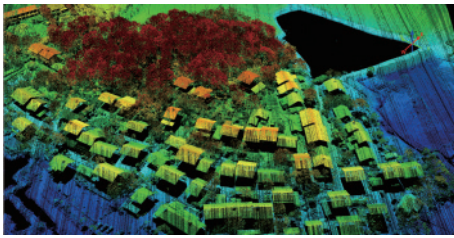


图 14 RIEGL VUX-1UAV 单航带点云

Fig. 14 Point cloud of RIEGL VUX-1UAV for single flight

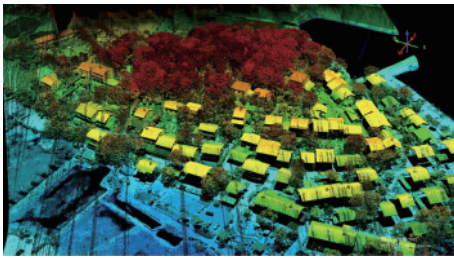


图 15 珞珈伊云 FT-1500 单航带点云

Fig. 15 Point cloud of Luojia Yiyun FT-1500 for single flight

对两种 LiDAR 单航带点云与 RTK 点的高程差、点云密度、点云厚度和点云穿透性等 4 项指标进行具体的对比分析。

4.3.1 RTK 高程值对比

RIEGL VUX-1UAV 和珞珈伊云 FT-1500 扫描的点云与 18 个外业 RTK 点的高程差 dZ 如表 3 所示。

RIEGL VUX-1UAV 扫描的激光点云与 18 个外业 RTK 点的高程差均值为 0.02296、标准差为 0.023827; 珞珈伊云 FT-1500 扫描的激光点云与 18 个 RTK 点的高程差均值为 0.021506、标准差为 0.022317。因此,珞珈伊云 FT-1500 LiDAR 扫描的点云可达到 RIEGL VUX-1UAV 同等精度。

4.3.2 点云密度

本实验中两种 LiDAR 的点云密度主要与视场角和激光发射频率相关,RIEGL VUX-1UAV 和珞珈伊云 FT-1500 的实际视场角分别为 90° 和 85°,激光发射

频率分别为 550 kHz 和 400 kHz,在各选区的点云密度如表 4 所示。

表 3 LiDAR 点云与外业 RTK 点高程差

Table 3 Elevation difference between LiDAR point cloud and field RTK point

RTK point	dZ	
	RIEGL VUX-1UAV	Luojia Yiyun FT-1500
1	0.0358	0.0192
2	0.0242	0.0087
3	0.0014	-0.0211
4	0.0148	-0.0039
5	-0.0038	-0.0230
6	0.0139	-0.0057
7	0.0147	-0.0064
8	0.0265	0.0095
9	0.0000	-0.0151
10	-0.0156	-0.0280
11	-0.0458	-0.0597
12	0.0235	0.0027
13	0.0378	0.0165
14	0.0441	0.0228
15	-0.0122	-0.0285
16	-0.0125	-0.0164
17	-0.0103	-0.0224
18	0.0236	0.0016

表 4 各选区点云密度

Table 4 Point cloud density of each selection area

Area	D_{cloud} / m^2	
	RIEGL VUX-1UAV	Luojia Yiyun FT-1500
A_1	116.56	319.56
A_2	104.40	374.32
A_3	91.04	318.48
A_4	132.32	242.76
A_5	120.16	203.20
B_1	46.80	139.84
B_2	51.40	100.64
B_3	62.80	240.00
B_4	74.72	390.96
B_5	150.64	380.44
B_6	140.40	306.92

珞珈伊云 FT-1500 扫描的点云在各选区的点云密度平均为 RIEGL VUX-1UAV 的 2.7 倍。因此,四面塔镜扫描相较于 45° 镜扫描可以在较低的扫描频率下获得更高的点云密度。

4.3.3 航带正下方和航带边缘点云厚度

RIEGL VUX-1UAV 和珞珈伊云 FT-1500 扫描点云在各选区的点云厚度如表 5 所示。

表 5 各选区点云厚度

Table 5 Point cloud thickness of each selection

Area	T/m	
	RIEGL VUX-1UAV	Luojia Yiyun FT-1500
A ₁	0.025	0.032
A ₂	0.045	0.037
A ₃	0.046	0.034
A ₄	0.041	0.045
A ₅	0.031	0.030
B ₁	0.047	0.061
B ₂	0.050	0.065
B ₃	0.074	0.070
B ₄	0.050	0.042
B ₅	0.061	0.051
B ₆	0.048	0.047

珞珈伊云 FT-1500 机载 LiDAR 的航带正下方和航带边缘的点云厚度均较小,在航带正下方的点云平均厚度为 3.56 cm,在航带边缘的点云平均厚度为 5.6 cm,对地表回波的稳定性和可重复性较好。

4.3.4 点云穿透性

点云穿透性主要与激光功率、激光发散角和测量距离相关,RIEGL VUX-1UAV 和珞珈伊云 FT-1500 的激光等级均为 1 级,激光发散角均为 0.5 mrad,飞行航高和航线相同。

本实验选取实验区内两个树林较茂密的区域 T_1 、 T_2 分析点云的穿透性,每个区域的点云根据高程分为 5 个区间 $H_1 \sim H_5$,其中, H_1 为地面层、 $H_2 \sim H_3$ 为树干层、 $H_4 \sim H_5$ 为树冠层。

两种 LiDAR 扫描的点云在两个选区内不同高程区间的分布特点如表 6 所示。

表 6 各选区点云穿透性

Table 6 Point cloud penetration of each constituency

Area	Height range	RIEGL VUX-1UAV		Luojia Yiyun FT-1500	
		Counts	Proportion	Counts	Proportion
T_1	H_1	2361.5	0.18	11438	0.27
	H_2	844	0.06	3228	0.08
	H_3	1942.5	0.15	7392.5	0.18
	H_4	4168	0.31	11923.5	0.28
	H_5	4064	0.30	8264.5	0.20
T_2	H_1	1084	0.13	6356.5	0.24
	H_2	552.5	0.07	1390.5	0.05
	H_3	649	0.08	2734	0.11
	H_4	1386.5	0.17	4682	0.18
	H_5	4430	0.55	10982.5	0.42

分析数据可知,两种 LiDAR 的点云穿透性均较好。珞珈伊云 FT-1500 LiDAR 扫描的点云在不同高程区间分布均匀,植被穿透性较好,植被下方的地形较

完整地表达,地面层点云的平均占比 $P_a = 0.255$,树干层点云的平均占比 $P_b = 0.21$,满足 $P_a \geq 0.2$ 、 $P_b \geq 0.2$ 的要求,点云的穿透性较好。

综合以上分析可知,四面塔镜扫描的点云密度高、航带正下方和航带边缘点云厚度小、点云穿透性好,在实现高效扫描的同时仍能保证较好的点云质量,适合应用在无人机机载 LiDAR 系统中。

5 结 论

根据无人机机载 LiDAR 的工作原理和结构特点,设计一种四面塔镜结构,建立相应的数学模型,分析四面塔镜扫描轨迹的特征、影响因素,以及四面塔镜和 45° 镜的扫描轨迹和视场角特点,并通过实验对比两种扫描方式应用于无人机机载 LiDAR 的实际扫描性能。实验结果表明,与现阶段发展较成熟的 45° 镜扫描 RIEGL VUX-1UAV 对比,四面塔镜扫描机载 LiDAR 的扫描效率高、点云质量好,具有较好的应用前景。

但四面塔镜结构较复杂,容易存在面型度和角度等多种结构误差以及与激光发射系统之间的安置误差等,需要进行检测和标定。另外,受结构和工作环境的限制,四面塔镜的扫描视场角也有待提高。

参 考 文 献

- [1] Chen Q. Airborne LIDAR data processing and information extraction[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2007, 73(2): 109-112.
- [2] 濮莉莉,周煜,孙剑锋,等. 激光雷达部分相干外差探测接收特性研究[J]. 光学学报, 2011, 31(12): 1228002. Pu L L, Zhou Y, Sun J F, et al. Receiving characteristics of coherent lidar under partially coherent condition[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(12): 1228002.
- [3] 张小红. 机载激光雷达测量技术理论与方法[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2007. Zhang X H. Theory and method of airborne lidar measurement technology[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2007.
- [4] 范士俊,张爱武,胡少兴,等. 基于随机森林的机载激光全波形点云数据分类方法[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0914001. Fan S J, Zhang A W, Hu S X, et al. A method of classification for airborne full waveform LiDAR data based on random forest[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(9): 0914001.
- [5] Yan W Y, Shaker A, El-Ashmawy N. Urban land cover classification using airborne LiDAR data: a review[J]. Remote Sensing of Environment, 2015, 158: 295-310.
- [6] 王建宇,洪光烈,卜弘毅,等. 机载扫描激光雷达的研制[J]. 光学学报, 2009, 29(9): 2584-2589. Wang J Y, Hong G L, Bu H Y, et al. Study on airborne scanning lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(9): 2584-2589.
- [7] 纪荣祎,赵长明,陈国. 激光扫描转镜扫描轨迹的分析计算[J]. 中国激光, 2011, 38(4): 0408003.

- Ji R Y, Zhao C M, Chen G. Analysis and calculation of scan trace of laser scanning rotation mirror[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(4): 0408003.
- [8] 马浩. 机载激光雷达测量系统误差检校方法研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2011.
Ma H. Research of error calibration methods of airborne lidar system[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2011.
- [9] 章大勇. 激光雷达/惯性组合导航系统的一致性与最优估计问题研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
Zhang D Y. Research on system consistency and optimal states estimation of LIDAR/INS integrated navigation system[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010.
- [10] 王永杰. 基于 MEMS 微镜的车载激光雷达扫描系统设计[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2020.
Wang Y J. Scanning system design for vehicle-mounted LiDAR based on MEMS mirror[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2020.
- [11] 张帆. 激光扫描投影显示的研究与扩展应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
Zhang F. Research on laser scanning projection display and extended applications[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [12] 王腾, 杨树明, 李述胜, 等. 振镜激光扫描测量系统误差分析与补偿[J]. 光学学报, 2020, 40(23): 2315001.
Wang T, Yang S M, Li S S, et al. Error analysis and compensation of galvanometer laser scanning measurement system[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(23): 2315001.
- [13] 卜弘毅, 王建宇, 舒嵘. 机载激光雷达均匀扫描的实现方法[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(4): 675-678.
Bu H Y, Wang J Y, Shu R. Method of achieving uniform scanning of airborne lidar[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(4): 675-678.
- [14] 李凯, 张永生, 童晓冲, 等. 定角圆锥扫描式机载激光测深系统定位模型与精度评价[J]. 测绘学报, 2016, 45(4): 425-433.
Li K, Zhang Y S, Tong X C, et al. Positioning model and accuracy evaluation of conical scanning airborne laser bathymetry system[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(4): 425-433.
- [15] 贺文俊, 付跃刚, 余锐, 等. 圆锥扫描中波红外光学系统的参数检测[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(7): 1783-1787.
He W J, Fu Y G, Yu K, et al. Parameters measurement of conical scanning MWIR optical system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(7): 1783-1787.
- [16] 钱立勇, 吴德成, 刘东, 等. 高光谱成像激光雷达扫描镜的分析与设计[J]. 光学学报, 2021, 41(9): 0928002.
Qian L Y, Wu D C, Liu D, et al. Analysis and design of hyperspectral imaging LiDAR scanning mirror[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(9): 0928002.
- [17] 陈怀波. 基于 45° 扫描转镜的线阵激光雷达研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
Chen H B. Research on linear lidar based on 45 scanning rotating mirror[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018.
- [18] 张恒, 冯德俊, 马浩. 国产 LiDAR 单机检校与试验研究[J]. 测绘通报, 2014(1): 125-128.
Zhang H, Feng D J, Ma H. A study on calibration and test of domestic single LiDAR instrument[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2014(1): 125-128.
- [19] 杨蒙蒙, 李军杰, 关艳玲, 等. 国产机载 SW-LiDAR 系统定位模型的建立与精度分析[J]. 测绘科学, 2014, 39(7): 33-39.
Yang M M, Li J J, Guan Y L, et al. Model building and accuracy analysis of domestic SW-LiDAR airborne integration system[J]. Science of Surveying and Mapping, 2014, 39(7): 33-39.
- [20] 杨蒙蒙, 万幼川, 徐景中. 激光扫描仪四棱塔镜误差分析及定位精度研究[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0914001.
Yang M M, Wan Y C, Xu J Z. Research of error analysis and positioning accuracy with four-prism of laser scanning[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(9): 0914001.
- [21] 任来平, 赵俊生, 翟国君, 等. 机载激光测深海面扫描轨迹计算与分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2002, 27(2): 138-142.
Ren L P, Zhao J S, Zhai G J, et al. Scanning-track computation and analysis for airborne laser depth sounding[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2002, 27(2): 138-142.
- [22] 匡萃方, 冯其波, 刘欣. 用矢量方法分析角锥棱镜的反射特性[J]. 应用光学, 2004, 25(2): 25-27, 50.
Kuang C F, Feng Q B, Liu X. Analysis of reflection property of cube-corner retroreflector with vector expression[J]. Journal of Applied Optics, 2004, 25(2): 25-27, 50.
- [23] 吴常津. 转镜扫描的光学原理[J]. 真空电子技术, 1993(6): 24-34.
Wu C J. The optical principles of scanning mirrors[J]. Vacuum Electronics, 1993(6): 24-34.
- [24] 姬浩, 段小维. 航空用 6061 铝合金板材组织及焊接性能研究[J]. 焊管, 2018, 41(6): 24-27.
Ji H, Duan X W. Experimental study on welding performance and microstructure of 6061 aluminum alloy for aviation[J]. Welded Pipe and Tube, 2018, 41(6): 24-27.
- [25] 李落星, 叶拓, 郭鹏程, 等. 挤压态 6061 铝合金动态力学性能及微观组织演变[J]. 中国材料进展, 2016, 35(4): 260, 268-274.
Li L X, Ye T, Guo P C, et al. The dynamic property and microstructure evolution of extruded 6061 aluminum alloy[J]. Materials China, 2016, 35(4): 260, 268-274.
- [26] Niu Z W, Huang J H, Liu K K, et al. Brazing of 6061 aluminum alloy with the novel Al-Si-Ge-Zn filler metal[J]. Materials Letters, 2016, 179: 47-51.
- [27] 张健, 张雷, 曾飞, 等. 机载激光 3D 探测成像系统的发展现状[J]. 中国光学, 2011, 4(3): 213-232.
Zhang J, Zhang L, Zeng F, et al. Development status of airborne 3D imaging lidar systems[J]. Chinese Journal of Optics, 2011, 4(3): 213-232.
- [28] 朱会平. 机载激光雷达测量系统检校与精度评价[D]. 焦作: 河南理工大学, 2011.
Zhu H P. Systemic calibration and precision evaluation of airborne LiDAR measurement system[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2011.