

## 机载平台 6-D 运动误差对 LiDAR 点云质量的影响比较

王建军, 许同乐, 李东兴, 霍文晓, 李云龙

(山东理工大学 机械工程学院 测控系, 山东 淄博 255000)

**摘要:** 直升机载平台 6-D(Six-Dimensional)运动误差(即飞行轨迹和姿态角运动误差)对机载 LiDAR 点云质量影响显著,进而影响三维重建模型精度。分析各运动误差对点云质量的影响特点,对于有针对性地消除各运动误差影响、有效提高机载 LiDAR 三维成像产品精度具有重要意义。建立了机载激光扫描脚点三维空间位置偏差与机载平台六方位运动误差之间的传递关系;采用数值仿真,定量比较了六方位运动误差对激光点云密度分布和的影响,获得了六方位运动误差的影响特点及规律。仿真结果表明,直升机载平台的三个姿态角运动误差对点云密度的影响更显著,且随飞行高度的增大而增大,而三个飞行轨迹运动误差的影响相对较小。

**关键词:** 遥感; 机载激光雷达; 点云质量; 点密度; 6-D 运动误差; 误差分析

**中图分类号:** TN958.98 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0830002

## Comparison of impacts of helicopter platform 6-D motion errors on point cloud quality from airborne LiDAR

Wang Jianjun, Xu Tongle, Li Dongxing, Huo Wenxiao, Li Yunlong

(Department of Measurement and Control, School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China)

**Abstract:** The six-dimensional(6-D) motion errors of helicopter loading platform(including three-dimensional(3-D) flight trajectory and 3-D attitude angle motion errors) have significant effects on point density and coverage area of the obtained laser point cloud from helicopter-borne LiDAR. Quantitatively comparing the influence characteristics of each of the 6-D motion errors on quality of the laser point cloud, has practical significance for eliminating the effects of these motion errors and for improving accuracy of the reconstructed 3-D imaging products. The transfer relationships between the 3-D position errors of the laser points and the 6-D motion errors were established. Through numerical simulation experiment, changes of point density and coverage area of the laser point cloud caused by the 6-D motion errors were quantitatively evaluated respectively and transversely compared. Simulation experimental results show that, the effects of the 3-D attitude angle motion errors are more significant, and also increase with increasing flight height; while the impacts of the 3-D flight trajectory motion errors are much smaller.

**Key words:** remote sensing; airborne LiDAR; quality of point cloud; point density; 6-D(six-dimensional) motion errors; error analysis

收稿日期:2015-12-21; 修订日期:2016-01-25

基金项目:国家自然科学基金(61201316);国家留学基金;山东省自然科学基金教育厅联合专项(ZR2014JL027);山东省青年教师成长计划;山东理工大学博士科研基金(4041-413028)

作者简介:王建军(1973-),男,副教授,博士,主要从事机载激光雷达三维成像、误差分析与补偿技术方面的研究。

Email: wangjianjun@sdut.edu.cn

## 0 引言

机载激光雷达技术是基于激光脉冲测距原理的遥感测绘新技术,可实时获取被测地形的点云及三维模型产品<sup>[1-2]</sup>。其中,以直升机为载荷平台的激光雷达由于具有飞行机动灵活、测量时效性好、成本低等优点,在城市建模、电力线、交通线及海岸线的测绘中,得到了广泛应用<sup>[3]</sup>。

机载激光雷达的点云获取过程本质上是对被测地形的二维采样过程,因此机载激光雷达的理想测量状态要求飞机按规划航线匀速直线飞行,则由机载激光雷达获得的扫描点云分布较规则、密度较均匀,具有最优的采样质量<sup>[4-5]</sup>。

但直升机在实际飞行中,飞行状态很不平稳,会产生较强烈的复杂非线性振动,很难保持理想的匀速直线飞行状态,存在飞行轨迹和姿态角的六方位运动误差<sup>[6-7]</sup>。目前飞机载荷平台的姿态角运动误差可达 $\pm 5^\circ$ <sup>[8]</sup>,且一般情况下,姿态角运动误差幅值越大,频率越低<sup>[9]</sup>。Wang 等<sup>[10]</sup>对某型固定翼飞机(Cessna Turbo-System Super Skywagon aircraft)进行了飞行实测表明,机载平台姿态角一直在微小波动,其中航向角的波动范围为 $\pm 2.5^\circ$ ,俯仰角为 $\pm 1.5^\circ$ ,滚动角为 $\pm 3.0^\circ$ 。直升机飞行状态比固定翼飞机更不稳定,平台振动特点为在宽带随机振动基础上还叠加了较强的周期振动信号<sup>[11]</sup>,姿态角运动误差可达 $10^\circ$ 以上,摆动频率为 $0.1\sim 1\text{ Hz}$ <sup>[12]</sup>。另外,三维飞行轨迹运动误差幅值可达 $2\text{ m}$ <sup>[13]</sup>。因此,对于直升机载激光雷达而言,研究平台的 6-D 运动误差对点云产品质量的影响,对于寻求相应的补偿措施以提高点云产品质量,具有重要现实意义。

目前国内外关于机载激光雷达误差分析方面的文献鲜有对各个运动误差的影响大小的定量分析及它们之间的横向比较<sup>[14-16]</sup>。如, Hofton<sup>[14]</sup>和 Baltsavias<sup>[15]</sup>指出载荷平台的姿态角运动误差会影响点云的分布及密度,但未详细研究。王建军等<sup>[16]</sup>定性分析了机载平台的姿态角变化对点云分布的影响,但未定量评价六个运动误差对点云密度影响大小并进行横向比较。因此,鉴于目前文献鲜有关于机载平台六方位运动误差对激光扫描点云质量影响的定量评价及横向比较的详细研究报告,文中对此进行了系统深入研究。

## 1 机载平台六方位运动误差对 LiDAR 扫描点云质量的影响

对于线扫描式机载激光雷达,设激光测距为 $S$ ,扫描角为 $\theta$ ,则可获得激光脚点 $p$ 在当地切平参考坐标系中的三维坐标<sup>[17]</sup>。

在理想飞行状态时(飞行平台为匀速直线运动),由 LiDAR 获得的理想激光脚点记为 $(x_{P(I)}^L, y_{P(I)}^L, z_{P(I)}^L)$ 。同样,在实际飞行中,设直升机载荷平台的六维运动误差分别为 $\Delta x_{\text{GPS}}^L$ (沿飞行方向的飞行轨迹误差)、 $\Delta y_{\text{GPS}}^L$ (垂直于飞行方向的飞行轨迹误差)、 $\Delta z_{\text{GPS}}^L$ (飞行高度误差)、 $\Delta \omega$ 滚动角误差、 $\Delta \varphi$ 俯仰角误差和 $\Delta \kappa$ 偏航角误差,可得实际飞行状态下获得的激光脚点三维坐标,即实际激光脚点,记为 $(x_{P(R)}^L, y_{P(R)}^L, z_{P(R)}^L)$ 。

由上,则由直升机载荷平台六方位运动误差造成的激光脚点三维坐标偏差可表示为:

$$\begin{cases} dx_p \\ dy_p \\ dz_p \end{cases} = \begin{cases} x_{P(R)}^L - x_{P(I)}^L \\ y_{P(R)}^L - y_{P(I)}^L \\ z_{P(R)}^L - z_{P(I)}^L \end{cases} \quad (1)$$

由机载激光扫描获得的点云质量,采用三项指标进行评价,即点云空间位置偏差的统计量、点密度及均匀度(或散度)。

### 1.1 点云空间位置偏差的统计量

由公式(1)可获得三维坐标偏差的均方根(Root Mean Square, RMS)统计量:

$$\begin{cases} \text{RMS}_{dx} = \sqrt{\sum_{k=1}^n (dx_{p(k)})^2/n} \\ \text{RMS}_{dy} = \sqrt{\sum_{k=1}^n (dy_{p(k)})^2/n} \\ \text{RMS}_{dz} = \sqrt{\sum_{k=1}^n (dz_{p(k)})^2/n} \end{cases} \quad (2)$$

该指标可反映出实际激光点云相对于理想激光点云的覆盖区域的偏离大小<sup>[18]</sup>,点云覆盖区域的变化主要影响对目标测量地形的扫描完整性。

### 1.2 点云密度

点云密度可反映出激光扫描对被测地形的采样分辨率,密度越大则分辨率越高,后续三维成像的精度越高。点云密度的通常求法是将点云覆盖的平面区域细分成若干栅格单元,计算每个网格单元的激

光点数目,作为点云密度。但这种计算方法实际上是一种求平均密度的方法,为精确反映出机载平台运动误差对点云密度局部区域的细微变化影响,文中研究采用将某激光点与其三个相邻点形成的四边形面积的倒数作为该点的密度。采用该方法求密度,面积越大则密度越小,如此可反映出每个激光点的密度大小及密度的细微变化。点云密度的具体计算步骤如下。

第一步:点云中每个激光点的排序。激光扫描复杂地形得到的点云高程有变化,但在计算点云密度时,只利用点云水平面上的两个坐标(设  $x$  是飞机的飞行方向; $y$  是横向扫描方向)进行计算即可。设点云中激光点的总数为  $n$ ,根据“先  $y$  最小再  $x$  最小”的原则,将所有的激光点进行排序(相当于按  $y$  坐标从小到大、 $x$  坐标从小到大的顺次排序)。

第二步:搜索三个临近点。如图 1 所示,将每个点进行排序后(图 1(a)),针对排好序的某一个点(记为点  $p$ ),利用距离公式,依次搜索与其距离最近的三个点,即:

$$d = \sqrt{(x_i - x_p)^2 + (y_i - y_p)^2} = \min, i = 1 \sim n \quad (3)$$

然后,分别求出三个点与  $p$  点的连线与水平线之间的夹角,即:

$$\alpha_m = \arctan\left(\frac{y_m - y_p}{x_m - x_p}\right), m = 1 \sim 3 \quad (4)$$

根据此三个夹角由小到大排列,对三个点进行围绕点  $p$  的逆时针排序,即图 1(b)中的  $1', 2', 3'$ 。

第三步:四边形面积计算。以点  $p$  为固定点,与三个临近点逆时针顺次组成两个三角形(见图 1(c)),设每个三角形的三个边长分别为  $a, b, c$ ,则该三角形的单周长设为:

$$l = 0.5 * (a + b + c) \quad (5)$$

则该三角形的面积可计算为:

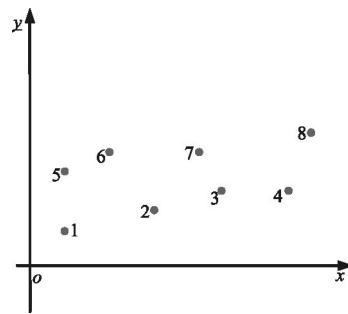
$$s_{\Delta} = \sqrt{l(l-a)(l-b)(l-c)} \quad (6)$$

两个三角形的面积相加,可获得点  $p$  的临近四边形的面积  $s_{\Delta}$ 。

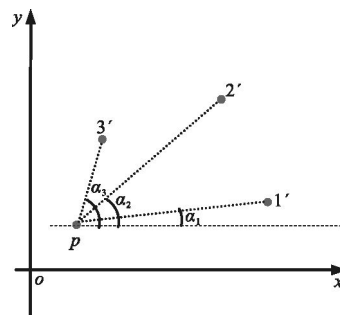
第四步:点密度计算。四边形面积的倒数,即为点  $p$  处的点密度,记为:

$$D_i = \frac{1}{s_{\Delta}(i)} \quad (7)$$

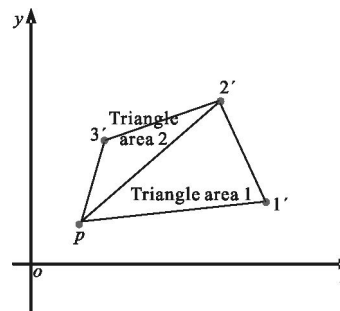
式中: $i = 1 \sim n$ ,  $i$  为点云中各激光点的序号; $n$  为点云中激光点的总数。



(a) 排序  
(a) Sorting of points



(b) 寻找三个临近点  
(b) Finding three closest points



(c) 计算四边形面积  
(c) Calculating area of the rectangular

图 1 点云密度的具体计算方法

Fig.1 Point cloud density calculating method

### 1.3 散度(或均匀度)

由每个激光点的密度指标( $D_i$ ),进一步采用密度指标的统计值反映出点云密度的分布情况。通常由三项统计量指标来反映出点云密度的分布离散程度(称为点云密度的散度或均匀度),即密度的平均值(Mean Density,记为  $M_d$ )、密度分布的标准偏差

(Standard Deviation, 记为  $S_d$ )、密度的均方根值 RMS (Root Mean Square, 记为  $RMS_d$ )。

## 2 六方位运动误差对点云质量影响的数值仿真分析

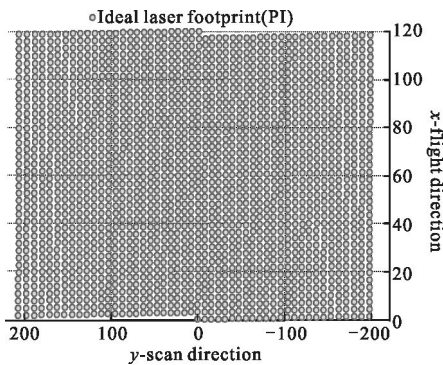
### 2.1 参数设计

采用摆镜式直升机载激光雷达扫描模式进行分析。为分析直升机载荷平台的六方位运动误差对点云密度和分布区域的影响而避免被测地形高程变化所带来的干扰,被测地形模拟了在当地切平参考坐标系中的一个平面地形。设激光雷达的脉冲重复频率为 1 kHz (取较低值的目的是使点云中点的间隔大些,方便观察点密度的变化),扫描频率为 20 Hz,扫描视场角为  $45^\circ(\pm 22.5^\circ)$ ,则每行扫描线中的激光点为 50 个;设直升机载荷平台的三个理想姿态角均为零,理想飞行高度为 500 m、理想飞行速度为 60 m/s;机载平台的六方位运动误差设为正弦变化量,即:三个飞行轨迹运动误差均为幅值为 2 m、频率为 0.5 Hz 的正弦变化(初相角为零),而三个姿态角运动误差设为幅值为  $3^\circ$ 、频率为 0.5 Hz 的正弦波动(初相角为零)<sup>[6]</sup>。

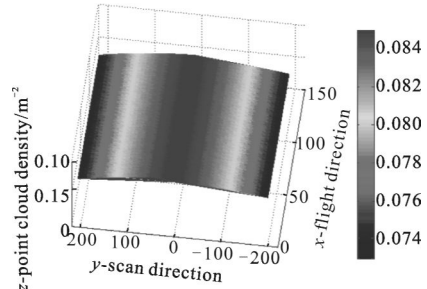
### 2.2 仿真结果

#### 2.2.1 理想激光点云及密度分布

模拟直升机载激光雷达在理想飞行状态下的扫描过程,取扫描时间为 2 s,获得了被测平面地形的理想激光点云,如图 2(a)所示。根据密度计算方法,获得了此点云密度分布图如图 2(b)所示,点密度在中间略高,且随扫描角的增大而逐渐有所降低,符合摆镜式激光扫描点云密度分布特点。



(a) 理想激光点云  
(a) Ideal laser point cloud



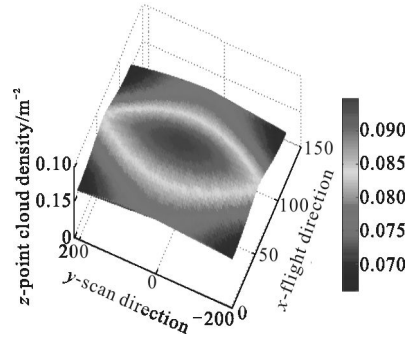
(b) 点云密度分布  
(b) Point cloud density distribution

图 2 理想激光点云及其密度分布

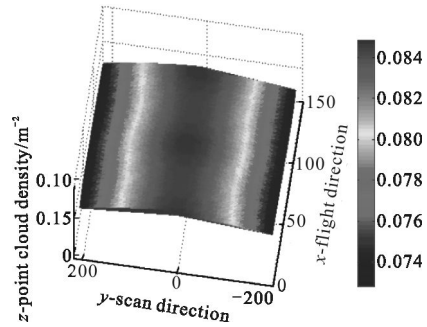
Fig.2 Ideal point cloud and its density distribution

#### 2.2.2 实际激光点云及密度分布

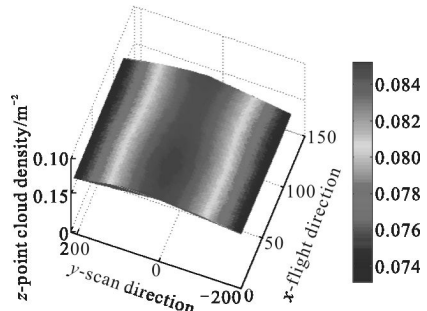
六方位运动误差对激光点云的密度影响如图 3 所示。



(a)  $\Delta x_{GPS}^L$  的影响(飞行误差)  
(a) Effect of  $\Delta x_{GPS}^L$  (flight error)



(b)  $\Delta y_{GPS}^L$  的影响(交叉跟踪误差)  
(b) Effect of  $\Delta y_{GPS}^L$  (cross track error)



(c)  $\Delta z_{GPS}^L$  的影响(飞行高度误差)  
(c) Effect of  $\Delta z_{GPS}^L$  (flight height error)

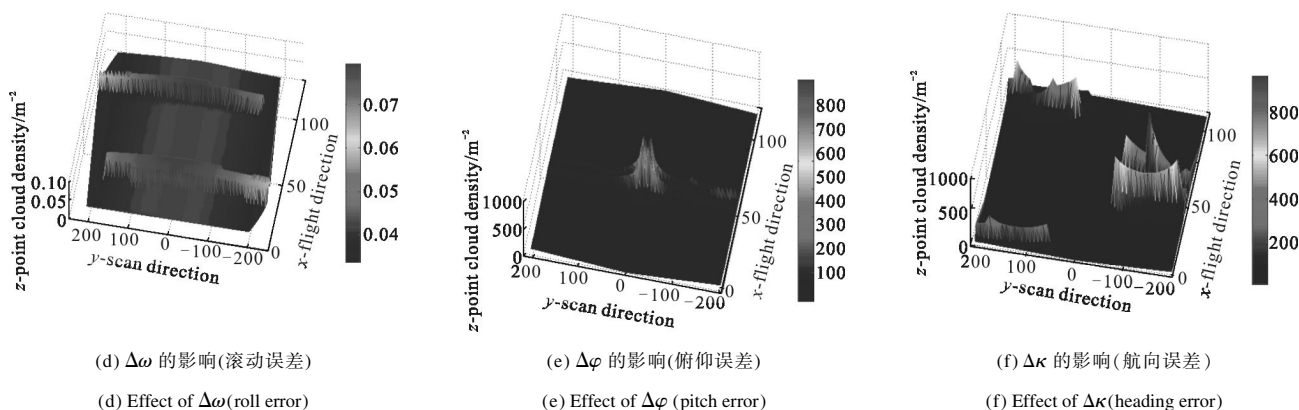


图 3 六方位运动误差对点云密度的影响

Fig.3 Impacts of 6-D motion errors on point cloud density

将图 3 中各图与图 2(b)所示的理想激光点云密度相比可知,三个飞行轨迹运动误差对点云密度的影响很微小,滚动角误差的影响也较小,而俯仰角和偏航角误差的影响最显著,使点云局部密度极大增高,同时其他局部区域密度显著降低。

2.3 点云密度变化统计指标分析

表 1 所示为实际激光点云的密度变化各统计量指标。

表 1 中,前五个指标是每个运动误差影响的实际激光点云密度值的统计量指标,后五个指标是实际激光点云密度统计量与理想激光点云密度统计量的差值。指标  $S_d$  反映了点云密度分布的离散程

度,表中数据说明,  $\Delta\varphi$  和  $\Delta\kappa$  使点云密度分散最大。Max 和 Min 两项指标而言,也是  $\Delta\varphi$  和  $\Delta\kappa$  使点云局部密度变得很大,而另外区域的密度则变得很小。 $\sum \text{正}(\Delta D_i)/n+$  和  $\sum \text{负}(\Delta D_i)/n-$  表明在六个运动误差的单独影响下,实际激光点云中激光点密度与理想激光点云对应点密度的所有差值中,正值之和及其点数、负值之和及其点数;由表 1 中可见,三个飞行轨迹误差对点云密度的影响较小,滚动角误差使每个点的密度都有所降低,而俯仰角和偏航角误差使点云有近一半的密度增加,而近另一半的点密度有所降低,所以三个姿态角误差对点云密度的影响均较大。

表 1 六方位运动误差造成的点云密度变化的统计量指标

Tab.1 Statistics of point density of actual point cloud caused by 6-D motion errors

Statistics of point density	Ideal point cloud	Actual point clouds affected by the 6-D motion errors/m					
		(a) $\Delta x_{GPS}^L$	(b) $\Delta y_{GPS}^L$	(c) $\Delta z_{GPS}^L$	(d) $\Delta\omega$	(e) $\Delta\varphi$	(f) $\Delta\kappa$
Max	0.085	0.095	0.085	0.085	0.079	785.877	963.113
Min	0.073	0.066	0.073	0.073	0.034	0.016	0.023
$M_d$	0.081	0.081	0.080	0.081	0.045	25.148	27.675
$S_d$	0.004	0.007	0.004	0.004	0.012	71.508	80.066
$RMS_d$	0.081	0.082	0.080	0.081	0.047	75.801	84.714
$\Delta M_d$	-	0	-0.001	0	-0.036	25.067	27.594
$\Delta S_d$	-	0.003	0	0	0.008	71.504	80.062
$\Delta RMS_d$	-	0.001	-0.001	0	-0.034	75.720	84.633
$\sum (+\Delta D_i)/n+$	-	6.051/995	0/0	0.159/922	0/0	50 210.956/1 064 55 251.554/939	
$\sum (-\Delta D_i)/n-$	-	-4.976/1 006	-0.602/2 001	-0.248/1 079	-71.481/2 001	-51.010/937	-36.112/1 062

2.4 仿真实验结果分析

由仿真实验结果可得出以下结论:

(1)就六方位运动误差的影响而言,造成点云扫描区域的变化主要体现在点云三维坐标中 y 坐标的偏差变化,此偏差越大,则说明点云分布区域偏离理

想分布区域越大。由上述仿真结果可知,主要有两个运动误差对分布区域影响显著,一是  $\Delta\omega$ ,即滚动角误差;二是  $\Delta y_{GPS}^L$ ,即垂直于飞行轨迹方向的运动误差。

(2)机载平台六方位运动误差对点云密度的影响:三个飞行轨迹运动误差对点云密度的影响很微

小,滚动角误差造成点云整体的密度都有所降低,而俯仰角和偏航角误差对点云密度影响最大。相比之下,机载平台姿态角误差对点云密度的影响要远远大于飞行轨迹运动误差的影响。

### 3 结 论

通过理论分析和数值仿真,对直升机载荷平台的六方位运动误差对激光扫描点云分布区域和点密度的影响进行了系统研究。结果表明,就六方位运动误差对点云分布区域的影响而言,滚动角误差的影响最显著,其次是垂直于飞行轨迹方向的运动误差,可能会造成点云覆盖区域大大偏离目标扫描地形,造成被测地形的漏扫;就六方位运动误差对点云密度的影响而言,俯仰角和偏航角误差的影响最显著,其次是滚动角误差,而三个飞行轨迹运动误差的影响较微小。

### 参考文献:

- [1] Wang Jianjun, Xu Lijun, Li Xiaolu, et al. Quantitative evaluation of impacts of random errors on ALS accuracy using multiple linear regression method[J]. *IEEE Transaction on Instrument and Measurement*, 2012, 61(8): 2242–2252.
- [2] Sun Meiling, Li Yongshu, Chen Qiang, et al. Iterative multi-scale filter based on morphological opening by reconstruction for LiDAR urban data [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 363–369. (in Chinese)
- [3] Wang Jianjun. Optimized design of parameters affecting the accuracy of airborne LiDAR by using orthogonalization-based experiments [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 42(2): 0214003. (in Chinese)
- [4] Jeff Dickman, Maarten Uijt Haag. Aircraft heading measurement potential from an airborne laser scanner using edge extraction [C]//IEEE Aerospace Conference, 2007: 1053–1–16.
- [5] Lv Dan, Sun Jianfeng, Li Qi, et al. 3D pose estimation of target based on lidar range image [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(4): 1115–1120. (in Chinese)
- [6] Alexander V Beresnev, Alexander I Abramochkin, Alexander A Tikhomirov. Airborne LiDAR facilities with scanning of sensing direction [C]//SPIE, 2000, 4341: 519–525.
- [7] Zhang Qingyuan, Li Li, Li Quanxi, et al. Comprehensive information processing system of helicopter anticollision laser radar[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(1): 80–87. (in Chinese)
- [8] Li Shukai, Xue Yongqi. The Integrated Technology System of High Efficiency Three-Dimensional Remote Sensing [M]. Beijing: Science Press, 2000: 96–97. (in Chinese)
- [9] Guo Hao, Li Yang, Qu Qiulin, et al. Studying atmospheric turbulence effects on aircraft motion for airborne SAR motion compensation requirements [C]//2012 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques (IST), 2012: 152–157.
- [10] Wang J G, Wang J L, Barnes J, et al. Flight test of a GPS/INS/Pseudolite integrated system for airborne mapping [C]//Spatial Sciences Conference, 2007: 108–118.
- [11] National Defense Science and Technology Industry Committee. GJB 150.16–1986 Vibration test of environmental testing method for military equipment [S]. Beijing: National Defense Science and Technology Industry Committee, 1986. (in Chinese)
- [12] Xian Bin, Gu Xun, Liu Xiang, et al. Nonlinear robust attitude control for a miniature unmanned helicopter [J]. *Control Theory and Applications*, 2014, 31(4): 409–416. (in Chinese)
- [13] Wu Youqian, Pei Hailong. Trajectory planning for unmanned helicopter based on Dubins curves[J]. *Computer Engineering and Design*, 2011, 32(4): 1426–1429, 1448. (in Chinese)
- [14] Baltsavias E P. A comparison between photogrammetry and laser scanning [J]. *ISPRS Journal of photogrammetry and Remote Sensing*, 1999, 54(2/3): 83–94.
- [15] Hofton M A, Blair J B, Minster J B, et al. An airborne scanning laser altimetry survey of Long Valley, California [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21(11): 2413–2437.
- [16] Wang Jianjun, Xu Lijun, Li Xiaolu, et al. Impact of attitude deviations on laser point cloud of airborne LiDAR [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(8): 1810–1817. (in Chinese)
- [17] Wang Jianjun, Xu Lijun, Li Xiaolu. Impacts of random attitude measurement errors on airborne laser scanning image [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(3): 0314001. (in Chinese)
- [18] Kider D B, Smith D H. Advance in the data compression of digital elevation models [J]. *Computers and Geosciences*, 2003, 29: 985–1002.