

影响机载激光扫描点云精度的测量误差因素 分析及其影响大小排序

王建军^{1,2} 刘吉东¹

(¹ 山东理工大学机械工程学院测控系, 山东 淄博 255049
² 北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院测控系, 北京 100191)

摘要 影响机载激光扫描点云精度的测量误差因素有很多,它们共同存在且交叉影响,因此确定各测量误差因素、分析它们各自对点云精度的影响大小并排序,对消除重要误差因素的影响、有效提高点云精度有重要意义。通过分析圆锥旋转式机载激光扫描工作原理,明确了影响点云精度的各种误差因素,建立了各误差因素和点云精度之间的映射关系。采用多元线性回归方法,建立了各误差因素与点云三维坐标误差之间的多元线性回归方程,获得了标准化回归系数,定量评价了各误差因素对激光点云三维坐标精度的影响显著性,并进行了排序。为机载激光扫描系统的误差分配和重要误差因素的抑制补偿以及有效提高激光点云的精度,提供了重要的理论依据。

关键词 遥感;机载激光扫描;定位精度;多元线性回归;误差分析;排序

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0414001

Analysis and Sorting of Impacts of Measurement Errors on Positioning Accuracy of Laser Point Cloud Obtained from Airborne Laser Scanning

Wang Jianjun^{1,2} Liu Jidong¹

(¹ School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255049, China
² Department of Measurement and Control, School of Instrument Science & Optoelectronic Engineering,
Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract Many measurement errors affect the positioning accuracy of the laser point cloud obtained from airborne laser scanning (ALS). These error factors exist together and influence each other. Therefore, it is of practical significance to find out them, and to analysis their impact sizes and make a sorting. The working principle of conical scanning mode airborne laser scanner is analyzed, and error factors affecting the positioning accuracy of laser point cloud are determined. Furthermore, the transfer relationship between the error factors and the three-dimensional (3D) coordinate errors of the laser point cloud is established. By using multiple linear regression method, regression equations between the error factors and the 3D coordinate errors are established, and the impact significance of each error factor on the 3D coordinate errors is quantitatively evaluated and further sorted. The study provides an important theoretical basis for compensating the significant error factors, so as to effectively improve position accuracy of laser point cloud.

Key words remote sensing; airborne laser scanning; positioning accuracy; multiple linear regression; error analysis; sorting

OCIS codes 280.3640; 110.3000; 100.6880; 110.3010

1 引言

机载激光扫描(ALS)是近二十多年来发展起来

的遥感测绘新技术,可快速获取被测地形的高精度
三维数字模型,在许多领域得到了日益广泛的应

收稿日期: 2013-09-16; 收到修改稿日期: 2013-11-15

基金项目: 国家 973 计划(2009CB724001)、山东理工大学博士科研启动基金(4041-413028)

作者简介: 王建军(1973—),男,博士,讲师,主要从事机载激光雷达三维成像、误差分析与补偿等方面的研究。

E-mail: wangjianjun@aspe.buaa.edu.cn

用^[1-2]。目前国外机载激光扫描技术的硬件水平和系统集成技术已相当成熟,民用机载激光扫描系统已超过 200 多套,典型的最新系统有加拿大 Optech 公司的 ILRIS-3D、美国 Leica 公司的 HDS6000 及美国 Trimble 公司的 GX 3D 激光扫描仪等^[3]。国内对该技术的应用和研究已广泛展开^[4-7]。2007 年,中国科学院上海技术物理研究所王建宇等^[6]研制了一套机载激光雷达系统。2009 年,中国科学院光电研究院朱精果等^[7]承担了国家 863 计划重点项目“轻小型机载激光雷达(LiDAR)系统技术”,于 2012 年完成了工程样机(Lair-LiDAR)研制。国内较缺乏具有自主知识产权的成熟设备和技术,所用硬件和大部分软件为国外产品,只有很少部分后处理软件由国内自主开发^[8]。因此,研究影响机载激光扫描系统的误差因素、并对各误差因素的影响大小进行定量分析和排序,寻找出影响显著的误差因素并进行抑制或补偿,对提高机载激光扫描成像产品精度具有重要意义。

从机载激光扫描测量原理看,影响激光脚点定位精度的误差因素主要有两类^[9-14]。一是传感器测量参数的测量误差,如激光扫描仪的激光测距误差、光电轴角编码器的扫描角测量误差、差分全球定位系统/惯性导航系统(DGPS/INS)系统对机载平台飞行轨迹和姿态角的测量误差等。由于各传感器的测量过程受到多种干扰因素影响,故此类误差一般表征为随机分布。另一类是系统集成误差,如 LiDAR、INS 和 GPS 三者之间的空间相对安装位置参数的测量误差^[15]。空间相对安装位置参数一般为静态测量,故此类误差一般表征为系统误差。系统误差的影响分析相对容易,而随机误差的影响分析及排序则较复杂,主要由于随机误差同时存在且交叉影响。因此,分析随机误差因素的影响大小并排序,是误差分析中的难点,且具有重要的现实意义。

国内外关于机载激光扫描系统中测量误差对激光点云精度的影响研究主要集中于对系统误差和单个随机测量误差的分析^[9-14,16-19],如 Wu 等^[9]分别分析了激光束对准误差、时钟测量误差及扫描镜制造误差对激光脚点定位精度的影响;王建军等^[10]分析了姿态角测量误差的影响规律;刘经南等^[16]分析了各种系统误差因素对激光脚点定位精度的影响。仅少数文献对多个随机误差因素共同作用时的综合影响进行了分析,如 Csanyi 等^[18-19]采取将各测量误差取固定值的方法,横向比较各误差因素的影响大小,但此方法忽略了各随机误差因素之间的交叉

影响。因此,有必要深入研究当各随机误差因素同时存在且综合影响时各随机误差因素对激光脚点定位精度的影响大小及其排序。

2 影响机载激光扫描点云精度的误差因素

2.1 机载激光扫描测量原理

图 1 为圆锥扫描式激光扫描仪工作原理图^[4]。激光器发出的激光脉冲束方向与电机转轴间夹角为 τ ,旋转扫描镜法线与电机转轴间夹角为 γ 。以扫描镜光学中心 O 为原点建立激光扫描仪参考坐标系(记为 LS),其中 x_{LS} 指向飞行方向, y_{LS} 指向飞机右机翼, z_{LS} 垂直于 $x_{LS}Oy_{LS}$ 平面并指向天底线。激光器出射激光束与 y_{LS} 轴重合。电机旋转一周,扫描镜法线 OB 的 B 点形成一圆形轨迹(圆心 A),同时出射激光脉冲束打在垂直于 z_{LS} 轴平面上的激光脚点会形成圆形扫描轨迹。设电机旋转角度 θ 可由轴角编码器测得,地面激光脚点 P 的激光测距值为 S ,则 P 点在 LS 中的三维坐标为

$$x_P^{LS} = -2S \cdot \sin \gamma \sin \theta (\cos \gamma \cos \tau - \sin \gamma \cos \theta \sin \tau), \quad (1)$$

$$y_P^{LS} = 2S \cdot (\cos \gamma \cos \tau - \sin \gamma \cos \theta \sin \tau) - S, \quad (2)$$

$$z_P^{LS} = 2S \cdot (\cos \gamma \cos \tau - \sin \gamma \cos \theta \sin \tau) \cdot (\cos \gamma \sin \tau + \sin \gamma \cos \theta \sin \tau), \quad (3)$$

将 LS 中的激光脚点坐标转换到当地测绘坐标系中(记为 LM)^[1]:

$$\begin{bmatrix} x_P^{LM} \\ y_P^{LM} \\ z_P^{LM} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_A \left(\mathbf{R}_\delta \begin{bmatrix} x_P^{LS} \\ y_P^{LS} \\ z_P^{LS} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} x_G \\ y_G \\ z_G \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中 (x_b, y_b, z_b) 为 GPS 天线相位中心与 LAS 扫描

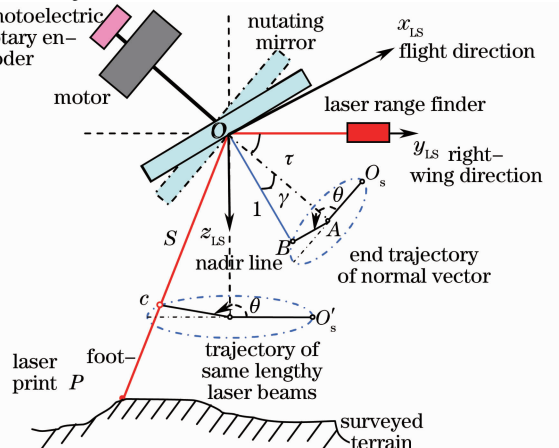


图 1 圆锥扫描式激光扫描仪工作原理图
Fig. 1 Schematics of conical laser scanner

镜光学中心之间的偏心矢量, (x_G, y_G, z_G) 为 GPS 测量的飞行轨迹坐标, \mathbf{R}_b 为从 LS 坐标系到惯性平台参考坐标系(记为 IP)的转换矩阵, 旋转角为 LS 与 IP 之间的安装误差角矢量 $(\delta_x, \delta_y, \delta_z)$, \mathbf{R}_A 为由 IP 到 LM 的转换矩阵, 旋转角为机载平台的姿态角矢量 $(\omega, \varphi, \kappa)$, 即滚动角 ω 、俯仰角 φ 和偏航角 κ 。

(4)式中共有 16 个自变量参数, 其中 8 个为系统集成参数, 即 (x_b, y_b, z_b) 、 $(\delta_x, \delta_y, \delta_z)$ 、 τ 和 γ ; 另外 8 个为传感器测量参数, 即 (x_G, y_G, z_G) 、 $(\omega, \varphi, \kappa)$ 、 θ 和 S 。如果精确获得 16 个参数的真实值, 则 P 点的三维坐标无测量误差。

2.2 误差因素确定

实际中, 由于 16 个参数的测量值均含测量误差, 即测量值为真实值与测量误差之和。设 16 个参数的真实值分别为 $(x_{G(r)}, y_{G(r)}, z_{G(r)})$ 、 $(\omega_{(r)}, \varphi_{(r)}, \kappa_{(r)})$ 、 $(x_{b(r)}, y_{b(r)}, z_{b(r)})$ 、 $(\delta_{x(r)}, \delta_{y(r)}, \delta_{z(r)})$ 、 $\tau_{(r)}$ 、 $\gamma_{(r)}$ 、 $\theta_{(r)}$ 、 $S_{(r)}$, 其中下标 (r) 指真实值, 代入(4)式, 可得 P 点的真实坐标, 记为 $(x_{P(r)}^{LM}, y_{P(r)}^{LM}, z_{P(r)}^{LM})$ 。设 16 个参数的测量值为 $(x_{G(r)} + \Delta x_G, y_{G(r)} + \Delta y_G, z_{G(r)} + \Delta z_G)$ 、 $(\omega_{(r)} + \Delta \omega, \varphi_{(r)} + \Delta \varphi, \kappa_{(r)} + \Delta \kappa)$ 、 $(x_{b(r)} + \Delta x_b, y_{b(r)} + \Delta y_b, z_{b(r)} + \Delta z_b)$ 、 $(\delta_{x(r)} + \Delta \delta_x, \delta_{y(r)} + \Delta \delta_y, \delta_{z(r)} + \Delta \delta_z)$ 、 $\tau_{(r)} + \Delta \tau$ 、 $\gamma_{(r)} + \Delta \gamma$ 、 $\theta_{(r)} + \Delta \theta$ 、 $S_{(r)} + \Delta S$, 代入(4)式中, 可获得 P 点的测量坐标, 记为 $(x_{P(m)}^{LM}, y_{P(m)}^{LM}, z_{P(m)}^{LM})$ 。

则激光脚点测量值与真实值之差即为激光脚点的定位误差:

$$\begin{bmatrix} \Delta x_P^{LM} \\ \Delta y_P^{LM} \\ \Delta z_P^{LM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{P(m)}^{LM} \\ y_{P(m)}^{LM} \\ z_{P(m)}^{LM} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_{P(r)}^{LM} \\ y_{P(r)}^{LM} \\ z_{P(r)}^{LM} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

取激光点云中所有激光脚点定位误差的均方根(RMS, 记为 R_{MS})值, 可反映该激光点云的整体定位精度, 即

$$\begin{cases} R_{MS_x} = \sqrt{\sum_{i=1}^n [\Delta x_P^{LM}(i)]^2 / n} \\ R_{MS_y} = \sqrt{\sum_{i=1}^n [\Delta y_P^{LM}(i)]^2 / n} \\ R_{MS_z} = \sqrt{\sum_{i=1}^n [\Delta z_P^{LM}(i)]^2 / n} \end{cases} \quad (6)$$

RMS 值越小, 表明激光点云的定位精度越高。由上可知, 影响激光点云定位精度的误差因素共 16 个, 其中 8 个为系统集成参数测量误差, 即 $(\Delta x_b, \Delta y_b, \Delta z_b)$ 、 $(\Delta \delta_x, \Delta \delta_y, \Delta \delta_z)$ 、 $\Delta \tau$ 和 $\Delta \gamma$, 表征为系统误差; 另 8 个为各传感器测量参数的测量误差, 即 ΔS 、 $(\Delta x_G, \Delta y_G, \Delta z_G)$ 、 $(\Delta \omega, \Delta \varphi, \Delta \kappa)$ 和 $\Delta \theta$, 表征为近似

高斯随机分布^[15]。

3 研究方法

3.1 多元线性回归分析

记 8 个随机误差因素 ΔS 、 $(\Delta x_G, \Delta y_G, \Delta z_G)$ 、 $(\Delta \omega, \Delta \varphi, \Delta \kappa)$ 和 $\Delta \theta$ 为自变量 $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_8]$, 3 个坐标误差 $(\Delta x_P^{LM}, \Delta y_P^{LM}, \Delta z_P^{LM})$ 为因变量 $\mathbf{Y} = [y_1, y_2, y_3]^T$, 则 \mathbf{X} 和 \mathbf{Y} 之间存在复杂的非线性关系, 记为

$$y_i = \beta_{0i} + \beta_{1i}x_1 + \beta_{2i}x_2 + \dots + \beta_{8i}x_8 + \varepsilon_i, \quad i = 1, 2, 3, \quad (7)$$

式中 $\beta_i = [\beta_{0i}, \beta_{1i}, \dots, \beta_{8i}]^T$ 为线性回归系数矩阵, $\varepsilon = [\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3]^T$ 为其他未知因素对 \mathbf{Y} 的影响。则 \mathbf{X} 和 \mathbf{Y} 之间可用多元线性回归方程表示为

$$\hat{y}_i = \hat{\beta}_{0i} + \hat{\beta}_{1i}x_1 + \hat{\beta}_{2i}x_2 + \dots + \hat{\beta}_{8i}x_8, \quad i = 1, 2, 3, \quad (8)$$

式中 $\hat{\beta}_i = [\hat{\beta}_{0i}, \hat{\beta}_{1i}, \dots, \hat{\beta}_{8i}]$ 为通过最小二乘估计方法获得的回归系数, 其大小反映了各自变量对相应因变量的影响大小。但由于各自变量单位不统一, 既有角度量, 又有长度量, 故无法横向比较各自的影响大小。记矩阵 $(\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1}$ 的主对角线元素为 $c_{00}, c_{11}, c_{22}, \dots, c_{tt}$, 其中 t 为自变量个数(在此 $t = 8$); 另外, 令

$Q_{ei} = \sum_{k=1}^n (y_{ik} - \hat{y}_{ik})^2$, n 为实验数据总数, Q_{ei} 为残差平方和。根据 $E(Q_{ei}) = (n - t - 1)\sigma^2$, 令 $s_i^2 = \frac{Q_{ei}}{n - t - 1}$, s_i 为剩余标准差, 则对 $\hat{\beta}_i$ 进行标准化处理为

$$\hat{\beta}_{ii}^* = \frac{\hat{\beta}_{ii}}{s_i \sqrt{c_{ii}}}. \quad (9)$$

式中 $\hat{\beta}_{ii}^*$ 值为标准化回归系数, 其消除了 $\hat{\beta}_{ii}$ 单位不统一的缺点, 为无量纲量, 因此既可用于判断单个自变量对因变量的影响显著性, 又可对多个自变量的影响大小进行横向比较及排序。在每个回归方程中, 哪个自变量的标准化回归系数的绝对值越大, 则该自变量对相应因变量的影响就越显著^[20-21]。

3.2 误差参数的取值

当飞行高度为固定值时, 在 LM 坐标系中建立一个平面作为被测地形。机载激光扫描工作参数设置如下: 激光扫描仪安装角度 $\tau = 45^\circ$, 扫描倾角 $\gamma = 7.5^\circ$, 安装偏差角 $(\delta_x, \delta_y, \delta_z)$ 均为 0° , 安装偏心量分别为 $x_b = 1.5 \text{ m}$, $y_b = 0.5 \text{ m}$, $z_b = -2.0 \text{ m}$, 飞行速度为 60 m/s , 姿态角 $(\omega, \varphi, \kappa)$ 均为 0° , 激光脉冲重复频率为 10 kHz , 扫描频率为 50 Hz , 扫描镜旋转一周扫描 200 点, 总激光扫描时间为 6 s (总可获得

60,000 个激光脚点)。

对上述 8 个系统误差和 8 个随机误差分别设定误差值,误差取值符合实际参数的测量误差分布特性。其中,目前在常用的机载激光扫描系统中, ΔS 和 $(\Delta x_G, \Delta y_G, \Delta z_G)$ 的测量精度在 0.1 m 左右; $(\Delta\omega, \Delta\varphi, \Delta\kappa)$ 在 0.01° 左右, $\Delta\theta$ 在 0.0007° 左右, $\Delta\tau$ 和 $\Delta\gamma$ 在 0.0005° 左右^[1,17-18]。16 个误差因素的分布或取值如表 1 所示。

表 1 16 个误差因素的分布或取值

Table 1 Distribution or configured values of 16 error factors

System error factor	Constant value	Random error factor	Standard deviation (mean of zero)
$\Delta\tau$	0.0005°	ΔS	0.1 m
$\Delta\gamma$	0.0005°	Δx_G	0.1 m
$\Delta\delta_x$	0.003°	Δy_G	0.1 m
$\Delta\delta_y$	0.003°	Δz_G	0.1 m
$\Delta\delta_z$	0.008°	$\Delta\omega$	0.01°
Δx_b	2.5 mm	$\Delta\varphi$	0.01°
Δy_b	2.5 mm	$\Delta\kappa$	0.015°
Δz_b	2.5 mm	$\Delta\theta$	0.0007°

根据上述参数设置,当飞行高度分别取 500、600、700、1000、1500、2000、3000、6000 m 时,分别模拟了机载激光扫描系统对平面地形的扫描过程,获得了相应的激光点云。当 16 个测量参数均忽略测量误差时,可获得真实激光点云。当 16 个测量参数具有如表 1 的测量误差取值时,获得了测量激光点云。进而通过(5)式,获得了激光脚点三维坐标误差值 $(\Delta x_P^{LM}, \Delta y_P^{LM}, \Delta z_P^{LM})$,并(6)式获得了不同飞行高度下激光点云的定位精度 RMS 值,如表 2 所示。

表 2 激光点云三维坐标精度 RMS 值随飞行高度的变化

Table 2 Varying rule of positioning accuracy of laser point cloud with the increasing of flight height

Flight height /m	R_{MSx}/m	R_{MSy}/m	R_{MSz}/m
500	0.1505	0.1487	0.1411
600	0.1672	0.1637	0.1443
700	0.1849	0.1799	0.1479
1000	0.2423	0.2326	0.1615
1500	0.3446	0.3278	0.1909
2000	0.4504	0.4267	0.2258
3000	0.6656	0.6286	0.3041
6000	1.3189	1.2433	0.5631

表 2 数据反映了激光点云的三维坐标精度随飞行高度的变化规律。可见,飞行高度越高,激光点云的定位精度越差。其中,激光点云的平面坐标误差

随飞行高度的增加而变化较大,而高程坐标误差则变化较小。

3.3 误差数据的处理

采用 SPSS13.0 软件,在飞行高度分别为 500、600、700、1000、1500、2000、3000、6000 m 时,根据模拟的误差因素取值和相应的激光脚点三维坐标误差数据,分别进行了多元线性回归处理,获得了在不同飞行高度下三个多元线性回归方程和各随机误差因素相对于三个坐标误差的的标准化回归系数。标准化回归系数的绝对值越大,则表明由该随机误差因素对该坐标误差的影响越大。

4 模拟实验结果及分析

4.1 随机误差因素影响大小的定量评价、排序及随飞行高度的变化规律

通过上述多元线性回归处理,在所述的机载激光雷达系统及其工作参数测量误差分布条件下,各随机误差因素对激光脚点三维坐标精度的影响大小和排序、以及随飞行高度的变化规律如图 2 所示。

1) 对 Δx_P^{LM} ,各随机误差因素的影响大小随飞行高度的变化规律如图 2(a)所示。在飞行高度小于 550 m 时, Δx_G 的影响最大、 $\Delta\varphi$ 次之;在 550 m 以上时, $\Delta\varphi$ 成为最重要影响因素,且其随飞行高度的增大逐渐增大,而 Δx_G 的影响则迅速减小。其他的误差如 ΔS 、 $\Delta\kappa$ 、 $\Delta\omega$ 、 Δy_G 、 Δz_G 和 $\Delta\theta$ 的影响很小且随飞行高度的增长而变化不大,可忽略不计。

2) 对 Δy_P^{LM} ,各随机误差因素的影响大小随飞行高度的变化规律如图 2(b)所示。当飞行高度在 600 m 以下时, Δy_G 的影响最大、 $\Delta\omega$ 次之;在 600 m 以上时,随飞行高度的增大, $\Delta\omega$ 的影响逐渐增大,而 Δy_G 的影响逐渐减小。其他的误差因素如 ΔS 、 $\Delta\kappa$ 、 $\Delta\varphi$ 、 Δx_G 、 Δz_G 和 $\Delta\theta$ 的影响很小且随飞行高度的增长而变化不大,可忽略不计。

3) 对 Δz_P^{LM} ,各随机误差因素的影响大小随飞行高度的变化规律如图 2(c)所示。在飞行高度在 500 m 以下时, ΔS 的影响最大、 Δz_G 次之;在 500 m 以上时 Δz_G 的影响成为第一位,而 ΔS 次之。在 500~600 m 之间, Δz_G 的影响逐渐增大并达到最大值;而在 600 m 以后,随飞行高度的增加,其他误差因素的影响逐渐增大,而 Δz_G 和 ΔS 的影响均逐渐降低。但直到 6000 m 高度, Δz_G 和 ΔS 的影响仍占主要地位。

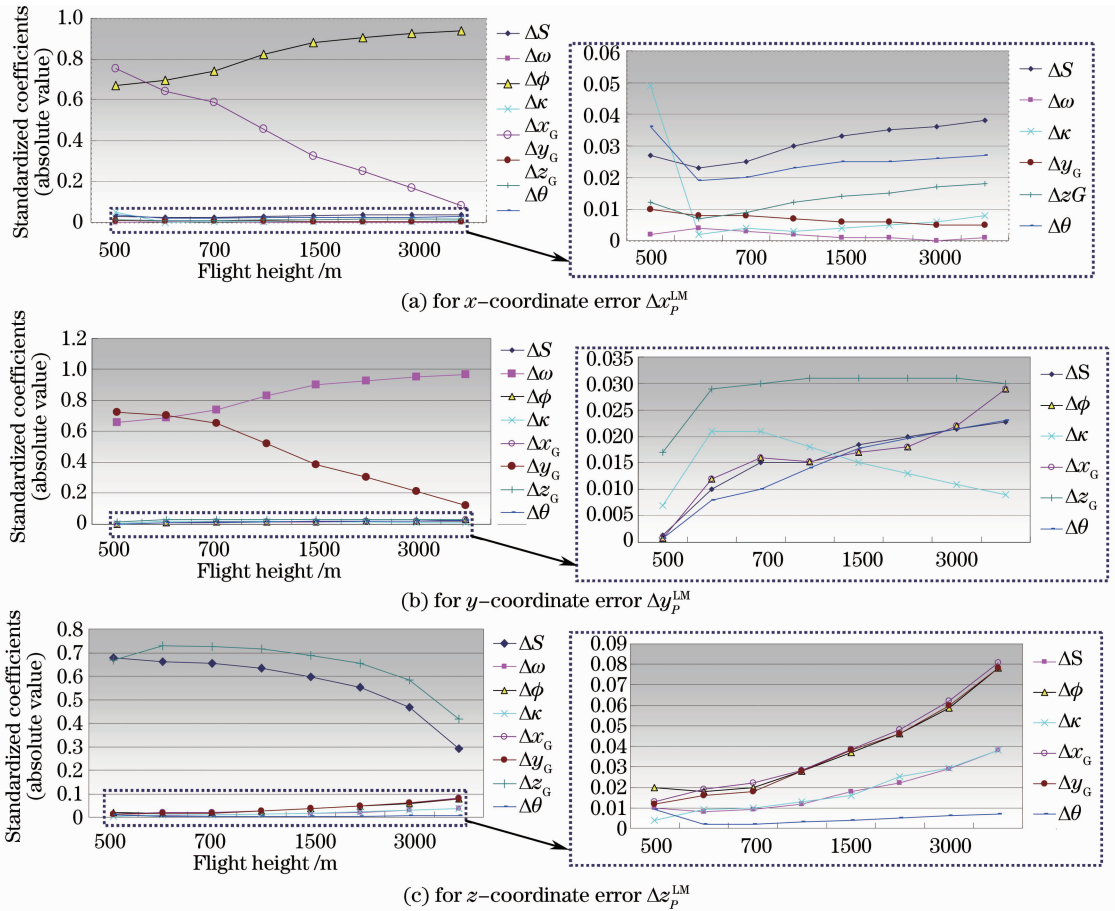


图 2 各随机误差因素对激光点云三维坐标误差的影响排序及随飞行高度的变化规律

Fig. 2 Varying rules of impacts of random error factors on three coordinate errors with the increasing of flight height

这里的结论为当飞行平台处于理想飞行状态时所获得的误差影响规律。在实际的机载 LiDAR 测量过程中,当飞行平台的不稳定因素造成姿态角和飞行轨迹随时间变化时,各随机误差对激光点云三维坐标精度的影响大小和排序会有微小变化,但其随飞行高度的变化总趋势不会改变。因此,研究结论对于飞行平台处于不稳定状态时也具有借鉴意义。

4.2 各传感器的测量精度选择

根据以上模拟实验结论,可得出机载激光扫描系统中各传感器测量精度的选择原则。

1) GPS 关于飞行轨迹三维坐标的测量误差分别对各自方向上的激光脚点坐标精度影响较大,而对另外两方向的坐标精度影响很小。当飞行高度为 500 m 及以下时,GPS 在水平方向的测量误差影响显著,大于姿态角测量误差的影响;而在垂直方向的测量误差仅次于测距误差的影响。当飞行高度增大时,GPS 在水平方向的测量误差对激光脚点平面坐标精度的影响减小;而其 z 坐标测量误差对点云高程精度的影响成为首要因素。

2) 对惯性测量单元(IMU)设备,在三个姿态角

测量误差中,滚动角误差对激光脚点的 y 坐标精度影响显著,俯仰角误差对激光脚点的 x 坐标精度影响显著,而偏航角误差的影响则较小。因此 IMU 要尽量提高滚动角和俯仰角的测量精度,而对偏航角的测量精度要求可适当放宽。

3) 对 LiDAR,激光测距误差对激光脚点的平面坐标精度影响很小,对高程精度则影响显著。所以,尽可能地提高 LiDAR 的测距精度至关重要。

5 结 论

通过分析圆锥扫描式机载激光扫描设备的工作原理,推导了激光点云三维坐标误差传递关系,确定了影响激光点云定位精度的各种误差因素。根据各误差因素的实际测量性质,设定了各误差因素的取值或分布。在一系列飞行高度下,根据误差传递关系分别获得了各误差因素造成的相应激光点云三维坐标误差。采用多元线性回归方法对所获得的误差数据进行了处理,获得了各随机误差的标准化回归系数,定量评价了各随机误差对激光点云定位精度的影响大小和排序,并分析了各随机误差的影响大

小随飞行高度的变化规律。研究结果对重要误差因素的抑制和补偿、有效提高机载激光扫描点云的定位精度提供了理论依据和技术支持。

参 考 文 献

- 1 Aloysius Wehr, Uwe Lohr. Airborne laser scanning—an introduction and overview[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 1999, 54(2-3): 68—82.
- 2 Zuo Zhiquan, Zhang Zuxun, Zhang Jianqing. Classification of LiDAR point clouds for urban area based on multi-echo region ratio and recognition topology model[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(4): 0414001.
左志权, 张祖勋, 张剑清. 区域回波比率与拓扑识别模型结合的城区激光雷达点云分类方法[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0414001.
- 3 Jenkins L G (Jake). Key drivers in determining LiDAR sensor selection [C]. Accra: ISPRS Commission VII Mid-term Symposium “Remote Sensing: from Pixels to Processes”, Enschede, the Netherlands, 2006. 342—352.
- 4 Li Shukai, Xue Yongqi. The Integrated Technology System of High Efficiency Three-Dimensional Remote Sensing[M]. Beijing: Science Press, 2000. 97.
李树楷, 薛永祺. 高效三维遥感集成技术系统[M]. 北京: 科学出版社, 2000. 97.
- 5 Chen Weibiao, Lu Yutian, Chu Chunlin, *et al.*. Analyses of depth accuracy for airborne laser bathymetry [J]. Chinese J Lasers, 2004, 31(1): 101—104.
陈卫标, 陆雨田, 褚春霖, 等. 机载激光水深测量精度分析[J]. 中国激光, 2004, 31(1): 101—104.
- 6 Wang Jianyu, Hong Guanglie, Bu Hongyi, *et al.*. Study on airborne scanning lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(9): 2584—2589.
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.
- 7 Zhu Jingguo, Zhang Keshu. Analysis of capability of light weighted mini airborne LiDAR (Lair-LiDAR)[C]. Beijing: First National LiDAR Advanced Seminar on Earth Observation, 2010. 1—4.
朱精果, 张珂殊. 轻小型机载激光雷达(Lair-LiDAR)技术能力浅析[C]. 北京: 第一届全国激光雷达对地观测高级学术研讨会, 2010. 1—4.
- 8 Han Yi, Sun Huayan, Li Yingchun, *et al.*. Advances in foreign simulation softwares of imaging laser radar [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(1): 010004.
韩 意, 孙华燕, 李迎春, 等. 国外成像激光雷达系统仿真软件研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(1): 010004.
- 9 Wu Jianwei, Ma Hongchao, Li Qi, *et al.*. Error analysis on laser measurement device of airborne LIDAR[C]. SPIE, 2007, 6786: 678653.
- 10 Wang Jianjun, Xu Lijun, Li Xiaolu. Impacts of random attitude measurement errors on airborne laser scanning image[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(3): 0314001.
王建军, 徐立军, 李小路. 姿态角随机测量误差对机载激光扫描成像的影响[J]. 中国激光, 2011, 38(3): 0314001.
- 11 Schenk T. Modeling and recovering systematic errors in airborne laser scanners [C]. Proceedings of the OEEPE Workshop on Airborne Laser Scanning and Interferometric SAR for Detailed Digital Elevation Models, 2001. 40—48.
- 12 Wang Jianjun. Optimized design of parameters affecting the accuracy of airborne LiDAR by using orthogonalization-based experiments[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0214003.
王建军. 基于正交化实验对影响机载激光雷达测量精度的工作参数进行最优化设计[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0214003.
- 13 Holopainen M, Haapanen R, *et al.*. Comparing accuracy of airborne laser scanning and TerraSAR-X radar images in the estimation of plot-level forest variables[J]. Int J Remote Sensing, 2010, 2(2): 432—445.
- 14 Csanyi N, Toth C K. Improvement of lidar data accuracy using lidar-specific ground targets[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2007, 73(4): 385—396.
- 15 RIEGL laser measurement systems. LMS-Q560[OL]. http://www.riegl.com/uploads/to-pxprieg/downloads/10-Datasheet-Q560_20_90_2010_01.pdf. [2013—09—10].
- 16 Liu Jingnan, Zhang Xiaohong, Li Zhenghang. Analysis of systematic error influencing the accuracy of airborne laser scanning altimetry [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2002, 27(2): 111—117.
刘经南, 张小红, 李征航. 影响机载激光扫描测高精度的系统误差分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2002, 27(2): 111—117.
- 17 Jiang Yuesong. A rigorous positioning equation and it's error analysis and precision evaluation for integrated positioning system of airborne GPS, INS and laser scanning ranging[J]. J Remote Sensing, 2001, 5(4): 241—247.
江月松. 机载 GPS、姿态和激光扫描测距集成定位系统的精确定位方程、误差分析与精度评估[J]. 遥感学报, 2001, 5(4): 241—247.
- 18 Csanyi N, Toth C K. Point Positioning Accuracy of Airborne Lidar Systems: a Rigorous Analysis[M]. U Stilla, H Mayer, F Rottensteiner, *et al.* Int Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2007, 36(3/W49B): 107—111.
- 19 Baltsavias E P. Introduction to Airborne LiDAR and Physical Principles of LiDAR Technology[OL]. <http://home.iitk.ac.in/~blohani/LiDARSchool2008/downloads.html>. [2014-1-21].
- 20 Lan Yuqing, Guo Shuhang. Multiple stepwise regression analysis on knowledge evaluation [C]. Nanchang: International Conference on Management of e-Commerce and e-Government, 2008. 297—302.
- 21 Sheng Zhou, Xie Shiqian, Pan Chengyi. Probability and Statistics (Third Edition)[M]. Beijing: Higher Education Press, 2001. 447—454.
盛 骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计(第三版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001. 447—454.

栏目编辑:何卓铭