

机载 LiDAR 中工作参数的控制误差和测量误差 对点云产品精度的影响机理及其比较

王建军¹ 李小路² 许同乐¹ 李东兴¹ 霍文晓¹

¹山东理工大学机械工程学院, 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, 北京 100191

摘要 机载 LiDAR 中的一些工作参数既有控制误差, 又有测量误差, 如机载平台的飞行轨迹、姿态角和激光扫描仪的扫描角等, 两种误差均会造成点云产品质量降低。为分析两种误差对点云产品精度的影响机理, 从理论上分析了两种误差对点云和数字表面模型(DSM)精度的影响, 通过数值仿真, 模拟了机载 LiDAR 的测量过程, 以机载平台姿态角参数为例, 定量评价及比较了姿态角的控制误差和测量误差对点云分布及 DSM 精度的影响大小。结果表明, 机载 LiDAR 的测量精度取决于这两种误差的影响, 其中控制误差主要造成点云分布区域及密度改变, 继而导致 DSM 失真增大, 而测量误差造成点云定位精度和重建 DSM 精度降低。因此, 需采取措施分别对两种误差进行抑制补偿。

关键词 测量; 机载 LiDAR; 误差分析; 控制误差; 测量误差; 点云; 数字表面模型

中图分类号 TN958.98

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0708003

Comparison of Impacts of Control Errors and Measurement Errors of Working Parameters on Accuracies of Point Cloud Products from Airborne LiDAR

Wang Jianjun¹ Li Xiaolu² Xu Tongle¹ Li Dongxing¹ Huo Wenxiao¹

¹School of mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255049, China

²School of Instrument Science & Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract In airborne LiDAR, some working parameters have both control errors and measurement errors, such as attitude angles, flight trajectories, and scan angle of laser scanner. Both kinds of errors can deteriorate qualities of point cloud products. In order to find out compensation measures to improve accuracies of point cloud and the reconstructed digital surface model (DSM), impacts of the two kinds of errors are analyzed theoretically. Then, through numerical simulation, the working process of airborne LiDAR is simulated. The two kinds of errors of attitude angle parameters are taken as an example, and effects of attitude control errors and measurement errors on accuracies of point cloud products are quantitatively evaluated and compared. Simulation results show that, the qualities of point cloud products from airborne LiDAR depend on common impacts of the control errors and measurement errors. The control errors mainly cause varying of point density and distribution area of point cloud, resulting in decreasing of spatial sampling resolution of point cloud, the measurement errors mainly cause decreasing of positioning accuracy of point cloud. Both errors can add distortion to the reconstructed DSM. Therefore, it is necessary to take appropriate measures to compensate the impacts of the two kinds of errors, respectively.

Key words measurement; airborne LiDAR; error analysis; control error; measurement error; point cloud; digital surface model

OCIS codes 280.3640; 110.3000; 100.6880; 110.3010

收稿日期: 2015-01-14; 收到修改稿日期: 2015-03-13

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)、山东理工大学博士科研基金(4041-413028)、山东省青年教师成长计划

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

E-mail: wangjianjun@sdut.edu.cn

1 引 言

机载LiDAR系统中,一些工作参数既是被控量,又是测量量。如机载平台的飞行航迹和姿态角,由飞行员或自动驾驶仪通过控制飞机的发动机转速和舵偏角实现控制,而实际的飞行轨迹和姿态角值采用全球定位系统/惯性测量单元(GPS/IMU)组合系统实现测量^[1]。此外,激光扫描仪的扫描角,一方面需要通过控制使扫描镜的实际转角跟踪理想设定角,此即控制过程;另一方面,需采用光电轴角编码器实时测量每个激光脉冲发射时刻的实际转角值,此即测量过程。以上即为机载LiDAR系统中7个既有控制量又有测量量的重要工作参数。另外,机载LiDAR系统中的一些空间位置参数,如GPS、IMU与激光扫描仪之间的空间安装位置偏心量和坐标轴未对准角,以及激光测距值等,这些参数只是单纯的测量量,不存在控制过程^[2-3]。因此,在机载LiDAR系统中,有7个工作参数既有控制过程又有测量过程,两者紧密配合,形成完整的激光扫描和地形测绘过程。控制过程中存在控制误差,测量过程中存在测量误差,这两种误差对激光点云产品[如点云和数字表面模型(DSM)等]质量影响如何,具有非常现实的研究意义。

目前国内外针对机载LiDAR的误差研究,主要侧重于对各种参数的测量误差影响上^[4-9]。而关于各种工作参数的控制误差对重建DSM精度的影响,则鲜有详细研究报告^[10-11]。同时,缺乏关于两种误差对点云质量及重建DSM精度影响大小的比较研究,如Krabill等^[4-5]研究了姿态角测量误差对点云高程精度的影响,Schenk等^[6-7]研究了激光扫描仪与IMU之间的坐标轴未对准角对点云精度的影响。Ayman等^[8-9]分析了各种传感器的测量误差对机载LiDAR测量精度的影响。关于各种参数的控制误差的影响研究,Baltsavias等^[10-11]指出机载平台运动误差会造成点云分布及密度的改变,但未明确将平台运动误差分类为控制误差和测量误差,也未进行对比研究。因此,本文对两类误差影响机理、定量评价及其比较进行了深入研究。

2 机理分析

2.1 控制误差和测量误差

机载LiDAR集成了飞行平台、GPS、IMU、激光扫描仪等,当飞机按预先规划的飞行航线匀速直线飞行时,由GPS/IMU组合系统实时测量机载平台的飞行轨迹和姿态角,激光扫描仪获得每个激光脉冲的测距值和扫描角值,再结合各种空间安装参数值,经计算可获得每个激光脚点的三维坐标^[12]。大量激光点形成激光点云,经进一步处理,如粗差点剔除、冗余点清理、滤波、插值及曲面拟合等,形成数字高程模型(DEM)和DSM等产品^[13]。

飞行平台运动参数控制系统框图如图1所示。

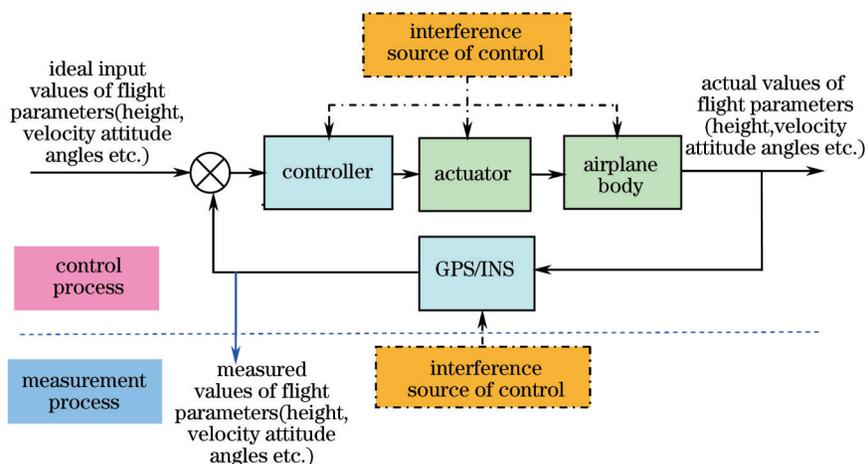


图1 飞行平台运动参数控制框图

Fig.1 Control schematics of airborne platform motion parameters

机载平台运动参数控制系统中包含两个过程,即控制过程和测量过程。实际飞行过程中,飞机受各种内、外界因素干扰,造成机载平台的实际飞行状态与理想状态之间存在偏差,即控制误差,目前机载平台的姿态角控制误差可高达 $\pm 5^\circ$ ^[14]。另外,机载平台运动参数的实际值需采用传感器进行测量,实际值与测量值之间也存在误差,即测量误差。

激光扫描仪中扫描角的控制过程与飞行平台运动参数的控制过程相似,如图2所示。

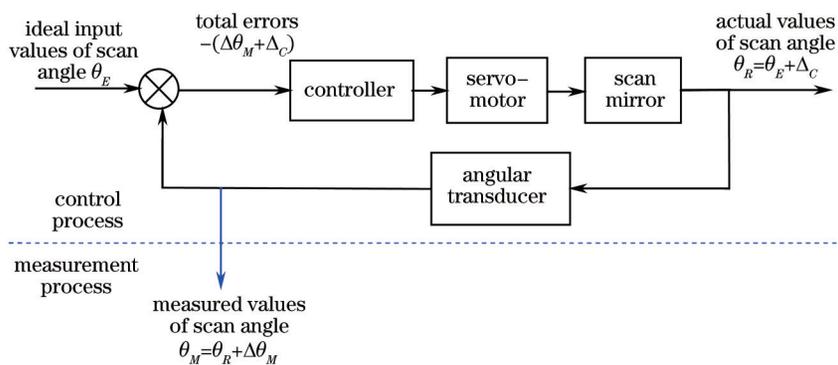


图2 扫描角的控制系统框图

Fig.2 Control schematics of scan angle

设 θ_E 、 θ_R 和 θ_M 分别为理想、实际和测量的扫描角值, $\Delta\theta_C$ 和 $\Delta\theta_M$ 分别为控制误差和测量误差。由控制误差=实际值-理想值, 则 $\Delta\theta_C = \theta_R - \theta_E$ 。由测量误差=测量值-实际值, 则 $\Delta\theta_M = \theta_M - \theta_R$ 。

2.2 控制误差和测量误差对激光脚点三维坐标的影响

由上可知,在机载LiDAR工作过程中,存在一个理想输入值(即机载LiDAR工作前各工作参数的理想预设值)及控制和测量两个过程,从而相应地有三种激光脚点:理想激光脚点、实际激光脚点和测量激光脚点。根据机载LiDAR中参数的理想设置值进行激光扫描,可获得被测地形的理想激光脚点;由各工作参数的实际值(仅受控制误差的影响)进行激光扫描,可获得实际激光脚点;而由各传感器测量值(考虑控制误差和测量误差的共同影响),可获得测量激光脚点。如图3所示,以扫描角的控制误差和测量误差对激光脚点的影响为例,说明两种误差对激光脚点的空间位置影响。

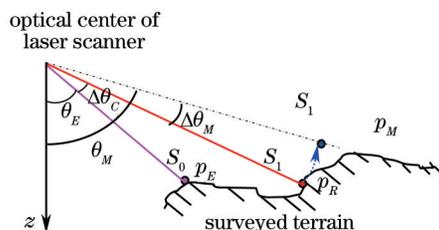


图3 扫描角的控制误差和测量误差对激光脚点空间位置的影响

Fig.3 Effects of control error and measurement error of scan angle on spatial position of laser points

图3中, p_E 为理想激光脚点, θ_E 为扫描角的理想控制角度; p_R 为实际激光脚点, θ_R 为实际扫描角, 且 $\theta_R = \theta_E + \Delta\theta_C$, 其中 $\Delta\theta_C$ 为扫描角控制误差; p_M 为测量激光脚点, θ_M 为测量扫描角, $\Delta\theta_M$ 为扫描角测量误差, 其中 $\theta_M = \theta_R + \Delta\theta_M = \theta_E + \Delta\theta_C + \Delta\theta_M$ 。 p_R 和 p_M 之间的空间位置误差, 即 $\overline{p_R p_M}$, 仅由扫描角测量误差造成; 通过提高测量精度或经过误差校正, 可使测量点 p_M 尽量逼近实际点 p_R 。 p_R 和 p_E 之间的空间位置误差, 即 $\overline{p_E p_R}$, 仅由扫描角控制误差造成; 由于激光测距值会随扫描角变化而变化, 故若采用事后校正或补偿方法难以将 p_R 校正回到 p_E , 只能采用实时补偿方法尽量减小控制误差的影响。而 p_M 和 p_E 之间的空间位置误差, 即 $\overline{p_E p_M}$, 则是两种误差共同作用的结果。

机载LiDAR的理想飞行轨迹应为平行于目标测绘地面的匀速直线运动,其飞行速度恒定且姿态角保持不变,此时扫描获得的点云分布规则、密度较均匀,DSM失真小,能最优重建真实地形。而飞行轨迹、姿态角及激光扫描角存在的控制误差,会导致点云分布不规则、密度不均匀;其中点云的不规则分布会导致目标扫描区域漏扫,而密度变化会改变对被测地形的采样率,两者均会使后续点云在进行曲面拟合时插值误差增大,造成重建DSM的精度降低。另一方面,激光点的三维坐标是由各工作参数测量值经开环计算获得,因此各传感器所测量数据的精度对激光点三维坐标精度有直接影响,工作参数值的测量误差会造成激光点三维坐标定位误差,此时测量的激光脚点不再反映真实被测地形表面,重建的DSM也产生失真。

因此,要提高机载 LiDAR 的 DSM 产品精度,需要从控制误差和测量误差两方面进行研究。

3 控制误差和测量误差对点云和 DSM 精度的影响

3.1 两种误差对点云三维坐标的影响

以圆锥扫描式机载激光雷达工作原理进行说明,如图 4 所示^[14]。

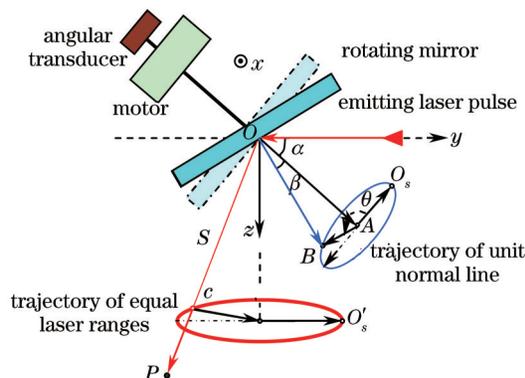


图 4 圆锥扫描式激光扫描仪工作原理图

Fig.4 Schematics of working principle of conical-scan LiDAR

图 4 中,以扫描镜的中心点 O 为原点建立激光扫描仪参考坐标系, x 方向为飞机飞行方向, y 为飞机的右机翼方向, z 垂直向下; α 为激光与电机轴夹角, β 为扫描镜的法线与电机轴夹角;当电机旋转时,单位长扫描镜法线的端点 B 会形成一个圆形轨迹,同时在垂直于 z 轴的平面上等距长激光脚点也会形成一个圆形扫描轨迹; θ 为扫描镜转角; S 为激光脚点 P 的测距值,则 P 点在激光扫描仪参考坐标系中的坐标可表达为^[14]

$$\begin{aligned} x'_p &= -2S \cdot (\sin \beta \sin \theta) (\cos \beta \cos \alpha - \sin \beta \cos \theta \sin \alpha), \\ y'_p &= 2S \cdot (\cos \beta \cos \alpha - \sin \beta \cos \theta \sin \alpha)^2 - S, \\ z'_p &= -S \cdot |2(\cos \beta \cos \alpha - \sin \beta \cos \theta \sin \alpha)(\cos \beta \sin \alpha + \sin \beta \cos \theta \cos \alpha)|. \end{aligned} \quad (1)$$

将 P 点坐标转换到当地水平参考坐标系中,可得^[2]

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} - \mathbf{R}_A \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} + \mathbf{R}_A \mathbf{R}_\delta \begin{bmatrix} x'_p \\ y'_p \\ z'_p \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 \mathbf{R}_δ 为 LiDAR 坐标轴与 IMU 坐标轴之间的空间未对准角转换矩阵, \mathbf{R}_A 为 IMU 惯性平台坐标系相对于当地水平坐标系的姿态角转换矩阵, (x_c, y_c, z_c) 为 GPS 测量中心在当地水平坐标系中的三维坐标, (x_c, y_c, z_c) 为 GPS 测量中心相对于激光扫描仪光学中心的空间偏移量。

由(2)式,根据机载 LiDAR 工作参数的理想设定值,可获得理想激光脚点(记为 p_E);只受工作参数的控制误差影响时,可获得实际激光脚点(记为 p_R);当考虑各工作参数的测量误差影响时,可获得测量激光脚点(记为 p_M)。因此,在 P 点处,由控制误差造成的激光脚点三维坐标误差为 $(\Delta x_{pC}, \Delta y_{pC}, \Delta z_{pC}) = \overline{p_E p_R}$,由测量误差造成的激光脚点三维坐标误差为 $(\Delta x_{pM}, \Delta y_{pM}, \Delta z_{pM}) = \overline{p_R p_M}$ 。

3.2 两种误差对重建 DSM 精度的影响

将空间离散激光点形成的点云基于 Delaunay 规则形成三角网格模型,然后基于三角网格模型进行曲面拟合,可获得重建 DSM^[15]。为评价 DSM 的精度,选取被测地形的多个参考点,记为 $(X_{ref}, Y_{ref}, Z_{ref})$;在各参考点的平面坐标位置 (X_{ref}, Y_{ref}) 上分别对 DSM 进行插值计算,获得 DSM 的高程插值,记为 Z_{int} 。 Z_{int} 减去 Z_{ref} 值,可得 DSM 在该参考点上的高程误差值,从而获得高程误差值序列,即

$$e_{int}(k) = [Z_{int}(k) - Z_{ref}(k)], \quad k = 1 \sim n, \quad (3)$$

式中 k 为参考点序号, n 为参考点总数。高程误差值序列的均方根(RMS)统计值通常作为该 DSM 的高程精度^[16],即

$$e_{\text{DSM}(C_s)} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n e_{\text{int}}(k)^2}{n}}, \quad (4)$$

式中下标 (C_s) 表示重建该 DSM 的点云。

以机载平台姿态角两种误差为例说明对重建 DSM 精度的影响求法。分别获得理想状态下、只受姿态角控制误差影响时、只受姿态角测量误差影响时扫描的三种激光点云, 记为 C_{exp} 、 $C_{\text{con-err}}$ 和 $C_{\text{mea-err}}$, 重建各自 DSM。由(3)、(4)式, 基于同一参考点集, 分别计算出三个重建 DSM 的高程精度, 记为 $e_{\text{DSM}(C_{\text{exp}})}$ 、 $e_{\text{DSM}(C_{\text{con-err}})}$ 和 $e_{\text{DSM}(C_{\text{mea-err}})}$ 。因此, 姿态角控制误差对 DSM 高程精度的影响可评价为

$$\Delta e_{\text{con-err}} = e_{\text{DSM}(C_{\text{con-err}})} - e_{\text{DSM}(C_{\text{exp}})}, \quad (5)$$

同样地, 姿态角测量误差对 DSM 高程精度的影响可评价为

$$\Delta e_{\text{mea-err}} = e_{\text{DSM}(C_{\text{mea-err}})} - e_{\text{DSM}(C_{\text{exp}})}, \quad (6)$$

通过比较 $\Delta e_{\text{con-err}}$ 和 $\Delta e_{\text{mea-err}}$ 的大小, 可反映出两种误差对 DSM 高程精度的影响。

4 仿真分析

4.1 对平面地形扫描时控制误差和测量误差的影响分析

在当地水平参考坐标系中建立一个平面地形模型, 设飞机飞行高度为 300 m, 对圆锥扫描式机载激光雷达的工作过程进行仿真。数值仿真中, 机载 LiDAR 的工作参数设置如下: $\alpha = 45^\circ$, $\beta = 15^\circ$, $x_c = 0$, $y_c = 0$, $z_c = 0$, 飞行速度为 60 m/s, 脉冲重复频率为 1 kHz, 扫描频率为 10 Hz; 机载平台三个姿态角(滚动角、俯仰角和偏航角)的理想值均设为 0° , 姿态角控制误差均设为幅值 3° 、周期 0.5 Hz 的正弦变化^[7]; 三个姿态角测量误差均设为标准差为 0.1° 的高斯随机信号。分析此姿态角控制误差和测量误差对点云和重建 DSM 高程精度的影响。

圆锥扫描一圈时姿态角控制误差和测量误差对激光脚点影响如图 5 所示。 p_E 为理想激光点云, 分布规则。 p_R 为机载平台姿态角有控制误差时扫描的激光点云, 其分布与 p_E 相比有一定偏移, 但仍落在被测地形表面上。 p_M 为姿态角有测量误差时获得的激光点云, 其一般会偏离真实的被测地形表面。

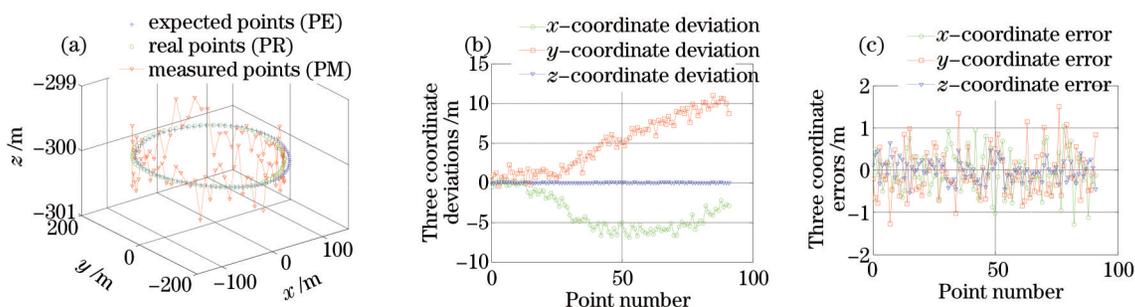


图 5 圆锥扫描一圈时两种误差对激光脚点的分布影响及坐标误差。(a) 激光脚点分布图; (b) 姿态角控制误差影响; (c) 姿态角测量误差影响

Fig.5 Impacts of two kinds of errors on distribution of laser points for one scan circle. (a) Distribution of laser points; (b) position deviations caused by attitude control errors; (c) position errors caused by attitude measurement errors

圆锥扫描 20 圈(2000 点)时的仿真结果如图 6 所示。

由图 6(a)、(b)可见, 姿态角控制误差造成实际激光脚点偏离理想激光脚点, 实际激光脚点虽仍打在被测地形表面上, 但其分布已变得不规则。由于通常姿态角控制误差为低频近似周期信号, 故激光脚点的 x 和 y 坐标偏差也较规律变化。由图 6(c)可见, 姿态角测量误差造成测量激光脚点偏离真实测量地形表面。由于姿态角测量误差一般为随机信号, 故激光脚点的三维坐标误差也为随机变化。图 6(d)为在两种误差共同影响下的重建 DSM, 其产生了较大失真, 不复为单纯的平面地形。

4.2 对高程变化地形扫描时两种误差的影响分析

通常被测地形不仅为平面, 为分析有高程变化时姿态角的两种误差对点云及重建 DSM 精度的影响, 在当地水平坐标系中分别建立了一个半球体地形模型(半径为 60 m)及一个长方体地形模型(120 m×60 m×40 m)。

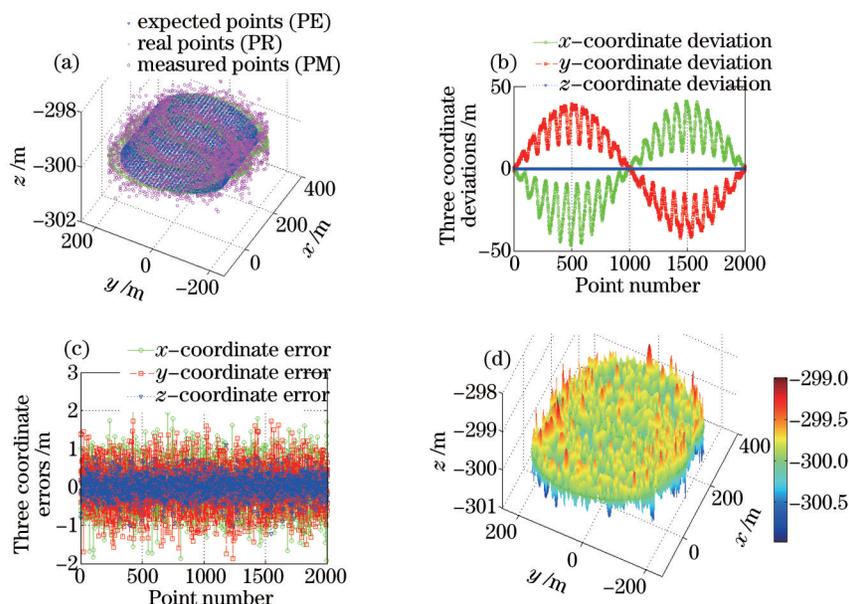


图6 姿态角控制误差和测量误差对点云及重建DSM的影响。(a)激光脚点分布图;(b)姿态角控制误差造成的激光脚点坐标偏差;(c)姿态角测量误差造成的激光脚点定位误差;(d)由PM点云重建的DSM(两种误差共同影响下)

Fig.6 Impacts of attitude control errors and measurement errors on point cloud and the reconstructed DSM. (a) Distribution of point clouds; (b) position deviations caused by attitude control errors; (c) position errors caused by attitude measurement errors; (d) reconstructed DSM from PM under common effects of both errors

机载 LiDAR 的工作参数基本与上例(平面测量时)相同,只是脉冲重复频率(PRF)改为 10 kHz,扫描频率为 20 Hz。另外,机载平台的理想姿态角和姿态角控制误差与上例亦相同,但姿态角测量误差改为标准差为 0.01°的高斯随机信号,这比较符合实际机载 LiDAR 中姿态角传感器的测量精度。通过数值仿真,模拟了圆锥扫描式机载 LiDAR 对这两种有高程变化地形的扫描过程,定量评价并比较了姿态角两种误差对点云和重建 DSM 精度的影响大小。

4.2.1 仿真结果

对半球体地形和长方体地形的机载激光扫描仿真结果如图 7 所示。对每种地形的扫描,分别获得了 4 种激光点云:理想激光点云(记为 PE);理想飞行情况下的测量激光点云(仅受姿态角测量误差影响,记为 PEM);实际飞行状态下的实际激光点云(仅受姿态角控制误差影响,记为 PR);实际飞行状态下的测量激光点云(同时受姿态角控制误差和测量误差影响,记为 PM)。图 7(g)和(h)所示为分别由图 7(a)和(d)中半球体地形和长方体地形的 PM 点云重建的 DSM,其受到了两种误差的共同影响。

另外,当激光扫描仪的 PRF 分别为 15 kHz 和 20 kHz 时,与上述仿真方法相同,对半球体和长方体地形模型进行了扫描,分别获得了 4 种激光点云。进而,由各激光点云重建了各自相应的 DSM。

4.2.2 两种误差对点云的影响分析

根据上述仿真结果,对于两种被测地形(半球体和长方体地形),在不同 PRF 设置下,分别获得了姿态角控制误差造成的激光点云三维坐标偏差的 RMS 统计值及姿态角测量误差造成的激光点云三维坐标误差的 RMS 统计值,如表 1 所示。由表 1 可知,姿态角控制误差使实际激光脚点偏离了理想规划的扫描区域,且使实际激光点云分布密度变得不均匀。而姿态角测量误差造成激光点云的三维坐标定位误差,其中平面坐标误差一般比高程误差大 2~3 倍^[18]。另外,扫描角的控制误差和测量误差对激光点云的影响与机载平台滚动角的两误差影响特点相似。由激光点三维坐标公式可知,飞行轨迹的控制误差和测量误差是 1:1 传递给激光脚点的三维坐标误差,其不会随飞行高度增大而增大,而姿态角两种误差的影响却会随飞行高度的增大而增大。通常机载 LiDAR 飞行高度为 500 m 以上,甚至高达 3000 m,因此姿态角的两误差对点云的影响要远大于飞行轨迹的两误差影响。

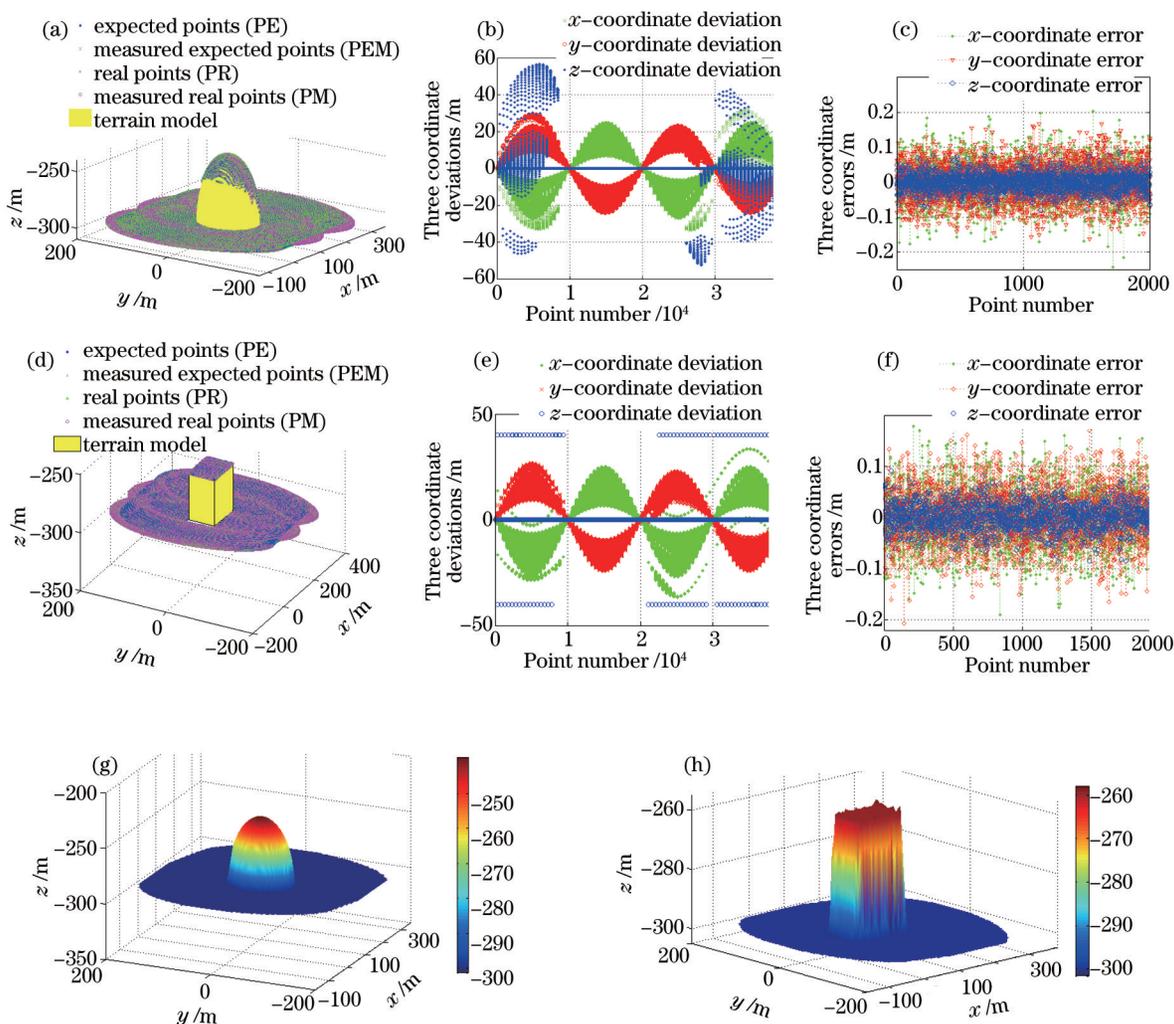


图7 两种误差对半球体和长方体地形扫描结果的影响。(a) 四种激光点云的空间分布(半球体地形); (b) 姿态角控制误差造成的激光点坐标偏差(半球体地形); (c) 姿态角测量误差造成的激光点定位误差(半球体地形); (d) 四种激光点云的空间分布(长方体地形); (e) 姿态角控制误差造成的激光点坐标偏差(长方体地形); (f) 姿态角测量误差造成的激光点定位误差(长方体地形); (g) 由图(a)中 PM 点云重建的 DSM; (h) 由图(d)中 PM 点云重建的 DSM

Fig.7 Impacts of two errors on scanning results for hemisphere topography and rectangular topography. (a), (b) and (c) The distribution of four point clouds, the position deviations caused by attitude control errors, and the position errors caused by attitude measurement errors for the hemisphere topography, respectively; (d), (e) and (f) the distribution of four point clouds, the position deviations caused by attitude control errors, and the position errors caused by attitude measurement errors for the rectangular topography, respectively;

(g) and (h) the reconstructed DSMs from PM clouds in (a) and (d), respectively

表1 姿态角控制误差和测量误差造成的两种地形点云坐标误差 RMS 值

Table 1 RMS of 3-D coordinate errors of point clouds caused by attitude control errors and measurement errors

Point clouds	RMS of 3-D coordinate errors	Hemisphere terrain /m			Rectangular terrain /m		
		PRF of 10 kHz	PRF of 15 kHz	PRF of 20kHz	PRF of 10 kHz	PRF of 15 kHz	PRF of 20kHz
PR	Δx	12.674	12.676	12.675	12.672	12.671	12.670
	Δy	13.392	13.392	13.392	13.380	13.379	13.379
	Δz	5.339	5.351	5.345	5.265	5.261	5.263
PEM	Δx	0.056	0.056	0.056	0.056	0.056	0.056
	Δy	0.054	0.054	0.054	0.054	0.054	0.0540
	Δz	0.026	0.025	0.026	0.025	0.025	0.026
PM	Δx	12.673	12.677	12.675	12.672	12.671	12.670
	Δy	13.392	13.392	13.392	13.380	13.380	13.379
	Δz	5.339	5.351	5.345	5.265	5.261	5.263

4.2.3 两种误差对重建 DSM 高程精度的影响分析与比较

为评价所重建 DSM 的高程精度,并定量评价两种误差造成的 DSM 高程精度的改变量,需预先获得被测地形模型的另一参考点集。参考点集的获取方法为:采用数值仿真,设激光扫描仪的 PRF 为 50 kHz、扫描频率为 25 Hz,分别模拟机载 LiDAR 对半球体和长方体地形模型在理想飞行状态下的扫描过程,获得了两种地形模型的理想激光扫描点云,两个理想激光点云中各包含了 200,000 个参考点(模拟扫描时间为 4 s),每个点反映了被测地形模型的真实点,故分别作为两种地形模型的参考点集。

利用上述两地形模型的参考点集,由(3)、(4)式,分别计算在不同 PRF 和扫描频率下所获得的两种地形模型的四种激光点云(即理想激光点云 PE、仅受姿态角控制误差影响 PR、仅受姿态角测量误差影响 PEM、两种误差同时影响时所获得的激光点云 PM)重建 DSM 的高程精度,如表 2 所示。

表 2 姿态角控制误差和测量误差对重建 DSM 高程精度的影响

Table 2 Impacts of attitude control errors and attitude measurement errors on elevation accuracies of DSM

RMS values of elevation errors of reconstructed DSM	Hemisphere terrain /m						Rectangular terrain /m					
	PRF of 10 kHz		PRF of 15 kHz		PRF of 20 kHz		PRF of 10 kHz		PRF of 15 kHz		PRF of 20 kHz	
	e_{DSM}	Δe_{DSM}	e_{DSM}	Δe_{DSM}	e_{DSM}	Δe_{DSM}	e_{DSM}	Δe_{DSM}	e_{DSM}	Δe_{DSM}	e_{DSM}	Δe_{DSM}
DSM from PE	0.098	-	0.080	-	0.070	-	0.214	-	0.135	-	0.111	-
DSM from PR	0.161	0.063	0.151	0.071	0.147	0.077	0.215	0.001	0.168	0.033	0.148	0.037
DSM from PEM	0.099	0.001	0.083	0.003	0.073	0.003	0.215	0.001	0.136	0.001	0.114	0.003
DSM from PM	0.162	0.064	0.152	0.072	0.149	0.079	0.216	0.002	0.169	0.034	0.150	0.039

表 2 中, Δe_{DSM} 值是将其他三种 DSM 高程精度值 e_{DSM} 与理想点云重建的 DSM 高程精度值相减获得的,可得出以下结论:

1) 影响机载 LiDAR 重建 DSM 高程精度的误差因素主要有两个:一是工作参数的控制误差,如机载平台飞行轨迹和姿态角、激光扫描角;二是工作参数的测量误差。7 个工作参数的控制误差通过影响点云的分布区域和密度,导致对被测地形采样分辨率的降低,进而影响重建 DSM 的高程精度。各工作参数的测量误差造成点云的定位误差,直接导致重建 DSM 失真增大。因此,需分别从两种误差入手,采取措施消除或补偿两者对 DSM 精度的影响。

2) 相比较而言,在本研究的仿真条件下(两种误差设置值符合实际姿态角的控制误差和测量误差大小),机载平台姿态角的控制误差造成的 DSM 高程误差要大于姿态角测量误差造成的 DSM 高程误差,表明机载平台姿态角控制误差的影响更显著。因此,采取有效措施消除各工作参数控制误差的影响是提高机载 LiDAR 点云产品质量的重要手段及迫切任务。

3) 由于不同地形的高程变化不同,即使在相同的激光扫描条件下,获得的 DSM 高程精度也有所不同。被测地形的高程突变越大,则重建 DSM 的高程误差越大。另外,从表 2 可见,当机载 LiDAR 的其他工作参数设置值不变时,通过提高采样频率(如提高 PRF 或扫描频率),可有效提高激光点云的点密度,从而对提高 DSM 的高程精度有一定的帮助。但随采样频率的提高,姿态角控制误差和测量误差造成的 DSM 高程精度的改变量却比较稳定,没有较大的变动,说明在不同的采样频率下,两种误差对 DSM 精度的影响没有作用。

5 结 论

本文从控制、测量和误差理论的角度,详细分析了机载 LiDAR 系统中 7 个工作参数的控制误差和测量误差对点云产品质量的影响机理。通过数值仿真,以机载平台姿态角的控制误差和测量误差为例,定量评价并比较了这两种误差对激光点云分布及重建 DSM 高程精度的影响大小。结果表明,在现有的机载 LiDAR 仪器性能和工作参数控制误差及测量误差条件下,机载平台姿态角的控制误差影响比姿态角测量误差更显著。因此,采取有效措施对 7 个工作参数的控制误差进行补偿,对提高机载 LiDAR 点云及 DSM 产品质量具有重要意义。

参 考 文 献

1 Wehr A, Lohr U. Airborne laser scanning—an introduction and overview[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing,

- 1999, 54(2-3): 68-82.
- 2 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.
- 3 Wang Jianjun. Optimized design of parameters affecting the accuracy of airborne LiDAR by using orthogonalization-based experiments[J]. Chinese J Lasers, 2013, 42(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, 42(2): 0214003.
- 4 Krabill W B, Abdalati W, Frederick E B, *et al.*. Aircraft laser altimetry measurement of elevation changes of the Greenland ice sheet: technique and accuracy assessment[J]. Journal of Geodynamics, 2002, 34(3): 357-376.
- 5 Wang J J, Xu L J, Li X L, *et al.*. Impact analysis of random measurement errors on airborne laser scanning accuracy[C]. 2011 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2011: 1083-1086.
- 6 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.
- 7 Camillo Ressler, Gottfried Mandlbürger, Norbert Pfeifer. Investigating adjustment of airborne laser scanning strips without usage of GNSS/IMU trajectory data[C]. Vosselman G (Eds) Laser Scanning 2009, IAPRS, 2009, XXXVIII(3/W8): 195-200.
- 8 Ayman Habib, Ana Paula Kersting, Ki In Bang, *et al.*. Alternative methodologies for the internal quality control of parallel LiDAR strips[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 2010, 48(1): 221-236.
- 9 Glennie C. Rigorous 3D error analysis of kinematic scanning lidar systems[J]. Journal of Applied Geodesy, 2007, 1(3): 147-157.
- 10 Baltsavias E P. A comparison between photogrammetry and laser scanning[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1999, 54(2-3): 83-94.
- 11 Nahum Gat. General Line of Sight Stabilization System[P]. US: 7466343B2, [2008-12-16].
- 12 Shu Nin. Laser Imaging[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2005: 41-48, 93-94.
舒宁. 激光成像[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2005: 41-48, 93-94.
- 13 Jiang Yuesong. A rigorous positioning equation and its error analysis and precision evaluation for integrated positioning system of airborne GPS, INS and laser scanning ranging[J]. Journal of 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.
- 14 Li Shukai, Xue Yongqi. The Integrated Technology System of High Efficiency Three-Dimensional Remote Sensing[M]. Beijing: Science Press, 2000: 96-97.
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: 96-97.
- 15 Barber C B, Dobkin D P, Huhdanpaa H. The quickhull algorithm for convex hulls [J]. ACM Transactions on Mathematical Software, 1996, 22(4): 469-483.
- 16 Su J, Bork E. Influence of vegetation, slope, and lidar sampling angle on DEM accuracy[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2006, 72(11): 1265-1274.
- 17 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.
- 18 Wang Jianjun, Liu Jidong. Analysis and sorting of impacts of measurement errors on positioning accuracy of laser point cloud obtained from ALS[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41 (4): 0414001.
王建军, 刘吉东. 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[J]. 中国激光, 2014, 41 (4): 0414001.

栏目编辑: 何卓铭