

姿态角随机测量误差对机载激光扫描成像的影响

王建军 徐立军 李小路

(北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘要 研究了姿态角随机测量误差对机载激光雷达激光脚点定位精度和数字表面模型(DSM)精度的影响。分析了机载激光雷达的工作原理,推导了姿态角随机测量误差与激光脚点定位误差之间的传递关系。通过数值仿真,模拟了3种地形,研究了姿态角随机测量误差对点云及DSM的影响规律。通过半实物仿真实验,定量评价了姿态角随机测量误差对激光脚点定位精度和DSM精度的影响。仿真和实验结果表明,姿态角随机测量误差造成激光脚点定位精度和DSM精度降低。姿态角随机测量误差造成激光脚点平面坐标误差增加较大,是高程误差的4~5倍;当姿态角随机测量误差增大10倍时,激光点云三维坐标误差也增大约10倍,而DSM误差则增大40倍左右。

关键词 遥感;误差分析;半实物仿真;姿态角;机载激光雷达;数字表面模型

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0314001

Impacts of Random Attitude Measurement Errors on Airborne Laser Scanning Image

Wang Jianjun Xu Lijun Li Xiaolu

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

Abstract The impacts of random attitude measurement errors on the positioning accuracy of laser footprints and digital surface model (DSM) accuracy of airborne lidar are studied. The principle of airborne lidar is analyzed. The transformation formulas between the random attitude measurement errors and the positioning errors of laser footprints are derived. Three terrains are simulated and the impacts of the random attitude measurement errors on laser point clouds and the corresponding DSM of the three terrains are analyzed. A semi-physical simulation experiment is carried out. The impacts of the random attitude measurement errors on the positioning accuracy of laser footprints and the DSM accuracy are quantitatively evaluated. The simulation and experimental results show that the random attitude measurement errors decrease the accuracy of laser point cloud and DSM. With the parameters used in this research, the horizontal coordinate errors caused by the random attitude measurement errors are about 4~5 times higher of the vertical coordinate error. In addition, when the random attitude measurement errors increase 10 times, the coordinate errors of laser point cloud increase about 10 times, while the error of the DSM increases by about 40 times statistically.

Key words remote sensing; error analysis; semi-physical simulation; attitude angles; airborne lidar; digital surface model

OCIS codes 280.3640; 110.3000; 100.6880; 110.3010

1 引 言

机载激光雷达是快速获取地面三维信息的地形测绘新技术^[1],其最终产品为数字表面模型(DSM)和数字高程模型(DEM)等^[2~5]。DSM或DEM精

度取决于激光点云的密度、分布和坐标精度^[6,7]。理想情况下,如果影响激光脚点三维坐标的各个参数能够精确测量,则计算得到的激光脚点与地面真实激光脚点重合,没有定位误差。但实际中,机载激

收稿日期:2010-08-02;收到修改稿日期:2010-12-02

基金项目:国家973计划(2009CB724001)和新世纪优秀人才支持计划(NCET-07-0046)资助课题。

作者简介:王建军(1973—),男,博士研究生,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

导师简介:徐立军(1968—),男,博士,教授,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: lijunxu@buaa.edu.cn(通信联系人)

光雷达系统中的各种传感器如全球定位系统(GPS)、惯性导航系统(INS)和激光扫描仪等测量精度有限。由GPS/INS集成系统测量的飞行平台轨迹和姿态角以及由激光扫描仪测量的扫描角和激光测距等参数存在测量误差^[8,9],造成激光脚点定位误差,导致DSM失真。其中将GPS/INS集成传感器测量平台姿态角时的误差,称为姿态角测量误差。姿态角测量误差包含系统误差和随机误差,通常经过事前校正或事后补偿,可消除系统误差的影响,而姿态角随机测量误差一般认为是符合正态分布的白噪声,不能通过上述方法消除^[10]。

目前国内外关于平台姿态角测量误差对激光点云定位精度的研究有较多的文献,而对DSM精度影响的定量评价研究较少^[11~17]。如Krabill等^[11]研究了姿态角测量误差对格陵兰冰盖区机载激光扫描脚点的高程精度的影响;Schenk等^[12~15]研究了姿态角定值测量误差对激光点云的影响和校正方法,但没有针对姿态角随机测量误差对点云和DSM的影响进行分析及实验研究;Dickman等^[16]通过数值仿真研究了姿态角随机测量误差对机载激光雷达平面地形成像的影响,但没有进行更复杂地形的仿真、具体的实验验证以及对DSM精度的定量评价。在对地形重建模型精度的评价方面,Su等^[17]将DEM在参考点平面坐标处的高程值与通过高精度GPS获得的实际参考点高程观测值相比较,获得高程均方根误差值,评价了不同地形(植被覆盖区、斜坡等)对DEM精度的影响,但未进行姿态角测量误差对DSM或DEM精度的影响研究。总之,目前的研究主要集中于姿态角定值测量误差对点云的影响,以及姿态角随机测量误差对激光点云坐标精度的仿真研究上,而针对姿态角随机测量误差对激光点云坐标精度和DSM精度影响的实验研究以及定量评价尚缺乏详细的报道。本文旨在研究姿态角随机测量误差对机载激光雷达点云和DSM的影响,因此暂时忽略其他参数测量误差的影响,如飞行轨迹测量误差、激光测距误差和扫描角测量误差等。主要针对姿态角随机测量误差对激光点云坐标精度和DSM精度的影响进行了数值仿真、半物理仿真实验和定量评价。

2 理论分析

2.1 激光脚点定位精度

设机载激光雷达在实际飞行状态时扫描在地面上的激光点为真实激光脚点,而由GPS/INS集成

传感器测量姿态角(含有姿态角测量误差)计算获得的观察激光脚点为测量激光脚点。

针对线扫描方式机载激光雷达,设测距为 S ,扫描角为 θ ,则激光脚点 P 在WGS-84坐标系中的三维坐标为^[12]

$$\begin{bmatrix} x_{84} \\ y_{84} \\ z_{84} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_G \\ y_G \\ z_G \end{bmatrix} + \mathbf{R}_{WGS} \mathbf{R}_{Geo} \mathbf{R}_{INS} \left\{ \mathbf{R}_{\theta} \mathbf{R}_{\theta} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ S \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} \right\}, \quad (1)$$

式中 \mathbf{R}_{θ} 为扫描角旋转矩阵, \mathbf{R}_{θ} 为安置误差角(激光雷达视轴相对于INS坐标轴的空间未对准夹角)转换矩阵, \mathbf{R}_{INS} 为IMU惯性平台参考坐标系相对于当地水平参考坐标系的转换矩阵, \mathbf{R}_{Geo} 为从当地水平参考坐标系到当地垂直坐标系的转换矩阵, \mathbf{R}_{WGS} 为从当地垂直坐标系到WGS-84坐标系的转换矩阵。 (x_G, y_G, z_G) 为飞机上GPS接收天线相位中心在WGS-84中的三维坐标, (x_c, y_c, z_c) 为GPS接收天线相位中心相对于激光扫描仪光学中心的安装偏心量坐标。

只考虑飞行平台姿态角测量误差对激光脚点的影响,忽略其他参数测量误差的影响,同时假设扫描区域较小,可忽略地球曲率的变化。以开始测量时刻的GPS相位中心为原点建立局部大地测量参考坐标系,其三轴方向分别平行于该点的当地水平参考坐标系。其中 x 轴指向正北, z 轴沿重力铅垂线向下, y 垂直于 xoz 平面并指向正东。因此,在该简化研究情况下,机载激光扫描系统中有3个主要的参考坐标系,即激光扫描参考坐标系(简记为LR坐标系,以扫描镜光学中心为原点),IMU惯性平台参考坐标系(简记为IR坐标系,以IMU测量中心为原点)和局部大地测量参考坐标系(简记为L坐标系),

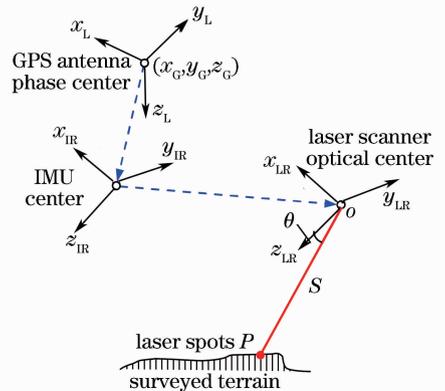


图1 机载激光雷达参考坐标系空间位置关系
Fig. 1 Spatial relationship of reference frames of airborne lidar

各坐标系之间的空间位置关系如图 1 所示。

激光脚点 P 的坐标建立在 L 坐标系中, 则此时 $\mathbf{R}_{WGS} = 1, \mathbf{R}_{Geo} = 1$ 。同时, 不考虑安置误差角和安装偏心量的影响, 故 $\mathbf{R}_\delta = 1, (x_c, y_c, z_c)$ 均为零。则(1)式可简化为

$$\begin{bmatrix} x_L \\ y_L \\ z_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{GL} \\ y_{GL} \\ z_{GL} \end{bmatrix} + \mathbf{R}_{INS} \mathbf{R}_\theta \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ S \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中对于摆镜式激光扫描仪, \mathbf{R}_θ 为沿 x 轴逆时针旋转 θ 角的旋转矩阵

$$\mathbf{R}_\theta = \mathbf{R}_x(-\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}, \quad (3)$$

\mathbf{R}_{INS} 为分别沿 z 轴, x 轴和 y 轴逆时针旋转偏航角 κ ,

$$\begin{bmatrix} x_L \\ y_L \\ z_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \int_0^t (\cos \varphi \cos \kappa + \sin \omega \sin \varphi \sin \kappa) v dt + (\cos \varphi \sin \kappa \sin \theta - \sin \varphi \sin \omega \cos \kappa \sin \theta + \sin \varphi \cos \omega \cos \theta) S \\ \int_0^t (\cos \omega \sin \kappa) v dt - (\cos \omega \cos \kappa \sin \theta + \sin \omega \cos \theta) S \\ \int_0^t (-\sin \varphi \cos \kappa + \sin \omega \cos \varphi \sin \kappa) v dt + (-\sin \varphi \sin \kappa \sin \theta - \cos \varphi \sin \omega \cos \kappa \sin \theta + \cos \varphi \cos \omega \cos \theta) S \end{bmatrix}. \quad (6)$$

设实际飞行中滚动角、俯仰角和偏航角的真实值分别为 ω_r, φ_r 和 κ_r , 设 S_r 为真实激光测距, 其中下标 r 指真实值, 代入(6)式, 则可得真实激光脚点坐标公式, 记为 $(x_{L(r)}, y_{L(r)}, z_{L(r)})$ 。

同样, 设由 GPS/INS 集成系统获得的滚动角、俯仰角和偏航角的测量值分别为 ω_m, φ_m 和 κ_m , 3 个姿态角的测量误差分别为 $\Delta\omega, \Delta\varphi$ 和 $\Delta\kappa$, 其中下标 m 指测量值。测量值和真实值满足关系: $\omega_m = \omega_r + \Delta\omega, \varphi_m = \varphi_r + \Delta\varphi$ 和 $\kappa_m = \kappa_r + \Delta\kappa$ 。若忽略激光测距误差, 将 ω_m, φ_m 和 κ_m 代入(6)式, 则可得测量激光脚点坐标, 记为 $(x_{L(m)}, y_{L(m)}, z_{L(m)})$ 。

由上可得姿态角测量误差造成的激光脚点定位误差为

$$\begin{bmatrix} \Delta x_{pm} \\ \Delta y_{pm} \\ \Delta z_{pm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{L(m)} \\ y_{L(m)} \\ z_{L(m)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_{L(r)} \\ y_{L(r)} \\ z_{L(r)} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

对于目标扫描区域所获得的激光点云, 其三维坐标误差的计算可采用

滚动角 ω 和俯仰角 φ 的旋转矩阵, 即

$$\mathbf{R}_{INS} = \mathbf{R}_y(-\varphi) \mathbf{R}_x(-\omega) \mathbf{R}_z(-\kappa), \quad (4)$$

(x_{GL}, y_{GL}, z_{GL}) 为 GPS 接收天线相位中心在 L 坐标系中的航迹坐标。实际飞行过程中, 姿态角 $(\omega, \varphi, \kappa)$ 的变化使飞行航迹 (x_{GL}, y_{GL}, z_{GL}) 随之变化, 即

$$\begin{bmatrix} x_{GL} \\ y_{GL} \\ z_{GL} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \int_0^t (\cos \varphi \cos \kappa + \sin \omega \sin \varphi \sin \kappa) v dt \\ \int_0^t (\cos \omega \sin \kappa) v dt \\ \int_0^t (-\sin \varphi \cos \kappa + \sin \omega \cos \varphi \sin \kappa) v dt \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中 t 为从初始测量点开始计时的飞行时间。

将(3), (4)和(5)式代入(2)式中, 可获得激光脚点在 L 坐标系中的详细三维坐标表达式

$$\begin{bmatrix} e_{px} \\ e_{py} \\ e_{pz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\sum_{k=1}^l [\Delta x_{pm}(k)]^2 / l} \\ \sqrt{\sum_{k=1}^l [\Delta y_{pm}(k)]^2 / l} \\ \sqrt{\sum_{k=1}^l [\Delta z_{pm}(k)]^2 / l} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中 k 为激光脚点的序号, l 为激光点云中激光脚点的总数。 e_{px}, e_{py} 和 e_{pz} 从激光点云整体上描述了激光脚点 x, y 和 z 3 个坐标的误差大小, 故作为由姿态角随机测量误差造成的激光脚点定位精度的评价指标。

2.2 激光点云的 DSM 及其精度的定量评价

采用将空间离散激光点云基于德洛内 (Delaunay) 方式形成不规则三角网 (TIN), 然后进行基于 TIN 模型的三次多项式曲面拟合^[18] (C-S) 的方式, 来获得激光点云的 DSM。

为了定量描述姿态角随机测量误差造成的 DSM 失真, 首先, 获得足够逼近被测地形高程真值、足够数量且均匀分布的参考点, 其高程看作被测地

形的高程真值(记为 Z_i) ; 然后对获得的实验激光点云采用 C-S 方法形成 DSM, 在参考点平面位置上对 DSM 进行插值, 获得拟合高程值(记为 z_i) ; 最后, 将 z_i 与相应参考点的高程真值 Z_i 进行比较, 获得拟合高程误差值, 并计算得到 DSM 的拟合高程误差均方根值, 记为 e_{DSM} , 具体计算公式为^[19,20]

$$e_{\text{DSM}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (z_i - Z_i)^2 / n}, \quad (9)$$

式中 i 为激光脚点的序号; n 为参与计算的激光脚点总数, 与参考点的数目相同。 e_{DSM} 值从整体上描述了 DSM 的高程值与地形高程真值的偏离程度, 故常作为定量评价 DSM 精度的指标之一^[17,21]。在相同的参考点下, 计算无、有姿态角随机测量误差影响下的激光点云形成的 DSM 精度评价指标 e_{DSM} 值, 获得两者的差值来定量评价姿态角随机测量误差对 DSM 精度的影响。

3 数值仿真

3.1 参数设计

模拟的真实机载激光雷达系统参数为: 激光脉冲重复频率 10 kHz, 飞行高度 500 m, 飞行速度 60 m/s, 扫描视场角 $45^\circ (\pm 22.5^\circ)$, 每行的扫描点数 260 个, 总扫描时间 2 s。为简化计算, 设滚动角、俯仰角和偏航角真实值均为 0。设 3 个姿态角随机测量误差均为均值为 0, 标准差为 0.1° 的高斯白噪声。另外, 仿真过程中忽略测距误差、扫描角误差和航迹坐标误差的影响, 只考虑姿态角随机测量误差影响。

3.2 3 种地形的仿真结果

图 2 反映了当被测地形为在 L 坐标系中的一个平面时, 姿态角随机测量误差对激光点云和 DSM 的影响。图中 P_R 为无姿态角随机测量误差影响时的真实激光脚点(圆圈点), P_M 为有姿态角随机测量误差影响时的测量激光脚点(交叉点)。

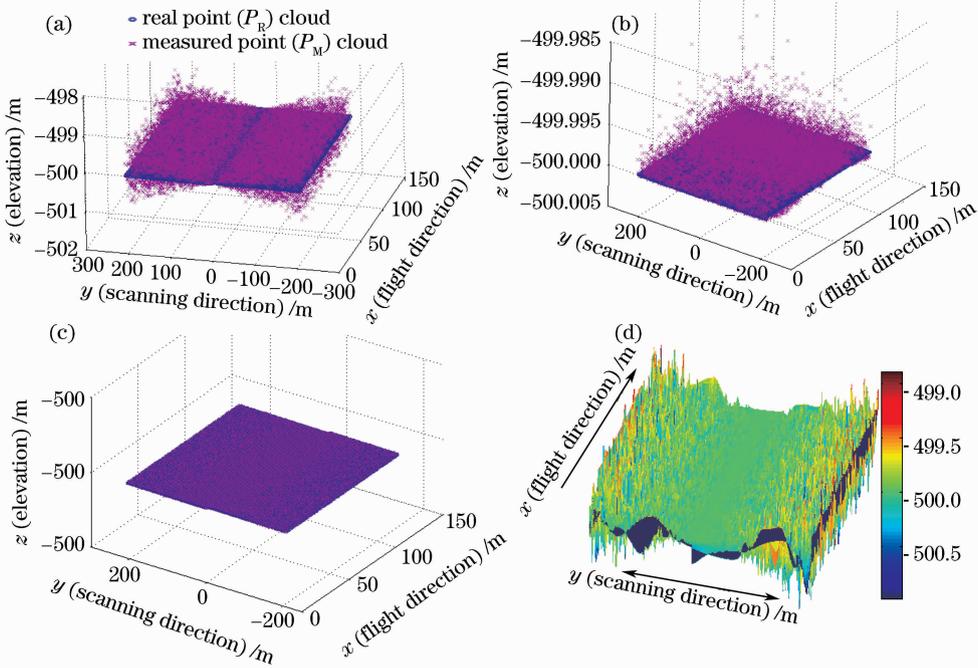


图 2 滚动角(a)、俯仰角(b)和偏航角(c)随机测量误差对平面地形的激光点云和 3 个姿态角随机测量误差同时存在时对 DSM 的影响(d)

Fig. 2 Impacts of the roll (a), pitch (b), heading (c) random measurement errors on laser point cloud of planar terrain and DSM influenced by all three random attitude measurement errors (d)

由姿态角随机测量误差造成的激光点云三维坐标误差的条形图如图 3 所示。

分析图 2,3 可见: 1) 只有滚动角存在随机测量误差时, 飞行方向 x 的坐标精度不受影响, 扫描方向 y 的坐标误差很大(e_{py} 为 0.8771 m), 高程 z 坐标误差 e_{pz} 为 y 坐标误差 e_{py} 的 25% 左右, 为 0.2062 m, 另外从图 2(a) 可见, 随扫描角的增大, 高程误差越

来越大; 2) 只有俯仰角存在随机测量误差时, 对 x 坐标精度影响很大(e_{px} 为 0.8667 m), 对 y 坐标精度无影响, 对 z 坐标精度影响很小(e_{pz} 为 0.0012 m), 如图 2(b) 所示; 3) 只有偏航角存在随机测量误差时, 只对 x 坐标精度有较小的影响, 对 y 和 z 坐标精度几乎无影响, 如图 2(c) 所示; 4) 3 个姿态角均存在随机测量误差时, e_{px} 为 0.9005 m,

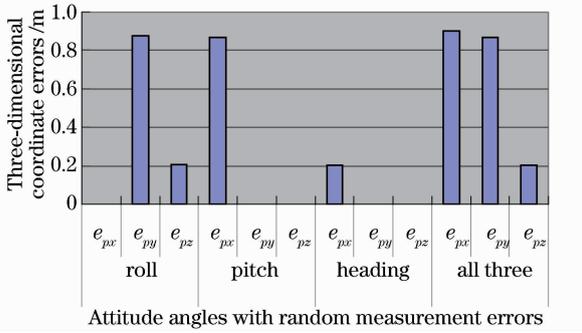


图3 姿态角随机测量误差造成的激光点云三维坐标误差

Fig. 3 Three-dimensional coordinate errors of laser point cloud caused by random attitude measurement errors

e_{py} 为 0.8662 m, e_{pz} 为 0.2035 m, 可见, 平面坐标误差要比高程误差高 4~5 倍。图 2(d) 为 P_M 点云经 C-S 重构的 DSM, 平面坐标误差使 DSM 相对于真实物体形状外扩或内缩, 边缘不齐, 高程误差使表面凹凸不平。DSM 表面粗糙, 且越到扫描区域边缘, 厚度越大, 不再是一个严格的平面, 产生了较大的失真。

考虑到实际地形中存在各种山包、圆顶形和方形建筑物, 建立了半球体和长方体地形模型。姿态角随机测量误差对这两种地形的激光点云和 DSM 影响的仿真如图 4 和 5 所示。其中图 4, 5 中的 (b) 和 (c) 分别为长方体顶部和半球体顶部的激光点云及其 TIN 模型局部图。

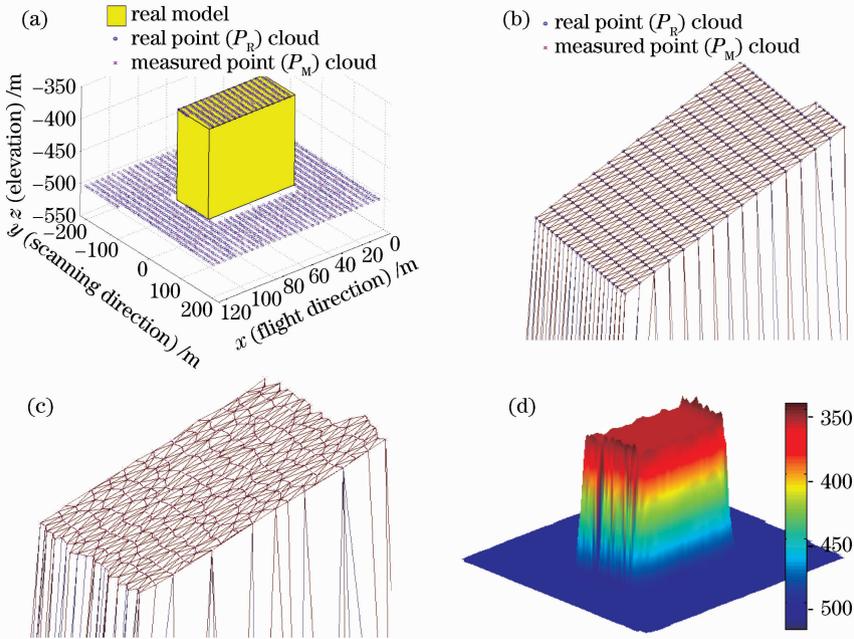


图4 姿态角随机测量误差对长方体地形的点云和 DSM 的影响

Fig. 4 Impacts of random attitude measurement errors on point cloud and DSM of cuboid terrain. (a) cuboid terrain model and point clouds, (b) TIN model of real point cloud, (c) TIN model of measured point cloud, (d) DSM of measured point cloud

由图 4 和 5 可见, 无姿态角随机测量误差影响时, 激光点云分布规则, 形成的 TIN 模型表面平整, 边缘平齐; 受姿态角随机测量误差的影响, 激光点云变得散乱, TIN 模型表面不平, 边缘不齐, 且点云经 C-S 重构的 DSM 表面粗糙, 失真增大。

3.3 3 种地形的激光点云坐标精度分析

对上述 3 种地形, 当 3 个姿态角均有随机测量误差时造成的激光点云三维坐标误差统计如表 1 所示。

由表 1 可见, 姿态角随机测量误差造成激光点

表 1 姿态角随机测量误差造成的 3 种地形激光点云三维坐标误差值

Table 1 Three-dimensional coordinate errors of laser point cloud caused by random attitude measurement errors of three kinds of terrain

Terrain type	e_{px} / m	e_{py} / m	e_{pz} / m
Planar terrain	0.9005	0.8662	0.2035
Cuboid terrain	0.8590	0.8287	0.2019
Hemisphere terrain	0.8757	0.8461	0.2020

云坐标误差, 在 3 种典型地形情况下, 平面坐标误差均较大, 为高程误差的 4~5 倍。另外长方体地形的

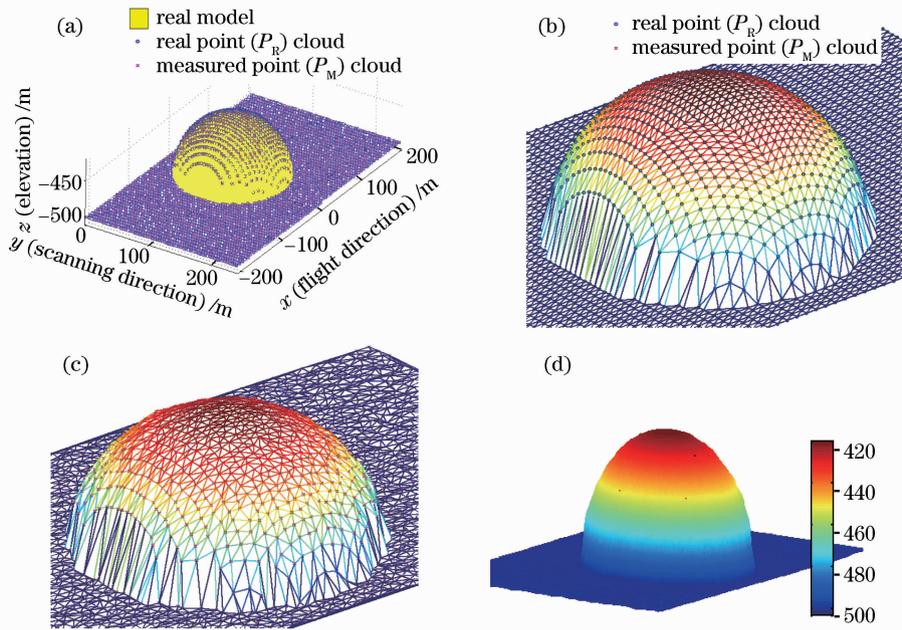


图 5 姿态角随机测量误差对半球体地形的点云和 DSM 的影响

(a) 半球体地形模型和点云, (b) 真实激光点云的 TIN 模型, (c) 测量激光点云的 TIN 模型, (d) 测量激光点云的 DSM
 Fig. 5 Impacts of random attitude measurement errors on point cloud and DSM of a hemisphere terrain. (a) hemisphere terrain model and point clouds, (b) TIN model of real point cloud, (c) TIN model of measured point cloud, (d) DSM of measured point cloud

激光点云三维坐标误差均比半球体的小,这是由于长方体高度比半球体高 70 m,飞行平台距离其更近。由此也证明了机载激光雷达平台距被测地形越高,姿态角随机测量误差造成的激光点云坐标误差越大。

4 半实物仿真实验

4.1 实验系统

图 6 为半实物仿真实验系统构成,主要包括 5 个部分:1) 控制和数据采集计算机,实现三轴转台、三维移动平台和激光测距仪的控制和数据采集; 2) 三轴转台,精度 0.001° ; 3) 三维移动平台,精度 $5 \mu\text{m}$; 4) 激光测距仪,精度 0.1193 mm (1σ , 测距为



图 6 半实物仿真实验系统构成

Fig. 6 Composition of semi-physical simulation system

1310 mm 时); 5) 被测地形模型,一半为一维正弦波浪板(波长 40 mm,波幅 17 mm),另一半为二维正弦波浪板(波长 20 mm,波幅 10 mm),模型长 600 mm,宽 400 mm,转台旋转中心距模型底面为 1310 mm。

4.2 实验方法

激光测距仪安装在三轴转台安装平台上,内轴的左右摆动带动激光测距仪旋转实现扫描功能。被测地形模型安装在三维移动平台上,激光扫描天底线(扫描角为 0 时的激光出射线)垂直于被测地形模型底平面。三维移动平台的 z 轴由上向下移动,相当于三轴转台带着激光扫描仪由下向上扫描被测地形模型,模拟飞机飞行。采用精确位置同步方式进行扫描角控制、飞行航迹控制和激光测距,模拟真实的机载激光雷达工作过程。实际的姿态角变化在 $\pm 5^\circ$ 以内^[22],由(5)式可知,当飞行高度较高(500 m 以上)时,由姿态角变化引起的航迹变化(航迹的左右水平变化最大为 3.35 m,飞行高度变化最大为 3.1 m)对激光点云的影响(匀速直线飞行且扫描视场角为 $\pm 12.5^\circ$ 时,激光点云扫描带宽为 221.69 m)可忽略,故半实物仿真实验对飞机航迹的模拟可忽略姿态角变化引起的航迹变化,即保持匀速直线飞行。模拟的真实机载激光雷达的主要参数为:扫描视场角为 $\pm 12.5^\circ$,激光脉冲重复频率为 10 kHz,飞

行高度500 m,飞行速度60 m/s。

4.3 实验激光点云的获取

在进行激光扫描时,为了使行间距和每行的点间距相等,激光扫描近似保持正方形网格采样,设置激光扫描每行点数和总扫描行数相等。姿态角为 0° 时,对扫描模型进行了 101×101 点密度扫描,所得点云记为 C_{101} ,此即无姿态角随机测量误差影响的激光点云,其中“C”表示点云,下标中的数字表示每行的扫描点数(或扫描行数)。

另外,为获得有姿态角随机测量误差影响时的激光点云,仍采用 101×101 点密度、姿态角为 0° 时的激光扫描测距值,但在进行激光脚点坐标计算时,3个姿态角不再为 0° ,而是分别施加了标准差均为 0.1° 的高斯白噪声姿态角测量误差。通过计算可获得受姿态角随机测量误差影响的激光点云,记为 $C_{101}^{0.1G}$,其中上标“0.1G”指标准差为 0.1° 的高斯白噪声。

目前,常用的GPS/INS集成测量系统获得的姿态角测量精度可达到 0.01° 。为了方便比较,同样,与 $C_{101}^{0.1G}$ 的获取方法相似,给3个姿态角分别施加了标准差均为 0.01° 的高斯白噪声姿态角测量误差,计算获得的激光点云记为 $C_{101}^{0.01G}$,其中上标“0.01G”指标准差为 0.01° 的高斯白噪声。

4.4 参考点集的获取

当3个姿态角均为 0° 时,对被测地形模型进行 151×151 点密度扫描,获得点云记为 C_{151} 。由于 C_{151} 点云密度高且分布均匀,其采用C-S方法重构的DSM精度高,失真小,故将其作为被测地形模型参考点集,其高程值看作被测地形模型的高程真值,用于参照计算上述3种实验点云(C_{101} , $C_{101}^{0.1G}$ 和 $C_{101}^{0.01G}$)相应的DSM精度评价指标 e_{DSM} 值。

4.5 实验结果及分析

4.5.1 激光点云三维坐标误差的定量计算

有姿态角随机测量误差影响时的点云 $C_{101}^{0.1G}$ 和 $C_{101}^{0.01G}$ 分别与无姿态角随机测量误差影响时的点云 C_{101} 相比较,可获得由各自姿态角随机测量误差造成的激光点云三维坐标误差,如表2所示。

表2 姿态角随机测量误差造成的激光点云三维坐标误差
Table 2 Three-dimensional coordinate errors of laser point cloud caused by random attitude measurement errors

Point clouds	Coordinate error type	Error /mm
$C_{101}^{0.01G}$	e_{px}	0.2239
	e_{py}	0.2260
	e_{pz}	0.0454
$C_{101}^{0.1G}$	e_{px}	2.2647
	e_{py}	2.2629
	e_{pz}	0.4556

表2中,与数值仿真结果相近, x, y 坐标误差较大, z 坐标误差相对较小,且平面坐标误差约为高程误差的4~5倍。另外,姿态角随机测量误差越大,造成的激光点云三维坐标误差也越大。 $C_{101}^{0.1G}$ 的激光脚点坐标误差比 $C_{101}^{0.01G}$ 的大10倍左右,说明机载激光雷达激光点云坐标精度与GPS/INS集成传感器的姿态角测量精度成近似线性关系。

4.5.2 DSM精度的定量评价

分别将激光点云 C_{101} , $C_{101}^{0.01G}$ 和 $C_{101}^{0.1G}$ 采用C-S方法重构DSM,图7描绘了激光点云 C_{101} 和 $C_{101}^{0.1G}$ 的DSM图像。无姿态角随机测量误差影响时, C_{101} 的DSM边缘整齐,表面光滑,能很好地反映真实地形。有姿态角随机测量误差影响时, $C_{101}^{0.1G}$ 的DSM边缘粗糙,表面凹凸不平,产生了较大失真。而 $C_{101}^{0.01G}$ 的DSM相对于 C_{101} 的DSM变化很小,两者很相似,故省略图示。

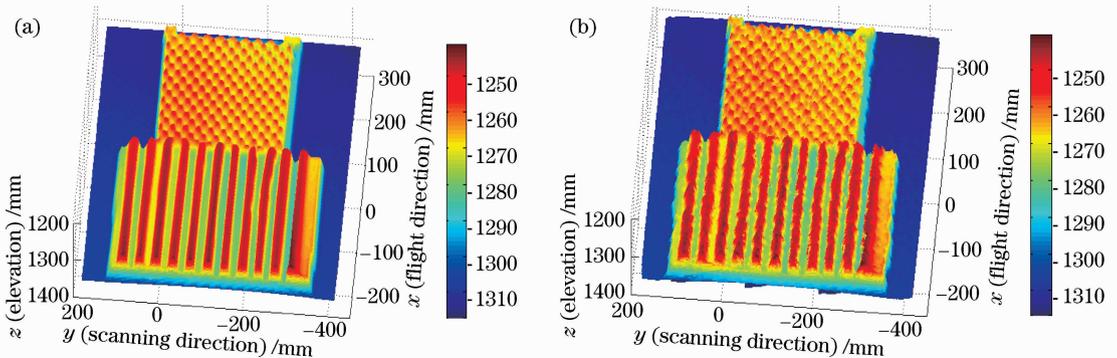


图7 姿态角随机测量误差对DSM的影响。(a) C_{101} 形成的DSM, (b) $C_{101}^{0.1G}$ 形成的DSM

Fig. 7 Impacts of random attitude measurement errors on DSM. (a) DSM of C_{101} , (b) DSM of $C_{101}^{0.1G}$

以 C_{151} 点云为真实地形模型的参考点(共 22801 点),由实验点云 C_{101} , $C_{101}^{0.01G}$ 和 $C_{101}^{0.1G}$ 采用 C-S 方法形成 DSM,通过(9)式分别计算获得各 DSM 的精度值 e_{DSM} ,如表 3 所示。

表 3 姿态角随机测量误差造成的 DSM 精度值 e_{DSM} 及其变化

Table 3 e_{DSM} values and their changes of DSMs caused by the random attitude measurement errors

DSM of experimental point clouds	e_{DSM}/mm	e_{DSM} change /mm
DSM of C_{101}	1.9860	—
DSM of $C_{101}^{0.01G}$	2.0259	0.0399
DSM of $C_{101}^{0.1G}$	3.5443	1.5583

将 $C_{101}^{0.01G}$ 和 $C_{101}^{0.1G}$ 实验点云的 DSM 精度值 e_{DSM} 分别与 C_{101} 的 DSM 精度值 e_{DSM} 相比较,可获得姿态角随机测量误差分别为 0.01° 和 0.1° 时造成的 DSM 精度值 e_{DSM} 的变化。表 3 中, $C_{101}^{0.1G}$ 的 DSM 精度值 e_{DSM} 较 C_{101} 的 DSM 增加了 1.5583 mm,而 $C_{101}^{0.01G}$ 的 DSM 精度值 e_{DSM} 较 C_{101} 的 DSM 只增加了 0.0399 mm。可见,在本研究实验条件下,当姿态角随机测量误差为标准差 0.01° 的高斯白噪声时,对 DSM 失真的影响不大;而当姿态角随机测量误差为标准差 0.1° 的高斯白噪声时,DSM 失真有较大增加, 0.1° 的姿态角随机测量误差造成的 DSM 失真比 0.01° 的姿态角随机测量误差造成的 DSM 失真增大了 40 倍左右。当然,该数值还与曲面拟合函数形式、地形特点及参考点的数目有关。但可得出结论,除了点云密度外,姿态角随机测量误差也是影响机载激光雷达 DSM 精度的一个重要因素,且姿态角随机测量误差越大,造成的 DSM 失真越大。

5 结 论

通过仿真计算和实验验证表明,姿态角随机测量误差造成的激光点云的高程误差较小,而造成的平面坐标误差较大。在本文研究条件下,由姿态角随机测量误差造成的平面坐标误差大约是高程误差的 4~5 倍。同时,姿态角随机测量误差越大,造成的激光点云坐标误差越大,DSM 精度越低;在本研究的实验条件(确定的地形特点、激光雷达工作参数和 DSM 形成方式)下,姿态角随机测量误差增大 10 倍,激光点云三维坐标误差也增大了 10 倍左右,而造成的 DSM 失真却增大了 40 倍左右。

通过仿真和实验结果还可知,姿态角随机测量误差造成机载激光雷达点云的平面坐标误差大,而

高程误差小,这与姿态角随机测量误差对摄影遥感成像的影响正好相反,故在实际应用中两者可组合使用,优势互补,有效提高地形测绘产品的精度。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 Kevin B. Strawbridge. Airborne and scanning lidar results obtained during pacific 2001 in the lower fraser valley of British Columbia [C]. *SPIE*, 2004, **5235**:525~536
- 3 Chen Weibiao, LuYutian, 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
- 4 E. P. Baltsavias. Airborne laser scanning: existing systems and firms and other resources [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1999, **54**(2-3):164~198
- 5 Xu Min, Hu Jiasheng. Analysis and calculation of rotating polygonal scanner in laser scanning imaging system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5):782~787
许敏,胡家升. 激光扫描成像中旋转多面体的分析计算[J]. *中国激光*, 2008, **35**(5):782~787
- 6 E. P. Baltsavias. A comparison between photogrammetry and laser scanning [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1999, **54**(2-3):83~94
- 7 Bu Hongyi, Wang Jianyu, Shu Rong. Method of achieving uniform scanning of airborne lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(4):675~678
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
- 8 Yao Jinliang, Yan Huimin, Zhang Xiuda *et al.*. Image registration and superposition for improving ranging accuracy of imaging laser radar [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6):1613~1617
姚金良,严惠民,张秀达等. 一种应用图像配准叠加提高成像激光雷达测距精度的方法[J]. *中国激光*, 2010, **37**(6):1613~1617
- 9 Wu Saicheng, Qin Shiqiao, Wang Xingshu *et al.*. A new method for the estimate of z-direction ring laser gyro drift based on attitude determination [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1209~1212
吴赛成,秦石乔,王省书等. 基于姿态解算的 z 向激光陀螺零偏估计方法[J]. *中国激光*, 2010, **37**(5):1209~1212
- 10 Bu Yanlong, Pan Liang, Niu Yifeng *et al.*. Modeling and accuracy analysis of parameter transmission in INS/SAR integrated navigation system [J]. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 2009, **30**(3):526~533
卜彦龙,潘亮,牛铁峰等. INS/SAR 组合导航参数传递建模及精度分析[J]. *航空学报*, 2009, **30**(3):526~533
- 11 W. B. Krabill, W. Abdalati, E. S. Frederick *et al.*. Aircraft laser altimetry measurement of elevation changes of the Greenland ice sheet: technique and accuracy assessment [J]. *Journal of Geodynamics*, 2002, **34**:357~376
- 12 T. Schenk. 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*, OEEPE Publication, 2001, **40**:40~48

- 13 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
- 14 G. Vosselman. Slope based filtering of laser altimetry data [J]. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2000, **X X X III**(B3):935~942
- 15 Camillo Ressler, Gottfried Mandlbürger, Norbert Pfeifer. Investigating adjustment of airborne laser scanning strips without usage of GNSS/IMU trajectory data [C]. *Laser Scanning 2009*, IAPRS, Paris, France, 2009, **X X X VIII**(3/W8):195~200
- 16 J. Dickman, M. Uijt De Haag. Aircraft heading measurement potential from an airborne laser scanner using edge extraction [C]. *Proceedings of the 2007 IEEE Aerospace Conference, Big Sky Montana*, March 3-10, 2007, **1053**:1~16
- 17 J. Su, E. Bork. Influence of vegetation, slope, and lidar sampling angle on DEM accuracy [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2006, **72**(11):1265~1274
- 18 C. B. Barber, D. P. Dobkin, H. Huhdanpaa. The quickhull algorithm for convex hulls [J]. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 1996, **22**(4):469~483
- 19 N. Csanyi, C. K. Toth. Improvement of lidar data accuracy using lidar-specific ground targets [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2007, **73**(4):385~396
- 20 M. Holopainen, R. Haapanen, M. Karjalainen *et al.*. Comparing accuracy of airborne laser scanning and terraSAR-X radar images in the estimation of plot-level forest variables [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, **2**:432~445
- 21 Zhou Qiming, Liu Xuejun. *Digital Terrain Analysis* [M]. Beijing: Science Press, 2006. 72~73
周启鸣, 刘学军. *数字地形分析* [M]. 北京: 科学出版社, 2006. 72~73
- 22 O. Bock, C. Thom. Wide-angle airborne laser range data analysis for relative height determination of ground-based benchmarks [J]. *Journal of Geodesy*, 2002, **76**:323~333