

文章编号 1004-924X(2009)11-2806-08

# 机载激光雷达系统标定方法

章大勇, 吴文启, 吴美平

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:**为满足机载激光雷达系统测量精度需求,研究了激光雷达与导航系统安装偏差参数的标定问题。首先,利用激光雷达反射强度信息确定和检测控制区,通过控制区平均获取对应的控制点,并根据控制点量测构造包含偏差参数和导航参数信息的激光矢量量测方程。然后,利用广义最小二乘法对噪声进行白化操作。最后,进行最小方差准则下的内方位参数估计。实验结果表明,该算法能够有效抑制系统矩阵不精确的影响,安装角估计精度 $<0.01^\circ$ ,安装杆臂估计精度 $<3\text{ cm}$ 。与传统方法相比,在量测噪声放大条件下估计精度平均提高了 $5.27\%$ ,在放宽小角度假设条件下估计精度平均提高了 $6.54\%$ ,满足机载激光雷达系统标定在强误差条件下的精度及鲁棒性需求。

**关键词:**机载激光雷达;内方位参数标定;广义最小二乘估计;控制区

**中图分类号:** TN958.98 **文献标识码:** A

## Calibration technology of airborne lidar

ZHANG Da-yong, WU Wen-qi, Wu Mei-ping

(College of Mechatronics Engineering and Automation,  
National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The interior origination element biases between a laser scanner and a navigation system were calibrated to satisfy the survey precision requirement of a lidar. Firstly, control areas are detected and ascertained through laser intensity map, and then the control points are calculated with laser footprint measurements averagely within a control area. Equations including biases and navigation parameters based on control points are set up for optimal estimation. The general least square method with a white technology is adopted to handle the coupled noise covariance and to give an optimal estimation of biases under the least square principle. Experiment results show that this algorithm can restrain imprecise coefficient matrix errors caused by a navigation system. The precision of fixing angle biases is superior to  $0.01^\circ$  and the precision of fixing level-arm biases is superior to  $3\text{ cm}$ . As compared with traditional methods in general, the average estimation precision has improved by  $6.54\%$  under the condition of a relaxed small angle and by  $5.27\%$  in the measurement noise to be amplified. These data confirm that the algorithm can satisfy the calibration requirement for both precision and robust under strong noise conditions.

**Key words:** airborne lidar; interior origination element calibration; general least squares estimation; control area

收稿日期:2008-12-29;修订日期:2009-03-26.

基金项目:国家安全重大基础研究项目(No. 973-61964);高校博士学科专项科研基金资助项目(No. 2006998009)

## 1 引 言

激光雷达是近年来蓬勃发展起来的新兴测量技术,已经广泛应用于遥感、测绘、大气探测、紧急避险等诸多领域。尤其是机载激光雷达测量系统能够高效、准确地测量地形信息,从而为获取高分辨率的地球空间信息提供了一种有效的技术手段,受到了国内外研究机构的极大关注。机载激光雷达系统通过机载导航系统确定空间位置和姿态,同时由激光测距仪获取地面激光脚点到发射装置的空间距离和矢量方向,利用导航参数作为基准计算出地面点的地理坐标位置,当激光脚点覆盖面积足够宽时,即可获得测量地形的高程数据。地形数据的获取依赖于导航参数,即需要确定激光测量系统的空间位置和脉冲发射姿态,导航参数通常由惯性导航系统(INS)和卫星导航系统(GPS)提供。为了保证激光测量的精确性,理论上需要将激光测量系统、INS 和 GPS 天线安装于同一空间点且要求安装坐标系重合,但实际工作很难满足这个要求。通常激光测量系统与 INS 之间存在三轴安装角误差和空间矢量系统误差,因此必须对其空间相对关系(内方位参数)进行标定。

机载激光雷达系统的标定精度在很大程度上影响最后的激光测量结果。最初主要利用外部经纬仪和测距仪直接轮廓测量得到内方位标定参数<sup>[1]</sup>,这种方法简单可靠,但程序繁琐、耗时且精度偏低。近年来,机载激光雷达系统的标定方法以飞行自标定为主,其基本思想是利用激光光束对已知点或相对点扫描产生的固定偏移进行参数估计。Favey 研究了利用控制点的重叠航带标定方法<sup>[2]</sup>,主要是利用几何模型对位置偏移计算标定参数;Filin 利用自然表面进行标定<sup>[3]</sup>,根据自然环境中的典型特征量进行几何模型分析和计算;Burman 采用最小二乘平差法进行控制点几何标定<sup>[4]</sup>,重叠部分利用了扫描线特征匹配;Schiele 等利用激光成像强度差异设计和匹配控制点<sup>[5]</sup>,采取了基于最小二乘的迭代求解方法;Brenner<sup>[6]</sup>针对激光雷达校准和标定问题采取了多角度控制点观测的最优化计算方法。这些自标定方法一般利用平差法对控制点或者重叠航带匹配特征点观测进行回归求解。机载激光雷达飞行

标定问题研究热点之一就是参数估计问题,即利用几何误差模型和测量坐标进行标定参数估计。本文主要研究参数估计问题。平差法求解中假设系统矩阵准确和量测噪声很小,然而受到控制点数量限制及系统矩阵中隐含导航系统误差的影响,该条件难以满足。文献[7]指出在设计标定算法中必须仔细考虑导航系统误差的影响,因为直接求解结果的置信率较低,甚至可能出现发散解。文献[8]在研究类似的激光瞄准线对准问题时也深入考虑了导航误差的影响。为了改进直接平差法可能造成的参数估计精度下降问题,本文采取控制区域量测构造系统方程减少系统矩阵的随机误差,并引入广义最小二乘法实现最优无偏估计,以减少隐含导航系统误差的不精确系数矩阵的影响,提高在强误差条件下的标定精度和鲁棒性。

## 2 机载激光雷达对地观测几何模型

### 2.1 激光雷达原理与扫描模式

机载激光雷达扫描组件由高频激光脉冲测距仪和旋转机构组成。测距仪可通过发射和接收激光脉冲测定脉冲延时  $t$ ,并由  $t$  计算激光脉冲的传输距离

$$D = \frac{1}{2} t \cdot c, \quad (1)$$

其中  $c$  为光速常量。

为了使激光光束覆盖面积足够大,必须使用旋转机构改变激光光束空间指向,从而实现激光光束带宽扫描,一般通过旋转棱镜或者旋转反射镜机械结构实现。加入旋转机构后,激光光束将在地面形成扫描线,目前大多数激光雷达采用“Z”型扫描或者圆锥扫描。“Z”型扫描是指激光

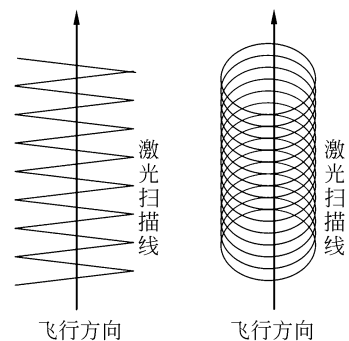


图 1 机载激光雷达扫描模式

Fig. 1 Scan model of airborne lidar

光束沿机体的垂直方向往复扫描,随着飞机向前飞行,激光光束在地面形成“Z”字型;圆锥扫描是指激光光束向一个与旋转轴有一定夹角的反射镜面发射激光,随着旋转轴的旋转,激光光束经镜面反射后沿飞行方向在地面形成卵形线,激光扫描线在地面的投影如图 1 所示。

## 2.2 对地观测矢量转换模型

### 2.2.1 矢量转换原理

在一定扫描模式下,根据旋转机构输出参数和相关几何参数,可以得到激光雷达坐标系下测距中心到地面激光脚点的量测矢量。但仅有激光脚点的量测矢量尚无法计算激光脚点在地球坐标系中的三维位置,必须完成以下两个步骤:1)根据激光雷达的瞬时姿态计算出激光光束(即量测矢量)在地球坐标系下的空间矢量;2)根据该空间矢量和激光雷达自身在地球坐标系下的位置矢量,经过几何运算得到激光脚点在地球坐标系下的位置矢量。上述解算所需导航参数由 GPS/INS 组合导航系统提供。为精确计算这两个步骤,必须确定导航系统坐标系和激光雷达系统坐标系之间的安装关系,即方位标定参数。本文主要考虑激光雷达坐标系与提供姿态的 INS 之间的三轴安装误差及二者的空间矢量距离误差。为了描述的方便,本文采用的导航算法已经将位置归算到 GPS 坐标系中,下面给出包含内方位参数的机载激光雷达对地观测模型。

### 2.2.2 基于导航参数和内方位参数的矢量转换

首先定义量测矢量转换相关坐标系:

- $e$  ECEF 地球坐标系;
- $n$  导航坐标系(ENU);
- $n_0$  地面基准点导航坐标系;
- $b$  INS 坐标系(机体坐标系);
- $s$  激光雷达坐标系。

激光雷达量测出  $s$  下的观测矢量  $x^s$ ,考虑由安装距离和偏差组成的内方位参数,则观测矢量为

$$\hat{x}^{n_0} = C_n^{n_0} C_b^n (C_s^b C_s^s x^s + l^b), \quad (2)$$

其中

$C_b^n$  由偏航角  $\psi$ 、俯仰角  $\theta$  和横滚角  $\varphi$  组成;

$C_n^{n_0} = C_e^{n_0} C_e^n$  由地理坐标系经度  $\lambda$ 、纬度  $L$  以及基准坐标系经度  $\lambda_0$ 、纬度  $L_0$  组成。由于一次

航测的面积不是很大,简化后  $C_n^{n_0}$  的为

$$C_n^{n_0} = \begin{bmatrix} 1 & -(\lambda - \lambda_0) \sin L & (\lambda - \lambda_0) \cos L \\ (\lambda - \lambda_0) \sin L_0 & 1 & L - L_0 \\ -(\lambda - \lambda_0) \cos L_0 & -L + L_0 & 1 \end{bmatrix}.$$

$C_s^b$  由理想安装参数构成,即沿机体坐标系  $z$  轴旋转  $\vartheta$  角的旋转矩阵

$$C_s^b = \begin{bmatrix} \cos \vartheta & -\sin \vartheta & 0 \\ \sin \vartheta & \cos \vartheta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

$l^b$  是  $b$  系下激光雷达与 INS 的安装位置差矢量;

$C_s^e$  是实际激光雷达坐标系到理想坐标系  $s'$  的误差矩阵,由安装失准角  $\xi$ 、 $\zeta$  和  $\tau$  组成,一般为小量,可写做单位阵与反对称矩阵之和

$$C_s^e = I_{3 \times 3} + \begin{bmatrix} 0 & -\tau & \zeta \\ \tau & 0 & -\xi \\ -\zeta & \xi & 0 \end{bmatrix}.$$

最后,根据 GPS/INS 给出的相对位置矢量  $P_{\text{ins}}^{n_0} = C_e^{n_0} (P_{\text{ins}}^e - P_{n_0}^e)$ ,可得激光脚点在 ECEF 系中坐标

$$P_t^e = P_{\text{ins}}^e + \hat{x}^{n_0}. \quad (3)$$

计算中导航参数通过 GPS/INS 系统获得,参考系之间的安装关系(即内方位参数)假定为常数。

## 3 广义最小二乘法内方位参数标定

### 3.1 激光脚点内方位参数方程

内方位参数标定的基本思想是利用激光脚点测量位置与对应准确位置构成相关函数方程并求解。

设获得  $M$  个有效激光雷达测量  $t_i (i=1, \dots, M)$ ,从导航系统得到  $C_n^{n_0}(i)$ 、 $C_b^n(i)$ ,从激光雷达获取量测矢量  $\hat{x}^{n_0}(i)$ ,组成观测方程

$$\begin{aligned} P_t^e &= P_{\text{ins}}^e(i) + C_n^{n_0}(i) C_b^n(i) (C_s^b C_s^s (x^s(i) + \boldsymbol{\varepsilon}(i)) + l^b) = \\ &P_{\text{ins}}^e(i) + C_n^{n_0}(i) C_b^n(i) (l^b - C_s^b [x^s(i) \times] \boldsymbol{\eta}) + \\ &C_n^{n_0}(i) C_b^n(i) C_s^s x^s(i) + C_n^{n_0}(i) C_b^n(i) C_s^s \boldsymbol{\varepsilon}(i), \end{aligned} \quad (4)$$

其中  $[a \times]$  表示矢量  $a$  的反对称矩阵,  $P_{n_0}^e$  为该激光脚点在  $n_0$  系下的准确地理位置坐标。  $\boldsymbol{\varepsilon}$  为量测噪声,假定其服从高斯独立同分布,方差阵  $C_0 = \text{diag}\{\sigma_1^2, \sigma_2^2, \sigma_3^2\}$ 。

系统待估参数为  $\boldsymbol{\Theta} = [l^b \quad \boldsymbol{\eta}]^T$ ,将真实位置坐标与激光雷达计算坐标之差作为系统量测

$\mathbf{y}(i)$ :

$$\mathbf{y}(i) = \mathbf{P}_c^{n_0} - \mathbf{P}_{\text{ins}}^{n_0}(i) - \mathbf{C}_n^{n_0}(i) \mathbf{C}_b^n(i) \mathbf{C}_s^b(i) \mathbf{x}^s(i), \quad (5)$$

以及相应的系统矩阵  $\mathbf{h}(i)$ :

$$\mathbf{h}(i) = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_n^{n_0}(i) \mathbf{C}_b^n(i) \\ -\mathbf{C}_n^{n_0}(i) \mathbf{C}_b^n(i) \mathbf{C}_s^b(i) [\mathbf{x}^s(i) \times] \end{bmatrix}^T. \quad (6)$$

假设能够获得多个激光脚点的准确位置信息,即可利用(5)、(6)组成超定方程求解参数  $\Theta$ 。但由于激光扫描有一定盲目性,不一定能准确覆盖控制点,因此必须采用激光图像检测和识别控制区,并通过控制区几何参数计算控制点。

### 3.2 利用控制区量测的广义最小二乘法标定

控制区是指能通过激光雷达量测检测出的地面区域,包含经过事先测量的精确控制点。一般利用激光雷达的深度图像或者回波强度图像提取,也称为激光主动成像<sup>[9]</sup>。深度图像中的突出标志,如平坦屋顶角点或者规则人工建筑都是很好的匹配点,激光雷达的回波反射强度图像则可以利用不同表面反射率差异作为控制区设置参考。本文采用基于激光反射强度识别的机场跑道中心线作为控制点几何区域,控制点为跑道中心线的几何中心。采用跑道中心线的优势有:(1)跑道中心线涂料材质具有较高的激光反射率,与普通水泥跑道有明显区别,有利于控制区识别;(2)中心跑道线为标准的矩形,形状规则且位于同一平面,有利于中心点计算;(3)跑道中心线基本在一条直线上,方便设计航线和飞机机动。一段跑道中心线的激光反射强度图像如图 2 所示:

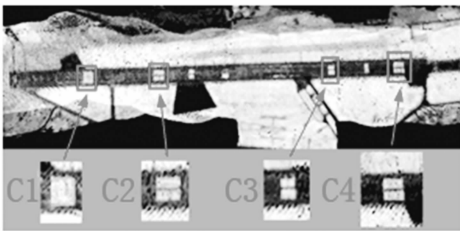


图 2 激光雷达强度图像控制区

Fig. 2 Control areas of lidar intensity image

在控制区中,事先精确测量的控制点仅有一个,无法得到控制区内所有激光脚点对应的真实地理位置,难以直接利用观测方程,必须对激光雷达测量预先处理,需要对控制区域中的激光脚点进行几何中心平均。利用前述矢量转换模型可以求出激光脚点在  $n_0$  系下的位置坐标,此时由于初始内方位参数未知,假设内方位参数均为 0。采

用控制区的另一个优势是空间几何平均减少了由于导航系统误差引起的系统矩阵误差,能够在一定程度上提高系统矩阵的精确度。

对于轮廓清晰的水平矩形控制区,可利用 4 个角的激光脚点坐标  $X_i (i=1, 2, \dots, 4)$  和  $Y_i (i=1, 2, \dots, 4)$  计算水平几何中心  $X_M$  和  $Y_M$ 。与控制点情形类似,  $X_i$  和  $Y_i$  也不一定被激光雷达直接测量,但矩形区的边缘成像清晰,且直线特征明显,因此可利用矩形图像的边两两求其基准交点,将其作为计算水平几何中心的激光脚点起算点。本文利用 Canny 算子提取矩形控制区图像轮廓,采用 Hough 变换提取直线,并求出控制区边缘直线的参数方程。利用边缘直线的参数方程插值产生所需的角位置坐标  $(\bar{X}_i, \bar{Y}_i), i=1, 2, \dots, 4$ , 以距  $n_0$  最近的角点作为控制区基准点。为了充分利用控制区内的激光脚点信息,在每个控制区内选取靠近图像中心的  $K$  个点计算控制点坐标:

$$\mathbf{P}_d = \frac{\sum_{i=1}^K [\mathbf{P}_{\text{ins}}^{n_0}(i) + \mathbf{C}_n^{n_0}(i) \mathbf{C}_b^n(i) \mathbf{C}_s^b(i) \mathbf{x}^s(i) - \mathbf{P}_0]}{K}, \quad (7)$$

其中  $\mathbf{P}_0 = [\min(\bar{X}) \quad \min(\bar{Y}) \quad 0]^T$ 。

设航路中有  $N$  个控制区及  $N$  个中心控制点  $\mathbf{P}_c$ , ( $j=1, 2, \dots, N$ ), 则第  $j$  个控制区组测量系统方程

$$\hat{\mathbf{y}}(j) = \hat{\mathbf{h}}(j) \Theta + \mathbf{v}, \quad (8)$$

其中

$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{P}_c - \mathbf{P}_d$  为实际控制点与计算控制点差值;

$$\hat{\mathbf{h}}(j) = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \begin{bmatrix} \mathbf{C}_n^{n_0}(i) \mathbf{C}_b^n(i) \\ -\mathbf{C}_n^{n_0}(i) \mathbf{C}_b^n(i) \mathbf{C}_s^b(i) [\mathbf{x}^s(i) \times] \end{bmatrix}^T$$

为通过控制区量测综合的系统矩阵;

$$\mathbf{v}(j) = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \mathbf{C}_n^{n_0}(i) \mathbf{C}_b^n(i) \mathbf{C}_s^b(i) \boldsymbol{\varepsilon}(i) \text{ 为综合量测}$$

误差。

$$\text{令 } \hat{\mathbf{A}}(j) = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \mathbf{C}_n^{n_0}(i) \mathbf{C}_b^n(i) \mathbf{C}_s^b(i), \text{ 由量测误差}$$

为高斯噪声的假设可知

$$\begin{cases} E[\mathbf{v}_j] = 0 \\ \mathbf{C}_j = \text{cov}[\mathbf{v}_j] = \hat{\mathbf{A}}(j) \mathbf{C}_0 \hat{\mathbf{A}}(j)^T \end{cases}, \quad (9)$$

根据全部  $N$  个控制点的量测,综合以上公式可得到总量关系

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H}^T \Theta + \mathbf{V}, \quad (10)$$

其中

$$\mathbf{Y} = [\hat{y}(1) \quad \hat{y}(2) \quad \cdots \quad \hat{y}(N)]^T$$

$$\mathbf{H} = [\hat{h}(1) \quad \hat{h}(2) \quad \cdots \quad \hat{h}(N)]^T$$

$\mathbf{V} = [v(1) \quad v(2) \quad \cdots \quad v(N)]^T$  为多个控制点对应的量测、系数矩阵及噪声;

$\mathbf{C}_V = \text{diag}\{C_1, C_2, \dots, C_N\}$  为噪声量测误差协方差阵。

对于此类参数估计问题,采用普通的最小二乘法是不合适的,原因在于噪声向量的协方差矩阵不是对角阵,且具有时变特性,不满足参数估计的最小方差准则,直接利用普通最小二乘算法求解将得到有偏解。为此,Dana 设计了广义最小二乘法<sup>[10]</sup>,以适应最小方差准则。广义最小二乘法已经成功运用在雷达数据配准等领域。采用广义最小二乘求解的算法如下:

由于  $\mathbf{C}_V$  是正定的,可采用 Cholesky 方法分解为

$$\mathbf{C}_V^{-1} = \mathbf{S}^T \mathbf{S}, \quad (11)$$

其中  $\mathbf{S}$  为可逆阵,由此可得

$$\mathbf{E}[(\mathbf{S}\mathbf{V})(\mathbf{S}\mathbf{V})^T] = \mathbf{S}\mathbf{C}_V\mathbf{S}^T = \mathbf{S}\mathbf{S}^{-1}(\mathbf{S}^T)^{-1}\mathbf{S}^T = \mathbf{I}, \quad (12)$$

则(10)可变为

$$\mathbf{Y}' = \mathbf{S}\mathbf{Y} = \mathbf{S}\mathbf{H}^T \boldsymbol{\Theta} + \mathbf{S}\mathbf{V} = \mathbf{H}'^T \boldsymbol{\Theta} + \mathbf{V}', \quad (13)$$

此时,  $\mathbf{V}' \sim N(0, \sigma I)$ , 即噪声方差满足对角型,同时保持了最小二乘的超定形式,在此基础上利用最小二乘可得

$$\boldsymbol{\Theta} = (\mathbf{H}'\mathbf{H}'^T)^{-1}\mathbf{H}'\mathbf{Y}' = (\mathbf{H}\mathbf{C}_V^{-1}\mathbf{H}^T)^{-1}\mathbf{H}\mathbf{C}_V^{-1}\mathbf{Y}. \quad (14)$$

即实现了量测噪声方差非对角阵条件下内方位参数的最小方差估计。

## 4 标定实验与分析

采用真实的激光雷达成像测量值为基础和不同场景噪声参数形成的数据进行实验验证。采用 Beim 公司提供的 ScaLARS 型圆锥型激光扫描仪作为测量模块,以 Applanix 公司生产的 POS/AV510 型 GPS/INS 导航系统以及对应的导航卫星地面差分站组成 RTK 导航系统,二者安装后组成激光雷达系统。ScaLARS 型圆锥型激光扫描仪的最高采样频率达到 7 500 Hz,最大测量范围为 750 m,测距精度为 10 cm ( $1\sigma$ )。POS/AV510 型 GPS/INS 导航系统工作在 RTK 模式下能够做到定位精度优于 0.4 m,测速精度

优于 0.05 m/s,水平姿态精度优于  $0.008^\circ$ ,方位角精度  $< 0.05^\circ$ ,输出频率为 10 Hz。在实际测量中激光扫描仪工作在 5 000 Hz,为了实现数据的无缝拼接,对导航数据进行了内插处理。标定实验利用德国 Nobitz 机场为基准标定场进行飞行实验,分别在机场跑道纵方向和横方向进行往复飞行,对跑道中心线进行了精确事先静态测量,测量点为中心线的几何中心点。激光雷达的主要扫描部件及工作原理如图 3 所示。激光雷达在飞机上安装时,惯性导航系统安放在与之相近的机舱平面上,卫星接收机天线安装在机舱的顶部。

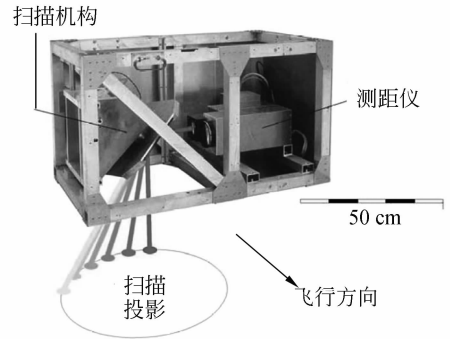


图 3 激光雷达结构及工作原理图

Fig. 3 Functional principle and main parts of lidar

图 4 显示了在 600 m 高度获取的激光雷达回波强度成像及对应光学图像,图 4 的左边部分为条带强度信号扫描图像。通过观察可知,跑道的中心线部分反射强度与其它部分有强烈对比,控制区边缘直线清晰,有利于进行图像检测识别及特征点提取计算。图 4 的右边给出了对应的空中光学成像图(由于拍摄高度以及几何投影关系,所显示跑道的指向略有不同)。

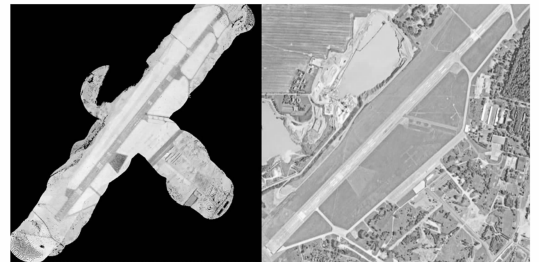


图 4 激光雷达成像图和空中摄影图

Fig. 4 Lidar scan map and photograph in air

在实验中,以飞行得到的激光雷达准确数据作为基准,进行了两组实验。第一组实验完全采

用飞行数据,系统的偏差安装角的真值由德国同行提供的偏差角光学测量结果为基准,其真值为  $\xi_1=0.447^\circ, \zeta_1=0.857^\circ, \tau_1=1.141^\circ$ ,  $b$  系下的安装位置矢量偏差值利用精确光学系统结合结构设计图纸进行测定,为  $l_x^b=5.152\text{ m}, l_y^b=1.841, l_z^b=4.802\text{ m}$ 。在此基础上,针对不同状态加入导航参数随机量测误差和姿态误差信息;第二组数据放宽了小角度假设,在第一组数据完全标定好的基础上,利用数据仿真重新设定安装偏差角和增加相关的量测噪声以及导航系统误差,安装偏差角为  $\xi_2=\zeta_2=\tau_2=5.0^\circ$ ,测量噪声和姿态角随机误差均设定为高斯白噪声,测量噪声值大小为  $\epsilon_V=0.1^\circ \times I_3(1\sigma)$ ,根据导航系统的统计精度,设定姿态角随机误差  $\epsilon_a=0.01^\circ \times I_3(1\sigma)$ 。分别采用平均控制法(ACS)、普通最小二乘法(NLS)和广义最小二乘法(GLS)进行参数估计。精确控制点为跑道中心线的几何中心点,选取 8 个跑道中心线区域控制区,每个控制区激光脚点平均采样数为 48 020 个,根据两组参数标定结果均值如表 1 和表 2 所示:

表 1 第一组内方位参数估计结果

Tab. 1 Results of group 1

序号	安装角偏差估计			安装位置偏差估计		
	$\xi$	$\zeta$	$\tau$	$l_x^b$	$l_y^b$	$l_z^b$
ACS	0.645°	0.827°	1.171°	5.528 m	2.221 m	4.975 m
NLS	0.482°	0.849°	0.943°	5.274 m	1.955 m	4.918 m
GLS	0.470°	0.868°	0.979°	5.218 m	1.810 m	4.887 m

表 2 第二组内方位参数估计结果

Tab. 2 Results of group 2

序号	安装角偏差估计			安装位置偏差估计		
	$\xi$	$\zeta$	$\tau$	$l_x^b$	$l_y^b$	$l_z^b$
ACS	5.359°	5.370°	4.809°	5.054 m	2.398 m	5.117 m
NLS	5.119°	4.905°	4.893°	5.235 m	1.980 m	4.960 m
GLS	5.044°	5.041°	4.946°	5.181 m	1.914 m	4.717 m

表中安装偏差角估计和安装位置偏差估计的有效位取为小数点后第三位(实际为双浮点精度数据),在此位数上取值已经满足数据处理和对比的要求。从表中可以看出,广义最小二乘取得的内方位参数估计更为准确,平均控制法精度最低。与参考值比较,算法在安装角估计上精度优于  $0.01^\circ$ ,安装杆臂估计精度优于 3 cm。在两个水

平安装角估计上,广义最小二乘法与普通最小二乘较为相近,这是由于测量噪声和导航系统误差在水平方向分布比较均匀,量测值和系统矩阵没有明显的偏离分布情况,因此估计结果较好。在方位安装角估计上,广义最小二乘法较普通最小二乘法更优,这主要是由于导航系统方位误差存在动态性导致系统矩阵误差分布不均匀,从而导致普通最小二乘法估计精度下降,相反广义最小二乘法则能有效处理这类误差,根据多组数据统计,当导航系统提供的姿态角误差为  $0.02^\circ(1\sigma)$  时,广义最小二乘算法与普通最小二乘算法相比能够提高 5.27% 的精度。

在第二组安装角偏差比较大的条件下,平均控制法基本上已经失效,而最小二乘法精度明显下降,这说明在安装角较大情况下噪声协方差矩阵是非均匀的,不满足普通最小二乘算法的假设,但广义最小二乘法依然有较高估计精度,这说明广义最小二乘法通过对动态误差协方差的分解有效的满足了最小方差估计的原则,能很好的处理非均匀噪声的影响,根据多组数据统计,在放宽小角度假设条件下时,广义最小二乘算法与普通最小二乘算法相比能够提高 6.54% 的精度。

为了进一步验证算法对测量噪声和姿态误差的抑制能力,在第二组偏差安装角假设下,对包含不同程度噪声和姿态误差的数据进行参数估计,得到普通最小二乘法和广义最小二乘法对方位安装角偏差估计的 RMS 均趋势曲线图,如图 5 所示,其中纵坐标为 RMS 均值,横坐标取值为误差强度,误差强度表示为测量噪声和姿态误差线性增长组合:

$$D = \{ \sigma_V(i) = 1.0 \times i \times I_3, \sigma_a(i) = 0.003 \times i \times I_3, (i=1, \dots, 10) \}, \quad (15)$$

从图 5 中可以看出,在噪声增大、姿态误差增大的情况下,普通最小二乘法的估计误差呈急剧增长的趋势,而采用广义最小二乘法的标定参数 RMS 值明显小于采用普通最小二乘法的 RMS 值,在噪声较大的条件下依然能够比较好的估计标定参数。采用广义最小二乘算法估计得到标定参数 RMS 值并没有随着噪声的增加而明显增加,这进一步说明是由于广义最小二乘法将量测误差和系统矩阵误差白化,满足了最小方差准则。

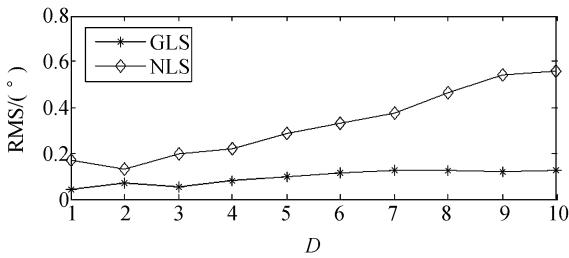


图 5 不同误差强度条件下 RMS 的趋势图

Fig. 5 RMS results under different noises

## 5 结 论

本文研究了机载激光雷达系统内方位参数标定问题,首先研究了激光雷达测量矢量坐标转换模型,然后在考虑系统量测误差影响标定过程的条件,提出一种基于激光雷达量测控制区信

## 参考文献:

- [1] KRABILL W B, WRIGHT C W, SWIFT R N. Airborne laser mapping of assateague national seashore beach[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2000, 66(1): 65-71.
- [2] FAVEY E. Investigation and improvement of airborne laser scanning technique for monitoring surface elevation changes of glaciers[D]. ETH, Zurich; Technische wissenschaften, 2001.
- [3] FILIN S. Recovery of systematic biases in laser altimeters using natural surfaces[J]. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2001, 34(3): 85-91.
- [4] BURMAN H. Calibration and orientation of airborne image and laser scanner data using GPS and INS[D]. Stockholm; Royal Institute Technology, 2000.
- [5] SCHIELE O, WEHR A, KLEUSBERG A. Operational calibration of airborne laserscanners by using LASCAL[C]. *Proceedings of the 9th Saint Petersburg international conference on integrated navigation system*, Saint Petersburg, Russia, 2002: 81-89.

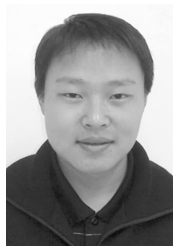
息的内方位参数标定方法,最后采用广义最小二乘法进行参数估计,获得了最小方差估计。实验结果表明,该算法能够有效的估计内方位标定参数,安装角估计精度 $<0.01^\circ$ ,安装杆臂估计精度 $<3\text{ cm}$ ,同时在导航系统误差和量测噪声较大条件下性能优于采用普通最小二乘法的标定方法,在量测噪声放大条件下估计精度平均提高了 5.27%,在放宽小角度假设条件下估计精度平均提高了约 6.54%,具有较高的鲁棒性,满足了激光雷达系统标定的要求。

## 6 致 谢

在此特别感谢德国斯图加特大学导航研究所 A. Wehr 博士提供的机载激光雷达数据和原理图以及相关帮助。

- [6] BRENNER C, DOLD C, RIPPERDA N. Coarse orientation of terrestrial laser scans in urban environments[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2008, 63: 4-18.
- [7] AL-DURGHAM M M. Alternative methodologies for the quality control of lidar systems[D]. Calgary; University of Calgary, 2007.
- [8] 赵馨,王世峰,佟首峰,等.飞机—地面间激光通信天线的初始对准[J]. *光学 精密工程*, 2008, 16(7): 1190-1195.  
ZHAO X, WANG SH F, TONG SH F, et al.. Initial alignment of antenna for laser communication system between aircraft and ground station[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(7): 1190-1195. (in Chinese)
- [9] WANG Z, JIA S, ZHANG X H, et al.. Multi-frame postprocessing algorithm of laser active imaging images[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(4): 615-621.
- [10] DANA M P. Registration: A Prerequisite for Multiple Sensor Tracking. In: *Multitarget Multisensor Tracking: Advanced Applications*[M]. Norwood MA: Artech House, 1990.

## 作者简介:



章大勇(1980—),男,四川泸州人,博士研究生,主要从事组合导航技术、遥感技术、最优估计理论等方面的研究。E-mail:da\_yong\_zhang@163.com



吴美平(1971—),男,福建南平人,教授,博士生导师,主要从事导航技术、空间遥感遥测技术、飞行力学控制等方面的研究。E-mail:meipingwu@263.net

## 导师简介:



吴文启(1967—),男,广西南宁人,教授,博士生导师,主要从事导航技术、空间遥感遥测技术等方面的研究。E-mail:wenqiwu\_lit@sina.com.cn

## ●下期预告

## 超高斯贝塞尔光束在湍流大气中的传播

马秀波,李恩邦

(天津大学 精密仪器与光电子工程学院,天津 300072)

激光束在大气中传播时,大气湍流引起的光强起伏等现象会限制光束的实际应用。为了寻求一种消除或者减小大气湍流对光束质量影响的方法,本文基于广义的惠更斯菲涅耳原理,通过数值模拟的方法研究了超高斯贝塞尔(SGB)光束在不同的湍流强度下的轴向和横向光强的分布。SGB光束在一定传播距离上具有无衍射性和自恢复性能。研究发现,在弱湍流大气环境中,尽管湍流强度的增大会加速轴上光强的衰减,但是在一定距离范围内,SGB光束仍然保持其无衍射特点。在弱湍流强度变化范围内,通过选择合适的孔径函数,可以将SGB光束的横向光强分布的峰值变化限制在不超过10%的范围内。SGB光束具有一定的抵制大气湍流干扰的能力。