

# 机载激光雷达系统的航带平差法

杨书娟<sup>1,2</sup>, 张珂殊<sup>1</sup>, 邵永社<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院电子学研究所, 北京 100190;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 即使机载激光雷达经过良好的检校, 激光雷达数据仍可能呈现残余系统误差, 从而导致测区各个航带存在变形。先基于面特征计算安置角, 为消除残余系统误差的航带平差提供初始点云; 再基于迭代最近点法(ICP)的航带平差法, 以连接点三维坐标相等为条件, 对扫描角度误差进行非线性变形改正。结果表明, 该方法能保证高空飞行数据的绝对精度, 点云精度可满足要求。

**关键词** 传感器; 激光雷达; 系统误差标定; 航带平差法

**中图分类号** TN958.98

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201744.1210003

## Strip Adjustment Method for Airborne Lidar System

Yang Shujuan<sup>1,2</sup>, Zhang Keshu<sup>2</sup>, Shao Yongshe<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Even if the airborne lidar is well calibrated, lidar data still may show residual system error, which results in the deformation of strips in each testing zone. We firstly calculates the placement angle based on the surface feature, which provides the initial point cloud for eliminating the residual system error. Then, under the condition of the same three-dimensional coordinate of the connection point, the nonlinear error of the scanning angle error is corrected based on the iterative closest point (ICP) method. Experiments show that the method can guarantee the absolute accuracy of high altitude flight data, and the point cloud accuracy can meet related requirements.

**Key words** sensors; lidar; systematic error calibration; strip adjustment method

**OCIS codes** 280.3420; 280.3640; 280.5600

## 1 引言

受航高和扫描视场角的限制, 机载激光雷达系统要完成一定的作业面积就必须飞行多条航线, 且这些航线必须保持一定的重叠度<sup>[1-2]</sup>。然而, 机载激光雷达的系统误差会严重影响点云数据的相对精度, 如等高线变得破碎不连续, 这使得激光雷达条带平差成为一个不可避免的问题。

国内大多使用国外研发的激光雷达系统, 由于厂家对激光雷达系统误差模型保密, 因此国内学者只能基于系统误差对点云坐标的影响规律建立数学模型来消除系统误差。谢劭峰等<sup>[3]</sup>基于手工调整法调整安置角; 左志权等<sup>[4-5]</sup>提出了基于表面匹配的航带平差; 王丽英、马宁等<sup>[6-11]</sup>发现航带存在变形, 提出了基于多项式的平差模型。但由于基于数据驱动计算的参数不具有适用性, 每个架次所有数据都需要参与计算, 非常耗时。国外研究的航带平差考虑了航带变形的根本原因, 提出了基于传感器模型的航带平差<sup>[12-15]</sup>, 通过优化设

收稿日期: 2017-07-11; 收到修改稿日期: 2017-08-15

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0101101)

作者简介: 杨书娟(1988—), 女, 博士研究生, 主要从事激光雷达三维数据处理技术方面的研究。

E-mail: yangshujuan880822@126.com

导师简介: 张珂殊(1972—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光探测技术、嵌入式计算机系统和计算机综合信息处理技术方面的研究。E-mail: ksZhang@mail.ie.ac.cn(通信联系人)

备的物理参数,提高了数据精度,该方法只需要选取相邻3条不同飞行方向的航带进行平差,解算出的参数可适用于所有架次的航带。因此,针对国内自主研发的雷达设备,需建立与之相对应的严格传感器模型进行航带平差。

在实际测图之前,对激光扫描仪进行了严格标定,且雷达系统经安置角检校后,对于低空飞行测区(如500 m 航高数据),相邻航带重叠区的点云基本重合;但对于中高空飞行测区(如1500 m 航高数据),相邻航带重叠区的高程差在垂直于飞行方向上呈条带状,高程差与扫描角度呈余弦函数关系,即扫描角度残差对激光点坐标的影响随着飞行距离增加而明显增加<sup>[16]</sup>。可见,对于中高空飞行数据,扫描角度残差不可忽略,He等<sup>[13-15]</sup>指出模型参数的选用必须与条带变形的情况相吻合,否则平差效果有限。本文先建立了机载激光雷达系统的定位模型,之后基于同名面特征条件计算雷达与惯性测量单元(IMU)间的安置角,最后基于迭代最近点法(ICP)的航带平差法消除了残留的角度系统误差。

## 2 检校原理

### 2.1 对地定位模型

机载激光雷达系统通过惯性导航系统(POS)获取的姿态和位置信息以及激光扫描仪测量的角度和距离,即可对激光脚点进行定位,定位的数学模型为

$$\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_G \\ Y_G \\ Z_G \end{bmatrix} + \mathbf{R}_{IMU}^W \begin{bmatrix} \Delta X_G \\ \Delta Y_G \\ \Delta Z_G \end{bmatrix} + \mathbf{R}_{IMU}^W \mathbf{R}_{Lidar}^{IMU} \mathbf{R}_\theta \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \rho \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 $[X_w, Y_w, Z_w]^T$ 为激光点的WGS-84坐标; $[X_G, Y_G, Z_G]^T$ 为全球定位系统(GPS)天线相位中心的WGS-84坐标; $[\Delta X_G, \Delta Y_G, \Delta Z_G]^T$ 为GPS天线中心的偏移分量; $\mathbf{R}_{IMU}^W$ 为IMU坐标系与WGS-84坐标系间的旋转矩阵,由IMU的3个姿态角构成; $\mathbf{R}_{Lidar}^{IMU}$ 为激光雷达设备坐标系与IMU坐标系间的旋转矩阵,由3个安置角 $[r, p, h]^T$ 构成; $\mathbf{R}_\theta$ 为激光雷达设备的扫描角 $\theta$ 构成的旋转矩阵; $\rho$ 为激光雷达设备测量的距离。

### 2.2 基于面特征检校安置角

对于高度集成的激光雷达系统,激光扫描仪与惯导系统刚性固联,可依据机械结构设计得到惯导和激光扫描仪之间的偏心分量,或者基于卡尔曼滤波器原理估算出惯导和GPS之间的偏心分量。

激光点WGS-84坐标 $\mathbf{P}_w$ 的误差模型可表示为 $g_w$ (雷达设备的设备坐标、POS系统记录的位置和姿态、GPS天线中心的坐标和偏移分量)和系统误差 $\epsilon$ (安置角误差)的函数,如(2)式所示:

$$\mathbf{P}_w = [X_w \ Y_w \ Z_w]^T = f(\epsilon, g_w) \quad (2)$$

采用稳健特征值法计算平面参数的初始值,将平面法向量问题转换为协方差矩阵求解特征值问题:

$$\mathbf{c} \cdot \mathbf{S}_i = \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^n \Delta x_i \Delta x_i & \sum_{i=0}^n \Delta x_i \Delta y_i & \sum_{i=0}^n \Delta x_i \Delta z_i \\ \sum_{i=0}^n \Delta y_i \Delta x_i & \sum_{i=0}^n \Delta y_i \Delta y_i & \sum_{i=0}^n \Delta y_i \Delta z_i \\ \sum_{i=0}^n \Delta z_i \Delta x_i & \sum_{i=0}^n \Delta z_i \Delta y_i & \sum_{i=0}^n \sum_{i=0}^n \Delta z_i \Delta z_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_i \\ b_i \\ c_i \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} a_i \\ b_i \\ c_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 $\mathbf{c}$ 为协方差矩阵, $[a_i, b_i, c_i]^T$ 为平面的法向量, $\mathbf{S}_i$ 为平面 $i$ 的法向量, $\lambda$ 为平面的最小特征值, $\Delta x_i = x_i - \sum_{i=0}^n x_i/n$ , $\Delta y_i = y_i - \sum_{i=0}^n y_i/n$ , $\Delta z_i = z_i - \sum_{i=0}^n z_i/n$ 。假设有 $n$ 个激光点落在平面 $i$ 上,将激光点坐标中心化,则协方差矩阵的最小特征值对应的特征向量为平面的法向量。

基于同一平面内激光点共面的思想,若平面 $i$ 的法向量 $\mathbf{S}_i$ 表示为 $[a_i \ b_i \ c_i]^T$ , $d_i$ 为点到平面的法向量,则激光点 $\mathbf{P}_w$ 位于平面 $i$ 上的数学模型可表示为

$$\begin{cases} \mathbf{S}_i \cdot f(\epsilon, g_w) + d_i = 0 \\ a_i^2 + b_i^2 + c_i^2 - 1 = g(\mathbf{S}_i) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

基于平面特征构建观测方程的未知参数,包括系统安置误差参数  $\epsilon(r, p, h)$  和平面参数  $\epsilon_p(a_i, b_i, c_i, d_i)$ ,将(4)式进行线性化处理,得到:

$$\begin{cases} F_{P_i} = f(\epsilon, g_w)(d_{a_i} + d_{b_i} + d_{c_i}) + d_{d_i} + \mathbf{S}_i^T \frac{\partial f(\epsilon, g_w)}{\partial r} dr + \mathbf{S}_i^T \frac{\partial f(\epsilon, g_w)}{\partial p} dp + \\ \quad \mathbf{S}_i^T \frac{\partial f(\epsilon, g_w)}{\partial h} dh + w \\ G_{P_i} = \frac{\partial g(\mathbf{S}_i)}{a_i} d_{a_i} + \frac{\partial g(\mathbf{S}_i)}{b_i} d_{b_i} + \frac{\partial g(\mathbf{S}_i)}{c_i} d_{c_i} + w_p \end{cases}, \quad (5)$$

式中  $F_{P_i}$  和  $G_{P_i}$  为(4)式的线性方程,  $d_{a_i}, d_{b_i}, d_{c_i}, d_{d_i}$  分别为平面  $i$  的平面参数改正项,  $\frac{\partial f(\epsilon, g_w)}{\partial r}, \frac{\partial f(\epsilon, g_w)}{\partial p}, \frac{\partial f(\epsilon, g_w)}{\partial h}$  为  $f(\epsilon, g_w)$  关于安置角  $\epsilon(r, p, h)$  的偏导数,  $\frac{\partial g(\mathbf{S}_i)}{a_i}, \frac{\partial g(\mathbf{S}_i)}{b_i}, \frac{\partial g(\mathbf{S}_i)}{c_i}$  为  $f(\epsilon, g_w)$  关于平面参数  $\epsilon_p(a_i, b_i, c_i, d_i)$  的偏导数,  $w$  和  $w_p$  分别为  $f(\epsilon, g_w)$  和  $g(\mathbf{S}_i)$  误差方程的观测常数。

将(5)式进行简化,可得:

$$\begin{cases} \mathbf{A}_1 \boldsymbol{\epsilon} + \mathbf{A}_2 \boldsymbol{\epsilon}_p + \mathbf{B} \mathbf{v} + \mathbf{w} = 0 \\ \mathbf{v}_p = \mathbf{G} \boldsymbol{\epsilon}_p + \mathbf{w}_p \end{cases}, \quad (6)$$

式中  $\mathbf{A}_1$  和  $\mathbf{A}_2$  分别为  $f(\boldsymbol{\epsilon}, g_w)$  关于参数  $\boldsymbol{\epsilon}$  和  $\boldsymbol{\epsilon}_p$  的偏导数,  $\mathbf{B}$  为  $f(\boldsymbol{\epsilon}, g_w)$  关于观测值的偏导数,  $\mathbf{G}$  为  $g(\mathbf{S}_i)$  关于平面参数  $\boldsymbol{\epsilon}_p$  的偏导数,  $\mathbf{v}$  和  $\mathbf{v}_p$  为  $F_{P_i}$  和  $G_{P_i}$  误差方程的观测常数。

由于平面参数与安置参数间存在强相关性,直接解算会导致参数的估计不收敛,故引入“高斯-马尔科夫”估计模型,先验权  $\mathbf{P}_e$  可表示为

$$\mathbf{P}_e = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_\epsilon & 0 \\ 0 & \mathbf{P}_{\epsilon_p} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中  $\mathbf{P}_\epsilon$  和  $\mathbf{P}_{\epsilon_p}$  分别为参数  $\boldsymbol{\epsilon}$  和  $\boldsymbol{\epsilon}_p$  的先验权。

联立(6)式和(7)式可得线性模型:

$$\begin{cases} \mathbf{A}_1 \boldsymbol{\epsilon} + \mathbf{A}_2 \boldsymbol{\epsilon}_p + \mathbf{B} \mathbf{v} + \mathbf{w} = 0; \mathbf{P}_e \\ \mathbf{G} \boldsymbol{\epsilon}_p + \mathbf{w}_p = 0; \mathbf{P}_\epsilon \\ \mathbf{v}_e = [\boldsymbol{\epsilon} \quad \boldsymbol{\epsilon}_p]^T; \mathbf{P}_e \end{cases}, \quad (8)$$

式中  $\mathbf{v}_e$  为平面参数和安置角参数的改正量。

对于线性化的模型(8)式,在平面参数条件和先验权的约束下,最终可表示为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_1^T (\mathbf{B} \mathbf{P}^{-1} \mathbf{B}^T)^{-1} \mathbf{A}_1 + \mathbf{P}_e + \mathbf{G}^T \mathbf{P}_\epsilon \mathbf{G} & \mathbf{A}_1^T (\mathbf{B} \mathbf{P}^{-1} \mathbf{B}^T)^{-1} \mathbf{A}_2 \\ \mathbf{A}_2^T (\mathbf{B} \mathbf{P}^{-1} \mathbf{B}^T)^{-1} \mathbf{A}_1 & \mathbf{A}_2^T (\mathbf{B} \mathbf{P}^{-1} \mathbf{B}^T)^{-1} \mathbf{A}_2 + \mathbf{P}_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\epsilon} \\ \boldsymbol{\epsilon}_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1^T (\mathbf{B} \mathbf{P}^{-1} \mathbf{B}^T)^{-1} \mathbf{w} + \mathbf{P}_e \mathbf{w}_e + \mathbf{G}^T \mathbf{P}_\epsilon \mathbf{w}_p \\ \mathbf{A}_2^T (\mathbf{B} \mathbf{P}^{-1} \mathbf{B}^T)^{-1} \mathbf{w} + \mathbf{P}_e \mathbf{w}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中  $\mathbf{P}$  为  $\mathbf{v}$  的权重矩阵,为单位矩阵。

基于附有条件的间接平差原理,通过调整未知参数,使残差加权平方和最小化。每次迭代分两次优化参数,每次优化时保持一组参数不变,调整另一组参数,如表 1 所示。

表 1 误差参数分组

Table 1 Grouping of error parameter

Optimization order	Parameters of placement angle	Parameters of plane
The first optimization	Fixed	Adjustment
The second optimization	Adjustment	Fixed

第一次优化时,未知参数的先验权值  $\mathbf{P}_e$  元素设置为

$$\begin{cases} \mathbf{P}_\epsilon = 0 \\ \mathbf{P}_{\epsilon_p} \rightarrow \infty \end{cases}. \quad (10)$$

第二次优化时,未知参数的先验权值  $\mathbf{P}_e$  元素设置为

$$\begin{cases} \mathbf{P}_{\varepsilon_p} = 0 \\ \mathbf{P}_{\varepsilon} \rightarrow \infty \end{cases} \quad (11)$$

通过循环迭代求解的方式,基于最小二乘原理计算未知参数的最优解。

### 2.3 基于 ICP 的航带平差法

对于 1500 m 飞行测区数据,即使经过安置角检校,相邻航带重叠区的高程差在垂直飞行方向上也呈条带状,即高程差随扫描角度而变化,说明扫描角度还存在残余误差。基于多次飞行数据发现激光雷达设备的角度残差与角度呈余弦函数关系:

$$\theta = \theta_0 + k_0 + k_1 \cos(k_2 + \theta_0) \quad (12)$$

式中  $\theta_0$  为激光雷达设备测量角度值,  $\theta$  为修正后的角度值,  $k_0, k_1, k_2$  为角度修正参数。

结合(1)式和(12)式,  $\mathbf{P}_w$  的误差定位模型可表示为

$$\mathbf{P}_w = [X_w \ Y_w \ Z_w]^T = f(\gamma, \tau_w), \quad (13)$$

式中已知观测值  $\tau_w$  为雷达设备的扫描角度和距离、POS 系统记录的位置和姿态、安置角和偏移分量,系统误差  $\gamma$  为扫描角度修正参数。

由于残留角度误差与角度呈余弦函数关系,为了精确计算系统误差  $\gamma$ ,需要在设备角度范围内均匀布设控制点,基于 ICP 原理,在航带点云中搜索控制点的“近似同名点”,再以同名点三维坐标相等为条件,将地面定标的角度修正参数作为初始值,计算扫描角度修正参数。将(12)式进行线性化处理可得到:

$$f_{P_i} = \frac{\partial f(\gamma, \tau_w)}{\partial k_0} d_{k_0} + \frac{\partial f(\gamma, \tau_w)}{\partial k_1} d_{k_1} + \frac{\partial f(\gamma, \tau_w)}{\partial k_2} d_{k_2} - l_{P_i}, \quad (14)$$

式中  $f_{P_i}$  为误差方程,  $\frac{\partial f(\gamma, \tau_w)}{\partial k_0}$ 、 $\frac{\partial f(\gamma, \tau_w)}{\partial k_1}$ 、 $\frac{\partial f(\gamma, \tau_w)}{\partial k_2}$  为  $f(\gamma, \tau_w)$  关于系统误差  $\gamma$  的偏导数,  $l_{P_i}$  为误差方程  $f_{P_i}$  的观测常数。

将式(14)简化,可得:

$$\mathbf{V} = \mathbf{B}_w \mathbf{X} - \mathbf{L}, \quad (15)$$

式中  $\mathbf{V}$  为(13)式的线性化误差方程,  $\mathbf{B}_w$  为(13)式中关于  $\gamma$  的偏导数,  $\mathbf{L}$  为同名点的坐标残差,  $\mathbf{X}$  为  $[k_0, k_1, k_2]^T$ 。

基于最小二乘间接平差原理,根据表达式  $\mathbf{X} = (\mathbf{B}_w^T \mathbf{P} \mathbf{B}_w)^{-1} (\mathbf{B}_w^T \mathbf{P} \mathbf{L})$  可求解角度的修正参数。

基于 ICP 航带平差的主要步骤为: 1) 经过安置角检校,航带重叠区的点云已实现初始匹配,再基于最邻近原则,重叠区内的每一个控制点可在航带数据中找到对应的匹配点,将其作为一对点对,这样就可以得到  $n$  对初始匹配点对; 2) 基于  $\mathbf{X} = (\mathbf{B}_w^T \mathbf{P} \mathbf{B}_w)^{-1} (\mathbf{B}_w^T \mathbf{P} \mathbf{L})$  求解这  $n$  组匹配点对的角度修正参数; 3) 计算  $n$  对匹配点的距离  $d$ , 如果  $d$  小于设定的阈值  $d_{set}$ , 则停止; 否则, 返回步骤 1), 直到  $d$  小于阈值为止。

### 2.4 整体检校流程

整体检校流程如图 1 所示。

## 3 试验及分析

### 3.1 安置角检校

实验数据来自实测数据,检校场共飞了 5 条航线,航线 1、2 分别有一对对飞航带,航线 3 为穿越航线,如图 2 所示。飞行航高为 500 m,航带宽度约为 500 m,扫描方向点间距为 0.4 m,飞行方向点间距为 0.8 m。

实验选取 3 条航带的重叠区进行区域网航带平差,先利用 TerraScan 软件实现航带重叠区的地物分类,如图 3(a)所示;然后基于区域增长法实现建筑物的分割,如图 3(b)所示;再在每个建筑物集群中,基于随机采样一致性法提取建筑物平面上的点云,如图 3(c)所示。共提取了 42 对平面特征,提取的特征均匀分布在航带的重叠区域。

图 4(a)和(b)分别为安置角检校前后航飞数据重叠区的剖面图,可以看到,安置角检校前,同名地物明显错位,而安置角检校后重叠区同名特征基本完全重合。

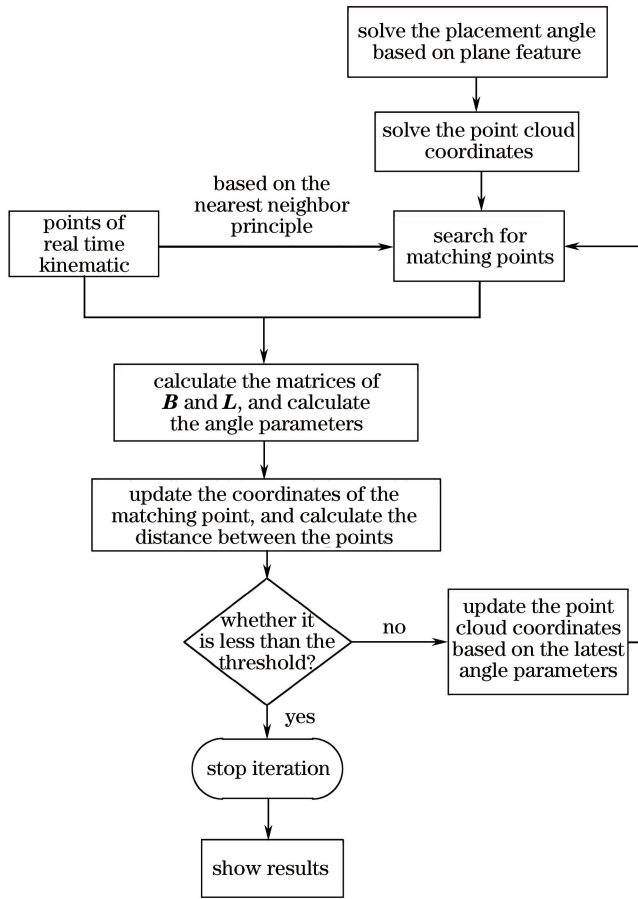


图 1 检校流程图

Fig. 1 Flow chart of calibration

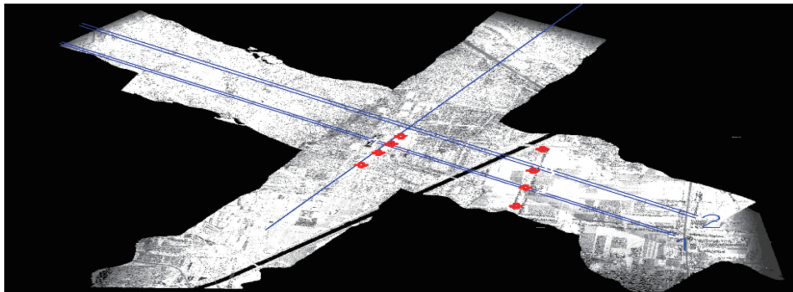


图 2 飞行数据

Fig. 2 Flight data

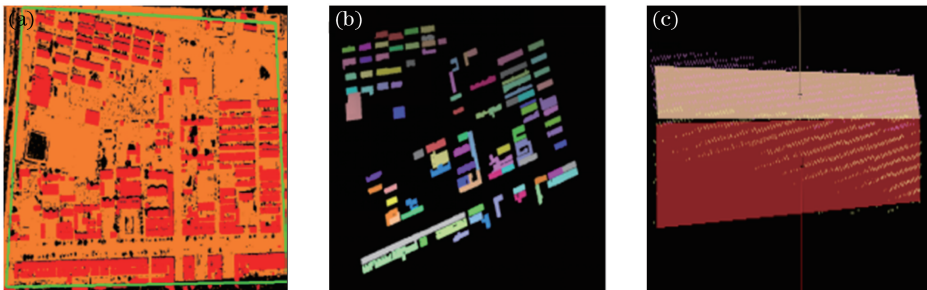


图 3 重叠区建筑物特征的提取。(a)分类;(b)建筑物平面分割 ;(c)拟合的平面

Fig. 3 Extraction of building features in overlap areas. (a) Classification; (b) division of building plane; (c) fitting plane

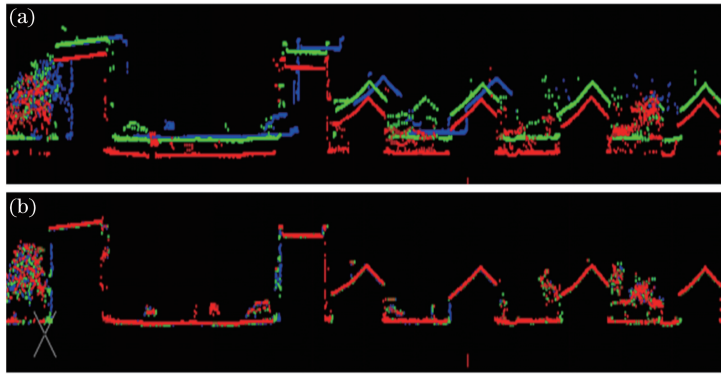


图 4 安置角检校前后航飞数据重叠区的剖面图。(a)检校前;(b)检校后

Fig. 4 Profiles of flight data in overlap areas before and after adjusting placement angle.

(a) Before adjusting; (b) after adjusting

为了评价基于面特征的航带平差法的相对精度,选用没有参与未知参数估计的 15 个平面,如图 5 所示,横轴为激光点的平面编号,纵轴为安置角检校前后往返航带前后向扫描平面激光点的法向距离残差。实验选用一条航带的点云计算平面参数的初始值,因此,该条航带平面法向距离的残差接近 0,而其他 2 个航带平面法向距离的残差都大于 1 m;当航带平差后,3 条航带的 15 个平面的法向距离残差都小于 6 cm,如图 5(b) 所示。由此可知,基于面特征的安置角检校能明显提高相邻航带重叠区的相对精度。

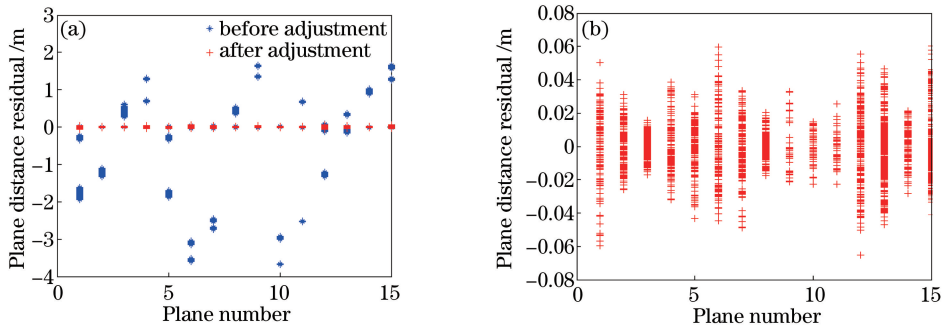


图 5 激光点的平面距离残差。(a)平面距离残差的差异;(b)平差后的平面距离残差

Fig. 5 Plane distance residual of laser spot. (a) The difference of plane distance residual;

(b) plane distance residual after adjustment

为了定量评定绝对精度,实验时沿着平坦道路共布设 8 个  $1.5 \text{ m} \times 3 \text{ m}$  的黑色平板,如图 6 所示。可以看到,地面点云和黑色平板点云的灰度存在明显差异。

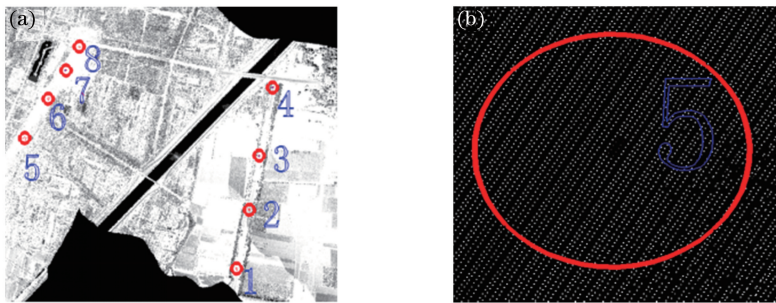


图 6 (a)黑色平板的布设和(b)黑色平板放大图

Fig. 6 (a) Layout of black plate and (b) enlarge image of black plate

用黑色平板点云的高程均值和中心点的平面位置评价点云的绝对精度,如表 2 所示,平面位置的平均误差约为 0.14 m,高程平均误差约为 0.05 cm,表中  $D_x$ 、 $D_y$  和  $D_z$  分别为控制点 X、Y 和 Z 方向的坐标残差。

### 3.2 ICP 航带平差

实验数据为航高 1500 m 的飞行数据,飞行方向的点间距为 6.05 m,垂直飞行方向的点间距为 1.1 m。在航带重叠区,沿着垂直于飞行方向的平坦道路每隔 50 m 布设了一个实时动态(RTK)控制点,如图 7 所示。

表 2 控制点的绝对精度  
Table 2 Absolute accuracy of control points

Number	Absolute accuracy of flight line 1 /m			Absolute accuracy of flight line 2 /m			Absolute accuracy of flight line 3 /m		
	$D_x$	$D_y$	$D_z$	$D_x$	$D_y$	$D_z$	$D_x$	$D_y$	$D_z$
1	0.12	0.13	0.06				0.12	0.13	0.06
2	-0.05	-0.14	0.03		Out of range		-0.05	-0.14	0.03
3	0.08	0.11	0.05	-0.04	0.09	0.03			
4		Out of range		0.06	0.12	0.04		Out of range	
5	0.03	-0.14	0.04				0.13	0.04	0.06
6	-0.08	-0.12	0.02		Out of range		0.05	-0.11	0.04
7	0.06	0.04	0.03	0.1	0.07	0.06	-0.06	0.08	0.03
8	-0.05	0.08	0.07	0.08	-0.09	0.03	0.09	0.12	0.08

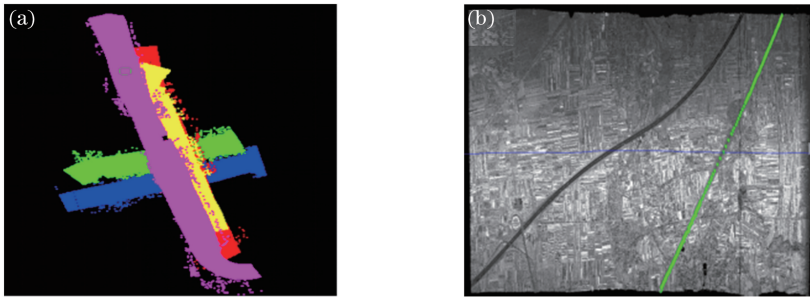


图 7 (a) 航飞数据和(b)控制点

Fig. 7 (a) Flight data and (b) control points

由于雷达系统经过安置角检校后只存在残留系统误差,因此可以以控制点坐标为中心、25 m 为半径建立搜索区域,基于 ICP 航带平差法,计算角度修正参数,结果如表 3 所示。

表 3 角度修正参数  
Table 3 Angle correction parameters

Calibration	$k_0$	$k_1$	$k_2$	rad
Ground calibration	-0.00360	0.00148	-1.22411	
Flight calibration	-0.00332	0.00164	-1.08617	

为了验证角度参数的有效性,分别利用地面角度检校参数和飞行角度检校参数计算航飞数据的三维坐标,比较往返航带的高程差。图 8(a)中往返航带高程差在垂直飞行方向上存在明显的条带误差,即高程差与扫描角度相关,图 8(b)中返航带高程差均匀分布,说明 ICP 航带平差基本消除了角度的残留系统误差。

为了定量评定绝对高程精度,基于最近距离原则,在一条航带中搜索控制点对应的同名点,比较 RTK 点与激光点的高程差,如图 9 所示。图 9(a)中的高程差在垂直飞行方向存在明显的条带误差,即高程差与扫描角度相关;图 9(b)中的高程差均匀分布,高程绝对精度小于 10 cm,说明 ICP 航带平差基本消除了角度的残留系统误差。

为了定量评定绝对位置精度,在房屋的 4 个脚点布设了 4 个控制点,如图 10 所示。可以看到:ICP 航带平差前,三条航带建筑物的平面位置(蓝色方框)偏离真实位置(控制点组成红色方框);ICP 航带平差后,建筑物平面上的点正好落在控制点组成的红色矩形框中,虽然激光点具有离散性,但检校后的绝对平面精度小于点间距。

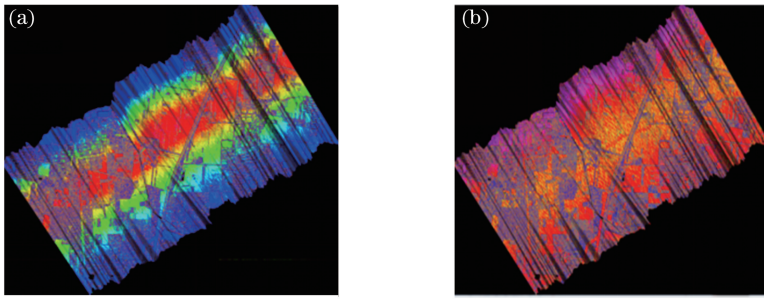


图 8 往返航带 1、2 重叠区的高程差。(a)航带平差前;(b)航带平差后  
Fig. 8 Difference of height of overlap region between flight 1 and flight 2.

(a) Before strip adjustment; (b) after strip adjustment

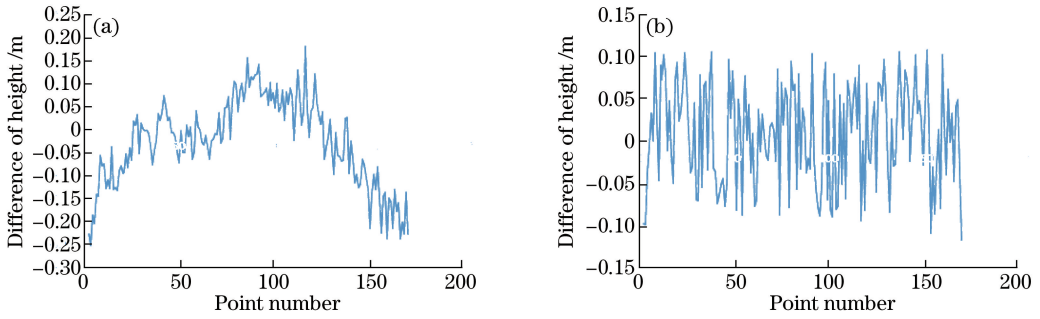


图 9 绝对高程差。(a)航带平差前;(b)航带平差后

Fig. 9 Absolute different of height. (a) Before strip adjustment; (b) after strip adjustment

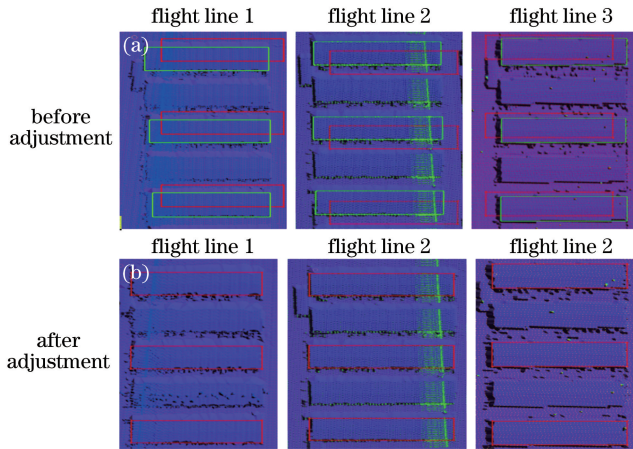


图 10 3 条航带建筑物的绝对平面精度。(a)航带平差前;(b)航带平差后

Fig. 10 Absolute position accuracy of buildings for three flight lines.

(a) Before strip adjustment; (b) after strip adjustment

## 4 结 论

雷达系统经安置角检校后,对于 500 m 飞行测区,航带重叠区点云基本能重合,但对于 1500 m 飞行测区,航带重叠区点云在垂直飞行方向上的相对高程精度不一致,存在变形,这主要是由角度残差对近距离点云的影响不明显,但对远距离点云的影响较大导致的。首先基于共面条件检校安置角,为消除残余角度误差的航带平差提供初始点云,再基于传感器模型航带平差法,以连接点三维坐标相等为条件,对航带网进行非线性变形改正。通过实验数据验证了航带平差法的可行性,该方法可适用于中高空飞行数据,点云精度能满足要求。



## 参 考 文 献

- [1] Wang Liying, Song Weidong, Liu Zhengjun. Block adjustment method airborne LiDAR[J]. Science of Surveying and Mapping, 2011, 36(3): 56-58.  
王丽英, 宋伟东, 刘正军. 机载 LiDAR 航带法区域网平差方法研究[J]. 测绘科学, 2011, 36(3): 56-58.
- [2] Crombaghs M J E, Bruegelmann R, de Min E J. On the adjustment of overlapping strips of laser altimeter height data [J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2000, 23(33): 230-237.
- [3] Xie Shaofeng, Liu Tianlong. Domestic airborne LiDAR system angle error calibration plan research[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2016, 39(6): 50-55.  
谢劭峰, 刘田龙. 国产机载 LiDAR 系统安置角误差检校方案研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2016, 39(6): 50-55.
- [4] Zuo Zhiqian, Liu Zhengjun, Zhang Li. Generic mathematical model of least squares three-dimensional surface matching and its application on strip adjustment of airborne LiDAR data[J]. Journal of Remote Sensing, 2013, 17(6): 1546-1558.  
左志权, 刘正军, 张力. 3 维最小二乘表面匹配泛型数学模型及在机载 LiDAR 条带平差中的应用[J]. 遥感学报, 2013, 17(6): 1546-1558.
- [5] Yuan Bao. A method of airborne Lidar point cloud strip adjustment based on total least squares registration [J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2016, 25(10): 53-58.  
袁豹. 基于总体最小二乘匹配的机载 Lidar 点云航带平差方法[J]. 测绘工程, 2016, 25(10): 53-58.
- [6] Wang Liying, Song Weidong. A comparative study between individual strip adjustment and strip block adjustment of airborne LiDAR data[J]. Science of Surveying and Mapping, 2013, 38(2): 32-34.  
王丽英, 宋伟东. 机载 LiDAR 数据逐航带平差与区域网平差对比[J]. 测绘科学, 2013, 38(2): 32-34.
- [7] Ma Ning. Study on point cloud orientation for three dimensional laser scanning based on bundle block net adjustment method[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2015.  
马宁. 基于激光束法区域网平差的三维激光扫描点云定向方法研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2015.
- [8] Zhao Dawei, Pei Hailong, Ding Jie, *et al.* Research of the unmanned plane airborne lidar system strip stitching method [J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(1): 0114002.  
赵大伟, 裴海龙, 丁洁, 等. 无人机机载激光雷达系统航带拼接方法研究[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0114002.
- [9] Zhang Y, Xiong X, Zheng M, *et al.* LiDAR strip adjustment using multi-features matched with aerial images[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(2): 976-987.
- [10] Chen Jie, Du Lei, Li Jing, *et al.* Effect of ground control points on airborne LiDAR strip data adjustment results[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2015(s1): 1-4.  
陈洁, 杜磊, 李京, 等. 地面控制点对机载 LiDAR 航带平差结果影响分析[J]. 测绘通报, 2015(s1): 1-4.
- [11] He Peipei, Wan Youchuan, Yang Wei, *et al.* Automatic registration of urban laser point cloud with aerial image data based on straight-lines[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0528001.  
何培培, 万幼川, 杨威, 等. 基于线特征的城区激光点云与影像自动配准[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0528001.
- [12] Yang B, Zang Y. Automated registration of dense terrestrial laser-scanning point clouds using curves [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2014, 95: 109-121.
- [13] He Y, Mei Y. An efficient registration algorithm based on spin image for LiDAR 3D point cloud models [J]. Neurocomputing, 2015, 151(1): 354-363.
- [14] Munjy R. Simultaneous adjustment of LIDAR strips[J]. Journal of Surveying Engineering, 2015, 141(1): 04014012.
- [15] Khosravi M, Khalili K, Amirabadi H. Employing Nelder-Mead and gravitational search algorithm methods in point clouds registration process[J]. Procedia Technology, 2015, 19(6): 112-119.
- [16] Yang Mengmeng, Wan Youchuan, Xu Jingzhong. Research of error analysis and positioning accuracy with four-prism of laser scanning[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(9): 0914001.  
杨蒙蒙, 万幼川, 徐景中. 激光扫描仪四棱塔镜误差分析及定位精度研究[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0914001.