

基于重叠航带的机载激光雷达系统检校

王致华¹ 张爱武¹ 王书民² 邵杰¹ 王飞¹ 李文宁¹

(¹首都师范大学三维信息获取与应用教育部重点实验室, 北京 100048)

²中国地震局地震预测研究所, 北京 100036

摘要 为了达到机载激光雷达系统潜在的精度, 需要对其整个系统进行严格的检校。在分析系统安置参数误差及其影响的基础上, 建立起平行重叠航带之间差异分析模型。在平行重叠航带之间运用优化的迭代最近点(ICP)算法, 通过配准过程, 得到相邻重叠航带之间的刚体变换矩阵, 再利用由外方位角元素和平移向量所组成的变换矩阵, 实现平行重叠航带之间差异检测。将表达差异的转换参数运用到重叠条带误差分析模型中, 推导系统安置参数偏差完成检校。试验结果通过与 Tmatch 软件检校过程进行对比分析, 验证了这种方法的有效性。

关键词 激光光学; 误差检校; ICP 算法; 转换参数; 参数估计

中图分类号 TN959.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0214003

Airborne Radar Calibration System Based on the Overlap Strip

Wang Zhihua¹ Zhang Aiwu¹ Wang Shumin² Shao Jie¹ Wang Fei¹ Li Wenning¹

(¹Key Laboratory of 3D Information Acquisition and Application of Ministry of Education, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

(²Institute of Earthquake Science China Earthquake Administration, Beijing 100036, China)

Abstract In order to achieve the potential accuracy of the system, a rigorous calibration process is needed as a whole. The proposed approach which is based on the analysis of system parameter error and influence establishes the discrepancy analysis model between parallel overlapping flight strips. And then through the registration process by using optimization iterative closest point (ICP) algorithm, we can get the rigid body transformation matrix between adjacent overlap strips. By using transformation matrix composed of elements of exterior orientation angle and translation vector, detecting differences between parallel overlap strips again are realized. The differences expressed by the transformation parameters can be applied to the error analysis model of overlapping strip. At this point, we can finish the calibration using the derived set parameters. Experimental results confirm the effectiveness of this approach.

Key words laser optics; calibration; iterative closest point algorithm; transformation parameters; parameter estimation

OCIS codes 280.3640; 150.1488; 280.3420

1 引言

激光雷达技术已经成为一种能够直接获取高密度和高精度的三维点云技术。一个激光雷达系统集成成了三个部件: 全球定位系统(GPS), 惯性导航仪(INS)和激光扫描测距单元。激光扫描测距单元获得从传感器到地表面的距离, GPS/INS 提供了平台

的位置和姿态信息, 机载雷达系统数据是通过条带方式进行采集, 地面激光脚点坐标是通过矢量求和过程推导得到^[1]。尽管近几年激光雷达数据的应用在不同领域有了明显的扩展, 但是仍然缺少标准有效的检校过程来提高点云质量。

以往常用的方法是通过建立地面控制点或者利

收稿日期: 2013-07-08; **收到修改稿日期**: 2013-09-22

基金项目: 国家科技支撑计划(2012BAH31B01)、北京市自然科学基金重点项目(B卷)(KZ201310028035)

作者简介: 王致华(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事机载激光雷达数据获取与应用方面的研究。

E-mail: gswzh870115@163.com

导师简介: 张爱武(1972—), 女, 博士, 教授, 主要从事三维信息获取与处理、计算机视觉与模式识别、图像处理等方面的研究。E-mail: zhangaw98@163.com

用航带线性、面域等特征来检校。文献[2]通过建立地面控制点方法来进行视准轴检校,文献[3]提出了利用重叠航带间线性特征进行检校,这些方法工作量大并且受人为因素的干扰多,并且由于点云的不规则性,识别单个点是非常困难的。同时还有部分算法要求找到系统的原始测量数据,文献[4]要求使用原始航迹文件数据,但是最终用户对这些数据获取比较困难。本文针对以上问题采用了基于平行重叠航带差异监测检校方法,在分析系统安置参数误差及其影响的基础上^[5],建立起平行重叠航带之间差异分析模型,然后在平行重叠航带之间运用优化的迭代最近点(ICP)算法,通过配准过程,得到相邻重叠航带之间的刚体变换矩阵,再利用由外方位角元素和平移向量所组成的变换矩阵,实现平行重叠航带之间差异检测,并将表达差异的转换参数运用到重叠条带误差分析模型中,推导系统安置参数偏差完成检校^[6-7]。

2 数学分析模型

2.1 机载激光雷达系统定位模型

激光脚点的坐标是由它的每个部件的测量值和这些部件安置参数融合的结果。系统测量值和安置参数之间的关系可表示为^[8]

$$\mathbf{X}_C = \mathbf{X}_O + \mathbf{R}_{y,p,r} \mathbf{P}_O + \mathbf{R}_{y,p,r} \mathbf{R}_{\Delta\omega, \Delta\varphi, \Delta\kappa} \mathbf{R}_{\alpha, \beta} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\rho \end{bmatrix}. \quad (1)$$

式中: \mathbf{X}_O 是起始地面点和惯性测量单元(IMU)坐标系统之间的偏移量; \mathbf{P}_O 是激光单元和 IMU 坐标系统之间的偏心量; ρ 是激光测得的激光发射点到地面脚点的距离; $\mathbf{R}_{y,p,r}$ 代表了地面和 IMU 坐标系统之间的旋转矩阵; $\mathbf{R}_{\Delta\omega, \Delta\varphi, \Delta\kappa}$ 代表了 IMU 坐标系统和激光单元坐标系统之间的旋转矩阵; $\mathbf{R}_{\alpha, \beta}$ 代表了激光器和激光束坐标系统之间的旋转矩阵,其中 α, β 表示的是激光旋转镜的扫描角,对于线性扫描仪而言旋转镜只在一个方向旋转($\alpha=0$)。

2.2 平行重叠航带差异分析模型

为了将系统安置偏差的影响简化,假设飞行方向平行于地面参考坐标系 Y 轴;航向按照一个恒定的姿态直线飞行;机载雷达系统几乎垂直于地面, $\mathbf{R}_{y,p,r}$ 为单位矩阵;机载系统有一个相对小的视准轴角并且试验区域地形相对平坦。(2)式表达了一个沿着地面参考坐标系 Y 轴正向飞行的机载系统,激光脚点 \mathbf{X}_C 是系统参数 \mathbf{x} 和测量值 \mathbf{l} 的函数,它是激光脚点真实坐标。其中 $\mathbf{x} = (\Delta X, \Delta Y, \Delta Z, \Delta\omega, \Delta\varphi, \Delta\kappa, \Delta\rho, S)$, $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ 分别是激光扫描单元和 IMU 坐标框架之间的偏心分量; $\Delta\omega, \Delta\varphi, \Delta\kappa$ 则是激光扫描单元和 IMU 坐标框架之间的偏转角; $\Delta\rho$ 是激光测距的恒定偏差, S 是扫描角的比例因子,对于没有偏差的系统来讲,比例因子应该归一。 $\mathbf{l} = (\mathbf{X}_O, y, p, r, \beta, \rho)$, y, p, r 分别是地面参考坐标系和 IMU 坐标系统之间旋转角, β 是扫描角度。

$$\mathbf{X}_C \approx \mathbf{X}_O + \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & -\Delta\kappa & \Delta\varphi \\ \Delta\kappa & 1 & -\Delta\omega \\ \Delta\varphi & \Delta\omega & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\rho \sin S\beta \\ 0 \\ -\rho \cos S\beta \end{bmatrix} = \mathbf{X}_O + \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & -\Delta\kappa & \Delta\varphi \\ \Delta\kappa & 1 & -\Delta\omega \\ \Delta\varphi & \Delta\omega & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -H \end{bmatrix}, \quad (2)$$

分别使用 \mathbf{X}_T 代表真实脚点坐标, \mathbf{X}_B 代表包含偏差的激光脚点坐标, H 为基于地面的飞行高度,此时 \mathbf{X}_B 为系统参数 \mathbf{x} 、测量值 \mathbf{l} 和参数误差 $\delta\mathbf{x}$ 的函数,可表示为

$$\begin{cases} \mathbf{X}_C = \mathbf{X}_T = f(\mathbf{x}, \mathbf{l}), \\ \mathbf{X}_B = f(\mathbf{x} + \delta\mathbf{x}, \mathbf{l}), \end{cases} \quad (3)$$

对于(3)式使用泰勒公示进行展开,忽略展开式的二阶和高阶项后有

$$\mathbf{X}_B = f(\mathbf{x}, \mathbf{l}) + \frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}} \delta\mathbf{x} = \mathbf{X}_T + \begin{bmatrix} \delta X_G \\ \delta Y_G \\ \delta Z_G \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中 $\delta X_G, \delta Y_G, \delta Z_G$ 是系统各个偏心影响的综合^[9],

$$\mathbf{X}_B = \mathbf{X}_T + \begin{bmatrix} \delta X_C \\ \delta Y_C \\ \delta Z_C \end{bmatrix}_{\delta\Delta X, \delta\Delta Y, \delta\Delta Z} + \begin{bmatrix} \delta X_C \\ \delta Y_C \\ \delta Z_C \end{bmatrix}_{\delta\Delta\omega, \delta\Delta\varphi, \delta\Delta\kappa} + \begin{bmatrix} \delta X_C \\ \delta Y_C \\ \delta Z_C \end{bmatrix}_{\delta\Delta\rho} + \begin{bmatrix} \delta X_C \\ \delta Y_C \\ \delta Z_C \end{bmatrix}_{\delta S} = \mathbf{X}_T + \begin{bmatrix} \delta X_C \\ \delta Y_C \\ \delta Z_C \end{bmatrix}_{\delta_T}. \quad (5)$$

通过分析系统参数中各种偏差对点云坐标的影响,可以分析出飞行方向相同或相反航带的共轭点对之间的数学关系。由于系统参数误差的存在,在重叠

航带中包含偏差共轭点的坐标将会显示系统差异,包含偏差的两个平行重叠相邻航带 A,B 之间的数学关系表示为

$$\begin{bmatrix} X_A - X_B \\ Y_A - Y_B \\ Z_A - Z_B \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 2\delta\Delta X - 2H\delta\Delta\varphi - (\sin\beta_A + \sin\beta_B)\delta\Delta\rho - H(\beta_A + \beta_B)\delta S \\ 2\delta\Delta Y + 2H\delta\Delta\omega + (x_A + x_B)\delta S \\ -(x_A - x_B)\delta\Delta\varphi(\cos\beta_A - \cos\beta_B)\delta\Delta\rho - (x_A\beta_A - x_B\beta_B)\delta S \end{bmatrix}, \quad (6)$$

由于常规的机载扫描系统角在 $\pm 25^\circ$ 范围之内,则 $\sin\beta \approx \tan\beta$, 由此 $(\sin\beta_A + \sin\beta_B)\delta\Delta\rho \approx (\tan\beta_A + \tan\beta_B)\delta\Delta\rho = [(-x_A)/H + (-x_B)/H]\delta\Delta\rho = \delta\Delta\rho(D/H)$, $-(x_A + x_B) = -(-D) = D$, D 是两条航带之间的横向距离。假设 $\cos(\beta)\delta\Delta\rho$ 值在扫描角度范围内没有明显的变化,因此 $\cos\beta_A - \cos\beta_B\delta S$ 可以减少到 0。最后假设 $\beta_A \approx -x_A/H$ 和 $\beta_B \approx -x_B/H$, $(x_A\beta_A - x_B\beta_B)\delta S$ 可以被简化为 $\frac{-(x_A^2 - x_B^2)}{H}\delta S = (x_A - x_B)\beta_T\delta S$, $\beta_T \approx D/H$ 指的是两个航带之间总扫描角。通过以上分析(6)式可以被简化为

$$\begin{bmatrix} X_A - X_B \\ Y_A - Y_B \\ Z_A - Z_B \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 2\delta\Delta X - 2H\delta\Delta\varphi - D/(H\delta\Delta\rho) - H\beta_T\delta S \\ 2\delta\Delta Y + 2H\delta\Delta\omega - D\delta\Delta\kappa \\ -(x_A - x_B)\delta\Delta\varphi - (x_A - x_B)\beta_T\delta S \end{bmatrix}. \quad (7)$$

将飞行方向向前的航带中给定点的坐标用与之飞行方向相反航带的对应点坐标来表示(7)式通过数学转换可以表示为

$$\begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2\delta\Delta X - 2H\delta\Delta\varphi - D/(H\delta\Delta\rho) - H\beta_T\delta S \\ 2\delta\Delta Y + 2H\delta\Delta\omega - D\delta\Delta\kappa \\ 0 \end{bmatrix} + R_{2\beta_T\delta S} \begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix}. \quad (8)$$

图 1 中,重叠条带点的坐标它形成了一个局部坐标系 $O-XYZ$, 它的 Y 轴在两个航带之间,图 2 是(7)式到(8)式的图形化表示,也表示出重叠条带中高程差异是由于沿着飞行方向的旋转角所导致。

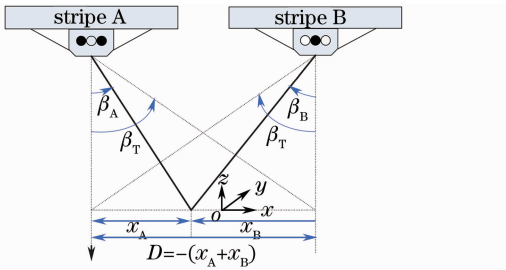


图 1 飞行方向相反的重叠航带

Fig. 1 Opposite direction from the overlap strip

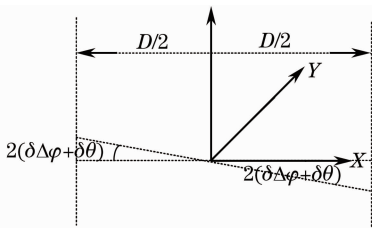


图 2 飞行方向视准轴偏差

Fig. 2 Boresight roll bias

同样,包含偏差同一个点对象在两个飞行方向相同的重叠条带之间的数学关系可表示为

$$\begin{bmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -D/(H\delta\Delta\rho) - H\beta_T\delta S \\ -D\delta\Delta\kappa \\ D\delta\Delta\varphi \end{bmatrix} + R_{2\beta_T\delta S} \begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix}. \quad (9)$$

通过以上分析可以得到,平行重叠条带之间的差异可以用三个平移量 (X_T, Y_T, Z_T) 和一个沿着飞行方向的旋转角 ϕ 来模拟。系统参数偏差和包含偏差的飞行方向相反航带中共轭点之间的差异的关系通过(10)式给出。同样对于两个飞行方向相同条带,系统偏差之间的关系和条带之间的差异可通过(11)式给出^[10]:

$$\begin{bmatrix} X_T \\ Y_T \\ \phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2\delta\Delta X - 2H\delta\Delta\varphi \mp D/(H\delta\Delta\rho) \mp H\beta_T\delta S \\ 2\delta\Delta Y + 2H\delta\Delta\omega \mp D\delta\Delta\kappa \\ 2\delta\Delta\varphi \pm 2\beta_T\delta S \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \\ \phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -D/(H\delta\Delta\rho) - H\beta_T\delta S \\ -D\delta\Delta\kappa \\ D\delta\Delta\varphi \\ 2\beta_T\delta S \end{bmatrix}. \quad (11)$$

3 检校方法

3.1 建立重叠航带基元对应性

为了建立起平行重叠航带之间共轭基元的对应性,估计转换参数,监测重叠航带之间的差异,使用经典点云数据配准算法(ICP)。ICP由Besl等^[8]提出,是一个实现两个三维点集最优匹配的几何变换的迭代优化过程,首先根据一定的准则确立对应点集 P 与 Q ,其中对应点对的个数为 n 。然后通过最小二乘法迭代计算最优刚体变换,即旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移矢量 \mathbf{t} ,使得误差函数(12)式最小,满足正确配准的收敛精度要求。本文通过对该算法的有效改进,提高点云配准精度和效率^[11-12]:

$$E(\mathbf{R}, \mathbf{t}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|m_i - (d_i \mathbf{R} + \mathbf{t})\|^2, \quad (12)$$

式中, m_i, d_i 分别为 P 与 Q 中待匹配点集, \mathbf{R} 为三维旋转矩阵, \mathbf{t} 为平移向量, i 为匹配点序号, n 为匹配点对个数。

3.2 优化算法

由于ICP算法在求不同航带邻近点算法花费时间较多,因此需要对其进行优化,提高计算效率。本文采用了基于特征点的ICP算法。根据点的曲率特征和法矢,在目标点云中寻找若干特征点。法矢和曲率描述了点云的局部几何特征。法矢表示测点局部邻域的主法线,在求解二次曲面的参数方程 $r(u, v)$ 后,可以计算出曲面的单位法向矢量大小 $n = \frac{r_u \times r_v}{|r_u \times r_v|}$ 。曲率能够表示测点的局部邻域形状变化,具有平移、旋转和缩放不变性,主曲率则由高斯曲率和平均曲率得到:

$$\begin{cases} k_1 = L - \sqrt{L^2 - K} \\ k_2 = L + \sqrt{L^2 - K} \end{cases}, \quad (13)$$

式中 K 为高斯曲率, L 为平均曲率, k_1, k_2 分别为两个

点的主曲率。对于点集 $m_i, d_i (i = 1, \dots, n)$,首先计算 m_i, d_i 各个点的主曲率 k_1, k_2 和法向矢量大小 n ,然后根据一个点集中每个测点的曲率来寻找其在另一个点集中的曲率相近点,所有的曲率相近点构成一系列点对。然后利用K-dimensional (K-D)树搜索这些特征点在参考点云中的最近点^[13-14]:

- 1) 根据点的曲率和法矢特征,在点集 d_i 中寻找 n 个特征点得到特征点集 f ;
- 2) 初始化;
- 3) 利用K-D树搜索计算 f 在 P 中的最近点,使 $\|m_i - d_i\|^2$ 趋于最小化;
- 4) 计算坐标变换向量,对特征点集进行坐标变换;
- 5) 判断误差是否收敛。如果 N 次找到的变换迭代和迭代 $N-1$ 中找到的变换之间的差异小于给定的阈值,即 $d_N - d_{N+1} < c, c$ 为给定误差常数($c > 0$),则收敛,目标点云进行坐标变换;否则回到步骤3)继续搜索^[15-17]。

3.3 外方位角元素求解

对应点集迭代配准算法的目标是寻找最优的坐标变换矩阵,采用单位四元数法。首先计算出 m_i, d_i 点集重心;然后构造两个点集的协方差矩阵;再由协方差矩阵构造 4×4 的对称矩阵

$$Q(\Sigma_{P,X}) = \begin{bmatrix} \text{tr}(\Sigma_{P,X}) & \Delta^T \\ \Delta & \Sigma_{P,X} + \Sigma_{P,X}^T - \text{tr}(\Sigma_{P,X})\mathbf{I}_3 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

式中 \mathbf{I}_3 是 3×3 的单位矩阵, $\text{tr}(\Sigma_{P,X})$ 是矩阵的迹, $\Delta = [A_{23} \ A_{31} \ A_{12}]^T, A_{i,j} = (\Sigma_{P,X} - \Sigma_{P,X}^T)_{i,j}$ 。最后通过求特征值和特征向量求解最佳平移向量和最佳旋转向量。设最佳旋转变换向量为单位四元数 q_i ,其中 $q_i = [q_0, q_1, q_2, q_3]^T$,则可得到 3×3 旋转矩阵 $\mathbf{R}(q_i)$:

$$\mathbf{R}(q_i) = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 & 2(q_1 q_2 - q_0 q_3) & 2(q_1 q_3 + q_0 q_2) \\ 2(q_1 q_2 + q_0 q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2 q_3 - q_0 q_1) \\ 2(q_1 q_3 - q_0 q_2) & 2(q_2 q_3 - q_0 q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

通过迭代配准过程,平行重叠航带之间的最优旋转矩阵被确定。在摄影测量中用外方位角元素表达旋转矩阵各个方向余弦^[18],相反可通过旋转矩阵反求外方位角元素。假设用 α, ω, κ 分别表示刚体绕 Y, X, Z 进行三次旋转,为方便表示,令旋转矩阵为

$$\mathbf{R}(q_i) = \mathbf{R}_\alpha \mathbf{R}_\omega \mathbf{R}_\kappa = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix}, \quad (16)$$

式中

$$\begin{aligned} a_1 &= \cos \alpha \cos \kappa - \sin \alpha \sin \omega \sin \kappa, & a_2 &= -\cos \alpha \sin \kappa - \sin \alpha \sin \omega, & a_3 &= -\sin \alpha \cos \omega, \\ b_1 &= \cos \omega \sin \kappa, & b_2 &= \cos \omega \cos \kappa, & b_3 &= -\sin \omega, \\ c_1 &= \sin \alpha \cos \kappa + \cos \alpha \sin \omega \sin \kappa, & c_2 &= -\sin \alpha \sin \kappa + \cos \alpha \sin \omega \sin \kappa, & c_3 &= \cos \alpha \cos \omega. \end{aligned} \quad (17)$$

据此两个平行重叠航带的转换参数被确定,从而得到了两个相邻重叠航带之间平移向量和旋转角。系统安置参数偏差就可以分别使用(10)式和(11)式来估计。在这两个分别表达飞行方向相同和相反的式中,转换参数被表达为一个机载雷达系统参数偏差的线性组合,最终由此产生的结果可以用一个最小二乘过程获得的估计来解决数据获取系统参数偏差。



图4 实验区不同航带点云数据

4 实验与分析

使用奥地利 RIEGL 公司的 LMS-Q560 型机载激光雷达系统采集河北某地的地面数据作为研究样本,其中激光器的最大发射频率为 240 kHz,信号接收为 160 kHz,该机载激光雷达系统还搭载了哈苏 H3D II -39 型相机进行地面特征的采集以及高精度的惯性导航系统。本次实验中用 6 条航带覆盖测区(见图 3),相邻航带之间平行且具有一定的重叠度。飞机飞行高度为 150 m,飞行速度为 200 km/h,飞行方向为东北西南向,激光脚点密度为 40 m^{-2} ,数据共 205536 个点(见图 4)。

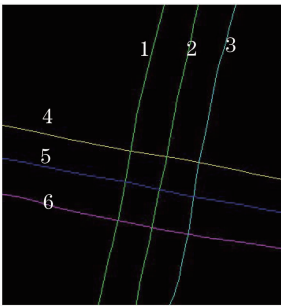


图3 实验区飞行航线

Fig. 3 Flight lines in experimental area

Fig. 4 Point cloud of experimental area

在运用优化的 ICP 算法迭代估计出两个重叠航带之间最优旋转矩阵。然后利用旋转矩阵反求外方位角元素 ω', ϕ', κ' 和偏心向量 X'_T, Y'_T, Z'_T (见表 1)。

为了估计出系统参数偏差的大小,在表 1 中得到的转换参数在(10)式是作为一种飞行方向相反的平行重叠条带系统参数偏差的线性组合。飞行方向相同的平行航带可以利用(11)式求解偏差。以航带 1,2 为例给出求解过程:

$$\begin{bmatrix} X_T \\ Y_T \\ \phi \end{bmatrix}_{\text{strip 1 \& 2}} = \begin{bmatrix} 2\delta\Delta X - 2H\delta\Delta\varphi \mp D/(H\delta\Delta\rho) \mp H\delta\theta \\ 2\delta\Delta Y + 2H\delta\Delta\omega \mp D\delta\Delta\kappa \\ 2\delta\Delta\varphi \pm 2\delta\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.095 \\ -0.033 \\ -0.0031 \end{bmatrix}. \quad (17)$$

最后这些求解式用一个最小二乘估计推导出机载系统参数偏差估计。最终运用本文算法对实验区 6 组航带数据求解得到该机载系统检校参数(见表 2)。

表 1 转换矩阵反求平移、旋转参数

Table 1 Transformation matrix reverse translation and rotation parameters

	X'_T / m	Y'_T / m	Z'_T / m	$\omega' / (")$	$\phi' / (")$	$\kappa' / (")$
Strip 1 & 2	+0.095	-0.033	-1.412	+0.0098	-0.0031	+0.999
Strip 2 & 3	-0.076	+0.040	-1.006	-0.0077	+0.0033	+0.999
Strip 1 & 3	+0.001	+0.106	+0.767	+0.0003	-0.0007	+1.000
Strip 4 & 5	+0.1456	+0.063	-1.305	+0.0152	+0.0064	+0.999
Strip 5 & 6	-0.1074	+0.006	+2.279	-0.0012	-0.0091	-0.996
Strip 4 & 6	-0.0860	+0.191	+0.872	-0.0014	+0.0005	+1.000

表 2 本文算法检校结果

Table 2 Algorithm calibration results in this paper

$\delta\Delta X / m$	$\delta\Delta Y / m$	$\delta\Delta\omega / (")$	$\delta\Delta\varphi / (")$	$\delta\Delta\kappa / (")$	$\delta\Delta\rho / m$	δS
0.000	0.042	-0.031	-0.011	-0.048	0.008	0.056

通过剖面线的比较可以显示出重叠航带之间差异的减小,由此可以作为机载系统检校相对精度评定。图 5 和图 6 分别是选择在实验区 A,B 两个不同区域的检校前后剖面线对比图。可以观察到不同

航带在各个地势不同区域都有很好的检校效果,不同航带之间的兼容性有了很大的提高,航带之间的差异有了很明显的缩小。

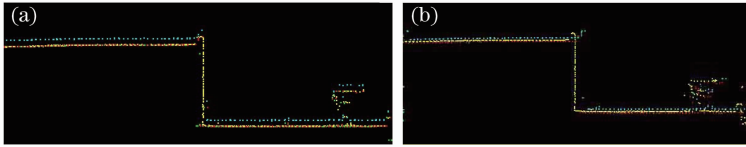


图 5 (a)区域 A 检校前剖面线图;(b)本文算法 A 区域检校后等比例剖面线图

Fig. 5 (a) Profile line before calibration of A area; (b) equal proportion profile line after calibration of A area

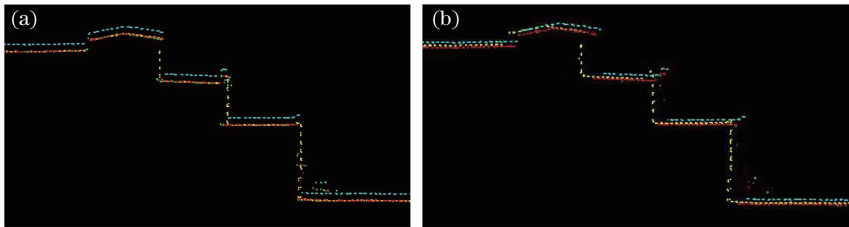


图 6 (a)区域 B 检校前剖面线图;(b)本文算法 B 区域检校后等比例剖面线图

Fig. 6 (a) Profile line before calibration of B area; (b) equal proportion profile line after calibration of B area

同样使用基于主要数据程序(MDL)应用程序的 Tmatch 插件来完成该实验数据检校后绝对精度评定。MDL 应用程序是国际上较为流行的激光数据处理软件,Tmatch 作为该软件其中之一模块,可以作为激光扫描仪的检校工具来解决实际项目数据问题。该方法原理是基于特征线匹配,要求使用带有航迹文件(*.trj)的点云数据来建立航迹文件和点云数据的对应性^[19-20]。对于检校场除了本文算法要求的飞行配置,该插件还要求航线相互垂直回归飞行。实验中分别选取航带点云数据对应的航迹文件,利用软件模块演绎使用时间、剔除杂点、搜索连接线等进行检校。

图 7(b)为局部放大图,不同颜色表示两两不同航带之间的“Tie lines”。

分别对两两重叠的相邻航带进行检校,得到表 3 所示的各个参数偏差。

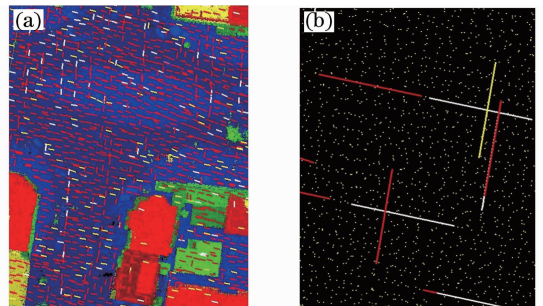


图 7 Tmatch 软件搜索到的“Tie lines”

Fig. 7 Tmatch software searched Tie lines

表 3 Tmatch 检校结果

Table 3 Calibration results by Tmatch

	$\delta\Delta X / m$	$\delta\Delta Y / m$	$\delta\Delta\omega / (")$	$\delta\Delta\varphi / (")$	$\delta\Delta\kappa / (")$
Strip 1 & 2	+0.000	-0.086	+0.0039	-0.0179	-0.0048
Strip 2 & 3	+0.000	+0.031	-0.0117	-0.0114	+0.0029
Strip 1 & 3	+0.001	+0.058	+0.0007	-0.0085	+0.0001
Strip 4 & 5	+0.000	+0.015	-0.0113	-0.0026	+0.0104
Strip 5 & 6	-0.000	+0.002	+0.0367	+0.0055	-0.0238
Strip 4 & 6	+0.000	-0.014	-0.0411	+0.0419	+0.0060

根据 6 组实验数据,通过求均值得到最优检校优化值,如表 4 所示。

表 4 Tmatch 检校均值优化结果与本文算法结果比较
Table 4 Mean optimization results of Tmatch calibration

	$\delta\Delta X / m$	$\delta\Delta Y / m$	$\delta\Delta\omega / (")$	$\delta\Delta\varphi / (")$	$\delta\Delta\kappa / (")$
Tmatch algorithm	+0.000	+0.035	-0.023	-0.007	-0.006
Algorithm in this paper	0.000	0.042	-0.031	-0.011	-0.048

同 Tmatch 软件检校结果相比较,本文算法在没有利用航迹文件数据,不要求航向垂直回归飞行条件下,检校结果同 Tmatch 基本一致(见表 4),从而说明了该算法的有效性。最后运用本文检校算法获取的安置偏差,应用到整个测区完成本次实验。

5 结 论

介绍的机载激光雷达系统安置误差检校方法适用于相邻平行重叠航带之间。它首先根据激光脚点的定位方程得到了相邻航带差异监测模型,此模型是由包含安置参数和误差组成,用三个平移量和一个旋转角来模拟表达,然后运用优化的 ICP 方法建立起两个航带之间共轭基元之间的对应性,得到实现两个航带配准的刚体转换矩阵,该矩阵是由外方位角元素表达的方向余弦组成,由此可解得航带之间平移,旋转变换量,最后将平移,旋转关系运用在平行重叠航带差异监测模型中,求得机载雷达系统安置参数误差,应用结果到所有航带中完成检校。实验中同样利用经典的 Tmatch 软件完成测区数据检校,与其相比本文算法在不要求检校场航向垂直相向飞行,也不要求使用 Tmatch 所必需的航迹文件数据条件下,也同样具有很高的检校精度,具有很好的实用性。

参 考 文 献

- Zhang Xiaohong. Airborne Laser Radar Data Measurement Technology Theory and Method [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2007. 74-88.
张小红. 机载激光雷达测量技术理论与方法[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2007. 74-88.
- Yuan Xiuxiao, Yang Fen, Zhao Qing, *et al.*. The boresight calibration of laser POS system [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2006, 31(12): 1039-1043.
袁修孝, 杨芬, 赵青, 等. 机载 POS 系统视准轴误差检校[J]. 武汉大学学报信息科学版, 2006, 31(12): 1039-1043.
- A F Habib, A P Kersting, Z Ruifang, *et al.*. LiDAR strip adjustment using conjugate linear features in overlapping strips [J]. Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2008. 385-390.
- Wang Liying, Song Weidong, Li Haitao, *et al.*. Vehicle-borne laser scanning system based on Tmatch software calibration [J]. Science of Survey and Mapping, 2010, 35(8): 80-83.
王丽英, 宋伟东, 李海涛, 等. 基于 Tmatch 软件的车载激光扫描系统检校[J]. 测绘科学, 2010, 35(8): 80-83.

- Wang Chen, M Menenti, M P Stoll, *et al.*. Error analysis & correction of airborne lidar data [J]. J Remote Sensing, 2007, 11(3): 390-396.
王成, M Menenti, M P Stoll, 等. 机载激光雷达的误差分析及校正[J]. 遥感学报, 2007, 11(3): 390-396.
- Wang Liying, Song Weidong. Airborne LiDAR point cloud strip adjustment method [J]. J Wuhan University, Information of Sciences, 2012, 37(7): 814-817.
王丽英, 宋伟东. 机载雷达点云航带平差方法研究[J]. 武汉大学学报, 信息科学版, 2012, 37(7): 814-817.
- Wang Liying, Song Weidong. Least Z-difference strip adjustment of airborne LiDAR data [J]. J Image and Graphics, 2012, 17(2): 279-285.
王丽英, 宋伟东. 机载雷达数据的 LZD 航带平差[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(2): 279-285.
- Lai Xudong. Airborne Laser Radar Basic Principle and Application [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2010. 221-236.
赖旭东. 机载激光雷达基础原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010. 221-236.
- Habib Ayman, Ki In Bang, Paula Kersting Ana, *et al.*. Error budget of LiDAR systems and quality control of the derived data [J]. Photogrammetric Engineering Remote Sensing, 2009. 75(9): 1093-1108.
- Habib Ayman, Ki In Bang, Paula Kersting Ana, *et al.*. Alternative methodologies for LiDAR system calibration [J]. Remote Sensing, 2010, 2(3): 874-907.
- P J Besl, N D Mckay. A method for registration of 3-D shapes [J]. IEEE Transaction on Pattern Recognition and Machine Intellegence, 1992, 14(2): 239-256.
- Rusinkiewicz Szymon, Levoy M. Efficient variants of the ICP algorithm [C]. 3D Digital Imaging and Modeling, 2001. 145-152.
- Xie Zexiao, Xu Shang. A survey on the ICP algorithm and its variants in registration of 3D point clouds [J]. Journal of Ocean University of China, 2010, 40(1): 99-103.
解则晓, 徐尚. 三维点云数据拼接中 ICP 及其改进算法研究综述[J]. 中国海洋大学学报, 2010, 40(1): 99-103.
- Zhu Yanjuan, Zhou Laishui, Zhang Liyan. Registration of scattered cloud data [J]. Journal of Computer Aided Design and Graphic Images, 2006, 18(4): 475-480.
朱延娟, 周来水, 张丽艳. 散乱点云数据配准算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2006, 18(4): 475-480.
- Dai Jinglan, Chen Zhiyang, Ye Xiuzi. The application of ICP algorithm in point cloud alignment [J]. Journal Image and Graphics, 2007, 12(3): 517-521.
戴静兰, 陈致杨, 叶修梓. ICP 算法在点云配准中的应用[J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(3): 517-521.
- Yang Xianhui, Wang Huinan. Application research of ICP algorithm in 3D point cloud alignment [J]. The Computer Simulation, 2010, 27(8): 235-238.
杨现辉, 王慧南. ICP 算法在 3D 点云配准中的应用研究[J]. 计算机仿真, 2010, 27(8): 235-238.
- A Nüchter, K Lingemann, J Hertzberg. Cached k-d tree search for ICP algorithms [C]. 3D Digital Imaging and Modeling, 2007. 419-426.
- Zhang Baoming, Gong Zhihui, Guo Haitao. Photogrammetry

- [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2007. 26—28.
张保明, 龚志辉, 郭海涛. 摄影测量学[M]. 北京: 测绘出版社, 2007. 26—28.
- 19 Zuo Chao, Lu Min, Tan Zhiguo, *et al.*. A novel algorithm for registration of point clouds [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(12): 1214004.
左 超, 鲁 敏, 谭志国, 等. 一种新的点云拼接算法研究[J]. 中国激光, 2012, 39(12): 1214004.
- 20 Shao Jie, Zhang Aiwu, Wang Shumin, *et al.*. Research on fusion of 3D laser point clouds and CCD image [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0514001.
邵 杰, 张爱武, 王书民, 等. 三维激光点云与 CCD 影像融合研究[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0514001

栏目编辑:何卓铭