

机载三维激光成像系统雷达数据自动化 航带调整方法研究

殷国伟,张汉德

(北海航空支队,中国海监,国家海洋局,青岛 266033)

摘要:激光雷达点云数据的航带调整,类似于传统航空摄影测量中的航带拼接,其目的就是消除航带点云数据中存在的系统误差,使航带之间相应的地物进行匹配,从而提高激光点云数据的平面以及高程精度。

本文讨论了一种基于最小二乘法的自动化航带调整方法,并使用现有的手动调整方法与自动化调整方法的结果精度进行了对比,证明自动化调整方法不但能够大大提高设备检校工作的效率,并且精度优于现有的手动调整方法,完全满足后处理的要求。

关键词:三维激光成像系统;LIDAR;航带调整;最小二乘法

doi:10.3969/j.issn.1000-3177.2011.05.016

中图分类号:TP79 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-3177(2011)117-0090-05

A Study on Automatic Laser Strip Adjustment of Airborne Laser System

YIN Guo-wei,ZHANG Han-de

(Aerial Detachment of North China Sea,China Marine Surveillance,State Oceanic Administration,Qingdao 266033)

Abstract: Similar to the strip matching in the traditional aerial photogrammetry, the strip adjustment of laser point clouds is to eliminate the systematic errors in the Airborne Laser System (ALS) and to match the same ground features in different laser strips, so finally to improve the plane and height accuracy of the laser data.

Based on the least square matching, an automatic method of laser strip adjustment is studied in this paper. Compared with the manual method of adjustment, which is available in practice, the automatic laser strip adjustment discussed here is proved to be not only more efficient, but also more precise than the manual one, and totally meet the accuracy requirement of post processing.

Key words: Airborne Laser System (ALS); LIDAR; flightline adjustments; least square matching

1 引言

机载激光扫描获取地面三维数据的 LIDAR 系统是最近几年出现的高新技术系统之一,可以产生地球表面模型以及地面目标的三维数字模型,目前在遥感、摄影测量、数字地球、数字城市、林业等领域,LIDAR 系统正在成为一个常规的作业工具。机载激光扫描系统地面三维数据的获取方法比传统的测量方法在产品制作过程中具有外业成本和后处理成本低的优点。目前广大用户急需低成本、高密度、

快速度、高精度的数字高程模型或数字表面模型,机载 LIDAR 技术正好满足这个需求,使它成为各种测量应用中深受欢迎的一项高新技术。激光相比较传统的摄影测量还有其他的优点(例如在森林地区的穿透),因此改善数据的精度以及消除重叠区域的误差就成为了使用雷达数据必要的前提条件。

三维激光成像系统中,误差包括系统误差和随机误差。由于随机误差的无规律性,即使一个十分完美的误差模型也不能保证完全消除随机误差^[1]。尽管人们对激光航带数据之间的调整越来越感兴

收稿日期:2010-08-06 修订日期:2011-01-10

基金项目:908 专项海岛海岸带航空遥感调查与研究(908-01-HY);国家海洋局青年科技基金项目(2008431)。

作者简介:殷国伟(1980~),男,主要从事雷达数据采集、系统校准和雷达数据后处理方面的研究。

E-mail: yinguowei_2006@yahoo.com.cn

— 90 —

趣,但是这方面的工作进行的很有限,其中主要方法有:①类似于传统航空摄影测量学中的影像匹配方法,寻找重叠部分的同名点,利用数学模型进行匹配^[2],这种方法虽然能够得到理想的结果,但是需要人工选择大量的同名点,毕竟雷达点云数据与影像不同,可以人工识别的同名点数量很少,并且在测量同名点的过程中会引入人工误差^[3],另外需要野外控制点,从而大大增加了工作的复杂性;②基于雷达点云数据中特殊的地形特征矢量进行调整^[4],这种方法需要选择一个合适的检校场地,有合适的特征地物,包括一处尖顶房屋或者一条沟渠^[5],使用数学函数对特征地物进行建模,例如可以使用余弦函数 $X\cos\alpha + Y\sin\alpha = d$ 来表示尖顶房屋^[6],其中 α 是屋脊的方向, d 是屋脊到坐标原点的距离。然而这种方法对检校场要求特别高,需要有足够大面积的尖顶房屋或者沟渠,并且在前期数据采集当中,空域协调受到很大的约束。当然这种方法的工作量已经大大减少,精度也会随之提高,能够满足后处理精度的要求,目前航带调整中主要使用的就是这种方法。本文中讨论的航带调整方法,目的是在不使用地面控制点的情况下,使用相邻或者交叉航线中重叠的部分对航线数据进行调整,消除其中的系统误差,提高激光点数据的平面和高程精度,并与已有的航带调整方法的结果精度进行比较,证明了自动化方法不但能够大大提高设备检校工作的效率,并且精度优于现有的手动调整方法,完全满足后处理的要求,最后对消除随机误差提出了几点建设性的意见。

2 自动化航带调整方法研究

一般来说,三维激光雷达航带调整过程中需要进行校正的系统误差参数包括很多,主要有 Intensity Based Range Correction (IBRC, 基于反射强度的距离校正)、Torsion (扭矩校正)、Encoder (译码电路校正)、Range (距离计算误差校正)、Roll (侧滚角校正)、Pitch (俯仰角校正)、Heading (航向角校正)。由于 IBRC、Torsion、Encoder、Range 这几个参数所产生的误差与机载设备电子元件的物理特性有关,并且在一段相对较长的时间内保持恒定,而 Roll、Pitch 和 Heading 与设备的安装情况有关,每次拆装设备都需要重新进行误差校正,所以本文所提到的激光雷达航带调整的系统参数只是针对 Roll、Pitch 和 Heading 这 3 个相对误差来说的,频繁地拆装设备大大加重了检校工作的复杂程度,因此本文

研究的自动化航带调整方法能够在提高精度的基础上,大大提高检校工作的效率。

2.1 航带调整的人工测量方法

2.1.1 测滚角 Roll 的调整

激光雷达系统坐标系和惯性导航系统 IMU 坐标系之间绕 X 轴(飞机机头方向)之间的夹角称为测滚角误差。由于这个角度误差的存在,当测滚角误差为正时,会使一条航带数据顺时针移动;反之,航带数据逆时针移动,同一条航带数据就会一边高一边低^[7](如图 1)。测滚表误差的调整方法是通过测量两条剖面线的高程 Z 、误差 d ,除以剖面线的长度来获得测滚角 Roll 的补偿值 α (弧度) $= d/2L$ 。

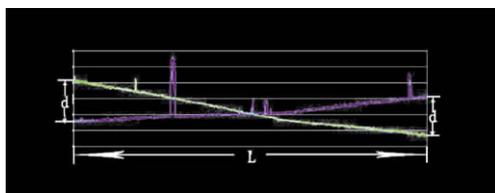


图 1 测滚角误差剖面图

2.1.2 俯仰角 Pitch 的调整

激光雷达坐标系和惯性导航系统 IMU 坐标系之间绕 Y 轴(飞机右舷)方向之间的夹角称为俯仰角误差,在沿航线的部分影响最明显。由于这个角度误差的存在,当俯仰角误差为正时,会使航带数据向前移动;反之,航带数据向后移动^[7]。如果不考虑使用影像,只使用激光点来进行补偿,不能使用平坦的区域,而需要使用有坡度的地面或者有坡度的建筑物,并且飞行高度越高,影响越明显(如图 2)。俯仰角误差的调整是通过测量这两个误差点的水平误差 d ,除以飞行高度 H 来获得俯仰角 Pitch 的补偿值 β (弧度) $= d/2H$ 。

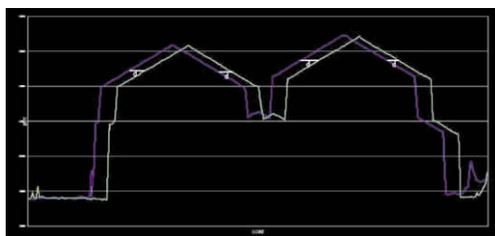


图 2 俯仰角误差剖面图

2.1.3 航向角 Heading 的调整

激光雷达坐标系和惯性导航系统 IMU 坐标系之间绕 Z 轴(飞机正下方)方向之间的夹角称为航向角误差,以弧度为单位。由于这个角度误差的存在,当航向角误差为正时,地面的扫描线左边向前移动,右边向后移动;反之,地面的扫描线左边向后移动,右边向前移动,而飞机正下方不会因为航向角误

差的存在而受影响^[7]。同样,由于误差出现在前后位置上,如果不考虑使用影像,只使用激光点来进行补偿的话,不能使用平坦的区域,而需要使用有坡度的地面或者有坡度的建筑物(如图3)。航向角误差的调整是通过测量这两个点之间的误差 d ,除以两条航线之间的距离 H 来获得航向角 Heading 的补偿值 γ (弧度) $= d/H$ 。

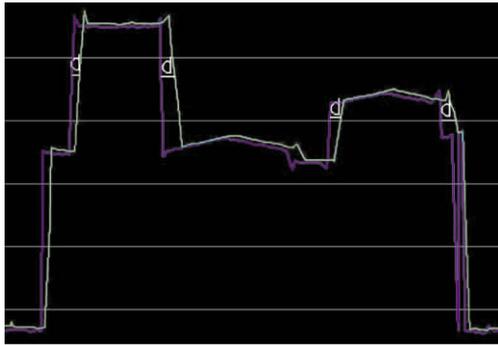


图3 航向角误差剖面图

在上述3个角度误差的人工调整过程中,需要分别测量出3个角度对同一个地物产生的距离误差,并且大部分情况下,同一个角度的补偿过程中,距离误差需要测量几次,然后取平均值,这就会引入手动测量的误差,降低了检校的精度。并且在人工调整过程中,由于要选择误差效果最明显的特殊地物(如平坦公路和尖顶房屋等)进行测量,因此只使用了两条航带重叠部分中约1m宽的一个剖面,从而忽略了航带中其他部分的数据所提供的价值。为了提高航带调整的精度,充分利用所有的数据进行全面的检校,提高数据的利用效率,本文提出了基于最小二乘法的自动化航带调整方法。

2.2 基于最小二乘法的自动化航带调整方法

基于最小二乘法的自动化航带调整方法,其原理是首先根据特定的滤波算法,剔除建筑物、沟渠、植被等有高程突变特征的地物,分别建立两条航带比较光滑的表面,由于现在已有很多的滤波算法,这里不再赘述。

经过滤波之后,把地面点进行曲面拟合,也就是把每个地面点按照其坐标 (x, y, z) 根据公式(1)拟合成一个数学模型 (x, y, z) 为行向量)。

$$Z(x, y) = \sum_{i=0}^{p-1} \sum_{j=0}^{q-1} aa_{ij} x^i y^j \quad (1)$$

其中 aa 为 $p \times q$ 的系数矩阵,其拟合误差 S 为:

$$S = \sum_{g=1}^n \omega(x_i, y_j) \left[\sum_{i=0}^{p-1} \sum_{j=0}^{q-1} aa_{ij} x^i y^j - f(x_i, y_j) \right]^2 \quad (2)$$

其中 $\omega(x, y)$ 为权函数,默认为1。根据最小二乘法原理,要求出误差 S 的最小值, $aa_{00} \dots aa_{p-1q-1}$

必须满足方程组

$$\frac{\partial S}{\partial a_{ij}} = 0 (ij = 0 \dots pq) \quad (3)$$

对 S 函数求偏导,移项之后得

$$\begin{pmatrix} (\varphi_{00}, \varphi_{00}) & (\varphi_{00}, \varphi_{01}) & \dots & (\varphi_{00}, \varphi_{p-1q-1}) \\ \vdots & \ddots & & \vdots \\ (\varphi_{p-1q-1}, \varphi_{00}) & (\varphi_{p-1q-1}, \varphi_{01}) & \dots & (\varphi_{p-1q-1}, \varphi_{p-1q-1}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} aa_{00} \\ \vdots \\ aa_{p-1q-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (\varphi_{00}, f) \\ \vdots \\ (\varphi_{p-1q-1}, f) \end{pmatrix} \quad (4)$$

其中 $\varphi_{00} = x^0 y^0, \varphi_{01} = x^0 y^1, \dots, \varphi_{p-1q-1} = x^{p-1} y^{q-1}$,也就是 $A * a_{\underline{n}} = B$ 。 A 为 pq 阶矩阵, function $A = \text{leftmatrix}(x, p, y, q)$; B 为长为 pq 的列矩阵, function $B = \text{rightmatrix}(x, p, y, q, z)$,这样就可以算出列矩阵 $a_{\underline{n}}$,然后转化成 aa ,从而对表面模型就行数学拟合。

本文中用的是二次曲面方程,即 $p=q=3$,权函数取1(如公式(5)),来表示航带数据的数学模型:

$$Z = f(X, Y) = aX^2 + bY^2 + cXY + dX + eY + f \quad (5)$$

再根据最小二乘法原理(公式(3))解算出距离两个误差平面残差平方和最小的共平面,最后使用2.1中提到的调整方法的公式自动计算出系统误差的校正值。

需要注意的是,在实际应用中,最小误差平方和使用的是竖直误差,而不是垂直误差,如图4所示,这样就使得在曲面方程求解过程中,对于每一个误差 Δz ,有独立的 (x, y) 坐标与之相对应,能够获得比使用垂直误差更简单的分析模型。在任何情况下,对于一定数量的噪声数据,垂直误差和竖直误差的差别非常小^[8]。

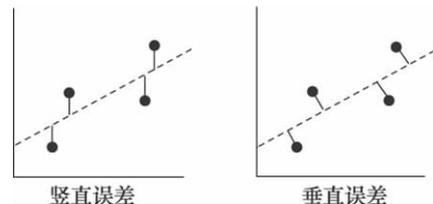


图4 竖直误差与垂直误差

由于人工测量的限制,人工航带调整方法的误差测量只能取平均值,而本文使用的最小二乘法,借助于计算机编程语言,既可以寻找残差平方和最小的共平面,使测量出来的系统误差更具可信性,又可以建立表面方程,能够对整个航带数据进行整体的调整,更有利于数据的后期使用,提高了检校的精度和数据的利用效率,并降低了工作量和复杂程度。

3 实验结果分析

两种航带调整方法的原理很相似,不同之处在于人工调整方法中的误差测量是基于特殊地物剖面中一维线的人工测量,误差测量取平均值;而自动化调整方法的误差测量是基于整条航带数据中二维面的自动化测量,误差测量取距离残差平方和最小的共平面的垂直距离误差。因此在进行自动化调整过程中也同样需要有坡度的地物,但是不能是建筑物,因为高程突变的地物在地面点滤波的时候会被滤除掉,所以在前期的数据采集阶段,检校飞行区域内包含山坡即可,这样在前期数据采集过程中会大大降低对检校区域的要求,提高了空域调配的灵活性。本文使用在浙江舟山机场附近区域采集到的实测数据进行试验,以验证自动化航带调整方法的适用性和有效性。

该实验区既有适合人工调整方法所需要的特殊地物,例如有一定长度和宽度的平坦公路和一定面积的尖顶房屋等,又有适合自动化调整所需要的山坡,便于两组结果的对比,同时使用了地面检核点,用于验证两种航带调整方法结果的绝对精度。

3.1 手动航带调整方法

数据采集的飞行航线如图 5,其中 9 条实际飞行航线,数字表示飞行顺序。用于 3 个系统误差的测量,白色显示的是使用地面 GPS 地面移动站采集到的 1758 个精度检核点,在长约 2.5km 的机场跑道两侧每隔 5m 左右均匀分布,用于验证调整结果的最终绝对精度。

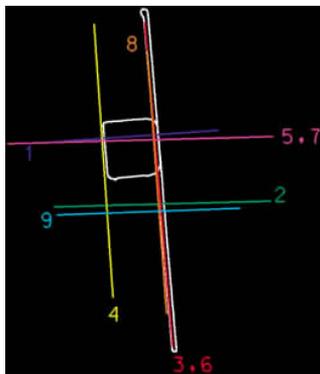


图 5 手动调整方法数据采集航线图

经过后期处理和手动测量误差之后,能够计算出 3 个系统误差的调整值,如表 1。

表 1 手动测量调整结果

	Roll(弧度)	Pitch(弧度)	Heading(弧度)
原始值	-0.004	0.004	0.001
调整值	-0.00355	0.00487603	0.00190004

把航带调整之后的数据与地面采集到的精度检核点进行对比,就能够计算出经过调整之后测区内每条航线数据的绝对误差(如表 2),以及整个测区数据的绝对误差(如表 3)。

表 2 手动调整后每条航线数据地面检核结果

航线编号	匹配点数	平均误差(m)	最大误差(m)	最小误差(m)	均方根(m)	标准差
64413	1082	-0.027	0.081	-0.081	0.05	0.042
65738	625	0.029	0.080	-0.059	0.035	0.02
70523	1743	0.01	0.066	-0.052	0.021	0.018
71445	894	0.055	0.095	-0.038	0.051	0.021
72205	1048	0.016	0.098	-0.058	0.033	0.029
72945	1404	0.043	0.096	-0.006	0.042	0.019
73746	1046	-0.043	0.044	-0.089	0.047	0.024
74357	1482	-0.044	0.05	-0.098	0.05	0.026
75151	657	-0.032	0.087	-0.085	0.054	0.046

表 3 手动调整后测区数据地面检核结果

平均高程误差(m)	+0.008
最小高程误差(m)	-0.089
最大高程误差(m)	+0.098
均方根误差(m)	0.038
标准差	0.032

3.2 自动化航带调整方法

相对于手动调整方法来说,自动化检校方法的航线设计要简单的多,检校场的限制条件也比较少,只需要有一处山坡就行,所以选择了一块 2km×2km 范围的区域,设计了 6 条交叉航线,飞行航线如图 6。

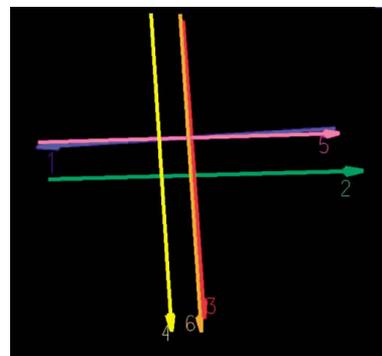


图 6 自动化调整方法数据采集航线图

经过后期处理和自动测量误差之后,能够计算出 3 个系统误差的调整值,如表 4。

表 4 自动化航带调整结果

	Roll(弧度)	Pitch(弧度)	Heading(弧度)
原始值	-0.004	0.004	0.001
调整值	-0.0035535	0.004680973	0.00166535

同样,把使用自动化调整方法得到的结果应用到前一组数据中,并且与地面采集到的精度检核点进行对比,就能够计算出经过自动化方法调整之后测区内每条航线数据的绝对误差(如表 5),以及整个测区数据的绝对误差(如表 6):

表 5 自动化调整后每条航线数据地面检核结果

航线编号	匹配点数	平均误差(m)	最大误差(m)	最小误差(m)	均方根(m)	标准差
64413	1082	-0.014	0.062	-0.081	0.041	0.039
65738	625	0.029	0.080	-0.042	0.034	0.018
70523	1743	0.005	0.066	-0.044	0.018	0.017
71445	894	0.047	0.088	-0.028	0.049	0.02
72205	1048	0.012	0.086	-0.058	0.029	0.027
72945	1404	0.038	0.095	-0.011	0.037	0.018
73746	1046	-0.039	0.024	-0.081	0.046	0.018
74357	1482	-0.036	0.04	-0.085	0.044	0.025
75151	657	-0.03	0.085	-0.075	0.05	0.038

表 6 自动化调整后整个测区数据地面检核结果

平均高程误差(m)	+0.001
最小高程误差(m)	-0.085
最大高程误差(m)	+0.095
均方根误差(m)	0.030
标准差	0.031

3.3 试验结果分析

对比上面两种航带调整方法的精度分析结果可以看出,尽管在有的航线中,自动化调整方法的最大误差和最小误差绝对值比手动调整方法的误差绝对值要大(这也可能是由于滤波算法引入误差的原因),但是在经过了自动化调整之后,每条航带数据的各项误差统计值都得到了不同程度的提高。另外,从整个测区数据的整体质量上来看,手动检校的精度虽然很高,平均高程误差为 8mm,但是自动化

检校的精度可以达到 1mm,大大提高了数据的高程精度,均方根也从 0.38 下降到了 0.30,标准差从 0.32 下降到了 0.31,误差精度各方面的统计指标都得到了提高。因此,自动化航带调整方法不仅在前期数据采集过程中能够大大降低对检校区域内特殊地物的要求,节省航线设计的时间,而且在后期处理中也能够大大提高检校的精度及其自动化程度。

4 结束语

本文所讨论的自动化航带调整方法针对的是三维激光成像系统中主要的 3 个系统相对误差,即测滚角、俯仰角和航向角,对于其他的随机误差,例如 GPS 测量误差、IMU 测量误差以及激光测距系统中的随机误差不是这篇文章讨论的范围,但是实际工作中需要对这些随机误差进行处理,本文提出几点建议:

①消除随机误差仍然需要地面控制点,寻找合适的地面控制点来修正激光点云数据的平面和高程精度。

②由于雷达数据中基本上没有可以人工识别的地物,这样就需要对控制点有一定的要求。首先需要反射率与周围地物能够明显分开,例如斑马线等反射率较强的物体;其次,对于一个控制点来说,在控制点位置上不一定会有激光扫描数据,所以需要使用合理的方法对控制点周围的点进行内插,来获取控制点位置比较可信的高程信息。

③本文着眼于激光数据自动化航带调整方法的研究,并使用高程精度这个参数对调整的结果进行评价。为了能够控制激光点数据的平面精度,只使用控制点的高程信息是不够的,必要的时候需要使用控制点的反射强度信息,在一个指定大小的窗口中对激光点的反射强度信息进行内插,根据内插的结果对激光点的平面精度进行修正。

参考文献

[1] Filin, S., Vosselman, G. . Adjustment of airborne laser altimetry strips[C]//In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. 2004.

[2] Crombaghs, M. J. E. , R. Brügelmann, E. J. de Min. On the adjustment of overlapping strips of laser altimeter height data [C]//In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. 2000, 33(B3/1): 224-231.

[3] Bretar, F. , Pierrot-Deseilligny, M. , Roux, M. . Estimating image accuracy of airborne laser data with local 3D-offsets [C]//International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. 2008, 34(3-W13): 20-26.

[4] 余涛,马杰,龚俊斌,田金文. 一种基于激光成像雷达的特征矢量匹配方法[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(5).

[5] Briese, C. Breakline modelling from airborne laser scanner data[D]. TU Vienna, 2004.

[6] Filin, S. . A laser strip adjustment model for the removal of systematic errors in airborne laser data[C]//In: Proceedings 3rd International Workshop on Mapping Geo-Surficial Processes using Laser Altimetry. 2002.

[7] ALS Calibration. pdf. Leica Geosystems Custom Support[Z]. March 2008

[8] Lawson, C. , Hanson, R. Solving Least Squares Problems[M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1974.