

机载三维激光扫描的实时一体化摄影测量及数据处理

郑团结¹ 缪剑¹ 高德俊¹ 张云彬²

(1. 总参测绘信息技术总站 西安 710054; 2. 总参测绘局 北京 10088)

摘要: 结合机载三维激光扫描实时一体化技术进行研究, 从系统设计、航测规划、空中测量、地面监控、质量检查、DEM 重采样等核心环节按“实时一体化”要求进行了详细设计和深入实践。从而为实时一体化测量提供了前中后期的配套模块, 为机载三维激光扫描具体应用提供了详细的应用方案, 为快速精确获取全方位、立体化地理数据提供了技术支持。实验表明, 该方案能最大程度地满足军事地理数据的实时获取要求。

关键词: 激光雷达 IMU/GPS 航测规划 内插重采样

1 引言

随着激光测距技术、IMU/GPS 制导技术在设备制造、自动控制、军事工业等高端领域的具体应用, 利用传统航空、航天设备获取地面测量数据逐渐不能满足军事地理数据保障的实时、快速、精确、立体等发展要求。国际著名厂商美国徕卡、OPTECH、德国 IGI、奥地利 RIGEL 等公司先后推出了各自的机载三维激光扫描设备。

由于低端激光雷达和中、高端三维激光扫描设备的具体应用, 传统航测规划、质量检查、数据处理的方式、手段、设备、平台都面临兼容性等实际问题。如何在现有设备、环境的前提下最大程度满足实时空中测量的时间和精度要求, 从而为战场环境、动态检测、灾难控制等地形突变提供高时效、高精度、全方位的地理数据, 这一严峻课题责无旁贷地摆在我们面前。

2 机载激光雷达

机载激光雷达是将光电技术、惯性测量与 GPS 复合姿态测量技术、激光扫描测距技术、高精度飞行器导航技术、图像处理技术高度集成的软硬件系统。硬件部分主要由三维激光扫描仪、系统控制器、IMU/GPS、控制计算机组成; 软件部分主要包括航测规划、航测控制、数据处理等配套模块。

机载激光雷达测量精度取决于激光雷达的激光器的校对和标定、飞机的飞行高度和速度、GPS/IMU 系统的精度、激光器的类型、斑点的大小等。

2.1 机载激光雷达硬件组成

2.1.1 扫描仪组件

扫描仪组件主要包括激光发射器、激光接收器、机械组件、扫描镜、窗口、接口板等。

激光器的种类较多, 对于不同用途所选择的激光器各不相同。

测量普通地面地形地貌时, 多数使用脉冲近红外激光器(波长在 900~1550 nm); 测量水下地形地貌时, 需要使用大功率的绿光或蓝光激光器。

大面积的高精度测量(如森林、城市等), 可以使用德国 IGI 公司和奥地利 RIEGL 公司联合制造的 LiteMapper 5600。它的激光器精度高达 2mm, 并且具备获取无穷次回波和数字波矢化的特点, 因此能够获取有关植被、路面、建筑物边沿、斜坡等表面的详细细节。由于它使用的是安全等级为一级的激光器, 所以不管是超低空、低空还是中空高空测量, 都不会对人体造成伤害。

中等精度的大面积测量, 可以使用徕卡公司的 ALS50 或 OPTECH 的 ALTM3100, 该激光器分辨率 2cm 左右, 近距离时会对于人、动物造成伤害, 因此, 当飞行高度低于 800 米时, 必须对激光器的输出激光信号强度进行衰减。即使如此, 一般也不能在低于 400 米高度使用。

低精度中小项目测量(如公路、铁路、电力)时, 一般采用功率较小的激光器, 这类激光器虽然测量精度较低, 但相比前面的设备价格相对便宜, 而且由于功率较小, 所以对人和动物的伤害较小。

2.1.2 系统控制器

系统控制器控制激光发生器进行测距。激光发生器产生电信号后, 开始驱动光学扫描头, 控制器读取已编码的扫描角、GPS 时标, 将角度、距离等数据统一格式并进行记录。

2.1.3 IMU/GPS

IMU/GPS 是主要用于航空、航天、航海领域的惯性测量与 GPS 复合姿态测量设备, 该设备能够输出激光雷达、相机等多种传感器的空间位置和姿态数据。

目前, 机载三维激光扫描设备中, 徕卡和 OPTECH 的 IMU/GPS 采用的是加拿大 Applanix 公司的 POS/AV 510-DG、POS/AV 410-DG 和 POS/AV 310-DG, 它们全是基于美国 Litton(雷盾)公司的 LR86 型号而改制的(机械式水平对准陀螺仪, dry-tuned gyro)。

美国和欧洲的许多激光雷达也使用德国 IGI 公司的 IMU-IIId 和美国 Litton 公司的 LN200, 该设备

基于光纤陀螺原理和迈克尔逊干涉测量光程差原理工作, IGI 一度占据飞机导航领域较大份额, 该公司 IMU/GPS 在精度、性能等方面已经有所超出 Applanix 产品。

IMU 在国外被大量使用在卫星、航空遥感及军事领域, 如 IGI 的 IMU 就用在德国的豹式坦克上, 通过它的定位、定向, 使得行进中的坦克可以随时发射炮火。

加拿大的 Applanix 公司进口许可要经过美国国务院、国防部等单位的批准, 申请的难度和时间以及不确定性较大, 另外 Applanix 公司对中国出口的 IMU 与在欧洲和北美使用的 POS/AV 510-DG 不一样, 称为 AIMU, 其光纤长度比标准型短的多, 约 200 米, 而 IGI 的 IMU 光纤长度为 500 米, 另外 AIMU 的测量频率小于 200 赫兹, 功能远远不如 510-DG。

另外不论是 IGI 的 IMU-IIId, 还是 Applanix 的 AIMU, 为了防止被用于军事, 都添加了特殊的装置, 如果加速度增大, 数据采集会自动停止。

2.1.4 控制/显示设备

控制/显示设备包括激光发射指标器、音频告警器、电路熔断器、系统诊断数据输出、控制接口等。

3 航测规划系统

航测规划系统包括范围确定、航线设计、地面控制、数据转换、可视规划等程序模块。

在正式的空中测量之前, 需要快速确定航测范围并进行航线设计。确定扫描区域需要相应的航测地图, 航测地图获取过程包括地图栅格化、几何纠正、影像重采样、地图载入。

徕卡和 OPTECH 一般建议沿航测任务区域外围飞一个 8 字型标定路线。实际作业中, 考虑到飞机起降及测量的成本, 我们利用 GPS 地面测量车进行范围确定和地面控制, 就是用 GPS 测量车沿测量区域外沿行驶一周, 将接收的 GPS 数据用于航线设计。

下面是 GPS 地面测量车沿某扫描范围采集的部分经纬度数据:

- 1, (109.051265778406E, 34.1857298102337N)
- 2, (109.031204119965E, 34.1676726013772N)
- 3, (108.960367233881E, 34.1570005298314N)
- 4, (108.907828510962E, 34.1539099399024N)

.....

记录经纬度数据的同时需要把该经纬度数据与地面实际位置严格对应, 因为在后期数据处理中经纬度数据需要用于“相对定向”, 从而为生成正射影像提供依据。

经过对航线设计快速计算, 部分航线数据如下:

- 9, (108.874200883786E, 34.2214107544383N)
- 10, (109.040017728664E, 34.2201166232102N)
- 11, (109.037121388845E, 34.2236808976947N)
- 12, (108.875733256502E, 34.2249396280251N)

.....

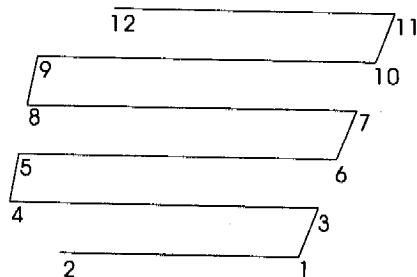


图 1 航线图形可视化

4 航测控制系统

航测控制系统由航测控制软件、质量检查软件组成。

4.1 航测控制软件

航测控制软件通过图形界面, 根据飞控系统输出的信息, 实时在地图上精确标定飞机的当前位置、飞行路线和飞行轨迹; 速度表, 高度表, 地平仪实时显示出当前速度、高度和飞行姿态, 地图窗口具有移动和缩放功能, 可以方便观察飞机的飞行状况。

通过航测控制系统, 飞行同时可以查看和修改飞机的轨迹、任务和飞行参数, 可用键盘或鼠标直接输入任务航点, 寻找和修改以前保存的任务航点文件, 以及在地图上直接标定航点位置, 大大增强了对飞机的实时控制性能。

航测控制软件具有以下功能:

- ▶支持各种文件格式的电子地图;
- ▶可以始终保持飞机在地图窗口中心;
- ▶窗口下方显示信息: 目标航点号、目标距离、任务计时器;
- ▶地图缩放键、窗口滑动。可手动改变地图大小和显示区域;
- ▶航点输入分文件输入和键盘输入两种方式;
- ▶可以输入或改变高度、速度、航点坐标和控制模式;
- ▶航点列表。用于调出和保存各任务航点、航迹文件;
- ▶航行数据记录器。用于保存飞行期间所有航行数据。

4.2 航测质量检查

航测质量检查主要包括航测区域可视化、有效测量面积统计、漏测分析。该模块既可以单独使用,

也可以挂接于 AutoCAD、Microstation 等通用软件。航测区域可视化依据扫描设备的空间坐标、扫描姿态、扫描设备参数按照严密的数学公式编程实现,基本符合实际情况;有效测量面积统计依据测量区域计算数据进行,由于部分区域被二次或三次测量,实际测量的有效面积小于单位时间测量面积与测量时间的乘积。有效面积统计按数理统计的并集原理进行计算。

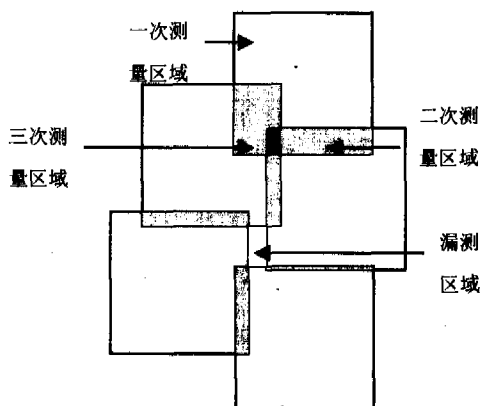


图2 航空摄影区域示意图

漏测分析主要用于决定是否补测并如何补测。

5 数据处理系统

机载三维激光扫描仪可以快速获取高精度 DTM, 实验中我们使用 GPS 地面测量车通过 GPS 差分快速获取高精度地面控制点, 然后利用地面控制点对 DTM 进行整体纠正, 从而使 DTM 相对精度和绝对精度均能满足使用要求, 最后利用纠正后的 DTM 将航空影像纠正为正射影像。由于获得的 DTM 和正射影像数据都是 WGS84 坐标系下的高斯投影数据, 所以需要经过内插重采样才能获得满足需要的 DEM、DSM 和 DOM。

5.1 DTM 数据处理

机载三维激光扫描仪获得的 DTM 是包含地物、树冠高程的表面模型, 该表面模型数据为一组近似矩形规则格网的离散坐标, 一般采用 WGS84 坐标系下的高斯投影。该数据直接可以作为产品使用, 但实际应用中我们常常采用北京 54 坐标系或西安 80 坐标系, 这就需要快速精确的数据转换, 另外建立 DEM 常常需要进行光滑采样, 获取 DSM 往往需要进行特征重采样, 不同数据的处理方法各不相同。

5.1.1 坐标系及投影转换

我国常用坐标系主要有北京 54 坐标系、西安 80 坐标系、WGS84 坐标系。这三种坐标系采用的椭球和高程基准各不相同, 所以重采样的重要一步, 就是在坐标系之间建立严密的数学关系。

DTM 数据记录的是相应坐标系下的空间坐标, 一

般该坐标值都是采用高斯投影的地面坐标, 不同坐标系之间的数据转换实质是将原空间坐标转换到目标空间坐标的过程, 在重采样方案里, 这个过程被称为“直接法”。

坐标系之间的数据转换依赖相应的主要数学关系。一是地面坐标 (x, y) 与大地坐标 (经度、纬度) 之间的数学关系, 利用的是高斯投影正反算公式; 二是大地坐标 (经度、纬度) 与地心空间坐标系 (X, Y, Z) 之间的数学关系, 使用的是极坐标与空间直角坐标之间的换算公式; 三是两种地心空间坐标系之间的平移、旋转和缩放, 利用的是矩阵变换公式。具体公式不再详细叙述。

5.1.2 DTM 光滑采样

为了满足数字高程模型的光滑需要, 我们采用了双三次曲面法进行 DTM 内插重采样。

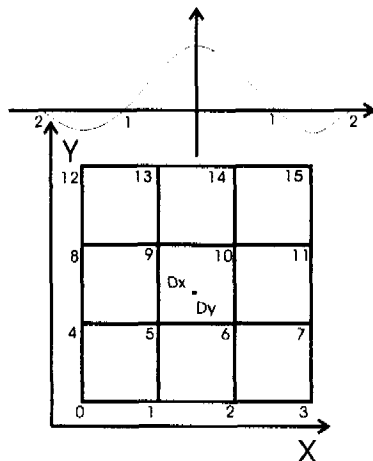


图3 双三次内插示意图

双三次曲面法虽然属于局部函数内插, 即在每一个方格网内拟合一个三次曲面, 但由于考虑了一阶偏导数与二阶混合导数, 因而能保证相邻曲面之间的连续与光滑。

双三次曲面法用一个三次重采样函数近似表示曲面函数, 其三次曲面方程式可以利用阵列代数式表达为

$$Z = \begin{bmatrix} 1 & dx & dx^2 & dx^3 \end{bmatrix} \cdot S \cdot \begin{bmatrix} 1 & dy & dy^2 & dy^3 \end{bmatrix}^T \quad \text{其中}$$

$S = A \cdot Z \cdot A^T$, Z 为 4×4 的高程阵列。

各点权值函数公式为:

$$W_x = \begin{bmatrix} 1 & dx & dx^2 & dx^3 \end{bmatrix} A \quad W_y^T = \begin{bmatrix} 1 & dy & dy^2 & dy^3 \end{bmatrix} A$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -3 & -2 & 3 & -1 \\ 2 & 1 & -2 & 1 \end{bmatrix}, \quad Z = \begin{bmatrix} z0 & z1 & z2 & z3 \\ z4 & z5 & z6 & z7 \\ z8 & z9 & z10 & z11 \\ z12 & z13 & z14 & z15 \end{bmatrix}$$

推算可得插值:

$$Z' = W_x^T \cdot Z \cdot W_y = \begin{bmatrix} 1 & dx & dx^2 & dx^3 \end{bmatrix} \\ \cdot A \cdot Z \cdot A^T \cdot \begin{bmatrix} 1 & dy & dy^2 & dy^3 \end{bmatrix}$$

双三次曲面法有 4×4 点参与计算, 实际应用中, 根据工程的具体需要, 权值的选择不尽相同。

5.1.3 DTM 特征采样

实际的城市表面模型往往需要特别体现高大建筑与独立地物的高程信息, 为了有效保留地表特征, 系统在保留极值、拐点等必要特征的基础之上按高差、斜率差异设计了“基于特征的混合采样算法”。

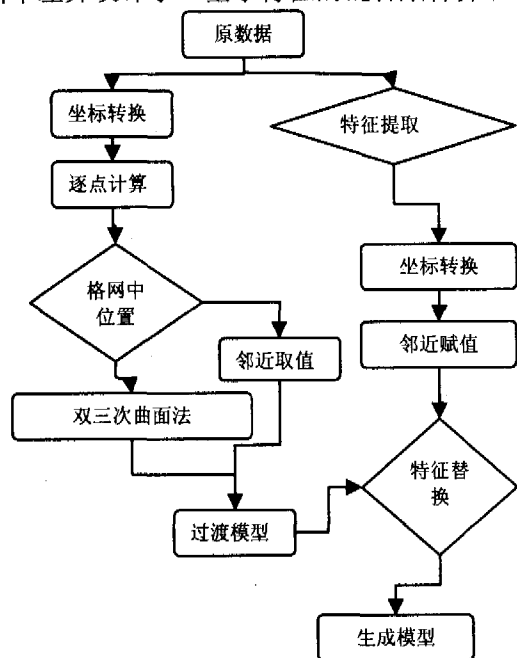


图4 基于特征混合采样流程图

具体方法步骤如下:

首先用间接法对原数据逐片分区采样。考虑到原始数据人工采点的邻近原则, 靠近边界区域采用邻近取值法, 为了保持地面模型整体的相符性, 远离边界区域(或中心区域)采用三次曲面内差方法。

然后对原模型进行特征提取。主要提取顶端特征和边沿特征, 即数学意义上的“极值点”和“拐点”。为了全部保留高大建筑与独立地物等极值高程和楼房棱线、高架边线等拐点高程, 需要对原数据逐点分析, 这里设计了“中点比较法”进行特征提取。

中点比较法主要思想为: 计算前后两点高程平均值、左右两点高程平均值, 用两个平均值分别与中心点高程比较。如果高差大于阈值, 则该中心点为特征点, 否则, 该中心点非特征点。

最后将特征数据进行坐标转换, 以邻近原则进行采样, 用特征数据对光滑采样相应区域进行替换, 从而生成需要的模型。

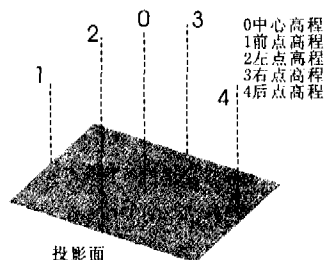


图6 中点比较法

本文设计的基于特征的混合采样方法既能保证山地模型的光滑特征, 又能保留城市模型的顶端特征和边沿特征。平面转换精度在毫米以下, 极值特征、边沿特征保留率 100%, 采样结果准确率 98% 以上, 采样精确率大大高于单纯的二次或三次采样。

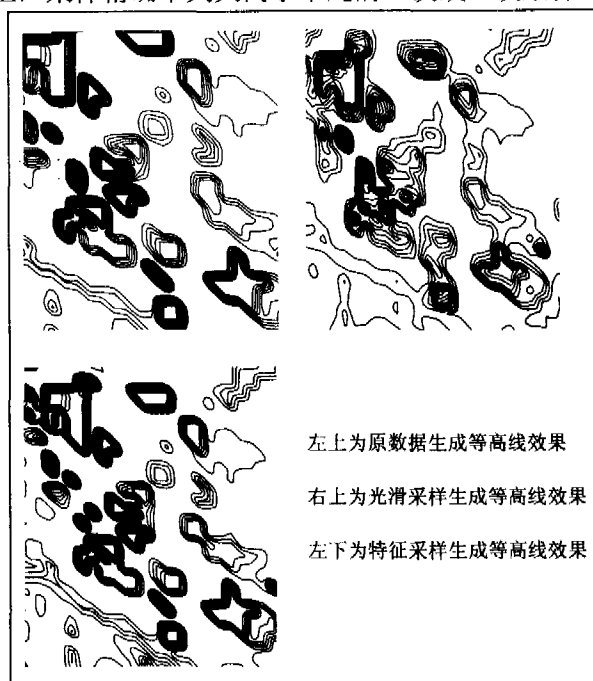


图7 特征采样效果比较

5.2 DOM 数据处理

DOM 的投影变换也是一个重采样过程, 关键是保持栅格影像的位置准确度和纹理清晰度。保持位置准确的关键是建立原影像与目标影像每一像素的对应关系, 具体过程与前面 DTM 投影转换计算方法一样, 在没有转换参数的情况下需要利用已知控制点进行仿射变换。

建立仿射变换关系需要四个控制点坐标, 使用的公式如下:

$$X = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy$$

$$Y = b_0 + b_1x + b_2y + b_3xy$$

式中 x 、 y 为原影像像素坐标, X 、 Y 为目标影像像素坐标。

将 4 个控制点的原影像像素坐标和目标影像像

素坐标代入仿射变换公式, 建立线性方程, 从而求出

$a_0, a_1, a_2, a_3, b_0, b_1, b_2, b_3$, 然后就可以利用仿射变换公式进行 DOM 的投影变化了。

DOM 的纹理采样同样可以使用前文设计的“基于特征的混合采样算法”。具体过程这里不再详细陈述。

6 结束语

基于机载三维激光扫描实时一体化技术的研究是测绘发展的新技术应用研究, 具有广阔的应用前景和巨大的市场空间, 本文通过对该系统整体设计及相关模块的应用研究, 为实时一体化测量提供了前中后期的配套模块, 为机载三维激光扫描具体应用提供了详细的应用方案, 为快速精确获取全方位、立体化地理数据提供了技术支持。

参考文献

- [1] 张祖勋. 数字影像定位与核线排列. 武汉: 武汉测绘学院学报, 1983.1
- [2] 朱长青. 计算方法及其在测绘中的应用. 北京: 测绘出版社, 1997
- [3] 邓建中, 葛仁杰, 程正兴. 计算方法. 西安: 西安交通大学出版社, 1987
- [4] 朱华统 黄继文. 椭球大地计算. 北京: 八一出版社, 2001
- [5] 江延川. 解析摄影测量学. 郑州: 解放军信息工程大学测绘学院, 1991
- [6] 张永生. 遥感图像信息系统. 北京: 北京科学出版社, 2000
- [7] 李德仁. 数字摄影测量. 北京: 测绘出版社, 1991

陕西省测绘学会举办第二届定向越野锦标赛

2006 年 10 月 22 日, 由陕西省测绘学会主办的“合众思壮集思宝杯”陕西省测绘学会第二届定向越野锦标赛在秦岭北麓长安区子午镇隆重举行。本次比赛吸引了来自全省测绘行业的 35 支参赛队共计 380 人参加比赛活动。

定向运动是一项非常健康的智力与体力并重的智慧型体育项目, 它不仅可以强身健体, 培养人的独立思考和独立解决困难的能力, 同时增强人们在体力和智力受到双重压力的情况下做出迅速反应, 果断决定的能力。定向越野竞赛活动不仅是一项极富群众性、趣味性、知识性、竞争性和军事穿插训练的新兴体育运动, 而且也是普及测绘知识, 扩大宣传影响的良好途径。

在一个简短的仪式后, 随着一声枪响, 比赛开始。参赛选手共分十八组, 每组编入十二人, 从 8:30 分开始每隔三分钟出发一组。组委员为这次比赛的设计 A、B 两条路线, 依次经过子午中学、两个村庄、大坝和水渠等 15 个标志点, 最后穿过一片麦田和果林到达终点。由于前几天下过雨, 地面湿滑, 对比赛增加了一定的难度, 但他们不畏艰难, 勇于面对, 表现了良好的体育道德风范和测绘人特别能吃苦, 特别能战斗的拼搏精神。经过参赛队员的奋力拼搏, 西安测绘信息技术总站的高军和吴芳莉在个人赛中脱颖而出, 仅以 35 分零 2 秒和 44 分 50 秒的成绩分别获得男子组和女子组的个人冠军, 长安大学二队 6 名队员最先完成 5 公里的赛程, 获得团体一等奖, 陕西省测绘局开发办队获最佳组织奖。

本次定向越野锦标赛由陕西省测绘学会主办, 陕西省测绘学会大地测量专业委员会、陕西省测绘学会摄影测量与遥感专业委员会、西安测绘信息技术总站、陕西测绘学会经济管理专业委员会、西安合众思壮科技有限公司承办, 得到了陕西省测绘局、在陕的军事测绘部门、大中专院校、各个测绘单位和企业的积极支持和大力赞助。与上一届比赛相比, 从参赛选手人数和承办规模上均有很大提高。

此次活动的成功举办, 丰富了测绘职工的业余文化生活, 促进全民健身运动的开展, 为普及测绘知识, 宣传测绘, 加强了测绘单位的了解和沟通, 增强了测绘学会在行业的凝聚力, 让更多的人了解测绘起到了很好的作用。(陕西测绘局 关梅)