

文章编号: 1000-050X(2000)06-0526-05

机载三维成像仪数据的快速处理技术^{*}

尤红建¹ 刘少创¹ 刘 彤¹ 李树楷¹

(1 中国科学院遥感应用研究所, 北京市大屯路 3 号, 100101)

摘要 对数据的快速处理技术进行了全面分析, 包括数据的检测分解、GPS 数据解算、计算激光采样点三维位置、地学编码图像的生成、DEM 的快速生成和航带的自动拼接等算法。最后通过在浦东所获取的数据进行快速处理, 表明了数据处理技术是可行的, 基本可以满足准实时的应用要求。

关键词 三维成像仪; 快速处理技术; 算法; DEM; 地学编码影像

分类号 P246. 2; TP73 文献标识码 A

遥感是获取地面资源、环境信息的重要技术手段, 经过 30 多年的发展, 其应用水平和遥感器均得到了很大的发展。但是, 遥感的作业流程并没有发生根本性的变革, 仍然依赖地面控制点(野外测量或从地形图上量测)来纠正遥感图像以得到地学编码影像, 若要获取地面的三维信息, 还需进行立体观测或匹配。从数据的获取到得到用户满意的成果, 需要的时间比较长, 远不能适应社会对遥感的快速反应要求。人们一直希望能够摆脱地面控制点, GPS 的发展为快速获取地面控制点提供了技术手段, 后来用于辅助全数字摄影测量, 效率提高了一些, 但是依然没有获得重大突破。地面控制点其实质就是已知坐标的地面标志点, 如果能够在获取遥感图像的同时, 从空中直接测得地面这些点的三维坐标, 那么它们也就是控制点了。这个思想随着无反射镜的激光扫描测距技术、惯性导航系统(INS)和 GPS 的发展成为可能。20 世纪 90 年代中期, 李树楷教授提出了将 GPS、INS、扫描激光测距仪和扫描成像仪进行集成, 形成机载三维成像仪——利用硬件同步获取地面的光谱遥感数据和对应的三维位置, 即定位(三维位置)和定性数据(光谱遥感信息)一体化的信息。研制的系统一个步骤就可以完成传统遥感技术三个步骤所做的工作, 效率提高数十倍到百倍。这一时期, 国际上也正大力开发机载激光扫描制图系统——将 GPS、INS 和扫描激光测距仪进行集成来快速获取 DEM, 到 1999 年已有 40 多种类似

的机载激光扫描系统^[1]。这些系统能够快速获取 DEM, 有的系统也配备了摄像系统或照相机, 但它们都不能在硬件上同步获取定位和定性数据, 若要得到地学编码遥感图像, 则处理时要复杂一些, 而且处理周期要长。机载三维成像仪的目标就是在飞行获取的数据数小时后能提供满足用户需求的三维遥感信息(DEM 和地学编码影像)。

1 机载三维成像仪系统简介

机载三维成像仪同步获取相互匹配的三维遥感数据(地面点的三维位置+遥感光谱数据)的基本原理如图 1 所示。它由 GPS 接收机、姿态测量装置(即 INS)、扫描激光测距仪、扫描成像仪 4 个主要部分构成。

GPS 测出三维成像仪在空中的精确三维位置, 姿态测量装置测出其在空中的姿态参数, 扫描激光测距仪可以精确测定成像中心到地面采样点的距离, 根据几何原理就可以计算出激光采样点的三维位置。同时, 扫描成像仪同步获取地面的遥感图像, 而且扫描成像仪和扫描激光测距仪在硬件上共用一套扫描光学系统组成扫描激光测距-成像组合传感器(AL-Hi)^[2], 从而保证地面的激光测距点和图像上的像元点严格匹配, 即在获取地面点图像的同时, 还获取该点到成像仪的激光距离值。在事后处理中, 这些激光采样点作为控制点用于生成 DEM, 也可以纠正同步获取的遥感图像。由于激光

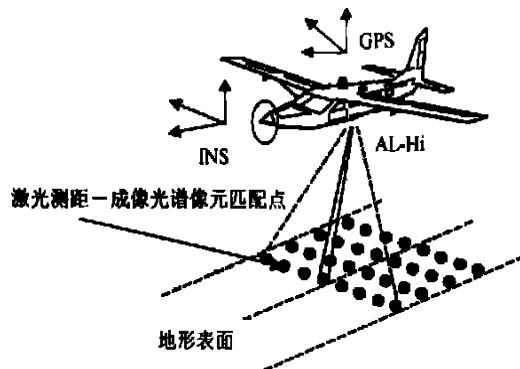


图1 三维成像仪的原理示意图

Fig. 1 Principle of Airborne 3D Image

扫描测距仪的重复频率有限,为了能得到高密度的激光采样点,必须采用合适的扫描方式。经过试验研究和比较,发现采用圆扫描方式可以得到比较密集的地面激光采样点,平均 $3\sim4\text{m}^2$ 就有1个激光点,比较适合城市地区应用。机载三维成像仪各部件之间的联系如图2所示。

机载三维成像仪在工作时,扫描激光测距-成像组合传感器的中心控制单元控制各种数据的获取。电机旋转一周,码盘的计数正好对应于扫描镜旋转一周,即获得一行扫描图像数据。每扫描一行图像就向姿态测量装置发出一个采样信号,

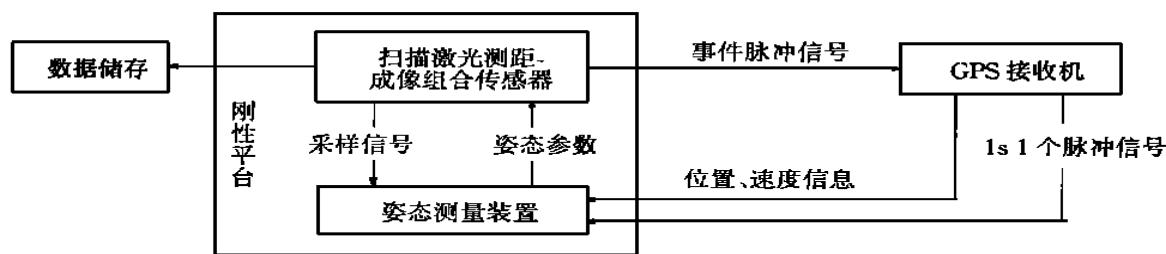


图2 三维成像仪各部件的功能连接示意图

Fig. 2 Function Link of Components of 3D Image

姿态测量装置接收到这个信号后,立即采集当前的姿态参数,并通过接口发送给扫描激光测距-成像组合传感器。每扫描16或32行图像,控制单元向GPS发出一个事件脉冲信号,并在自己的数据中进行计数。而GPS能测出该脉冲的精确时刻,并存储在GPS内存中(事后处理时依据该事件脉冲信号的精确时间计算成像仪对应的空中三维位置)。存储的数据有GPS数据、姿态数据、激光测距数据和遥感图像数据,这些数据之间有的是通过时间同步来实现数据的严格同步,如GPS数据和其他数据;有的直接是硬件同步获取的,如激光测距数据和图像数据。在这4类数据中,图像数据是一行一行连续扫描获取的,且每一行也是一个像元一个像元连续获取的,但是由于激光扫描脉冲的重复频率和能量有限,激光测距数据是每隔8个或更多的像元才获取一个激光测距数据。同时由于扫描速率比较快(每秒20~40行),并不是每个像元都获取姿态数据和GPS数据,而是每条扫描行才获取一次姿态数据,每隔数行才给GPS一个事件信息。

2 三维成像仪数据的快速处理技术

机载三维成像仪能快速获取到测区的飞行数据,要发挥其高效的性能,还必须有相应的数据快

速处理系统。在保证系统最终精度的前提下,优先选用处理速度快的算法来进行数据的处理,以满足快速处理的要求。处理时,首先要对获取的各种数据进行分解和检测,然后进行数据的同步和预处理,解算激光点的三维坐标,再利用这些激光采样点来生成DEM,同时还用来纠正同步获取的遥感图像,从而得到遥感地学编码影像。具体处理流程如图3所示。

2.1 数据的分解和检测

事后处理时,首先将三维成像仪飞行所获取的数据按照约定的数据结构进行分解,分别得到原始图像数据、姿态数据和激光测距数据。然后进行数据的检测和回放,检测的目的在于检查数据是否完善和有效。对获取的大容量数据进行检测对遥感作业十分关键,因为它关系到飞行数据是否合格,要不要重飞,直接影响到三维成像仪的作业成本和时间。根据GPS轨迹可以计算出飞行航线和设计航线间的重叠情况,从而可以大致判断飞行航线间的重叠情况。严格计算时必须依据飞行轨迹、飞行的姿态参数和视场角,按序惯计算的思想来再现飞行作业时地面的覆盖情况,计算出航带间的重叠率。

2.2 数据的快速预处理

预处理包括GPS处理和数据的快速内插。GPS数据的处理主要有差分处理、脉冲时刻天线位

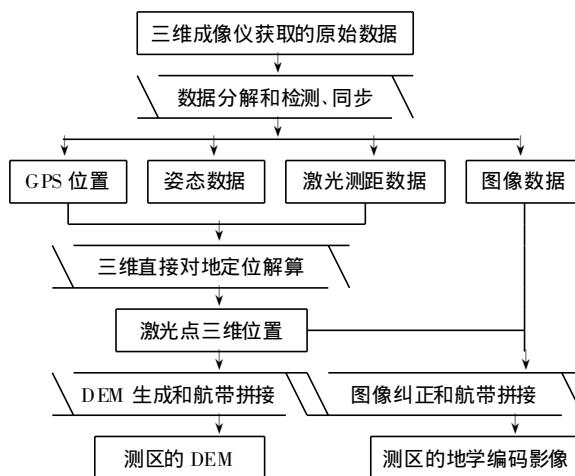


图 3 机载三维成像仪数据的处理流程

Fig. 3 Flowchart of Processing Data of Airborne 3D Image

置解算、偏心矢量改正、高斯平面投影变换, 最后计算出每个激光测距点所对应的空中 GPS 位置。

由于 4 种数据并不是一一对应的同步关系, 一行扫描图像对应 32 个激光测距数据, 同时对应一组姿态数据(3 轴姿态), 16 或 32 行扫描图像才对应一组 GPS 位置数据。因此, 要得到每个激光点对应的位置和姿态, 必须进行数据的内插, 主要涉及到 GPS 数据和姿态数据的内插。经过比较, 并参照飞行作业飞机的运动特点, 采用三次多项式内插可以满足内插精度, 而且处理速度也快, 满足快速处理的要求, 即

$$x(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 \quad (1)$$

系数 a_0, a_1, a_2, a_3 根据时刻 t 前后各几秒数据采用最小二乘方法进行反求。由于采用了“移动窗口”(需内插值前后各几秒的数据来内插)的序贯算法, 保证数据的光滑性, 运算速度也很快。

2.3 三维直接对地定位解算

根据扫描方式, 有了每个激光测距点对应的姿态、GPS 位置和激光测距值, 按照三维成像仪的定位原理^[3], 就可以逐个计算每个激光采样点的三维坐标。激光点位置解算时要利用空中三维位置数据、姿态数据及激光测距数据, 按照空间三角几何矢量关系快速解算出每个激光测距点的三维坐标。

2.4 DEM 的快速生成

为了事后处理和航带间的自动拼接, 特地采用了包含信息头的格网数据结构来表示 DEM。地学编码影像也采用这样的数据结构。信息头主要包含了本航带数据的起点坐标、格网大小等信息。依据航带内所有激光采样点的数据可以计算出坐标范围 ($\min X, \min Y, \max X, \max Y$), 加上

DEM 格网采样步长 SampleInterval, 就可以依次计算所有激光采样点所对应的格网坐标。为了将 DEM 数据和地学编码影像数据进行严格的匹配, DEM 的采样步长和地学编码影像的像元分辨率一致。由激光点坐标 (X, Y, H) 计算对应的格网坐标 (I, J, H) 的公式为:

$$I = (X - \min X) / \text{SampleInterval} \quad (2)$$

$$J = (Y - \min Y) / \text{SampleInterval}$$

所有的激光采样点依据式(2)简单快速处理就可以得到粗略的 DEM, 再对该 DEM 进行内插, 以推求出邻近没有激光采样点的 DEM 值。DEM 的内插和拟合方法也很多, 为了能满足快速处理要求, 而且由于三维成像仪的 DEM 原始采样数据也比较密集, 因此采用了单点移面(即一定大小的模板)内插方法(没有求逆过程, 节省运算时间, 达到快速处理的目的)。

内插模型为:

$$H_{\text{Interpolate}} = \frac{1}{P} \sum_{i=1}^n p_i H_i \quad (3)$$

式中, $P = \sum_{i=1}^n p_i$; n 为移动面内的已知高度值的点数; p_i 为该区域内每个激光点对应的权; H_i 为区域内已知的 DEM 样本点。在实际应用中取内插点到已知激光测距点距离 d_i 的倒数作为权, 即 $p_i = 1/d_i$ 。

2.5 遥感图像的快速纠正

三维成像仪扫描获取地面图像时, 由于激光发射的重复频率有限, 因此, 并不是对每个图像像元都发射激光来进行测距, 而是每隔一定的间隔发射一次激光来获取该像元的激光测距值。图像上对应的激光采样点作为控制点可以用来纠正原始图像而得到地学编码图像。为了纠正准确和运算迅速, 经过比较, 采用三次多项式内插方法来纠正圆扫描图像简单易行, 而且可以满足精度要求。由于原始图像是按行逐个像元扫描获取的, 因此纠正也是逐行进行的。因为从信息获取的原理上知道圆扫描获取的图像在相邻扫描行之间的时间间隔(大约 0.05s), 而每个扫描行上的像元却是按次序连续获得的。对每一个扫描行纠正时, 可以认为每个像元对应的地面坐标 (u, v) 是每一行内像元序号 n 的函数, 没有像传统方法那样把扫描行序号作为函数变量, 使公式计算简单, 达到快速处理的目的, 而且满足精度要求。经过试验比较和分析, 采用像元序号 n (一个扫描行内图像像元的排列号)的三次函数, 可以满足精度要求, 处理速度也快, 如:

$$\begin{cases} u = a_0 + a_1 \cdot n + a_2 \cdot n^2 + a_3 \cdot n^3 \\ v = b_0 + b_1 \cdot n + b_2 \cdot n^2 + b_3 \cdot n^3 \end{cases} \quad (4)$$

这也就是一个扫描行的图像和地面坐标的映射关系, 每行的具体映射关系可以由该行图像上分布的若干个激光点作为控制点来确定, 即按最小二乘法来反求出式(4)的系数 $a_0, a_1, a_2, a_3, b_0, b_1, b_2, b_3$ 。每行的映射关系确定后, 就能把这一行的每个像元按该映射关系纠正到地面的坐标系中。有了该像元的地面坐标, 依据图像分辨率及该航带的起点坐标就能计算出纠正后的影像坐标。同时根据 DEM 就能进行投影差改正, 从而最终得到地学编码图像。由于飞行速度、飞行姿态的变化, 按行扫描得到原始图像并不能将地面完全覆盖, 中间有一些点不能扫描到, 即产生“漏扫描”现象。因此, 纠正完的图像还必须进行灰度内插——根据周围点的灰度内插该点的灰度。内插方法和 DEM 内插方法相同。

2.6 航带的联合拼接处理

三维成像仪航空作业时, 由于旁向扫描视场有限, 每条航带的图像只能覆盖地面一定的宽度, 要

完成一定的作业面积就必须飞行多条航线, 而且航线还必须保持一定的重叠度(10%~20%)。生成 DEM 和地学编码图像后, 还必须将测区内所有航带的 DEM 和地学编码图像拼接在一起, 形成该测区的 DEM 和地学编码图像。图 4 为测区的部分地学编码影像图。拼接时要使测区数据拼接无缝, 保证 DEM 和图像灰度过渡自然(每条航带的灰度会因为太阳照射角度等因素而不太一样), 必须考虑重叠部分的左右两条航带的数据。因此, 设计了一种变权的加权平均值:

$$G_{\text{overter}} = \frac{R_r}{R_r + R_l} G_r + \frac{R_l}{R_r + R_l} G_l \quad (5)$$

式中, R_r, R_l 分别为当前重叠区内的像元到重叠区最右侧和最左侧的距离; G_r, G_l 分别为重叠区右侧和左侧航带像元的灰度值或 DEM 值。

由于飞行的复杂性, 两条航线间重叠区内的每行扫描数据的重叠也都不一样, 所以权系数是随每行而变化的, 每行中的每个像素也是变化的, 这样保证了重叠区到非重叠区的平稳过渡, 真正做到无缝拼接。



图 4 上海市区黄浦江两岸中心区的部分地学编码图像

Fig. 4 Part of Geo-referenced Image of Pudong, Shanghai

3 飞行试验及其处理

2000 年 3 月 9 日三维成像仪在上海飞行获取了黄浦江两岸的部分数据, 共飞行了 24 条有效

航带, 飞行高度 600m 左右, 视场角为 30°。采用圆扫描方式, 地面分辨率为 1.8m, 地面覆盖宽度为 320m 左右, 飞行时沿南北飞行, 飞行航线大约 6km 长, 航带间的重叠为 20% 左右, 这样飞行的区域大约为 40km²。基于上述的快速处理算法,

利用 VC⁺⁺ 编制了快速处理软件模块, 飞行结束后首先进行数据的分解, GPS 轨迹回放, 确定航带重叠无缝后快速处理出测区的 DEM 和地学编码图像。经过试验, 只需 2h 左右就处理完了全部的数据, 各处理模块计算所需要的时间如下: 数据分解为 2min, GPS 计算为 4min, 三维计算为 35min, DEM 生成为 24min, 地学编码影像生成为 50min, 航带拼接为 10min, 合计 125min。

4 结 论

通过快速处理算法的分析和实际试验表明, 快速处理技术可以满足实际应用的要求, 能够充分发挥机载三维成像仪的高效优势, 基本实现准实时处理的目的, 同时也说明三维成像仪技术系统的工作效率要比常规遥感技术高很多(若用传统的技术来获取浦东的 DEM 和地学编码影像最快也要 10d 多

时间)。下一步的目标是提高三维成像仪的飞行高度(主要是提高扫描激光器的能量和重复频率)和视场角, 在处理算法上将进一步提高处理精度和处理速度, 以满足实时应用的要求。

参 考 文 献

- 1 Baltsavias E P. Airborne Laser Scanning: Existing Systems and Firms and other Resources. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 1999, 54(2~3): 164~198
- 2 李树楷, 薛永祺. 高效三维遥感集成技术系统. 北京: 科学出版社, 2000
- 3 刘少创, 邵晖, 向茂生, 等. 机载三维成像仪的定位原理和误差分析. *测绘学报*, 1999, 28(2): 121~127

尤红建, 男, 31 岁, 博士生, 副研究员。现从事机载集成遥感技术的应用和研究。已发表论文 20 余篇。

E-mail: youhongjian@263.net

Fast Data Processing Technology of Airborne 3D Image

YOU Hongjian¹ LIU Shaochuang¹ LIU Tong¹ LI Shukai¹

(1 Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, 3 Datun Road, Beijing, China 100101)

Abstract A new airborne remote sensing system--3D image, which integrates GPS, attitude measurement unit (AMU), scanning laser ranger finder (SLRF) and spectral scanner, has been developed successfully. The scanner and SLRF use the same optical system, which ensures the laser point to match the pixel closely. The distinctive advantage of 3D image is that it can produce geo-referenced image and DEM (digital elevation models) image without any ground control points (GCPs). Because surveying GCPs is no longer necessary, it is the software that processes the data and generates data products. Therefore, its efficiency is 10~100 times higher than traditional approaches. The data acquired by 3D image can be processed to produce several kinds of image, such as DEM, geo-referenced image. The data processing involves data decomposing and checking, GPS processing, calculating the positions of laser points, producing geo-referenced image, producing DEM, strips mosaic. The principle of 3D image is first introduced in this paper, and then we focus on the fast processing technique and algorithm. In the end, the data acquired by 3D image in the east of China is processed based on the basis of fast processing technique, and the result shows that the processing technique is feasible and can meet the requirement of quasi-real-time applications.

Key words 3D image; fast processing technology; algorithm; DEM; geo-referenced image

YOU Hongjian male, 31, Ph. D candidate, associate researcher. His research interest is airborne integrated remote sensing technology and remote sensing image processing. He has published about 20 papers.

E-mail: youhongjian@263.net