

超轻型飞机搭载 SWDC 系列数字航摄仪的 航空摄影测量一体化作业思路

袁路晴¹ 黄 杰² 兰艳青¹ 郭德琨²

(1. 中铁工程设计咨询集团有限公司, 北京 100020; 2. 北京昊成雪域飞行器有限公司, 北京 100000)

Working Thoughts on Integration of Aerial Photogrammetry through SWDC Serial Digital Aerial Photographer Loaded in Light Aerial Plane

Yuan Luqing Huang Jie Lan Yanqing Guo Dekun

摘 要 归纳了航空数码相机和激光雷达系统在国内的应用现状,介绍了国产 SWDC 系列数字航摄仪与超轻型飞机、运 5 飞机的组合在航测生产中的应用情况,指出恰当地选择航空数码相机能提高铁路勘测设计的质量和效率。

关键词 SWDC 系列数字航摄仪 超轻型飞机 铁路勘测设计

1 航空数码相机简介

20 世纪 90 年代初,机载数码相机、机载数码激光雷达在国外问世。这些设备主要由主机、惯性测量制导仪(IMU)、导航定位系统(GPS)、飞行计划和管理系统、空中数据采集和存储系统组成。

在航空摄影测量领域,用数码相机和激光雷达航摄作业完全取代光学航空摄影是历史的必然。我国目前也有近 20 台航摄数码相机和激光雷达系统,处于刚起步阶段。国内使用的进口数码相机主要是:Z/I 公司的 DMC、奥地利的 UCD、Leica 公司的 ADS40 等。机载激光雷达为:Leica 公司的 ALS50,加拿大 Optech 公司的 ALTM3100,德国 IGI 公司与奥地利 RIEGL 公司联合研制开发的 LiteMapper5600 等。国产自己研发的数码相机主要有:北京四维远见信息技术有限公司的 SWDC 系列数字航空摄影仪,中国科学院光电技术研究所的彩色大面阵(810 万像素)数字航测相机,中测新图公司的 LARS-1 低空数码遥感系统等。这几年还有人用无人驾驶飞机装载小数码相机和视频信息分析系统对地面城镇、街区进行小面积航空摄影。

航空数码相机与光学相机的几个主要不同之处是:

①关于数码相机的焦距。数码相机上标注的焦距

不能等价理解为胶片相机的焦距,应该从计算高程精度出发算出数码相机的等效焦距:等效焦距 = 数码相机标注焦距 $\times 230 \text{ mm}$ / 数码相机的 x 方向幅面尺寸,其中 230 mm 为 RC 胶片相机的幅面尺寸,用它来作为计算的标准幅面。

②关于摄影比例尺、像元地面尺寸 GSD。胶片相机的摄影比例尺,是由焦距(f)/航高(H)得来,数码相机标注焦距相对于胶片相机要小的多,所以用 f/H 计算的摄影比例尺非常小,与胶片相机没有可比性。由数码相机得到的摄影比例尺在成图时的放大倍数比胶片相机要大 2~3 倍,这是由于相机像元尺寸间的比例关系引起的。数码相机像元 9μ 对应胶片相机数字化扫描后的 25μ 或 21μ ,胶片相机一般以 3~6 倍成图,数码相机以 6~15 倍成图。因此数码航摄国际统一使用 GSD (Ground Sample Distance) 概念,包括遥感影像。

数码摄影时,以 GSD 为出发点,由成图比例尺确定 GSD,进而确定航高。GSD 是图上 0.1 mm 代表的地面实际距离,即像元地面尺寸。

航摄比例尺、成图比例尺与 GSD 的对应关系如表 1 所示。

表 1 摄影比例尺、成图比例尺与 GSD 的对应关系

摄影比例尺	成图比例尺	像元地面尺寸 GSD/cm
1:3 000	1:500	7~8
1:4 000	1:1 000	10
1:8 000	1:2 000	20
1:35 000	1:10 000	83

收稿日期:2007-10-15

第一作者简介:袁路晴(1949—),男,1970 年毕业于中国民航飞行学院飞机驾驶专业,工程师。

③关于数码相机的像幅。很多人认为数码相机的焦平面尺寸小,会造成像幅过小,在同样条件下会产生较多的像对数。根据计算,光学摄影胶片若以 25μ 扫描的话在航空数字影像中并不大。对于实际应用来说,一个像对的面积大小可以算出一幅图有多少个模型。

像对面积 = $MN(1 - \text{航向重叠度})(1 - \text{旁向重叠度})$

其中, M 为 Y 方向像元数, N 为 X 方向像元数, 计算单位是 GSD^2 。

由上面的公式可推算出大幅面数码相机的像对面积与胶片相机相当。为什么使用时有的数码相机时像对数会增多呢? 这是因为此相机像元角小(等效焦距长), 航摄飞行高度高, 导致因天气或技术方面的延误, 或高程精度达不到。这样就不得不降低航高摄影, 导致摄影面积小, 像对数增多。

几款数码相机与 RC 光学相机的航摄指标比较如表 2 所示。

表 2 数码相机与光学相机航摄指标比较

型号	指标 f/mm	Y 方向 像元数	X 方向 像元数	像元尺寸 $/\mu\text{m}$	像元角	旁向视场 角/ $(^\circ)$	宽高比 $K=L_y/H$	航向视场 角/ $(^\circ)$	60% 的基高 比/ (B/H)	以最高航高 5 000 m 计 算的最大可能 GSD/cm
RC2323f88	88	9 000	9 000	25	1:3 520	104	2.6	104	1.0	142
RC2323f152	152	9 000	9 000	25	1:6 080	73	1.5	73	0.59	82
DMC	120	13 800	7 600	12	1:10 000	69	1.4	42	0.3	50
UCD	101.4	11 500	7 500	9	1:11 266	54	1.02	37	0.266	44
SWDC-4B35	35	11 630	8 520	9	1:3 889	112	3.0	95	0.87	129

由于国内对这项新技术认识方面的局限, 在使用国外数码相机和激光雷达航空摄影作业时出现了一些教训和需要总结、探讨的地方, 主要有:

(1) 雷达扫描摄影及国外部分数码相机的航摄飞行精度完全依赖高精度的 IMU。高精度的 IMU 进口困难, 价位较高。每次飞行前都要做检校, 检校场的外业工作量较大。还要在地面开 GPS 基站和基站值守。国外使用 IMU 航摄飞行主要用在中小比例尺测图时直接定向而不做空三加密。但国内在实践中发现不做空三在精度和视差方面都不稳定。另外, 当飞行高度超过 2 000 m 后, IMU 的测量精度会显著下降。

(2) 雷达数据处理较麻烦。若保证制图效益和质量须有较好的数据处理软件, 还要经过一定的生产实践摸索才能达到所需效果。

(3) 目前在国内使用的部分进口机载数码相机由于使用不当致使高程精度不能满足制作地形图的要求。因为这些数码相机的构造特点只能提供城镇正射影像资料, 所以选择数码相机时一定要慎重。数码相机与胶片相机一样, 他们的高程精度都是由基高比(摄影基线与航高的比值)决定的, 基高比高的数码相机, 在相同 GSD 条件下, 取得的高程精度要高。当数码相机高程精度不能满足要求时, 只有采用降低航高, 缩小 GSD 的方法进行补救。但会使航拍后像对数增多、工作量增大。

(4) 外国机载数码相机和激光雷达设备价格昂贵, 一般硬件价位在人民币 1 000 ~ 2 000 万元左右, 且售后服务麻烦, 收费较高。

(5) 像元角大的数码相机, 在相同 GSD 条件下, 所需的航高较低, 对天气条件要求比较宽松。反之, 像元

角小的所需航高较高, 对天气条件要求比较苛刻。最近某款进口数码相机做航摄飞行试验, 由于受航高的限制, 3 个飞行日的工作量竟然用了半个多月的时间才完成。

这就是目前大家都说数码相机好, 但就是没有马上把光学相机换掉而使用数码相机进行航空摄影的主要原因。另一个重要原因是: 长期以来, 航空摄影测量的技术是建立在光学摄影机的基础之上的, 各测绘部门都制定和沿用了一整套光学航空摄影测量成图的比较完善的内外业作业细则。因此测绘专业航空摄影由胶片时代向数码时代过渡不仅仅是更换相机, 还要更新数据采集的手段和编制数码摄影测量作业规则。对比胶片相机, 数码相机具有 CCD 几何尺寸稳定, 精度高, 色彩丰富, 成图周期短等优势, 胶片摄影被数字摄影取代是科技发展的必然趋势。

2 机载数码设备在铁路方面的使用优势

恰当选择和使用数码航空摄影机能提高铁路勘测设计的质量和进度。

铁路勘测中制作大比例尺铁路设计施工图的关键是要求精准的地面高程精度。以往用光学相机进行航空摄影, 为了工期, 往往在天气很差的情况下航拍, 结果航摄相片影像模糊、灰暗, 影响测图精度。有时还因为等天气时间太长被迫取消航拍计划, 而临时改用旧航片测图。因航飞年代不同, 旧航片上的地形地物与实地不符, 导致图的质量下降, 还要投入大量人力进行现场补测和调绘。

使用超轻型或轻小型飞机搭载数码相机进行铁路新线勘测设计航空摄影, 能提高制图质量, 缩短制图时

间,保证设计工期按时完成。我国正处于经济建设高速发展时期,地面由建筑施工、工业生产等原因,会产生很多烟雾升向空中。加之很多地区因地域关系阴雾天气较多。如果要求航摄飞行航高高于1 000 m 以上就要等待合适的天气执行航拍,这对设计工期的按时完成会造成很大影响。如果选择短焦距(35 mm、50 mm)的国产数码相机 SWDC 就可以获得大的 GSD(像元的地面尺寸),也就是小的摄影比例尺航拍。由于此相机角像元(CCD 尺寸除以焦距)比其他数码相机大一倍,所以在同样的成图比例尺条件下,航高可以降低一倍,有利于争取飞行天气,节省等天气的时间和费用。数码相机还可以调整感光度,在不大于1 000 m 高度的云下、阴天、轻雾等天气条件下飞行,经过图像预处理获得合格的影像。由于航高低、CCD 动态范围宽,SWDC 用于铁路勘测航空摄影对飞行天气的要求大大低于传统光学相机和进口数码相机。加之基高比大,高程测量精度高,技术优势明显。

机载激光雷达系统也可用于铁路勘测设计航空摄影。激光雷达航空摄影受天气影响较小,因为激光脉冲不易受阴影、云层和太阳角度的影响,故机载激光雷达技术在一般情况下能为铁路设计提供适时的线路范围三维地形、地物数据及数码影像,以及精度较高的地面高程模型 DEM,为铁路设计用图和施工土方量的计算提供影像数据。雷达数码扫描飞行用于铁路的具体操作及雷达数据的编辑处理作业工艺还需要在生产实践中摸索。

3 极限超轻型飞机搭载 SWDC 系列数字航摄仪是航空摄影测量一体化作业的新思路

3.1 SWDC 系列数字航摄仪

在国家测绘局“十五”攻关,科技部创新基金支持下,在一些测绘专家、航空摄影爱好者的带动下,开展了国产数码航空摄影机的研制。其中北京四维远见信息技术公司开发的 SWDC 系列数字航空摄影仪,是引进消化吸收再创新的成功典范,是在总结了国内外数码相机的优缺点之后而研制成功的。

2007 年 5 月 30 日,自主研发、具有自主知识产权的国产数字航空摄影仪 SWDC 系列产品通过了产品鉴定。鉴定专家一致认为,国产数字航空摄影仪(SWDC)系列产品作为空间信息获取与更新的重要手段,填补了国内空白,高程精度指标达到同类产品的国际领先水平,整体技术指标达到国际先进水平。

SWDC 相机镜头可更换(三组),幅面大、视场角大、基高比大、高程精度高(达1/10 000);能实现空中

摄影自动定点曝光;通过精密 GPS 辅助空三,飞行中不使用 IMU 就可以达到很高的精度,避开了购买使用 IMU 的一些难题,并使航摄外业的工作量减少;SWDC 具有较强的数据处理软件功能,可直接与国产 JX4、空三加密等软件接轨,价格不到国外同类产品的二分之一。相机原机为 Hasselblad,经过设计、组装、加固和检校后,成为 SWDC 系列数字航空摄影仪。

相机的主要数据和性能:

焦距为 35 mm、50 mm、80 mm。

光圈为 3.5 ~ 32。

感光度为 50/100/200/400。

快门为 1 ~ 1/800 s,连续曝光最小时间间隔为 2.5 s。

像元数为 13 K × 11 K、11 K × 8 K,像素尺寸为 6.8 μm、9 μm。

畸变小于 2 μm。

像元角为 1/3 888、1/5 555、1/8 888。

旁向视场角为 112°、91°、59°,测量型 GPS 接收机、数字罗盘、航空摄影管理计算机、地面后处理计算机。

相机所用软件:

飞行设计软件、飞行控制管理软件、影像拼接及摄影质量分析软件、影像匀光匀色软件、GPS 辅助数码空三加密软件。

航空影像数字摄影测量工作站 JX4。

GPS 单点定位技术 PPP。

相机最佳搭载飞行器:

航高1 000 m 以下,时速 100 ~ 150 km 时使用蜜蜂 3C 改装的超轻型飞机。航高1 500 m 以上,时速 200 ~ 300 km 时使用运 5 飞机较好。

SWDC 相机已完成任务的精度情况如表 3 所示。

SWDC 的技术特点:

①角分辨率大,飞行高度低,是同样地面分辨率国外航空数码相机航高的 1/2 ~ 1/3,无需带氧气飞行。

②航高低、CCD 动态范围宽,在云下和轻雾天可调高感光度拍摄,对飞行天气的要求大大低于传统相机。

③超轻型和轻型飞机可以在测区内部利用草地,公路就地起飞,成本低。特别是国家放开1 000 m 以下空域时,这类飞行器的吸引力更大。

④采用 GPS 定点曝光,用专用软件检查航飞区域内是否有漏洞,当时就能进行定点补拍。

⑤大的基高比,在相同地面分辨率情况下,比国外数码相机高程精度高。

表 3 SWDC 系列相机已完成的任务的精度统计

时间	2005 年 10 月	2006 年 4 月	2006 年 5 月	2006 年 7 月	2006 年 12 月
地点	乌兰布统(平坦)	焦作(平坦)	沁阳(平坦)	宜宾(山区)	北京郊区(平坦)
GSD/cm	22	13	8	56	10
面积/km ²	32	530	30	2 829	40
总片数	175	4 567	546	1 150	180
所用相机	SWDC-1 窄像对飞行 535	SWDC-2 窄像对飞行 535	SWDC-2 窄像对飞行 535	SWDC-2 窄像对飞行 535	SWDC-4 窄像对飞行 550
飞机型号及相对航高	蜜蜂 3C/850 m	蜜蜂 3C/480 m	蜜蜂 3C/320 m	运 5/2 200 m	蜜蜂 3C/550 m
GPS 辅助空三的定向点的检查点布设情况	24 条基线加构架航线,基本航线 5 条,四角布定向点 4 个,24 个检查点均匀分布	基本航线 4 条,在 25 根基线处布一排平高定向点代替构架航线,在最弱处布检查点一排 3 个	基本航线 7 条,在 21 根基线处布一排平高定向点代替构架航线,在最弱处布检查点一排 5 个	25 条基线飞构架航线,基本航线 4 条,控制点 4 个分布在 4 角,检查点 47 个均匀分布	6 条航线,在 13 根基线处布 2 排平高定向点代替构架航线,检查点 42 个均匀分布
GPS 辅助 M_x					
空三检 M_y	平面 16.5	14.1	4.6	57.3	7.1
查点中 M_z	高程 18.5	10.4	5.2	72.9	7.4
误差/cm		13.8	10.9	71.9	4.8

⑥可更换镜头。这样就可以用同一套数字后背配不同的镜筒、镜头,实现长焦、短焦的更换,可解决大城市的高楼投影差问题。

⑦接近方形的影像(11:8),与传统照片形状相似,符合作业员习惯。

⑧内置双频 GPS 接收机。利用该接收机可实现高精度定点曝光,并记录曝光时刻的位置数据(投影中心精确坐标),为 GPS 辅助空三提供原始数据,可以大量节省外业控制点。

⑨SWDC-4 也可以装在超轻型飞机上,可以无摄影员全自动曝光。

⑩SWDC-4 由于有电子磁罗盘和摄像双重控制,加上电动 κ 旋转,使其影像的 κ 角较小。

⑪价格低,重量轻,自主软件免费升级,反应及时的售后服务。

3.2 昊成雪域公司的超轻型飞机

该机采用北京昊成雪域飞行器技术有限公司的专项技术,是北京航空界的专家为满足青藏高原高海拔这一特殊需求而专门设计改装的小型航空摄影专用飞机,于 2000 年设计成功,2002 年 10 月在西藏安多(海拔 4 700 余 m)试飞成功。它是国内惟一能在海拔 5 000 m 以上的高原上直接任意起降、并可进行超低空飞行(相对高度 2~200 m)的轻型飞行器。2002 年至 2004 年,极限一号飞机对建设中的青藏铁路二期工程(青海格尔木—西藏拉萨段)进行了航空摄影和摄像,飞机起飞平均海拔 4 500 m 以上,最高起飞海拔 5 072 m(唐古拉火车站)。极限飞机在青藏铁路的航摄成果得到铁道部领导的好评,其中部分摄像、影像资料于 2006 年青藏铁路通车之际已在中央电视台等媒体播放。此飞机在技术上具有可靠、安全和对高原条件的适应性,它可以在全国任何地方起降和执行各种地形

的航空摄影测量任务。

机动灵活的性能决定了极限飞机是多用途的轻型飞行器,它能执行航空摄影测量、专业摄像、空中拍照、监测等多项通用航空业务,且销售价格非常便宜。

作为国内大飞机航空摄影生产的补充,昊成公司的航摄方式更具有中国特色,它更适于城镇、铁路公路、西北高原地区、南方阴雾天气及中小地区的航空摄影作业。

数码航空摄影测量作业工序:①数码相机航空摄影;②打印调绘相片;③GPS 测量、调绘;④空三加密;⑤数字化测图和编辑;⑥建立数据库、出图。

航测部门自己装备国产高性能、低价位的 SWDC 系列数字航空摄影仪和超轻型飞机或运 5 飞机,把航测生产作业延伸到空中:手持 GPS 布地标, GPS 定点导航型数码航拍,自动相关软件检查航向旁向漏洞, GPS 定点补拍,RTK 像控点测量,空三加密, JX4 测编地形图,正射影像制作,均依次完成。实现从航空摄影到制图完成的全工序操作,符合测绘市场竞争规律,缩短成图周期,加快向国家建设提供基础数据和空间信息的速度。

参 考 文 献

- [1] 李寿兵. 航测遥感技术在运营铁路管理上的应用[J]. 铁道勘察, 2005, 31(3)
- [2] 甄春相. 遥感技术在铁路勘测中的作用[J]. 铁路航测, 2000(4)
- [3] 张金龙, 韩金玉. 铁路工务航复测信息管理系统的研究开发[J]. 铁道勘察, 2004, 30(2): 15-18
- [4] 铁道部专业设计院航测处. 铁路航空勘测[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1985
- [5] 袁路晴, 潘学英. 航空数码摄影系统的应用与展望[J]. 铁道勘察, 2004, 30(5)
- [6] 胡志贵, 韩改新. 航测遥感技术在铁路建设中的应用与开发[J]. 铁道勘察, 2006, 32(5)