引文格式：田生辉 ,武瑞宏 ,张卫龙 ,等. 利用正射影像立体像对的无人机测图系统[J]. 地理空间信息, 2024, 22(5): 77-80. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2024.05.016

利用正射影像立体像对的无人机测图系统

田生辉[1]，武瑞宏[1]，张卫龙[1]，杨远超[1]，石　硕[1]，赵一方[1]
（1. 中铁第一勘察设计院集团有限公司，陕西 西安 710043）

摘　要：利用无人机影像通过传统立体像对模型测图时需要频繁切换像对，将无人机影像制作为实景三维模型测图时则需频繁平移、缩放和旋转模型，两种方式都存在效率低的问题。正射影像立体像对可将成百上千个立体像对的左右片各自无缝拼接起来，形成覆盖超大范围的立体像对。开发了基于正射影像立体像对的无人机测图系统，作业模式与传统立体像对相似，但避免了像对切换，提高了作业效率。在多个项目中开展了 1∶2 000测图实验，该系统平面精度约为0.2 m，高程精度为0.2~0.4 m。

关键词：正射影像立体像对；测图系统；无人机影像；无缝拼接；精度评估
中图分类号：P231　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）05-0077-04

UAV Mapping System Using Orthoimage Stereo Image Pairs

TIAN Shenghui[1], WU Ruihong[1], ZHANG Weilong[1], YANG Yuanchao[1], SHI Shuo[1], ZHAO Yifang[1]
(1. China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710043, China)

Abstract: Using UAV image to map through traditional stereo image pair has to switch image pairs frequently, and mapping on the 3D real scene model made by the UAV images has to translate, scale and rotate the model frequently. Both mapping methods have low efficiency. Orthoimage stereo image pairs can seamlessly mosaic the left and right pieces of hundreds of stereo pairs to form a stereo image pair covering a large range. We developed a UAV mapping system based on orthoimage stereo image pairs. The operation mode was similar to the traditional stereo image pair, but avoided switching image pairs and improved the operation efficiency. We conducted 1∶2 000 mapping experiments in some projects. The results show that the plane accuracy of this system is about 0.2 m, and the elevation accuracy is between 0.2 and 0.4 m.

Key words: orthoimage stereo image pair, mapping system, UAV image, seamless mosaic, accuracy assessment

地形图是各种工程项目勘察设计阶段的必备资料[1]，如铁路和公路初测时需通过 1∶2 000地形图辅助选线，施工图设计阶段需要 1∶500大比例尺工点图。无人机低空摄影测量具备成本低、机动灵活、受天气影响小、快速响应、操作简单等优势，已广泛应用于各种中小型测图项目中。直接在实景三维模型上进行测图是目前无人机测图的发展趋势[2]，具有裸眼3D测图、地物遮挡少、可测绘建筑物立面[3]、精度高等优点，但采集地形图时需要不停平移、缩放、旋转模型，极大地影响了采集效率。通过传统立体像对采集地形图只需平移、缩放，无需旋转，十分快捷[4]，但由于无人机像幅较小，采集过程中需频繁切换像对，同时带来更多的接边工作，影响作业效率。因此，亟需一种既能以立体像对模型进行测图，又能避免切换像对的软件。

20世纪60年代末到70年代，Blachut和Collins等就已提出了利用正射影像立体像对进行测图与判读的思想[5]，但当时处于模拟摄影测量阶段，构造正射影像立体像对的设备庞大笨重[6]，且局限于一个像对。王密[7]进一步发展了该技术，通过无缝镶嵌正射影像与辅助正射影像突破了单像对的限制，形成了跨越多航带多模型，可在一个测区范围内无缝浏览的立体场景[8]。王争鸣[9]等提出了基于投影光线改正的坐标量测方法，降低了坐标量测计算的复杂度，将正射影像立体像对称之为真实感大场景。吕慧玲[10]、张占忠[11]等研究了制作真实感大场景的工艺与质量控制方法；孟祥连[12]、刘亚林[13]等详细探讨了真实感大场景在铁路勘察、地质解译等领域的应用。目前较少有文献述及通过正射影像立体像对进行无人机测图，鉴于正射影像立体像对量测精度与原始像对接近，地形图采集方式与传统立体像对相同，但可在多个像对间无缝漫游的特点，本文研发了相应的测图系统。

收稿日期：2023-02-16。
项目来源：中铁第一勘察设计院集团有限公司2022年度软件开发资助项目（2022RJ25）；2021年度科研重大专项资助项目（2021KY73ZD(ZDZX)-01）；2022年度科研重大专项资助项目（2022KY56(ZDZX)-02）。
第一作者简介：田生辉（1995—），硕士研究生，工程师，主要从事摄影测量与遥感方向的软件研发工作，E-mail：1042342250@qq.com。

1 无人机正射影像立体像对构建

1.1 正射影像立体像对的概念与原理

为使正射影像具备立体观测条件，可考虑在正射影像中引入人工视差形成辅助正射影像，与原正射影像共同构成立体像对。视差与观测者和被观测物的距离有关，因此引入的人工视差应随DEM的变化而变化。由于通过DEM引入的人工视差只能模拟地形部分的视差，无法建立地物碎步的视差，因此DEM上的地物无法显示立体效果。考虑到原始立体像对天然地保留了地形和地物视差，应分别利用原始像对中的左（右）片制作正射影像，右（左）片制作辅助正射影像。引入视差的方法主要包括固定角度投影法、变角度投影法和对数投影法。固定角度投影法利用一定角度的平行光线对DEM进行投影（图1a），为使引入的视差尽可能与原始立体像对的自然视差一致，平行光线角度一般需满足 $\tan\alpha=\frac{B}{H}$ ， B 为像对基线长度，H 为摄影航高，引入的视差为 $P=\tan\alpha\times Z$ 。

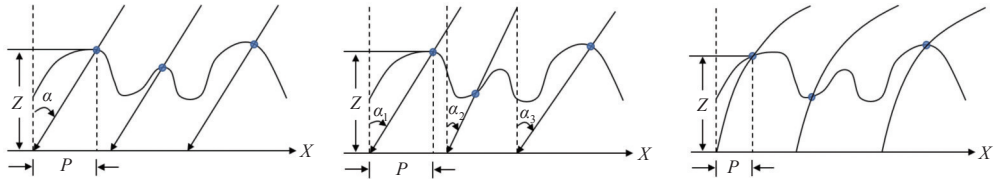
固定角度投影法确定投影光线角度时未考虑具体位置的高程，因此引入的视差与原始立体像对的天然视差并不完全一致，因此参考文献[7]中提出了变角度投影法，根据每个位置的高程确定投影光线的角度（图1b），人工视差为 $P=\frac{B\times Z}{H-Z}$ 。当原始影像被校正为核线影像时，像方视差 $p=\frac{B\times f}{d}$ ， f 为相机焦距， d 为相机与拍摄点的距离。对上述像方视差进行微分，可得 $\Delta p=-\frac{B\times f}{d^2}\Delta d$ ，乘以比例系数 $-\frac{d}{f}$ ，则得到物方的视差微分为：

$$\Delta p=\frac{B}{d}\Delta d \tag{1}$$

依据式（1），从投影基准面到目标点高程对 d 进行积分，推出视差为：

$$P_i=\int_{d_i}^{d_{基}}\frac{B}{d}\Delta d=B\left(\ln d_{基}-\ln d_i\right)=B\times\ln\frac{H}{H-Z_i} \tag{2}$$

式（2）去掉下标 i ，即为引入人工视差的对数投影法（图1c）。对数投影法理论严密，引入的视差与天然视差相近，应用较广泛，本系统采用对数投影法。



a 固定角度投影法　　b 变角度投影法　　c 对数投影法

图1 引入视差的3种方式

1.2 无人机正射影像立体像对构建流程

无人机正射影像立体像对构建包含数据准备与预处理、数据生成、数据检核3个步骤。在数据准备与预处理阶段，应对测区内的原始影像进行空三加密处理，获取相片精确的内外方位元素。空三加密处理后，根据影像密集匹配生成的点云输出DEM，并需经过简单的人工处理，如对建（构）筑物区域的DEM进行压平，以减少正射影像立体像对中建筑物和构筑物的拉花变形。测区的各个影像也应进行色调一致性处理，使得形成的正射影像立体像对在拼接处颜色自然过渡。正射影像立体像对数据生成的一个关键步骤是构造立体拼接线。与普通正射影像的拼接线不同，立体拼接线需满足更多的条件，即保证正射影像和辅助正射影像上的同名点分别来自某个立体像对中的左右片，这就要求对每个立体像对的重叠区进行拼接（图2），计算得到每个立体像对重叠区的中心点坐标，再根据这一系列中心点，在加入测区边界约束的情况下构建泰森多边形。该泰森多边形是从几何关系出发构造的立体拼接线，每个多边形恰好对应一个立体像对的重叠区。由于该拼接线构造方法未考虑影像内容，实际生产中往往还需对拼接线进行人工修改，修改时应尽可能使拼接线绕过高大的建筑物，避免拼接错位，这与编辑普通正射影像拼接线的原则是一致的。数据生成的另一个关键步骤是构造辅助正射影像，即利用DEM对影像进行数字微分纠正时引入人工视差。制作辅助正射影像时，需考虑到平面坐标 (X,Y) 是引入人工视差后的坐标，应求得高程 Z 。由于制作过程中视差无法事先获得，因此需通过迭代求解高程，获得 (X,Y,Z) 后可利用共线条件方程通过反解法计算至像平面坐标 (x,y) 。考虑到原始立体像对的视差方向与基线方向基本一致，引入视差的方向也应与该方向保持一致，即在与基线方向平行的DEM切面上引入视差。数据检核步骤是检查数据的立体显示效果是否逼真，地物的拉花变形是否严重，拼接线处地物是否错位。此外，还需在正射影像立体像对中导入控制点或检查点，并读取其坐标，

从而检核量测精度。

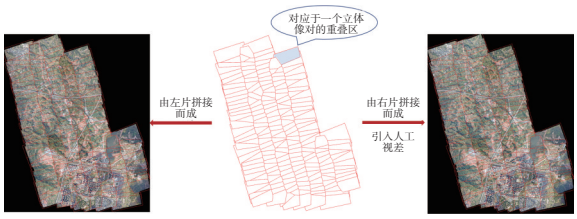


图2　根据拼接线构造正射影像立体像对过程

1.3　正射影像立体像对量测精度分析

在正射影像立体像对上进行地物量测主要有两种方法。第一种方法是量测出视差后根据视差引入函数反算高程。对于某个地物，在正射影像立体像对上其视差包括通过DEM高程引入的人工视差和DEM高程以上地物存在的天然视差，由于二者反算高程的公式并不相同，因此只使用视差引入函数计算高程必然存在误差。王密[7]分析发现，在地物碎部局部小范围水平的假设前提下，若忽略二次小项，人工视差与天然视差公式一致，但现实情况往往不满足局部小范围水平的条件，经推算，局部范围的高差变化导致量测出的高程偏移量为 $-\frac{x}{B}(h_2-h_1)$，h_1 为成像点在正射影像对应坐标的高程值，h_2 为成像点在辅助正射影像对应坐标的高程值，x 为从像底点起算，沿着基线方向的坐标值。由于存在投影差，量测地物时无法直接获得地物的真实平面坐标，因此无法直接计算地物高程。参考文献[9]在制作正射影像立体像对的过程中尽可能地保证引入的视差与天然视差一致，首先根据式（3）计算得到高程 Z，再利用相似关系计算得到地物投影位移量，并对平面坐标进行改正，获得精确的平面坐标。该方法虽然计算简单，但理论上并不严密。

$$Z_i=H\left(1-\exp\left(-\frac{P_i}{B}\right)\right)+Z_0 \tag{3}$$

第二种方法是量测出视差后反算至原始像点坐标，再通过前方交会计算得到精确的三维坐标。该方法虽然计算量大于第一种方法，但理论上较严密，只要量测的视差准确，即可达到原始相片的量测精度，系统采用这种方法。

2　正射影像立体像对测图系统的实现

2.1　测图系统的体系架构

测图系统通常包括两个显示界面，一个显示影像或模型，另一个显示采集的几何要素（图3）。系统从底层开发了正射影像立体像对显示界面ImageStereo2，由于目前生产中采集的地形图以DWG格式存储，因此基于ObjectARX开发了采集面板。该面板依赖于AutoCAD运行，负责创建采集图层；也是沟通ImageStereo2与AutoCAD的桥梁，可将正射影像立体像对上采集的几何要素数据流转换为AutoCAD支持的格式，还可将AutoCAD中的多种数据显示在正射影像立体像对上。

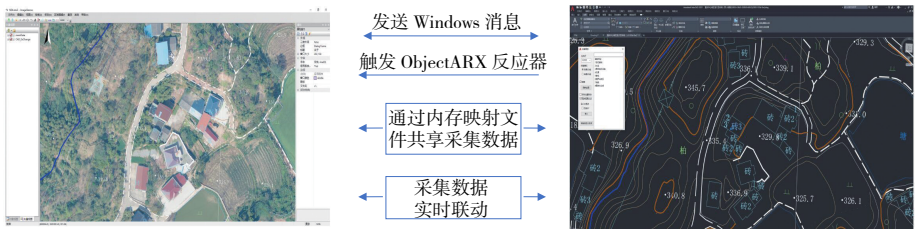


图3　测图系统主界面间的关系

2.2　正射影像立体像对的显示

正射影像立体像对由成百上千张高分辨率影像拼接而成，数据量较大。地形图采集过程中需频繁移动和缩放影像，为实现系统对大影像数据的高效调度和多尺度浏览，并降低内存消耗，减少过多的I/O操作，本文设计了分层分块交替式瓦片金字塔存储模式，将具体数据记录在内存映射文件中，并依据影像瓦片与正射影像立体像对左右片的从属关系及其在内存映射文件中的地址创建索引文件。通过内存映射文件可将物理存储器中的数据映射到进程地址空间，避免直接对文件进行I/O操作和创建缓存。生成正射影像立体像对时分块读取原始影像，并将其写入已经打开的内存映射文件视图中，作为瓦片金字塔的底部两层数据。读取原始影像后，对其逐层下采样，构建瓦片金字塔的上层数据。将各瓦片在内存映射文件中的偏移量、所在的金字塔层以及与原始影像的归属关系记录至索引文件。由于已将正射影像立体像对转换为规则的瓦片金字塔数据，并创建了索引，因此显示影像时可实现数据实时调度，达到流畅的浏览效果。此外，系统基于OpenGL立体四缓存技术实现数据的立体显示。

2.3　采集数据的维护与管理

根据系统架构，采集的几何数据需在ImageSte-

reo2与AutoCAD两个平台中共享。创建命名内存映射文件作为中间数据，并存储几何要素信息，操作系统可将该内存映射文件的视图分别映射至两个进程，从而实现数据的共享，当然该中间数据需转换为两个平台各自支持的数据格式。在某一平台改动几何数据时，另一平台的几何数据需自动更新，即在数据共享的基础上实现数据联动。数据联动机制是由Windows消息与ObjectARX反应器共同实现的，当ImageStereo2中采集的数据发生变化时，通过Windows消息将数据的索引发送至AutoCAD采集面板，采集面板更改相应数据；当AutoCAD中采集的数据发生变化时，将触发ObjectARX反应器，在反应器函数中发送消息通知ImageStereo2进行数据更新。

3 无人机测图系统的实验分析

3.1 测试数据与方法

本文选取不同区域的多个无人机测图项目利用本系统开展1∶2 000测图实验。不同项目的无人机影像可能由不同型号的相机拍摄，原始影像和制作的正射影像立体像对的分辨率均满足1∶2 000测图要求。在每个项目测区中，选取超过20个均匀分布的特征点，分别在本系统和商业测图软件MapMatrix中量测坐标，并计算二者的中误差，以衡量本系统的测图精度。对于存在较多外业检查点的项目，开展了本系统量测值与外业实测值的对比实验。高程量测精度与基高比有关，因此在西青茶N03、西青茶N06测区、白鹿原等3个项目中分别以不同影像重叠度的立体像对制作正射影像立体像对，分析了不同基高比下的高程量测精度。

3.2 实验结果与分析

以项目为独立的测试单元，分别统计各项目中所有检查点坐标与真值的均方根误差，以 Z 坐标为例，计算公式为：

$$\Delta Z=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(Z_i-Z_i^{'})^2}{n}} \tag{4}$$

式中，Z_i 为某点 Z 坐标的真值（以外业实测或MapMatrix量测为准）；$Z_i^{'}$ 为该点在本系统中量测的 Z 坐标值；n 为某一测区中选取的点数。

本系统与MapMatrix的量测精度对比见表1，与外业实测的量测精度对比见表2，可以看出，本系统平面量测精度较高，与真值的中误差在0.2 m以内；不同项目的高程精度存在差异，由量测型相机、非量测相机获取影像项目的高程精度分别约为0.2 m和0.4 m。从原始数据来看，非量测相机获取的影像像幅小、旋片角大、相邻相片的基线短，导致高程量测精度降低，且非量测相机并未经过精密标定，而是在空三加密过程中进行自检校；从制作的正射影像立体像对来看，部分地物存在扭曲变形；从软件操作来看，本系统仅量测地物相对于地面的视差，而传统测图方式量测地物与地面整体的视差，上述因素均对本系统的高程量测产生了不利影响。不同影像重叠度下本系统相对于MapMatrix的量测精度见表3，可以看出，在抽稀相片、提高正射影像立体像对的平均基高比后，本系统的高程量测精度得到了提升，因此制作正射影像立体像对时，可在保证测区无漏洞的前提下适当减小影像重叠度。总体来看，本系统能够满足规范《基础地理信息数字成果1∶500、1∶1 000、1∶2 000数字线划图》对国家1∶2 000测图的精度要求。

表1 本系统量测数据与MapMatrix的对比结果

项目	相机类型	测区	点数	平面误差/m	高程误差/m
西青茶	非量测相机	N03	60	0.147	0.402
西青茶	非量测相机	N06	60	0.195	0.452
兰合线	量测相机	N01	60	0.120	0.141
引汉济渭	量测相机	N06	50	0.145	0.154
引汉济渭	量测相机	N08	52	0.099	0.142
阿阿线	量测相机	N02	50	0.133	0.155
延榆鄂	非量测相机	N01	20	0.105	0.308

表2 本系统量测数据与外业检查点的对比结果

项目	相机类型	测区	点数	平面误差/m	高程误差/m
引汉济渭	量测相机	N06	21	0.204	0.205
引汉济渭	量测相机	N08	52	0.127	0.157
西青茶	非量测相机	N03	24	0.156	0.389
西青茶	非量测相机	N06	29	0.183	0.422
阿阿线	量测相机	N02	50	0.142	0.143
白鹿原	非量测相机		126	0.219	0.468

表3 不同重叠度下本系统量测数据与MapMatrix的对比结果

项目	点数	高程误差/m	平均重叠度/%
西青茶N03	60	0.402	91.5
	60	0.354	83.1
西青茶N06	60	0.452	89.7
	60	0.391	80.5
白鹿原	126	0.457	82.4
	126	0.386	75.9

4 结 语

通过分析制作正射影像立体像对时各种人工视差引入函数的优劣，本文选择对数视差函数引入人工视

（下转第101页）