引文格式：沈吉宝. 空地融合精细化实景三维重建方法[J]. 地理空间信息, 2023, 21(8): 114-117. DOI:10. 3969/J.ISSN. 1672-4623.2023.08.029

空地融合精细化实景三维重建方法

沈吉宝[1]
（1. 甘肃省测绘工程院，甘肃 兰州 730000）

摘　要：针对地形较大高差区域，采用单一航高获取多视影像数据构建实景三维模型存在模型粘连、狭窄底部扭曲，拉花无纹理等问题，提出空地融合的精细化实景三维重建方法。首先，使用飞马D200、D2000采集该测区的高分辨率多视影像数据；然后，使用精灵4RTK人工采集无人机难以获取的地物实景影像，再把所获取的影像数据输入到实景三维建模平台瞰景Smart 3D软件进行空三建模；最终获得符合项目要求的精细化实景三维模型。以某河谷测区为例，结果表明，本方法具有一定的技术可行性，可为类似工程提供技术参考。

关键词：倾斜摄影技术；空地融合；精细化三维重建；Smart 3D
中图分类号：P231　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）08-0114-04

Refined Real Scene 3D Reconstruction Method of Air Ground Integration

SHEN Jibao[1]
(1. Gansu Institute of Surveying and Mapping Engineering, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In view of the large elevation difference of terrain and the problems of model adhesion, narrow bottom distortion and no texture in the construction of 3D model by using a single aerial height acquisition image, we proposed a refined real scene 3D reconstruction method of air ground integration. Firstly, we used Pegasus D200 and D2000 to collect the high-resolution image data of survey area. Then, we used the Wizard4 RTK to manually collect the real image of the ground object whichwasdifficult to obtain by the UAV, andinputtedthe obtained image data into Smart 3D software for aerotriangulation and modeling. Finally, we gained the refined real scene 3D model meeting the requirements of project. Taking a river valley survey area for example, the results show that this method has certain technical feasibility and can be offered as technical reference for similar projects.

Key words: oblique photography technology, air ground integration, refined 3D reconstruction, Smart 3D

近年来，自然资源部要求全面推进实景三维构建，研制实景三维信息产品可以广泛应用于国土空间规划、生态保护修护、智慧城市等领域[1]。通常采用倾斜摄影[2-3]、贴近摄影测量[4]、三维激光扫描[5]等技术获取构建实景三维原始数据。

为了充分利用不同平台数据采集优势，提高构建实景三维模型的效率与精度，本文提出空地融合的精细化实景三维重建方法，以某河谷测区为例，验证本方法的可行性，为精细化实景三维重建提出一种新的思路。

1　空地融合精细化三维重建技术路线

本文总的技术流程见图1。首先，利用倾斜无人机摄影测量平台采集较大区域的多视影像数据，通过低成本、效率高的低空倾斜摄影测量技术获取多视影像数据，结合Smart3D软件对多视影像数据处理生成实景三维模型；然后，对于高差较大的地物以及重建失败区域，通过近景补拍方法进行模型精细化处理；最终，对多种方式获取数据构建实景三维模型进行融合，生成高精度、精细化的实景三维模型。

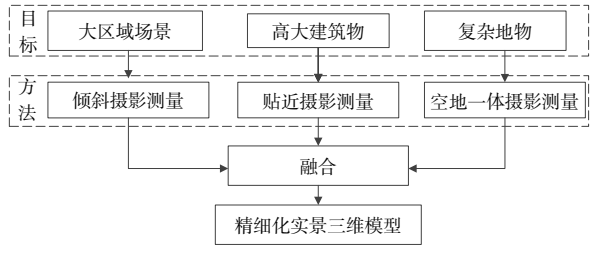


图1　空地融合的精细化实景三维构建路线

由于无人机拍摄获取影像数据与近地获取影像数

收稿日期：2022-03-27；修回日期：2022-06-28。
项目来源：甘肃省自然资源厅科技创新项目（202248）。
作者简介：沈吉宝（1984—），高级工程师，主要从事航空摄影测量、遥感影像处理、图像目标检测与识别等工作，E-mail：530649430@qq.com。

据存在尺度与拍摄角度差异较大，导致影像匹配失败，空三解算时无法准确计算影像位置与姿态信息。因此，为了提高空地影像数据融合效率，提出多源空地数据融合的空三策略。

1.1　POS数据辅助空三解算

光束法区域网平差方法是以像点坐标为观测值以影像为平差单元，进行影像姿态参数解算的方法，该方法以物方点、摄影中心、像点坐标三点共线为基础，利用共线方程建立像点与地面点的空间几何关系，具体关系见式1。通过多组像点坐标与对应性的物方点坐标，计算影像精确的姿态参数。

$$\begin{cases} x-x_0=-f\dfrac{\boldsymbol{a}_1(X-X_s)+\boldsymbol{b}_1(Y-Y_s)+\boldsymbol{c}_1(Z-Z_s)}{\boldsymbol{a}_3(X-X_s)+\boldsymbol{b}_3(Y-Y_s)+\boldsymbol{c}_3(Z-Z_s)} \\ y-y_0=-f\dfrac{\boldsymbol{a}_2(X-X_s)+\boldsymbol{b}_2(Y-Y_s)+\boldsymbol{c}_2(Z-Z_s)}{\boldsymbol{a}_3(X-X_s)+\boldsymbol{b}_3(Y-Y_s)+\boldsymbol{c}_3(Z-Z_s)} \end{cases} \tag{1}$$

式中，$\boldsymbol{a}_i$、$\boldsymbol{b}_i$、$\boldsymbol{c}_i$（$i=1,2,3$）为外方位角元素构成的旋转矩阵；x、y为影像像点坐标；x_0、y_0为相机内方位元素；f为相机主距；X、Y、Z为像点对应的物方坐标；X_s、Y_s、Z_s为影像外方位线元素。

常规的光束法区域网平差方法以像点坐标为观测值，影像精确外方位元素、像点物方坐标为待求参数。假设存在一个n°重叠点，则可列2n个误差方程，将所有误差方程组成法方程，即可利用误差方程解算物方点坐标与影像精确外方位元素。由于无人机搭载POS系统，该系统获取的姿态、位置数据可以直接参与到区域网平差数据解算中。由于无人机拍摄受外界影响较大，难以搭载高精度的GPS，因此原始POS数据含有较大的粗差，直接使用会产生较大误差。本文通过少量外业控制点数据计算POS系统获取参数改正数，并对原始POS数据进行改正，无需对现有的平差方法改动，避免复杂光束法区域网平差计算。

1.2　空地空三融合策略

多源空地数据融合关键在于多源数据影像匹配，获取不同数据空间几何关系，进而解算多源空地影像姿态参数。依据现有的多源影像重建基础，文中采用新的多源数据融合策略。首先，对无人机影像数据与近景数据分别进行空三处理，生成初始空三成果与稀疏点云数据；其次，对无人机影像数据与近地影像数据进行连接点自动匹配或人工选取同名点数据，使得多源空地影像数据的位置关系一致、稳健；最后，利用稳健的光束法区域网平差方法进行多源影像姿态数据解算，进行多源空地影像空三结果优化处理，如图2所示。

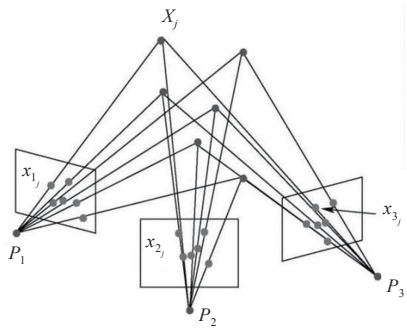


图2　稳健的多源影像匹配方法

利用SIFT特征提取方法对单一影像源数据进行匹配，获取匹配点数据集；对于多源影像数据匹配时，依据影像初始POS数据计算多源影像数据重叠区域，通过SIFT特征算法与多策略约束的误差剔除方法获取多源影像间的同名特征点集；对于匹配失败区域，利用人机交互的方法在无人机影像与近地影像上选取满足清晰、易于判读明显拐点，确保每个模型间具有一定数据的连接点。多源空地影像融合自由网空三解算完成后，利用外业控制点对自由网进行绝对定向处理，计算多源空地影像精确的姿态数据，并将解算结果转换到指定坐标系下。

2　工程实验

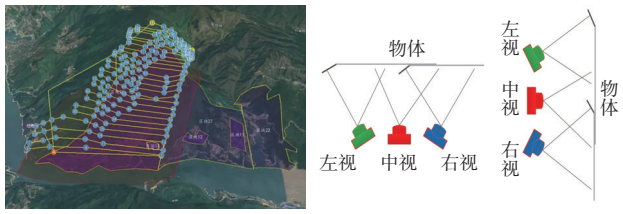
2.1　工程概况

根据测区内的海拔和地物分布情况，将测区分为山区、建筑群落区、重点标志建筑区3种类型。整个测区地形高差变化较大，地物、地貌比较典型，具有一定的实验代表性。多视影像数据数据获取，对整个测区先使用消费型飞马D2000、飞马D200获取大场景多视影像数据；对于高大建筑物，采用贴近摄影的方法获取多视影像数据；对于复杂建筑物，采用精灵4RTK采集地面影像数据采集。为验证本文方法构建实景三维精度，采用GNSS-RTK外业采集35个点坐标分别进行空三加密与实景三维模型精度检查。

2.2　航线设计

针对测区地形高差变化较大、地貌复杂多样，采用仿地飞行方式确保获取多视影像数据分辨率一致。在大面积山区，为了获取地面分辨率约为0.05 m的多视影像数据，采用具有长航时、便携性强、自动避障、断点续飞的消费型无人机飞马D2000结合飞马云台设置相对航高为532 m，航向重叠度为80%，旁向重叠度为70%等参数设计航线，设计航线如图3a所

示。对于建筑物密集区域，为了获取高清晰多视影像数据，采用抗干扰能力强，姿态平稳的消费型无人机飞马D200搭载全画幅成像效果好的A7R3镜头进行建筑物区域多视影像数据采集，设置影像分辨率为0.02 m、相对航高为155 m、航向重叠、旁向重叠均为80%，获取高分辨率建筑多视影像数据；对于复杂的建筑物使用精灵4rtk进行补拍，以满足模型精细度要求。由于不同建筑结构存在差异，补拍数据需要满足一定要求才能够作为融合数据进行后期的融合处理。具体方法如下：①拍摄的传感器镜头与建筑保持适中距离；②拍摄方式最好以建筑上部、中部、下部3种方式；③照片与照片之间保证60%重叠度；④照片中避免出现大面积水域，或者天空等无特征区域。具体方法见图3b。



a 航线设计　　b 贴近摄影测量

图3 多视数据获取方法

2.3 多视影像数据处理

首先，对于多视影像数据、影像对应初始定位、定姿参数，利用Smart3D软件的匹配模块进行多视影像匹配，获取具有重叠区域多视影像的同名点坐标，构建多视影像间相对几何位置关系；然后，利用外业采集的像控点坐标、影像同名点集以及影像初始定位参数，进行光束法区域网平差处理，生成影像对于高精度的定位参数；最后，通过Smart3D软件提供的多视密集匹配方法获取多视影像区域高精度密集点云数据，并由该点云数据生成不规则三角网，再根据纹理映射算法得到具有真实纹理信息的三维模型。

对于不同设备获取的多视影像数据，进行空中三角测量前确保关键点、连接点以及重投影误差，在规定的1个像素以内。多源数据合并策略：首先，运用倾斜航片结合实测地面像控点进行高精度区域网倾斜多视影像空中三角测量，生成高精度倾斜空三成果；同时利用地面定点拍摄的照片进行无控制空中三角测量，形成不带真实坐标的空三成果；接着运用添加连接点的方式，将无坐标的地面空三成果与高精度倾斜空三成果配准；最后，自动进行空地融合区域网空三平差解算，并生成高精度、远观逼真、近看真实美观的实景三维模型。具体模型见图4。



图4 实景三维模型

由图4可知，该方法构建模型几何结构更精细，贴图更真实，并且模型底部基本没有悬浮物，极大减少了修模的工作量。通过数据融合机制和误差阈值设定机制，保证了建模结构的完整性和贴图的真实性。同时多源数据融合策略，能够将空地一体多源影像数据全自动的空三和三维重建，生成高精细度的实景三维模型，保证有建筑物几何形状和纹理完整、正确。为高精度的实景三维建模提供了一种新的切实有效的方法，确保建模细节更优。

为了验证多源数据融合策略的优势，本文将仅用一种数据生成的三维模型与多源数据融合生成的三维模型进行比较。图5为具有代表意义的2个细节地物，从图5a、c可知仅用一种数据建立的模型对于单个细节模型有明显的失真和拉花现象，尤其是在有遮掩和纹理复杂的区域这种现象更加明显。经过多源数据融合后的模型可以充分解决丢失细节信息和模型拉花等问题，所以较于传统单层倾斜摄影数据，多种分辨率数据融合后，模型成果TIN格网三维结构更加精细，贴图效果更加清晰。



a 细节1 融合前　　b 细节1 融合后

c 细节2 融合前　　d 细节2 融合后

图5 细节对比

2.4 精度验证

为了进一步验证，多源数据融合构建实景三维模型精度，本文设计三组实验分别验证单一实景空三精度与多源数据空三成果精度、实景三维绝对定位精度与相对精度。

第一组实验，给出仅利用飞马D2000采集多视影

像数据空三成果精度与多源数据融合后的空三成果精度精细比较，检查点分布结果见图6。由于坐标点前几位数字相同，为了显示方便和保密需要，相同位置采用*表示，统计结果见表1，由表1可知，单一数据检查点X方法中误差为0.056 m，Y方法中误差为0.047 m，Z方法中误差为0.039 m，多源数据融合X方向中误差为0.053 m，Y方向中误差为0.045 m，Z方向中误差为0.038 m，相比较单一数据源各方向中误差有所下降，但精度提升效果不明显。笔者认为主要由于外业检查点一般选择在地势平坦的角点区域，该区域不存在高差变化与建筑物遮挡，多源重复观测对空三成果精度提升有限，多源数据在高差变化较大、不同视角存在遮挡情况下能提供不同视角纹理信息，避免实景三维纹理缺失问题。



图6　检查点分布图

第二组实验，利用GPS-RTK外业采集的30个检查点坐标与实景三维模型上量测的坐标进行比较，以验证实景三维模型的绝对定位精度。由于坐标点前几位数字相同，为了显示方便和保密需要，相同位置采用*表示，据具体统计可知30个检查点X方向最大误差为-0.062 m，中误差为0.045 m，Y方向最大误差为0.074 m，中误差为0.038 m，Z方向最大误差为0.051 m，中误差为0.032 m，满足《三维地理信息模型数据产品规范》[6]中1∶500比例尺规范要求。

表1　单一实景空三精度与多源数据空三成果精度/m

点号	外业			飞马D2000			飞马D2000误差			多源数据融合			多源数据融合误差		
	X1	Y1	Z1	X1	Y1	Z1	X1	Y1	Z1	X1	Y1	Z1	X1	Y1	Z1
KS01	*.562	*.258	*.256	*.623	*.207	*.215	-0.061	0.051	0.041	*.621	*.209	*.217	-0.059	0.049	0.039
KS02	*.362	*.492	*.386	*.323	*.538	*.428	0.039	-0.046	-0.042	*.397	*.536	*.429	-0.035	-0.044	-0.043
KS03	*.238	*.283	*.564	*.297	*.245	*.535	-0.059	0.038	0.029	*.299	*.25	*.537	-0.061	0.033	0.027
KS04	*.426	*.913	*.121	*.373	*.956	*.075	0.053	-0.043	0.046	*.375	*.959	*.079	0.051	-0.046	0.042
KS05	*.352	*.551	*.777	*.288	*.605	*.812	0.064	-0.054	-0.035	*.297	*.602	*.814	0.055	-0.051	-0.037
			最大误差				0.064	0.054	0.046				0.061	0.051	0.043
			中误差				0.056	0.047	0.039				0.053	0.045	0.038

第三组实验，利用高精度全站仪采集12个典型地物的长度与实景三维模型上量测对于地物长度进行比较，以验证实景三维模型的相对定位精度。据具体统计结果可知（表2）；12个典型地物长度的最大误差为0.076 m，中误差为0.052 m，误差分布均匀且不存在过大误差，说明该方法构建的实景三维模型内部精度一致，满足1∶500比例尺应用要求。

表2　相对定位精度/m

地物号	实测	模型量测	误差	地物号	实测	模型量测	误差
MX01	3.156	3.212	-0.056	MX08	1.268	1.294	-0.026
MX02	5.297	5.221	0.076	MX09	6.284	6.233	0.051
MX03	4.391	4.356	0.035	MX10	7.264	7.205	0.059
MX04	10.245	10.299	-0.054	MX11	6.253	6.314	-0.061
MX05	3.247	3.178	0.069	MX12	3.245	3.202	0.043
MX06	4.168	4.192	-0.024	最大值		0.076	
MX07	3.486	3.447	0.039	中误差		0.052	

3　结　语

针对测区场景复杂、高差较大的河谷地区，传统三维建模方法存在模型粘连、底部扭曲，拉花无纹理等问题。文中提出空地融合的精细化的实景三维重建方法，通过多源数据融合技术，获取高精度、视角逼真的实景三维模型。为实景三维重建提供一种新思路，具有一定的工程意义和推广价值。但该方法在空地影像角度、重叠度、色差调整等方面也存在一些不足，这也是下一步探索的方向。

参考文献

[1]　朱庆，张利国，丁雨淋，等. 从实景三维建模到数字孪生建模[J]. 测绘学报，2022，51(6):1-13

[2]　马国吉，马国斌，马国宝，等. 消费型无人机倾斜序列影像三维重建研究[J]. 地理空间信息，2021，19(7):31-35

[3]　肖雄武. 具备结构感知功能的倾斜摄影测量场景三维重建[J]. 测绘学报，2019，48(6):802

[4]　苗志成，杨永崇，于庆和，等. 贴近摄影测量在单体建筑物精细化建模中的应用[J]. 遥感信息，2021，36(5):107-113

[5]　高云龙，张帆，黄先锋，等. 融合影像的机载激光扫描点云建筑物三维重建系统设计与实现[J]. 测绘通报，2014(4):79-81

[6]　三维地理信息模型数据产品规范: CH/T 9015-2012[S].