

考古遗址的超低空拍摄与数据处理

刘建国

关键词：考古遗址 超低空拍摄 数据处理

KEYWORDS: Archaeological Sites Low-altitude Photography Data Processing

ABSTRACT: To process the digital images taken by low-altitude photography with the multi-view three-dimensional reconstruction technology can make three-dimensional reconstruction to the archaeological remains of various sizes, from a single excavation grid to the sites of ancient city or settlement covering areas as large as dozens of hectares, and rapidly present digital products such as high-quality three-dimensional point cloud models, three-dimensional models with real textures, the digital orthophoto maps with resolution of 1-5 cm, the façade images, digital surface models (digital elevation models) and so on, based on which the plans and contour maps of the sites can be drawn; this technology has characteristics of quick completion, high precision and simple operation, which will thoroughly change the traditional mapping methods of the archaeological fieldwork, and provide powerful support to the archaeological surveys and excavations and cultural heritage conservations.

前 言

考古调查与发掘过程中，往往需要从较高的位置拍摄遗址或遗迹的影像。考古界同仁曾经借助气球、梯子等的辅助来拍摄影像，但总是很难达到令人满意的效果。近年来，随着固定翼、多旋翼无人驾驶遥控飞机技术的成熟与使用，田野考古工作现场的超低空拍摄变得简单而且有效，可以满足考古调查、发掘、保护工作中大场景影像拍摄、三维重建、遗迹与地形测绘等的需要。

用于考古工作中超低空拍摄的遥控飞机类型很多，一般固定翼遥控飞机飞行高度比较高，速度快，适合拍摄较大范围的考古遗址。多旋翼遥控飞机有四轴、六轴、八轴等，可以垂直起降，慢速飞行，适合

拍摄中、小型遗址，甚至考古发掘的探方。四轴、六轴的遥控旋翼飞机可以携带微单相机，八轴遥控旋翼飞机可以携带单反相机进行超低空拍摄。

2013年11月18日实施的《民用无人驾驶航空器系统驾驶员管理暂行规定》^[1]指出，重量小于等于7公斤的微型无人机，飞行范围在半径500米以内、相对高度低于120米的目视视距范围内，无须证照管理。现在很多六旋翼遥控飞机飞行平稳，驾驶简单，价格低廉，携带微单相机后重量在3公斤左右，进行考古遗址超低空拍摄的人员无须申领驾驶执照。

本文结合一些实例，探讨使用遥控飞机对考古遗址进行超低空拍摄的地面控制、相机设置、数据处理、成图等技术。

作者：刘建国，北京市，100710，中国社会科学院考古研究所。

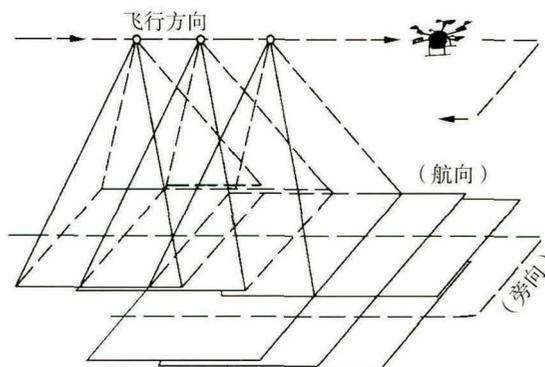
一、控制测量与超低空拍摄

超低空拍摄之前需要在地面设置、测量一些控制点，控制点标志可以摆放在在拍摄区域的四角位置，避免沿一条直线摆放。控制点标志一般使用四五个具有红色、黄色三角形图案的环氧树脂标志板（图一），标志板的中心位置非常明确，在不同分辨率的影像上都可以精确地确定，红、黄颜色在野外绿色、灰色等环境中也非常醒目，易于辨认。标志板的大小应该根据飞行高度和相机焦距来确定。使用全画幅相机、2400万像素、21~25毫米焦距镜头拍摄时，相对高度在30米以内时可以使用10厘米×10厘米的控制点标志板，相对高度在30~60米时可以使用20厘米×20厘米的控制点标志板，相对高度在60~100米时可以使用30厘米×30厘米的控制点标志板。标志板大小合适时，才能在拍摄的影像中清晰明显，易于标注中心位置。

控制点坐标需要使用电子全站仪或RTK进行测量，使用电子全站仪进行测量可以获得很高的测量精度，特别是使用免棱镜方式直接瞄准控制点中心进行测量时，能够得到3~5毫米的测量精度。使用棱镜测量时，应该尽量降低棱镜的高度，以提高测量精度。使用RTK进行测量时的误差有时可能达到10



图一 控制点标志与带有控制点标志的影像



图二 遥控飞机飞行拍摄路径示意图

厘米左右。现场测量的控制点坐标数据最好使用照相机拍摄，或者直接联机导出文本文件，以避免笔录时出现抄写错误。

超低空拍摄之前照相机的设置非常重要，应该使用手动档（M档）进行拍摄，选择拍摄范围内最亮的地面物体进行测光，使最亮地物在拍摄的影像上曝光合适，其他地物的曝光可以稍微弱一些。光圈为8左右，具有防抖功能照相机的曝光时间为1/500~1/400秒，无防抖功能照相机的曝光时间为1/1000~1/800秒，感光度范围在100~400之间，自动白平衡。使用的镜头选择短焦距的手动对焦镜头。这类镜头的超焦点距离很近，设置合适后一般在几米之外都能够清晰成像。

拍摄过程中，遥控飞机从拍摄区域一角起飞，起飞前开始使用计时器记录飞行时间，到达合适的飞行高度后沿着摄影区域一边向左（或向右）飞行，每隔3秒左右拍摄一幅影像，相邻两幅影像拍摄的范围保持80%左右的航向重叠。到达拍摄区域另一个边角后向前飞行一段距离，再向右（或向左）飞行，完成第二个航带的拍摄，两个航带之间的影像保持20%~30%左右的旁向重叠，然后再拍摄第三航带、第四航带等（图二）。根据计时器记录的飞行时间，在电池电量耗尽之前将遥控飞机降落，更换电池后进行后续拍摄。

拍摄时的飞行高度需要根据影像的分辨率来确定，一般飞行3~4米的相对高度可以获得1毫米的正射影像图，30~40米的相对飞行高度可以获得1厘米的正射影像图，100米左右的相对飞行高度可以获得3~5厘米的正射影像图。

为了获得更好的三维重建效果，在地表起伏较大的遗址、具有较深的探方壁等情况下，需要将照相机倾斜安置在遥控飞机的下面，从不同位置拍摄多视角的影像。

二、数据预处理

拍摄的影像应该在现场进行简单处理，检查拍摄区域内的影像覆盖是否完整，有没有遗漏的部分。如果只是浏览影像，还不能判断全部的覆盖情况，就需要选择一部分影像使用多视角三维重建软件Agisoft Photoscan进行初步处理。由于拍摄现场往往只有笔记本电脑可供使用，所以选择的影像大致保持50%~60%的航向重叠，并且把6000×4000像素的影像备份后缩小成3000×2000或更低像素（如1800×1200），影像数目较多时需要进行分组，大致200幅影像处理一次。根据预处理的结果，如果有遗漏区域，需要立即进行补充拍摄，如果没有遗漏区域，可以回到办公室使用图形工作站进一步处理。

由于超低空拍摄的影像是以拍摄区域中最亮地物测光拍摄的，所以有时影像的主体亮度偏暗，如果进行三维重建的效果比较差，则需要对全部影像的亮度与反差进行调整。

亮度调整是对影像直方图进行线性拉伸或压缩，Adobe Photoshop

等软件菜单中的“色阶”就是调整影像的亮度。影像直方图表示不同亮度的像素数量分布情况（图三），可以通过移动直方图下面黑色、灰色、白色三个小三角形来调整影像亮度。其中黑色、白色两个三角形可以在无像素区域（图四中两条红色竖线之外）移动，灰色三角形应该移动到直方图曲线峰值附近。一边调整黑色、灰色或白色小三角形，一边观察影像的变化，直到比较满意为止。

反差调整是对影像直方图进行非线性拉伸，Adobe Photoshop等软件菜单中的“曲线”就是调整影像的反差。打开“曲线”对



图三 原始影像及其直方图



图四 直方图调整后影像亮度变化情况

对话框之后，在斜线右上、左下附近分别点击一次，产生两个节点，将右上节点向左上提升一些，左下节点向右下拉伸一些，同时观察影像质量的变化（图五）。每次“曲线”调整的幅度不宜太大，如果影像质量仍然不理想，可以进行第二次“曲线”调整（图六）。

亮度和反差调整能够显著提高影像的质量，如果处理低空拍摄的数百幅数字影像，可以通过Adobe Photoshop软件的快捷键来提高速度，如“Ctrl+Alt+L”是根据上次的参数进行亮度调整，“Ctrl+Alt+M”是根据

上次的参数进行反差调整。因此，处理过程中每次可打开10幅左右的影像，对每幅影像进行一次亮度调整、一次或两次反差调整之后，关闭、保存影像即可完成。

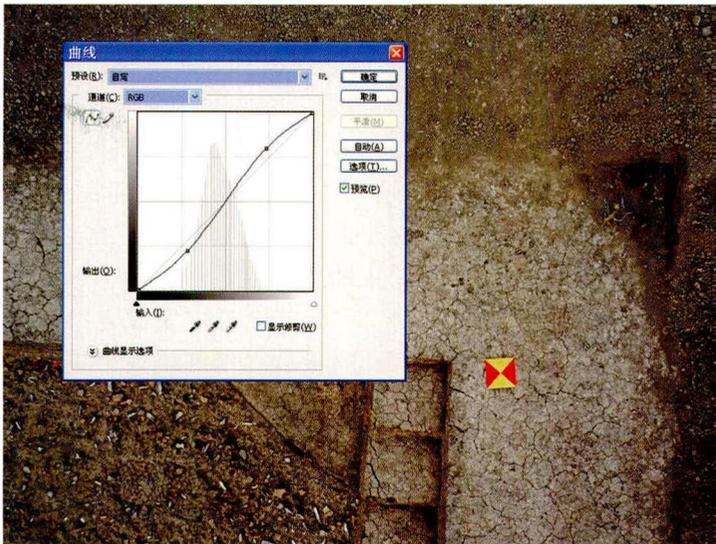
三、三维重建与数据输出

运用Agisoft Photoscan软件可以根据超低空拍摄的全部数字影像进行三维重建，制作拍摄区域的三维模型，然后在三维模型上标注控制点的准确位置，输入各控制点的三维坐标，将三维模型安置在平面直角坐标系中，最后导出通用格式的三维模型、正射影像图、数字表面模型（DSM：Digital Surface Model）等数字成果。

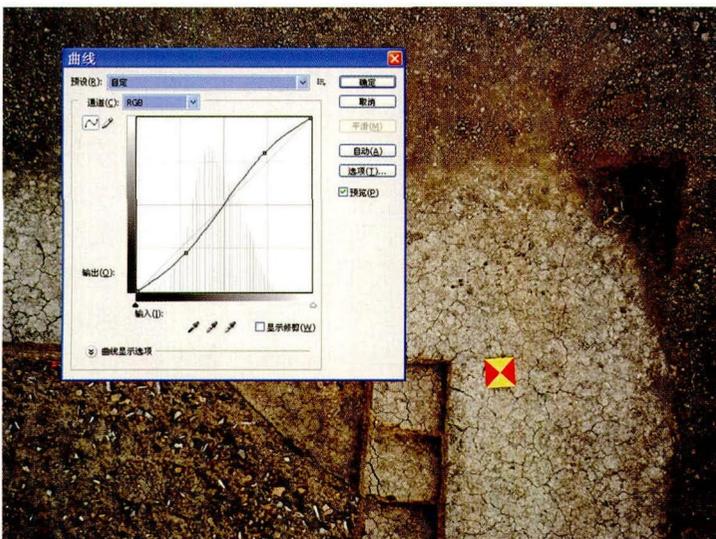
三维重建之前需要对全部影像进行筛选，尽量减少参与处理的影像数目。没有树木、房屋且地势平缓的区域，相邻影像应该具有50%~60%的航向重叠；有树木、房屋的区域，相邻影像需要具有80%左右的航向重叠。400幅以内的影像可以使用6000×4000像素，超过400幅影像时最好把像素降到3000×2000像素，一次处理的影像数目最好不超过1000幅。

使用Agisoft Photoscan时，右键单击“工作区”弹出对话框“添加堆块”，左键单击选择，工作区中出现“Chunk 1”，再右键单击“Chunk 1”，弹出对话框后选择“添加照片”，打开存放数字影像的文件夹，选择用于三维重建的全部影像（图七）。

三维重建的过程就是依次运行软件“工作流程”菜单中



图五 反差调整及影像反差变化情况



图六 第二次反差调整及影像反差变化情况

的“对齐照片”、“建立密集点云”、“生成网格”、“生成纹理”四个步骤(图八)。其中“对齐照片”后生成稀疏点云,据此调整好工作区域的大小与方向,再“建立密集点云”,此时需要根据软件显示的稀疏点云的数目选择密集点云的精度,有“最高”、“高”、“中”、“低”、“最低”可供选择。一般稀疏点云1万以内可以选择“中”,1~5万选择“低”,超过5万选择“最低”。生成的密集点云的数目最好在2000万以内,否

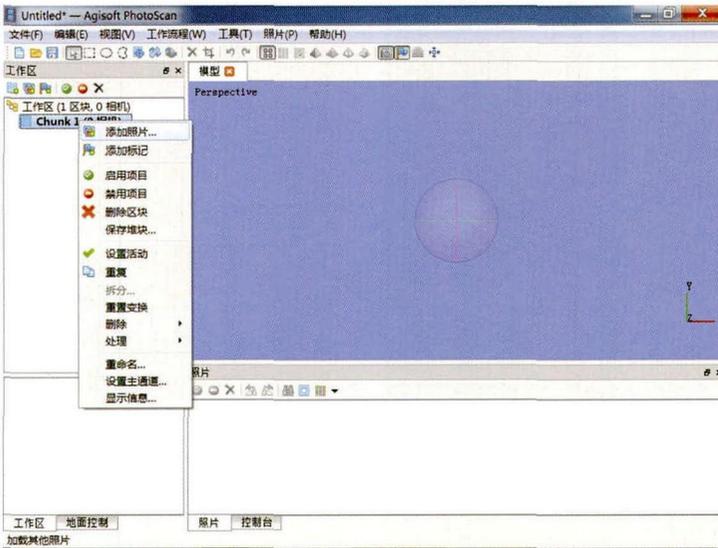
则需要花费很长的处理时间。“生成网格”数目可以根据模型的复杂程度选择20~200万面。

“生成纹理”的大小可以修改为6000~20000之间,方式选择“平均”。

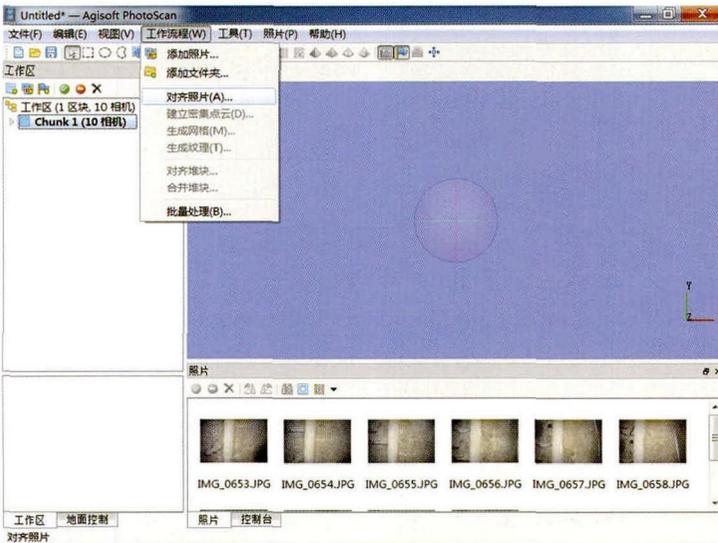
“对齐照片”步骤完成之后,需要检查整个区域的稀疏点云是否完整。如果有很多影像没有参与生成稀疏点云,需要找出参与生成稀疏点云的最前、最后两幅影像文件名,查看这两幅影像前、后有没有未被选择参与三维重建的影像,如果有,则选择进来重新处理;如果没有,则需要增加两个“堆块”,把缺失部分的影像分别添加到“Chunk 2”、“Chunk 3”中进行“对齐照片”处理,然后“对齐堆块”、“合并堆块”,对合并后的堆块进行“建立密集点云”等后续处理。

三维重建完成之后,将鼠标放在三维模型中控制点标志板附近,转动滚轮进行放大,右键点击控制点标志板的中心位置,选择弹出对话框的“添加标志”。全部控制点标注完毕,左键单击软件界面左下角的“地面控制”(或“参照”,不同版本的软件有差别),依次双击“point 1”、“point 2”等控制点的X、Y、Z栏,输入测量的三维坐标数据,进行“设置”后完成三维模型的坐标系设置(图九)。输入三维坐标时需要注意的是,电子全站仪与RTK的X、Y、Z坐标分别表示北坐标、东坐标、高程,软件中的X、Y、Z坐标则分别表示东坐标、北坐标、高程。

坐标设置完成后,检查各



图七 添加影像的操作界面



图八 工作流程的操作界面

控制点的误差大小。如果误差很大，需要检查控制点的顺序是否准确，输入的各控制点的坐标数据有没有错误。经计算确认误差很小之后即可导出三维模型、正射影像图等成果。

“导出模型”菜单可以导出3ds、pdf等格式的三维模型数据。导出pdf格式文件时，生成的三角网数目不能超过60万、纹理大小不能超过8000，否则打开文件后无法浏览三维模型。

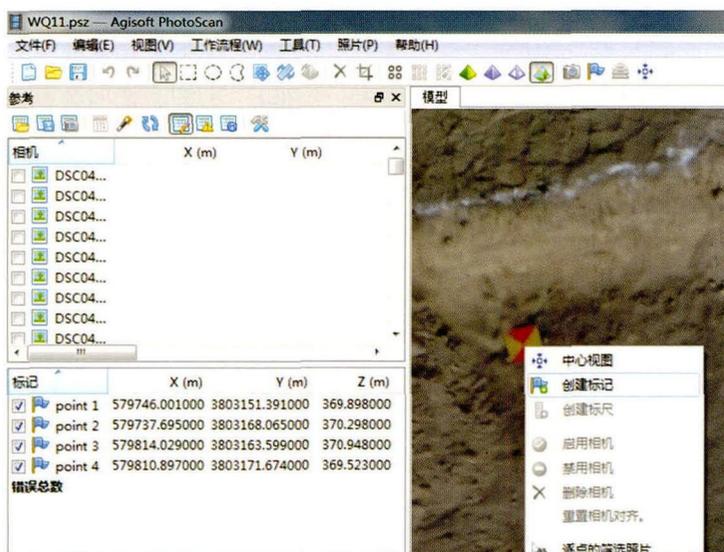
“导出正射影像”对话框打开后，需

要选择“投影平面”为“顶部XY”。“像素大小”根据具体情况输入，探方的正射影像图可以输入1~10毫米，遗址的正射影像图可以输入2~5厘米。选中“写世界(world)文件”前的复选框，指定保存的路径和文件名即可(图一〇)。“导出DEM(数字高程模型)”的情况与“导出正射影像”类似，分辨率数值可以与正射影像图一致或稍大。

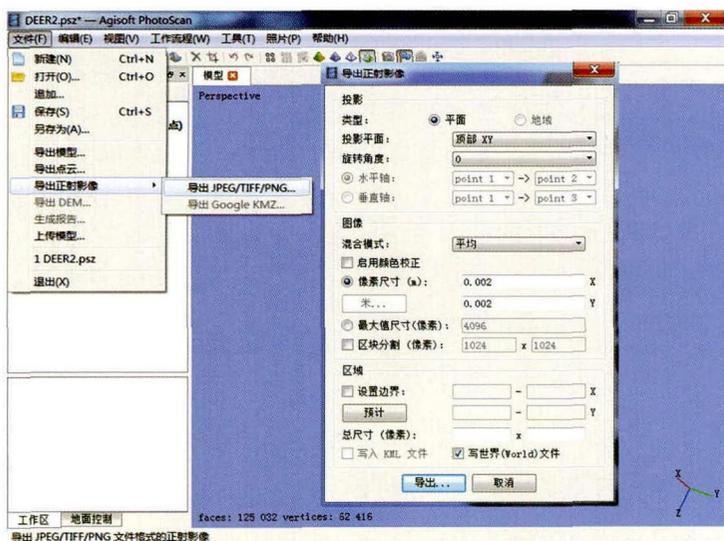
四、成果整理与应用

Agisoft Photoscan软件导出tif格式正射影像的同时产生一个tfw文件，这是影像的坐标参照文件，可以通过Windows中的“记事本”程序打开，其中的第1、4行分别表示正射影像X、Y方向的分辨率，第5、6行分别表示影像左上角的X、Y坐标。根据影像分辨率可以通过Adobe Photoshop软件在正射影像中标注图解比例尺，例如在4厘米分辨率的正射影像上绘制比例尺时，可以使用“固定大小”的矩形选择工具，选择250×4像素的选区，填充黑色或红色，然后在其两端上部进行数字标注(250像素表示实地10米，所以应该标注“0”和“10米”；图一一)。具有图解比例尺的正射影像可以加载到Adobe Photoshop、ArcGIS软件或其他制图软件中绘制线划图，用这种方法绘制图形，成图速度快、精度高，能够绘制各种复杂的考古发掘现场图形。

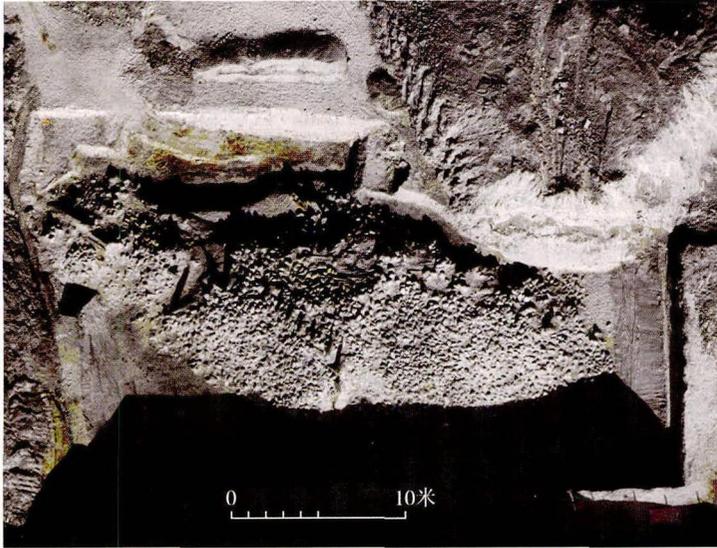
导出的数字高程模型文件实际上只是数字表面模型，只有在模型表面没有树木、房屋



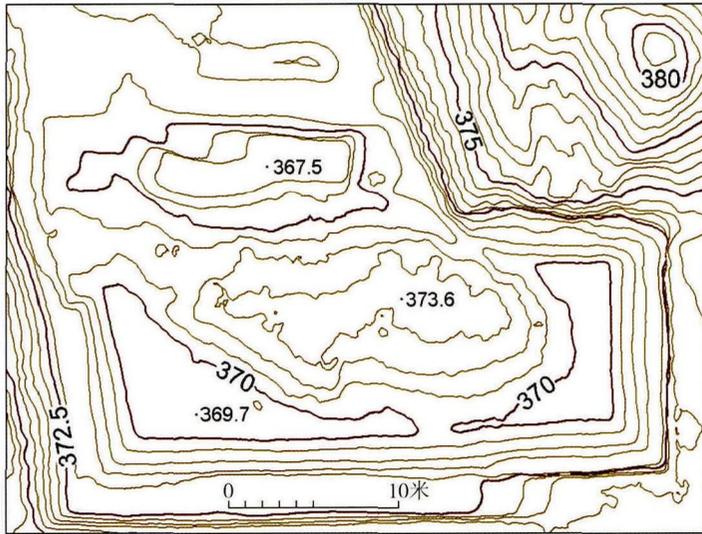
图九 输入控制点坐标的操作界面



图一〇 导出正射影像图的操作界面



图一— 根据三维模型生成的正射影像图



图一二 根据数字高程模型生成的等高线图

等覆盖的情况下，才可以看做是数字高程模型。数字高程模型文件直接加载到ArcGIS软件或Global Mapper软件中，生成并导出等高线文件（图一二）。如果模型表面被树木、房屋等覆盖，需要根据实际情况对等高线进行修改，消除树木、房屋等对等高线产生的影响。

根据三维模型除了可生成各种遗迹的平面图，还可生成不同立面的正射影像图；对三维模型的重要部位进行裁切，能够获取不同部位的断面影像图，据此绘制遗迹的立面图、剖视图、剖面图等。

结 语

运用多视角三维重建技术处理超低空拍摄的数字影像，可以对考古发掘的单个探方至数十万平方米的古城遗址、古村落等进行三维重建，快速生成高质量的三维点云模型、具有真实纹理的三维模型、1~5厘米的正射影像图、立面影像图、数字表面模型（数字高程模型）等数字成果，进而可以绘制遗迹平面图、等值线图等产品，成图速度快、精度高、操作简单，将彻底改变传统田野考古绘图方法，为考古调查、发掘和文化遗产保护提供有力的支持。

发掘探方、遗迹、遗址等的真实三维模型，全面记录遗迹或遗址的空间信息，为之后发掘报告的整理、考古学研究、博物馆展示等奠定了坚实的基础；而低成本、易操作的三维重建技术，将会在博物馆展陈、文化遗产保护与考古学研究中得到迅速、广泛而深入的运用。

附记：此项研究是科技部科技支撑计划“中华文明探源及其相关文物保护技术研究”中“遥感技术在中华文明探源中关键技术应用研究”课题的内容，课题编号：2013BAK08B06。

注 释

[1] 《民用无人驾驶航空器系统驾驶员管理暂行规定》（编号：AC-61-FS-2013-20），中国民用航空局飞行标准司，2013年11月18日实施。

（责任编辑 洪石）