

可移动文物的多视角影像三维重建*

中国社会科学院考古研究所 刘建国

随着计算机和三维重建技术的发展,对考古发掘的遗址、遗迹、出土文物等进行三维重建的理论与方法日臻完善。其中多视角影像三维重建技术能够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、高分辨率的正射影像图、立面影像图、数字高程模型等数字成果,进而可以绘制遗迹平面图、等值线图图等图件,成图精度高,速度快,操作简单,为考古发掘、研究和文化遗产保护、展示等提供有力的支持。

可移动文物的三维重建对于考古现场信息获取、存档、绘图,以及数字博物馆建设等都具有重要的意义。本文以东大杖子 M40:16 彩陶盖盖的三维重建为例,探讨可移动文物三维建模的精度与方法等问题。

一、可移动文物的控制测量与精度分析

多视角三维重建技术生成的三维模型没有真实的空间关系信息,不能直接量取模型上空间点位之间的距离等数据,所以在进行多视角影像拍摄时必须设立 3 个以上的控制点。生成三维模型之后,通过控制点的三维坐标数据对其进行绝对定向,将三维模型安置在给定的坐标系中,才能够量取空间点位间的距离,并且在生成的正射影像图中准确添加比例尺等。

一般电子全站仪的测量精度最高可控制在 2~3 毫米,无法满足对可移动文物进行控制测量的精度要求,所以不能使用电子全站仪进行控制测量。比较简单的办法是拍摄多视角影像时将可移动文物放置在坐标纸上,对文物与坐标纸一起建立三维模型,然后从模型中的坐标纸上选择 3~4 个明显格网点作为控制点,将格网数值换算成相对坐标数据后对三维模型进行坐标控制。

但是运用坐标纸进行控制测量的方法也存在一些问题。首先,坐标纸上放置文物后很难保持纸面平整,影响控制测量的精度;其次,坐标纸一般都是蓝色或橘黄色格网,光线反射后会影响到文物的正常色调;第三,坐标纸上规则格网不断重复,对三维重建过程中的自动匹配产生干扰,降低控制测量的精度。所以需要设计制作独特的测量控制板。

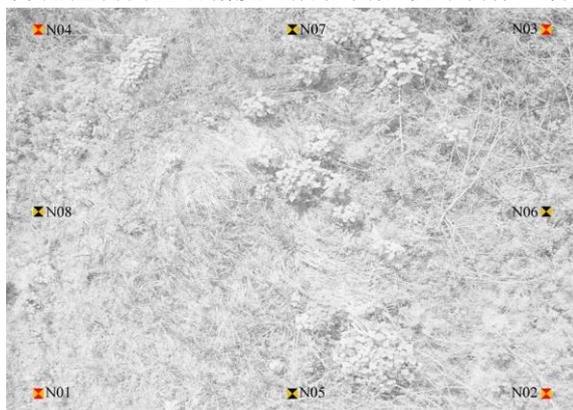


图 1 控制点与检查点分布图



图 2 控制测量板与高程检查点

制作的控制板应该选择浅灰色图案,设置有 4 个红、黄标志的控制点和 4 个黑、黄标志的检查点(图 1),使用彩色激光打印机将图案打印在较厚的铜版纸上,然后与平整的环氧树脂板粘贴在一起。再使用数字显示的游标卡尺精确量测各控制点与检查点之间的距离,并换算成相对平面直角坐标数值。由于控制板中控制点与检查点都在同一个平面上,不利于三维重建的高程精度分析,所以选择一只纸盒进行三维重建,纸盒顶面与侧面标注 4 个黑、黄标志的高程检查点(图 2),使用数字显示的游标卡尺精确量测标志中心的相对高程数值。然后拍摄一组控制板与纸盒的多视角数字影像,使用 Agisoft Photoscan 软件制作三维模型,在模型上标注控制点与检查点标志中心,

* 本文研究是 2012 年度国家社会科学基金重大项目《东大杖子墓地及相关遗址的发掘与研究》的内容,项目编号:12&ZD193。

输入控制点、检查点的三维坐标数值，其中 N01~N08 点的高程值为 0，N09~N12 只输入高程数值。选择控制点 N01~N04 进行控制计算之后，统计控制点与检查点的坐标精度（表 1）。

表 1 控制点与检查点的三维坐标与误差数值（单位：米）

点号	X 坐标	Y 坐标	Z 坐标	X 误差	Y 误差	Z 误差
N01	0.000000	0.000000	0.000000	0.000035	-0.000153	0.000064
N02	0.249000	0.000000	0.000000	-0.000095	-0.000046	-0.000064
N03	0.249000	0.178700	0.000000	-0.000047	0.000089	0.000064
N04	0.000000	0.178700	0.000000	0.000108	0.000110	-0.000064
N05	0.124500	0.000000	0.000000	-0.000037	-0.000101	0.000130
N06	0.249000	0.089720	0.000000	-0.000053	0.000054	-0.000067
N07	0.124500	0.178700	0.000000	-0.000005	-0.000031	-0.000040
N08	0.000000	0.089720	0.000000	0.000113	0.000031	-0.000145
N09			0.120300			0.000082
N10			0.114400			0.000055
N11			0.120300			0.000158
N12			0.076850			0.000131

控制测量实验中，使用数字显示的游标卡尺通过目视观测各点间的距离，换算成控制点与检查点的平面坐标或高程，其精度大约在 0.1 毫米左右。建立三维模型之后，准确标注各点位置并进行计算，控制点与检查点的平面坐标和高程误差基本上控制在 0.1 毫米左右，表明 Agisoft Photoscan 软件生成三维模型与正射影像图等成果的精度应该优于 0.1 毫米，能够满足绘制 1:1 可移动文物线划图的精度要求。

二、可移动文物的影像拍摄

拍摄可移动文物多视角影像的数字相机最好具有可翻转的显示屏，便于从不同角度对文物进行取景、拍摄。理想的拍摄环境是将文物放置室外走廊的阴影下或使用大遮阳伞，避免阳光直接照射到文物。相机设置成手动档（M 档），选择文物最亮部分测光，设置光圈与曝光时间，使其曝光合适，一件器物的影像使用相同参数设置，较暗部位可以曝光稍弱，必要时可以使用软件调整影像的亮度与反差。光圈数值最好选择 8 或 10，这是每只镜头成像最佳的光圈，而且具有较好的景深。曝光时间应小于 1/60 秒。一般相机的感光度设置在 100~400 之间，少数高感光度相机可以增加。手动设置白平衡为日光或阴天等模式，因为自动白平衡模式在拍摄不同角度影像时，往往会由于白平衡模式的变化，导致相邻影像之间出现色调差异很大的情况。对焦模式选择中心位置单点、单次自动对焦。尽量不使用闪光灯拍摄，如果必须使用，应该启用闪光灯的 TTL 模式。

为了生成可移动文物上下左右各个角度的三维模型，其多视角影像一般分两组拍摄，然后在 Agisoft Photoscan 软件中分别生成密集点云，最后通过密集点云合并生成完整文物的密集点云。本文选择 M40:16 的彩陶簋盖作为样例，介绍多视角影像的拍摄与三维模型合成方法。

拍摄第一组影像时，首先将测量控制板放置在平整、稳定的小台面上，然后在测量控制板上平稳地放置彩陶簋盖，最好把准备生成彩陶簋盖剖视图的方向与控制板边缘（坐标轴）的方向一致。对于比较大的可移动文物，可以将测量控制板水平放置在文物附近。如果对三维重建后文物的色调要求很高，拍摄时还应该摆放标准色卡，以便后期对照色卡调整模型纹理的色调。按照图 3 中红色箭头指示的方向围绕彩陶簋盖拍摄 4 圈影像；再把彩陶簋盖翻转过来，放在另外一个台面上按照图 4 中红色箭头指示的方向围绕彩陶簋盖拍摄另外 4 圈影像。两组影像中的第一圈拍摄 5~6 幅影像，第二、三、四圈分别拍摄 18~20 幅影像。整件器物拍摄约 120 幅影像即可。其中拍摄第二组影像时不需要使用测量控制板，但是必须与拍摄第一组影像时使用不同位置安放的不同台面，否则两组影像生成的点云数据就会以共同的台面为参照进行配准，无法生成完整的三维

模型。拍摄第二组影像时，文物可以倒置，也可以侧立放置，只要让其底部不与台面接触即可。

拍摄可移动文物的多视角影像时尽量不要使用旋转平台，因为使用旋转平台时必须使文物的背景色调单一，否则软件会以每幅影像周边的背景为参照，无法生成准确的文物三维点云数据。而且使用旋转平台时拍摄角度也受到很大的局限，不利于表面复杂的可移动文物的三维重建。



图3 拍摄第一组影像的对焦位置



图4 拍摄第二组影像的对焦位置

三、可移动文物的三维重建

在进行三维重建之前，应该首先检查全部影像的亮度、反差是否合适。对于亮度暗淡、反差低平的影像，应该设置合理统一的参数对全部影像进行调整。

在 Agisoft Photoscan 软件中，首先建立两个“堆块”分别加载拍摄的两组多视角影像。其中第一组拍摄的影像要运用“工作流程”菜单中“对齐照片”、“建立密集点云”、“生成网格”、“生成纹理”的四个步骤，然后依次精确标注测量控制板上 4 个控制点，在“参照”面板中分别输入 4 个控制点的三维坐标数据，进行“设置”后检查各控制点的误差情况。

第二组拍摄的影像只处理“工作流程”菜单中的“对齐照片”与“建立密集点云”两个步骤。然后运行“工作流程”菜单中的“对齐堆块”，之后使用点云编辑工具删除拍摄时支撑台面、测量控制板的点云与离散噪点等的密集点云。再运行“工作流程”菜单中的“合并堆块”，选择菜单中的“合并密集点云”选项，软件会生成一个名为“Merged Chunk”的堆块，查看合并后的密集点云是否完整，回到“参照”面板中点击“设置”图标进行坐标系设置。再运行“工作流程”菜单中的“生成网格”与“生成纹理”，完成整件文物的三维重建工作。

各项设置参数不宜过大，“建立密集点云”的“质量”选项选择“中”、“低”或“最低”，“生成网格”的“面数”为 80 万左右，“生成纹理”的“纹理大小”为 6000~20000 即可。

四、数据导出



图5 坐标转换前导出的俯视影像图

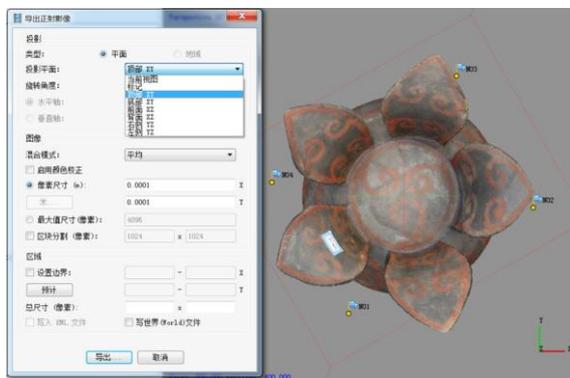


图6 导出正射影像图的界面

根据三维模型即可直接导出各平面、立面、剖面等正射影像图。图 5 是彩陶簋盖的俯视影像图，如果需要导出图 5 中 AA'方向的剖面图，则需要对 4 个控制点的平面坐标进行调整。具体方法是首先在 Adobe Photoshop 软件中打开导出的顶面俯视影像图，使用标尺工具量测 AA'方向的角度是逆时针 30.15°。然后根据 4 个控制点的平面坐标数据在 Auto CAD 软件中绘制一个四边形，

以西南角控制点(N01)为旋转基点,将四边形逆时针旋转30.15°之后,分别点击旋转基点之外的三个控制点,记录状态栏显示的平面坐标。最后在 Agisoft Photoscan 软件中使用旋转后的坐标数值更换之前的控制点平面坐标,进行“设置”后保存,关闭 Agisoft Photoscan 软件。

重新运行 Agisoft Photoscan 软件,打开彩陶簋盖的三维模型,就会发现三维模型是根据旋转后的坐标系方向显示出来,即可直接导出彩陶簋盖的俯视影像图、正立面影像图等。具体操作过程中需要参照软件工作区右下角提示的三维坐标系,分别导出“顶部 XY”、“底部 XY”、“前面 XZ”等正射影像图,像素尺寸输入 0.0001 米或 0.0002 米,“混合模式”选择“平均”或“马赛克”(图 6)。可以直接导出彩陶簋盖的俯视影像图、底面影像图、正立面影像图(图 7、图 8、图 9)。其中选择“马赛克”模式导出的正射影像图一般更为清晰。



图 7 坐标转换后导出的俯视影像图



图 8 彩陶簋盖的底面影像图



图 9 彩陶簋盖的正立面影像图

在 Adobe Photoshop 等软件中可以删除各影像图的黑背景,再根据影像分辨率可以在影像图中精确标注图解比例尺。例如在 0.0001 米分辨率的正射影像上绘制比例尺时,可以将影像下部先增加画布大小约 200 像素,再使用“固定大小”的矩形选择工具,设定选框长度为 1000 像素,高为 8 像素,在图幅下部点击鼠标左键,出现 1000×8 像素的选区,填充黑色成为黑色短线,然后计算 1000 像素的实际长度:1000 像素×0.0001 米/像素=0.1 米(即 10 厘米),在黑色短线两端上部标注黑色数字“0”和“10 厘米”(图 7)。由于全部影像图都是使用同一分辨率导出,可以直接复制图解比例尺到其他影像图中(图 8、图 9)。

如果需要导出 AA'方向的剖视影像图与剖面图,则需要使用鼠标右键移动模型到“轨迹球”的中心位置,使用矩形选框工具,从下部选择接近一半的模型(图 10),通过键盘上的 Delete 键删除,再导出“前面 XZ”的正射影像图,生成彩陶簋盖 AA'方向的剖视影像图(图 11)。再使用矩形选框工具,从上部选择接近一半的模型并删除,软件界面上只留下一个横向窄条,导出“前面 XZ”的正射影像图,经过后续简单处理后得到彩陶簋盖 AA'方向的剖面图(图 12)。

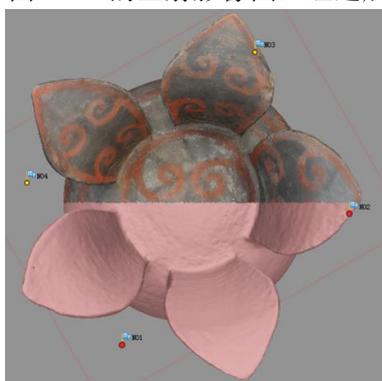


图 10 被局部选择的三维模型



图 11 AA'方向剖视影像图

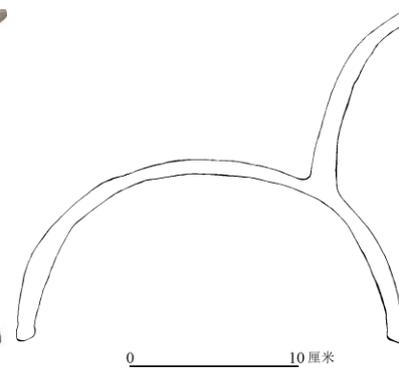


图 12 AA'方向剖面图

此外,根据可移动文物三维模型还可以导出不同立面的数字高程模型,生成可移动文物不同立面等值线图、坡度图、坡向图等成果,获取文物表面各空间点位的三维坐标、坡度、坡向等数据,为相关分析、研究提供支持。

五、结语

多视角影像三维重建技术所需的设备也仅仅是档次稍高的数字照相机、计算机、相关软件等等，操作难度很小，一般人员经过一、两天的培训、练习就能够基本掌握要领，独立开展影像拍摄与数据处理工作。可移动文物三维重建的主要成果应该是具有真实纹理的三维模型，它记录了文物在影像拍摄时的整体信息，在文物存档、展示、保护等方面都具有重要的作用，是数字博物馆建设与展示的主要内容。结合出土文物发掘现场及其遗址周边环境的三维重建，数字博物馆展示的内容可以拓展到考古发掘现场，展示方式可以通过三维模型制作的视频、展示触控屏、三维虚拟展示头盔等多种技术，为参观者呈现丰富多彩的内容与奇妙的视觉体验。当然，这种方法并非对所有的可移动文物都能够进行三维重建，对于多层镂空文物、小口深腹瓶状文物等都无法制作内部的模型。

考古发掘现场对出土文物的三维重建既可以建立文物的三维模型档案，也可以导出俯视、仰视、正立面、侧立面、剖面等的正射影像图，据此可以在绘图软件中绘制各个平面、立面、剖面的线划图，提高绘图的精度和速度。

快速制作的可移动文物俯视、仰视、立面、剖面影像图，具有丰富、精确的器形、纹理信息，与传统方法绘制的线划图相比，具有更加准确、直观、信息量大等优点。所以针对目前很多考古报告由于绘图工作没有完成而影响出版的问题，直接发表正射影像图应该是一种很好的选择。而且现在很多文博和考古的刊物、报告等都采用全彩版印刷，出版正射影像图不会增加印刷成本。

考古绘图工作在无法制作正射影像图、只能出版黑色线划图的年代，为呈现发掘现场遗迹分布、出土文物的器形与纹饰等发挥了重要的作用。但是传统考古绘图方法也存在很多问题，首先是通过卡尺、三角板等量测方法无法保证绘图精度，特别是球面上纹饰的变形、器物很多部位的厚度等无法量测，一般都是根据经验来绘制。其次，通过线条来表示文物的器形、纹饰，甚至强化某些特征的方法必然会忽略或丢失很多次要信息，而这些忽略的信息往往正是其他研究方向的学者所关注的内容。第三，目前很多绘图人员尚不能完全理解所绘制的文物的文化内涵，一些线划图绘制的效果很不理想。第四，通过线形、符号表示文物的信息量，永远无法与通过影像来表示文物的信息量相提并论，考古学研究讲究看器物、摸陶片，在无法接触实物的情况下，研究影像图肯定比分析线划图更为合理。

诚然，提出直接出版正射影像图并非拒绝线划图，线划图有时可以作为必要的补充，用来辅助描述影像图不能准确描述之处，影像图中也可以根据需要添加一些线条、符号和注记。考古绘图本身在教学和研究中仍然具有重要的意义，绘制器物的线划图有助于对器形、纹饰以及文化内涵等的正确理解，考古绘图的技术与方法有必要继续探讨。

后记：本文使用的彩陶器物多视角影像由中国社会科学院考古研究所张鹿野同志在辽宁省文物考古研究所的徐韶钢、高振业等同仁的配合下拍摄，谨此特别致谢！