
多时相三维激光扫描技术在考古发掘过程中的应用

——以江苏孔塘遗址为例^{*1}

吴怡¹ 朱晓汀² 林留根² 李宁¹ 杨林^{1、3}

(1. 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室江苏南京 210023;

2. 南京博物院江苏南京 210016;

3. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心江苏南京 210023)

【内容提要】：三维激光扫描技术凭借快速、准确、无需接触文物表面等优势，已被越来越多地应用于文物保护和考古发掘工作中。江苏句容孔塘遗址在发掘过程中运用三维激光扫描技术不断跟进扫描，全面真实记录发掘过程中的各类遗迹的空间数据。在顾及遗存特征的前提下，对多时相墓葬点云数据进行了空间匹配、分割和缺失数据拟合等后期处理，重建遗址三维场景，直观展示多期遗存的时空关系，为后期考古研究推理提供了数据支持。

【关键词】：多时相三维激光扫描；考古发掘；数据采集与处理；孔塘遗址

【中图分类号】：K854.1；P234.1 **【文献标识码】**：A

考古发掘是依地层堆积顺序逐层向下发掘的动态过程。此过程中发掘的各类遗存信息，是考古研究的重要基础和第一手资料，对它们及时、准确的记录是田野考古的必要工作。除文字、影像、测绘等传统考古记录方式之外，近年来，三维激光扫描作为一种新兴记录方式，凭借其快速、准确、无需接触文物表面等优势，已被越来越多地应用于文物保护和考古发掘工作中^[1]。国内有四川三星堆遗址^[2]、山西陶寺遗址和出土文物的数字化建模^[3]、河南孟津唐墓的4D图生成等^[4]；国外有法国卡普布朗遗址的旧石器雕刻岩石^[5]、苏格兰古镇的三维重建等^[6]。然而当前的大部分应用仍局限于静态考古对象，并未涉及到田野考古动态发掘中各个阶段的遗存数据的采集处理，而对发掘遗址的连续数据采集才是遵循田野考古作业规范和完整记录各类遗存的基本要求。本研究以江苏孔塘遗址墓群为实验对象，旨在通过对遗址发掘过程中多时相点云数据的采集、处理等方法的研究，为遗址三维场景复原和时空分析提供基础数据。

¹ 收稿日期 2017-01-25

作者简介吴怡（1993—），女，南京师范大学硕士研究生，主要研究方向：地理信息科学。朱晓汀（1982—），女，南京博物院副研究馆员，主要研究方向：体质人类学。林留根（1963—），男，南京博物院研究员，主要研究方向：史前考古。李宁（1992—），男，南京师范大学硕士研究生，主要研究方向：测绘科学。杨林（1976—），女，南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室教授，主要研究方向：数字摄影测量、考古GIS。

基金项目：本课题的研究受国家自然科学基金项目（41471102、41101377、41631175），国家社会科学基金项目（15CKG014）资助。

一、实验区介绍

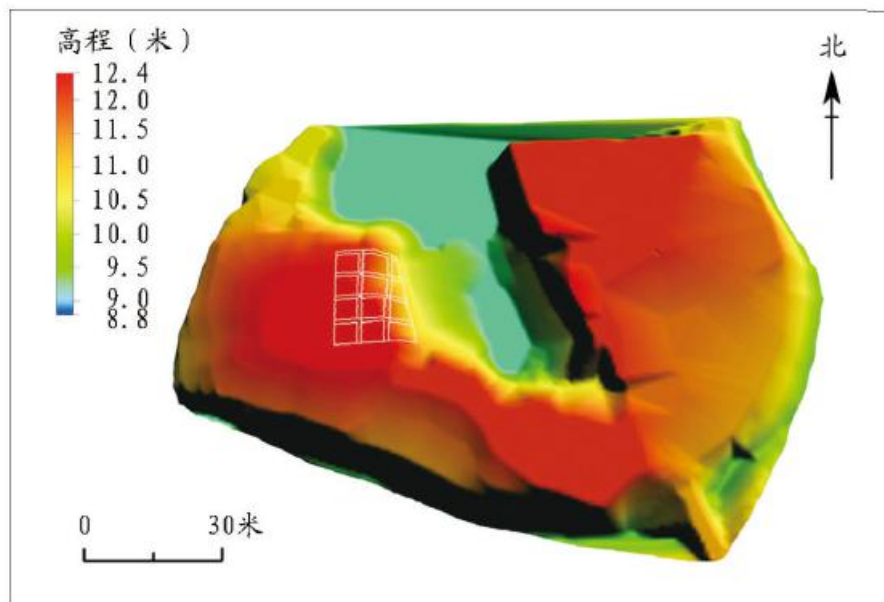
孔塘遗址位于江苏省句容市郭庄镇孔塘村，遗址文化面貌复杂，自下而上、由早及晚，出土器物呈现出一脉相承的本地特色，除此之外，还伴有崧泽文化、北阴阳营文化、良渚文化等文化因素，推测距今已有 5000 余年的历史。2015 年 4 月，南京博物院对该遗址进行了抢救性考古发掘，截止 2016 年初第 1 次发掘完成，在约 300 平方米的发掘区内已发掘清理 200 座墓葬。推测墓葬可能采用浅坑掩埋的方法，在发掘过程中，很难根据土质土色划出遗迹，而且墓葬分布相当集中，叠压打破关系非常复杂^[7]。为详实准确记录出土墓葬的时空关系，我们采用三维激光扫描技术对多期出土墓葬逐次进行了扫描，并结合相关软件进行后期处理、建模，最大限度地还原发掘现场。

二、数据采集

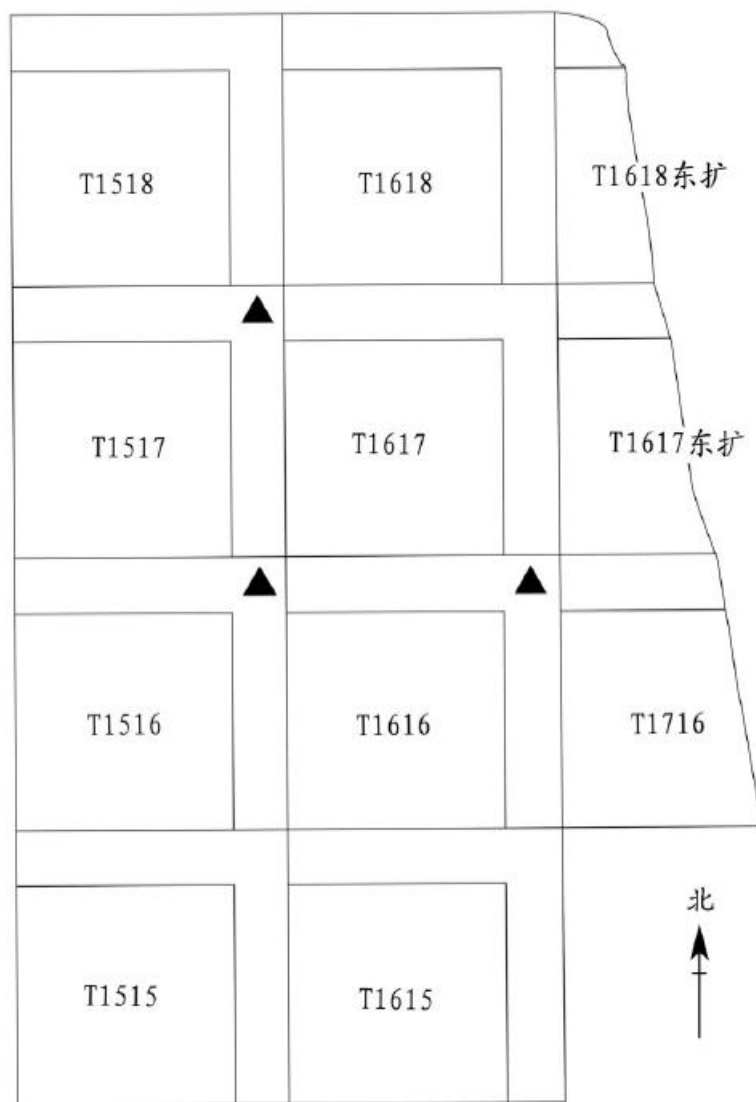
田野考古数据是考古研究的第一手资料。田野发掘是一个长期、动态的过程，随着发掘不断推进必定产生多期扫描数据，且每期数据采集时间存在一定间隔，需解决多期数据空间配准的问题。现场操作中，受发掘区域面积、墓葬分布情况、光线、采集速度的影响，需根据实际情况设计数据采集方案。本研究选用的三维激光扫描仪为 FARO Laser Scanner Focus3D 120，其扫描速度为 976000 点/秒，视场角 $305^{\circ} \times 360^{\circ}$ ，10 米测距精度达到 2 毫米，可以为实验对象提供快速精确的空间数据。

1. 控制点布设

孔塘遗址位于一处隆起的土墩，包括 9 个完整探方及探方向东向北的 5 个扩方（封二：1）。随着发掘的不断推进，一般发掘清理完一层墓坑便进行一次扫描，因此会积累多期墓葬点云数据。为方便多期数据配准处理，要求每期扫描数据具有 3 个以上的共同点，且这些控制点在整个多期数据扫描过程中便于通视，同时易于长期保存^[8]。为此工作人员预先在关键柱位置钉桩用作控制点，探方及控制点（三角点）分布如图一。截至 2016 年初第 1 次发掘完成，累计扫描了 17 期共 151 座墓葬点云数据。少数墓坑由于发掘进度、相互打破关系及现场判读等原因未被扫描。



1.发掘区数字高程模型图(基于实测GPS数据生成)



图一// 控制点位置

2. 现场数据采集

为获得完整的墓群点云数据，需架设多个测站（一个 10×10 米的扫描区通常设 5 站），从多个角度进行数据采集。在进行单期扫描过程中，需首先根据探方大小、墓葬分布情况合理安排三维激光扫描仪和标靶球（作为不同测站坐标统一的连接控制点）的摆放位置，确保扫描数据无遗漏。除此之外，在用于多期配准的控制点处也要布设标靶球。标靶球的布设，确保任意 3 个标靶球不在同一直线、同一平面上。单期相邻测站间要求具有 3 个以上公共标靶球，多期数据间也至少有 3 个共同控制点，以便后期处理时对多期多站数据进行配准。

准备工作完成后，根据实际情况进行扫描参数设置，包括采样分辨率、扫描角度、颜色等。扫描效率同点云质量成反比关系，点云质量越高所需扫描时间越久，在确保采集质量足以反映墓葬三维信息的同时也应尽量提高扫描效率。扫描角度包括水平方向角度和垂直方向角度，设置时应使目标区域包含在角度范围内，并且角度不宜过大，因为目标区域外的点云数据后期将作为冗余数据被删除，还会延长扫描时间。另外，光线过明或过暗都会造成点云色彩失真，因此采集数据时应避开阴雨天及阳

光过强的时段。通常在扫描距离 20 米范围内的情况下，设置仪器分辨率参数为“1/5”，保证点间距达到 10 毫米。在此精度前提下，每期扫描架设 3 到 5 站，每测站扫描时间约 3 分钟，几乎不影响发掘进度。扫描时应绘制现场草图，记录墓葬编号及墓葬间特殊的空间关系及其他属性信息，辅助后续的数据整理。

以上三维激光扫描仪的使用方法简单易学，不需依赖专业知识背景，一般考古工作者 1—2 小时就可以快速掌握仪器使用方法。现场的布控和设站方法也较简单。以一个标准 5×5 米探方为例，通常只需要在探方壁的两个对角处设两站进行扫描。以隔梁打通后视域较为开阔的 2×2 个探方为例，通常只需要在大探方壁的四个对角加中心关键柱处，共设 5 站进行扫描，总扫描时间至多 20 分钟（对局部遗迹复杂的地层可适当增加设站数量），可以快速准确地获取整个层面遗迹的空间数据，几乎不影响发掘进度。

三、数据处理

为制作多时相点云墓葬群三维场景，需对野外采集的原始点云数据进行一系列处理，包括去噪、分割、采样、配准等，即删减杂乱的冗余点和非目标区域，将多期、多站数据配准至同一坐标系下，数字化还原孔塘遗址墓葬群的时空关系。

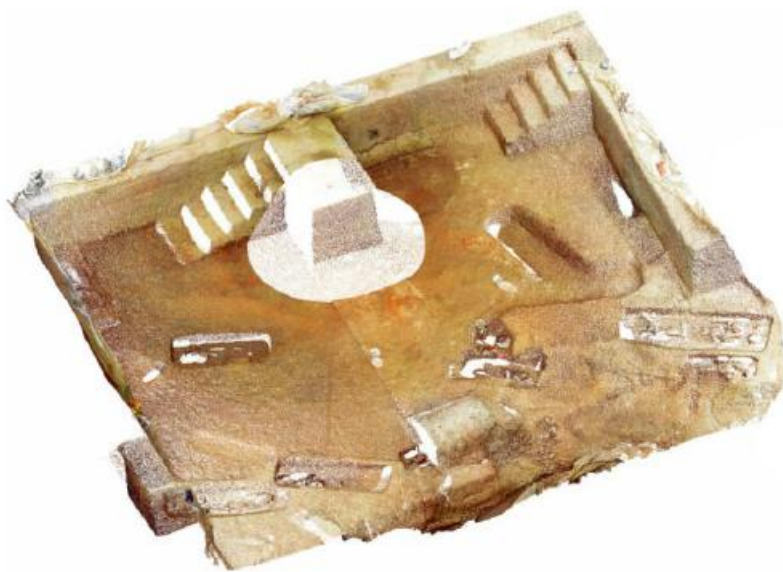
1. 数据预处理

受外业采集环境限制和仪器自身的影响，点云数据不可避免地存在大量噪声点。为提高计算效率，在保留数据特征前提下，需要进行数据预处理，即减少冗余数据并整体优化点云^[9]。

首先，通过去除非连接项、体外孤点、减少噪音等操作清除偏离模型表面的点。以 2015 年 6 月 20 日扫描第一测站数据（扫描范围为探方 T1617、T1618、T1617 东扩、T1618 东扩）为例，经处理的点云和删减冗余点后效果如图（封二：2-a、2-b）。其次，面向多期墓葬群场景复原，同时提高点云处理效率，需对扫描区中的墓葬点云进行自动分割，本文基于欧式聚类提取算法并辅以手工分割^[10]。本次研究对象为墓葬遗迹，因此探方壁面、地层信息等均可剔除。在此步骤中暂时保留了标靶球及部分特征明显的探方边界，以便辅助进行数据配准。点云分割后效果如图（封二：2-c）。最后，本文选取统一的采样比例进行抽样，在保证几何特征和分析精确度的前提下，有效剔除去噪后仍包含的冗余数据。



a



b



2.点云预处理

a.原始点云 b.去噪后 c.分割后

2. 数据配准

配准是将不同扫描站的数据匹配到一起，按扫描频次分为单期配准和多期配准。单期扫描通常设置 3 至 5 个测站，由于每站扫描的点云数据都有其独立的空间坐标系，要建立一个完整的三维几何模型，需进行三维数据配准，即将不同视点的点云数据统一到同一个坐标系下。单期配准选用 FARO SCENE 软件。SCENE 是一款专为 FARO Laser Scanner Focus3D 和 FARO ScannerFreestyle3D 而设计的三维点云处理软件，通过自动识别标靶球或手动标记特征点、线、面进行配准。单期配准完毕后即可利用不同期布设的公共控制点并辅以暂留的探方边界角点作为共同点进行多期配准。多期配准可将采集的 17 期数据统一到相同坐标系，数字化还原孔塘遗址墓葬群的时空关系，达到传统记录方式所不能实现的展示效果。完全匹配成功后可将预留的控制点、探方边界角点删除以节省存储空间，提高计算效率。最终配准效果如图（封二：3）。



3.17期点云数据配准图

a.多时序墓葬点云俯视图 b.多时序墓葬点云正视图

墓葬点云的预处理及配准属于后期处理的基本工作，至此即可初步实现多时序墓葬点云的三维展示效果。点云处理软件有很多，例如与本研究所用仪器配套的 SCENE、杰魔 Geomagic Studio、开源软件 Cloud Compare 等，软件功能与操作流程大多相似，稍有计算机基础的人员经过 1—2 天培训或自学即可掌握。后期工作所需时间视处理人员熟练程度、数据大小、操作环境配置情况而有所不同，本研究在每期扫描结束当天即对墓葬点云进行处理，每期数据所需时间通常为半小时左右。

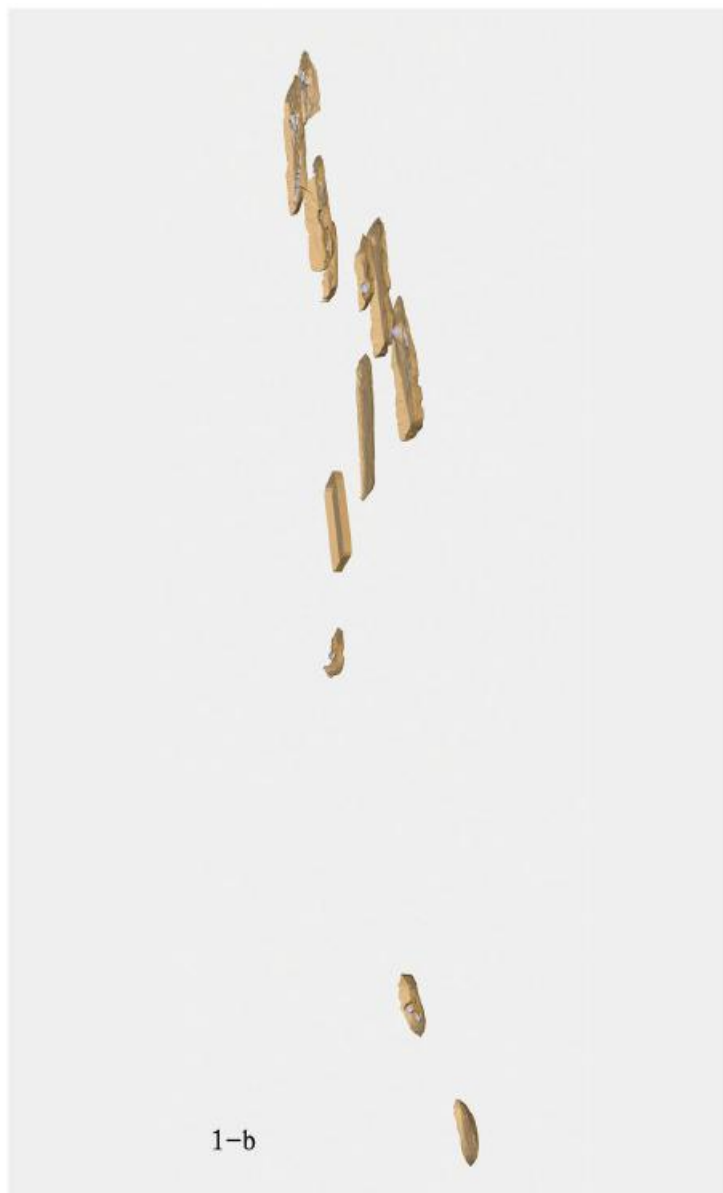
3. 数据编辑

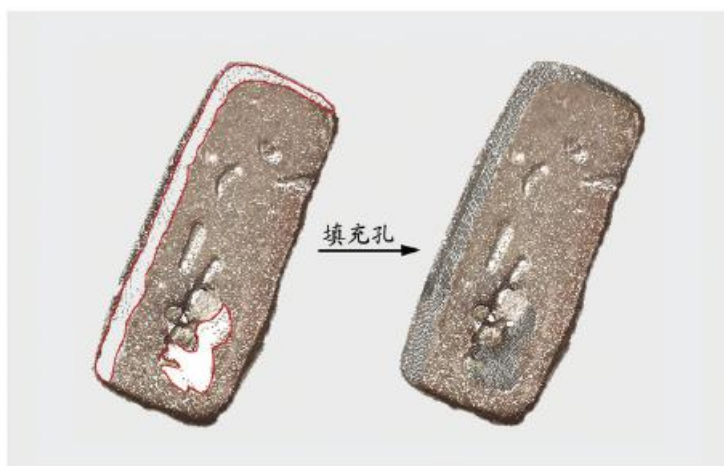
如前所述，由于发掘现场判识滞后、误判或进度要求，及扫描环境的限制，存在漏扫或点云缺失的情况，这些情况可通过后期编辑、拟合等方法进行修补。

(1) 缺失点云修补

由于扫描对象表面形状的复杂性及扫描设备测量方法的局限性等原因，点云数据中不可避免存在部分缺失孔洞，为获得完整的点云模型、达到更好的显示效果，需要对缺失部分进行修补。

目前针对散乱点云的孔洞修复主要有以下两种方式：第一种是先对空间无序点建立三角网格模型，根据网格三角形中每条边的特性判断其是否为边界，从而得到孔洞边界，最后采用局部扩充等算法完成对孔洞区域三角形的填充修复；第二种是直接对离散点云先建立无序点集的空间关系，然后识别得到边界特征点，通过拟合孔洞曲面完成孔洞点填充^[11]。本文使用的是基于第二种方法的 Geomagic 软件中的“填充孔”功能对缺失部分点云进行修补。以 M24 为例，修补前后效果如图（封三：2）。

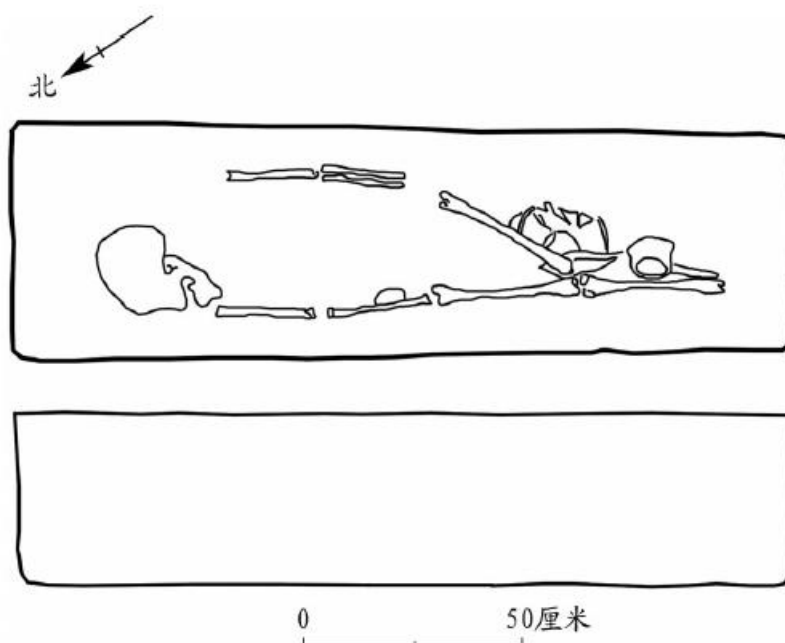




2.M24墓葬点云孔洞修复前后比较图

(2) 融合手绘图的三维数据拟合

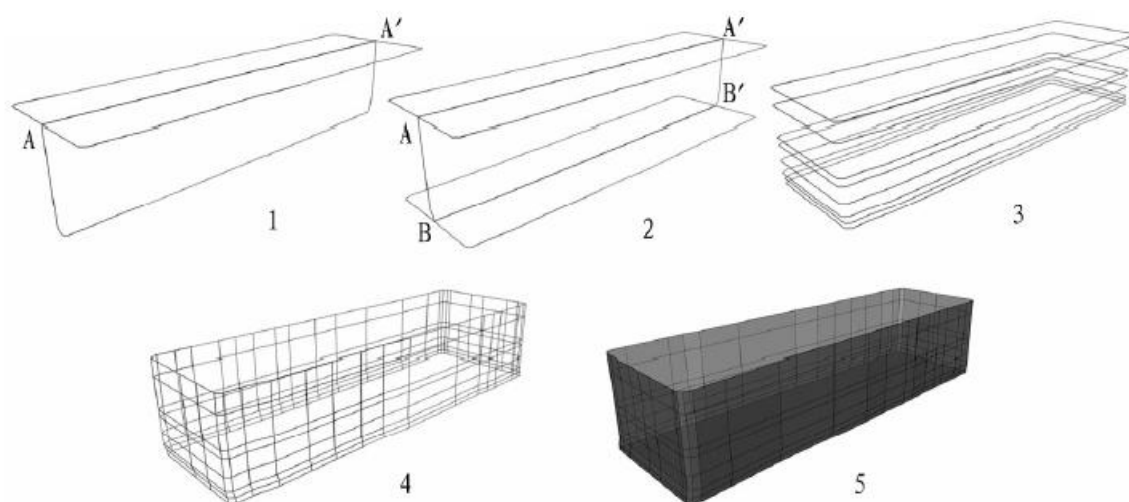
为配合发掘进度，少数墓坑未及扫描即被清理，造成墓葬群点云数据缺失。对于缺失的这部分墓坑模型，可结合其现场手绘的平剖面图进行拟合，还原其三维形态。以墓葬 M70 的平、剖面图为例（图二），本文采用方法步骤如下。



图二// M70平、剖面图

首先，基于手绘图件矢量化墓坑的平、剖面，以 AA' 为缝合点将平面、剖面在三维空间中对齐，并连接平、剖面轮廓的缝合点作为基准线 AA'（图三：1）。然后，以剖面线为约束线，在其多段线折点位置作基准线 AA' 平行线，即底部 BB'（图三：2），计算 AA' 与 BB' 比例缩放平面轮廓线至该折点位置。同样方法在剖面各个折点位置进行平面轮廓线的缩放，形成多圈

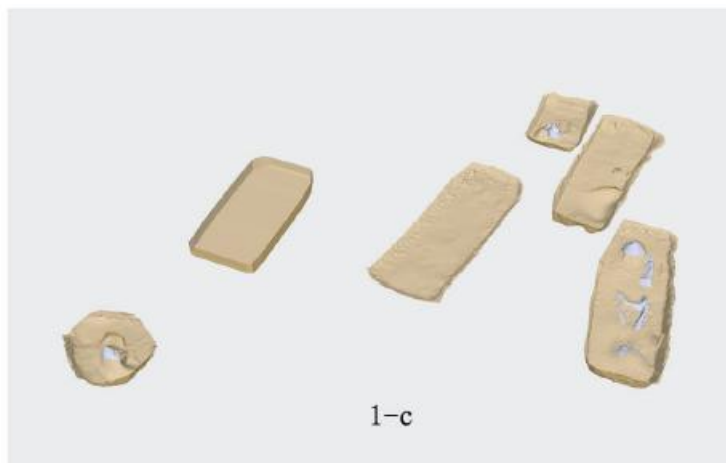
平面轮廓线（图三：3）。其次，由上到下逐点连接多圈平面轮廓线，形成墓坑网格模型（图三：4）。最后，填充网格模型，设置颜色、纹理等信息（图三：5）。



图三// M70缺失墓坑三维数据拟合过程

墓坑点云经过去噪、分割、孔洞修补、建立三角网、平滑等一系列操作后（遗骨部分点云可单独选择与墓坑壁面部分区分开，进行同样操作），可将上述编辑拟合后的墓坑三维模型与其融合。以第④层下部分墓坑的模型为例（封三：1）。其中拟合得到的模型表面比较光滑，而点云数据模型则包含较多的细节。其建模精度与初始点云采样密度和手绘图采样精度有关，通常可以达到厘米级，能满足考古绘图和展示的需要。





1.墓葬三维模型效果图

a.④层下墓坑模型俯视图 b.④层下墓坑模型侧视图
c.④层下墓坑模型细节图

四、结论

考古发掘是一个不可逆的过程，全面真实记录发掘过程中的各种遗存，并进行数字复原对于考古研究非常重要。本文以孔塘遗址墓群为研究对象，遵循考古发掘的作业流程，按时序进行了多期遗存 LiDAR 点云数据采集，探讨了面向遗址场景复原的多期点云数据处理方法。相比传统的、分散的考古记录方式更加快速、全面、准确、直观，可以同时展示多期遗迹数据的三维时空关系。

在发掘过程中，点云数据扫描应与现场发掘进度协作进行，及时跟进确保无遗漏数据。为保证作业效率，不耽误发掘进程，每次扫描可安排两名人员，合作进行布置标靶点、架站等准备工作，在扫描过程中则分工看护仪器和现场绘制草图，通常可将每期扫描时长控制在半小时以内。对于后期数据处理，单个软件操作熟练的工作人员半小时内即可完成。

[1] 魏薇、潜伟：《三维激光扫描在文物考古中应用述评》，《文物保护与考古科学》2013 年第 1 期。

[2] 刘江涛、张爱武：《三维数字化技术在三星堆遗址中的应用》，《首都师范大学学报（自然科学版）》2007 年第 4 期。

[3] 程小龙、程效军、贾东峰、李杰：《三维激光扫描技术在考古发掘中的应用》，《工程勘察》2015 年第 8 期。

[4] 周立、毛晨佳：《三维激光扫描技术在洛阳孟津唐墓中的应用》，《文物》2013 年第 3 期。

[5] K. A. Robson Brown, et al. An Automated Laser Scan Survey of the Upper Palaeolithic Rock Shelter of Cap Blanc. *Journal of Archaeological Science*, 2001, 28 (3) : 283-289.

[6] J. A. Entwistle, K. J. W. McCaffrey, P. W. Abrahams. Three-dimensional (3D) visualisation: the application of terrestrial laser scanning in the investigation of historical Scottish farming township. *Journal of Archaeological Science*, 2009, 36 (3) : 860-866.

[7] 南京博物院内部资料。

-
- [8] 施贵刚: 《地面三维激光扫描数据处理技术及作业方法的研究》, 同济大学硕士学位论文, 2009 年。
- [9] 陈田: 《激光测量点云的数据处理方法研究》, 《激光与光电子学进展》2011 年第 9 期。
- [10] 朱德海、郭浩、苏伟: 《点云库 PCL 学习教程》, 北京航空航天大学出版社 2012 年, 第 339—340 页。
- [11] 吴岩冰: 《基于支持向量机的点云数据修补》, 郑州大学硕士学位论文, 2009 年; E. Marchandise, C. Piret, J.F. Remacle. CAD and mesh repair with Radial Basis Functions. *Journal of Computational Physics*, 2012, 231 (5): 2376–2387.