

DOI:10.12405/j.issn.2097-1486.2026.01.009

三维几何形态测量方法在文物考古中的应用

王金^{1,2*}, 石成玉¹

1. 山西大学 科学技术史研究所, 山西 太原 030006

2. 中国科学院自然科学史研究所, 北京 100190

摘要:几何形态测量是分析研究对象形态特征的方法,在生物学研究中有较多应用。近年来,随着三维数字化技术的发展,几何形态测量的研究对象从原来的二维平面发展到三维立体,基于三维模型的几何形态测量在文物考古研究中的应用案例逐渐增多。本文首先对形态测量学的发展情况和三维几何形态测量方法进行介绍,之后梳理了文物考古研究中三维数据获取的常用方法,对三维几何形态测量方法在文物考古中的应用进行综述。最后为了便于更好地了解,本文以曲村-天马遗址出土的陶器为案例进行分析。三维几何形态测量方法是对考古学中传统形态研究的加强与补充,提高了研究结果的准确性和多样性,为文物考古研究提供了可参考的客观数据。

关键词:三维几何形态测量;文物考古;三维数据;标点法;轮廓法;陶器

中图分类号:P204

文献标志码:A

文章编号:2097-1486(2026)01-0093-10

The application of three-dimensional (3D) geometric morphometry method in cultural relics archaeology

WANG Jin^{1,2*}, SHI Chengyu¹

1. Institute for History of Science and Technology, Shanxi University, Taiyuan 030006, China

2. Institute for the History of Natural Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract: Geometric morphometry is a method to analyze the morphological characteristics of the research objects, which has wide application in biological research. In recent years, with the development of three-dimensional (3D) digital technology, the research objects of geometric morphometry have been developed from the original 2D to 3D. The application cases of geometric morphometry based on the 3D model increase gradually in the study of cultural relics and archaeology. In this paper, the development of morphometry and the 3D geometric morphometry method are introduced firstly, the commonly used methods of 3D data acquisition in the research of cultural relics archaeology are sorted out, and then the application of 3D geometric morphometry method in cultural relics archaeology is reviewed. Finally, in order to facilitate better understanding, this paper takes as a case study the pottery unearthed at a site in Qucun-Tianma. The 3D geometric morphometry method strengthens and complements the traditional morphological research in archaeology, improves the accuracy and diversity of the research results, and provides referable objective data for the archaeological research of cultural relics.

Keywords: 3D geometric morphometry; cultural relics archaeology; 3D data; landmark method; outline method; pottery

*通信作者

基金项目:中国科学院发展规划局战略研究专项中国科学院自然科学史研究所“十四五”重大项目(GHJ-ZLZX-2022-11-5);国家自然科学基金重大项目(23&ZD273)

收稿日期:2025-06-17;修回日期:2025-08-01

0 引言

形态测量学是对研究对象的形态特征进行定量分析的方法,最初应用于古生物学及生物学研究。19世纪英国生物学家Karl Pearson和Francis Galton提出使用统计学来分析生物组织的尺寸与形状,1932年英国演化生物学家Julian Huxley研究异速发育时开始把定量化引入生物学的形态描述和分析中,以解释生物发育和演化理论^[1]。形态测量学也被称为形态统计学^[2],该方法对研究对象的形态特征量化较直观,比较线性测量距离、夹角、体重、面积、出现频率、变量间的比值等数值。形态测量学是几何形态学的雏形,之后研究者逐步将形态性状的数值表征与多元统计相结合进行研究。但在形态研究中,研究对象的空间形态信息难以使用线性距离这种单变量进行捕获和保存。

二十世纪八九十年代,形态测量学有了新的发展。研究者突破线性距离这种单变量的局限,重点比较研究对象如生物体的拓扑结构,几何形态学随之出现。James Rohlf和Leslie Marcus基于莫斯曼对数形状比,利用标志点捕捉生物体形状相匹配的几何信息,用统计程序检验生物的几何形状及其形状差异^[3]。Dennis Slice通过Procrustes metric定义的几何和统计特征,对生物形状进行分析和差异比较,被称为“几何形态测量学的革命”^[4]。几何形态学在21世纪后逐渐成熟,理论和配套软件的不断发展使其日益完善。

生物的形态主要由大小、方位、物理性能和形状等元素构成。几何形态学可以去除大小、方位和物理性能等因素的影响,获得纯粹的形状差异结果^[5](见图1)。几何形态学的基本理论是根据一定原则选取研究对象的标点或曲线,通过这些标点或曲线代表形态结构信息,利用叠印步骤对选取的原始点进行坐标转化。考古工作通过文物研究古代社会历史,必须先对文物有外形上的认识。类型学,旧称“标型学”“形态学”,考古学最基本的方法论。考古类型学让考古材料通过分类而系统化,是传统考古学研究的一种基础手段^[6]。类型学研究一般是从外形入手,即所谓的形态分析。传统类型学研究依赖考古学家的经验和学识,为主观判断,使用数学方法为考古学研究提供了可参考的客观数据。

1 三维几何形态测量方法

几何形态测量学方法注重比较物体形状,选取

笛卡尔坐标数据后通过缩放、旋转、重叠等方式分离坐标中形成的因素与非形态因素^[7]。二维数据容易获得,且分析计算过程中资源需求低,是几何形态学分析的主要数据类型。但遇到样本形态结构特殊、内部结构需要研究时,仅依靠二维数据分析有结构信息缺失、系统误差偏大、材料磨损等问题。相对于二维数据分析的不足,三维几何形态测量方法的数据更加丰富,增加了数据提取的维度,从研究对象二维数据的点、线拓展到三维数据的面、体。数据的多样性增加了研究对象的形状信息,弥补了传统形态测量法的缺陷。在几何形态测量学方法中,三维几何形态测量的原理、方法主要有标点法和轮廓线法,标点法的数据主要为标志点和半标志点,轮廓线法的数据主要为曲线函数,与二维数据分析基本相同。

1.1 标点法

标点法是选取、定义研究对象的标志点并将其转化成空间坐标,获取其形态结构信息,通过坐标数据的多元统计分析研究物体的形态特征的方法。其中,标志点(landmarks)是位于研究对象表面相类似的位点,这些标志点相对于其他标志点来说不改变对象拓扑位置,对研究对象的表面形态能够足够覆盖,可以重复且稳定地出现在同一平面内。此外,研究对象标志点的选取,需要鉴别定位的易操作性及评估形态变异的有用性^[8]。以标志点方法为基础的半标志点(semilandmarks),引入曲线或曲面在数学上的同源性来代替生物学上的同源性,可以在曲面上任意一点进行标志,补充了某些情况下标志点法取点不足。半标志点在轮廓线上的分布带有一定的任意性。通常情况下,标志点法用于具有标志性解剖位置的点,多在生物分析上使用。在缺少统一、固定的解剖位置情况下,半标志点用于进行辅助轮廓定位的点,多用于研究缺少真正标志点的形状,或是作为标志点的补充。R软件、Morph J^[9]、TPS系列软件和AGMT3-D软件^[10]等可定义标志点进行分析。

1.2 轮廓线法

轮廓线法是获取物体的组织或结构的外形轮廓曲线为研究对象,利用一系列的数学函数公式对轮廓进行拟合逼近、参数作为描述外形轮廓的变量,进行统计分析的一类方法^[11]。相比线性距离,轮廓线更能准确完整地反映研究对象的轮廓形态。椭圆傅里叶分析法是轮廓线主要的分析方法,基础是傅里叶变换。1982年,Kuhl等提出用椭圆傅里叶来描述链编码的任意封闭的轮廓曲线,对于任意形状的封闭曲线,均可以用椭圆傅里叶级数来逼近^[12]。傅里

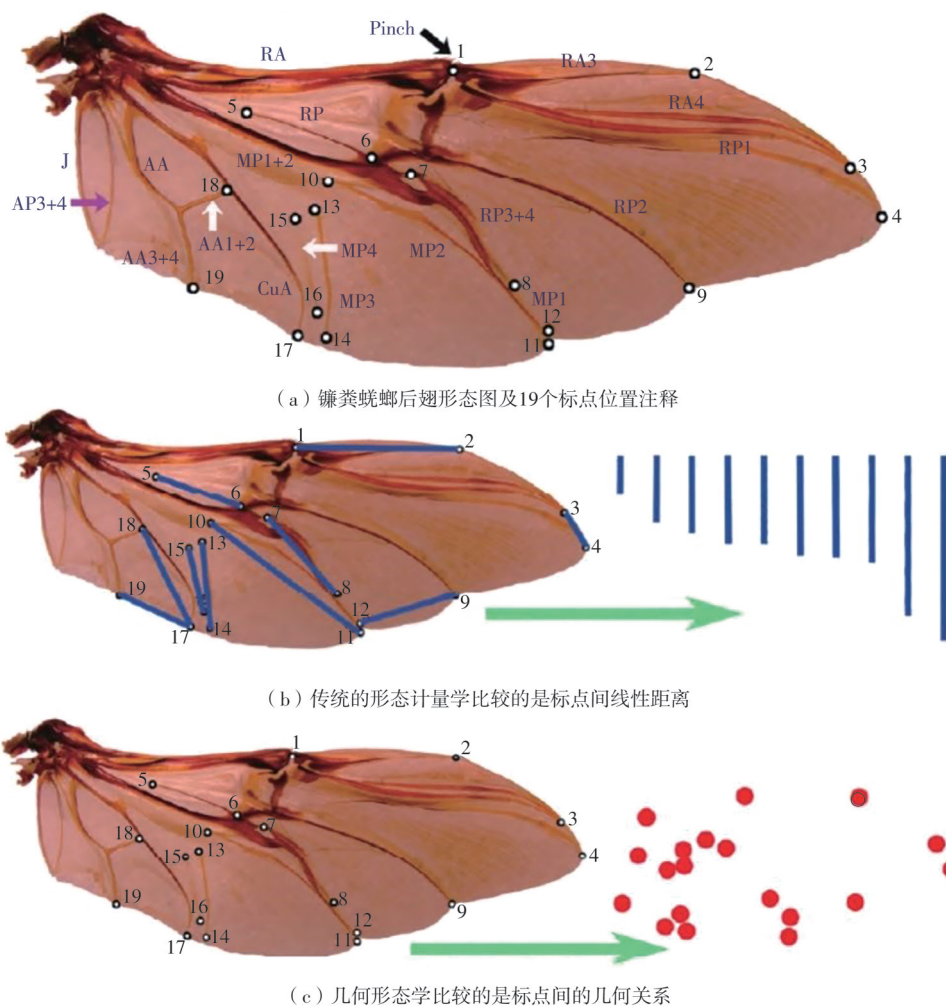


图1 传统形态测量学与几何形态学的区别(以镰粪蜣螂后翅为例)^[5]

Figure 1 Differences between traditional morphometrics and geometric morphology (taking the hind wing of Dung Beetle as an example)^[5]

叶描述被用来获得闭合边界的形态特征,椭圆傅里叶描述就是利用椭圆叠加来逼近物体的边界曲线。椭圆傅里叶是在傅里叶级数的分析基础上提取出来的,傅里叶级数能够以多次谐波的形式来无限逼近边界,通过归一化处理的椭圆傅里叶描述子还具有起始点变换、尺度变换和旋转变换的不变性,且不丢失任何形状信息的优点^[12],因此被广泛应用于图像轮廓的描述和形状分析。Matlab编程、PAST软件和Shape软件^[13]等可用于椭圆傅里叶分析。

2 文物考古的三维数据获取

几何形态测量的样本数据大部分通过拍照、平面扫描、电镜等方式获得二维数据信息。随着科技的发展,三维数字化技术越来越多地应用到文物考古研究当中。三维数字化技术通过先进的设备采集研究对象的三维模型,利用计算机软件输出三维数

据信息。三维数字化技术获得的三维模型还可以做文物的三维资料记录、文物及考古现场的虚拟展示、3D模型打印、文物虚拟修复等工作。模型可以永久保存并多次使用,作为研究其他课题的基础模型。根据数据需求、现场采集环境、制作成本等因素,目前文物考古研究中主要使用以下几种三维数据采集方式。

2.1 三维激光扫描技术

三维激光扫描技术,又称实景复制技术。该技术通过高速激光扫描测量的方法,能够高分辨率、大面积、快速地获取研究对象表面各个点的三维坐标数据,是获取三维点云模型的一种技术手段^[14]。三维激光扫描技术的研究和应用开始于20世纪90年代后期,具有非接触性、快速性、分辨率和精度高、全数字化等特点。北京建筑大学选取德胜门箭楼为范例,通过三维激光扫描技术获取的数据复原德胜门

箭楼法式图纸,以此为城楼及城台类文物建筑的结构变形监测提供技术分析路线及实例参考^[15]。安徽省第二测绘院对贺兰山岩画进行三维激光扫描等技术的应用研究,为文物遗址数字化保护和修缮提供一个范例^[16]。西安市文物保护考古研究院运用三维激光扫描技术解决小微玻璃文物高精度三维信息采集和利用问题,应用于战国晚期至秦时期玻璃珠饰的三维建模与数据分析上^[17]。

三维激光扫描技术的扫描精度较高,扫描范围广,适用于壁画、考古遗址、古建筑、大型佛造像等大、中型文物考古研究。但是也有缺陷,精度易受周边环境的影响而导致整体拼接误差略大,从而导致扫描对象局部细节的特征还原度不高,纹理色彩需要后期二维相片贴图等。

2.2 光栅投影扫描技术

光栅投影扫描技术采用光栅投影移相法,基于光学三角原理的相位测量法,将光栅图样投射到被测对象的表面,进而在被测对象的表面形成光栅图像。该技术具有高精度、高效率、易于实现等特点,主要适用于精细化扫描^[18]。浙江省博物馆在杭州市对馆藏15件具有代表性的浙江新石器陶器采用光栅投影技术进行三维数据采集,分析了该数字化成果对今后文物保护与研究的作用^[19]。湖南博物院、广东省博物馆使用光栅投影扫描技术对本馆馆藏文物进行三维数据信息采集,获得高精度数据。敦煌研究院使用光栅投影扫描技术,对该院盛唐时期和晚唐时期具有代表性的两个洞窟进行三维数据采集和数据化重建工作^[20]。

光栅投影扫描技术主要适用于可移动的中小型文物的精细化扫描,扫描景深程度较大、纹理信息复杂尤其是处理具有镂空特征的文物时,具有优势。但是,精细化的扫描带来了扫描模型三维数据量较大的缺点,同时该技术对文物的纹理色彩还原度不高,特别是对高反光材质的文物,扫描数据完整性较差。

2.3 工业CT技术

工业CT是工业用计算机断层成像技术的简称,是一种用于可视化样品切片图像的射线照相扫描技术。这些横截面图像描述了样品在切片图像中射线线性衰减系数(μ)的空间分布,从而揭示了样品的内部结构,进而可以无损获得被检器物的结构组成、材质分布和密度变化等内部信息,且不存在影像重叠。因此工业CT是文物结构特征和材质分布无损分析的最佳方法之一^[21]。该技术能够实现分

层次扫描,20世纪中后期起用于文物的检测与分析。成都博物馆为研究馆藏青铜器香薰的制造工艺,利用高精度计算机断层扫描系统进行数字成像(DR)和锥束扫描(CT)两种方式扫描,重建香薰的三维模型^[22]。重庆市文物考古研究院对三星堆遗址出土的神树结合部位工业CT图像进行解读和辨析,发现其在浇筑中实现机械卡牢的设计^[23]。上海博物馆运用工业CT技术分析了青铜器交龙纹鼎、子仲姜盘、北魏出土的铜佛像、南宋漆器圆盘、康熙时期的瓷器瓶等器物的内部信息,例如保存状况、工艺结构、修复痕迹等等。分析了CT检测文物中遇到的一些常见伪影,并解析这类伪影的消除或减弱的方法,为相关研究提供参考^[21]。

工业CT技术精度较高,对封闭内腔的数据获得具有独特优势。因此在需要获得文物内部的三维数据时推荐使用。但是,与其他方式扫描获得的模型三维数据拼接时存在问题。扫描费用受研究对象的大小、密度、材质等影响,成本较高。

2.4 摄影测量技术

摄影测量技术是应用数码相机采集图像,通过计算机视觉、模式识别、图像处理等技术进行影像的处理和匹配,并利用软件自动识别相位点,通过数学解析确定其空间三维坐标,构成三维模型数据、正射影像图、线划矢量图等^[24]。摄影测量技术使用航拍或手持高分辨率数码相机等方式获得样本的二维图片,在三维重建软件中完成建模。吉林大学以洛阳定鼎门遗址博物馆前的小型建筑和一座墓葬为例,介绍Agisoft Photoscan软件重建遗物及遗迹三维数字模型的方法和流程以及在考古方面的应用^[25]。河北大学总结一套基于Agisoft PhotoScan软件专门针对打制石器且易于掌握的建模方式,从观察绘图、数字化、展示三个方面探讨了石器三维模型的应用^[26]。刘建国对可移动文物控制测量与三维成像精度进行实验分析并介绍文物三维重建过程^[27]。

摄影测量技术成本较低操作相对简单,纹理色彩还原度较高,平均投影误差小。但是对拼接模型的二维影像数据要求高,相对其他方法模型精细度和数据完整性较低。摄影测量技术需要借助其他软件辅助解算三维模型信息。

3 三维几何形态测量方法在文物考古中的应用

3.1 体质人类学分析

西班牙ATD6-69化石被认为是现代人类面部

特征最早出现的标志。研究者使用CT扫描获得化石的三维模型,在模型表面进行标志点和半标志点分析。研究结果展示了一幅关于面部特征的复杂图景,证明了一些现代人类的面部形态间歇性地出现在中更新世人类身上,现代人类的一些面部特征可能在人类进化过程中变化了多次^[28]。中国科学院古脊椎动物与古人类研究所采用三维标点和半标点几何形态测量技术和多元统计分析方法对和县头盖骨的形状进行量化,并将其与其他直立人颅骨标本进行比较。结果证实了和县与中国直立人在整体形态上的相似性,特别是额骨和脑颅后部结构的相似性^[29]。邢松等采用基于标志点的几何形态测量方法,对河南和湖北地区考古遗址出土的291颗近代

人群上下颌前臼齿齿冠轮廓形状(包括外轮廓及内轮廓形状)进行了分析^[30]。周蜜等使用显微断层扫描技术,扫描了百例华中地区近代农业人群的上颌前臼齿,复原了釉质-齿质连接面的三维结构。其中采用30例样本,使用标志点和半标志点的三维几何形态测量方法,量化了上颌前臼齿釉质-齿质连接面表面形状,对结果进行分析^[31]。该团队还对桐子岩会洞古人类牙齿使用几何形态分析和微计算机断层扫描(micro-CT)重新评估古人类牙齿的形态^[32]。李海军等分析现代中国人群的侧面轮廓形状及变异情况,采用基于标志点的几何形态学测量方法对青海互助土族自治县的土族、藏族侧面轮廓形状进行了分析(见图2)^[33]。

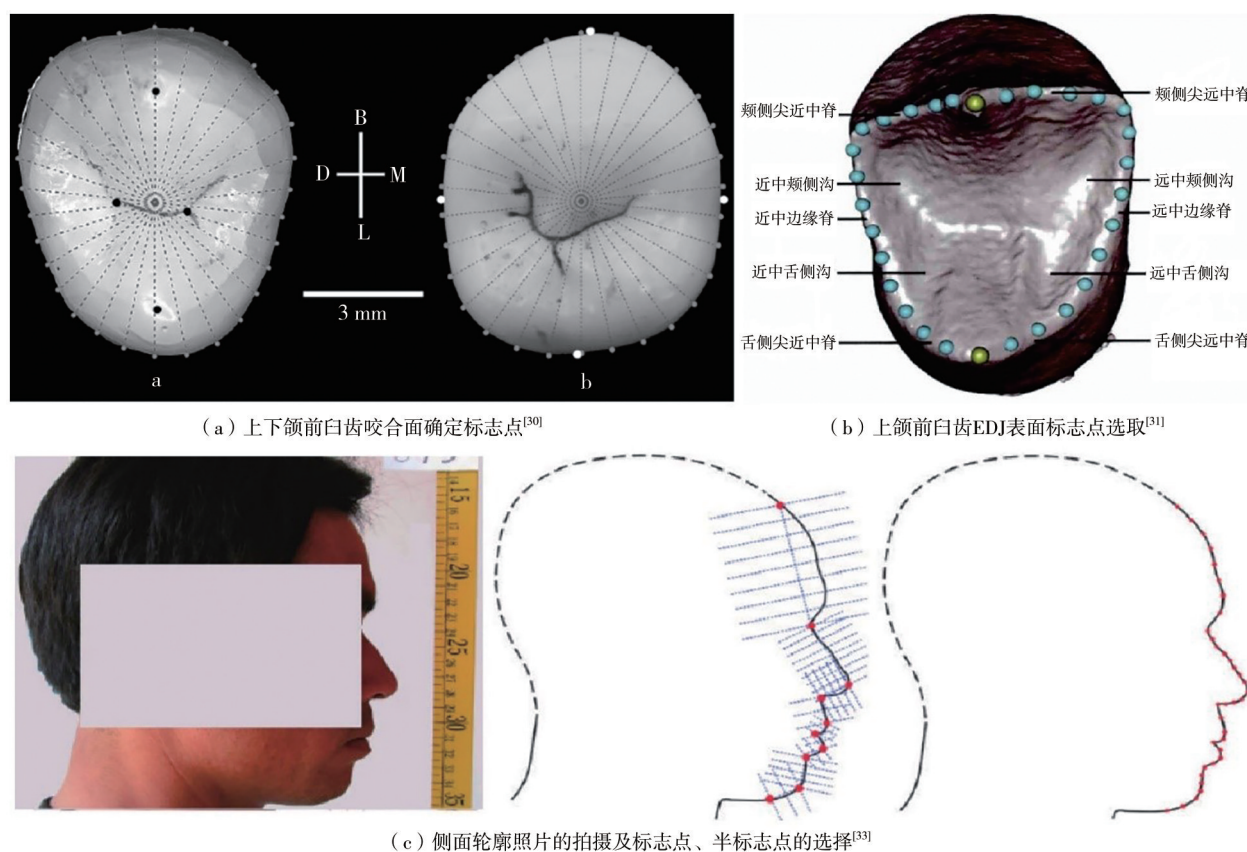


图2 体质人类学分析案例^[30-31,33]

Figure 2 Physical anthropology analysis case^[30-31,33]

3.2 石制品分析

Stephen J. Lycett^[34]评价了生物科学的形态测量方法应用到考古学中相对缓慢的原因,介绍了旧石器时期岩屑的几何形态分析实例,强调了形态记录对石器研究的重要性。Will Archer^[35]使用三维测量技术,确定南非中更新世遗址的阿舍利双面工具的主要变化来源。这种三维技术与传统的二维

方法进行比较,能够更全面地捕捉研究样本的形态变化。手斧形状的解读是阿舍利考古研究中最突出的问题之一。C Shipton等^[36]通过实验记录了形状和片状疤痕密度的变化,并进行几何形态测量分析。Darya Presnyakova等^[37]使用三维几何形态测量和描述性方法来描述早期大型双面切割工具的变化。Archer等^[38]使用三维几何形态测量法分析了石片

形状的变化,证明了石片形状和大小变化的决定因素,并对石片形状进行详细的预测。他们^[39]使用三维几何形态测量研究石质薄片的细微差异并分析原因。以色列希伯来大学考古团队研发出 AGMT3-D (Artifact GeoMorph Toolbox 3D) 软件,对旧石器时期手斧和尖状器的形态差异进行研究。该软件使用标志点方法在研究样本的三维模型上进行几

何形态分析,为考古学研究提供一种简单易用的工具^[39]。该软件大大提升了分析效率,提高了数据精度,能够自动设置研究对象的标志点,将后期进行运算的多元统计分析和广义普氏分析集中在一起使用^[40]。贵州大学利用这一软件对百色盆地遗址调查采集的手斧标本进行形态分析研究^[41](见图3)。

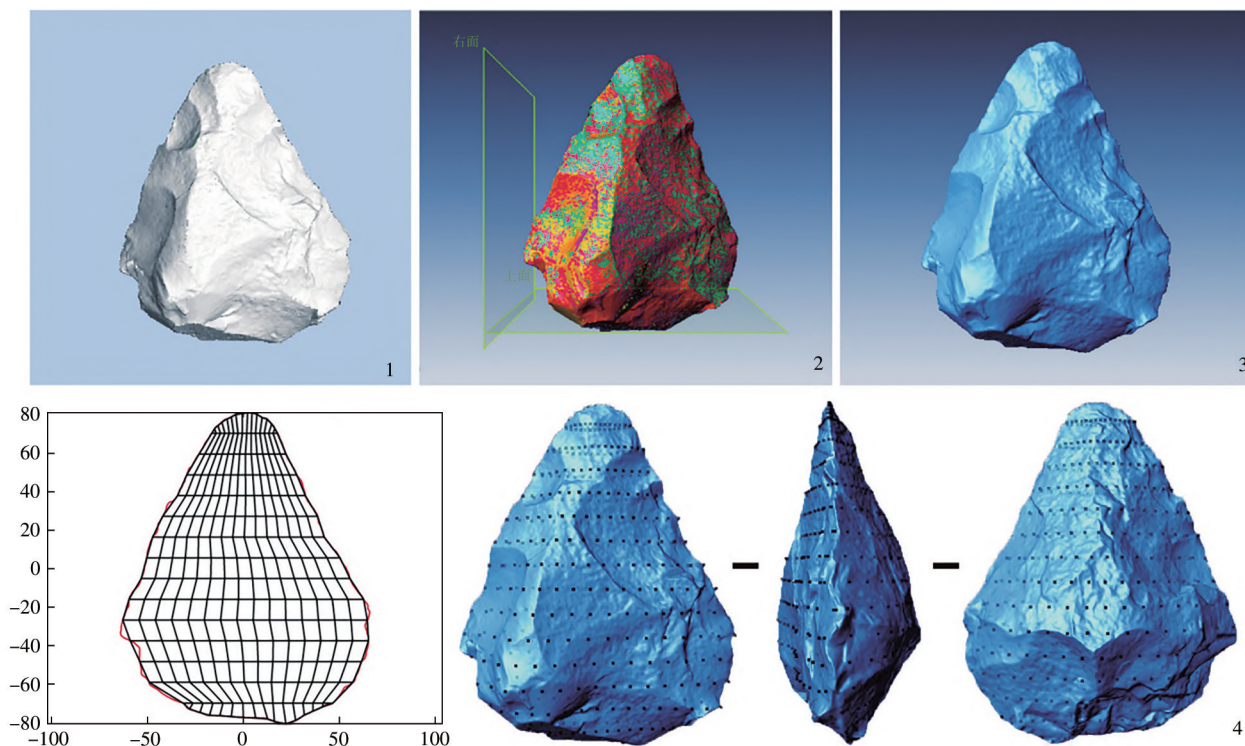


图3 三维模型的获取及模型数据的预处理^[41]

Figure 3 Acquisition of 3D models and the pretreatment of models^[41]

4 个案分析

本文以曲村-天马遗址出土的陶器为样本,采用扫描仪 Creaform Go! SCAN 20 获得样本的三维模型,提取代表陶器形态的轮廓曲线,数据用于椭圆傅里叶描述子分析。曲村-天马遗址位于我国山西省曲沃、翼城两县境内,距今 2 800—3 000 年,是西周时期晋国墓地,又名“晋侯墓地遗址”^[42]。该遗址墓葬时代几乎贯穿整个西周时期,为西周时期晋国的封地和历史研究提供了重要的实物资料^[42]。选取样品为曲村-天马遗址出土的代表性陶器盆 63 件。

4.1 三维模型获取与数据提取

与 3D 激光扫描仪相比,扫描仪 Creaform Go! SCAN 20 采用 LED 光源的白光扫描仪,扫描速度快。此外,它更适用于小型文物。VXelements, Au-

todesk Meshmixer 和 3D Builder 软件用于 3D 扫描过程的后处理阶段。模型的纵截面曲线被提取在三维逆向软件 Geomagic Studio。所有陶器三维模型样本自动拟合 Studio 中设定的坐标系,为模型数据提取的统一性建立标准。在“截取平面”的功能中,将平面设定到与过坐标零点且与中心轴重合的位置,截取特征平面,之后输出特征曲线(见图4)。

4.2 椭圆傅里叶分析

利用曲线椭圆傅里叶方法对陶器进行分析,需以下步骤:

①通过椭圆傅里叶级数公式,确定最大谐波拟合次数(见图5),求出特征平面的椭圆傅里叶描述子。椭圆傅里叶级数近似将曲线上的 (x, y) 坐标点在二维上转换为作为第三个变量 (t) 的函数的一对方程。然后根据链码边界轮廓的离散傅里叶级数近似计算傅里叶系数。在 x 轴和 y 轴上投影的封闭环

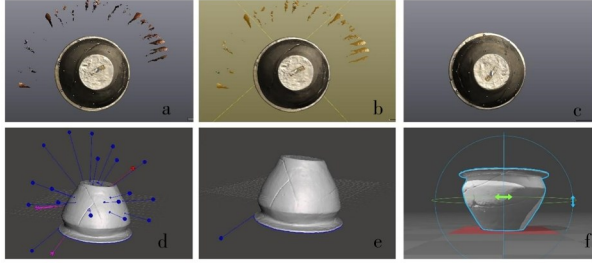


图4 三维模型获取

(a)原始扫描模型;(b)模型外杂点手动选中在Vxlements软件(c)明显噪声点被删除;(d)检测出孔洞裂缝等缺失在Autodesk meshmixer软件;(e)修复后的完整模型在Autodesk meshmixer软件;(f)模型在3D Builder中安置旋转摆正

Figure 4 3D mode acquisition

(a) Original model (b) The obvious noise points are selected in Vxlements (c) The obvious noise points are deleted (d) Deficiencies, such as holes and cracks, are detected using the Autodesk Meshmixer (e) The model is complete after being restored in Autodesk Meshmixer (f) The model is adjusted in 3D Builder

廓的椭圆傅里叶级数近似定义如下^[16-18]:

$$\begin{aligned} X_N(t) &= A_0 + \sum_{n=1}^N a_n \cos\left(\frac{2n\pi t}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{2n\pi t}{T}\right) \\ Y_N(t) &= C_0 + \sum_{n=1}^N c_n \cos\left(\frac{2n\pi t}{T}\right) + d_n \sin\left(\frac{2n\pi t}{T}\right), \end{aligned} \quad (1)$$

式中, t 为 $t_{p-1} < t < t_p$ 时, $1 \leq p \leq K$, 沿封闭轮廓移动单位像素所需的步数, N 为傅里叶谐波的个数, K 为链编码点的总数。 A_0 和 C_0 是频率为 0 对应的系数, 定义了轮廓的平均大小。如果对第 $(i-1)$ 个和第 i 个链编码点之间的轮廓进行线性插值, 并且从起点到第 p 个点的轮廓长度和轮廓周长分别用 t_p 和 T 表示, 则

$$t_p = \sum_{i=1}^p \Delta t_i, \quad (2)$$

式中 T 为链码的基本周期, 是整个轮廓的总步长; $T = tk$, 其中 Δt_i 为第 $(i-1)$ 个点与第 i 个点之间的距离。第 k 点用 x_p 表示。然后,

$$x_p = \sum_{i=1}^p \Delta x_i, \text{ and } y_p = \sum_{i=1}^p \Delta y_i, \quad (3)$$

其中 Δx_i 和 Δy_i 分别是第 $i-1$ 点和第 i 点之间沿 x 轴和 y 轴的距离。假设相邻点之间的线性插值, 则公式(1)中 n 次谐波 (a_n, b_n, c_n 和 d_n) 的椭圆傅里叶描述子可以使用以下公式计算:

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{T}{2n^2\pi^2} \sum_{p=1}^K \frac{\Delta x_p}{\Delta t_p} \left(\cos\left(\frac{2n\pi t_p}{T}\right) - \cos\left(\frac{2n\pi t_{p-1}}{T}\right) \right) \\ b_n &= \frac{T}{2n^2\pi^2} \sum_{p=1}^K \frac{\Delta x_p}{\Delta t_p} \left(\sin\left(\frac{2n\pi t_p}{T}\right) - \sin\left(\frac{2n\pi t_{p-1}}{T}\right) \right) \\ c_n &= \frac{T}{2n^2\pi^2} \sum_{p=1}^K \frac{\Delta y_p}{\Delta t_p} \left(\cos\left(\frac{2n\pi t_p}{T}\right) - \cos\left(\frac{2n\pi t_{p-1}}{T}\right) \right) \\ d_n &= \frac{T}{2n^2\pi^2} \sum_{p=1}^K \frac{\Delta y_p}{\Delta t_p} \left(\sin\left(\frac{2n\pi t_p}{T}\right) - \sin\left(\frac{2n\pi t_{p-1}}{T}\right) \right). \end{aligned} \quad (4)$$

使用平均傅里叶功率估计所需的谐波数。谐波的傅里叶次数与振幅成正比, 并提供了如下公式所描述的形状信息数量的度量:

$$F = \frac{\sum_{n=1}^N (a_n^2 + b_n^2 + c_n^2 + d_n^2)}{2}. \quad (5)$$

经过对盆的曲线数据进行椭圆傅里叶描述, 得到拟合原始曲线的最大谐波次数 $N=14$, 即可得到单个盆曲线数据的椭圆傅里叶描述子(见表1)。

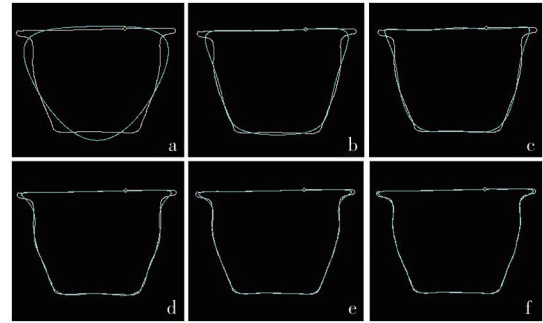


图5 盆的轮廓线不同谐波次数拟合效果

Figure 5 The fitting effect of different harmonic orders of basin contour line

②根据特征平面的椭圆傅里叶描述子, 进行主成分分析, 确定主成分累计贡献率之和大于 90% 的个数(见图6); 根据最大谐波拟合次数和主成分累计贡献率个数, 求出主成分得分。

对盆的 63 个样本进行椭圆傅里叶描述子矩阵进行主成分分析, 得到各个主成分的累计贡献率和各个样本的主成分得分矩阵, 前 k 个主成分累计贡献率之和大于 90%。前 4 个主成分累计贡献率之和大于 90%。从主成分分析的结果可以看出, 盆的前 4 个主成分对应的特征平面形态差异图能够显示出特征平面轮廓曲线的主要形态变化。

③通过 k 均值聚类算法对主成分得分进行分析, 得到分类结果(见图7)。

根据盆的谐波拟合 $N=14$ 和前 4 个主成分累计

贡献率之和大于 90% 的结果,可以计算出盆的主成分得分。将主成分得分按照 K 均值聚类算法进行分析。主成分得分采用 SPSS 软件进行 k 均值聚类分析。分类结果如图 7 所示。第一组有 13 个样本,整体形状瘦长;第二组有 9 个样本,整体形状较为粗壮;第三组有 41 个样本,整体形状接近方形。

表 1 盆特征曲线的椭圆傅里叶描述子
Table 1 Elliptic Fourier descriptor of basin characteristic curve

谐波 次数 N	椭圆傅里叶描述子			
	a_n	b_n	c_n	d_n
1	1	0	0	0.770 86
2	0.000 23	0.051 52	0.147 52	0.002 35
3	-0.054 50	-0.002 47	-0.002 23	0.061 76
4	0.000 22	0.028 93	0.010 30	-0.000 22
5	-0.032 65	-0.000 96	-0.000 22	-0.000 57
6	0.001 67	-0.021 25	-0.019 25	-0.001 11
7	-0.010 13	0.000 62	-0.000 13	0.009 36
8	0.001 48	-0.026 15	0.002 53	-0.000 27
9	0.002 32	0.001 20	0.000 20	-0.001 63
10	-0.000 05	-0.008 90	0.001 94	-0.000 16
11	0.010 67	0.001 02	0.000 27	-0.001 65
12	-0.000 67	-0.000 22	-0.001 91	-0.000 14
13	0.006 27	0.000 10	0.000 16	0.002 40
14	-0.000 59	0.002 87	0.000 02	-0.000 03

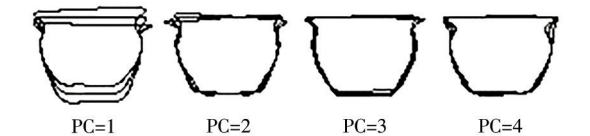


图 6 盆的前 4 个主成分对应的特征平面形态差异
Figure 6 The morphological differences of the characteristic planes corresponding to the first four principal components of the basin.

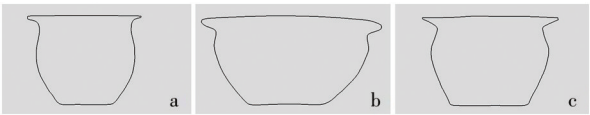


图 7 陶器盆形态分类结果
Figure 7 Classification results of pottery basin morphology

5 结语与展望

三维数据信息量丰富、维度高、能够更加全面地表达研究对象的几何形态信息,比二维数据有很多优势。但是三维数据也有其缺点,首先研究对象的三维模型获取成本比二维图像高。因此,在没有过高的精度要求下,推荐使用摄影测量技术获得三维

模型。其次,研究样本的三维模型处理和三维数据提取,需要相关软件和计算机编程辅助进行,要求研究者有一定计算机基础。这也是目前三维数字化技术在考古文物研究中应用的难点,也是未来三维数字化技术发展的方向,成本更低、操作更加简便。

在几何形态测量方法中,标点法的优势在于数据选取清楚且数据量少,因此计算量相对少。但是选取点的多少是否能够完全代表研究对象的形态,细小的形态变化容易忽视,这也是该方法存在的不足。轮廓线法的优势在于曲线数据全面且容易提取,可以很好地反映出研究对象轮廓的形态变化。但曲线数据不能分析研究对象内部的形态结构。因此,两种方法相互补充,可以同时结合其他数学定量分析方法使用,这也是三维几何形态测量发展的趋势。

参考文献:

[1] HUXLEY J. Problems of relative growth[M]. London: Methuen&Co. LTD, 1932:28-30.

[2] 张元动. 形态统计学:一门新兴的应用性学科[J]. 古生物学报,1994(05):651-652.DOI:10.19800/j.cnki.aps.1994.05.009.

[3] ROHLF F J, MARCUS L F. A revolution morphometrics[J]. *Trends in ecology & evolution*, 1993, 8(4): 129-132.DOI:10.1016/0169-5347(93)90024-J.

[4] SLICE D E. Landmark coordinates aligned by procrustes analysis do not lie in Kendall's shape space[J]. *Systematic Biology*, 2001, 50(1): 141-149.DOI:10.1080/10635150119110.

[5] 白明,杨星科,李静,等. 几何形态学:关于形态定量比较的科学计算工具[J]. 科学通报,2014,59(10): 887-894.

[6] 王巍. 中国考古学大辞典[M]. 上海:上海辞书出版社, 2014:1-2.

[7] JAMES R F, DENNIS S. Extensions of the Procrustes method for the optimal superimposition of landmarks [J]. *Systematic zoology*, 1990, 39(1): 40-59.DOI:10.2307/2992207.

[8] ZELDITCH M L, SWIDERSKI D L, SHEETS D H, et al. Geometric morphometrics for biologists: a primer [M]. San Diego: Elsevier Academic Press, 2004:32-35.

[9] KIINGENBERG C P. Morpho J: an integrated software package for geometric morphometrics[J]. *Molecular Ecology Resources*, 2011, 11(2): 353-357.DOI:10.1111/j.1755-0998.2010.02924.x.

[10] HERZLINGER G, GOREN-INBAR N, GROSMAN L. A new method for 3D geometric morphometric

- shape analysis: The case study of handaxe knapping skill[J]. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 2017, 14(1): 163-173. DOI: 10.1016/j.jasrep.2017.05.013.
- [11] 闻慧,王心丽. 轮廓形态测量法在生物分类应用中的研究进展[J]. *应用昆虫学报*, 2012, 50(5): 1438-1446. DOI: 10.7679 /j. issn.2095-1353.2013.197.
- [12] KUHL F P, GIARDINA C R. Elliptic Fourier features of a closed contour[J]. *Computer graphics and image processing*, 1982, 18(3): 236-258. DOI: 10.1016/0146-664X(82)90034-X.
- [13] IWATA H, UKAI Y. SHAPE: a computer program package for quantitative evaluation of biological shapes based on elliptic Fourier descriptors[J]. *Journal of heredity*, 2002, 93(5): 384-385. DOI: 10.1093/jhered/93.5.384.
- [14] 周炳琨. 激光原理[M]. 北京:国防工业出版社, 2007: 1-2.
- [15] 朱宇华,徐睦,乜小珂. 基于三维激光扫描技术的古代城台及城楼的结构变形监测与分析方法研究[J]. *北京建筑大学学报*, 2022, 38(02): 68-73. DOI: 10.19740/j.2096-9872.2022.02.09.
- [16] 陈春生. 三维激光扫描技术在文物遗址数字化测绘中的应用研究[J]. *中国高新科技*, 2021(03): 138-140.
- [17] 吴晨,李源,柴怡,等. 三维激光扫描技术在小微玻璃文物保护中的应用[J]. *文博*, 2024(04): 96-102. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7954.2024.04.015.
- [18] 成思源,杨雪荣. 逆向工程技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2018: 263.
- [19] 张永春,潘思文. 结构光扫描技术在文物数字化中的应用分析[J]. *文博*, 2012(03): 93-96. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7954.2012.03.019.
- [20] 李洋. 博物馆文物三维数据采集技术探析[J]. *博物馆管理*, 2020, (03): 80-89.
- [21] 丁忠明,张立凯. 工业CT扫描文物的伪影与校正[J]. *文物保护与考古科学*, 2022, 34(06): 35-44. DOI: 10.16334/j.cnki.cn31-1652/k.20220802655.
- [22] 邓阳全,唐宴东,魏艳艳,等. 利用高精度计算机断层扫描系统重建青铜器香薰的三维模型[J]. *文物保护与考古科学*, 2014, 26(01): 88-92. DOI: 10.16334/j.cnki.cn31-1652/k.2014.01.012.
- [23] 叶琳,郭建波,秦海嘉. 三星堆遗址出土青铜神树结合部位工业CT图像的再辨析[J]. *西南文物考古*, 2023(02): 152-156.
- [24] 侯刚栋,邵晨光. 数字近景摄影测量在文物考古领域中的应用[J]. *测绘技术装备*, 2019, 21(04): 82-85, 81.
- [25] 马欢欢,赵清坡. Agisoft Photoscan 照片建模技术在考古中的应用[J]. *文物保护与考古科学*, 2016, 28(04): 144-149. DOI: 10.16334/j. cnki. cn31-1652/k. 2016.04.019.
- [26] 赵海龙,全广,闫晓蒙. 基于 Agisoft PhotoScan 的石器三维建模与应用[J]. *人类学学报*, 2021, 40(01): 40-48. DOI: 10.16359/j.cnki.cn11-1963/q.2020.0066.
- [27] 刘建国. 可移动文物的多视角影像三维重建[J]. *考古*, 2016(12): 97-103.
- [28] FREIDLINE S E, GUNZ P, HARVATI K, et al. Evaluating developmental shape changes in Homo antecessor subadult facial morphology[J]. *Journal of Human Evolution*, 2013, 65(4): 404-423. DOI: 10.1016/j.jhevol.2013.07.012.
- [29] CUI Y, WU X. A geometric morphometric study of a Middle Pleistocene cranium from Hexian, China[J]. *Journal of Human Evolution*, 2015, 88: 54-69. DOI: 10.1016/j.jhevol.2015.08.001.
- [30] 邢松,周蜜,刘武. 中国人牙齿形态测量分析:近代人群上、下颌前臼齿齿冠轮廓形状及其变异[J]. *人类学学报*, 2010, 29(02): 132-149. DOI: 10.16359/j.cnki.cn11-1963/q.2010.02.003.
- [31] 周蜜,崔娅铭,邢松. 中国近代人群上颌前臼齿釉质-齿质连接面形状的三维几何形态测量[J]. *人类学学报*, 2016, 35(04): 585-597. DOI: 10.16359/j.cnki.cn11-1963/q.2016.0049.
- [32] XING S, MARTINÓN-TORRES M, BERMÚDEZ DE CASTRO JM. Late middle Pleistocene hominin teeth from Tongzi, southern China[J]. *Journal of human evolution*, 2019, 130: 96-108. DOI: 10.1016/j.jhevol.2019.03.001.
- [33] 李海军,徐晓娜. 青海土族和藏族侧面部轮廓形状及其变异:基于标志点的几何形态测量分析[J]. *科学通报*, 2014, 59(16): 1516-1524. DOI: 10.1360/972013-1065.
- [34] LYCETT S J. Quantifying transitions: morphometric approaches to Palaeolithic variability and technological change[M]. New York: Springer, 2009: 79-92.
- [35] ARCHER W, BRAUN D R. Variability in bifacial technology at Elandsfontein, Western cape, South Africa: a geometric morphometric approach[J]. *Journal of Archaeological Science*, 2010, 37(1): 201-209. DOI: 10.1016/j.jas.2009.09.033.
- [36] SHIPTON C, CLARKSON C. Handaxe reduction and its influence on shape: An experimental test and archaeological case study[J]. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 2015, 3: 408-419. DOI: 10.1016/j.jasrep.2015.06.029.
- [37] PRESNYAKOVA D, BRAUN D R, CONARD N J, et al. Site fragmentation, hominin mobility and LCT

- variability reflected in the early Acheulean record of the Okote Member, at Koobi Fora, Kenya[J]. *Journal of human evolution*, 2018, 125: 159-180.DOI:10.1016/j.jhevol.2018.07.008.
- [38] ARCHER W, POP C M, REZEK Z, et al. A geometric morphometric relationship predicts stone flake shape and size variability[J]. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 2018, 10: 1991-2003.DOI: 10.1007/s12520-017-0517-2.
- [39] ARCHER W, DJAKOVIC I, BRENET M, et al. Quantifying differences in hominin flaking technologies with 3D shape analysis[J]. *Journal of Human Evolution*, 2021, 150: 102912.DOI:10.1016/j.jhevol.2020.102912.
- [40] HERZLINGER G, GROSMAN L. AGMT3-D: A software for 3-D landmarks-based geometric morphometric shape analysis of archaeological artifacts [J]. *PloS one*, 2018, 13(11): e0207890.DOI: 10.1371/journal.pone.0207890.
- [41] 雷蕾,贺乐天,李大伟,等. 三维几何形态测量方法在石制品分析中的应用[J]. *人类学学报*, 2021, 40(06): 970-980.DOI:10.16359/j.1000-3193/aas.2021.0076.
- [42] 邹衡,北京大学考古系商周组,山西省考古研究所. 天马-曲村:1980-1989[M]. 北京:科学出版社,2000.



王金,山西大学科学技术史研究所副教授,硕士生导师,毕业于北京科技大学科技史与文化遗产研究院,工学博士。主要研究方向为科技考古、博物馆、科技与社会。Email:wangjin0308@sxu.edu.cn

(责任编辑:彭 鹏)