

基于激光点云的园林假山遗产特征定量化评价

Quantitative Evaluation of Garden Rockery Heritage Characteristics Based on Laser Point Cloud

吴杭彬¹ 韦朝旭¹ 杨 晨^{2,3*} 韩晓蓉² 刘 春¹
WU Hangbin¹ WEI Chaoxu¹ YANG Chen^{2,3*} HAN Xiaorong² LIU Chun¹

(1. 同济大学测绘与地理信息学院, 上海 200092; 2. 同济大学建筑与城市规划学院, 上海 200092; 3. 高密度人居环境生态与节能教育部重点实验室, 上海 200092)

(1. College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai, China, 200092; 2. College of Architecture and Urban Planning, Tongji University, Shanghai, China, 200092; 3. Key Laboratory of Ecology and Energy-saving Study of Dense Habitat, Ministry of Education, Shanghai, China, 200092)

文章编号: 1000-0283(2022)10-0028-08
DOI: 10. 12193 / j. laing. 2022. 10. 0028. 004
中图分类号: TU986
文献标志码: A
收稿日期: 2022-08-10
修回日期: 2022-09-02

摘 要
基于湖石假山特征定量化评价的一种新方法, 利用激光扫描采集高精度环绕式假山点云数据, 分析点云模型的骨架线、轮廓转折点、透窝洞、粗糙度等关键特征, 并以传统品赏标准中的“瘦、透、漏、皱”为引导, 建立由体占比、透空率、洞穿率等14个指标构成的定量评价体系。通过对上海和扬州的假山实例研究, 得出漏空比、出孔率、切占比和孔心分布系数能够综合反映假山“漏”的特征; 透空率、出洞率、洞穿率和洞心分布系数能够表征“透”的特征; 粗糙度和粗糙率能够表征“皱”的特征; 体占比、转折数、轮廓弯曲度和骨架复杂度能够综合反映“瘦”的特征。方法有效利用了激光点云高精度、多细节的特点, 结合数理分析及计算机可视化等手段构建了定量评价途径, 为园林假山遗产的保护和传承提供了更科学的依据和新的思路。

关键词
古典园林遗产; 湖石假山; 激光点云; 特征提取; 量化评价

Abstract
An innovative approach for quantitatively evaluating the Taihu Lake stone rockery characteristics was created in this research. Key features of the digital model, including model skeleton extraction, contour scatter extraction, geometric holes, and texture roughnes, were examined. High-precision surrounding rockery point cloud data were collected using laser scanning. Based on the traditional Chinese evaluation criteria for garden rockeries, “Shou (slim), Tou (riddled through), Lou (well hollowed out), and Zhou (wrinkled)”, a quantitative evaluation system with 14 indicators, such as body proportion, air permeability, and penetration rate, was proposed. It was determined through the case study of rockery in Shanghai and Yangzhou that the characteristics of “Lou (well hollowed out)” can be seen in the mutual weighting of leakage ratio, porosity, tangent ratio, and hole center distribution coefficient;; the air permeability, the hole rate, the hole penetration rate, and the hole center distribution coefficient can represent the characteristic of “Tou” (riddled through); “Zhou (wrinkled)” can be seen in the two indicators of roughness and roughness ratio; the body proportion, inflection number, contour curvature, and skeleton complexity can fully reflect the characteristic of “Shou” (slim). This method effectively makes use of the high-precision and multi-detail characteristics of laser point clouds. It also combines mathematical analysis and computer visualization. The quantitative evaluation approach can provide a scientific basis and new visions for the conservation and transmission of garden rockery heritage.

Keywords
classical garden heritage; Taihu lake stone rockery; laser point cloud; feature extraction; quantitative evaluation

吴杭彬
1983年生/男/浙江东阳人/博士/副教授/
研究方向为激光扫描数据处理

韦朝旭
1998年生/男/贵州黔南人/在读硕士研究生/
研究方向为激光扫描数据处理

杨 晨
1985年生/男/江苏徐州人/博士/副教授/
研究方向为风景园林遗产信息化

*通信作者 (Author for correspondence)
E-mail: chen.yang@tongji.edu.cn

基金项目:
国家自然科学基金青年科学基金项目“基于三维点云数据的遗产景观空间模式识别研究”(编号: 51608369); 同济大学建筑与城市规划学院建成环境技术中心科研课题“园林假山定量化评价方法研究——以江南太湖石峰为例”(编号: 2020010302)

假山是以造景为目的，用单体石材或土石结合设计营建而形成的模拟山体，是中国古典园林最具特色的要素之一。江南园林的假山是中国山水园林中的高度艺术境界，其源于自然又超越自然之美，具有重要的艺术价值、历史价值和文化价值。我国拥有丰富的园林假山遗产资源，在联合国教科文组织《世界遗产名录》中，明清故宫、承德避暑山庄、北京颐和园、杭州西湖等都包含大量园林假山，尤其以苏州古典园林世界遗产为突出代表，彰显着中国文化遗产的特色。

太湖石假山是中国传统假山的主要类型之一。太湖石是由石灰岩受侵蚀后形成，岩体脆弱，难以保护。而自然界中的太湖石石料目前已濒临绝迹，湖石假山的修复和重建难度较大。同时，湖石假山是典型的不规则几何体，具有外形复杂、骨干丰繁、内部交错、表面粗糙等几何特征。传统基于定性描述的假山营造理论面临“只可意会、不可言传”的困境，特征评价需要依靠专家的主观判断和经验来完成，缺乏可操作性和推广价值。因此，对现存太湖石假山遗产特征的定量化评价和监测是古典园林遗产保护中十分紧迫的工作。

随着近年来计算机技术和遥感手段的革新，文化遗产研究和保护进入了数字化阶段，假山定量化分析已经成为园林遗产研究的热点。国内学者运用三维激光扫描、近景摄影测量等新型遥感技术采集园林假山空间信息，弥补了传统测绘手段在完整性和精确性方面的不足^[1-3]。许多学者结合数字化模型开展假山特征分析，运用形态语言学研究假山设计特点、开展假山色彩定量化分析和假山历史特征定量化解析等研究^[4-6]。数字化信息手段提升了假山特征识别的精准度，为进一步探索定量化遗产价值阐释手段提供了

重要机遇。

然而，目前对于遥感数据的应用局限于对假山外形和尺寸的提取，缺乏对关键数据和几何特征的系统评价研究。激光扫描获得的点云在达到高精度测量的同时也带来了巨大的数据冗余，很难直接应用于遗产保护和管理的研究和实践。因此，本文以建立园林假山遗产特征定量化评价方法为目标，以数字遥感技术获取的三维点云为数据源，以遗产对象特征及假山传统品赏标准为引导，通过算法设计及数理分析，从繁复的点云数据中提取假山遗产的关键参数和特征指标，探索假山遗产特征定量化评价体系。

1 基于激光点云的园林假山遗产特征定量化评价

1.1 园林假山点云模型特征提取

中国传统造园理论多以宋代米芾提出的“漏、透、皱、瘦”作为品鉴湖石假山形貌

特征及品质之标准^[7]。“漏、透、皱、瘦”作为一种审美标准，是假山客观物理形貌和欣赏者主观感受相互作用的结果。本研究的目标是采用数字化手段评价假山审美的客观对象，即物理形貌特点，为进一步的审美特征评价提供基础。“漏、透、皱、瘦”4类特征主要是对假山的整体形态结构、外部轮廓、内部形态变化、表面纹理等特征的表述，而定量化分析评价需要以假山关键特征的提取和数字化表达作为基础。因此，本研究首先通过建立高精度假山三维模型，提取模型的骨架线、轮廓转折点、孔洞、表面粗糙度等关键信息并将其数字化，构建假山关键特征提取技术体系（图1）。

1.1.1 假山骨架线特征提取

本研究选取假山模型的骨架线特征来表征假山的形体结构特征。将假山模型（图2-a）通过Nooruddin^[8]的方法生成体素描述、拓

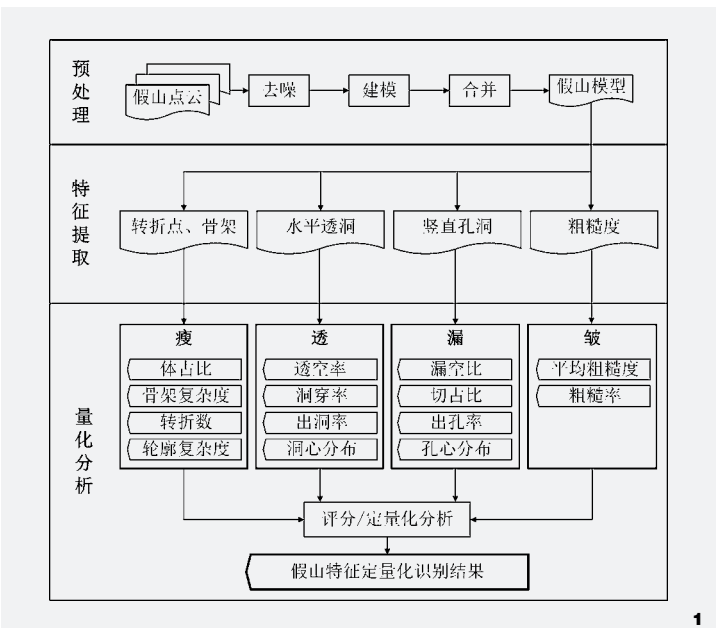


图1 基于激光点云的遗产特征定量化评价流程
Fig. 1 Flow chart of quantitative evaluation of heritage features based on laser point cloud

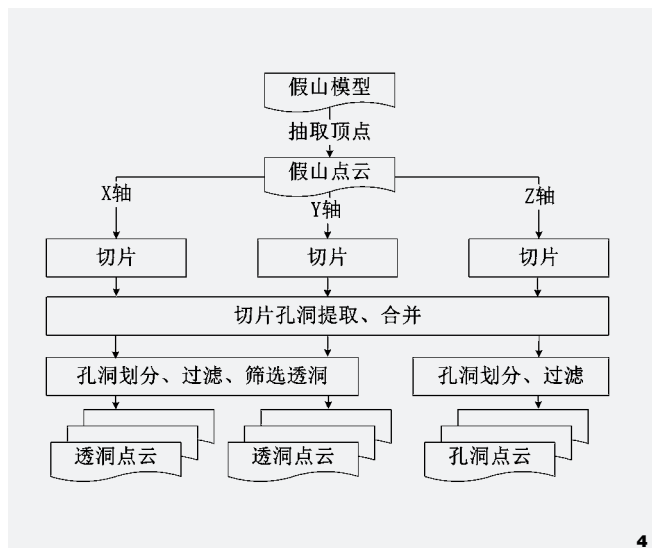
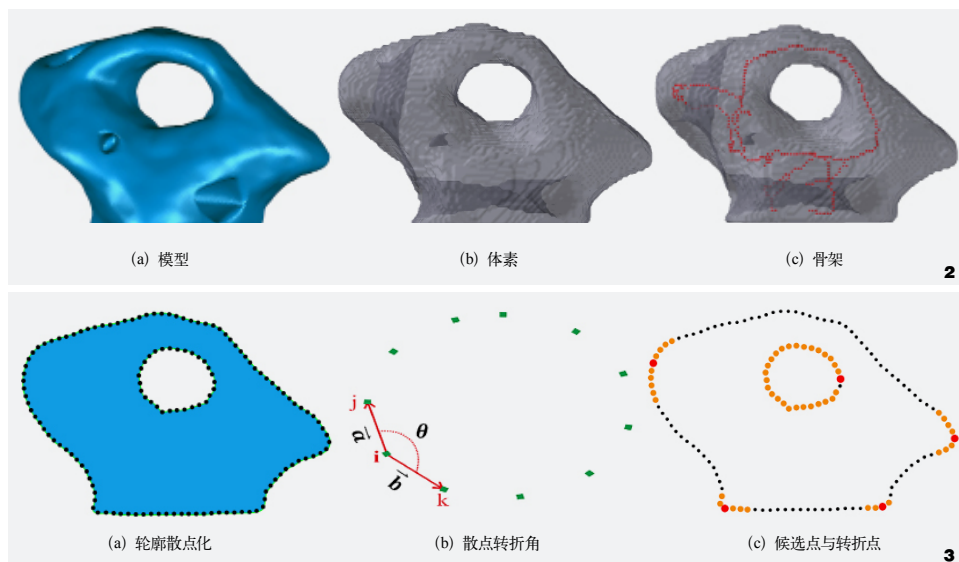


图2 骨架提取
Fig. 2 Skeleton extraction

图3 转折点提取
Fig. 3 Turning points extraction

图4 孔洞提取流程图
Fig. 4 The flow chart of hole extraction

生成轮廓散点(图3-a)。

对多轮廓点排序后, 转折点提取主要通过计算转折角余弦值实现。如图3-b所示, 令当前点与前后点分别为 i 、 j 、 k , 定义 i 点的转折角 ij 、 ik 为连线的夹角 θ , 设 i 、 j 、 k 在投影面的二维点坐标为 (x_i, y_i) 、 (x_j, y_j) 、 (x_k, y_k) , 则可以通过向量 $\vec{a}$ 、 $\vec{b}$ 计算转折角的余弦值进行转折特征点的筛选, 见式(1-3)。

$$\vec{a} = (x_j - x_i, y_j - y_i) \quad (1)$$

$$\vec{b} = (x_k - x_i, y_k - y_i) \quad (2)$$

$$\cos\theta = \frac{\vec{a} \cdot \vec{b}}{|\vec{a}| \cdot |\vec{b}|} \quad (3)$$

当某点的转折角 θ 大于一定阈值时, 将该点添加到候选点中(图3-c大号橙色点), 最后将相邻的候选点分组并取该组最大值点作为转折点(图3-c大号红色点)。

1.1.3 假山透洞及窝洞提取

假山形体中各种朝向、大小、深度的孔洞是假山内部形态特征的体现,也是假山数据完整采集、定量分析的难点。本研究选取透洞(任意方向洞穿假山的孔洞)和窝洞(竖直方向未洞穿假山的孔洞)表征假山的内部形态,并构建了提取流程(图4)。

假山模型姿态会影响最终孔洞提取的结果,为得到更符合实际的结果,在数据预处理时将姿态调整为Z轴与山体底平面垂直, $X(Y)$ 轴与实地观赏方向一致, $Y(X)$ 轴垂直于其余两轴的平面。姿态调整结束后,将假山点云分别沿坐标轴方向按式(4)切片^[10]:

$$\begin{cases} num_X = \text{int}(\frac{x-x_{min}}{dx}) \\ num_Y = \text{int}(\frac{y-y_{min}}{dy}) \\ num_Z = \text{int}(\frac{z-z_{min}}{dz}) \end{cases} \quad (4)$$

式中, x 、 y 、 z 为假山上某个激光点的三维坐标, x_{min} 、 y_{min} 、 z_{min} 为该假山点云中 X 、 Y 、 Z 三个方向的最小值, d_x 、 d_y 、 d_z 为三

扑修改, 转回多边形的流程得到体素(图2-b), 之后用Lee等^[9]提出的三维平行稀疏算法, 提取3D体素对象的中间表面和中间轴, 其结果即为假山的骨架信息(图2-c), 能够简练地表达假山模型的形体结构。

1.1.2 假山轮廓线转折点特征提取

轮廓转折点可以用来定量描述假山的外

部轮廓特征。本研究从假山主要观赏视点沿视线方向获取假山外部轮廓线,并设计轮廓散点提取和转折特征点提取两个步骤。轮廓散点描述了在该投影方向的外轮廓形状,提取方法为将假山点云沿着主要观察方向投影到一定平面,对投影得到的平面点构建三角网,删除三角网中边长超过一定阈值的边,从剩余三角网中提取内外边界,并从边界线

个方向的厚度阈值, int 为取整函数, num_X 、 num_Y 、 num_Z 为该点所处的切片编号。

图5给出了假山的切片情况, 切片中的点云可由假山三维模型中的相连关系分成几个条带, 其中孔洞在切片中表现为内含于其他的条带(图5-c, 图5-f, 图5-i中红色), 可借助此特征提取切片中的孔洞部分^[11]。沿轴向各切片识别出的孔洞点云合并后, 得到该轴多个孔洞对象的点云集合, 再次根据模型中相连关系可划分得到单个孔洞。通过点云数量阈值设置过滤掉细小的部分, 剩于对象通过边界数量区分, 边界定义为只属于一个三角面片的边的集合(图6-a, 图6-b), 两条以上边界的是透洞(图6-a), 只有一条边界的是窝洞(图6-b)。

1.1.4 粗糙度计算

为了量化表征假山表面的纹理特征, 本文借地理学的粗糙度指标^[12], 将假山粗糙度定义为以当前点为中心顶点的一阶三角网总面积与投影到其最小二乘拟合平面总面积的比值(图7, 图8)。以三角形为例, 投影后边长可以通过两端点坐标构成的向量和拟合平面法向量来计算。

粗糙度计算公式为:

$$R = \frac{\sum S}{\sum S'} \quad (5)$$

其中 $\sum S$ 、 $\sum S'$ 分别为原总面积和投影后总面积, S 、 S' 为其中某三角面片的面积值与投影面积值。

1.2 假山遗产的特征量化评价

基于对假山三维模型关键特征的提取和量化表达, 以“漏、透、皱、瘦”为引导, 通过对4大特征内涵的解读, 与三维模型定量化分析评价因子建立关联, 提出了由体占

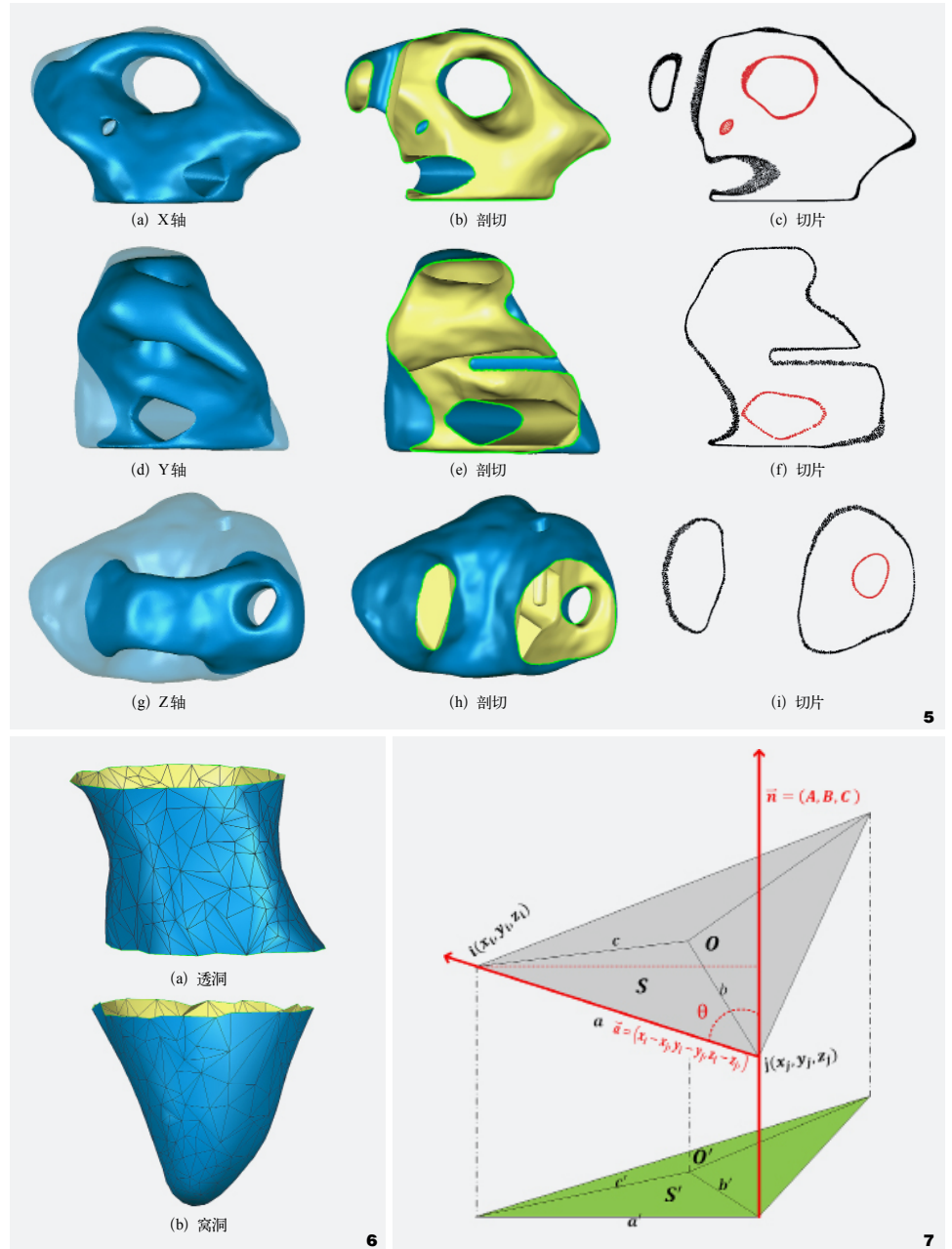


图5 切片示意
Fig.5 Slicing and chip

图6 孔洞类别
Fig.6 Type of hole

图7 粗糙度计算
Fig.7 Roughness calculation

比、透空率、洞穿率等14个指标构成的定量分析评价体系, 并通过假山实例进行定量验证。

1.2.1 假山特征评价指标体系构建

“瘦”主要是对假山整体形态上的鉴赏, 指的是“瘦骨嶙峋, 纵向上纤细修长”^[7]。

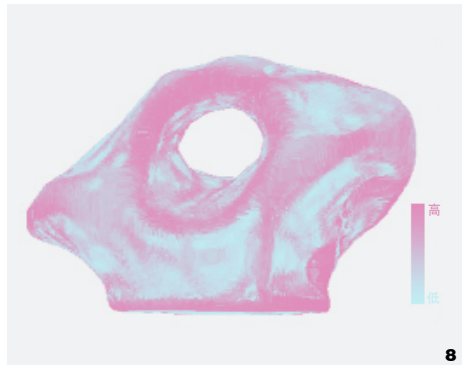


图8 粗糙度计算结果
Fig. 8 Results of roughness calculate

“瘦”并非指单薄与单一，而是要求骨架简洁但外形婉转变富有趣味。由此选择4个定量化评价指标：(1) 体占比：体积除以占地面积，对应形态的纤细修长程度；(2) 骨架复杂度：假山骨架中分支数量，对应骨架简洁程度；(3) 转折数：轮廓转折点的数量，对应外形变化情况；(4) 轮廓弯曲度：轮廓转折候选点夹角平均余弦值，对应外形婉转程度。

“透”是对于假山水平方向透洞的鉴赏，表现由透空带来的视觉上的虚实关系，也表达假山水平方向透洞数量多及分布广的情况，相应的定量化指标为：(1) 透空率：正视图透空部分与填充部分的比值，对应虚实关系强烈程度；(2) 洞穿率：透洞洞口面积与假山表面积之比，对应虚实关系强烈程度；(3) 出洞率：透洞数量与体积的比值，对应排除体积影响后的透洞数量；(4) 洞心分布系数：透洞质心相对于假山质心距离的变异系数，对应透洞的分布情况。

“漏”是对竖直方向孔洞的鉴赏，与“透”类似但又不尽相同，“漏”是表达假山竖直方向漏空程度和孔洞之间彼此的连通关系。由此选择4个指标：(1) 漏空比：漏洞

及窝洞体积与假山体积的比值，对应漏空程度；(2) 切占比：带有孔洞的切片占比，对应孔洞竖直方向分布情况；(3) 出孔率：竖直方向孔洞数量与体积的比值，对应排除体积影响后的孔洞数量；(4) 孔心分布系数：孔洞质心相对于假山质心距离的变异系数，对应于孔洞水平的分布情况。

“皱”是对假山表面凹凸变化的鉴赏，要满足“纹理褶皱、脉络纵横交错，富于变化”的要求^[13]，因此选择两个指标：(1) 平均粗糙度：各点粗糙度的均值，对应粗糙程度；(2) 粗糙率：粗糙度超过一定阈值的点的占比，对应粗糙表面范围。

1.2.2 假山特征指标评分体系

为了系统地识别假山的整体特征，本研究基于上述指标设计了相应的评分体系。“瘦、透、漏、皱”各项指标得分加权求和结果作为评价对象的对应量量化得分。得分区间划分与实验案例数等级关联，例如研究案例为4处假山，则最低分0分，最高分4分。第一个计算值不为0的案例为1级，相同计算值的对象得分取均值。根据指标计算值相关性排序确定案例等级，案例越多，打分体系也会更加精细。

研究以传统赏石原则为依据，设定了不同评价指标的权重。传统假山审美强调“远取其势，近取其质”^[7]，即山体轮廓和动势决定了整体特征，占主导；而细部的特征，即“石质”是在整体特征基础上的细微刻画。因此，在权重设置对“瘦”“透”“漏”特征的评价首先关注整体特征，将“体占比”“透空率”“漏空比”分别赋予权重0.5，其余每项3个辅助指标分别赋权0.167、0.167和0.166；“皱”所对应的“粗糙度”和“粗糙率”两个指标都面向细部形象层面，因此均赋权0.5。

2 实验与分析

2.1 实验数据

本文选择4处太湖石假山进行实验分析，验证评价体系的有效性。两处为典型江南园林假山：鱼骨石是扬州个园的镇园之宝，公认其具有“瘦、透、漏、皱”的遗产特征，尤其“透”的特征格外突出（图9-a）；玲珑石属于北宋花石纲遗物，其姿态优美，是扬州街南书室的镇宅之宝（图9-b）。另外两处作为对照案例，分别位于上海同济大学三好坞园林和千秋园，其“瘦、透、漏、皱”的特征不明显，本文中以坞石（图9-c）和秋石（图9-d）命名。

数据采集使用DOT-X手持激光扫描仪。该设备由深度相机搭配手机或平板电脑等移动处理平台构成（图10），采用主动红外立体成像方式获取深度信息，帧速率为90帧/s，RGB传感器分辨率为1920×1080，深度流输出分辨率为1280×720，扫描距离为0.3 ~ 10 m。采集过程中手持设备对假山进行环绕式扫描，并对孔洞等部分重点扫描，保证数据密度，使得假山数据的完整性和密度相较于传统架站式激光扫描仪进一步提升。扫描过程中设备实时进行点云的配准及配色，扫描结束时即可得到真彩色三维点云。通过激光扫描获取了假山本体、周边树木、地面、苔藓等地物信息，并对点云进行姿态调整、去噪、建模、模型合并与修复等预处理，得到完整模型和关键尺寸（表1）。

数据预处理使用软件Geomagic Warp完成，分析得到点云与模型的平均距离偏差为3 ~ 6 mm^[14]。其余实验的实现方案为：几何特征体素化提取借助软件binvox完成，骨架提取使用Matlab工具箱中Skeleton3D模块完成，轮廓散点提取、面积与体积计算借助Geomagic Warp软件完成，其余特征提取及指标计算使

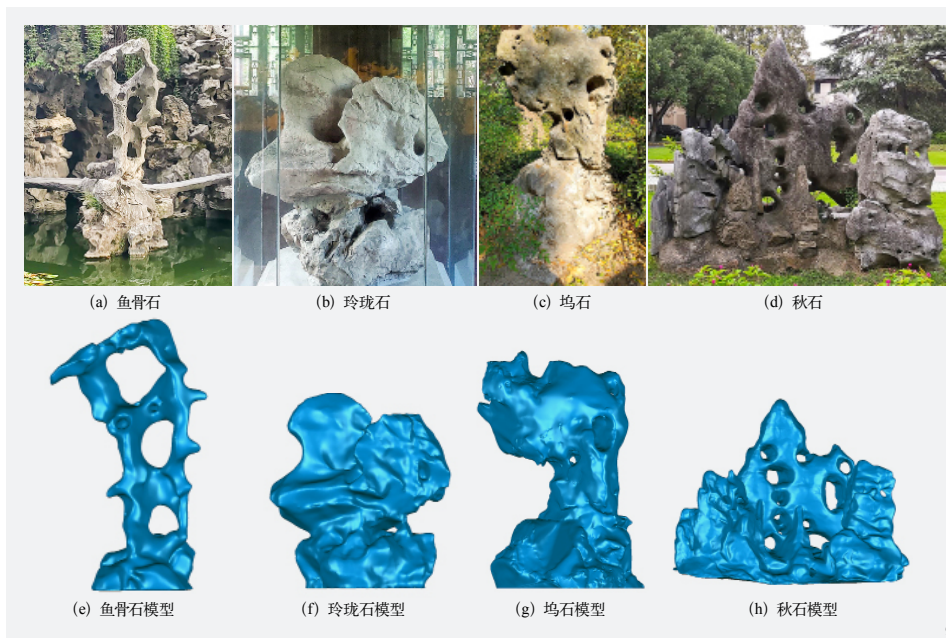


图9 实验对象
Fig. 9 Cases of study

图10 研究团队利用手持激光扫描仪扫描鱼骨石假山
Fig. 10 Scanning Yugushi using the handheld laser scanner



用Python语言编程完成。

2.2 特征量化评价结果

在“瘦”相关特征量化结果中。在“体占比”一项上：体积最小(0.360 m^3)且单薄镂空的鱼骨石计算值最大(1.51)；秋石体积虽最大(2.259 m^3)，但得益于“三峰”式的布局 and 较大的占地面积，最终计算值排名第二(1.46)；而玲珑石和坞石的计算值都较低，这也反映了二者外形敦实的特征。在“转折点

数量”和“轮廓弯曲度”上，选取主要欣赏面提取轮廓点得到图11-a。转折点数量和弯曲度数值基本与对象体积正相关(表1，表2)，即体积越大，转折点数量和弯曲度越高。在“骨架复杂度”一项上，将各模型转化成数量为 $80\times 80\times 80$ 的体素对象并提取骨架得图11-b，计算结果显示该项指标也基本与体积正相关。但鱼骨石的加权得分为3.834，远高于体积为其约6.2倍的秋石，充分反映了其瘦骨嶙峋的特征(表2)。

表1 实验对象尺寸
Tab. 1 Size of study cases

尺寸 Size	鱼骨石 Yugu rockery	玲珑石 Linglong rockery	坞石 Wushi rockery	秋石 Qiushi rockery
长/m	1.315	1.163	1.290	2.994
宽/m	1.112	1.253	1.427	1.692
高/m	2.270	0.730	1.832	2.352
体积/ m^3	0.360	0.272	0.838	2.259
占地面积/ m^2	0.543	0.313	1.019	3.312

在“透”相关特征量化结果中，鱼骨石的透空率计算值最高(0.218)，其次是秋石(0.034)，两者都远高于坞石和玲珑石(0.001)。在计算“出孔率”“洞穿率”“洞心分布系数”等指标时，切片阈值设置为10 mm，提取得到水平方向透洞图11-c。秋石虽体积较大但因透洞数量21个占绝对优势而得到最高“出洞率”，其余3石计算值相当；然而由于表面积较大，秋石的“洞穿率”最小(0.024)，表面积较小的鱼骨石取得了最大值(0.081)；在“洞心分布系数”方面，秋石依靠透洞数量优势取得了最大值(0.299)，其余案例因透洞数量较少计算值都不高。综合来看，许多指标都与透洞数量正相关，而透洞数量又与假山体量有正相关关系，故本文采用绝对数值除以体积和表面积的方式来平衡假山体量差异对计算值的影响，从而充分反映假山自身的特征。鱼骨石加权得分为最高3.335，

表2 量化指标计算结果
Tab. 2 Value of quantitative items

特征 Characteristics	指标 Indicators	权重 Weight coefficient	鱼骨石 Yugu rockery		玲珑石 Linglong rockery		坞石 Wushi rockery		秋石 Qiushi rockery	
			计算值	得分	计算值	得分	计算值	得分	计算值	得分
瘦	体占比	0.500	1.51	4	1.15	1	1.21	2	1.46	3
	转折数	0.167	33	4	13	1	21	2	31	3
	轮廓弯曲度	0.167	-0.806	4	-0.773	3	-0.771	2	-0.678	1
	骨架复杂度	0.166	13	3	11	4	21	2	41	1
加权得分				3.834	1.832		2		2.334	
透	透空率	0.500	0.218	4	0.001	1.5	0.001	1.5	0.034	3
	出洞率	0.167	8.336	3	3.676	1	5.967	2	9.296	4
	洞穿率	0.167	0.081	4	0.038	3	0.027	2	0.024	1
	洞心分布系数	0.166	0.049	1	0	0	0.168	2	0.299	3
加权得分				3.335	1.418		1.75		2.833	
漏	漏空比	0.500	0.0005	2	0.002	3	0.0003	1	0.005	4
	出孔率	0.167	2.779	1	7.352	4	4.773	2	5.755	3
	切占比	0.167	0.027	1	0.117	2	0.183	3	0.485	4
	孔心分布系数	0.166	0	0	0	0	0	0	0.218	1
加权得分				1.334	2.502		1.335		3.335	
皱	平均粗糙度	0.500	1.00201	2	1.00185	1	1.00283	4	1.00275	3
	粗糙率	0.500	0.157	3	0.099	1	0.131	2	0.226	4
加权得分				2.5	1		3		3.5	

量化结果与实际情况基本相符（表2）。

针对“漏”这一特征，为提取漏洞，将切片阈值设置为10 mm并得到漏洞结果（表2）。与“透”的结果特征相似，“漏”的计算结果也和假山体量有关。水平和竖直方向都有孔洞分布的秋石得分最高。4个案例的“漏空比”计算值普遍较低，加权得分均小于0.01。

在“皱”相关特征量化结果中，对主要观察方向设置粗糙度阈值1.0 001完成了粗糙率的计算分析（表2）。各案例的“平均粗糙度”计算值都不高，与所选案例表面光滑的情况相符。而在表达粗糙部分覆盖率的“粗糙率”方面，“三峰”布局方式的秋石带有更多的起伏，因而数值最大，并使得秋石“皱”的加权得分最高，而坞石因下半部分形态丰富多变，因此在“平均粗糙度”上的数值最

大。最终坞石在“皱”这一项的加权得分与秋石相近，计算结果与图11-e相互印证。

本研究综合考虑了假山绝对尺度对各类指标的影响，将假山体积、表面积等作为基数来计算各类指标的相对数值，从而充分反映不同假山个体的特征。实验表明，指标定量化结果和模型分析可视化结果能够相互印证，与假山特征定性描述呈现高度一致性，通过模型指标计算能够初步识别假山的整体和局部特征。

3 结论与展望

本研究聚焦中国古典园林假山遗产，以遗产的科学评价和保护为目标，以园林假山传统品赏理论为引导，以“形态特征提取与数字化表达、定量化特征评价指标体系构

建”为主线，建立了假山遗产特征定量化评价的新方法。论文创新点在于：（1）从园林遗产的视角出发，以解读、分析和传播园林假山的传统美学特征为目标，从历史的语境中识别假山的特点并引导定量化分析，为解决遗产保护中的特征评价这一关键问题寻找突破口；（2）在假山研究中引入手持式激光扫描技术，采集环绕式假山点云数据，解决了困扰假山定量化评价的细节重建完整度和精度问题，尤其是对假山孔洞、缝隙等关键细节复制和还原；（3）面向假山复杂点云特征提取这一难题，创新性提出了孔洞计算和分类方法，并将测绘学骨架线和粗糙度等概念及方法引入风景园林遗产研究，实现了假山形态结构化数据的提取，为特征定量化评价提供基础；（4）将测绘学中对三维几何模

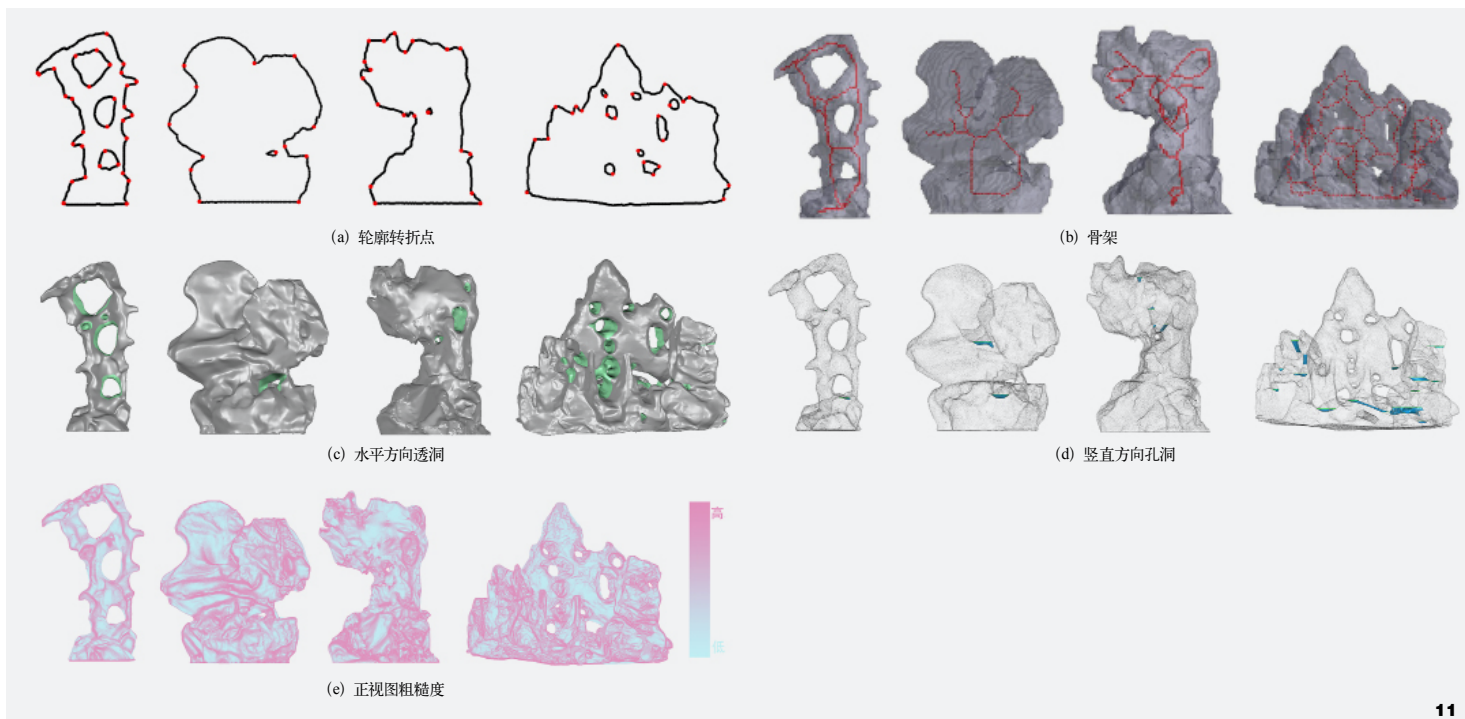


图11 假山的特征可视化结果
Fig. 11 Visualization results of rockery features

型的评价指标与假山品鉴标准相互联系，实现定性评价与定量评价相互关联，建立了基于多学科知识和技术交叉的假山遗产定量评价路径。

园林假山作为一种高度动态性和多样性的文化遗产，几乎无法做到原样保护和修复。如何把控其特征规律从而在监测和修复过程中实现“形不一而神相似”的目标，有效地通过假山的形貌特点传播古典审美信息，是本研究重要的科学意义所在。研究构建的理论框架和技术方法能够更加科学地表述园林假山的特征，为评价假山遗产保护和修复提供了更加客观的依据。同时，该方法将有助于我们更加理性地解译园林假山蕴含的审美规律和标准，为进一步开展传统园林假山美学分析提供支撑，必将有益于传统假山营造智慧的传承和推广应用。

参考文献

- [1] DONG Q, ZHANG Q, ZHU L. 3D Scanning, Modeling, and Printing of Chinese Classical Garden Rockeries: Zhanyuan's South Rockery[J]. Heritage Science, 2020, 8(1).
- [2] 古丽圆, 古新仁, 杨·伍斯德拉. 三维数字技术在园林测绘中的应用——以假山测绘为例[J]. 建筑学报, 2016(S1): 35-40.
- [3] 喻梦哲, 林溪. 基于三维激光扫描与近景摄影测量技术的古典园林池山部分测绘方法探析[J]. 风景园林, 2017, 02: 117-122.
- [4] 陈莹莹. 扬州个园假山叠石中形态语言符号的研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2011.
- [5] 刘劲芳, 张勃, 安平. 北京地区中国古典园林掇山色彩分析[J]. 《圆明园》学刊, 2016, 21(6): 191-196.
- [6] 杨晨, 韩锋. 数字化遗产景观: 基于三维点云技术的上海豫园大假山空间特征研究[J]. 中国园林, 2018, 34(11): 20-24.
- [7] 魏菲宇. 中国园林置石掇山设计理论[D]. 北京: 北京林业大学, 2009.
- [8] NOORUDDIN FS, TURK G. Simplification and Repair of Polygonal Models Using Volumetric Techniques[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2003, 9(2): 191-205.
- [9] LEE T.C, KASHYAP R.L, Chu C.N. Building Skeleton Models Via 3D Medial Surface Axis Thinning Algorithms[J]. CVGIP: Graphical Models and Image Processing, 1994: 1042.
- [10] 李金涛, 程效军. 建筑物立面点云直线段特征提取方法[J]. 中国激光, 2019, 46(11): 287-298.
- [11] HAINES E. Point in Polygon Strategies[J]. Graphics Gems IV, 1994: 24-26.
- [12] JENNESS J S. Calculating Landscape Surface Area from Digital Elevation Models[J]. Wildlife Society Bulletin, 2004: 323.
- [13] 解明. 《云林石谱》与宋代文人赏石趣味[D]. 重庆: 西南大学, 2018.
- [14] 郭培闪, 杜黎明. 运用Geomagic Studio实现点云数据的曲面重建及误差分析[J]. 地理信息世界, 2015(01): 57-60.