



Delft University of Technology

基于 LiDAR 点云的中国传统园林视觉空间定量分析方法 以寄畅园为例

Zhang, Guanting ; Peng, Yuyang; Nijhuis, Steffen

DOI

[10.3724/j.fjyl.202401070015](https://doi.org/10.3724/j.fjyl.202401070015)

Publication date

2024

Document Version

Final published version

Published in

Landscape Architecture (Fengjing Yuanlin)

Citation (APA)

Zhang, G., Peng, Y., & Nijhuis, S. (2024). 基于 LiDAR 点云的中国传统园林视觉空间定量分析方法: 以寄畅园为例. *Landscape Architecture (Fengjing Yuanlin)*, 31(7), 108-114.
<https://doi.org/10.3724/j.fjyl.202401070015>

Important note

To cite this publication, please use the final published version (if applicable).
Please check the document version above.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download, forward or distribute the text or part of it, without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license such as Creative Commons.

Takedown policy

Please contact us and provide details if you believe this document breaches copyrights.
We will remove access to the work immediately and investigate your claim.

张冠亭, 彭予洋, 史蒂芬·奈豪斯. 基于 LiDAR 点云的中国传统园林视觉空间定量分析方法: 以寄畅园为例[J]. 风景园林, 2024, 31 (7): 108-114.

基于 LiDAR 点云的中国传统园林视觉空间定量分析方法——以寄畅园为例

张冠亭 彭予洋* (荷) 史蒂芬·奈豪斯

摘要: 【目的】中国传统园林空间复杂多变, 传统的分析方法难以深入探索传统园林复杂的三维视觉空间特征。三维激光雷达 (light detection and ranging, LiDAR) 点云技术在传统园林空间研究方面具有精度高、信息全等优势, 借助 LiDAR 点云技术深入探索中国传统园林视觉空间特征, 可为现代人居环境空间营造提供借鉴与参考。【方法】基于 LiDAR 点云技术提出一套适用于中国传统园林视觉空间分析的方法, 并以三维可视性、视野舒展度及景物视野占比 3 项指标量化描述视觉空间。【结果】以寄畅园为例, 构建了寄畅园 LiDAR 点云体素模型, 利用提出的方法对锦汇漪西侧滨水步道的 11 个视点进行了量化分析, 解析了寄畅园的视觉空间特征, 并探究了该步道的空间感知序列。【结论】证实了利用 LiDAR 点云技术展开传统园林视觉空间研究的可行性与准确性, 提出的方法可应用于其他传统园林视觉空间的分析研究中。
关键词: 中国传统园林; LiDAR 点云; 空间视觉感知; 景观视觉特征; 视觉量化指标

中图分类号: TU986

文献标识码: A

文章编号: 1673-1530(2024)07-0108-07

DOI: 10.3724/j.fjyl.202401070015

收稿日期: 2024-01-07

修回日期: 2023-11-30

开放科学 (资源服务)
标识码 (OSID)



人类主要经由视觉来感知景观空间与环境^[1], 因此视觉景观研究一直是风景园林研究的核心议题之一^[2]。对中国传统园林的景观空间进行视觉分析, 挖掘其视觉特征, 对空间营建精髓的传承具有指导意义。

有别于西方古典园林和现代园林, 中国传统园林空间更为复杂多变^[3]。仅依托定性描述的视觉空间分析很难能体现传统园林空间丰富的视觉体验^[4]。因此, 近年来许多学者都尝试用量化分析的方法解析中国传统园林的视觉空间。既有研究多利用平面或图片等二维信息解析传统园林的空间特征, 如魏胜林等^[5]借助测距仪和矢量平面图, 从视距、视角的角度解析了拙政园的空间特征, 乐志等^[6]基于图片网格对苏州古典园林进行了视觉质量评价, 张甜甜等^[7]借助海量图片, 利用人工智能、空间句法量化探索了网师园的视觉时空感知形成机理。上述研究为解析园林空间特征提供了一定的量化方法与理论基础, 然而基于二维信息的分析难以准确描述人本尺度下三维空间的形态特征 (空间体量、边界、容量等) 和视觉特征 (可视范围、视野深度等), 相关研究的科学化与精确化水平有待提高^[8]。为解决传统园林三维视觉空间研究的

困境, 相关研究多利用数字模型进行视域分析^[9]。然而传统数字模型, 如数字高程模型 (digital elevation model, DEM)、数字表面模型 (digital surface model, DSM)、实体模型 (solid model) 等, 只能反映地面高程变化、建筑空间等信息, 难以将植被、假山等要素进行精细建模, 也因此无法准确描述传统园林空间复杂多变的特征。

目前, 三维激光雷达 (light detection and ranging, LiDAR) 扫描技术的出现有望弥补这一研究缺憾^[10]。对比传统的数字模型, LiDAR 采集的点云模型可以为视觉景观研究提供更详细的空间信息^[11]。当下已经有诸多利用 LiDAR 点云技术进行视觉空间分析的研究, 但大多聚焦于现代城市空间, 如利用点云进行景观可视性分析^[12-13]、城市绿视率分析^[14]、城市街道封闭度研究^[15]等。这些研究均强调了点云模型在分析复杂的植物形态、建筑环境时准确度高的优势。目前也有部分学者将点云技术应用于传统园林研究, 但大多集中在假山研究, 如针对上海豫园假山的三维建模与定量研究^[16]、多种扫描技术相结合的苏州遂园三维建模^[17]、传统园林中假山的三维建模与量化评价体系建立等^[18]。目前在中国传统园

林研究领域, 利用点云技术解析空间视觉特征的案例仅有笔者先前对寄畅园的可视性分析^[19]与观景视野分析^[20], 相关研究仍存在诸多内容有待挖掘。

因此, 本研究旨在探索利用 LiDAR 点云技术深入分析中国传统园林视觉空间的可能性与应用场景。本研究选取江南四大名园之一寄畅园作为研究案例, 主要内容包括: 1) 提出可以进行视觉分析计算的点云数据建模方法; 2) 构建传统园林视觉空间分析方法并提出基于视觉感知的量化指标; 3) 以寄畅园为例, 利用上述方法分析传统园林的空间视觉特征。

1 基于 LiDAR 点云技术的视觉空间分析方法

利用点云对中国传统园林进行视觉景观分析具有数据完整度高与精度高的优势, 然而基于此方法的相关研究成果较少。究其原因, 笔者认为, 此类研究面临着 3 个方面的挑战: 构建可进行视觉空间分析和计算的点云模型的方法; 确立获取视觉空间信息的视觉分析方法; 提出利用上述信息进行视觉景观评估的指标。下文将就上述挑战论述本文

的技术路线。

1.1 基于LiDAR点云技术的视觉分析模型构建

1.1.1 由体素法主导的三维数字模型

GIS软件在进行视觉景观分析时,需要在具有实体或连续表面的数字模型中进行。而点云数据无实体或表面,因此需要在“点”的基础上构建具有实体的数字模型。常见的点云数据建模方式有3类:体素法(voxel-based method)、表面法(surface-based method)、射线追踪法(ray-tracing method)^[21]。在这3类方法中,体素法虽然在模型精度上稍有不足,但具有建模速度快、后期运算效率高等优势。尤其是针对中国传统园林空间而言,过于精细的空间模型会产生大量冗余计算。同时,对于复杂度过高的传统园林空间,体素法可以通过调整体素颗粒度来平衡后期视觉分析计算精度与计算效率之间的关系。因此,本研究选取体素法生成基于点云的实体模型。

建立由体素法主导的三维数字模型主要包含3个步骤:1)清洗点云数据,删除游人等干扰信息,并将原始点云数据分为建筑、植被、假山、地面四大类;2)基于点云数据分别构建建筑、植被、假山3D体素模型;3)利用地面点云数据构建DEM。其中,3D体素模型的构建包含2个部分:1)借助python的Open3D开源库对至少含有一个“点”的空间进行体素模型构建;2)缩减体素数据体量,利用八叉树(octree)算法搜索体素的周边信息,判断该体素是否被6个以上体素包围,如果命题为真,则该体素被其他体素包围,为冗余信息,该体素会被剔除。

1.1.2 通视分析

视觉研究的基础是探究视点与对象之间的可视关系,只有在对象“可视”的基础上,才能进行视觉特征分析。因此,本研究采用的视觉分析方法为基于三维数字模型的通视分析(line of sight)方法,具体操作步骤为:在模型空间中,根据研究需要选取视点;以视点为出发点,以研究场地的尺度来定义视线长度,按照均匀分布的水平角度与垂直角度生成三维构造视线。利用ArcGIS的通视分析工具,判断视线是否被景物所阻碍,记

录障碍物位置、体素编号及线段真实长度,并输出可视的、不被阻碍的三维视线。

1.2 景观视觉空间指标选取

在西方,关于景观视觉的研究已历经数十载,积累了丰富的词汇(vocabulary)与指标(indicator),用以描述、评估、分析园林空间视觉特征^[22]。其中,有三大类指标是被反复提及且值得关注的:1)关注可视空间自身尺度、范围与边界的指标,如开敞度^[23]、郁闭度^[24]、视觉规模(visual scale)^[25]等;2)关注不同空间之间关联的指标,如连续度^[26]、指向性^[27]、序列^[28]等;3)关注视觉空间中与可视内容相关的指标,如丰富度^[29]、复杂度^[30]、多样性^[31]等。因此,对于以上三大类指标,本研究提出了3项基于点云三维可视性计算结果的量化指标:三维可视性(3D visibility)、视野舒展度(visual spread)、景物视野占比(feature ratio of visual field)。其中,三维可视性用于描述可视景观空间的尺度、范围、边界;视野舒展度可以描述可视景观空间的形态和空间指向性,用于研究不同空间之间的视觉联系;景物视野占比用于描述可视空间内的可视内容及其占比。

1.2.1 三维可视性

区别于传统二维可视性的二元结果,三维模型下的可视性分析涵盖了多条三维视线,这些视线共同组成一个视点的三维可视性。计算式:

$$V_{3D} = \frac{V_{visi}}{V_{all}} = \left(\frac{4}{3} \pi \sum r_k^3 \right) / \left(\frac{4}{3} \pi r_0^3 \right) = \frac{\sum r_k^3}{r_0^3}, \quad (1)$$

式中, V_{3D} 为某一视点的三维可视性, V_{visi} 表示视点处的可视空间体积, r_k 为可视视线 k 的长度, m 为所有可视视线的数量, V_{all} 表示以视点为中心、以构造视线长度为半径的球体体积, r_0 为构造视线长度(即可视性分析中所能看到的最远距离)。 $V_{3D} \in [0, 1]$,如果 $V_{3D} = 0$,则表示该视点被完全遮挡,不存在可视空间;如果 $V_{3D} = 1$,则表示该视点在构造视线长度范围内完全不受遮挡。

1.2.2 视野舒展度

视野舒展度表示视点对应的可视空间的舒展程度。本研究利用近球率反映空间舒展度,如果可视空间近似于球体,那么该空间

相对舒展,反之则表明该空间在某个方向视线存在收缩,可视空间不规则。计算式:

$$VS = \frac{\pi \bar{r}^3}{\pi r_{max}^3} = \left(\frac{\bar{r}}{r_{max}} \right)^3 = \left(\frac{\sum r_k}{n r_{max}} \right)^3, \quad (2)$$

式中, VS 为某一视点的视野舒展度, $\bar{r}$ 为所有可视视线的平均长度, n 为参与可视性分析的构造视线数量, r_k 为可视视线 k 的长度, r_{max} 为该视点的最远可视距离。 $VS \in (0, 1]$,如果 $VS = 1$,则表示该视点在任意方向的视线长度都相等,可视空间是以视点为中心的球体,舒展度高;如果 VS 趋近于0,则表示可视空间仅在某一方向舒展,其他方向较为紧缩,可视空间可能趋向于线性空间。

1.2.3 景物视野占比

景物视野占比描述的是在某一视点的视野画面中,各类景物所占的百分比。计算式:

$$FR_i = \frac{N_i}{N_v} \times 100\%, \quad (3)$$

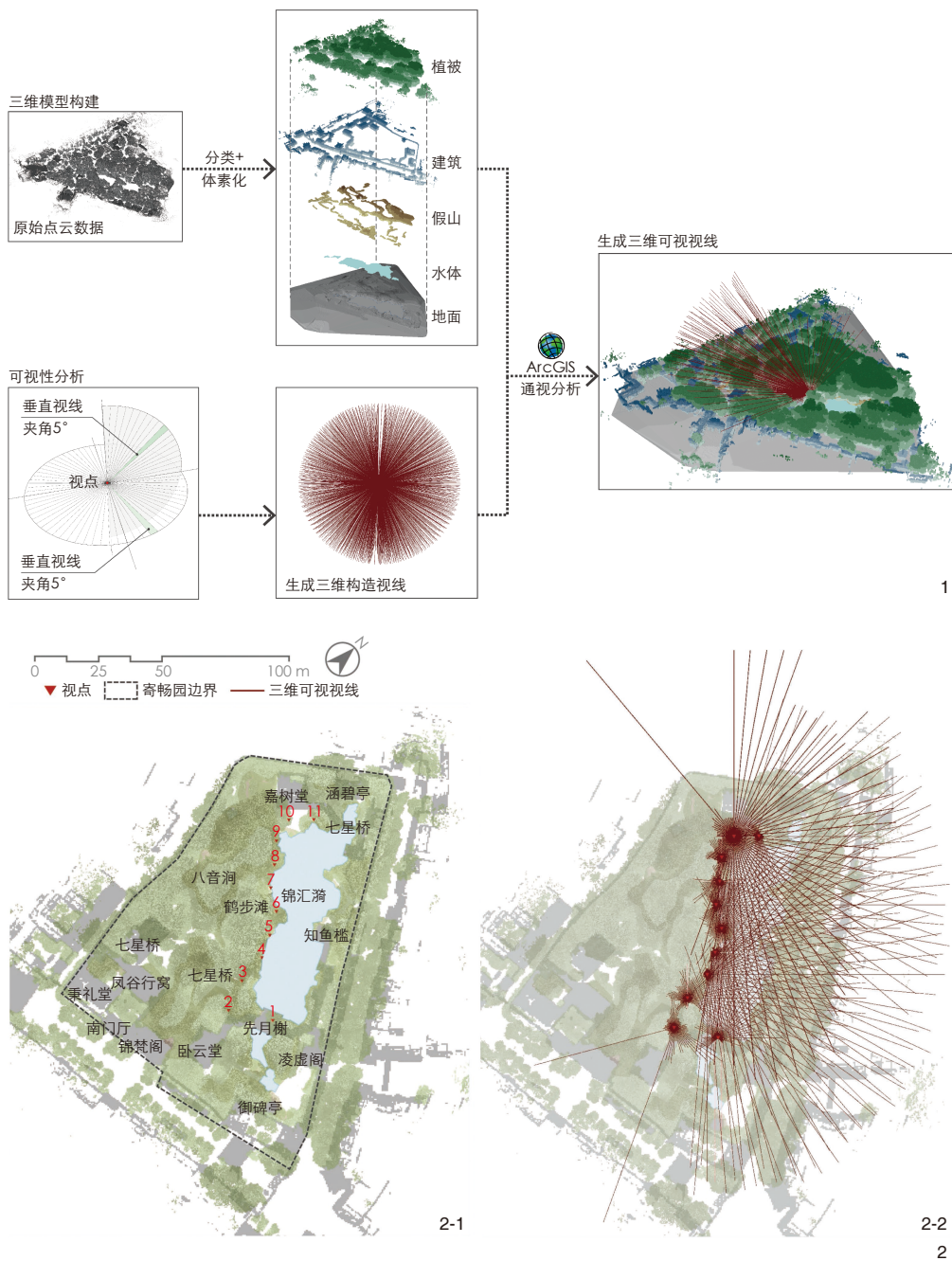
式中, FR_i 为某一视点的景物视野占比, N_i 为景物 i 体素模型的可视视线数量, N_v 为所有构造视线的数量。

2 无锡寄畅园视觉空间分析

本研究选取无锡寄畅园作为研究案例,通过构建三维数字模型模拟寄畅园的景观空间,并选取寄畅园西侧的滨水步道为研究对象,利用本研究提出的视觉空间量化方法分析游览过程中的视觉空间体验。本次扫描所得的初始数据大小为31.8 GB,共包含三维点约 8.83×10^9 个。通过Realworks点云处理软件自动分类与人工分类方法对初始数据进行分类,将数据主要分为植被、建筑、假山、水体、地面、其他等,其中其他(如垃圾桶、交通工具、行人)作为干扰数据不纳入后续分析。

2.1 体素模型构建

1)建筑、植被及假山的体素建模。综合考虑计算效率与分析精度,本研究采用的体素边长为500 mm。本研究曾尝试采用300 mm、400 mm边长的体素模型进行运算,但因单个视点运算量较大(300 mm、400 mm、500 mm边长体素模型的运算时长分别为112.2 h、73.6 h、24.5 h),且相同视点下运算结果差异较小



1 寄畅园三维模型构建及可视性分析流程

Construction of a three-dimensional model and visibility analysis process for Jichang Garden

2 寄畅园三维模型平面、视点分布及可视视线

Master plan, viewpoint distribution, and visible lines of sight of the three-dimensional model for Jichang Garden

2-1 寄畅园平面及视点分布

Master plan and viewpoint distribution of Jichang Garden

2-2 各视点对应的三维可视视线

Three-dimensional visible lines of sight corresponding to each viewpoint

(可视视线误差在 3%~4%)，最终选择边长为 500 mm 的体素模型进行全视点运算。虽然该体素精度难以准确呈现植物枝叶的具体形态及半透明性，但相较于以往使用柱体或筒

化植物模型进行视觉分析的方法^[32]，本研究使用的体素模型可以较为真实地表现出植被的整体形态。由此本研究构建了寄畅园园林空间的三维体素模型(图 1)，包含假山体素

25 725 个，植被体素 399 559 个，建筑体素 113 529 个，共计 538 813 个体素。

2) 地面 DEM。因研究区域不存在明显的高程变化，本研究利用 Realworks 软件以 10 m 为地面点云数据的平均间距进行抽稀工作。将抽稀后的点云数据作为高程点导入 ArcGIS 之中构建 DEM。

3) 构建寄畅园三维模型。综合园内的水体数据，拟合体素模型与 DEM，完成寄畅园的三维数字模型构建。

2.2 通视分析与视觉空间分析

选取寄畅园内西侧的滨水步道作为研究对象，以 10 m 为间距提取观察视点，每个视点高度为 1.6 m，共生成 11 个三维视点(图 2-1)。以三维视点为中心，构建水平范围 360°、垂直范围 180°、水平及垂直夹角均为 5°的三维构造视线(图 1)，来模拟人眼及头部活动状态下的可视球体范围，每个视点包含 2 089 条三维构造视线。将这些三维构造视线输入 ArcGIS 三维分析模块的通视分析中，同时选取阻碍物模型及 DEM 作为基础，计算可视性。输出视线包含空间位置、线段长度、水平及垂直夹角等信息。随后，在通视分析结果的基础上，利用本研究提出的 3 项量化指标，分别对 11 个三维视点进行视觉空间分析。

3 视觉空间分析结果

3.1 三维可视性分析

从总体分析结果(图 2-2)来看，在游览滨水步道时，视线主要向水面方向展开，步道西侧基本被植被遮挡，视线无法穿透。将 11 个视点的可视性分析结果进行拆分，发现视点 1、5、6、7、10 具有比较开阔的视野，部分视线长度达 100 m(图 3)。

3.2 视觉空间指标

结合 11 个视点的视觉空间指标计算结果，发现视点 1 的三维可视性最高，位于先月榭观水平台，而视点 2 的三维可视性最低。视点 10 的视野舒展度最高，位于嘉树堂南侧广场，而视点 11 的视野舒展度最低。除视点 1(建筑为主)与视点 10(地面为主)以外，其他视点景物视野占比最高的都是植物元素；此外，在观水视野方面，视点 5 的水面占比

最高，为 18.334%（图 3，表 1）。

4 讨论

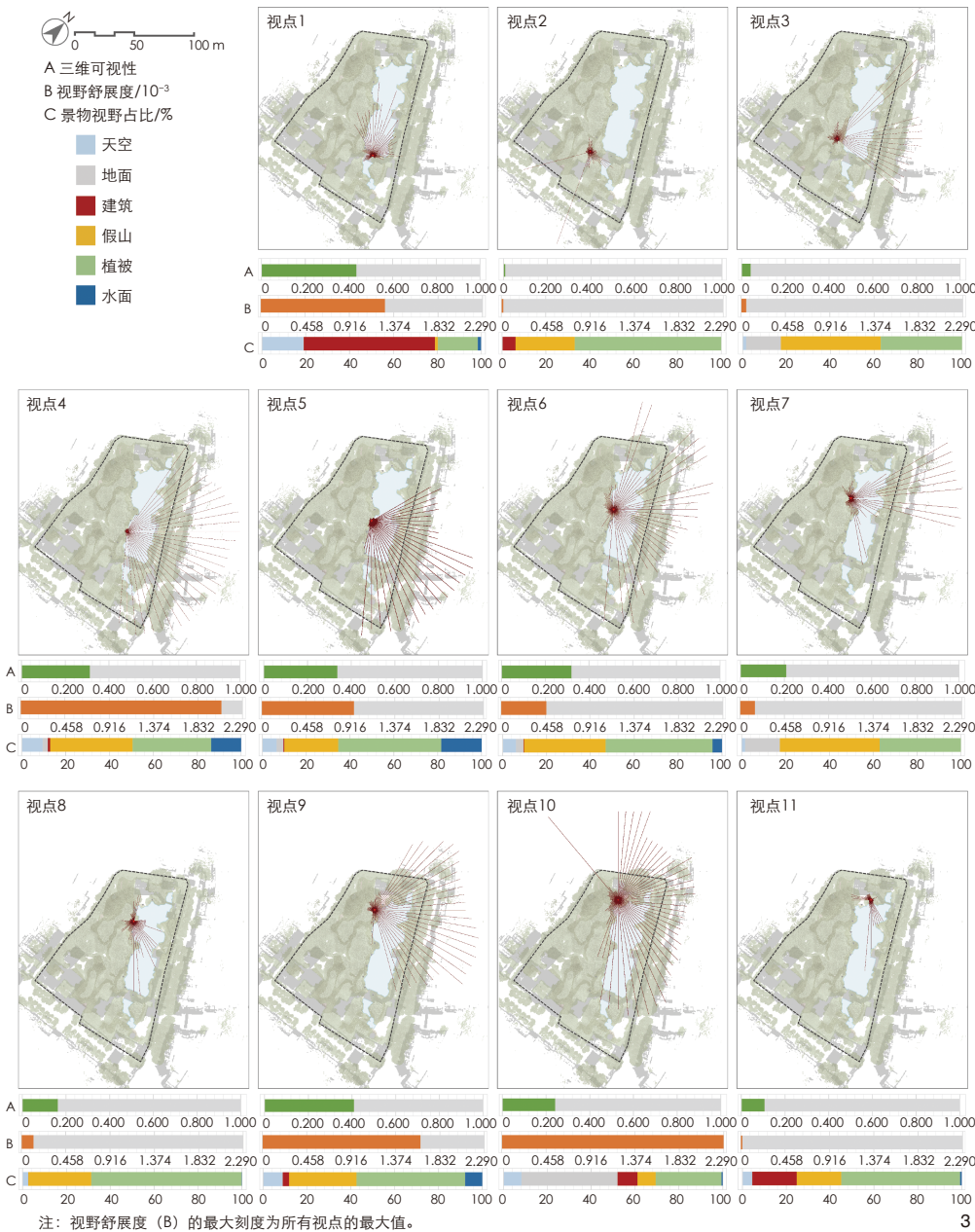
4.1 基于视觉空间指标的视觉特征解读

从三维可视性数据来看，视点 4~9 的数值基本大于 0.250，最大值甚至达到了 0.390；而从视野的组成要素来看，这些视野内基本都出现了天空、水面。由此可见，园内可以观赏开敞水面的视点对应的空间开敞度相对较高。然而却有 2 个例外：视点 7、8 的三维可视性较小，视点 8 的视野舒展度甚至低于 0.130，基本不能看到水面和天空；视点 7 虽能看到天空，但水面也基本被遮挡。造成此现象的原因是在视点 7、8 附近，水面被植物和假山遮挡。此外，视点 10（从嘉树堂南侧望向水面的视点）是寄畅园中著名的视点之一（借惠山景），其三维可视性的数据却小于视点 4 等视点，这是因为视点 10 位于水面的短边，观湖的视角宽度小于视点 4 等位于长边的视点。而视点 1（从先月榭内望向水面的视点）作为寄畅园中另一著名的观湖视点，其可视范围甚至更小。通过观察视点 1 的视野组成要素，可以发现先月榭的屋顶限制了其可视范围的延伸。此外，视点 2、3、11 的可视性数据较小，是因为视点 2、3 位于被植物环绕的小路之上；视点 11 号则位于七星桥前，正好被桥两侧的树木遮挡了视线，在分析结果中表现为植被的视野占比较高。

综上所述可以看出，三维可视性可用于识别园林可视空间尺度，视野占比可用于分析可视空间尺度的成因，在加入视野舒展度指标后，则能进一步识别传统园林中视觉空间的形态特征。如视点 1 的三维可视性及视野舒展度较高，但可视性结果表明该视点的可视范围有限：一方面，屋顶限制了该视点上方的可视范围，但立面通透的水榭又保证了水平方向的可视空间继续向外舒展；另一方面，由于周围景观要素及地面的限制，虽然视线长度的最大值仅 62 m，但此处的可观赏景物类型较为丰富。

4.2 基于视觉空间指标的园路视觉空间研究

由 11 个沿路视点及其对应的可视空间特征可以看出，在这条不长的路径中，造园者



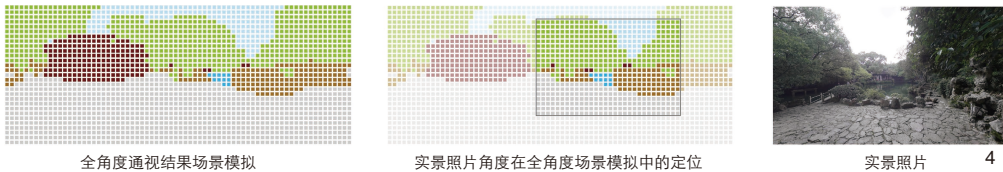
3 各视点可视性分析结果及视觉空间指标计算结果
Visibility analysis results of each viewpoint and calculation results of visual space indicators

安排了多次视觉空间转换。而且，本研究中沿路视点的采样密度有限，还有很多更细致的视觉空间转换未被揭示，如位于视点 10 与视点 11 之间一处开敞的观水空间（嘉树堂前）。从景观序列角度来看，游人从先月榭出发，经由鹤步潭到达嘉树堂的过程中，至少经历了以下空间感知过程。1）先月榭—林间小径（九狮台附近）：游人从先月榭建筑内的观湖空间步行来到小径上被群树环绕的郁闭空间。2）林间小径—鹤步潭：游人从密

闭度较高的环境突然转折到开敞度较高的观水空间，这种观水体验的峰值出现在视点 5 附近（鹤步潭处，一处三面环水的观水空间）。3）鹤步潭—滨水小径（八音涧附近）：游人的体验由开敞的观水空间过渡到观湖视野被植物等遮挡的郁闭空间，进一步丰富了观水体验，避免游人因一直处于相似的空间环境中而产生审美疲劳。4）滨水小路—嘉树堂前：游人的体验由封闭的、植物主导的空间逐步转换成嘉树堂前开敞的观湖空间（锦

表1 各视点视觉空间指标计算结果
Tab. 1 Calculation results of visual space indicators for each viewpoint

视点	三维可视性	舒展度/ 10^{-3}	景物视野占比/%					
			植被	建筑	假山	水体	地面	天空
1	0.434	1.284	18.238	59.837	1.340	1.485	0.144	18.956
2	0.008	0.022	66.778	5.888	26.999	0	0.144	0.191
3	0.042	0.055	37.099	0	45.428	0	15.845	1.628
4	0.313	2.074	35.902	1.101	37.482	13.595	2.346	9.574
5	0.336	0.954	47.008	0.431	24.557	18.334	3.112	6.558
6	0.320	0.469	48.684	0.239	37.195	4.356	3.447	6.079
7	0.209	0.156	68.550	0.096	28.674	0.095	0	2.585
8	0.163	0.126	50.311	0.144	41.599	3.733	0	4.213
9	0.409	1.633	49.497	2.920	30.732	7.851	0	9.000
10	0.242	2.290	30.062	9.095	8.234	0.574	43.801	8.234
11	0.107	0.018	54.189	20.249	20.345	0.717	0	4.500
平均值	0.235	0.631	46.029	9.091	27.508	4.609	6.258	6.502
最小值	0.008	0.018	18.238	0.000	1.340	0	0	0.191
最大值	0.434	2.074	68.550	59.837	45.428	18.334	43.801	18.956



4 寄畅园体素模型场景模拟与实景照片
Voxel model scene simulation and real photo of Jichang Garden

汇漪西侧的滨水步道感知空间序列的终点)。除了关于空间序列的分析外,本研究提出的3个视觉空间指标还能用于评估道路的连续度、指向性等视觉空间特征,限于篇幅不作展开。

4.3 研究局限性

相较于传统空间分析方法而言,基于点云技术,针对中国传统园林视觉分析的精度与准确性已经提升了很多,但是此类研究的局限性依旧存在。首先,为了提高计算效率,对数字模型的精度有所牺牲。边长为500 mm的体素虽然已经可以体现植物、建筑、假山等难以准确建模的景物要素的形态,但颗粒度较大使计算结果存在一定误差。以位于嘉树堂南侧小广场的视点10为例,分析该视点处的实景照片,发现照片的水面占比约为1.911%。利用通视分析结果的可视视线端点模拟视点10的全角度场景,并根据拍摄视角筛选出与实景照片相匹配的模拟画面,发现在30点素×20点素的画幅中水面占11个点位,

占比为1.833%(图4)。尽管两者的计算结果存在一定差距,但误差较小,结合笔者相关研究^[14],景物视野占比的量化分析结果基本可靠。

针对中国传统园林视觉空间的研究可细分为3个层次。第一层次:对园林物理环境特征进行的“物质环境分析”。第二层次:关于人们在园林空间内的生理性视觉感知反应,即“视觉感知分析”。第三层次:探讨人们在园林中的视觉感知与园林文化元素(如文字描述、典故等)相互影响的“景观意境分析”。本研究主要聚焦于第一层次,即园林的客观物理空间,因此无法直接探讨第二层次中人的视觉感知体验,也不涉及第三层次中将视觉感知与文化要素相结合的分析。此外,针对本研究提出的分析方法也存在一定局限性,因体素模型颗粒度较大,不能还原植物枝叶的形态及间隙,导致在研究中不能进一步探索植物的半透明性、具体形

态对分析结果的影响。

5 总结与展望

本研究基于LiDAR点云技术,针对中国传统园林建立了一个包括数字建模、三维空间通视分析、视觉空间量化指标的方法体系。以寄畅园为例,对园内锦汇漪西侧滨水步道上的11个三维视点进行了视觉分析,在此基础上对该步道的空间感知序列进行了探究。本研究进一步证实了点云技术在中国传统园林视觉空间分析中的潜力,基于该技术可以较为精准地解析传统园林空间特征,并对分析结果进行直观表达。本研究提出的视觉分析方法与视觉量化指标可用于解析其他传统园林的视觉空间特征,通过横向比较不同传统园林视觉空间的共性与特性,可为当代风景园林空间营建提供参考,有助于对传统园林的传承与发展。本研究提出的方法还可拓展至现代园林空间的分析研究中,用以探索园林空间特征与视觉感知的关联,为当代人居环境建设提供参考。

参考文献 (References):
[1] BELL S. Landscape: Pattern, Perception and Process[M]. London: Routledge, 2012.
[2] NIJHUIS S, VAN LAMMEREN R, VAN DER HOEVEN F. Exploring the Visual Landscape: Advances in

Physiognomic Landscape Research in the Netherlands[M]. Amsterdam: IOS Press, 2011.

[3] 胡晓宇.中国江南私家园林与英国自然风景式园林风格比较初探[D].重庆: 重庆大学, 2007.

HU X Y. A Comparative Study on Gardening Style Between Chinese Private Garden and English Natural Landscaped Garden[D]. Chongqing: Chongqing University, 2007.

[4] 金鼎.中国古典园林空间构形及可理解度之量化分析[D].天津: 天津大学, 2009.

JIN D. Quantitative Analysis of Space Configuration and Intelligibility in Chinese Traditional Garden: Southern Private Garden for Example[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009.

[5] 魏胜利, 刘海燕.拙政园造园要素空间特征的量化研究[J].中国园林, 2015, 31 (7): 78-82.

WEI S L, LIU H Y. Quantitative Study of Spatial Characteristics of Elements in Landscape Architecture of the Humble Administrator's Garden[J]. Chinese Landscape Architecture, 2015, 31 (7): 78-82.

[6] 乐志, 梁晓娜, 范榕.苏州古典园林中的视觉质量评价分析[J].中国园林, 2017, 33 (1): 113-118.

YUE Z, LIANG X N, FAN R. The Application of Landscape Visual Quality Assessment Theory in Classical Gardens of Suzhou[J]. Chinese Landscape Architecture, 2017, 33 (1): 113-118.

[7] 张甜甜, 刘滨谊, 朱喆, 等.网师园“步移景异”时空感知生成机理[J].中国园林, 2023, 39 (11): 22-28.

ZHANG T T, LIU B Y, ZHU Z, et al. The Spatio-Temporal Perception Formation Mechanism of the “View Changes with Step Movements” in the Master of the Nets Garden[J]. Chinese Landscape Architecture, 2023, 39 (11): 22-28.

[8] 顾至欣, 张青萍.近 20 年国内苏州古典园林研究现状及趋势: 基于 CNKI 的文献计量分析[J].中国园林, 2018, 34 (12): 73-77.

GU Z X, ZHANG Q P. Research Status and Future Trends of Domestic Studies on Suzhou Classical Gardens in the Past Two Decades: Bibliometric Analysis Based on CNKI[J]. Chinese Landscape Architecture, 2018, 34 (12): 73-77.

[9] LU L, LIU M. Exploring a Spatial-Experiential Structure Within the Chinese Literati Garden: The Master of the Nets Garden as a Case Study[J]. Frontiers of Architectural Research, 2023, 12 (5): 923-946.

[10] URECH P R W, DISSEGNA M A, GIROT C, et al. Point Cloud Modeling as a Bridge Between Landscape Design and Planning[J]. Landscape and Urban Planning, 2020, 203: 103903.

[11] VUKOMANOVIC J, SINGH K K, PETRASOVA A, et al. Not Seeing the Forest for the Trees: Modeling Exurban Viewscapes with LiDAR[J]. Landscape and Urban Planning, 2018, 170: 169-176.

[12] ZHANG G T, VERBREE E, WANG X J. An Approach to Map Visibility in the Built Environment From Airborne LiDAR Point Clouds[J]. IEEE Access, 2021, 9: 44150-44161.

[13] ZHAO Y, WU B, WU J P, et al. Mapping 3D Visibility in an Urban Street Environment from Mobile LiDAR Point Clouds[J]. GIScience & Remote Sensing, 2020, 57 (6): 797-812.

[14] 成实, 张冠亭, 张潇涵, 等.基于 LiDAR 点云的景观空间“绿视率”量化分析方法研究[J].中国园林, 2022, 38 (2): 12-19.

CHENG S, ZHANG G T, ZHANG X H, et al. Research on the Quantitative Analysis Method of “Green Viewing Ratio” of

Landscape Spatial Form Based on Three-dimensional LiDAR Point Cloud Data[J]. Chinese Landscape Architecture, 2022, 38 (2): 12-19.

[15] DAI L Y, ZHENG C L, DONG Z K, et al. Analyzing the Correlation Between Visual Space and Residents' Psychology in Wuhan, China Using Street-View Images and Deep-Learning Technique[J]. City and Environment Interactions, 2021, 11: 100069.

[16] 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.

YANG C, HAN F. Digital Heritage Landscape: Research on Spatial Character of the Grand Rockery of Yuyuan Garden in Shanghai Based on 3D Point Cloud Technologies[J]. Chinese Landscape Architecture, 2018, 34 (11): 20-24.

[17] 张青萍, 梁慧琳, 李卫正, 等.数字化测绘技术在私家园林中的应用研究[J].南京林业大学学报(自然科学版), 2018, 42 (1): 1-6.

ZHANG Q P, LIANG H L, LI W Z, et al. Research of the Application of Digital Survey Techniques in Private Garden[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2018, 42 (1): 1-6.

[18] 吴杭彬, 韦朝旭, 杨晨, 等.基于激光点云的园林假山遗产特征定量化评价[J].园林, 2022, 39 (10): 28-35.

WU H B, WEI Z X, YANG C, et al. Quantitative Evaluation of Garden Rockery Heritage Characteristics Based on Laser Point Cloud[J]. Landscape Architecture Academic Journal, 2022, 39 (10): 28-35.

[19] PENG Y Y, NIJHUIS S, ZHANG G T, et al. Towards a Practical Method for Voxel-Based Visibility Analysis with Point Cloud Data for Landscape Architects: Jichang Garden (Wuxi, China) as an Example[J]. Journal of Digital Landscape Architecture, 2022, 7 (7): 682-691.

[20] PENG Y Y, ZHANG G T, NIJHUIS S, et al. Towards a Framework for Point-Cloud-Based Visual Analysis of Historic Gardens: Jichang Garden as a Case Study[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2024, 91: 128159.

[21] ALSADIK B, GERKE M, VOSELMAN G. Visibility Analysis of Point Cloud in Close Range Photogrammetry[C]// ISPRS Technical Commission. ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Riva del Garda: ISPRS, 2014: 9-16.

[22] LIU M, NIJHUIS S. Talking About Landscape Spaces. Towards a Spatial-Visual Landscape Design Vocabulary[J]. The Design Journal, 2022, 25 (2): 263-281.

[23] SHACH-PINSKY D, FISHER-GEWIRTZMAN D, BURT M. Visual Exposure and Visual Openness: An Integrated Approach and Comparative Evaluation[J]. Journal of Urban Design, 2011, 16 (2): 233-256.

[24] STAMPS A E. Isovists, Enclosure, and Permeability Theory[J]. Environment and Planning B-Planning & Design, 2005, 32 (5): 735-762.

[25] TVEIT M S. Indicators of Visual Scale as Predictors of Landscape Preference; a Comparison Between Groups[J]. Journal of Environmental Management, 2009, 90 (9): 2882-2888.

[26] WYLY E K. Continuity and Change in the Restless Urban Landscape[J]. Economic Geography, 1999, 75 (4): 309-338.

[27] LYNCH K. The Image of the City[M]. Cambridge: MIT Press, 1960.

[28] THIEL P. A Sequence-Experience Notation: For

Architectural and Urban Spaces[J]. The Town Planning Review, 1961, 32 (1): 33-52.

[29] ZHANG G C, YANG J, WU G W, et al. Exploring the Interactive Influence on Landscape Preference from Multiple Visual Attributes: Openness, Richness, Order, and Depth[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2021, 65: 127363.

[30] ODE Å, HAGERHALL C M, SANG N. Analysing Visual Landscape Complexity: Theory and Application[J]. Landscape Research, 2010, 35 (1): 111-131.

[31] ANGILERI V, TOCCOLINI A. The Assessment of Visual Quality as a Tool for the Conservation of Rural Landscape Diversity[J]. Landscape and Urban Planning, 1993, 24 (1-4): 105-112.

[32] NIJHUIS S. GIS-Based Landscape Design Research: Stourhead Landscape Garden as a Case Study[J]. A+BE | Architecture And The Built Environment, 2015 (13): 1-338.

图表来源(Sources of Figures and Table):

文中图表均由作者绘制, 其中图 4 的实景照片来源于 720 云官网 (www.720yun.com)。

(编辑 / 边紫琳)

作者简介:

张冠亭 / 女 / 壮族 / 博士 / 南京工业大学建筑学院讲师 / 研究方向为数字景观、视觉景观、景观空间量化分析、风景园林规划与设计

彭予洋 / 男 / 硕士 / 代尔夫特理工大学建筑与建成环境学院助理研究员 / 研究方向为视觉景观、数字景观、遗产景观、风景园林规划与设计

通信作者邮箱: Y.Peng-1@tudelft.nl

(荷) 史蒂芬·奈豪斯 / 男 / 博士 / 代尔夫特理工大学建筑与建成环境学院正教授、景观部门负责人 / 研究方向为以景观为基础的城市主义、区域景观设计、可持续城市发展、基于过程的景观设计、弹性海岸景观、遗产景观、数字景观和视觉景观

ZHANG G T, PENG Y Y, NIJHUIS S. Method for Quantitative Analysis of Visual Space of Chinese Traditional Gardens Based on LiDAR Point Cloud: A Case Study of Jichang Garden[J]. Landscape Architecture, 2024, 31(7): 108-114. DOI: 10.3724/j.fjyl.202401070015.

Method for Quantitative Analysis of Visual Space of Chinese Traditional Gardens Based on LiDAR Point Cloud: A Case Study of Jichang Garden

ZHANG Guanting, PENG Yuyang*, (NLD) Steffen Nijhuis

Abstract:

[Objective] Human perception of landscape and environment is primarily through visual senses, making visual landscape research a central theme in landscape architecture research. Conducting a visual analysis of the spatial characteristics of traditional Chinese gardens and exploring their visual features can provide valuable guidance for inheriting the essence of spatial design. In recent years, many scholars have employed quantitative analytical methods to identify the visual space of traditional gardens. However, few of these studies have used detailed models to analyze the spatial features of traditional garden spaces. Compared to traditional digital models, point cloud models collected through LiDAR (light detection and ranging) offer more detailed spatial information for visual landscape research. Therefore, this research aims to take Jichang Garden in Wuxi as an example to explore the possibilities and applications of in-depth visual and spatial analysis of traditional Chinese gardens using point cloud technology. This aim can be further broken into several components: 1) Establishing analytical methods and selecting analysis indicators; 2) applying these methods and indicators to analyze the visual space of Jichang Garden; 3) uncovering the characteristics and features of traditional Chinese gardens through the interpretation of analysis results.

[Method] This research establishes a set of methods for quantifying the analysis of visual space using point cloud data, including three main steps. 1) Establishment of a model based on point cloud for calculating the analysis results of visual space. In detail, this research applies a voxel-based method to build multidimensional digital models for buildings, vegetation, and rockery, and build a digital elevation model (DEM) based on the point cloud data on the ground. Then, the aforesaid two kinds of models are integrated with water surface to finalize the modeling process. 2) Establishment of a visual analysis method (line of sight method) based on the three-dimensional digital model for obtaining visual space information. 3) Proposal of indicators for evaluating visual landscape utilizing the visual space information obtained, including "3D visibility", "visual spread" and "feature ratio of visual field" indicators. A total of 11 viewpoints (viewpoints 1, 2, 3 ... 11) on the west side of Jinhuiyi Pond are analyzed using the above methods.

[Results] This research's main findings consist of three parts: 1) 3D visibility calculation results. From the visibility analysis results of 11 viewpoints, it is evident that viewpoints 1, 5, 6, 7, and 10 have a relatively broad visual field, with some line of sight reaching a length of 100 meters. 2) Evaluation results of visual space indicators. The viewpoint with the highest 3D visibility is labeled as viewpoint 1, located at the Xianyuexie water viewing platform, while the one with the minimum 3D visibility is labeled as viewpoint 2. The viewpoint with the

highest "visual spread" is viewpoint 10, situated in the plaza at the south of the Jiashutang building, while the one with the minimum "visual spread" is viewpoint 11. Except for viewpoint 1 (dominated by buildings) and viewpoint 10 (dominated by the ground), the highest "feature ratio of visual field" is occupied by vegetation. 3) Interpretation of the calculation results. Firstly, the research interprets the reasons for forming a scenic view from a single viewpoint. "3D visibility" can be used to identify the scale of the visual field in gardens. At the same time, the "feature ratio of visual field" can be employed to analyze the factors contributing to the scale of visual space. Moreover, incorporating the "visual spread" indicator further makes it possible to identify the morphological features of visual space in traditional gardens. Secondly, the research explores route-based visual space transitions. From the perspective of landscape sequence, visitors, starting from the Xianyuexie water viewing platform and passing through Hebutan (a small pond) to reach the Jiashutang building, undergo at least the following spatial perception processes. 1) Xianyuexie – woody path (near Jiushitai): Visitors transition from the lake viewing space beside the Xianyuexie building to the enclosed space surrounded by a group of trees along the path. 2) Woody path – Hebutan: Visitors experience a shift from a relatively enclosed environment to a more open water viewing space. The peak of this water viewing experience occurs near viewpoint 5 (Hebutan), a space with water on three sides. 3) Hebutan – waterside path (near Bayinjian): Visitors' experience transitions from an open water viewing space to a more enclosed space where the view of the lake is obstructed by plants, enriching the water viewing experience and preventing aesthetic fatigue resulting from continuous exposure to similar spatial environments. 4) Waterside path – Jiashutang: Visitors' experience evolves from a closed, plant-dominated space to a gradually more open lake viewing space in front of the Jiashutang building, serving as the endpoint of the entire perceptual space sequence on the west side of Jinhuiyi Pond.

[Conclusion] In summary, the conclusions of this research are as follows: Firstly, point cloud technology has a specific feasibility for analyzing the spatial and visual characteristics of traditional Chinese gardens, and its high accuracy and precision make it suitable for handling the complex and varied spatial conditions of traditional Chinese gardens. Secondly, the three visual space indicators proposed in this research have a solid capability for explaining the characteristics of garden space.

Keywords: Chinese traditional garden; LiDAR point cloud; visual space perception; visual landscape characteristic; visual quantification indicator

Authors:

ZHANG Guanting (Zhuang), Ph.D., is a lecturer in the College of Architecture, Nanjing Tech University. Her research focuses on digital landscape, visual landscape, quantitative analysis of landscape spaces, and landscape design and planning.

PENG Yuyang, Master, is an assistant research fellow in the Faculty of Architecture and the Built Environment, Delft University of Technology. His research focuses on digital landscape, visual landscape, heritage landscape, and landscape design and planning. Corresponding author Email: Y.Peng-1@tudelft.nl

(NLD) Steffen Nijhuis, Ph.D., is a full professor in the Faculty of Architecture and the Built Environment, and leader of Landscape Architecture Section, Delft University of Technology. His research focuses on landscape-based urbanism, regional landscape design, sustainable urban development, design with natural processes, resilient coastal landscape, heritage landscape, digital landscape, and visual landscape.