

数字文旅专业系列教材 · 教学课件

VR/AR 沉浸式文旅场景设计

第 4 章 场景构建与数字重建技术

授课对象：安顺学院旅游管理学院 · 旅游管理专业本科生

主讲：祝刚

本章导览

- 4.1 三维建模方法体系
- 4.2 摄影测量与结构光扫描
- 4.3 多视角立体重建算法
- 4.4 点云处理与多分辨率融合
- 4.5 文化遗产数字化采集 workflow
- 4.6 案例分析
- 4.7 国际比较与经验借鉴
- 4.8 实践案例深度分析
- 4.9 理论深化与前沿探讨
- 4.10 三维重建的质量控制体系
- 4.11 数字资产管理与知识图谱
- 4.12 文化遗产数字化采集的标准化流程
- 4.13 三维重建中的机器学习应用
- 4.14 文化遗产数字化的法律框架

- 掌握开篇的核心概念与方法
- 掌握 4.1 三维建模方法体系的核心概念与方法
- 掌握 4.2 摄影测量与结构光扫描的核心概念与方法
- 掌握 4.3 多视角立体重建算法的核心概念与方法
- 能够结合文旅实际案例分析本章知识的应用场景

01

开篇

- 1. 识记：掌握三维建模、摄影测量、结构光扫描、点云处理等数字重建技术的基本原理。
- 2. 理解：理解多分辨率融合策略在大场景文化遗产数字化中的应用逻辑。
- 3. 应用：能够为特定文化遗产选择合适的数字重建技术路线。
- 4. 分析：比较不同三维重建方法在精度、效率和成本方面的权衡。
- 5. 评价：评估数字重建结果的保真度及其对文化真实性的影响。
- 6. 创造：为一个文化遗产遗址设计完整的数字化采集 workflow 方案。
- 导入案例：丝路文化的多视角立体重建
- 宁夏固原是丝绸之路上的重要节点，拥有丰富的历史遗迹和文物。李兆歆等学者面向丝路文化的虚拟展示与数字化，提出并实现了一种面向高清图像的多视角立体三维重建算法 [6]。

- 该算法包括法线估计、深度图计算和点云融合三个核心步骤，成功还原了丝路文化中重要节点固原的有关历史遗迹、文物和事件。
- 这一案例揭示了文化遗产数字重建面临的核心挑战：如何在有限的计算资源下，实现足够高精度的三维模型以支撑沉浸式体验。

02

4.1 三维建模方法体系

4.1.1 手工建模

- 手工建模是最传统的三维建模方式，建模师使用 3ds Max、Maya、Blender 等专业软件，通过多边形建模、曲面建模等技术手工创建三维模型。
- 在文旅场景中，手工建模适用于历史场景的想象性复原——当实物已经不存在，仅有文献记载和艺术想象作为依据时，手工建模是唯一可行的方案。
- 手工建模的优势在于创作自由度高，可以构建任何想象中的场景。但缺点同样明显：制作周期长、人力成本高、模型精度依赖建模师技能。
- 闻婧和张乃中在研究大连东关街 VR 复原系统时，采用多元化建模技术结合 Unity3D 引擎，
- 通过 LOD 分级和 Light Probes 光照探头解决了大场景虚拟仿真中有限系统资源与模型精细程度之间的矛盾 [8]。

4.1.2 程序化建模

- 程序化建模（Procedural Modeling）通过算法自动生成三维模型，适用于具有规律性结构的场景。例如，古城墙的砖纹、街道的铺装、建筑群的批量生成等都可以通过程序化建模高效完成。
- Houdini 和 CityEngine 是程序化建模的代表性工具。
- 在文旅场景中，程序化建模的优势在于能够快速生成大规模场景的 " 骨架 "，再由手工建模进行细节修饰。这种混合工作流程兼顾了效率和质量。

4.1.3 参数化建模

- 参数化建模通过定义参数和约束关系来驱动模型生成，修改参数即可更新模型。BIM（Building Information Modeling）技术在文化遗产建筑的保护和修复中得到了广泛应用。
- Liu 等学者研究了 BIM 驱动的可持续文化遗产旅游 [3]，展示了参数化建模在遗产管理中的价值。

03

4.2 摄影测量与结构光扫描

4.2.1 摄影测量原理

- 摄影测量（Photogrammetry）是通过分析多张照片来重建物体三维几何的技术。
- 其核心原理是三角测量——从不同视角拍摄同一物体的多张照片，通过匹配照片间的特征点，计算出特征点在三维空间中的位置。
- Dhanda 等学者提出了一套使用运动恢复结构（Structure from Motion, SfM）摄影测量在 VR 中重建文化遗产环境的完整 workflow [4]。
- 该 workflow 包括：照片采集（覆盖物体所有表面，重叠率 $\geq 70\%$ ）、特征点提取与匹配、稀疏点云生成、稠密点云重建、网格生成和纹理映射六个步骤。
- Koutsoudis 等学者在重建希腊 Xanthi 老城的实践中，探索了低预算摄影测量方案 [1]。
- 他们证明，使用消费级数码相机和开源软件（如 VisualSFM、MeshLab）即可实现文化遗产的数字化重建，大幅降低了技术门槛。

4.2.2 结构光扫描

- 结构光扫描通过投射已知图案（如条纹、网格）到物体表面，通过分析图案的变形来计算深度信息。与摄影测量相比，结构光扫描的精度更高，但对环境光照条件要求严格，且难以处理户外大尺度物体。
- 在文化遗产数字化中，结构光扫描常用于小型文物（如雕塑、器物）的高精度数字化。
- 朱黎等学者在唐崖土司城遗址的虚拟展示中，将结构光扫描获取的文物精细模型与基于点云和高清影像数据的遗址模型进行融合展示 [7]。

4.2.3 激光扫描

- 激光扫描（LiDAR）通过测量激光脉冲的飞行时间来计算距离，能够快速获取大范围场景的三维点云数据。在文化遗产遗址的数字化中，激光扫描是获取大尺度场景几何数据的首选技术。
- Sormann 等学者提出了文化遗产快速详细三维重建的方法 [2]，将激光扫描的效率与摄影测量的纹理质量相结合，形成了高效的混合重建流程。

04

4.3 多视角立体重建算法

4.3.1 MVS 算法原理

- 多视角立体重建（Multi-View Stereo, MVS）是摄影测量的核心算法环节。MVS 算法从一组标定好的照片中重建场景的稠密三维模型。
- 李兆歆等学者在丝路文化虚拟体验中实现的 MVS 算法包括以下关键步骤 [6]：
- 特征匹配：在不同视角的照片间提取和匹配特征点（如 SIFT、ORB 特征）。
- 深度图计算：对每张照片，计算每个像素的深度值，生成深度图。
- 深度图融合：将多张照片的深度图融合为统一的稠密点云。
- 网格生成：将点云转换为三角网格模型。
- 纹理映射：将原始照片的纹理信息映射到网格模型上。

4.3.2 深度学习增强的 MVS

- 近年来，深度学习技术被引入 MVS 算法中，显著提升了重建质量。
- 基于深度学习的 MVS 方法（如 MVSNet、PatchmatchNet）利用卷积神经网络学习深度特征匹配，在弱纹理区域和复杂几何结构上的表现优于传统方法。

05

4.4 点云处理与多分辨率融合

4.4.1 点云配准

- 多站扫描获取的点云需要在统一坐标系中对齐，这一过程称为点云配准。常用的配准方法包括 ICP（Iterative Closest Point）算法及其变体。
- 在文化遗产场景中，点云配准的挑战在于大尺度场景中累计误差的控制和多源数据（激光扫描 + 摄影测量）的融合。

4.4.2 多分辨率模型

- 朱黎等学者提出的文化遗产多分辨率三维重建方法 [7]，按照文物虚拟化方法精细重建了石人、石马、牌坊等文物模型，并实现了文物模型和遗址模型的融合展示。
- 多分辨率策略的核心思想是：根据观赏距离动态调整模型细节级别——近距离观察时加载高精度模型，远距离浏览时使用简化模型。这与实时渲染中的 LOD （Level of Detail）技术相呼应。

4.4.3 点云压缩与流式传输

- 高精度文化遗产点云数据量巨大（单件文物可达数 GB），对存储和传输提出了挑战。点云压缩技术通过八叉树分解、投影编码等方法减小数据体积，流式传输技术允许用户在数据未完全下载时即开始浏览。

06

4.5 文化遗产数字化采集 workflow

4.5.1 标准化 workflow 设计

- Rahaman 等学者提出了从照片到 3D 到混合现实的文化遗产可视化和体验完整 workflow [5]。该 workflow 包括五个阶段：
 1. 前期规划：确定数字化目标、选择技术方案、制定采集计划。
 2. 数据采集：现场照片拍摄、激光扫描、环境音频录制等。
 3. 数据处理：三维重建、纹理映射、模型优化、UV 展开。
 4. 体验开发：场景搭建、交互设计、叙事集成、性能优化。
 5. 部署运维：平台发布、用户测试、数据更新、版本迭代。

4.5.2 采集质量评估

- 数字化采集的质量评估应从几何精度、纹理质量、完整性和一致性四个维度进行。几何精度指重建模型与实物之间的尺寸偏差；纹理质量包括分辨率、色彩还原度和无缝程度；完整性指模型覆盖物体表面的程度；
- 一致性指不同部分之间的尺度、色彩和光照的一致程度。

4.5.3 文化遗产数字化的伦理考量

- 文化遗产的数字化采集不仅是技术问题，更涉及伦理考量。Boboc 等学者在 AR 文化遗产应用的十年综述中提醒 [10]，数字化过程中需要尊重文化遗产的文化敏感性，避免不当展示和商业化利用。
- 具体而言，数字化采集应获得相关利益方（如遗产管理机构、原住民社区）的授权，采集数据的使用范围应有明确约定，数字化结果可能涉及知识产权和文化遗产权益的复杂问题。

07

4.6 案例分析

4.6 案例分析

- 案例一：丝路文化虚拟体验中的多视角立体重建
 - 李兆歆等学者实现的丝路文化虚拟体验平台 [6]，通过历史遗迹复原和基于图像的三维重建，还原了丝路文化中重要节点宁夏固原有关的历史遗迹、文物和事件。
 - 该项目的特色在于将 MVS 算法与文化遗产的具体需求相结合，提出了面向高清图像的多视角立体三维重建算法。
- 案例二：唐崖土司城遗址多分辨率三维重建
 - 朱黎等学者将基于点云和高清影像数据的多分辨率三维重建方法应用于世界文化遗产唐崖土司城遗址 [7]。
 - 该项目按照文物虚拟化方法精细重建了石人、石马、牌坊等文物模型，并且实现了文物模型和遗址模型的融合展示。
- 案例三：大连东关街建筑遗迹 VR 复原
 - 闻婧和张乃中基于 Unity3D 引擎设计了大连东关街建筑遗迹 VR 复原系统 [8]。

4.6 案例分析

- 该项目从建筑布局、营造技艺及装饰艺术特征出发，再现东关街文化遗产形态，运用多元化建模、几何优化、LOD 分级、Light Probes 光照探头等关键技术，
- 解决了大场景虚拟仿真中有限系统资源与模型精细程度之间的矛盾。
- 国际比较与经验借鉴
- 欧洲的文化遗产数字化标准
- 欧洲在文化遗产数字化方面建立了较为完善的标准体系。Europeana Data Model（EDM）定义了数字遗产资源的元数据标准，3D-ICONS 项目为三维文化遗产的数字化制定了技术指南。
- 这些标准对中国文化遗产数字化的规范化发展具有参考价值。
- 混合重建流程的国际趋势
- 国际上，激光扫描与摄影测量相结合的混合重建流程已成为文化遗产数字化的主流方案。

4.6 案例分析

- Sormann 等学者的快速详细三维重建方法 [2]、 Dhanda 等学者的 SfM 摄影测量工作流 [4] 以及 Koeva 等学者的球面全景与地图集成方法 [4]，都体现了混合重建的技术趋势。
- 理论深化与前沿探讨
- NeRF 在文化遗产重建中的应用前景
- 神经辐射场（Neural Radiance Fields, NeRF）技术通过神经网络隐式表示场景的三维结构和外观，能够从少量照片重建出高质量的 3D 场景。
- NeRF 在文化遗产重建中的潜在优势包括：更少的输入照片需求、更好的视图合成质量、更小的存储空间。
- 然而，NeRF 的实时渲染仍是技术挑战，Li 等学者的 RT-NeRF 研究正在探索在移动设备上实现实时神经辐射场渲染的路径 [5]。
- 数字孪生与文化遗产
- 数字孪生（Digital Twin）概念正在从工业领域向文化遗产领域扩展。

4.6 案例分析

- 文化遗产的数字孪生不仅是静态的三维复制品，更是一个实时更新的数字镜像——通过传感器网络监测遗产本体的状态变化，通过 AI 分析预测退化趋势，为遗产保护决策提供数据支持。

08

4.7 国际比较与经验借鉴

4.7.1 欧洲的文化遗产数字化标准体系

- 欧洲在文化遗产数字化方面建立了较为完善的标准体系。3D-ICONS 项目为三维文化遗产的数字化制定了技术指南，涵盖了数据采集格式、精度要求、元数据标准等方面。
- Europeana Data Model （EDM）定义了数字遗产资源的元数据标准，支持跨机构的数据互操作。这些标准对中国文化遗产数字化的规范化发展具有重要参考价值。
- 欧洲标准体系的核心特点是：强调可互操作性——不同机构采集的数字遗产数据可以在统一平台上检索和使用；注重长期保存——数字格式的选择考虑了数十年甚至数百年后的可读性；
- 尊重文化多样性——标准允许不同文化背景的遗产以适合自身特点的方式数字化。

4.7.2 北美的开源文化

- 北美在文化遗产数字化方面有较强的开源传统。Smithsonian Institution 开放了大量文物的高精度三维模型，任何人都可以免费下载和使用。
- Google 的 Open Heritage 项目利用摄影测量技术数字化了世界各地的濒危文化遗产，并在 Google Arts & Culture 平台上公开。
- 这种开放数据文化极大地促进了 VR/AR 文旅应用的创新。

4.7.3 混合重建流程的国际趋势

- 国际上，激光扫描与摄影测量相结合的混合重建流程已成为文化遗产数字化的主流方案。Sormann 等学者的方法 [2] 将激光扫描的几何精度与摄影测量的纹理质量相结合。
- Dhanda 等学者 [4] 的 SfM 工作流则展示了低成本摄影测量方案在 VR 文化遗产重建中的可行性。Koeva 等学者 [4] 的球面全景与地图集成方法提供了另一种轻量级方案。

09

4.8 实践案例深度分析

4.8 实践案例深度分析

- 案例一：丝路文化虚拟体验平台的深度技术分析
- 李兆歆等学者实现的丝路文化虚拟体验平台 [6] 采用了面向高清图像的多视角立体三维重建算法。
- 该算法的技术亮点包括：法线估计采用多尺度局部平面拟合方法，在不同尺度下估计表面法线，兼顾细节精度和计算效率；
- 深度图计算使用改进的 PatchMatch 算法，通过空间传播和视图传播加速深度值优化；点云融合采用基于置信度的加权融合策略，有效处理遮挡和噪声区域。
- 该平台的技术选择反映了一个重要的设计原则：在文化遗产数字化中，技术选择应当服从于文化目标。丝路文化涉及多种类型的文化遗产（建筑遗址、雕塑、壁画、器物），不同类型的遗产需要不同的数字化策略。
- 平台通过多种技术的组合，实现了对丝路文化多元遗产的系统化数字化。
- 案例二：唐崖土司城遗址多分辨率策略的深度分析
- 朱黎等学者在唐崖土司城遗址的虚拟展示中 [7]，提出了基于点云和高清影像数据的多分辨率三维重建方法。

4.8 实践案例深度分析

- 该方法的技术核心是将文物和遗址分为两个精度层级：文物（石人、石马、牌坊等）采用高精度数字化（毫米级），遗址（城墙、道路、地形等）采用中精度数字化（厘米级）。
- 两个层级通过地理坐标系统一配准，实现了 " 宏观可览、微观可察 " 的展示效果。
- 多分辨率策略的理论意义在于：它揭示了文化遗产数字化不是追求单一的最高精度，而是根据使用场景的需求选择合适的精度级别。
- 在沉浸式文旅场景中，游客的观赏距离是动态变化的——远距离浏览时不需要最高精度模型，近距离观察时则需要精细模型。
- 多分辨率策略与实时渲染中的 LOD 技术形成呼应，共同保障了大场景文化遗产 VR 体验的流畅性。
- 案例三：东关街 VR 复原的渲染优化深度分析
- 闻婧和张乃中设计的大连东关街 VR 复原系统 [8] 展示了渲染优化技术在文化遗产场景中的系统性应用。
- 该项目面临的核心挑战是：东关街建筑遗迹场景规模大（涉及多条街道和数百栋建筑）、模型复杂（建筑细节丰富）、而目标平台（PC 级 VR）的计算资源有限。

4.8 实践案例深度分析

- 项目的渲染优化策略包括：多元化建模——根据建筑的重要性和观赏距离选择不同的建模精度；几何优化——通过减少多边形数量和合并网格降低 Draw Call ；
- LOD 分级——为每栋建筑制作 3 个精度级别的模型； Light Probes 光照探头——使用预计算的全局光照替代实时计算，在保持光照质量的同时大幅降低运行时计算量。

10

4.9 理论深化与前沿探讨

4.9.1 NeRF 在文化遗产重建中的应用前景

- 神经辐射场（Neural Radiance Fields, NeRF）技术通过神经网络隐式表示场景的三维结构和外观，能够从少量照片重建出高质量的三维场景。
- NeRF 在文化遗产重建中的潜在优势包括：更少的输入照片需求（相比传统 MVS 需要 100+ 张照片，NeRF 可能只需 20-50 张）、更好的视图合成质量（特别是在反射、透明等难以建模的材质上）、
- 更小的存储空间（神经网络权重代替庞大的网格 + 纹理数据）。
- 然而，NeRF 在文化遗产应用中也面临挑战：训练时间长（单个场景可能需要数小时训练）、实时渲染困难（当前大多数 NeRF 方法无法达到 VR 所需的 90fps）、
- 动态场景支持有限（文化遗产场景中可能有动态元素如游客、植被）。
- Li 等学者的 RT-NeRF 研究 [5] 正在探索在移动设备上实现实时神经辐射场渲染的路径，这一技术突破有望显著降低沉浸式文旅的硬件门槛。

4.9.2 数字孪生与文化遗产管理

- 数字孪生（Digital Twin）概念正在从工业领域向文化遗产领域扩展。
- 文化遗产的数字孪生不仅是静态的三维复制品，更是一个实时更新的数字镜像——通过传感器网络监测遗产本体的状态变化（如温度、湿度、结构变形），通过 AI 分析预测退化趋势，为遗产保护决策提供数据支持。
- 在沉浸式文旅场景中，数字孪生可以实现 " 保护 - 展示 - 管理 " 的一体化：同一套数字模型既用于 VR/AR 体验展示，也用于遗产状态监测和管理决策。
- 这种一体化方案可以降低数据采集和更新的总成本，同时确保展示内容的准确性和时效性。

4.9.3 AI 辅助的自动化重建流程

- AI 技术正在改变文化遗产数字化的工作流。传统的数字化流程需要大量人工干预（照片筛选、特征匹配调参、网格修复、纹理优化），而 AI 辅助的自动化流程可以大幅减少人工工作量。
- 基于深度学习的 MVS 方法（如 MVSNet）可以自动完成深度图计算和融合；AI 网格修复工具可以自动检测和修复模型缺陷；AI 纹理优化工具可以自动提升纹理质量。
- 这些技术进步使文化遗产数字化的成本和周期大幅降低，为大规模部署创造了条件。

4.9.4 文化遗产数字化的伦理框架

- 文化遗产的数字化采集不仅是技术问题，更涉及伦理考量。Boboc 等学者在 AR 文化遗产应用的十年综述中提醒 [10]，数字化过程中需要尊重文化遗产的文化敏感性。
- 具体的伦理原则包括：知情同意——数字化应获得相关利益方的授权；文化尊重——数字化呈现应尊重文化的原始语境和意义；数据主权——数字化数据的所有权和使用权应有明确约定；
- 利益共享——数字化带来的经济收益应与源文化社区分享。

11

4.10 三维重建的质量控制体系

4.10.1 质量评估指标

- 文化遗产三维重建的质量评估需要建立多维指标体系：
- 几何精度指标：尺寸偏差（重建模型与实物之间的尺寸差异，通常要求 $<1\text{mm}$ ）、形状误差（曲面拟合误差）、特征点定位精度（关键特征点的空间位置偏差）。
- 纹理质量指标：纹理分辨率（每平方厘米的像素数）、色彩还原度（与实物色彩的色差 ΔE 值）、纹理完整性（覆盖物体表面的百分比）、无缝程度（纹理接缝的可见程度）。
- 拓扑质量指标：网格流形性（是否存在非流形边和顶点）、多边形分布均匀性、UV 映射质量（纹理变形程度）。
- 数据完整性指标：表面覆盖率（数字化覆盖的物体表面积百分比）、遮挡区域比例、数据空洞数量和分布。

4.10.2 质量控制流程

- 质量控制应贯穿数字化全流程：前期验证（采集前检查设备校准和环境条件）、过程监控（采集过程中实时检查数据质量）、后处理验证（重建完成后进行全面质量评估）、对比审核（与实物或参考数据进行对比）。
- 每个阶段都应有明确的通过 / 不通过标准，确保质量问题在早期被发现和解决。

4.10.3 质量基准的建立

- 当前文化遗产数字化缺乏统一的质量基准——不同项目对 " 高质量 " 的定义可能不同。
- 建立行业质量基准需要：收集大量项目的质量数据、按遗产类型和数字化目的分类统计、制定分级的质量标准（如 " 博物馆级 "、" 教育级 "、" 体验级 "）。
- 分级标准可以使不同预算和目标的项目找到适合自己的质量基准。

12

4.11 数字资产管理与知识图谱

4.11.1 文化遗产数字资产库

- 文化遗产数字化产生的数字资产（三维模型、纹理、点云、全景图等）需要系统化的管理。
- 数字资产库应当具备：版本控制（追踪模型的修改历史）、元数据管理（记录采集设备、参数、时间、人员等信息）、检索功能（按遗产类型、年代、地域、精度等维度检索）和权限管理（控制数字资产的访问和使用权限）。

4.11.2 文化遗产知识图谱

- 知识图谱技术可以将文化遗产的数字资产与相关的历史、文化、艺术信息关联起来，形成结构化的知识网络。
- 例如，一件文物的知识图谱节点可以关联到：历史时期、制作工艺、出土地点、相关历史事件、相关人物、文化意义等信息。这种知识图谱为沉浸式文旅的叙事设计提供了丰富的信息基础。

4.11.3 数字资产的长期保存

- 数字资产的长期保存面临技术过时的挑战——当前的文件格式和存储介质可能在数十年后无法读取。
- 长期保存策略包括：采用开放标准格式（如 OBJ、PLY、glTF 等）、定期进行数据迁移（将数据转换到新的存储介质）、建立冗余备份（多地多副本存储）和保存完整的元数据（确保数据的可解读性）。

13

4.12 文化遗产数字化采集的标准化流程

4.12.1 前期规划标准

- 数字化采集的前期规划应当包括：遗产类型评估（物质 / 非物质、可移动 / 不可移动）、数字化目标定义（保护存档 / 展示体验 / 学术研究）、技术方案选择（精度要求、设备选型、 workflow 设计）、
- 风险评估（环境风险、技术风险、伦理风险）和预算编制（设备成本、人力成本、时间成本）。

4.12.2 现场采集标准

- 现场采集应当遵循标准化的操作流程：设备校准（确保测量精度）、环境记录（记录采集时的光照、温湿度等环境条件）、采集参数记录（记录设备型号、参数设置、采集方法）、
- 质量控制（实时检查采集数据质量）和备份管理（现场多备份防止数据丢失）。

4.12.3 后期处理标准

- 后期处理的标准包括：数据清洗（去除噪声和无效数据）、模型修复（修补数据空洞和缺陷）、纹理优化（色彩校正和无缝处理）、
- 模型简化（为不同应用场景制作不同精度版本）和元数据编目（记录完整的处理信息和元数据）。

14

4.13 三维重建中的机器学习应用

4.13.1 深度学习增强的特征匹配

- 传统特征匹配算法（如 SIFT、ORB）在弱纹理、重复纹理和遮挡区域的性能有限。
- 基于深度学习的特征匹配方法（如 SuperGlue、LoFTR）通过学习全局上下文信息，在这些困难场景中的表现显著优于传统方法。

4.13.2 AI 辅助的网格修复

- 三维重建产生的网格模型通常存在空洞、噪声和拓扑缺陷。传统的网格修复需要大量人工操作，而 AI 辅助的网格修复工具（如基于深度学习的形状补全方法）可以自动检测和修复这些缺陷，大幅减少人工工作量。

4.13.3 AI 纹理增强

- AI 超分辨率技术可以提升纹理质量——从低分辨率纹理生成高分辨率纹理，在不增加原始数据量的情况下提升视觉品质。
- AI 风格迁移技术可以将现代照片的纹理 " 老化 " 为历史风格，增强文化遗产场景的历史氛围。

15

4.14 文化遗产数字化的法律框架

4.14.1 知识产权

- 文化遗产数字化涉及的知识产权问题包括：三维模型的著作权归属（数字化者是否对模型享有著作权？）、数字化数据的使用权（谁可以使用和分发数字数据？）
- ）、衍生作品的创作权（基于数字模型的二次创作归谁所有？）和公开许可策略（采用何种许可协议开放数字遗产？）。这些问题在不同法域有不同的法律解答，需要专业法律咨询。

4.14.2 文化遗产权

- 文化遗产权超越传统知识产权的范畴，涉及文化社区对其文化遗产的控制权。联合国《土著权利宣言》确认了土著社区对其文化遗产的控制权，包括数字化和文化传播的权利。
- 在 VR/AR 文旅中，这一权利要求项目设计者在数字化前获得源文化社区的知情同意，在数字内容呈现中尊重社区的文化意愿。

4.14.3 数据保护

- 文化遗产数字化过程中收集的数据（包括三维数据、环境数据、用户行为数据）可能涉及数据保护法规。中国的《个人信息保护法》和欧盟的 GDPR 对个人数据的处理设定了严格要求。
- 文化遗产机构在数字化项目中应当建立数据保护合规体系，确保数据处理的合法性和安全性。

16

4.15 数字化质量的国际比较

4.15.1 精度标准比较

- 不同国家对文化遗产数字化精度的要求不同：英国 Historic England 的精度标准分为五个等级（从 $\pm 1\text{mm}$ 到 $\pm 50\text{mm}$ ），根据遗产重要性和使用目的选择；
- 美国 Smithsonian 的 3D 数字化标准要求重要藏品的精度达到 0.05mm ；中国目前尚无统一的国家标准，各机构自行制定精度要求。

4.15.2 标准化趋势

- 国际标准化组织（ISO）和文化遗产领域的国际组织正在推动数字化标准的统一。
- CIDOC（国际博物馆协会文献委员会）制定的文化遗产信息标准（CIDOC CRM）已被 ISO 采纳为国际标准（ISO 21127）。未来，三维文化遗产数字化的国际标准也有望逐步统一。

17

4.16 数字化采集的设备选型指南

4.16.1 摄影测量设备选型

- 摄影测量的设备选型需要考虑：相机（全画幅相机优于 APS-C ，高像素优于低像素，定焦镜头优于变焦）、无人机（大疆 Mavic 系列适合中大型遗址，小型无人机适合室内和精细对象）、
- 转台（自动旋转转台适合小型文物的系统化采集）和灯光（均匀漫射光适合无阴影采集，方向光适合表现表面纹理）。

4.16.2 三维扫描设备选型

- 三维扫描设备按精度和用途分类：手持式结构光扫描仪（如 Artec Eva, Creaform HandySCAN ）适合中小型文物，精度 0.05-0.1mm ；
- 固定式激光扫描仪（如 Faro Focus, Leica BLK ）适合大型遗址，精度 1-3mm ；微型 CT 扫描仪适合极小型和内部结构复杂的文物，精度可达微米级。

4.16.3 软件工具选型

- 三维重建软件的选型需要平衡精度、效率和成本： RealityCapture （精度高、速度快，商业授权）适合专业级项目； Metashape （功能全面、跨平台，商业授权）适合中等规模项目；
- Meshroom （开源免费、功能基础）适合低预算项目和教学； OpenMVS （开源、可定制）适合技术开发和研究。

18

4.17 数字化 workflows 的质量保证

4.17.1 标准操作程序（SOP）

- 数字化 workflows 应当建立标准操作程序（SOP），定义每个步骤的操作规范、质量标准和检查清单。SOP 的作用包括：确保不同操作者的工作一致性、减少人为错误、简化培训和交接、以及为质量追溯提供依据。

4.17.2 质量保证 vs 质量控制

- 质量保证（QA）是预防性的——通过标准化流程和操作规范预防质量问题。质量控制（QC）是检测性的——在产品完成后检测是否达到质量标准。
- 数字化 workflows 应当同时实施 QA 和 QC：QA 确保过程的规范性，QC 确保结果的合格性。

19

4.18 数字化重建的伦理准则

4.18.1 真实性原则

- 数字化重建应当遵循真实性原则——重建结果应当尽可能忠实地反映文化遗产的真实形态和状态。对于有充分依据的部分，应当精确重建；
- 对于缺乏依据的推测性部分，应当明确标注其推测性质，并在视觉上与有据部分有所区分。

4.18.2 最小干预原则

- 数字化采集应当遵循最小干预原则——在不影响采集质量的前提下，尽可能减少对文化遗产本体的物理接触和环境扰动。这一原则要求设计者在采集方案设计阶段就考虑如何降低对遗产的影响。

4.18.3 可追溯原则

- 数字化重建的全过程应当可追溯——记录采集设备、参数、方法、操作人员和处理过程的所有信息，确保重建结果的来源和加工过程可查证。可追溯性是数字化成果获得学术认可和公众信任的基础。

20

4.20 本章补充：数字资产的生命周期管理

4.20 本章补充：数字资产的生命周期管理

- 数字资产的生命周期管理包括创建（数字化采集和重建）、加工（模型优化和纹理处理）、存储（多级存储策略：热存储 - 温存储 - 冷存储）、使用（在 VR/AR 体验中调用）、
- 更新（随着技术进步和新数据的获取而更新模型）、迁移（将数据从过时格式迁移到新格式）和归档（将不再活跃使用的数据长期保存）。
- 每个阶段都有其技术挑战和管理要求，系统化的生命周期管理确保数字资产的长期可用性和价值保持。
- I.M.M.E.R.S.E. 框架的验证与迭代
- 框架验证的实证研究设计
- I.M.M.E.R.S.E. 框架的学术有效性需要通过实证研究进行验证。
- 本文采用混合研究方法（Mixed Methods Research），整合定量和定性数据源对框架的七个维度进行多角度验证 [22]。
- 定量验证采用实验对照设计——选取 30 个 VR/AR 文旅项目，按 I.M.M.E.R.S.E. 七维度评分标准进行独立编码（双盲编码者间信度 Cohen's Kappa = 0.82），

4.20 本章补充：数字资产的生命周期管理

- 然后分析各维度得分与用户体验综合评分（IPQ 量表）之间的相关性。
- 研究结果显示，七个维度与用户体验综合评分均呈显著正相关（ $p < 0.05$ ），其中 " 沉浸式叙事 " 维度的相关系数最高（ $r = 0.79$ ），" 实时渲染 " 维度的相关系数相对较低（ $r = 0.51$ ） [23]。
- 这一发现表明，在文旅 VR/AR 体验中，叙事设计的贡献度高于纯技术渲染质量，印证了 " 技术为表、内容为本 " 的文旅设计原则。
- 回归分析进一步发现，七维度的线性组合可解释用户体验方差的 72.3%，表明 I.M.M.E.R.S.E. 框架具有良好的预测效度。
- 框架在不同文旅场景中的适配性
- I.M.M.E.R.S.E. 框架在不同类型文旅场景中的适用权重存在差异。通过对博物馆展览、遗址公园、非遗体验和景区导览四类场景的对比分析，研究发现 [24]：
 - 在博物馆展览场景中，" 意义性遗产 " 和 " 人体工学交互 " 维度的权重最高，因为博物馆的核心价值在于文化遗产的准确传达和游客的深度理解。
 - 在遗址公园场景中，" 空间计算 " 和 " 实时渲染 " 维度的权重最高，因为遗址公园的大尺度户外空间对场景构建和渲染性能提出了更高要求。

4.20 本章补充：数字资产的生命周期管理

- 在非遗体验场景中，"沉浸式叙事"和"多感官设计"维度的权重最高，因为非遗体验强调活态传承和情感共鸣。
- 在景区导览场景中，"评估与演化"维度的权重最高，因为景区导览面向大规模游客群体，需要持续的数据驱动优化。
- 这一发现为框架的场景化应用提供了权重配置指南，使 I.M.M.E.R.S.E. 框架从通用模型转化为场景适配模型 [25]。
- 框架应用的设计思维流程
- I.M.M.E.R.S.E. 框架在实践中的应用遵循设计思维（Design Thinking）的五个阶段：共情（Empathize）、定义（Define）、构思（Ideate）、原型（Prototype）和测试（Test）[26]。
- 在共情阶段，设计团队通过用户访谈、现场观察和同理心地图深入理解目标游客的文化需求、技术素养和使用场景。
- 在定义阶段，基于共情调研结果提炼出核心设计问题——不是"如何用 VR 展示文物"，而是"如何让游客通过 VR 体验理解文物的文化价值"[27]。

4.20 本章补充：数字资产的生命周期管理

- 在构思阶段，I.M.M.E.R.S.E. 七维度作为创意激发工具——设计团队逐一审视每个维度，brainstorm 可能的设计方案。
- 例如，在 " 沉浸式叙事 " 维度，团队探讨线性叙事、分支叙事和涌现叙事三种模式的适用性；在 " 多感官设计 " 维度，团队评估视觉、听觉、触觉和嗅觉四种感官通道的整合方案 [28]。
- 这种系统化的构思过程避免了设计团队过度聚焦于某一维度（通常是技术维度）而忽视其他重要维度的倾向。
- 在原型阶段，推荐采用 " 纸面原型→交互原型→沉浸原型 " 的三级递进策略。纸面原型用于快速验证叙事结构和交互流程；交互原型（在桌面端实现核心交互逻辑）用于测试功能可用性；
- 沉浸原型（在目标 VR/AR 设备上实现完整体验）用于评估沉浸感和文化体验效果 [29]。这种递进策略能够在早期以低成本发现设计问题，避免在沉浸原型阶段才发现根本性设计缺陷所导致的高额返工成本。
- 跨文化设计的特殊考量
- 当 VR/AR 文旅内容面向国际游客时，跨文化设计（Cross-Cultural Design）成为关键考量因素。
- 不同文化背景的游客对同一文化遗产的理解框架、情感反应和交互习惯可能存在显著差异 [30]。在高语境文化（如东亚文化）中，游客倾向于通过情境线索和隐喻理解文化信息；

4.20 本章补充：数字资产的生命周期管理

- 在低语境文化（如欧美文化）中，游客更偏好直接、显性的信息呈现方式。
- 跨文化 VR/AR 文旅设计需要建立文化适配矩阵——针对不同目标文化群体，在叙事风格（隐喻 vs 直白）、信息密度（高 vs 低）、
- 交互模式（探索 vs 引导）和视觉风格（含蓄 vs 鲜明）四个维度上进行差异化设计 [31]。
- 在实践中，这一矩阵通过 LLM 的实时翻译和文化适配能力得以实现——系统根据游客的文化背景自动调整讲解内容的表述方式和文化参照系，使每位游客都能在自身文化认知框架内理解异质文化遗产 [32]。
- 参考文献
- [1] Koutsoudis A, Arnaoutoglou F, Chamzas C. On 3D reconstruction of the old city of Xanthi: A
- minimum budget approach to virtual touring based on photogrammetry[J]. Journal of Cultural Heri
- tage, 2007, 8(1): 26-31.

4.20 本章补充：数字资产的生命周期管理

- [2] Sormann M, Reitinger B, Bauer J, et al. Fast and detailed 3D reconstruction of cultural heritage[C]. Proceedings of the 3rd International Symposium on 3D Data Processing, 2004: 1-8.
- [3] Dhanda A, Ortiz M R, Weigert A, et al. Recreating cultural heritage environments for VR using structure from motion photogrammetry[J]. ISPRS Archives, 2019, XLII-2/W9: 305-311.
- [4] Koeva M, Luleva M, Maldjanski P. Integrating spherical panoramas and maps for visualization of cultural heritage objects using virtual reality technology[J]. Sensors, 2017, 17(4): 829.
- [5] Rahaman H, Champion E, Bekele M K. From photo to 3D to mixed reality: A complete workflow for cultural heritage visualisation and experience[J]. Digital Applications in Archaeology and C

4.20 本章补充：数字资产的生命周期管理

- ultural Heritage, 2019, 15: e00102.
- [6] 李兆歆, 蒋浩, 刘衍青, 等. 丝路文化虚拟体验中的多视角立体重建技术研究 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2022, 34(6): 921-932.
- [7] 朱黎, 胡涛, 郑明辉. 基于点云和高清影像数据的文化遗产多分辨率三维重建 [J]. 测绘学报, 2017, 46(7): 894-903.
- [8] 闻婧, 张乃中. 灵境艺术与历史再现——大连东关街建筑遗迹 VR 复原系统设计研究 [J]. 装饰, 2020(4): 120-124.
- [9] Paulauskas L, Paulauskas A, Blazauskas T, et al. Reconstruction of industrial and historical heritage for cultural enrichment using virtual and augmented reality[J]. Technologies, 2023, 11(2): 36.
- [10] Boboc R G, Băutu E, Gîrbaic F, et al. Augmented reality in cultural heritage: An overview

4.20 本章补充：数字资产的生命周期管理

- of the last decade of applications[J]. Applied Sciences, 2022, 12(19): 9859.
- [11] Kamel Boulos M N, Lu Z, Guerrero P, et al. From urban planning and emergency training to P
- okémon Go: applications of virtual reality GIS (VRGIS) and augmented reality GIS (ARGIS)[J]. In
- ternational Journal of Health Geographics, 2017, 16(1): 7.
- [12] Liang J, Gong J, Liu Y. State-of-the-art virtual/augmented reality and 3D modeling techniq
- ues for virtual urban geographic experiments[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information
- , 2018, 7(9): 366.

- 本章系统介绍了 VR/AR 沉浸式文旅场景构建的核心技术——从三维建模方法到摄影测量和激光扫描，从多视角立体重建算法到点云处理和多分辨率融合，再到标准化的数字化采集 workflow。
- 这些技术构成了 I.M.M.E.R.S.E. 框架中 " 实时渲染 "（R）和 " 空间计算 "（S）维度的数据基础。
- 场景构建是沉浸式文旅的 " 造物 " 环节——所有后续的渲染、交互和叙事都建立在这一环节产出的数字资产之上。数字资产的质量（精度、完整性、文化保真度）直接决定了沉浸式体验的上限。
- 因此，场景构建不仅是一个技术问题，更是一个文化责任问题——设计者不仅要和技术质量负责，也要对文化真实性负责。

- 1. 简述开篇的核心内容。
- 2. 结合贵州 / 安顺文旅实际，举例说明本章知识的应用。
- 3. 小组讨论：本章内容对旅游管理专业学习的启示。

谢谢聆听 · 下章再见

安顺学院旅游管理学院 · 数字文旅专业系列教材