

数字文旅专业系列教材 · 教学课件

文化遗产保护概论——非遗数字化与文物数字典藏

第4章 数字化采集与生成技术

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 数字化采集技术体系
- 4.2 非遗数字化采集技术
- 4.3 数字化采集的工艺流程
- 4.4 技术选型与评估
- 4.5 国际比较与经验借鉴
- 知识卡片
- 4.6 数字化采集的质量管理体系
- 4.7 数字化采集的实践案例深度分析
- 4.8 数字化采集的未来发展方向
- 4.9 数字化采集的标准化与规范化
- 4.10 多模态数据融合与文化遗产数字化
- 4.11 数字化采集中的文化敏感性
- 4.12 文化遗产数字化的全流程管理
- 4.6 数字化采集技术的精度分析与质量控制

- 1. 识记：三维激光扫描、结构光扫描、摄影测量、多光谱成像四类核心采集技术的原理与特征
- 2. 理解：非遗数字化采集（音视频、动作捕捉、口述史）与文物数字化采集的技术差异
- 3. 应用：根据文物类型选择合适的数字化采集方案，制定技术路线
- 4. 分析：比较中外数字化采集实践的技术路线差异与各自优势
- 5. 评价：从精度、效率、成本三个维度评估不同采集技术的适用性
- 6. 创造：为一个包含可移动文物和古建筑的综合性地设计数字化采集方案

- 敦煌莫高窟现存洞窟 735 个，壁画 45000 平方米，彩塑 2400 余尊。然而，莫高窟长期面临风沙侵蚀、温湿度波动、游客二氧化碳排放等多重自然和人为威胁。
- 敦煌研究院从 20 世纪 80 年代末开始探索壁画数字化保护，经过三十余年的技术迭代，建立了 " 壁画数字化作业规范 "—— 以高分辨率数字摄影为主，辅以多光谱成像和三维激光扫描，
- 实现壁画的毫米级精度数字化记录。
- 杜若飞在分析敦煌数字化实践时指出，数字敦煌项目的核心技术路线是 " 高保真摄影 + 色彩管理 + 数字拼接 "，单幅壁画图像分辨率达到 300dpi 以上，色彩还原度 $\Delta E \leq 3$ ，
- 确保了数字副本在视觉上与原始壁画高度一致。

- 截至 2024 年，数字敦煌资源库已向全球开放 290 个洞窟的高清数字图像，累计访问量超过 2000 万次。
- 这一案例展示了数字化采集技术在文化遗产保护中的巨大价值，也提出了 " 如何选择合适技术、如何控制质量、如何平衡成本 " 等系统性问题。

01

4.1 数字化采集技术体系

4.1.1 三维激光扫描技术

- 三维激光扫描 (3D Laser Scanning) 是通过发射激光脉冲并接收反射信号来测量物体表面三维坐标的技术。
- 根据测量原理可分为时间飞行法 (Time-of-Flight, ToF)、相位差法和三角测量法三类。
- Wachowiak 和 Karas 在研究博物馆与文化遗产行为的三维扫描应用时指出，三维数字化已在文化遗产对象的记录和分析技术中占据了重要地位，不同原理的扫描设备在精度、速度、范围等方面各有优劣。
- 时间飞行法扫描仪适用于大型文物和建筑的远距离扫描，测量范围可达数百米，但精度相对较低 (毫米级)。相位差法扫描仪在中距离扫描中具有更高的精度和速度，适用于中型文物和室内空间。
- 三角测量法扫描仪适用于小型高精度文物扫描，精度可达微米级，但测量范围有限。
- 赵迎龙以北京考古遗址博物馆藏辽代白釉穿带瓶为例，探讨了三维扫描技术和摄影测量技术的融合应用，指出两种技术的相互融合能够发挥各自优势，实现文物的高精度全方位三维数字化。

4.1.2 结构光扫描技术

- 结构光扫描 (Structured Light Scanning) 通过投射已知图案 (如条纹、网格) 到物体表面，由摄像头捕获变形后的图案，通过计算图案变形量来重建物体三维形貌。
- 结构光扫描具有速度快、精度高、非接触等优点，特别适用于中小型文物的精细化数字化。
- Montusiewicz 等人在研究文化遗产对象三维模型制备时采用结构光扫描技术，不仅实现了文物的精确三维记录，还探索了将三维打印模型用于视障人士触觉认知的可能性。
- 这一实践拓展了文物数字化采集的社会价值维度。

4.1.3 摄影测量技术

- 摄影测量 (Photogrammetry) 是通过分析多角度重叠照片来重建物体三维模型的技术。
- 相较于激光扫描，摄影测量具有设备成本低、操作灵活、色彩还原好等优势，但数据处理量更大、精度受拍摄条件影响。
- Espina-Romero 和 Guerrero-Alcedo 在分析数字化领域的研究活动时指出，摄影测量自动化技术的发展使小型文物集合的三维数字化效率大幅提升。
- 丁翔等人在研究武当文化数字博物馆时利用三维激光扫描技术获取武当山古建筑和文物的三维数据，通过 HTML5 技术将三维模型嵌入网页，实现了文化遗产的在线展示和互动。
- 这一实践展示了摄影测量与 Web 技术结合的应用前景。

4.1.4 多光谱与高光谱成像

- 多光谱成像 (Multispectral Imaging) 和高光谱成像 (Hyperspectral Imaging) 通过捕获物体在不同波长 (包括可见光、红外、紫外等) 下的反射信息，
- 揭示肉眼不可见的文物特征。
- 该技术在古籍文献、壁画、油画等文物的数字化中具有独特价值——能够揭示被覆盖或褪色的文字和图案，为文物研究和修复提供关键信息。

02

4.2 非遗数字化采集技术

4.2.1 音视频记录技术

- 音视频记录是非遗数字化最基础也最核心的采集技术。对于表演艺术类非遗（戏曲、音乐、舞蹈等），高质量的音视频记录是保存表演形态的基本手段。
- 师国伟等人在研究增强现实技术在文化遗产数字化保护中的应用时指出，文化遗产数字化保护是发展趋势，音视频记录是最基本的技术手段。
- 现代非遗音视频采集通常采用 4K/8K 超高清摄像、多机位同步拍摄、专业级无损录音等技术，确保记录的完整性和高质量。
- 孔莉莉以全景 VR 视频技术为例，探讨了数字化艺术文化遗产保护的教学实践，展示了 360 度全视角动态视听媒体信息记录和还原的技术路径。

4.2.2 动作捕捉技术

- 动作捕捉技术是非遗数字化采集的前沿领域，特别适用于身体实践类非遗（舞蹈、戏曲、武术、传统手工艺等）的记录。
- 通过光学、惯性或电磁式动作捕捉系统，可以精确记录表演者或工艺师的身体运动轨迹、力度和节奏，为非遗的身体知识保存和教学传承提供数据基础。

4.2.3 口述史数字化记录

- 口述史是非遗传承的重要载体。口述史数字化记录不仅包括音视频采集，还涉及口述内容的文字转写、主题标注、语义索引和知识组织。
- Liu 等人在研究 "毛猴" 手工艺的数字化传承时，通过口述史记录结合数字制作技术，探索了非遗身体知识的数字化保存路径。

03

4.3 数字化采集的工艺流程

4.3.1 前期规划与方案设计

- 数字化采集的前期规划是整个工作质量的基础。主要包括：确定数字化对象的优先级（基于价值评估、保存状况、使用需求等）；制定技术方案（选择采集技术、确定精度要求、设计工作流程）；
- 评估现场条件（环境光照、温湿度、空间限制等）；准备设备和人员。

4.3.2 现场数据采集

- 现场采集是数字化工作的核心环节。
- 对于文物三维扫描，需要关注以下要点：扫描覆盖完整性（确保文物所有表面被覆盖）、标靶布设（用于多站扫描数据配准）、色彩管理（使用标准色卡进行色彩校准）、环境控制（避免直射光和反射干扰）。
- 对于非遗音视频采集，需要关注拍摄角度的全面性、音频录制的清晰度和现场环境的记录。

4.3.3 数据处理与质量控制

- 数据处理包括点云配准、去噪、网格重建、纹理映射、模型优化等步骤。
- 朱黎等人在研究文化遗产多分辨率三维重建时，提出了一种基于地理位置的不同分辨率遗址文物模型融合与展示方法，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。

04

4.4 技术选型与评估

4.4.1 不同文物类型的采集策略

- | 文物类型 | 推荐技术 | 精度要求 | 特殊注意事项 ||-----|-----|-----|-----|| 小型可移动文物 | 结构光扫描 + 摄影测量 | $\leq 0.05\text{mm}$ | 色彩管理、
- 材质反光处理 || 大型可移动文物 | 三维激光扫描 + 摄影测量 | $\leq 0.5\text{mm}$ | 多站扫描配准 || 古建筑 / 遗址 | 远距离三维激光扫描 | $\leq 5\text{mm}$ | 控制点布设、
- 外围环境 || 壁画 / 平面文物 | 高分辨率摄影 + 多光谱成像 | $\geq 300\text{dpi}$ | 色彩校准、
- 光照均匀 || 非遗表演 | 多机位 4K/8K 视频 + 动作捕捉 | 视项目而定 | 多角度同步、音频质量 |

4.4.2 精度与效率的平衡

- 数字化采集需要在精度和效率之间取得平衡。过高的精度要求会导致采集时间大幅增加、数据量急剧膨胀，而精度不足则无法满足研究和修复需求。
- Dai 和 Yu 在研究木雕作品的 3D 重建和数字保护时，基于 U-Net 模型和 6G 网络技术探索了精度与效率的优化路径。

4.4.3 成本效益分析

- 数字化采集的成本包括设备成本 (扫描仪、相机、计算机等)、人力成本 (技术人员、专家) 和时间成本。对于资金有限的中小型博物馆，摄影测量是一种成本效益较高的替代方案。

05

4.5 国际比较与经验借鉴

4.5.1 欧洲数字化采集实践

- 欧洲在文化遗产数字化采集方面积累了丰富经验。
- Caciara 等人在研究建筑文化遗产数字化时提出了一种集成化方法论，将三维激光扫描、摄影测量和数据处理技术整合为一体化工作流程，以实现文化遗产的精确记录和可及性提升。

4.5.2 美国史密森尼学会数字化标准

- 美国史密森尼学会是全球最早系统开展藏品数字化的博物馆机构之一。其数字化标准强调可重复性、文档完整性和数据开放性，形成了从采集到发布的全流程标准化体系。

4.5.3 中外技术对比分析

- 中国与发达国家在文物数字化采集技术方面各有优势。中国在壁画数字化和石窟寺数字化领域处于世界领先水平 (如数字敦煌) ，但在设备制造、标准体系建设和数据开放方面仍有提升空间。

06

知识卡片

- 知识卡片 4-1：三维扫描技术对比 | 技术类型 | 精度 | 速度 | 范围 | 适用对象 | |-----|-----|-----|-----|-----| | To
- F 激光扫描 | 毫米级 | 中 | 远距离 | 建筑、遗址 | | 相位差扫描 | 亚毫米级 | 快 | 中距离 | 室内空间、
- 中型文物 | | 三角测量扫描 | 微米级 | 慢 | 近距离 | 小型高精度文物 | | 结构光扫描 | 亚毫米级 | 快 | 近距离 | 中小型文物
- | 知识卡片 4-2：数字化采集质量检
- 查清单 - [] 扫描覆盖率 $\geq 95\%$ - [] 配准误差在允许范围内 - [] 色彩校准已执行 (色差 $\Delta E \leq 3$) - [] 纹理分辨率 $\geq 300\text{dpi}$ - []
- 元数据记录完整 - [
-] 备份已完成且可读

07

4.6 数字化采集的质量管理体系

4.6.1 质量标准与规范

- 文化遗产数字化采集的质量管理需要建立系统化的标准体系。国际层面，ISO 21127(CIDOC CRM) 为文化遗产信息交换提供了概念基础；
- 欧洲的 3D-ICONS 项目制定了 3D 文化遗产数字化的技术指南；美国的联邦数字化指导纲要 (FADGI) 为数字化项目提供了详细的品质等级标准。中国也在积极推进数字化标准建设。
- 国家文物局发布的《可移动文物数字化保护技术规范》对文物数字化的技术参数、工作流程和质量控制提出了明确要求。
- 然而，邵壮在分析国博三维数字化实践时指出，不同博物馆采用不同的数据格式和技术标准，严重制约了数据的互联互通，亟需建立全国统一的文物数字化标准体系。
- 质量评价核心指标包括：(1) 几何精度——三维模型与实物之间的尺寸偏差，高精度要求 $\leq 0.1\text{mm}$ ；(2) 纹理分辨率——单位面积的像素数量，专业级要求 $\geq 300\text{dpi}$ ；
- (3) 色彩还原度——数字图像与实物之间的色差 (ΔE)，专业级要求 $\Delta E \leq 3$ ；(4) 模型完整性——三维模型覆盖文物表面的百分比，要求 $\geq 95\%$ ；
- (5) 拓扑质量——三角网格的规整程度，影响后续处理和渲染质量。

4.6.2 质量控制流程

- 质量控制应贯穿数字化采集的全过程。前期质量控制包括设备校准、环境检测和方案审核；中期质量控制包括现场实时检查、数据预览验证和异常处理；
- 后期质量控制包括数据处理验证、模型质量评估和元数据完整性检查。
- Bentkowska-Kafel 和 Macdonald 在探讨文化遗产数字技术时强调，质量控制的文档化是确保数字化成果可重复和可验证的关键——每件文物的数字化过程都应记录详细的处理日志，
- 包括设备参数、环境条件、操作步骤和质量检测结果。

4.6.3 常见质量问题与解决方案

- 文物数字化采集中常见的质量问题包括：反光问题——金属和釉陶等高反光材质的扫描数据会出现噪点和缺失，解决方案包括喷涂消光剂或使用偏振光过滤；
- 暗色问题——深色文物的扫描信号弱，需要增加激光功率或延长曝光时间；复杂几何问题——镂空、透雕等复杂结构的文物难以完整扫描，需要多角度多设备联合采集；
- 色彩失真问题——光照不均匀导致的色彩偏差，需要使用标准色卡进行色彩校准。
- He 和 Jia 提出的 Opti3D 方法解决了低光照环境下的三维数字化和免校准问题，为特殊环境下的文物数字化提供了新技术路径。
- 这一技术突破对于石窟寺、墓室等光线条件受限的文化遗产地具有重要实用价值。

08

4.7 数字化采集的实践案例深度分析

4.7.1 案例一：敦煌莫高窟壁画数字化

- 敦煌莫高窟壁画数字化是中国文化遗产数字化保护的标杆项目。
- 该项目的技术路线包括四个核心环节：(1) 高分辨率数字摄影——使用专业级数码相机配合定焦镜头，逐壁面、逐区域进行高分辨率拍摄，单张图像分辨率超过 300dpi；
- (2) 色彩管理系统——使用 X-Rite 标准色卡进行色彩校准，确保数字图像与原始壁画的色差 $\Delta E \leq 3$ ；(3) 数字拼接技术——将数百张局部照片拼接成完整的壁画数字图像，拼接精度控制在亚像素级；
- (4) 质量检验——对数字图像的分辨率、色彩、拼接质量进行系统检验。
- 陈振旺和樊锦诗从文化科技融合的视角分析了敦煌数字化实践，指出敦煌数字化的成功在于将技术创新与文化理解深度融合——技术团队不仅需要掌握数字化技术，还需要深入理解壁画的艺术特征和历史背景，
- 才能确保数字化成果的学术价值。

4.7.2 案例二：故宫古建筑三维数字化

- 故宫古建筑三维数字化面临的技术挑战与壁画完全不同。古建筑体量大、结构复杂、细节繁多，需要远距离三维激光扫描与近景摄影测量的融合。
- 欧阳宏指出，故宫使用三维数字技术采集了大量古建筑的高精度三维数据，通过数字呈现技术立体再现文化遗产原貌。
- 故宫的实践创新在于：一是建立了 " 古建筑数字档案 " 系统，每栋建筑都有完整的三维数字模型和详细的构件数据库；二是开发了虚拟漫游系统，使公众可以通过 VR 技术 " 走进 " 未开放区域；
- 三是将数字化与修缮工程深度结合，三维数据为修缮设计和施工提供了精确的参考依据。

4.7.3 案例三：三星堆遗址考古现场数字化

- 三星堆遗址的考古现场数字化代表了考古发掘与数字技术深度融合的新方向。
- 2020-2022 年的三星堆 " 祭祀坑 " 发掘过程中，考古团队使用了三维扫描、摄影测量、多光谱成像等多种数字化技术，对发掘过程进行了全程数字化记录。
- 2025 年的数字化展示项目运用科技艺术手段，从地域文化性、信息叙事性、空间艺术性及情感共鸣性四个维度构建了文化遗产数字化展示的新范式。
- 三星堆案例的创新意义在于 " 过程数字化 "—— 不仅对出土文物进行数字化，更对考古发掘过程本身进行数字化记录，为后续研究提供了完整的发掘现场数字档案。

09

4.8 数字化采集的未来发展方向

4.8.1 自动化与智能化

- 数字化采集正在从手工操作向自动化和智能化方向发展。自动化扫描系统可以减少人工干预，提高采集效率和一致性。AI 辅助处理可以自动完成去噪、配准、纹理映射等后处理工作，大幅缩短数据处理周期。
- Dai 和 Yu 基于 U-Net 模型和 6G 网络技术的研究展示了 AI 在文物 3D 重建中的技术潜力。

4.8.2 多模态融合

- 多模态融合是数字化采集的重要发展方向。单一技术往往难以全面记录文化遗产信息——三维扫描擅长形态记录但色彩还原不足，摄影测量色彩好但精度受限，多光谱成像能揭示隐藏信息但适用范围有限。
- Caciara 等人提出的集成化方法论将多种技术整合为一体化工作流程，代表了多模态融合的实践方向。

4.8.3 实时化与云端化

- 5G 和边缘计算技术的发展使实时化数字化采集成为可能。在考古现场，5G 网络可以支持三维扫描数据的实时上传和云端处理，研究人员可以远程实时查看和处理数据。
- 这一方向对于田野考古和不可移动文物的数字化具有重要意义。

10

4.9 数字化采集的标准化与规范化

4.9.1 国际标准化进展

- 文化遗产数字化采集的标准化是确保数据互操作性和长期可重用性的基础。
- 国际上，ISO/TC 46(信息与文献技术委员会) 和 ISO/TC 211(地理信息技术委员会) 制定了多项与文化遗产数字化相关的标准。
- 欧洲的 3D-ICONS 项目制定了 3D 文化遗产数字化的技术指南，涵盖了从数据采集到在线发布的完整流程。
- 美国的 FADGI(联邦数字化指导纲要) 为数字化项目提供了详细的品质等级标准，将数字化品质分为一星到四星四个等级。
- Bentkowska-Kafel 和 Macdonald 在探讨文化遗产数字技术时强调，标准化不仅涉及技术参数 (如分辨率、精度、色彩空间) ，还涉及工作流程文档化、元数据记录和质量验证方法。
- 完整的标准化体系应覆盖数字化过程的每个环节，确保数字化成果的可重复性和可验证性。

4.9.2 中国标准化现状

- 中国文化遗产数字化标准化建设近年来取得了显著进展。国家文物局先后发布了《文物数字化保护标准体系》《可移动文物数字化保护技术规范》《不可移动文物数字化保护技术规范》等标准文件。
- 然而，邵壮在分析国博三维数字化实践时指出，标准的统一是馆藏文物三维数字化工作的关键前提，不同博物馆采用不同的数据格式和技术标准严重制约了数据的互联互通。
- 当前中国标准化的主要不足包括：标准覆盖面不够（特别是非遗数字化标准严重缺失）、标准执行力度不足（标准发布后缺乏有效的推行机制）、标准更新滞后（技术快速演进但标准修订周期过长）。

11

4.10 多模态数据融合与文化遗产数字化

4.10.1 多模态数据的类型

- 文化遗产数字化采集产生的多模态数据包括：几何数据 (三维点云、网格模型)、纹理数据 (高清照片、多光谱图像)、属性数据 (元数据、历史档案、学术文献)、环境数据 (温湿度、光照、空气质量) 和动态数据 (游客行为、社交媒体反馈)。
- 这些数据在格式、精度、时间尺度上各不相同，如何融合利用是技术挑战。

4.10.2 数据融合的技术路径

- 多模态数据融合的技术路径包括：配准对齐——将不同来源的数据统一到同一坐标系或参考框架下；特征融合——从不同模态数据中提取互补特征进行联合分析；
- 决策融合——将不同模态数据的分析结果进行综合决策。Caciora 等人提出的集成化方法论将三维激光扫描、摄影测量和数据处理技术整合为一体化工作流程，代表了多模态融合的实践方向。

12

4.11 数字化采集中的文化敏感性

4.11.1 文化敏感性的含义

- 数字化采集中的文化敏感性是指在采集过程中尊重文化遗产来源社区的文化传统、宗教信仰和情感联系。某些文物可能具有神圣或禁忌属性，数字化采集需要遵守特定的文化礼仪和行为规范。
- 例如，某些宗教文物的展示有性别限制，某些仪式文物的记录有时间限制。

4.11.2 文化敏感性实践指南

- 建立文化敏感性实践指南应包括：事前调研——在数字化前了解文物的文化背景和可能的敏感性；社区协商——与来源社区协商数字化的范围、方式和用途；行为规范——制定采集现场的行为规范，尊重文化礼仪；
- 使用限制——对敏感文物的数字资源设置访问和使用限制。Manzŭch 指出，数字化伦理的社会维度要求关注公平获取和文化敏感性。

13

4.12 文化遗产数字化的全流程管理

4.12.1 项目管理框架

- 文化遗产数字化项目应采用系统化的项目管理框架。
- 项目生命周期包括：启动阶段 (需求分析、可行性研究、方案制定)、规划阶段 (技术选型、资源配置、进度计划)、执行阶段 (现场采集、数据处理、质量检查)、监控阶段 (进度监控、质量监控、风险监控) 和收尾阶段 (成果验收、文档归档、项目评估)。
- 每个阶段都应有明确的输入、输出和质量标准。

4.12.2 人员组织与能力建设

- 数字化项目需要多学科团队协作，核心角色包括：项目经理（负责整体协调和管理）、技术专家（负责设备操作和数据处理）、领域专家（负责文物 / 非遗的专业指导）、元数据专家（负责元数据标准设计和标引）、
- IT 支持（负责系统维护和数据安全）和社区联络员（负责与来源社区的沟通协调）。
- 团队能力建设应注重跨学科培训——技术人员需要基本的文化遗产知识，领域专家需要基本的数字技术素养。

4.12.3 成果管理与共享

- 数字化项目完成后，成果的管理和共享是确保项目长期价值的关键。
- 成果管理包括：数据归档（按标准格式入库存储）、元数据完善（补充描述性元数据和管理性元数据）、版权处理（明确版权归属和使用许可）和访问服务（建立检索和下载服务）。
- 成果共享应遵循 FAIR 原则——可发现 (Findable)、可获取 (Accessible)、互操作 (Interoperable) 和可重用 (Reusable)。

14

4.6 数字化采集技术的精度分析与质量控制

4.6.1 采集精度的决定因素

- 文物数字化采集的精度受多种因素影响，理解这些因素对技术选型和质量控制至关重要：硬件因素：(1) 传感器分辨率——三维扫描仪的点间距和面阵分辨率决定了几何细节的捕捉能力。
 - 如 Artec Space Spider 的手持结构光扫描仪精度可达 0.05mm，适合小型精细文物的采集；(2) 光学系统质量——镜头畸变、景深范围、对焦精度等直接影响数据质量；
 - (3) 运动控制精度——对于自动化扫描系统，运动平台的定位精度限制了整体采集精度。环境因素：(1) 光照条件——摄影测量和结构光扫描对环境光照敏感，需要在受控光照环境下进行采集。
 - 如敦煌壁画数字化采集采用了定制 LED 冷光源，色温 5600K $\pm$ 200K，显色指数 Ra>95，确保色彩还原的准确性；
 - (2) 温度湿度——温度变化导致的热胀冷缩和湿度变化引起的材质变形会影响采集精度，精密采集通常在恒温恒湿环境下进行；
 - (3) 振动——外部振动对高精度扫描（尤其是接触式扫描）影响显著，需要隔振平台。
- 文物因素：(1) 表面材质——高反光材质（如金属器、瓷器釉面）、高吸光材质（如漆器黑漆面）、半透明材质（如玉石、玻璃）对光学的响应特性各异，需要针对性的采集策略；
- (2) 表面状态——风化、侵蚀、修补痕迹等影响采集数据的完整性和可解读性；(3) 尺寸与复杂度——大型文物（如建筑构件）需要多站扫描拼接，复杂几何（如镂空、深凹）容易产生遮挡和数据缺失。

4.6.2 质量控制体系

- 建立系统化的质量控制体系是确保数字化采集质量的关键。
- 质量控制体系应覆盖采集前、采集中和采集后三个阶段：采集前质量控制：(1) 制定采集方案——根据文物类型、精度要求和预算约束，选择合适的技术方案和设备参数；
 - (2) 设备校准——扫描仪、相机等设备需要在采集前进行校准，确保系统误差在可控范围内；(3) 试采集——对代表性样本进行试采集，验证方案可行性并及时调整。
- 采集中质量控制：(1) 实时监控——在采集过程中实时检查数据质量，发现遮挡、噪点等问题及时补采；(2) 覆盖率检查——确保扫描覆盖率不低于 95%，对遗漏区域进行补扫；
 - (3) 色彩管理——使用标准色卡 (如 X-Rite ColorChecker) 进行色彩校准，确保色彩还原准确。
- 采集后质量控制：(1) 数据完整性检查——验证点云密度、模型完整性和纹理覆盖率；
 - (2) 精度验证——使用已知尺寸的参考物或三坐标测量机验证采集精度；(3) 元数据记录——完整记录采集设备、参数、环境条件、操作人员等元数据，支持结果的可追溯性。

15

4.7 非遗数字化采集的方法论深化

4.7.1 动作捕捉技术在非遗记录中的应用

- 动作捕捉技术是非遗身体实践类项目 (如传统舞蹈、武术、戏剧、手工艺) 数字化记录的核心技术。当前应用于非遗记录的主流动捕技术包括：
光学动捕系统：通过多台红外摄像机追踪演员身上标记点的运动轨迹。
 - 优点是精度高 (亚毫米级)、采样率高 (120-240fps)，适合精细动作记录。如北京舞蹈学院利用 Vicon 光学动捕系统记录了中国 56 个民族的代表性舞蹈动作，建立了中国民族舞蹈动作数据库。
 - 缺点是对场地要求高 (需要专用动捕棚)、标记点可能影响表演者的自然动作。惯性动捕系统：演员穿着内置 IMU(惯性测量单元) 的动捕服，通过加速度计和陀螺仪计算身体姿态。
 - 优点是便携性好、无遮挡问题、可在户外使用，适合田野调查中的非遗记录。如中央民族大学利用 Xsens 惯性动捕系统在贵州黔东南苗族村寨现场记录了苗族锦鸡舞的完整表演。
 - 缺点是精度略低于光学系统 (厘米级)，长时间使用存在漂移问题。无标记视频动捕：基于计算机视觉从普通视频中提取人体姿态，无需穿戴设备。优点是非侵入式、对表演者无干扰，适合自然表演场景的记录。
 - 如利用 OpenPose 或 MediaPipe 从非遗表演视频中提取骨架数据。缺点是精度有限、对遮挡敏感、难以捕捉手指等精细动作。

4.7.2 口述史数字化记录的规范与伦理

- 口述史是非遗保护的重要方法，数字化技术为口述史的记录、保存和利用提供了新可能。
- 口述史数字化记录需要遵循以下规范：
记录规范：(1) 使用专业录音设备 (采样率 48kHz/24bit 以上) 和摄像设备 (4K 以上)，确保音视频质量；
(2) 在安静、自然的环境中进行访谈，避免环境噪音干扰；(3) 完整记录访谈过程，包括访谈者提问和受访者回答，不做选择性删除；(4) 记录元数据 (访谈时间、地点、受访者信息、访谈语言等)。
- 伦理规范：(1) 知情同意——访谈前需向受访者说明记录目的、使用范围和存储方式，获得书面知情同意；(2) 文化敏感性——对涉及宗教仪式、家族秘传等敏感内容，尊重受访者的意愿，可设置访问限制；
- (3) 利益分享——数字化成果如果产生商业收益，应与受访社区分享利益；(4) 文化主权——数字化记录不应剥夺社区对其文化遗产的控制权，社区有权决定数字资源的访问和使用方式。

16

4.8 数字化采集的案例深度分析

4.8.1 敦煌壁画数字化采集的技术演进

- 敦煌莫高窟的壁画数字化是中国文化遗产数字化采集中最具代表性的案例。
- 从 20 世纪 90 年代至今，敦煌壁画数字化采集技术经历了三个发展阶段：第一阶段——数字摄影阶段 (1996-2006)：采用大画幅胶片相机拍摄壁画，再扫描为数字图像。
 - 主要设备为 Linhof Technikd 相机配 Kodak 专业反转片，单张照片覆盖面积约 1 平方米。
 - 这一阶段的技术局限在于：胶片冲洗的色彩管理难以标准化，拼接精度受限于手动操作，整体效率较低 (每天完成约 2-3 平方米)。
- 第二阶段——数字直接采集阶段 (2006-2016)：引入数码后背相机系统 (Phase One IQ3 100MP)，采用轨道自动化拍摄系统。
 - 数码直接采集消除了胶片冲洗环节，色彩管理通过 ICC 色彩配置文件实现标准化。轨道系统确保每张照片的位置精度，拼接通过专业软件 (PTGui) 自动化完成。
 - 这一阶段的采集效率提升至每天约 8-10 平方米，色彩还原度 $\Delta E < 5$ 。
- 第三阶段——智能采集阶段 (2016 年至今)：引入 AI 辅助的采集和处理系统。
 - AI 技术主要用于：(1) 自动检测拍摄区域的遮挡和曝光不均，指导补拍；(2) 自动色彩校正，减少人工调色工作量；(3) 智能拼接优化，自动识别和处理拼接缝。

4.8.1 敦煌壁画数字化采集的技术演进

- 同时引入多光谱成像系统，同步采集壁画的紫外荧光和红外反射图像，用于颜料分析和病害诊断。当前阶段的采集效率达到每天约 15-20 平方米，色彩还原度 $\Delta E < 3$ 。

4.8.2 三星堆遗址的数字化采集策略

- 三星堆遗址的数字化采集展示了考古遗址多技术融合采集的典型策略：遗址级采集：利用无人机倾斜摄影测量获取遗址整体的三维地形模型，地面激光扫描获取发掘区域的精细几何数据。
- 两者融合生成厘米级精度的遗址数字孪生体。探方级采集：每个探方在发掘过程中进行多阶段的 3D 扫描——每发掘一个文化层扫描一次，记录地层关系和遗迹分布的完整序列。
- 这种 " 过程性数字化 " 保留了发掘过程的三维记录，对后续研究具有重要价值。器物级采集：出土器物在第一时间进行 3D 扫描和多角度高清摄影，建立器物的数字档案。
- 重要器物还进行 CT 扫描，记录器物内部结构 (如铜尊内部的泥芯、象牙的内部断裂情况) 。环境数据采集：同步采集发掘现场的环境数据 (温度、湿度、土壤含水率) ，为后续保护提供环境基线数据。
- 这些环境数据与器物数字化数据关联存储，支持病害分析和保护决策。

17

4.9 数字化采集的国际比较与标准建设

4.9.1 国际数字化采集标准体系

- 各国在文化遗产数字化采集标准建设方面形成了不同的体系：英国标准体系：英国文化遗产局 (Historic England) 发布的《3D 激光扫描遗产应用指南》是全球最早的三维数字化采集标准之一。
- 该标准详细规定了不同类型遗产 (建筑、遗址、雕塑、小件器物) 的扫描精度要求、数据格式和质量验收标准。
- 美国标准体系：美国联邦机构数字指南倡议 (FADGI) 制定了涵盖图像、音视频、电子文档等数字资源的统一指南。
- Smithsonian 博物馆的数字化标准强调 " 以用途驱动精度 "—— 不同用途 (档案保存、学术研究、公众展示、3D 打印) 对精度的要求不同，应根据用途选择适当的采集参数。
- 欧盟标准体系：欧盟通过 Europeana 项目推动了成员国数字化标准的协调统一。Europeana 数据交换协议 (EDM) 定义了统一的元数据模型，确保各机构数据可互操作。
- 欧盟还资助了 3D-ICONS 等项目，制定 3D 文化遗产数字化的技术标准。中国标准体系：中国文物数字化标准建设以国家文物局为主导，已发布多项行业标准 (WW/T 系列) 。
- 2023 年发布的《文物数字化保护技术规范 通则》规定了文物数字化保护的基本要求、工作流程和质量控制标准。

4.9.2 精度等级与应用场景的对应关系

- 基于国际标准和中国实践，
- 可建立数字化采集精度等级与应用场景的对应关系：

	精度等级	几何精度	色彩精度	适用场景	典型应用
- | | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |

|| L1- 超精密 | <0.05mm | $\Delta E < 2$ | 科学研究 / 精密测量 | 文物微痕分析、
- 材质鉴定 || L2- 精密 | 0.05-0.5mm | $\Delta E < 3$ | 档案保存 / 数字修复 | 高精度数字档案、
- 虚拟修复 || L3- 标准 | 0.5-2mm | $\Delta E < 5$ | 学术研究 / 教育展示 | 研究参考、
- 教学课件 || L4- 展示 | 2-10mm | $\Delta E < 8$ | 公众展示 / 网络浏览 | 在线展览、
- 虚拟漫游 || L5- 概览 | >10mm | 不要求 | 位置记录 / 空间管理 | 遗产普查、空间规划 | 这一分级体系为数字化项目的方案设计和资源配置提供了参考框架。
- 在实际项目中，应根据文物的价值等级、保护需求和预算约束选择合适的精度等级，避免 "一刀切" 的过度采集或不足采集。

18

4.10 多光谱与高光谱成像在文物分析中的应用

4.10.1 技术原理与设备

- 多光谱成像 (MSI) 和高光谱成像 (HSI) 是文物非破坏性分析的重要手段：多光谱成像：在几个到十几个离散波段 (通常包括可见光、近红外、紫外等) 采集图像。
- 典型设备如 Modified DSLR 相机配合带通滤光片，可获取 8-12 个波段的图像。MSI 的优点是设备成本相对较低、操作简便，适合常规文物分析。
- 高光谱成像：在数百个连续波段采集图像，形成 " 图像立方体 "(Image Cube) ，每个像素都包含完整的光谱曲线。
- 典型设备如推扫式高光谱相机 (Specim IQ、Headwall Photonics) ，可获取 400-1000nm 范围内数百个波段的数据。
- HSI 的优点是光谱分辨率高，可精确识别材料的化学成分，缺点是设备昂贵、数据量大。

4.10.2 文物分析应用案例

- 壁画颜料分析：不同颜料具有不同的光谱反射特征，通过高光谱成像可非破坏性地识别壁画使用的颜料种类。
- 如敦煌研究院利用 HSI 技术对莫高窟壁画进行了系统性的颜料分析，识别出朱砂、石青、石绿、铅丹等 10 余种传统颜料，并发现了部分壁画中使用的罕见混合颜料。
- 这些信息不仅有助于理解古代绘画技法，还为修复材料的选择提供了科学依据。底层素描揭示：多光谱成像可 " 看穿 " 表面层，揭示画布上的底层素描或修改痕迹。
- 如荷兰国家博物馆利用 MSI 对伦勃朗的《夜巡》进行扫描，发现了多处底层构图修改痕迹，揭示了画家的创作过程。
- 文字增强与读取：对于褪色、污损或被覆盖的文字，多光谱成像可通过选择特定波段增强文字与背景的对比度，使不可见文字变为可读。
- 如利用红外成像成功读取了碳化赫库兰尼姆纸莎草卷上的文字，这些卷轴在公元 79 年维苏威火山喷发中被碳化，常规方法完全无法读取。

4.10.3 数据处理与可视化

- 多光谱 / 高光谱数据的处理和分析需要专业的方法和工具：数据预处理：包括暗电流校正、白板校正（反射率标准化）、几何配准（确保不同波段图像的空间对齐）等步骤。
- 预处理质量直接影响后续分析结果的可靠性。降维与特征提取：高光谱数据维度高（数百个波段），需要通过主成分分析 (PCA)、最小噪声分离 (MNF) 等方法降维，提取最具区分力的特征波段。
- 分类与识别：利用光谱匹配 (Spectral Angle Mapping, SAM) 或机器学习（支持向量机、随机森林）方法，将每个像素的光谱曲线与已知颜料的光谱库进行比对，
- 实现颜料种类的自动识别。
- 可视化：将分析结果以伪彩色图像的形式呈现，不同颜色代表不同的材料种类。还可生成光谱曲线图，直观展示不同区域的光谱特征差异。

19

4.11 数字化采集的成本效益与资源配置

4.11.1 采集成本模型

- 文物数字化采集的成本受多种因素影响，建立成本模型有助于项目预算和资源配置：设备成本：3D 扫描仪 (手持式 5-50 万元，固定式 10-200 万元)、高分辨率相机及镜头 (5-30 万元)、
- 多光谱成像设备 (20-100 万元)、动作捕捉系统 (光学式 50-300 万元，惯性式 10-50 万元)。
- 设备可通过采购或租赁获取，租赁适合短期项目。人力成本：数字化工程师 (采集和处理)、文物保护专家 (现场指导)、项目协调员 (与文博机构沟通)。
- 人力成本在总成本中占比通常为 30%-50%，是项目预算的重要组成部分。时间成本：不同类型文物的数字化耗时差异巨大。小型器物 (如钱币、玉器) 单件采集约 0.5-2 小时；
- 中型器物 (如陶瓷、青铜器) 约 2-8 小时；大型复杂对象 (如古建筑、石窟) 需要数天至数月。时间成本直接影响项目的总预算。
- 数据处理成本：采集后的数据处理 (点云去噪、网格重建、纹理映射、色彩校正等) 通常占项目总时间的 40%-60%。数据处理是质量决定性环节，不能压缩。

4.11.2 优先级排序策略

- 面对海量待数字化文物和有限的资源，需要建立优先级排序策略：价值导向优先：优先数字化价值最高的文物——一级文物、具有独特历史或艺术价值的文物、面临劣化风险的文物。
- 这一策略确保最重要的文物优先得到数字保护。需求导向优先：优先数字化当前需求最迫切的文物——正在筹备展览的藏品、研究项目急需的资料、文旅开发需要的文化资源。
- 这一策略确保数字化成果能及时发挥作用。效率导向优先：优先数字化效率最高的文物——同类型批量文物（如同一批出土的陶器）可采用自动化流程批量处理，单位成本低。
- 这一策略确保在有限预算内覆盖最多文物。风险导向优先：优先数字化面临最大风险的文物——材质脆弱易损的文物、存放环境不佳的文物、频繁展出导致磨损的文物。
- 这一策略确保最脆弱的文物在损坏前留下数字档案。实际项目中，通常综合上述策略进行优先级排序。如 " 高风险 + 高价值 " 的文物应最高优先级， " 低风险 + 低价值 " 的文物可暂缓数字化。

20

4.12 数字化采集的伦理考量

4.12 数字化采集的伦理考量

- 数字化采集虽然以技术为核心，但也涉及重要的伦理问题：文物安全伦理：数字化采集过程可能对文物造成物理风险——3D 扫描的激光可能对光敏感材料产生影响，接触式扫描可能造成物理磨损，
- 运输和搬动文物增加了损坏风险。
- 因此，采集方案应进行风险评估，优先选择非接触、非侵入式的采集技术，且采集过程须有文物保护专家在场监督。
- 文化敏感性伦理：某些文物具有文化敏感性（如宗教圣物、祖先遗骸、秘传物品），对其数字化采集应征得相关社区或群体的知情同意，并尊重其关于数字化范围、数据使用和访问权限的文化规范。
- 数据伦理：数字化采集产生的大量数据需要妥善管理——谁有权访问原始数据？数据可以共享给哪些机构或个人？数据存储在哪个国家 / 地区？
- 这些问题需要制定明确的数据管理政策，确保数据的合法、合规和合伦理使用。技术依赖伦理：过度依赖数字化可能导致“数字替代”效应——管理者认为文物已有数字备份而放松对物理实体的保护。
- 数字化不应成为减少物理保护投入的理由，而应作为物理保护的补充和增强。

21

4.13 延伸阅读与实践建议

4.13 延伸阅读与实践建议

- 延伸阅读：建议阅读 Historic England 发布的《3D Laser Scanning for Heritage: Advice and Guidance》(2nd Edition)，
- 了解英国遗产数字化采集的详细技术指南。
- 同时推荐阅读 CIPA Heritage Documentation 的系列论文，了解建筑遗产摄影测量的国际标准和实践案例。
- 实践建议：本章涉及的数字化采集技术具有较强的实践性，建议配合实验课进行教学。
- 可使用消费级 3D 扫描设备（如 iPhone 的 LiDAR 扫描、Insta360 全景相机）让学生对校园建筑或小型器物进行数字化采集实践，体验从采集到处理再到展示的完整流程。
- 同时，应安排学生参观当地的数字化采集实验室或文博机构的数字化部门，观摩专业级设备的操作过程。
- 技术发展趋势：值得关注的未来技术方向包括：(1)AI 辅助的自动化采集——AI 可自动识别文物的最佳采集角度和参数，减少人工试错；
- (2) 便携式高精度扫描——手持设备的精度不断提升，未来可能在更多场景替代固定式设备；(3) 实时处理与展示——采集与处理同步进行，采集完成后立即可见 3D 模型，大幅提升工作效率。

22

4.14 数字化采集的质量验收标准

4.14 数字化采集的质量验收标准

- 建立系统化的质量验收标准是确保数字化成果可用性的关键：几何质量验收：(1) 完整性——点云覆盖率不低于 95%，无明显遮挡区域；
- (2) 精度——与参考标准的偏差不超过规定阈值（如 L2 级精度要求偏差 $\leq 0.5\text{mm}$ ）；(3) 拓扑正确性——网格模型无流形错误、无自相交、无孔洞（关键区域）。
- 纹理质量验收：(1) 分辨率——纹理图像分辨率不低于规定值（如 L2 级要求 $\geq 300\text{ DPI}$ ）；(2) 色彩准确性——与标准色卡的色差 ΔE 不超过规定值；
- (3) 纹理映射质量——纹理与几何对齐准确，无明显错位和拉伸。元数据完整性验收：检查元数据必填字段是否齐全、内容是否准确、格式是否规范。
- 元数据应至少包含：文物标识信息（名称、编号、分类）、采集技术信息（设备型号、参数、软件版本）、质量信息（精度等级、验收结果）和人员信息（采集人员、验收人员、日期）。
- 验收流程：采集方提交验收材料（数字成果 + 元数据 + 自检报告）→ 验收方进行技术检测（自动检测 + 人工抽检）→ 出具验收报告（合格 / 有条件合格 / 不合格）→ 不合格项目返工。
- 验收报告应归档保存，作为数字成果质量的正式凭证。

23

4.15 新兴采集技术展望

4.15 新兴采集技术展望

- 值得关注的新兴数字化采集技术包括：(1) 量子成像技术——利用量子纠缠原理实现超低光照条件下的高信噪比成像，特别适合对光极度敏感的文物；
- (2) 太赫兹成像——太赫兹波可穿透非金属材料，实现涂层下层的无损检测，如发现油画下的底层绘画或壁画下的草稿；
- (3) AI 辅助的众包采集——利用普通智能手机进行文物 3D 扫描，通过 AI 算法将多用户拍摄的图像融合为高质量 3D 模型，大幅降低采集成本。
- 这些技术虽尚处于实验室阶段，但有望在未来 5-10 年内进入实用阶段，为文化遗产数字化采集带来新的可能性。此外，数字化采集技术的发展还需要与文物保护需求密切配合。
- 技术选型不应追求最高精度或最新设备，而应根据文物的具体特征、保护需求和使用场景选择最合适的技术方案。在实际工作中，经常需要在精度、效率、成本和文物安全之间寻找平衡点。
- 建议各文博机构建立完善的数字化采集管理制度，明确技术标准、操作规范和质量验收流程，确保数字化成果的规范性和可用性。同时应加强人员培训，提升其技术能力和文物保护意识。
- 在数字化采集的实践教学，建议安排学生参观文博机构的数字化实验室，观摩专业级 3D 扫描仪、多光谱成像系统等设备的实际操作。
- 同时鼓励学生使用消费级设备进行实践，如使用手机 LiDAR 进行小型器物 3D 扫描，使用 360 度相机采集全景图像。

4.15 新兴采集技术展望

- 通过对比消费级和专业级设备的采集效果，学生能更深入理解精度、效率与成本之间的权衡关系。数字化采集的质量管理是一个系统工程，需要在制度设计、技术标准和人员培训三个层面同步推进。
- 综上所述，数字化采集技术是文化遗产数字化保护的基础性环节，其质量直接决定了后续典藏、呈现和活化利用的效果。从业者应秉持科学严谨的态度，在保障文物安全的前提下追求最高质量的数字化成果。

- 本章系统论述了文化遗产数字化采集与生成技术体系，对应 G.U.A.R.D. 框架的 G 维度。
- 首先介绍了三维激光扫描、结构光扫描、摄影测量和多光谱成像四类核心采集技术的原理与适用场景；然后分析了非遗数字化采集的特殊技术路径，包括音视频记录、动作捕捉和口述史数字化；
- 接着从前期规划、现场采集和数据处理三个方面阐述了数字化采集的工艺流程；然后从文物类型匹配、精度效率平衡和成本效益三个维度讨论了技术选型方法；
- 最后通过国际比较揭示了中外数字化采集实践的差异与趋势。

- 三维激光扫描的三种测量原理分别是什么？各有什么优缺点？ 2.（理解）分析摄影测量与三维激光扫描在文物数字化中的互补关系。
- 3.（应用）为一面 10 平方米的古代壁画设计数字化采集方案，包含技术选型、设备清单和质量控制标准。
- 4.（分析）比较文物数字化采集与非遗数字化采集在技术路线上的核心差异。 5.（评价）评估 " 高精度等于高质量 " 这一观点在文化遗产数字化采集中的合理性。
- 6.（创造）为一个预算 50 万元的县级博物馆设计文物数字化采集三年规划。

- 1. Caciora T, Jubran A, Ilies D C, et al.. Digitization of the Built Cultural He
- 2. Espina-Romero L, Guerrero-Alcedo J. Fields Touched by Digitalization: Analysi
- 3. Cheng H M, Yen Y, Yang W B. Digital Archiving in Cultural Heritage Preservati
- 4. Graham C A. Applications of digitization to museum collections management, re
- 5. Wachowiak M J, Karas B V. 3D Scanning and Replication for Museum and Cultural
- 6. 丁翔, 龙佳媛, 向泽冬, 等. 基于三维激光扫描与 HTML5 技术的武当文化数字博物馆的研究. 维普网.

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