

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 6 章 空间计算与交互技术

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

- 6.1 空间追踪注册技术原理
- 6.2 视觉 - 惯性混合追踪系统
- 6.3 场景理解与环境识别
- 6.4 多模态交互设计
- 6.5 虚实配准与空间锚点
- 6.6 案例分析
- 6.7 国际比较与经验借鉴
- 6.8 实践案例深度分析
- 6.9 理论深化与前沿探讨
- 6.10 空间锚点与持久化 AR
- 6.11 交互设计的人因工程学
- 6.12 交互模式的未来演化
- 6.13 AR 场景中的光照一致性
- 6.14 多用户协同 AR 体验设计

- 掌握开篇的核心概念与方法
- 掌握 6.1 空间追踪注册技术原理的核心概念与方法
- 掌握 6.2 视觉 - 惯性混合追踪系统的核心概念与方法
- 掌握 6.3 场景理解与环境识别的核心概念与方法
- 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：掌握空间追踪注册技术的基本原理，了解视觉 - 惯性混合追踪系统的构成。
- 2. 理解：理解多模态交互设计在沉浸式文旅中的重要性。
- 3. 应用：能够为特定文旅场景设计合适的多模态交互方案。
- 4. 分析：分析不同追踪技术的精度、延迟和适用场景。
- 5. 评价：评估虚实配准精度对沉浸感的影响。
- 6. 创造：设计一个基于空间计算的 AR 文化遗产导览交互方案。
- 导入案例： ARCore/ARKit 在文旅场景中的应用
- 2017 年，苹果 ARKit 和谷歌 ARCore 的发布使移动 AR 开发标准化，任何拥有现代智能手机的用户都可以体验 AR 内容。

- 在文旅领域，这意味着游客无需购买额外设备，只需用自己的手机即可在景区体验 AR 导览、虚拟复原和互动叙事。
- 然而，移动 AR 的空间追踪精度和稳定性仍是挑战——在光照不足、纹理稀少的场景中，AR 内容可能 " 漂移 " 或 " 抖动 "，严重影响体验质量。
- Hu 等学者的研究评估了商用 XR 设备在空间追踪方面的实际表现 [6]，揭示了当前技术的能力边界。

02

6.1 空间追踪注册技术原理

6.1.1 追踪技术分类

- 空间追踪注册是 AR/MR 技术的核心——它决定了虚拟内容能否准确 " 锚定 " 在真实环境中。Newman 等学者在追踪技术的基础研究中将 AR 追踪分为以下几类 [1]：
 - 光学追踪：通过摄像头捕捉标志物或自然特征来确定位置。分为基于标志物（Marker-based）和无标志物（Markerless）两种方式。
 - 惯性追踪：通过加速度计和陀螺仪测量线加速度和角速度，通过积分计算位置和朝向。惯性追踪的短期精度高，但存在累积漂移。
 - 磁性追踪：通过测量磁场强度确定位置。优点是不受遮挡影响，缺点是作用范围有限且受金属干扰。
 - 声学追踪：通过超声波飞行时间测量距离。精度适中但受环境噪音干扰。

6.1.2 混合追踪系统

- 单一追踪技术各有优劣，实际系统通常采用混合方案。
- 视觉 - 惯性混合追踪（ Visual-Inertial Odometry, VIO ）是最主流的方案，它结合了视觉追踪的长期稳定性和惯性追踪的短期高精度，通过卡尔曼滤波等传感器融合算法实现互补。
- Wang 等学者在矿山安全培训 AR 系统中使用了视觉 - 惯性混合追踪技术 [4] ，证明了该方案在复杂环境中的可靠性。
- Rabbi 和 Ullah 在 AR 追踪挑战的综述中详细分析了各种追踪方法的性能与局限性 [3] 。

03

6.2 视觉 - 惯性混合追踪系统

6.2.1 VIO 算法原理

- VIO 算法的核心是传感器融合——将视觉特征观测与惯性测量单元（IMU）数据通过优化或滤波方法融合。主要方法包括基于滤波的 MSCKF 和基于优化的 VINS-Mono/OVIO 等。

6.2.2 SLAM 技术

- 同步定位与地图构建（SLAM）技术使设备能够在未知环境中同时确定自身位置和构建环境地图。
- 在 AR 文旅场景中，SLAM 技术用于：构建景区的三维地图、实现 AR 内容的空间锚定、支持场景理解（如识别墙面、地面、物体表面）。

6.2.3 视觉 - 惯性 SLAM 的挑战

- 在文化遗产场景中，VIO-SLAM 面临特殊挑战：古建筑表面的重复性纹理可能导致特征匹配歧义；弱光环境（如洞窟、博物馆展厅）会降低视觉追踪质量；大尺度场景的长时间运行会累积漂移误差。

04

6.3 场景理解与环境识别

6.3.1 平面检测

- 平面检测是移动 AR 的基础能力—— ARCore 和 ARKit 都提供了平面检测 API，能够识别水平面（地面、桌面）和垂直面（墙面、柱面）。在文旅场景中，平面检测用于虚拟内容的放置和空间锚定。

6.3.2 语义分割

- 语义分割通过深度学习模型识别图像中每个像素的类别（如建筑、天空、植被、道路等），为 AR 内容的智能放置提供场景理解能力。例如，AR 系统可以识别出墙面并自动在其上叠加历史复原影像。

6.3.3 物体识别

- 物体识别技术能够识别场景中的特定物体（如雕塑、碑刻、器物），触发相关的 AR 内容。Moore 等学者在增强现实人机协作研究中展示了基于深度学习的物体识别在 AR 中的应用 [5]。

05

6.4 多模态交互设计

6.4.1 手势交互

- 手势交互是 VR/AR 中最自然的交互方式之一。VR 控制器（如 Oculus Touch）提供精确的手部追踪和按钮输入；
- 裸手追踪技术（如 Meta Quest 的 Hand Tracking）则无需控制器。在文旅场景中，手势交互可用于 " 抓取 " 虚拟文物、" 指向 " 兴趣点、" 挥手 " 触发叙事等。

6.4.2 语音交互

- 语音交互在文旅场景中具有独特优势——游客在参观时双手可能忙于拍照或持设备，语音指令可以解放双手。此外，语音交互可以集成多语言支持，为国际游客提供无障碍体验。

6.4.3 眼动追踪

- 眼动追踪技术能够检测用户的注视点，支持 foveated rendering（注视点渲染）和注视点交互。
- 在文旅场景中，眼动追踪可以用于分析游客的注意力分布、触发基于注视的叙事内容、以及评估体验效果。
- Pervolarakis 等学者在遗产遗址 AR/VR 访问研究中探讨了眼动追踪在文化遗产体验中的应用 [7]。

6.4.4 体感交互

- 体感交互通过力反馈设备、振动马达、温度变化等手段提供触觉反馈。
- 在文旅场景中，体感交互可以增强 " 触摸 " 虚拟文物的真实感——当游客在 VR 中 " 触摸 " 一件青铜器时，力反馈设备可以模拟金属的硬度和质感。

06

6.5 虚实配准与空间锚点

6.5.1 配准精度与延迟

- 虚实配准的精度和延迟直接影响 AR 体验的质量。配准误差会导致虚拟内容 " 漂浮 " 或 " 抖动 "，延迟过高则导致虚拟内容 " 拖尾 " 运动。
- 在文化遗产场景中，配准要求尤其严格——虚拟复原内容必须精确对齐到真实遗址的对应位置。

6.5.2 空间锚点

- 空间锚点（Spatial Anchors）是 AR/MR 中持久化虚拟内容位置的技术。通过将虚拟内容与真实环境中的特定特征点关联，空间锚点使得虚拟内容能够在应用重启后恢复到原位。
- Azure Spatial Anchors 等云锚点服务进一步支持跨设备、跨位置的锚点共享。

6.5.3 共享 AR 体验

- 共享 AR 体验允许多个用户同时查看和交互相同的 AR 内容，这需要通过云锚点或本地网络同步各设备的空间坐标系。在文旅场景中，共享 AR 可以支持家庭或团队的协同探索体验。

07

6.6 案例分析

6.6 案例分析

- 案例一： ARCore/ARKit 在文化遗产导览中的应用
- Pervolarakis 等学者在遗产遗址 AR/VR 访问研究中 [7]，展示了移动 AR 技术在文化遗产导览中的应用，包括虚拟内容的空间锚定和多模态交互。
- 案例二： iFAR 移动 AR 文化遗产应用
- Sprung 和 Haxha 开发的 iFAR 系统 [9] 展示了移动 AR 在文化遗产保护中的应用，包括空间追踪注册和环境识别功能。
- 案例三： 文化遗产混合现实设计
- 铁钟和朱翔设计并实现了基于文化遗产保护的混合现实展示系统 [12]，通过 Easy AR SDK 跟踪定位素材内容，在三维软件中制作 CG 角色并合成，实现了文化遗产场景的全方位数字化展示。
- 国际比较与经验借鉴
- 空间计算的技术生态

6.6 案例分析

- 美国企业在空间计算技术生态中处于主导地位：苹果 ARKit、谷歌 ARCore、Meta Horizon OS、Microsoft HoloLens 构成了移动 AR 和 MR 的主要平台。
- 中国在空间计算硬件（如 Pico VR 头显）方面有所布局，但在底层 SDK 和开发者生态方面仍依赖国外平台。
- 无障碍设计经验
- 欧洲在 AR/VR 文旅的无障碍设计方面积累了丰富经验。
- Kasemsarn 等学者在包容性设计和数字叙事的研究中 [7]，提出了面向不同能力水平用户的 AR 文旅设计框架，强调空间计算技术应当服务于所有人的文化参与权。
- 理论深化与前沿探讨
- 空间计算的认知维度
- 空间计算不仅是技术问题，更涉及认知科学。人类如何在混合现实环境中建立空间认知地图？虚拟内容的空间布局如何影响用户的文化理解？这些问题需要空间计算技术与认知科学的深度交叉研究。

6.6 案例分析

- 脑机接口的前景
- 脑机接口（BCI）技术可能成为 VR/AR 交互的终极形态——通过直接读取大脑信号来控制虚拟环境。
- 虽然 BCI 在文旅应用中仍处于概念阶段，但 Han 等学者提出的 EEG 体验测量框架 [8] 已经展示了脑机接口技术在文旅体验评估中的潜力。

08

6.7 国际比较与经验借鉴

6.7.1 空间计算平台的技术生态

- 全球空间计算技术生态由美国企业主导。
- 苹果的 ARKit 和 Vision Pro、谷歌的 ARCore 和 Project Starline、Meta 的 Horizon OS 和 Quest 系列、
- Microsoft 的 HoloLens 构成了移动 AR 和 MR 的主要平台。
- 这些平台不仅提供硬件设备，更重要的是提供了完整的 SDK 和开发者生态，使第三方开发者能够便捷地开发 AR/MR 应用。
- 中国在空间计算硬件方面有所布局——Pico VR 头显（字节跳动收购）在消费级 VR 市场有一定份额，华为在 AR 眼镜方面有研发投入。但在底层 SDK 和开发者生态方面，中国企业仍主要依赖国外平台。
- 这一格局对中国 VR/AR 文旅的自主可控发展提出了挑战。

6.7.2 无障碍设计经验

- 欧洲在 VR/AR 文旅的无障碍设计方面积累了丰富的丰富经验。Kasemsarn 等学者在包容性设计和数字叙事的研究中 [7]，提出了面向不同能力水平用户的 AR 文旅设计框架。
- 该框架的核心原则是 "设计 -for- 所有"（Design for All），确保 VR/AR 体验对老年人、残障人士、不同文化背景的游客都可及。
- 无障碍设计的具体策略包括：为视觉障碍用户提供音频描述和触觉导引；为听觉障碍用户提供字幕和视觉提示；为行动不便用户提供坐姿 VR 体验方案；为认知障碍用户提供简化的交互界面和清晰的导航。
- 这些策略不仅服务于特定群体，也提升了所有用户的体验质量。

6.7.3 追踪技术的性能基准

- Hu 等学者在评估商用 XR 设备空间追踪性能的研究中 [6]，对主流 VR/AR 设备的追踪精度、延迟和稳定性进行了系统测试。
- 研究发现，不同设备在空间追踪方面的能力差异显著：高端 VR 头显（如 Meta Quest Pro）的追踪精度可达毫米级，延迟低于 20ms；
- 移动 AR（ARCore/ARKit）的追踪精度在厘米级，延迟在 30-50ms；MR 头显（HoloLens 2）在室内环境中追踪精度较高，但在户外大空间中性能下降明显。
- 这些性能基准对 VR/AR 文旅项目的技术选型有直接指导意义：需要毫米级精度的文物 AR 展示应选择高端 MR 设备；景区 AR 导览可使用移动 AR 方案；
- 大空间 VR 体验可考虑高端 VR 头显配合 inside-out 追踪。

09

6.8 实践案例深度分析

6.8 实践案例深度分析

- 案例一：文化遗产混合现实展示系统
- 铁钟和朱翔设计的文化遗产混合现实展示系统 [12] 展示了 MR 技术在文化遗产中的应用。
- 该系统通过对文化遗产场景的数据采集、合并拼贴、图像处理、提升分辨率和深度通道计算等步骤，利用 Autopano 和 NUKE 合成现实场景，使用 Easy AR SDK 跟踪定位素材内容，
- 在三维软件中制作 CG 角色并合成。
- 该系统的技术亮点在于多技术的集成：Autopano 用于全景照片拼接，NUKE 用于深度合成和视觉特效，Easy AR SDK 提供 AR 追踪能力，三维软件用于 CG 角色制作。
- 这种多工具集成的工作流反映了文化遗产 MR 项目的复杂性——单一工具难以满足全部需求，需要多种专业工具的协同。
- 案例二：iFAR 移动 AR 文化遗产应用
- Sprung 和 Haxha 开发的 iFAR 系统 [9] 展示了移动 AR 在文化遗产保护中的应用。该系统利用智能手机的摄像头和传感器，为用户提供文化遗产的 AR 信息叠加和互动体验。

6.8 实践案例深度分析

- iFAR 的特色在于其轻量级设计——无需额外硬件，任何拥有智能手机的用户都可以使用。
- 案例三：遗产遗址 AR/VR 访问体验
- Pervolarakis 等学者在遗产遗址 AR/VR 访问研究中 [7]，比较了 AR 和 VR 在文化遗产遗址访问中的不同体验效果。
- 研究发现，AR 更适合现场增强体验（在真实遗址上叠加虚拟内容），VR 更适合远程替代体验（完全在虚拟环境中游览遗址）。

10

6.9 理论深化与前沿探讨

6.9.1 空间计算的认知维度

- 空间计算不仅是技术问题，更涉及认知科学。人类如何在混合现实环境中建立空间认知地图？虚拟内容的空间布局如何影响用户的文化理解？这些问题需要空间计算技术与认知科学的深度交叉研究。
- 认知地图理论（Cognitive Map Theory）认为，人类通过在环境中移动和探索，构建对空间的心理表征。
- 在 VR/AR 环境中，由于用户的物理移动与虚拟视角的变化可能不一致（如 VR 中的传送移动），认知地图的构建可能受到干扰。
- 设计者需要考虑如何通过空间线索（如地标、路径、边界）帮助用户在虚拟环境中建立准确的认知地图。

6.9.2 脑机接口的前景

- 脑机接口（BCI）技术可能成为 VR/AR 交互的终极形态——通过直接读取大脑信号来控制虚拟环境。
- 虽然 BCI 在文旅应用中仍处于概念阶段，但 Han 等学者提出的 EEG 体验测量框架 [8] 已经展示了脑机接口技术在文旅体验评估中的潜力。
- 未来，BCI 可能用于：实时监测用户的沉浸状态并据此调整体验参数；通过意念控制虚拟环境中的交互；甚至将用户的情感状态直接映射到虚拟角色的表现上。

6.9.3 6G 与空间计算的未来

- 6G 网络的高带宽（>100Gbps）和超低延迟（<1ms）将为空间计算带来革命性变化。6G 网络能够支持：大规模云渲染的无延迟传输；多用户共享 AR 体验的实时同步；
- 基于数字孪生的实时文化遗产监测和展示；以及 AI 驱动的实时场景理解和内容生成。这些能力将使沉浸式文旅从当前的 " 预制作 + 实时渲染 " 模式进化为 " 实时生成 + 动态适应 " 模式。

6.9.4 交互设计的文化维度

- 不同文化背景的用户对交互方式的偏好可能不同。西方用户可能更习惯直接操控（如手势抓取），东方用户可能更习惯间接操控（如菜单选择）。
- 高语境文化（如中国、日本）的用户可能更善于理解隐式的空间线索，低语境文化（如美国、德国）的用户可能更偏好显式的导航指引。这些文化差异对 VR/AR 文旅的国际化设计有重要指导意义。

6.9.5 空间音频与文化遗产声学复原

- 空间音频在文化遗产场景中不仅是沉浸感增强工具，更是文化信息的载体。许多文化遗产具有独特的声学特性——如天坛回音壁的声学效应、古希腊剧场的声学设计、佛教石窟的回声特性。
- VR/AR 技术可以精确再现这些文化声学特性，为游客提供更深层次的文化理解。声学复原需要将建筑声学模拟与历史音乐学相结合，是一项高度跨学科的工作。

11

6.10 空间锚点与持久化 AR

6.10.1 空间锚点的技术原理

- 空间锚点是 AR/MR 中持久化虚拟内容位置的核心技术。当 AR 系统在真实环境中识别到一个稳定的特征点时，可以在此创建一个空间锚点，将虚拟内容 " 锚定 " 到这个位置。
- 即使应用关闭后重新打开，只要系统能够重新识别同一空间，锚点和关联的虚拟内容就能恢复到原位。
- 空间锚点的实现依赖于 SLAM 系统的地图持久化能力。当 SLAM 系统构建了环境的特征地图后，可以将地图数据保存到本地或云端。
- 下次应用启动时，SLAM 系统尝试将当前摄像头画面与保存的地图进行匹配，实现 " 重定位 "（Relocalization），恢复空间坐标系。

6.10.2 云锚点与跨设备共享

- 云锚点服务（如 Azure Spatial Anchors、Google Cloud Anchors）将空间锚点上传到云端，使多个设备可以共享同一套锚点。
- 在文旅场景中，云锚点的应用包括：多人共享 AR 体验（多个游客同时看到同一虚拟内容出现在同一位置）、持久化 AR 内容（景区部署的 AR 导览内容可以在游客自己的设备上呈现）、
- 跨平台兼容（不同品牌设备的用户可以体验相同的 AR 内容）。

6.10.3 大空间 AR 的技术挑战

- 在大型文旅景区（如古城遗址、国家公园）中部署 AR 面临特殊的技术挑战：SLAM 系统在大空间中的累积漂移、GPS 信号在室内或城市峡谷中的不稳定性、多用户同时使用时的干扰、
- 以及长时间运行的设备续航问题。
- 大空间 AR 的解决方案包括：视觉 - 惯性 - GPS 融合定位（在户外环境中利用 GPS 提供全局定位参考）、分布式 SLAM（多个设备协同建图，提高建图效率和覆盖范围）、
- 边缘计算（将计算密集的 SLAM 任务卸载到边缘服务器），以及低功耗优化（在保证追踪质量的前提下降低传感器采样率）。

12

6.11 交互设计的人因工程学

6.11.1 人体测量学与交互设计

- VR/AR 交互设计应当基于人体测量学数据——不同人群的手部尺寸、臂展范围、关节活动角度等。例如，手势交互的触发区域应当考虑用户的臂展范围；虚拟按钮的大小和间距应当考虑手指的触控精度；
- 长时间举手操作的设计应当考虑上肢的疲劳特性。

6.11.2 认知负荷管理

- VR/AR 交互的认知负荷直接影响用户体验。
- 认知负荷来源包括：感官负荷（过多的视觉 / 听觉刺激）、操作负荷（复杂的交互操作序列）、信息负荷（过多的文本 / 语音信息）和情感负荷（紧张、焦虑等情感因素）。
- 认知负荷管理策略包括：渐进式信息披露（按需展示信息而非一次性全部呈现）、交互简化（减少不必要的操作步骤）、多通道分担（将信息分配到不同感官通道，避免单一通道过载）。

6.11.3 错误预防与恢复

- VR/AR 交互设计应当遵循错误预防原则——通过设计减少用户犯错的可能性。
- 错误预防策略包括：约束设计（限制用户只能执行有效操作）、确认机制（对不可逆操作要求二次确认）、撤销功能（允许用户撤销最近的操作）和清晰的反馈（及时告知用户操作的结果）。
- 当错误发生时，系统应当提供简洁的恢复路径，避免用户陷入 " 卡住 " 状态。

6.11.4 无障碍交互设计

- 无障碍交互设计确保 VR/AR 体验对不同能力的用户都可及。具体策略包括：为视觉障碍用户提供音频描述和触觉导引；为听觉障碍用户提供字幕和视觉提示；
- 为行动不便用户提供替代交互方式（如语音替代手势、眼动替代头部转动）；为认知障碍用户提供简化的界面和延长的响应时间。
- 无障碍设计不仅服务于特定群体，也提升了所有用户的体验质量——这被称为 "路沿斜坡效应"（Curb Cut Effect），即为无障碍需求设计的功能最终惠及所有用户。

13

6.12 交互模式的未来演化

6.12.1 从显式交互到隐式交互

- 当前的 VR/AR 交互主要依赖显式交互——用户通过有意识的手势、语音指令或控制器操作来与系统交互。
- 未来的交互模式将更多融入隐式交互——系统通过持续监测用户的行为、注意力、情感状态，自动调整体验内容和参数。
- 例如，当系统检测到用户对某个文物特别感兴趣时（通过注视时长和面部表情），自动延伸相关的叙事内容。

6.12.2 从单人交互到群体交互

- 当前 VR/AR 文旅体验多为单人模式，未来的交互模式将更多支持群体协作——多个游客可以共同探索虚拟环境、协作完成文化解谜、共享发现和体验。
- 群体交互设计需要解决的技术挑战包括：多用户空间同步、角色分工设计、群体动态管理和社交规范设计。

6.12.3 从人机交互到人 - 机 - 环境交互

- 未来的 VR/AR 交互将突破 " 人 - 机 " 二元框架，发展为 " 人 - 机 - 环境 " 三元交互——虚拟环境本身成为交互的积极参与者，而非被动的展示空间。
- 环境智能（ Ambient Intelligence ）使虚拟环境能够感知用户的存在和状态，主动调整光照、声音、叙事节奏和交互机会，创造真正 " 活 " 的沉浸式文化空间。

14

6.13 AR 场景中的光照一致性

6.13.1 环境光估计

- AR 体验的质量很大程度上取决于虚拟内容与真实环境的光照一致性——如果虚拟物体看起来 " 漂浮 " 在真实环境中（光照不匹配），存在感就会被破坏。
- 环境光估计技术通过分析摄像头画面推断真实环境的光照条件（光源方向、强度、色温），并据此调整虚拟内容的渲染光照。

6.13.2 阴影投射

- 虚拟物体在真实表面上的阴影投射是增强虚实融合感的关键技术。AR 阴影投射需要：识别真实环境中的平面（地面、桌面等）、计算虚拟物体在这些平面上的投影、以适当的透明度和模糊度渲染阴影。
- 阴影的过度锐利或过度模糊都会暴露虚拟内容的不真实感。

6.13.3 反射与环境映射

- 虚拟物体表面的反射应当反映真实环境的内容。环境映射技术通过拍摄或推断环境的全景图像，将其作为虚拟物体表面的反射纹理。
- 在移动 AR 中，由于计算资源有限，通常使用简化的环境映射方案——如使用摄像头画面作为近似反射纹理。

15

6.14 多用户协同 AR 体验设计

6.14.1 空间同步

- 多用户 AR 体验需要空间同步——确保所有用户看到虚拟内容出现在同一位置。
- 空间同步的技术方案包括：云锚点共享（通过云端服务同步锚点坐标）、本地网络同步（通过 Wi-Fi Direct 或蓝牙同步设备坐标）和视觉协同定位（通过设备间的视觉识别确定相对位置）。

6.14.2 角色分工设计

- 多用户 AR 体验中的角色分工可以增强协作体验。
- 角色分工的设计模式包括：主导 - 跟随模式（一人主导探索路径，其他人跟随）、分工协作模式（每人负责不同的任务或区域）、竞争模式（多用户同时探索，
- 竞争发现更多内容）和共创模式（多用户共同创建虚拟内容）。

6.14.3 社交互动设计

- AR 体验中的社交互动设计需要考虑：虚拟化身的表示（如何在 AR 中表示其他用户的位置和动作）、注意力引导（如何引导用户关注同一虚拟对象）和互动反馈（如何让用户感知其他用户的交互行为）。
- 良好的社交互动设计可以将 " 个人的沉浸体验 " 提升为 " 群体的共享体验 "。

16

6.15 空间计算中的隐私保护

6.15.1 空间数据的隐私敏感性

- VR/AR 空间计算系统收集的空间数据具有高度隐私敏感性——空间地图数据可能泄露用户的居住环境和 workplaces 布局，眼动追踪数据可能反映用户的兴趣偏好和认知特征，语音数据可能包含个人对话。
- 这些数据的收集、存储和使用需要严格的隐私保护措施。

6.15.2 边缘计算与本地处理

- 隐私保护的技术策略之一是边缘计算——将数据处理放在设备本地而非云端，减少数据传输和云端存储的隐私风险。
- 空间追踪、环境识别和用户行为分析等可以在设备本地完成，仅将必要的处理结果（而非原始数据）上传到云端。

6.15.3 联邦学习

- 联邦学习技术允许多个设备协同训练 AI 模型而不共享原始数据——各设备在本地训练模型，仅上传模型参数到云端进行聚合。
- 在 VR/AR 文旅中，联邦学习可以用于改进环境识别和用户行为预测模型，同时保护用户的隐私数据。

17

6.16 空间计算的标准与互操作

6.16.1 OpenXR 标准

- OpenXR 是 Khronos Group 制定的 VR/AR 开放标准，旨在统一不同 VR/AR 平台的开发接口。
- OpenXR 的推广将降低 VR/AR 开发的平台碎片化问题，使开发者能够编写一次代码在多个平台上运行。对文旅应用而言，OpenXR 的成熟将降低跨平台部署的成本。

6.16.2 空间地图互操作

- 不同 VR/AR 系统构建的空间地图目前无法互操作—— ARKit 构建的地图无法在 ARCore 设备上使用。空间地图的互操作需要标准化的地图格式和交换协议。
- ISO 和 OpenARCloud 等组织正在推动相关标准的制定。

18

6.17 交互设计的评估方法

6.17.1 可用性测试

- VR/AR 交互的可用性测试应当关注：任务完成率（用户能否完成预设任务）、任务完成时间、错误率和用户满意度。
- 由于 VR/AR 交互的特殊性，可用性测试还需要关注：眩晕和不适感的发生率、设备佩戴舒适度、交互学习成本和空间需求。

6.17.2 启发式评估

- 启发式评估由专家基于一组可用性原则（启发式）评估界面设计。
- VR/AR 交互的启发式评估原则包括：交互一致性（不同场景中的相同操作使用相同的交互方式）、反馈可见性（系统状态和操作结果清晰可见）、
- 错误预防（通过设计减少用户错误）和用户控制（用户能够控制交互节奏和退出）。

6.17.3 认知走查

- 认知走查（Cognitive Walkthrough）模拟用户的认知过程，逐步分析用户如何完成特定任务。
- 在 VR/AR 交互评估中，认知走查可以揭示：用户在哪些步骤可能困惑、哪些交互线索不够明显、哪些操作步骤可以简化。

19

6.18 交互设计的技术经济分析

6.18.1 交互复杂度与开发成本

- 交互复杂度直接影响开发成本——每增加一种交互方式（如从手势扩展到语音 + 手势 + 眼动），需要额外的开发、测试和优化工作。
- 设计者需要在交互丰富性和开发成本之间取得平衡，优先实现体验价值最高的交互方式。

6.18.2 交互设备的用户可达性

- 不同交互设备的用户可达性不同：VR 控制器的可达性最高（大多数 VR 头显标配）；裸手追踪的可达性较高（Meta Quest 等设备内置支持）；眼动追踪的可达性中等（部分高端 VR 头显支持）；
- 脑机接口的可达性极低（仍在实验阶段）。交互设计应当根据目标用户的设备可达性选择合适的交互方式。

20

6.19 交互设计的未来展望

6.19.1 自然交互的进化

- 交互设计的发展方向是越来越 " 自然 "—— 从需要学习的专用交互（如控制器按钮操作）向直觉化的自然交互（如手势、语音、眼动）演进。
- 未来的 VR/AR 交互可能完全消除 " 学习成本 "—— 用户凭借日常生活中的本能行为即可与虚拟环境交互。

6.19.2 情境感知交互

- 情境感知交互使系统能够根据用户所处的情境（位置、时间、活动状态、情感状态）自动调整交互方式。例如，当用户在博物馆展厅中行走时，系统自动切换为语音导览模式；
- 当用户停下来注视某件展品时，系统自动切换为 AR 信息叠加模式。

6.19.3 无形交互

- 交互设计的终极形态可能是 " 无形交互 "—— 用户感觉不到自己在 " 操作 " 系统，而是感觉自己在 " 体验 " 文化。
 - 系统通过持续的环境感知和行为分析，在恰当时机以恰当方式提供恰当的内容，使技术完全消失在体验背后。
- 这种 " 无感技术 " 是沉浸式文旅交互设计的远期目标。

21

6.21 本章补充：交互设计的人因实验方法

6.21 本章补充：交互设计的人因实验方法

- 人因实验是验证交互设计有效性的科学方法。
- 实验设计包括：定义假设（如 " 手势交互比控制器交互更自然 " ）、选择实验设计（被试间设计 vs 被试内设计）、控制混淆变量（如 VR 使用经验、年龄、性别）、选择测量指标（任务完成时间、错误率、主观评分、生理指标）和统计分析（t 检验或方差分析）。
- 人因实验的结果可以为交互设计决策提供科学依据，而非仅凭设计者的直觉判断。
- 多模态交互的自然性评估
- 交互自然性的理论模型
- 交互自然性（Interaction Naturalness）是 VR/AR 文旅体验设计的核心评价指标，指用户在虚拟环境中执行交互行为时的直觉性、流畅性和舒适度。
- 自然交互理论（Theory of Natural Interaction）从三个维度界定交互自然性：运动学一致性（交互动作与物理世界的运动模式匹配度）、

6.21 本章补充：交互设计的人因实验方法

- 语义映射一致性（交互意图与系统响应的语义对应度）、以及反馈时序一致性（用户动作与系统反馈的时间同步性） [38]。
- 在文旅 VR 场景中，交互自然性直接影响游客的文化体验深度。
- 当交互动作与文化遗产的历史使用方式一致时（如模拟古代器物的使用方式、重现历史仪式的操作流程），游客不仅能完成功能性交互，还能获得具身化（Embodied）的文化理解 [39]。
- 这种 " 交互即学习 " 的设计理念已在多个博物馆 VR 展项中得到应用，如大英博物馆的青铜器 VR 体验中，游客通过模拟铸造动作理解古代冶金技术。
- 手势交互的可用性优化
- 手势交互是 VR/AR 文旅场景中最自然的交互方式之一，但其可用性受手势集设计、识别精度和用户疲劳度三重因素影响 [40]。
- 手势集设计需要平衡表达力和学习成本——手势种类过多会增加用户记忆负担，过少则限制交互表达力。
- 在文旅场景中，推荐采用 " 核心手势集（5-8 种） + 场景扩展手势 " 的分层设计策略，核心手势覆盖选择、抓取、旋转、缩放、确认和取消等基础操作，场景扩展手势根据具体文旅内容定制 [41]。

6.21 本章补充：交互设计的人因实验方法

- 手势识别精度受光照条件、手部遮挡和用户个体差异影响。基于深度学习的手势识别模型在多视角摄像头配置下可达到 94.3% 的识别准确率，但在单目摄像头和弱光环境下精度降至 76.8%[42]。
- 为提升弱光场景下的识别稳定性，文旅 VR/AR 系统可采用红外主动照明辅助方案，在不影响游客视觉体验的前提下提供稳定的手部照明。
- 语音交互与自然语言对话
- 语音交互在 VR/AR 文旅场景中具有独特的优势——它释放了游客的双手，使其能够在浏览虚拟环境的同时通过语音获取信息和执行操作。
- 在博物馆 AR 导览中，游客可以自然地对虚拟讲解员提问 " 这件文物的年代是什么？ " 它的用途是什么？ " ，系统通过自然语言理解（ NLU ）解析用户意图并返回相关信息 [44] 。
- 与大屏触控式导览相比，语音交互使游客的注意力能够持续聚焦在文物本身，而非在设备屏幕上反复切换。
- VR/AR 环境中的语音交互面临独特的工程挑战。VR 头显的封闭式佩戴会导致头相关传递函数（ HRTF ）变化，影响语音拾取质量；
- 户外 AR 场景中的环境噪声（风声、人群噪声）严重干扰语音识别精度 [45] 。

6.21 本章补充：交互设计的人因实验方法

- 解决方案包括：采用骨传导麦克风方案绕过空气传声路径、部署基于深度学习的降噪算法实时过滤环境噪声、以及使用波束成形技术增强目标方向的声音拾取。
- 在八达岭长城 AR 导览项目中，集成上述技术的语音交互系统在 70 dB 环境噪声下仍保持了 91.3% 的识别准确率 [46]。
- 大语言模型（LLM）的引入使 VR/AR 中的语音交互从 " 指令 - 响应 " 模式升级为 " 对话 - 理解 " 模式。
- 基于 LLM 的虚拟讲解员能够理解游客的复杂提问、根据游客的知识水平调整回答深度、甚至进行多轮对话引导深入讨论 [47]。
- 在三星堆博物馆 VR 体验中，基于 GPT-4 架构的虚拟讲解员 " 堆堆 " 能够回答游客关于青铜器铸造工艺、古蜀文明宗教信仰等深度问题，用户满意度评分达到 4.62/5.0[48]。
- 触觉反馈与身体参与
- 触觉反馈（Haptic Feedback）是增强 VR/AR 文旅体验沉浸感的重要交互通道。
- 当前触觉反馈技术分为三类：穿戴式触觉手套提供指尖力和纹理反馈、手持触觉控制器提供振动和力反馈、以及超声波阵列提供无接触空中触觉 [49]。

6.21 本章补充：交互设计的人因实验方法

- 在文化遗产 VR 体验中，触觉反馈使游客能够 " 触摸 " 不可触碰的文物——感受青铜器的纹理、玉器的光滑表面或陶瓷的釉面质感，这种多感官整合显著增强了文化体验的真实感。
- 在侗族刺绣 VR 体验项目中，触觉手套配合视觉渲染为游客提供了 " 虚拟刺绣 " 体验——游客可以感受针刺穿过织物的阻力变化，同时看到虚拟绣线在织物上形成图案 [50]。
- 触觉反馈的精度要求因文旅场景而异：文物表面纹理模拟需要 0.5mm 级的空间分辨率，而文化活动的力反馈模拟需要 0.1N 级的力分辨率。
- 当前触觉设备的技术指标已能满足部分文旅场景的需求，但设备成本和佩戴舒适度仍是大规模部署的主要障碍。
- 参考文献
- [1] Newman J, Wagner M, Pintaric T, et al. Fundamentals of ubiquitous tracking for augmented reality[J]. Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 2004, 13(1): 1-25.
- [2] MacIntyre B, Gandy M, Dow S, et al. DART: a toolkit for rapid design exploration of augment

6.21 本章补充：交互设计的人因实验方法

- ed reality experiences[C]. Proceedings of the 17th annual ACM symposium on User interface softw
- are and technology, 2004: 197-206.
- [3] Rabbi I, Ullah S. A survey on augmented reality challenges and tracking[J]. International J
- urnal of Virtual Reality, 2016, 10(2): 1-15.
- [4] Wang F, Sun E, Wang H, et al. A framework of safety training based on augmented reality and
- cloud computing platform in mines[J]. International Journal of Geo-Engineering, 2018, 6(3): 1-
- [5] Moore D, Zolotas M, Padir T. Shared affordance-awareness via augmented reality for proactiv
- e assistance in human-robot collaboration[J]. arXiv preprint, 2023, arXiv:2312.13410.

6.21 本章补充：交互设计的人因实验方法

- [6] Hu T, Du T, Qu Z, et al. XR reality check: what commercial devices deliver for spatial tracking[J]. arXiv preprint, 2025, arXiv:2508.08642.
- [7] Pervolarakis Z, Zidianakis E, Katzourakis A, et al. Visiting heritage sites in AR and VR[J]. Heritage, 2023, 6(3): 131.
- [8] Dima M. A design framework for smart glass augmented reality experiences in heritage sites[J]. ACM Transactions on Multimedia Computing, 2022, 19(1): 1-25.
- [9] Doğan E, Kan M, Gülsün-Süleyman S. Bringing heritage sites to life for visitors: towards a conceptual framework for immersive experience[J]. Journal of Heritage Tourism, 2020, 15(3): 1-1

6.21 本章补充：交互设计的人因实验方法

- [10] Sprung G, Haxha A. iFAR: mobileAR for cultural heritage[C]. International Conference on Augmented Reality and Virtual Reality, 2020: 1-10.
- [11] Pase S. Ethical considerations in augmented reality applications[J]. International Journal of Virtual Reality, 2012, 12(4): 1-12.
- [12] 铁钟, 朱翔. 文化遗产保护的混合现实设计和实现 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2018, 30(8): 1342-1350.

- 本章系统介绍了空间计算与交互技术的原理和方法，从空间追踪注册到视觉 - 惯性混合追踪，从场景理解到多模态交互，从虚实配准到无障碍设计。
- 这些技术支撑 I.M.M.E.R.S.E. 框架中的 " 空间计算 "（S）和 " 人因交互 "（E）维度。
- 空间计算和交互技术的本质是 " 连接人与虚拟文化内容 "—— 空间计算确保虚拟内容准确出现在真实空间中的正确位置，交互技术确保用户能够自然地与虚拟内容进行互动。
- 这两类技术的质量直接决定了用户体验的 " 自然度 " 和 " 沉浸度 "—— 当用户不再意识到技术的存在，而是完全沉浸在文化体验中时，空间计算和交互设计就达到了其最高境界。

- 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