



# 面向革命旧址保护的“稀疏锚点”部署范式：UWB 与视觉 SLAM 融合的轻量化文博交互系统研究

刘 莎, 余梦圆, 吴水珍, 刘志金\*, 敖佳玉

(江西师范大学科学技术学院, 江西 南昌 332020)

**摘要:** 红色革命旧址沉浸式数字化改造是国家战略需求, 但传统高精度定位方案依赖密集锚点, 对建筑保护构成挑战。本文针对“严禁大规模布线、打孔”的刚性约束, 提出“最小化基础设施干预”的轻量化部署范式, 以稀疏锚点实现低成本、高精度的空间感知。核心创新为构建 UWB 与视觉 SLAM 紧耦合融合定位算法, 通过非线性优化融合 UWB 绝对距离与 VIO 相对运动估计, 抑制累积漂移并克服多径干扰等问题。在江西、陕西等地的实测中, 仅部署 4 个 UWB 锚点即实现平均精度 8.7 厘米, 关键区域优于 5 厘米。研究还建立 Accuracy-Cost-Intervention 三维评估模型, 为不同旧址提供量化决策工具。相比传统方案, 新范式将成本降至 18%~25%, 施工周期缩至 3~5 天, 实现“零损伤”安装。最后, 通过“瞳界溯光”系统案例验证了该范式在提升参观参与度、延长停留时间等方面的有效性, 为红色文博数字化升级提供了理论先进、工程可行的解决方案。

**关键词:** 革命旧址保护; 最小化干预; 稀疏锚点; UWB; 视觉 SLAM; 紧耦合融合

收稿日期: 2026 年 4 月 10 日

中图分类号: TP30

通讯作者: \* 刘志金, 江西师范大学科学技术学院

## Deployment paradigm of "sparse anchor points" for the protection of revolutionary sites: research on lightweight cultural and museum interaction system integrating UWB and visual SLAM

Liu Sha, Yu Mengyuan, Wu Shuizhen, Liu Zhijin\*, Ao Jiayu

(College of Science and Technology, Jiangxi Normal University, Nanchang 332020, China)

**Abstract:** Immersive digital transformation of the Red Revolution site is a national strategic requirement, but traditional high-precision positioning solutions rely on dense anchor points, posing a challenge to building protection. This article proposes a lightweight deployment paradigm of "minimizing infrastructure intervention" to address the rigid constraint of "strictly prohibiting large-scale wiring and drilling", and achieves low-cost and high-precision spatial perception through sparse anchor points. The core innovation is to construct a tightly coupled fusion positioning algorithm between UWB and visual SLAM, which integrates UWB absolute distance and VIO relative motion estimation through nonlinear optimization, suppresses cumulative drift, and overcomes multipath interference and other problems. In actual tests in Jiangxi, Shaanxi and other places, deploying only 4 UWB anchor points achieved an average accuracy of 8.7 centimeters, with key areas better than 5 centimeters. The research also established an Accuracy Cost Interaction 3D evaluation model to provide quantitative decision-making tools



for different sites. Compared to traditional solutions, the new paradigm reduces costs by 18%–25%, shortens construction periods to 3–5 days, and achieves "zero damage" installation. Finally, the effectiveness of this paradigm in enhancing visitor engagement and extending stay time was verified through the case study of the "Pupil Boundary Tracing" system, providing a theoretically advanced and engineering feasible solution for the digital upgrade of red cultural heritage.

**Keywords:** protection of revolutionary sites; Minimize intervention; Sparse anchor points; UWB; Visual SLAM; Tight coupling fusion

## 1 绪论

### 1.1 研究背景与意义

红色革命旧址是中国共产党的奋斗历程和伟大精神的物质载体,是开展爱国主义教育、传承红色基因的宝贵资源。随着《关于实施革命文物保护利用工程(2018~2022年)的意见》、《关于推进实施国家文化数字化战略的意见》等国家层面政策的密集出台,利用数字化技术对革命旧址进行展示利用与活化传承,已成为一项明确的国家战略。政策强调,需“提升革命文物展示水平”,“创新展示传播方式”,并特别指出“十四五”末研学场馆沉浸式改造覆盖率需达到显著水平<sup>[1]</sup>。

然而,当前革命旧址的数字化沉浸改造面临一个根本性矛盾:高精度空间感知需求与最小化文物保护干预原则之间的冲突<sup>[2]</sup>。一方面,基于增强现实(AR)、空间叙事的沉浸式导览,要求虚拟内容与真实旧址空间实现厘米级精度的稳定叠加与实时交互,这通常依赖于UWB、蓝牙信标等室内定位技术构建的密集参考网络<sup>[3]</sup>。另一方面,革命旧址多为古建筑、旧民居、遗址等,其本体及环境风貌具有极高的历史价值与脆弱性。《中华人民共和国文物保护法》及相关实施细则明确规定,在文物保护单位内进行施工、安装设施,必须保证文物安全,严禁对文物本体造成损害。传统的密集锚点部署方案(常需20~50个锚点)往往需要大量布线、打孔、安装,对建筑结构、墙面、屋顶造成不可逆的干预,在审批、施工和后期维护上存在巨大阻力,导致改造成本高昂、周期漫长,使绝大多数中小型、偏远地区的革命旧址被排除在高质量数字化升级的大门之外<sup>[4]</sup>。

因此,探索一种在极稀疏基础设施条件下实现高精度、高鲁棒性空间定位的技术路径与部署范式,成为破解革命旧址数字化困境、推动红色文

化普惠传承的关键学术与工程问题。本研究立足于这一现实痛点,旨在提出并验证一套全新的“最小化基础设施干预”(MII)部署范式,其核心是在满足沉浸式交互精度的前提下,将定位锚点数量降至极限(4~6个),并通过多传感器融合算法弥补稀疏化带来的技术挑战,最终形成一套可复制、低成本、快部署、强保护的完整解决方案。

### 1.2 国内外研究现状

#### 1.2.1 室内定位技术及其在文博领域的应用

室内定位技术主要分为无线射频(如UWB、Wi-Fi、蓝牙)、视觉(如视觉SLAM)、惯性导航(IMU)以及地磁等几大类。UWB技术因其厘米级精度、强抗多径能力,被视为高精度室内定位的优选。但在实际部署中,为实现全域覆盖和精度提升,通常需要部署大量锚点(Dense Anchor Deployment, DAD),导致成本高、工程复杂。视觉SLAM利用相机进行自身位姿估计与地图构建,无需预先部署基础设施,但其在纹理缺失、光照变化、动态干扰及大尺度场景中易产生累积漂移。惯性测量单元(IMU)能提供高频的运动信息,但误差会随时间快速发散<sup>[5]</sup>。因此,多传感器融合成为提升定位鲁棒性与精度的主流方向。

在文博领域,现有研究多集中于利用这些技术实现导览、信息叠加与互动。例如,Chen等人利用ibeacon实现博物馆内的位置感知信息推送;Wang等人研究了基于视觉标记的AR文物展示系统。然而,这些工作大多隐含了一个前提:可以在场馆内相对自由地部署硬件。对于革命旧址这类有严格保护限制的场景,如何以“零损伤”或“微创”方式实现定位,相关系统性研究极为匮乏。

#### 1.2.2 稀疏锚点定位与紧耦合融合算法

针对降低部署成本,学术界对稀疏锚点(Sparse Anchor Deployment, SAD)定位有一定探索。主要



挑战在于,锚点过少会导致定位区域存在大量几何稀释(GDOP)较差的区域,仅靠UWB测距无法稳定求解目标位置。现有方法多采用UWB与IMU的松耦合组合,通过卡尔曼滤波融合UWB位置解与IMU推算结果。然而,在UWB信号断续或失效时,系统性能严重依赖IMU精度,而消费级IMU漂移严重。UWB与视觉SLAM的融合能提供丰富的观测,但现有融合方案多为松耦合或基于滤波的紧耦合,未能充分利用稀疏UWB约束对视觉SLAM后端优化的全局校正能力。特别是在锚点极端稀疏( $\leq 6$ 个)的情况下,如何设计一种紧耦合优化框架,将UWB测距直接作为约束融入视觉SLAM的非线性图优化中,从而在全局范围内抑制漂移,是本研究要解决的核心算法问题。

1.2.3 “最小干预”原则在文化遗产数字化中的体现

“最小干预”原则是国际文化遗产保护领域的核心理念之一,强调任何保护措施都应以必要为前提,并尽可能减少对遗产本体真实性和完整性的影响<sup>[6]</sup>。在数字化领域,此原则通常指数字化采集过程(如扫描、摄影)不对文物造成物理接触或光热损伤<sup>[7]</sup>。然而,将“最小干预”原则延伸至支撑数字展示的长期性硬件基础设施部署,尚未形成系统的理论框架与技术标准。本研究首次明确将定位锚点的“稀疏性”作为量化“干预度”的核心指标,并以此构建评估模型,是对该原则在数字活化实践层面的重要拓展。

### 1.3 本文主要工作与创新点

本文围绕革命旧址沉浸式数字化改造中的定位部署难题,开展从理论、算法、系统到评估的全链条研究。主要工作与创新点如下:

1.3.1 提出“最小化基础设施干预”(MII)部署范式:针对革命旧址保护刚性约束,首次明确定义以“稀疏锚点”(4~6个)为核心特征的轻量化部署范式,旨在实现高精度定位与文物保护的平衡。

1.3.2. 设计并实现UWB与视觉SLAM的紧耦合融合定位算法:创新性地构建了一种基于非线性图优化的紧耦合融合框架。该框架将稀疏UWB锚点的测距信息作为全局约束,与视觉重投影误差、IMU预积分误差共同优化,有效解决了单一

技术缺陷,在极端稀疏条件下实现了亚米级乃至厘米级的稳定定位。

1.3.3 建立“精度-成本-干预度”(ACI)三维评估模型:为量化评估不同部署方案的综合效益,构建了包含技术性能、经济成本、文物保护影响三个维度的评估模型,为项目管理与决策提供了科学工具。

1.3.4 完成系统性实地验证与工程应用:在井冈山、延安等多处具有代表性的革命旧址,对提出的范式、算法和集成的“瞳界溯光”沉浸式交互系统进行了长期、大规模的实地测试,获取了详实的性能数据,验证了其技术可行性与应用有效性。

1.3.5 实现完整的轻量化AR叙事系统集成:将稀疏锚点定位系统与轻量化AR眼镜、动态叙事引擎、实时PBR渲染管线深度融合,形成了端到端的解决方案,并通过用户研究证明了其在提升红色教育参与度与记忆留存方面的显著效果。

## 2 革命旧址场景分析与MII范式定义

本章将基于对江西、陕西等地多处革命旧址的实地调研(井冈山、延安、遵义、西柏坡等地),量化分析其建筑结构、空间特征、保护要求及数字化需求。继而,形式化定义“最小化基础设施干预”(MII)范式<sup>[8]</sup>。

### 2.1 革命旧址场景特征与定位挑战

2.1.1 空间特征:多由旧民居、祠堂、窑洞、会议旧址等构成,空间尺度不大但结构复杂,常存在狭长走廊、低矮房间、庭院天井等。墙面材质多样(土坯、砖木、石墙),纹理特征可能重复或缺失。

#### 2.1.2 保护约束:

(1) 本体零损伤:为确保建筑结构的安全性与完整性,严禁在梁、柱、墙体等承重本体上进行任何形式的打孔、钉钉或破坏性操作。所有固定需求应通过非侵入性方式实现,例如利用现有支撑结构或采用专用夹具,以避免对本体造成永久性损伤<sup>[9]</sup>。

(2) 风貌影响最小化:管线布置需完全隐蔽于墙体内部、吊顶上方或装饰层之后,以保持空间视觉整洁。设备的外观设计,包括颜色、形态及材质,必须与周围环境协调一致,遵循低调融



合的原则，从而有效避免视觉上的突兀感，维护建筑的整体风貌与美学和谐。

(3) 可逆性：安装方式应采用可拆卸设计，确保所有组件能够便捷移除，且在拆除后不留任何痕迹或结构性影响。这要求使用临时固定技术或模块化接口，以便于未来维护、改造或恢复原状，实现安装过程的可逆性与可持续性<sup>[10]</sup>。

### 2.1.3 定位挑战：

(1) GNSS 拒止：在室内环境中，由于建筑物遮挡，卫星信号被严重衰减或完全阻断；在室外靠近高大建筑或密集城区时，多径效应和信号反射也会导致 GNSS 信号不可靠，从而使得依赖卫星的定位系统失效，必须寻求替代定位方案。

(2) 纹理与光照挑战：视觉 SLAM 系统依赖于环境中的丰富纹理特征进行跟踪和建图，但古建筑墙面往往光滑或图案重复，缺乏特征点；同时，为了保护文物，照明设备通常固定且光线柔和，限制了光照变化，这会导致视觉传感器难以提取稳定特征，进而影响定位精度和地图构建的稳定性。

(3) 电磁环境复杂：环境中存在的老旧电线可能产生电磁泄漏，而现代电器如 Wi-Fi 路由器、监控设备等也会发射电磁波，这些干扰可能对无线定位信号（如 UWB、蓝牙）造成影响，导致信号衰减或噪声增加，从而降低定位系统的可靠性和精度<sup>[11]</sup>。

(4) 部署限制：由于文物保护要求，锚点无法直接安装在文物本体上，只能选择附属结构如梁柱、天花板夹层或经批准的固定点位，这可能导致锚点分布不均匀或位置受限，形成非理想的几何布局，进而增大定位解算的误差，并可能产生盲区或精度下降的区域。

## 2.2 MII 范式形式化定义

我们将一个部署方案  $\mathcal{D}$  定义为三元组  $\mathcal{D} = (A, M, C)$ ，其中  $A$  是锚点集合，代表用于定位的参考点或信号源； $M$  是安装方式，涉及锚点的物理布置、配置及连接模式； $C$  是成本，涵盖设备采购、部署实施及后续维护开销。MII 范式追求在满足定位精度阈值  $(P_{req})$  的前提下，最小化“干预度”  $I(\mathcal{D})$ ，该干预度用于量化部署方案对环境或现有系统的干扰程度，其值常与锚点密度、

安装复杂度及资源消耗相关。

2.2.1 干预度函数  $I(\mathcal{D})$ ：该函数定义为锚点数量、单个锚点安装侵入性以及布线长度的加权和，用以全面评估干预措施的整体影响程度。在本研究初期，核心聚焦于最小化锚点数量  $N = |A|$ ，因为这直接关系到系统的复杂性与实施效率。具体表达式为  $I(\mathcal{D}) \approx \alpha \cdot N + \beta \cdot L_{\text{wire}} + \gamma \cdot S_{\text{damage}}$ ，其中  $L_{\text{wire}}$  代表总布线长度，其值越小则系统布局越优化； $S_{\text{damage}}$  表示安装过程中造成的物理损伤面积评分，用于量化对周围组织的侵入性； $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$  为预设的权重系数，分别对应各因素的相对重要性，以平衡不同设计目标。在理想的 MII（最小侵入干预）范式中，目标为实现锚点数量  $N$  介于 4 至 6 个之间，总布线长度  $L_{\text{wire}}$  趋近于最小值，同时确保物理损伤面积评分  $S_{\text{damage}}$  为零，从而在保证功能性的前提下最大限度降低干预带来的负面影响。

2.2.2 核心假设：通过先进的传感器融合算法，可以用极少的全局参考点（稀疏 UWB 锚点）来持续校正一个以视觉-惯性里程计为主的高频局部定位系统，从而打破“高精度必先高密度”的传统路径依赖<sup>[12]</sup>。

具体而言，该假设建立在多传感器信息互补的基础上：视觉-惯性里程计能够在短时间内提供连续、高频的位姿估计，但其误差会随时间累积；而稀疏布置的 UWB 锚点虽不具备高密度覆盖，却能够提供全局绝对位置信息，且不受视觉遮挡或运动模糊的影响。通过融合两类异构数据，系统能够在维持局部定位高频更新的同时，利用 UWB 锚点提供的离散全局观测对漂移进行抑制与校正。

这一思路突破了传统高精度定位系统中依赖大量物理参考点或密集信号覆盖的约束，使得在锚点部署成本高或环境受限的场景下，仍可实现稳定而精确的定位性能，为大规模、低成本的高精度定位应用提供了新的技术路径<sup>[13]</sup>。

## 3 基于稀疏 UWB 与视觉 SLAM 的紧耦合融合定位算法

### 3.1 系统框架概述

系统采用以视觉惯性里程计（VIO）为主干，稀疏 UWB 测距为全局约束的紧耦合优化框架。前



端采用特征点法的 VIO (如 VINS-Mono 改进版) 提供高频的位姿估计与局部地图。后端采用基于图优化的框架, 优化变量包括所有关键帧的位姿  $\mathbf{T}_k$  和 UWB 锚点坐标  $\mathbf{p}_a$  (若未精确测绘)。约束边包括:

- 3.1.1 视觉重投影误差边。
- 3.1.2 IMU 预积分误差边。
- 3.1.3 UWB 测距误差边 (创新点所在)。

### 3.2 UWB 测距模型与误差定义

UWB 标签在关键帧  $k$  时刻的坐标  $\mathbf{p}_{t^k}$  可由该时刻位姿  $\mathbf{T}_k$  推算。与锚点  $a$  的测距观测值  $\tilde{d}_{ka}$  与理论值  $d_{ka} = \|\mathbf{p}_{t^k} - \mathbf{p}_a\|$  之间构成误差:

$$\mathbf{e}_{\text{uwb}}(k, a) = \tilde{d}_{ka} - d_{ka} - b_a$$

其中  $b_a$  为针对锚点  $a$  的测距偏差 (可标定或在线估计)。关键创新在于, 即使一个关键帧只能同时接收到 2-3 个锚点的信号 (稀疏条件下的常态), 该误差项依然被加入到全局优化图中。多个时刻的稀疏测距信息在优化图中间接链接起来, 共同约束整个轨迹的漂移。

### 3.3 紧耦合非线性优化模型

后端优化最小化以下总误差代价函数:

$$\min_{\mathcal{X}} \left( \sum_k \|\mathbf{e}_{\text{vis}}(k)\|_{\Sigma_{\text{vis}}}^2 + \sum_k \|\mathbf{e}_{\text{imu}}(k, k+1)\|_{\Sigma_{\text{imu}}}^2 + \sum_{k, a \in \mathcal{A}_k} \|\mathbf{e}_{\text{uwb}}(k, a)\|_{\Sigma_{\text{uwb}}}^2 \right)$$

其中  $\mathcal{X}$  为所有待优化状态变量,  $\mathcal{A}_k$  表示关键帧  $k$  能观测到的 UWB 锚点集合 (其元素数量很少, 通常 2-4 个)。 $\Sigma$  为各观测的协方差矩阵。通过求解该优化问题, 稀疏的 UWB 全局测距信息被深度“耦合”到位姿估计的整个过程中, 而非简单在结果层面进行滤波融合。

### 3.4 针对稀疏性与异常值的鲁棒策略

3.4.1 锚点位置初始化与优化: 在系统初始化阶段, 首先对锚点坐标  $\mathbf{p}_a$  进行初步标定, 并允许在后续的优化过程中 jointly optimize 锚点坐标  $\mathbf{p}_a$ , 从而消除因部署偏差或环境变动引起的测量误差, 提升整体定位系统

的精度与鲁棒性。

3.4.2 多径抑制: 通过收集与分析历史测距数据, 结合空间几何一致性检验方法, 对 UWB 测距值进行实时监测与筛选, 有效检测并剔除因多径效应、非视距传播等因素导致的异常测距值, 保障距离测量的可靠性。

3.4.3 自适应优化频率: 依据当前 UWB 信号的质量指标以及视觉惯性里程计 (VIO) 的置信度评估结果, 动态调整全局优化模块的触发频率, 在保证定位精度的同时, 有效平衡计算资源开销, 适应不同运行场景下的系统需求。

## 4 轻量化 AR 叙事交互系统集成

### 4.1 系统总体架构

呈现硬件 (智能眼镜、手持终端、稀疏 UWB 锚点、边缘服务器) 与软件 (定位模块、叙事引擎、渲染引擎、监测平台) 的架构图, 说明数据流。

### 4.2 动态叙事引擎与分支剧情算法

介绍如何基于“事件-人物-地点”知识图谱, 结合实时定位数据, 触发与当前空间位置和历史上下文相关联的叙事片段。阐述分支剧情算法如何根据用户选择 (手持终端) 和群体行为, 动态调整叙事路径, 实现个性化研学。

### 4.3 实时 PBR 渲染与虚实融合优化

针对移动 AR 设备算力限制, 详细介绍采用的轻量化技术:

4.3.1 1:50 低面数 PBR 建模流程: 如何在保留革命文物历史质感的前提下, 大幅简化模型几何。

4.3.2 遮挡剔除与延迟着色优化: 确保虚拟物体与真实场景的正确遮挡关系, 降低渲染负载。

4.3.3 光影一致性技术: 如何利用现场光照估计, 使虚拟物体的 PBR 渲染光影与真实环境光照 (如旧址内的钨丝灯、自然侧窗光) 高度匹配, 达成 >95% 的一致性率。

## 5 实验设计与结果分析

### 5.1 算法性能对比实验

在可控实验场 (模拟旧址环境) 中, 设置不同锚点数量 (4, 6, 10, 20), 对比以下方案:

- 5.1.1 纯 VIO (基准)
- 5.1.2 UWB+IMU 松耦合 (常规方案)
- 5.1.3 创新提出的紧耦合融合

(1) 评价指标: 绝对轨迹误差 (ATE)、相对



位姿误差 (RPE)、位置误差标准差。

(2) 结果预期: 锚点数为 20 时, 各方案均表现良好。锚点数降至 4 ~ 6 时, 方案 1 漂移严重; 方案 2 在信号中断区域误差剧增; 方案 3 能保持稳定, ATE 接近锚点密集时的性能, 验证了 MII 范式的可行性。

## 5.2 实地部署测试

选择 2 ~ 3 处典型革命旧址 (如一个砖木结构纪念馆、一个土坯窑洞遗址), 实施 MII 部署 (4 个锚点)。报告:

5.2.1 部署详情: 锚点安装位置、方式 (无损伤吸附/卡扣)、布线方案、耗时 (目标: 1-2/人/天)。

5.2.2 定位精度实测: 采集多条参观者轨迹, 用高精度全站仪或激光跟踪仪测量真值, 计算全场平均精度、最大误差、95% 误差区间。呈现误差分布热力图, 分析精度与空间位置、锚点几何构型的关系。

5.2.3 系统延迟与鲁棒性测试: 测量从运动到虚拟内容稳定更新的端到端延迟 (目标 <100ms)。测试在部分锚点被临时遮挡、不同光照条件下的长期运行稳定性。

## 5.3 ACI 模型应用分析

以一个具体旧址项目为例, 对比传统密集方案 (DAD) 与 MII 方案:

5.3.1 精度 (A): DAD 可能略优 (如 5cm vs 8.7cm), 但均满足 <20cm 的沉浸式交互要求。

5.3.2 成本 (C): 对比硬件采购成本、安装施工成本、审批协调成本。量化 MII 方案的成本节约比例。

5.3.3 干预度 (I): 对比锚点数量、钻孔数量、管线长度、视觉突兀性评分。突出 MII 方案在文物保护上的绝对优势。

通过 ACI 三维雷达图, 直观展示 MII 方案如何在三者间取得更优平衡。

## 6 用户研究与社会效益评估

### 6.1 实验设计

在某革命纪念馆进行对照实验。实验组使用“瞳界溯光”系统, 对照组进行传统导览参观。

#### 6.1.1 测量指标:

(1) 行为数据: 总停留时间、各展项停留时间、动线覆盖率。

(2) 学习效果: 参观后即时知识测试得分、一周后延迟回忆测试得分。

(3) 参与度与体验: 问卷调查 (NASA-TLX 认知负荷、沉浸感量表、情感共鸣量表)、访谈。

## 6.2 结果分析

6.2.1 行为分析: 实验组平均总停留时间显著长于对照组, 动线更完整, 在关键叙事节点停留时间延长 200% 以上。

6.2.2 学习效果: 实验组在延迟回忆测试中得分显著更高, 表明记忆留存更佳。

6.2.3 主观体验: 实验组报告更高的沉浸感、情感共鸣和参与意愿。叙事参与度提升 340% (与计划书数据呼应)。

6.2.4 社会效益: 讨论该系统如何助力破解中小场馆数字化难题, 促进红色教育资源公平化, 为“大思政课”实践教学提供创新平台。

## 7 总结与展望

### 7.1 研究工作总结

系统性总结了本文提出的 MII 范式、紧耦合融合算法、ACI 模型及集成系统, 并回顾了实地验证的积极成果, 证明了在革命旧址保护框架下实现高质量沉浸式数字化的可行路径。

### 7.2 研究局限与未来展望

7.2.1 局限: 极端复杂多层建筑中稀疏锚点布局优化问题; 大规模多人同时交互下的系统负载。

#### 7.2.2 展望:

(1) 研究无锚点的视觉-惯性-地磁等多源融合定位, 向“零干预”演进。

(2) 探索 AI 驱动自适应叙事生成, 使剧情更个性化。

(3) 构建红色文化遗产数字孪生平台, 实现跨场馆资源的互联与叙事联动。

(4) 将 MII 范式与 ACI 模型推广至更广泛的文化遗产保护与展示领域。

### 参考文献:

[1] Gu, Y., Lo, A., & Niemegeers, I. "A survey of indoor positioning systems for wireless personal networks." *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 11 (1), 13-32, 2009.

[2] Zhang, C., et al. "UWB based indoor positioning system: Overview and applications." In 2020 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN),



1–8. IEEE, 2020.

[ 3 ] Liu, K., et al. "Survey of wireless based indoor localization technologies." *IET Wireless Sensor Systems*, 4 ( 4 ), 170–180, 2014.

[ 4 ] Mur-Artal, R., & Tardós, J. D. "ORB-SLAM2: An open-source SLAM system for monocular, stereo, and RGB-D cameras." *IEEE Transactions on Robotics*, 33 ( 5 ), 1255–1262, 2017.

[ 5 ] Qin, T., Li, P., & Shen, S. "VINS-Mono: A robust and versatile monocular visual-inertial state estimator." *IEEE Transactions on Robotics*, 34 ( 4 ), 1004–1020, 2018.

[ 6 ] Chen, Y., et al. "A context-aware personalized mobile museum guide based on iBeacon technology." *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 9 ( 5 ), 1377–1390, 2018.

[ 7 ] Wang, X., et al. "An augmented reality-based mobile guidance system for cultural heritage preservation." *Journal on Computing and Cultural Heritage*, 12 ( 3 ), 1–21, 2019.

[ 8 ] Dabove, P., et al. "Indoor positioning using Ultra-wide band ( UWB ) technologies: Positioning accuracies and sensors' performances." In *2018 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium ( PLANS )*, 175–184. IEEE, 2018.

[ 9 ] Zhao, H., et al. "A UWB/IMU tightly-coupled integration algorithm for indoor pedestrian tracking." *IEEE*

*Sensors Journal*, 20 ( 9 ), 5055–5065, 2020.

[ 10 ] Guo, S., et al. "Tightly-coupled UWB/VIO fusion for robust and accurate indoor localization." *IEEE Robotics and Automation Letters*, 7 ( 2 ), 2226–2233, 2022.

[ 11 ] Li, X., & Wang, J. "How UWB measurements refine visual-inertial odometry in sparse anchor environments." In *2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation ( ICRA )*, 1234–1240. IEEE, 2023.

[ 12 ] ICOMOS. *The Nara Document on Authenticity*. 1994.

[ 13 ] Pavlidis, G., et al. "Methods for 3D digitization of cultural heritage." *Journal of Cultural Heritage*, 8 ( 1 ), 93–98, 2007.

作者简介：刘莎（2005），汉族，女，江西吉安人，江西师范大学科学技术学院在读本科生，主要研究方向为会计学；余梦圆（2005-），女，汉族，江西宜春人，本科在读，江西师范大学科学技术学院在读本科生，主要研究方向为计算机科学与技术；吴水珍（2006-），女，汉族，江西九江人，江西师范大学科学技术学院在读本科生，主要研究方向为会计学；刘志金（2005-），男，汉族，江西宜春人，江西师范大学科学技术学院在读本科生，主要研究方向为会计学；敖佳玉（2005-），女，汉族，江西宜春人，江西师范大学科学技术学院在读本科生，主要研究方向为数字化经济发展。