

ICS 35.240.01
CCS L 79

T/ZGCMCA

中国移动通信联合会团体标准

T/ZGCMCA 025—2025

行进式 VR 大空间定位与交互技术规范

Locomotive-Based VR Large-Space Positioning and Interaction Technical
Specifications

2026 - 1 - 13 发布

2026 - 01 - 25 实施

中国移动通信联合会 发布

目 次

前 言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 缩略语	2
5 基本原则	2
6 技术要求	4
7 安全要求	10
附录 A	11

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国移动通信联合会提出并归口。

本文件起草单位：咪咕新空文化科技（厦门）有限公司、清华大学、北京邮电大学、中国国家博物馆、中国科学院上海微系统与信息技术研究所、北京微视威信息科技有限公司、中国联合网络通信有限公司、中兴通讯股份有限公司、南昌菱形信息技术股份有限公司、上海元数嗨嗨科技有限公司、西安大千迷境科技有限公司、福建百宝图科技有限公司、新轴动画科技发展（北京）有限公司、共生生（厦门）科技有限公司、浙江大学、光线云（杭州）科技有限公司、大理元智文旅科技有限责任公司、山西辰涵数字科技股份有限公司、江苏击中未来文化科技有限公司、北京通感科技有限公司、上海青瞳视觉科技有限公司、北京兴云数科技术有限公司、北京工业大学、中国移动通信联合会区块链与数据要素专业委员会。

本文件主要起草人：张小磊、杨定康、张松海、乔秀全、李华飙、史雪振、高岩、盖孟、马睿智、江洪峰、于涛、王玉旺、张贺、苏横军、梁雅俊、胡志超、唐天、朱小晶、郭建伟、吴勇、王锐、孙卿、吴婷婷、陈鹏鹏、代金梅、曹闵、胡世豪、贾禹、黄莹晶、郭雨晨、郭宏蕾、温正棋、赵鑫、何伟、陈晓华。

本文件为首次发布。

行进式 VR 大空间定位与交互技术规范

1 范围

本文件规定了行进式VR大空间定位与交互的基本要求、技术关联性、技术要求、安全要求等内容。

本文件适用于利用智能穿戴设备的行进式VR大空间定位与交互技术的设计和开发，涵盖高精度定位、动态渲染、多用户协同及虚实融合等核心技术场景，智能穿戴设备参考附录A。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB 4943.1-2022 音视频、信息技术和通信技术设备 第1部分：安全要求

GB/T 22239-2019 信息安全技术 网络安全等级保护基本要求

GB/T 28448-2019 信息安全技术 网络安全等级保护测评要求

GB/T 35273-2020 信息安全技术 个人信息安全规范

GB/T 42396-2023 移动终端人一系统交互工效学 触控界面感知流畅性

GB/T 43697-2024 数据安全技术 数据分类分级规则

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

VR大空间 Location-Based Entertainment VR

通过高精度空间定位、动态渲染、多用户交互及虚实融合等技术，在物理空间中构建可支持用户自由移动、实时交互的沉浸式虚拟现实环境，实现物理空间与虚拟场景的无缝映射与协同感知，并满足多人协同、低延迟、高保真等核心需求的技术系统。

3.2

同步定位与地图构建 simultaneous localization and mapping ;SLAM

通过传感器数据实时构建环境地图并确定自身位置的技术。

3.3

触觉反馈 haptic feedback

通过力、振动、温度或运动等物理刺激，模拟或还原用户与虚拟/远程对象交互时的触感信息，以增强沉浸感与操作真实性的技术手段。

3.4

响应时延 response latency

从用户完成交互至系统向用户呈现首个可感知反馈的时间间隔。

3.5

动效时延 animation duration

用户在操作人机交互工程时，从输入触控指令，通过界面反馈输出起（即原页面刚开始变化），到新页面完全出现，其窗口充满目标区域这一过程的时长。

注：此时内容不一定加载完成，以窗口充满目标区域为准。

[来源：GB/T 42396-2023, 3.5, 有修改]

3.6

完成时延 completion latency

户操作人机交互工程时，从输入触控指令到界面完全刷新结束并达到可以阅读的稳定状态的时间。

[来源：GB/T 42396-2023, 3.6, 有修改]

3.7

动作重定向 motion redirection

通过对用户动作的微小操控，使物理空间与虚拟空间在结构相异的情况下能够协调运行，最大化虚拟场景的覆盖率与可用性，提升物理空间利用率。

3.8

坪效率 floor efficiency

通过动作重定向、空间复用等技术，在单位物理面积内所能实现的有效虚拟交互范围或用户容量的提升比率。

3.9

虚拟场景覆盖率 virtual scenario coverage

虚拟场景中用户可自由到达并进行基础交互的区域面积，占场景总设计面积的比例。

3.10

首响应时延 first response latency

从输入语音开始到反馈语音识别结果出现第一个字的时间。

3.11

实时因子 real-time factor

语音识别交互时间与语音输入时间的比值。

4 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

API: 应用程序编程接口 (Application Programming Interface)

DTLS: 数据报传输层安全协议 (Datagram Transport Layer Security)

HDR: 高动态范围 (High Dynamic Range)

LOD: 层次细节 (Level Of Detail)

MQTT: 消息队列遥测传输 (Message Queuing Telemetry Transport)

PBR: 物理渲染 (Physically Based Rendering)

QoS: 服务质量 (Quality of Service)

WebRTC: 网页即时通信 (Web Real-Time Communication)

VR: 虚拟现实 (Virtual Reality)

SDK: 软件开发工具包 (Software Development Kit)

TLS: 传输层安全协议 (Transport Layer Security)

5 基本原则

5.1 易用性

易用性应满足以下要求：

- a) 用户界面设计应简洁直观，符合人体工程学原理，操作流程清晰易懂；
- b) 交互元素的尺寸、颜色和布局应便于用户快速识别和操作，并提供及时有效反馈机制；
- c) 宜提供多语言界面，以满足不同用户的语言需求；
- d) 宜提供多样化的操作方式，除传统的手柄操作外，应支持手势识别、语音控制等自然交互方式，且各种操作方式之间应能无缝切换；
- e) 应具备完善的引导和帮助功能，在用户首次进入或遇到操作困难时，能够提供清晰、详细的操作指引和提示信息。引导方式包括文字说明、动画演示、语音提示等。

5.2 安全性

安全性应满足以下要求：

- a) 在VR大空间定位与交互过程中，应采取有效措施防止用户因碰撞、摔倒等意外情况受到身体伤害，通过空间边界提示、虚拟障碍物设置等功能，引导用户在安全区域内活动；
- b) 用户在VR大空间中的个人信息、交互数据及系统运行数据应按敏感程度和业务影响分为核心数据、重要数据、一般数据三级，具体分类标准应符合GB/T 43697-2024中的规定。核心数据和重要数据应采用加密技术对数据进行传输和存储，防止数据泄露、篡改或丢失，应符合GB/T 35273-2020中的规定；
- c) 应建立完善的数据访问权限管理机制，只有授权人员能访问和处理相关数据，权限分配应遵循最小权限原则；
- d) VR大空间定位与交互设备应具备良好的电气安全性能，应符合GB 4943.1-2022中的规定。设备的机械结构应稳固可靠，避免因设备松动、脱落等原因对用户造成伤害。设备应具备过热保护、过载保护等功能，防止设备因长时间运行或异常情况而损坏。

5.3 可靠性

可靠性应满足以下要求：

- a) 在VR大空间环境中，应具备高精度的定位能力，定位误差应控制在合理范围内；
- b) VR大空间定位与交互技术应具备高度的稳定性，能够长时间连续运行并且不出现故障或崩溃，运行过程中应支持自动检测和处理异常情况；
- c) 在多用户同时参与的VR大空间交互场景中，不同用户看到的虚拟场景、交互对象等信息应保持同步更新。

5.4 兼容性

兼容性应满足以下要求：

- a) VR大空间定位与交互技术应支持多种类型的硬件设备，如VR头戴式显示器、手柄、定位传感器等；
- b) 应支持多种操作系统和开发平台，方便开发者进行应用程序的开发和部署；
- c) 应兼容多种格式的虚拟内容，包括3D模型、动画、视频、音频等，不同的内容格式应能够在系统中正确显示或播放；
- d) VR大空间定位与交互技术应能在更新和升级时，新版本应能与旧版本兼容，避免因升级而导致现有功能失效或数据丢失的情况发生。

5.5 可扩展性

可扩展性应满足以下要求：

- a) 应具备良好的空间扩展性，支持不同规模的空间场景；
- b) 应具备灵活的功能扩展能力，能够根据用户的需求和市场的变化，添加新的内容、功能和模块；
- c) 应能够通过升级硬件设备或优化软件算法的方式，实现性能的扩展和提升。

5.6 可维护性

可维护性应满足以下要求：

- a) 应具备故障诊断和排除功能，包括自动检测和定位运行过程中出现的故障。当出现故障时，应及时向管理员发出告警信息；
- b) 应支持软件的在线更新和升级，包括修复系统中的漏洞、优化系统性能、添加新的功能等。软件更新过程应简单快捷；
- c) 应具备版本管理功能，对不同版本的软件进行备份和管理，在需要时可进行回滚操作；
- d) 应具备完善的日志管理功能。

6 技术要求

6.1 头戴式设备定位技术

6.1.1 用户定位精度

6.1.1.1 水平定位精度

在理想的无遮挡、无强干扰的室内或室外大空间环境下，定位技术在水平方向上的定位误差宜满足以下要求：

- a) 行走速度（速度范围为 0~2 米/秒）的用户，平均定位误差不超过 ± 2 厘米，最大定位误差不超过 ± 5 厘米；
- b) 对于移动（速度大于 2 米/秒）的用户，平均定位误差不超过 ± 3 厘米，最大定位误差不超过 ± 5 厘米。

6.1.1.2 垂直定位精度

在相同的环境条件下，定位系统在垂直方向上的定位误差宜满足：

- a) 上下移动（速度范围为 0.2~1 米/秒）的用户，平均定位误差不超过 ± 2 厘米，最大定位误差不超过 ± 5 厘米；
- b) 对于垂直移动（速度大于 1 米/秒）的用户，平均定位误差不超过 ± 3 厘米，最大定位误差不超过 ± 5 厘米。

6.1.1.3 角度定位精度

定位技术应具备对用户姿态角度的测量能力。在静态和动态情况下，角度测量误差宜满足：

- a) 俯仰角和翻滚角的测量误差平均值不超过 $\pm 1^\circ$ ，最大误差不超过 $\pm 3^\circ$ ；
- b) 偏航角的测量误差平均值不超过 $\pm 1^\circ$ ，最大误差不超过 $\pm 5^\circ$ 。

6.1.2 定位更新频率

6.1.2.1 常规场景

在一般的行进式VR大空间应用场景中，定位技术应以不低于90Hz的频率实时更新用户的定位信息。

6.1.2.2 动态变化场景

当用户处于快速移动、频繁改变姿态或周围环境发生动态变化时，定位更新频率宜不低于60Hz，且根据动态变化的程度进行自适应调整。

高速运动场景，如VR体育、战斗游戏等场景下，更新频率宜 $\geq 90\text{Hz}$ ，以捕捉快速动作并减少延迟感。

6.1.3 抗干扰能力

6.1.3.1 电磁干扰

定位技术应具备良好的抗电磁干扰能力，在存在常见电磁干扰源的环境中正常工作。在距离电磁干扰源一定范围内，定位精度和定位更新频率应满足6.1.1和6.1.2的要求，且不应出现定位中断、数据丢失或错误定位等故障。

6.1.3.2 光学干扰

在强光直射环境下，水平与垂直方向的定位误差均不应超过 $\pm 10\text{cm}$ ，定位数据不应出现持续丢帧或跳变

6.1.3.3 动态障碍物适应

在人员密集或设备移动场景下，定位技术应能适应动态障碍物。

6.1.4 时间同步

6.1.4.1 系统内部时间同步

各个定位设备之间应实现高精度的时间同步。时间同步误差宜不超过 30ms 。

6.1.4.2 与外部系统时间同步

当需要进行数据交互和协同工作时，应实现与外部系统的时间同步，时间同步误差宜不超过 30ms 。

6.1.4.3 时间同步保持能力

应具备自动校准和保持时间同步的能力，在长时间运行过程中持续维持时间同步状态。系统内部和与外部系统的时间同步误差仍应满足上述要求。

6.2 交互技术

6.2.1 语音交互

6.2.1.1 功能要求

语音交互功能应满足以下要求：

- a) 应能对输入的语音进行判断并输出相应的识别结果；
- b) 应支持近场音频处理或远场音频处理中的一种；
- c) 在多个语种混读的情况下，宜能对不同语种进行判断并输出相应的识别结果；
- d) 应支持通过发声源进行定位。

6.2.1.2 语义正确理解率

低噪环境中（噪声强度在 50dB 以下），语义正确理解率宜在 95% 以上。

6.2.1.3 语音识别响应时间

低噪环境中（噪声强度在 50dB 以下），首响应时延宜小于 1s ，实时因子宜小于 1.5 。

6.2.2 手势交互

6.2.2.1 功能要求

手势交互功能应满足以下要求：

- a) 应支持如握拳、张开手掌、点赞、OK手势、滑动、抓取、旋转、缩放等手势识别；
- b) 宜提供添加手势、删除手势、自定义手势和手势列表的功能；
- c) 宜提供至少一种手势采集方法；

- d) 应提供至少一种默认手势；
- e) 宜支持手势与语音、眼动追踪等多模态输入的协同交互；
- f) 近场有效交互范围应为 0.2m~1.5m，远场有效交互范围应为 1.5m~5m；
- g) 宜能用视觉、听觉、触觉或其他反馈方式中的至少一种将手势识别结果通知用户。

6.2.2.2 手势交互成功率

静态手势交互成功率宜 $\geq 98\%$ ，动态手势交互成功率宜 $\geq 95\%$ 。

6.2.2.3 手势交互响应时间

手势交互响应时间宜不大于100ms。

6.2.2.4 手势识别视场角

手势识别设备静态手势识别视场角宜 $\geq 30^\circ$ ，动态手势跟踪识别视场角 $\geq 50^\circ$ 。

6.2.3 虚拟触控交互

6.2.3.1 功能要求

虚拟触控交互功能应满足以下要求：

- a) 应能准确捕捉用户佩戴 VR 设备进行的触控输入，包括单点触控和多点触控；
- b) 虚拟触控交互范围应覆盖用户视野内的所有虚拟界面元素；
- c) 应能对捕捉到的操作提供直观的视觉反馈，帮助用户确认触控操作的有效性；
- d) 应提供多种形式的反馈机制，如视觉、听觉和触觉反馈；
- e) 对于支持振动的设备，应能通过振动来提供额外的触控反馈；
- f) 应支持用户或开发者自定义虚拟触控区域及其功能；
- g) 应能识别并区分不同类型的触控操作，如轻触、长按、滑动、缩放等；
- h) 宜支持多用户同时进行虚拟触控交互。

6.2.3.2 响应时延

点击响应时延宜 $\leq 20\text{ms}$ ，滑动响应时延宜 $\leq 20\text{ms}$ ；用户数大于两人或虚拟空间大于 20m^2 时，时延波动范围宜 $\leq 30\text{ms}$ 。

6.2.3.3 动效时延

动效启动时延宜 $\leq 30\text{ms}$ 。动效与触觉、音频反馈的时延差宜 $\leq 50\text{ms}$ 。

6.2.3.4 完成时延

操作平均完成时延宜 $\leq 50\text{ms}$ 。在5G、5G-A专网环境下操作平均完成时延宜低于等于60ms。在5G、Wi-Fi6等无线广域网环境下，操作完成时延宜 $\leq 100\text{ms}$ 。

6.2.4 眼动追踪（眼动交互）

6.2.4.1 功能要求

眼动交互功能应满足以下要求：

- a) 用户应能通过注视点的变化来控制操作；
- b) 应提供给出可听或可视的交互结果反馈，以确认系统已经识别到用户的注视或意图；
- c) 应能与其他交互方式结合使用，如语音交互、手势交互等。

6.2.4.2 眼动交互响应时间

从用户视线聚焦于虚拟对象到触发交互反馈的时间间隔宜 $\leq 30\text{ms}$ 。

6.2.4.3 眼动交互成功率

静态场景交互成功率宜 $\geq 98\%$ ；动态场景交互成功率宜 $\geq 95\%$ 。

6.2.5 动作捕捉（体感交互）

6.2.5.1 功能要求

动作捕捉应满足以下要求：

- a) 应准确识别用户的身体动作、姿态等；
- b) 应能与其他交互方式结合使用；
- c) 宜支持多用户同时使用，允许不同的用户在同一空间内进行交互；
- d) 当用户结束动作后应提供及时、有效的可听或可视交互结果反馈。

6.2.5.2 体感交互距离

最小交互距离宜 $\leq 50\text{cm}$ ；最大交互距离宜 $\geq 5\text{m}$ ；

6.2.5.3 体感交互响应时间

单用户使用情况下，体感交互响应时间宜不大于 50ms ；多用户使用情况下，体感交互响应时间宜不大于 80ms 。

6.2.5.4 体感交互成功率

单用户使用情况下，体感交互成功率宜 $> 98\%$ ；多用户使用情况下，体感交互成功率宜 $> 95\%$ 。

注：体感交互成功标准为系统反馈与用户意图一致。

6.2.6 动作重定向

6.2.6.1 功能要求

运动重定向模块功能应满足以下要求：

- a) 应在有限物理空间中扩展可用虚拟空间；
- b) 所施加的重定向增益值宜处于感知阈值范围内，以降低眩晕感并维持自然行走体验；
- c) 应支持多用户同时使用，允许不同用户在同一物理空间中进行无碰撞交互；
- d) 重定向过程应保持平滑自然，不得出现突兀的跳变或失真；
- e) 重定向算法应兼容不规则物理空间，支持路径修正与动态障碍物规避，保证用户在虚拟场景中连续行走过程中避免“穿模”或“停顿”；
- f) 当用户接近物理空间边界时，应提供及时、有效的可视或听觉提示。

6.2.6.2 空间利用效率

坪效率宜 $\geq 35\%$ ，虚拟场景覆盖率宜 $\geq 95\%$ 。在多用户协同交互或复杂场景下，虚拟场景覆盖率宜 $\geq 90\%$ 。

6.2.6.3 多用户协同交互

宜支持至少10名用户同时在同一虚拟场景中自由移动，用户交互的最小安全距离宜为 200mm 。

6.2.6.4 空间映射精度

动作重定向应支持物理空间与虚拟空间的动态映射，平均误差宜 $\leq 2\text{mm}$ ，最大误差宜 $\leq 5\text{mm}$ ，且无连续3帧以上数据丢失。

映射算法应兼容不规则物理空间，支持动态障碍物避让与路径修正，避免虚拟场景中的“穿模”或“卡顿”现象。

6.2.6.5 虚实融合反馈

动作重定向应结合力反馈设备，提供至少3级力度反馈，并支持环境音效的3D空间化渲染。

虚拟场景中的物理交互应符合现实力学规律，摩擦系数、重力加速度等参数可自定义调整，以适应不同应用场景。

6.3 图形渲染

6.3.1 功能要求

图形渲染模块功能应满足以下要求：

- a) 宜支持至少多名用户同时在同一虚拟场景中实时渲染，且每个用户的数字分身、交互对象及环境元素均应独立渲染，避免画面撕裂或闪烁；
- b) 支持动态加载与卸载场景资源；
- c) 宜支持物理空间与虚拟场景的叠加渲染，包括透明显示、半透明混合及全沉浸渲染；
- d) 渲染算法宜动态调整虚拟光照与现实光照的匹配度，宜支持 HDR 与 PBR 技术；
- e) 渲染宜支持 VR 双目渲染。

6.3.2 渲染精度

图形渲染精度应满足以下要求：

- a) 虚拟场景的渲染支持模型 LOD 技术，实现模型精度的动态调整，切换时应平滑无跳变。系统渲染输出的单眼分辨率宜达到 4K 级别，并支持 120Hz 及以上的刷新率；
- b) 纹理分辨率宜支持 4K（4096×4096）及以上，且支持 PBR 材质的实时渲染，虚拟物体的物理特性应与现实一致；
- c) 支持动态纹理加载，纹理更新频率宜≥60Hz；
- d) 宜支持色彩校准功能，可根据不同显示设备自动调整色彩参数。

6.3.3 延迟时间

图形渲染延迟时间应满足以下要求：

- a) 从用户物理动作触发到虚拟场景中对应动作渲染完成（比较长的过程）的延迟宜≤50ms；
- b) 在大空间场景中，用户从一个区域移动到另一个区域时，场景切换延迟宜≤3s，避免画面黑屏或卡顿；
- c) 应支持预加载技术，根据用户移动方向提前加载相邻区域资源。

6.3.4 刷新率

图形渲染刷新率应满足以下要求：

- a) 默认刷新率宜≥60Hz，宜支持动态调整至 120Hz 或更高，降低晕动症风险；
- b) 刷新率稳定性宜≥95%，即连续 40 分钟运行中，帧率波动范围≤5%；
- c) 在多人协同场景中，所有用户的刷新率应同步，避免因刷新率差异导致的画面撕裂或交互不同步。

6.4 交互音效

6.4.1 功能要求

音效模块的交互功能应满足以下要求：

- a) 应支持动态声源生成，用户与虚拟物体的距离或交互动作可实时触发对应的音效；
- b) 音频渲染应符合头部相关传递函数（HRTF）标准，支持水平角、垂直角、距离的三维定位，以服务于基于声音的空间感知与交互；
- c) 应支持动态声学遮挡效应模拟，当虚拟物体阻挡声源时，音频能根据遮挡情况自动调整音色与音量；
- d) 宜支持虚拟物体与环境的实时声学交互，例如不同材质的碰撞应触发不同的音效。

6.4.2 性能要求

交互音效的性能应满足以下要求：

- a) 从用户物理动作触发到对应音频渲染完成的延迟宜≤30 ms；
- b) 在多人协同场景中，所有用户的音频播放应同步，跨设备音频流的时间差宜≤20 ms。

6.5 多用户协同

6.5.1 空间映射一致性

多用户协同空间映射一致性应满足以下要求：

- a) 多用户共享同一虚拟空间时，应通过分布式时钟同步协议确保所有用户的空间坐标系与时间基准完全一致。
- b) 宜支持动态场景更新，当虚拟物体位置变化时，所有用户应在 100ms 内同步更新其空间状态，避免视觉分裂或交互冲突。
- c) 虚拟物体的物理属性应在所有用户端保持一致。

注：多用户指 ≥ 2 个用户。

6.5.2 并发用户数

并发用户数满足以下要求：

- a) 应支持多名用户在同一虚拟空间内实时交互；
- b) 当用户数量超过基础容量，应通过边缘计算节点或分片渲染技术自动分配计算资源，单节点负载不应超过 80%。

6.6 软硬件接口要求

6.6.1 硬件接口

硬件接口应满足以下要求：

- a) 定位追踪设备应支持 USB 3.2 Gen 1（或更高版本）或千兆以太网接口，多传感器数据应实时传输，延迟宜 $\leq 15\text{ms}$ ；
- b) 手柄、触觉手套等交互设备应提供低延迟蓝牙（Bluetooth 5.1 及以上）或 Wi-Fi 6 接口，应支持至少 8 台设备同时连接，且无丢包率应 $\leq 0.1\%$ ；
- c) VR 头戴式显示器宜支持 DisplayPort Alt Mode 的 USB-C 或专用高速串行接口，高分辨率渲染应无压缩损耗；
- d) 接口供电应符合 USB PD 3.1 标准，支持最高 100W 功率输出，过载保护响应时间应 $\leq 10\mu\text{s}$ 。

6.6.2 软件接口

软件接口应满足以下要求：

- a) 宜提供跨终端 SDK 支持主流操作系统，其 API 设计应保证高效与稳定，单次调用延迟 $\leq 10\text{ms}$ ；
- b) 多用户协同场景宜支持 WebRTC 或 MQTT 5.0 协议，不同厂商设备间应支持数据互通，消息传递延迟 $\leq 50\text{ms}$ 。

6.6.3 设备发现

设备发现应满足以下要求：

- a) 应支持设备自动发现与配对，新设备接入时自动完成 IP 地址分配、服务注册；
- b) 配对过程应通过认证，防止未授权设备接入；
- c) 应提供 API 实时查询设备状态，包括电量、信号强度、连接稳定性等，更新频率宜 $\geq 10\text{Hz}$ ，且支持推送通知，如设备离线告警。

6.7 网络与数据传输

6.7.1 传输延迟

网络与数据传输延迟应满足以下要求：

- a) 定位数据传输从传感器采集到渲染引擎接收的端到端延迟宜 $\leq 50\text{ms}$ ，其中网络传输延迟宜 $\leq 20\text{ms}$ ；
- b) 手柄、触觉手套等设备的操作指令延迟宜 $\leq 50\text{ms}$ ；
- c) 应支持 QoS（服务质量）动态调度，根据数据优先级分配带宽，高优先级数据丢包重传次数应 ≤ 1 次。

6.7.2 数据带宽

数据带宽应满足以下要求：

- a) 单用户场景应支持至少 4K@120Hz 视频流与 6DoF 定位数据同步传输，总带宽需求宜 $\geq 1\text{Gbps}$ ；
- b) 每增加 1 名用户，应额外预留 100Mbps 带宽，支持至少 20 名用户同时在线且无卡顿；
- c) 支持 SDN 技术，根据用户位置、动作复杂度动态调整带宽分配，带宽利用率宜 $\geq 90\%$ 。

6.7.3 网络可靠性

网络与数据传输可靠性应满足以下要求：

- a) 当出现无线网络链路层连接丢失，且持续时间不超过 3 秒时，应能利用本地预测与状态缓存机制维持虚拟场景的连续性；
- b) 单台定位基站或交互设备故障时，应支持切换至备用设备，且不影响其他设备正常运行；
- c) 关键数据应采用三副本存储，任一节点故障时数据可用性 $\geq 99.9\%$ 。

7 安全要求

7.1 访问控制

访问控制宜满足以下要求：

- a) 建立基于角色的访问控制模型，为不同用户分配不同的角色和权限，严格限制数据访问范围，并对数据访问行为进行记录，以便追溯和审计；
- b) 宜实现数据访问的最小权限原则，即用户仅能获得完成工作所必需的最小数据访问权限，禁止授予“超级管理员”权限；
- c) 用户认证宜采用多因素身份认证，结合密码、短信验证码或邮箱验证等不少于两种的认证方式。在敏感操作时，应强制要求生物识别或硬件密钥二次验证；
- d) 权限变更应经过审批流程，并记录变更原因和时间。

7.2 用户权限管理

用户权限管理应满足以下要求：

- a) 宜支持 5 级权限，包括管理员、开发者、普通用户、访客、受限用户，每级权限可独立配置操作范围；
- b) 权限变更宜通过区块链存证或数字签名技术确保不可篡改，且变更记录可追溯至具体操作人与时间戳；
- c) 当管理员修改用户权限时，所有用户端应同步更新权限状态，避免越权操作；
- d) 应支持权限冲突检测，根据权限优先级裁决并反馈结果；
- e) 不同权限用户的数据流应通过虚拟局域网或软件定义网络隔离；
- f) 应支持敏感操作二次验证，降低误操作风险。

7.3 网络安全

网络安全应满足以下要求：

- a) 应符合 GB/T 22239-2019 网络安全等级保护制度 3 级或以上的规定，并通过 GB/T 28448-2019 中的测评要求；
- b) 应部署网络入侵检测系统，对异常访问行为进行检测和拦截，应能识别常见的网络攻击特征，并及时发出告警；
- c) 默认不信任外部流量，每次访问均需验证身份、设备状态及网络环境；
- d) 应建立漏洞扫描与修复流程，对开源组件定期更新补丁，并记录漏洞修复闭环。

附录 A
(资料性)
智能穿戴设备

智能穿戴设备示例参照表 A.1 和表 A.2。

表A.1 定位相关穿戴设备

类型	设备名称	主要功能
头戴显示类	VR 一体机	提供沉浸式视觉体验，集成定位与交互模块
	PC VR 头显	高渲染质量，外接定位基站
手持交互类	6DoF 手柄	提供精准的空间定位与操作输入
辅助定位与传感类	UWB 定位标签	厘米级空间定位
	眼动追踪模块	捕捉视线方向与注视点

表A.2 交互相关穿戴设备

类型	设备名称	主要功能
手持交互类	触觉反馈手套	捕捉手部动作并提供力触觉反馈
全身动作捕捉类	惯性动捕服	实时捕捉全身动作
	光学标记服	高精度动作重建
触觉与体感类	触觉背心	提供身体触觉反馈（如冲击、振动）
	力反馈外骨骼	模拟阻力与反作用力
辅助定位与传感类	语音交互耳机	实现远场语音识别与空间音频