引文格式:朱军,丁永哲,游继钢,等.结构语义特征约束的地震灾害AR场景精准建模方法[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(6):1126-1136.DOI:10.13203/j.whugis20240276

Citation: ZHU Jun, DING Yongzhe, YOU Jigang, et al. An Accurate Modeling Method of Earthquake Disaster AR Scene Constrained by Structural Semantic Features[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2025, 50(6): 1126-1136. DOI:10.13203/j.whugis20240276

结构语义特征约束的地震灾害AR场景精准建模方法

朱 军[1,2] 丁永哲[1] 游继钢[1] 党 沛[1] 杨文权[1] 高雨涵[1]

1 西南交通大学地球科学与工程学院,四川 成都,611756

2 西南交通大学桥梁智能与绿色建造全国重点实验室,四川 成都,611756

摘 要:地震灾害具有突发性强、环境复杂等特点,增强现实(augmented reality, AR)场景建模对地震灾害应急救援具有重要意义。现有AR场景建模方法在地震灾害场景下存在特征提取不准确、虚实融合建模精度低的问题,难以实现环境复杂的地震灾害现场AR场景精准建模。因此,提出结构语义特征约束的地震灾害AR场景精准建模方法,首先,剖析地震灾害场景特征,构建地震灾害现场结构语义特征库;其次,提出结构语义约束的地震灾害虚实特征提取方法,提高虚实图像特征提取精准度;然后,基于虚实特征提取结果进行地震灾害AR场景虚实建模;最后,选择受损建筑作为实验案例进行分析。实验结果表明,结构语义约束的地震灾害虚实特征提取方法$F1$分数达90%,优化后的AR场景配准误差较直接建模方法降低了80%。所提方法实现了地震灾害AR场景的精准建模,为地震灾害应急救援提供了数字化场景支撑。

关键词:地震现场;增强现实;结构语义;特征约束;虚实融合建模

中图分类号:P237 **文献标识码**:A **收稿日期**:2025-01-05

DOI:10.13203/j.whugis20240276 **文章编号**:1671-8860(2025)06-1126-11

An Accurate Modeling Method of Earthquake Disaster AR Scene Constrained by Structural Semantic Features

ZHU Jun[1,2] *DING Yongzhe*[1] *YOU Jigang*[1] *DANG Pei*[1] *YANG Wenquan*[1] *GAO Yuhan*[1]

1 Faculty of Geosciences and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China

2 State Key Laboratory of Bridge Intelligent and Green Construction, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China

Abstract: **Objectives**: Earthquake disaster has become one of the natural disasters that pose a great threat to human society, and it puts forward high requirements for the efficiency and accuracy of emergency rescue. Augmented reality (AR) technology can provide more intuitive decision-making support for rescue personnel by integrating virtual information into the real scene. However, the existing AR scene modeling technologies face challenges in the complex environment of earthquake disaster. **Methods**: This paper proposes an accurate modelling method for earthquake disaster AR scenes with structural semantic feature constraints. First, the characteristics of earthquake disaster scenes are analyzed, and the semantic feature library of earthquake disaster scene structure is constructed. Second, the virtual-real feature extraction of earthquake disasters with structural semantic constraints is proposed to improve the accuracy of virtual-real image feature extraction. Then, the virtual-real modelling of the earthquake disaster AR scene is carried out based on the results of virtual-real feature extraction. Finally, the damaged buildings are selected as the experimental case area for experimental analysis. **Results**: Experimental results indicate that the proposed method achieves an $F1$ score of 90% for earthquake disaster feature extraction based on structural semantic

基金项目:国家重点研发计划(2022YFC3005703)。

第一作者:朱军,博士,教授,研究方向为虚拟地理环境与灾害场景建模。vgezj@163.com

通信作者:游继钢,博士。vgeyjg523@my.swjtu.edu.cn

constraints. The optimized AR scene registration error has been reduced by 80% compared to the direct modeling method. **Conclusions**: The findings demonstrate that the proposed method can effectively extract and match virtual-real features, leading to accurate AR scene modelling for earthquake disaster scenarios. At the same time, the proposed method has important application potential for improving the accuracy and reliability of AR applied to disaster emergency response, and can assist on-site rescue personnel to obtain more accurate disaster information.

Key words: earthquake field; augment reality; structure semantic; feature constraints; virtual-real fusion modeling

近年来,全球气候变化和自然灾害频发,其中地震导致的建筑物受灾造成了巨大的人员伤亡与经济财产损失,地震受灾建筑中救援工作的展开也面临诸多风险与挑战[1-2]。《“十四五”国家应急体系规划》[3]中提出的安全应急产品和服务发展重点包括新型应急指挥通信和信息感知产品。在应急救援工作中,相较于侧重沉浸感的虚拟现实(virtual reality, VR),侧重虚拟与现实融合的增强现实(augmented reality, AR)是实现高效灾情信息融合、灾情场景感知的重要举措[4-6]。AR 建模是一种将虚拟信息与真实世界场景叠加的计算机技术,然而在复杂的地震灾害场景中,现有 AR 建模难以精准获取真实世界空间信息[7-8],导致灾害场景 AR 建模不精确,难以为应急救援提供较为准确的信息支撑。

目前 AR 建模方法主要基于标识信息实现,包括基于标识物[9]、即时定位与地图构建(simultaneous localization and mapping,SLAM)[10]、图像识别[11]、空间感知[12]等,此类方法需要在对目标区域进行预处理的前提下,基于标识进行 AR 融合建模,但方法识别范围有限,且需要提前布置标识物,难以实现地震灾害场景复杂应急环境 AR 建模[13]。为解决上述问题,有学者提出了基于地理配准的户外 AR 建模方法[14],在结合三维地理信息系统与 AR 的基础上,基于位置和姿态传感器在三维地理信息场景中进行注册,对虚实场景进行 AR 融合展示,符合环境复杂的地震灾害场景应急救援使用场景需求。然而,受到定位精度以及惯性测量单元(inertial measurement unit,IMU)获取姿态误差等硬件限制,基于地理配准的户外 AR 建模方法存在虚实融合不准的问题[15]。

针对户外 AR 建模虚实融合不准的问题,学者们使用基于视觉的三维配准方法进行 AR 融合建模。基于视觉的三维配准核心是在特征提取和匹配的基础上对用户的位置、姿态进行解算[16-17],进而实现真实世界与虚拟世界的配准。但在 AR 场景建模中,由于虚实图像存在异质性,传统真实图像特征提取方法[18-19]无法适用于异源虚实图像,特征提取及匹配精度较差,无法满足高精度位姿解算需求。近年来,随着深度学习方法的飞速发展,许多基于深度学习的虚实特征匹配算法被提出[20],但其高效运作依赖于大量标注精确的训练样本。在复杂灾害场景下,样本数据的缺乏限制了深度学习模型的提取精度,导致提取结果不可靠。此外,国内外学者也对异源图像匹配进行了研究,部分学者考虑利用建筑结构特征信息优化异源图像匹配,分别利用天际线[21]、铅垂线[22]、二维地图[23]等内容改进了目标特征的提取及匹配过程,能够实现建筑在自然状态下的虚实融合建模,但在复杂受灾环境下,仅靠单一约束的特征提取难以实现高精度 AR 场景建模。

针对以上问题,为提高地震灾害 AR 场景虚实建模精度,本文以基于地理配准的 AR 建模方法为基础,充分考虑地震灾害现场复杂环境,剖析地震受灾建筑特征,提出了结构语义特征约束的地震灾害 AR 场景精准建模方法,以期解决现有方法针对复杂灾害场景存在的融合不准问题,实现地震现场的虚拟场景现实场景的高精度融合建模,为救援人员快速精准定位受困者提供技术支撑,提高地震灾害应急救援效率。

1　方法

1.1　总体研究思路

本文提出结构语义特征约束的地震灾害 AR 场景精准建模方法,如图 1 所示。首先,充分考虑建筑结构与地震灾害现场受灾环境,厘清不同情景下灾害现场空间结构约束,构建灾害现场空间结构语义特征库;然后,充分利用受灾现场结构特征,提出了结构特征约束的地震灾害虚实特征提取方法;最后,基于虚实特征对进行高精度位姿解算,实现地震灾害现场 AR 场景精准建模。

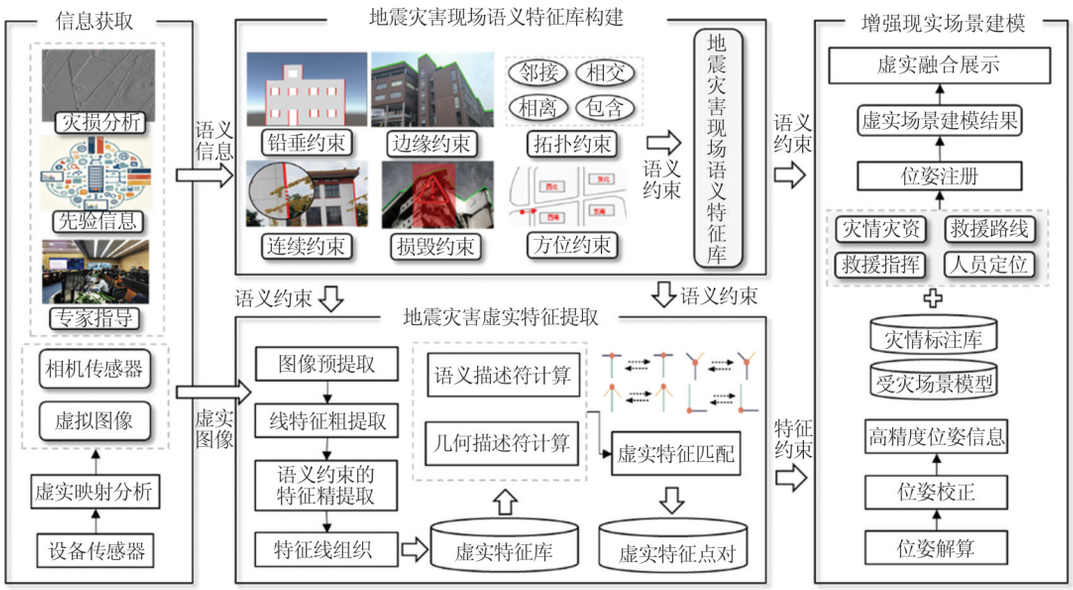


图1 总体研究思路

Fig. 1 General Research Idea

1.2 地震灾害现场结构语义特征库构建

本文针对异质性虚实场景,充分考虑地震现场相关空间结构特征约束,统合灾害现场相关结构特征,包括建筑物的形状和结构、建筑物空间布局、损坏情况等,并依照结构约束,建立灾害现场特征语义库。

1.2.1 空间结构约束

针对地震灾害现场特点,基于建筑物结构先验参数库、抗震规范标准库、历史灾情案例库构建多源基础数据库,实现建筑物属性数据、法规约束数据、灾损演化数据的标准化存储;通过法规条文的结构安全条款解析、现场空间拓扑关系建模、灾损程度量化评估3个维度,建立空间结构约束集。

1)拓扑-方位约束根据灾害场景中不同的实体对象的二、三维空间关系,实现不同实体之间的关系分析。对不同实体的拓扑关系以及方位关系进行整理,构建多维度空间关系判别准则,对目标特征进行语义属性赋值。

2)连续性约束根据空间结构特征的连续性特点,对结构特征依照图像轮廓线,改进A*算法,对特征断点进行像素连接。

3)铅垂约束考虑灾害现场铅垂线特征,提出基于垂直消失点的铅垂线特征提取方法。在灾害场景三维重建中,空间中的平行铅垂线在投影平面内交汇于垂直消失点,以垂直消失点为铅垂线提取的先验约束,可有效提取铅垂线。

4)多边形-损毁约束在地震灾害中,建筑物通常可分为常规建筑物和损毁建筑物。常规结构特征多为规则多边形、转角、圆角等规则形状,可使用多边形拟合提高提取精度去除噪声;而受损结构较为复杂,线条不规则,特征不明显,导致受损结构匹配精度较差,不利于AR场景建模,需进行剔除处理。

1.2.2 特征语义库构建

针对先验数据、官方文件、受损报告、专家知识等来源数据进行整理,以需求分析、对象划分、关系构建3个步骤构建语义库,通过结构分析、受灾分析、情景分析、实体分析,形成实体表、情景表和约束表。情景表描述了灾情种类、时间、气候等影响虚实特征影响的客观因素,以适应不同情景下的虚实融合建模;实体表描述了受灾现场结构拆分的各项实体及其属性,储存了受灾现场特征的语义信息;特征表描述了目标实体在特征提取过程中使用到相关约束的对应方法以及参数。基于实体-情景-特征的表达模型进行特征语义库构建,分析地震灾害现场建筑物相关特征,建立地震灾害现场结构语义约束关系,实现地震灾害现场结构语义库的构建,流程如图2所示。

1.3 结构语义约束的地震灾害虚实特征提取与匹配

本文充分利用受灾现场结构特征信息,提出了空间结构约束的灾害现场特征提取以及几何-语义联合的虚实结构特征匹配,实现受灾现场的特征提取和虚实特征对的匹配,得到精确的灾害现场虚实特征对。

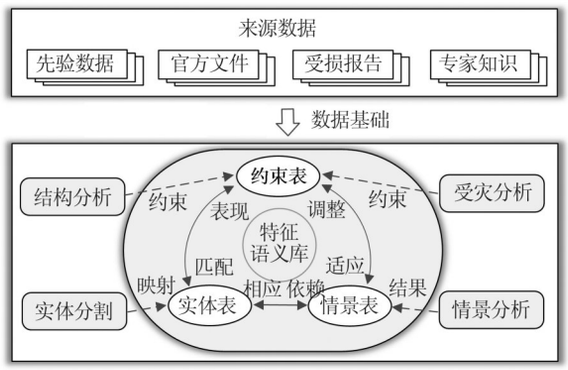


图 2　灾害现场空间结构语义库构建

Fig. 2　Semantic Library Construction of Spatial Structure of Disaster Site

1.3.1　空间结构约束的灾害现场特征提取

基于空间结构约束进行灾害现场特征提取包含粗提取以及精确提取两个步骤,首先,根据传感器和先验信息进行特征粗提取;然后,按照地震灾害现场语义库进行特征精确提取。

1)地震灾害现场特征粗提取真实图像由设备视觉传感器获取,并获取拍摄时的位置和姿态参数,得到拍摄姿态信息六参数,即坐标(x,y,z)和姿态角(翻滚角、偏航角、俯仰角),通过平移、旋转实现真实场景坐标系以及虚拟场景坐标系的统一,并根据相机内参完成摄像机参数的统一,进行虚拟图像的渲染,如图 3 所示。

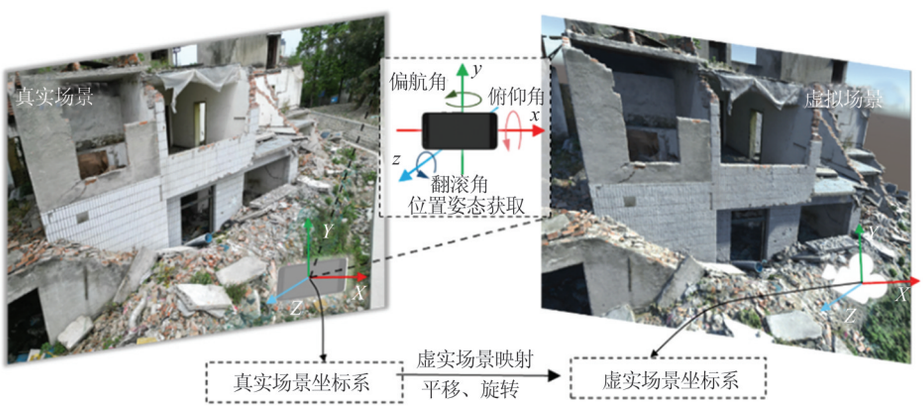


图 3　AR 虚实映射

Fig. 3　Virtual-Real Mapping of AR

由于虚实图像在纹理上具有异质性,首先优化虚实图像规格,对虚实图像进行特征约束的图像预处理,本文采用双线性插值法对图像进行降采样处理,采用高斯滤波进行降噪处理,然后基于地震灾害场景结构约束,针对虚实图像进行特征粗提取,初步提取受灾现场外轮廓线和铅垂线等。

2)语义约束的地震灾害现场特征提取基于地震灾害现场语义库对粗提取结果进行精确提取,依照连续性约束和边缘约束进行连续性检测、断点连接,方法流程如图 4 所示。首先,采用八邻域断点检测算法,对初始特征线进行连续性检测并提取断点。以边缘检测结果为约束,改进 A*算法进行断点连接,获取特征线。然后,针对特征断点对存在多条连接线的情况,采用基于特征语义约束的启发式函数估计从起始节点到目标节点的最佳路线。定义$f(n)$为代价函数,用于评价连接线与地震灾害现场特征线的接近程度,以获取最适合的连接线,计算式为:

$$f(n)=d\times f_d+w\times f_w+v\times f_v+q\times f_q \quad (1)$$

式中,d、w、v、q分别为距离、上偏移量、下偏移量、曲折度;f_d、f_w、f_v、f_q分别为距离、上偏移量、下偏移量、曲折度在代价函数计算中的权重。

使用多点折线的矢量型数据结构进行特征线的空间信息的数据组织,在储存其几何信息基础上,对每组特征线使用一串语义标识符存储对应特征线的语义信息,该标识符包含虚实特征库标识、语义标识以及结构标识,通过语义库和结构点库相互连接组织形成特征库。

1.3.2　几何-语义联合约束的虚实结构特征匹配

基于结构特征提取结果,设计几何-语义联合约束的特征点匹配算法。提取特征线的拐点、交点作为待匹配特征点,分别计算每个点的几何描述符以及语义描述符。综合几何描述符以及语义描述符从语义、形态、位置等多方面进行共同匹配,实现虚拟图像与真实图像的特征点对获取,如图 5 所示。

语义描述符是基于结构特征提取结果中储存的语义信息进行关系计算得到,描述了特征点

相交线的数量、相交线语义类型等语义信息。几何描述符是基于角点提取算法计算得到,算法原理是利用滑动的局部窗口在图像上进行移动判断灰度发生的变化,通过窗口在各个方向上的变化程度可以得到特征点的相交线条数以及相交角度,几何描述符描述了特征点的几何特征。综上,结合几何描述符以及语义描述符结果匹配虚实特征点对。

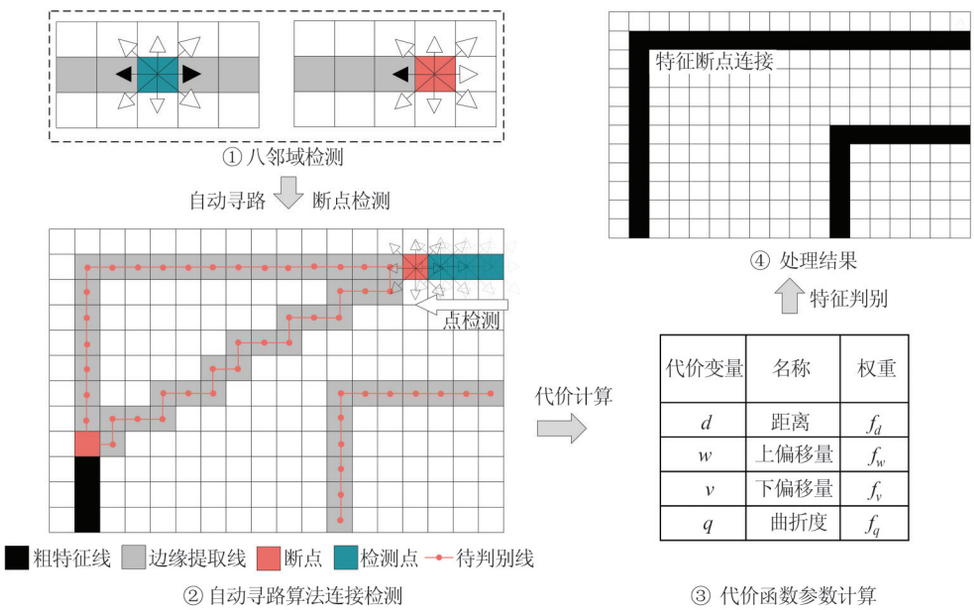


图4 语义约束的地震灾害现场特征提取

Fig. 4 Line Feature Extraction Based on Semantic Constraints in Seismic Hazard Site

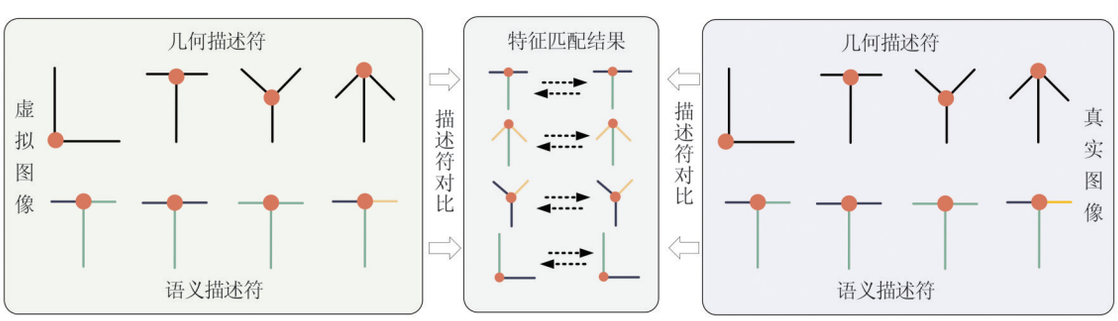


图5 几何-语义结合的虚实特征匹配

Fig. 5 Geometric-Semantic Combination of Virtual-Real Feature Matching

1.4 特征约束的地震现场AR场景精准建模

本文分析基于特征的虚实位姿跟踪解算方法,针对地震灾害现场虚实结构语义特征对,提出了特征约束的灾害现场增强场景建模方法,实现受灾现场AR场景精准建模。

1.4.1 基于特征的虚实位姿跟踪解算

AR建模方法关键在于精确识别和跟踪用户的位置和方向,并根据这些信息在用户的视野中叠加虚拟信息。依照特征点对进行空间位姿解算,获得用户的精准位姿信息,其中位姿解算原理如图6所示,其中P为像点三维坐标,P_1、P_2分别为该像点在像平面I_1、I_2上的点坐标,O_1、O_2分别为虚实图像的相机位置,O_1O_2为基线,e_1、e_2分别为O_1O_2与I_1、I_2像平面的交点。之后通过共面方程得到位移的改正数$\mathrm{d}x$、$\mathrm{d}y$、$\mathrm{d}z$以及旋转的改正数$\mathrm{d}\kappa$、$\mathrm{d}\varphi$、$\mathrm{d}\omega$,进行改正之后得到精准的位姿解算结果。

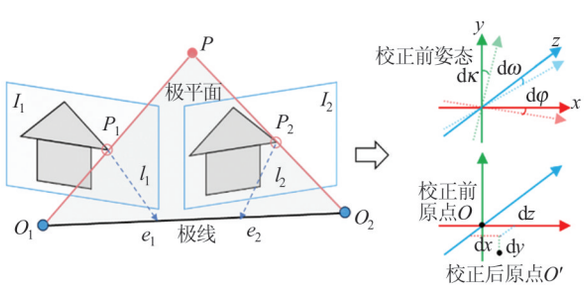


图6 位姿解算

Fig. 6 Positional Pose Solution

1.4.2　地震灾害现场 AR 融合建模

灾害现场虚实融合建模方法如图 7 所示。首先将用户信息库与渲染服务器建立连接,通过位姿、相机传感器获取真实图像以及粗位姿;然后根据解算的用户高精度位姿,进行用户位姿在虚拟场景中的准确注册,综合三维虚拟模型以及标注符号库进行救援方案标注,进而实现地震灾害 AR 场景的精准虚实融合建模。

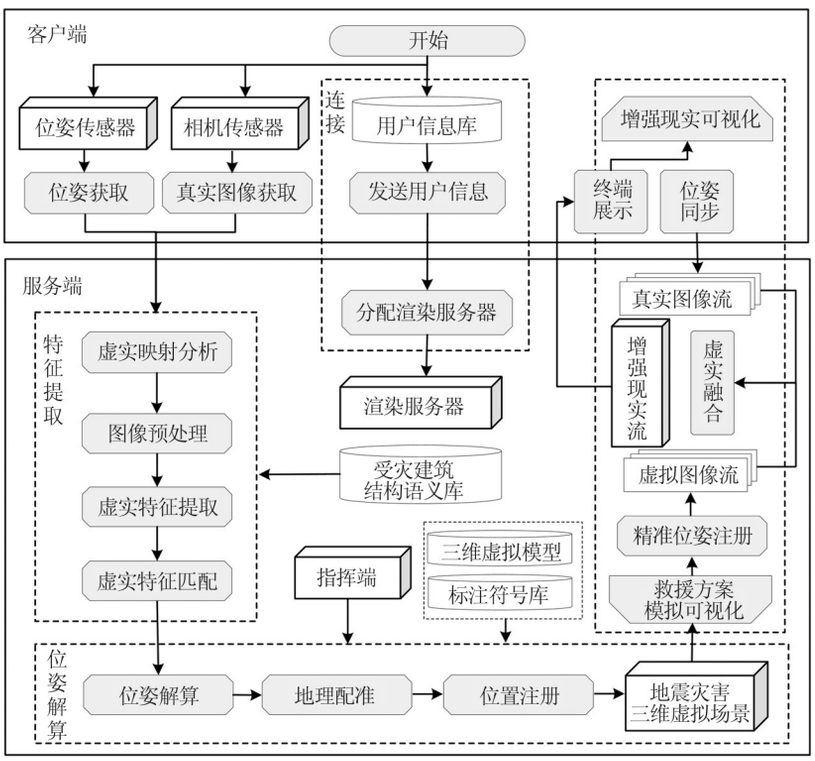


图 7　灾害现场虚实融合建模

Fig. 7　Virtual-Real Fusion Modelling of Disaster Site

2　实验与分析

为了验证本文方法,本文选取四川省成都市内占地面积 60 m^{2}的轻度受损两层砖房以及占地 112 m^{2}的轻度受损三层砖房作为实验案例。基于受损建筑虚拟模型,以搭载 Android 系统的移动设备为获取设备,以 Unity3D 以及 Visual Studio 2019 为实验平台,结合 OpenCV 计算机视觉开源库,设计了虚实图像线特征提取、特征匹配实验以及位姿解算与虚实融合实验。

2.1　实验仪器设备及实验数据

1) 实验设备

实验图像使用移动设备进行数据采集,使用相机进行真实图像获取,同时使用位姿传感器记录位姿姿态,基于标定棋盘格标定手机相机内参,得到手机相机的横向、纵向焦距分别为 3 919.8 像素、2 926.4 像素,相机主点位置为(1 969.4 像素,1 475.9 像素),相机径向畸变系数为(0.005 5,−0.041 0),切向畸变系数为(0.004, 0.005)。

2) 实验数据

本文从不同角度采集了虚拟图像以及真实图像进行特征提取实验,拍摄数据为救援常用地面视角,图像分辨率均为 4 000×3 000 像素,并同时记录拍摄照片的位姿与姿态信息,分别使用建模数据以及三维重建结果构造虚拟场景,根据本文所述虚实映射方法初步获取虚拟图像,实验数据如图 8 所示。

2.2　实验分析

2.2.1　结构语义特征提取分析

为了验证本文语义约束的线特征提取方法应用于地震灾害现场的有效性,采用现有的主流线特征提取方法 Hough_p[24]、LSD[25]、FLD[26]、EDLines[27]与本文方法对实验数据进行线特征提取处理,得到结果如图 9 所示。

本文采用 $F1$ 分数对结果进行评价,$F1$ 分数综合了准确率 P 和召回率 R 两个指标。P 和 R 通常是一对矛盾的度量,当提取置信度高时,P 偏高;分类置信度低时,R 偏高。因此本文将 $F1$ 分

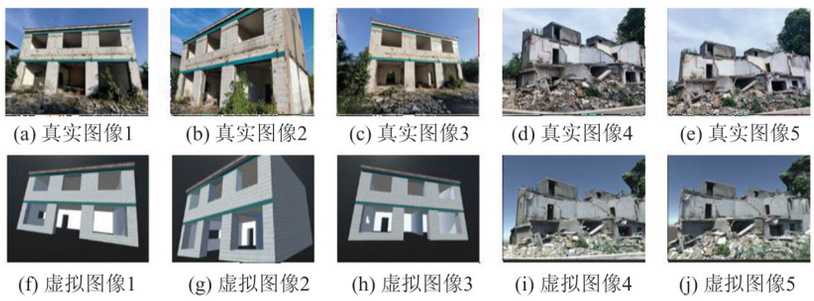


图8 实验数据

Fig. 8 Experimental Data



图9 不同特征线提取方法的结果

Fig. 9 Results of Different Line Detection Methods

数作为平均指标,计算式为:

$$F1=\frac{2\times P\times R}{P+R} \tag{2}$$

以真实图像建筑物门窗轮廓线、天际线、铅垂线作为正样本,其他作为负样本,对图9实验结果进行评价,计算各图像对的$F1$分数,结果如表1所示,各方法的$F1$分数箱型统计如图10所示。

表1 不同特征线提取方法的$F1$分数

Table 1 $F1$ Values of Different Line Detection Methods

提取方法	图像类别	图像对1	图像对2	图像对3	图像对4	图像对5
Hough_p[24]	真实图像	0.579	0.644	0.468	0.437	0.406
	虚拟图像	0.575	0.515	0.476	0.458	0.511
LSD[25]	真实图像	0.622	0.708	0.691	0.665	0.665
	虚拟图像	0.692	0.671	0.625	0.649	0.675
FLD[26]	真实图像	0.741	0.654	0.683	0.671	0.653
	虚拟图像	0.708	0.619	0.652	0.669	0.704
EDLines[27]	真实图像	0.686	0.724	0.733	0.751	0.675
	虚拟图像	0.728	0.656	0.784	0.756	0.677
本文方法	真实图像	0.927	0.954	0.914	0.878	0.903
	虚拟图像	0.951	0.962	0.933	0.880	0.919

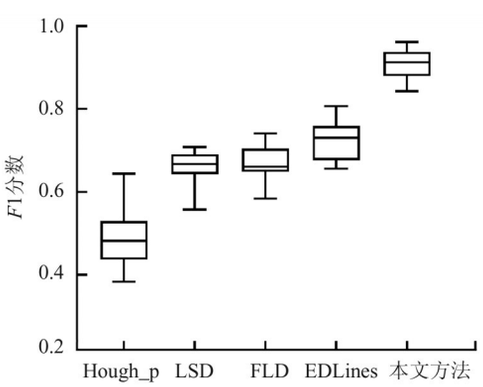


图10 不同特征线提取方法的$F1$分数箱型统计图

Fig. 10 Box Statistics of $F1$ Values of Different Line Detection Methods

从表1可以看出,在地震场景的虚实特征提取的环境下,基于灰度图进行提取的Hough_p方法$F1$分数平均值为0.507,基于RGB色彩图像的LSD、FLD以及EDLines方法$F1$分数平均值分别为0.665、0.675、0.717,由此可见传统方法对于地震灾害场景特征的错提取、漏提取情况较多,本文结构语义特征的提取方法$F1$分数平均值为0.922,较传统方法有明显的提升,实现了虚实特征的准确提取,说明本文方法在地震场景中具有更好的适应性。

2.2.2　结构语义特征匹配分析

在虚实位姿解算过程中,需根据提取结果对虚实特征进行匹配以获得特征对。本文分别采用现有的 4 种主流匹配方法 SURF[28]、ORB[29]、Harris[30]、EDLines+RANSAC[31]与本文方法进行特征匹配实验,结果如图 11 所示。

虚实位姿的解算方法只有在匹配点对数大于 8 时才可获取相对正确的解算结果,点对越多解算结果越精确。以正确匹配数为标准对实验结果进行对比,正确匹配数指提取匹配结果中准确点对的个数,该值越高,表示可以用于配准的点对越多,配准效果越好。统计不同方法匹配正确匹配点对数如表 2 所示。

由图 11 和表 2 可以看出,ORB、Harris、EDLines+RANSAC 方法受到异质性虚实图像的影响,特征描述符无法准确描述特征,匹配精度较低。SURF 方法使用质量较高的三维重建模型的图像对 4 和图像对 5 有相对较好的提取结果,但是仍然无法满足高精度的 AR 场景建模需求,在实际使用中无法稳定地提供虚实特征点对。本文方法在不同情景下均有较为可靠的匹配精度,证明本文几何-语义联合的特征描述子可以有效进行特征点对的匹配,可用于高精度的 AR 场景建模。

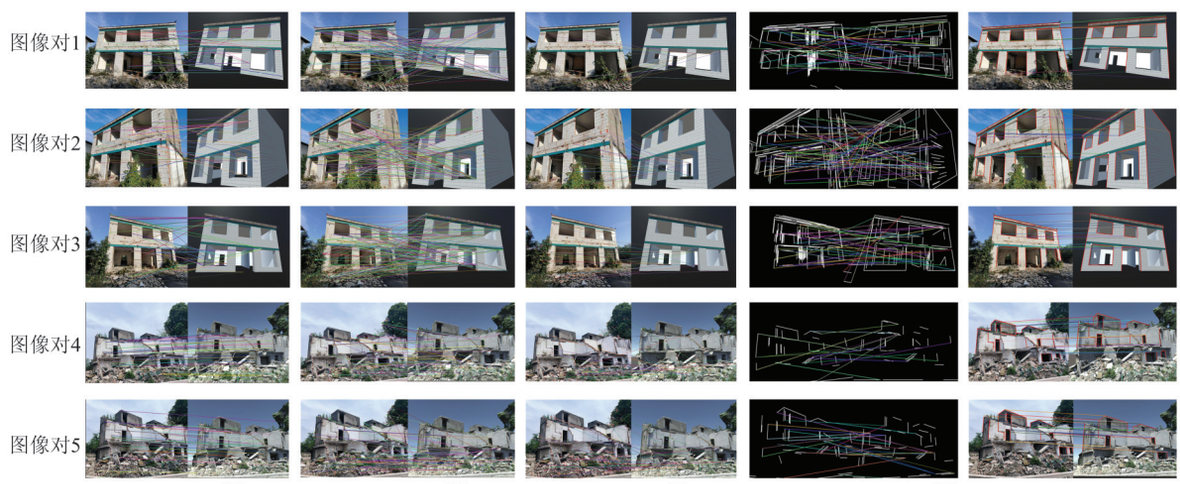


图 11　不同匹配方法的实验结果

Fig. 11　Experimental Results of Different Matching Methods

表 2　不同匹配方法的正确匹配点对数

Table 2　Number of Correctly Matched Pairs of Points of Different Matching Methods

匹配方法	图像对 1	图像对 2	图像对 3	图像对 4	图像对 5
SURF[28]	2	4	3	10	10
ORB[29]	1	5	2	4	2
Harris[30]	3	5	4	2	2
EDLines+RANSAC[31]	1	0	2	0	0
本文方法	11	13	10	18	21

2.2.3　灾害现场 AR 场景建模精度评估

基于特征解算结果进行位姿解算实验进而实现地理配准,位姿解算程序基于特征提取以及匹配的结果对每个虚实图像对进行位姿的解算。得到位移的改正数 $\mathrm{d}x$、$\mathrm{d}y$、$\mathrm{d}z$ 以及旋转的改正数 $\mathrm{d}\kappa$、$\mathrm{d}\varphi$、$\mathrm{d}\omega$ 的解算结果如表 3 所示。

本文使用虚实融合效果来评价 AR 场景建模精度,首先基于位姿校正参数调整虚拟相机位姿并生成新图像,然后将新生成图像与基准图像进行特征点对匹配,通过计算各特征点对视线偏移夹角值的均值作为配准精度量化指标[32]。实验测得各图像对的平均视线偏移夹角如表 4 所示。

表 3　不同图像对位姿解算结果

Table 3　Results of Different Image Pairs for Positional Pose Solution

项目	参数	图像对 1	图像对 2	图像对 3	图像对 4	图像对 5
位置修正/m	$\mathrm{d}x$	−1.416	1.061	−1.608	−0.654	−1.070
	$\mathrm{d}y$	0.437	−0.339	−0.420	0.865	−0.243
	$\mathrm{d}z$	0.172	−1.442	−0.800	0.665	−1.532
角度修正/(°)	$\mathrm{d}\varphi$	−0.867	−0.213	−0.131	−2.340	4.251
	$\mathrm{d}\omega$	6.318	2.763	−8.539	3.420	6.646
	$\mathrm{d}\kappa$	−6.520	−2.550	−1.046	0.380	−3.850

由表 4 可知,在结构语义约束前各个图像视线偏移夹角平均值为 4.63°,存在明显偏差,在引入结构语义特征约束后,通过特征点的位姿解算和融合建模,得到的视线偏移夹角平均值显著降

低至1.24°,结构语义约束后的视线偏移夹角平均值为结构语义约束前的视线偏移夹角平均值的20%左右,虚实融合建模的精度显著提升。

表4 约束前后各图像对的平均视线偏移夹角/(°)

Table 4 Average Angular Deviation of Line of Sight Before and After Constraint/(°)

组别	图像对1	图像对2	图像对3	图像对4	图像对5
结构语义特征约束前	5.21	4.58	4.72	4.41	4.23
结构语义特征约束后	1.41	1.13	1.22	1.58	0.87

3 结 语

本文面向地震灾害现场的信息快速感知、AR场景精准建模需求,提出了结构语义特征约束的地震灾害AR场景精准建模方法,针对地震灾害现场相关结构语义信息及相关约束构建了地震灾害结构语义特征库,设计了结构语义约束的灾害现场AR场景虚实特征提取方法,实现了特征约束的灾害现场AR场景虚实建模,并针对受灾现场进行AR场景建模实验。实验结果表明,本文语义约束的特征提取方法可信度$F1$分数达90%,几何-语义联合特征点匹配方法克服异质性虚实图像的匹配困难问题,满足地理配准需求,结构特征语义约束后的AR场景建模结果虚实融合误差相较于结构特征语义约束前降低了约80%,证明本文方法对于AR场景虚实融合建模精度有显著提升。

参 考 文 献

[1] 刘恩东,陈子豪.“一带一路”自然灾害防治和应急管理国际合作机制建设与中国方案[J].中国减灾,2024(8):43-46.
LIU Endong, CHEN Zihao. Construction of An International Cooperation Mechanism for Natural Disaster Prevention and Emergency Management on the “Belt and Road” and China's Program[J]. *Disaster Reduction in China*, 2024(8): 43-46.

[2] 陆明勇,赵晓霞,韩珂,等.分析灾害现场特征提升救援行动效率[J].中国减灾,2023(9):51-53.
LU Mingyong, ZHAO Xiaoxia, HAN Ke, et al. Analyze the Characteristics of the Disaster Site to Improve the Efficiency of Rescue Operations[J]. *Disaster Reduction in China*, 2023(9): 51-53.

[3] 新华社.国务院印发《“十四五”国家应急体系规划》[J].中国应急管理,2022(2):4.
Xinhua News Agency. The State Council Issued the National Emergency Response System Plan for the Fourteenth Five-Year Plan[J]. *China Emergency Management*, 2022(2): 4.

[4] 朱军,付林,李维炼,等.知识引导的滑坡灾害场景动态表达方法[J].武汉大学学报(信息科学版),2020,45(8):1255-1262.
ZHU Jun, FU Lin, LI Weilian, et al. Knowledge-Guided Dynamic Representation Method of Landslide Disaster Scene[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(8): 1255-1262.

[5] 李维炼,朱军,张昀昊,等.空间语义约束的泥石流灾害VR场景融合建模及交互方法[J].武汉大学学报(信息科学版),2020,45(7):1073-1081.
LI Weilian, ZHU Jun, ZHANG Yunhao, et al. A Fusion Modeling and Interaction Method with Spatial Semantic Constraint for Debris Flow VR Scene[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(7): 1073-1081.

[6] 申申,龚建华,李文航,等.基于虚拟亲历行为的空间场所认知对比实验研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2018,43(11):1732-1738.
SHEN Shen, GONG Jianhua, LI Wenhang, et al. A Comparative Experiment on Spatial Cognition Based on Virtual Travel Behavior[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(11): 1732-1738.

[7] 周忠,周颐,肖江剑.虚拟现实增强技术综述[J].中国科学:信息科学,2015,45(2):157-180.
ZHOU Zhong, ZHOU Yi, XIAO Jiangjian. Survey on Augmented Virtual Environment and Augmented Reality[J]. *Scientia Sinica Informationis*, 2015, 45(2): 157-180.

[8] 徐静.面向应急救援的可穿戴智能装备设计研究[J].包装工程,2023,44(24):123-130.
XU Jing. Design of Wearable Intelligent Equipment for Emergency Rescue[J]. *Packaging Engineering*, 2023, 44(24): 123-130.

[9] 周东波,秦政,陈言言,等.通视受限下视锥剖分的移动增强现实注册策略[J].武汉大学学报(信息科学版),2018,43(8):1178-1184.
ZHOU Dongbo, QIN Zheng, CHEN Yanyan, et al. Registration Strategy for Mobile Augmented Reality Based on Cone-View Partition Under the Restricted Visibility Environment[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(8): 1178-1184.

[10] 李新春.浅谈SLAM+AR眼镜在远程协助中的应用[J].中国设备工程,2020(19):251-252.
LI Xinchun. An Introduction to SLAM+AR

Glasses in Remote Assistance[J]. *China Plant Engineering*, 2020(19): 251-252.

[11] 陈琼, 林兴萍, 舒元昊, 等. 融合目标检测和空间投影的增强现实方法[J]. 计算机系统应用, 2023, 32(10): 123-131.
CHEN Qiong, LIN Xingping, SHU Yuanhao, et al. Augmented Reality Method Combining Object Detection and Spatial Projection[J]. *Computer Systems and Applications*, 2023, 32(10): 123-131.

[12] MA W, XIONG H J, DAI X F, et al. An Indoor Scene Recognition-Based 3D Registration Mechanism for Real-Time AR-GIS Visualization in Mobile Applications[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2018, 7(3): 112.

[13] 曹鹏霞, 李文新, 马伟苹. 增强现实无标识跟踪注册方法研究综述[J]. 计算机应用与软件, 2023, 40(4): 1-7.
CAO Pengxia, LI Wenxin, MA Weiping. Survey on Marker-Less Tracking and Registration Methods of Augmented Reality[J]. *Computer Applications and Software*, 2023, 40(4): 1-7.

[14] RADANOVIC M, KHOSHELHAM K, FRASER C. Aligning the Real and the Virtual World: Mixed Reality Localisation Using Learning-Based 3D Model Registration[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2023, 56: 101960.

[15] YUE L W, LI H J, ZHENG X W. Distorted Building Image Matching with Automatic Viewpoint Rectification and Fusion[J]. *Sensors*, 2019, 19(23): 5205.

[16] 侯守明, 韩吉, 张煜东, 等. 基于视觉的增强现实三维注册技术综述[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(11): 2206-2215.
HOU Shouming, HAN Ji, ZHANG Yudong, et al. Survey of Vision-Based Augmented Reality 3D Registration Technology[J]. *Journal of System Simulation*, 2019, 31(11): 2206-2215.

[17] 黄碧辉, 吴勇, 郑森源, 等. 一种改进的户外移动增强现实三维注册方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(12): 1865-1873.
HUANG Bihui, WU Yong, ZHENG Senyuan, et al. An Improved Registration Method for Outdoor Mobile Augmented Reality[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(12): 1865-1873.

[18] 刺小兆, 刘新妹, 殷俊龄. 基于特征匹配的单目相机姿态解算[J]. 计算机系统应用, 2023, 32(1): 310-315.
LA Xiaozhao, LIU Xinmei, YIN Junling. Attitude Algorithm of Monocular Camera Based on Feature Matching[J]. *Computer Systems and Applications*, 2023, 32(1): 310-315.

[19] 巩丹超, 韩轶龙, 黄旭. 线特征约束的建筑物密集匹配边缘全局优化方法[J]. 测绘学报, 2021, 50(6): 833-846.
GONG Danchao, HAN Yilong, HUANG Xu. Global Refinement of Building Boundary with Line Feature Constraints for Stereo Dense Image Matching[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50(6): 833-846.

[20] 董赛云,刘钊,李婕,等. 深度学习融合局部聚合向量的增强现实标志物检索研究[J]. 测绘地理信息, 2022,47(S1):157-161.
DONG Saiyun, LIU Zhao, LI Jie, et al. Research on Augmented Reality Marker Retrieval Based on Deep Learning and Vector of Locally Aggregated Descriptors[J]. *Journal of Geomatics*, 2022, 47(S1):157-161.

[21] AYADI M, SCUTURICI M, BEN AMAR C, et al. A Skyline-Based Approach for Mobile Augmented Reality[J]. *The Visual Computer*, 2021, 37(4): 789-804.

[22] 胡校飞, 周杨, 蓝朝桢, 等. 结构语义辅助约束的数字孪生场景虚实配准方法[J]. 地球信息科学学报, 2023, 25(5): 883-895.
HU Xiaofei, ZHOU Yang, LAN Chaozhen, et al. Virtual Real Registration Assisted by Structural Semantic Constraint for Digital City Scene[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2023, 25(5): 883-895.

[23] 邓晨, 游雄, 张威巍, 等. 基于2D地图的城市户外ARGIS视觉辅助地理配准技术[J]. 测绘学报, 2019, 48(10): 1305-1319.
DENG Chen, YOU Xiong, ZHANG Weiwei, et al. A Vision-Aided Geo-Registration Method for Outdoor ARGIS in Urban Environments Based on 2D Maps[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(10): 1305-1319.

[24] ZHAO K, HAN Q, ZHANG C B, et al. Deep Hough Transform for Semantic Line Detection[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2021, 44(9): 4793-4806.

[25] XUE N, BAI S, WANG F, et al. Learning Attraction Field Representation for Robust Line Segment Detection[C]//IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Long Beach, USA, 2019.

[26] BAYKAL I C, YILMAZ I C. An Extremely Fast Pattern Based Line Detector[C]//The 13th IEEE International Conference on Intelligent Computer Com-

munication and Processing (ICCP), Cluj-Napoca, Romania, 2017.

[27] DAN X, GONG Q, ZHANG M, et al. Chessboard Corner Detection Based on EDLines Algorithm[J]. *Sensors*, 2022, 22(9): 3398.

[28] AOUTHU S, KOLLATI M, KURAPARTHI S, et al. Robust Video Watermarking with Complex Conjugate Symmetric Sequency Transform Using SURF Feature Matching[J]. *Cogent Engineering*, 2024, 11(1): 2345851.

[29] NUSANTIKA R N, XIAO J, HU X. An Enhanced Multiscale Retinex, Oriented FAST and Rotated BRIEF (ORB), and Scale-Invariant Feature Transform (SIFT) Pipeline for Robust Key Point Matching in 3D Monitoring of Power Transmission Line Icing with Binocular Vision[J]. *Electronics*, 2024, 13(21): 4252.

[30] RAMLI R, IDRIS I Y M, HASIKIN K, et al. Local Descriptor for Retinal Fundus Image Registration[J]. *IET Computer Vision*, 2020, 14(4): 144-153.

[31] 周艳青,薛河儒,马学磊,等. 基于RANSAC算法的改进特征匹配方法研究[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版),2021,42(6):8792.
ZHOU Yanqing, XUE Heru, MA Xuelei, et al. Improved Feature Matching Method Based on RANSAC Algorithm[J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University* (*Natural Science Edition*), 2021, 42(6): 8792.

[32] 邓晨, 游雄, 智梅霞. 户外增强现实地理配准精度测试评估[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(9): 1693-1704.
DENG Chen, YOU Xiong, ZHI Meixia. Evaluation on Geo-Registration Accuracy of Outdoor Augmented Reality[J]. *Journal of System Simulation*, 2020, 32(9): 1693-1704.