



引文格式:徐舒婷,郑先伟,谢潇,等.面向虚实融合的单体建筑物实时识别与定位[J].武汉大学学报(信息科学版),2023,48(4):542-549.DOI:10.13203/j.whugis20200561

Citation: XU Shuting, ZHENG Xianwei, XIE Xiao, et al. Real-Time Building Instance Recognition for Vector Map and Real Scene Fusion[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(4):542-549. DOI:10.13203/j.whugis20200561

面向虚实融合的单体建筑物实时识别与定位

徐舒婷¹ 郑先伟¹ 谢潇² 熊汉江¹

¹ 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,湖北 武汉,430079

² 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

摘要:针对当前矢量地图导航缺乏真实环境信息,而视觉地理定位依赖海量图像标注数据的问题,提出了一种面向虚实融合的单体建筑物实时识别与定位方法。该方法以智能手机为载体,利用轻量级深度网络 SSD(single shot detector)实时检测手机视频流中的建筑物对象类别,通过调用手机内置传感器获取当前定位信息与拍摄视角,并以矢量地图信息为辅助,在仅需识别出建筑物类别的情况下,准确获得单个建筑物的属性与定位信息,并与矢量地图进行叠加可视化,最终达到真实地理环境与矢量地图融合的增强导航。随机采集了 550 张建筑物图像,经过处理标注后作为训练标签,在计算机上训练 SSD 的建筑检测功能并且进行验证;将训练好的 SSD 网络模型迁移到移动端,结合地理围栏方法与手机传感器开发可识别建筑单体信息的增强导航系统,将系统部署在手机上进行测试。实验结果表明,该方法可充分利用矢量地图与实景图片的互补信息,在仅需少量建筑物标注样本的情况下,实现单体建筑物信息增强的手机端地图导航,有效缓解了矢量地图定位不够直观的问题。

关键词:地理定位;建筑物识别;嵌入式设备;增强现实导航

中图分类号:P228;TP391

文献标识码:A

收稿日期:2020-12-16

DOI:10.13203/j.whugis20200561

文章编号:1671-8860(2023)04-0542-08

Real-Time Building Instance Recognition for Vector Map and Real Scene Fusion

XU Shuting¹ ZHENG Xianwei¹ XIE Xiao² XIONG Hanjiang¹

¹ State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

² School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Objectives: In current navigation systems, the vector map navigation lacks real environment information while visual geolocation rely heavily on massive image annotation data, leading to unsatisfactory experience for general users. This paper proposes a method of real-time recognition and positioning of single buildings for mobile augmented reality (AR) navigation. **Methods:** The proposed method adopts a light-weight deep network SSD (single shot detector) to detect in real-time the building objects from the mobile phone video stream, and obtains the current position and shooting angle of view by using the built-in sensors of the mobile phone. Once the building category is recognized, the attributes and positioning information of the involved building instances are able to be obtained by exploiting the vector map information, which are superposed on the vector map to be visualized. Thereby, an enhanced navigation system combining real geographic environment and vector map is achieved. **Results:** The experimental results show that our proposed method can correctly identify multiple building entities at different times and locations. The building detection is less affected by lighting conditions, and the detection accuracy can reach about 95%, which

基金项目:国家重点研发计划(2018YFB0505500;2018YFB0505501);中央高校基本科研业务费;国家自然科学基金(41701445, 41871361, 42071370)。

第一作者:徐舒婷,硕士生,主要从事场景理解与增强现实导航研究。xushuting@whu.edu.cn

通讯作者:郑先伟,博士,副研究员。zhengxw@whu.edu.cn

meets the requirements of real-time navigation. **Conclusions:** Compared with the traditional geolocation method, this method can make full use of the complementary information of vector maps and realistic photos, and only requires a small number of building annotation samples. This proposed method succeeds in realizing mobile AR navigation with enhanced information of individual buildings, which effectively relieves the unintuitive visualization problem of vector map navigation. This study can potentially improve users' experience and cognitive ability of environment through building detection and information enhancement.

Key words: geo-location; building recognition; embedded equipment; augment reality navigation

随着定位技术、移动通信和移动地理信息技术的飞速发展,个人定位、手机导航、物流跟踪等位置服务应运而生^[1-3]。智能终端的迅速普及和免费地图/导航软件的广泛使用,使得面向公众的应用成为位置服务的主体^[4]。然而,基于传统二维/三维地图的位置服务在导航模式和应用上还存在着一定局限性。目前的导航模式主要是用户根据自身的定位信息,通过不断观察和对比导航地图与周围环境,从而将周围的布局与地图匹配上,实现自身对环境以及导航路线的认知。这对眼脑协同要求较高,尤其是在定位误差比较大。周边环境较复杂的情况下,难以进行判别;对于环境识别能力较弱的人群,则经常会产生迷茫。因此,面向公众应用,研究环境认知增强的地图导航新模式具有重要的意义和实际价值。

当前传统地理可视化的输出主要为纸质地图或电子地图,为用户提供了有限的交互模式。增强现实(augmented reality, AR)技术突破了传统地理数据的表达方式^[5-6],能够将地理信息系统(geographic information system, GIS)空间数据库中的复杂信息叠加在显示场景中,为用户创造一个身临其境的环境,使其更加准确地理解和接受地图空间的信息。国内外学者围绕空间增强现实融合展开了一系列的研究^[7-9]。结合轻量型 AR 设备、地图信息(兴趣点、迷你彩图、导航箭头^[10])以及高精度同时定位与建图(simultaneous localization and mapping, SLAM)技术等,学者们也尝试将 AR 技术应用到室内外导航服务中^[11-13]。2017 年 11 月,百度地图发布了全新的步行 AR 导航(<http://lbsyun.baidu.com/index.php?title=androidsdk>),将 AR 技术与导航功能结合,用户开启 AR 导航后,不必反复查看地图路线信息,只需结合语音导航、真实街景即可轻松找到方向,顺利抵达目的地,大大提升了导航体验。同时,苹果公司在 iOS11 系统的地图应用中也增加了对 AR 技术的支持,带来更佳的步行导航用户交互体验(<https://developer.apple.com/maps/>)。然而,当前的 AR 导航技术主要利用 GPS(global positioning

system)/全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)技术,通过标识指导,结合地图使用,因此过度依赖 GPS/GNSS 提供精确位置定位,使得在 GPS 信号弱的地方,AR 导航将无法正常工作。

近年来,基于图像的地理定位技术在计算机视觉和 GIS 领域引起了广泛的关注。地理定位是确定查询图像中每个像素的真实地理位置的问题。目前主流的方法是将地面视图照片与带地理参考的航空图像匹配^[14],获得地面摄像头定位信息。然而,由于从地面和空中不同角度获取图像时视点发生了明显的变化,导致图像畸变非常大,使得传统匹配方法(如尺度不变特征转换(scale invariant feature transform, SIFT)^[15]和加速稳健特征(speeded up robust features, SURF)^[16]等)仍然极具挑战性,并且该方法还一定程度受限于数据质量和覆盖范围。随着人工智能的不断发展,基于深度学习的图像识别与目标检测^[17]在地理定位中得到广泛研究。基于深度学习的方法^[18]主要通过卷积神经网络来学习和预测地面图像与航空图像之间的匹配关系,或通过单体建筑物识别,进而达到地理定位的目的。但是这些方法通常需要构建很大的图像数据库,并为每一个单体建筑物提供多个视角的训练图像,不仅耗时耗力,而且普适性较低。对此,本文提出了一种面向虚实融合的单体建筑物实时识别与定位方法。通过智能手机后置摄像头实时获取真实场景视频流,并利用轻量级深度网络 SSD(single shot detector)^[19]实时检测视频流中的建筑物对象类别,结合手机内置的传感器信息以及矢量地图丰富的地理信息,来定位和获取建筑物单体信息,并在手机视频窗口和地图中实时绘制建筑物属性信息和定位辅助信息,以实现矢量地图和真实场景的实时融合与交互,为二维导航地图提供真实场景的辅助。从而使得用户在一些陌生的环境中(特别是在交叉路口时),当电子地图很难及时确定自身位置时,能帮助其快速确定自身方位,进行空间解算,感知周围环境。

1 基于建筑物识别的矢量地图与真实场景实时融合

本文面向虚实融合的单体建筑物实时识别与定位方法处理流程如图1所示。该方法在用户进行移动端导航时,首先通过智能手机后置摄像头获取真实场景视频流,并使用SSD目标检测器实时检测视频流中的建筑物;然后利用

智能手机的内置传感器信息获取手机姿态(拍摄方位)和当前定位信息,结合矢量地图信息,计算得到被检测建筑物在地图中的位置,从而获得其名称和相关属性信息;最后借助增强现实技术实现地理实体识别结果与空间信息实时联动可视化。为了达到实时AR导航的目的,本文方法在设计上尽量使用轻量级的算法以简化相关步骤的处理。

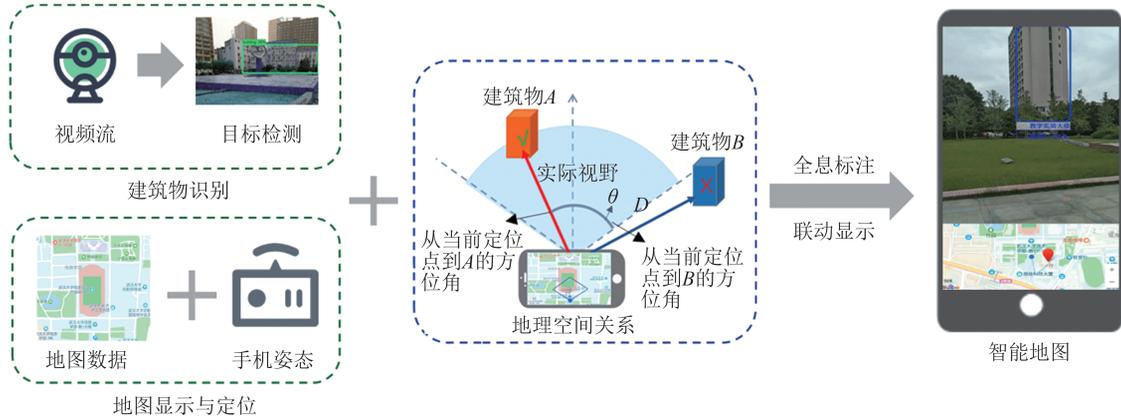


图1 本文方法流程

Fig.1 Flowchart of the Proposed Method

1.1 智能手机位姿信息获取与处理

随着智能手机的硬件系统和软件系统不断更新完善,基于智能手机内嵌的各种传感器,比如重力传感器、磁场传感器、光线传感器、陀螺仪传感器等,可以提供手机的各种基本信息。本文所需的设备位置信息和姿态信息通过智能手机的位置服务和方向传感器获得,衡量手机姿态的参数包括手机的前后俯仰、手机朝向、左右倾斜3个。姿态传感器坐标图如图2所示。

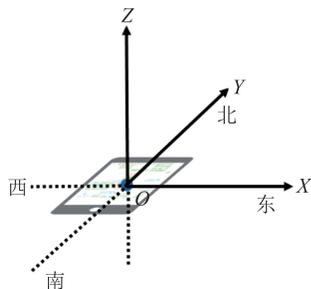


图2 姿态传感器坐标图

Fig.2 Coordinate System of Attitude Sensor

将设备正面朝上水平放置时屏幕的短边方向作为X轴,右方向为正方向;Y轴为手机屏幕垂直轴,以手机左下角指向屏幕顶部作为Y轴的正方向;Z轴为OXY平面的垂直轴,Z的正方向指向天空。手机朝向指示手机绕Z轴转动的角度大

小,即手机偏离正北方向的角度,范围为 $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$;当智能手机正北放置时为 0° ,角度以智能手机绕Z轴顺时针转动递增,手机正东放置为 90° ;俯仰角指示手机绕X轴转动的角度大小,其值为 $-180^{\circ} \sim 180^{\circ}$;左右倾斜,指示手机绕Y轴转动的角度,其值为 $-90^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 。

本文使用的手机姿态参数主要是手机朝向,手机偏离正北方向的角度用于限定当前视野范围以及获取当前范围内的地图、建筑物信息。

1.2 单体建筑物的实时检测与识别

本文单体建筑物检测和识别主要是使用户可以将地图中的抽象平面矢量化建筑物信息与实际环境中的实景建筑物对应,达到辅助地图认知和增强导航的目的。不同于视觉地理定位依赖海量单体建筑物标注,本文主要通过粗检测得到建筑物类别,并调用手机传感器信息和地图信息共同解算得到单体建筑物信息。因此,该部分主要涉及手机摄像头数据处理,基于SSD模型的建筑物检测及单体建筑物定位与属性获取等3个方面,如图3所示

由于通过智能手机Android系统提供的相机应用程序接口获取的摄像头原始数据是YUV(Luma-Chroma model)格式,这是一种为彩色电视系统使用的数据格式。而这种格式的数据并



图 3 建筑物识别实验流程

Fig.3 Building Recognition Process

不方便用于地理实体的识别处理,因此手机摄像头数据处理主要是将智能手机获取的原始图像数据(YUV格式)转化为RGB类型的通用图像数据格式,使其成为SSD模型可处理的格式。YUV格式图像与RGB格式图像之间的转换公式如下:

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1.13983 \\ 1 & -0.39465 & -0.58060 \\ 1 & 2.03211 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Y \\ U \\ V \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中, $(R, G, B)^T$ 为转换为RGB格式后,红绿蓝3个通道的颜色值,范围在0~255之间; $(Y, U, V)^T$ 为输入数据。图像转换为RGB格式后,既可绘制在手机屏幕上,也可以用于地理实体的检测,作为地理增强系统中实时环境显示的一部分。

对于建筑物目标的实时检测,考虑到SSD在大目标且结构棱角分明这一类对象上具有较高的检测精度和速度,因此选择SSD网络作为本文方法的实时检测器。SSD网络框架如图4所示。

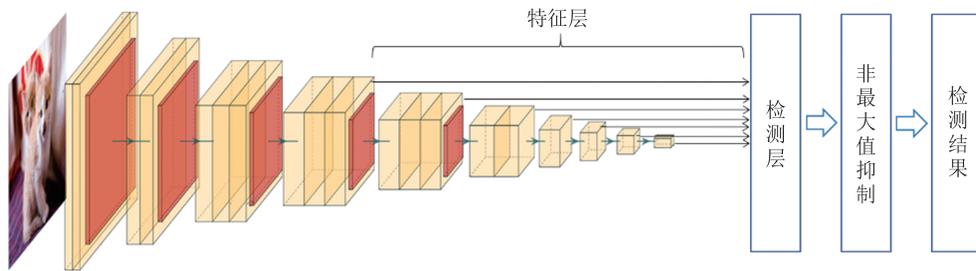


图 4 SSD网络框架图

Fig.4 SSD Network Architecture

SSD模型是一种直接预测目标类别和边界框的目标检测网络,其中主网络结构采用VGG16 (visual geometry group 16)^[20],将最后两个全连接层改成卷积层,然后增加了4个卷积层来构造网络结构。在进行预测时,网络会产生一定大小的边界框集合,在每个默认框中为每个出现的目标类别生成预测分数,并对边界框进行适当的调整,以便于更好地匹配目标的形状。与传统的目标检测不同,本文实验只利用SSD模型检测真实场景中建筑物这一地理实体,并不同时获得建筑物的属性信息。这样有助于减少建筑物单体图像数据库的构建,提高实验的泛化能力。本文实验中,图像中检测到的建筑物一方面可以用于辅助地理定位,另一方面可以作为增强现实地图导航的真实场景展示。

由于本文使用SSD网络模型的地理目标只是真实场景中建筑物这一地理实体,仅仅只有外包矩形,而没有该幢建筑物具体空间与属性信息,这样的检测结果并不能直接使用。而矢量地图丰富的地理信息可以帮助完成查询建筑物信息。因此需要在地图中进行地理空间关系约束,

查询检测出来的建筑物的空间和属性信息。空间关系对于将基于视觉的检测结果应用于真实地理世界也至关重要。因此,有必要利用移动设备的传感器如方向传感器、加速度传感器和磁场传感器将基于视觉的地理对象检测结果与其空间关系结合起来,实现后续虚拟对象的精确配准。

为了在地图上查询出所检测建筑物最准确的位置与姿态信息,从而与地图进行关联,本文使用地理围栏方法缩小建筑物的查询范围,减少查询时间。地理围栏是位置服务(location based service, LBS)的一种应用,即利用一个虚拟的栅栏围出一个虚拟地理边界,当手机进入、离开某个特定地理区域,或在该区域内活动时,手机可以自动接收通知和警告。本文的地理围栏以当前位置为参考点,在地图上划定一个边长为100 m的菱形范围(如图5所示),通过射线法判断手机视频流中仅在该范围内的建筑物,继而使用概率公式计算得到概率最高的目标(即最有可能是目标检测所识别出的建筑物),并在地图上将该建筑物标亮。



图5 地理围栏空间关系示意图

Fig.5 Spatial Relations of Geo-fencing

为了划定地理围栏距离范围以及计算每个建筑物目标到当前定位点的距离,本文方法引入

了距离条件,用来表示视觉传感器和地理对象之间的距离,定义如下:

$$d = 2\arcsin \sqrt{\left(\sin \frac{L'_A - L'_B}{2}\right)^2 + \cos L'_A \times \cos L'_B \times \left(\sin \frac{L''_A - L''_B}{2}\right)^2} \times R \quad (2)$$

式中, L'_A 、 L''_A 分别为GPS定位点A的经、纬度; L'_B 、 L''_B 分别为目标点B的经、纬度; R 为地球半径,单位:km。

为了进一步得到地理围栏角度范围,以及计算地理围栏内建筑物为目标检测所识别出的建筑物的概率,引入了方向条件,方位角定义如下:

$$\beta = \arctan \left(\frac{\cos L'_A \times \sin L'_B - \sin L'_A \times \cos L'_B \times \cos(L''_B - L''_A)}{\sin(L''_B - L''_A) \times \cos L'_B} \right) \times \frac{180}{\pi} \quad (3)$$

进一步使用射线法来判断建筑物是否在地理围栏(划定的搜索范围)内。在本文使用的方法中,地理围栏为多边形,所以可以将方法转化为判断点是否在多边形内。图6为射线法的示意图,在每个点的右侧绘制一条水平线,并延伸到无穷远,然后计算水平射线与多边形相交的次数。如果相交的次数为偶数,则该点在多边形的外部;如果相交的次数为奇数,则该点在多边形的内部。

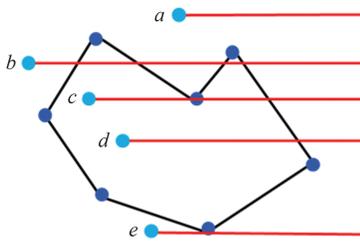


图6 射线法示意图

Fig.6 Ray Casting

根据射线法得到了位于地理围栏内的建筑物,根据式(2)、(3)计算出位于该范围内的建筑物是所检测的建筑物的概率,概率最大的建筑物就是所检测出来的建筑物,计算如下:

$$p = 1 - \left(\frac{d}{d+D} + \frac{\theta}{\theta+\beta} \times 2 \right) / 1.5 \quad (4)$$

式中, $D=150$ m; $\beta=60^\circ$; d 为建筑物与当前定位点的距离; θ 为建筑物相对于当前手机朝向的方向角。概率公式采用非线性模型,可以让结果对

小范围的距离或者角度的变化更加敏感。同时在开放街道地图(OpenStreetMap,OSM)上获取该建筑物的空间和属性信息,根据空间信息计算与当前定位点的距离。为了使该方法可以在低功耗移动或嵌入式设备上轻松实现,本文采用了简单的算法并且不需要大量的数据集对建筑物的信息做额外的训练,就可以在陌生的户外环境中细化目标检测结果。

1.3 矢量地图与真实场景的实时融合与交互

面向AR导航的矢量地图与真实场景融合的整体界面基于两个部分:(1)传统地图的部分,本文采用百度地图的开放能力进行基础符号化地图的可视化,利用OSM查询空间及属性信息;(2)增强现实虚拟融合部分,通过将地理信息与智能手机获取的实时视频进行无缝融合,实现智能手机真实地理场景的智能分析理解,将信息与真实场景相关联,简化用户理解过程,让地图使用更加简单。

由于手机的屏幕尺寸有限,无法一次将地理实体的空间信息可视化,因此本文设计了一种交互方式,通过智能化的交互为用户带来更加丰富的媒体信息。在交互设计中,页面之间的交互切换和按钮的交互功能主要是通过与场景的匹配来实现的。点击屏幕中央的交互按钮,可以跳转到该建筑物相应的信息页面,使得用户可以进一步了解该建筑物,获取所需信息。

2 实验结果与分析

2.1 数据集

为了将 SSD 网络用于移动端的建筑物目标检测,首先需要用一定量的建筑物照片进行网络的训练。本文随机采集了 550 张包含不同视角的不同建筑物自然图像,并将所有图像的分辨率调整为 640×480 像素,然后通过人工框选的方式标注出图像中的建筑物作为训练标签。因此,实验数据集总共包含 500 个带注释的图像,将其分为训练集、验证集和测试集,分别包含 400、100 和 50 张图像。训练集和验证集用于训练 SSD 网络生成预训练模型,测试集用于评估 SSD 模型的



图 7 测试数据集上建筑物检测的实验结果

Fig.7 Results of Buildings Detection on Test Set

2.3 增强导航系统测试

本文基于 Android 平台开发了一个原型系统,系统采用 Android 客户端的架构模式,将 SSD 模型直接存放在本地,减少了模型传输的时间,大大地减少了地理增强现实系统初始化时间,并且增强导航系统部署在移动端,更方便用户使用及携带。本文所采用的增强导航系统测试手机为 Lenovo Z5,处理器是高通骁龙 TM 636 1.8 GHz 8核处理器,运行内存 6 GB,物理存储容量 64 GB,带有 GPS 传感器、方向与加速度传感器、以及 1 600 万像素的前置摄像头。

为了检测系统的稳定性与地理实体识别的正确性及地图联动的实时性,本文对该原型系统进行了测试,并对本文方法分别进行了定性与定量评价。首先是定性评价,在一天的不同时间段对不同场景下的地理实体识别进行了测试和验证,包括街道、校园内及宿舍楼周边 3 个场景,可以得到理想的定位信息与可靠的地图结果;当保持系统持续运行并且不断地改变手机位置,实时可视化地图内容也能够根据位置的改变显示设备所处地理环境的地图信息。图 8 展示了不同时间段的多个建筑物单次识别结果,图 9 展示了不同地点的建筑物识别结果。由图 8、9 可知,该系统

性能。

2.2 模型的训练与测试

本文的实验在 TensorFlow 基础上开发,核心代码采用 C 和 C++ 编写,函数 API 以 python 语言提供。在 Windows 10 环境下采用 GeForce GTX 1060 GPU 加速训练模型。在该环境下,进行 SSD 网络的训练,直到其网络迭代收敛,模型精度不再变换,停止训练。为了验证数据训练的准确性,需要使用测试图片对生成的模型进行验证,模型大小 22.5 MB,在计算机中验证结果如图 7 所示。从图 7 中可以看出,识别目标的概率基本都在 90% 左右,对输入的图片基本能够正确识别,满足实验需求。

可以正确识别不同时间、不同地点的多个建筑物实体。

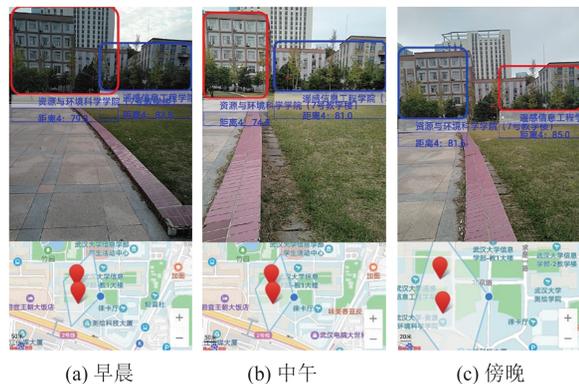


图 8 不同时间段的多个建筑物单次识别结果

Fig.8 Results of Multiple Building Recognition at Different Time

在定量验证地理实体的正确性时,主要考虑不同时间、位置及光照条件对跟踪注册结果的影响。为了方便在户外环境使用手机统计测试结果,本文通过表格的方式,在测试的时候记录实体名称并计算每个实体的准确率和有效检测结果,分别在早晨、中午以及傍晚 3 个不同的时刻进行了实验,表 1 为一天不同时段建筑物检测结果统计表。由表 1 可以发现,建筑物目标的检测准



图9 不同地点的建筑物识别结果
Fig.9 Results of Building Recognition at Different Locations

准确率受光照条件影响较小,并且检测准确率均可以达到95%左右,满足实时导航的要求。最后,本文进一步测试了系统的交互功能。当需要了解更多关于该建筑物的信息,可以点击屏幕中央的定位按钮,就能跳转到相应的信息页面,如图10所示。

3 结 语

视觉地理定位方法需构建大型图像数据库,不仅耗时耗力且难以达到实时,而依赖纯矢量地图的定位导航缺乏真实场景的辅助,抽象不够直观。针对以上问题,本文提出了一种面向虚实的单体建筑物实时定位与识别的方法。实验结果表明,结合目标检测、手机传感器、矢量地图信息的移动户外增强现实方法,在户外环境中实现了对建筑物单体目标的实时检测及矢量地图导航的增强表达。相比于传统地理定位方法,该方法

表1 一天不同时段建筑物检测结果统计表
Tab.1 Results of Building Recognition at Different Time in a Day

类别	早晨		中午		傍晚	
	准确率	测试记录数	准确率	测试记录数	准确率	测试记录数
测绘学院	0.946 7	962	0.934 9	783	0.941 2	858
教学实验大楼	0.977 2	839	0.962 3	687	0.971 1	723
资源与环境科学学院	0.934 6	681	0.949 6	765	0.949 2	712
国家重点实验室	0.993 8	759	0.985 4	874	0.989 3	803
信息学部1号教学楼	0.941 3	643	0.959 8	734	0.952 2	576
信息学部图书馆	0.983 4	622	0.988 7	650	0.994 5	634



图10 交互功能实验结果
Fig.10 Results of User Interaction

充分利用了地图丰富的空间及属性信息,在少量标注数据的支持下,即可达到单体建筑物的定位与属性获取。而相比于纯矢量地图导航,本文通过建筑物的检测和信息增强,很好地提升了用户体验及对定位环境的认知能力。

参 考 文 献

[1] Kothari N, Kannan B, Glasgwow E D, et al. Robust Indoor Localization on a Commercial Smart Phone[J]. *Procedia Computer Science*, 2012, 10: 1114-1120.
[2] Zhang Yuan. Research on Location-Based Service

- [J]. *Information and Communications Technologies*, 2011, 5(2): 42-46. (张园. 移动位置服务应用发展研究[J]. 信息通信技术, 2011, 5(2): 42-46.)
- [3] Zhu Xinyan, Zhou Chenghu, Guo Wei, et al. Preliminary Study on Conception and Key Technologies of the Location-Based Pan-Information Map [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(3): 285-295. (朱欣焰, 周成虎, 芮维, 等. 全息位置地图概念内涵及其关键技术初探[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(3): 285-295.)
- [4] Nam Y. Map-Based Indoor People Localization Using an Inertial Measurement Unit [J]. *Journal of Information Science & Engineering*, 2011, 27: 1233-1248.
- [5] Portales C, Lerma J L, Navarro S. Augmented Reality and Photogrammetry: A Synergy to Visualize Physical and Virtual City Environments [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2010, 65(1): 134-142.
- [6] Guan Yuanyuan, Wang Zhe. Review on the Development and Application of Augmented Reality Technology [J]. *Computer Knowledge and Technology*, 2019(1): 98. (关媛元, 王喆. 增强现实技术发展及应用综述 [J]. 计算机产品与流通, 2019(1): 98.)
- [7] Hou Xiaoning, Guo Jian, Li Aiguang, et al. Research on Application Mode in Augmented Reality Maps [J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2016, 33(6): 639-643. (侯晓宁, 郭健, 李爱光, 等. 增强现实电子地图应用模式研究 [J]. 测绘科学技术学报, 2016, 33(6): 639-643.)
- [8] Liu Cheng, Luo Lihong. Application of AR-Based Augmented Reality in Vehicle Scene Navigation [J]. *Digital Technology & Application*, 2019, 37(3): 84. (刘丞, 罗立宏. 基于AR增强现实的汽车实景导航应用研究 [J]. 数字技术与应用, 2019, 37(3): 84.)
- [9] 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. (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.)
- [10] Zhang Xing, Li Qingquan, Fang Zhixiang. An Approach of Generating Landmark Chain for Pedestrian Navigation Applications [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(10): 1240-1244. (张星, 李清泉, 方志祥. 面向行人导航的地标链生成方法 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2010, 35(10): 1240-1244.)
- [11] Tian Feiteng. Design and Implementation of Augmented Reality Navigation System Based on Android Platform [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2018. (田飞腾. 基于安卓平台的增强现实导航系统设计与实现 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2018.)
- [12] Huang W. A 3D GIS-Based Interactive Registration Mechanism for Outdoor Augmented Reality System [J]. *Expert Systems with Applications*, 2016, 55: 48-58.
- [13] Fang Hao, Song Zhangtong, Yang Liu, et al. Spatial Cognitive Elements of VR Mobile City Navigation Map [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(8): 1124-1130. (方浩, 宋章通, 杨流, 等. VR移动城市导航地图设计中的空间认知要素 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(8): 1124-1130.)
- [14] Bansal M, Daniilidis K, Sawhney H. Ultra-Wide Baseline Facade Matching for Geo-Localization [C]// The 12th International Conference on Computer Vision, Berlin, Germany, 2012.
- [15] Lowe D G. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2): 91-110.
- [16] Bay H, Ess A, Tuytelaars T, et al. Speeded-up Robust Features (SURF) [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2008, 110(3): 346-359.
- [17] Liu Jianwei, Liu Yuan, Luo Xionglin. Research and Development on Deep Learning [J]. *Application Research of Computers*, 2014, 31(7): 1921-1930. (刘建伟, 刘媛, 罗雄麟. 深度学习研究进展 [J]. 计算机应用研究, 2014, 31(7): 1921-1930.)
- [18] Vo N N, Hays J. Localizing and Orienting Street Views Using Overhead Imagery [M]// Cham: Springer International Publishing, 2016.
- [19] Liu W, Anguelov D, Erhan D, et al. SSD: Single Shot MultiBox Detector [M]// Cham: Springer International Publishing, 2016.
- [20] Simonyan K, Zisserman A. Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition [J]. *arXiv*, 2014, DOI: 1409.1556.