

9-18-2020

Evaluation on Geo-registration Accuracy of Outdoor Augmented Reality

Deng Chen

1. *Institute of Geospatial Information, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China;* ;2. *61618 Troops, Beijing 100094, China;* ;

You Xiong

1. *Institute of Geospatial Information, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China;* ;

Meixia Zhi

3. *State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Evaluation on Geo-registration Accuracy of Outdoor Augmented Reality

Abstract

Abstract: Geo-registration technology is a key technology for the combination of augmented reality and geographic information systems, and its registration accuracy has a significant impact on the availability of ARGIS. Aiming at this application, the basic concepts and principles of augmented reality geo-registration technology are analyzed, and *the method for quantitative evaluation of geo-registration accuracy is proposed. Combined with the pre-acquired high-precision geographic information data, a variety of outdoor geo-registration experiments are carried out by using the different hardware devices, and the quantitative accuracy of different geo-registration methods is evaluated.* The geo-registration errors and the problems existing in the practical application are analyzed. And solutions for the different application demands are discussed for the follow-up research.

Keywords

outdoor augmented reality, geo-registration, evaluation of registration accuracy, ARGIS

Recommended Citation

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.

户外增强现实地理配准精度测试评估

邓晨^{1,2}, 游雄¹, 智梅霞³(1. 信息工程大学地理空间信息学院, 河南 郑州 450001; 2. 61618 部队, 北京 100094;
3. 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430079)

摘要: 地理配准技术是增强现实与地理信息系统结合应用的一项关键技术, 其配准精度对 ARGIS (Augmented Reality Geographic Information System) 的可用性有显著的影响。针对增强现实这一应用, 阐释了增强现实地理配准的基本概念与技术原理, 提出了地理配准精度量化评估方法; 结合预先采集的高精度地理信息数据, 采用多种硬件设备设计了不同的地理配准精度评估方案, 实际评估了各类地理配准方法的量化精度; 基于评估结果, 进一步分析了配准误差因素及各方法的局限性, 探讨了不同应用场景的配准方案思路, 为后续研究提供参考和借鉴。

关键词: 户外增强现实; 地理配准; 配准精度评估; 增强现实地理信息系统

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2020) 09-1693-12

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.19-0052

Evaluation on Geo-registration Accuracy of Outdoor Augmented Reality

Deng Chen^{1,2}, You Xiong¹, Zhi Meixia³(1. Institute of Geospatial Information, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China; 2. 61618 Troops, Beijing 100094, China;
3. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: Geo-registration technology is a key technology for the combination of augmented reality and geographic information systems, and its registration accuracy has a significant impact on the availability of ARGIS. Aiming at this application, the basic concepts and principles of augmented reality geo-registration technology are analyzed, and the method for quantitative evaluation of geo-registration accuracy is proposed. Combined with the pre-acquired high-precision geographic information data, a variety of outdoor geo-registration experiments are carried out by using the different hardware devices, and the quantitative accuracy of different geo-registration methods is evaluated. The geo-registration errors and the problems existing in the practical application are analyzed. And solutions for the different application demands are discussed for the follow-up research.

Keywords: outdoor augmented reality; geo-registration; evaluation of registration accuracy; ARGIS

引言

增强现实技术 (AR) 与地理信息系统 (GIS)



收稿日期: 2019-01-28 修回日期: 2019-06-04;
作者简介: 邓晨(1990-), 男, 江西, 博士, 研究方向为虚拟现实与仿真、增强现实; 游雄(1962-), 男, 福建, 博士, 教授, 研究方向为虚拟现实与仿真; 智梅霞(1990-), 女, 河南, 博士生, 机器视觉与智能驾驶。

结合的应用开始受到广泛的关注^[1], 通过将 3D 城市建筑模型、路网信息、兴趣点信息、交通信息、街道导航信息等数据逐层精确的叠加到对应的建筑物和街道上, 可以在户外大范围空间中为用户提供 AR 导航与位置服务^[2], 方便用户日常出行。支持上述 ARGIS 应用的一项关键技术是户外增强现实地理配准技术 (Geo-Registration), 即在统一的全局地理坐标下, 获取高精度的地理信息位置和

<http://www.china-simulation.com>

• 1693 •

AR 用户的绝对位姿（地理坐标+绝对姿态），对具有地理位置的目标信息进行虚实配准。

在增强现实研究中，配准技术一直是众多学者研究的热点^[3-5]，并且取得了较大进展，特别是在室内或者局部小范围场景中，通过人工布设视觉标志^[6]、或基于 SLAM、IMU 等相对位姿跟踪技术^[7-8]，可以方便的实现较为成熟的 AR 应用；在增强现实与地理信息系统结合应用方面，国内外学者对面向户外大范围场景应用的 AR 地理配准技术也进行了积极探究^[9]。杜清运等^[1]、孙敏等^[10]系统的分析了户外 ARGIS 的总体框架，并设计了验证性的原型系统；曲毅等^[11-12]、王俊^[13]等探究了基于位姿传感器的户外 AR 配准方法，并推导了虚实融合坐标转换关系；Ventura 等^[14]、Arth 等^[15]面向户外 AR 应用研究了基于单目视觉的地理定位方法，并致力于在手机、平板等移动终端上实时运行；Menozzi 等^[16]、Gans 等^[17]基于位姿传感器与视觉方法混合，集成研发了一套可在野外条件下应用的穿戴式 AR 系统（ARC4）。这些研究从不同角度、运用不同的方法，为基于轻量化、低功耗、便携式硬件设备的户外 AR 地理配准技术研究提供了参考；但当前的研究对不同配准方法的实际配准效果与适用性尚缺乏对比与分析，且在地理配准精度评估方面，大多通过视觉检验的方式进行配准精度定性评估，缺乏实际的量化评估参考。

鉴于目前户外 AR 地理配准技术问题本身及其基本原理尚没有明确的阐述和分析，本文阐释了增强现实地理配准的基本概念及其技术基本原理，并提出了一种地理配准精度量化评估方法；采用多种硬件设备设计了不同的地理配准技术方案，实际对比了各类地理配准方法的效果，并给出了各类地理配准方法的量化精度参考值；基于评估的结果进一步分析了地理配准的误差因素及各类方法实际应用时存在的问题。

1 方法原理

1.1 相关概念

配准技术作为增强现实的一项关键支撑技术是 1997 年由 Azuma 提出的，当时使用的术语是“3D Registration”^[18]，中文里一般将其称为“3D 配准”^[19]、“虚实配准”或直接简称为配准技术，也有部分学者将其称为“3D 注册”^[10]或“虚实注册”。

通常，不同的应用场景对配准技术的要求不同，基于标志的配准方法^[6]只需获取用户相对于标志的相对位姿，即可对具有预设标志的对象进行增强，但其通常只适用于局部小范围场景；为了能够在户外大范围空间中，随时随地为用户同时提供更多、更广泛的增强信息，则需要在预先设定的统一坐标系中描述用户位姿和虚拟信息的位置。这种在全局地理坐标参考系下的 AR 虚实配准技术称为“Geo-Registration”^[14-15,17]，重点强调了“Geo”一词。

增强现实地理信息系统（ARGIS）是 2004 年由孙敏等^[10]提出，其目的是促进增强现实技术在地理信息服务领域的具体应用。在 ARGIS 研究中，本文援引“Geo-Registration”这一术语对“通用化”的虚实配准技术做进一步阐述，称其为“增强现实地理配准”技术，其基本含义是指在大范围地理空间中，将具有三维位置的地理信息渲染叠加在 AR 显示器上，使用户从不同视角观察时，增强信息都能叠放在现实世界中正确的位置处，能够与真实世界中的对象准确套合。显然，虚拟信息与现实世界对象套合的程度，即虚实配准的精度，对户外 AR 的可用性有显著的影响，实现更高精度的地理配准才能为用户提供更精细、更精确的信息内容服务。

1.2 解算方法

如图 1 所示是地理配准解算过程涉及到的坐标转换原理图，其相关的坐标系参数代称及描述如表 1 所述。地理配准的基本解算过程可分为以下 4 个步骤：

1. 确定用户随身携带的 AR 设备之间的相互坐标转换关系, 通常可以通过离线方法进行标定^[21]。其中传感器设备如加速度计、陀螺仪、摄像机等用于获取用户的位姿和场景真实图像, 刚性绑定到用户头部; 显示器用于渲染合成增强信息, 固定于人眼附近, 便于直接观察。

2. 在地理坐标系中求解用户(及显示器)的位置和视线方向, 建立坐标系 b 、 d 与地理坐标系 e 的变换关系。

因为重力加速度计、磁力计等传感器的测量值都是相对于当地 ENU 坐标系而言的, 因此, 用户相对于 O -XYZ 坐标系的坐标变换, 可由用户相对于 ENU 坐标系的坐标变换乘以 ENU 坐标系相对于 O -XYZ 坐标系的坐标变换^[22]得到。

3. 求解用户与“增强”信息的相对位置关系, 即将具有地理坐标的“增强”信息变换到显示器坐标系 d 中。

现假设环境中待配准的目标点 S 的地理坐标已知, 其相对于显示器坐标系原点 Q 的位置坐标可以计算为:

$$P_d^S = (M_n^e M_b^n M_d^b)^T [P_e^S - (P_e^G + M_n^e M_b^n P_b^Q)] \quad (1)$$

式中: P_d^S 为目标点 S 在显示器坐标系 d 中的坐标位置, 是待求量; P_e^G , M_b^n 分别为用户的地理位置和用户相对于地表 ENU 坐标系的姿态方向, 是需要实时求解的未知量。 P_e^S , P_b^Q , M_d^b , M_n^e (M_n^e

表示由坐标系 n 变换到坐标系 e 的旋转变换矩阵) 等都可以直接测量或离线校正的已知量。

4. 根据式(1)计算得到的参数 P_d^S , 通过 3D-2D 透视投影和显示器视口变换可将虚拟信息渲染到 AR 显示器的正确位置上, 实现增强用户视觉感知。

综上所述, 在具有高精度地理信息内容的基础上, 经过离线标定, 户外增强现实实时地理配准的技术难题, 事实上就转化为如何实时求解用户高精度的 6DOF 绝对位姿, 即实时求解用户在地理坐标系中的 3DOF 位置坐标 P_e^G , 和用户视线相对于地表 ENU 坐标系的 3DOF 绝对方向 (M_b^n)。

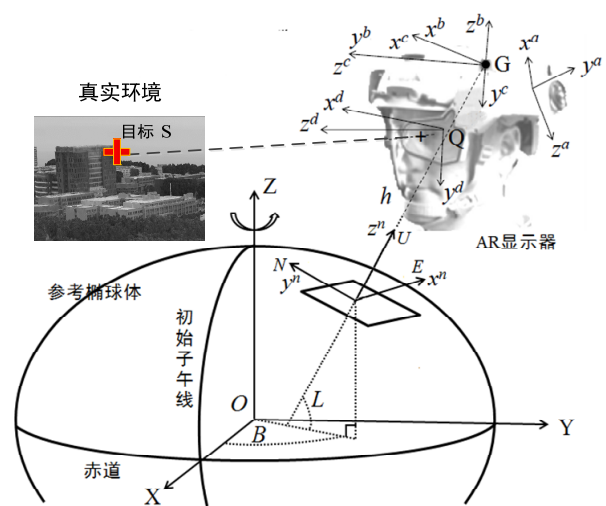


图 1 户外 AR 地理配准解算坐标变换原理图
Fig. 1 Schematic diagram for outdoor AR geo-registration coordinate transformation

表 1 地理配准过程中涉及的坐标系代称及描述

Tab. 1 Representation and description of coordinate systems in geo-registration process

| 坐标系参数代称 | 相关描述 |
|-----------------------|--|
| G | 用户身体坐标系 b 和摄像机坐标系 c 共同的原点 |
| $a - (x^a, y^a, z^a)$ | 惯性传感 (加速度计、陀螺仪) 坐标系, 刚性绑定于用户坐标系 |
| $b - (x^b, y^b, z^b)$ | 用户身体坐标系 b 及其三轴: x^b 指向用户右侧, y^b 轴代表用户视线方向, 指向用户前方, z^b 轴指向用户正上方 |
| $c - (x^c, y^c, z^c)$ | 摄像机坐标系 c 及其三轴: x^c 轴指向相机右侧, y^c 轴指向正下方, z^c 轴指向前方 |
| $d - (x^d, y^d, z^d)$ | 显示器坐标系及其三轴, 固定于人眼附近, 轴方向与摄像机坐标系类似 |
| $n - (x^n, y^n, z^n)$ | 地球表面的东北天 (上) 坐标参考系 (ENU, East-North-UP), 用户视线相对于 ENU 坐标系的方向可以由 3 个姿态自由度 (DOF) 描述 |
| O -XYZ | 地心地固 (ECEF) 直角坐标系, 用 e 表示, 描述地理信息和用户位置的统一空间基准 |

1.3 配准精度量化评估方法

虚实配准精度衡量的是人眼通过显示器观看到的虚实对准程度，而虚拟信息以 2D 图形的方式渲染在显示器上，其与对应的真实物体在用户视野中的偏移夹角越小，则相应的配准精度越高；反之，精度越低。因此，可采用虚实对象的视线偏移夹角作为评估点目标地理配准精度的量化指标。

图 2 所示为虚实配准精度计算的原理图。

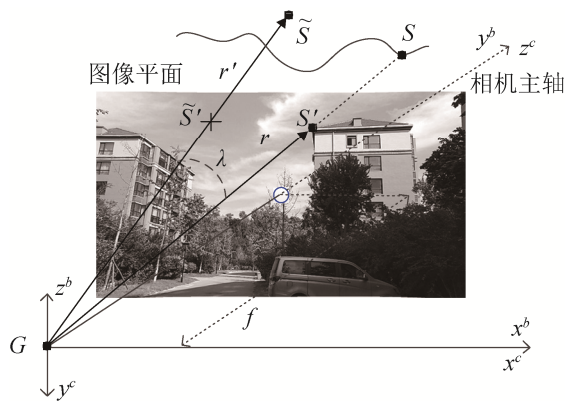


图 2 虚实配准精度求解原理图

Fig. 2 Schematic diagram for quantitative registration accuracy evaluation

图 2 中，以摄像机拍摄的照片类比人眼看到的场景， G 点为图像拍摄时相机的光心位置，即相机坐标系原点； f 为相机焦距； z^c 轴为相机的主光轴，与像平面垂直； S' 为真实世界目标点 S 在像平面的像点；向量 r 为由原点 G 指向像点 S' 的向量；图像平面上点 S' 是根据求解出的图像位姿和 S 点的三维位置反向投影到图像平面的虚拟信息像点，与原点连线构成向量 r' 。理论上，当实现虚实完全配准时，向量 r 和向量 r' 是完全重合的；但实际过程中，因为各种误差因素的存在，向量 r 和向量 r' 总会存在一定的夹角 λ ，显然 λ 越大，配准误差越大； λ 越小，虚实对象叠加越接近。本文通过计算上述 2 向量的夹角 λ 作为评估配准精度的量化指标，具体计算方法如下：

1) 从虚实合成图像上获取像点 S' ， S' 的图像像素坐标分别为： (u_1, v_1) ， (u_2, v_2) ；

2) 根据建立的相机直角坐标系 $G - (x^c, y^c, z^c)$ ，求解向量 r 和 r' 的三轴坐标分量 (x_1, y_1, z_1) ， (x_2, y_2, z_2) ：

$$x_1 = (u_1 - u_0) \times dx, y_1 = (v_1 - v_0) \times dy, z_1 = f \quad (2)$$

$$x_2 = (u_2 - u_0) \times dx, y_2 = (v_2 - v_0) \times dy, z_2 = f \quad (3)$$

式中： (u_0, v_0) 为相机离线校正的中心点像素坐标， dx ， dy 分别为图像平面上单个像素在 x 、 y 轴上的物理尺寸， $f_x = f / dx$ ， $f_y = f / dy$ 是可以根据离线校正^[23]得到的相机焦距内参数。

3) 求解向量 r 和 r' 的夹角 λ ：

$$\cos \langle r, r' \rangle = \cos \lambda = \frac{(x_1, y_1, z_1) \cdot (x_2, y_2, z_2)}{\| (x_1, y_1, z_1) \| \cdot \| (x_2, y_2, z_2) \|} \quad (4)$$

1.4 实验方案设计

当前，面向户外移动应用的 AR 系统硬件构成方法主要有两种，一种是利用手机^[13]、平板等已有的集成化产品，这类设备配备了 GPS、加速度计、磁力计、显示器、摄像机等硬件，其特点是硬件集成度高、轻便易携带且大众化程度高；另一种是通过自主组装方式，在特定头戴式显示器上搭载各类低功耗、轻量化、便携式的传感器，其特点是可根据特定需求自主定制不同成本和性能的 AR 设备。

本文以配准精度为着眼点，借鉴相关的研究经验^[11,13-14,24]，设计了如下 4 种典型的户外 AR 地理配准技术方案，对当前地理配准方法的配准精度进行对比分析，使用的硬件设备及其特点如表 2 和图 3 所示。

表 2 实验设备及其特点

Tab. 2 Experimental devices and characteristics

| 硬件设备 | 特点 |
|-----------|--|
| 小米 5X 手机 | 集成度高；配备加速度计(BMI120)、磁力计(AK09918)、GNSS 芯片等位姿传感器(单项价格几十元)；大众化 Android 手机 |
| Xsens | 捷联式、低功耗；50~60 g， |
| Mti-G-710 | 尺寸 60 mm×40 mm×20 mm，价格 2~3 万元 |
| BQT6175 | 便于组装/携带；约 50 g， 尺寸 40 mm×40 mm×12 mm，价格近百元 |
| Qmini A7 | 可接入千寻差分网络；320 g， 尺寸 165 mm×85 mm×18 mm，价格近万元 |



(a) 小米 5X 手机 (b) GNSS 天线(BQT6175)

(c) 差分定位终端(Qmini A7) (d) Mti-G-710

图 3 实验所用的硬件设备

Fig. 3 Hardware devices of experiment

方案 1: 基于手机(小米 5X)集成传感器获取的 6DOF 位姿, 进行地理配准精度评估;

方案 2: 基于普通便携式 GNSS 接收器(BQT6175)获取 3DOF 位置, 结合便携式惯性传感器(Xsens Mti-G-710)获取 3DOF 姿态信息;

方案 3: 基于差分定位终端(中海达 Qmini A7)获取 3DOF 位置, 结合便携式惯性传感器(Xsens Mti-G-710)获取 3DOF 姿态信息;

方案 4: 基于计算机视觉方法(使用小米 5X 手机相机获取图像), 使用预先重建的三维点云为参考, 采用 EPnP 方法解算图像 6DOF 位姿。

为了能够对图像进行视觉定位, 并且为户外 AR 虚实配准提供高精度的地理信息数据, 本文通过倾斜摄影测量三维重建的方式构建了校园环境内的三维点云数据和大比例尺正射图, 经过人工修模, 构建了校区范围内主要建筑、路网的 3D 模型, 如图 4 所示。为了保证点云和三维模型的地理位置、尺度的准确性, 三维重建时, 在重建区域地面上合理的布设了 RTK GPS 差分控制点, 点云位置精度可以达到 cm 级。

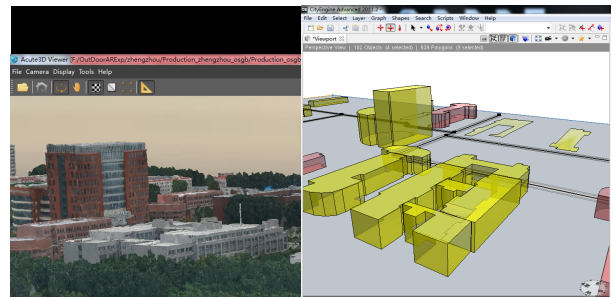


图 4 通过倾斜摄影测量建立的校区点云及三维模型数据
Fig. 4 Point clouds and 3D city-models of campus reconstructed by photogrammetry

2 结果与讨论

实验在户外相对静态条件下, 通过摄像机(小米 5X 手机摄像机)采集真实环境图像数据, 同时通过不同的位姿传感器记录相机拍照时的 6DOF 位姿数据, 其中, 相机与 Mti-G-710 姿态传感器绑定于统一平台上, 其相对姿态关系通过离线方式进行校正^[21]。经内业处理, 把不同位姿传感器记录的位姿数据和根据视觉方法解算的位姿数据, 采用视频透视式显示方式, 将 3D 地理信息反向投影到相机采集的真实场景图像中, 实现虚实融合渲染显示, 用于配准精度量化计算。首先对各方案的定位精度进行分析。

2.1 定位精度分析

实验时采集了 9 组不同场景数据(包括图像、传感器位姿数据等), 经实验分析发现, 通过图像特征点匹配的 EPnP^[25]方法求解的位姿通常具有较高的精度, 在有 4 对以上准确对应特征点基础上, 其 3DOF 位置精度与 RTK GPS 定位结果相比, 误差通常在 cm 级~dm 级; 而基于 EPnP 求解的 3DOF 姿态进行虚实配准的精度也通常较高。

因此, 实验使用 EPnP 方法计算的 6DOF 位姿为参考, 分别计算其他各类方法在各自自由上的误差最大值、最小值、平均值作为定位精度评价指标。为了便于直观理解各误差代表的含义, 所有计算及其结果都变换到以校区中心经纬度为原点的 ENU 直角坐标系中, 其中 3DOF 的位置精度如表 3 和图 5~7 所示。

表 3 以图像定位的 3DOF 位置为参考, 其他方法位置精度比较

Tab. 3 3DOF position accuracy of other localization methods compared with position acquired by image-based localization

| 定位方法与 3DOF 位置精度/m | $E(X)$ | | | $N(Y)$ | | | $U(Z)$ | | |
|--------------------------|--------|-------|--------------|--------|-------|--------------|--------|-------|--------------|
| | 最大误差 | 最小误差 | 平均误差 | 最大误差 | 最小误差 | 平均误差 | 最大误差 | 最小误差 | 平均误差 |
| 小米 5X 自带 GNSS | 3.787 | 0.341 | 2.013 | 4.381 | 0.016 | 1.241 | 6.906 | 0.741 | 3.486 |
| BQT6175 便携式 GNSS | 3.440 | 1.165 | 2.057 | 4.674 | 0.925 | 2.563 | 6.678 | 0.536 | 2.826 |
| Qmini A7 手持便携式 伪距差分定位 | 1.078 | 0.043 | 0.373 | 3.168 | 0.529 | 1.768 | 1.018 | 0.063 | 0.391 |

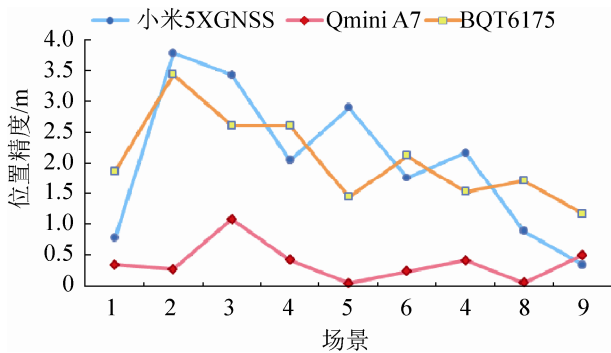


图 5 手机 GNSS、BQT6175、Qmini A7 三种定位设备水平方向定位误差 (E 轴向)

Fig. 5 Horizontal positioning errors (E-axis) of mobile phone GNSS, BQT6175 and Qmini A7

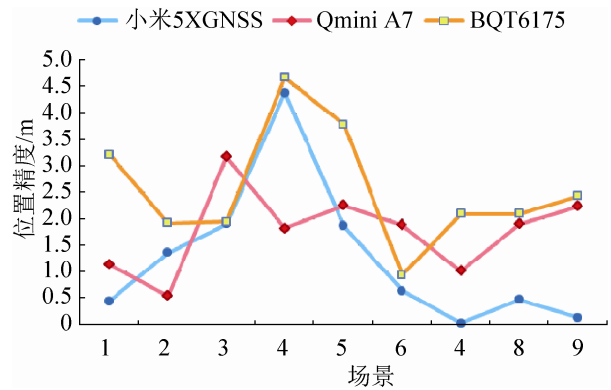


图 6 手机 GNSS、BQT6175、Qmini A7 三种定位设备水平方向定位误差 (N 轴向)

Fig. 6 Horizontal positioning errors (N-axis) of mobile phone GNSS, BQT6175 and Qmini A7

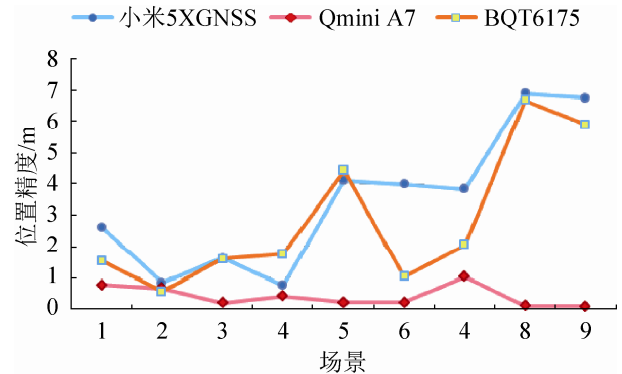


图 7 手机 GNSS、BQT6175、Qmini A7 三种设备高程定位误差 (U 轴向)

Fig. 7 Elevation positioning errors (U-axis) of mobile phone GNSS, BQT6175 and Qmini A7

从表 3 和图 5~7 中可以看出: (1) 在水平定位精度方面, 普通接收终端如手机 GPS、BQT6175 等, 单方向上定位误差可达 5 m 以内, 平均误差 2~3 m。Qmini A7 虽可通过互联网接入国内千寻伪距差分信息, 但实时差分定位解算结果并不稳定, 不易得到固定解, 定位误差大多高于 1 m (特别是 N 轴方向), 并未达到理想的分米级。(2) 在高程精度方面, 普通接收终端的误差仍然相对较大, 平均误差达 3~4 m, 且不稳定易出现较大的高程偏差值。相比较而言, Qmini A7 的高程定位误差比普通卫星定位有明显改进, 平均误差可达到米级以下。3DOF 的姿态精度如表 4 和图 8~9 所示。

表 4 以图像定位的 3DOF 姿态为参考, 其他方法姿态精度比较

Tab. 4 3DOF attitude accuracy of other methods compared with attitude acquired by image-based localization

| 姿态传感器 与精度/° | 俯仰角 Pitch(绕 E) | | | 滚动角 Roll(绕 N) | | | 偏航角 Yaw(绕 U) | | |
|-----------------|----------------|---------|----------------|---------------|---------|----------------|--------------|---------|----------------|
| | 最大误差 | 最小误差 | 平均误差 | 最大误差 | 最小误差 | 平均误差 | 最大误差 | 最小误差 | 平均误差 |
| 小米 5X 姿态传感器 | 1.462 1 | 0.046 7 | 0.644 0 | 2.134 0 | 0.449 0 | 1.375 6 | 6.878 1 | 1.869 5 | 4.418 1 |
| Xsens Mti-G-710 | 0.604 1 | 0.057 1 | 0.294 5 | 0.964 8 | 0.063 0 | 0.389 3 | 9.000 3 | 0.264 8 | 4.539 0 |

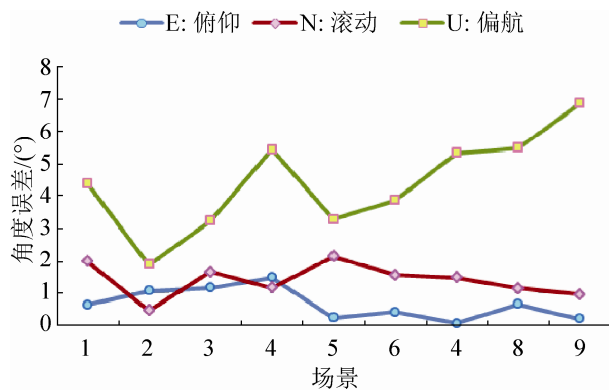


图 8 小米 5X 手机姿态传感器获取的三轴姿态误差
Fig. 8 Three-axis attitude error obtained by Xiaomi 5X mobile phone attitude sensor

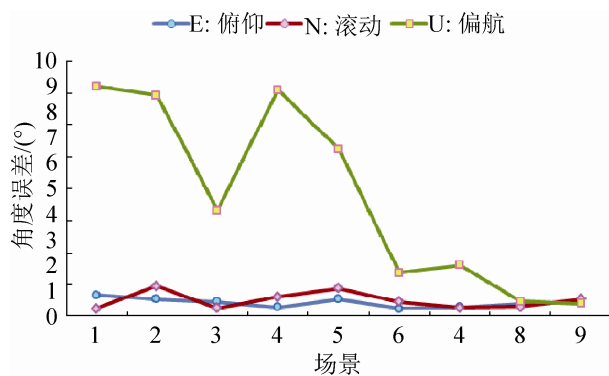


图 9 Mti-G-710 传感器获取的三轴姿态误差
Fig. 9 Three-axis attitude error obtained by Mti-G-710 sensor

从表 4 和图 8~9 中可以看出:

1) 俯仰和滚动倾角方面, 使用普通手机自带的加速度计(BMI120)测得的倾角, 在相对静态条件下也具有较高精度, 大多数测量误差不超过 2° ; 而使用 Mti-G-710 测得的倾角精度更高, 误差通常不超过 1° 。

2) 偏航角方面, 两类设备通过磁力计测得的偏航角误差都相对较大, 平均误差接近 5° , 且测

量结果不稳定, 易出现较大偏差值; 并且, 我们发现无论是手机的磁力计还是 Mti-G-710 的磁力计, 航向角的测量结果极易受环境中磁性材质的干扰而不可用, 例如当我们接近普通笔记本电脑内置的扩音器或停在路旁的汽车时, 磁力计会迅速偏转导致测量误差明显增大。因此, 磁力计在户外测量偏航角的稳定性和准确性难以保证。

需要说明的是, 实验中的偏航角误差是经过磁偏角校正后的误差, 磁偏角大小是 -5.0333° , 即磁北方向相对当地真北西偏 5.0333° , 这是根据当地经纬度和测试日期时间使用地球磁场模型^[27]计算得到的结果。

2.2 配准精度分析

基于上述 6DOF 位姿求解结果, 可以实现不同配准方案的虚实合成, 本文以虚实对象在合成图像上的视线夹角作为评价配准精度的量化指标。角度可以和弧度互换, $1 \text{ mard}(\text{毫弧度}) \approx 0.057^\circ$, 约等于横向 0.1 m 与纵向 100 m 形成的夹角值, 以 mard 作为评估虚实配准精度的单位, 可方便的将虚实视角误差与虚实配准的现实意义联系起来, 特别适用于户外远距离目标虚实配准精度的量化评估。因此, 本文同时给出了配准误差的角度值和毫弧度值作为评估参考。

如表 5 所示, 是 9 组不同场景分别使用 4 种配准方案进行虚实地理配准的量化误差最大值、最小值和平均值; 图 10 给出了相应每一组场景量化精度折线图; 图 11~12 分别给出了 2 组案例场景实际虚实配准的对比效果图, 图中的线框是建筑 3D 轮廓模型反向投影叠加的结果。

表 5 地理配准方案及其配准精度比较

Tab. 5 Comparison of geo-registration schemes and registration accuracy

| 配准方案与精度 | 最大误差 | | 最小误差 | | 平均误差 | |
|--------------------------|----------|--------|----------|-------|----------|---------------|
| | $^\circ$ | /mard | $^\circ$ | /mard | $^\circ$ | /mard |
| EPnP 方法 | 0.393 8 | 6.87 | 0.000 0 | 0.00 | 0.206 3 | 3.60 |
| 小米 5X 集成传感器 | 8.882 5 | 155.03 | 3.856 4 | 67.31 | 6.726 4 | 117.39 |
| BQT6175+Xsens Mti-G-710 | 10.496 8 | 183.21 | 2.302 0 | 40.18 | 6.211 5 | 108.41 |
| Qmini A7+Xsens Mti-G-710 | 8.933 6 | 155.92 | 0.476 9 | 8.32 | 4.177 9 | 72.91 |

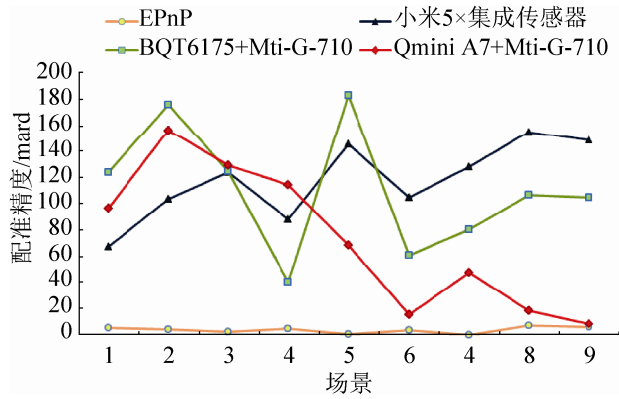


图 10 每一组场景分别使用 4 种配准方案进行虚实地理配准的量化精度折线图

Fig. 10 Geo-registration quantization accuracy line chart of each set of scenes using four registration schemes

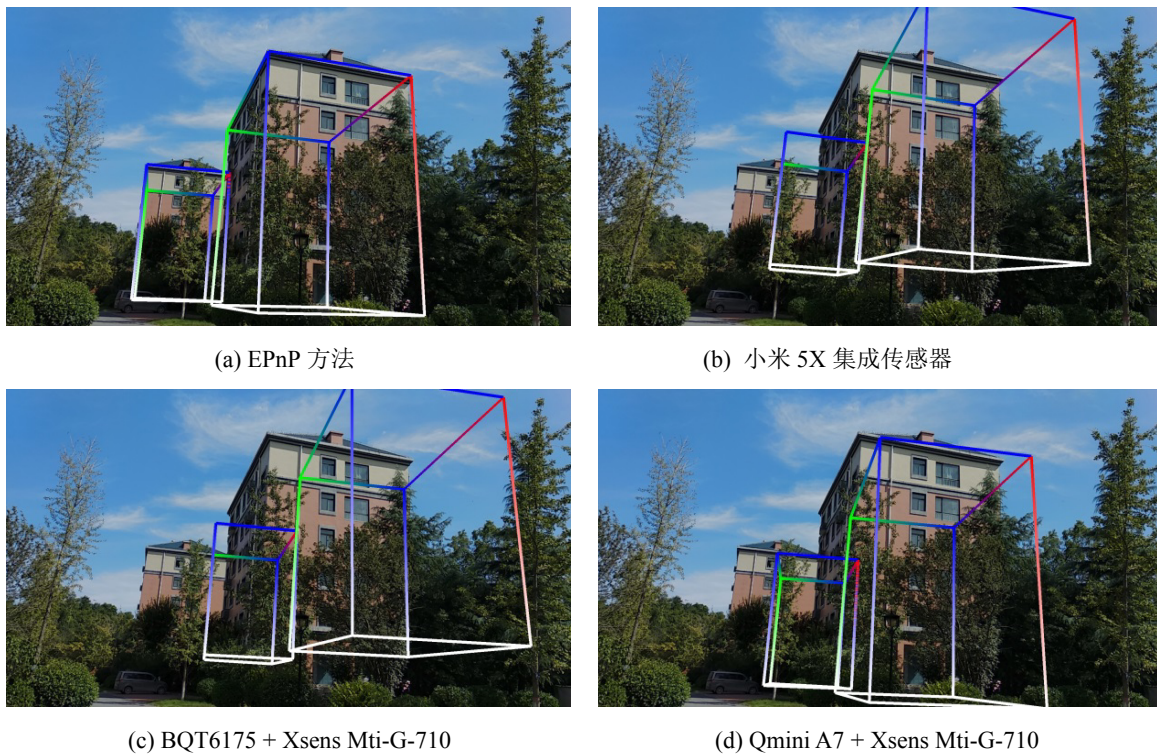
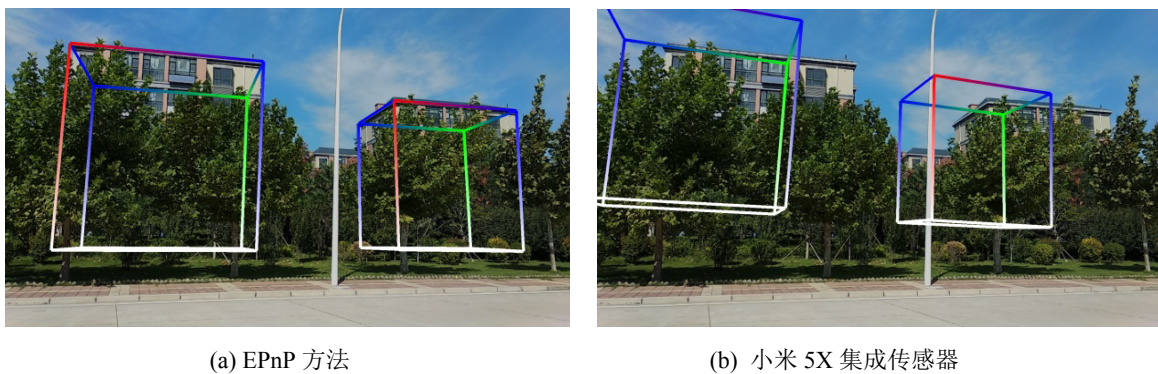


图 11 场景 5 使用 4 种定位方案进行建筑轮廓地理配准的效果图

Fig. 11 Effects of rendering geo-registered building models on real scene image using four positioning schemes in Scenario 5



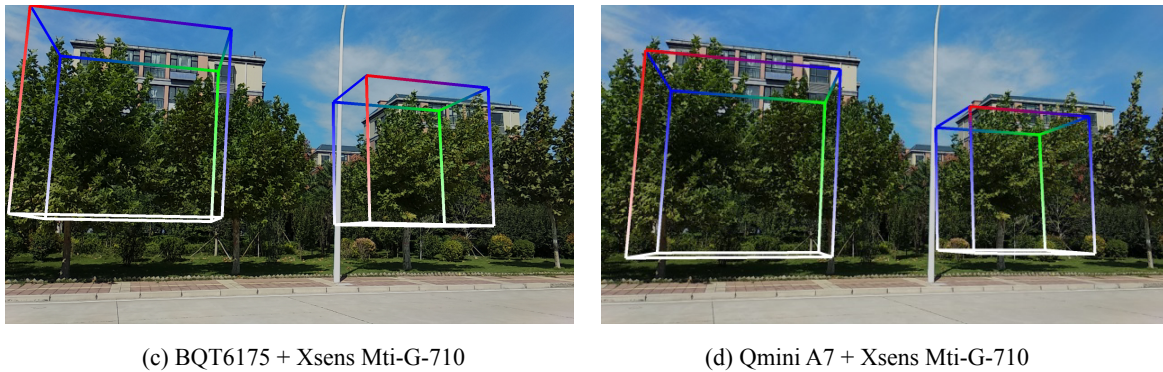


图 12 场景 7 使用 4 种定位方案进行建筑轮廓地理配准的效果图

Fig. 12 Effects of rendering geo-registered building models on real scene image using four positioning schemes in Scenario 7

从表 5 和图 10 可以看出:

(1) 使用视觉 EPnP 方法求解图像 6DOF 位姿实现地理配准的精度普遍较高(这里特征点匹配通过人工辅助实现), 9 组测试场景的平均虚实配准误差不足 4 mard, 只在个别场景因图像位姿误差和图像畸变稍大, 导致虚实配准的误差接近 7 mard。

(2) 相比而言, 基于位姿传感器的地理配准误差普遍较大, 其中, 基于手机集成传感器获取的 6DOF 位姿, 配准平均精度约为 110~120 mard, 即当用户与现实世界目标对象相距 100 m 距离时, 虚拟信息反向投影叠加在用户眼前与目标对象的偏移约为 11~12 m。

(3) Mti-G-710 测得俯仰角和滚动角比普通手机测得的结果更为准确, 但是其磁力计测得偏航角与手机磁力计测得的偏航角误差都较大, 且不稳定, 因而使用 BQT6175+Mti-G-710 测得姿态进行地理配准的精度, 与使用手机传感器测得的位姿进行地理配准的精度类似, 平均配准精度略有改进, 为 108 mard。

(4) 使用 Qmini A7 作为实时定位设备, 其在水平方向的定位精度并不稳定, 但在高程方向的定位改进可以一定程度上提高虚实配准精度。实验中使用 Qmini A7+Mti-G-710 作为位姿传感器的配准方案, 平均配准精度约为 73 mard, 比前 2 种基于位姿传感器的配准方案精度有所提高。

综上所述, 可以看出: 基于普通位姿传感器

(如手机)的地理配准精度, 比测试前的预期要高, 尽管其配准误差仍然较大; 而基于中、高端位姿传感器的配准精度, 略低于理想的预期, 其主要原因是即使使用较高成本的位姿传感器, 其定位精度和水平方向测量精度(偏航角)仍不稳定, 易出现较大的误差(特别是磁力计测得的偏航角)。相比较而言, 基于点云参考数据的视觉配准方案可以得到较为满意的虚实配准精度。

2.3 应用讨论

结合上述各方案得到的实验结果, 本节探讨地理配准的误差因素、各类配准方法的局限性、以及可能的配准方案思路, 为根据不同应用需求选择配准方法和成本投入提供参考和建议。

(1) 地理配准误差因素分析

户外增强现实地理配准涉及到信息源建模、地理坐标系变换、组件设备对齐、实时位姿求解、透视投影转换、渲染显示等多个过程, 每一个步骤中的误差都会影响到最终的虚实配准精度。本文经过设备离线校正, 结合高精度的地理信息数据, 特别是使用图像 EPnP 方法求解 6DOF 位姿, 一方面验证了在户外环境中实现高精度地理配准的技术思路可行性; 另一方面, 对比基于位姿传感器的粗略定位与配准结果, 验证了“位姿定位误差是影响地理配准精度的主要因素^[28]”这一结论。因此, 为了提高户外 AR 地理配准的精度必须要提高户外用户实时地理位姿解算精度。

(2) 各类地理配准方法应用的局限性

当前,基于计算机视觉的地理配准方法虽然可以实现较为理想的虚实配准精度,但其必须要预先准备大量的高精度视觉参考数据,并保证及时更新;且这种视觉参考数据通常数据量巨大^[20],往往需要借助服务器和网络给移动终端实时传送定位参考数据^[14,29],这很容易给原本复杂、耗时、耗能的视觉计算带来更大的延迟和消耗。

相比较而言,基于位姿传感器的地理配准方法更为高效,也更容易实现,并且能在白天、夜间、雾天等多种环境条件下持续运行,但实验表明其配准精度相对不足。从本文的测试结果来看,即使使用目前性能较优的便携式传感器设备,如 Qmini A7、Xsens Mti-G-710 等,虚实配准的效果仍不理想;如果使用成本更高、体型和重量更大的位姿传感器(如 RTK 等),可能会进一步改进 AR 配准效果,但这会给移动用户带来更大的“负担”。

(3) 可能的配准方案

根据不同应用场景的最低配准精度要求,定制特定的配准技术方案可能是实现户外 AR 应用的一个可行且经济的思路。不同应用场景最低的配准精度要求,可以根据应用所需分辨的目标尺度大小基本确定,例如,面向城市步兵分队作战应用,美军军事专家提出 AR 虚实配准精度需达到 10 mard 以内,以保证对城市建筑上不同窗户的指引和分辨能力^[30-31],因为建筑上两窗户的间距通常为 1 m 左右,当用户距离某一建筑近百米时,如果配准精度不足 10 mard,叠加的虚拟信息极易错指到其他窗户上;而在一般的城市游览 AR 应用中,如果仅仅只是为了区分 2 栋相距十几米的建筑物,则配准精度可以适当降低到 20 mard 甚至更大,它仍可以指示到同一栋建筑上。

对于需要提供精确、精细信息服务的 AR 应用场景,可以在一定范围内预先采集环境详细的视觉参考数据,并综合运用视觉和位姿传感器方法^[5],特别是通过视觉方法辅助校正位姿传感器测量的

水平偏航角及定位误差,实现高效、高精度的 AR 应用。而对于仅需要粗略信息提示的场合,可能仅采用特定的传感器设备就可以实现应用所需,例如基于普通手机的 AR 城市概略游览。

3 结论

为促进增强现实技术与地理信息系统应用结合发展,本文阐释了增强现实地理配准的基本概念及其技术基本原理,提出了一种配准精度量化评估方法;面向户外移动用户,采用多种轻量化、低功耗、便携式的硬件设备设计了不同的地理配准方案,结合预先采集的高精度地理信息数据,实际评估了各地理配准方法的量化精度,并分析了地理配准的误差因素及各方法存在的问题,探讨了可能的解决方案思路。根据具体的应用需求,研究不同精度的实时地理配准技术方法是本文后续需要做的工作。

参考文献:

- [1] 杜清运, 刘涛. 户外增强现实地理信息系统原型设计与实现[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2007, 32(11): 1046-1049.
Du Qingyun, Liu Tao. Design and Implementation of a Prototype Outdoor Augmented Reality GIS[J]. Geomatics & Information Science of Wuhan University, 2007, 32(11): 1046-1049.
- [2] 刘经南, 高柯夫. 增强现实及其在导航与位置服务中的应用[J]. 地理空间信息, 2013, 11(2): 1-6.
Liu Jingnan, Gao Kefu. Augmented Reality and Its Application for Navigation and Location Services[J]. Geospatial Information, 2013, 11(2): 1-6.
- [3] 刘浩敏, 章国锋, 鲍虎军. 基于单目视觉的同时定位与地图构建方法综述[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2016, 28(6): 855-868.
Liu Haomin, Zhang Guofeng, Bao Hujun. A Survey of Monocular Simultaneous Localization and Mapping[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2016, 28(6): 855-868.
- [4] 王巍, 王志强, 赵继军, 等. 基于移动平台的增强现实研究[J]. 计算机科学, 2015, 42(11A): 510-519.
Wang Wei, Wang Zhijiang, Zhao Jijun, et al. Research of Augmented Reality Based on Mobile Platform[J].

- Computer Science, 2015, 42(11A): 510-519.
- [5] 罗斌, 王涌天, 沈浩, 等. 增强现实混合跟踪技术综述[J]. 自动化学报, 2013, 39(8): 1185-1201.
Luo Bin, Wang Yongtian, Shen Hao, et al. Overview of Hybrid Tracking in Augmented Reality[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(8): 1185-1201.
- [6] 徐旺, 李爱光. 纸地图增强现实对准技术研究[J]. 测绘科学技术学报, 2016, 33(2): 185-190.
Xu Wang, Li Aiguang. Research on Paper Map Augmented Reality Registration Technology[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2016, 33(2): 185-190.
- [7] Liu H, Zhang G, Bao H. Robust Keyframe-based Monocular SLAM for Augmented Reality[C]. IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality. Merida, Mexico: IEEE, 2016: 1-10.
- [8] Li P, Qin T, Hu B, et al. Monocular Visual-Inertial State Estimation for Mobile Augmented Reality[C]. IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality. Nantes, France: IEEE Computer Society, 2017: 11-21.
- [9] You X, Zhang W, Ma M, et al. Survey on Urban Warfare Augmented Reality[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information (S2220-9964), 2018, 7(2): 1-16.
- [10] 孙敏, 陈秀芳, 张飞舟, 等. 增强现实地理信息系统[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2004, 40(6): 906-913.
Sun Min, Chen Xiuwan, Zhang Feizhou, et al. Augment Reality Geographical Information System[J]. Acta Scientiarum Naturalum Universitatis Pekinesis, 2004, 40(6): 906-913.
- [11] 曲毅, 李爱光, 徐旺, 等. 基于位姿传感器的户外 ARGIS 注册技术[J]. 测绘科学技术学报, 2017, 34(1): 106-110.
Qu Yi, Li Aiguang, Xu Wang, et al. Outdoor ARGIS Registration Techniques Based on Position-Posture Sensor[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2017, 34(1): 106-110.
- [12] 曲毅, 李爱光, 徐旺, 等. 面向 ArGIS 的多传感器混合跟踪注册研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2017, 40(3): 114-117.
Qu Yi, Li Aiguang, Xu Wang, et al. Research on Multi Sensor Hybrid Tracking Registration for ArGIS[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2017, 40(3): 114-117.
- [13] 王俊. 户外增强现实 GIS 的应用研究[D]. 重庆: 西南大学, 2014.
Wang Jun. Application Research on Outdoor Augmented Reality GIS[D]. Chongqing: Southwest University, 2014.
- [14] Ventura J, Arth C, Reitmayr G, et al. Global Localization from Monocular SLAM on a Mobile Phone[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (S1077-2626), 2014, 20(4): 531-539.
- [15] Arth C, Pirschheim C, Ventura J, et al. Instant Outdoor Localization and SLAM Initialization from 2.5D Maps[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (S1077-2626), 2015, 21(11): 1309-1318.
- [16] Menozzi A, Clipp B, Wenger E, et al. Development of vision-aided navigation for a wearable outdoor augmented reality system[C]. Position, Location and Navigation Symposium-PLANS 2014, 2014 IEEE/ION. Monterey, CA, USA: IEEE, 2014: 460-472.
- [17] Gans E, Roberts D, Bennett M. Augmented reality technology for day/night situational awareness for the dismounted Soldier [C]. Display Technologies and Applications for Defense, Security, and Avionics IX; and Head- and Helmet-Mounted Displays XX. Bellingham, Washington, USA: SPIE, 2015: 94700401-94700411.
- [18] Azuma R T. A survey of augmented reality[J]. Presence: Teleoperators & Virtual Environments (S1054-7460), 1997, 6(4): 355-385.
- [19] 郭昌达. 增强现实三维配准技术方法研究[D]. 郑州: 信息工程大学, 2013.
Guo Changda. Research on Methods of 3D Registration Technique in Augmented Reality[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2013.
- [20] Arth C, Ventura J, Schmalstieg D. Geospatial Management and Utilization of Large-Scale Urban Visual Reconstructions[C]. International Conference on Computing for Geospatial Research & Application. San Jose, CA, USA: IEEE, 2013: 64-69.
- [21] Lobo J, Dias J. Relative Pose Calibration Between Visual and Inertial Sensors[J]. The International Journal of Robotics Research (S0278-3649), 2007, 26(6): 561-575.
- [22] Paul D G. Principles of GNSS, Inertial, and Multi-sensor Integrated Navigation Systems[M]. Boston, Massachusetts, USA: Artech House, 2008: 50-51.
- [23] Zhang Z Y. A exible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (S0162-8828), 2000, 22(11): 1330-1334.
- [24] Huang W, Sun M, Li S. A 3D GIS-based interactive registration mechanism for outdoor augmented reality system[J]. Expert Systems with Applications (S0957-4174), 2016, 55(1): 48-58.

- [25] Lepetit V, Moreno-Noguer F, Fua P. EPnP: An Accurate O (n) Solution to the PnP Problem[J]. *International Journal of Computer Vision* (S0920-5691), 2009, 81(2): 155-166.
- [26] Chu H, Gallagher A, Chen T. GPS Refinement and Camera Orientation Estimation from a Single Image and a 2D Map[C]. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*. Columbus, OH, USA: IEEE Computer Society, 2014: 171-178.
- [27] Chulliat A, Macmillan S, Alken P, et al. The US/UK World Magnetic Model for 2015-2020: Technical Report[R]. National Geophysical Data Center, NOAA, 2015.
- [28] Holloway R L. Registration error analysis for augmented reality[J]. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* (S1054-7460), 1997, 6(4): 1-25.
- [29] 段利亚. 移动增强现实大范围定位与注册关键技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- Duan Liya. Study on Key Technology of Wide Area Localization and Registration for Mobile Augmented Reality Systems[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [30] Argenta C, Murphy A, Hinton J L, et al. Graphical user interface concepts for tactical augmented reality[C]. *Head- and Helmet-Mounted Displays XV: Design and Applications*. Bellingham, Washington, USA: SPIE, 2010: 768801-768812.
- [31] 邓晨, 游雄, 张威巍. 面向城市分队作战的增强现实研究[J]. *指挥控制与仿真*, 2019, 41(2): 1-10.
- Deng Chen, You Xiong, Zhang Weiwei. Augmented Reality in Urban Operations for Unit Dismounted Warfighters[J]. *Command Control & Simulation*, 2019, 41(2): 1-10.