

# 基于混合注册方式的海洋环境增强现实系统

邹国良 屠正飞 郑宗生

(上海海洋大学信息学院 上海 201306)

**摘要** 针对单一传感器无法解决海洋环境增强现实系统中跟踪注册的问题,提出融合智能手机 AGPS、电子罗盘和加速度传感器测定视线方向的多传感器注册与基于海天线特征标识的视觉跟踪注册的混合注册方法,并通过扩展卡尔曼滤波器实现多传感器有效融合以提高三维注册精度。以真实海洋环境及海洋数值预报为例,提出适应海洋动态环境的增强现实框架,利用 Vuforia AR 实现了原型系统,并对混合注册方法进行了验证。结果表明,该技术框架及注册方法有较强的可用性和实用性,在海洋动态环境的增强现实中具有广泛应用前景。

**关键词** 增强现实 混合注册 数值预报 海洋环境 Vuforia

中图分类号 TP391 文献标识码 A DOI:10.3969/j.issn.1000-386x.2016.10.035

## MARINE ENVIRONMENT AUGMENTED REALITY SYSTEM BASED ON HYBRID REGISTRATION MODE

Zou Guoliang Tu Zhengfei Zheng Zongsheng

(College of Information Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

**Abstract** In view of single sensor can not provide a complete solution for tracking registration in marine environment augmented reality system, we proposed a mixed registration method, it integrates the registration of multiple sensors including assisted global positioning system (AGPS) of smart phone, electronic compass and acceleration sensor measuring the sight direction with the sea-sky-line feature mark-based vision tracking registration, and achieves effective integration of multi-sensor through extended Kalman filter to improve the precision of 3D registration. Taking real marine environment and marine numerical forecasting as the example, we presented an augmented reality framework adapted to dynamic marine environment and used Vuforia augmented reality (AR) to implement the prototype system, and verified the hybrid registration method as well. Results showed that this technology framework and the registration method have strong availability and practicality, and have extensive application prospect in dynamic marine environment augmented reality.

**Keywords** Augmented reality Hybrid registration Numerical forecasting Marine environment Vuforia

## 0 引言

传统二维、三维地理信息系统通常采用地图和图像等作为地理信息可视化的表达方式,并通过抽象符号、地图注记来表示地理实体,但是这些符号和注记已不能满足地理学家对真实场景表达的需求,因此新兴的增强现实技术开始逐渐被用于地理信息的可视化<sup>[1]</sup>。增强现实 AR (Augmented Reality) 技术通过将虚拟的信息(如图形、文字注释等)叠加到真实的环境中,从而增强人类视觉体验效果<sup>[2]</sup>。

虚实物体无缝融合的实现,须将虚拟物体叠加到现实环境中的准确位置,此过程称为跟踪注册,它是增强现实系统中研究的重难点<sup>[3,4]</sup>。目前室内的跟踪注册主要采用基于视觉跟踪的图像注册方式<sup>[5]</sup>,通过对视频流检测出事先制定好的图像标识进行匹配,解算摄像机内部和外部参数计算投影模型,渲染虚拟物体,最后实现空间信息的虚实融合。这种注册方式精度高、无需借助其他传感器,但是图像匹配算法复杂,多采用线性迭代,系统延迟性高、造成误差难控制、鲁棒性弱等缺点<sup>[6]</sup>。另一种

针对户外环境的跟踪注册是基于硬件传感器的注册方式,采用 GPS、电子罗盘和陀螺仪等传感器获取物体的位置和姿态数据,通过坐标变换获取虚拟物体在真实世界中的位置,继而完成虚实融合。基于硬件传感器的注册方式受传感器精度和惯性漂移影响较大,其匹配精度很难满足一般户外环境跟踪注册的要求<sup>[7]</sup>。因此,实际应用中常采用多种跟踪注册技术相结合的混合注册方式<sup>[8-10]</sup>,如美国南加利福尼亚大学的研究人员利用惯性传感器与基于模型的视觉跟踪注册结合的混合跟踪方法进行户外的跟踪定位<sup>[11]</sup>;西班牙 Paloc 科研团队用惯性传感器与基于平面视觉检测相结合的方法进行跟踪定位<sup>[12]</sup>。

由于自然环境多样,特别是真实的海洋环境瞬息万变,跟陆地要素标识不同,海洋要素标识时刻动态变化<sup>[13,14]</sup>,很难找到有效可靠的标识。针对以上问题,本文以中国上海自贸区洋山深水港区附近海域为研究对象,提出了海洋动态环境下增强现实的混合注册方法。以智能手机内置网络辅助 GPS 定位系统

收稿日期:2015-07-19。山东省海洋生态环境与防灾减灾重点实验室开放基金项目(2012011)。邹国良,教授,主研领域:海洋信息化,海上无线通信技术。屠正飞,硕士生。郑宗生,副教授。

进行精确定位,电子罗盘、加速度传感器相结合测定视线方向,同时基于海天线标记的视频检测对定位进行二次匹配,以提高混合注册精度。以海洋预报流场为空间建模对象,构造出一个在地理空间、视觉空间统一的增强现实地理信息系统。让用户在现场就能够察看具有立体逼真的海洋要素并可以根据需要随时查询感兴趣海情信息,实现洋山港区海情的实时多方位展示,为海浪灾害预警、洋山港区海洋工程防护及航运提供重要依据。

## 1 关键技术

### 1.1 海洋环境增强现实混合注册方法

基于视觉图像的跟踪注册受应用环境影响较大,在有标志物且环境变化较小的情况下,可以达到较为满意的效果。但对环境变化较大,且标识物很难选取的海洋环境,视觉跟踪算法的实时性和精确度不高。基于硬件传感器的跟踪注册方式计算较少,延迟小,更适合在移动终端上创建增强现实环境,但其定位精度有限且传感器存在漂移误差<sup>[15]</sup>。鉴于硬件传感器跟踪注册与视觉图像跟踪注册的性能互补,本文采用传感器跟踪定位与海天线标识匹配的混合注册策略,以提高海洋环境移动增强现实系统跟踪注册的精度和稳定性。

(1) 位置定位:辅助全球卫星定位系统 AGPS (Assisted Global Positioning System),是传统卫星定位与 GPRS/GSM 定位相结合的定位技术。配备 AGPS 的手机以 GPRS/GSM 作为辅助服务器协助卫星信号接收机完成定位服务。AGPS 比单一硬件传感器的 GPS 定位精度高、延时性小,更适合于户外增强现实系统。

(2) 视线定位:智能手机同时内嵌了摄像头、AGPS、惯性传感器,因此摄像机的姿态数据等同于手机姿态数据,摄像机的姿态数据包括偏航角 (Azimuth)、俯仰角 (Pitch) 和倾斜角 (Roll)。如图 1 所示,手机的坐标系统由 X、Y、Z 轴组成,手机正常抓握时,视线的水平方向表示 X 轴,向右为正方向,手机绕 X 轴旋转相对于水平面的角度为俯仰角 (Pitch);视线的垂直方向为 Y 轴,向上为正方向,手机绕 Y 轴旋转相对于水平面的角度为倾斜角 (Roll);垂直手机屏幕的方向为 Z 轴,向上为正方向,手机绕 Z 轴的旋转角为偏航角,即 Y 轴与地磁北极间的夹角。其中偏航角 Azimuth 由电子罗盘传感器测量的读数计算获取,俯仰角 Pitch 和倾斜角 Roll 通过加速度传感器测量值进一步计算获取。

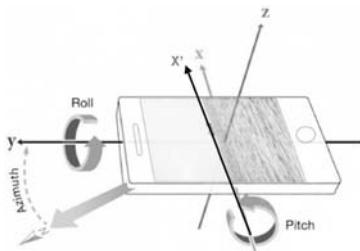


图 1 手机的姿态与海天线跟踪结果

(3) 视觉跟踪定位:针对海天线标识特征的检测,本文采用了 Sobel 边缘检测算子结合 Hough 变换的方法提取海天线,由于手机姿态的变化,海天线可能处在图像的非水平位置,在 Sobel 算子中增加了  $0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4$  四个方向的检测模板,可使算子提取到由于手机旋转造成的不同方向边缘信息。提取的海

天线信息如图 2 中 X' 方向,可对手机水平姿态 X 轴进行二次定标,提高注册精度。采用的改进 Sobel 模板如下:

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ 2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -2 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \\ -2 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

(4) 坐标变换:经纬度坐标转化到视觉平面像素坐标,涉及 5 个坐标系:大地坐标系  $(B, L, H)$ 、世界坐标系  $(X_w, Y_w, Z_w)$ 、摄像机坐标系  $(X_c, Y_c, Z_c)$ 、像平面坐标系  $(x, y, z)$ 、影像平面坐标系  $(u, v)$ 。这些坐标系空间位置关系如图 2 所示。

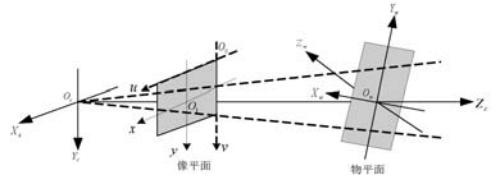


图 2 世界坐标系到影像平面坐标系位置关系

利用一系列通用坐标转换公式可得到影像平面坐标系中的点与世界坐标系中的点对应关系:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_c} \begin{bmatrix} \frac{f}{d_x} & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \frac{f}{d_y} & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中:  $f$  为  $O_c O_1$  距离即像距,  $(u_0, v_0)$  定义为像平面坐标系在影像平面坐标系中的坐标,  $d_x, d_y$  定义为单位像素在  $x, y$  轴上的物理尺寸。  $T$  为位移向量,一般地,世界坐标系与摄像机坐标系的原点相重合,即  $T = 0$ 。  $R$  为  $3 \times 3$  正交单位旋转矩阵,  $R$  具有三个自由度,可由手机 (摄像机) 姿态数据  $\beta, \alpha, \varphi$  来表示:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\beta & \sin\beta & 0 \\ -\sin\beta & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\varphi & 0 & -\sin\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\varphi & 0 & \cos\varphi \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\beta\cos\varphi + \sin\beta\sin\alpha\sin\varphi & \sin\beta\cos\alpha & -\cos\beta\sin\varphi + \sin\beta\sin\alpha\cos\varphi \\ -\sin\beta\cos\varphi + \cos\beta\sin\alpha\sin\varphi & \cos\beta\cos\alpha & \sin\beta\sin\varphi + \cos\beta\sin\alpha\cos\varphi \\ \cos\alpha\sin\varphi & -\sin\alpha & \cos\alpha\cos\varphi \end{bmatrix}$$

其中:  $\beta$  为手机俯仰角 Pitch,  $\alpha$  为手机偏航角 Azimuth,  $\varphi$  为手机倾斜角 Roll。

令  $f_x = \frac{f}{d_x}, f_y = \frac{f}{d_y}, Z_w = 0$ , 将式 (1) 转化为摄影测量中常用的共线方程:

$$\begin{cases} u - u_0 = f_x \frac{r_{11}X_w + r_{12}Y_w}{r_{31}X_w + r_{32}Y_w} \\ v - v_0 = f_y \frac{r_{21}X_w + r_{22}Y_w}{r_{31}X_w + r_{32}Y_w} \end{cases} \quad (3)$$

本文采用的世界坐标系使用 WGS-84 空间坐标系, WGS-84 空间坐标系中坐标  $(X, Y, Z)$  与大地坐标系中的经纬坐标  $(B, L, H)$  存在如下转化关系:

$$\begin{cases} X = (N + H) \cos B \cos L \\ Y = (N + H) \cos B \sin L \\ Z = [N(1 - e^2) + H] \sin B \end{cases} \quad (4)$$

令  $H = 0, Z = 0$ , 得到:

$$\begin{cases} X = N \cos B \cos L \\ Y = N \cos B \sin L \end{cases} \quad (5)$$

其中:  $N$  为点  $(X, Y, Z)$  的卯西圈曲率半径,  $N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}}$

$a, e$  分别是该大地坐标系对应椭球的长半轴和第一偏心率,  $a \approx 6.3781366 \text{ m}$ ,  $e \approx 0.081819$ 。

真实的世界坐标系中的物体坐标为  $(X_w + X_0, Y_w + Y_0, 0)$ , 将  $X_w + X_0, Y_w + Y_0$  取代式(5)中  $X$  和  $Y$ , 再代入到式(3)中可以得到影像平面坐标系与大地坐标系的对应关系:

$$\begin{cases} u - u_0 = f_x \frac{r_{11}(N\cos B\cos L - X_0) + r_{12}(N\cos B\sin L - Y_0)}{r_{31}(N\cos B\cos L - X_0) + r_{32}(N\cos B\sin L - Y_0)} \\ v - v_0 = f_y \frac{r_{21}(N\cos B\cos L - X_0) + r_{22}(N\cos B\sin L - Y_0)}{r_{31}(N\cos B\cos L - X_0) + r_{32}(N\cos B\sin L - Y_0)} \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $u_0, v_0, f_x, f_y$  是摄像机的内参数, 可以由张正友标定法<sup>[16]</sup>后得到, 其值经过标定后在不同的视场保持不变。 $r_{11}, r_{12}, r_{21}, r_{22}, r_{31}, r_{32}$  由智能手机的姿态数据仰视角、偏航角和倾斜角经过式(2)计算得到。至此, 由式(6)可以进行经纬度坐标到视觉平面中的像素坐标的转换, 从而完成图像的实时注册。

(5) 信息融合: 电子罗盘、AGPS、加速度传感器获取的信息与基于视觉跟踪的海天线标识定位结果进行综合对比来修正注册精度, 本文采用扩展卡尔曼滤波器按照最小均方差准则来完成多种传感器及视觉跟踪注册结果的融合, 如图3所示。

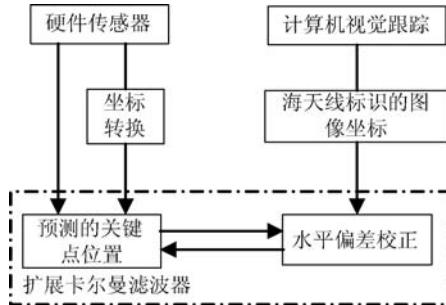


图3 混合注册信息融合框架

## 1.2 流场预报与服务发布

海洋流场预报采用 ROMS (Regional Ocean Model System) 区域海洋模式。预报结果生成的数据为通用的网络数据格式 NetCDF (Network Common Data Form) 格式。模型东西向距离约为 360 km, 南北向约为 325 km, 并对洋山港实验区进行的局部加密。为了整合不同异构空间地理数据, 预报流场数据通过地图服务形式进行发布。Web Service 作为新一代分布式应用集成的技术, 具有较强的互操作性, 易于将现有应用集成为新的系统<sup>[17]</sup>。利用 Web Service 技术, 将 GIS 地图以服务的方式发布, 同时把海洋模型处理过程也以服务的方式封装和发布。本文主要通过 ArcGIS Server 服务管理器以 Map Service 类型进行发布。流场数据在网络中主要通过 JSON 数据格式传输, 可以满足不同异构平台读取空间数据的需要, 同时减小数据传输量, 保证实时性要求。

## 1.3 流场要素建模

设空间任意一点流场矢量起止点分别为  $S_1(x_1, y_1, z_1)$ 、 $S_2(x_2, y_2, z_2)$ , 流场大小为  $V$ 、流场方向为  $D$ , OXYZ 为世界坐标系。如图4所示,  $S_1$  为标注空间矢量流场起点,  $S_2$  可通过大小及方向计算, 流场的大小与实际地面距离通过比例尺进行等比例缩放以适合移动端浏览。为了减小数据的计算量, 流场模型由锥体及的线段组合而形成简单的几何形体, 其中箭头表示流场大小、长度代表流速大小, 以上数据通过 Web Services 直接从数据库读取流速、流向及起点空间坐标信息, 并在移动端实时建模, 然后通过空间坐标变换实时绘制。

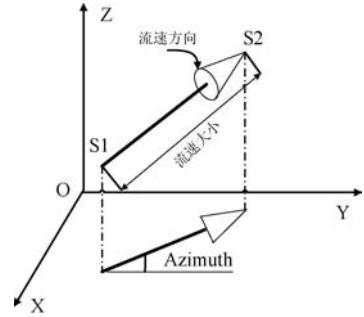


图4 海洋预报流场矢量建模

## 2 系统实现

### 2.1 系统框架

整个移动增强现实系统由移动端与服务器端构成。如图5所示, 移动端与服务器端通信通过 GPRS/GSM 或 3G 服务实现, 负责传输服务器端每个计算网格的流场数据。移动端读取网格中流场数据进行三维建模, 并通过 CCD 摄像头影像进行海天线标识的提取及定位传感器、姿态传感器对流场模型进行坐标变换, 形成位置准备的虚拟图像与真实视频图像进行融合, 形成最终的增强现实视频序列。

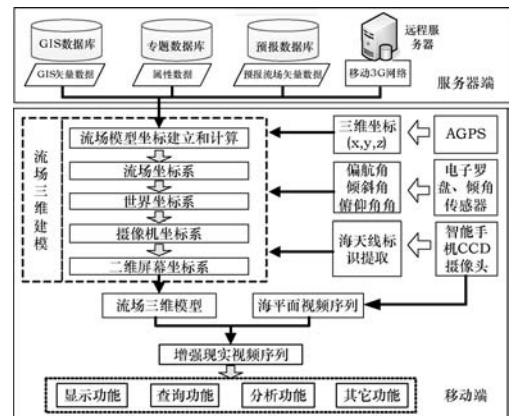


图5 海洋流场信息户外移动增强现实系统框架

### 2.2 软硬件环境

移动端为智能手机小米 2S (电信版): 2 GB 内存, 四核 CPU, 后置 800 万像素摄像头; 内置的硬件主要包括 AGPS、通信模块 (GPRS/GSM/3G)、陀螺仪、重力感应器、加速度传感器、电子罗盘等, 手机已开通 3G 网络服务。通过张正友标定法得到混合注册时的手机摄像头内参数如下:  $u_0 = 239.017$  像素,  $v_0 = 340.377$  像素,  $f_x = 677.848$  像素,  $f_y = 680.795$  像素。

Vuforia 增强现实软件开发工具包 (Vuforia Augmented Reality SDK), 是美国高通公司开发的用于移动设备的增强现实工具包。实验环境采用 Vuforia AR sdk 4.0, SDK 支持 Image Targets、Multi-Targets、User Defined Targets 等多种视觉跟踪注册方式。通过手机摄像头获取真实场景影像, 采用 Sobel 边缘检测算法及 Hough 变换拟合, 提取和跟踪海天线标识, 其结果存储在状态对象中, 可以被其他程序调用。手机的姿态信息可以通过 QCAR::Matrix44F 方法获取, 对流场三维模型可以通过 translateM、rotateM、scaleM 函数进行变换, 使其叠置到真实的视频序列。

服务器端为 OpenSpark 构建的云环境, 8 GB 内存、

80 GB 硬盘。软件包括:Oracle 11g 数据库、ArcSDE10.1 空间数据引擎、GIS 服务数据服务主要通过 ArcGIS Server 10.1 发布地理信息及预报数据服务。

### 2.3 流场数据结构

本试验采用的流场的数据结构比较简单没有包含流场的拓扑信息,流场文件的空间数据结构包括计算网格标识、网格中心点坐标 X、中心点坐标 Y、流速及流向信息,流向以正北方向为 0,如表 1 所示。

表 1 预报流场矢量数据结构

计算网格标识	网格中心坐标 X	网格中心坐标 Y	流速	流向
123	121.218	31.251	12	187
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

### 2.4 精度分析

利用高精度 GPS 设备预先设定三个点的坐标,然后用手机分别进行单 GPS 定位与网络辅助 GPS 定位对比两者精度,其中 GPS 的定位精度分别为:3.02、3.52、4.48 m, AGPS 的定位精度分别为 2.93、2.20、2.96 m,可见 AGPS 的定位精度较单 GPS 定位精度更高。在实验现场将开启摄像功能的手机固定在摄像机无磁三轴转台分别对偏航角(Azimuth)、俯仰角(Pitch)和倾斜角(Roll)变化 0°、15°、30°、45°、60°、75° 和 90° 后,采用混合注册计算旋转后的角度,同时关闭摄像功能直接提取相机的姿态做前后对比,如表 2 所示。从表中数据可以看出采用混合注册方法后手机姿态数据的精度有了明显的提升。

表 2 手机姿态注册精度

角度/°	硬件注册方式/°			混合注册/°		
	Azimuth	Pitch	Roll	Azimuth	Pitch	Roll
0	3.4	1.6	2.2	2.8	0.8	1.0
15	12.6	13.4	13.6	13.3	14.7	14.9
30	28.1	28.4	28.3	28.4	29.6	29.8
45	43.7	45.4	43.6	44.1	44.8	44.5
60	57.7	58.1	57.3	58.0	59.1	59.7
75	75.3	74.2	73.1	75.1	74.7	74.8
90	90.4	86.2	87.5	90.3	88.8	89.4

### 2.5 测试结果

本次实验的测试地点为洋山深水港附近的观测站。测试

时,先打开手机的网络数据服务和 GPS 定位服务,然后点击进入系统手机后置摄像头自动打开,等待几秒钟后屏幕左上方会显示手机当前的经纬度坐标和手机的姿态数据。将摄像头对准海面,海洋流场信息会叠加在屏

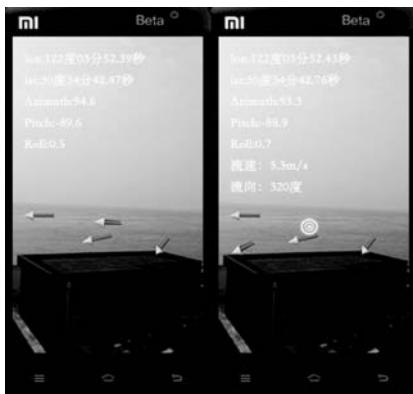


图 6 洋山港户外观测站增强现实测试

幕上,如图 6(a)所示;当点击手机屏幕上的任意海面位置,可查询当前海面位置处的流速、流向信息,如图 6(b)所示。通过这些简单的操作方式可以得到真实场景视觉体验和有效信息的获取,为海洋灾害预警和近海船只航行提供重要依据。

## 3 结 语

本文面向海洋动态环境增强现实系统中的跟踪注册问题提出了基于海天特征标识与智能手机硬件传感器注册融合的混合三维注册方法,有效地提高注册的精度满足了海洋动态环境下的三维注册实时性的需要,延伸了虚实融合的空间范围。但是本文只选取了海天特征这一特征作为视觉跟踪注册的标识。如何在海洋这种特征的动态环境中挖掘其他有效的特征标识,整合智能手机中各种传感器实现多传感器数据的有效融合,更进一步地提高混合注册的精度和稳定性成为下一步的重点研究方向。

## 参 考 文 献

- [1] Azuma R, Baillet Y, Behringer R, et al. Recent advances in augmented reality[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2001, 21(6): 34-47.
- [2] Bostanci E, Kanwal N, Ehsan S, et al. User Tracking Methods for Augmented Reality[J]. International Journal of Human Computer Studies, 2013, 5(1): 93-98.
- [3] 李丹,程耕国. 基于 Android 平台的移动增强现实的应用与研究[J]. 计算机应用与软件, 2015, 32(1): 16-19, 23.
- [4] 陈鹏,管涛. 基于仿射重投影的增强现实三维注册方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2010, 22(3): 480-486.
- [5] 史晓琳,边耐政. 手机增强现实室内向导的研究与实现[J]. 计算机应用与软件, 2013, 30(2): 320-323.
- [6] 朱森良,姚远,蒋云良. 增强现实综述[J]. 中国图象图形学报, 2004, 9(7): 767-774.
- [7] 陈靖,王涌天,刘越,等. 适用于户外增强现实系统的混合跟踪定位算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2010, 22(2): 204-209.
- [8] 赵峰,赵清华,陈宏滨. 基于 EKF 和数据融合的移动台跟踪定位算法[J]. 计算机工程, 2012, 38(22): 244-247.
- [9] 王威,彭勃宇,周诚,等. 面向增强现实的多传感器组合位姿注册算法[J]. 传感器与微系统, 2015, 34(7): 132-136.
- [10] 李薪宇,陈东义. 紧耦合多传感器混合跟踪算法[J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(10): 1951-1956.
- [11] Jiang B, Neumann U, You S. A robust hybrid tracking system for outdoor augmented reality[C]//Proceedings of IEEE Virtual Reality, Chicago, 2004, 3-10.
- [12] Barandiaran I, Paloc C. Hybrid tracking for outdoor augmented reality applications[J]. Computer Graphics Topics, 2006, 18(4): 6-15.
- [13] 张锁平,张春田. 基于全变差和脊波变换的海岸线提取算法[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(12): 2580-2585.
- [14] 李永进,金一丞,任鸿翔. 基于物理模型的近岸海浪建模与实时绘制[J]. 中国图象图形学报, 2010, 15(3): 518-523.
- [15] 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.
- [16] 马颂德,张正友. 计算机视觉[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 52-63.
- [17] 许蕾,李言辉,陈林,等. 一种面向用户需求的 Web 服务测试方法[J]. 计算机学报, 2014, 37(3): 512-521.