

引用格式:别勇攀,关庆锋,姚尧.基于边云协同的AR空间分析计算框架[J].地球信息科学学报,2020,22(6):1383-1393. [ Bie Y P, Guan Q F, Yao Y. A framework for AR spatial analysis based on edge-cloud integration[J]. Journal of Geo-information Science, 2020,22(6):1383-1393. ] DOI:10.12082/dqxxkx.2020.190472

## 基于边云协同的AR空间分析计算框架

别勇攀,关庆锋\*,姚尧

中国地质大学(武汉)地理与信息工程学院,武汉 430078

### A Framework for AR Spatial Analysis based on Edge-Cloud Integration

BIE Yongpan, GUAN Qingfeng\*, YAO Yao

School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430078, China

**Abstract:** Augmented Reality (AR) for geographic data is an important development direction of geographic information visualization. In recent years, some geographic studies have begun to use head-wear AR devices to visualize geographic data, making geographic spatial information more fully expressed. However, due to the limited computing power of head-wear AR devices, most of existing geographic information AR studies focus on the visualization of geographic information, yet do not provide complex spatial analysis and computation functions. This paper presents a framework for spatial analysis on AR devices by edge-cloud integration. In order to achieve efficient and end-to-end collaborative computation, the AR device is responsible for spatial data visualization, human-computer interaction, and data preprocessing; while the cloud server is responsible for complex spatial analysis tasks and persistent storage of spatial data. The binary storage method of edge-cloud and the coordinate conversion module between the 3D visualization model and the 3D geographic model provide efficient links between AR end and cloud end. Specifically, the framework divides three-dimensional geospatial data into three-dimensional AR visualization model data and three-dimensional geographic model data with attribute information, which are stored in AR and the server, respectively. The coordinates of the three-dimensional AR visualization model and geospatial coordinates are mapped using Bursa-wolf seven-parameter coordinate transformation method. Finally, HTTP protocol is used to transmit data to achieve high efficiency and end-to-end collaborative computing. Based on this framework, this paper used Hololens, a head-mounted AR device, and based on three-dimensional building data in Wuhan and a sky visibility factor algorithm, to realize complex spatial computation in the meantime of AR visualization. The findings suggest that our framework can provide smooth and stable 3D visualization (FPS was about 35) while guaranteeing the efficiency and accuracy of the complex sky-view factor computation. In conclusion, the edge-cloud integration technology can enable AR devices to perform complex spatial analysis and computation.

收稿日期:2019-08-27;修回日期:2019-11-29.

基金项目:国家自然科学基金项目(41671408);国家自然科学基金青年基金项目(41801306);国家自然科学基金青年联合基金项目(U1711267);湖北省自然科学基金杰出青年项目(2017CFA041)。[ **Foundation items:** National Natural Science Foundation of China, No.41671408; Youth Fund Project of National Natural Science Foundation of China, No.41801306; Youth joint fund project of National Natural Science Foundation of China, No.U1711267; Natural Science Fund of Hubei Province, No.2017CFA041. ]

作者简介:别勇攀(1996—),男,湖北天门人,硕士生,研究方向为地理数据AR可视化、城市计算。E-mail: yongpanbie@cug.edu.cn

\*通讯作者:关庆锋(1977—),男,四川绵阳人,博士,教授,研究方向为高性能空间计算。E-mail: guanqf@cug.edu.cn

**Key words:** Augmented Reality; edge computing; cloud computing; edge-cloud integration; hololens; spatial analysis; geographic data

**\*Corresponding author:** GUAN Qingfeng, E-mail: guanqf@cug.edu.cn

**摘要:**地理数据的增强现实(AR)技术,是地理信息可视化重要发展方向之一。受限于头戴式AR设备有限的计算能力,已有的地理信息AR研究多集中于地理信息的可视化,并未提供复杂的空间分析计算功能。本文提出了一套基于边缘计算与云计算协同的AR空间分析计算框架。AR端完成空间数据的可视化、人机交互、数据预处理等;云端则完成复杂的空间分析计算任务以及空间数据的持久化存储;边云二元存储方法和三维可视化模型-三维地理模型间的坐标转换模块完成AR端和云端间的高效链接;从而达到高效率的、端对端的协同计算。基于该框架,本文利用头戴式AR设备Hololens,并基于武汉市的建筑物三维数据和天空可视因子算法,实现了在AR可视化的同时进行复杂的空间计算。结果表明,在保证空间分析计算效率和精度的同时,Hololens性能表现稳定,三维空间可视化的体验良好(FPS约35),证明了边云协同框架下的AR在空间分析计算具有广阔前景。

**关键词:**增强现实技术(AR);边缘计算;云计算;边云协同;Hololens;空间分析;地理数据

## 1 引言

地理空间可视化是把地图学方法和其他信息表示方法相结合,对地理数据进行探索、分析、合成、表达的一门学科<sup>[1]</sup>。地理空间的三维可视化可以帮助用户更加直观地理解地理空间数据的三维特征,对自然环境、城市交通、人文经济等领域有着重要的意义<sup>[2-3]</sup>。然而,目前大部分地理空间数据的三维可视化均依赖于传统的计算机屏幕进行显示。由于二维扁平的实体屏幕限制了现有空间信息的充分表达和可视化,进而极大地影响用户对地理对象的认知和理解<sup>[4]</sup>。

增强现实(Augmented Reality, AR)是将计算机生成的虚拟物体叠加到现实世界当中,并产生新的可视化环境,提供虚实结合、实时互动的技术<sup>[5-6]</sup>。相较于虚拟现实(Virtual Reality, VR),AR的优势在于在真实的环境中表达三维信息,且不易产生眩晕感,具有更好的视觉体验<sup>[7]</sup>。因此,AR以其独特的信息表达方式和真实的表达效果,已经被成功地应用于地理空间数据的增强表达<sup>[8]</sup>。

早期的研究主要是通过视频制图(Video Mapping)技术将AR应用于地理信息可视化,利用记录在视频磁带上的位置和GIS数据库匹配,以视频影像为载体来可视化地理信息。例如,Ghadirian等<sup>[9]</sup>通过建立GIS数据库与真实全景视频影像序列之间的联系,成功地模拟了澳大利亚维多利亚省卡集洼(Cudgewa)山谷野草动态蔓延的过程;杜清运等<sup>[10]</sup>探讨了户外AR技术与移动地理信息系统结合的模式,并设计实现了一个AR地理信息系统;常勇

等<sup>[11]</sup>提出了虚拟三维数据模型的框架,最后成功地应用于三维管线的可视化。

上述研究多依赖于二维计算机屏幕进行地理信息的可视化。近年来,部分地理学者开始使用头戴式AR设备可视化地理空间信息。例如,Zhang等<sup>[12]</sup>采用头戴式AR设备,并基于多源数据集和开源城市模型对多伦多的城市数据进行了可视化显示;Wang等<sup>[13]</sup>采用基于CGA(ComputerGenerateArchitecture)规则的快速三维城市场景建模方法,在头戴式AR设备中实现了城市地理数据的快速建模与可视化。然而,受限于AR技术的发展,目前头戴式AR设备只拥有轻量级的计算能力,存在如下3个问题:①在处理数据量较大的三维模型时,会出现许多体验不佳的问题,如每秒刷新帧数(Frame Per Second, FPS)过低、GPU占用率过高等;②缺乏地理数据与增强现实之间通用的数据接口和标准,二者之间的数据格式转换成本较高,使用现有转换工具会造成属性信息丢失的问题;③更重要的是,AR的轻量级计算能力难以支持复杂的空间分析计算功能,已有研究均未实现空间计算功能。

边云协同计算是云计算的一种新的发展方向,其核心思想是:边缘端靠近数据源,就近提供端服务,为云端提供高价值数据;云端为边缘端提供数据持久化存储,以及为复杂计算的应用提供计算资源。其主要的优势是:①减少网络操作和服务交付的时延、保护数据安全;②减轻边缘端计算单元的负担,且满足边缘端备份数据的需要;③边云二者互补、协同<sup>[14]</sup>。因此,边云协同计算为在AR环境中进行复杂空间分析提供了解决方案。

为实现在AR可视化地理空间数据的同时提供

复杂空间计算服务的目标,本文提出了一套基于边云协同的AR空间分析计算框架。该框架采用边云协同计算的思想,在AR端完成地理空间数据的可视化、人机交互、数据预处理等,在云端完成复杂的空间分析计算任务以及空间数据的持久化存储。具体而言,该框架将地理空间三维数据拆分成三维AR可视化模型数据与带有属性信息的三维地理模型数据,分别储存于AR端和服务端,并利用基于Bursa-wolf七参数坐标转换方法将三维AR可视化模型坐标与地理空间坐标映射,最后以HTTP协议来传输数据实现高效率的、端到端的协同计算。为验证该框架的可行性,本文采用头戴式AR设备MicrosoftHololens,基于武汉市的建筑物三维数据,并结合天空可视因子的算法,实现了基于边云协同计算的AR城市空间计算功能和应用。

## 2 研究方法

为实现AR环境下的复杂空间分析计算功能的目标,本文设计了如图1所示的边云协同计算框架。该框架包括2个核心部分,即具备增强现实可视化功能和轻量级计算能力的AR端(边缘端),以及具备强计算能力和大存储容量的服务器端(云端)。二者之间通过HTTP协议连接,构成边云协同

的计算构架,从而在保证流畅的三维AR可视化体验的同时,提供复杂的空间分析计算服务。

### 2.1 AR端与云端的协同计算

为实现AR端与云端的协同计算,本框架分别为AR端和云端设计了相应的功能模块。

AR端负责可视化三维数据、人机交互,数据预处理,主要包括如下功能模块:

- (1)坐标转换模块:建立AR端中可视化模型坐标与云端空间数据的地理坐标之间的转换关系;
- (2)人机交互模块:面向用户,捕捉用户输入,将AR的交互方式与可视化模型组成可操作的事件;
- (3)数据预处理模块:对空间分析操作的输入参数进行预处理,将其转换为云端API所能识别的数据格式,与云端进行通信,实现任务协同;
- (4)数据可视化模块:可视化三维数据,同时为其他模块提供可视化服务。

服务端为AR端提供空间计算、数据存取的支持,主要包括如下功能模块:

- (1)应用服务模块:提供对外服务接口,控制内部数据流传,主要包括算法模型调用接口、可视化接口(计算结果的可视化)、信息管理接口等;
- (2)数据管理模块:对整个系统的数据进行管理,为系统各模块提供数据存储、调用支持;
- (3)空间计算模块:内置各种空间算法模型,负

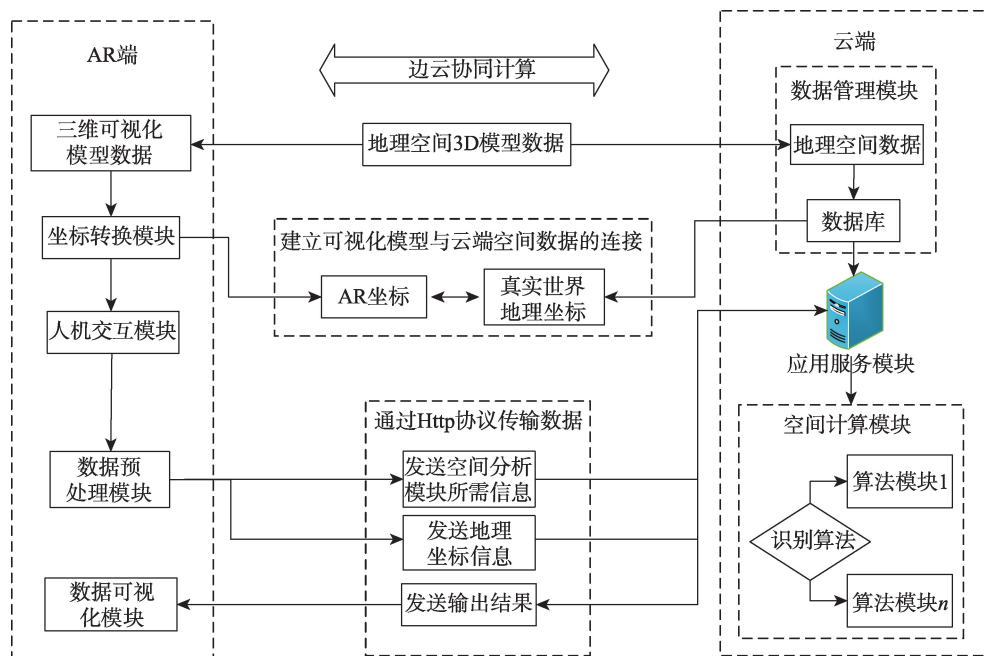


图1 基于边云协同的AR空间分析计算框架

Fig. 1 Framework for AR spatial analysis based on edge-cloud integration

责计算任务的运行与调度;

(4)运行管理模块:监控维护系统各模块的稳定运行,包括整个系统的计算性能、网络性能、IO性能等。

图2为AR端与云端协同计算的逻辑连接图。当AR端需要对某个对象(或者位置)进行特定空间分析计算时,AR端通过坐标转换模块将目标对象(或位置)的三维可视化坐标转换为云端数据库中的地理坐标;人机交互模块捕捉该空间分析所需的其他参数,由数据处理模块将信息以云端API规范生成URL,并向云端发送HTTP请求;云端应用服务模块解析该URL,识别空间分析类别,调用数据管理模块和空间计算模块进行计算,并将计算结果以HTTP协议传送给AR端;AR端中的数据可视化模块将计算结果以真三维的方式展示给用户,完成空间分析的协同计算。

为实现上述功能模块,本框架包含三维数据的边云二元存储和边云端空间坐标转换2个独特的方法。由于目前地理数据与AR数据之间的标准不统一,在三维模型之间转换会造成属性信息的丢失,且地理空间三维模型的大小会直接影响到三维AR空间可视化的体验,所以本文将地理空间三维模型拆分为三维可视化模型数据和原始的三维地理空间数据,分别储存于AR端和云端。其中,前者不具备地理坐标信息和属性信息,仅仅用于AR可视化。在云端进行计算量较大的空间计算时,则必须

将AR端的三维可视化模型与云端的地理空间数据连接起来,即在AR端中的三维可视化坐标系与云端中的地理空间坐标系之间建立转换映射关系。

### 2.2 三维地理模型的边云二元储存

现有AR端所采用的数据标准本身是闭源的,内部存在的节点一般为空间信息节点(几何网络、光源、骨骼)而不包括属性信息<sup>[15]</sup>。而在地理三维模型中,存在着大量的地理对象,拥有着复杂的属性信息,目前的转换工具转换成AR端数据标准会丢失属性信息。另外,由于AR端是一个微型的处理终端,其本身的储存能力是有限的。当地理空间对象存在复杂且大量的属性信息时,会存在容量溢出的问题。

为解决上述问题,本文采用三维地理模型的边云二元存储,是将三维地理模型拆分为三维AR可视化模型和原始的三维地理空间数据,分别导入到AR端和云端进行储存。其优势在于:①AR端只需可视化三维模型,不需要处理属性信息,避免了从地理空间三维模型转为AR数据所造成的属性信息丢失问题;②减少了AR端的数据量,避免了在AR端读取属性信息产生的I/O,进一步提升AR可视化的流畅度。

为实现地理三维模型的边云二元储存,本框架设计了一套数据组织方式。原始的三维矢量数据导入到云端的数据库中,每个地理对象均有ID、名

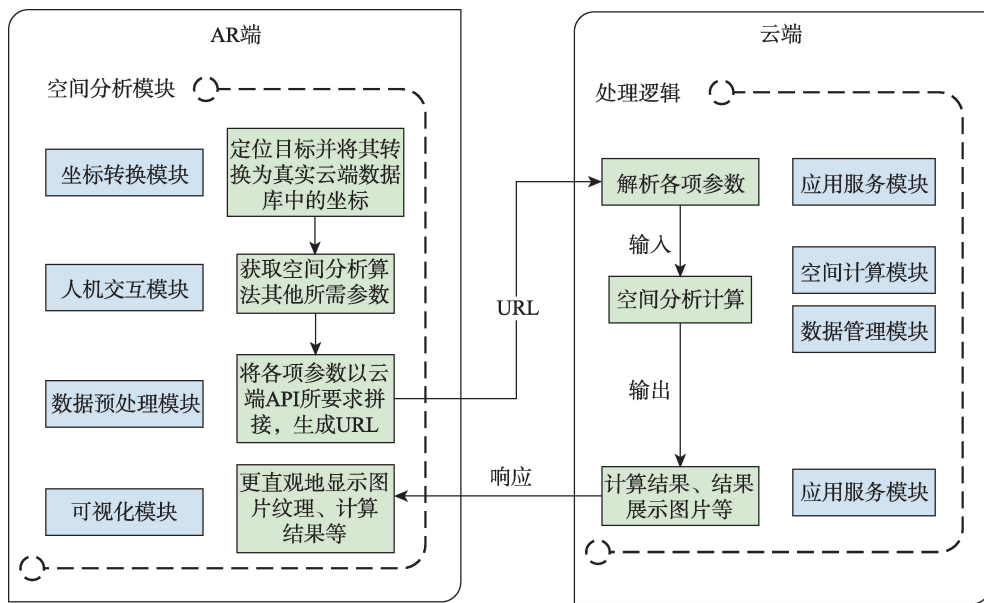


图2 AR端与云端协同计算的逻辑连接

Fig. 2 Logical connection of cooperative computing between AR and the cloud server

称、三维地理位置坐标、以及其他属性信息,用于为AR端提供属性信息查询、数据备份和空间计算模块的数据支持。而三维AR可视化模型直接按AR数据接口标准导入AR端中,保持地理对象之间的方向关系但不具备地理坐标信息和属性信息,用于AR设备的全息影像渲染,提供能在真实物理世界中可感知、可交互的全息虚拟对象。当AR端需加载地理对象的属性信息时,则通过HTTP协议在云端数据库中读取。分布于AR端和云端的数据的内容和差异如表1所示。

表1 AR端与云端数据内容差异

Tab. 1 Differences between AR data and cloud data

|      | AR端数据  | 云端数据           |
|------|--------|----------------|
| 坐标系  | AR本地坐标 | 地理坐标           |
| 属性信息 | 无      | 有              |
| 空间信息 | 方向关系   | 方向关系、距离关系、拓扑关系 |

### 2.3 基于Bursa-wolf七参数的坐标转化

为在云端进行复杂的空间计算并将结果返回给AR端,云端需要明确空间计算的目标地理对象和位置。因此,需要将空间AR端三维可视化模型与云端数据库中的地理空间数据相匹配,建立两端的空间坐标转换关系。坐标转换的精度直接影响空间分析的计算结果。因此本框架利用七参数Bursa-wolf模型<sup>[16]</sup>实现坐标映射。七参数法的优势在于不仅可以转换高程坐标而且转换精度相对较高,其原理是利用2套坐标系中3个或3个以上已知公共点的坐标,求出3个平移参数、1个尺度因子、3个旋转参数,其坐标转换模型如下:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -Z' & Y' \\ Z' & 0 & -X' \\ -Y' & X' & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ k \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:包含7个转换参数,即3个平移参数 $\Delta X$ 、

$\Delta Y$ 、 $\Delta Z$ ,1个尺度因子 $k$ ,和3个旋转参数 $\varepsilon_x$ 、 $\varepsilon_y$ 、 $\varepsilon_z$ ;  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 表示目标三维空间直角坐标系; $X'$ 、 $Y'$ 、 $Z'$ 表示原坐标系。当公共点数为3个或3个以上时,可以通过平差的方法求得转换参数。求得转换参数后即可通过该模型进行坐标转换。

坐标转换模块将空间分析对象的AR可视化坐标转换为云端数据库中地理坐标,从而匹配到数据库中的地理对象,为之后的空间计算获取需要的地理位置信息和相应的属性信息。

## 3 框架实现与实验结果

为验证该计算框架的有效性,本文利用了头戴式AR设备Microsoft HoloLens来进行相关实验(图3)。HoloLens具备三维立体显示、凝视和手势捕捉,空间声音与空间映射等功能,具备较为完整的AR可视化与互动功能。HoloLens集成了中央处理单元(CPU,主频为1.04 GHz)、全息处理单元(HPU)等组件,具有轻量级的计算能力,并搭载了Windows 10的操作系统,是一套能独立运行的、完整的AR系统<sup>[17]</sup>。

### 3.1 框架实现

本实验选择武汉市青山区某区域内的建筑物数据(图4),覆盖面积3 km×3 km,在City Engine平台中以CGA规则<sup>[18]</sup>驱动生成三维模型,并结合天空可视因子(SkyViewFactor, SVF)算法<sup>[19]</sup>实现了一个AR数字城市应用程序。

框架实现大体可分为2个部分,即AR数字城市应用的研发和云端服务的研发。AR数字城市应用研发流程主要分为3个步骤:①在CityEngine中生成三维AR可视化模型;②在Unity3D平台中进行开发;③在Visual Studio中进行调试与部署。云



(a)正面

(b)侧面

图3 头戴式AR设备Microsoft HoloLens

Fig. 3 Head-Wear AR device - Microsoft HoloLens

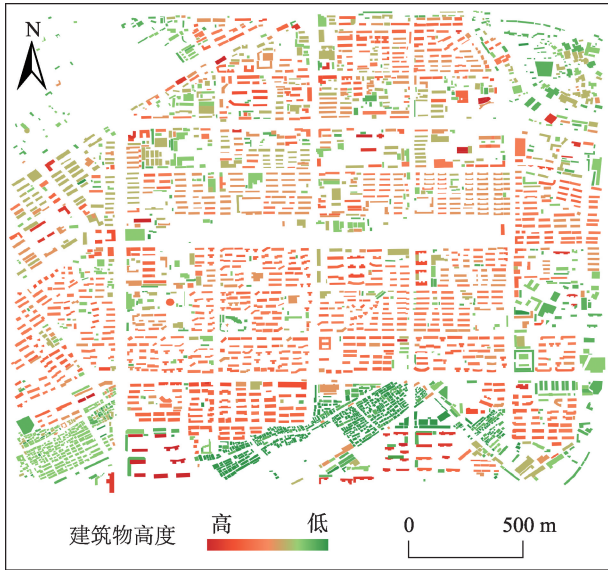


图4 基于边云协同的AR空间分析计算框架  
实现实验建筑物数据

Fig. 4 Dataset for the experimental building of AR spatial analysis framework based on edge-cloud integration

端研发流程主要分为:利用Flask开发应用服务模块;开发算法模块,SVF算法由c++编译后的可执行

程序支持;数据库的部署。具体流程如图5所示。

具体而言,在AR端中,人机交互模块以创建脚本的形式将之前所得到的3D资源与AR端的各类交互方式(凝视设计、手势设计、语音设计、空间映射)组成可操作的事件,并添加GUI、缩放、旋转、移动等基本功能;坐标转换模块通过选取校准点,实时读取在AR空间的坐标,通过Bursa-wolf模型建立与真实世界坐标的映射;数据预处理模块通过与人机交互模块对接,通过解析事件的输入,并以http协议与云端应用服务模块进行通信;可视化模块通过处理云端返回的计算结果,并以适当的形式进行可视化。在云端中,数据管理模块主要通过MySQL提供数据支持;应用服务模块使用Flask搭建,通过解析http请求,调用数据管理模块和算法模块来返回结果;算法模块为天空可视因子算法,为编译完成的可执行程序。

为验证本框架的计算有效性,实验在该地块上随机选取了50个坐标点,利用AR应用计算这50个抽样点的SVF值,并通过与实际天空可视域因子对比,验证了本框架的计算精度。另外,实验

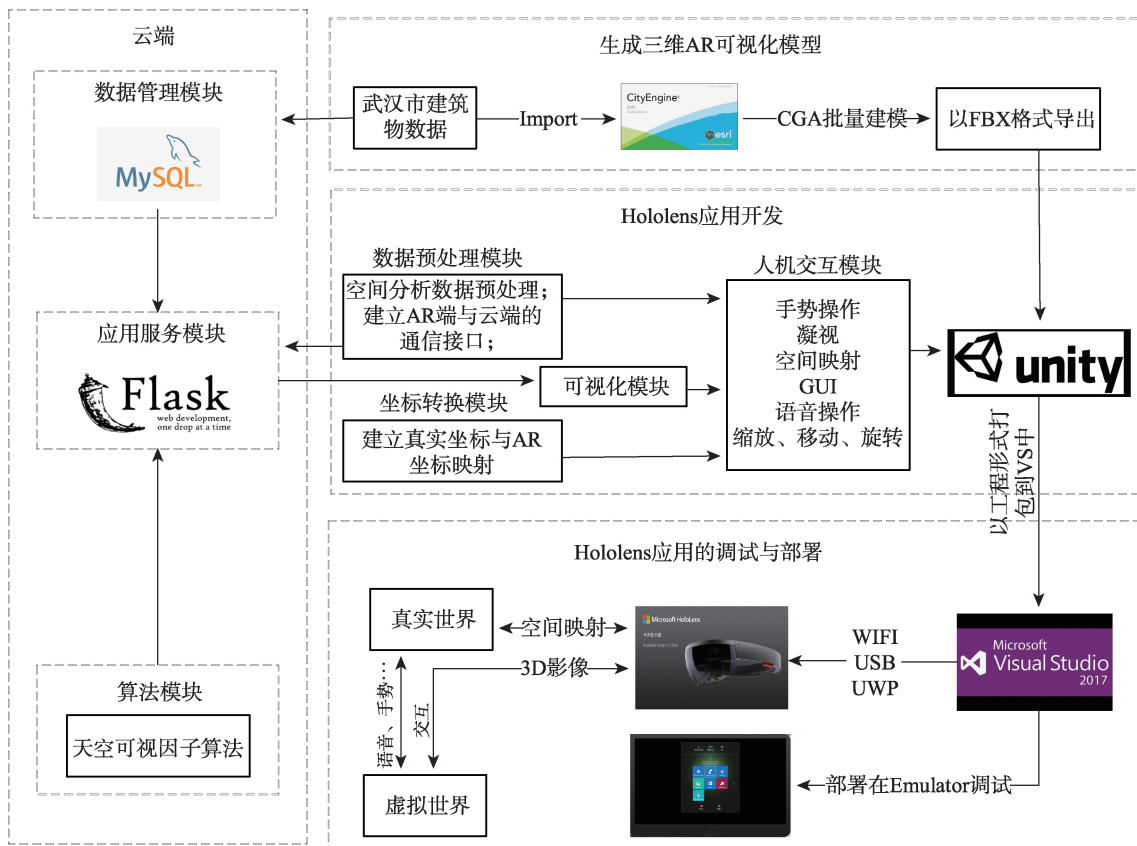


图5 基于边云协同的AR空间分析计算框架实现流程

Fig. 5 Flowchart of AR spatial analysis framework based on edge-cloud integration

全程使用 Hololens Device Portal 对 Hololens 的性能进行追踪,并对比了 Hololens 在运行该应用前后的性能差异。

### 3.2 相关算法

#### 3.2.1 CGA 规则驱动三维建模

本实验在 CityEngine 平台下,借助 CGA 规则驱动<sup>[18]</sup>,对城市建筑物高度数据快速批量建模,其步骤(图6)为:①通过高度信息对建筑物的面要素进行拉伸;②将拉伸后的建筑物按照实际的需要进行拆分和细分割,对细分割后的要素进行分类,并定义相应的规则进行批量建模;③通过贴图函数为各部分贴上纹理。

#### 3.2.2 SVF 算法

本实验计算天空可视因子所使用的是遮挡角算法,通过方位角和高度角将天空半球划分为若干切片,通过计算各方位角对应的遮挡高度角确定天空遮挡<sup>[19]</sup>(图7)。该方位角  $\alpha$  处的天空可视因子的计算公式,如式(2)所示。

$$SVF = \cos^2 \beta (\alpha/360) \quad (2)$$

式中: $g(x)$ 的值为该方位角遮挡物的高度值; $\beta$ 为遮挡高度角,由遮挡建筑物的高度与测量点距离该遮挡物的距离确定。

### 3.3 开发环境介绍

本文的示例实验的开发环境包括一台高性能 PC 和一台 Hololens 开发者版本设备 Hololens。应用程序的研发以及服务端的部署是在高性能 PC 上完成。在 AR 端,利用 CityEngine (<https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/esri-cityengine/>)完成三维 AR 可视化模型的生成,利用 Unity3D (<https://unity3d.com/>)、VisualStudio (<https://visualstudio.microsoft.com/>)以及开源包 MixedRealityToolkit (<https://github.com/microsoft/MixedRealityToolkit-Unity/>)完成 Hololens 应用的开发。具体开发环境如表2所示。

在云服务端,利用 python 以及 Flask (<https://github.com/pallets/flask>)完成 web 服务的主体结构,利用 C++ 以及开源库 Qt (<https://www.qt.io/>)完成算法实现,利用 MySQL (<https://www.mysql.com/>)和 Redis (<https://redis.io/>)实现数据存储和管理。服务端可以部署于局域网的私有云中,也可以部署于广域网的公有云中,具体开发环境如表3所示。

### 3.4 实验结果

图8为该研究区域内遥感影像与 CityEngine 生成的三维 AR 可视化模型(FBX 格式)的对比图。其中选取了2块不同区域,a 区域为商业区,建筑物高度较高;b 区域为居民生活小区,建筑物高度较低。

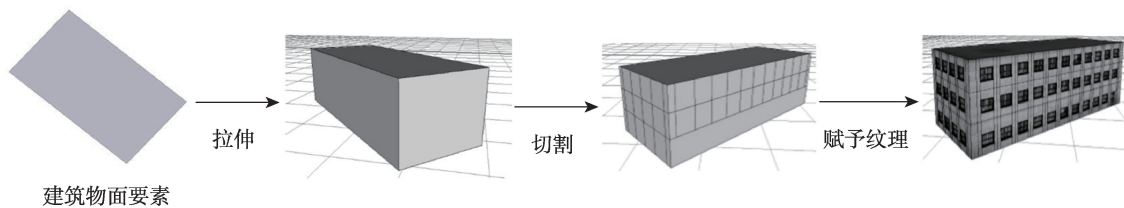


图6 基于CGA规则的三维建模  
Fig. 6 Three-D modeling based on the CGA rule

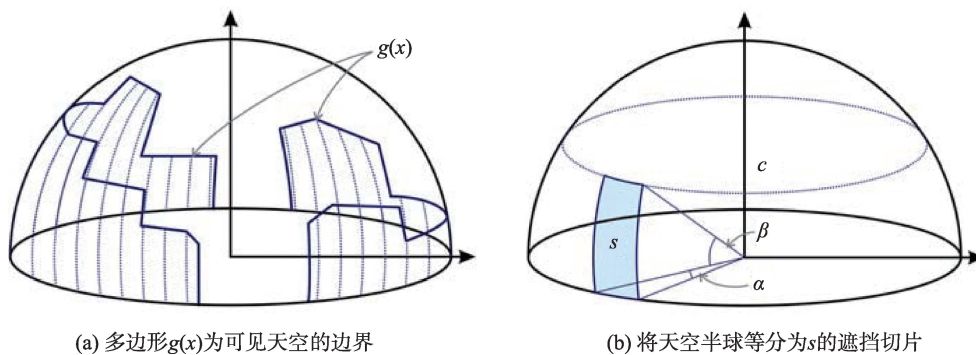


图7 遮挡角算法对天空的划分示意  
Fig. 7 Partition of sky by occlusion angle algorithms

表2 AR端实验开发环境

Tab. 2 Development environment of AR for experiments

| 类型   | 详细信息  |
|------|---|
| 硬件环境 | 处理器: Intel Xeon E5-1630 v4<br>内存: 64 GB<br>储存容量: 3 TB<br>显卡: Nvidia GeForce GTX 1080 Ti 显存: GDDR4 11GB                          |
| 软件环境 | 操作系统: Windows 10 专业版 64位<br>City Engine 2016.0<br>Visual Studio 2017 Community<br>Unity 2017.2.1f1 (64-bit)、MixedRealityToolkit |

表3 云端实验开发环境

Tab. 3 Development environment of cloud for experiments

| 类型   | 详细信息  |
|------|---|
| 硬件环境 | 处理器: Intel Xeon E5-1630 v4<br>内存: 64 GB<br>储存容量: 3 TB                                 |
| 软件环境 | 操作系统: Windows 10 专业版 64位<br>Python 3.6、Flask 0.12.2<br>MySQL 5.7、Redis 3.0<br>Qt 5.10 |

图8(a)、(b)中左图为遥感影像,右图为CityEngine生成的模型。从图中可以看出,本文生成的三维AR可视化模型数据可以基本反映城市建筑物的情况。

为验证边云协同框架的可行性,本文基于生成的三维城市AR可视化模型和天空可视因子算法,设计并开发了一个AR数字城市APP。图9为AR数字城市应用界面示意图,该应用具有以下功能模

块:① 坐标显示模块,负责实时显示操作球的AR本地坐标和地理经纬度坐标;② 小地图模块,负责显示当前城市的全局地图,为方便用户了解所在的位置;③ 操作球,用于选取建筑物;与使用凝视手势来选取建筑物相比,使用操作球更加稳定,同时APP体验会更加流畅;④ 接受服务端计算结果模块,负责接受并显示服务端的返回空间计算结果,包括图片、文字等;⑤ Hololens输入模块,负责接受语音和虚拟键盘输入,如用户自定义算法的输入参数。

在AR数字城市应用中,用户通过凝视按钮并使用AirTap手势来实现对操作球所在位置的天空可视域计算。计算响应时间约3s,其中在服务器中计算SVF时间约2s。这说明空间计算的时间很大程度上依赖于云服务端运行算法程序所耗费的时间,即空间计算的速率取决于云服务端的计算性能,而非AR设备。因此,该框架的计算效率较高。

另外,为验证该框架在解决实际城市空间计算问题时的准确性与有效性,本文在该研究区域上随机选取了50个地理空间位置,通过对比在该框架下得到的SVF值和SVF计算程序的结果,选取拟合优度( $R^2$ )、均方差(MSE)、完全均方差(MAE)3个指标进行精度评价,结果如表4所示。

以上结果表明,基于本文框架的Hololens应用在SVF计算时,与直接通过原始SVF计算程序的计算结果基本吻合,证明了本文框架的有效性。

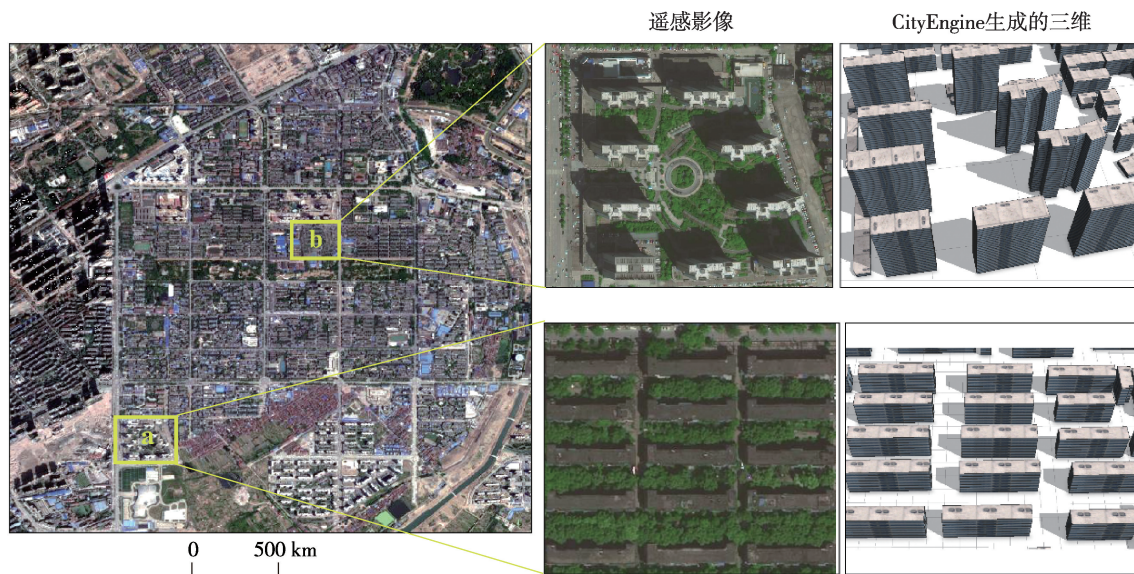
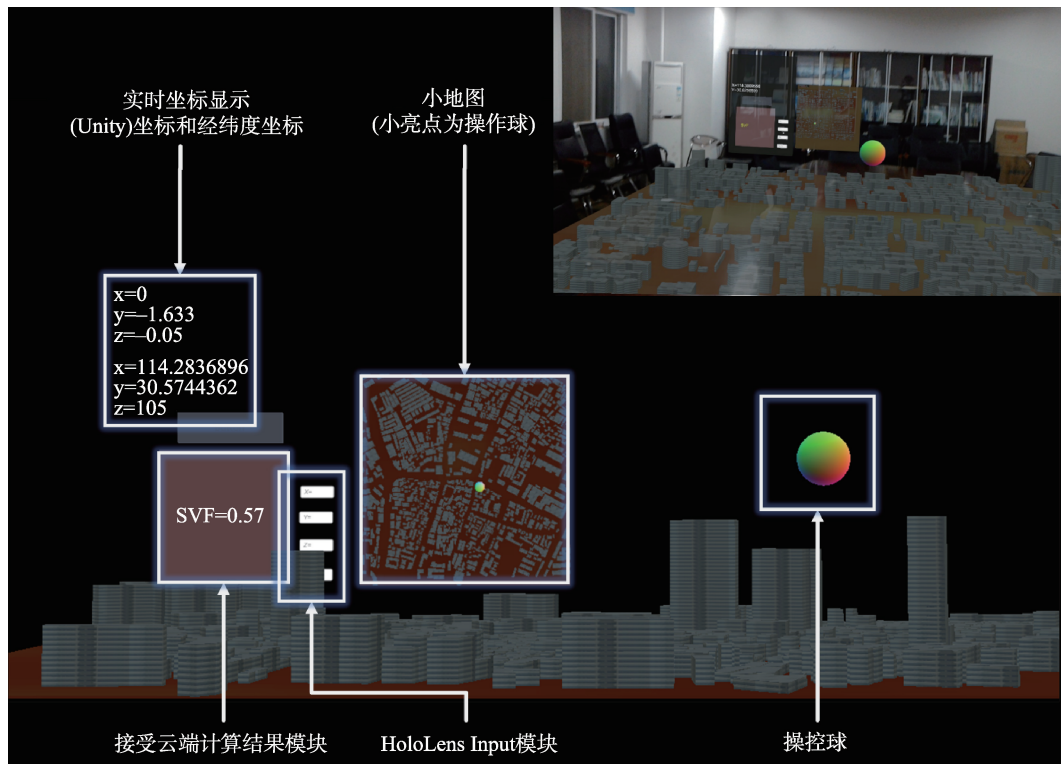


图8 遥感影像与CityEngine生成的三维AR可视化模型

Fig. 8 Remote sensing images and 3D models generated by CityEngine





注: 右上角为该AR数字城市APP在真实物理世界中的展示效果, 数字城市被放置于桌面上。

图9 AR数字城市APP界面示意

Fig. 9 Interface of AR digital city

表4 边云协同框架下SVF计算结果精度

Tab. 4 Accuracy of SVF calculation based on the edge-cloud integration framework

|          | $R^2$ | MSE     | MAE     |
|----------|-------|---------|---------|
| SVF 计算结果 | 0.998 | 0.00002 | 0.00293 |

### 3.5 性能测试

为评价基于本文框架的AR数字城市应用的流畅性以及在进行空间计算时的性能表现, 本文在实验的过程中实时追踪了HoloLens的性能状态。在运行该APP后, 本文先后于 $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ 时刻选取了3个不同的地理位置进行了天空可视因子计算, 如图10所示。

从中可以看出, 在进行天空可视因子计算时, HoloLens的GPU利用率与FPS保持稳定, CPU利用率波动很小(最多上升10%)。在执行空间计算时, HoloLens只需向服务端发送一个HPPT请求并接收结算结果, 只会调用很少的CPU计算资源, 与维持HoloLens应用的CPU占用率相比可以忽略不计, 且这部分操作不涉及到HoloLens的GPU调用, 所以

GPU与FPS均很稳定。因此, 基于该框架的HoloLens APP在进行空间计算时, AR端的系统资源占用并没有显著提升, 且可视化流畅程度基本不变, 实现了在HoloLens有限的计算资源下完成复杂的空间计算。

## 4 结论与讨论

本文提出了一套基于边云协同计算的AR城市空间计算的框架。AR端完成城市数据的可视化、人机交互、数据预处理等计算量较轻且实时性较高的任务。云端则完成计算量较大的空间分析计算任务以及空间数据的持久化存储。本文以头戴式AR设备HoloLens初代开发者版本作为AR端展示平台, 结合天空可视因子算法实现了一个AR数字城市APP, 实现了在真三维空间中完成复杂空间分析计算任务。相比于以往研究, 具有以下优点:

(1) 解决了以往由于头戴式AR设备的硬件限制而难以进行复杂空间分析计算的问题。基于边云协同计算技术, 在云端进行空间分析计算, AR端

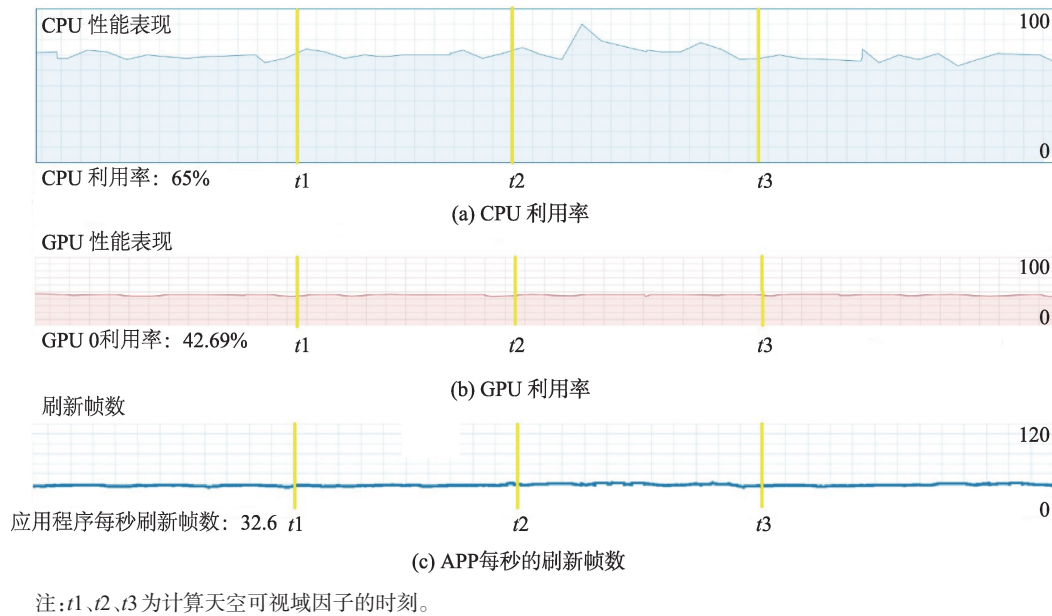


图10 运行应用时的Hololens性能

Fig. 10 Performance of Hololens while running the APP

进行城市数据模型可视化、数据预处理、坐标转换等计算量较小的任务,从而实现计算任务的协同。

(2)避免了三维模型在格式转换过程中属性信息缺失的问题。将地理空间数据与三维AR可视化模型数据分别储存在云端服务器和AR端;AR端仅存储数据量较小的三维AR可视化模型,其属性信息、地理位置信息可直接通过云端数据库加载,实现数据的协同。

(3)保证了流畅的三维可视化体验(FPS不会过低)。通过二元数据存储和边云协同计算,有效减少了AR端的计算资源开销,保证三维可视化的流畅性。

本文所提出的框架拓展性较强,可以加入多种空间分析功能,如天际线分析、通视性分析等,能够提供多种决策支持。然而,本研究也存在一些不足。例如,本实验只考虑了点的空间计算,空间分析服务较为单一。今后,将在云端的空间计算模块实现和部署多种空间分析服务,同时结合AR头戴式设备的交互方式,将线与面的空间计算也加入到AR空间分析系统中,丰富空间分析功能。

#### 参考文献(References):

- [1] Maceachren A M, Menno-Jankraak. Research challenges in geovisualization[J]. American Cartographer, 2001,28(1):3-12.
- [2] Kwan M P. Interactive geovisualization of activity-travel patterns using three-dimensional geographical informa-

tion systems: A methodological exploration with a large data set[J]. Transportation Research Part C, 2000,8(1): 185-203.

- [3] 龚建华. 地学三维可视化[J]. 地球信息科学学报, 1996(2): 34-37. [Gong J H. Three-dimensional visualization of Geoscience[J]. Geo-information Science, 1996(2):34-37.]
- [4] 吴立新, 史文中, Christopher G. 3D GIS与3D GMS中的空间构模技术[J]. 地理与地理信息科学, 2003,19(1):5-11. [Wu L X, Shi W Z, Christopher G. Spatial modeling technologies for 3D GIS and 3D GMS[J]. Geography and Geo-information Science, 2003,19(1):5-11.]
- [5] Ghadirian P, Bishop I D. Composition of augmented reality and GIS to visualize environmental changes[C]. 2002.
- [6] Berryman D R. Augmented reality: A review[J]. Medical reference services quarterly, 2012,31(2):212-218.
- [7] Pagano K, Haddad A, Crosby T. Virtual reality-making good on the promise of immersive learning: The effectiveness of in-person training, with the logistical and cost-effective benefits of computer-based systems[J]. IEEE Consumer Electronics Magazine, 2016,6(1):45-47.
- [8] 陈科, 黄天勇, 杨林波, 等. AR技术在GIS可视化中的应用及方法研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2011,34(6):98-101. [Chen K, Huang T Y, Yang L B, et al. Research on applications and methods of AR technology to visualize geospatial data[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2011,34(6):98-101.]
- [9] Ghadirian P, Bishop I D. Integration of augmented reality and GIS: A new approach to realistic landscape visualisation[J]. Landscape and Urban Planning, 2008,86(3-4):

- 226-232.
- [10] 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 Q Y, Liu T. Design and implementation of a prototype outdoor augmented reality GIS[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2007,32(11):1046-1049. ]
- [11] 常勇,施闯.基于增强现实的空间信息三维可视化及空间分析[J].系统仿真学报,2007,19(9):1991-1995. [ Chang Y, Shi C. 3D visualization and analysis of spatial information based on augmented reality[J]. Journal of System Simulation, 2007,19(9):1991-1995. ]
- [12] Zhang L, Chen S, Dong H, et al. Visualizing Toronto city data with Hololens: Using augmented reality for a city model[J]. IEEE Consumer Electronics Magazine, 2018,7(3):73-80.
- [13] Wang W, Wu X, Chen G, et al. Holo3D GIS: Leveraging Microsoft HoloLens in 3D Geographic Information[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information. 2018,7(2): 60-75.
- [14] 边缘计算与云计算协同应用将大数据分析推向新高度[J].中国安防,2018,149(4):66-72. [ Collaborative application of Edge computing and Cloud computing pushes big data analysis to a new level[J]. China Security & Protection, 2018,149(4):66-72. ]
- [15] 闻平,王冲,吴小东,等. FBX 三维模型自动转换为OBJ三维模型方法研究[J].测绘与空间地理信息,2016,39(1): 113-115. [ Wen P, Wang C, Wu X D, et al. Research of the automatic conversion method from FBX model to OBJ model[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2016,39(1):113-115. ]
- [16] Kutoglu H S, Mekik C, Akcin H. A comparison of two well known models for 7- parameter transformation[J]. Australian surveyor, 2002,47(1):24-30.
- [17] Furlan R. The future of augmented reality: Hololens-Microsoft's AR headset shines despite rough edges[J]. IEEE Spectrum, 2016,53(6):21.
- [18] 吕永来,李晓莉.基于CityEngineCGA的三维建筑建模研究[J].测绘,2013(2):91-94. [ Lv Y L, Li X L. Research on 3D architectural modeling based on city engine CGA[J]. Surveying and Mapping, 2013(2):91-94. ]
- [19] Gál T M, Rzepa M, Gromek B, et al. Comparison between sky view factor values computed by two different methods in an urban environment[J]. Acta Climatologica et chorologica, 2007,40:17-26.