

7-20-2021

Fast Maritime Simulator Scene Modeling Method Based on Aerial Images

Lijia Chen

1. School of Navigation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;;2. Hubei Key Laboratory of Inland Shipping Technology, Wuhan 430063, China;;

Wang Kai

1. School of Navigation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;;2. Hubei Key Laboratory of Inland Shipping Technology, Wuhan 430063, China;;

Shigang Li

3. Jiangsu Maritime Safety Administration, Nanjing 210000, China;;

Yanfei Tian

4. School of Port and Transportation Engineering, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, 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.

Fast Maritime Simulator Scene Modeling Method Based on Aerial Images

Abstract

Abstract: Artificial Modeling using Computer Aid Design software are frequently applied in maritime simulator scene modeling, but with low accuracy, low efficiency and complicate workflow. It's not the ideal method of modeling a large-scale area. *A modeling method is proposed based on aerial images in combination with tilt photography modeling, procedural modeling and image semantic segmentation method.* It's a fast and highly automated modeling method specially for the maritime simulator. A water area near Tianxingzhou Yangtze River Bridge is chosen as the model. Experiment results show that the proposed method is of fast speed, high precision, high degree of automation, and the rendered scene is real and smooth and can meet the requirement of the maritime simulator.

Keywords

maritime simulator, tilt photography, 3D reconstruction, procedural modeling, image semantic segmentation

Recommended Citation

Chen Lijia, Wang Kai, Li Shigang, Tian Yanfei. Fast Maritime Simulator Scene Modeling Method Based on Aerial Images[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(7): 1565-1573.

基于航空影像的航海模拟器视景快速建模方法

陈立家^{1,2*}, 王凯^{1,2}, 李世刚³, 田延飞⁴

(1. 武汉理工大学 航运学院, 湖北 武汉 430063; 2. 内河航运技术湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430063;
3. 江苏海事局, 江苏 南京 210000; 4. 浙江海洋大学 港航与交通运输工程学院, 浙江 舟山 316022)

摘要: 为解决航海模拟器视景建模中采用的人工建模方法效率低、精度差, 处理工序复杂, 不适用于大场景的三维建模问题, 结合航海模拟器视景特点, 运用倾斜摄影建模, 程序化建模及图像语义分割技术, 提出一种基于航空影像的组合建模方法, 实现航海模拟器视景快速自动建模的目的。选取武汉天兴洲长江大桥附近水域进行建模, 结果表明: 该方法建模速度快, 精度高, 自动化程度高, 且渲染效果真实流畅, 符合航海模拟器中对于视景建模的需求。

关键词: 航海模拟器; 倾斜摄影; 三维重建; 程序化建模; 图像语义分割

中图分类号: TP391.9;U666.158 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X (2021) 07-1565-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.20-0192

Fast Maritime Simulator Scene Modeling Method Based on Aerial Images

Chen Lijia^{1,2*}, Wang Kai^{1,2}, Li Shigang³, Tian Yanfei⁴

(1. School of Navigation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;

2. Hubei Key Laboratory of Inland Shipping Technology, Wuhan 430063, China;

3. Jiangsu Maritime Safety Administration, Nanjing 210000, China;

4. School of Port and Transportation Engineering, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China)

Abstract: Artificial Modeling using Computer Aid Design software are frequently applied in maritime simulator scene modeling, but with low accuracy, low efficiency and complicate workflow. It's not the ideal method of modeling a large-scale area. A modeling method is proposed based on aerial images in combination with tilt photography modeling, procedural modeling and image semantic segmentation method. It's a fast and highly automated modeling method specially for the maritime simulator. A water area near Tianxingzhou Yangtze River Bridge is chosen as the model. Experiment results show that the proposed method is of fast speed, high precision, high degree of automation, and the rendered scene is real and smooth and can meet the requirement of the maritime simulator.

Keywords: maritime simulator; tilt photography; 3D reconstruction; procedural modeling; image semantic segmentation

引言

航海模拟器是一种常用的航海实训设备, 相比于实船培训具有更高的经济性和安全性, 因此在海员培训和考试、港航工程论证研究等领域上有着广泛应用。其依靠准确的船舶运动模型、逼真的三维场景和真实的驾驶台设备布置来模拟现实的船舶

驾驶场景。其中航海模拟器三维视景是体现操纵环境真实感的关键, 通常包括高精度的三维地形和模型、高分辨率的材质图片和海浪实时渲染算法等。三维视景的构建实际上是对现实场景的还原, 根据现实场景绘制各类物体的三维模型, 确定模型相对位置信息, 组织三维场景。目前常用的建模方法是使用三维建模软件对现实场景中的各类物体进行

收稿日期: 2020-04-18 修回日期: 2020-07-09

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC0810400/05, 2018YFC1407400/03)

第一作者/通讯作者: 陈立家(1979-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为智能航海与仿真技术。E-mail: ChenLiJia@whut.edu.cn

手工建模^[1-2], 如 MultiGen Creator, 3Ds Max 等。手工建模方法简单、灵活, 但在针对航海模拟器的大场景模型开发中, 表现出建模成本高、周期长和模型数据量大的特点。为此不同领域的专家学者对大场景的快速建模方法进行了深入的研究, 如利用倾斜摄影数据重建三维地形实体数据^[3]; 利用倾斜摄影测量和激光雷达重建三维城市模型^[4]; 对无人机倾斜摄影场景建模的建筑物单体化^[5-6]; 对城市模型的程序化建模^[7-8]。

就目前的研究成果来看, 倾斜摄影建模技术通过多镜头无人机采集多视角影像数据, 自动匹配计算三维模型, 相比传统的手工建模方法, 具有自动化程度高, 建模效率高, 三维信息准确的特点, 但是受无人机性能限制, 倾斜摄影建模方法更适用于重建小面积三维场景的高精度模型。程序化建模方法通过编写程序脚本指导计算机自动建模, 能够快速构建高密度的简单三维城市模型, 更适用于重建大面积三维场景的简单三维模型, 但需要手工标记建筑轮廓。针对这2种方法的优点与不足, 结合倾斜摄影建模与基于图像语义分割的程序化建模, 提出基于航空影像的航海模拟器视景组合建模方案, 对航海场景中不同细节要求的区域分别建模, 可实现针对航海模拟器大规模视景快速重建。

1 组合建模方案设计

本文将现实的航海环境中驾驶室视角可见场景分为两部分: 接近船舶视点的港口作业区与远离船舶视点的城市居民区。港口作业区有错综复杂的码头建筑、种类繁多的机械设备等物标, 这类物标几何结构复杂, 规律不定, 难以用规则几何体表示。同时, 这类物标更接近船舶视点, 需要更高的细节等级, 手工建模工序复杂, 选择倾斜摄影建模方法进行建模。而城市居民区一般由各类楼房组成, 这类物标几何结构简单, 能够以规则几何体的组合表示。虽然结构简单, 但在建模场景中大量存在, 手工建模繁琐费时, 选择程序式建模方法进行建模。

本文方案如图1所示, 对港口作业区采用倾斜

摄影建模方法快速重建高细节三维模型, 对于城市居民区采用程序式建模方法快速重建大面积简单三维模型。通过模型简化算法简化倾斜摄影模型, 在开放场景图(Open Scene Graph, OSG)引擎中组合模型进行渲染, 以期获得真实、流畅的视觉感受。

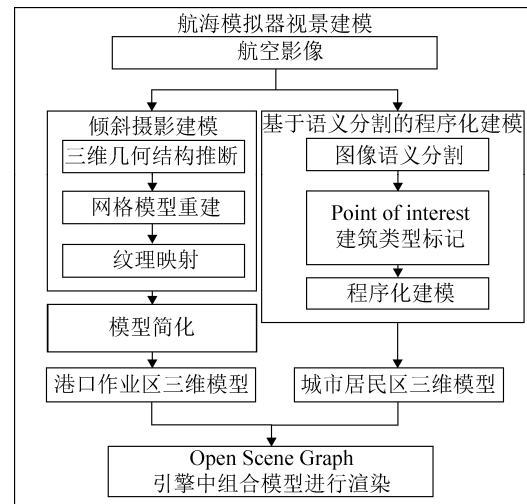


图1 技术路线图

Fig. 1 Technology roadmap

2 倾斜摄影建模

倾斜摄影建模通过对多视角影像数据进行特征点的匹配提取, 从影像的相对位置关系中推断出特征点的空间位置信息, 得到图2中的点云模型。通过对特征点拓扑关系的重建, 构建网格面, 生成网格模型。通过纹理映射, 赋予网格面材质属性, 完成倾斜摄影建模。

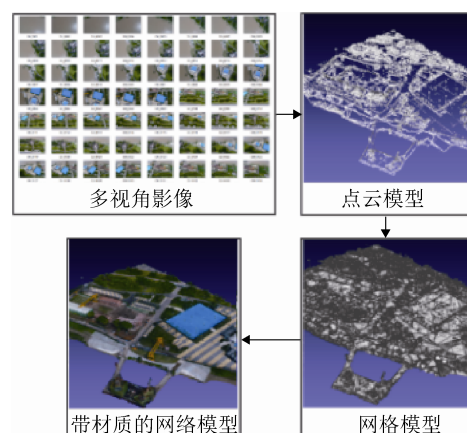


图2 倾斜摄影建模流程图

Fig. 2 Flowchart of tile photography modeling

2.1 三维几何结构推断

对于采集到的多视角影像数据,从二维图像信息中计算三维空间点。对武汉天兴州长江大桥附近码头区域采集到的 2 张正射图像进行特征提取匹配^[9],在图 3(a)找到不受图像变换影响的特征点并标识出来,在图 3(b)中匹配不同图像间的特征点,确定空间点在 2 幅图像中的相对位置,根据相对位置信息计算三维空间点。

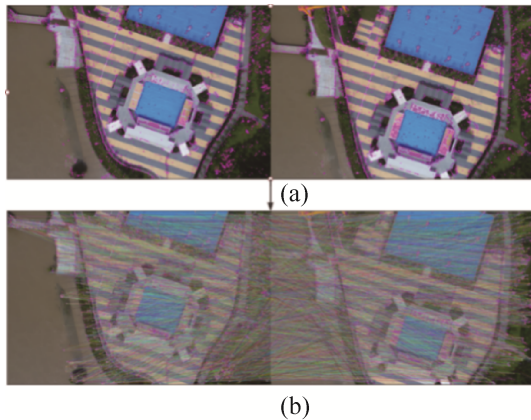


图 3 特征点提取匹配

Fig. 3 Extracting and mapping of distinctive points

依据特征点 x_1, x_2 图像坐标与相机参数信息计算出三维空间点坐标,得到建模区域的点云数据模型。

图 3 中几何关系为满足图 4 的特征点 x_1, x_2 , 特征点 x_1, x_2 为空间点 x_s 在视角 c_1, c_2 对应图像上的投影, x_1, x_2 的齐次坐标分别为 $\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2$, 基础矩阵为 \mathbf{F} , 则 $\mathbf{F}\mathbf{X}_1$ 表示一条必经 x_2 的直线, 即:

$$\mathbf{X}_2^T \mathbf{F} \mathbf{X}_1 = 0 \quad (1)$$

式中: \mathbf{F} 是 3 阶矩阵, 秩为 2, 通过 8 组特征点即可估算出基础矩阵 \mathbf{F} 。由相机参数可知相机参数矩阵 \mathbf{K} , 由式(2)即可得到本质矩阵 \mathbf{E} 。

$$\mathbf{E} = \mathbf{K}^T \mathbf{F} \mathbf{K} \quad (2)$$

通过对本质矩阵的奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD)分解, 即可得到从三维空间点转换到二维图像点的平移矩阵 \mathbf{T} , 和旋转矩阵 \mathbf{R} , 式(3)为某一特征点与空间点 x_s 的对应关系:

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K} [\mathbf{R} \quad \mathbf{t}] \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{P} \mathbf{X}_s \quad (3)$$

式中: s 为相机到点 x_s 的距离。

对于 x_1 有:

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11} \\ p_{12} \\ p_{13} \end{bmatrix} \mathbf{X}_s \quad (4)$$

消去常数项 s 即可得:

$$\begin{bmatrix} p_{13}u - p_{11} \\ p_{13}v - p_{12} \end{bmatrix} \mathbf{X}_s = 0 \quad (5)$$

对于点 x_2 也可得到如式(5)所示下标的方程组, 联立求解即可得到空间点 x_s 的坐标, 由此得到三维点云数据。

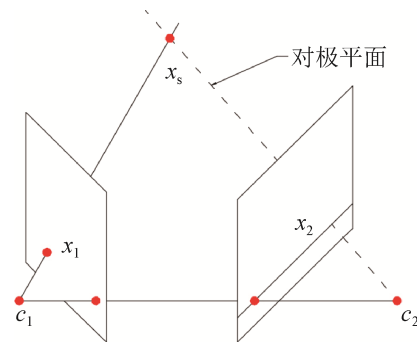


图 4 对极几何原理

Fig. 4 Principle of the epipolar geometry

2.2 网格模型重建

不包含拓扑关系的点云无法表示出模型的实际形状, 采用泊松表面重建生成网格模型。已知点云数据对应的就是建模区域表面点的信息, 如图 5 所示, 通过点云空间坐标以及点云法向量找到能够包围所有点的最小体即可重建该区域的网格模型。

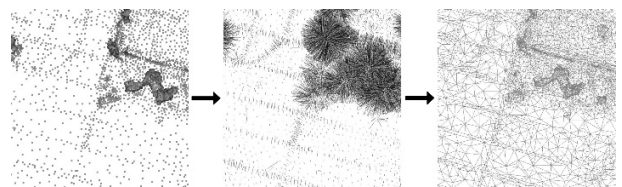


图 5 表面重建

Fig. 5 Surface Reconstruction

重建流程如图6所示,由点云中每一点的特征向量共同形成的有向点集 V ,从高斯散度理论可得:

$$\Delta\chi_M = \nabla\nabla\chi_M = \nabla V \quad (6)$$

由此构造泊松方程,求解表示模型范围的指示函数。将模型所处空间分割为若干个正方体,根据指示函数判断正方体定点是否在模型内部,在正方体内部生成等值三角面,以三角面逼近模型表面结构,对模型表面重采样,重构网格面,得到网格模型。

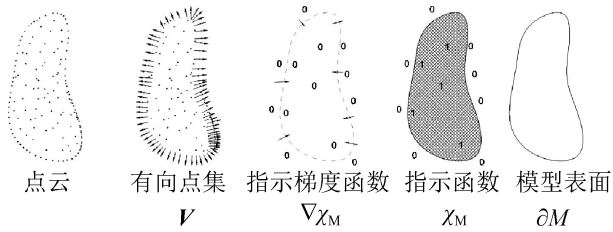


图6 泊松表面重建
Fig. 6 Poisson surface reconstruction

2.3 纹理映射

网格面对应的纹理可从多张影像图中选择,而不同视角、曝光度等参数下的影像中纹理信息完整度不同。如图7所示,根据相机内外方位元素可确定该三角面片对应的图像序列。

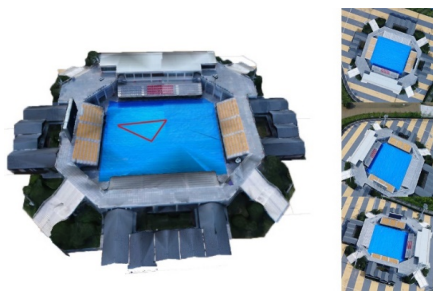


图7 图像序列
Fig. 7 Sequence of picture

依据图割算法选取最优纹理,图割算法是一种图的数学表示。对于图7中的三角面片 F_i ,从输入的多视角影像序列 I 中选取最佳纹理图像,利用能量函数式(7)的最小化来选择最优纹理^[10]:

$$E(I) = \sum_{F_i \in \text{Faces}} E_{\text{data}}(F_i, I_j) + \sum_{(F_i, F_j) \in \text{Faces}} E_{\text{smooth}}(F_i, F_j, I_i, I_j) \quad (7)$$

式中: E_{data} 为图像 I_i 与网格面 F_i 匹配程度,通过相机内外方位元素解得图像 I_i 与网格面 F_i 的空间位置关系,通过视角与遮挡关系评判匹配程度; E_{smooth} 表示相邻网格面 F_i 与 F_j 选择的影像 I_i 与 I_j 之间的匹配程度,通过影像 I_i 与 I_j 的空间位置关系评判匹配程度。从选取的最佳纹理图像,裁剪出有效部分映射到三维模型表面,获得带材质属性的网格模型。

2.4 模型简化

倾斜摄影模型几何信息丰富,数据量庞大,几何细节程度远超航海模拟器三维视景渲染的需求,采用边折叠算法^[11]对模型进行简化。以网格模型作为输入,通过二次误差度量公式确定图8中相邻顶点 V_1 和 V_2 合并到顶点 V 时产生的模型误差,遍历网格模型中所有相邻顶点,选择误差最小的合并方式。

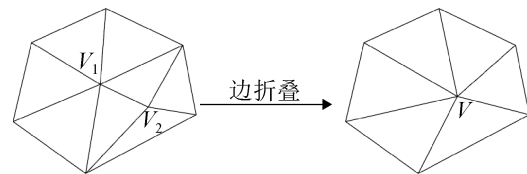


图8 边折叠
Fig. 8 Edge collapse

3 基于图像语义分割的程序化建模

程序化建模方法基于模型抽象化的思想,提取建筑立面的结构规律,将建筑模型结构逐级分解,以门、窗和墙壁等建筑结构元素的组合来表示建筑模型^[12]。通过卫星影像图中的建筑轮廓建立初始模型,应用计算机生成建筑(Computer Generated Architecture, CGA)规则指导计算机对初始模型迭代细分,划分模型立面并赋予对应的结构元素属性,按属性选取对应纹理图像完成纹理映射。

传统的程序化建模方法,需要人工标定建筑物轮廓,因此提出基于图像语义分割的程序化建模方法,识别建筑俯视图轮廓,并标记建筑类型(写字楼、商场、小区及工厂),依据不同建筑类型的结构规律建立建模规则,以俯视图轮廓作为输入,得

到三维模型。方法流程如图 9 所示, 使用训练好的深度神经网络对卫星影像图进行图像语义分割, 标记出建筑屋顶轮廓^[13], 将地图数据中的(Point of Interest, POI)信息叠加在卫星影像图上, 通过 POI 点的分布推断建筑类型, 根据建筑类型采用程序化建模方法完成建模。

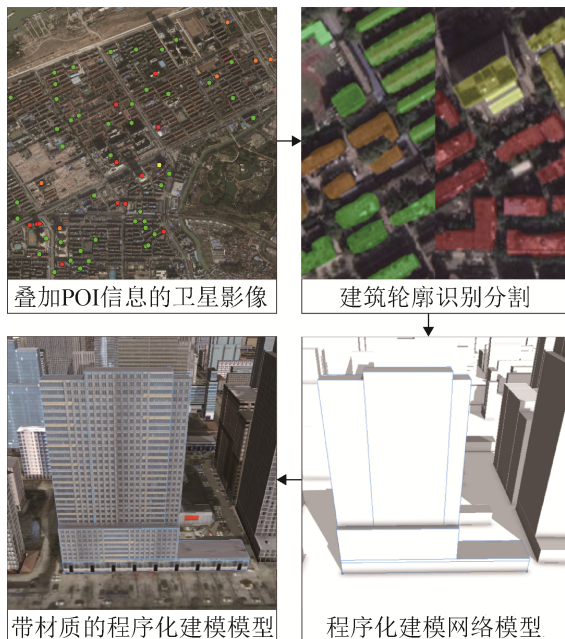


图 9 基于图像语义分割的程序化建模

Fig. 9 Procedural modeling method based on image semantic segmentation

3.1 建筑轮廓提取

首先抓取电子地图上的 POI 信息, 包括小区、工厂、商场和写字楼这 4 类大量出现的代表性建筑类型, 抓取到的数据包括 POI 点的经纬度坐标及名称。对 POI 信息进行整理, 根据经纬度坐标叠加到卫星影像图上, 并以不同颜色的点来标记不同建筑类型的区域, 如图 9 所示, 绿色标记为小区建筑, 橙色建筑为商场, 黄色建筑为写字楼, 红色建筑为工厂。

采用神经网络对卫星图像进行识别, 其中深度神经网络模型采用 u-net 神经网络结构, u-net 是一种基于全卷积网络的分割网络, 本文采用的网络结构, 采用编码器-解码器结构, 通过对图像降采样后再升采样, 提取图像特征, 从而对建筑俯视轮廓进行识别。

3.2 程序化建模

根据建模区域建筑风格建立 4 种建模规则, 依据建筑轮廓及标记类型生成建筑模型并划分立面网格, 得到程序化建模网格模型。从建筑区域采集到的倾斜影像中, 人工建立门窗表面材质库, 根据建筑规则随机匹配得到样式不同的带材质的建筑模型。

以小区建筑为例, 提取其建筑特征, 该建筑可表示为其基本元素在立面上的排列。依据基本组成元素的划分, 如图 10 中立面划分的结构, 编写计算机生成建筑(Computer Generated Architecture, CGA)规则脚本。



图 10 程序化建模

Fig. 10 Procedural modeling

CGA 规则脚本

Lot -->

extrude(height) Building

Building -->

```
comp(f) { front:Frontfacade | side:Sidefacade |
top:Roof }
```

Frontfacade -->

```
setupProjection(0, scope.xy, 1.5, 1, 1)
```

```
setupProjection(2, scope.xy, scope.sx, scope.sy)
```

```
split(y){groudfloor_height: Groudfloor |
{~floor_height:Floor}*}
```

在 CGA 规则中, 根据建筑俯视轮廓标记生成三维模型, 按图 10 的立面结构将模型立面逐级划分, 并且对划分出来的网格面附上相应的属性,

如门窗等，在表面材质库中选取纹理图像完成模型重建。

4 航海模拟器视景示例

为充分评判本文提出的快速建模方案的优劣，选取武汉天兴洲长江大桥附近水域进行建模。该段地区物标种类丰富，有港口码头区常出现的吊机设备、几何结构比较复杂的体育场馆以及大量城市住房。所选区域面积为 529 348 m²，需要进行建模的建筑物有 130 个左右。

建模平台处理器为 i7-8700k 6 核 3.7 GHz，32 GB 内存，GTX1080Ti 11G，操作系统为 windows10，64 位。渲染平台采用目前主流计算机配置，处理器为 i7-7567U 双核 3.5 GHz，16 GB 内存，显卡为 GTX1060 6G，操作系统为 windows10，64 位。

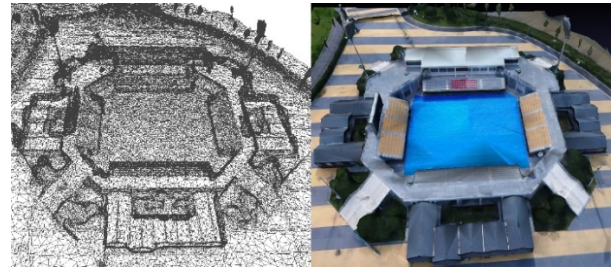
首先对该区域的码头、工业区和具有显著特点的建筑采集多视角影像进行三维重建，在 VisualSFM 中进行点云计算，完成特征匹配到稠密点云计算。在 Meshlab 中进行点云的修剪，去除多余及异常点，然后通过泊松表面重建得到网格模型，最后完成纹理映射得到渲染模型。

通过 C++编程实现边折叠算法对模型进行简化，并通过开放图形库(Open Graphics Library, OpenGL)显示简化后网格。在 Meshlab 中对简化前后模型进行对比，如图 11 所示，简化前模型多边形个数为 29 142，简化后模型多边形个数为 6 021。通过对比可以发现，简化前后模型渲染表现影响不大，而多边形数量降低了 79.3%。

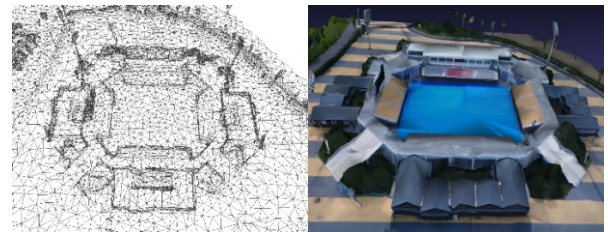
同时对该场景采用 3DS Max 建模软件进行了人工建模试验，同时对比了人工建模与倾斜摄影建模效果，如图 12 所示。人工建模耗时较长，得到模型细节较低，难以获得高质量的立面材质，模型纹理质量较差，而多边形数量及数据量大小都小于倾斜摄影建模。建模效果对比如表 1 所示。

通过 keras 和 TensorFlow 构建 u-net 全卷积神经网络模型，采用 AI Crowd Mapping Challenge 数

据集进行训练，该数据集仅包含建筑这一类标记信息。训练平台处理器为 i7-8700k 6 核 3.7 GHz，32 GB 内存，GTX1080Ti 11 G，操作系统为 windows10 64 位，对所用样本训练 10 次，用时约 50 h，训练好的神经网络学习曲线如图 13 所示。



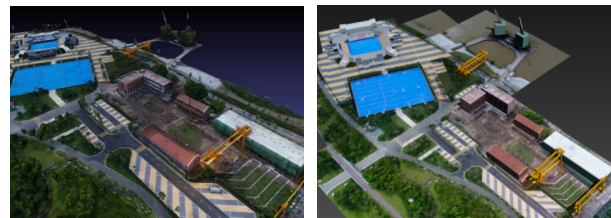
(a) 简化前倾斜摄影模型



(b) 简化后倾斜摄影模型

图 11 简化前后倾斜摄影模型对比

Fig. 11 Comparison of models created by tilt photography modeling



(a) 倾斜摄影建模

(b) 人工建模模型

图 12 倾斜摄影建模效果对比

Fig. 12 Comparison of models created by tilt photography modeling and artificial modeling

表 1 倾斜摄影与人工建模对比

Tab. 1 Comparison of models created by tilt photography modeling and artificial modeling

| 参数 | 倾斜摄影建模 | 人工建模 |
|------------|--------|-------|
| 多边形数量(个) | 68 722 | 2 632 |
| 数据量大小/Mbit | 59.03 | 7.57 |
| 用时/h | 4 | 12 |
| 纹理质量 | 高 | 低 |
| 几何细节 | 高 | 低 |
| 模型表面平整度 | 低 | 高 |

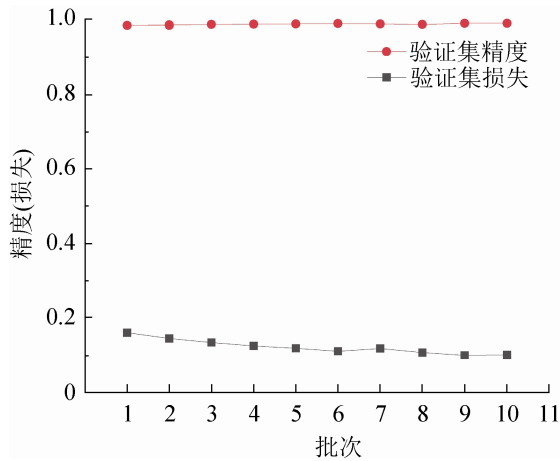


图 13 神经网络学习曲线
Fig. 13 Learning curve of u-net

使用训练好的分割网络提取出卫星影像图中的建筑轮廓信息, 如图 14 所示。对识别出的建筑轮廓信息进行整理, 叠加 POI 信息, 生成带有建筑类型的标记文件。

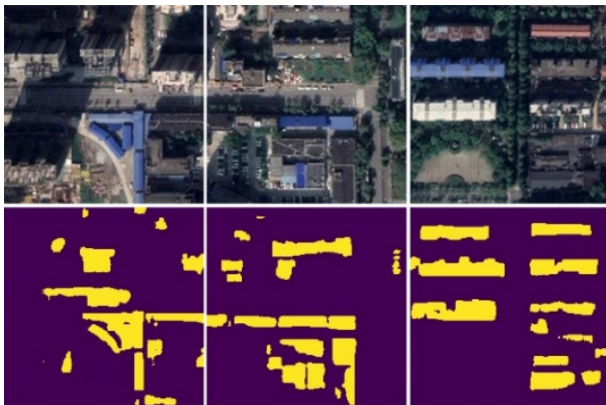


图 14 建筑轮廓标记
Fig. 14 Annotation of building

通过标记文件对武汉天兴洲长江大桥附近区域进行程序化建模, 以图 15 中部分为例, 针对不同的建筑类型, 使用 C++ 及计算几何算法库 (Computational Geometry Algorithms Library, CGAL) 设计程序化建模算法建立建筑模型, 其中有小区、写字楼等建筑类型。

对城市地区也进行了人工建模对比试验, 如图 16 所示, 详细数据如表 2 所示, 相比程序化建模, 人工建模用时较长, 模型重复度较高, 立面纹理质量差, 而模型几何细节基本持平。

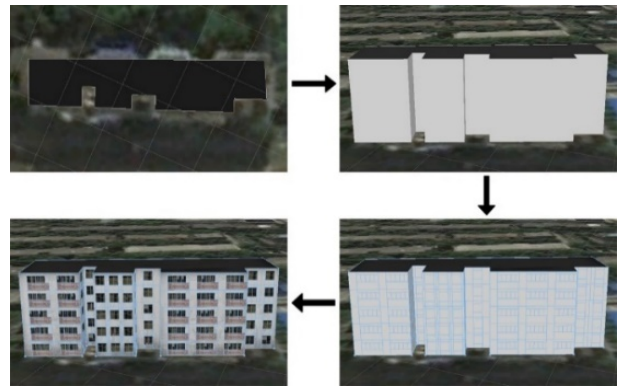


图 15 程序化建模流程图
Fig. 15 Roadmap of procedural modeling



(a) 程序化建模



(b) 人工建模

图 16 程序化建模效果对比
Fig. 16 Comparison of models created by procedural modeling and artificial modeling

表 2 程序化建模与人工建模对比
Tab. 2 Comparison of models created by procedural modeling and artificial modeling

| 参数 | 程序化建模 | 人工建模 |
|------------|-------|-------|
| 多边形数量(个) | 7 952 | 7 686 |
| 数据量大小/Mbit | 23.80 | 1.05 |
| 用时/h | 4 | 16 |
| 纹理质量 | 低 | 低 |
| 几何细节 | 低 | 低 |
| 模型表面平整度 | 高 | 高 |

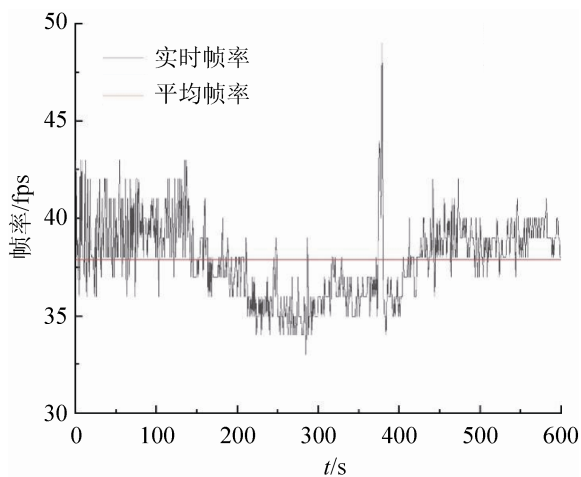
使用 OSG 引擎分别对人工建模场景和组合建模场景进行渲染, 渲染效果如图 17 所示, 比较实时渲染表现。实验平台采用 Intel E5-2695 CPU, NVIDIA GRID K280Q 显卡, 3 GB 内存的计算机。

实验中视景系统以 1 280×720 的分辨率运行，验证该建模方法的性能，记录渲染过程中帧率的变化。

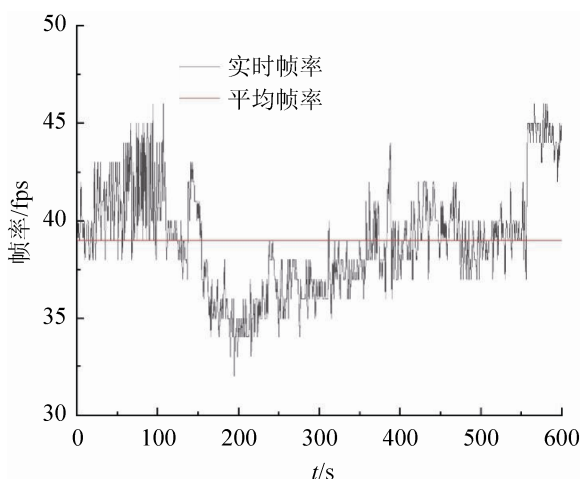


图 17 OSG 仿真效果
Fig. 17 Rendered frame by OSG

由图 18 与表 3 的实验数据可知，组合建模方法生成的视景模型在实时渲染性能上基本与人工建模方法的帧生成曲线差异不大。



(a) 组合建模方法



(b) 人工建模方法

图 18 场景渲染性能记录

Fig. 18 Framerate of scenes created by our method and artificial modeling method

表 3 场景渲染性能对比

Tab. 3 Framerate comparison of scenes created by our method and artificial modeling method /s

| 参数 | 组合建模方法 | 人工建模方法 |
|-----|--------|--------|
| 最低帧 | 33 | 32 |
| 最高帧 | 50 | 47 |
| 平均帧 | 37.897 | 38.985 |

其中组合建模方法的平均每秒帧数比人工建模方法低 1.088 帧。最低每秒帧数和最高每秒帧数均略高于人工建模方法。分析可知：组合建模方法对航海模拟器视景建模的渲染性能并无明显影响；帧生成曲线较为平滑，不会造成画面卡顿；航海场景中船速较慢，视觉信息变化较为缓慢，该帧率能够满足航海仿真的要求。

5 结论

本文从航海模拟器视景建模方法出发，以加速建模过程，提高模型仿真度为目标，选取武汉长江段船舶航行视景系统为实验对象，开展航行环境视景三维建模、视景驱动等相关研究。综合运用倾斜摄影建模，程序化建模及图像语义分割技术，提出了一种基于航空影像的组合建模方法，以 OSG 作为渲染平台验证了该方法的可行性。结果表明：该建模方法在不损失系统流畅度的前提下，有效提高建模效率和模型精度，降低建模成本。

参考文献:

- [1] Varela J M, Soares C G. Geometry and Visual Realism of Ship Models for Digital Ship Bridge Simulators[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment (S1475-0902), 2017, 231(1): 329-341.
- [2] 翟小明, 尹勇, 任鸿翔. 内河船舶操纵模拟器视景系统的建模与仿真[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2018(5): 112-117.
Zhai Xiaoming, Yin Yong, Ren Hongxiang. Modeling and Simulation of Visual System in Inland River Handling Simulator[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2018(5): 112-117.
- [3] 刘双童, 王明孝. 基于倾斜摄影建模技术的三维地形实体模型制作研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2019, 42(1): 31-33.

- Liu Shuangtong, Wang Mingxiao. Research on 3D Terrain Solid Model Production Based on Tilting Photography Modeling Technology[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2019, 42(1): 31-33.
- [4] 张学之, 张禹, 徐敏. 利用 LiDAR/倾斜摄影技术实现三维城市快速建模的方法研究[J]. *测绘与空间地理信息*, 2015(3): 47-49.
- Zhang Xuezhi, Zhang Yu, Xu Min. Research on the Quick Construction Modeling of 3D City Based on LiDAR and Oblique Photogrammetric Technique[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2015(3): 47-49.
- [5] 连蓉, 丁忆, 罗鼎, 等. 倾斜摄影与近景摄影相结合的山地城市实景三维精细化重建与单体化研究[J]. *测绘通报*, 2017(11): 128-132.
- Lian Rong, Ding Yi, Luo Ding, et al. Research on 3D Fine Reconstruction and Model Singling on Mountainous City Combined with Oblique Photography and Close Range Photography[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2017(11): 128-132.
- [6] 王勇, 郝晓燕, 李颖. 基于倾斜摄影的三维模型单体化方法研究[J]. *计算机工程与应用*, 2018, 54(3): 178-183.
- Wang Yong, Hao Xiaoyan, Li Ying. Study of Method for Achieving 3D Model to be Single Based on Oblique Photogrammetry Image[J]. *Computer Engineering and Application*, 2018, 54(3): 178-183.
- [7] Nishida G, Bousseau A, Aliaga D G. Procedural Modeling of a Building from a Single Image[J]. *Computer Graphics Forum (S1467-8659)*, 2018, 37(3): 415-429.
- [8] 刘波, 王章野, 王丽英, 等. 大规模城市场景的高效建模及其实时绘制[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2008(9): 1153-1162.
- Liu Bo, Wang Zhangye, Wang Liying, et al. Efficient Modeling and Real-Time Rendering of Large-scale Urban Scenes[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2008(9): 1153-1162.
- [9] Tang G L, Liu Z J, Xiong J. Distinctive Image Features from Illumination and Scale Invariant Keypoints[J]. *Multimedia Tools and Applications (S1380-7501)*, 2019, 16(78): 23415-23442.
- [10] Zhong D Y, Wang L G, Bi L. Implicit Surface Reconstruction Based on Generalized Radial Basis Functions Interpolant with Distinct Constraints[J]. *Applied Mathematical Modelling (S0307-904X)*, 2019, 71: 408-420.
- [11] Garland M, Heckbert P S. Simplifying Surfaces with Color and Texture Using Quadric Error Metrics[C]// *Proceedings Visualization'98*. North Carolina: IEEE, 1998: 263-269.
- [12] Wonka P, Wimmer M, Sillion F X, et al. Instant Architecture[J]. *ACM Transactions on Graphics (S0730-0301)*, 2003, 22(4): 669-677.
- [13] Chen K Q, Fu K, Yan M L, et al. Semantic Segmentation of Aerial Images With Shuffling Convolutional Neural Networks[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters (S1545-598X)*, 2018, 15(2): 173-177.