

基于帧缓存的多角度影像精细纹理映射方法

朱庆¹, 翁其强¹, 胡翰², 王峰¹, 王伟玺^{3, 4}, 杨卫军⁵, 张鹏程⁵

(1. 西南交通大学地球科学与环境工程学院, 四川, 成都 611756; 2. 香港理工大学土地测量与地理资讯学系, 香港 999077; 3. 深圳大学智慧城市研究院, 广东, 深圳 518060; 4. 国土资源部城市土地资源检测与仿真实验室, 广东, 深圳 518060; 5. 广州市城市规划勘测设计研究院, 广东, 广州 510060)

摘要: 三维建筑物模型纹理映射方法通常针对单独平面选取单一影像投影, 然而单张关联影像通常存在部分遮挡问题, 影响纹理映射质量。为此, 本文提出一种基于帧缓存纹理绘制技术的多角度影像精准纹理映射方法。首先将单体化精细建筑模型和倾斜摄影测量解决方案生成的三角网模型配准, 再根据建筑模型空间特征进行纹理绘制基元提取; 然后根据纹理绘制基元对三角网模型生成虚拟渲染相机, 利用帧缓存纹理绘制方法, 获取帧缓存对象并提取纹理, 最后通过纹理绘制基元映射到精细建筑物模型表面, 实现三角网模型到精细单体化建筑模型的自动纹理映射。利用倾斜摄影测量数据进行实验, 实验结果表明, 相比传统方法, 本文方法减少了 14% 以上的不良纹理比率, 纹理空间压缩率达到 14.21%, 且具有更精确的纹理映射效果, 能满足精细建筑模型的纹理重建需求。

关键字: 摄影测量; 建筑物精细三维重建; 帧缓存; 纹理映射; 计算机视觉

中图分类号: P231

文献标识码: A

Multi View Image Precise Texture Mapping Method Based on Frame Buffer

ZHU Qing¹, WENG Qiqiang¹, HU Han², WANG Feng¹, WANG Weixi³, YANG Weijun⁵, ZHANG Pengcheng⁵

(1. Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China; 2. Department of Land Surveying and Geo-information, Hongkong 999077, China; 3. Research Institute for Smart City, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 4. Key Laboratory of Urban Land Resources Monitoring and Simulation, Ministry of Land and Resources, Shenzhen 518060, China; 5. Guangzhou Urban Planning and Design Survey Research Institute, Guangzhou 510060, China)

Abstract: Detailed 3D building model texture mapping methods normally select the best corresponding images for each single face to do texture mapping, yet the single face-associated images often have partial occlusion problem that impact the mapped textures' quality. This paper presents an multi view image accurate texture mapping method based on frame buffer rendering technique. Firstly registrate coordinates between single independent building model and oblique photogrammetry scheme produced triangle mesh model, then the rendering primitives were extracted based on the spatial characters of single independent building model. Subsequently, establish rendering cameras for triangle mesh model according to rendering primitives, using with RTT(Render to texture) method, textures correspond to each rendering primitives were obtained from FBO(frame buffer object) while rendering the triangle mesh model with rendering cameras. Finally remapping the textures to the surface of detailed building model via rendering primitives, achieved automatically texture mapping from triangular mesh model to detailed single independent building model. Experiment using data of oblique photogrammetry shows the defective textures' occupation reduced by over 14% using proposed method than

基金项目: 国家自然科学基金 NSFC NO. 41631174, 41501421, 61602392; 国土资源部城市地监测与仿真重点实验室开放课题(KF-2016-02-022, KF-2016-02-021)

作者简介: 朱庆 (1966—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为摄影测量、地理信息系统、虚拟地理环境, E-mail: zhuq66@263.net

通信作者: 胡翰, E-mail: huhan19880715@163.com

traditional method, and the size of textures were compressed to 14.21%, meanwhile have more accurate texture mapping quality, so can satisfy the requirement in texture reconstruction of detailed building models.

Keywords: photogrammetry; detailed building 3D reconstruction; frame buffer; texture mapping; computer vision

面向多细节层次三维城市建模的迫切需求,多角度航空倾斜影像应运而生并已成为大规模城市三维重建的主要数据源,已有倾斜摄影测量解决方案可以较高的自动化程度生成大规模场景具有纹理信息的三角网模型。然而三角网模型无完整的拓扑结构与语义信息,难以支撑复杂的空间智能应用,具有更加丰富拓扑语义信息的单体化精细建筑物模型,已成为行业应用的热点^[1]。而精细建筑物模型的纹理映射,因建筑物遮挡以及多视影像纹理融合导致的纹理不完备等问题,亦是建筑物精细重建的难点与研究热点^[2]。

针对单体化精细建筑模型的纹理映射问题已存在大量研究。包括用轮廓线配准的建筑墙面纹理映射策略实现基于航拍影像的墙面纹理重建方法^[3],综合视角法和深度缓存方法从多视角影像中选择最优影像映射的方法^[4],对建筑面筛选最佳倾斜影像再通过特征线匹配优化外方位元素实现精确投影的纹理映射方法^[5],采集全景影像映射建筑纹理的方法^[6]等。已有方法主要通过两个途径来实现单体化精细建筑模型的纹理映射:1. 在基于影像的纹理映射基础上对面和影像进行精确配准,优化映射精确度。2. 采用多类型影像作为纹理来源以提高纹理质量。但均无法很好解决关联影像遮挡或纹理信息不完备的问题。

倾斜摄影测量可自动生成具有纹理信息的三角网模型,然而三角网模型纹理细碎,在立面下部等纹理质量不佳区域难以编辑。现有方法主要从两个方面优化三角网模型纹理映射效果:1. 优化纹理映射过程,尽可能选取最佳影像进行映射,或对局部区域统一映射^[7-9]。2. 优化映射后纹理,采用像素重写或匀色等手段增强纹理的真实性或一致性^[7, 10]。但均无法很好解决因源影像质量等原因造成的纹理映射问题。

本文基于帧缓存纹理绘制的多角度倾斜影像纹理精准映射,不同于传统方法将立面投影至影像进行纹理裁剪的方式,采用纹理绘制技术(render to texture, RTT)将具有纹理信息的三角网模型规则绘制到建筑物平面上,直接生成和三角网模型一致的无遮挡纹理。有效利用三角网模型中的纹理信息,

且提取出来的信息易于编辑。同时基于通用图形处理技术,在 GPU 中进行并行加速处理,提高处理效率,实现单体化精细三维模型的自动纹理映射。

1 算法流程

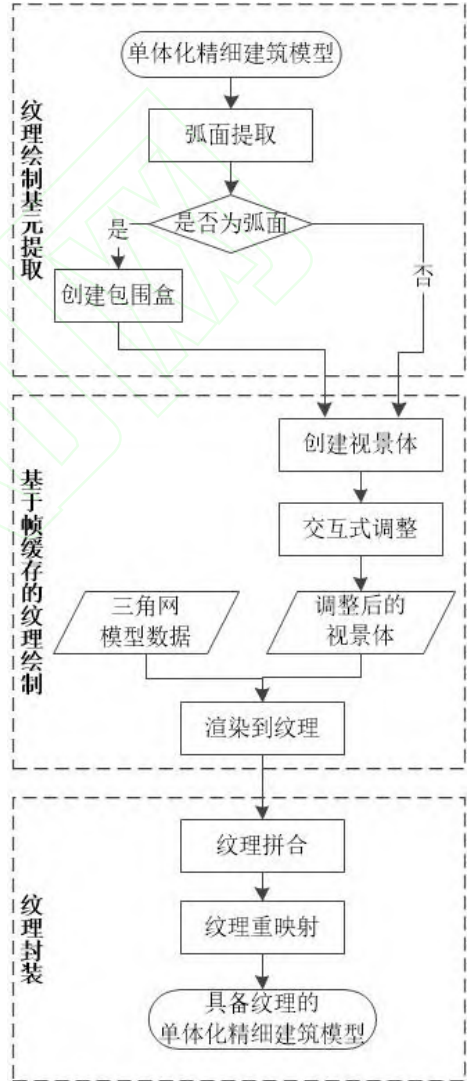


图 1 算法流程图
Fig. 1 Algorithm flowchart

如图 1 所示,基于帧缓存绘制的倾斜影像模型纹理映射方法包含以下关键技术环节:

(1) 纹理绘制基元提取。先进行三角网模型与精细建筑模型的配准和精细建筑模型中弧面的自动提取。对于一般建筑面元,直接将其视为纹理绘制

基元, 针对弧面, 创建弧面外包围盒, 以外包围盒面作为纹理绘制基元。

(2) 基于帧缓存的纹理绘制。获取纹理绘制基元的最小外包矩形 (minimum bounding rectangle, MBR), 沿基元法向量正负方向拓展创建视景体。提供一种交互式调整视景体的方法, 在必要时允许用户交互式调整视景体位置以解决自相交问题。根据各纹理绘制基元视景体参数分别对三角网模型进行渲染, 利用 RTT 技术从三角网模型渲染得到的帧缓存对象 (frame buffer object, FBO) 中获取颜色缓存 (color cache) 并保存。针对弧面, 获取的是外包围盒面的纹理。

(3) 纹理拼合与重映射。采用最大矩形装箱算法 (max rect bin packing) 将离散纹理拼合成纹理集 (texture atlas), 根据 (3) 中获取的纹理与纹理绘制基元最小外包矩形的映射关系以及纹理装箱规则计算纹理坐标, 再将纹理映射回建筑平面。对于弧面, 先根据法向量选取每个基元的最佳包围盒投影面, 再根据弧面基元与投影面之间的空间关系计算纹理坐标并映射纹理。

(4) 得到以精细建筑模型纹理绘制基元为基本单位组织的纹理, 在需要的情况下, 便于人工整饰优化纹理效果。

2 纹理绘制基元提取

2.1 三角网模型与单体化精细建筑模型配准

基于单体化精细建筑模型与三角网模型的坐标参考系差异, 首先要对二者进行坐标配准, 将单体化精细建筑模型的坐标统一到三角网模型的坐标系下。

坐标配准可以借助中间坐标系来实现, 分别获取三角网模型和单体化精细建筑模型的局部坐标系与中间坐标系间的转换关系, 基于此来实现二者的坐标转换^[11]。

坐标转换过程用布尔莎七参数模型可表示为

$$[x_2, y_2, z_2] = \lambda R[x_1, y_1, z_1] \quad (1)$$

其中 λ 是缩放系数, R 是正交旋转矩阵。在实际计算中用 $[x_2, y_2, z_2] = [x_1, y_1, z_1] * T_s * T_r * T_t$ 来实现坐标转换, 其中 $[x_1, y_1, z_1]$ 和 $[x_2, y_2, z_2]$ 分别是坐标系 1 和坐标系 2 中的任意点坐标, T_s 、 T_r 、 T_t 分别是坐标系 1 到坐标系 2 的缩放矩阵、旋转矩阵和偏移矩阵。

设单体化精细建筑模型对应的坐标系为 $[X, Y, Z]$ 三角网模型对应的坐标系为 $[x, y, z]$, 中间坐标系为

$[x_m, y_m, z_m]$, 则将模型坐标从 $[X, Y, Z]$ 转换到 $[x, y, z]$ 坐标系下的转换公式为

$$[X', Y', Z'] = [X, Y, Z] * T_{s1} * T_{r1} * T_{t1} * T_{s2}^{-1} * T_{r2}^{-1} * T_{t2}^{-1} \quad (2)$$

其中 $[X', Y', Z']$ 是转换后的坐标, T_{s1} 、 T_{r1} 、 T_{t1} 是从 $[X, Y, Z]$ 到 $[x_m, y_m, z_m]$ 的转换矩阵, T_{s2} 、 T_{r2} 、 T_{t2} 是从 $[x, y, z]$ 到 $[x_m, y_m, z_m]$ 的转换矩阵。

2.2 精细建筑模型中弧面的提取

在基于表面模型的三维模型表达中, 弧面是由法向量具有一定夹角的连续基元组成的。在表面模型中, 实际表达弧面结构所需要的基元数量明显高于弧面数量。因此对模型中的弧面进行提取, 可以降低后续步骤时间复杂度^[12]。

将弧面约束为具有以下特征的模型部分:

(1) 由若干法向量角度差均等的连续平滑基元组成;

(2) 相邻的组成基元应有方向差异;

特征 (1) 是对弧面几何形态的简单描述, 特征 (2) 是为了区分弧面和平面。设某弧面对应的弧面基元集合为 $C = \{f_1, f_2, \dots, f_m\}$, 其中 f_1 到 f_m 为组成该弧面的有向基元, 基元法向量集合为 $V = \{\vec{v}_1, \vec{v}_2, \dots, \vec{v}_m\}$, 任意连续基元向量 $\vec{v}_i, \vec{v}_j, \vec{v}_k \left(\left\{ \vec{v}_i, \vec{v}_j, \vec{v}_k \right\} \in V \right)$ 满足以下条件:

$$(1) \quad 0 < \langle \vec{v}_i, \vec{v}_j \rangle < \xi_1$$

$$(2) \quad \left| \langle \vec{v}_i, \vec{v}_j \rangle - \langle \vec{v}_j, \vec{v}_k \rangle \right| < \xi_2$$

其中 ξ_1 是一个相邻面元角度差极大阈值, 用于区分表面模型中的多边形和弧面, 其值反映了模型表面与光滑弧面的逼近程度。定义符合条件且基元间角度差大于 ξ_1 的表面构造为多边形, 其组成基元数量较少, 基元间法向量差异大, 单独提取无法显著提升处理效率, 且在后续间接纹理映射中容易造成纹理清晰度不一的问题。 ξ_2 是连续面元角度差差值的极大阈值, 用于限制连续面元的形态变化一致性, 以识别弧面。

基于以上条件获取所有面元中符合条件的弧面基元, 根据相邻关系对弧面基元聚类, 获得块内相连, 块间区隔的弧面块, 并剔除块内弧面基元数量少于极小值 n 的弧面块, 以平衡方法效率。

得到聚类后的弧面块集合 $G = \{g_1, g_2, \dots, g_k\}$ 后, 基于弧面基元的法向量特征, 构建由 K 个平面约束的离散定向多面体 (dimensional discrete oriented polytope, DOP) 包围盒, 并将包围盒面作为纹理绘制基元以平衡方法效果和效率^[13]。对于非弧面的一般面元, 直接将其视为纹理绘制基元。

3 基于帧缓存的纹理绘制方法

帧缓存 (frame buffer) 是计算机渲染过程中为保存屏幕像素数据等开辟的一块内存空间, 是渲染管线的输出目标和屏幕显示画面的直接映像。渲染到纹理是计算机图形学中常用的一种技术, 其基本原理是通过对目标区域进行渲染并提取生成的帧缓存中的信息, 再保存为位图的方式, 实现对特定三维场景纹理的提取^[14]。

结合渲染到纹理的方法, 可以从倾斜摄影测量解决方案生成的三角网模型中提取适当纹理并保存, 再映射回精细模型表面。

3.1 创建视景体

视景体是三维空间中成像景物所在空间的集合, 它决定了三维场景在屏幕上的可见范围^[15]。为了使用 RTT 方法从三角网模型中获取精细建筑模型每个纹理绘制基元的纹理影像, 需先根据每个纹理绘制基元的空间位置构建对应视景体, 再根据视景体重建虚拟纹理相机实现对模型特定区域的局部渲染以得到对应纹理。

视景体形态由投影方式确定。为了获取无畸变纹理, 这里采用正射投影的方式, 此时视景体为规整的长方体。根据纹理绘制基元的空间位置创建唯一视景体需要确定视景体的九个参数, 包括: 视点 e , 纹理绘制基元外包矩形中心点 c , 上方向矢量 \vec{u} 和长方体视景体上下左右前后六个面的空间位置。设 $R_i(w, h)$ 是纹理绘制基元 f_i 对应的最小外包矩形, 其中 w 和 h 分别是 R_i 的长和宽, c 是 R_i 的几何中心, \vec{n} 是 f_i 的法向量, 规定 d_1 为 R_i 到视景体前面的距离, d_2 为 R_i 到视景体后面的距离, $d=d_1+d_2$ 。如图 2 令 \vec{u} 为沿短边 h 任一方向, 以中心点 c 为坐标原点, 中心点 c 指向视点 e 方向为 z 轴正方向, 上方向 \vec{u} 为 x 轴正方向, 与 x 、 z 轴正交方向为 y 轴正方向建立局部坐标系。此时视景体六个面分别平行于三条坐标轴, 其位置分别用坐标轴数值 $x_l, x_r, y_l, y_r, z_b, z_d$ 来表示。九参数分别为:

$$c(0,0,0), e(0,0,n), x_d(-\frac{h}{2}, 0, 0), x_u(\frac{h}{2}, 0, 0), y_l(0, \frac{w}{2}, 0), y_r(0, -\frac{w}{2}, 0)$$

$$z_b(0, 0, -d_2), z_f(0, 0, d_1)$$

其中, e, c, \vec{u} 确定了视景体在三维空间中的方位, $x_l, x_r, y_l, y_r, z_b, z_d$ 确定了视景体的边界范围。

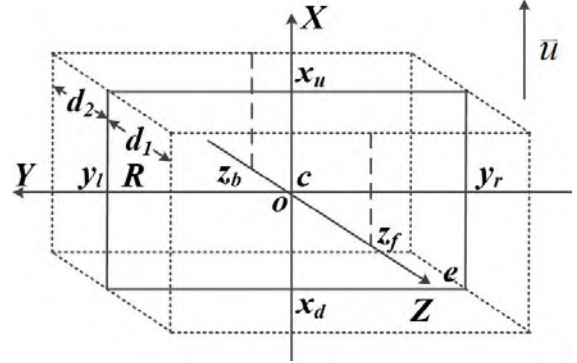


图 2 视景体示意图
Fig. 2 Sketch of the frustum

对于弧面部分, 对其包围盒面所对应的纹理绘制基元构建视景体, 以简化方法。

考虑到部分建筑之间可能距离较近, 视景体厚度 d 不宜设置得过大, 以免裁剪无关模型。同时针对精细建筑模型纹理绘制基元的视景体与三角网粗模存在的自相交问题, 引入一种交互式编辑的纠正方式: 将配准后的粗模和精模在同一场景下显示, 绘制出选定精模纹理绘制基元及其视景体前后面, 提供一种交互式调整视景体前距参数 d_1 的方法来调整视景体前后两面的位置以解决自相交问题。

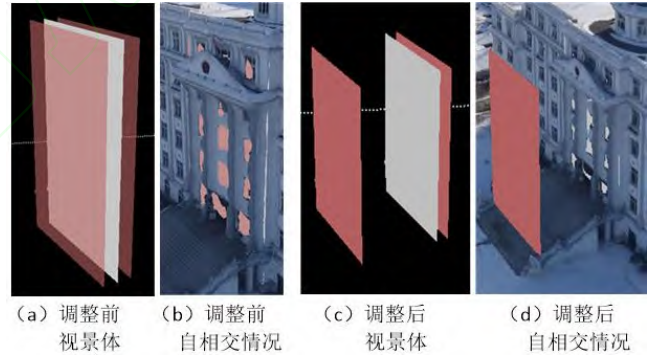


图 3 视景体调整效果
Fig. 3 Frustum adjustment result

根据视景体从三维空间点获取二维纹理的过程是一个矩阵变换的过程^[14]。该过程可以用 MVPW (Model view-Projection-Window) 变换来描述。

$M_{model-view}$ 、 $M_{projection}$ 、 M_{window} 分别是上述转换过程的矩阵表示, 由设定的虚拟相机投影参数确定。将目标对象从三维世界坐标系中到二维屏幕窗口坐标系下的转换过程, 可以视为 $M_{model-view}$ 、 $M_{projection}$ 、 M_{window} 的级联。

3.2 纹理绘制

通过确定纹理绘制基元的视景体参数, 并经过 MVPW 变换, 实现了目标区域模型从世界坐标系到视口的转换。将对应的虚拟相机绑定至当前图形上

下文环境，然后对目标模型进行渲染以获取对应的帧缓存，以提取需要的纹理位图。

三维渲染管线流程完成后渲染数据被写入帧缓存中，帧缓存是与系统默认图形上下文环境绑定的一块内存区域，具体包括颜色缓存，深度缓存，模板缓存等，帧缓存由系统管理，在使用上有所限制^[16, 17]。

从帧缓存中提取信息到纹理位图的方法有多种：借助像素缓存（pixel buffer, PBuffer）获取纹理；借助帧缓存对象输出渲染结果到纹理位图等。

借助像素缓存获取纹理的方法需要频繁切换图形上下文环境，资源开销较大。相比之下，帧缓存

对象可以直接写入显存，效率更高，这里采用帧缓存对象的方法实现纹理的获取。

帧缓存对象可以看作是用户自己定义管理的帧缓存，是离屏渲染中常用的一种数据载体。借助帧缓存对象应用程序可以直接获取渲染结果并自由操作。将渲染结果输出到纹理位图中的过程，实际是先将渲染结果写入帧缓存对象，再通过帧缓存对象绑定到纹理位图。帧缓存对象中同样包含颜色缓存、深度缓存和模板缓存。这里提取其中的颜色缓存保存为纹理。至此即可获取精细建筑模型中各纹理绘制基元对应的三角网模型纹理位图。RTT 过程可以利用通用图形处理技术，在 GPU 中并行加速处理以提高处理效率。

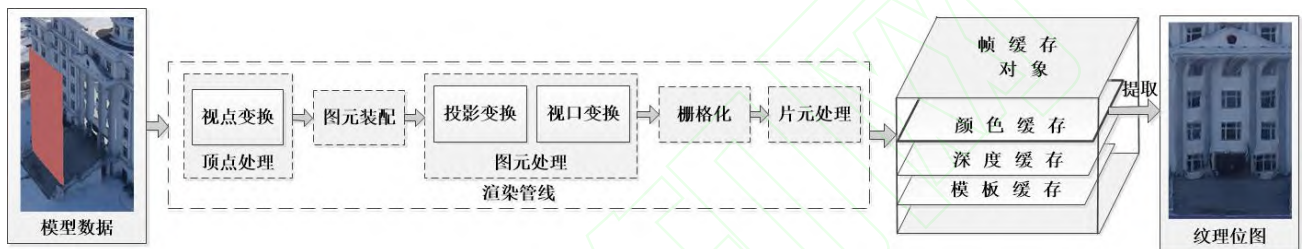


图 4 渲染到纹理流程图
Fig. 4 Flowchart of render to texture procedure

4 纹理封装方法

4.1 纹理拼合

单体化精细建筑模型所对应的纹理绘制基元数量通常较多，由渲染到纹理方法将得到大量的离散矩形纹理，直接重映射回建筑表面渲染效率较低。这里引入一种最大矩形装箱（max rect bin packing）算法来整合离散纹理^[17, 18]。

最大矩形装箱算法核心步骤分为两点：

（1）自由域分割

最大矩形装箱算法在每次插入新的矩形后，将被插入的矩形剩余区域（称为自由域），分割为纵横方向上分别具有最长边的两个有重叠矩形，加入备择矩形集合 F 。

（2）插入策略

插入策略是从备择矩形集合 F 中选取最优矩形进行插入的策略。常用的插入策略具有相近的时间和空间复杂度，完全装箱后最短边插入（best short side fit, BSSF）方法的二维空间利用率最高，因此本文采用 BSSF 方法^[17]，即每次从 F 中选取插入后剩余边长最短的矩形放入离散矩形。

装箱过程是一个从 F 中选取最优矩形并插入离散矩形，再重新分割自由域的迭代过程，直到所有

离散矩形都被插入到初始矩形箱。每次插入新的矩形后应移除与插入矩形相交的备择矩形并更新集合 F 。

装箱过程中还可能遇到所有备择矩形均无法容纳插入矩形的情况，特别是限定一定的“箱子”尺寸时，这里采用两种策略改进装箱算法。

（1）在装箱之前对离散矩形预排序，由于本文采用 BSSF 插入方法，因此将离散矩形按长度递减排序，以规避装箱中途遇到大规格纹理导致的插入失败。

（2）设定缩放参数 $\delta (0 < \delta < 1)$ ，对排序后依然遇到的矩形插入失败情况，将所有矩形纹理缩放 δ ，再全部重新插入，直到所有离散纹理都被插入到指定大小纹理影像中，得到纹理集。

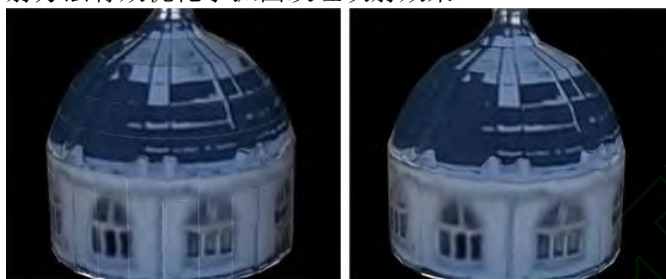
4.2 纹理重映射

得到纹理集之后，需要计算建筑各个纹理绘制基元最小外包矩形角点对应纹理集中的纹理坐标。

对于一般面元，纹理绘制基元就是面元本身。渲染到纹理获取的纹理位图角点直接面元最小外包矩形角点，因此，只需要根据纹理拼合时离散纹理插入到纹理集中的位置，即可求得面元最小外包矩形各个角点对应的纹理集纹理坐标^[19]。

对于弧面部分,因为渲染到纹理时获取的是包围盒的纹理,还需要进一步计算从包围盒到弧面基元的投影关系,按照纹理集→包围盒→弧面基元的顺序建立纹理映射关系。

将离散纹理整合为纹理集并重映射时,由于纹理打包和重映射等的累计误差,纹理绘制基元之间将存在细小的白色间隙,对于一般立面影响并不显著,但由于弧面是由大量细小基元连续构成,故视觉影响明显。如图 5,左图是直接对弧面基元单独取纹理再重新映射的效果,右图是借助包围盒对弧面取纹理后再间接映射的效果。可以看出,左图模型弧面基元之间存在大量细小白色缝隙,而右图模型基本不存在可见缝隙,基于弧面包围盒的间接纹理映射方法有效优化了弧面纹理映射效果。



(a)直接映射

(b)包围盒间接映射

图 5 直接映射和包围盒间接映射效果对比

Fig. 5 Comparison between texture mapping directly and via boundingbox

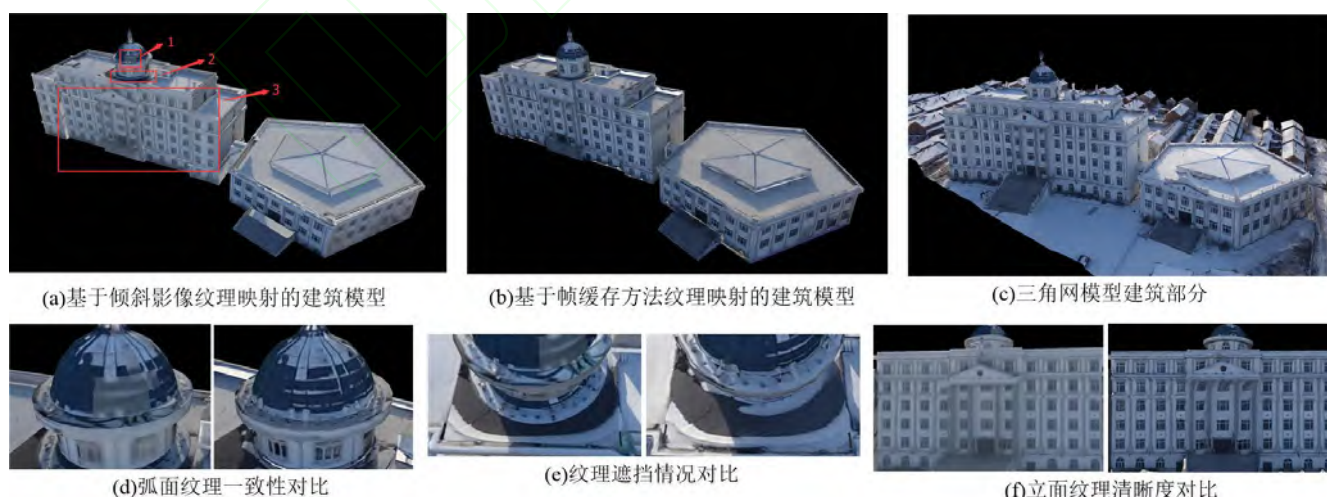
5 实验与分析

本文采用了 SWDC-5 传感器采集的倾斜摄影测量影像数据进行实验。基于倾斜摄影测量影像数据对目标建筑生成三角网粗模,交互式构建对应的单体化精细建筑模型并基于倾斜影像实现对单体化精细建筑模型的纹理映射,如图 6(a)。按照实验方法利用三角网模型渲染得到的帧缓存对象对精细建筑模型进行纹理映射,实验结果如图 6(b)所示。

图 6(a)中矩形框 1 中存在区域纹理色调不一致的问题,详见图 6(d)。这是由于弧面区域由许多连续基元构成,基于影像的纹理映射方法针对每个基元进行单独映射,导致获得的相邻面元纹理来源于不同影像,影响基元纹理特征的一致性。基于帧缓存的纹理映射方法从三角网模型中获取纹理,纹理更精细且经过全局匀光,一致性好于基于影像的纹理映射方法。

图 6(a)中矩形框 2 区域存在纹理遮挡问题。基于影像的纹理映射方式难以解决遮挡问题,如图 6(e),面元影像纹理来自该面元上方下视影像,影像受到面元上方凸出构造的遮挡影响,致使底部面元存在部分纹理映射错误,该问题在本文方法中被有效解决。

图 6(a)中矩形框 3 区域存在纹理模糊的问题,详见图 6(f)。基于法向量优先原则从影像中选取垂直立面纹理时,由于立面角度问题,筛选得到的最优影像一般位于影像阵列边缘部分,面元区域对应纹理比较模糊,基于帧缓存方法得到的立面纹理更加精细。



(a)基于倾斜影像纹理映射的建筑模型

(b)基于帧缓存方法纹理映射的建筑模型

(c)三角网模型建筑部分

(d)弧面纹理一致性对比

(e)纹理遮挡情况对比

(f)立面纹理清晰度对比

图 6 纹理映射结果对比

Fig. 6 Comparison of texture mapping results

若认定面元纹理中纹理质量较差区域占比达 10%以上的为不良纹理,则采用倾斜影像实现纹理映

射的单体化精细建筑模型中,有超过 20%以上的面元纹理为不良纹理,且不良纹理中,存在遮挡,纹

理模糊等纹理信息缺失问题的纹理占到一半以上，很难通过人工方式纠正；采用帧缓存方法实现纹理映射的单体化精细建筑模型中，不良纹理占比在 6%

以内，且不良纹理问题主要为纹理扭曲，易于人工编辑纠正。

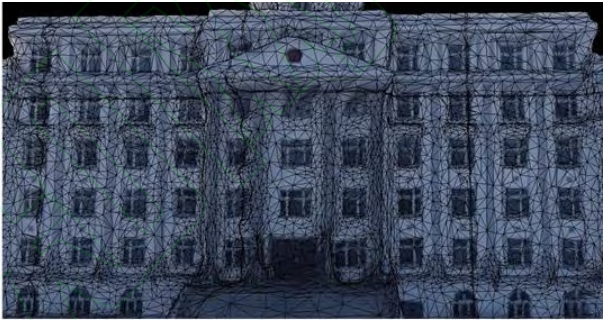
表 1 模型纹理对比
Tab. 1 Comparison between model textures

模型类型	纹理基元类型	纹理基元数量/个	纹理数量/张	不良纹理比率	纹理可否编辑
三角网模型	不规则三角格网	约 60000	1	*	否
基于影像方法纹理映射的模型	面元	541	541	>20%	是
基于帧缓存方法纹理映射的模型	纹理绘制基元	349	1	<6%	是

由图 7 可见，三角网模型中纹理基于不规则三角网组织，采用帧缓存方法映射的单体化模型中的纹理则基于规则矩形面元组织。图 9 是三角网模型的导出纹理，三角网模型的纹理形态细碎难以编辑，图 8 是采用帧缓存方法得到的纹理集，纹理形态为规整的矩形，易于处理。图 10 是对获得的纹理进行人工整饰前后的效果对比。图 10 (a) 中是 RTT 直接获取纹理和对应的模型效果，由图可见，由于三角格网朝向问题，获取的面元纹理上部扭曲严重。而三角网模型中纹理破碎难以编辑，通过本文方法将三角网模型纹理提取为规则矩形纹理后，可以方便地进行人工整饰，图 10 为人工整饰前后效果，纹理扭曲部分经由人工校正，整体建筑纹理效果得到改善。

呈现扭曲等问题的不良纹理，多对应三角网模型中成片的法向量朝下的连通区域，可以基于这种特征提取纹理中的畸变区域，并以自动化方式实现修复。如引入曲率驱动传播 (curvature driven diffusion, CDD) 模型，借助准确区域纹理特征矫正畸变纹理^[20]，或引入 Criminisi 算法直接利用准确区域匹配填充畸变区域^[21]。

图 8 的纹理集位图像素尺寸为 2048*2048，打包前离散纹理位图数量为 349 张，占用空间 8.94MB，纹理打包后纹理位图数量为 1 张，占用空间 1.27MB，空间压缩率为 14.21%。图 11 是模型打包前后的模型可视化效果对比图，纹理打包前后模型渲染效果差异较小。引入纹理拼合方法能在保证渲染效果的前提下有效减少纹理空间占用并降低渲染纹理调度开销。



(a)三角网模型



(b)帧缓存方法映射的建筑模型

图 7 三角网模型与基于帧缓存方法映射的建筑模型纹理组织差异

Fig. 7 Comparison of texture primitives between triangle mesh model and model processed with proposed method

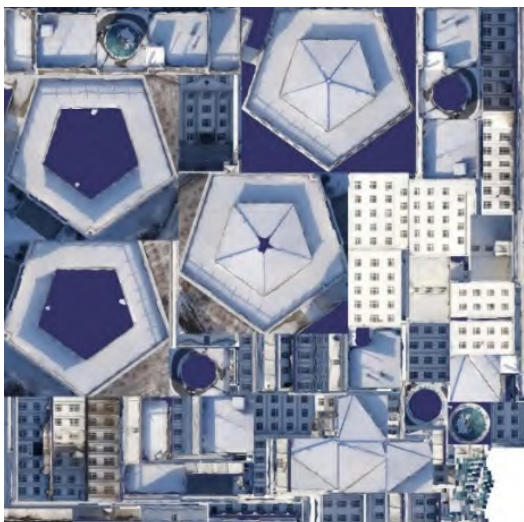


图 8 纹理打包后的纹理集
Fig. 8 Texture atlas



图 9 三角网模型纹理
Fig. 9 Textures of the triangle mesh model



(a) Rtt 获得的原始面纹理与对应模型



(b) 对模型纹理进行人工整饰的效果

图 10 对获得纹理进行纹理编辑的效果
Fig. 10 Result of manual texture modification



(a) 纹理打包前



(b) 纹理打包后

图 11 纹理打包前后模型对比

Fig. 11 Comparison of model textures before and after texture packing

6 结语

本文提出了一种基于帧缓存绘制技术的倾斜影像建筑纹理映射方法。实验表明，相比传统基于影像的建筑纹理映射方法，该方法能利用倾斜摄影测量解决方案生成的三角网模型中精细的纹理信息，

获取更加准确的建筑纹理并赋予精细建筑模型。该方法成功提取了三角网模型中高度细碎的纹理信息,便于进一步编辑操作,并有效减少了基于影像的建筑纹理映射方法中出现的纹理遮挡等问题。

致谢:智慧广州时空信息云平台建设项目(市工信委项目编号:GZIT2016-A5-147)。

参考文献:

- [1] 刘洋. 无人机倾斜摄影测量影像处理与三维建模的研究[D]. 南昌: 东华理工大学, 2016.
- [2] Haala N, Kada M. An update on automatic 3D building reconstruction[J]. *Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*. 2010, 65(6): 570-580.
- [3] 孙春生, 吴军, 陈丹青. 三维城市建模中的建筑墙面纹理快速获取[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*. 2005, 30(9): 766-770.
- [4] 桂德竹, 林宗坚, 张成成. 倾斜航空影像的城市建筑物三维模型构建研究[J]. *测绘科学*. 2012, 37(4): 140-142.
Gui D, Lin Z, Zhang C. Research on construction of 3D building based on oblique images from UAV[J]. *Science of Surveying and Mapping*. 2012, 37(4): 140-142.
- [5] Wang M, Bai H, Hu F. Automatic Texture Acquisition for 3D Model Using Oblique Aerial Images[C].//*International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems*. Wuhan: IEEE, 2008:495-498.
- [6] Haala N, Kada M. Panoramic Scenes for Texture Mapping of 3D City Models[J]. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2005, 36(Part 5/W8).
- [7] 李明, 张卫龙, 范丁元. 城市三维重建中的自动纹理优化方法[J]. *测绘学报*. 2017, 46(3): 338-345.
Li M, Zhang W, Fan D. Automatic Texture Optimization for 3D Urban Reconstruction[J]. *Acta Geodaetica Et Cartographica Sinica*. 2017, 46(3).
- [8] 张春森, 张卫龙, 郭丙轩, 等. 倾斜影像的三维纹理快速重建[J]. *测绘学报*. 2015, 44(7): 782-790.
Zhang C, Zhang W, Guo B, et al. Rapidly 3D Texture Reconstruction Based on Oblique Photography[J]. *Acta Geodaetica Et Cartographica Sinica*. 2015, 44(7).
- [9] 李媛, 胡翰, 谢金华, 等. 局部区域表面一致性约束的三维模型纹理映射方法[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*. 2016, 41(12): 1599-1604.
- [10] Ran G, Wexler Y, Ofek E, et al. Seamless Montage for Texturing Models[J]. *Computer Graphics Forum*. 2010, 29(2): 479-486.
- [11] 潘国荣, 赵鹏飞. 基于空间向量的三维基准转换模型[J]. *大地测量与地球动力学*. 2009, 29(6): 79-82.
- [12] Mcivor A M, Waltenberg P T. Recognition of simple curved surfaces from 3D surface data[M]. Springer Berlin Heidelberg, 1998: 434-441.
- [13] Fünfzig C, Fellner D W. Easy Realignment of k-DOP Bounding Volumes.[C].//*Graphics Interface*. Nova Scotia: Citeseer, 2003:257-264.
- [14] Szeliski R. *Computer Vision: Algorithms and Applications*[M]. New York: Springer-Verlag New York, Inc., 2010: 2601-2605.
- [15] Baer S. *Essentials of Interactive Computer Graphics: Concepts and Implementation*[M]. Boca Raton: CRC Press, 2008: 311-334.
- [16] Akeninemoller T, Haines E, Hoffman N. *Real-time rendering*[M]. Natick: A.k.peters Limited, 2008: 163-173.
- [17] Jylänki J. A thousand ways to pack the bin-a practical approach to two-dimensional rectangle bin packing[EB/OL]., 2010/2010-02-27[2018].<http://clb.demon.fi/files/RectangleBinPack.pdf>.
- [18] Bansal N, Khan A. Improved Approximation Algorithm for Two-Dimensional Bin Packing[J]. *Proceedings of the twenty-fifth annual ACM-SIAM symposium on Discrete algorithms*. 2014: 13-25.
- [19] 张剑清, 贺少军, 苏国中. 三维模型重建中影像纹理重组方法研究[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*. 2005, 30(2): 115-117.
- [20] Chan T F, Shen J. Nontexture inpainting by curvature-driven diffusions[J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*. 2001, 12(4): 436-449.
- [21] Criminisi A, Pérez P, Toyama K. Region filling and object removal by exemplar-based image inpainting[J]. *IEEE Transactions on image processing*. 2004, 13(9): 1200-1212.