

引文格式:汪利斌,胡翰,朱庆,等.局部表面参数化的实景三角网模型语义增强方法[J].测绘学报,2020,49(2):225-234. DOI:10.11947/j. AGCS.2020.20180588.

WANG Libin, HU Han, ZHU Qing, et al. A semantic enhancement method for photorealistic mesh model based on local parameterization[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2020, 49(2): 225-234. DOI: 10.11947/j. AGCS.2020.20180588.

## 局部表面参数化的实景三角网模型语义增强方法

汪利斌<sup>1</sup>, 胡翰<sup>2,3</sup>, 朱庆<sup>1</sup>, 丁雨淋<sup>1</sup>, 陈敏<sup>1</sup>

1. 西南交通大学地球科学与环境工程学院, 四川 成都 611756; 2. 轨道交通工程信息化国家重点实验室(中铁一院), 陕西 西安 710043; 3. 浙江中海达空间信息技术有限公司, 浙江 湖州 313200

## A semantic enhancement method for photorealistic mesh model based on local parameterization

WANG Libin<sup>1</sup>, HU Han<sup>2,3</sup>, ZHU Qing<sup>1</sup>, DING Yulin<sup>1</sup>, CHEN Min<sup>1</sup>

1. Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China; 2. State Key Laboratory of Rail Transit Engineering Informatization (FSDI), Xi'an 710043, China; 3. Zhejiang Hi-Target Spatial Information Technology Co. Ltd., Huzhou 313200, China

**Abstract:** With the advances in structure-from-motion and multi-view stereo, state-of-the-art oblique photogrammetric solutions can obtain city-scale photorealistic mesh models automatically. However, the mesh models are lack of fine geometric structure and semantic free. Aiming at solving this issue, it is proposed that a semantic enhancement method for photorealistic mesh models based on local surface parameterization. The basic idea behind the proposed method is that, through the representation of surface tree, it is converted that the seamless fusion of semantic components and photogrammetric mesh models to a replacing operation in a local area. The two 3D models are parametrized to 2D space in the local region and seamless merged and replaced in the UV space by 2D constrained delaunay triangulation (CDT). The replaced semantic components are then reversed transform to 3D space, which finalize the semantic enhancement automatically. Experiments on oblique images in Shenzhen reveal that the proposed method can effectively realize the automatic seamless fusion of semantic components with an open boundary and photorealistic mesh models. Compared with the commercial software Maya, based on the method of insertion and fusion, the proposed method has practical value for improving modeling efficiency.

**Key words:** 3D surface structure tree; local parameterization; triangulation model; semantic enhancement; oblique photogrammetry

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China (Nos. 41631174; 61602392; 41871291); The Science and Technology Planning Project of Guangdong Province of China (No. 2017B010117006)

**摘 要:** 倾斜摄影测量方法已可自动获取城市规模的实景三角网模型,然而散乱的三角网缺乏精细的几何结构和功能语义信息。为克服上述问题,提出一种局部表面参数化的实景三角网模型语义增强方法:将具有语义信息的独立三维部件与实景三角网模型的无缝融合问题,通过定义三维表面结构树,转换为局部区域的三角网替换操作;在待融合区域附近,将原实景三角网模型和替换的三维语义部件,通过局部参数化表达,UV展开为二维平面三角网;在二维平面上构建约束 Delaunay 三角网(CDT),实现两模型的无缝拼接,逆映射至三维空间并自动重建语义部件。通过深圳某区域的倾斜影像进行的试验证明,本文方法能有效实现具有开放边界和语义信息的部件模型与表面模型的无缝融合。与商业软件 Maya 对比,这种基于插入、融合的手段对提高建模效率具有实用价值。

**关键词:** 三维表面结构树;局部表面参数化;三角网模型;语义增强;倾斜摄影测量

中图分类号:P237

文献标识码:A

文章编号:1001-1595(2020)02-0225-10

基金项目:国家自然科学基金(41631174;61602392;41871291);广东省科技计划(2017B010117006)

城市精细三维模型已成为智慧城市建设、城市安全保障和 VR/AR 等智能应用的关键基础信息。倾斜摄影测量因其大范围、高精度、高清晰的复杂场景感知能力已成为城市精细化三维建模的首要手段<sup>[1-2]</sup>。现有的倾斜摄影测量技术,已可从航空五镜头倾斜影像中,通过运动恢复结构(structure from motion, SFM)与多视密集匹配(multi-view stereo, MVS)自动生成实景三角网模型,然而散乱的三角网模型缺乏精细的几何结构和功能语义信息<sup>[3]</sup>。

作为城市骨架内容的建筑物模型,国际开放地理信息委员会(Open Geospatial Consortium, OGC)制定了 CityGML 标准,其多细节层次建筑物(LOD)不仅具有完善的拓扑结构,更重要的是具有丰富的语义信息<sup>[4]</sup>。然而已有 LOD 模型建模通常依赖大量人工交互,效率低、精度差,难以满足大规模三维城市重建需求。因此,直接对自动获取的实景三角网模型插入独立的三维几何群组,并通过自动或交互编辑方式,赋予独立的几何组件以属性信息,如窗户、阳台等,丰富实景三角网模型的语义信息,具有广泛的实用价值。

上述独立群组的创建,依赖于插入部件与实景三角网模型的无缝融合,并根据插入部件自动赋予相关属性。然而三维三角网与二维平面三角网或2.5维的不规则三角网(triangulated irregular network, TIN)存在本质差异,其几何拼接无法用 Delaunay 三角网实现。该问题在计算几何领域仍是一开放问题,未得到有效解决<sup>[5]</sup>。针对上述问题,本文将插入的语义部件与实景三角网的几何、语义融合,通过三维结构树的表达,转换为局部模型的替换操作,利用局部表面参数化(local parametrization)转换为二维三角网的拼接,通过构建约束 Delaunay 三角网(constrained Delaunay triangulation, CDT)实现二维三角网拼接与替换,再逆映射回三维空间,实现自动无缝融合,增强精细度并丰富语义信息。

## 1 文献综述

随着近年来 SFM<sup>[6]</sup>与 MVS<sup>[7]</sup>的快速发展,倾斜摄影测量已可几乎全自动、快速、高效地构建城市级别的实景三角网模型<sup>[8]</sup>。其中 SFM 方法

已逐渐发展出分组重建、提取影像骨架集和硬件加速等策略<sup>[9]</sup>,已可实现海量影像的三维重建<sup>[10]</sup>。在恢复相机参数后,需要通过 MVS 得到场景的稠密点云。目前应用最广泛的应当为半全局匹配方法(semi-global matching, SGM)<sup>[11]</sup>和基于面片的多视立体匹配算法(patch-based multiple view stereo, PMVS)<sup>[12]</sup>。因 SGM 和 PMVS 高效、快速的特点,已被广泛用于摄影测量软件中,如 SURE、PhotoScan 等采用了 SGM 策略,IPS 使用 PMVS 来生成密集点云。但是倾斜影像存在明显的几何变形和辐射质量差异,得到的点云通常较为粗糙、噪声明显、存在缺漏现象<sup>[13]</sup>,最终导致构网后仅能得到散乱、粗糙的三角网,无任何功能语义信息。

针对具有语义信息的多细节层次建筑物模型,已有建筑物重建方法可划分为数据驱动和模型驱动两类<sup>[14-16]</sup>。数据驱动方法直接从影像密集匹配得到的点云提取一系列几何基元,并恢复基元之间的拓扑关系,重建闭合几何体<sup>[17]</sup>,但是这类方法受点云噪声影响严重,难以有效保持建筑物规则特性<sup>[18]</sup>。模型驱动方法并非从点云提取几何基元,而是通过定义基元库,从参数化的基元模型中选择合适模型,利用点云数据拟合其参数,如现有商用解决方案 CityModeller、BuildingReconstruction 等,但是这种方法适用于直接构建整个建筑物,无法在已有实景三角网模型上融合独立语义部件。综上所述,目前基于倾斜影像生成具有纹理信息的三维 TIN 已实现自动化处理,然而已有解决方案均难以自动获取点云语义信息,获得的模型难以区分精细化部件,缺少语义信息。

为给三角网模型指定额外的语义信息,需要实现三维三角网拼接,改变原始模型结构。不同于二维平面三角网,三维三角网融合问题仍无法有效解决。例如,已有方法仅可通过边缘扩张实现无缝可视化,无法实现其几何拼接<sup>[19-20]</sup>。目前,仅可通过三角网表面模型进行 CDT 生成四面体模型<sup>[21]</sup>,然后再反过来提取物体的三角网表面模型<sup>[22-23]</sup>,该方法的空间复杂度为  $O(n^3)$ ,难以扩展。综上所述,本文通过局部表面参数化的方式将三维三角网转化为二维三角网,通过二维

CDT 进行自动无缝融合解决上述问题,实现实景三角网模型的语义增强。

## 2 方法

### 2.1 基本原理

本文方法假设三角网表面模型不存在自相交等非流形结构,在预处理中需自动检测非流形结构并修复。基本原理是采用三维表面结构树<sup>[24]</sup>对实景三角网模型与具有开放边界的语义部件的无缝融合进行抽象,通过选择合适的拼接区域,利用局部表面参数化方法,将该区域和语义部件的开放边界同时映射至相同的二维空间,利用 CDT 实现拼接后逆变换回三维空间自动完成语义增强。算法难点在于在保持拼接区域与语义部件边

界拓扑不变的前提下,实现两者无缝融合。为解决该问题,本文方法的整体流程如图 1 所示。首先在三维表面模型  $S$  上,依据具有开放边界  $\partial Q$  的语义部件  $Q$  的安置位置、尺度、旋转姿态,动态地确定一个待拼接的局部区域  $U$ ,此区域之外部分  $S \setminus U$  保持不变;接着将  $U$  与  $Q$  通过局部三角网  $UV$  参数化(parametrization)至二维平面<sup>[25]</sup>,将其边界  $\partial U$  与  $\partial Q$  作为 CDT 的约束条件构网;再根据三角形重心坐标公式重新计算  $\partial Q$  的三维坐标并利用网格变形方法<sup>[26]</sup>得到融合的三维模型  $V$ ,实现  $U$  与  $Q$  无缝融合。最终的三角网模型即为  $(S \setminus U) \cup V$ ,其中  $V$  中属于  $Q$  的三角形具有独立的群组语义标识。

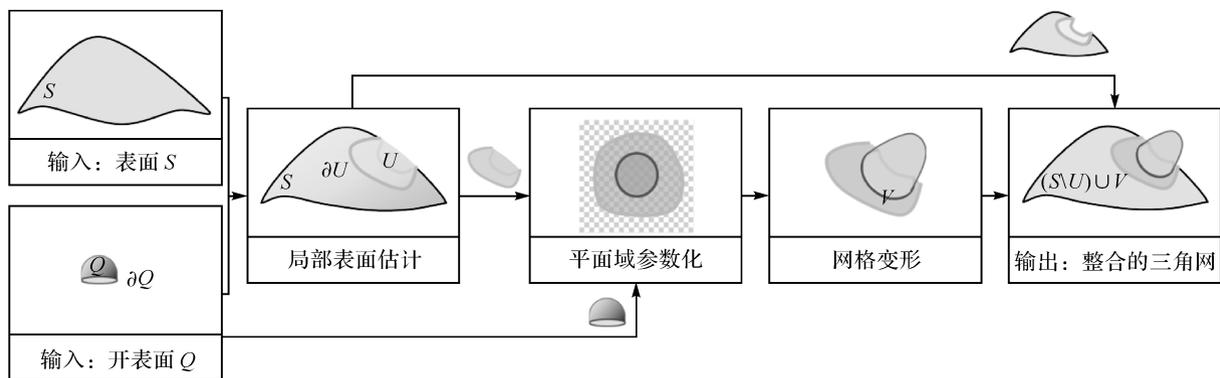


图 1 局部表面参数化的三角网模型语义增强流程

Fig.1 Principal of the semantic enhancement of photorealistic mesh model based on local parametrization

### 2.2 三维表面结构树

三维表面结构树可抽象地表达层次化三维建模过程<sup>[27]</sup>,其原理如图 2 所示。树的每个节点  $N$  表示一种表面替换操作:用一个开表面  $V$  替换表面  $S$  上的一个有界区域  $U$ ,其中边界  $\partial V$  与  $\partial U$  需保持拓扑一致,即具有相同的顶点数目和连接关系,则节点  $N$  可表达为

$$N(S, U, V) = (S \setminus U) \cup V \quad (1)$$

其中边界定义为一段或多段仅与一个三角形相邻的边,而开表面是指存在至少一条边界的表面。基于式(1),一个复杂表面可以由一个基本表面  $S_0$  通过一系列的节点运算迭代生成,即

$$\left. \begin{aligned} S_{i+1} &= N_i(S_i, U_i, V_i) \\ &\vdots \\ S_1 &= N_0(S_0, U_0, V_0) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式(2)呈现了由初始表面到最终输出表面的线性结构而不是树结构,但第  $i+1$  个步骤中的开

表面  $V_i$  可由第  $i$  个步骤获得的输出表面  $S_i$  表示,因此最终的三维表面建模过程隐式地呈现为二叉树结构。每个编辑节点  $N$  实际上仅需记录对应的模型  $U_i, V_i$ ,编辑操作由包含模型替换操作的命令堆栈维护。

由于节点被抽象为表面替换过程,因此式(1)的关键假设是  $V$  与  $U$  的边界保持一致,为保证该条件成立,一种实用的方式是定义  $V$  为对  $U$  进行保留边界操作后获得的表面,即

$$V = E(U) \quad (3)$$

本文中, $V$  本质上为语义部件与局部表面无缝融合得到的表面,而  $E$  即为三角网无缝融合过程,其在保护边界一致性的同时自动实现待融合区域  $U$  与独立部件  $Q$  的无缝拼接。通过  $E$  操作之后,区域  $U$  发生变形而边界  $\partial U$  保持不变,因此也就显式地确保  $\partial V = \partial U$  的条件成立,保证与原表面  $S$  无缝拼接。由式(3)可知,当  $U$  改变时, $V$

基于融合操作  $E$  也会自动发生变形。但是根据式(2),在三维表面结构树中,若在节点  $N_i$  中对  $U_i$  进行操作,则  $S_{i+1}$  会发生变化,此时在节点  $N_{i+1}$  中  $U_{i+1}$  应当被重新确定以便更新  $V_{i+1}$  使其适应新的表面。为此,本文采用黎曼几何中平面域参数化思想将待融合区域  $U$  的自动计算独立于原表面  $S$ (图 3):若  $S$  的参数化平面域为  $s$ ,那

么  $U$  可以表示为  $s$  上某一二维区域  $u$  的函数(图 3(a)),记作  $U=U(u)$ ;当  $S$  发生变形时,通过几何缩放和平移变换仍可将其映射至  $[0,1] \times [0,1]$  的参数空间,而  $u$  的位置与范围保持不变,因此可自动重新确定  $U$ (图 3(b))。结合式(3),式(1)可改写为

$$N(S,u,E)=(S \setminus U(u)) \cup E(U(u)) \quad (4)$$

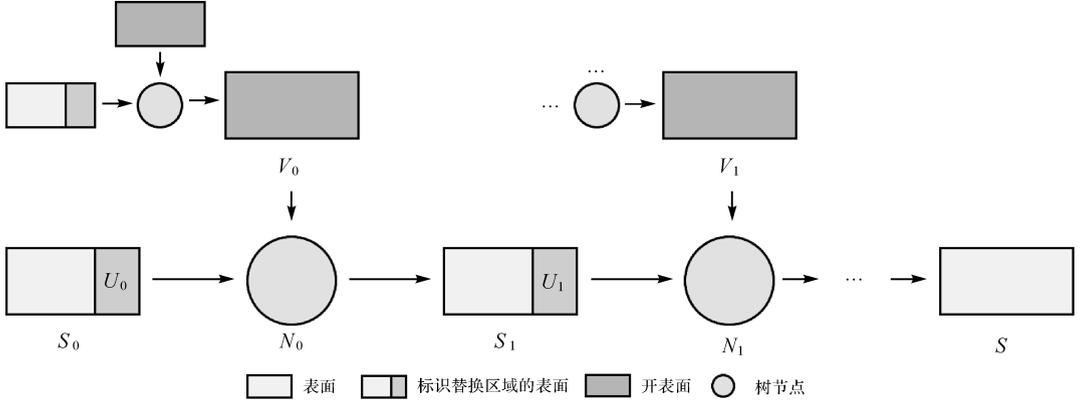


图 2 三维表面结构树  
Fig.2 3D surface tree

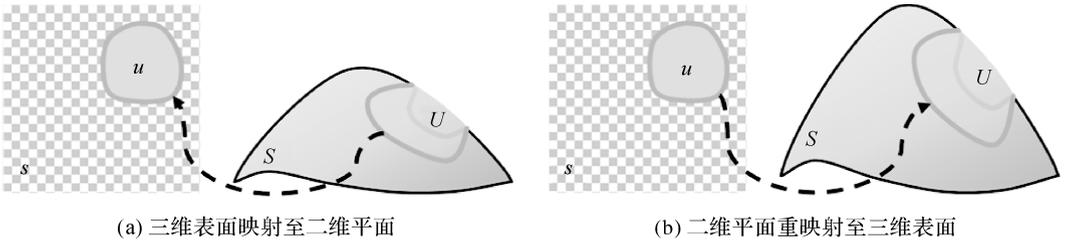


图 3 待融合区域自动计算原理

Fig.3 Automatic calculation of the area to be merged

但是,当三角网的顶点数量过多时,可能难以进行实时更新,在实际应用中应当避免全局参数化  $UV$  展开。本文在下一小节将介绍局部表面参数化的方法。基于该方法,单个无缝融合操作  $E(U(u))$  的实现流程如图 4 所示。图 4(a)为三角网局部表面  $U=U(u)$ ;图 4(b)为将其展开到二维平面后的区域  $u$ ;在二维平面上,二维三角网的 CDT 是一种非常实用的拼接操作,因其可显式地顾及边界约束条件,因此可采用 CDT 有效地获取保留  $\partial u$  和语义部件二维参数化表面边界  $\partial q$  不变的三角网模型(图 4(c)),将其逆映射回三维空间即可完成最终三维三角网无缝融合操作(图 4(d))。基于上述流程,由于待融合区域已可自动重新确定,根据模型纹理手动调整语义部件的安置位置、尺寸、旋转姿态后,整个三角网无缝

融合操作即可自动完成。

根据本文方法,通过无缝融合操作获得带部件的表面后,需用其替换原始的局部表面。为简单操作,本文将三角网看作一个由三角形构成的线性结构  $L$ ,结构中每个位置存储了三角面片的属性和唯一标识,该标识用于区分局部表面和原表面。记原表面、带部件表面的结构分别为  $L_s$  和  $L_v$ ,通过遍历  $L_s$  即可删除局部区域的三角形,然后连接  $L_v$  得到最终结果。

### 2.3 局部表面参数化

指数映射<sup>[28]</sup>是一种常用的参数化方法,其本质上是在种子点  $p$  附近的曲面上生成一个二维坐标系统,将曲面  $S$  上的点映射到  $p$  点的切平面  $T_p$  上,对任一单位向量  $v \in T_p$ ,都存在一个以弧长来参数化的大地线  $g_v$ ,使得  $g_v(0) = p$  且

$g'_v(0) = \mathbf{v}$ 。对  $p$  领域中任意一点  $q$ , 可以以极坐标  $(\rho, \varphi)$  映射到  $T_n$  上,  $\rho$  是  $p$  到  $q$  的大地线距离,  $\varphi$  是  $\mathbf{v}$  在  $T_p$  上的极角, 极坐标可以在  $T_p$  上

被任意一个正交基底表达成法坐标  $(\mathbf{u}, \mathbf{v})$ , 二维向量  $\mathbf{e} = (\mathbf{u}, \mathbf{v})$  称为大地线向量。

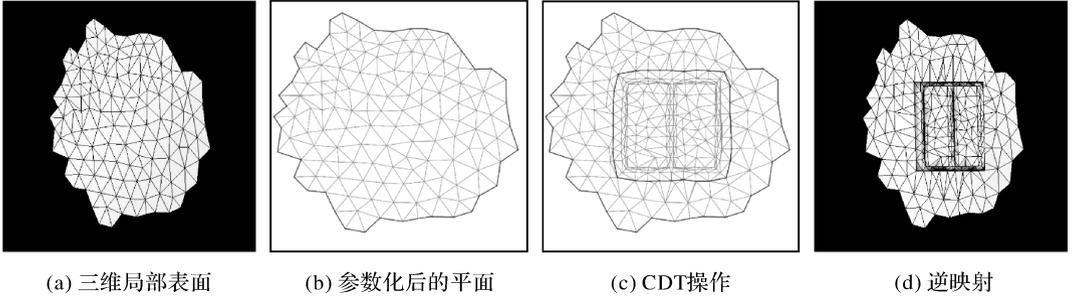


图 4 语义融合操作  $E(U(u))$

Fig.4 Semantic merging  $E(U(u))$

对于三角网曲面, 为近似得到表面  $S$  上点  $p$  处的指数映射, 若按上述原理, 需要计算曲面上其他点  $q$  相对于  $p$  的大地线长度和极角, 但是大地线的计算成本较高且极角难以确定<sup>[29]</sup>。针对该问题, 本文提出一种改进的离散指数映射 (discrete exponential maps, DEM) 方法<sup>[30]</sup>。如图 5 所示, 假设曲面上 3 点  $(p, r, q)$  (图 5(a)),  $(p, r)$  的大地线向量  $\mathbf{u}_{p,r}$  和  $(r, q)$  的大地线向量  $\mathbf{u}_{r,q}$  已知, 目标是求取  $\mathbf{u}_{p,q}$ , 即  $q$  在  $T_p$  上的法坐标。在线性系统中,  $\mathbf{u}_{p,q} = \mathbf{u}_{p,r} + (\mathbf{u}_{p,q} - \mathbf{u}_{p,r})$ , 求解  $\mathbf{u}_{p,q} - \mathbf{u}_{p,r}$  即是, 将用  $T_r$  的三维基底  $(x_r, y_r, z_r)$  表示的  $\mathbf{u}_{r,q}$ , 转换到  $T_p$  的三维基底  $(x_p, y_p, z_p)$ 。设  $p, r$  的法向量分别为  $\mathbf{n}_p$  和  $\mathbf{n}_r$ , 将  $T_r$  沿着  $\mathbf{n}_r$  和  $\mathbf{n}_p$  的叉积方向旋转两法向量的夹角使得  $T_r$  与  $T_p$  共面,  $T_r$  基底变成  $(x'_r, y'_r, n_p)$ , 再将  $T_r$  沿着  $\mathbf{n}_p$  方向旋转角度  $\cos^{-1}(x'_r \cdot x_p)$  使得  $T_r$  和  $T_p$  具有相同三维基底 (图 5(b) 和图 5(c)), 因此,  $\mathbf{u}_{p,q}$  可近似表示为

$$\mathbf{u}_{p,q} \approx \hat{\mathbf{u}}_{p,q} = \mathbf{u}_{p,r} + \text{Rot2D}(\theta_{p,r})\mathbf{u}_{r,q} \quad (5)$$

式中,  $\text{Rot2D}(\theta_{p,r})$  表示二维旋转变换。三角网上任意顶点与其所有 1-ring 邻域顶点之间的大地线长度即为连接两点的边的长度, 因此, 表面上所有顶点与 1-ring 邻域顶点的大地线向量可以轻易计算得到。利用 Dijkstra 算法可以求得  $p$  到三角网上任意顶点  $q$  的最短路径  $\{p_0, p_1, \dots, p_n\}$ , 之后沿着该路径不断地将每个切平面上的大地线向量转换到  $T_p$  基底上即可求得  $q$  点的大地线向量。但是, 若按照唯一路径 (图 5(d)) 得到后续点的法坐标会存在误差积累的问题:  $q_i$  的大地线向量由  $q_{i-1}$  唯一确定, 在  $q_{i-1}$  处产生的误差就会

累加到  $q_i$  及经过  $q_i$  的后续扩张点, 这将导致曲率突变表面的参数化结果发生畸变。因此本文引入路径加权的步骤, 即后续扩张点的最终位置由其上层邻域点加权决定。在图 5(e) 中,  $q_i$  的上层邻域点为大地线向量已知的三点  $r_1, r_2, r_3, r_4, r_5, r_6$  虽也是  $q_i$  的邻域点, 但其路径在  $q_i$  之后, 对  $q_i$  不产生影响, 故不是其上层邻域点。相较于唯一路径方法 (结果见图 6(a)), 这样做分担了误差, 避免因某一过大误差对后续点产生压倒性影响 (改进后的结果见图 6(b)), 故式 (5) 被重新定义为

$$\mathbf{u}_{p,q} \approx \sum_i \omega(q, r_i) (\mathbf{u}_{p,r_i} + \text{Rot2D}(\theta_{p,r_i})\mathbf{u}_{r_i,q}) \quad (6)$$

式中,  $r_i$  为  $q$  的上层邻域点;  $\omega$  为反距离权重, 即

$$\omega(q, r_i) = \frac{(q - r_i^2)^{-1}}{\sum_i (q - r_i^2)^{-1}} \quad (7)$$

由上述原理可知, 离散指数映射不直接计算各顶点与种子点的大地线和极角, 而是先由 Dijkstra 算法产生分段线性大地线向量, 再通过向量叠加得到法坐标。因此, 式 (6) 中  $\mathbf{u}_{p,q}$  与实际的大地线向量存在偏差, 且该偏差会随着距离增加而增大, 故离散指数映射适合对局部表面进行参数化。在三角网表面上给定种子点  $p$  和半径  $R$  即可唯一确定一个局部表面 (图 6(c))。  $p$  作为离散指数映射逐层向外扩张的起点, 该点的切平面与参数化平面共面; 半径  $R$  是种子点到局部表面内最远点的大地线距离, 决定了区域的范围也是算法的停止条件。在调整语义部件位置、角度、尺寸时, 局部表面应自适应确定。为此, 首先

根据部件的局部坐标系(图 6(d)),利用碰撞检测获得  $Z$  轴负方向与原表面交点作为  $p$  点;然后计算部件边界的最小外包盒对角线长度,记作  $L$ ,则  $R = \sigma L$ ,其中  $\sigma$  用于确保参数化后部件边界完全位于局部表面内部。为参数化语义部件,利用  $Z$  轴正方向与部件表面相交即确定种子点,半径设

置为无穷大,离散指数映射将自动以部件边界为算法停止条件。计算得到局部表面及部件所有顶点的法坐标后,通过几何缩放和平移变换即可将法坐标映射至  $[0,1] \times [0,1]$  的参数空间,最终结果如图 6(d)所示,左侧为局部表面参数化结果,右侧为独立部件参数化结果。

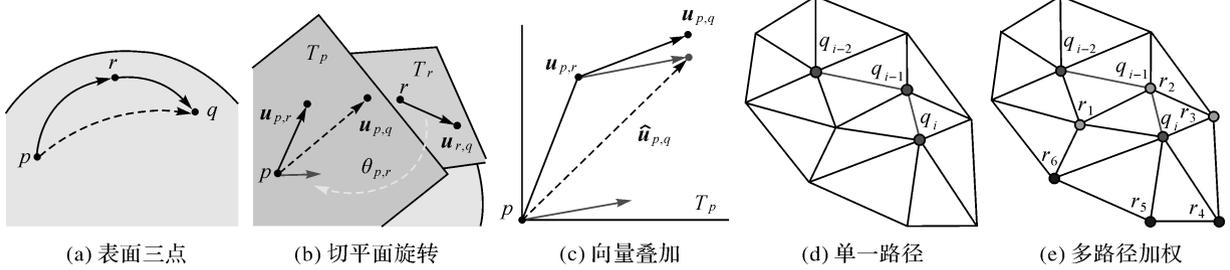


图 5 路径加权的离散指数映射原理

Fig.5 Path-weighted discrete exponential map

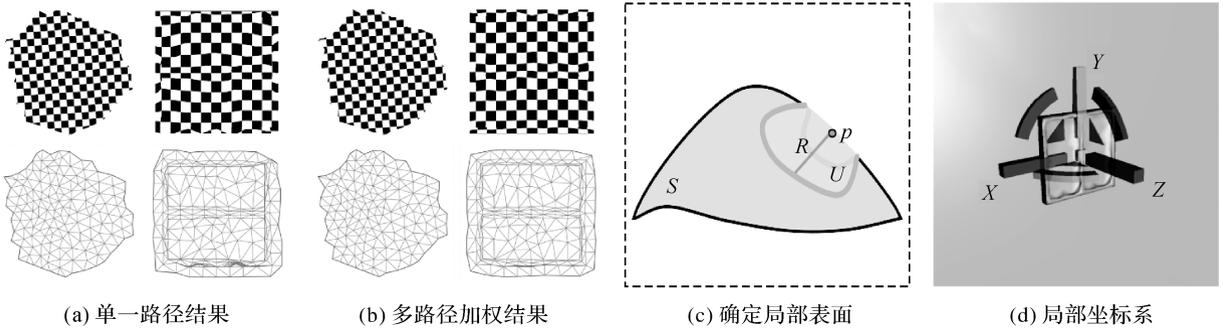


图 6 局部表面参数化

Fig.6 Local surface parameterization

参数  $UV$  展开是为了将独立部件的开放边界嵌入至三维三角网中,而通过离散指数映射,局部表面被映射为二维三角网,独立部件参数化并进行法坐标归一化后,其边界顶点一般都位于二维三角形的内部(包括三角形边)。因此,为了将网格重构后的二维三角网重新映射至三维空间,需要计算边界点的三维坐标。该过程可用三角形重心坐标求解:设开放边界参数化后的二维顶点  $M$  位于平面三角形  $\triangle ABC$  内,该三角形 3 个顶点的三维坐标分别为  $a$ 、 $b$ 、 $c$ ,则  $M$  的三维坐标为

$$M = ua + vb + wc \quad (8)$$

式中,  $u = S_{\triangle MBC} / S_{\triangle ABC}$ ;  $v = S_{\triangle MAC} / S_{\triangle ABC}$ ;  $w = S_{\triangle PAB} / S_{\triangle ABC}$ 。根据式(8)即可计算得到独立部件边界的三维空间位置,逆映射后该边界便嵌入至原始表面中,利用该三维边界,通过网格变形方

法可自动无缝还原三维空间的语义部件。

### 3 试验分析

#### 3.1 试验数据

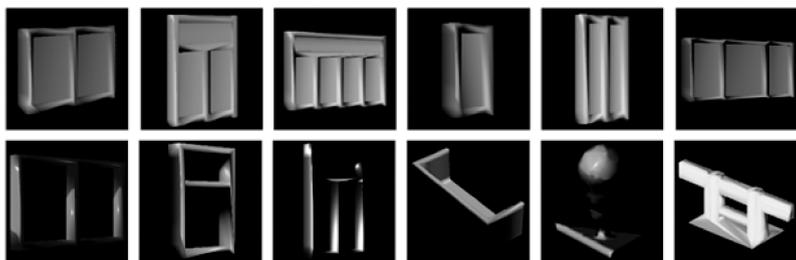
为验证本文方法的有效性,采用深圳某一区域倾斜影像数据进行测试,如图 7 所示。图 7(a)为从影像上截取的 4 处具有重复结构(窗户、阳台等)的建筑物场景。对这些影像进行运动恢复结构得到相机姿态参数及稀疏点云后,再进行多视影像联合匹配生成密集点云,接着利用构网算法得到三角网模型,然后进行纹理映射获得实景模型,图 7(b)为试验区域一处实景建筑物模型。根据纹理信息,本文利用 SketchUp 软件设计了多种具有开放边界和语义信息的精细部件并存储至模型库中,如图 7(c)所示。



(a) 具有重复结构的建筑物场景



(b) 实景模型



(c) 精细部件

图 7 试验数据

Fig.7 Experimental data

### 3.2 试验结果与分析

图 8 为建筑物与窗户部件融合的试验结果。图 8(a)为原始实景建筑物立面,均带有数量较多且结构单一的窗户纹理,若采用传统的人工建模手段,过程较为烦琐;图 8(b)为利用本文方法无缝融合窗户部件并重新进行纹理映射的结果;图 8(c)对比了融合窗户部件前后拼接区域的三角网结构,通过倾斜摄影流水线得到的三角网模型缺失窗户精细部件,仅能通过纹理获知窗户位置,而利用本文算法成功重建了窗户部件;试验用不同颜色区分具有不同语义信息的窗户部件(图 8(d))。

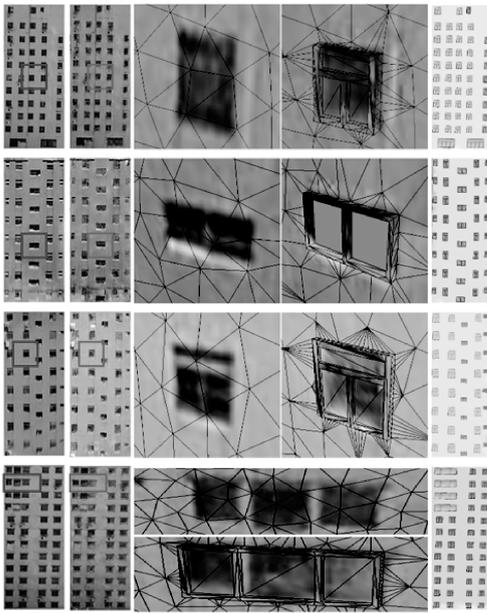
本文方法实质是将开表面的边界嵌入至原始三维模型中,然后根据嵌入边界自动重建独立部件。因此,若原表面较为平坦,则可直接嵌入部件;当原表面起伏较大,嵌入的边界也会发生较大变形,此时需要预先对原表面进行“踏平”处理。图 9 为建筑物与阳台部件无缝融合的试验结果。图 9(a)为原始的带有阳台的建筑物模型;图 9(b)为利用本文方法无缝融合阳台部件并重新进行纹理映射的试验结果;图 9(c)对比了融合阳台前后拼接区域的三角网结构,原始三角网精细化部件难以区分、几何结构粗糙,预先对墙面进行整平处理后利用本文方法能得到较好效果;图 9(d)为融合了窗户、阳台部件的模型,并用不同颜色区分不同语义信息。

为验证方法的实用性,通过 Maya 软件和结合 SketchUp 的本文方法对同一立面建立多个重复的精细部件,记录操作时序、统计操作数目并进行对比,结果如图 10 所示(试验人员对两种操作方式均熟练,操作过程无明显失误)。图 10(a)记录了利用两种方式建模时的所有操作(鼠标按下、鼠标释放、鼠标移动、滚轮操作)及各操作消耗的时间:利用 SketchUp 软件结合本文方法完成试验的总耗时约为 2 min,而利用 Maya 软件完成相同试验需耗时约 6 min,值得指出的是该时间包含 SketchUp 对窗户进行建模的时间,若已有部件模型效率仍有提升空间。图 10(b)统计了两种建模方式的操作数:利用 SketchUp 软件结合本文方法的操作数仅 300 余次,而利用 Maya 完成试验的操作数超过 2000 次。两种方式的建模结果如图 10(c)所示,本文方法获取的结果各窗户之间结构性更佳,且其三角网拓扑结构规则性更直观。

为进一步验证本文方法的实用性,本文进行对某一城市道路进行语义增强试验,如图 11 所示。图 11(a)为从正视影像中截取的一处城市道路场景,场景包含护栏和树木;图 11(b)为由影像生成的该场景原始的实景模型;图 11(c)为利用本文方法融合护栏、树木等语义部件的实景模型;图 11(d)为根据语义信息以不同颜色渲染的场景;图 11(e)和图 11(f)为图 11(b)和图 11(c)中

两处局部场景,分别对比了融合护栏、树木前后三角网的结构,可见,精细部件与原始表面无缝融

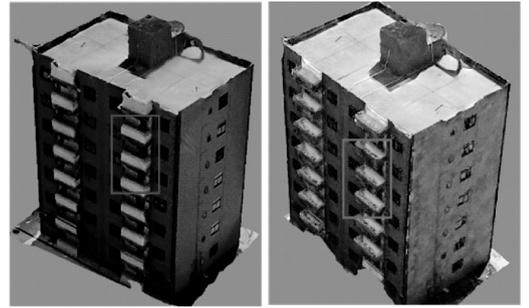
合。实际上,本文方法对具有典型结构特性的目标均适用。



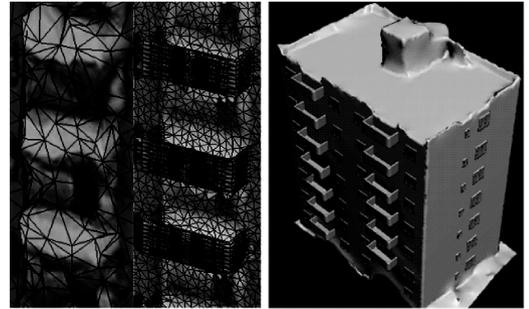
(a) 原始立面 (b) 融合立面 (c) 局部三角网 (d) 语义渲染

图8 融合窗户试验结果

Fig.8 Results of merging windows



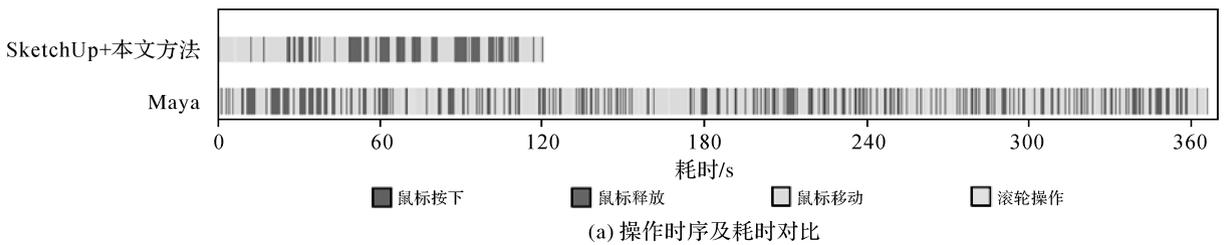
(a) 原始建筑物 (b) 融合建筑物



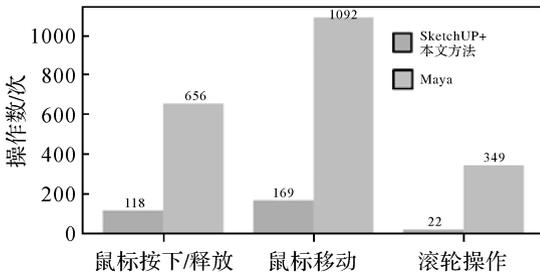
(c) 局部三角网 (d) 语义渲染

图9 融合阳台试验结果

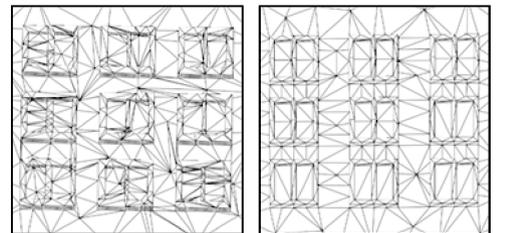
Fig.9 Results of merging balconies



(a) 操作时序及耗时对比



(b) 操作数对比



(c) 结果对比

图10 对比试验结果

Fig.10 Results of contrast experiment

### 4 结论

针对倾斜影像实景三角网模型精细度不够、缺少功能语义信息等问题,本文提出了一种局部表面参数化的实景三角网模型语义增强方法,为

解决计算几何中三维三角网无法直接融合难题,本文引入了表面结构树的概念,通过局部表面参数化的方式,将三维三角网表面模型的几何拼接、语义融合,转化为二维三角网的拼接,并通过成熟的 CDT 方法实现几何无缝融合。试验证

明,对复杂城市场景,本文方法能有效通过精细的几何构建,提高三角网模型质量并丰富其语义信息。由于其几何拼接在UV参数化空间进行,因此可同时直接利用原始实景三角网模型的纹理信息。不过,本文方法也存在一定局限性,即要保证待融合区域和插入的语义部件均存在一个开放边

界,而实景三角网模型由于MVS算法能力限制,可能产生几何、拓扑错误,后续研究将探索针对倾斜摄影测量三角网模型的实用优化处理方法,同时将本文方法拟集成于本团队自主研发的倾斜摄影测量精细建模软件OSketch<sup>[31]</sup>中。

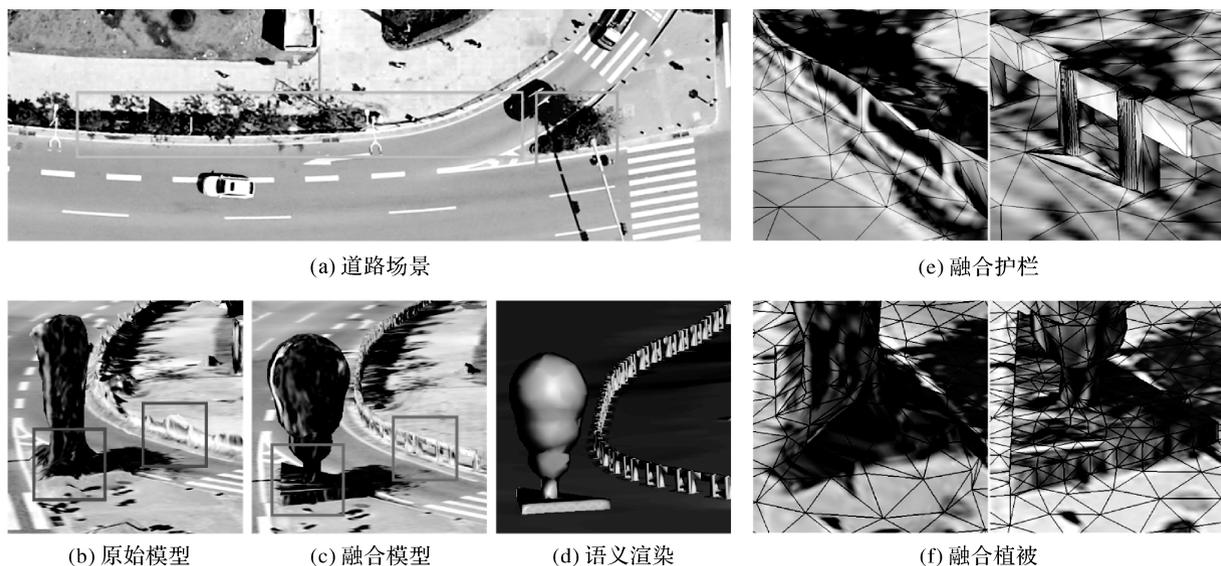


图 11 城市道路试验结果

Fig.11 Result of urban road scene

## 参考文献:

[1] NEX F, GERKE M, REMONDINO F, et al. ISPRS benchmark for multi-platform photogrammetry[C]// Proceedings of ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Munich, Germany: [s.n.], 2015: 135-142.

[2] BARROW C. Oblique imagery: the standard for mapping [EB/OL]. (2014-04-23). <https://www.gim-international.com/content/article/oblique-imagery-the-standard-for-mapping>.

[3] BILJECKI F, STOTER J, LEDOUX H, et al. Applications of 3D city models: state of the art review[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2015, 4(4): 2842-2889.

[4] KOLBE T H, GRÖGER G, PLÜMER L. CityGML: Interoperable access to 3D city models[M]// VAN OOSTEROM P, ZLATANOVA S, FENDEL E M. Geo-information for Disaster Management. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005: 883-899.

[5] FUHRMANN S, GOESELE M. Fusion of depth maps with multiple scales[J]. ACM Transactions on Graphics, 2011, 30(6): 148.

[6] 肖雄武, 郭丙轩, 李德仁, 等. 一种具有仿射不变性的倾斜影像快速匹配方法[J]. 测绘学报, 2015, 44(4): 414-421. DOI: 10.11947/j.AGCS.2015.20140048.

XIAO Xiongwu, GUO Bingxuan, LI Deren, et al. A quick and affine invariance matching method for oblique images [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44(4): 414-421. DOI: 10.11947/j.AGCS.2015.20140048.

[7] YANG Qingxiang. Stereo matching using tree filtering[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2015, 37(4): 834-846.

[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. DOI: 10.11947/j.AGCS.2015.20140341.

ZHANG Chunsen, ZHANG Weilong, GUO Bingxuan, et al. Rapidly 3D texture reconstruction based on oblique photography[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44(7): 782-790. DOI: 10.11947/j.AGCS.2015.20140341.

[9] 李劲澎. 基于全局式运动恢复结构的无人机影像位姿估计关键技术研究[D]. 郑州: 信息工程大学, 2017.

LI Jinpeng. Key technology of position and orientation estimation for UAV images based on global structure from motion [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2017.

[10] HEINLY J, SCHÖNBERGER J L, DUNN E, et al. Reconstructing the world\* in six days[C]// Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Boston, MA: IEEE, 2015: 3287-3295.

[11] HIRSCHMULLER H. Stereo processing by semiglobal matc-

- hing and mutual information[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2008, 30(2): 328-341.
- [12] FURUKAWA Y, PONCE J. Accurate, dense, and robust multiview stereopsis [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2010, 32(8): 1362-1376.
- [13] SCHÖNBERGER J L, FRAHM J M. Structure-from-motion revisited[C] // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Las Vegas, NV: IEEE, 2016: 4104-4113.
- [14] BERGER M, TAGLIASACCHI A, SEVERSKY L, et al. State of the art in surface reconstruction from point clouds [C]//Proceedings of Eurographics 2014 - State of the Art Reports. Strasbourg, France: [s.n.], 2014: 161-185.
- [15] HAALA N, KADA M. An update on automatic 3D building reconstruction[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2010, 65(6): 570-580.
- [16] MUSIALSKI P, WONKA P, ALIAGA D G, et al. A survey of urban reconstruction[J]. Computer Graphics Forum, 2013, 32(6): 146-177.
- [17] VERDIE Y, LAFARGE F, ALLIEZ P. LOD generation for urban scenes[J]. ACM Transactions on Graphics, 2015, 34(3): 30.
- [18] MONSZPART A, MELLADO N, BROSTOW G J, et al. RAPter: rebuilding man-made scenes with regular arrangements of planes[J]. ACM Transactions on Graphics, 2015, 34(4): 103.
- [19] CHAUVE A L, LABATUT P, PONS J P. Robust piecewise-planar 3D reconstruction and completion from large-scale unstructured point data[C] // Proceedings of 2010 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. San Francisco, CA: IEEE, 2010: 1261-1268.
- [20] VU H H, LABATUT P, PONS J P, et al. High accuracy and visibility-consistent dense multiview stereo[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2012, 34(5): 889-901.
- [21] BERGER M, TAGLIASACCHI A, SEVERSKY L, et al. State of the art in surface reconstruction from point clouds [C]//Proceedings of Eurographics 2014 - State of the Art Reports. Strasbourg, France: [s.n.], 2014: 161-185.
- [22] LAFARGE F, ALLIEZ P. Surface reconstruction through point set structuring [J]. Computer Graphics Forum, 2013, 32(2): 225-234.
- [23] ORTHUBER E, AVBELJ J. 3D building reconstruction from LiDAR point clouds by adaptive dual contouring[C]// Proceedings of ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Munich, Germany: [s.n.], 2015: 157-164.
- [24] SCHMIDT R, SINGH K. Sketch-based procedural surface modeling and compositing using surface trees [J]. Computer Graphics Forum, 2008, 27(2): 321-330.
- [25] LÉVY B, PETITJEAN S, RAY N, et al. Least squares conformal maps for automatic texture atlas generation[J]. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(3): 362-371.
- [26] JACOBSON A, BARAN I, KAVAN L, et al. Fast automatic skinning transformations [J]. ACM Transactions on Graphics, 2012, 31(4): 77.
- [27] WYVILL B, GUY A, GALIN E. Extending the CSG tree. warping, blending and boolean operations in an implicit surface modeling system[J]. Computer Graphics Forum, 1999, 18(2): 149-158.
- [28] DO CARMO M P. Differential geometry of curves and surfaces: revised and updated[M]. 2nd ed. Mineola, New York: Dover Publications, 2016.
- [29] CRANE K, WEISCHEDEL C, WARDETZKY M. The heat method for distance computation[J]. Communications of the ACM, 2017, 60(11): 90-99.
- [30] SCHMIDT R, GRIMM C, WYVILL B. Interactive decal compositing with discrete exponential maps [J]. ACM Transactions on Graphics, 2006, 25(3): 605-613.
- [31] 胡翰. Oblique Sketch: 倾斜摄影测量交互式建模软件 [EB/OL]. (2016-10-29). <http://www.vrlab.org.cn/>.  
HU Han. Oblique Sketch: an interactive modeling software of oblique photogrammetry[EB/OL]. (2016-10-29). <http://www.vrlab.org.cn/>.

(责任编辑:丛树平)

收稿日期: 2018-12-21

修回日期: 2019-06-10

第一作者简介: 汪利斌(1995—),男,博士生,研究方向为倾斜摄影测量。

First author: WANG Libin(1995—), male, PhD candidate, majors in oblique photogrammetry.

E-mail: 2325748989@qq.com

通信作者: 胡翰

Corresponding author: HU Han

E-mail: huhan19880715@163.com