

局部区域表面一致性约束的三维模型 纹理映射方法

李媛¹ 胡翰¹ 谢金华² 朱庆^{1,3} 张叶廷¹
杜志强¹ 彭明军⁴ 高山⁴

1 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,湖北 武汉,430079

2 国家测绘地理信息局卫星测绘应用中心,北京,101300

3 西南交通大学地球科学与环境工程学院,四川 成都,611756

4 武汉市国土资源和规划信息中心,湖北 武汉,430014

摘要:倾斜摄影测量进行三维模型重建时,由于影像匹配精度和密集点云简化等因素,使得三角形网格模型表面的法向量存在许多明显噪声,加上镜头畸变和光照条件不同引起的影像间几何与辐射的不一致,最终导致不同三角形之间纹理映射结果不连续,这种碎片状纹理表面的真实感不强,难以直观理解。针对此,提出了一种局部区域表面一致性约束的纹理映射方法,采用区域生长策略将多个三角形合并为一个较大的平面区域,并且在区域生长过程中顾及了区域的连续性和平面性,建立该平面区域与同一影像之间的映射关系。实验证明了该方法能够有效消除纹理映射碎片化的现象。

关键词:倾斜摄影测量;三角形网格模型;区域生长;纹理映射

中图法分类号:P208; P231 **文献标志码:**A

倾斜摄影测量技术已广泛应用于逼真地形景观建模等领域,其基本特点是从多角度影像自动获取密集点云数据,通过简化处理生成不规则三角网格表面模型(triangulated irregular network, TIN),并自动映射纹理^[1,2]。实际上,受多视影像联合平差精度和密集匹配生成的点云精度的限制,以及点云简化的不足,会导致生成的三角形网格模型表面粗糙,连续区域表面法向量存在噪声,从而造成不一致性。这种不一致性导致对应于同一地物表面的三角面片被投影到不同影像上;同时,由于相机畸变、光照、地物反射特性等原因,不同影像间存在几何和辐射上的差异,最终纹理映射后的结果呈碎片化状态,三维场景真实感不强、不直观。当前主流的倾斜影像处理软件如 Street Factory 等也都存在类似的问题。

纹理映射碎片化问题的解决方法主要有渐入渐出法^[3]、光照连续性重建^[4,5]法以及应用较广泛的多波段融合法^[6-9]等。这些方法都是从影像出发,通过匀光或色彩融合等处理,使其在灰度上趋

于一致,虽然在一定程度上可以使碎片之间的纹理过渡更加平滑,但计算量大,算法要求高,容易出现模糊和重影现象,并且依然难以消除碎片化的影响。

纹理映射碎片化的根本原因是模型表面上相邻的三角面片由于几何不一致被投影到不同影像上。现有方法只是在影像层面对纹理进行修复,并没有从根本上解决模型表面的几何不一致性问题。针对此,本文提出一种局部区域表面一致性约束的纹理映射方法,采用一致性约束的区域生长方法和分块区域整体的纹理优选方法,解决上述纹理碎片化的问题。

1 算法基本原理

局部区域表面一致性约束的纹理映射方法流程如图 1 所示。记三角形网格模型为 $M^{[9]}$, 构成 M 的带有法向量的三角形记作有向三角面片 t , 则 M 的连续表面 $S = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$, $S \in R^3$ 。首

先,在表面一致性约束的前提下,以有向三角面片 t 为基元,采用表面一致性约束的区域生长算法将 S 分割为多个分块连续的区域 $R_1, R_2, \dots, R_n, R_i \subset S (1 \leq i \leq n)$,且分割结果应在最大程度上满足人们对建筑物几何表面划分的认知,即连续、光滑建筑物有且仅有一个表面与之对应。为了保证局部区域内纹理映射的连续性,需要根据区域整体的纹理优选方法,从覆盖区域 R_i 的多张不同角度的影像中,选择一张最佳影像为 R_i 提供纹理。最后根据投影矩阵计算 R_i 上的点在影像上的投影,得到纹理,完成纹理映射。

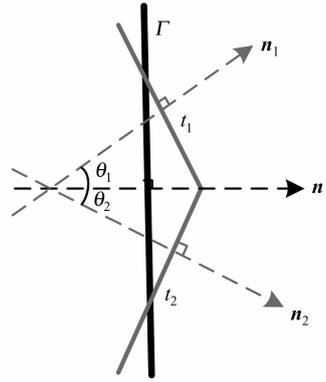


图2 法向量噪声示意图

Fig. 2 Noises on the Normal of Surfaces

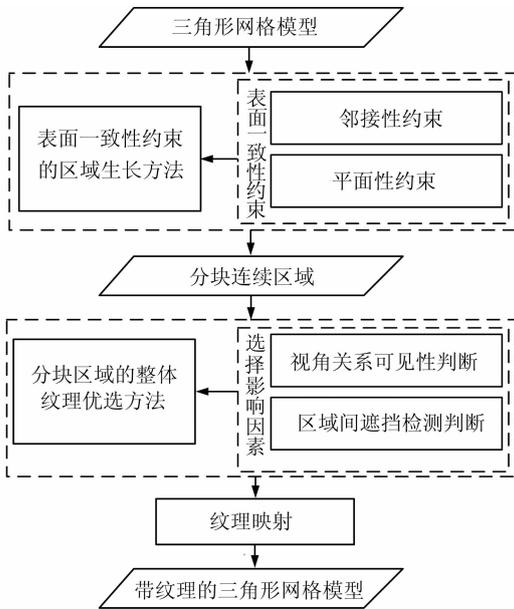


图1 算法流程图

Fig. 1 Flowchart of the Algorithm

1.1 表面一致性约束的区域生长方法

纹理映射的碎片化是由于三角形网格模型 M 表面的几何不一致性引起的。产生不一致性的原因是影像平差精度和密集匹配的点云精度的限制以及构网过程中的简化算法不够完善,导致连续区域表面的法向量存在异常噪声。如图2所示, Γ 为建筑物真实的表面, n 为其法向量, t_1, t_2 为 M 表面两个相邻的三角面片, n_1, n_2 为其法向量。

单独来看, t_1, t_2 与 Γ 之间的夹角 θ_1, θ_2 均在噪声容忍范围内,但 t_1 与 t_2 之间的夹角 $\theta = \theta_1 + \theta_2$ 却超过了噪声容忍范围,形成噪声。表面一致性约束不是剔除噪声点,而是通过约束,使噪声点可以与邻近点形成一个具有一致性的区域,即该区域是连续的,并且区域上任何一点在同一张影像上具有相同的可见性。因此,表面一致性约束包括邻接性约束和平面性约束两方面。

1.1.1 邻接性约束

邻接性约束,即三角面片在空间上是相邻的,能保证区域的连续性。邻接性约束可通过采用树状的索引结构(KD-Tree、R-Tree^[10-12]等),进行半径搜索或 K 邻近搜索来实现。但是由于三角形网格模型密度的不均匀性,进行半径搜索时难以设置合适的阈值以保证每次搜索的有效性,故本文中采用 K 邻近搜索方法。

K 邻近搜索方法实现区域生长的关键是 K 的取值。平坦的模型表面 K 一般取较大值,可以加速计算;而对于房屋角点、植被等复杂表面,由于存在多个平面, K 一般由大到小渐进取值,这样既能保证分割出每一个平面,又能保证计算效率。本文中,首先令 K 取一个较大的值($K=20$)进行搜索,判断搜索到的点是否满足平面性约束,若不满足则说明是复杂表面,此时令 K 值减半继续搜索,以此类推。这样既可以保证计算速度,又可以保证区域生长结果在多个平面交界处的准确性。

1.1.2 平面性约束

实际中,许多建筑物的表面由连续曲面构成,但是曲面上的不同点在同一张影像上不具备相同的可见性(不考虑其他面的遮挡)。如图3(a)所示, Γ 为建筑物真实的表面, I_1, I_2, I_3 是不同角度的拍摄的影像, $p_0 \sim p_4$ 为 Γ 上的点, $p_0 \sim p_2$ 为 I_1 的可视范围, $p_1 \sim p_3$ 为 I_2 的可视范围, $p_2 \sim p_4$ 为 I_3 的可视范围,可见 Γ 上的点不可能全部投影到同一张影像上,因此需要对其进行平面性约束,用多个平面逼近曲面,如图3(b)所示。

设有向点集 $P (P \in R^3)$, P 的平面度可以通过其协方差矩阵的主成分分析来判断^[13],对协方差矩阵进行奇异值分解(singular value decomposition, SVD)后得到特征值 $\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3, \eta_1, \eta_2, \eta_3$ 为对应的特征向量,如图4所示。特征值及其对

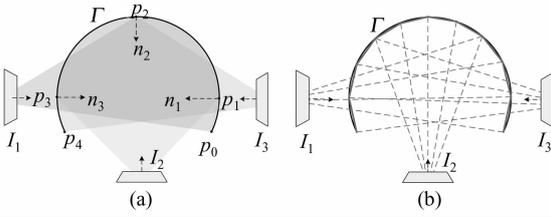


图 3 平面约束示意图

Fig. 3 Planarity Constraint

应的特征向量代表了 P 在三维空间中的分布情况, σ_1 越小 P 越接近平面, 极限情况为 $\sigma_1 = 0$ 。因此, 平面性约束可记为:

$$\begin{cases} \sigma_2/\sigma_1 > \xi_1 \\ \sigma_3/\sigma_2 < \xi_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\sigma_2/\sigma_1 > \xi_1$ 可保证点集 P 近似为平面, 而 $\sigma_3/\sigma_2 < \xi_2$ 则能避免产生过于狭长的条带。本文中采用这种方法作为平面性约束, 令 $\xi_1 = 45, \xi_2 = 15$, 既有效约束了平面的形状, 也较好地包容了噪声点。

若 P 满足上述约束, 则可拟合出平面并记 n_0 为拟合平面的法向量, 近似于图 2 中建筑物表面 Γ 的实际法向量 n , x 为平面上的点。设 P 中一点 p_i 的法向量 n_i 与 n_0 之间的夹角记为 $\theta(n_i, n_0)$, 需满足:

$$\theta(n_i, n_0) < \xi_0 \quad (2)$$

由前面对法向量噪声的分析可知, 式(2)避免了法向量噪声对平面的影响。式(1)和式(2)共同构成平面性约束, 在区域生长时可将连续的曲面及平滑的过渡地带分割为多个平面逼近。

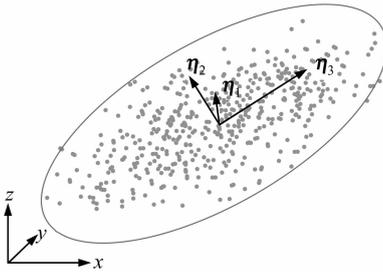


图 4 SVD 分解的几何示意图

Fig. 4 Geometric Schematic View of SVD

1.1.3 顾及约束的区域生长方法

区域生长以有向三角面片 t 为基元, 采用迭代的策略由种子点向外生长。为了方便计算, 将 t 的几何重心点及其法向量构成有向点 p , 则全部有向三角面片 t 的集合 S 即对应于有向点集 P 。区域生长需要解决的三个关键问题为种子点的选取, 包含进区域的准则以及生长停止的条件。

以 P 为数据源创建 Kd-Tree, 记生长出的区域为 R , 其边界为 B , 符号 $\oplus(p)$ 表示添加点 p , $\ominus(p)$ 表示从集合中删除点 p , 并且添加一个点后都需要将它从 KD-Tree 中删除, 以避免重复计算。首先, 从 P 中任选一点 p_0 作为种子点, $R \oplus(p_0)$, $B \oplus(p_0)$, 标记 p_0 为起始点; 以 B 中第 j 个标记为起始点的点 p_{B_j} 为中心进行 $K = 20$ 的邻近搜索, 若搜索到的点 $\{p_{new}\}$ 与 R 一起满足平面性约束式(1)、式(2), 则 $R \oplus\{p_{new}\}$, $B \oplus\{p_{new}\}$, 标记 $\{p_{new}\}$ 为起始点, 并且 $B \ominus(p_{B_j})$; 若不满足平面性约束式(1)、式(2), 则 K 值减半进行搜索, 若直到 $K = 1$ 时 $\{p_{new}\}$ 与 R 一起仍不满足约束条件, 则标记 p_{B_j} 为终止点; 然后重新令 $K = 20$, 搜索 B 中第 $j + 1$ 个标记为起始点的点; 逐此迭代, 直到 B 中所有点均标记为终止点, 或 K 邻近搜到的结果为空为止, 则停止生长。最后得到的 R 即为所求的连续区域, 它拟合的平面的法向量可视为 R 的法向量 n_R , n_R 是后面选择投影影像时的关键因素。若 KD-Tree 不为空, 则以剩下的点中任意一点为某个区域生长结束后的种子点, 进入下一个区域的生长。

1.2 分块连续区域的整体纹理优选方法

倾斜摄影测量具有多角度、多时相的特点, 因此区域 R 会被多张影像 I_1, I_2, \dots, I_m 同时覆盖。 R 与影像间的方位关系不同, 在影像上产生投影畸变的程度也不同; 同时由于区域间的遮挡关系, R 在不同影像上的可见情况不同。因此, 需要选择一张最佳的影像来为 R 提供整体的纹理。

1.2.1 视角关系判断及区域间遮挡检测

倾斜摄影测量中不同角度影像在空间中的方位是固定的, 以 5 头相机为例, 影像范围覆盖同一区域的相机 A, B, C, D, E 分布如图 5(a) 所示。定义 ρ 为区域与影像之间的视角关系权重, 它与两个角度有关: ① 区域 R 的法向量 n_R 与每张影像投影反方向 n_i 之间所成的夹角, 记为 α ; ② 以 R 的中心为起点, 连接影像中心, 得到向量 l , 记 l 与 n_R 之间的夹角为 β , 如图 5(b) 所示, A_1, A_2, A_3 为不同时刻相似 A 在空中的位置。 β 越小, 则 R 在影像上的投影越靠近影像中心。

则 ρ 的确定方式如下:

$$\rho = \frac{90^\circ - \alpha}{90^\circ} \times \frac{90^\circ - \beta}{90^\circ} \quad (3)$$

当 ρ 大于 0 时, 区域 R 在影像上可见(不考虑遮挡和超出影像范围)。为了保证投影的质量, 令:

$$\rho = \frac{75^\circ - \alpha}{90^\circ} \times \frac{75^\circ - \beta}{90^\circ} \quad (4)$$

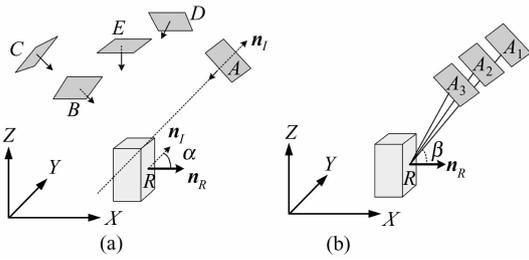


图5 最佳投影影像

Fig. 5 Selection of the Optimal Image

以区域 R 为整体进行遮挡检测,若 R 中总三角面片个数为 s ,被遮挡和超出影像范围的个数为 k ,记 η 为 R 在影像上的遮挡比率:

$$\eta = \frac{k}{s} \tag{5}$$

1.2.2 最佳影像优选方法

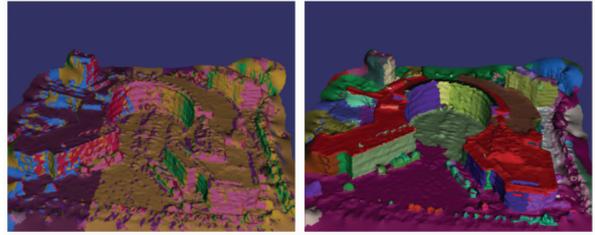
区域 R 整体的纹理优选方法需同时考虑视角关系 ρ 和遮挡比率 η 。首先找出所有 ρ 大于 0 对应的影像,并从中选取 η_{\min} 所对应的影像作为 R 的最佳投影影像 I_{best} 。若 η_{\min} 大于 0,则说明 R 在 I_{best} 上不完全可见,此时需要将不可见的部分分割出来作为一个单独的区域 R' ,再以同样的方法为 R' 选择最佳投影影像。最后,从每一块区域对应的最佳投影影像中提取纹理,进行纹理映射。

2 实验分析

为了验证上述方法的有效性,本文采用 SWDC-5 的倾斜摄影影像数据来进行实验。整个测区共被 15 张影像所覆盖,相机 A、B、C、D、E 分别各有 3 张影像,影像覆盖区域内包括道路、建筑物(弧形/非弧形)、操场、植被等多种地物。对这些影像进行多视影像联合匹配后生成点云,再利用构网算法得到三角形网格模型,作为纹理映射的模型基础。

对比实验将三角形格网模型 M 中的有向三角面片 t 逐个按照 § 1.2 中的方法选择最佳投影影像,然后再将投影到同一张影像上的相邻三角面片连接为一个区域 R 。这种逐个三角形纹理映射的方法与本文方法之间的区别在于是否进行了一致性约束的区域生长。图 6(a)为逐个三角形纹理映射的结果;图 6(b)为本文方法进行一致性约束的区域生长后的分割结果。将三角形个数小于一定阈值的区域视为碎片,可看出图 6(a)中碎片化现象严重,而图 6(b)中区域连续一致,地面和立面、立面和屋顶被很好地分割开,并且弧形的建筑物表面被分割为 6 个连续的近似平面,以保

证能够正确地选择投影影像。实验中对一个具有 60 000 个三角面片的三角形网格模型分别在两种方法下形成的连续区域 R 进行统计分析,其结果见表 1。可看出,本文方法可将碎片化程度减小到逐个三角形纹理映射方法的 5%,而这些碎片主要分布在植被不规则的表面、建筑物内凹形成的坑洞表面以及细小地物的表面等处。



(a) 噪声导致的碎片化影响 (b) 一致性约束的区域生长结果

图6 区域生长前后结果

Fig. 6 Comparison of Results with and Without Region Growing

表1 区域生长前后碎片化程度对比

Tab. 1 Comparison of Fragmentation Degrees of the One-by-one Approach and Our Approach

方法	总连通区域个数	三角形个数 < 10 的连通区域个数	三角形个数 < 5 的连通区域个数	三角形个数 = 1 的连通区域个数	平均包含的三角形个数
逐个三角形映射方法	11 755	10 766	9 640	5 748	5.1
一致性约束的区域生长方法	909	541	457	216	66.0

图 7 为纹理映射后的对比结果。图 7(a)为 Street Factory 建模并进行纹理映射的结果。从图 7(a)可看出,虽然 Street Factory 对纹理进行了匀光处理,但仍存在纹理碎片化的现象;图 7(b)、7(c)分别为同一个三角形网格模型在逐个三角面片纹理映射和一致性约束纹理映射的结果,显然逐个三角面片的纹理映射结果受噪声影响较大,尤其是在水面和植被处的纹理碎片化现象严重;而一致性约束纹理映射结果则有显著改善。

3 结 语

本文提出了一种针对三角形网格模型的局部区域表面一致性约束的纹理映射方法,并使用真实数据与 Street Factory 等商业软件进行了对比实验。表面一致性约束可大大减小三角形网格模型表面噪声(尤其是法向量噪声)的影响,顾及这种约束的区域生长方法能够将三角形网格模型良

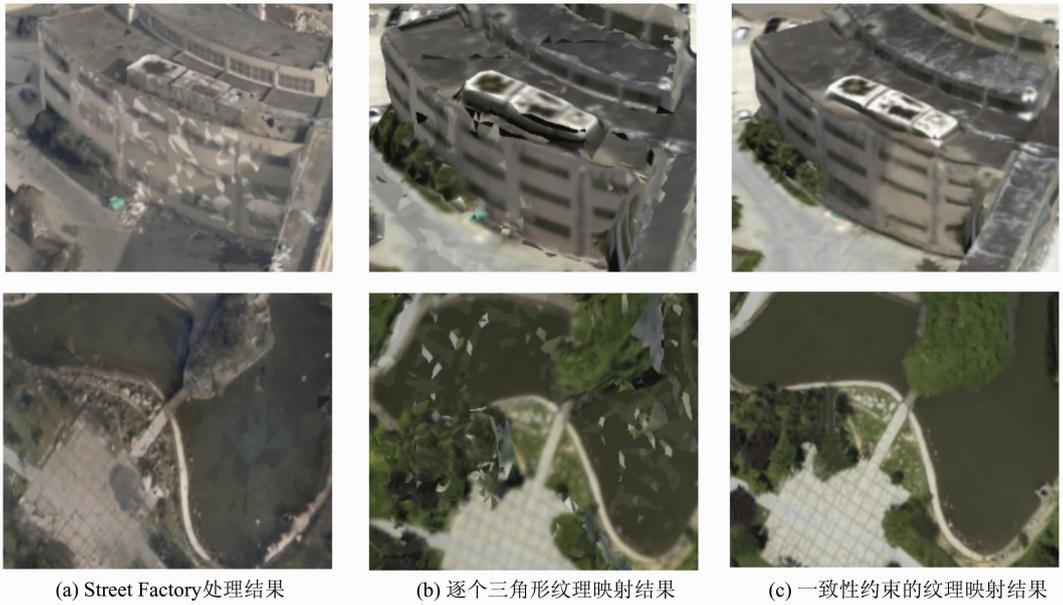


图 7 纹理映射对比结果

Fig. 7 Comparison of Texture Mapping Results

好地分割为多个连续的区域,最终为每一个区域选择最优的投影影像提供纹理。这种化零为整的思想对消除纹理碎片化现象具有显著效果。进一步的研究将针对更加复杂的建筑物场景的真实感表达进行,以期消除不同建筑物间的纹理接缝,增强场景的真实感。

参 考 文 献

- [1] Zhu Qing, Xu Guanyu, Du Zhiqiang, et al. Review of Oblique Photogrammetric Technology[OL]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201205-355>,2012(朱庆,徐冠宇,杜志强,等. 倾斜摄影测量技术综述[OL]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201205-355>,2012)
- [2] Wang Wei, Huang Wenwen, Zhen Jiao. Pictometry Oblique Photography Technique and Its Application in 3D City Modeling[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2011, 34(3): 181-183(王伟,黄雯雯,镇皎. Pictometry 倾斜摄影技术及其在 3 维城市建模中的应用[J]. 测绘与空间地理信息, 2011, 34(3): 181-183)
- [3] Szeliski R. Video Mosaic for Virtual Environments [J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 1996, 16(2): 22-30
- [4] Li Zhiqiang, Zhang Zuxun, Zhang Jianqing. Effective Method on Realistic Texture Rendition in Three Dimension Reconstruction[J]. *Geospatial Information*, 2004, 2(6): 34-36(李治江,张祖勋,张剑清. 三维重建中真实纹理再现的一种有效方法[J]. 地理空间信息, 2004, 2(6): 34-36)
- [5] Guo Ling, Wang Jianyu, Huang Yanyan. On Texture Mapping for Realistic 3D Reconstruction[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2007, 12(10): 1 881-1 884(郭玲,王建宇,黄炎焱. 真实感 3D 重建中的纹理映射技术[J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(10): 1 881-1 884)
- [6] Allène C, Pons J P, Keriven R. Seamless Image-Based Texture Atlases Using Multi-band Blending [C]. 19th International Conference on Pattern Recognition, Tampa, Florida, USA, 2008
- [7] Brown M, Lowe D G. Automatic Panoramic Image Stitching Using Invariant Features[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2007, 74(1): 59-73
- [8] Zheng Shunyi, Zhou Yang. High Quality Texture Reconstruction for Small Objects Based on Structure Light Scanning System with Digital Camera [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(5): 529-534(郑顺义,周漾. 结构光系统结合数码相机的小物体高质量纹理重建[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(5): 529-534)
- [9] Zhou Yang, Zheng Shunyi, Huang Rongyong, et al. Face-wise Poisson Blending with Color Transfer in Seamless Texturing [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2014, 19(4): 512-519(周漾,郑顺义,黄荣永,等. 面泊松融合结合色彩变换的无缝纹理辐射处理[J]. 中国图象图形学报, 2014, 19(4): 512-519)
- [10] Gong Jun, Zhu Qing, Zhang Yeting, et al. An Efficient 3D R-tree Extension Method Concerned with Levels of Detail [J]. *Acta Geodaetica et Carto-*

graphica Sinica, 2011, 40(2):249-255(龚俊, 朱庆, 张叶廷, 等. 顾及多细节层次的三维R树索引扩展方法[J]. 测绘学报, 2011, 40(2):249-255)

[11] Yen S H, Hsieh Y J. A KD-Tree-Based Nearest Neighbor Search for Large Quantities of Data[J]. *Transactions on Internet and Information Systems*, 2013, 7(3):459-470

[12] Yuan Zhengwu, Wang Yuanhui. Research on K Nearest Neighbor Non-parametric Regression Algo-

rithm Based on KD-Tree and Clustering Analysis [C]. 2012 Fourth International Conference on Computational and Information Sciences, Chongqing, China, 2012

[13] Matei B C, Sawhney H S. Building Segmentation for Densely Built Urban Regions Using Aerial LiDAR Data[C]. 2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Anchorage, Alaska, USA, 2008

An Automatic Texture Mapping Method Using Local Surface Consistency Constraint

LI Yuan¹ HU Han¹ XIE Jinhua² ZHU Qing^{1,3} ZHANG Yeting¹ DU Zhiqiang¹
PENG Mingjun⁴ GAO Shan⁴

1 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Satellite Surveying and Mapping Application Center, NASG, Beijing 101300, China

3 Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China

4 Wuhan Land Resources and Planning Information Center, Wuhan 430014, China

Abstract: Due to the limitations of the accuracies in dense image matching and the factors of simplification during the three dimensional mesh generation, enormous noises normally occur on the triangular mesh surfaces during object reconstruction procedures. Furthermore, the geometrical and radiant differences between images, together with the noises, cause the textured mesh fragmentation. Aiming to solve this problem, this paper proposes a texture mapping method using a local surface consistency constraint. In this mapping procedure, fragmented triangles are merged into a relative larger surface with region growing, considering continuity and planarity. The regions are treated as a rigid surface and mapped to the same image to relieve the fragmented effect in the textured mesh. Experimental results show that the proposed method is effective and the output has better consistency than industry standard software such as street factory.

Key words: oblique photogrammetry; triangle-mesh model; region-growing; texture mapping

First author: LI Yuan, postgraduate, specializes in the theories and methods of 3D reconstruction. E-mail: giser_liyuan@whu.edu.cn

Corresponding author: HU Han, PhD candidate. E-mail: huhan19880715@163.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 41171311; the National Science and Technology Support Program, No. 2012BAH35B02; Sichuan Science and Technology Support Program, No. 2014SZ0106.