

文章编号:1002-2082(2020)01-0127-07

基于质心 Voronoi 图重构的 UDSM 边折叠简化

刘盛恩, 陈向宁, 王得成

(中国人民解放军航天工程大学, 北京 101416)

摘要: 城市数字表面模型网格(UDSM)的相邻网格常常出现曲率剧变, 而这些位置是 UDSM 的细节部分, 简化过程中应当尽量保持。针对该情况, 引入了质心 Voronoi 图重划分网格, 将曲率较小的表面的点云密度大大降低。重划分的网格表面细节与周围的平滑表面的三角网格尺寸悬殊, 在该基础上使用二次误差矩阵边折叠进行 LOD 构建时网格发生明显变化, 范围大大减少。算法在时间性能与网格误差与直接边折叠相近的前提下, 更多地保存简化后的网格细节。

关键词: 网格简化; 城市数字表面模型; 质心 Voronoi 图; 网格重划分; 边折叠

中图分类号: TN911.73; TP391

文献标志码: A

DOI: [10.5768/JAO202041.0102010](https://doi.org/10.5768/JAO202041.0102010)

Edge collapse of UDSM based on centroidal Voronoi diagram reconstruction

LIU Sheng'en, CHEN Xiangning, WANG Decheng

(PLA Space Engineering University, Beijing 101416, China)

Abstract: The adjacent meshes of the urban digital surface model (UDSM) are often subject to curvature upheavals, and these locations are details of the UDSM that should be preserved as much as possible during simplification. In order to solve this problem, the centroidal Voronoi diagram was introduced to repartition the mesh, and the point cloud density of the surface with small curvature could be greatly reduced. The size of the redrawn mesh surface was greatly different from that of the surrounding smooth triangular mesh. On this basis, the quadric error matrix edge collapse was used for levels of details (LOD) construction, and the area of obvious changes in the mesh could be greatly reduced. On the premise that the time performance and mesh error are similar to that of the direct edge simplification, the algorithm can save more simplified mesh details.

Key words: mesh simplification; UDSM; centroidal Voronoi diagram; remesh; edge collapse

引言

网格简化主要分为 3 类: 第一种直接从原网格提取矢量数据进行顶点聚类如文献 [1], 这种方法不增加新的矢量数据, 聚类方法的效果很难达到要求^[2]; 第二种采样以减少矢量数据, 这种方法在消除被采样的矢量数据同时也少量添加以提高简化效果, 边折叠和面聚合都属于这一类; 第三种就是基于矢量数据本身进行分析, 重新布点构网。

五视图航拍城市三维重建是机器视觉的重要应用之一。其中通过存储不同简化率的网格来构建层次细节 (level of details, LOD) 是实现动态流畅的三维漫游的基本方法。理想的三维网格浏览网

格应该保持不变, 但对大范围网格如 UDSM, 无简化漫游 GPU 会严重过载, 所以简化虽然会对三维重建结果分析精度有一定的影响, 但在这时必须对网格简化以构建 LOD^[3]。因此视点变化时网格出现明显变化的范围越小, 漫游时视觉效果越好。UDSM 结构复杂, 存在大量理论上的平整且纹理相似的表面如墙面、屋顶、道路, 像素分辨度低。一方面完全平整的表面几何上要求苛刻, 另外一方面上述位置常常像素分辨度低, 如文献 [4], 在光滑的桌子、白色的书页里都没有选取特征点, 这些位置匹配精度过低, 而城市里的平整表面就符合上述特点。

收稿日期: 2018-12-18; 修回日期: 2019-04-10

基金项目: 国家 863 计划 (2015AA7031093C)

作者简介: 刘盛恩 (1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事 UDSM 大型可视化数据的处理与应用。E-mail: enloveaihong@qq.com

基于 Voronoi 图的简化耗时较长^[5]。但如果将基于 Voronoi 图重构(处理后顶点数量基本保持不变)为基础进行简化,则研究时不将初始化重构的时间作为简化时间考虑^[6],而且 UDSM 表面重建的巨型工程中,就包含对点云进行处理和构网的过程^[7]。重建的点云直接进行 Delaunay 三角化是原网格,包含完整的三维重建信息。本文将对网格进行重构代替直接的 Delaunay 三角化,再进行边折叠简化。

但许多简化算法如文献 [6][8][9] 与原网格的误差较大,这些研究回避了与 QSLIM^[10]在误差和时间方面的比较,初步比较发现这些文献的经典模型简化后的误差和简化时间都明显大于 QSLIM 简化误差。但是纯粹比较与原网格误差有很大的局限性,实际上上述文献细节的保持要好于 QSLIM。细节的保持已经成为网格简化最新成果的基本立足点。

细节的保持主要在于模型的轮廓^[8]、建筑架构的保持^[11]以及网格表面曲率变化较大位置的保持。本文首先将 UDSM 瓦片利用质心 Voronoi 图规则进行重构,再利用 QSLIM 简化。保持较高时间效率的同时,提升细节的保持度,减少简化过程中发生明显变化表面的比例。

1 质心 Voronoi 图

质心 Voronoi 图 (centroid voronoi diagram, CVD) 的规则是网格重划分的规则,三角网属于离散的数据模型,从连续的定义扩展到离散的定义,以使其可以对网格进行重构或者简化。

1.1 连续质心 Voronoi 图

全集 Ω 是由 n 个不同区域 ($z_i : i=0,1,\dots,n-1$) 组成的 a 维区域(本文的 $a=3$, 暨三维), Voronoi 图 (VD) 按照下式规则将 Ω 分为 n 个不同的单元格 C_i :

$$C_i = \{\omega \in \Omega \mid d(\omega, z_i) < d(\omega, z_j) \\ j = 1, 2, \dots, n, j \neq i\} \quad (1)$$

连续情形 Voronoi 单元格的位置就是其质心坐标 $Z_i^{[12]}$:

$$Z_i = \int_{C_i} x \rho(x) dx / \int_{C_i} \rho(x) dx \quad (2)$$

式中 $\rho(x)$ 是密度函数。构建质心 Voronoi 图 (CVD) 要使其能量值 E 达到最低:

$$E = \sum_{i=1}^n \int_{I_j} \int_{C_i} \rho(x) \|x - z_i\| dx \quad (3)$$

1.2 离散质心 Voronoi 图

参照^[5]对离散 CVD 的定义, Ω 不再是一个连

续的空间而是一个三角网 M 。构建 CVD 有 2 种方法:以三角面片或者顶点作为聚合单元。考虑到顶点数量大致只有面片数量的一半。由于顶点密集处出现拓扑的分界可能性大, UDSM 的建筑边界等位置都有很多分界,并且这些边界还有可能包含非流形,以顶点为单元进行聚类更加适合上述情况。

离散 CVD 的能量值定义如下:

$$E = \sum_i \left(\sum_{I_j \in C_i} \int_{I_j} \rho(x) \|x - z_i\|^2 dx \right) \quad (4)$$

这时每个单元 C_j 的中心为 z_i ,但并不一定是 C_j 的质心,每个单元 I_j 的能量可以化简为:

$$\int_{I_j} \rho(x) \|x - z_i\|^2 dx = M_j \|z_i - \gamma_j\|^2 + A_j \quad (5)$$

其中:

$$A_j = \int_{I_j} \rho(x) \|x - \gamma_j\|^2 dx \quad (6)$$

$$M_j = \int_{I_j} \rho(x) dx \quad (7)$$

$$\gamma_j = \frac{1}{M_j} \int_{I_j} \rho(x) x dx \quad (8)$$

A_j 的值由 I_j 的几何特性与密度函数 $\rho(x)$ 决定,在这个密度下 I_j 的权就是 M_j ,而 γ_j 则是 I_j 的质心。由公式 (5) 则得总能量:

$$E = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{I_j \in C_i} M_j \|z_i - \gamma_j\|^2 \right) + \sum_j A_j \quad (9)$$

可继续分解为:

$$E = \sum_j A_j + \sum_j M_j \|\gamma_j\|^2 + F \quad (10)$$

其中:

$$F = \sum_i \left(\|z_i\|^2 \sum_{I_j \in C_i} M_j - 2z_i^T \sum_{I_j \in C_i} M_j \gamma_j \right) \quad (11)$$

在公式 (10) 中,只有 F 随着 C_i 聚类方式的变化而发生变化。在 (10) 式中,无论 Voronoi 图怎么设置,参数 A_j 和 $M_j \|\gamma_j\|^2$ 都不会变。所以问题转化为求 F_{\min} 。另一方面,由于 Voronoi 图是离散的,故将 M_j 视为聚类单元的密度 ρ_j 。这里还需要强调的是,基于三维模型的特点,所有公式中的距离都是测地距离,暨必须按照拓扑规则沿着顶点或者单元格的中心进行测距,而非简单的二维直线距离。

所有公式中的 j 可以指代第 j 个聚类的三角面片或者聚类的顶点。对三维网格进行 Voronoi 构图时,距离 $\|x - z_i\|$ 是测地距离,而一个面片内密度恒定,其距离测定用其几何中心来代替^[5],这种方法

会造成拓扑特征的破坏。图 1 中 V_1 和 V_2 是 2 个顶点, 边 V_1V_2 是包含重要拓扑特征的三角边。当聚类顶点时 V_1 和 V_2 就是测距节点, 当聚类面片时, F_1 和 F_2 是测距节点。图 1 标注出两种情况从 A 到 B 的测地距离, 很明显看出聚类顶点时, 测地距离为 $2\sqrt{5}$, 聚类面片时测地距离为 $2+\sqrt{2}$ (假设边长为 2, 单位密度), 密度不均匀时这个距离差依然不会变, 距离差越大, 对应位置布点越密集。所以选择后者进行聚类。

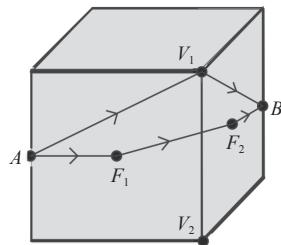


图 1 图解 2 种聚类方式的测地距离

Fig. 1 Illustration of geodesic distance of two clustering methods

2 算法的执行

定义离散 CVD 后, 需要解决几个问题: 一是初始化 Voronoi 图密度; 二是如何初始化 Voronoi 图中心; 三是初始化后如何进行聚类。

本文算法的 Voronoi 单元格数量与模型顶点数量一致, 进行重构。再使用 QSlim 算法进行简化, 减少了 UDSM 简化后的失真。

2.1 初始话 Voronoi 图密度

初始化需要确定每个 Voronoi 单元格中心的分布, 若采用文献 [5] 的随机布点方法, 则中心点将均匀分布到网格的周围, 也就使得每个单元格的面积大小相似, 无法突出细节, 难以自适应 UDSM 拥有多层次复杂度的网格。

首先计算每个单元格应该分配到的质量:

$$D_{\text{avg}} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \rho_j \quad (12)$$

式中: n 为单元格的数量; ρ_j 为每个顶点的密度。遍历每个顶点, 遍历至顶点密度之和不小于 D_{avg} 时, 该遍历周期的顶点构成一个初始单元格, 并开始下一个遍历周期, 已经被遍历的顶点被称为非自由点, 重复这个过程, 直到所有的顶点遍历完成为止。当所有顶点都变成非自由点时, 离散数学的特征决定了单元格的数量必然没能达到 n 个, 并用 2.2 章节的方法继续构造单元格。这种

方法相对于劳埃德松弛法^[13], 可实现高效率的构建^[14]。

为了使简化能调整局部单元格的数量, 以自适应地突出细节和简化平整区域 ρ_j 必然不是统一的值。利用多项式拟合^[15]得到顶点的主曲率 k_a 和 k_b , 并且 ρ_j 需要同时考虑顶点的密集度, 设 f_g 为顶点 P_j 周围的所有三角网格:

$$\begin{aligned} \rho_j &= |P_j| \left(\sqrt{k_{j,1}^2 + k_{j,2}^2} \right)^{\lambda} \\ |P_j| &= \frac{1}{3} \sum_{g=0}^{\eta_{e_i}-1} \text{area}(f_g) \end{aligned} \quad (13)$$

式中 λ 是曲率指标, 决定着网格曲率 ρ_j 和顶点密集度的敏感度。这个参数的设置于 2.3 节重点研究。

2.2 初始化 Voronoi 图中心

引入二次误差矩阵 (quadric error metrics, QEM)^[10], 建立每个初始化的区域内部顶点的 QEM, 借助 QEM 得到折叠误差, 就是折叠点与相邻面片所在平面的距离之和, 选择每个单元格中二次误差最小的三角边上的点作为中心点, 使得每个顶点周围的三角边都满足初始化所定的数量指标。确定中心点后将不再改变其位置, 聚类至增加新中心点并改变单元格的形状。这样聚类过程能保持尖锐的细节 (折叠误差大) 得到更好的保留, 降低与原网格的误差。这种后处理的方法^[16]也验证了其性能。

2.3 网格重构过程

确定了上文要素后, 按照以下步骤进行网格重构:

1) 按照三维网格文件的顶点索引顺序 (相邻的索引在模型中也是相邻的顶点) 划分中心点, 当遍历的顶点的权之和大于 D_{avg} 时分配一个中心点并进入下个周期, 直至遍历完所有的顶点为止。按照离散 CVD 的规则绘得初始 Voronoi 图。并确定每个 Voronoi 单元的中心。

2) 按照 Voronoi 图中心的定义将 QEM 得到的误差大小对每个三角边进行最佳边折叠点加入队列, 继续以 D_{avg} 作为阈值进行遴选, 折叠误差从大到小排列。并且每选取一个中心点, 该点与两侧的顶点要继续进行边折叠, 得到新的两个折叠点按照大小顺序插入到队列中, 直到中心点数量达到原网格顶点数量为止。

3) 按照离散 CVD 的规则得到最终 Voronoi 图, 按照文献 [6] 的方法进行构网。除了每个单元的中心, Voronoi 单元的一些交会点也被归为顶点重新进行 Delaunay 三角构网。所以重构 UDSM 的顶点数量略大于原网格。

4) 按照简化率要求用 QSLIM 算法进行简化。若不进行这一步骤, 直接按照简化率要求设置聚类的 Voronoi 单元数量, 在实验中称为 CVD(2)。

3 曲率指标的选择

自由点的比例受曲率指标 λ 的影响很大, 而重新分配的自由点以 QEM 计算的误差作为标准。同 QSLIM 受到后来研究者指出的缺点一样, 虽然与

原网格误差小, 但损失细节。如果自由点的比例过大, 同样的问题也会出现。

λ 如何影响自由顶点的比例, 举个简单的例子: 假设 5 个顶点的 $|P_i|$ 分别为 $(1, 2, 3, 4, 5)$, $\lambda=0$ 时这 5 个顶点按照上述规则初始可分为 5 个子集 $((1)(2)(3)(4)(5))$, 自由点比例 0; 同理当 $\lambda=1$ 时初始分为 4 个子集, 自由点比例 0.2; 当 $\lambda=2$ 时初始分为 3 个子集, 自由点比例 0.4。所以须对存在大量顶点的 UDSM 选择恰当的 λ 值, 如图 2 所示。

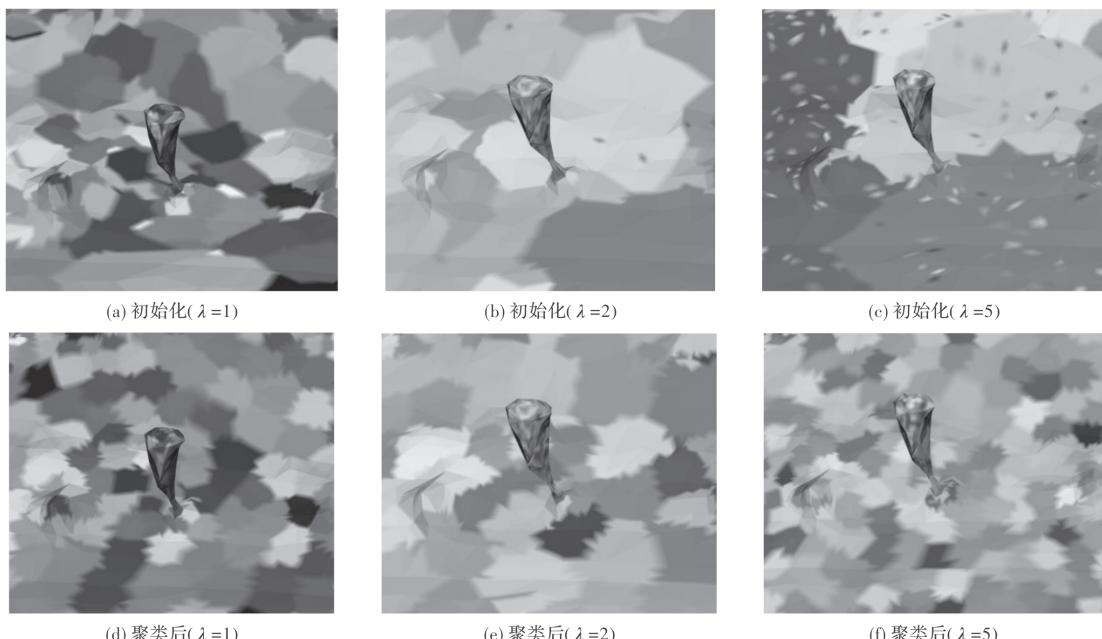


图 2 质心 Voronoi 单元格的初始化与聚类

Fig. 2 Initiation and clustering of centroidal Voronoi cells

图 2(a)(c)(e) 斑驳的点就是自由点, 随着 λ 值的增加, 自由点的比例增加, Voronoi 单元的初始化和最终聚类结果的差别就越来越大, 只有减少平整网格的面片数量真正减少才能更好地保持城市网格的构造^[17]。经过观察比较, $\lambda=2$ 时平整网格的 Voronoi 单元分布较为稀疏, 下一章实验以 $\lambda=2$ 进行实验。

4 实验与讨论

实验采用 2 个倾斜摄影三维重建构造的 UDSM。模型 1 是大雁塔和其周围一小片区域; 模型 2 是大连某商区。这 2 个模型有个共同的特点: 存在“假平面”。在简化率比较高的时候, 很多网格重构的简化方法会误把有波动但波动幅度不大的区域简化成扁平区域, 这个现象在 CVD 聚类简化中尤为严重。

但本文的方法将 CVD 聚类运用在网格预处理

这个步骤里, 较大地克服了 CVD 简化消耗时间过长的缺陷。图 3 展示了大雁塔(顶点: 81 821; 面片: 160 834)和大连某商区(顶点: 55 816; 面片: 109 936)的 UDSM, 分别用 QSLIM^[10]、ACVD^[5]、CVD(2)和直接使用本文重构算法进行简化, 利用 Metro 工具^[18]测量不同简化率简化结果的最大误差、平均误差和均方根误差(单位为误差值占对角线长度的比例):

总体上 Metro 的测量结果 QSLIM 都比较好。由图 3 可以看出, 最大误差和均方根交错位置较多, 无法准确判断出除了 QSLIM 算法的质量, QSLIM 的最大误差基本都是最低的, 这里也可以看出基于原网格的边折叠在保持网格边缘精度方面的优势。平均误差本文算法与 QSLIM 是最接近的。

而这样的“误差”并非真正的误差。一方面这是为了突出网格效果, 使得简化后细节保留效果较好必须付出的代价; 另一方面, 三维重建构造的

UDSM 细节最少的是平整表面, 为了保证其他细节的质量, 简化后的 UDSM 更应当尽可能减少平整表面的网格数量。

图 4 展示 UDSM 的原网格及其简化网格和本文方法重构和简化后的效果 (简化率为 0.9)。可以

看到, 本文方法简化后与重构网格相比 UDSM 的平整表面变化很小, 因此在 LOD 漫游过程只有细节表面网格发生明显变化。由于局部发生网格细分后再进行的简化, 误差曲线中偶尔也会出现 LOD 层误差小于高一层的 LOD 的情况 (如图 3)。

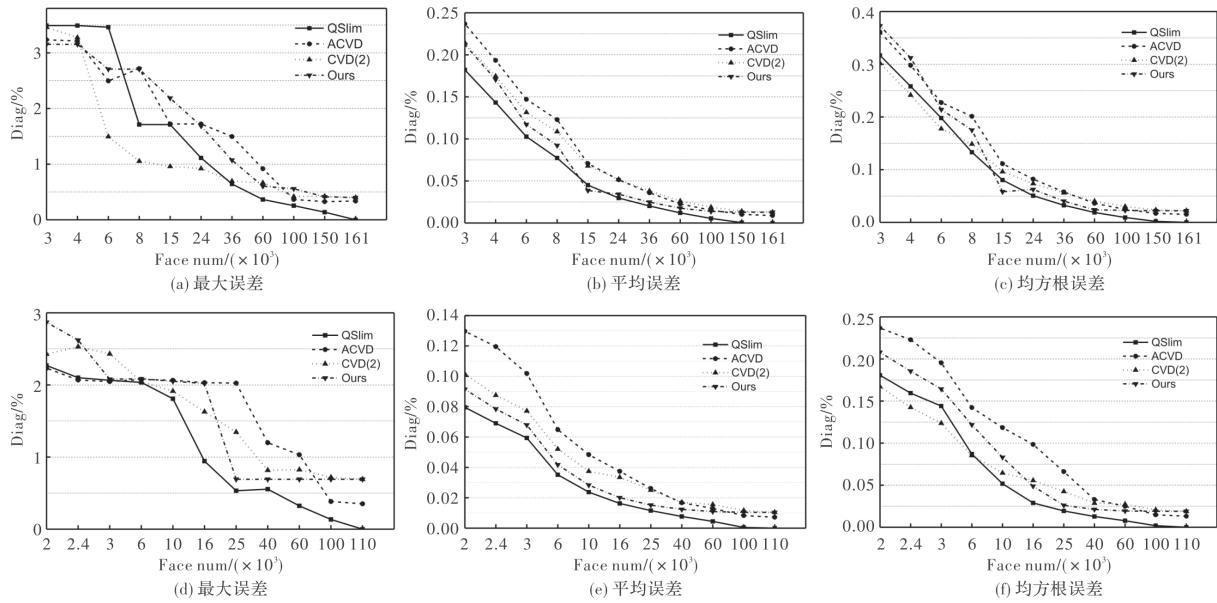


图 3 简化误差测量(上: 大雁塔; 下: 大连某商区)

Fig. 3 Measurement of simplification error (up: Wild Goose Pagoda; down: a region of Dalian)

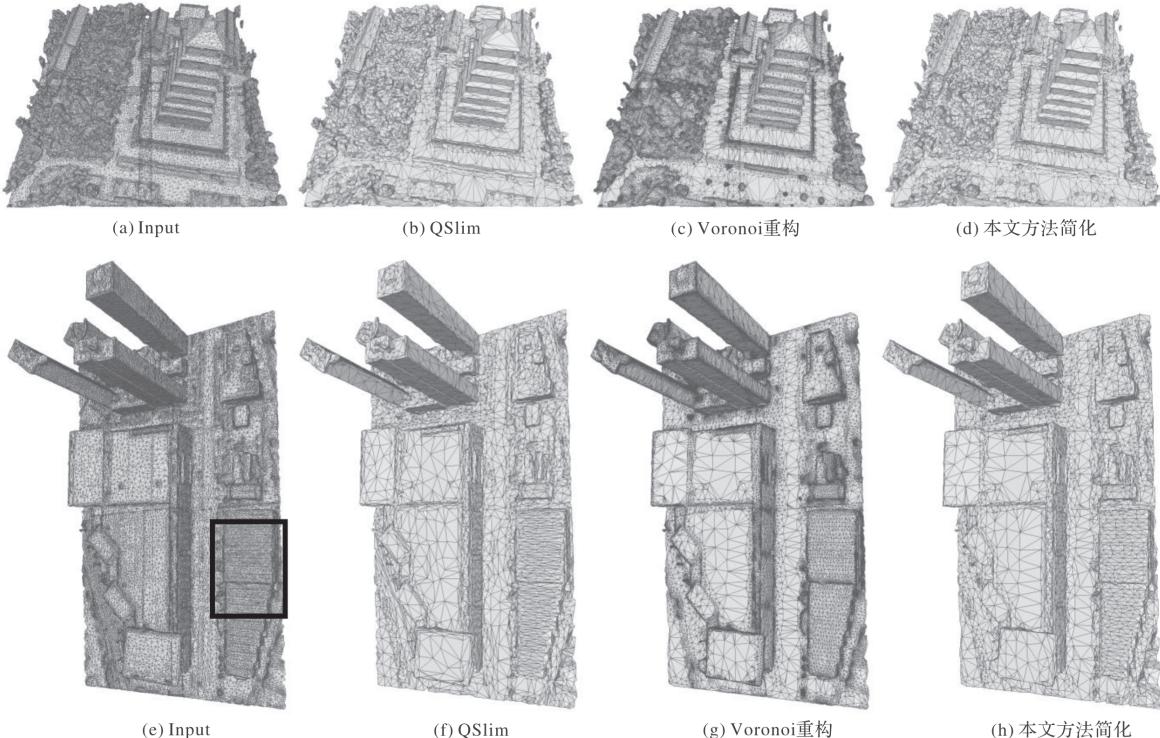


图 4 简化效果展示 1(上: 大雁塔; 下: 大连某商区)

Fig. 4 Display 1 of simplification results (up: Wild Goose Pagoda; down: a region of Dalian)

对比 Voronoi 重构前后进行 QSLIM 的结果, 可以发现整体上重构后再进行 QSLIM 简化视觉上网格的变化幅度明显减少, 这是平整表面简化后变化很小营造的效果。图 4 的展示只能证明漫游时视觉效果优良, 除了这个方面, 细节的保持也是重要的指标。将大连某商区的 UDSM 的面片数简化

至 2000, 并截取图 4(e)的黑框部分, 得到图 5。使用 CVD(2)算法也可以得到类似图 4(c)(d)和图 4(g)(h)的 LOD 效果。但从图 5 可以看到本文算法克服了基于 Voronoi 图的简化算法失真化平整波动不大的细节网格, 并且相对于 QSLIM 算法, 屋顶的轮廓得到更好的保持。

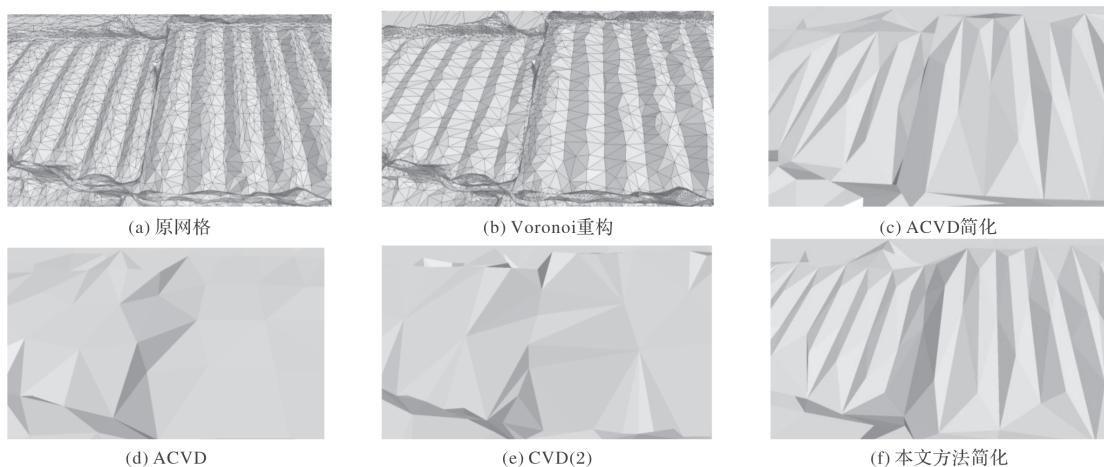


图 5 简化效果展示 2(上: 大雁塔; 下: 大连某商区)

Fig. 5 Display 2 of simplification results (up: Wild Goose Pagoda; down: a region of Dalian)

实验条件 CPU 为 i5-4210 m(主频: 2.60 Ghz), 内存为 DDR3(8 G)。将本文算法与 QSLIM、ACVD 和 CVD(2), 其中也将面片数为 69 451 的 bunny 模型加入进行对比, 简化率为 0.9, 结果如表 1 所示。

表 1 本文算法的时间性能对比

Table 1 Time performance comparison for our simplification method

网格名称	本文方法/s	QSLIM/s	ACVD/s	CVD(2)/s
大连某商区	2.019	1.731	8.891	12.265
大雁塔	3.088	2.504	3.423	3.864
Bunny	0.843	0.827	6.609	7.363

由表 1 可看出, 由于细节网格复杂度和数量的轻微增加, 本文算法耗时略微高于 QSLIM, 可以认为与 QSLIM 保持一致。QSLIM 时间性能较好, 在许多的研究中都有所体现。

5 结论

UDSM 的三维重建需要大量时间, 而网格重构的鲁棒性强不需要随着简化率变化而变化。本文融合了基于 Voronoi 图形的重构简化算法保持网格细节特征, 和 QSLIM 总体上与原网格误差小的特

点, 得到了基于质心 Voronoi 图重构的 UDSM 边折叠简化, 部分克服了 Voronoi 平整失真的问题。但网格重构的过程中, 虽然增加了细节区域的网格数量, 但是细分过程中出现了建筑边缘钝化现象, 可以通过简化率较低时使用 QSLIM 为代表的均匀简化构建 LOD。

参考文献:

- [1] WANG Jiateng, YIN Hong, XIE Wenbin, et al. Simplification of terrain mesh based on vertex importance and hierarchical clustering tree[J]. Computer Engineering and Design, 2016, 37(6): 1543-1548.
- [2] GARLAND M, WILLMOTT A, HECKBERT P S. Hierarchical face clustering on polygonal surfaces[C]// 4Proceedings of the 2001 symposium on interactive 3D graphics. USA: ACM, 2001: 49-58.
- [3] BAO Peng, HUO Liang, WANG Rui, et al. Research on urban 3D data organization method based on embedded pyramid model[J]. Journal of Beijing Institute of Civil Engineering and Architecture, 2017(4): 33-38.

- 鲍鹏, 霍亮, 王锐, 等. 基于嵌入式金字塔模型的城市三维数据组织方法研究[J]. 北京建筑工程学院学报, 2017(4): 33-38.
- [4] XUE Junshi, SHU Qiquan, GUO Ningbo. Relative pose estimation method in multi-view 3D reconstruction with unknown distortion[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(6): 612002-0612002.
- 薛俊诗, 舒奇泉, 郭宁博. 未知畸变参数时多视图三维重建相对位姿估计方法[J]. *光子学报*, 2018, 47(6): 612002-0612002.
- [5] VALETTE S, CHASSERY J. Approximated centroidal voronoi diagrams for uniform polygonal mesh coarsening[J]. Computer Graphics Forum, 2010, 23(3): 381-389.
- [6] LIU Y J, XU C X, FAN D, et al. Efficient construction and simplification of Delaunay meshes[J]. ACM Transactions on Graphics, 2015, 34(6): 1-13.
- [7] XU Siqi, HUANG Xianfeng, ZHANG Fan, et al. Application of tilt photogrammetry in large scale topographic mapping[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2018(2): 111-115.
- 徐思奇, 黄先锋, 张帆, 等. 倾斜摄影测量技术在大比例尺地形图测绘中的应用[J]. 测绘通报, 2018(2): 111-115.
- [8] LIU S, FERGUSON Z, JACOBSON A, et al. Seamless: seam erasure and seam-aware decoupling of shape from mesh resolution[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2017, 36(6): 216.
- [9] DUAN Liming, SHAO Hui, LI Zhong-ming, et al. Simplification method for feature preserving of efficient triangular mesh model[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(2): 460-468.
- 段黎明, 邵辉, 李中明, 等. 高效率的三角网格模型保持
征简化方法[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(2): 460-468.
- [10] GARLAND M. Surface simplification using quadric error metrics[C]//Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, USA: ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1997: 209-216.
- [11] SALINAS D, LAFARGE F, ALLIEZ P. Structure - aware mesh decimation[J]. Computer Graphics Forum, 2015, 34(6): 211-227.
- [12] DU Q, FABER V, GUNZBURGER M. Centroidal voronoi tessellations: applications and algorithms[J]. *SIAM Review*, 1999, 41(4): 637-676.
- [13] LLOYD S. Least squares quantization in PCM[J]. IEEE Trans, 1982, 28(2): 129-137.
- [14] VALETTE S, CHASSERY J, PROST R. Generic remeshing of 3D triangular meshes with metric-dependent discrete voronoi diagrams[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2008, 14(2): 369-381.
- [15] CAZALS F, POUGET M. Estimating differential quantities using polynomial fitting of osculating jets[J]. *Computer Aided Geometric Design*, 2005, 22(2): 121-146.
- [16] HECKBERT P S, GARLAND M. Optimal triangulation and quadric-based surface simplification[J]. *Comput. Geom.*, 1999, 14(1-3): 49-65.
- [17] LI Jingjing. Research on the methods of true three-dimensional mesh construction of urban point cloud[D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2016.
- 李晶晶. 城市点云真三维网格构建方法研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2016.
- [18] CIGNONI P, ROCCHINI C, SCOPIGNO R. Metro: measuring error on simplified surfaces[J]. Computer Graphics Forum, 1998, 17(2): 167-174.