DOI:10.19652/j.cnki.femt.2305585

防止纹理扭曲的倾斜摄影模型轻量化算法*

王彦海[1] 张宇昊[1] 李 成[2] 陈树平[2] 李恩阳[1]
(1.三峡大学电气与新能源学院 宜昌 443000;
2.中国南方电网超高压输电公司梧州局 梧州 543002)

摘 要:针对倾斜摄影模型网格简化后出现纹理扭曲的问题,基于二次误差度量算法(quadric error metrics, QEM),提出一种防止纹理扭曲的倾斜摄影模型轻量化算法。该算法依据模型中各顶点的拓扑连接关系对顶点进行分类,对不同类型的顶点制定相应的折叠策略,并引入顶点起伏度因子、纹理形变因子和顶点一环领域内三角形平均面积对QEM算法中的边折叠代价进行改进。实验结果表明,改进算法可以在高简化率下避免出现纹理扭曲现象,有效保持了模型的几何特征和纹理特征,并且相较于传统QEM算法,改进算法处理的模型最大误差、平均误差和均方差均分别至少降低了43.55%、52.50%和21.61%;在90%简化率的情况下,相较于带纹理模型的简化算法,改进算法处理的模型最大误差、平均误差和均方差分别降低了34.90%、10.61%和12.31%。

关键词:倾斜摄影模型;二次误差度量算法;网格简化;纹理扭曲;模型轻量化
中图分类号: TP391.41 **文献标识码**:A **国家标准学科分类代码**: 520.6

Lightweight algorithm for preventing texture distortion in oblique photogrammetry model simplification

Wang Yanhai[1] Zhang Yuhao[1] Li Cheng[2] Chen Shuping[2] Li Enyang[1]
(1. College of Electrical & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443000, China;
2. China Southern Power Grid Extra High Voltage Power Transmission Company Wuzhou Branch, Wuzhou 543002, China)

Abstract: In response to the issue of texture distortion that arises after mesh simplification in oblique photogrammetry models, a lightweight algorithm is proposed to prevent texture distortion based on the quadratic error metric (QEM) algorithm. This algorithm categorizes vertices based on their topological connectivity within the model, and then formulates appropriate folding strategies for different vertex types. It also introduces vertex fluctuation factor, texture deformation factor, and average triangle area within a one-ring neighborhood of each vertex to enhance the edge folding cost in the QEM algorithm. Experimental results show that the improved algorithm effectively avoids texture distortion phenomena at high simplification rates, preserving both the geometric and texture features of the model. The improved algorithm reduces the maximum error, average error, and mean square error of the processed model by at least 43.55%, 52.50% and 21.61%, respectively, compared to the QEM algorithm. At a simplification rate of 90%, the improved algorithm reduces the maximum error, average error, and mean square error of the processed model by 34.90%, 10.61% and 12.31%, respectively, compared to the simplification algorithm for textured models.

Keywords: oblique photogrammetry; quadric error metrics; mesh simplification; texture distortion; model lightweight

0 引 言

随着三维重建技术和计算机图形学的快速发展,倾斜摄影技术因具备成本低、效率高、模型观感真实等特点,被广泛应用于地貌测绘[1]、工程测量[2]、电力巡检[3-4]、安全监测[5-6]、数字城市[7]、文物保护[8]与BIM设计[9]等诸多领域。然而,倾斜摄影模型的数据量十分庞大,超高的数据量不仅会延长计算机渲染模型的时间,还会对模型的后期

收稿日期:2023-09-22
* **基金项目**:国家自然科学基金(U22A20600,52079070)、防灾减灾湖北省重点实验室开放资金(2022KJZ07)项目资助

存储和管理带来挑战，因此，如何轻量化处理倾斜摄影模型，降低计算机渲染模型的时间成为了亟需解决的问题。三角网格作为倾斜摄影模型的基本组成单元，减少倾斜摄影模型三角面数量是轻量化处理模型的重要策略之一。目前三角网格简化算法主要分为元素删除法、网格重绘法和顶点聚类法[10-11]，其中元素删除法可根据删除对象的不同分为边折叠算法、三角面折叠算法和顶点删除法，边折叠算法因具备算法复杂度低、简化效率高和简化效果优秀等特点而被广泛使用[12]。

国内外研究学者在边折叠算法的基础上，进行了许多改进工作。Garland 等[13]在边折叠算法的基础上，提出使用二次误差度量作为边的折叠代价，该算法效率高、简化效果优秀，但是在高简化率的情况下，难以保持模型几何细节特征。焦越等[14]在二次误差度量算法(QEM)的基础上，引入三角网格面积度量因子，有效控制了简化模型的整体误差，但是该算法没有考虑边界三角网格和顶点曲率，对于模型边界和表面细节特征处的简化效果较差。段黎明等[15]使用网格细分法结合三角形折叠法进行模型简化，引入体积因子和平展度因子优化折叠代价，该方法可以较好的保持模型几何细节特征，提高简化效率，但是无法处理含有纹理信息的模型。张春森等[16]在 QEM 算法的基础上，引入平面检测算法提取代理平面，通过代理平面对折叠代价进行优化，该算法在高简化率的情况下可以较好的保持模型整体质量，但是无法避免简化后模型出现纹理扭曲现象。李少卿等[17]引入顶点曲率和角度误差因子优化边的折叠代价，并且考虑了三角网格面积对顶点曲率计算的影响，但是没有考虑三角网格面积相同时，不同形状对顶点曲率计算的影响。张韵等[18]在 QEM 算法的基础上，引入顶点近似曲率和顶点一环领域内三角网格平均面积对边折叠代价计算进行改进，同时在计算顶点近似曲率的过程中，增加了三角网格面积和顶点内角两个影响因子，该算法极大程度上保留了原模型的几何细节特征，但是算法运行时间较长，并且不能处理带纹理特征的三维模型。兰峰等[19]对倾斜摄影模型中的植被信息进行提取，并且结合马尔可夫随机场对倾斜摄影模型中的植被区域进行分割，然后采用 QEM 算法对植被区域进行简化，但是该算法只能对倾斜摄影模型中的植被区域进行简化处理，不能对其他区域进行简化，模型整体简化程度有限。李鹏等[20]对倾斜摄影模型的纹理贴图信息进行处理，得到模型中各顶点对应的归一化纹理高低值，然后引入顶点纹理高低值对 QEM 算法进行优化，该算法虽然考虑了模型纹理信息对网格简化的影响，但是没有考虑如何调整简化后模型的纹理坐标，导致最终输出的模型出现纹理扭曲和纹理错位现象。李世俊等[21]引入了三角面法向量夹角和纹理面积比重优化 QEM 算法，可以在一定程度上保留模型纹理特征，但是该算法只能对纹理信息连续的模型进行处理，对于纹理信息不连续的倾斜摄影模型无法有效处理，模型简化后会出现纹理扭曲现象。

针对上述方法无法解决倾斜摄影模型网格简化后出现纹理扭曲的问题，本文提出一种防止纹理扭曲的倾斜摄影模型轻量化算法。本文算法以 QEM 算法为基础，根据倾斜摄影模型中顶点拓扑连接关系对各顶点进行分类，对于待折叠边按照其所含顶点的类别分别采取不同的折叠策略，并且引入顶点起伏度因子、纹理形变因子和顶点一环领域三角形平均面积优化边的折叠代价，避免了高简化率下模型出现纹理扭曲现象，同时有效的保留了模型的几何特征和纹理特征。

1 基于二次误差度量的边折叠算法

QEM 算法采用新生成顶点到折叠边一环领域内三角面的距离平方和作为边的折叠代价，每次折叠操作时，选取折叠代价最小的边进行折叠[13]。

在三维空间中，设平面方程为 $ax+by+cz+d=0$，其中 $a^2+b^2+c^2=1$，平面方程系数矩阵为 $\boldsymbol{p}=[a\quad b\quad c\quad d]^{\mathrm{T}}$，QEM 算法定义顶点 $\boldsymbol{v}_i=[x\quad y\quad z\quad 1]^{\mathrm{T}}$ 到其一环领域内各三角面 $\boldsymbol{p}$ 的距离平方和为该顶点的二次误差 $\Delta(\boldsymbol{v}_i)$：

$$\Delta(\boldsymbol{v}_i)=\sum_{p\in planes(v_i)}\boldsymbol{v}_i^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{p}\boldsymbol{p}^{\mathrm{T}})\boldsymbol{v}_i=\boldsymbol{v}_i^{\mathrm{T}}\Big(\sum_{p\in planes(v_i)}\boldsymbol{K}_p\Big)\boldsymbol{v}_i \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{K}_p$ 是一个 4×4 的对称矩阵，定义 $Q(\boldsymbol{v}_i)=\sum_{p\in planes(v_i)}\boldsymbol{K}_p$ 为顶点 $\boldsymbol{v}_i$ 的二次误差矩阵；$planes(\boldsymbol{v}_i)$ 为顶点 $\boldsymbol{v}_i$ 一环领域内所有三角面的集合。

当边 (v_1,v_2) 折叠到新顶点 $\bar{\boldsymbol{v}}$ 时，取 $Q(v_1)+Q(v_2)$ 作为 $\bar{\boldsymbol{v}}$ 的二次误差矩阵，同时也作为边 (v_1,v_2) 的二次误差矩阵。则边 (v_1,v_2) 的折叠代价计算公式如下：

$$\Delta(\bar{\boldsymbol{v}})=\bar{\boldsymbol{v}}^{\mathrm{T}}(Q(v_1)+Q(\boldsymbol{v}_2))\bar{\boldsymbol{v}}=q_{11}x^2+2q_{12}xy+2q_{13}xz+2q_{14}x+q_{22}y^2+2q_{23}yz+2q_{24}y+q_{33}z^2+2q_{34}z+q_{44} \tag{2}$$

式中：$q_{11}\sim q_{44}$ 表示 $\bar{\boldsymbol{v}}$ 的二次误差矩阵中的元素。

为了计算边的折叠代价，还需要先计算出新生成顶点 $\bar{v}$ 的空间坐标，使用求偏导的方式对式(2)进行求解，得到新生成顶点 $\bar{\boldsymbol{v}}$ 的空间坐标计算公式如下：

$$\bar{\boldsymbol{v}}=\begin{bmatrix}q_{11}&q_{12}&q_{13}&q_{14}\\q_{12}&q_{22}&q_{23}&q_{24}\\q_{13}&q_{23}&q_{33}&q_{34}\\0&0&0&1\end{bmatrix}^{-1}\begin{bmatrix}0\\0\\0\\1\end{bmatrix} \tag{3}$$

当系数矩阵不可逆时，则在边 (v_1,v_2) 的中点、顶点 v_1 和顶点 v_2 中选择使折叠代价最小的点作为新生成顶点。

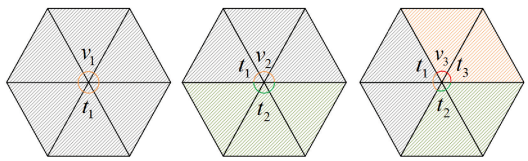
2 保持纹理特征的边折叠简化算法

2.1 顶点分类方法

针对含有纹理特征的倾斜摄影模型，在简化过程中不

仅要计算出新生成顶点 $\bar{v}$ 的三维空间坐标，也要同时赋予 $\bar{v}$ 合理的纹理坐标，否则简化后的模型将出现纹理扭曲现象。为了准确的计算出折叠过程中新生成顶点的空间坐标及其对应的纹理坐标，本文基于各顶点关联的纹理坐标数量进行顶点分类。

如图 1 所示，如果某顶点只有一个纹理坐标，则该顶点为平滑顶点；如果某顶点有两个纹理坐标，则该顶点为接缝顶点；如果某顶点有 3 个或 3 个以上纹理坐标，则该顶点为角顶点。

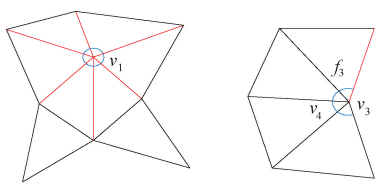


(a) 平滑顶点　(b) 接缝顶点　(c) 角顶点

图 1　顶点分类

受限于计算机性能，倾斜摄影模型建立过程中往往会进行分块建模的操作，为了避免各区块模型简化后出现边缘破损的情况，影响模型整体效果，本文基于各顶点一环领域内所有边关联的三角面数量对顶点进行二次分类。

首先假设模型所有顶点均为非边界顶点，然后遍历顶点一环领域内所有边，如果边具有两个或两个以上的关联三角面，则认定该边为非边界边；如果边只有一个关联三角面，则认定该边为边界边。当顶点一环领域内存在边界边时，则认定该顶点为边界顶点。如图 2 所示，顶点 v_1 一环领域内所有边都有两个关联三角面，因此该顶点一环领域内均为非边界边，顶点 v_1 为非边界顶点；顶点 v_3 一环领域内存在边 (v_3,v_4) 只有一个关联三角面，即 (v_3,v_4) 为边界边，因此顶点 v_3 为边界顶点。



(a) 非边界顶点　(b) 边界顶点

图 2　边界分类

2.2　折叠策略

假设边 (v_1,v_2) 为待折叠边，顶点 $\bar{v}$ 为边 (v_1,v_2) 折叠后新生成的顶点。基于上述顶点分类法，对各类情况的待折叠边制定相应的折叠策略。

1)如果顶点 v_1 和顶点 v_2 均为平滑顶点，则 $\bar{v}$ 也是平滑顶点，如图 3(a)所示，$\bar{v}$ 的空间坐标和纹理坐标根据文献[22]的广义二次误差度量算法进行计算。

将所有顶点置入五维向量空间 $\boldsymbol{R}^5$，即顶点的表示向量由 $[x\quad y\quad z]^{\mathrm{T}}$ 拓展到 $[x\quad y\quad z\quad u\quad v]^{\mathrm{T}}$($u$、$v$ 表示归一化的纹理坐标值)。假设空间 $\boldsymbol{R}^5$ 内存在任意三角面 $t=(p,q,r)$，p、q、r 三个顶点在空间 $\boldsymbol{R}^5$ 中构建了一个二维平面如图 4 所示，其中 $\boldsymbol{e}_1$ 和 $\boldsymbol{e}_2$ 为该平面上两个正交化的单位向量，计算公式如下：

$$\begin{cases}\boldsymbol{e}_1=\dfrac{q-p}{\|q-p\|}\\[2ex]\boldsymbol{e}_2=\dfrac{r-p-(\boldsymbol{e}_1\cdot(r-p))\boldsymbol{e}_1}{\|r-p-(\boldsymbol{e}_1\cdot(r-p))\boldsymbol{e}_1\|}\end{cases}\tag{4}$$

假设存在任意顶点 $\boldsymbol{v}'\in\boldsymbol{R}^5$，则顶点 $\boldsymbol{v}'$ 到三角面 t 的距离平方为：

$$\boldsymbol{D}^2=\boldsymbol{v}'^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}\boldsymbol{v}+2\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{v}+\boldsymbol{C}\tag{5}$$

其中，$\boldsymbol{A}$、$\boldsymbol{B}$、$\boldsymbol{C}$ 的计算公式如下所示：

$$\begin{cases}\boldsymbol{A}=\boldsymbol{I}-\boldsymbol{e}_1\boldsymbol{e}_1{}^{\mathrm{T}}-\boldsymbol{e}_2\boldsymbol{e}_2{}^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{B}=(p\cdot\boldsymbol{e}_1)\boldsymbol{e}_1+(p\cdot\boldsymbol{e}_2)\boldsymbol{e}_2-p\\ \boldsymbol{C}=p\cdot p-(p\cdot\boldsymbol{e}_1)^2-(p\cdot\boldsymbol{e}_2)^2\end{cases}\tag{6}$$

定义顶点 $\boldsymbol{v}'$ 的二次误差矩阵为：

$$Q(\boldsymbol{v}')=\begin{bmatrix}\sum\limits_{t\in planes(v')}A_t & \sum\limits_{t\in planes(v')}B_t\\ \sum\limits_{t\in planes(v')}B_t{}^{T} & \sum\limits_{t\in planes(v')}C_t\end{bmatrix}\tag{7}$$

当边 (v_1,v_2) 折叠到新顶点 $\bar{v}$ 时，为了方便计算取 $Q(v_1)+Q(v_2)$ 作为 $\bar{v}$ 的二次误差矩阵，边 (v_1,v_2) 的折叠误差 $\Delta(\bar{v})$ 和 $\bar{v}$ 的计算公式如下：

$$\begin{cases}\Delta(\bar{v})=[\bar{v}\quad 1]^{\mathrm{T}}(Q(v_1)+Q(v_2))[\bar{v}\quad 1]\\ \bar{v}=-\Big(\sum\limits_{t\in planes(v_1,v_2)}A_t\Big)^{-1}\Big(\sum\limits_{t\in planes(v_1,v_2)}B_t\Big)\end{cases}\tag{8}$$

式中：$planes(v_1,v_2)$ 表示顶点 v_1 和 v_2 一环领域内三角面的集合。

2)如果顶点 v_1 和顶点 v_2 中有一个是平滑顶点，另一个是接缝顶点，如图 3(b)所示，顶点 v_2 是接缝顶点，则边 (v_1,v_2) 折叠后继续以 v_2 作为新生成的顶点。

3)如果顶点 v_1 和顶点 v_2 中有一个是平滑顶点，另一个是角顶点，如图 3(c)所示，顶点 v_2 是角顶点，则边 (v_1,v_2) 折叠后继续以 v_2 作为新生成的顶点。

4)如果顶点 v_1 和顶点 v_2 均为接缝顶点，且边 (v_1,v_2) 处于两个不同纹理块的接缝处，则 $\bar{v}$ 也为接缝顶点，如图 3(d)所示，取边 (v_1,v_2) 的中点作为 $\bar{v}$ 的空间坐标，$\bar{v}$ 的纹

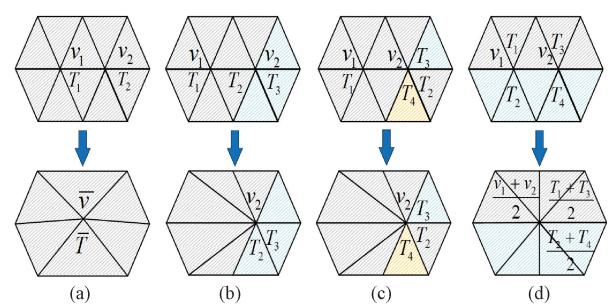


图 3　可折叠边的类型

理坐标取 v_1 和 v_2 纹理坐标的平均值。

5)对于其他情况,折叠边 (v_1,v_2) 会严重增加简化后模型出现纹理扭曲现象的风险,因此本文算法禁止折叠这些边。

对于模型边界的处理,本文算法有两种情况。顶点 v_1 和顶点 v_2 均为非边界顶点或均为边界顶点,可以直接按照上述5种情况进行相应的折叠处理;v_1、v_2 中存在一个边界顶点和一个非边界顶点,如果对这类边进行折叠操作,会造成模型边界出现破损现象,因此本文算法禁止对此类边进行折叠操作。

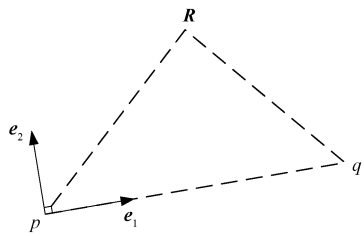


图4 三角面 t 定义的二维平面

2.3 顶点起伏度因子

由于倾斜摄影模型会在不平坦区域使用大量三角网格进行绘制,尤其是模型中的植被区域,占用了大量三角网格[19],为了对顶点附近区域起伏程度进行衡量,本文引入顶点起伏度因子。顶点起伏度因子越高,表示该顶点一环领域内区域起伏程度越大,该区域越不平坦。

顶点 $\boldsymbol{v}_i$ 的起伏度因子 LRS_{v_i} 计算公式如下:

$$LRS_{v_i}=\frac{\sum\limits_{j\in vertexs(v_i)}\frac{\langle N_{v_i},N_{v_j}\rangle}{\|\boldsymbol{v}_i-\boldsymbol{v}_j\|}}{m} \tag{9}$$

式中:$vertexs(v_i)$ 是顶点 $\boldsymbol{v}_i$ 一环领域内相邻顶点的集合;$\langle N_{v_i},N_{v_j}\rangle$ 表示顶点 $\boldsymbol{v}_i$ 的法向量和顶点 $\boldsymbol{v}_j$ 的法向量的夹角;$\|\boldsymbol{v}_i-\boldsymbol{v}_j\|$ 是顶点 $\boldsymbol{v}_i$ 和顶点 $\boldsymbol{v}_j$ 的欧氏距离;m 是顶点 $\boldsymbol{v}_i$ 一环领域内相邻顶点的个数。

由式(9)可知,顶点法向量将直接影响顶点起伏度因子的准确性,为了考虑三角网格面积和形状对顶点法向量计算的影响,因此本文引入顶点一环领域内三角网格面积 S 和与顶点相关联的内角角度 θ 到法向量计算公式中,得到优化后的顶点法向量计算公式:

$$N_{v_i}=\frac{\sum\limits_{k\in planes(v_i)}\theta_k S_k \boldsymbol{n}_k}{\|\sum\limits_{k\in planes(v_i)}\theta_k S_k \boldsymbol{n}_k\|} \tag{10}$$

式中:θ_k 为第 k 个三角面与顶点 v_i 相关联的内角角度;S_k 表示第 k 个三角面的几何面积;$\boldsymbol{n}_k$ 表示第 k 个三角面的法向量,$\boldsymbol{n}_k$ 可由式(11)求出。

$$\boldsymbol{n}_k=\frac{(v_0-v_1)\times(v_2-v_0)}{\|(v_0-v_1)\times(v_2-v_0)\|} \tag{11}$$

式中:v_0、v_1、v_2 是第 k 个三角面的3个顶点。

2.4 顶点一环领域三角形平均面积

为了衡量顶点周围三角网格密集程度,本文引入顶点一环领域内三角形平均面积对折叠代价进行优化处理,一般情况下顶点周围三角网格越密集,则平均三角面积越小。顶点一环领域内三角形平均面积 $\overline{A}_{v_i}$ 计算公式如下:

$$\overline{A}_{v_i}=\frac{\sum\limits_{k\in planes(v_i)}S_k}{n} \tag{12}$$

式中:n 表示顶点 v_i 一环领域内三角面个数。

2.5 纹理形变因子

对于倾斜摄影实景三维模型这种含有纹理特征的网格模型,如果直接使用普通QEM算法进行简化处理,会忽视模型的纹理特征信息,进而造成简化处理后的模型纹理特征丢失,增加出现纹理扭曲的风险。针对上述问题,本文引入纹理形变因子 $tex(v_i,v_j)$ 来衡量模型中各条边折叠后出现纹理扭曲现象的风险程度,纹理形变因子越高表示折叠该边出现纹理扭曲的风险越大:

$$\begin{cases}den(v)=\sum\limits_{k\in planes(v)}\frac{S_{tex,k}}{n\cdot S_k}\\ tex(v_i,v_j)=\|v_i-v_j\|(\alpha(v_i)\cdot den(v_i)+\\ \quad\alpha(v_j)\cdot den(v_j))\end{cases} \tag{13}$$

式中:$S_{tex,k}$ 表示第 k 个三角面的纹理面积;$den(v)$ 表示顶点 v 一环领域内三角网格平均纹理密度,其作用是衡量顶点一环领域内纹理面积占几何面积的比重大小,$den(v)$ 越大,说明顶点 v 周围区域的纹理越密集;$\alpha(\cdot)$ 表示顶点类型调节系数,可取>0的实数,其作用是为了区分折叠不同类型顶点对模型纹理效果的影响程度。

1)平滑顶点是模型中最多的顶点类型,由于其只包含一个纹理坐标,因此折叠含有平滑顶点的边对于模型整体简化效果影响不大,当顶点为平滑顶点时,本文取 $\alpha=1.0$。

2)接缝顶点是倾斜摄影模型中最重要的顶点类型,因为接缝顶点一般位于两个不同纹理块的交接处,如果对于含有接缝顶点的边过度折叠,会增加模型出现纹理扭曲现象的风险,因此对于接缝顶点,本文的处理策略是取 $\alpha=1.5$,尽量延后其折叠顺序。

3)角顶点是倾斜摄影模型中含有纹理坐标最多的点,一般位于3个或更多纹理块的交接处,正常情况下角顶点的重要程度应该高于接缝顶点,但是角顶点总体数量非常少,并且本文算法对于含有角顶点的边的折叠策略管控相对严格,出现纹理扭曲现象的风险最高的两种情况是禁止折叠的,即双顶点均为角顶点的边或由接缝顶点和角顶点组成的边,因此对于角顶点,本文取 $\alpha=1.2$。

2.6 优化后的边折叠代价

本文后续处理的模型为倾斜摄影三维建筑模型,受限于倾斜摄影建模的技术特点,此类模型会使用大量密集的三角网格刻画建筑周围的植被区域或地表区域,但是对更

加重要的建筑物本体使用的三角面却更少，因此在简化过程中应该尽可能的多简化建筑周围的植被和地表区域，同时尽量保留建筑物本体的几何特征和纹理特征。

由于使用普通 QEM 算法的折叠代价无法有效衡量模型的几何特征和纹理特征，因此本文引入顶点起伏度因子 LRS 、顶点一环领域三角形平均面积 $\overline{A}$ 和纹理形变因子 $tex(\boldsymbol{v}_i,\boldsymbol{v}_j)$ 对原始折叠代价进行优化。

其中顶点起伏度因子 LRS 是衡量顶点周围区域起伏程度的指标，在倾斜摄影三维建筑模型中，建筑物的房顶和外立面起伏程度一般较低，但建筑周围植被区域的起伏程度很高，为了更好的保留建筑物本体的模型特征，本文算法让顶点起伏度因子与折叠代价负相关，可以更多的简化植被区域的网格，保留更多的建筑物区域的三角网格；顶点一环领域三角形平均面积 $\overline{A}$ 可以衡量顶点周围三角网格密集程度，由于建筑物区域所占三角网格较少，故该区域内顶点的 $\overline{A}$ 较大，本文算法将顶点一环领域三角形平均面积与折叠代价正相关，可以最大程度保证模型简化后建筑物本体的呈现效果；纹理形变因子 $tex(\boldsymbol{v}_i,\boldsymbol{v}_j)$ 是衡量边折叠后出现纹理扭曲现象风险程度的指标，本文算法令其与折叠代价正相关，从而实现模型简化后优秀的纹理特征保持效果，并且避免模型出现纹理扭曲现象。

综上所述，本文改进的边折叠代价 $Cost(\boldsymbol{v}_i,\boldsymbol{v}_j)$ 如下所示：

$$Cost(\boldsymbol{v}_i,\boldsymbol{v}_j)=\bar{\boldsymbol{v}}^{\mathrm{T}}\left(\frac{\overline{A}_{v_i}\boldsymbol{Q}(\boldsymbol{v}_i)}{LRS_{v_i}}+\frac{\overline{A}_{v_j}\boldsymbol{Q}(\boldsymbol{v}_j)}{LRS_{v_j}}\right)\bar{\boldsymbol{v}}\cdot tex(\boldsymbol{v}_i,\boldsymbol{v}_j) \tag{14}$$

式中：$\bar{\boldsymbol{v}}$ 表示边 (v_i,v_j) 折叠后的新生成顶点；$\boldsymbol{Q}(\cdot)$ 表示顶点二次误差矩阵；LRS 为顶点起伏度因子；$\overline{A}$ 表示顶点一环领域三角形平均面积；$tex(\boldsymbol{v}_i,\boldsymbol{v}_j)$ 表示边 $(\boldsymbol{v}_i,\boldsymbol{v}_j)$ 的纹理形变因子。

2.7 算法流程

本文算法流程如图 5 所示。

1)对模型进行预处理，获取模型中几何元素之间的拓扑连接关系，并按照 2.1 节的分类方法对模型顶点进行分类。

2)计算模型中各顶点的二次误差矩阵、起伏度因子和一环领域内三角形平均面积。

3)按照 2.2 节的折叠策略筛选出可折叠的边，并将其置入待折叠边堆。

4)计算待折叠边堆中各边的纹理形变因子、新生成顶点位置和优化后的折叠代价。

5)将待折叠边按折叠代价从小到大进行排序，每次均选取折叠代价最小的边进行折叠操作，折叠完成后更新受影响的几何元素的所有信息。

6)重复折叠操作直至模型的三角面数量达到简化目标，最后输出简化后的倾斜摄影模型。

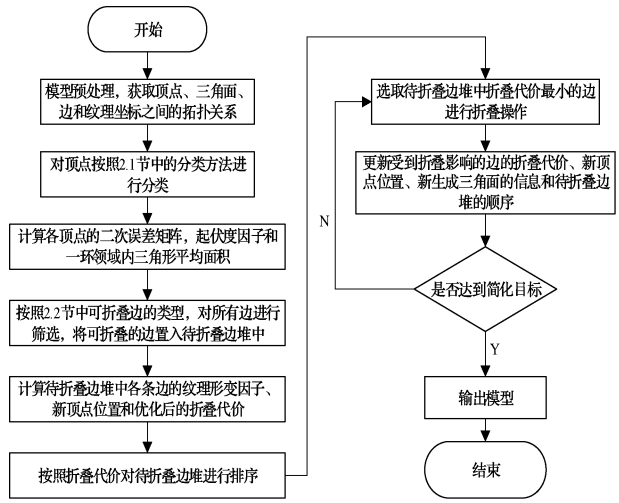


图 5 算法流程

3 实验结果与分析

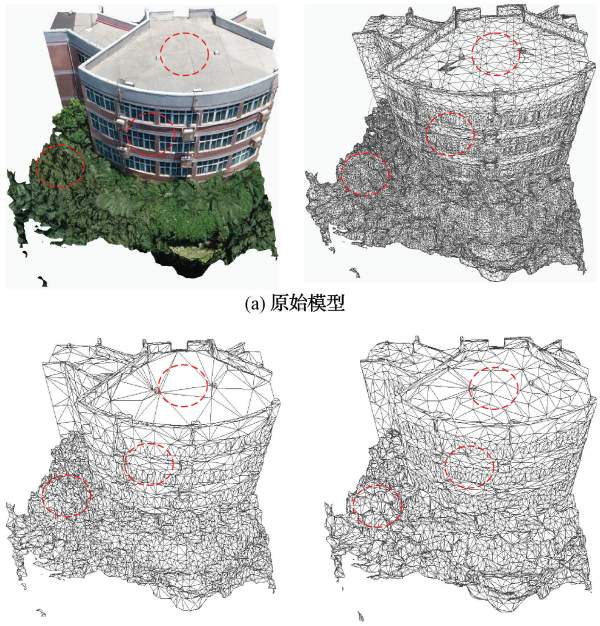
3.1 实验环境

本文算法在 Intel(R)Core(TM) i7-8750H CPU 2.20 GHz，机带 RAM 8 GB、可用内存 7.82 GB 的环境下，以 Visual Studio 2019 为平台，使用 C＋＋实现算法。操作系统为 Windows10，显卡为 Intel(R) UHD Graphics 630、NVIDIA GeForce GTX 1050 Ti，使用 Meshlab 显示模型。算法处理的模型均为自建的倾斜摄影模型，格式为 OBJ。

3.2 改进因子效果验证

加入顶点起伏度因子对模型简化效果如图 6 所示。其中图 6(a)为建筑物原始模型，共包含 65 569 个三角面；图 6(b)是未加入顶点起伏度因子时，模型简化 80%的结果；图 6(c)是加入顶点起伏度因子时，模型简化 80%的结果。对比图 6(a)、(b)、(c)可以发现，在没有加入顶点起伏度因子的情况下，由于植被区域的平坦程度很低，起伏程度很大，简化后的模型保留了更多的植被区域的三角网格，而对于更加重要的建筑物本体区域，保留的三角网格较少。在加入了顶点起伏度因子的情况下，对于建筑物的外立面和屋顶等平坦度较高，起伏程度较低的重要区域，简化后的模型在这些区域内保留的网格明显比图 6(b)更多、更密集，对于观感影响较低的植被区域的网格则保留的比图 6(b)更少，这样可以很好的保留住建筑物本体的细节几何特征，并对不那么重要的植被区域尽量多的简化。

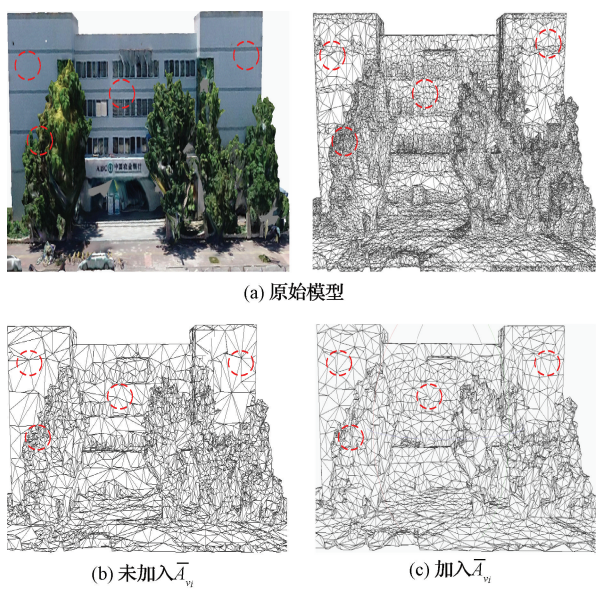
加入顶点一环领域内三角形平均面积 $\overline{A}_{v_i}$ 对模型简化效果如图 7 所示。其中，图 7(a)为建筑物原始模型，包含 86 052 个三角面；图 7(b)是未加入 $\overline{A}_{v_i}$ 时，模型简化 80%的结果；图 7(c)是加入 $\overline{A}_{v_i}$ 时，模型简化 80%的结果。$\overline{A}_{v_i}$ 可以衡量顶点周围三角网格密集程度，对比图 7(a)、(b)、(c)可以发现，加入 $\overline{A}_{v_i}$ 后，楼房门口树木区域的密集



(a) 原始模型

(b) 未加入顶点起伏度因子　　(c) 加入顶点起伏度因子

图 6　顶点起伏度因子效果



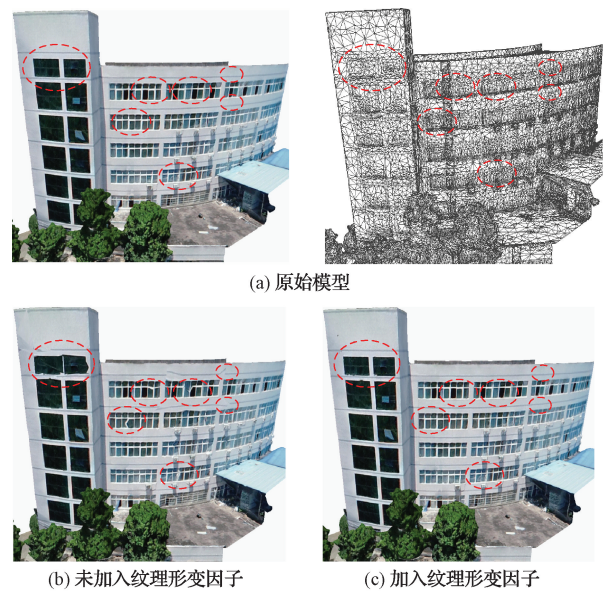
(a) 原始模型

(b) 未加入$\overline{A}_{v_i}$　　(c) 加入$\overline{A}_{v_i}$

图 7　顶点一环领域内三角形平均面积效果

三角网格进行了更多的简化，而三角网格密集程度较低的楼房本体区域简化较少，从而使楼房整体简化后的效果更加优秀。

加入纹理形变因子对模型简化效果如图 8 所示。其中图 8(a)为建筑物原始模型，包含 118 353 个三角面；图 8(b)是未加入纹理形变因子时，模型简化 80%的结果；图 8(c)是加入纹理形变因子时，模型简化 80%的结果。通过对比可以发现，在没有加入纹理形变因子的情况下，简化后的模型中出现了多处纹理扭曲和纹理错位现象，尤其是窗户边缘处，扭曲现象十分严重，对模型整体呈现效果影响很大。在加入纹理形变因子的情况下，简化后的模型没有出现明显的纹理扭曲现象，模型整体纹理效果保持良好，与原模型的纹理特征高度一致。



(a) 原始模型

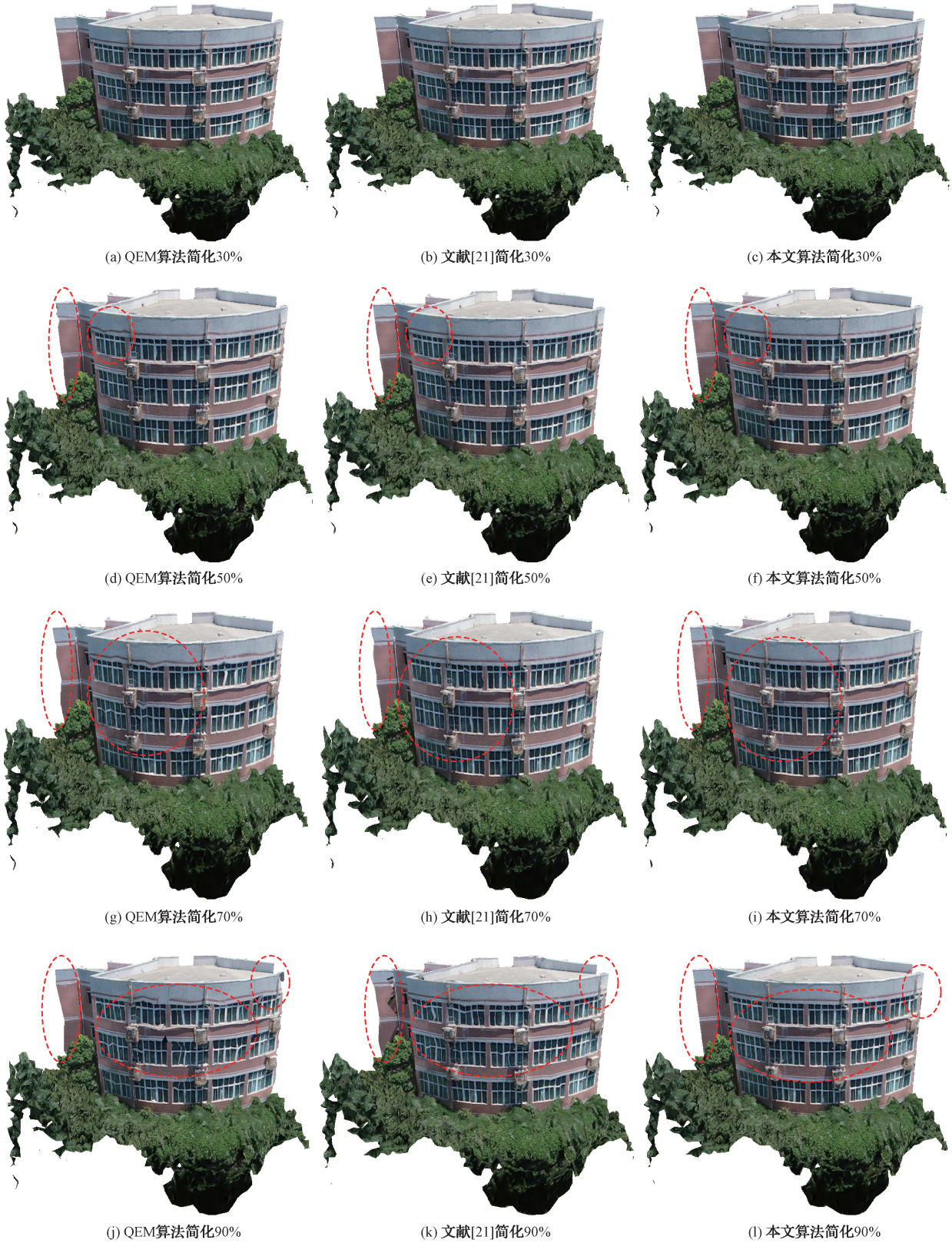
(b) 未加入纹理形变因子　　(c) 加入纹理形变因子

图 8　纹理形变因子效果

3.3　算法对比与结果分析

选择图 6 的原始模型为处理对象，与 QEM 算法和文献[21]算法进行对比。所有算法均在 3.1 节的实验环境下运行，并且均配置第 3 方拓展库 Armadillo 用于矩阵计算，编译平台选择 X64。为了直观的展示出模型轻量化处理后的简化误差，本文采用 Metro 网格比较工具对简化误差进行量化。Metro 网格比较工具广泛用于网格模型误差分析[23]，该比较工具通过接收原始模型与简化后的模型，得到简化后模型中各顶点到原始模型的最小距离，从而计算出模型简化后的最大误差、平均误差和均方差作为模型之间的误差指标。

各算法效果对比如图 9 所示，由图 9(a)～(c)可以发现，在简化率较低的情况下，3 种算法处理的模型效果相差不大，基本没有出现明显的纹理扭曲现象或几何特征缺失现象。对比图 9(d)～(f)可以发现，使用 QEM 算法简化模型 50%时，简化后模型出现了边界破损情况和轻微的纹理扭曲现象，文献[21]算法简化的模型同样出现了一定的边界破损情况，但是仍然较好的保持了模型的纹理信息，没有出现明显的纹理扭曲现象，本文算法则很好的保持了模型的边界和纹理特征，没有出现边界破损情况和纹理扭曲现象。当模型简化率达到 70%时，观察图 9(g)～(i)可以发现，使用 QEM 算法和文献[21]算法简化的模型边界破损情况进一步加剧，并且在模型窗户处已经出现了明显的纹理扭曲现象，而本文算法还能很好的保持住模型的几何特征和纹理特征。对比图 9(j)～(l)可以发现，当简化率达到 90%的情况下，QEM 算法简化的模型不仅左



(a) QEM算法简化30%　(b) 文献[21]简化30%　(c) 本文算法简化30%

(d) QEM算法简化50%　(e) 文献[21]简化50%　(f) 本文算法简化50%

(g) QEM算法简化70%　(h) 文献[21]简化70%　(i) 本文算法简化70%

(j) QEM算法简化90%　(k) 文献[21]简化90%　(l) 本文算法简化90%

图 9　算法效果对比

右两边都出现了较严重的边界破损现象，还在模型中间部位出现了严重的纹理扭曲现象，模型整体简化效果很差，文献[21]算法对于全部顶点采用一样的折叠策略，导致了在高简化率下对于含接缝顶点和角顶点的边过度折叠，增

加了简化后模型出现纹理扭曲的风险，文献[21]算法简化模型90%时，模型同样出现了严重的边界破损现象和纹理扭曲现象，而本文算法由于对倾斜摄影模型中各类型顶点都制定了对应的折叠策略，在简化率高达90%的情况下，仍然没有出现纹理扭曲现象，较好的保持了模型的几何特征和纹理特征，整体简化效果明显优于QEM算法和文献[21]算法。

本文采用简化后模型与原始模型之间的最大误差、平均误差和均方差来量化各算法的简化效果，具体数据如表1所示。由表1可以看出，3种算法处理模型所用时间差距不大，本文算法在简化用时低于其他两种算法的情况下，各项误差均优于其他两种算法。本文算法对比QEM算法，最大误差至少降低了43.55%，平均误差至少降低了52.50%，均方差至少降低了21.61%。当简化率达到90%时，本文算法对比文献[21]算法和QEM算法，最大误差分别降低了34.90%和43.55%，平均误差分别降低了10.61%和52.50%，均方差分别降低了12.31%和21.61%。

表1 各算法的误差及简化所用时间

算法	对比项	30%	50%	70%	90%
QEM算法	最大误差	0.032 906	0.157 804	0.302 414	0.345 950
	平均误差	0.002 522	0.005 766	0.011128	0.019 415
	均方差	0.005 297	0.009 507	0.016710	0.026 590
	简化时间/s	29.69	31.97	40.72	46.64
文献[21]算法	最大误差	0.016 921	0.070 873	0.199 960	0.300 024
	平均误差	0.000 137	0.000 432	0.003 477	0.010 317
	均方差	0.000 238	0.002 126	0.010 271	0.023 770
	简化时间/s	27.61	34.91	43.26	47.01
本文算法	最大误差	0.000 521	0.056 694	0.132 251	0.195 303
	平均误差	0.000 130	0.000 353	0.003 459	0.009 222
	均方差	0.000 175	0.001 989	0.008 636	0.020 845
	简化时间/s	28.96	31.93	38.15	42.23

4 结 论

针对倾斜摄影模型网格简化后出现纹理扭曲的问题，本文提出一种基于QEM算法的防止纹理扭曲的倾斜摄影模型轻量化算法，可以实现倾斜摄影模型高质量简化。

实验结果表明，引入顶点起伏度因子和顶点一环领域内三角形平均面积优化边折叠代价，有效保留了简化后模型的几何特征，模型整体观感更优秀。通过对不同类型的待折叠边制定相应的折叠策略，同时引入纹理形变因子对边折叠代价进行优化，有效保留了模型纹理特征，避免了模型简化后出现纹理扭曲现象。本文算法在误差控制方面明显优于其他两种对比算法，在90%简化率的情况下，本文算法简化后的模型最大误差、平均误差和均方差分别至少降低了34.90%、10.61%和12.31%。

下一步研究将对倾斜摄影模型纹理贴图进行简化处理，进一步降低模型的存储空间与渲染用时。

参 考 文 献

[1] 田方. 基于激光点云数据的地形地貌测量研究[J]. 电子测量技术，2021，44(1)：15-19.

[2] HAN Y T，FENG D M，WU W W，et al. Geometric shape measurement and its application in bridge construction based on UAV and terrestrial laser scanner[J]. Automation in Construction，2023，151：104880.

[3] 谢东升，孙滔，史卓鹏，等. 基于三维重建的输电线舞动检测方法研究[J]. 国外电子测量技术，2022，41(3)：96-101.

[4] 刘玉贤，阮明浩，闫臻. 一种基于机载激光点云的门型电塔精确提取方法[J]. 测绘通报，2022 (7)：129-133.

[5] 唐亮，吴桐，刘一军，等. 融合加速度的桥梁位移响应倾斜摄影监测方法[J]. 仪器仪表学报，2022，43(10)：152-164.

[6] 陈丽，陈洋，杨艳华. 面向三维结构视觉检测的无人机覆盖路径规划[J]. 电子测量与仪器学报，2023，37(2)：1-10.

[7] LIU Z，ZHANG C，CAI H，et al. A model simplification algorithm for 3D reconstruction[J]. Remote Sensing，2022，14(17)：4216.

[8] WANG W，HEI M M，PENG F，et al. Development of "air-ground data fusion" based LiDAR method：Towards sustainable preservation and utilization of multiple-scaled historical blocks and buildings[J]. Sustainable Cities and Society，2023，91(10)：104414.

[9] 闫文娟，王水璋. 无人机倾斜摄影航测技术与BIM结

合在智慧工地系统中的应用[J]. 电子测量与仪器学报,2019,33(10):59-65.

[10] 陈博,佘江峰,谈俊忠,等. 三维场景中建筑物模型简化研究进展[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2020,45(9):1429-1437.

[11] LYU W, WU W, ZHANG L, et al. Laplacian-based 3D mesh simplification with feature preservation[J]. International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing, 2019, 10(2): 1950002.

[12] 朱天晓,闫丰亭,史志才. 特征保持的区域分级网格简化算法[J]. 图学学报,2023,44(3):570-578.

[13] GARLAND M, HECKBERT P S. Surface simplification using quadric error metrics[C]. Proceedings of the 20th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. Newyork: ACM, 1997: 209-216.

[14] 焦越,王慧青,吴煜豪,等. 结合面积度量和误差校正的网格简化算法[J]. 计算机工程与应用,2019,55(17):221-226.

[15] 段黎明,邵辉,李中明,等. 高效率的三角网格模型保特征简化方法[J]. 光学 精密工程,2017,25(2):460-468.

[16] 张春森,张会,郭丙轩,等. 城市场景结构感知的网格模型简化算法[J]. 测绘学报,2020,49(3):334-342.

[17] 李少卿,霍亮,沈涛,等. 顾及角度误差的三维建筑模型边折叠简化算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2021,46(8):1209-1215.

[18] 张韵,王淑营,郑庆,等. 保持细节几何特征的三维网格模型轻量化算法[J]. 计算机应用,2023,43(4):1226-1232.

[19] 兰峰,张帆,高云龙,等. 顾及地物类别的倾斜摄影三维模型简化方法[J]. 测绘通报,2022(4):44-50.

[20] 李鹏,颜青松,曲英杰,等. 融合纹理信息的实景三维模型简化算法[J]. 测绘科学,2021,46(10):151-158,166.

[21] 李世俊,姜晓彤,唐慧. 保持细节特征的带纹理模型的高质量简化算法[J]. 计算机应用研究,2020,37(1):300-303,312.

[22] GARLAND M, HECKBERT P S. Simplifying surfaces with color and texture using quadric error metrics[C]. IEEE Conference on Information Visualization, 1998.

[23] ARIGE A, LAVRIC T, PREDA M, et al. Analysis of 3D CAD MESH simplification approaches within the framework of AR applications for industrial assembly lines [C]. Proceedings of the IEEE 30th International Symposium on Industrial Electronics. IEEE 2021:1-6.

作者简介

王彦海(通信作者),博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为输电线路三维建模方面。
E-mail:45245356@qq.com

张宇昊,硕士研究生,主要研究方向为三维模型轻量化方面。
E-mail:435776470@qq.com

李成,工程师,主要研究方向为输电线路运行与维护方面。
E-mail:470191690@qq.com

陈树平,助理工程师,主要研究方向为超高压输电线路运维管理方面。
E-mail:1340933938@qq.com

李恩阳,硕士研究生,主要研究方向为输电线路工程方面。
E-mail:1799284446@qq.com