引文格式：金河,刘涛,杜萍. 倾斜摄影测量数据轻量化处理工具设计与实现[J]. 地理空间信息, 2024, 22(10): 75-78. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2024.10.018

倾斜摄影测量数据轻量化处理工具设计与实现

金　河[1,2,3]，刘　涛[1,2,3*]，杜　萍[1,2,3]

（1. 兰州交通大学测绘与地理信息学院，甘肃　兰州 730070；2. 地理国情监测技术应用国家地方联合工程研究中心，甘肃　兰州 730070；
3. 甘肃省地理国情监测工程实验室，甘肃　兰州　730070 ）

摘　要：针对现有倾斜摄影测量数据轻量化软件处理功能单一、处理效果不佳等问题，设计并实现了一种轻量化处理工具，为用户提供模型简化、顶层合并、重置LOD参数和数据压缩等功能。利用无人机航拍数据进行实验，分别从轻量化处理前后的数据量、模型点平面高程精度和模型精细度进行分析。结果表明该工具处理后的倾斜摄影测量数据具有数据量小、加载速度快、渲染效率高、保真度较高等特点，说明该工具具有较好的处理能力，能够满足用户数据轻量化处理需求。

关键词：轻量化处理；倾斜摄影测量数据；模型简化；三维可视化

中图分类号：P231　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）10-0075-04

Design and Implementation of Lightweight Processing Tool of Oblique Photogrammetry Data

JIN He[1,2,3], LIU Tao[1,2,3], DU Ping[1,2,3]

(1. Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
2. National-Local Joint Engineering Research Center of Technologies and Applications for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730070, China;
3. Gansu Provincial Engineering Laboratory for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In response to the limitations of existing software for lightweight processing of oblique photogrammetric data, such as limited functionality and unsatisfactory processing results, we designed and implemented a lightweight processing tool, which could provide users with functionalities such as model simplification, top-level merging, LOD parameter resetting and data compression. We used unmanned aerial vehicle (UAV) aerial imagery data to conduct experimental evaluations, and analyzed the data volume, planimetric and elevation accuracy of model points and model detail before and after lightweight processing. The experimental results demonstrate that the processed data exhibits characteristics in reduced data volume, faster loading speed, improved rendering efficiency and higher fidelity, which can indicate that the tool has strong processing capabilities and meet the user’s requirements for lightweight data processing.

Key words: lightweight processing, oblique photogrammetry data, model simplification, 3D visualization

随着无人机倾斜摄影测量技术发展，以多角度采集高分辨率、大范围倾斜摄影测量数据已经成为建立精细化实景三维模型的首选方法[1]。目前，倾斜摄影测量技术广泛应用于实景三维中国建设中，为地理信息可视化和时空地理信息的应用提供支持[2-3]。然而，随着倾斜摄影模型精度越来越高[4]，数据量也越来越大，在Web端加载时速度缓慢，甚至出现卡顿现象。因此，对倾斜摄影测量数据进行轻量化处理以减少数据量、加快渲染速度具有十分重要的现实意义。

倾斜摄影测量数据轻量化一直是实景三维建设领域备受关注的问题。当前，用于倾斜摄影测量数据轻量化处理的软件众多，但都存在一定局限。有些软件只能进行数据压缩和顶层合并，有些则只能进行模型简化，还有一些商业软件在轻量化处理后仅能输出自有格式数据，限制了数据进一步应用。针对上述问题，本文设计并实现了一种倾斜摄影测量数据轻量化处理工具，为用户提供模型简化、重置LOD（Level of Detail）参数、顶层合并、数据压缩、数据格式转换等多种功能，以满足用户数据轻量化处理需求。

1　功能设计

倾斜摄影测量数据轻量化处理工具具有基本功能

收稿日期：2023-06-13。
项目来源：国家自然科学基金资助项目（42261076、42061060）。
第一作者简介：金河（1997—），硕士研究生，主要研究方向为实景三维，E-mail：jhcgnb@163.com。
通信作者：刘涛（1981—），博士，教授，博士生导师，主要研究方向为空间关系理论、GIS与遥感一体化、GIS和RS应用与开发，E-mail：ltaochina@foxmail.com。

和轻量化处理两大功能。基本功能包括打开工程、输出工程和数据格式转换；轻量化处理功能包括模型简化、重置LOD参数、顶层合并和数据压缩。

2 开发环境与平台

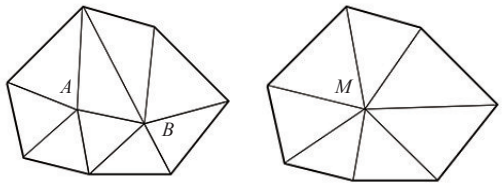
工具采用Qt+OSG3.6.5+OpenGL进行开发。Qt是一款跨平台的C++图形用户界面应用程序开发框架，基于Qt开发的应用程序能够在多种平台与系统下运行，可扩展性较强[5-6]。OSG（OpenSceneGraph）是一款基于C++和OpenGL的高性能开源三维图形引擎[7-8]，目前已广泛应用于虚拟仿真、虚拟现实和工程可视化等诸多领域。

3 功能实现

3.1 模型简化

常用简化算法包括几何删除、顶点重采样、区域合并法和网格细分等[9]。其中几何删除法中的边折叠法是一种增量式算法，能够保持原模型拓扑结构，快速、高效地生成不同精度模型，目前已成为应用最广泛的简化算法[10-12]。基于二次度量误差的边折叠算法[13]是在边折叠算法基础上提出来的，通过引入二次度量误差代价函数来实现简化，操作简便，效果良好。因此，本文使用该算法实现模型简化功能，算法描述如下：

1）边折叠操作如图1所示。将顶点 A 与 B 合并至误差最小顶点 M，与 AB 相连所有点都与新顶点 M 相连，同时对边折叠产生的空洞重新进行三角化。



a 边折叠操作前　　b 边折叠操作后

图1 边折叠算法

2）引入代价函数即二次度量误差，通过折叠后的点到原始网格中相邻面距离计算代价函数。

原始网格中顶点 M 具有 n 个相邻面，其每个平面的平面方程为 $P_i=[a_ib_ic_id_i]$，其中平面法向量为单位向量。顶点 M 为 $M=(M_x,M_y,M_z)$，可以将顶点 M 相对于网格误差定义为点到每个平面距离的平方和。原始网格中，因为所有点都在面上，误差都为0。定义顶点 M 的顶点误差为 ΔM，则顶点 M 的顶点误差为顶点 M 到其所有一阶邻域网格面片距离平方和，表达式如下：

$$\Delta M=\sum_{P\in P(M)}\left(P^{\mathrm{T}}M\right)^2 \tag{1}$$

$$\Delta M=M^T\left(\sum_{P\in P(M)}\boldsymbol{K}_p\right)M \tag{2}$$

式中，$\boldsymbol{K}_p$ 为求网格中任意点到平面 P 距离平方和矩阵；矩阵 $\boldsymbol{Q}$ 为与点 M 相邻的平面集合的 $\boldsymbol{K}_p$ 之和，如公式（3），这样每点都有属于自己的代价矩阵 $\boldsymbol{Q}$。

$$\Delta M=M^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}M \tag{3}$$

定义一条收缩边 AB，边 AB 折叠到一个新顶点 M_{new}，则 M_{new} 代价矩阵为 $\boldsymbol{Q}_{\mathrm{new}}=\boldsymbol{Q}_1+\boldsymbol{Q}_2$。折叠代价为 $\Delta(M_{\mathrm{new}})=M_{\mathrm{new}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}_{\mathrm{new}}M_{\mathrm{new}}$，展开得到折叠误差的二次项。

其中 M_{new} 位置能够使得折叠代价 $\Delta(M_{\mathrm{new}})$ 最小，分别对所得折叠误差的二次项中 x、y、z 求偏导然后确定 M_{new} 位置 $\dot{M}$。如果系数矩阵可逆，则 M_{new} 坐标 $\dot{M}$ 可直接求得。如果系数矩阵不可逆，则沿着 AB 边寻找最优位置，找不到则直接取 AB 中点。

3.2 顶层合并

由于倾斜摄影数据文件夹众多，每个文件夹都是一个小型金字塔。随着数据量增大，小金字塔数量也随之增多。在Web端，即使仅加载每个小金字塔最顶层数据，其数据量也非常庞大。因此可以对所有文件夹中最粗糙层次进行相邻合并，并向上抽取相应层数，以构建一个金字塔形式的数据结构，优化数据加载和处理。本文采用四叉树方式将所有顶层模型向上抽稀合并，将空间中的对象分配到对应节点中，快速对顶层模型进行合并。四叉树是一种常用于空间划分和索引的数据结构，将空间划分为多个层次，每个层次都对应着空间中更细致的划分。

顶层合并功能的步骤包括：①将所有顶层模型加载到内存中形成一个场景图，遍历场景图，并根据场景中所有对象的位置信息构建四叉树。②遍历四叉树时对每个节点进行判断，若节点下的模型数量小于预设阈值，则将该节点下所有模型合并，并将合并后的模型作为该节点的父节点。在最终得到的场景图中，部分顶层模型被抽稀合并成为较少四叉树叶节点，从而减少场景图的复杂度，能够在保持视觉效果的同时提高处理效率。

3.3 重置LOD参数

在倾斜摄影测量数据中，LOD（level of detail）是一种用于控制模型细节级别技术[14]。LOD节点属性中通常有一个控制LOD级别的参数，表示模型的细节级别。通过设置LOD参数来减少模型复杂度和数据量，能够在保证模型可视化效果的前提下有效提高渲染效率。如果一个节点的LOD级别参数超过了预设阈值，

则对该节点进行重置。阈值越小，模型细节越丰富，数据存储需求增大，渲染负荷增加；阈值越大，模型细节程度越低，渲染负荷减轻，数据存储需求减少。根据经验，本文将默认阈值设置为最小LOD范围的1/3，这样既能保证模型的细节，又能减轻渲染负担。同时，用户也可以根据自己工程情况设置阈值。

重置LOD参数的流程为：①遍历OSGB文件，对节点进行优先级排序，优先处理位于用户视野范围内、与主要场景相关的节点。②调用LOD节点的setRange()方法，只对需要重置的节点进行修改，而不是重新处理整个场景图。③将修改后的场景保存为OSGB文件。

3.4　数据压缩

倾斜摄影测量数据中顶点数量较多，每个顶点还包含纹理坐标和三角形关系等信息，数据量较大。在渲染过程中，需要将数据从文件读入内存，再从内存传输到GPU中，这一过程会消耗大量时间和带宽流量，降低渲染性能。因此，对顶点和纹理进行压缩是十分必要的。

存储在OSGB文件中的纹理支持ZLIB压缩算法[15]，ZLIB压缩算法根据OSGB文件中图片数据占用比例进行压缩，压缩率在5%~30%之间，本文采用默认的ZLIB算法进行纹理压缩。针对顶点压缩，本文采用压缩器节点和节点访问器方法。压缩器节点用于执行实际压缩操作，节点访问器则用于遍历场景图，使得所有节点都受益于顶点压缩优化。这2种方法不仅提高了整体压缩效率，而且能够在保持模型质量的同时显著降低数据存储和网络传输成本。

4　实验与分析

4.1　实验数据

为测试倾斜摄影测量数据轻量化处理工具的性能，本文选择甘肃省酒泉市瓜州县倾斜摄影测量数据进行实验，如图2所示。该实验数据为实地无人机航拍数据，文件大小为13.9 G。



图2　实验数据

4.2　实验结果与分析

4.2.1　数据量对比

本文从顶点数量、三角网格数量和文件大小等方面对轻量化处理前后数据进行对比，结果如表1所示。

表1　轻量化处理前后数据量对比

数据	顶点数量 / 个	三角网格数量 / 个	文件大小 / G
处理前	4 051 970	2 331 065	13.9
处理后	3 651 970	2 011 263	10.6
压缩比	0.098	0.137	0.237

4.2.2　数据加载时间对比

在相同硬件环境下，在Web端基于Cesium平台分别加载1∶100万、1∶10万和1∶1万轻量化处理前后的数据，并统计加载时间，如表2所示。

表2　轻量化处理前后Web端加载时间对比

比例尺	处理前加载时间/s	处理后加载时间/s
1∶100万	40.2	16
1∶10万	32.9	12.2
1∶1万	20.5	9
1∶5 000	13	6.5

4.2.3　平面及高程精度分析

在获取甘肃省酒泉市瓜州县倾斜摄影测量数据时，结合RTK在航拍区域进行实地测量，选取50多个特征明显、分布均匀的点，分别记录其平面坐标 X，Y 和高程 H。从轻量化处理后的数据中提取上述各点的对应点，记录其平面坐标 X'，Y' 及高程 H'，将 X、Y 和 H 作为真值，计算两者差值并计算差值的中误差来评定轻量化处理后模型的平面精度和高程精度[16]。图3为差值绝对值统计图，由图3可知，轻量化处理后特征点高程方向的差值普遍大于 X 方向和 Y 方向，X 方向和 Y 方向的差值绝对值较高程差值分布更为均匀，都低于0.175 m。同时计算得 X 方向中误差为0.062 m，Y 方向中误差为0.046 m，由 X，Y 方向的中误差计算出平面中误差为0.077 m。高程方向的差值绝对值分布较为离散，最大接近0.2 m，高程方向中误差为0.078 m。参照由国家测绘地理信息局发布的《三维地理信息模型数据产品规范》[17]，经本工具轻量化处理后的模型平面精度和高程精度均满足1级1∶500成图比例尺三维模型产品的规定，即平面中误差低于0.3 m，高程中误差低于0.5 m。

4.2.4　模型精细度对比

在《三维地理信息模型数据产品规范》中，对建筑物屋顶、地面道路和楼体等建筑要素模型精细度表现等级也进行了划分。本文从实验数据中选择建筑和窗户进行轻量化处理前后可视化对比，如图4所示。由图可知，该工具较好地保留了模型细节特征，在整体可视化效果方面，轻量化后的数据较处理前差别不大，建筑物窗户、屋顶等复杂结构清晰可见，不存在

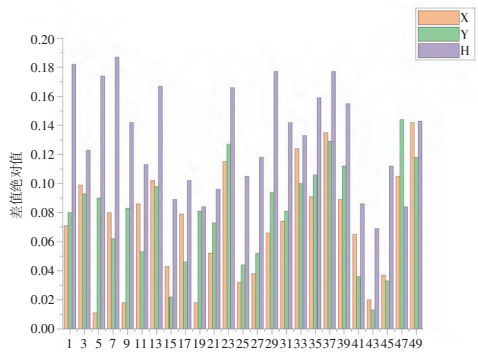
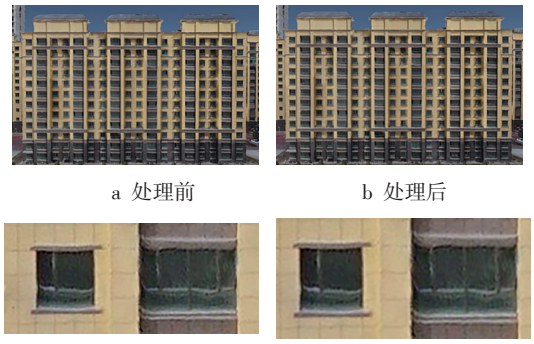


图3 差值绝对值统计图



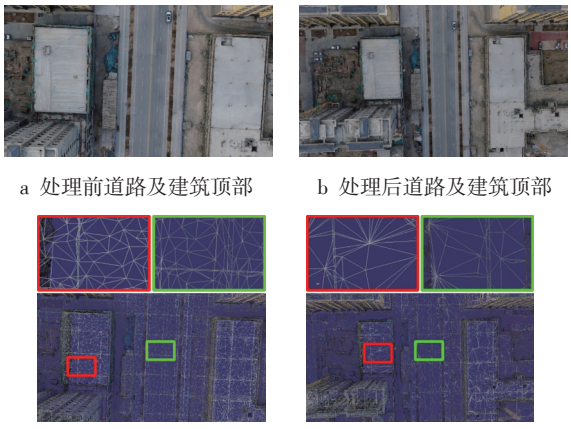
a 处理前 b 处理后

c 处理前窗 d 处理后窗户

图4 倾斜摄影测量数据处理前后对比

明显的形变和失真，符合《三维地理信息模型数据产品规范》中等级I的精细度规定。

除建筑物以外，本文对平坦、空旷等对细节要求不高的区域（如道路）也进行了可视化效果对比，其三角网格形式的局部放大图如图5c和5d所示。由图可知，轻量化处理后，模型整体完好无损，各地物要素完整，虽然网格和顶点数量明显减少，但模型细节特征得到保留，符合《三维地理信息模型数据产品规范》中等级I的精细度规定。



a 处理前道路及建筑顶部 b 处理后道路及建筑顶部

c 处理前模型三角网格 d 处理后模型三角网格

图5 平坦区域处理前后三角网格疏密对比

4.2.5 与商业软件对比

超图idesktop、图新地球和三维工厂是当前常用的倾斜摄影测量数据轻量化处理商用软件。超图idesktop在数据压缩和顶层合并功能上表现优秀，能够有效减少数据量和模型复杂度，其暂时未提供模型简化和重置LOD参数功能。图新地球实现了顶层合并，极大地降低了模型复杂度和存储成本，但是其当前不具备其他功能，无法完成更复杂的数据轻量化处理。三维工厂能够进行数据压缩和顶层合并，在数据轻量化方面表现较好，然而其目前没有提供模型简化和重置LOD参数功能，限制了更高层次优化和细节控制。相较于其他软件，本文工具功能全面，易于操作，对非专业用户也比较友好。

5 结 语

本文设计并实现了一个倾斜摄影测量数据轻量化处理工具，该工具具有模型简化、重置LOD参数、顶层合并、数据压缩等功能。论文选取甘肃省酒泉市瓜州县倾斜摄影测量数据进行实验，分别从数据量、加载时间、模型平面和高程精度、模型精细度等方面对工具实用性和有效性进行验证，同时进行了商业软件与本工具的对比。实验表明，该工具能够在保留模型细节的情况下减少数据量，提升渲染效率。

参考文献

[1] 刘佳嘉,魏琪. 面向复杂体型建筑物的无人机倾斜摄影航线规划研究[J].南京信息工程大学学报(自然科学版),2023(4):1-11

[2] 张帆,黄先锋,高云龙,等. 实景三维中国建设技术大纲(2021版)解读与思考[J]. 测绘地理信息,2021,46(6): 171-174

[3] 王文凯,黄昆学,李梦,等.倾斜摄影测量数据轻量化处理技术研究[J]. 测绘通报,2020(9):123-126

[4] 侯雪晴,邓文彬,李盎然. 倾斜摄影测量技术在露天矿监测中的应用[J]. 地理空间信息,2022,20(7):117-119

[5] 彭玲,祝润泽 ,戴昆林,等. 基于Qt的工业机器人语言编辑器设计[J]. 机床与液压,2023(4):1-6

[6] 陆文周. Qt5开发及实例[M].北京:电子工业出版社,2015

[7] 杨化斌,于振华,林中,等.OpenSceneGraph3.0 三维视景仿真技术开发详解[M].北京:国防工业出版社,2012

[8] 洪洲,徐颖,张正鹏. 基于OpenSceneGraph的大场景三维浏览系统设计与实现[J]. 矿山测量,2019,47(2):116-119

[9] Clark J H. Hierarchical Geometric Models for Visible Surface Algorithms[J]. Communications of the ACM, 1976, 19(10):547-554

[10] 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

（下转第95页）