引文格式：褚宁,米川. 一种基于无人机倾斜摄影的高精度单体三维建模方法[J]. 地理空间信息, 2023, 21(11): 9-14. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2023.11.003

一种基于无人机倾斜摄影的高精度单体三维建模方法

褚　宁[1]，米　川[1]
（1. 河南省地质局矿产资源勘查中心，河南 郑州 450006）

摘　要：传统倾斜摄影测量在同时获取正射和倾斜影像数据时，往往对建筑物低空立面纹理采集不够精细，且多数建筑物或地物模型毗连成片，不利于单独管理与使用。鉴于此，提出了一种高精度单体三维建模方法。首先结合建筑物几何特征和分辨率需求，研究三维环绕式航线设计方案，采集覆盖全局的高分辨率影像数据；然后将倾斜摄影模型的点云划分为虚拟网格，并将每个虚拟网格中的点云视为一个整体，通过设置高差提取建筑立面的点云，经点云分类处理，进一步提取轮廓信息；最后通过提取轮廓线相交三角形，实现单个建筑模型的三维构建。结果表明，该方法能自动、高效地单体化构建倾斜摄影建筑模型，对工程建设与发展具有一定的应用价值。

关键词：无人机；倾斜摄影测量；单体化模型；三维环绕；虚拟网格
中图分类号：P231　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）11-0009-06

High-precision Monomer 3D Modeling Method Based on UAV Oblique Photography

CHU Ning[1], MI Chuan[1]
(1. Mineral Resources Exploration Center of Henan Geological Bureau, Zhengzhou 450006, China)

Abstract: When traditional oblique photogrammetry obtains orthophoto and oblique image data at the same time, the collection of low altitude facade texture of buildings is often not fine enough, and most buildings or ground object models are adjacent, which is not conducive to separate management and use. In order to solve the above problems, we proposed a high-precision monomer 3D modeling method in this paper. Firstly, combining with the geometric characteristics and resolution requirements of buildings, we studied the design scheme of 3D surround route, and collected the global high-resolution image data. Then, we divided the point cloud of oblique photography model into virtual grid, and regarded the point cloud in each virtual grid as a whole. We extracted the point cloud of building facade by setting the height difference, and further extracted the contour information after the point cloud classification processing. Finally, we realized the 3D construction of a single building model by extracting the intersecting triangles of contour lines. The experimental result shows that this method can automatically and efficiently realize the monomer construction of oblique photography building model, and has a certain application value for engineering construction and development.

Key words: UAV, oblique photogrammetry, monomer model, 3D surround, virtual grid

随着航空航天和传感器技术的不断突破与发展，遥感数据采集难度逐渐降低，地理信息产品也在向多元方向发展。三维建筑模型作为新时代产物，已在数字城市、灾害评估、城市规划等领域发挥重要作用[1-3]。由于三维模型需准确表述建筑物的外部几何形状、纹理特征，增加了单体化精细建模的难度，因此快速获取建筑物完整的影像数据是决定建模质量的关键[4]。根据遥感数据类型，市场中存在3种三维模型构建方法：①利用二维矢量数据建模，将二维平面底图进行一定高度的立体拉伸，也可以添加侧面纹理信息，使得模型变得逼真，代表性软件包括3ds MAX、AutoCAD，该方法无法表现精准的建筑物细节特征，且纹理添加过程人为参与过多，耗时严重[5]；②利用激光雷达技术建模，通过激光雷达数据生产高精度建筑物白模后，采用纹理映射的方式完成三维模型生产，该方法的主要工作量是获取与匹配建筑物顶部和侧面的纹理信息，工作难度较大[6]；③利用倾斜摄影测量技术建模，以无人机平台搭载摄像机获取建筑物具有重叠范围的多视图航空影像数据，再通过摄影测量和机器视觉理论完成三维建模，相比而言，该方法成本低、效率高，但多数依靠条带航线飞行模式采集数据，无疑会漏掉建筑物侧面部分细节特征，导致模型局部失真，需后期修整以满足建模要求[7-8]。由此可见，无人机倾斜摄影测量技术是一种更便捷、高效的影像获取与模型构建手段，并已应用于定位服务、灾害评估和考古研究等多个领域[9]。近年来，国外已出

收稿日期：2022-03-23。
项目来源：2021年甘肃省高等学校创新基金资助项目（2021B-463）。
第一作者简介：褚宁（1983—），高级工程师，主要从事大地测量工作，E-mail：xiulingyang@yeah.net。

现了较多倾斜摄影构建三维城市的成功案例，并合理利用地面街景、人工采集影像修正了三维模型出现的纹理不清、近地结构不细等问题，但这无疑增加了数据获取的手段，导致工作量大大增加，且所构建的三维模型是包含建筑物和其他地物的连续体，对单个目标无法实施编辑与管理，在相关GIS领域上的应用比较受限[10]。国内一些学者提出了物理单体化和逻辑单体化的概念，并利用相关切割手段完成了单体目标剥离，但切割建筑模型需通过人机交互获取建筑轮廓线，然而现存的轮廓线提取方法受阴影、遮挡、植被等地物因素干扰较大[11]。

针对无人机倾斜摄影过程缺少采集近地高分辨率影像数据以及单个三维建筑模型无法自动构建的问题，本文结合建筑物结构特点提出了三维环绕式航线规划设计，一次性获取高–地–空多方位影像数据；在三维模型构建过程，研究了一种从三维模型中自动提取单个实体的方法，避免了手工绘制范围的复杂过程，提取的轮廓线精度更高，最终达到了单独管理三维建筑物模型的目的。

1 三维环绕航线规划设计

为最大限度地采集建筑物表面的纹理信息，本文提出了三维环绕航线规划设计方案，以单镜头的旋翼无人机为例，对建筑物实施倾斜摄影时采取环绕飞行的方式，以获取均匀的高分辨率影像数据。

1.1 方案设计

为合理规划无人机的飞行航线，首先对建筑物进行实地勘察，确定所能容纳建筑物及其附属设施的最小长方体大小，并设置矩形长宽高分别为 a、b、c，然后根据长方体几何参数确定其最小外接半球体（图1）。半径的计算公式为：

$$R_0=\frac{\sqrt{a^2+b^2+(2c)^2}}{2} \tag{1}$$

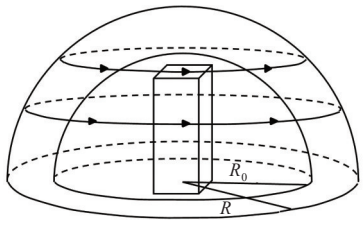


图1 建筑物外接半球体与航线规划

以最小外接半球体的外表面为投影基准，仿照对地采样标准确定摄影距离，设建筑物采样分辨率为GSD，相机焦距为 f，像元尺寸为 μ，则摄影距离可表示为：

$$D_0=\frac{f\times \mathrm{GSD}}{\mu} \tag{2}$$

由图1可知，无人机倾斜摄影航线布设面为 D_0 所构成的新的半球面，设半径为 R，则有：

$$R=R_0+D_0 \tag{3}$$

1.2 航线规划

在已知半球面几何尺寸、相机参数、重叠度和飞行速度后，即可计算得到相机倾斜角、航摄高度、飞行半径、摄影基线、曝光间隔等倾斜航线规划参数[12]。

首先，计算起始航线参数，为使建筑物近地面影像获取完整，以摄影光线刚好能达到最小外接球面与地面交叉处为临界状态，成像条件剖面图见图2。设相机镜头视角为 α，由正弦定理可获得主光轴线对应的角度值，再根据三角形内角和为180°，进而计算得到相机倾斜角度，即

$$\alpha_1=180^\circ-\arcsin\frac{R\times\sin\frac{\alpha}{2}}{R_0}-\frac{\alpha}{2} \tag{4}$$

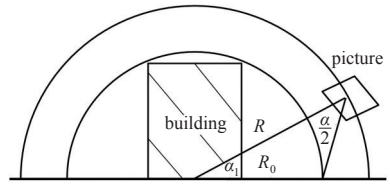


图2 倾斜摄影成像条件剖面图

由此，即可计算得到无人机的飞行高度 H_1 和环绕半径 R_1，即

$$H_1=R\times\sin\alpha_1 \tag{5}$$

$$R_1=R\times\cos\alpha_1 \tag{6}$$

设无人机影像航向像元数量为 P_x，重叠度为 O_x，则摄影基线长度为：

$$B_1=\frac{(1-O_x)\mu P_x D_0}{f} \tag{7}$$

在初始航线上，无人机沿半径为 R_1 的圆进行飞行（图3），当从一个曝光点飞到另一个曝光点时，可由摄影基线和航线半径计算得到摄影间隔角，即

$$\beta_1=2\arcsin\left(\frac{B_1}{2R_1}\right) \tag{8}$$

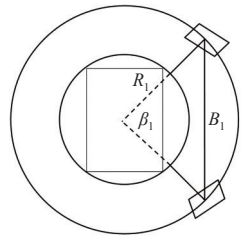


图3 倾斜摄影航线俯视图

无人机以近似匀速状态进行航摄时，为满足重叠度要求，设最大飞行速度为 $V_{\max}$，则摄影间隔为：

$$t=\frac{\pi\times R_1\times\beta_1}{V_{\max}\times 180^{\circ}} \tag{9}$$

然后，计算其余航线参数，在上一条环形航线的基础上，通过设置旁向重叠度确定相关的航线信息。相机倾斜角度的计算公式为：

$$\alpha_n=\alpha_{n-1}+\alpha_1(1-O_y) \tag{10}$$

式中，α_n、α_{n-1}分别为当前航线和上一条航线的倾斜角；O_y为旁向重叠度。

计算得到其余任一航线倾斜角后，即可按照上述步骤计算航高、环绕半径、基线长度、摄影间隔等其他航线参数，直到建筑物顶端影像采集完毕、飞行结束。飞行结束的数学判断标准为：

$$H_n>c \tag{11}$$

$$R_n<\sqrt{R^2-c^2} \tag{12}$$

2　建筑模型单体化实现方法

2.1　单体化建模流程

本文单体化建模方法分为提取建筑物轮廓和通过切割三角形网格实现单个实体两个部分。为提取建筑物轮廓，将倾斜摄影模型中提取的点云数据划分为固定大小的虚拟网格，计算每个网格中点云的高差，通过设置高差阈值移除地面和植被；然后对点云数据进行聚类，并根据聚类点云数据绘制建筑物边界点云；再由构建的建筑轮廓确定切割多边形，切割多边形的边界框与倾斜摄影模型第一级层次细节模型（LOD）的边界框相交，并提取相交模型，相交模型的三角形分为内部、外部和与切割多边形相交3个部分，内部合并为单个模型，外部修改为原始模型文件；最后遍历倾斜摄影模型所有LOD，即可实现单个实体模型的构建。

2.2　基于倾斜摄影模型提取建筑物轮廓

2.2.1　虚拟网格生成

点云在特征明显的区域密集，不均匀分布的点云将影响建筑轮廓的提取[13]。为提高建筑轮廓的计算效率和精度，需构造点云的邻域关系。本文根据点云构建虚拟网格，以便于后续分析和处理。输入点云的边界框，获取点云区域的最小点坐标$(x_{\min},y_{\min},z_{\min})$和最大点坐标$(x_{\max},y_{\max},z_{\max})$，则整个网格的行数$r$和列数$c$为：

$$\begin{cases}r=\dfrac{(x_{\max}-x_{\min})}{w}\\[2ex] c=\dfrac{(y_{\max}-y_{\min})}{w}\end{cases} \tag{13}$$

式中，w为考虑点云密度的虚拟栅格大小。

由此可见，所有点云数据最终被划分为几个大小相同的网格，每个网格中包含的点云数据由网格的中心点云表示，即可解决点云数据量大、分布不均匀的问题。

2.2.2　基于高差的建筑物立面点云提取

建筑物与地面之间的最大差异反映在高程上，在倾斜摄影模型中平面相邻点之间的高程变化不明显，但受建筑物墙体的影响，建筑边缘的高程会出现明显变化[14]，因此可设置高差阈值，遍历所有网格，从网格中删除高差低于阈值的点云，即可消除地面点、建筑物顶面和大部分植被等平面点云，进而保留建筑物的立面点云数据。

2.2.3　点云分类和轮廓生成

现有点云分类算法包括DBSCAN、K-means等[15]，本文主要采用基于密度的DBSCAN聚类方法，将密度足够高的区域划分为多个聚类。与K-means不同，该方法无需事先知道簇的数量，且可识别噪声点，利用Alpha Shapes算法通过分类点云构建每个建筑物的外部轮廓。

2.3　基于切割三角网获取单个实体

2.3.1　三角面的交叉检测与分类

倾斜摄影三维模型含有大量三角形，若每个都与建筑物轮廓形成的切割多边形相交，则处理效率将受很大影响[16]。因此，本文的处理流程为：①确定多边形边界框和模型边界框之间的相交关系；②识别边界框与切割多边形边界框相交的模型；③检测三角面的相交情况；④将三角面分为区域内、区域外和相交部分3类；⑤切割相交的三角面，并将结果分为区域内和区域外两类，删除区域外部分，保留区域内部分为单个实体模型。

2.3.2　切割三角网

切割线与三角形的关系可分三角形与切割线相切、相交以及三角形与两条切割线相交3种情况，具体情况见图4、5。切割过程遵循切割最小几何元素的原则，以确保后续仍满足几何特征。由于文本使用的倾斜摄影模型包含三角形切片，切割最小单元后，三角形切片之间的拓扑关系仍应保持不变。

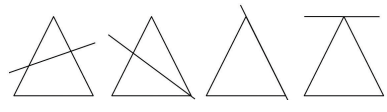


图4　单条切割线切割三角形

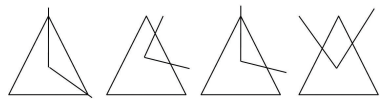


图5　两条切割线切割三角形

2.3.3　单体三维模型构建

由于通过切割三角形得到的单个实体是物理实

体，因此需增加顶点和三角形数量来重新组建三维模型中的数据。首先在切割过程中生成的相交点将成为三维模型的新顶点，且单个三角形切片将被划分为多个切片，为达到三维模型显示的效果，需计算新添加顶点的纹理坐标；然后从模型中删除相交的三角形切片，并将新生成的三角形切片分为区域外和区域内两类，区域内的所有三角形将融合为单个模型，区域外的三角形融合到原始场景中；最后从原始场景中移除单个模型，倾斜摄影模型则在不影响整体显示效果的情况下实现了单个实体建模。

2.4 精度控制方法

在三维模型构建过程中，为解决传统辅助光束法平差精度低的问题，一般通过布设一定数量的地面控制点参与空中三角测量，不仅会增加外业工作量，而且对于无法布控的场景，难以实现高精度对地观测。本文充分考虑差分GNSS系统安装产生的偏心误差以及由飞控指令和相机曝光时间不一致而导致的延迟误差，在传统平差模型的基础上，构建顾及系统误差补偿的辅助平差模型，即

$$\begin{bmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\mathrm{GNSS}} + \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\mathrm{V}} \Delta t - \boldsymbol{R} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix}_{\mathrm{GNSS}} \right) \tag{14}$$

式中，$[X \quad Y \quad Z]_{\mathrm{V}}^{\mathrm{T}}$ 为曝光时无人机在3个坐标方向的速度矢量，由GNSS系统测得；$[X \quad Y \quad Z]_{\mathrm{GNSS}}^{\mathrm{T}}$ 为系统记录的GNSS天线坐标；$[x_0 \quad y_0 \quad z_0]^{\mathrm{T}}$ 为GNSS天线中心在像空间坐标系下的坐标。

以曝光时刻摄站的真实坐标为观测值，进一步构建观测方程，则有：

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} = \lambda \boldsymbol{R}^{\mathrm{T}} \left(\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} - \left(\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\mathrm{GNSS}} + \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\mathrm{V}} \Delta t - \boldsymbol{R} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix}_{\mathrm{GNSS}} \right) \right) \tag{15}$$

式中，$[x \quad y \quad -f]^{\mathrm{T}}$ 为地面目标成像点在像空间坐标系下的坐标；$[X \quad Y \quad Z]^{\mathrm{T}}$ 为像点在地面辅助坐标系下的坐标；λ 为比例系数；$\boldsymbol{R}$ 为影像3个角元素构成的投影矩阵。将上述观测方程进行泰勒展开，取一次项即可得到标准误差方程，再利用最小二乘原理完成迭代计算，进而提升模型绝对和相对精度。

3 实验与结果分析

3.1 数据获取

本文以大疆精灵4 RTK旋翼无人机为航摄平台，相机焦距为8 mm，影像分辨率为4 864×3 648，对某高层建筑物实施实景三维建模实验。首先实地勘察了解建筑物基本几何信息，确定最小外接长方体尺寸和底面几何中心位置；然后为满足成像和建模精度要求，设置影像空间分辨率为0.15 cm，航向重叠度为80%、旁向重叠度为60%，并结合三维环绕航线规划模型，完成飞行参数计算，无人机按照设计航线完成建筑物倾斜影像获取；最后将影像和POS数据导入Context Capture Center软件中，经数据预处理、空中三角测量、密集匹配等流程即可获取建筑物密集点云和TIN网，并将纹理映射到对应的白模上，生产OSGB数据格式的三维模型，其中OSGB模型文件存储多源数据信息，如模型的顶点坐标、纹理坐标和纹理图片，模型的顶点坐标和三角测量数据易于提取，从而便于后续模型处理。

3.2 单体模型构建

3.2.1 建筑物轮廓提取结果

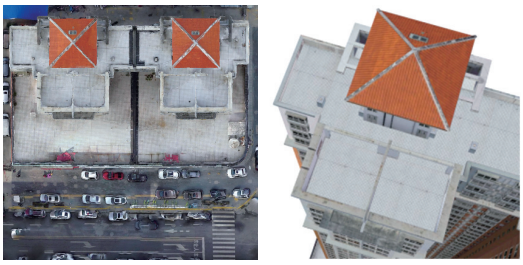
从原始数据中提取顶点信息作为初始点云，再通过设置虚拟网格和高差阈值消除地面和植被点。根据经验，独立建筑轮廓之间不存在交叉和包含[17]，因此可消除受建筑物内部特征信息影响的聚类结果。根据轮廓线多边形的形状和面积，可消除其他干涉簇。不同网格大小和高差阈值会对点云提取效果产生很大影响。本文通过控制变量法研究高差阈值和网格大小对点云提取效果的影响，提取效果见表1，可以看出，将高差阈值设置为18 m、网格大小设置为1 m，可提取轮廓清晰的点云。

采用DBSCAN算法分割上述点云，以Alpha形状为每个点云簇构造外围轮廓线，将建筑物轮廓信息与

表1 网格大小和高程差阈值对点云提取效果的影响

高差阈值	网格尺寸		
	0.5 m	1 m	2 m
12 m	许多噪音点云	许多噪音点云	点云太稀疏
15 m	许多噪音点云	许多噪音点云	点云太稀疏
18 m	点云密度过大，但轮廓点云清晰	点云密度适中，轮廓清晰	点云太稀疏
21 m	轮廓点云明显缺失	轮廓点云明显缺失	轮廓点云明显缺失
24 m	轮廓点云明显缺失	轮廓点云明显缺失	轮廓点云明显缺失

每个虚拟网格的高程差信息相结合，绘制建筑物边界框；并将其叠加在倾斜摄影三维模型上，效果见图6。



a 全局边界框　　b 局部边界框

图6　基于轮廓线绘制边界框

3.2.2　基于倾斜摄影模型的单体模型实现

利用上述方法可有效获取建筑物的轮廓线，以此作为多边形切割倾斜摄影模型，将单个建筑模型从原始场景中分离出来，实现单体建模。由图7可知，本文方法所生产的单体模型较规整，且实现了单体模型从原始场景中的分离。



a 倾斜摄影模型　　b 单体模型

图7　单体模型分离效果

3.3　质量分析

为验证本文方法在三维单体建模过程中的优势，分别从模型完整性、细节特征和数学精度3个方面进行质量评定[18]。从视觉角度对单体模型进行细节浏览，其覆盖了建筑物整体结构，不存在纹理缺失现象，且色调均匀（图8），说明本文提出的三维环绕式倾斜摄影测量解决了高、低空高分辨率影像获取问题，提升了建筑物纹理的完整性。

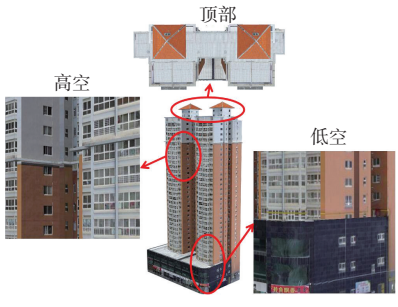
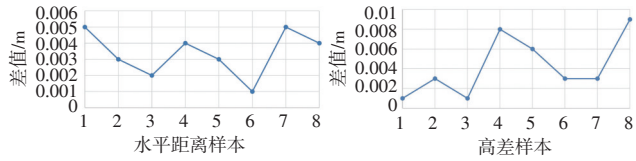


图8　建筑物单体模型细节展示

在单体建筑物模型管理过程中，保证完整性和纹理特征准确的同时，模型的数学精度也是关注的焦点[19]。为验证模型的量测精度，本文采用内、外业量测对比的方式进行分析，首先将模型与实际建筑物按比例对应，外业实测得到16个特征点的绝对坐标以及两点间的水平距离和高差；然后内业在模型中拾取相同的点位，读取对应的坐标、水平距离和高差值；最后将两组数据进行差值计算，获取相对、绝对精度统计结果（图9、10）。



a 水平距离　　b 高差

图9　建筑物单体模型相对精度统计结果

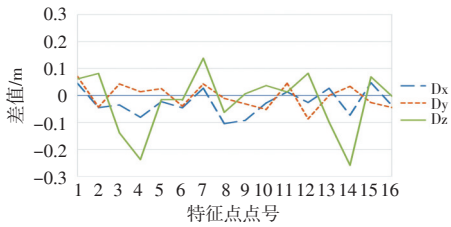
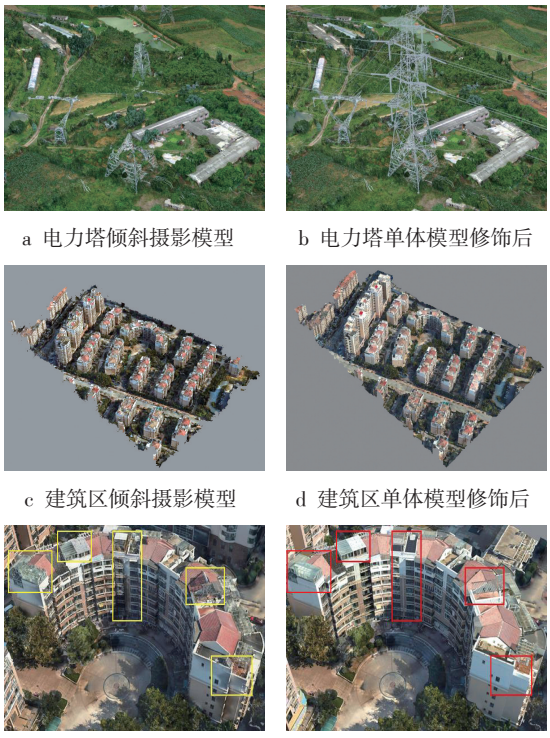


图10　建筑物单体模型绝对精度统计结果

由相对精度结果可知，水平距离、高差差值的平均值分别为0.003 m、0.004 m，标准差分别为0.001 m、0.003 m。由绝对精度结果可知，X、Y、Z方向的坐标差值平均值分别为−0.027 m、−0.004 m和−0.022 m，标准差分别为0.054 m、0.043 m和0.112 m。若以实测值为真值，计算得到单体模型的水平距离量测中误差为±0.004 m、高差量测中误差为±0.005 m；平面中误差为±0.069 m，高程中误差为±0.112 m；点位中误差为±0.131 m。因此，本文方法所采取的三维环绕式航线规划设计和虚拟网格构建策略能较好地实现建筑物单体模型构建，且表述完整、纹理详细，模型的数学精度满足规范设计要求，有利于工程项目管理和进一步应用。

3.4　其他实验结果

为进一步验证本文方法的普适性，在另外3个测区进行了飞行和建模实验，改进效果见图11，可以看出，倾斜摄影测量建模受影像采集和算法限制，模型细节表述粗略，图11a中电力塔甚至出现了大部分丢失，影响后期模型的分析与利用；经单体模型修饰后，电力塔、建筑区和建筑物的三维模型细节显著、纹理清晰、质量可靠，但对于低楼层，尤其是城市和农村被树木遮挡的低楼层、城中村等，无人机倾斜摄影受到遮挡，严重影响三维模型精度，需进一步探索其他技术手段补充完善。



a 电力塔倾斜摄影模型　b 电力塔单体模型修饰后

c 建筑区倾斜摄影模型　d 建筑区单体模型修饰后

e 建筑物倾斜摄影模型　f 建筑物单体模型修饰后

图11　本文方法在其他测区的实验结果

4 结 语

为解决高层建筑物单体建模过程存在的影像采集不精细、建筑物模型与地物毗连成片的问题，本文分别从影像获取和模型构建两个方面提出了解决办法。在影像获取过程设计了三维环绕式航线规划方案，提升了建筑物由近地到高空影像的分辨率，使得三维模型精度更高、完整性更好；针对生产的OSGB全景三维模型中存储的多源信息，采取虚拟网格划分、高差设定、轮廓提取等手段将单个建筑模型从原始场景中分离出来，实现了单体模型的构建。实验表明，单体建模方法避免了大部分人为干预，效率较高，所构建的单体模型具有较好的完整性和纹理特征，几何精度达到了工程应用标准。

参考文献

[1] Sanz-Ablanedo E, Chandler J, Rodriguez-Perez J, et al. Accuracy of Unmanned Aerial Vehicle(UAV) and SfM Photogrammetry Survey as a Function of the Number and Location of Ground Control Points Used[J]. Remote Sensing, 2018, 10(10):1 606

[2] Su M S, Hwang W L, Cheng K Y. Analysis on Multiresolution Mosaic Images[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(7):952-959

[3] Turner D, Lucieer A, Wallace L. Direct Georeferencing of Ultrahigh-resolution UAV Imagery[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(5): 2 738-2 745

[4] 李鹏, 马建芳. 融合点云及倾斜摄影三维单体化建模技术研究[J]. 测绘通报, 2021(增刊1):29-32

[5] 苏晓刚. 无人机倾斜摄影测量的不动产三维单体化建模及应用研究[D]. 淮南:安徽理工大学, 2020

[6] 崔颖, 黄鹤, 李毅, 等. 基于多基线近景摄影测量方法的城市建筑物立面图构建[J]. 北京测绘, 2020, 34(12): 1 746-1 749

[7] Zheng X, Wang F, Li Z. A Multi-UAV Cooperative Route Planning Methodology for 3D Fine-resolution Building Model Reconstruction[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2018(146):483-494

[8] 聂赞, 文琳, 黄山, 等. 倾斜摄影的单体化建模研究[J]. 地理空间信息, 2019, 17(3):113-114

[9] 娄宁, 马健, 杨永崇, 等. 倾斜摄影的单体精细化三维建模技术[J]. 遥感信息, 2020, 35(6):44-48

[10] 苗志成, 杨永崇, 于庆和, 等. 贴近摄影测量在单体建筑物精细化建模中的应用[J]. 遥感信息, 2021, 36(5):107-113

[11] 刘春, 曾劲涛, 张书航, 等. 面向单体异形建筑的无人机单相机实景三维建模[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(4):550-556

[12] 王涛, 阳利永, 曾举, 等. 不同航线规划模式下单体建筑物三维建模对比研究[J]. 测绘通报, 2019(增刊1):298-302

[13] Turner D, Lucieer A, Watson C. An Automated Technique for Generating Georectified Mosaics from Ultra-high Resolution Unmanned Aerial Vehicle(UAV) Imagery, Based on Structure from Motion(SfM) Point Clouds[J]. Remote Sensing, 2012, 4(5):1 392-1 410

[14] Remondino F, Barazzetti L, Nex F, et al. UAV Photogrammetry for Mapping and 3D Modeling-current Status and Future Perspectives[J]. International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2011, 38(C22):25-31

[15] 霍志敏, 史云飞, 张玲玲, 等. 建筑物群集对象的改进型棱柱模型表达[J]. 测绘科学, 2021, 46(10):137-144

[16] 卢露媛, 颜青松, 曲英杰, 等. 多视立体网格的城市建筑物三维建模[J]. 测绘科学, 2021, 46(8):112-119

[17] 张数, 杨德宏. 数字近景摄影测量的二维影像三维建模的关键技术应用[J]. 软件, 2018, 39(2):133-138

[18] 周玉秀, 申忠昌, 王永菊. 无人机低空摄影测量数据处理及应用探讨[J]. 青海大学学报, 2021, 39(3):88-92

[19] 韦程文. 大区域无人机影像全自动拼接的三维重建[J]. 经纬天地, 2021(1):40-42

[20] 田方, 史佳豪, 李昊旖. 无人机航测倾斜摄影测量三维地理信息建模分析[J]. 能源与环保, 2021, 43(5):79-83