引文格式:郭庆胜,童莹,魏智威,等.使用正对投影的建筑物群毗邻化新算法[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(10):2086-2096.DOI:10.13203/j.whugis20230232

Citation:GUO Qingsheng, TONG Ying, WEI Zhiwei, et al.A New Algorithm for Building Groups Agglomeration with Facing Projection[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2025,50(10):2086-2096.DOI:10.13203/j.whugis20230232

使用正对投影的建筑物群毗邻化新算法

郭庆胜[1] 童 莹[1] 魏智威[2,3] 王 勇[4] 刘 洋[1]

1 武汉大学资源与环境科学学院,湖北 武汉,430079

2 中国科学院空天信息创新研究院,北京,100830

3 人工智能与数字经济广东省实验室(深圳),广东 深圳,518060

4 中国测绘科学研究院,北京,100036

摘 要:毗邻化是建筑物群综合的一个重要算子,既能解决邻近建筑物之间的空间视觉冲突,还能保持建筑物的独立性。在自动判别建筑物之间正对投影线段的基础上,提出了一种顾及建筑物群整体直角分布特征的建筑物群毗邻化算法。首先,借助原始建筑物群数据的规则格网索引从原始数据中快速搜索符合毗邻化条件的所有正对投影线段;然后,基于建筑物原始直角边相关联的正对投影线段集合生成毗邻主方向线;最后,按照正对投影线段的端点与已生成的毗邻主方向线的不同关联程度,生成毗邻线上的新顶点,并调整建筑物图形轮廓上与这些新顶点直接相关的原始顶点。该方法用成对的正对投影线段可以直接生成建筑物之间的毗邻线,借助毗邻主方向线可以较好地保持毗邻化后的建筑物群整体直角分布特征。采用中国广东省广州市部分区域的大比例尺建筑物群作为实验数据,对不同类型建筑物群进行了毗邻化,分析了建筑物群毗邻化前后的5个建筑物空间特征指标的变化情况,实验结果验证了所提算法的有效性和适用性。

关键词:建筑物群;毗邻化;正对投影线段;制图综合

中图分类号:P283 **文献标识码**:A **收稿日期**:2023-12-21

DOI:10.13203/j.whugis20230232 **文章编号**:1671-8860(2025)10-2086-11

A New Algorithm for Building Groups Agglomeration with Facing Projection

GUO Qingsheng[1] *TONG Ying*[1] *WEI Zhiwei*[2,3] *WANG Yong*[4] *LIU Yang*[1]

1 School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Aerospace Information Research Institute, Chinese Academic of Sciences, Beijing 100830, China

3 Guangdong Laboratory of Artificial Intelligence and Digital Economy (Shenzhen), Shenzhen 518060, China

4 Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100036, China

Abstract: **Objectives**: Agglomeration is an important operator for map generalization of building groups, which can solve the visual conflicts between building symbols and maintain the independence of individual buildings simultaneously. However, the existing methods for agglomeration are difficult to maintain the orthogonality and spatial distribution of building groups. We propose an algorithm for building groups agglomeration considering the overall orthogonal features of building polygons based on identifying the facing projection segments between building polygons automatically. **Methods**: First, all facing projection segments meeting the criteria of agglomeration can be found rapidly using the regular grid index of original data. Then, the agglomeration main direction lines are generated based on sets of facing projection segments associated with orthogonal segments of original building polygons. Finally, according to the degree of association between the vertices of the facing projection segments and the generated agglomeration main direction lines, the new vertices on the agglomeration lines are generated. And the original vertices of building polygons related with these new vertices must be adjusted. **Results**: The building footprints data at large-scale in a part of

基金项目:国家自然科学基金(41871378)。

第一作者:郭庆胜,博士,教授,研究方向为地图制图综合、地理信息智能化处理与可视化。guoqingsheng@whu.edu.cn

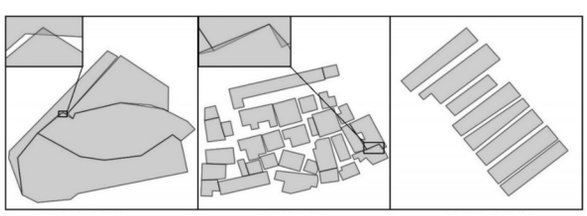
Guangzhou city, Guangdong Province, China is the experimental data. The algorithm of building groups agglomeration has been implemented for different kinds of building groups. The change of five indices describing spatial characteristics between before and after the agglomeration of building groups in this experiment has been analyzed. **Conclusions**: The experimental results have verified the effectiveness and applicability of the proposed algorithm . This proposed algorithm can directly generate the agglomeration lines between building polygons directly by means of paired facing projection segments, while the overall orthogonal features of building polygons agglomerated can be preserved based on agglomeration main direction lines.

Key words: building groups; agglomeration; facing projection segments; cartographic generalization

面群的地图制图综合算子有多种,主要包括化简、移位、合并、典型化和毗邻化等[1-6]。其中,毗邻化算子是通过收缩面状图形之间的狭长间隙为线,使被其分割的面状要素成为毗邻的面要素的一种制图综合操作[5,7]。毗邻化算子能有效消除面状要素之间太过狭窄的开放区域,并保持面状要素的独立性、形状特征与空间分布特征[5,8]。在面群毗邻化算法中,学者们往往借助约束性Delaunay三角网识别面状目标之间的狭长区域,并用该狭长区域的骨架线生成毗邻线[5,8],类似算法也可以用于邻近面状水系要素的综合缩编[9-10],以及河流、道路等狭长图斑的分割处理等[8,11]。

建筑物是一种典型人造地物,地图上的建筑物在图形综合后其轮廓线应尽量保持边的平直和整体直角分布特征[12-14],建筑物群毗邻化亦有同样的要求。此外,在大比例尺地形图中存在不同空间特征的建筑物群,例如,图1(a)是一个复合建筑物群,图1(b)是一个典型的城中村类建筑物群,图1(c)是排列较规则的独立建筑物群,建筑物群毗邻化算子也需兼顾这些不同类型建筑物群的空间分布特征[15]。并且,如果原始建筑物矢量图形数据是由非专业人士采集的众包地理信息,建筑物平面多边形之间就可能存在如图1(a)和图1(b)左上角的放大图所示的相交关系[16],建筑物群毗邻化算子也需处理这类情况。

现有的面群毗邻化算法不能完全满足建筑物群毗邻化的制图综合需求。用一个示例图来说明这个问题,图2(a)是一个原始建筑物群和狭长区域的约束性Delaunay三角网及其骨架线,图2(b)是使用基于约束性Delaunay三角网的面群毗邻化方法[5,8]处理后的结果,红色圆圈区域说明了该方法无法很好地保持建筑物图形轮廓直角边的平直,但是,按照建筑物群毗邻化的制图综合要求,图2(c)才是图2(a)建筑物群毗邻化的理想效果。另外,现有基于约束性Delaunay三角网的毗邻化方法也没有考虑像图1(a)和图1(b)中出现的建筑物图形目标之间的相交现象。所以本文试图提出一个建筑物群毗邻化新算法,用面状建筑物图形之间狭长区域两侧边界共线特性实现建筑物群毗邻化,基于成对正对投影线段生成面状建筑物图形之间的毗邻线,并借助毗邻主方向线尽量保持毗邻化后的面状建筑物图形轮廓特征。



(a) 复合建筑物群　(b) 城中村类建筑物群　(c) 独立建筑物群

图1　不同类型的建筑物群

Fig. 1　Building Groups with Different Types

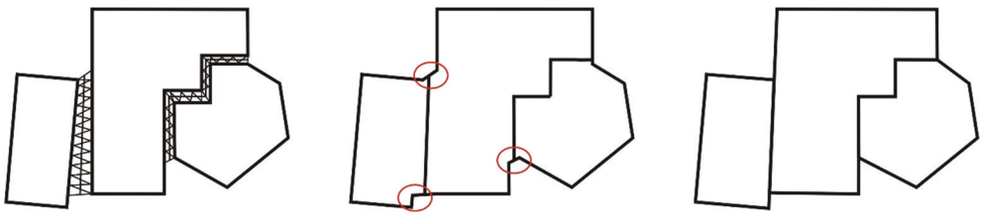
1　建筑物群毗邻化的基本思想

1.1　建筑物群毗邻化的相关概念

建筑物群毗邻化是通过收缩建筑物图形之间的狭长间隙为线,使被其分割的建筑物图形成为邻接关系。为了描述本文所提的建筑物群毗邻化算法,一些概念定义如下:

1)正对投影线段:指一条直线段正对投影[17]到另一条直线段的重叠部分,如图3中的A_2P_2和P_1B_2就是两条正对投影线段,A_2P_2是B_1B_2在A_1A_2上的正对投影,P_1B_2是A_1A_2在B_1B_2上的正对投影。

2)一组正对投影线段:指两条直线段相互正对投影后所得到的两条正对投影线段,如图3中的A_2P_2和P_1B_2。



(a) 狭长区域的三角网 (b) 现有方法毗邻化结果 (c) 理想的建筑物群毗邻化结果

图2 面群毗邻化方法的应用

Fig. 2 Application of Polygon Groups Agglomeration

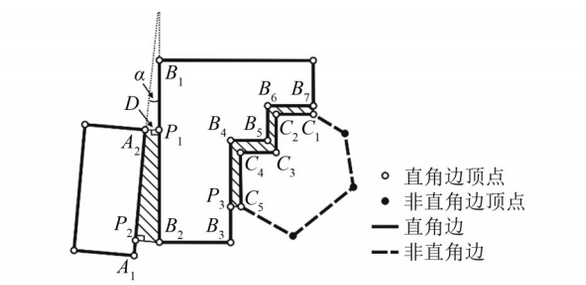


图3 建筑物群毗邻化的示意图

Fig. 3 Diagram of Building Groups Agglomeration

3)正对点:指正对投影线段的端点,该端点既可以是垂足(见图3中的P_1和P_2),也可以是原始直线段的端点(见图3中的A_2和B_2)。

4)一组正对点:指一组正对投影线段中互为正对投影的两个正对点,这两个正对点可以由一个原始端点和一个垂足点组成(见图3中的A_2和P_1),若一个垂足点与其所在同一条直线段上的某一个端点之间的距离小于地图上两个建筑物之间的最小距离阈值,则用该端点直接代替这个垂足点,例如,图3中的端点B_4就可以代替一个垂足点。

5)正对点集:点之间距离小于地图上两个建筑物之间的最小距离阈值的多个正对点组成一个正对点集,如图4所示,每个虚线圆圈内的多个正对点就是一个正对点集。

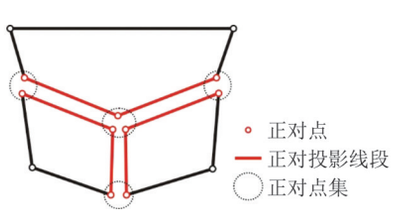


图4 正对点集示意图

Fig. 4 Diagram of Facing Point Sets

6)直角边:指一个建筑物轮廓线上两条顺序相邻直线段之间转角为$90°\pm\alpha$或$270°\pm\alpha$($\alpha=10°$)的这两条线段(见图3中的实线),该建筑物轮廓线上其他的线段为非直角边(见图3中的虚线)。

7)直角边顶点:指直角边上的两个端点或直角边上插入的垂足点(见图3中的空心点),建筑物轮廓线上的其余顶点为非直角边顶点(见图3中的实心点)。

8)毗邻主方向线:指建筑物之间一组正对投影线段所围成的投影区域的主方位线,或呈直线排列的多组正对投影线段分别所围成的投影区域的主方位线,用于控制建筑物群毗邻化中的直角边共线。一条毗邻主方向线可以由一组正对投影线段中两组正对点的中点确定,见图5(a)中的直线P_1P_2、图5(c)中的直线P_3P_4和直线P_5P_6;一条毗邻主方向线也可以由多组正对投影线段中距离最远的两组正对点的中点确定,见图5(b)中的直线P_1P_2和图5(c)中的直线P_1P_2。毗邻主方向线不是一个狭长区域的毗邻区主方向线。

9)顺序连接的正对投影线段集合:指一个建筑物轮廓上顺序连接的正对投影线段集合,集合中两个相邻正对投影线段端点之间的距离应小于地图上两个建筑物之间的最小距离阈值,见图3中的折线$P_3B_4B_5B_6B_7$和折线$C_1C_2C_3C_4C_5$。

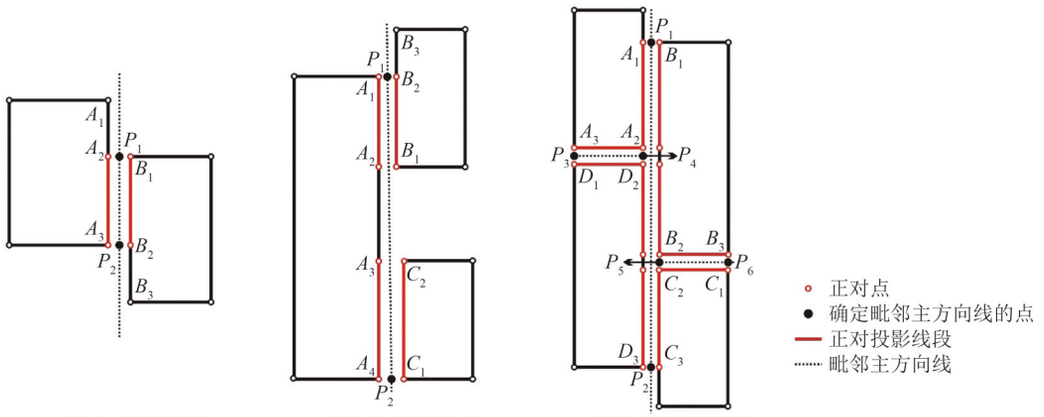
10)邻近度:指正对投影线段(或顺序连接的正对投影线段集合)与其所在建筑物轮廓线上的原始直线段(或集合)的长度比值,图3中A_2P_2的邻近度是A_2P_2与A_1A_2长度的比值,$P_3B_4B_5B_6B_7$的邻近度是$P_3B_4B_5B_6B_7$与$B_3B_4B_5B_6B_7$长度的比值。

1.2 建筑物群毗邻化中正对投影线段应满足的条件

正对投影线段是建筑物群毗邻化共线处理的基本单元,每组正对投影线段需满足以下条件:

1)被毗邻化的建筑物多边形面积应该大于地图上单个建筑物的最小面积阈值(简称为最小面积阈值)T_1。

2)每条正对投影线段的长度应该大于地图上建筑物轮廓线上直线段的最小长度阈值(简称为最小长度阈值)T_2,或顺序连接的多条正对投



(a) 一组正对投影线段　(b) 两组正对投影线段　(c) 多组正对投影线段

图 5　不同条件下毗邻主方向线的生成

Fig. 5　Generation of Main Direction Lines Under Different Conditions

影线段总长度大于 T_2。

3)每组正对投影线段中两条直线段之间的最小距离 D(见图 3)应该小于地图上两个建筑物之间的最小距离阈值(简称为最小距离阈值)T_3,并且每组正对点之间的距离应该小于 T_3。

4)每条正对投影线段或顺序连接的多条正对投影线段的邻近度应大于邻近度阈值 T_4。

5)每组正对投影线段中两条直线段之间的夹角 α(见图 3)应小于方向差异阈值 T_5。

6)每组正对投影线段中两条直线段之间无其他的建筑物轮廓线。

1.3　建筑物群毗邻化的基本流程

在本文所提出的建筑物群毗邻化方法中,采用统一正对点集位置的方法处理正对投影线段的共线问题,借助毗邻主方向线辅助调整建筑物轮廓线上的直角边,建筑物群毗邻化的数据处理流程见图 6,主要步骤如下:

1)建立建筑物群空间数据集合的规则格网索引[18-19],索引中需要记录所有直线段落入的网格身份标识号(identity document,ID)和所有网格通过的直线段 ID。

2)依据建筑物之间的最小距离对建筑物群进行聚类和分类。建筑物之间最小距离小于 1 m(经验值)的建筑物群为城中村或复合建筑物类,其他建筑物为独立建筑物类;按照最小距离阈值 T_3 聚类相同类型的建筑物群。

3)在每个建筑物轮廓线上寻找符合条件的正对投影线段,§2.1 将详细讨论该计算过程。

4)按照最小距离阈值 T_3 聚类所有正对点,生成所有正对点集。

5)计算所有毗邻主方向线,§2.2 将详细讨论该计算过程。

6)正对点集的位置统一和直角边上非正对点的顶点调整,§2.3 将详细讨论该计算过程。

7)若毗邻化后的建筑物群还存在需要毗邻化的建筑物群,则返回步骤 3);否则结束整个建筑物群毗邻化过程。

2　算法中 3 个重要步骤的数据处理方法

2.1　正对投影线段的自动识别

每个建筑物轮廓线上的正对投影线段是建筑物群毗邻化的基础,若一个建筑物多边形面积大于 T_1,则需要识别该建筑物轮廓线上的正对投影线段。设一个建筑物多边形为 A,其轮廓线的原始直线段集合记为 $S=\{s_j|1\leqslant j\leqslant m\}$,其中 s_j 表示 A 中第 j 条直线段,m 为 A 中直线段总数。A 的正对投影线段自动识别过程如下:

1)遍历集合 S,若已遍历完 S,则转到步骤 3);否则,计算 s_j 所在索引网格集合 H,并将 H 的一阶邻近格网也加入 H,从 H 所包含的索引网格中检索出其他建筑物轮廓上的直线段集合 $Q_j=\{q_k|1\leqslant k\leqslant n\}$,其中 q_k 表示 s_j 的第 k 条邻近直线段,n 为邻近直线段的总数。若 $Q_j\neq\varnothing$,则进入步骤 2);否则 $j=j+1$,重复步骤 1)。

2)遍历集合 Q_j,若已遍历完 Q_j,则回到步骤 1),否则,判断 s_j 与 q_k 是否同时满足以下条件:(1)s_j 与 q_k 之间的夹角 $\alpha\leqslant T_5$;(2)s_j 与 q_k 之间的最小距离 $D\leqslant T_3$;(3)s_j 与 q_k 之间没有其他直线段;(4)存在一组正对投影线段;(5)两组对应正对点之间距离都小于 T_3。若完全满足条件,则 s_j 与 q_k 之间存在一组候选正对投影线段,并在集合 $C=\{c_i|1\leqslant i\leqslant p\}$ 中存储该组正对投影线段,并记录该

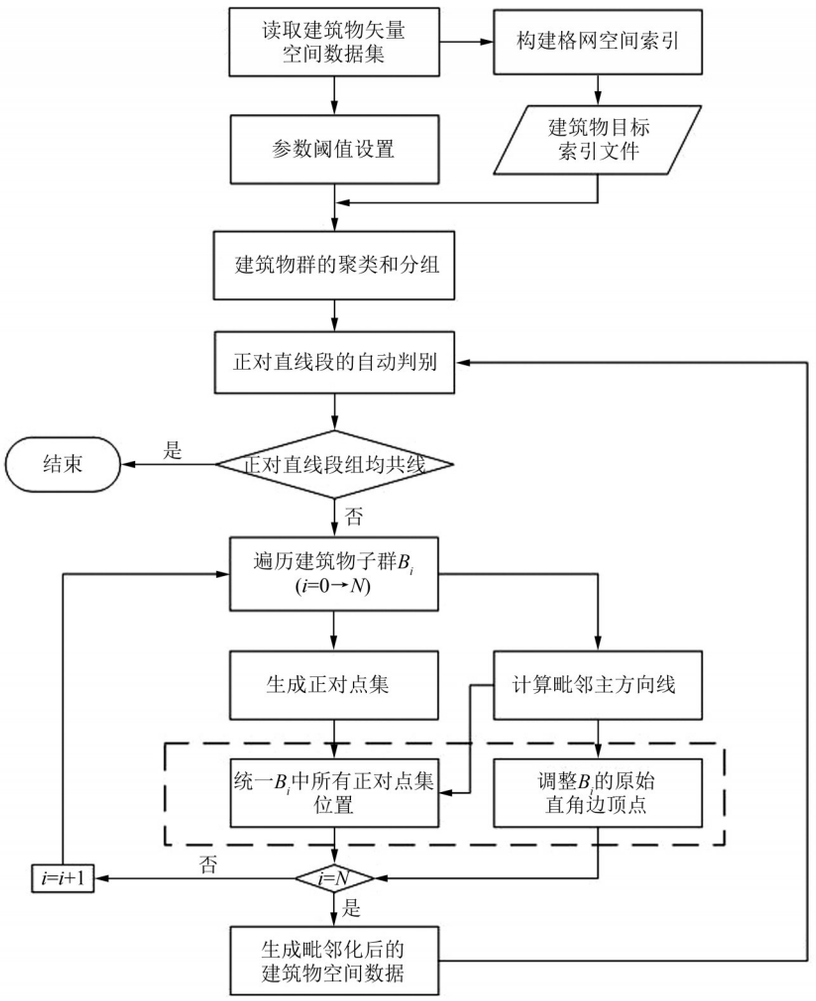


图6 建筑物群毗邻化流程图

Fig. 6 Flowchart of Building Groups Agglomeration

组正对投影线段的长度参数和邻近度参数,其中,c_i是A中第i组候选正对投影线段,p为正对投影线段组的总数;若不满足条件,则k=k+1,重复步骤2)。

3)集合C中已存储了当前建筑物轮廓上所有关联的候选正对投影线段。在集合C中判断A的轮廓线上是否有顺序连接的候选正对投影线段集合,若有,则分别修正该集合中每条候选正对投影线段的长度参数和邻近度参数为顺序连接的候选正对投影线段组成的折线总长度和邻近度;若没有,则无须处理。

4)确定正对投影线段。遍历集合C,若一组候选正对投影线段c_i的每条直线段的长度和邻近度都大于规定的阈值,则该组候选正对投影线段为一组可以共线的正对投影线段。

2.2 毗邻主方向线的构建方法

在建筑物群毗邻化过程中,为了尽可能有效保持建筑群整体的直角分布特征,在本文所提出的算法中需要使用与建筑物轮廓直角边相关的毗邻主方向线,一组正对投影线段或呈直线排列的多组正对投影线段的一条毗邻主方向线的计算过程如下:

1)设初始线段集合T为空,从前文已识别出的正对投影线段中选择一组至少有一条正对投影线段在原始直角边上的正对投影线段,添加该组正对投影线段至集合T;然后,若集合T中某条正对投影线段所在的原始直角边上有其他正对投影线段,则将该原始直角边上的其他正对投影线段也加入集合T,重复该过程,直至无法找到符合条件的正对投影线段。若所选正对投影线段已处理过,则说明该正对投影线段与某条毗邻主方向线已关联,不选择。

2)在集合T的所有端点中搜索距离最远的两组正对点,分别计算这两组正对点的中点P_1(x_a,y_a)和P_2(x_b,y_b),过P_1和P_2的直线就是T统一共用的一条毗邻主方向线,如图5(b)中过点P_1P_2的虚线,毗邻主方向线直线方程为:

$$(y_b-y_a)x+(x_a-x_b)y+(x_by_a-x_ay_b)=0 \tag{1}$$

3)建立该毗邻主方向线与 T 中所有正对投影线段的原始直角边顶点之间的关联关系,便于后期的直角边顶点位置调整。例如,图 5(a)中毗邻主方向线 P_1P_2 关联的顶点是 A_1、A_2、A_3、B_1、B_2 和 B_3,图 5(b)中毗邻主方向线 P_1P_2 关联的顶点是 A_1、A_2、A_3、A_4、B_1、B_2、B_3、C_1 和 C_2。有时,一个直角边顶点可能关联多条毗邻主方向线,如图 5(c)的 A_2 就同时关联毗邻主方向线 P_1P_2 和 P_3P_4。

2.3　参考毗邻主方向线调整建筑物轮廓上的顶点

建筑物群毗邻化需要调整建筑物轮廓线上的两类顶点:正对点集和原始直角边上非正对点,分别用于正对直线段共线和避免直角边弯折。设一个点集合 V,$V=\{v_1,v_2,\cdots,v_i,\cdots,v_n|,n\geqslant 1\}$,其中,$v_i(x_i,y_i)$ 是 V 中第 i 点,n 是集合中正对点的总数,V 满足下列任意一个条件:(1)$n\geqslant 2$;(2)$n=1$ 且该点至少关联一条毗邻主方向线。满足条件(1)时,V 代表一个正对点集;满足条件(2)时,V 代表一个原始直角边上其他顶点。本文根据该集合 V 所关联的毗邻主方向线的不同数量调整点的位置,方法如下:

1)如果集合 V 关联的毗邻主方向线数量等于 0,则说明集合 V 是一个正对点集,且 V 中所有点都位于非直角边。此时,只需统一集合 V 中点的位置,统一位置是集合 V 的几何中心。统一位置 $P_0(x_0,y_0)$ 的计算方法见式(2),如图 7 即为基于式(2)对图 4 中建筑物毗邻化的结果。

$$\begin{cases} x_0=\dfrac{\sum_{i=1}^{n}x_i}{n} \\ y_0=\dfrac{\sum_{i=1}^{n}y_i}{n} \end{cases} \tag{2}$$

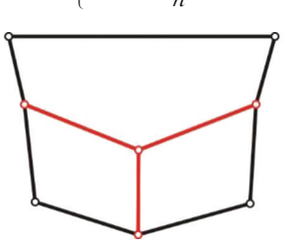


图 7　非直角边正对点集的位置统一

Fig. 7　Location Unification of Facing Point Set on Non-orthogonal Segments

2)如果 V 关联的毗邻主方向线数量等于 1,则集合 V 中点的位置应该调整至这条毗邻主方向线上,调整后的点位置 $P_1(x_1,y_1)$ 的计算方法为:

$$\begin{cases} x_1=\dfrac{B^2x_0-ABy_0-AC}{A^2+B^2} \\ y_1=\dfrac{A^2y_0-ABx_0-BC}{A^2+B^2} \end{cases} \tag{3}$$

式中,A、B 和 C 分别是集合 V 中正对点关联的毗邻主方向线的直线方程 $Ax+By+C=0$ 的系数,参考式(1),$A=y_b-y_a$,$B=x_a-x_b$,$C=x_by_a-x_ay_b$;当 $n\geqslant 2$ 时,(x_0,y_0) 是集合 V 的几何中心坐标,其计算方法见式(2),当 $n=1$ 时,(x_0,y_0) 是直角边上非正对点的原始坐标。如图 5(b)所示,只有一条毗邻主方向线 P_1P_2,当 V 为正对点集时,4 个正对点集 $\{A_1,B_2\}$、$\{A_2,B_1\}$、$\{A_3,C_2\}$ 和 $\{A_4,C_1\}$ 调整后的结果如图 8 中 $\{A_1',B_2'\}$、$\{A_2',B_1'\}$、$\{A_3',C_2'\}$ 和 $\{A_4',C_1'\}$ 所示;当 V 为非正对点时,图 5(b)中的直角边顶点 B_3 调整为图 8 中的 B_3'。

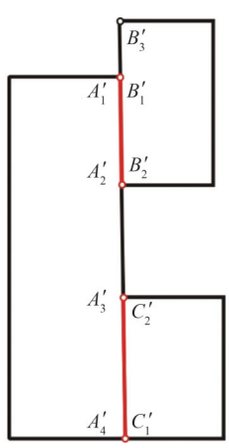
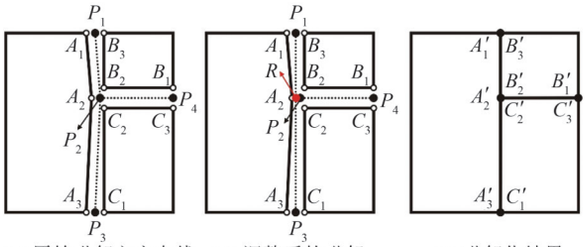


图 8　关联一条毗邻主方向线的顶点调整

Fig. 8　Vertices Adjustment Associated with One Main Direction Line

3)如果集合 V 关联的毗邻主方向线数量大于 1,则需要尽可能同时维持多条原始直角边的特征,调整后的点位置 P_2 的计算方法为:

(1)若集合 V 所关联的某两条毗邻主方向线之间的夹角小于 10°(经验值),则用这两条毗邻主方向线上最远的两组正对点的两个中点生成新的毗邻主方向线,并用该新生成的毗邻主方向线代替原来的两条毗邻主方向线。如图 9(a)所示,正对点集 $\{A_2,B_2,C_2\}$ 关联了 3 条毗邻主方向线 P_1P_2、P_2P_3 和 P_2P_4,其中,P_1P_2 与 P_2P_3 之间的夹角小于 10°,它们被图 9(b)中的毗邻主方向线 P_1P_3 代替。



(a) 原始毗邻主方向线 (b) 调整后的毗邻主方向线 (c) 毗邻化结果

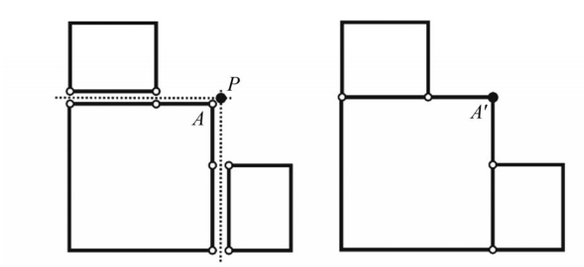
图9 毗邻主方向线的合并与毗邻化结果

Fig. 9 Aggregation of Main Direction Lines and Agglomeration Result

(2)若集合V关联的已更新的毗邻主方向线数量为1,则用式(3)计算集合V的统一位置坐标;若集合V关联的已更新的毗邻主方向线数量大于等于2,则选择其中夹角最接近90°的两条毗邻主方向线,它们的交点坐标即是集合V的统一位置坐标,该统一位置坐标$P_2(x_2,y_2)$的计算方法为:

$$\begin{cases} x_2=\dfrac{C_2B_1-C_1B_2}{A_1B_2-A_2B_1} \\ y_2=\dfrac{C_1A_2-C_2A_1}{A_1B_2-A_2B_1} \end{cases} \tag{4}$$

式中,A_1、B_1、C_1、A_2、B_2和C_2分别是已选择的两条毗邻主方向线的直线方程系数。图9(b)中的红色点R是由式(4)所求正对点集{A_2、B_2和C_2}的统一位置,图9(a)的毗邻化结果如图9(c)所示。图10(a)的直角边顶点A关联了两条毗邻主方向线,基于式(4)可调整A至图10(b)中的A'(两条毗邻主方向线的交点P)。若新产生的顶点导致两个建筑物多边形相互压盖,则移动该顶点至这两个建筑物轮廓边线相交的最近交点处。



(a) 关联的两条毗邻主方向线 (b) 节点调整结果

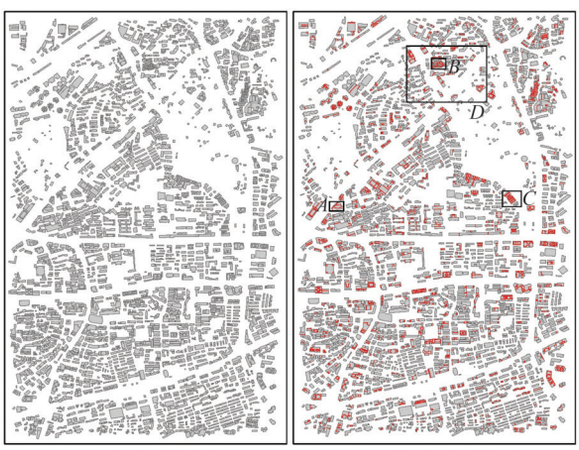
图10 关联两条毗邻主方向线的非正对节点调整

Fig. 10 Adjustment of Non-facing Vertex Associated with Two Main Direction Lines

3 建筑物群毗邻化实验与分析

3.1 实验数据与实验条件

选择如图11(a)所示的中国广东省广州市越秀区部分建筑物白模平面多边形(称之为建筑物多边形)数据进行实验。实验数据原始比例尺为1∶500,包含3 704个矢量建筑物多边形,待毗邻化的建筑物多边形之间存在空间邻近、点相接以及小面积相交等多种空间拓扑关系。本文在Microsoft Visual Studio 2019集成开发环境中,使用C#开发语言和DotSpatial开源地理信息库实现算法。



(a) 实验原始数据 (b) 毗邻化实验结果

—正对投影线段 建筑物多边形

图11 原始实验数据及其毗邻化结果

Fig. 11 Original Experimental Data and Agglomeration Results

3.2 实验参数设置与结果分析

实验中地图目标比例尺为1∶2 000,根据国家基本比例尺地图图式中建筑物的编图要求[20-21],地图上单个建筑物的最小面积阈值(实地)T_1设为8 m^2(T_1=2 mm^2×2 000×2 000=8 m^2),建筑物轮廓线上直线段的最小长度阈值T_2(实地)设为0.8 m(T_2=0.4 mm×2 000=8 m),两个建筑物之间的最小距离阈值(实地)T_3设为3 m(T_3=1.5 mm×2 000=3 m)。

邻近度阈值T_4与建筑物类型有关,对于独立建筑物,参考文献[22],邻近度阈值T_4为50%;对于城中村或复合建筑物,邻近度阈值T_4为5%,这是一个经验值,因为城中村和复合建筑物中建筑物之间的对齐程度低[23]。

方向差异阈值T_5与建筑物类型有关,对于独立建筑物,参考文献[22]的阈值设置经验,方向差异阈值T_5为10°;对于城中村或复合建筑物,它们有一些需要毗邻化的不规则短边夹角稍大,方向差异阈值T_5为20°。

这些阈值有些是直接参考地图比例尺的变化,按照国家制图标准计算得到的;有些是按照

表 1　实验中的阈值

Table 1　Experimental Thresholds

阈值符号	描述	阈值取值	
		城中村&复合建筑物	独立建筑物
T_1	建筑物最小面积阈值(实地)/m^2	8	
T_2	最小长度阈值(实地)/m	0.8	
T_3	最小距离阈值(实地)/m	3	
T_4	邻近度阈值/%	5	50
T_5	方向差异阈值/(°)	20	10

数据的特征给出的经验值。本文算法在应用过程中可以自动识别出不同类型的建筑物子群,人工干预很少,实验中的阈值见表1。

图11(a)中的建筑物群毗邻化结果见图11(b),图11(b)中红色线段是毗邻化后的正对投影线段。为了更好地说明和分析本文算法的实验效果,选取图11中的方框D区域放大,图12(a)、12(b)分别是毗邻化前后建筑物群图形,通过对比分析可以看出:消除了独立建筑物图形之间的狭长缝隙(如图12(b)中方框A所示);解决了复合建筑物中图形之间的边界不一致问题(如图12(b)中方框B所示);解决了城中村建筑物目标图形之间的狭长缝隙和边界不一致问题(如图12(b)中方框C所示)。

为了更好说明不同建筑物群使用本文方法毗邻化的图形效果,进一步选取了图11(b)中A、B和C等3个区域的放大图进行展示,图13(a)是图11(b)中区域A复合建筑物的毗邻化结果;图13(b)是图11(b)中区域B城中村的毗邻化结果;图13(c)是图11(b)区域C独立建筑物的毗邻化结果。由图13可知,相较于图11所示的原始建筑物群,这些毗邻化后的建筑物群依然能较好地保持建筑物的形状特征以及建筑物群内的排列结构。

良好的地图制图综合结果能够确保地图要素空间特征尽可能少发生改变。本文通过毗邻化前后面状建筑物的形状、方位以及大小变化评价建筑物群毗邻化的综合结果,在每一个方面选择一个或多个空间特征指标,这些指标包括:建筑物形状的紧密度[24-25]、建筑物的边数[24,26]、建筑物的直角数量,建筑物的最小外接矩形长轴的方位[24,26]和建筑物的凸包面积[24]。上述指标在建筑物群毗邻化前后的变化情况可以从5个方面进行评价,包括:

1)建筑物群的平均形状因子差C_{IPQ}:



图12　毗邻化前后局部放大图

Fig. 12　Local Enlarged Map of Before and After Agglomeration



图13　建筑物群毗邻化的细节放大图

Fig. 13　Enlarged Details of Building Groups Agglomeration Results

$$C_{\mathrm{IPQ}}=[(\sum_{i=1}^{n}|Q_i^a-Q_i^b|)/n]\times 100\% \quad (5)$$

$$Q=4\pi A/P^2 \quad (6)$$

式中,n为建筑物的总个数;i表示第i个建筑物;a用于标识被毗邻化后的建筑物;b用于标识被毗邻化前的建筑物;Q表示建筑物形状的紧密度;A表示建筑物的面积;P表示建筑物的周长。

2)建筑物边数变化的占比C_C:

$$C_C=[\sum_{i=1}^{n}(|(E_i^a-E_i^b|/E_i^b)/n]\times 100\% \quad (7)$$

式中,E表示一个建筑物的边数。

3)建筑物轮廓线上直角的保持比例C_P:

$$C_p=(1-\sum_{i=1}^{n}G_i^a/\sum_{i=1}^{n}G_i^b)\times 100\% \quad (8)$$

式中,G表示一个建筑物轮廓上的直角数量。

4)建筑物最小外接矩形方位差异的平均值C_O:

$$C_O=[\sum_{i=1}^{n}(|O_i^a-O_i^b|/\pi)/n]\times 100\% \quad (9)$$

式中,O表示一个建筑物的最小外接矩形长轴的方位。

5)建筑物凸包的平均面积变化率C_A:

$$C_A=[\sum_{i=1}^{n}(|W_i^a-W_i^b|/W_i^b)/n]\times 100\% \quad (10)$$

式中,W表示建筑物的凸包面积。

以上5个指标的数值均介于0~1之间,数值越小,说明本文建筑物群毗邻化综合效果越好。

3.3 对比实验

实验中阈值的设置对实验结果有影响,假设使用独立建筑物毗邻化的阈值对图1(a)和图1(b)中的复合建筑物群和城中村毗邻化,当T_4=50%,T_5=10°时,图1(a)的毗邻化结果有错误,见图14(a),图14(a)中圆圈区域的建筑物轮廓线方向差异较大,没有消除缝隙;图1(b)的毗邻化结果也是错误的,见图14(b),圆圈区域的邻近度较小正对投影线段组仍然没有共线。



(a) 复合建筑物群 (b) 城中村类建筑物群

图14 使用不恰当阈值的建筑物群毗邻化错误结果

Fig. 14 Wrong Results of Building Groups Agglomeration with Inappropriate Thresholds

使用文献[5]中的方法验证本文方法的有效性,表2展示了本文方法与文献[5]方法的毗邻化后图形特征变化情况,5个空间特征指标均高于本文方法的结果,说明本文方法在建筑物图形特征保持上有优势。

为了进行直观的对比分析,选择了实验区图11(b)中区域B展示实验结果,使用文献[5]方法的实验结果见图15,使用本文方法的实验结果见图13(b),比较后可以发现:(1)一些相交的建筑物未被处理,如图15中的红圈A所示;(2)文献[5]方法所提取的骨架线生成了一些很短的边,如图15中的红圈B所示,这导致相关建筑物的边数增加,有些毗邻化后的建筑物的直角边无法保持平直,与本文方法相比,有些毗邻化后的建筑物形状变化更大。本文方法在毗邻化过程中直接提取正对投影线段,相对而言,更加简单直接。

表2 两种方法的比较

Table 2 Comparison of Two Methods

方法	毗邻化建筑物数量/个	C_{IPQ}/%	C_C/%	C_P/%	C_O/%	C_A/%
本文方法	2 144	0.12	0.70	1.26	0.76	2.60
文献[5]方法	1 371	1.26	43.97	7.38	1.40	7.12



图15 基于文献[5]方法的建筑物群毗邻化结果

Fig. 15 Results of Building Groups Agglomeration with the Method in Reference [5]

4 结 语

地图面状空间目标之间的毗邻化是地图制图综合中的一个算子,本文针对建筑物群的特点提出了一个建筑物群毗邻化的新算法,该方法在自动判别成组正对投影线段基础上可以快速完成建筑物群毗邻化的任务,同时借助与原始直角边关联的毗邻主方向线,可以尽量保持毗邻化后的建筑物群整体图形轮廓的直角分布特征。从实验结果来看,该方法的适用性强,能处理不同

类型的建筑物群毗邻化,建筑物群毗邻化效果好。然而,在建筑物群的制图综合中,建筑物群毗邻化需要与建筑物群的选取、典型化和聚合等综合算子协同,未来将进一步研究该算法与其他制图综合算子的协同策略和方法。

参 考 文 献

[1] YANG M, YUAN T, YAN X F, et al. A Hybrid Approach to Building Simplification with an Evaluator from a Backpropagation Neural Network[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2022, 36(2): 280-309.

[2] MA J Z, SUN Q, XU L, et al. A Displacement Algorithm Considering Geometry Constraints to Resolve Spatial Conflicts Between Roads and Buildings [J]. *The Cartographic Journal*, 2023, 60(1): 43-55.

[3] 李安平, 翟仁健, 殷吉崇, 等. 顾及空间结构关系的居民地自动合并方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(9): 1723-1733.
LI Anping, ZHAI Renjian, YIN Jichong, et al. Automatic Merging Method of Residential Areas Considering Spatial Structure Relationship[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(9): 1723-1733.

[4] WANG X, BURGHARDT D. A Typification Method for Linear Building Groups Based on Stroke Simplification[J]. *Geocarto International*, 2021, 36(15): 1732-1751.

[5] 李成名, 殷勇, 武鹏达, 等. 一种狭长图斑分块融解方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(12): 2259-2268.
LI Chengming, YIN Yong, WU Pengda, et al. A Partitioned Dissolution Method for Long and Narrow Patches[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 2259-2268.

[6] 武芳, 杜佳威, 钱海忠, 等. 地图综合智能化研究的发展与思考[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(10): 1675-1687.
WU Fang, DU Jiawei, QIAN Haizhong, et al. Overview of Research Progress and Reflections in Intelligent Map Generalization[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(10): 1675-1687.

[7] 王家耀, 李志林, 武芳. 数字地图综合进展[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
WANG Jiayao, LI Zhilin, WU Fang. Advances in Digital Map Generalization[M]. Beijing: Science Press, 2011.

[8] LI Z J. Algorithmic Foundation of Multi-scale Spatial Representation[M]. Boca Raton: CRC Press, 2007.

[9] 葛莹,毛鹏宇,李云婷,等. 利用ASTER GDEM提取瓯江流域水系及精度评价[J]. 测绘地理信息, 2015,40(2):31-34.
GE Ying, MAO Pengyu, LI Yunting, et al. Automatic Update of River Network Using ASTER GDEM: A Case Study of Oujiang Watershed in Zhejiang Province[J]. *Journal of Geomatics*, 2015, 40(2): 31-34.

[10] 艾廷华, 郭宝辰, 黄亚峰. 1:5万地图数据库的计算机综合缩编[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2005, 30(4): 297-300.
AI Tinghua, GUO Baochen, HUANG Yafeng. Construction of 1: 50 000 Map Database by Computer Generalization Method[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2005, 30(4): 297-300.

[11] 李琳. 约束Delaunay三角网下土地利用空间数据库中的面状要素合并研究[D]. 西安:长安大学, 2016.
LI Lin. The Study on Patches Merging in Land Use Spatial Database Based on the Constrained Delaunay Triangular Irregular Network[D]. Xi'an: Chang'an University, 2016.

[12] 郭庆胜. 以直角方式转折的面状要素图形简化方法[J]. 武汉测绘科技大学学报, 1999, 24(3): 255-258.
GUO Qingsheng. The Method of Graphic Simplification of Area Feature Boundary as Right Angle[J]. *Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping*, 1999, 24(3): 255-258.

[13] 郭仁忠, 艾廷华. 制图综合中建筑物多边形的合并与化简[J]. 武汉测绘科技大学学报, 2000, 25(1): 25-30.
GUO Renzhong, AI Tinghua. Simplification and Aggregation of Building Polygon in Automatic Map Generalization [J]. *Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping*, 2000, 25(1): 25-30.

[14] 刘鹏程, 艾廷华, 邓吉芳. 基于最小二乘的建筑物多边形的化简与直角化[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(5): 699-704.
LIU Pengcheng, AI Tinghua, DENG Jifang. Simplification and Rectangularity of Building-Polygon Based on Least Squares Adjustment[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2008, 37(5): 699-704.

[15] GUPTA R K. Constraint Analysis [EB/OL]. (1995-07-01)[2023-01-05]. https://link.springer.

com/chapter/10.1007/978-1-4615-2287-4_4#citeas.

[16] GUERCKE R, GÖTZELMANN T, BRENNER C, et al. Aggregation of LoD 1 Building Models as an Optimization Problem[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2011, 66(2): 209-222.

[17] 行瑞星, 武芳, 张浩, 等. 基于正对投影距离的双线道路提取方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(1): 152-158.
XING Ruixing, WU Fang, ZHANG Hao, et al. Dual-Carriageway Road Extraction Based on Facing Project Distance[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(1): 152-158.

[18] 崔铁军. 地理空间数据库原理[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
CUI Tiejun. Principle of Geospatial Database[M]. Beijing: Science Press, 2007.

[19] 陈玉敏, 龚健雅, 史文中. 多级道路网的最优路径算法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2006, 31(1): 70-73.
CHEN Yumin, GONG Jianya, SHI Wenzhong. Research on the Optimal Path Algorithm in Multi-level Road Network[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, 31(1): 70-73.

[20] 国家测绘地理信息局测绘标准化研究所. 国家基本比例尺地图图式 第1部分:1∶500 1∶1 000 1∶2 000地形图图式: GB/T 20257.1—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation of China. Cartographic Symbols for National Fundamental Scale Maps: Part 1: Specifications for Cartographic Symbols 1∶500 1∶1 000 & 1∶2 000 Topographic Maps: GB/T 20257.1—2017 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.

[21] 国家测绘地理信息局测绘标准化研究所. 国家基本比例尺地图图式 第2部分:1∶5 000 1∶10 000地形图图式: GB/T 20257.1—2017[S]. 北京:中国标准出版社, 2017.
National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation of China. Cartographic Symbols for National Fundamental Scale Maps:Part 2: Specifications for Cartographic Symbols 1: 5000 & 1∶10 000 Topographic Maps: GB/T 20257.1—2017 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.

[22] LI Z, YAN H, AI T, et al. Automated Building Generalization Based on Urban Morphology and Gestalt Theory[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2004, 18(5): 513-534.

[23] YU W H, ZHOU Q, ZHAO R. A Heuristic Approach to the Generalization of Complex Building Groups in Urban Villages[J]. *Geocarto International*, 2021, 36(2): 155-179.

[24] 郭庆胜, 魏智威, 王勇, 等. 特征分类与邻近图相结合的建筑物群空间分布特征提取方法[J]. 测绘学报, 2017, 46(5): 631-638.
GUO Qingsheng, WEI Zhiwei, WANG Yong, et al. The Method of Extracting Spatial Distribution Characteristics of Buildings Combined with Feature Classification and Proximity Graph[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(5): 631-638.

[25] YAN H W, WEIBEL R, YANG B S. A Multi-Parameter Approach to Automated Building Grouping and Generalization[J]. *GeoInformatica*, 2008, 12(1): 73-89.

[26] BASARANER M, CETINKAYA S. Performance of Shape Indices and Classification Schemes for Characterising Perceptual Shape Complexity of Building Footprints in GIS[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2017, 31(10): 1952-1977.