

顾及结构特征的建筑物图形迭代凸分解方法

魏智威^{1,2}, 童莹³, 丁慷⁴, 乔海浪^{1,2}

- (1. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京, 100094;
2. 中国科学院空天信息创新研究院网络信息体系技术院重点实验室, 北京, 100094;
3. 武汉大学资源与环境科学学院, 湖北 武汉, 430079;
4. 浙江农林大学环境与资源学院, 浙江 杭州, 311300;

摘要: 图形分解是图形认知和分析的基础。本文针对建筑物图形, 提出了一种结合其形态表达特点的迭代凸分解方法。该方法利用 Delaunay 三角网提取建筑物图形凹部层次化结构和骨架线定义图形节点凹度, 并依据建筑物图形直角化和简洁表达的特点选取分割线迭代消除当前图形中凹度最大节点实现图形凸分解。实验结果表明, 本文方法能有效实现带洞(或岛)建筑物图形的凸分解, 结果符合视觉认知。同时, 基于图形分解结果讨论了字母型和直线型建筑物群模式的识别, 证明了结合图形分解能更有效挖掘建筑物群空间分布特征。

关键词: 凹度; 凸分解; 形状认知; 模式识别

【中图分类号】P208

【文献标识码】A

【文章编号】1009-2307 (20) 0 - -

An iterative approach for building convex decomposition considering their shape characteristics

WEI Zhiwei^{1,2}, TONG Ying³, DI Su⁴, QIAO Hailang^{1,2}

(1.Key Laboratory of Network Information System Technology, Institute of Electronic, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094; 2.The Aerospace Information Research Institute, Chinese Academic of Sciences, Beijing 100094; 3. School of Resources and Environment Science, Wuhan University, Wuhan 430079; 4. College of Environmental and Resource Science, Zhejiang 311300, China)

Abstract: Representing shapes in terms of meaningful parts is a fundamental problem in shape analysis and recognition. We propose an iterative convex decomposition approach for buildings considering their shape characteristics. In this approach, node concavity is defined based on built implicit hierarchy of concave parts and skeleton of the building by using Delaunay triangulation. The best cut is then selected to eliminate the node with the largest concavity iteratively to achieve building convex decomposition. Orthogonal features of buildings are considered in the cut selection. The experimental results show that the approach proposed can effectively achieve convex decomposition of buildings with or without holes, and the decomposition results are in line with human visual perception. Letter-like and linear building pattern recognition were also discussed based on decomposition results, which show spatial distribution of building groups can be explored effectively with shape decomposition.

Keywords: buildings; concavity; convex decomposition; shape recognition; pattern recognition.

0 引言

地理图形认知是地图数据分析和处理的重要基础^[1]。实验心理学研究表明, 人眼视觉系统认知存在部分与整体的关系, 图形分解有助于完成目标识别、分类和检索等视觉认知任务^[2]。凸多边形是视觉认知的几何基元, 图形凸分解是计算机视觉研究的基础问题^[3]。建筑物是矢量地图表达的基础要素, 建筑物图形凸分解对建筑物图形的数据处理与分析具有重要意义, 并已有效用于城市三维模型可视化、建筑物复杂空间关系表示、室内建筑物通风效果评估等^[4-6]。

图形凸分解依据应用目的不同, 分解原则不一样。其中, 最小组分原则和最短分割原则最为常用^[7,8]; 若考虑到分解后图形的面积均衡, 分解时会尽量采用接近凹点处角平分线的分割分解图形^[9]; 若用于图形匹配, 则要求图形分解后多边形数量相等^[10]。但是, 分解特定类图形时, 人通常已具备该类图形的结构化认知, 上述方法仅从图形几何特征出发, 分解结果有时不合理。如手势图形分解需考虑手掌与手指的连接关系^[11]; 人体或动物图形则只会被分解为头部、颈部和躯干等^[12]; 文献[13]则考虑了图形可能存在的特殊点或特殊结构, 分

解时尽量保留这些特殊点或特殊结构；另外，文献[14]则将图形分解与图形分类结合，基于特定类图形的结构信息指导图形分解。建筑物是典型人造地物，具有多直角和简洁表示的特点，如郭仁忠院士等将建筑物看作矩形的差分组合，并用于建筑物合并与化简^[15]。另外，地理图形通常具有层次结构，如文献[16]基于Delaunay三角网建立曲线的层次结构用于河口湾海岸线的简化。因此，建筑物图形分解在考虑特定几何特征约束的同时，需要顾及图形的结构化特征。

不同分解原则需转化成分解算法的约束条件。若转化成优化算法的约束条件，可利用A*算法、动态规划算法、能量最小化算法等从全局上分解图形^[17,18]；若转化成聚类算法的聚类条件，可利用谱聚类算法分解图形^[19]。但是，实际应用中多边形有时会包含洞(或岛)，利用优化方法从全局上分解带洞(或岛)的图形被证明为N-P难，常用策略是利用分治策略迭代地消除当前图形中凹度最大节点实现图形凸分解^[20]。节点凹度可利用节点到多边形最小凸包的可视距离、节点沿多边形到最小凸包的长度等表达^[21]；同时，不同凹度也可组合表示^[22]。但是，上述凹度定义方法没有考虑图形可能存在的层次结构。文献[23]基于图形结构层次性定义图形节点凹度，但是，该方法不适用于洞(或岛)上节点的凹度定义。

建筑物图形通常包含洞(或岛)，依据图形节点凹度大小迭代地分解建筑物图形是较合理的策略；同时，建筑物图形分解需要充分考虑其图形表达特点。综上所述，本文试图利用Delaunay三角网建立建筑物图形凹部的层次化结构和骨架线定义图形节点凹度，该凹度定义同样适用于洞(或岛)上节点；其次，依据节点凹度大小迭代地消除当前图形中凹度最大节点实现建筑物图形的凸分解，分解时充分顾及建筑物图形多直角和简洁表示的特点。

1 节点凹度定义

(1) 建筑物凹部的层次结构与骨架线

Delaunay三角网以三角面元剖分空间，具有最大最小角性质与唯一性等优点，是一种有效的线面结构分析工具^[24]。本文以建筑物边为约束边，对边加密后构建建筑物图形的约束Delaunay三角网分析其结构特征，如图1，Delaunay三角网构建方法见文献[25]。依据三角形在多边形内(外)部可以将其分为内部三角形和外部三角形。其次，依据三角形邻接的同类三角形数量，三角形可分为四个子类：I类(连接非封闭外部区域)；II类(邻接1个同类三角形)；III类(邻接2个同类三角形)；IV类(邻接3个同类三角形)，如图1(b)。

依据文献[26]，I类三角形为图形凹部入口；II类三角形为图形凹部底部；III类三角形为图形凹部中间区域；IV类三角形为大凹部划分为小凹部的分界区域。基于该定义，若凹部位于图形外部，以I类三角形为入口，依据三角形间邻接关系，遍历同在图形外部的三角形，能建立图形外凹部的层次结构，如图1(b)。同理，针对洞(或岛)上的凹部，从凹部底部(II类三角形)出发，依据三角形的邻接关系，遍历同在洞(或岛)内部的三角形，能建立洞(或岛)上凹部的层次结构。另外，骨架线是建筑物图形的降维表达，参考文献[25]，提取不同凹部骨架线，如图1(c)；凹部的层次化结构表示了对应骨架线的层次结构，如图1(b)。

(2) 凹度定义

图形节点凹度表示节点向图形内(或外)部的延伸程度^[20]，本文用节点沿骨架线向图形内(或外)部的延伸长度表示。依据凹部骨架线层次结构，节点沿骨架线的延伸路径为低层级骨架线向高层级骨架线逐级延伸，如图1(d)中凹点D沿骨架线的延伸路径为 $S_{ce} \rightarrow S_{cg} \rightarrow S_{ag}$ 。

另外，需确定骨架线延伸的终点。若节点位于图形外轮廓，节点沿骨架线的延伸终点为对应凹部入口三角形外侧边中点，如图1(d)中点M。若节点位于洞(或岛)上，节点沿骨架线延伸终点为洞(或岛)的中心。参考文献[27]，基于骨架线节点中心性提取多边形中心，该中心点位于骨架线上，如图1(e)中点P为洞abcdef中心。

因此，图形节点凹度(NCon)定义如下：

-若节点位于图形外轮廓，其凹度为节点沿骨架线向对应凹部入口三角形外侧边中点的延伸长度，图1(d)中加粗部分；

-若凹节点位于岛或洞上，其凹度为节点沿骨架线向洞(或岛)中心点的延伸长度，图1(e)中加粗部分。

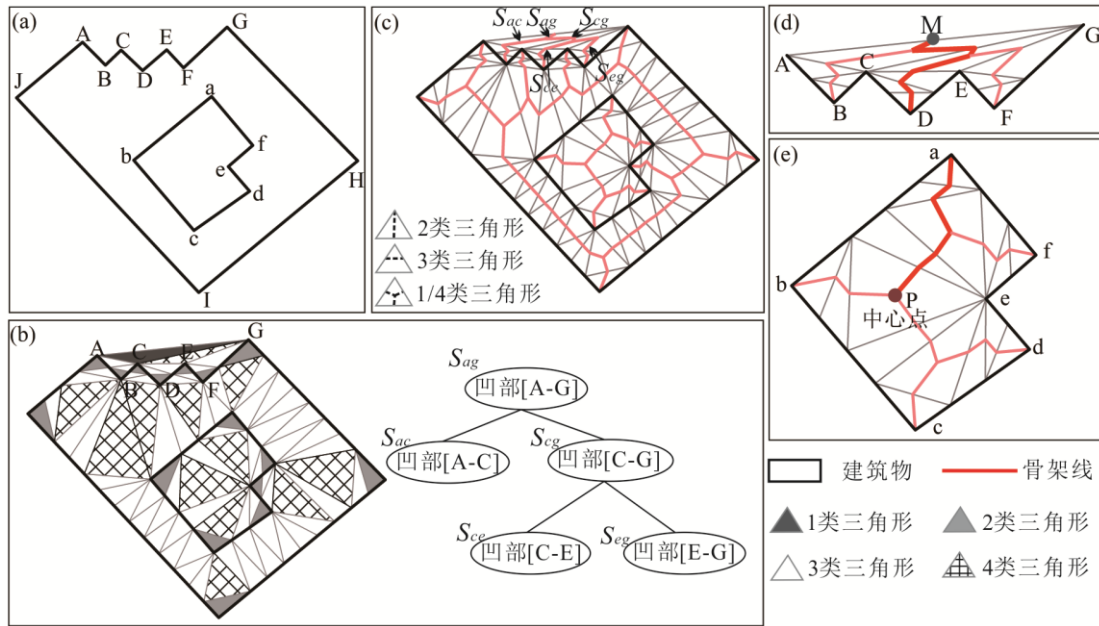


图1. 凹度定义。(a) 原始建筑物；(b) 三角网中三角形分类和凹部层次关系构建；(c) 建筑物骨架线；(d)外轮廓节点凹度定义；(e)洞上节点凹度定义。

Fig 1. Definition of node concavity. (a) Original building; (b) Triangle classification and hierarchy construction of concave parts; (c) Building skeleton; (d) Concavity definition of node on boundary; (e) Concavity definition of node on holes.

2 建筑物图形的迭代凸分解

图形凸分解即消除图形中凹点，考虑到建筑物图形带洞(或岛)表达的特点，本文采用迭代策略依次消除当前图形中凹度最大节点实现图形凸分解；消除特定凹点时，需确定可用分割集合，并依据条件选择最优分割。

(1) 可用分割集合

约束性三角网实现了图形无重叠、无缝隙的三角单元覆盖，任意选择图形内部三角网的一条边均能分解图形为两部分，且该边具备“最邻近连接”特征^[24]。因此，图形内部任意连接给定凹点的三角网边均可作为潜在分割。其中，考虑到构建约束性三角网时为保证生成三角形的质量，建筑物图形边往往需要加密，有时会导致邻近边上加密节点连接构成三角形，如图 2(b)中三角形 ACB 。因此，获取给定凹点潜在分割集合时，需调整三角网。

假设建筑物图形内部三角网记为 $B(V, E, T)$ ，图 2(a)； V 为三角网节点集合 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_i\}$ ， E 为三角网边集合 $E = \{e_1, e_2, \dots, e_j\}$ ， T 为三角网三角形集合 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_k\}$ 。给定凹点 $P \in V$ ，若 P 关联的三角形 $t_p \in T$ 为 4 类三角形，即 t_p 的边集合 $E_{t_p} = \{e_{p1}, e_{p2}, e_{p3}\}$ 分别关联 T 中 3 个三角形。若 $e_{pi} \in E_{t_p}$ 不关联凹点 P ，则交换边 e_{pi} 关联的 2 个三角形组成的四边形的对角线，如交换图 2(b)中三角形 ABC 和 PAB 构成的四边形的对角线 AB 为对边 PC 。调整过程直至凹点 P 不关联 4 类三角形为止；调整结果如图 2(c)，图中红线为消除凹点 P 的可用分割集合。

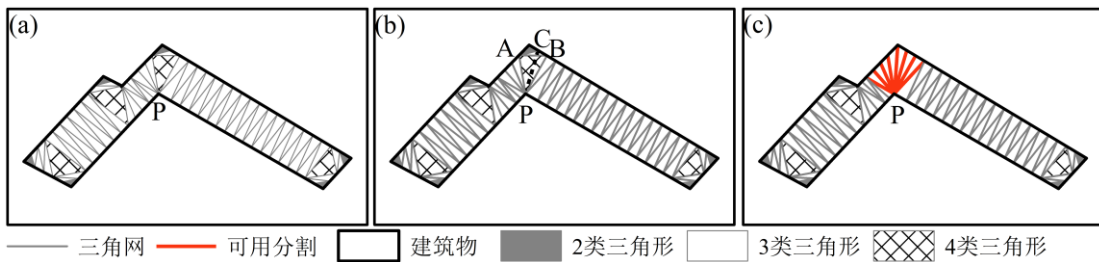


图 2. 获取给定凹点 P 的可用分割集合。(a) 建筑物图形内部三角网；(b)三角网调整中间过程(若凹点 P 点关联第 4 类三角形，则交换对应三角形关联的四边形的对角线，如图中虚线 PC)；(c) 凹点 P 的可用分割集合(图中红线表示的三角网)。

Fig 2. Candidate cuts of node P . (a) Triangles in building; (b) Adjustment of the triangles; (c)

Candidate cuts of node P (edges colored red).

(2) 最优分割

给定凹点 P ，连接点 P 的可用分割集合记为 $CS=\{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ ，需依据分割原则选择最优分割。其中，最小组分原则和最短分割原则是图形凸分解需遵循的通用原则^[7,8]；同时，建筑物作为典型人造地物，具有多直角和简洁表达的特点^[28]。因此，给定分割 C_m ，其应遵循的原则如下：

-最小组分原则：图形需被分解为尽可能少的凸多边形^[7]；图形凸分解的目的是消除图形中凹点，若分割 C_m 执行后图形凹点减少数量(RC_m)越大，则 C_m 越优。

-最短分割原则：实验心理学研究表明，图形分解倾向于利用尽可能短的路径分解图形^[8]，若 C_m 长度 LC_m 越小，则 C_m 越优。

-直角化特征保持：分割需尽量避免破坏建筑物图形的直角化特征。参考文献[28]，连续的直角转折是建筑物图形处理时需考虑的直角化结构，如邻近直角转折构成的凹(凸)部，表 1 中结构 $BCDE$ ；如邻近直角转折构成的阶梯状结构，表 1 中结构 $FEDC$ 。分割 C_m 需尽量避免划破相应直角化结构，用 CC_m 表示： $CC_m=0$ 表示分割 C_m 执行后划破了相应的直角化结构；否则， $CC_m=1$ 。

-图形简洁表达原则：建筑物图形往往高度抽象，具有简洁表示的特点，若分割 C_m 执行后节点增加数量 NC_m 越小，则 C_m 越优。

表 1. 分割原则量化描述及其优先级

Tab 1. Descriptions of cut rules in building convex decomposition.

参数名	描述	示意图	优先级	值域
RC_m	C_m 执行后图形凹点减少数量		1	$RC_m \in [0, 1, 2]$
LC_m	C_m 长度		3	$LC_m \in R^+$
CC_m	C_m 执行后是否破坏图形直角化结构： $CC_m=0$ 表示分割 C_m 执行后划破了直角化结构；否则， $CC_m=1$ 。		2	$CC_m \in [0, 1]$
NC_m	C_m 执行后图形节点增加数量		3	$NC_m \in [0, 1, 2, 3]$

不同原则依据实际需要优先级不一样，不同分解原则优先级定义见表 1：最小组分原则在较多图形分解算法中都具有最大优先级；直角化是建筑物图形表达的重要特征，图形分解时需尽量顾及，其优先级次之；最小分割原则和图形简洁表达原则优先级最低。考虑到不同分解原则间相关性较小，连接凹点 P 的分割 C_m 优化函数(f_{cm}) 适宜表示成不同量化分解原则的线性组合^[29]，见公式(1)。

$$f_{cm} = \{\alpha_1 * RC_m + \alpha_2 * CC_m + \alpha_3 * (3 - NC_m) + 1\} * LC_m \quad (1)$$

其中, $\alpha_1 \gg \alpha_2 \gg \alpha_3$; 若 f_{C_m} 越大, 表示分割 C_m 越优。

(3) 迭代凸分解过程

给定凹多边形 CP , 将 CP 迭代分解为凸多边形集合 $CPS = \{CP_1, CP_2, \dots, CP_n\}$ 的过程如下。

步骤 1: 设置 $CPS = Null$, 添加 CP 至 CPS ; CPS 中多边形节点集合记为 $pS = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$, 转步骤 2;

步骤 2: 计算 pS 中节点凹度, 凹度大于 0 的节点数记为 Num : 若 $Num > 0$, 获取 pS 中凹度最大节点 p_{max} , 在 CPS 中对应的凹多边形为 CP_{max} , 转步骤 3; 否则, 返回 CPS , 结束分解过程;

步骤 3: 获取消除凹多边形 CP_{max} 中节点 p_{max} 的分割集合 $CS = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$; 依据公式 (1) 计算获取最优分割 C_b 分解 CP_{max} 为多边形 CP_{max}^1 和 CP_{max}^2 ;

步骤 4: 更新 CPS : 从 CPS 中删除 CP_{max} , 添加 CP_{max}^1 和 CP_{max}^2 ; 依据 CPS 更新 pS ; 返回步骤 2。

3 实验与分析

3.1 实验结果

选择 OSM 地图北京地区 44 个不同形态特征的建筑物检验本文方法有效性: 其中, 带洞建筑物 6 个(编号 39-44)。基于 ArcEngine10.2 利用 C# 二次开发实现本文方法; 同时, 公式(1)中参数存在关系 $\alpha_1 \gg \alpha_2 \gg \alpha_3$, 设置 $\alpha_1 = 10000, \alpha_2 = 100, \alpha_3 = 0.2$, 建筑物图形分解结果见图 3。由图可知, 本文方法有效实现了图中带洞或不带洞图形的凸分解。

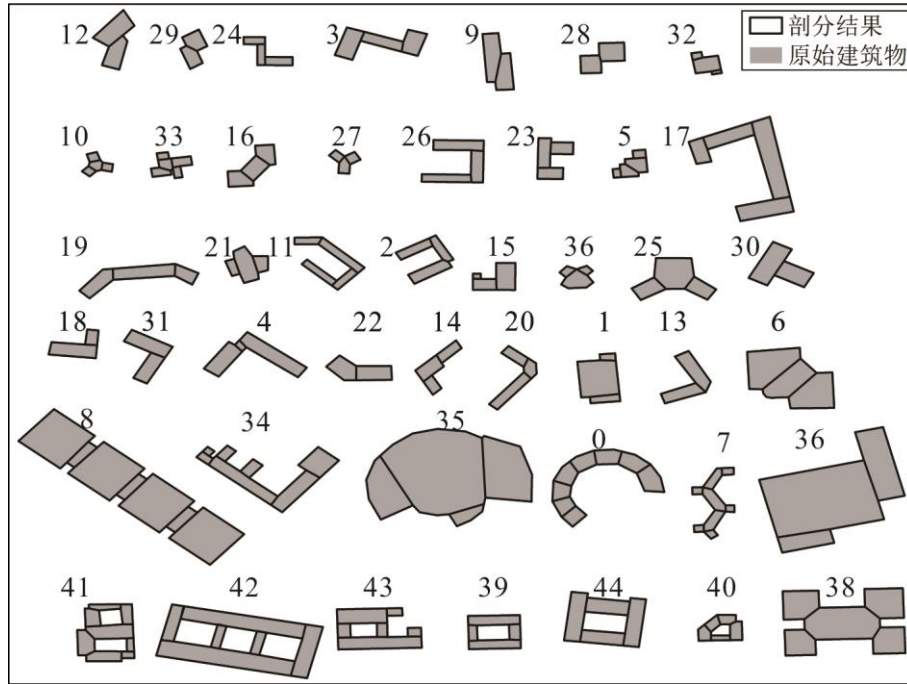


图 3. 本文方法图形凸分解结果

Fig 3. Convex decomposition result of buildings by proposed approach.

另外, 参考文献[19], 利用 Hamming 距离(D_h)评估本文方法分解结果与视觉感知分解结果的一致性, 结果见图 4, 视觉感知分解结果是从事地图学研究的多名硕士和博士依据视觉感知的分解结果, 数据地址如下: <https://data.mendeley.com/datasets/k4jnbhjjsv/1>。Hamming 距离定义如下: 假设同一建筑物的不同分解结果为 $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ 和 $B = \{B_1, B_2, \dots, B_m\}$, 集合 A 向 B 的单向 Hamming 距离($D_h(A \rightarrow B)$)见公式(2)。

$$D_h(A \rightarrow B) = \sum_i |A_i / B_{ki}| \quad (2)$$

$k_i = \arg \max_j |A_i \cap B_j|$, 集合 A 与 B 的 Hamming 距离($D_h(A, B)$)见公式(3)。

$$D_h(A, B) = \frac{D_h(A \rightarrow B) + D_h(B \rightarrow A)}{2} \quad (3)$$

由图 4 可知, 本文分解结果与视觉感知分解结果一致性较高, 均高于 0.97, 这说明本文方法分解结果符合人的视觉感知。同时, 能有效实现带洞建筑物图形(编号 39-44)的凸分解。

3.2 对比分析

为验证本文方法有效性, 基于常用的凹点到图形凸包可视距离定义节点凹度对图形进行分解^[13], 分解结果与视觉感知分解结果的 Hamming 距离(D_h^c)见图 4(a)。对比图 4(a)中 D_h 和 D_h^c 可知, 编号 5、10 和 33 的建筑物分解结果相对于视觉感知分解结果差异较大, 均大于本文方法分解结果。同时, 基于凹点到图形凸包可视距离定义节点凹度无法处理带洞建筑物图形(编号 39-44)的凸分解。以编号 5 的建筑物为例, 若基于凹点到图形凸包的可视距离定义凹度, 其没有有效顾及建筑物图形凹部的层次结构, 故凹点 A 为图形凹度最大节点, 会选择图 4(a)中分割 C_1 分解图形; 实际上依据人的视觉感知, 凹点 B 为图形凹度最大节点, 宜选择分割 C_2 分解图形, 本文分解方法与视觉感知一致。

另外, 本文分解方法考虑了建筑物图形多直角和简洁表达的特点, 若不考虑建筑物图形的这些特点进行分解, 其分解结果与视觉感知分解结果的 Hamming 距离(D_h^r)见图 4(b)。对比图 4(b)中 D_h 和 D_h^r 可知, 若不考虑建筑物图形多直角和简洁表达的特点, 编号 0、5、7、27、33 和 36 的建筑物分解结果相对于视觉分解结果差异较大, 大于本文分解方法结果。以编号 33 的建筑物为例, 若不考虑建筑物图形多直角和简洁表达的特点, 分割时会尽量选择距离最小的分割, 如针对图 4(b)中凹点 D 进行分解时会选择距离最短的分割 C_3 分解图形; 实际上依据人的视觉感知, 宜选择分割 C_4 分解图形, 本文分解方法与视觉感知一致。

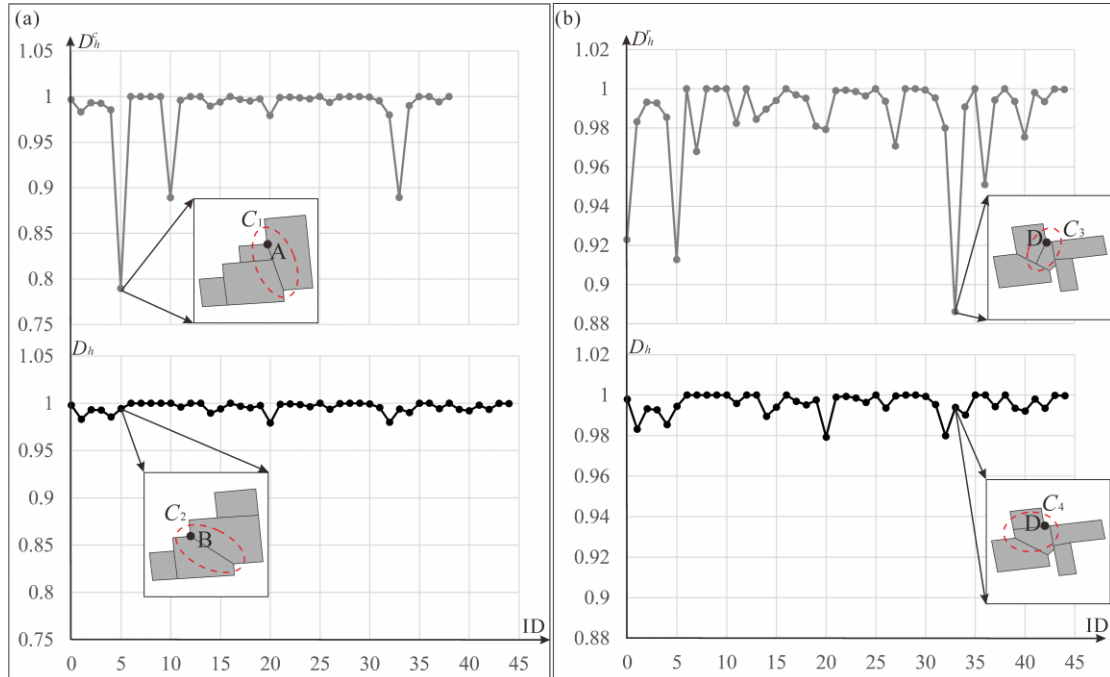


图 4. 分解结果与视觉感知分解结果的 Hamming 距离及其对比: (a) D_h 和 D_h^c 对比; (b) D_h 和 D_h^r 对比。

Fig 4. Comparison on convex decomposition results between proposed approach and visual perception by Hamming distance. (a) Comparison between D_h and D_h^c ; (b) Comparison between D_h and D_h^r .

3.3 参数分析

(1) 凸分解与近似凸分解

本文依据图形节点凹度($NCon$)大小迭代地消除图形中凹点实现图形凸分解。实际应用中考虑到图形边界可能不完全平滑, 针对图形的凸分解有时会将图形划分成众多冗余小块^[20]。因此, 凸分解有时需要转化为近似凸分解处理, 即消除图形中节点凹度大于一定阈值 T_c 的凹点。图形近似凸分解时需针对不同建筑物设置相同的阈值 T_c , 考虑到建筑物形态各异, 需对节点凹度($NCon$)进行归一化处理($NCon^s$), 见公式(4)^[18]。

$$NCon^s = \frac{NCon}{2\sqrt{\pi A}} \quad (4)$$

其中, A 为图形面积。分别设置 $T_c=0.05, 0.10, 0.15$, 对编号 34 的建筑物分解, 结果见图 5(a)。由图 5(a)可知, 依据本文方法定义的节点凹度也能有效实现图形的近似凸分解。

(2) 分解原则量化参数

针对图形分解涉及的原则, 本文利用公式(1)进行了量化; 其中, $\alpha_1 \gg \alpha_2 \gg \alpha_3$, 需设置参数 α_3 , 其主要考虑了建筑物图形简洁表达的特点。若不考虑图形简洁表达的特点, 设置参数 $\alpha_3=0$, 编号 19 的建筑物图形分解结果见图 5(b); 若 α_3 设置为较大值, 如 $\alpha_3=10$, 编号 19 建筑物图形分解结果见图 5(b): 两种结果均与视觉感知结果不一致。其中, $\alpha_3=0$ 旨在选择距离最短的分割; $\alpha_3=10$ 旨在选择节点最少的分割。但是, 视觉认知上两者需要权衡, 本文取 $\alpha_3=0.2$ 是较合适的经验值, 基于 $\alpha_3=0.2$ 的分解结果与视觉认知结果基本一致。

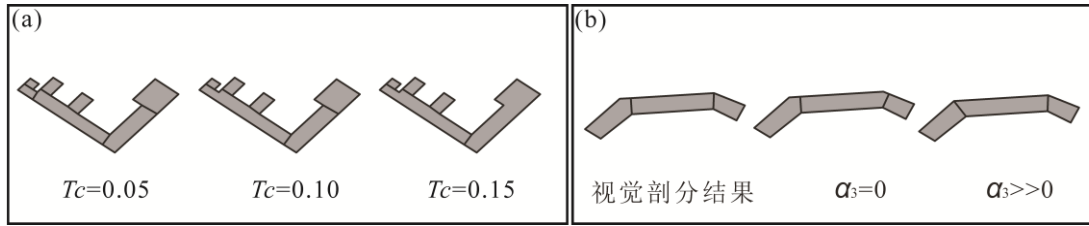


图 5. 参数分析。(a) 建筑物图形的近似凸分解; (b) 参数分析对比结果。

Fig 5. Parameter analysis. (a) Approximate convex decomposition of the building; (b) Comparison result with different parameters.

3.4 结合图形分解的建筑物群模式识别

人眼视觉系统认知存在部分与整体的关系, 图形分解有助于从局部认知建筑物图形; 但是, 已有建筑物群认知通常是将建筑物作为整体。若将分解后的建筑物多边形也认为是独立的建筑物多边形, 就能利用现有建筑物群认知方法结合图形分解结果认知建筑物群。如基于分解结果, 参考文献[30]定义并识别建筑物群中 C 型建筑物群模式, 结果见图 6(a)。由图可知, 模式 A、B、C 和 D 是基于分解后建筑物才能获取的 C 型建筑物群模式, 符合人的视觉认知。另外, 参考文献[30]基于图形分解结果识别直线型建筑物群模式, 结果见图 6(b)。由图可知, 模式 E、F、G 和 H 是基于分解后建筑物才能识别的直线模式, 符合人的视觉认知。

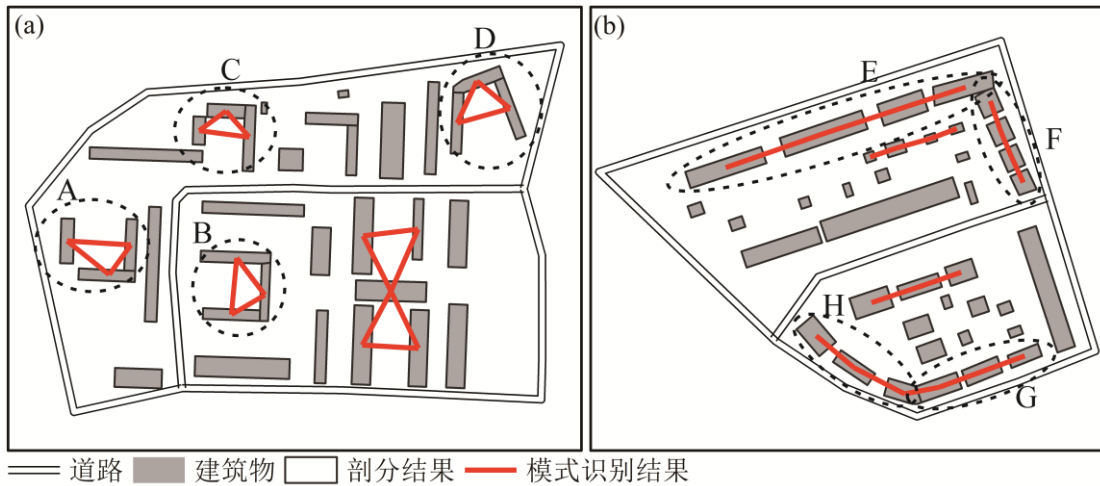


图 6. 结合图形分解的建筑物群模式识别结果。(a) C 型建筑物群模式识别结果; (b) 直线型建筑物群模式识别结果。虚线圈标出的模式均为结合图形分解结果才能获取的建筑物群模式。
Fig 6. Pattern recognition with polygon decomposition. (a) Recognized C-like patterns; (b) Recognized linear patterns. Patterns circled out only can be recognized with polygon decomposition.

4 结论

本文考虑到建筑物图形带洞(或岛)表达的特点, 采用迭代策略依次消除当前图形中最大

凹点实现图形凸分解；图形凹点定义时考虑了图形凹部的层次关系；同时，图形分解时顾及了建筑物图形多直角和简洁表达的形态特点。实验证明本文方法能实现带洞或无洞建筑物图形的凸分解，分解结果符合人的视觉认知。同时，基于图形分解结果识别了建筑物群模式，证明结合图形分解有助于更详细地挖掘建筑物群的空间分布特征。但是，图形分解依据应用目的不同，分解原则和策略有时会不一样；同时，实际应用中建筑物图形局部常常包含相应的语义特征，如房屋布局等，结合语义特征和实际需要分解建筑物图形是下一步研究的重点。

参考文献

- [1] 艾廷华, 郭仁忠. 基于格式塔识别原则挖掘空间分布模式[J]. 测绘学报, 2007, 36(3): 303-308. (Ai T, Guo R. Polygon cluster pattern mining based on Gestalt principles[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2007, 36(3): 303-308.)
- [2] Rodrigues R S V, Morgado J F M, Gomes A J P. Part-based mesh segmentation: a survey[C]//Computer Graphics Forum. 2018, 37(6): 235-274.
- [3] 马燕新, 鲁敏, 滕书华等. 基于视觉显著性的层次形状分解方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2014, 26(06): 914-922. (Ma Y, Lu M, Teng S, et al. A visual salience based hierarchical shape decomposition algorithm[J]. Journal of Computer-Aid Design & Computer Graphics, 2014, 26(6): 914-922.)
- [4] Hu X, Fan H & Noskov A. (2018). Roof model recommendation for complex buildings based on combination rules and symmetry features in footprints[J]. International Journal of Digital Earth, 11(10): 1039-1063.
- [5] Du S, Shu M & Wang Q. (2019). Modelling relational contexts in GEOBIA framework for improving urban land-cover mapping[J]. GIScience & Remote Sensing, 56(2): 184-209.
- [6] Jiang J, Jiang Z, Kwan T H, et al. Study of Indoor Ventilation Based on Large-Scale DNS by a Domain Decomposition Method[J]. Symmetry, 2019, 11(11): 1416.
- [7] Singh M, Seyranian G D, Hoffman D D. Parsing silhouettes: The short-cut rule[J]. Perception & Psychophysics, 1999, 61(4): 636-660.
- [8] Luo L, Shen C, Liu X, et al. A Computational Model of the Short-Cut Rule for 2D Shape Decomposition[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2014, 24(1): 273-283.
- [9] 何立恒, 鲍其胜, 王志杰. 邻近凹点角平分线的多边形顶点快速凸分算法研究及应用[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2013, 37(5): 165-168. (He L, Bao Q, Wang Z. Research and application on algorithm for decomposing a concave polygon into convex polygons of adjacent angle bisector of concave point and vertex of polygon[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2013, 37(5): 165-168.)
- [10] Kim D H, Yun I D, Sang U L. Interactive 3-D Shape Retrieval System Using the Attributed Relational Graph[C]// Conference on Computer Vision & Pattern Recognition Workshop. IEEE Xplore, 2004.
- [11] Dash K S, Puhan N B, Panda G. Unconstrained handwritten digit recognition using perceptual shape primitives[J]. Pattern Analysis & Applications, 2016.
- [12] Fotopoulou F, Economou G. On the definition of Shape Parts: a Dominant Sets Approach[J]. Pattern Analysis & Applications, 2017.
- [13] Qu W, Ma M, Li Z, et al. A coarse-to-fine shape decomposition based on critical points[J]. Concurrency and Computation Practice and Experience, 2017, 29(2): e4088.
- [14] Wang C, Lai Z. Shape decomposition and classification by searching optimal part pruning sequence[J]. Pattern Recognition, 2016, 206-217.
- [15] 郭仁忠, 艾廷华. 制图综合中建筑物多边形的合并与化简[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2000, 25(1): 25-30. (Guo R, Ai T. Simplification and Aggregation of Building Polygon in Automatic Map Generalization[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2000, 25(1): 25-30.
- [16] 杜佳威, 武芳, 李靖涵等. 一种河口湾海岸线渐进化简方法[J]. 测绘学报, 2018, 47(4): 547-556. (Du J, Wu F, Li J, et al. A Progressive Simplification Method for the Estuary Coastline[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2018, 47(4): 547-556.)
- [17] Ralf Juengling M M. Combinatorial Shape Decomposition[C]// Advances in Visual Computing, Third International Symposium, Isvc, Lake Tahoe, Nv, USA, November. DBLP, 2007.
- [18] Lipson H, Shpitalni M. Decomposition of a 2D polygon into a minimal set of disjoint primitives[C]//CSG96 Conference on Set-Theoretic Solid Modeling. 1996: 65-82.

- [19] Li Z, Hu J, Stojmenovic M, et al. Revisiting Spectral Clustering for Near-Convex Decomposition of 2D Shape[J]. Pattern Recognition, 2020, 105:107371.
- [20] Lien J M, Amato N M. Approximate convex decomposition of polygons*[J]. Computational Geometry, 2006, 35(1-2):100-123.
- [21] J. Zunic, P.L. Rosin, A convexity measurement for polygons, in: British Machine Vision Conference, 2002, pp. 173–182.
- [22] Ghosh M, Amato N M, Lu Y, et al. Fast approximate convex decomposition using relative concavity[J]. CAD Computer Aided Design, 2013, 45(2): 494-504.
- [23] Liu G, Xi Z, Lien J M. Dual-Space Decomposition of 2D Complex Shapes[C]// Computer Vision & Pattern Recognition. IEEE, 2014.
- [24] 郭庆胜, 黄远林, 郑春燕等. 2007. 空间推理与渐进式地图综合[M]. 武汉: 武汉大学出版社. (Guo Q, Huang Y, Zheng C. 2007. Spatial reasoning and progressive map generalization[M]. Wuhan: Wuhan University Press.)
- [25] 刘远刚, 郭庆胜, 孙雅庚等. 地图目标群间骨架线提取的算法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(02): 264-268. (Liu Y, Guo Q, Sun Y, et al. An Algorithm for Skeleton Extraction Between Map Objects[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2015, 40(2): 264-268.)
- [26] Ai T, Ke S, Yang M, et al. Envelope generation and simplification of polylines using Delaunay triangulation[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2017, 31(1-2):1-23.
- [27] 卢威, 艾廷华. 利用三角剖分骨架图提取简单多边形目标中心点[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(3):337-343. (Lu W, Ai T. Center Point Extraction of Simple Area Object Using Triangulation Skeleton Graph[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(3): 337-343.)
- [28] Sester M. Optimization approaches for generalization and data abstraction[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2005, 19(8-9): 871-897.
- [29] 苏为华. 多指标综合评价理论与方法问题研究[D]. 厦门大学, 2000. (Su W. Research on Multiple-Objective-Comprehensive-Evaluation[D]. Xiamen University, 2000.)
- [30] Du S, Shu M & Feng C. Representation and discovery of building patterns: A three-level relational approach. International Journal of Geographical Information Science, 2015, 30(6): 1161–1186.

作者简介: 魏智威 (1993—), 男 (汉族), 湖北赤壁人, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为地理信息可视化。

E-mail: 2011301130108@whu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41871378)

通信作者: 魏智威 助理研究员 E-mail:2011301130108@whu.edu.cn

First author: WEI Zhiwei, Male(Han), PhD, assistant researcher, majors in visualization of geo-information.

E-mail: 2011301130108@whu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (No.41871378)

Corresponding author: WEI Zhiwei, assistant researcher. E-mail: 2011301130108@whu.edu.cn

1、通信地址: 北京市海淀区中关村北一条 9 号科电大厦 魏智威 (收)

2、手机: 17720571080

3、身份证号: 421281199303030717

4、单位: 中国科学院空天信息创新研究院, 12100000MB1E85344J