

基于 DNA 序列比对的多直角建筑物图形形状相似性计算方法

魏智威^{1,2}, 郭庆胜^{3,4}, 程璐³, 刘洋³, 童莹³

1.中国科学院网络信息体系技术重点实验室, 北京 100830; 2.中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100830; 3.武汉大学资源与环境科学学院, 湖北武汉 430079; 4.武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北武汉 430079

Shape similarity measurement based on DNA alignment for buildings with multiple orthogonal features

WEI Zhiwei^{1,2}, GUO Qingsheng^{3,4}, Cheng Lu³, Liu Yang³, Tong Ying³

1.Key Laboratory of Network Information System Technology, Institute of Electronic, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100830; 2.The Aerospace Information Research Institute, Chinese Academic of Sciences, Beijing 100830; 3. School of Resources and Environment Science, Wuhan University, Wuhan 430079; 4. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079

Abstract: Shape similarity between buildings is useful for building matching, classification, retrieval, etc. As buildings tend to be designed with square angles, we proposed a method to measure shape similarity for buildings with multiple orthogonal features based on Needleman-Wunsch (NW) and Smith-Waterman (SW) algorithms. While encoding building shape into a sequence, adjacent two angles are taken as codes. Type, angle and length characteristics of the codes are described, and their similarity are then defined. NW and SW algorithms are applied to compute similarities between two encoding sequences of buildings. Shape-based query experiments show that proposed method in this paper can effectively measure the shape similarity between buildings. And the experimental results are also in line with human visual perception.

Keywords: buildings; shape similarity; spatial cognition; sequence analysis.

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

摘要: 建筑物图形形状相似性能有效用于建筑物匹配、分类和查询等, 基于 DNA 序列比对的 Needleman-Wunsch (NW) 和 Smith-Waterman (SW) 算法, 本文提出了一种度量多直角建筑物图形形状相似性的方法。该方法顾及到建筑物图形多直角表达的形态特征, 将邻近两个转折作为建筑物图形编码序列的基础元素, 并基于这些基础元素的类型、角度和长度特征定义基础元素间相似性; 其次, 利用 NW 和 SW 算法计算建筑物图形编码序列间的相似程度, 该相似程度表达了对应建筑物图形间的形状相似性。基于形状的空间查询实验结果表明, 本文所提出的方法能有效度量多直角建筑物图形间的形状相似性, 符合人的空间视觉认知。

关键字: 建筑物; 形状相似性; 空间认知; 序列分析

中图分类号: P208

文献标识码: A

基金项目: 国家自然科学基金 (41871378)

矢量图形之间的形状相似性计算是矢量图形匹配、分类和查询的基础^[1], 已广泛应用于 GIS 领域, 如基于图形相似性的同名实体匹配^[2]、基于模板的居民地化简^[3]和基于图形形状

的空间查询^[4,5]等。建筑物是矢量地图的基础地理要素之一，其形状相似性计算对建筑物图形数据处理具有重要意义。

图形形状相似性计算有赖于对图形形状的定量描述，如基于图形轮廓，可以用傅里叶级数拟合图形轮廓^[6, 7]、用曲率尺度空间表达图形轮廓的曲率变化^[8]、用序列编码图形轮廓的局部特征^[1, 9]等；基于图形区域，有基于矩的形状描述方法^[10]，也可以描述图形的面积、延展度^[11]等；基于图形结构，可以用骨架线作为图形的结构化表达^[12]。其中，用序列编码图形轮廓的局部特征，能较好分析图形的轮廓形态；同时，匹配序列中基础元素度量图形间形状相似性较为形象直观，是矢量图形形状相似性计算较常采用的方法^[1]。用序列编码图形需确定编码的基础元素，并描述基础元素的特征。如基于特征点编码图形，可以描述特征点的角度、相对于邻近点的可变形势、邻近点相对于该点的切线距离函数等^[13-15]；基于边编码图形，可以描述边的方向、长度等^[16]；基于弧段编码图形，可以描述弧段的弓高弦长比、弧长弦长比等^[17]。但是，建筑物图形通常相对简单，节点较少，基于特征点或边编码的图形相似结果离散程度高、区分度小；另外，建筑物多具有直角表达的形态特征，即几何转折明显且无连续弯曲，不适宜用弧段编码建筑物图形。

DNA 序列是生物信息学研究的重要对象，有成熟的计算 DNA 序列间相似性的方法，如经典的 NW 和 SW 算法^[18]。因此，本文试图充分考虑建筑物图形多直角表达的形态特征，将建筑物图形编码成类似 DNA 的序列，利用 NW 和 SW 算法计算建筑物图形编码序列间相似程度。

1. DNA 序列比对的 NW 和 SW 算法

DNA 序列比对是生物信息学中基因组测序的关键技术之一，其通过匹配 DNA 序列中碱基获取不同 DNA 序列间相似程度^[18]。其中，NW 和 SW 算法是 DNA 序列比对时常用的两种基于动态规划原理的优化方法；NW 算法旨在找到两序列在全局上的最佳匹配，可获取两序列比对的全局最大相似性(GsF)；SW 算法旨在找到两序列相似性最大的片段，可获取两序列比对的局部最大相似性(LsF)^[18]。

首先，DNA 序列比对需匹配 DNA 序列中碱基，依据 DNA 在自然界的复制规律，DNA 中碱基存在匹配(*Match*)、误匹配(*MisMatch*)和空缺(*Gap*)3 种匹配关系^[18]，定义见表 1。例如，给定 DNA 序列 $Q_m = \{A, G, C, A, C, T\}$ ， $Q_n = \{A, G, T, A, T\}$ ，比对序列 Q_m 、 Q_n 可能存在如表 1 的匹配关系；其中，匹配对(A, A)、(G, G)、(A, A)、(T, T)为 *Match* 关系，(C, T)为 *MisMatch* 关系，(C, -)为 *Gap* 关系。

表 1. DNA 序列比对举例

Q_m	A	G	C	A	C	T			<i>Match</i> : 序列中碱基相互匹配
									<i>MisMatch</i> : 序列中碱基相互不匹配
Q_n	A	G	T	A	-	T			<i>Gap</i> : 序列中碱基在另一序列中不存在匹配

其次，不同匹配关系的碱基对对于 DNA 序列间相似性贡献不一样，可以转化为得分。匹配对关系为 *Match* 需加分，匹配对关系为 *MisMatch* 或 *Gap* 则需罚分，匹配碱基对(x^m_i, x^n_j)的得分 $MScore(x^m_i, x^n_j)$ 可依据 DNA 中碱基替换的频率确定^[18]。

最后，基于定义的碱基对匹配关系和匹配对得分比对 DNA 序列 Q_m 和 Q_n 时，NW 算法即找到匹配关系 $f_R = Q_m \rightarrow Q_n$ ，使 $QScore = \sum_{i=0}^M MScore(x^m_i, x^n_i)$ 最大， M 表示序列 Q_m 、 Q_n 在匹配关系 f_R 下的匹配对数。基于动态规划原理，利用 NW 算法比对序列 Q_m 与 Q_n 时需构造一个 $(p+1)*(q+1)$ 的得分矩阵， p 表示序列 Q_m 中碱基个数， q 表示序列 Q_n 中碱基个数，矩阵

i 行 j 列的元素 $H(i, j)$ 表示序列 Q_m 前 $(i-1)$ 个碱基与序列 Q_n 前 $(j-1)$ 个碱基匹配的最优得分。因此，若从矩阵的左上方往右下方依次更新 $H(i, j)$ ，就可以获取序列 Q_m 与 Q_n 比对的 GsF ，即 $H(p+1, q+1)$ ；其中， $H(0, 0)=0$ ， $H(i, j)$ 更新满足公式(1)。

$$H(i, j) = \text{Max} \begin{cases} H(i-1, j-1) + \text{MScore}(x_i^m, x_j^n) \\ H(i-1, j) + \text{MScore}(x_i^m, -) \\ H(i, j-1) + \text{MScore}(-, x_j^n) \end{cases} \quad (1)$$

x_i 表示序列 Q_m 第 i 个位置碱基， x_j 表示序列 Q_n 第 j 个位置碱基， $-$ 表示对应位置为空，即存在 Gap 关系。

SW 算法即找到匹配关系 $f_R = Q_m \rightarrow Q_n$ ，使 $QScore = \sum_{i=i'}^{M'} \text{MScore}(x_i^m, x_{i'}^n)$ 最大；

$i' \geq 0, M' \leq M$ ， M' 表示序列 Q_m 、 Q_n 在匹配关系 f_R 下的匹配对数。同理，SW 算法也可以基于动态规划原理实现，即需要构造一个 $(p+1)*(q+1)$ 的得分矩阵。由于 SW 算法旨在找到两序列相似性最大的片段，其实现与 NW 算法略有不同：首先，局部序列匹配得分的最小值为 0，因此，从矩阵的左上方往右下方依次更新 $H(i, j)$ 时，若公式(1)中 $H(i, j) < 0$ 时， $H(i, j)=0$ ；其次，SW 算法比对序列 Q_m 、 Q_n 时不要求两序列中碱基一定存在匹配关系，因此，序列 Q_m 与 Q_n 比对的 LsF 为得分矩阵中取值最大的 $H(i, j)$ ，而非 $H(p+1, q+1)$ 。

2. 基于 NW 和 SW 算法的建筑物图形形状相似性计算

本文建筑物图形形状相似性计算过程是：首先，将建筑物图形编码成类似 DNA 的序列；其次，定义序列中基础元素的匹配关系与匹配对得分；最后，利用 NW 与 SW 算法计算相应建筑物图形编码序列间全局相似性(GsF)与局部相似性(LsF)表达对应建筑物图形间形状相似性。

2.1 建筑物图形的序列编码

考虑到建筑物图形上节点和边的关联关系，可以将节点与节点关联边构成的转折作为建筑物图形序列编码的基础元素^[19]；同时，邻近转折可能会构成特殊的结构，需将邻近的转折联合起来表达。其中，考虑到数据采集、存储误差可能导致的异常节点，如重复点、共线点、尖锐点等需在编码前删除^[20]。

假设构成建筑物多边形的有序节点集合为 $AP = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ ， $p_1 \neq p_n$ ，转折 C_m 可以表示成点集合 $\{p_{m-1}, p_m, p_{m+1}\}$ 或边集合 $\{p_{m-1}p_m, p_m p_{m+1}\}$ ， $p_{m-1}, p_m, p_{m+1} \in AP$ 。转折 C_m 的角度即节点 p_m 处角度(C_m^{angle})，为边 $p_{m-1}p_m$ 绕节点 p_m 逆时针旋转至边 $p_m p_{m+1}$ 的角度。依据转折 C_m 角度的不同，可以利用四方向或八方向编码将建筑物表示成以转折为基础元素的类似 DNA 的离散编码形式^[20]。但是，建筑物作为人造地物，往往呈现出多直角表达的形态特征，如一些建筑物化简方法中会将接近直角一定范围内的转折作为直角处理^[19]。因此，利用四方向或八方向对建筑物图形进行编码时，需考虑转折 C_m 角度是否为直角。本文直角定义如下：若 C_m^{angle} 满足条件 $|C_m^{angle} - 90^\circ| < \alpha \vee |C_m^{angle} - 270^\circ| < \alpha$ ，则 C_m^{angle} 为直角；其中， $\alpha=15^\circ$ 。依据该定义，对 Ordnance Survey 开源提供的制图比例尺 1:10,000 的街道层次地图中 765961 个建筑物图形外轮廓角度特征进行统计分析显示，其中直角占比为 96.06%，呈现出明显的多直角表达形态特征；源数据下载地址：<http://freegisdata.rtwilson.com/>。因此，考虑到建筑物图形

多直角表达的形态特征，以转折为基础元素的建筑物图形序列编码表见表 2，则图 1(a)所示的建筑物若以转折 ABC 为起点进行编码，可以表示成以转折为基础元素的有序序列：32552223423，如图 1(e)。

表 2.以转折为基础元素的建筑物图形序列编码表

C_{angle}	$[0^\circ, 75^\circ]$	$[75^\circ, 105^\circ]$	$[105^\circ, 180^\circ]$	$[180^\circ, 255^\circ]$	$[255^\circ, 285^\circ]$	$[285^\circ, 360^\circ]$
编码	1	2	3	4	5	6

同时，邻近转折可能会构成特殊结构，特别是邻近的直角转折，往往被认为具有较强的视觉含义，常作为建筑物图形数据处理的基础单元^[21]。如文献[22]将凹部作为建筑物化简的基础结构；文献[23]则依据邻近转折的角度差异将建筑物外轮廓划分为凸部（凹部）和阶梯状结构等。其中，凸部则可以认为是邻近的两个凸角转折构成，如图 1(b)中结构 $ABCD$ 和结构 $EFGH$ ；凹部可认为是邻近的两个凹角转折构成，如图 1(c)中结构 $CDEF$ ；另外，邻近的凸角转折与凹角转折则会组合形成阶梯状结构，如图 1(d)中结构 $DEFG$ 和结构 $HIJK$ 。尽管出于不同需要也可以定义其它特殊结构，如连续的阶梯状结构等，这些结构都可以看成是凸部、凹部和阶梯状结构等的组合^[22]。因此，考虑到建筑物图形中邻近转折可能会构成的基础结构，本文将邻近的两个转折联合起来作为基础元素对建筑物图形进行编码，可表示成 $S_m = \{C_m, C_{m+1}\}$ 。因此，图 1(a)所示的建筑物若以转折 ABC 为起点进行编码，可以表示成以邻近转折为基础元素的有序序列： $S_{32}S_{25}S_{55}S_{52}S_{22}S_{22}S_{23}S_{34}S_{42}S_{23}$ ，图 1(f)。对前文数据集中建筑物基础结构特征进行统计分析显示，邻近转折均为直角构成的凸部（ S_{22} ）、凹部（ S_{55} ）和阶梯状结构（ S_{25} 和 S_{52} ）占比分别为 89.22%，0.57%和 4.77%，是其中的主要基础结构。

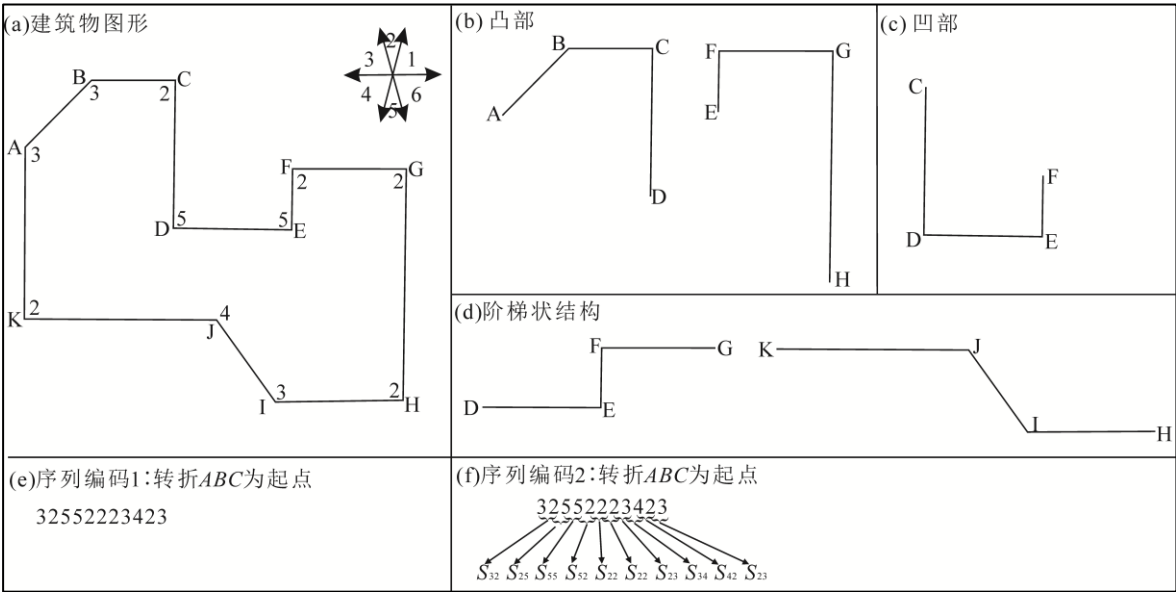


图 1.建筑物图形序列编码。(a) 示例建筑物图形；(b) 凸部；(c) 凹部；(d) 阶梯状结构；(e) 示例建筑物图形以转折为基础元素的有序序列编码结果；(f)示例建筑物图形以邻近转折为基础元素的有序序列编码结果。

2.2 基础元素匹配关系与匹配对得分

(1) 基础元素特征描述

本文将邻近的两个转折联合起来作为基础元素对建筑物图形进行编码，即 $S_m = \{C_m, C_{m+1}\}$ 。其中，构成 S_m 的转折 C_m 和 C_{m+1} 因角度的凹、凸性会组合形成不同基础结构，如凹部、凸部等，见图 1；另外，需记录基础元素的几何特征，如构成 S_m 转折的角度、边的长度等。

类型划分：假设构成 S_m 的转折 C_m 和 C_{m+1} 角度分别为 C_m^{angle} 与 C_{m+1}^{angle} (角度编码见表 2)，依据章节 2.1 的分析，基于邻近转折角度的凹、凸性，可以将 S_m 划分为四种类型(S_{Type})，见表 3：凸部($DentS$)，邻近转折角度均为凸角，如图 1(b)中结构 $ABCD$ 和结构 $EFGH$ ；左阶梯结构($LStairS$)，邻近转折角度为凸角和凹角，如图 1(d)中结构 $HLJK$ ；右阶梯结构($RStairS$)，邻近转折角度为凹角和凸角，如图 1(d)中结构 $DEFG$ ；凹部($SnugS$)，邻近转折角度均为凹角，如图 1(c)中结构 $CDEF$ 。

表 3. 基础元素类型划分

S_{mm+1}	C_m^{angle}	C_{m+1}^{angle}	S_{Type}
1	$C_m^{angle} \in [1, 2, 3]$	$C_{m+1}^{angle} \in [1, 2, 3]$	$DentS$
2	$C_m^{angle} \in [1, 2, 3]$	$C_{m+1}^{angle} \in [4, 5, 6]$	$LStairS$
3	$C_m^{angle} \in [4, 5, 6]$	$C_{m+1}^{angle} \in [1, 2, 3]$	$RStairS$
4	$C_m^{angle} \in [4, 5, 6]$	$C_{m+1}^{angle} \in [4, 5, 6]$	$SnugS$

角度特征：假设构成 S_m 的转折 C_m 和 C_{m+1} 角度分别为 C_m^{angle} 与 C_{m+1}^{angle} ，(角度编码见表 2)， S_m 的角度特征记为 $S_m^{angle} = \{C_m^{angle}, C_{m+1}^{angle}\}$ 。

长度特征：假设构成 S_m 的边 $p_{m-1}p_m$ 、 $p_m p_{m+1}$ 和 $p_{m+1}p_{m+2}$ 长度分别为 L^{m-1} 、 L^m 和 L^{m+1} ， S_m 的长度特征记为 $S_m^{Length} = \{L^{m-1}, L^m, L^{m+1}\}$ 。

(2) 匹配关系与匹配对得分

建筑物图形编码基础元素(S_m)存在不同类型(S_{Type})，不同类型 S_m 在视觉上存在明显差异；同一类型 S_m 在视觉上表现出一定相似性。因此，给定匹配对($S1_m, S2_n$)，其匹配关系定义如下。

Match：若 $S1_m.S_{Type} = S2_n.S_{Type}$ ，则($S1_m, S2_n$)构成 *Match* 关系；

MisMatch：若 $S1_m.S_{Type} \neq S2_n.S_{Type}$ ，则($S1_m, S2_n$)构成 *MisMatch* 关系；

Gap：若 $(S1_m = null) \vee (S2_n = null)$ 为真，则($S1_m, S2_n$)构成 *Gap* 关系。

若匹配对($S1_m, S2_n$)为 *Match* 关系，匹配对得分由基础元素 $S1_m, S2_n$ 间相似性确定。其中，若($S1_m, S2_n$)为 *Match* 关系，则 $S1_m$ 、 $S2_n$ 属于同一类型。因此，基础元素 $S1_m$ 和 $S2_n$ 的相似性由其角度特征和长度特征的相似性确定。假设 $S1_m$ 和 $S2_n$ 的角度特征分别为 $S1_m^{angle} = \{C1_m^{angle}, C1_m^{m+1angle}\}$ 和 $S2_n^{angle} = \{C2_n^{angle}, C2_n^{n+1angle}\}$ (角度编码见表 2)，构成基础元素对应两个转折的角度差值和能表示基础元素间角度特征差异，可以用形如 $x'_i = (Max\{x_i\} - x_i) / (Max\{x_i\} - Min\{x_i\})$ 的极值标准化方法表达^[11]。其中，构成 $S1_m$ 和 $S2_n$ 对应转折的角度最大差值和为 4，最小差值和为 0。为避免基础元素角度特征相似性(As)取值为 0，取转折角度的最大差值和为 5，因此， As 的计算见公式(2)。

$$As = (5 - |C1_m^{angle} - C2_n^{angle}| + |C1_m^{m+1angle} - C2_n^{n+1angle}|) / 5 \quad (2)$$

假设基础元素 $S1_m$ 和 $S2_n$ 的长度特征分别 $S1_m^{Length} = \{L1^{m-1}, L1^m, L1^{m+1}\}$ 和 $S2_n^{Length} = \{L2^{n-1}, L2^n, L2^{n+1}\}$ ，基础元素的长度特征相似性(Ls)由构成基础元素对应 3 条边的相似性和表示，边的长度相似性可以用边长度的比值表示。因此，基础元素 $S1_m$ 和 $S2_n$ 的 Ls 定义见公式(3)。

$$Ls = \left(\frac{Min(L1^{m-1}, L2^{n-1})}{Max(L1^{m-1}, L2^{n-1})} + \frac{Min(L1^m, L2^n)}{Max(L1^m, L2^n)} + \frac{Min(L1^{m+1}, L2^{n+1})}{Max(L1^{m+1}, L2^{n+1})} \right) / 3 \quad (3)$$

基础元素的相似性(S_s)需综合考虑基础元素的 A_s 和 L_s ; 其中, 角度和长度分别独立描述基础元素的不同侧面, 相关性较弱, 故 S_s 可以表示成 A_s 和 L_s 的线性组合, 见公式(4)^[24]。

$$S_s = A_s * w_1 + L_s * w_2 \quad (4)$$

w_1 和 w_2 表示权重, $w_1 + w_2 = 1$ 。

若匹配对($S1_m, S2_n$)为 *MisMatch* 或 *Gap* 关系, 均需要罚分, 表示两图形对应位置在视觉感知上不相似。参考 DNA 序列匹配针对 *gap* 关系的罚分, 需考虑 *Gap* 关系的连续性, 即随着 *Gap* 关系的延续, 可能会加强或减弱对应匹配对的相似性^[18]。因此, 本文针对 *MisMatch* 或 *Gap* 关系的罚分见公式(5)。

$$P_s = d + (n - 1) * e \quad (5)$$

d 表示开启一个 *MisMatch* 或 *Gap* 关系的罚分, n 表示延续 *MisMatch* 或 *Gap* 关系的个数, e 表示延续一个 *MisMatch* 或 *Gap* 关系的罚分。

同时, 不同基础元素在建筑物图形中重要性不一样, 匹配对($S1_m, S2_n$)的得分或罚分需考虑相应基础元素的重要性, 如文献[25]认为, 人对图形进行视觉感知时, 倾向于抓住主要结构而忽略次要细节。因此, 重要基础元素构成的匹配对($S1_m, S2_n$)得分或罚分往往相对高, 基础元素的重要性可以用其总长度表示。假设存在匹配对($S1_m, S2_n$), 构成基础元素 $S1_m$ 和 $S2_n$ 三条边的总长度分别为 $SumL_1^m$ 和 $SumL_2^n$; 若匹配对为 *Gap* 关系, 表示其中一个基础元素不存在, 其总长度记为 0。假设依据公式(4)和(5)计算出匹配对($S1_m, S2_n$)的得分或罚分为 S_s , 则匹配对($S1_m, S2_n$)的最终得分或罚分 ($MScore$) 计算见公式(6)。

$$MScore = \begin{cases} S_s * \min(SumL_1^m, SumL_2^n) & (S_s \geq 0) \\ S_s * \max(SumL_1^m, SumL_2^n) & (S_s < 0) \end{cases} \quad (6)$$

2.3 建筑物序列相似性计算

假设给定建筑物 Po_m 和 Po_n , 依次选择 Po_m 和 Po_n 中不同节点为起点编码, 构成编码集合 $QSet_m = \{Queue^m_1, Queue^m_2, \dots, Queue^m_p\}$ 和 $QSet_n = \{Queue^n_1, Queue^n_2, \dots, Queue^n_p\}$, 两两配对集合 $QSet_m$ 和 $QSet_n$ 中序列可获取两建筑物图形编码序列的 GsF 集合 $GsSet = \{Gs_{11}, Gs_{12}, \dots, Gs_{ij}, \dots, Gs_{pq}\}$ 和 LsF 集合 $LsSet = \{Ls_{11}, Ls_{12}, \dots, Ls_{ij}, \dots, Ls_{pq}\}$, 则两建筑物的 GsF 取 $\max\{Gs_{11}, Gs_{12}, \dots, Gs_{ij}, \dots, Gs_{pq}\}$, 两建筑物的 LsF 取 $\max\{Ls_{11}, Ls_{12}, \dots, Ls_{ij}, \dots, Ls_{pq}\}$ 。

建筑物间形状相似性(GL_s)需综合考虑两建筑物的 GsF 与 LsF 。其中, 指标 GsF 与 LsF 具有较大的相关性, 且 $LsF \geq 0$, GL_s 适宜表示成 GsF 与 LsF 的乘数组合, 见公式(7)^[24]。

$$GL_s = \begin{cases} (GsF * LsF)^{\frac{1}{2}} & (GsF \geq 0) \\ -(|GsF| * LsF)^{\frac{1}{2}} & (GsF < 0) \end{cases} \quad (7)$$

3. 实验与讨论

3.1 实验

选择 OSM 地图中北京地区建筑物作为源数据制作检验本文方法有效性的形状数据库, 源数据见图 2(a), 局部区域放大见图 2(b), 下载地址: <https://www.openstreetmap.org/>。选择方形(T_1)、L 型(T_2)、T 型(T_3)、C 型(T_4)、阶梯型(T_5)、十字型(T_6)共 6 种较常见的建筑物图

形作为典型建筑物^[3]，从源数据中选择与对应典型建筑物(T_1 - T_6)形状相似的 194 个建筑物目标构成形状数据库，见图 2(c)，形状数据库的统计结果见表 4。其中，形状数据库中与典型建筑物(T_1 - T_6)形状相似的建筑物是依据多名从事地图学研究的硕士生或博士生的视觉感知实验结果投票选出的，本文形状数据库已开源，下载地址：<https://data.mendeley.com/datasets/pfmf4y344h/1>。

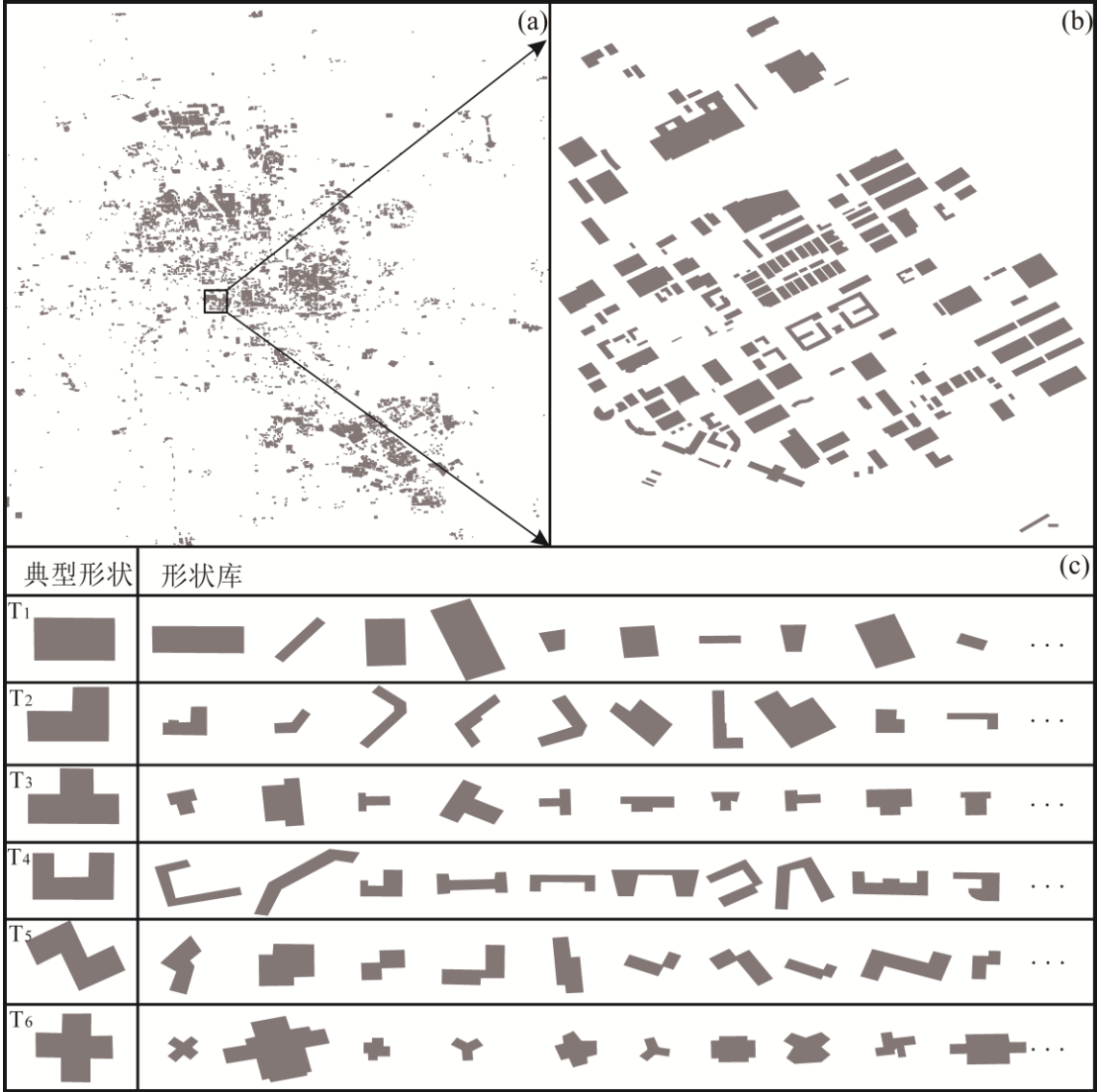


图 2.形状数据库。(a)OSM 地图北京地区建筑物数据源数据；(b)OSM 地图北京地区建筑物数据源数据局部放大图；(c)本文形状数据库。

表 4. 形状数据库统计结果

典型形状	方形(T ₁)	L 型(T ₂)	T 型(T ₃)	C 型(T ₄)	阶梯型(T ₅)	十字型(T ₆)	合计
数量	30	52	21	47	29	15	194

实验在 AE10.2 基础上利用 C#二次开发实现本文所提方法，实验平台为一台 CPU 为 Intel(R) Core(TM) i5-8265U CPU @1.60GHz、内存为 8GB、操作系统为 Windows 10(64 位)的计算机。实验参数设置如下：公式(5)中取 $w_1=0.8$ ， $w_2=0.2$ ；公式(6)中取 $d=-0.8$ ，取 $e=-0.5$ 。

依据形状数据库中建筑物(B_i)与典型建筑物图形(T_1 - T_6)的形状相似性(GLs)，确定 B_i 最相

似的典型建筑物(GLs 越大表示图形间形状越相似), 并与人的视觉认知进行比对, 结果统计见表 5; 其中, tp 表示结果中与人视觉感知一致的建筑物数目, fp 表示结果中不被认为是视觉感知相似的建筑物数目; fn 表示结果中遗漏的与人视觉感知相似的建筑物数目。由表 5 可知, 依据 GLs 正确识别 177 个, 错误识别 17 个, 识别准确率为 91.2%; 其中, 针对不同类型的典型建筑物图形, 识别准确率均达到 80.8%以上, 且对于阶梯型(T_5)和十字型(T_6)两类典型建筑物, 准确率均达到 100%。实验结果一定程度上说明, 本文方法在基于形状的建筑物图形检索与匹配上具有较好的性能。

表 5. 基于形状的建筑物空间查询结果

	tp	fp	fn	查全率= $tp/(tp+fp)$	查准率= $tp/(tp+fn)$
方形(T_1)	29	1	1	96.7%	96.7%
L 型(T_2)	42	10	10	80.8%	80.8%
T 型(T_3)	18	3	3	85.7%	85.7%
C 型(T_4)	44	3	3	93.6%	93.6%
阶梯型(T_5)	29	0	0	100%	100%
十字型(T_6)	15	0	0	100%	100%
合计	177	17	17	91.2%	91.2%

3.2 讨论

(1) 方法对比

为验证本文所提方法有效性, 分别基于转角函数(Ts)^[9]和多级弦长函数的傅立叶形状描述子(Fs)^[7]计算了建筑物间形状相似性, 并与本文所提方法的结果进行对比, 结果见表 6。其中, 基于转角函数计算图形间形状相似性对于起始点的选择较为敏感, 本文基于转角函数(Ts)计算建筑物间形状相似性时也参考了文献[3]的策略。不同方法实验耗时统计如下: 基于 GLs 耗时为 9.73s, 基于 Ts 耗时为 3.31s, 基于 Fs 耗时为 0.48s。

对比表 5 和表 6 中结果可知, 基于本文方法(GLs)耗时最大, 但是其准确率也最高, 均明显高于基于 Ts 的识别准确率(59.8%)和基于 Fs 的识别准确率(51.5%); 基于 Fs 的耗时最小, 但是其识别准确率(51.5%)也最低。同时, 基于 Ts 在识别阶梯型(T_5)和十字型(T_6)建筑物的准确率为 13.8%和 46.7%; 基于 Fs 在识别 L 型(T_2)和十字型(T_6)建筑物的准确率为 15.4%和 33.3%; 均低于 50%, 准确率较低。

表 6. 基于 Ts 和 Fs 的建筑物空间查询结果

		tp	fp	fn	查全率= $tp/(tp+fp)$	查准率= $tp/(tp+fn)$
方形(T_1)	基于 Ts	28	2	2	93.3%	93.3%
	基于 Fs	27	3	3	90.0%	90.0%
L 型(T_2)	基于 Ts	28	24	24	53.8%	53.8%
	基于 Fs	8	44	44	15.4%	15.4%
T 型(T_3)	基于 Ts	12	9	9	57.1%	57.1%
	基于 Fs	13	8	8	61.9%	61.9%
C 型(T_4)	基于 Ts	37	10	10	78.7%	78.7%
	基于 Fs	26	21	21	55.3%	55.3%
阶梯型(T_5)	基于 Ts	4	25	25	13.8%	13.8%
	基于 Fs	21	8	8	72.4%	72.4%
十字型(T_6)	基于 Ts	7	8	8	46.7%	46.7%
	基于 Fs	5	10	10	33.3%	33.3%
合计	基于 Ts	116	78	78	59.8%	59.8%
	基于 Fs	100	94	94	51.5%	51.5%

同时，选择 3 个典型建筑物图形对比分析三种不同方法，结果见图 3。对于建筑物 1，基于 GLs 和 Fs 均获得了与视觉认知一致的结果，而基于 Ts 获得的结果与视觉认知不一致，这是因为 Ts 相对于 GLs 没有有效考虑到连续直角构成的特殊结构，这些特殊结构在识别建筑物图形时具有较明显的视觉含义^[23]。对于建筑物 2，基于 GLs 获得了与视觉认知一致的结果，而基于 Ts 和 Fs 获得的结果均与视觉认知不一致，这是因为 Ts 相对于 GLs 在对比局部结构时，没有有效考虑到局部结构比对时可能存在的 *Gap* 情况。 Fs 由于是基于图形轮廓从整体上利用傅立叶描述子表达图形形状，当图形间复杂程度接近时 Fs 相对不敏感，即图 3 中建筑物 2 与各模板相似程度均较大；同时， Fs 无法有效顾及到建筑物图形多直角表达的形态特征^[3]。对于建筑物 3，基于 Fs 获得了与视觉认知一致的结果，而基于 Ts 和 GLs 获得的结果均与视觉认知不一致，这是因为基于 GLs 的识别是以比对连续直角构成的特殊结构组成的序列为基础，若建筑物不具备多直角表达的形态特征，且两建筑物复杂程度差异过大时， GLs 往往取值较低（见图 3）。因此， GLs 相比于 Fs 更适宜多直角表达的简单图形间的形状相似性计算。其中，前文对 Ordnance Survey 开源提供的制图比例尺 1:10,000 的街道层次地图中 765961 个建筑物图形外轮廓角度特征进行统计分析显示，其中直角占比为 96.06%，呈现出明显的多直角表达形态特征，因而，建筑物形状相似性计算较适宜使用 GLs 。而 Fs 则相对更适宜非多直角表达的复杂图形间的形状相似性计算，如面状湖泊、河流等。




相似度		模板	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	视觉认知结果
目标									
1		GLs	0.455	0.618	0.549	0.822	0.347	-0.155	
		Ts	0.957	0.755	0.766	0.772	0.967	0.936	X T ₄
		Fs	0.478	0.498	0.705	0.801	0.676	0.600	
2		GLs	0.530	0.657	0.486	0.547	0.222	0.145	
		Ts	0.264	0.542	0.517	0.602	0.542	0.697	X T ₂
		Fs	0.736	0.761	0.844	0.801	0.831	0.874	X
3		GLs	-0.196	-0.196	-0.193	-0.189	-0.187	-0.181	X
		Ts	1.749	1.575	1.830	1.649	1.672	1.646	X T ₄
		Fs	0.442	0.484	0.725	0.812	0.667	0.632	

图 3.典型建筑物分析

(2) 参数敏感性分析

公式(5)和公式(6)中的参数需要设置，我们依据建筑物图形特征设置了经验阈值。公式(5)中，考虑到人对于形状感知时，角度较长度的视觉感知往往更明显^[25]，因此，实验中 w_1 取值大于 w_2 。分析参数 w_1 、 w_2 影响时，固定公式(6)中参数 $d=-0.8$ ， $e=-0.5$ ；分别设置 $w_1=0.0,0.1,...,0.9,1.0$ ，对应设置 $w_2=1.0,0.9,...,0.1,0.0$ ，基于不同参数设置，前文实验中基于 GLs 的建筑物图形识别准确率(PR)变化见图 4(a)。由图 4(a)可知，当 w_1 取值适当大于 w_2 时，即 $w_1=0.8, w_2=0.2$ 或 $w_1=0.7, w_2=0.3$ 时， PR 最高，为 91.2%；当 w_1 取值较大或 w_1 取值小于 w_2 时， PR 均有所下降。

同时，统计参数 w_1 、 w_2 取不同值时建筑物图形间形状相似性(GLs)变化。图 4(b)表示参数设置为 $w_1=1.0, w_2=0.0$ 和 $w_1=0.0, w_2=1.0$ 时，形状数据库中任选的 23 个建筑物与典型建筑物 T_3 的 GLs 。由图可知，当 w_1 取值减小时， GLs 会减小，这是由于建筑物多直角表达的形态特征所致，即若 2.1 中定义的基础结构构成 *Match* 关系，则角度特征相似性往往较大，

大于对应的长度特征相似性。另外，若 $w_1=0.0, w_2=1.0$ ，即只考虑基础结构的长度特征相似性时， GLs 均小于 0.5，而基于本文的定义，理论上 $GLs \in [-1,1]$ ，故实际应用中 w_1 取值需适当大于 w_2 。

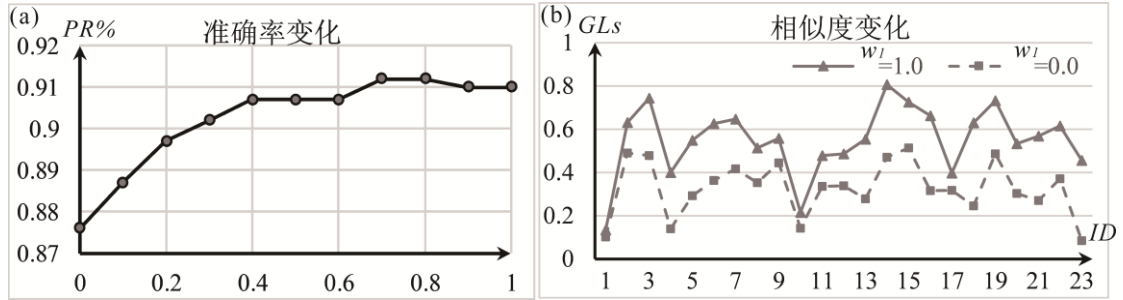


图 4. 参数 w_1 、 w_2 影响分析。(a) 图形匹配准确率(PR)随参数 w_1 取值变化；(b) 图形形状相似度(GLs)随参数 w_1 取值变化对比。

公式(6)中，参考 DNA 序列匹配时罚分权重的设置，若用于匹配的 DNA 序列发生碱基对替换的可能性较高，即可能存在较多 *MisMatch* 或 *Gap* 关系时，罚分通常设置较高，即对于差异大的序列，可设置较大的罚分^[18]。考虑到建筑物图形相对简单，若两图形存在 *MisMatch* 或 *Gap* 关系，则该匹配关系就可能在序列中占比较大；因此，实验中设置了较大的 d 和 e 。

固定公式(5)中参数 $w_1=0.8, w_2=0.2$ ，分别取值 $d=-0.8, e=-0.5$ 和 $d=-0.4, e=-0.25$ ，分析参数 d 与 e 变化对实验结果的影响。图 5(a)表示参数 d 与 e 取不同值时，形状数据库中任选的 23 个建筑物与典型建筑物 T_3 的 GLs ，由图可知，随着参数 d 与 e 取值变大， GLs 会变小。图 5(b)表示形状数据库中任选的 23 个建筑物分别与 6 个典型建筑物(T_1 - T_6) GLs 的标准差(Std)，由图可知，当参数 d 与 e 取值较大时， Std 会更大，这意味着此时 GLs 的区分性更强。

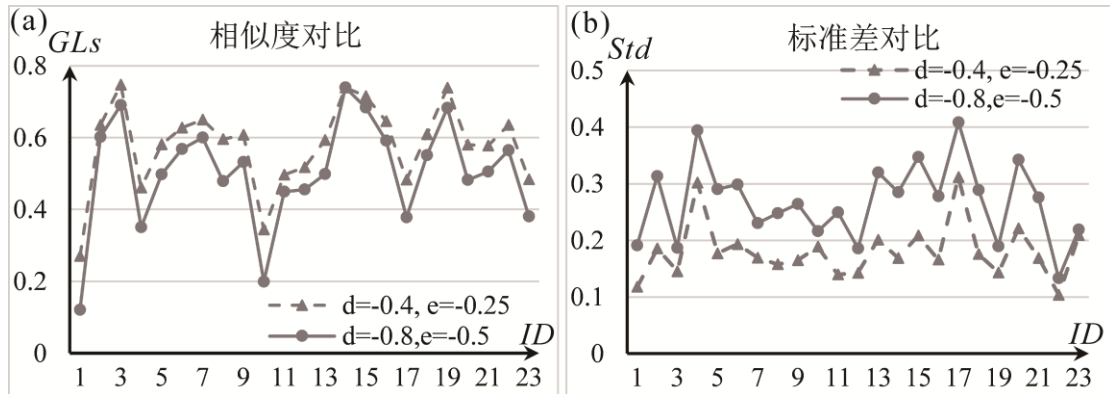


图 5. 参数 d 、 e 影响分析。(a) 图形形状相似度(GLs)随参数 d 、 e 取值变化对比。；(b) 标准差(Std)随参数 d 、 e 取值变化对比。

依据上文分析可知，实际应用时公式(5)中 w_1 取值需适当大于 w_2 ；公式(6)中若用于计算 GLs 的建筑物图形复杂程度相近时，参数 d 与 e 可取较大值，因为此时 GLs 区分性更好；若用于计算 GLs 的建筑物图形复杂程度差异大时，参数 d 与 e 可取较小值。因此，本文算法针对复杂程度差异不同的建筑物图形分别设置两组参数缺省值：(1) $w_1=0.8, w_2=0.2, d=-0.8, e=-0.5$ ；(2) $w_1=0.8, w_2=0.2, d=-0.4, e=-0.25$ 。依据文献[26]，建筑物图形的边数比(Er)可作为建筑物图形复杂程度差异的近似度量：若数据集中建筑物间平均边数比

$aEr > 0.6$, 表示数据集中建筑物间复杂程度相近, 取参数组(1); 否则, 取参数组(2)。另外, 本文算法参数均为可选项, 实际应用过程中用户也可依据需要进行设置。

4. 结论

为了计算建筑物图形间形状相似性, 本文将建筑物图形编码成序列, 应用 DNA 序列比对的 NW 和 SW 算法, 计算序列间相似性。建筑物图形序列编码时充分顾及了建筑物图形多直角表达的形态特征。实验证明本文所提方法计算的建筑物图形间形状相似性符合人的视觉空间认知。但是, 实际应用中建筑物图形形状复杂多样, 未来将结合机器学习方法等动态调整算法参数和基础元素匹配关系, 提高算法的智能化程度。

参考文献:

- [1] Veltkamp R C. Shape matching: similarity measures and algorithms[C]. Proceedings International Conference on Shape Modeling and Applications, Genova, Italy, 2001, 188-197.
- [2] 付仲良, 逯跃峰. 利用弯曲度半径复函数构建综合面实体相似度模型[J]. 测绘学报, 2013, 42(1): 145-151. (Fu Z, Lu Y. Establishment of the comprehensive model for similarity of polygon entity by using bending radius complex function[J]. Acta Geodactica et Cartographica Sinica, 2013, 42(1): 145-151.)
- [3] 晏雄峰, 艾廷华, 杨敏. 居民地要素化简的形状识别与模板匹配方法[J]. 测绘学报, 2016, 45(7): 874-882. (Yan X, Ai T, Yang M. A simplification of residential feature by the shape cognition and template matching method[J]. Acta Geodactica et Cartographica Sinica, 2016, 45(7): 874-882.)
- [4] 艾廷华, 帅赞, 李精忠. 基于形状相似性识别的空间查询[J]. 测绘学报, 2009, 38(4): 356-362. (Ai T, Shuai Y, Li J. A spatial query based on shape similarity cognition[J]. Acta Geodactica et Cartographica Sinica, 2009, 38(4): 356-362.)
- [5] 安晓亚, 刘平芝, 金澄等. 手绘地图开域空间关系方向检索法[J]. 测绘学报, 2017, 46(11): 1899-1909. (An X, Liu P, Jin C, et al. A hand-drawn map retrieval method based on open area spatial direction relation[J]. Acta Geodactica et Cartographica Sinica, 2017, 46(11): 1899-1909.)
- [6] Ai T, Cheng X, Liu P, et al. A shape analysis and template matching of building features by the Fourier transform method[J]. Computers, environment and urban systems, 2013, 41(9): 219-233.
- [7] 王斌. 一种基于多级弦长函数的傅立叶形状描述子[J]. 计算机学报, 2010, 33(12): 2387-2396. (Wang B. A fourier shape descriptor based on multi-level chord length function. Chinese journal of computers, 33(12): 2387-2396.)
- [8] Zhang D, Lu G. A comparative study of curvature scale space and Fourier descriptors for shape-based image retrieval[J]. Journal of Visual Communication & Image Representation, 2003, 14(1): 41-60.
- [9] Arkin E. An Efficient Computable Metric for Comparing Polygonal Shapes[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 1991, 13(3): 209-216.
- [10] Fu Z, Liang F, Yan Z, et al. A moment-based shape similarity measurement for areal entities in geographical vector data[J]. ISPRS International Journal of Geo Information, 2018, 7(6): 208.
- [11] Wei Z, Guo Q, Wang Lin, et al. On the spatial distribution of buildings for map generalization[J]. Cartography & Geographic Information Science. 2018, 45(6): 539-555.
- [12] Bai X, Latecki L J. Path similarity skeleton graph matching[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2008, 30(7): 1282-1292.
- [13] Belongie S, Malik J, Puzicha J. Shape matching and object recognition using shape contexts[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2002, 24(4): 509-522.
- [14] Xu C, Liu J, Tang X. 2D shape matching by contour flexibility[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2009, 31(1): 180-186.
- [15] Wang J, Bai X, You X, et al. Shape matching and classification using height functions[J].

Pattern recognition letters, 2012, 33(2): 134-143.

- [16] Chen L, Feris R, Turk M. Efficient partial shape matching using Smith-Waterman algorithm[C]. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision & Pattern Recognition Workshops, 2008.
- [17] 危辉,李俐.拱序列的曲线描述与匹配[J].中国图象图形学报, 2017, 22(08): 1045-1055. (Wei H, Li L, Curve description and matching using arch sequence[J]. Journal of Image and Graphics, 2017, 22(8): 1045-1055.)
- [18] Mount D W. 2004. Bioinformatics: Sequence and Genome Analysis[M]. Cold Spring Harbor Press.
- [19] 郭庆胜. 以直角方式转折的面状要素图形简化方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 1999, 24(3): 255-258. (Guo Q. The Method of Graphic Simplification of Area Feature Boundary as Right Angle[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University. 1999, 24(3): 255-258.)
- [20] 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.)
- [21] 许文帅, 龙毅, 周侗等. 基于邻近四点法的建筑物多边形化简[J]. 测绘学报, 2013, 42(6): 143-150. (Xu W, Long Y, Zhou T, et al. simplification of building polygon based on adjacent four-point method[J]. Acta Geodactica et Cartographica Sinica, 2013, 42(6): 929-936.)
- [22] 陈文瀚, 龙毅, 沈婕等. 利用约束 D-TIN 进行建筑物多边形凹部结构识别与渐进式化简[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2011, 36(5): 584-587. (Chen W, Long Y, Shen J, et al. Structure recognition and progressive ofthen concaves of building polygon based on constrained D-Tin[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2011, 36(5):584-587.)
- [23] Sester M. Optimization approaches for generalization and data abstraction[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2005, 19(8-9): 871-897.
- [24] 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.)
- [25] Hu R, Jia W, Zhao Y, et al. Perceptually motivated morphological strategies for shape retrieval[J]. Pattern Recognition, 2012, 45(9): 3222-3230.
- [26] Yan H, Weibe R, Yang B. A Multi-parameter Approach to Automated Building Grouping and Generalization[J]. Geoinformatica, 2008, 12(1): 73-89.

第一作者简介: 魏智威 (1993—), 男, 博士, 研究方向为地理信息智能化处理与可视化

First author: Wei Zhiwei(1993—), male, Phd, majors in intelligent handling and visualization of geographical information.

E-mail: 2011301130108@whu.edu.cn

通讯作者: 郭庆胜

Corresponding author: GUO Qingsheng

E-mail: guoqingsheng@whu.edu.cn