

DOI: 10.13203/j.whugis20130327

文章编号: 1671-8860(2014)12-1446-06

一种利用模拟退火思想的线状要素 Morphing 方法

李精忠¹ 吴晨琛² 杨泽龙¹ 黄进¹

¹ 武汉大学资源与环境科学学院, 湖北 武汉, 430079

² 国家基础地理信息中心, 北京, 410083

摘要: 提出一种基于模拟退火思想的线状要素 Morphing 方法, 针对同名线状要素在大小比例尺下的两种表达, 首先利用约束 Delaunay 三角网提取小比例尺地图上线状要素的弯曲特征点, 然后采用模拟退火技术在特征点与大比例尺线数据顶点之间建立全局最优匹配, 匹配结果将两线状要素分割成多对对应线段, 最后针对每一对对应线段采用常规线性插值方法进行 Morphing 插值。模拟算例和实际数据实验证明, 该方法较好地顾及了线状要素尺度变换过程中的弯曲化简、删除、夸大、典型化等综合操作, 变换结果能有效地保持原线状要素的结构特征, 提高了 Morphing 变换的精度。

关键词: Morphing 变换; 模拟退火; 特征点匹配; 线状要素

中图法分类号: P208; P231.5 文献标志码: A

Morphing 又称图形渐变技术, 其基本思想是采用某种内插方法使得初始图形光滑连续地渐变到目标图形, 具体实施涉及两个基本过程, 即图形特征匹配和形状插值^[1], 图形特征匹配是将原始图形特征分别分解为多个子集, 并在初始和目标子集之间建立一一对应关系的过程。常见的匹配方法有基于能量最小化的匹配方法、基于 Hausdorff 距离的匹配方法和基于 Fréchet 距离的匹配方法等^[2-4]。建立对应关系之后将初始图形的各部分沿一定路径变换到对应图形部分所在位置, 获取中间状态图形系列, 常见的插值方法包括线性插值方法、基于目标边界的插值方法、顾及目标内部区域的差值方法等^[5-7]。

近年来 GIS 领域众多专家和学者对 Morphing 技术表现出了极大的兴趣^[7-11]。Morphing 变换研究的重点集中在形状特征的提取与匹配, 因此出现了一些基于特征点的匹配方法^[12-14]。对于地图中的线状要素而言, 小比例尺的数据往往由大比例尺数据经尺度变换得来, 如常见的弯曲化简、删除、夸大和典型化等操作^[11], 传统 Morphing 方法无法实现综合操作在中间状态的渐变, 如弯曲的逐渐化简、删除、夸大和典型化等。

为此, 本文提出一种基于模拟退火思想的全局最优曲线特征匹配方法。

1 原理

1.1 概念模型

对于同一线状要素, 设其大比例尺表达为 a , 小比例尺表达为 b , 则 Morphing 变换模型可以表示为 $R_s = \pi(a, b, t)$, 其中, π 为 Morphing 形状内插函数, t 为一个与比例尺有关的参数, 表明内插结果随比例尺的不同而变化。对任意 $0 \leq t \leq 1$, $\pi(t)$ 是单调、连续的; 当 $t=0$ 时, $R_s=a$; 当 $t=1$ 时, $R_s=b$; 当 $0 < t < 1$ 时, R_s 为介于 a 和 b 之间的表达。

为提高 Morphing 精度, 首先按照线状要素自身弯曲特性提取特征点并进行分段。小比例尺下线状要素的表达是从大比例尺下的表达经过顶点抽稀、弯曲删除、弯曲夸大等操作得到的, 小比例尺下提取的特征点能在大比例尺中找到对应点, 反之则未必。因此, 本文只提取小比例尺下的特征点, 并据此寻找大比例尺中的对应点。

设 a 和 b 的初始顶点个数分别为 m 和 n , 顶点系列分别为 $SP: \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ 和 $TP: \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$

收稿日期: 2013-07-13

项目来源: 国家自然科学基金资助项目(41001229); 国家 863 计划资助项目(2012AA12A404); 虚拟地理环境教育部重点实验室资助项目(2012VGE03); 国家基础科学人才培养基金《武汉大学地理科学理科基地》科研能力训练资助项目(J1103409); 卫星测绘技术与应用国家测绘地理信息局重点实验室经费资助项目(KLSMTA-201308)

第一作者: 李精忠, 博士, 副教授, 主要从事 DEM 分析、空间数据多尺度表达的理论与方法研究。E-mail: llideyx@126.com

$\dots, b_n\}$, 曲线 b 特征点个数为 k , 特征点下标为 $TK: \{g_1, g_2, \dots, g_k\}$, 特征点点集系列为 $TS: \{b_{g_1}, b_{g_2}, \dots, b_{g_k}\}$ ($b_{g_j} \in TP \wedge g_j \in TK$)。对 $\forall g_j \in TK$, 有 $1 \leqslant g_j \leqslant n \wedge g_1 = 1 \wedge g_k = n \wedge b_{g_i} \in TP$, 且当 $1 < j \leqslant k$ 时, $g_j \geqslant g_{j-1}$ 。具体的特征点提取方法见 § 1.2。

特征点的提取实现了对曲线 b 的分段, 接下来需要建立 b 的分段在 a 中的映象, 即需要建立 b 的特征点与 a 中顶点之间的对应关系。该过程可描述为: 以 TS 为出发点, 从 SP 中寻找 k 个特征点与 TS 建立对应关系 $\gamma: TS \rightarrow SP$, 该对应关系的评价函数定义为 $d(a, b, \gamma)$ 。为获得全局最优匹配, 需要在所有可能的匹配关系中寻找一种对应关系 $\hat{\gamma}$, 使得 $d(a, b, \hat{\gamma})$ 最小(大)化。本文采用模拟退火技术实现特征点的全局最优匹配, 具体方法见 § 1.3。以曲线相似性作为匹配状态评价函数 d , 相似性好则匹配度高。曲线相似性的评价指标通常有距离(如 Hausdorff 距离、Fréchet 距离等)、长度、方向、形状等, 在多尺度环境下这些指标都可能发生较大的变化, 而曲线缓冲区面积重叠度在一定程度上涵盖上述各指标的基本特性, 曲线距离、长度、方向、位置越相似, 则缓冲区面积重叠度越大, 反之则越小。在此, 以曲线缓冲区面积重叠度为曲线相似性度量指标, 为确保曲线缓冲区有一定的重叠度, 采用两曲线段的 Hausdorff 距离作为缓冲半径。则任意两曲线段 σ 和 τ 状态评价函数可定义为:

$$d(\sigma, \tau) = \text{buffer}(\sigma)_{\text{hausdorff}(\sigma, \tau)} \cap \text{buffer}(\tau)_{\text{hausdorff}(\sigma, \tau)} / \text{buffer}(\sigma)_{\text{hausdorff}(\sigma, \tau)} \cup \text{buffer}(\tau)_{\text{hausdorff}(\sigma, \tau)} \quad (1)$$

在某一匹配状态 γ 下, 曲线 a 和 b 的整体相似性定义为各分段的相似性之和, 如式(2):

$$d(a, b, \gamma) = \sum_{i=1}^{k-1} d_i(\sigma, \tau) \quad (2)$$

式中, k 为 b 中特征点的个数; $k-1$ 为曲线分段数。

最后, 基于匹配上的特征点对曲线 a 和 b 进行分段, 分别在对应的子曲线段之间进行线性插值, 获得渐变的 Morphing 系列。

1.2 基于 Delaunay 三角网的特征点提取

研究认为, 基于 Delaunay 三角网弯曲识别的特征点提取方法符合曲线自身的顶点分布特征和人类的空间认知^[12]。在此采用基于 Delaunay 三角网弯曲识别的特征点提取方法, 具体流程如下。

1) 约束 Delaunay 三角网剖分。以曲线顶点为离散点, 曲线线段为约束边建立约束 Delaunay 三角网。

2) 三角形分类。基于约束边条数对三角形进行分类, 只有一个非约束边的三角形为 I 类三角形, 如图 1(a)中的三角形 C ; 只有两条非约束边的三角形为 II 类三角形, 如图 1(a)中的三角形 B ; 三条边都是非约束边的三角形为 III类三角形, 如图 1(a)中的三角形 A 。

3) 特征点提取。在三角形分类的基础上提取 I类三角形两条约束边的交点作为曲线特征点, 图 1 中左下侧黑色箭头为曲线数字化方向, 图 1(a)中的圆形特征点为曲线右侧弯曲形成的特征点, 矩形特征点为曲线左侧弯曲形成的特征点。

4) 伪特征点剔除。基于 Delaunay 三角网提取特征点的方法对矢量数据的点位精度较为敏感, 微小的抖动即可产生细小的、与视觉认知不相符的弯曲, 导致伪特征点的产生。分析发现, 伪特征点所在 I类三角形与 III类三角形直接关联, 可以区分两种情况来处理。若某 III类三角形邻接一个 I类三角形, 则直接删除该 I类三角形所关联的特征点(如图 1(a)中 o 点); 若某 III类三角形邻接两个 I类三角形, 则保留较大面积的 I类三角形所关联的特征点(如图 1(a)中 p 点), 删除较小面积的 I类三角形所关联的特征点(如图 1(a)中 q 点); 伪特征点剔除后左右弯曲形成对称趋势, 圆形特征点和矩形特征点相间出现。

5) 补充首尾点作为特征点。

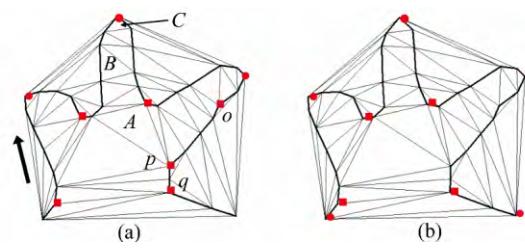


图 1 曲线特征点提取过程图解

Fig. 1 Diagram of Characteristic Points Extraction from Curve

1.3 基于模拟退火的特征点匹配

模拟退火的基本思路是以随机产生的初始解为起点, 在初始解的基础上进行扰动产生新解, 采用 Metropolis 准则确定是否接受随机产生的新解, 并采用温度作为整个进程的主要控制参数^[13]。一般说来, 退火历程越长, 取得的效果越好。考虑计算的充分性与计算效率的平衡性, 本文采用线性的退火进度表, 即在规定的循环次数内, 温度 μ 保持不变; 到达规定的循环次数时, 以线性系数退温。匹配的基本流程如下。

1) 建立匹配候选集。为提高算法效率, 首先为 TS 中的每一特征点建立一个匹配候选集。 a

和 b 属同名地理实体,具有相近的空间位置。采用空间位置作为匹配候选集的搜索条件。对于TS中除首末点以外的其他每一点,从 a 中寻找与其空间位置最邻近的点,这些点将 a 分为 $k-1$ 段,则TS中任一特征点关联 b 中的两个分段,其匹配候选点集由前一分段的后半段和后一分段的前半段的顶点集合构成。

2) 初始化。对于TS中的每一特征点从其候选集中随机选择一个特征点作为其匹配对象,生成初始匹配状态 $\gamma_0: TS \rightarrow SP$,给定初温 $\mu = \mu_0$ 。

3) 外循环开始

(1) 内循环开始。首先,产生新状态 $\gamma_i: TS \rightarrow SP$ 。在 γ_0 的基础上,从TS中随机选择一个特征点 b_j ,并从其候选集中随机选择一个非当前匹配元素 a_j 作为匹配对象,其他元素匹配关系保持不变,以此构建新的匹配关系 γ_i 。然后,判定新状态 γ_i 是否被接受。如果 $d(a, b, \gamma_i) > d(a, b, \gamma_0)$,表明新状态 γ_i 优于当前状态 γ_0 ,接受 γ_i 为当前解 $\gamma_0 = \gamma_i$;如果 $d(a, b, \gamma_i) \leq d(a, b, \gamma_0)$,则新状态不如当前状态好,在这种情况下新状态以一定的概率被接受,即如果 $\min\{1, \exp[-(d(a, b, \gamma_i) - d(a, b, \gamma_0))/\mu_w]\} \geq \text{random}[0, 1]$,则接受 $\gamma_0 = \gamma_i$,否则拒接新状态。最后,内循环终止判断。当同一温度下的循环达到 N (N 为内循环执行次数)次时内循环终止,跳至步骤(2)进行退温;否则,跳至内循环开始状态继续内循环。

(2) 退温。 $\mu_{w+1} = \text{update}(\mu_w)$,并令 $w=w+1$,以新的温度跳至步骤(1)。

4) 外循环终止判断。如果在同一温度下进行了 N 次匹配,并且没有一次匹配结果被接受,则停止整个算法,以当前匹配状态作为最终的匹配结果,并输出全局最优匹配 $\hat{\gamma} = \gamma_0$ 。

根据文献[14]的经验及多次试验结果,本文设置在 $d(a, b, \gamma_i) - d(a, b, \gamma_0) = 1$,概率 $P = 1/3$ 时取得初温 $\mu_0 = 2.5$;采用指数退温函数 $\mu_{\text{new}} = 0.9^\lambda \mu_{\text{old}}$ ($0 < \lambda < 1$)进行降温;内循环执行次数 N

$= 50K$, K 为参与匹配的特征点个数。

2 实验分析

为验证本文方法的可行性和有效性,采用模拟数据和实际数据展开实验,针对两组数据同时引入文献[7]的方法进行对比实验,模拟算例数据如图2所示。图2(a)中线状数据由119个顶点组成,即 $SP: \{a_1, a_2, \dots, a_{119}\}$,代表线实体在大比例尺地图上的精细表达 a ;图2(b)中线状数据由41个顶点组成,即 $TP: \{b_1, b_2, \dots, b_{41}\}$,代表同名实体在小比例尺地图上的概略表达 b ,其约束Delaunay三角网和特征点提取效果亦展示于图2(b)中,共13个特征点,序号为 $TK: \{1, 3, 5, 7, 12, 18, 25, 28, 30, 33, 36, 38, 41\}$ 。对各特征点建立的匹配候选集如表1所示。图2(c)为 a 和 b 叠置显示的效果,其中实线为 a 对应的表达,点线为 b 对应的表达。该样例数据反映了多尺度环境下线状数据尺度变换的基本特征,图中虚线椭圆A和E所在区域中 b 表达由 a 经顶点抽稀产生,椭圆B所在区域由弯曲删除产生,椭圆C所在区域由弯曲夸大产生,椭圆D所在区域由弯曲典型化产生。

对于该模拟数据,初始温度为2.5,内循环终止条件为 $50 \times 13 = 650$ 次,外循环终止条件为某一温度下连续650次的新解都没有被接受,则退出整个算法。模拟数据13个特征点将 a 和 b 都划分为12个子曲线段,各段分别计算缓冲区面积重叠度,可以得到 a 和 b 的整体重叠度以及平均重叠度。各轮循环(外循环)的状态函数值如表2和图3所示。可以发现,在第10轮循环以前,状态不稳定,存在较大的起伏,在第10轮循环以后,起伏较小,重叠度整体平稳增加。在达到第19轮和20轮循环时重叠度值相同,外循环终止条件满足,此时特征点匹配接近全局最优解,可以进行形状插值。

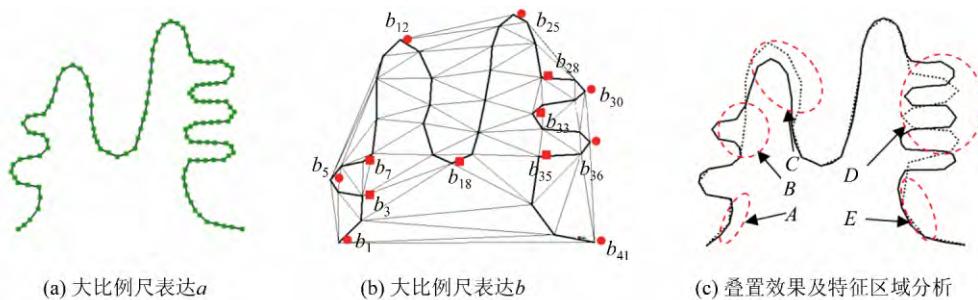


图2 模拟数据及其特征分析

Fig. 2 Simulation Data and Its Characteristics Analysis

表1 模拟数据特征点及其匹配候选集

Tab. 1 Characteristic Points of Simulation Data and Related Matching Candidate

特征点	候选集	特征点	候选集	特征点	候选集	特征点	候选集
b_1	{ a_1 }	b_{12}	{ a_{23}, \dots, a_{35} }	b_{30}	{ a_{68}, \dots, a_{75} }		
b_3	{ a_4, \dots, a_8 }	b_{18}	{ a_{36}, \dots, a_{49} }	b_{33}	{ a_{76}, \dots, a_{83} }		
b_5	{ a_9, \dots, a_{12} }	b_{25}	{ a_{50}, \dots, a_{60} }	b_{36}	{ a_{84}, \dots, a_{97} }	b_{41}	{ a_{119} }
b_7	{ a_{13}, \dots, a_{22} }	b_{28}	{ a_{61}, \dots, a_{67} }	b_{38}	{ a_{98}, \dots, a_{113} }		

表2 模拟数据特征点匹配迭代过程

Tab. 2 Iterative Process of Simulation Data Matching

迭代次数	评价函数值		迭代次数	评价函数值		迭代次数	评价函数值		迭代次数	评价函数值	
	整体	平均		整体	平均		整体	平均		整体	平均
1	7.772 0	0.647 7	6	8.741 2	0.728 4	11	9.378 2	0.781 5	16	9.786 6	0.815 6
2	8.204 3	0.683 7	7	8.917 4	0.743 1	12	9.739 3	0.811 6	17	9.743 0	0.811 9
3	8.634 1	0.719 5	8	8.447 5	0.704 0	13	9.572 2	0.797 7	18	10.003 4	0.833 6
4	9.456 4	0.788 0	9	9.664 6	0.805 4	14	9.483 5	0.790 3	19	10.337 8	0.861 5
5	8.855 5	0.738 0	10	9.109 2	0.759 1	15	9.629 4	0.802 4	20	10.337 8	0.861 5

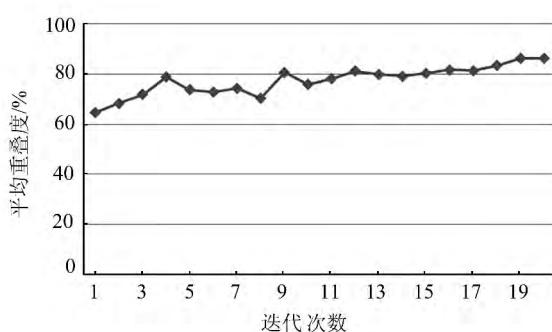


图3 模拟数据特征点匹配迭代过程

Fig. 3 Iterative Process of Simulation Data Matching

图4和图5分别为本文方法及线性内插方法文献[7]的形状内插结果。其中 $t=0$ 和 $t=1$ 分别为线实体在大比例尺 S_a 的表达 a 和小比例尺 S_b 的表达 b , $t=0.1$ 到 0.9 为不同程度的形状内插

结果, t 与中间比例尺 S 的关系为 $S=(1-t)S_a+t\times S_b$ 。可以看出,图4的结果更加符合空间数据渐变特征,弯曲的化简、删除、夸大和典型化操作(对应于图2(c)中的A、B、C、D、E区域)从左到右的过渡光滑自然。在图5中,线性插值方法由于忽略了线状要素固有的结构特征,内插结果存在两个明显的问题:一是 a 、 b 图形同时具有的特征在内插过程中发生了变形,如图5中虚线矩形所在区域;二是 a 、 b 图形相异特征在内插过程中产生了难以接受的畸异形态,图6(a)和6(b)中左边部分分别为 $t=0.4$ 和 $t=0.5$ 时的线性内插整体效果,右边部分为左图中虚线圆圈所在区域的局部放大图,表明中间结果存在自相交。而对于同构特征,本文方法在内插过程中几乎不发生变化;对于异构特征,则能实现符合制图综合规律的、渐变的中间插值状态。

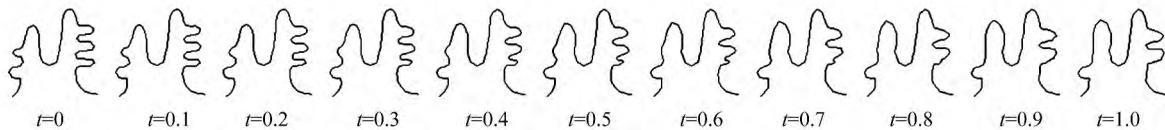


图4 基于本文方法的模拟数据 Morphing 渐变效果

Fig. 4 Morphing Effect of Simulation Data Based on the Method in this Paper

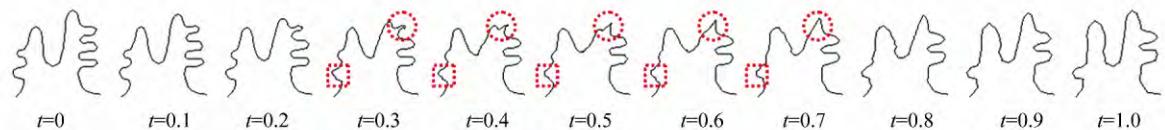


图5 基于线性插值方法的模拟数据 Morphing 渐变效果

Fig. 5 Morphing Effect of Simulation Data Based on the Linear Interpolation Method

图7和图8分别为某区域1:10 000和1:50 000的真实等高线数据采用本文方法及文献

[13]中线性内插方法的形状内插结果,为便于对比,大小比例尺数据的等高距皆为10 m。图7和

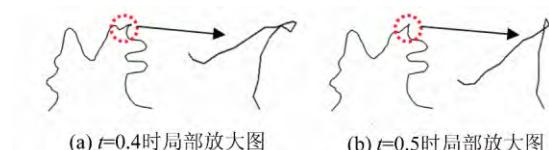


图 6 线性插值方式中间过程局部畸变放大图

Fig. 6 Enlarged View of Local Distortion of Linear Interpolation Method

图 8 中从左到右 t 值分别为 0, 0.25, 0.5, 0.75 和

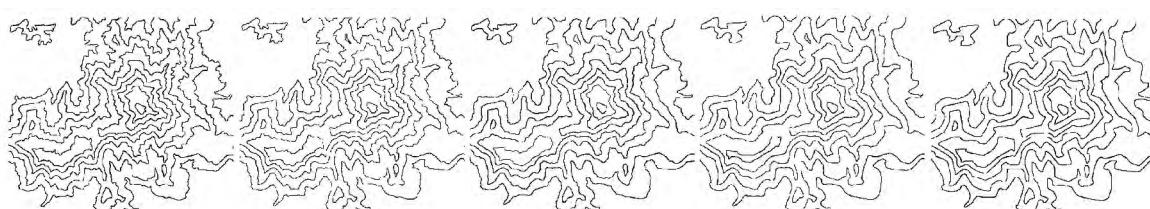


图 7 基于本文方法的真实数据 Morphing 渐变

Fig. 7 Morphing Effect of Real Data Based on the Method in this Paper

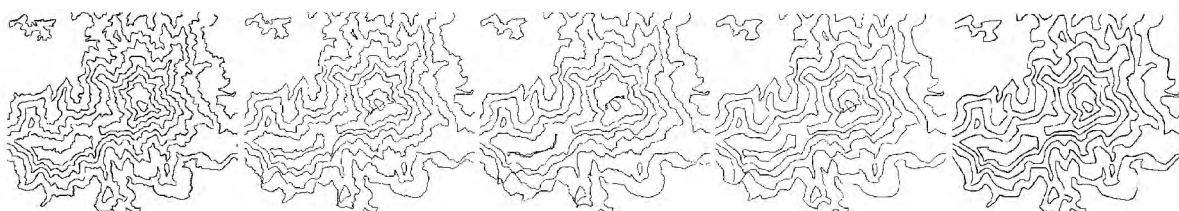


图 8 基于线性插值方法的真实数据 Morphing 渐变

Fig. 8 Morphing Effect of Real Data Based on the Linear Interpolation Method

3 结语

本文提出了一种基于模拟退火思想的线状要素 Morphing 方法,该方法从线状要素固有的弯曲特征出发,首先基于 Delaunay 三角网剖分提取小比例尺上线状数据弯曲特征点,然后采用模拟退火技术搜索其在大比例尺线状数据中的全局最优对应顶点,匹配结果将两线状要素分割成多对对应线段,最后针对每一组对应线段采用常规线性插值方法进行 Morphing 插值。由于特征点的提取和匹配过程顾及了线状数据自身的空间结构特征,该方法能较好地保持同构特征在内插过程中不变形,对于异构特征则能产生符合地图综合规律的、渐变的中间状态,极大地提高了线状空间数据 Morphing 变换的精度。

参 考 文 献

- [1] Li Hua, Zhu Guangxi, Zhu Yaoting, et al. A Survey of Object Metamorphosis [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2002, 7(8): 745-751(李华,朱光喜,朱亚东,等. 物体渐变技术综述[J]. 《图像与图形》,2002,7(8):745-751)
- [2] Sederberg T W, Greenwood E. A Physically Based Approach to 3D Shape Blending [J]. *Computer Graphics*, 1992, 26(2): 25-34
- [3] Huttenlocher D P, Klanderman G A, Rucklidge W J. Comparing Images Using the Hausdorff Distance [J]. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1993, 15(9): 850-863
- [4] Alon E, Leonidas J G, Sariel H, et al. New Similarity Measures Between Polylines with Applications to Morphing and Polygon Sweeping [J]. *Discrete Comput. Geom.*, 2002, 28:535-569
- [5] Sederberg T, Gao P, Wang G, et al. 2-D Shape Blending: An Intrinsic Solution to the Vertex Path Problem [J]. *Comput Graph*, 1993, 27:15-18
- [6] Surazhsky V, Gotsman C. Guaranteed Intersection-Free Polygon Morphing [J]. *Computers and Graphics*, 2001, 25(1): 67-75
- [7] Cecconi A, Galanda M. Adaptive Zooming in Web Cartography [J]. *Computer Graphics Forum*, 2002, 21(4):787-799
- [8] Martin N, Damian M, Alexander W, et al. Morphing 1, 其中 $t=0$ 时对应 1 : 10 000 的初始表达, $t=1$ 时对应 1 : 50 000 的初始表达, $t=0.25, 0.5$ 和 0.75 时分别对应 1 : 20 000, 1 : 30 000 和 1 : 40 000 的表达。不难发现, 图 7 的渐变效果较好, 曲线弯曲形态由复杂到简单光滑过渡, 中间状态不存在自相交等拓扑错误; 而图 8 中存在一些明显的畸变状态, 中间山顶区域等高线存在扭曲和自相交, 原因在于大小比例尺初始数据采样点密度差异较大, 导致匹配错误和中间状态的扭曲变形。

- Polyline: A Step Towards Continuous Generalization[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2008, 32(4): 248-260
- [9] Peng Dongliang, Deng Min, Xu Feng, et al. Morphing Linear Features Considering Their BLG-tree Structures[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(9): 1 120-1 125(彭东亮, 邓敏, 徐枫, 等. 顾及 BLG 树结构特征的线状要素 Morphing 变换方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(9): 1 120-1 125)
- [10] Deng Min, Peng Dongliang, Xu Zhen, et al. A Morphing Method Based on Bend Structures for Linear Features[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2012, 43(7): 2 674-2 682(邓敏, 彭东亮, 徐震, 等. 一种基于弯曲结构的线状要素 Morphing 方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(7): 2 674-2 682)
- [11] Sester M, Brenner C. Continuous Generalization for Visualization on Small Mobile Devices [C]. The 11th International Symposium on Spatial Data Handling (SDH'04), Leicester, 2004
- [12] Zhai Renjian, Wu Fang, Zhu Li, et al. Structured Representation of Curve Shape[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2009, 38(2): 175-182(翟仁健, 武芳, 朱丽, 等. 曲线形态的结构化表达[J]. 测绘学报, 2009, 38(2): 175-182)
- [13] Wang Ling. Intelligent Optimization Algorithms and Their Applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press & Springer Verlag, 2001(王凌. 智能优化算法及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社 & 施普林格出版社, 2001)
- [14] Jon C, Christopher B J. Conflict Reduction in Map Generalization Using Iterative Improvement [J]. *Geoinformatica*, 1998, 2(4): 383-407

A Morphing Method for Linear Features Based on Simulated Annealing

LI Jingzhong¹ WU Chenchen² YANG Zelong¹ HUANG Jin¹

¹ School of Resources and Environmental Science, Wuhan University, Wuhan 430079, China

² National Geomatics Center of China, Beijing 100830, China

Abstract: A simulated annealing based morphing of linear features is presented in this paper. For the two representations of the same feature in two different scales, characteristic points are extracted first from the small scale related data by using the constrained Delaunay triangulation, then the global optimal matching between characteristic points and the large scale linear feature's vertexes is estimated by simulated annealing technique. The two linear features are divided into two groups of sub-segments by the matching results, each of the corresponding segment pair is interpolated using the linear interpolation method. Simulation example and actual data show that the Morphing method proposed in this paper, which taking into account the generalization operators of bend simplification, deletion, exaggeration and typification, can effectively keep the original linear feature's structure characteristics and improve the accuracy of morphing transformation.

Key words: morphing; simulated annealing; characteristic points matching; linear feature

First author: LI Jingzhong, PhD, associate professor, specializes in the DEM analysis and multiple representations of spatial data. E-mail: llideyx@126.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 41001229; the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program), No. 2012AA12A404; Virtual Geographic Environment, Ministry of Education Key Laboratory of Funded Projects, No. 2012VGE03; National Science Talents Fund “Geographical Sciences, Wuhan University of Science Base” Research Capacity Training Program, No. J1103409; Key Laboratory of Satellite Mapping Technology and Application, National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation, No. KLSMTA-201308.