

# 基于图形渐变技术的等高线连续尺度表达模型

刘鹏程, 龚冲亚, 陶建斌, 赵晓雪

(华中师范大学城市与环境科学学院, 湖北 武汉 430079)

**摘要:** 提出一种基于特征点匹配的等高线图形渐变技术。对2个不同比例尺地图上表达的同名等高线, 由计算几何的方法构建特征点多层次树状结构; 利用距离邻近性和弧段的形态分析实现特征点的匹配; 在匹配的同名弧段间实施图形渐变技术得到2尺度内任意中间尺度的等高线表达。实验证明, 提出的基于多层次特征点匹配的图形渐变技术是在网络环境下等高线多尺度表达的一种有效尝试, 由于在两尺度端进行了图形的控制, 等高线的拓扑一致性得到了有效的维护。

**关键词:** 图形渐变技术; 地图连续尺度表达; 同名特征点

**中图分类号:** P208

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0690(2014)03-0332-06

在当前网络环境下, 用户需要在任意比例尺下浏览连续变化的地图要素, 解决该问题的一般策略是采用地理要素的增量式表达模型, 并在网络中采用流媒体传输模式<sup>[1-4]</sup>。这种多尺度地图要素表达模型只在地图大比例尺端进行控制, 没有充分利用另一端的小比例尺数据, 产生的数据系列属于阶梯尺度数据集, 难以实现地理要素从一个已知尺度到另一已知尺度的连续过渡, 也容易产生几何、拓扑的不一致性。借鉴动画中图形渐变技术(morphing), 近年来人们开始尝试使用2个关键尺度下的地图数据内插出中间尺度的地图数据<sup>[5,6]</sup>。该技术主要应用于曲线要素, 涉及4方面的关键技术: 其一, 关键尺度的选择。其二, 2个关键尺度下曲线特征点的探测, 这是实现本技术的难点之一, 最好能以最少的特征点来描述曲线的主体特征, 其算法的复杂度不能太高。在动画技术领域, 常常以曲线的极值点、拐点、端点作为特征点。文献[7]计算多边形各个顶点的相关度, 以其为依据删除相关度小的顶点, 以简化了的多边形的顶点作为特征点; Nöllenburg考虑到上述方法产生的特征点数量的庞大, 尝试用一系列贝塞尔曲线来拟合原曲线, 以各个贝塞尔曲线的控制点作为曲线的特征点<sup>[5]</sup>; 文献[8]考虑到曲线的形态单元的不可分割性, 通过建立弯曲的层次结构, 以弯曲的分界点作为特征点, 但建立约束 De-

launay三角网以及弯曲识别算法的复杂度较高<sup>[8]</sup>, 只适合网络地图的离线计算。其三, 建立两曲线特征点的匹配关系, 这是实现本技术的难点之二, 匹配关系务必保证对应弧段的形状相似性。在动画领域, 常采用构造代价函数, 以匹配代价最小作为最优方案<sup>[9,10]</sup>, 但这些方法不太适合地图要素的匹配; 文献[8]采用所识别弯曲的参量的比较而进行匹配, 该方法十分简单, 但当弯曲不能一一对应时可能存在一些问题<sup>[8]</sup>。其四, 由2个尺度的同名曲线内插得到中间尺度的曲线。

本文基于凸壳模型以及BLG树建立等高线多层次特征点树状结构, 以距离邻近以及形状特征分析来逐层匹配特征点, 提高了识别和匹配的可靠性。从实验的效果来看, 当用户在放大缩小(Zoom in/out)过程中能得到连续平稳过渡的等高线连续尺度表达。

## 1 渐变技术支持下的等高线连续尺度的表达

### 1.1 多层次等高线特征点的识别

如图1a为1:1 000下的一条闭合等高线, 按照文献[11]的方法以其上的点建立凸壳(图1b), 将凸壳上的边分为两类: I类, 曲线上连续两点构成的边, 如图1b中点16~17、17~18、18~19、31~32构成

收稿日期: 2013-05-16; 修订日期: 2013-07-02

基金项目: 国家863计划项目(2012AA12A404)、中央高校基本科研项目(CCNU13A05002)、国家自然科学基金(41371183)资助。

作者简介: 刘鹏程(1968-), 男, 湖北省潜江市人, 博士, 主要研究方向为地图可视化表达、WEBGIS。E-mail: liupc3000@qq.com

的边; II类: 曲线上非连续两点构成的边, 如图 1b 中点 0~8、10~16、19~24、26~31、32~53、53~60 构成的边。将一系列连续的 I 类边组合在一起, 便是原曲线的凸起部分, 如图 1b 中的弧段 60~61、61~62、62~63、63~0 组合而成的 60~0 弧段便是原曲线的凸起; II 类边跨过的曲线段则是曲线的凹陷部分, 如 0~8、32~53 弧段所跨过的曲线段为凹陷。

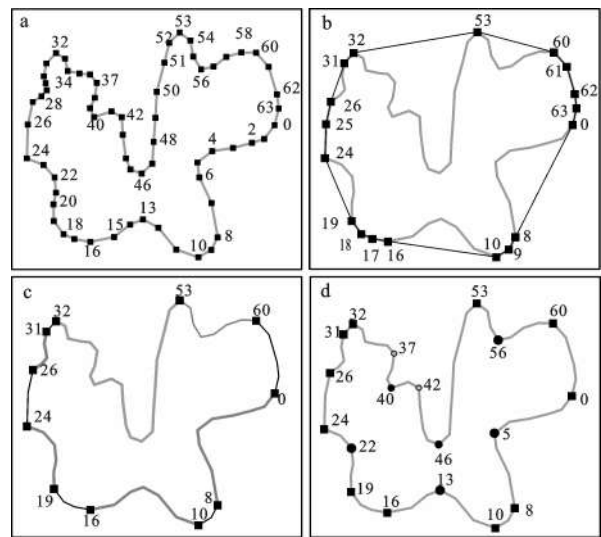
如上分段后, 曲线便是由系列的凸起和凹陷组合而成, 凸起和凹陷为曲线的基本形态单元, 两形状单元的分界点为曲线的首级特征点, 根据特征点前后形状单元的类型, 为了后续特征点匹配分析的需要将其分为 3 类: “u·u”类: 前后均为凹陷; “u·n”类: 前为凹陷后为凸起; “n·u”类: 前为凸起后为凹陷(以顺时针方向为前进方向, u 表示凹陷, n 表示凸起)。其中图 1c 中黑方块表示等高线的首级特征点, 分别为 0、8、10、16、19、24、26、31、32, 其中 0、10、19、26、32 为“n·u”类, 而 8、16、24、31、60 为“u·n”类, 53 为“u·u”类。不难发现, 划分的结果实际上是识别了曲线上的 2 类弯曲: 向内的凹陷和向外的凸起, 并有效地保持了曲线形态单元的完整性<sup>[8]</sup>。

在首级特征点识别及分段基础上, 对每一形状单元, 采用文献[12]提供的方法构建 BLG 树。具体过程是: 分析每一个形态单元, 若最大距离大于等于给定距离阈值  $D$ , 则以最大距离的点作为二级特征点, 并以该点将该形状单元分成两段, 在每一段重新构建下一级形态单元结构, 采用递归算法, 依次探测下一级的特征点, 直至弧段垂向最大距离小于阈值  $D$  或者两点间没有中间点为止。阈值  $D$  可按式(1)进行计算:

$$D = S_{\text{cale}} \times d_{\text{svo}} \quad (1)$$

式中,  $d_{\text{svo}}$  为小比例尺下最小可辨目标 (smallest visible object) 所对应的实际长度,  $S_{\text{cale}}$  为两比例尺下较小比例尺的分母, 若两关键比例尺分别为 1: 1 000、1: 5 000, 取  $d_{\text{svo}} = 0.4 \text{ mm}$ , 则  $D = S_{\text{cale}} \times d_{\text{svo}} = 5 000 \times 0.4 \text{ mm} = 2 \text{ m}$ 。针对图 1c 取阈值  $D$  为 2 m, 产生的次级特征点如图 1d 所示, 其中 5、13、22、46、56 为第 2 个特征点, 在 32~53 弧段中存在 4 级特征点, 其中 40 为 3 级特征点, 37、42 为 4 级特征点。整个等高线各个弧段的层次关系可以用多叉树来表示, 图 2 清晰地表达了图 1 所示等高线的各弧段的层次树结构。

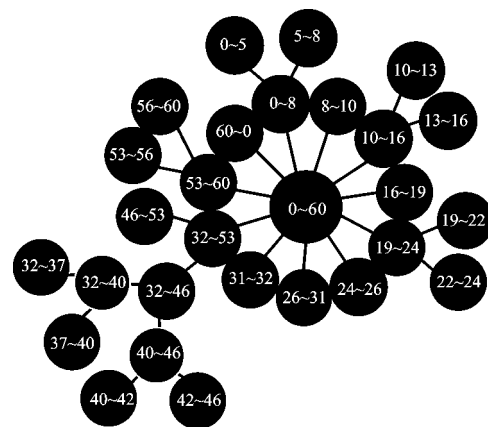
本文研究的是 2 个关键尺度下的等高线内插技术, 根据地图多尺度表达的基本原则, 2 个关键



a. 等高线上的点(黑方块表示); b. 以等高线曲线上的点构建的凸壳(实黑线表示); c. 等高线上的凸起弧段和凹陷弧段, 虚灰色线为凹陷, 实黑色线为凸起, 黑方块为首级特征点; d. 不同层次的特征点, 大小不同的圆点为次级各层次特征点

图 1 等高线特征点的识别过程及曲线的分段

Fig.1 Recognition of multi-hierarchical characteristic points and segmenting of a contour



圆圈中数字是曲线的起始点和终止点

图 2 等高线弧段的层次结构

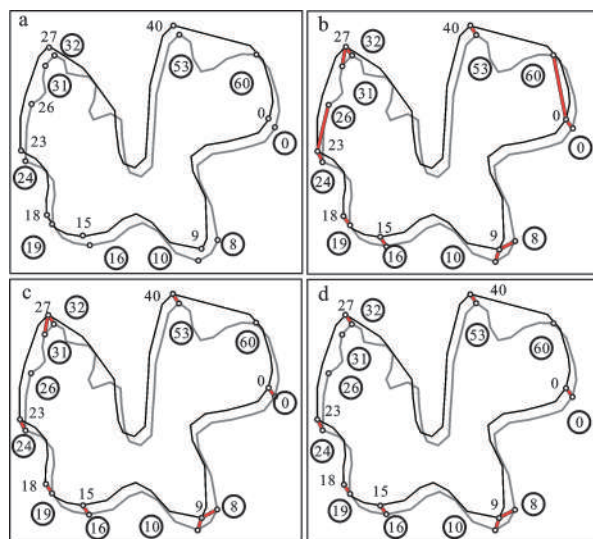
Fig.2 Multi-hierarchical arc structure of contour

尺度下的同名等高线在总体轮廓形状上具有较高度的相似性, 因而首级特征点采用基于形状特征的识别方法, 在曲线的细节层次上一般难以维持形状的一致性, 曲线内的法向极值点常常具有很强的继承性。通过这两类方法识别不同级别的特征点, 既顾及不同尺度下地理要素总体形态的相似性, 又兼顾曲线上极值点对曲线形态的重要意义。

## 1.2 两个关键尺度下特征点的匹配

图形渐变的两端为不同尺度下的同名等高线,虽然二者可能存在一定的位移,但在位置上仍然具备足够的精度,本文将依据特征点的邻近性来搜索同名特征点。由于同名等高线的特征点大都不能一一对应,当匹配存在歧义时需要加以形状特征的辅助分析。如大比例尺下的等高线 $f$ 与小比例尺下的等高线 $g$ 为同名等高线,按上节的方法探测两等高线上特征点,其中等高线 $f$ 的首级特征点集为 $\{P_i(X_i, Y_i) | i \text{ 为整数}\}$ (其中 $(X_i, Y_i)$ 为首级特征点中第 $i$ 个点的坐标,下同),等高线 $g$ 的首级特征点集为 $\{P_j(X_j, Y_j) | j \text{ 为整数}\}$ (图3a)。考虑到小比例尺下的等高线具有更详细的形状细节,因此,一般而言 $f$ 的首级特征点多于 $g$ 的首级特征点,可能会出现 $f$ 的多个首级特征点匹配 $g$ 的一个特征点,因而在探测同名特征点时的映射方向为大比例尺到小比例尺。顾及到2个尺度下要素的整体位移,对每个要素的特征点进行归一化处理:分别计算2个曲线的外接矩形 $R(f)$ 和 $R(g)$ ,得到其中心坐标分别为 $(X_f, Y_f)$ 和 $(X_g, Y_g)$ ,对于 $f$ 上的各个特征点 $P_i(X_i, Y_i)$ ,其归一化处理后坐标为 $(X_i - X_g, Y_i - Y_g)$ ,对于 $g$ 上的各个特征点 $P_j(X_j, Y_j)$ ,其归一化处理后的坐标为 $(X_j - X_g, Y_j - Y_g)$ 。使用归一化处理后的坐标,计算 $f$ 上特征点 $P_i$ 到 $g$ 上所有特征点的距离,找出距离最近的点,建立初步的特征点匹配关系(图3b)。设定距离阈值 $D$ ,删除距离大于 $D$ 的匹配, $D$ 的取值可按公式(1)获得(图3c)。经过处理后,可能还会存在大比例尺要素的多个特征点与小比例尺要素的一个特征点匹配的情况,如在图3c中 $f$ 上的点8、10与 $g$ 上的点9匹配,点31、32与27匹配,此时必须进行更为精细化的匹配。精细匹配的基本原则是两曲线的形状单元的匹配:针对一对二的情况,必须满足小比例尺特征点前方形状单元与大比例尺前点的前方形状单元一致,小比例尺的特征点后形状单元与大比例尺后点后的形状单元一致,即前后两端的形状单元必须保持一致,若其中一个不匹配,则删除该匹配。

对图3c中的2个一对二匹配的情况,参照图4进行详细地分析。图4a中小比例尺曲线的特征点27与大比例尺曲线的31、32对应,点31、32分别为“u·n”型与“n·u”型,省去中间段,则31~32两端的形状为“u·u”型,27的前后形状单元为“n·u”型,二者的后弧段类型不相符,删除不符的一端,即27~31的匹配关系。图4b中小比例尺曲线的特征点9

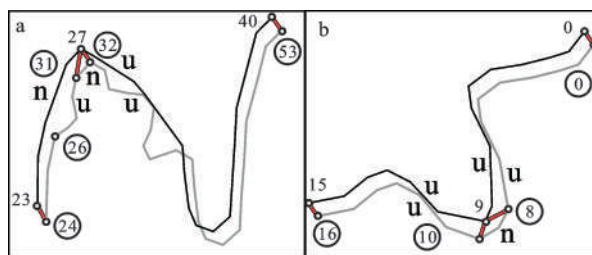


a. 首级特征点(空心圆表示); b. 最近距离的首级特征点匹配(红线表示); c. 删除距离大于阈值的匹配结果; d. 按弧段的形态特征精细化匹配关系后的结果

图3 首级特征点的匹配过程

Fig.3 The matching procedure of characteristic points on first-level of the tree

与大比例尺曲线的8、10对应,省去中间段,则8~10两端的形状为“u·u”型,与9号点前后单元的形状类型一致,故仍保持一对二的匹配。经过精细匹配后, $f$ 与 $g$ 的特征点匹配结果如图3d,其中点9与点8和点10匹配。



a. 形态不匹配的“一对二”情况; b. 形态匹配的一对二情况

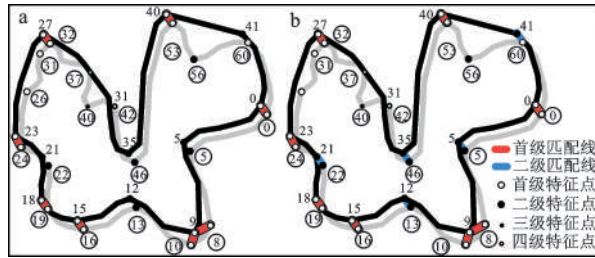
图4 根据弧段形态精细化特征点的一对二情况

Fig.4 Refining one to two matching relation of characteristic points according to shape character

首级特征点匹配完成后,再进行二级特征点匹配,图5a给出了2个同名等高线首级特征点的匹配及各个下级特征点,对大比例尺下任意一个二级特征点,在小比例尺所对应的首级特征点之间搜索最近的二级同名特征点,然后删除距离大于阈值的匹配。二级特征点匹配完成后,再进行下一级的特征点匹配,直到各级特征点匹配完成成为



止。图5b给出各级特征点匹配的结果。



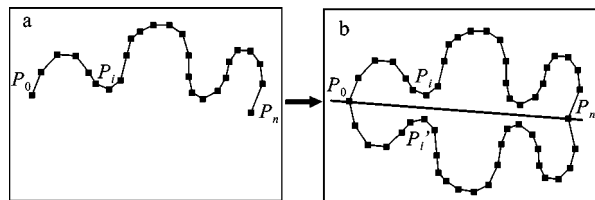
a.等高线的多级特征点;b.等高线多级特征点匹配的结果

图5 两个同名等高线的多级特征点及其匹配的结果

Fig.5 Multi-hierarchical characteristic points of correspondence contour and their matching results

### 1.3 对开等高线特征点识别与匹配

上文讨论的均是闭合等高线,对于开等高线以其首尾点的连线作镜像处理获得闭合曲线(图6),用与上文同样的方法获取特征点并匹配。如果首尾点不能成为首级同名特征点,需要添加它们作为首级同名特征点。匹配完成后,除掉镜像的部分,后续的内插部分与闭合等高线的操作一样。



a.原开等高线;b.经过镜像处理后的闭合曲线

图6 开等高线经过镜像处理后构成闭合曲线

Fig.6 The open contour is processed into close curve through mirroring with the axis of symmetry including starting and ending points

### 1.4 中间尺度等高线数据的获取

对于2个关键尺度下的同名等高线的2个同名弧段,其曲线函数可设为 $\alpha:[0,1] \rightarrow f$ 和 $\beta:[0,1] \rightarrow g$ ,其中 $\alpha(0)$ 和 $\beta(0)$ 分别为2个同名弧段的起点, $\alpha(1)$ 和 $\beta(1)$ 为其终点,对于任意 $u$  ( $1 \geq u \geq 0$ ), $\alpha(u)$ 匹配 $\beta(u)$ ,根据线性内插原理<sup>[5]</sup>,按式(2)得到中间尺度的曲线 $\gamma:[0,1] \rightarrow h$ 。

$$\gamma(t,u)=(1-t)\alpha(u)+t\beta(u) \quad (2)$$

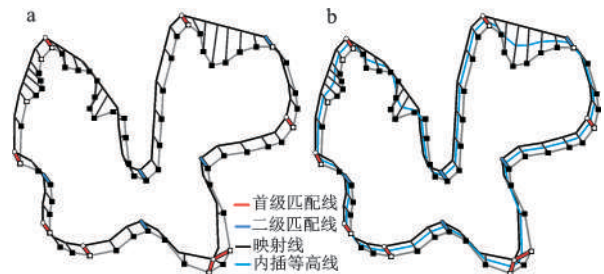
式中, $t$ 为一个与比例尺相关的参数, $\gamma(t,u)$ 为由 $f(u)$ 和 $t\beta(u)$ 内插得到的 $t$ 对应的中间尺度下的点。如果已知小比例尺为 $1:S_1$ (对应起点 $t=0$ , $S_1$ 为关键小比例尺分母)和大比例尺为 $1:S_2$ (对应终点 $t=1$ , $S_2$

为关键大比例尺分母),中间比例尺 $1:S_3$ ( $S_3$ 为关键中间比例尺分母)的 $t$ 可用式(3)计算得到:

$$t=(S_1-S_3)/(S_1-S_2) \quad (3)$$

大比例尺等高线上点的密度一般大于小比例尺等高线上点的密度,因而在实际计算中将大比例尺等高线上的点按距离比例映射到小比例尺等高线上(图7a)。对于在弧段匹配中退化的特例,即大比例的一段弧段对应小比例尺一点的情况,则将大比例尺弧段上的所有点直接与小比例尺的一点进行映射,如图7a中的弧段8~10与小比例尺的点9为同名弧段,直接将弧段8~10内中间所有的点映射到小比例尺下的点9上。

在地图数据库中,不同尺度的同名等高线以同一ID号进行标示,按网络地图的浏览范围将多个尺度的等高线数据传输到客户端。具体浏览地图时,根据当前的比例尺由式(3)计算得到与比例尺对应的 $t$ 值,由式(2)计算得到大比例尺下所有等高线上各点在当前比例尺下对应的坐标,将新生成的各点按顺序连接构成曲线,从而实时表达当前尺度下的等高线图形(图7b)。



a.大比例尺等高线上的点映射到;b.内插获得的中间等高线小比例尺同名等高线上

图7 中间尺度的等高线获取过程

Fig.7 The procedure of interval contour being created

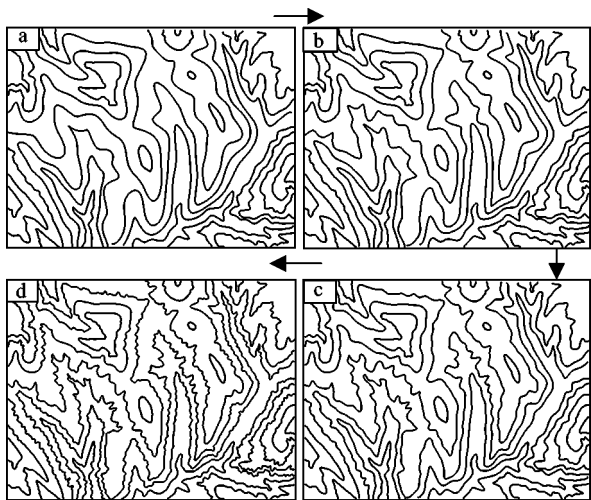
## 2 实验和讨论

本文使用C#程序语言在ArcEngine9.3环境中实现了图形渐变技术的试验,选取一定区域的2个关键尺度(1:5 000和1:1 000)下的等高线数据,利用凸壳与BLG树获取多层次的特征点,通过邻近距离与弧段的形态特性的比较实现同名特征点的匹配,当浏览的比例尺发生变化时自动获取与当前比例尺相适应的等高线表达。在图8a给出一定区域1:1 000的等高线数据,图8a~d为在本文模型下从1:

5 000 到 1:1 000 中间尺度的等高线表达。为了考察算法的复杂度,实验中选取 10 条不同长度及复杂度的等高线,记录探测特征点以及同名特征匹配所需时间,并与文献[5]提供的方法所耗时间进行对比(表 1),从表 1 可看出本文的模型无论是在特征点探测还是特征点匹配所耗时间都明显少于文献[5]提供的模型,从总时间看,本模型所耗的时间为文献[5]提供的模型的 42%,在算法复杂化度上明显优于对方。从图 8 显示的效果看各中间尺度图形等高线渐变效果良好,说明本模型的实用性。

表 1 本模型特征点探测与匹配所耗时间与文献[5]相应时间的对比(单位:ms)

Table 1 Contrast of cost time of detecting characteristic points and matching characteristic points based on the models proposed by this study and reference [5] (unit: ms)											
方法		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
本文模型	探测	23	34	18	43	94	67	123	67	55	43
	匹配	8	9	2	12	15	23	26	28	20	12
	合计	31	43	64	55	106	91	149	95	76	56
文献5模型	探测	45	76	45	100	234	302	234	123	154	90
	匹配	14	23	8	56	56	45	43	78	80	45
	合计	59	99	53	157	290	347	278	201	234	135



a. 关键尺度 1(1:5 000)的等高线;b. 中间尺度(1:3 000)等高线;  
c. 中间尺度(1:2 000)等高线;d. 关键尺度 2(1:1 000)的等高线

图 8 基于图形渐变技术的等高线连续尺度表达  
Fig.8 Continual-scale representations of contours based on morphing technique

在全自动地图连续尺度表达中常常容易出现是要素自身或相互的拓扑冲突,而本文使用的图

形渐变技术,中间尺度的数据受两尺度数据的严格控制,中间尺度的数据只是关键尺度数据的微调,因而出现拓扑冲突的可能性不大。

### 3 结 论

本文依据两关键尺度下的等高线数据,应用图形渐变技术内插出中间尺度的等高线数据,实现了等高线连续尺度的表达,模型的关键技术是基于形状分析的等高线特征点的探测及其匹配过程,通过实验验证了该模型的有效性。必须说明,由于地形的多样性和复杂性,即使是人工方法进行等高线的多尺度表达也是费脑费时,本模型最适应于地形起伏不大的大比例尺等高线连续尺度表达。对于地形复杂程度较高的等高线,特征点的探测与匹配是本模型能否实用的关键,下一步将充分吸收图像图形模式识别的成果,进一步提高特征点探测和匹配的精度和效率,以得到更为实用的实时多尺度的地图要素的表达。

### 参考文献:

[1] 艾廷华.多尺度空间数据库建立中的关键技术与对策[J].科技导报,2004,(12):4~8.

[2] 刘鹏程,艾廷华,杨 敏.基于傅里叶级数的等高线网络渐进式传输模型[J].测绘学报,2012,41(2):284~290.

[3] 艾廷华,李志林,刘耀林,等.面向流媒体传输的空间数据变化累积模型[J]. 测绘学报,2009,38(6):514~519,526.

[4] Bertolotto M,Egenhofer M.Progressive Transmission of Vector Map Data over the World Wide Web[J].GeoInformatica,2001,5(4):345-373.

[5] Nöllenburg M,Merrick D,Wolff A,et al.Morphing polylines:A step towards continuous generalization[J].Computers,Environment and Urban Systems,2008,(32):248-260.

[6] 李精忠.尺度空间地图多重表达的面向对象数据模型研究[D]. 武汉: 武汉大学,2009 .

[7] Latecki Login Jan, Lakämper Rolf.Convexity rule for shape decomposition based on discrete contour evolution[J]. Computer Vision and Image Understanding,1999,73(3):441-454.

[8] 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): 2674~2682.

[9] Cohen S,Elber G,Bar-yehuda R.Matching of freeform curves[J]. Computer-Aided Design,1997,29(5):369-378.

[10] Mortara M,Spagnuolo M.Similarity measures for blending polygonal shapes[J].Computers & Graphics,2001,25(1):13-37.

[11] Barber C B,Dobkin D P,Huhdanpaa H.The quick hull algorithm for convex hull[J].ACM Transactions on Mathematical Software,1996, (22):469-483.

[12] Oosterom P V, Bos J V D. An Object-oriented approach to the design of Geographic Information systems[C]. New York, USA:

The First Symposium on Design and Implementation of Large Spatial Databases, 1990.

## The Continual Scale Representation Model for Contour Based on Morphing Technique

LIU Peng-cheng, GONG Chong-ya, TAO Jian-bin, ZHAO Xiao-xue

(College of Urban and Environmental Science, Central China Normal University, Wuhan, Hubei 430079, China)

**Abstract:** A new Morphing technique for two contours is proposed based on characteristic points matching. This problem occurs frequently during continuous zooming in interactive maps.

For corresponding contours at two different key scale maps, firstly, two multi-way trees of characteristic points of these two contours are built, in which the characteristic points on top hierarchy are identified by building convexes of points, which are located on contours and other subordinate characteristic points of tree are detected by using Douglas-Peucker algorithm between two corresponding arcs. So using the method, the similarity of the whole shape of geographic feature at different scales is not only considered, but the influence of extreme points of the curve on curve taken into account as well. Secondly, the different hierarchy characteristic points matching are researched. For each first-level characteristic points of small key scale contour, the most neighboring first-level characteristic points of which on large scale contour are regarded as their candidate corresponding points. Next, the ultimate matching relationship of first-level characteristic points will be established by setting neighboring distance threshold and arcs' shape analysis. For the following-level characteristic points, the matching relationship will be built from higher- to lower-level characteristic points based on distance proximity. Thirdly, the new contour of arbitrary interval scale between the two key scales is acquired using Morphing technique. The mapping line of any point between two continuing characteristic points on large scale contour is built up from the large to small key scale contour according to the distance proportion of the two characteristic points. Then according to the representative scale, some new points can be interpolated on mapping lines and these points can be combined into a new representative scale contour. So in arbitrary scale contour representation can be obtained based on morphing technique. The key point of Morphing technique is recognition of characteristic points and matching relationship of characteristic points. The paper have compared the cost of time in the model provided by this article with that in the algorithm proposed by literature[5]. The conclusion is that the cost of time of the former model is less than that of the latter algorithm. Experiment results show the model based on multi-hierarchical characteristic points is helpful trial of continual-scale representation of contour in the network environment and can effectively sustain topological relationship between contours.

**Key words:** morphing; map continual-scale representations; corresponding characteristic points