

同名矢量地图要素形状配准的算法与应用

赵东保¹, 盛业华¹, 魏永强²

(1. 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 南京 210046; 2. 黄河水利委员会信息中心, 郑州 450002)

摘要: 地图配准是 GIS 领域的一个基础问题, 本文结合矢量地图要素的形状特点, 提出了一种可对存在仿射变换关系的两个同名矢量地图要素, 进行自动精确配准的算法。首先, 该算法综合利用地图要素的几何矩以及仿射变换的有关性质定理解算仿射变换参数, 实现两个要素的粗配准; 然后, 以粗配准结果作为初值, 通过一种改进的 PLCP 算法进行迭代配准, 从而实现待配准地图要素的精配准。实验结果表明: 本文算法可对存在仿射变换的同名要素进行自动精确配准, 且具有一定的抗噪能力, 以配准结果为基础, 还可以准确地从同名要素上自动识别和匹配同名特征点。

关键词: 形状配准; 地图配准; 地图要素配准

1 引言

地图配准是 GIS 应用中进行空间数据处理与分析的重要步骤。对于两幅矢量地图的自动配准而言, 在缺乏同名控制点的情况下, 一般都是借助同名地图要素进行配准, 即通过地图要素的形状、空间关系和拓扑结构等信息, 实现矢量地图的自动配准, 即基于特征的配准。

针对这种配准, 人们已开展了不少研究工作^[1-5]。但它们研究的重点放在了同名地图要素的自动识别上, 而对同名地图要素上选取同名特征点的重视不足。这些算法在对同名地图要素正确匹配后, 只是从同名地图要素上选取一到两个标志点作为控制点, 例如, 面状要素, 则选取质心作为控制点, 线状要素, 则选取端点作为控制点。当同名地图要素的数量较多时, 此种做法的正确性毋庸置疑, 但是, 当同名地图要素的数量很少的个别情况下, 当只有两个同名地图要素时, 显然仅提取要素的质心作为控制点是不足以解算坐标转换参数的。然而, 这种极端的情况在实践中也是会经常遇到的, 例如, 有两幅地图, 一幅是江苏省道路交通图, 另一幅是江苏省水运交通图, 假定这两幅地图仅有江苏省省界这一对同名

地图要素, 显然, 欲实现这两幅地图的配准, 就必须要实现省界的精确配准。事实上, 对于任何待配准的两幅地图而言, 即便同名地图要素的数量较多, 但如果能够对每两个同名地图要素都进行精确配准, 则两幅地图的配准精度将会得到进一步提高, 尤其是当两幅地图的坐标转换参数并非全局统一, 而是存在非均匀形变现象时, 这种精度的改善会更为明显。为了实现对两个同名地图要素的自动且精确配准, 就需要找到合适的方法, 这在计算机视觉领域中已经有所涉及, 被称之为形状配准问题, 尽管在计算机视觉领域也提出了一些形状配准算法^[6-9], 但这些算法大都针对图像数据而言, 且多是规则物体。而对于具有复杂形状特点的矢量地图要素而言, 这些方法并不能完全适用, 鉴此, 本文将针对两个同名矢量地图要素的精确配准算法, 由粗配准和精配准两个阶段进行具体分析。

2 面状要素的几何矩

本文算法中面状要素的自动配准的理论基础, 是利用其形状的几何矩, 作为不变量来解算仿射变换的参数。因此, 对面状要素的形状几何矩需

收稿日期: 2009-05-22; 修回日期: 2009-12-24

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40671147、40671154); 国家“863”计划 (2007AA12Z236、2007AA12Z207)。

作者简介: 赵东保 (1979-), 男, 河南郑州人, 博士研究生, 助教, 研究方向: 空间数据集成与共享。

E-mail: zdongbao@126.com

*通讯作者: 盛业华 (1965-), 男, 博士生导师, 教授, 研究方向: 虚拟地理环境。E-mail: shengyehua@njnu.edu.cn

给出以下预备知识^[10]。

定义 1: 设任意一个形状记为 S ，它对应一个二元有界函数 $f(x, y)$ ，形状边界上的任意一点用 2×1 矩阵 X 表示，形状所包围的区域为 S ，则其 $(j+k)$ 阶矩为：

$$M_{jk} = \iint_S f(x, y) x^j y^k dx dy \quad j, k = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

集合 $\{M_{jk}\}$ 对于函数 $f(x, y)$ 是唯一的，它可以完全确定函数 $f(x, y)$ 本身，也即每一个形状都有一个几何矩的集合与其相对应。

定义 2: 设 S 为形状的面积，则形状的面积就是 $(0+0)$ 阶矩，也即 $S = M_{00}$ 。

定义 3: 设形状的质心用 2×1 矩阵 C 表示，

则有 $C = \frac{1}{S} \iint_S x dy$ ，即形状质心的坐标应为：

$$C = \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{10}/M_{00} \\ M_{01}/M_{00} \end{bmatrix} \quad (2)$$

定义 4: 为了获得矩的不变特征，往往采用中心矩和归一化的中心矩，中心矩的定义为：

$$M_{jk} = \iint_S (\bar{x} - x)^j (\bar{y} - y)^k f(x, y) dx dy \quad j, k = 0, 1, 2, \dots \quad (3)$$

对于 $j+k=2, 3, 4, \dots$ 的高阶矩，可以定义归一化的中心矩为

$$\mu_{jk} = \frac{M_{jk}}{(M_{00})^r}, \quad r = \left(\frac{j+k}{2} + 1 \right) \quad (4)$$

定义 5: 设形状 S 的协方差矩阵用符号 COV 表示，则有：

$$COV(S) = \frac{1}{S} \iint_S \begin{bmatrix} x - \bar{x} \\ y - \bar{y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - \bar{x} & y - \bar{y} \end{bmatrix}^T dx dy \quad (5)$$

定义 6: 对形状 S 如下变换： $T(S) = COV(S)^{-\frac{1}{2}} [I - C]J$ ，该变换被称为形状的规范化。形状 S 经过规范化后，其协方差阵变为单位阵，也即 $COV(T(S)) = E$

3 矢量地图要素的算法配准

算法的第一个阶段为粗配准。粗配准的目的是利用形状的几何矩来求取仿射变换的平移、缩放、旋转和歪斜等参数，从而使得同名地图要素能够大致配准，并为后续的精配准提供较为准确的初值。

3.1 形状粗配准

3.1.1 计算面状要素之间的仿射变换参数

设面状要素 S_1 上的边界点集合为 X_1 ，面状要素 S_2 上的边界点集合为 X_2 ，它们之间的仿射变换模型可以写为： $X_2 = AX_1 + b$ ，经由以下 5 步可以求得矩阵 A 和 b ，从而获取仿射变换的各个参数。

(1) 计算面状要素 S_1 和 S_2 三阶以内的低阶几何矩，由这些低阶几何矩即可求出面要素的质心、主轴等关键特征量。至于几何矩的计算方法，可参照文献 [11] 的方法进行计算。该方法的基本原理：首先，将形状 S 置于第一象限，再将形状边界的 n 个顶点分别与坐标原点连接，相邻的两个顶点与原点就形成了一个三角形，于是可得到 n 个三角形即 T_1, T_2, \dots, T_n 。计算每个三角形区域的 $(j+k)$ 阶矩，然后，对这 n 个三角形的 $(j+k)$ 矩进行符号相加就可得到整个形状的 $(j+k)$ 阶矩。由其计算原理可以看出，仅通过边界信息计算几何矩所耗费的时间与边界的顶点个数 n 成线性正比关系，仅为线性时间复杂度。

(2) 借助已经算出的几何矩，根据定义 (3) 可求得两个面状要素 S_1 和 S_2 的质心 C_1 和 C_2 ，平移 S_1 和 S_2 使得它们的质心与原点重合，这样，即可求出矩阵 b 所对应的两个平移参数。此时 S_1 和 S_2 变为 S'_1 和 S'_2 ，其边界点集合也分别变为 X'_1 和 X'_2 ，并有 $X'_1 = X_1 - C_1$ ， $X'_2 = X_2 - C_2$ ， $X'_2 = AX'_1$ 。

(3) 按照定义 (6) 分别对形状 S'_1 和 S'_2 进行规范化，可得 $T(S'_1)$ 和 $T(S'_2)$ ，由文献 [12] 可知 $T(S'_1)$ 和 $T(S'_2)$ 之间只存在旋转变换。

(4) 在分别获得 $T(S'_1)$ 和 $T(S'_2)$ 的主方向后，易于求得二者之间的旋转角度，由此便可得旋转矩阵 R 。形状的主方向也即其最适合椭圆的长轴方向可由下式确定：

$$\theta = \tan^{-1} \frac{M_{02} - M_{20} + \sqrt{(M_{02} - M_{20})^2 + 4M_{11}^2}}{2M_{11}} \quad (6)$$

形状的主方向位于倾角为 θ 的直线上存在二义性，即究竟是正向 θ 还是反向 $\theta + \pi$ ，其判别方法为将形状旋转角度 θ ，然后由形状的三阶矩决定，即当 $M_{30} > 0$ ，取 θ ，反之取 $\theta + \pi$ 。确定了形状的主方向后不难确定形状的主轴，沿形状的主方向过形状的质心的直线即为形状的主轴。

(5) 由 $T(S'_1)$ 和 $T(S'_2)$ 之间的旋转矩阵 R ，

可进一步求得 $A = COV(\mathbf{z}_2)^{-1} R COV(\mathbf{z}_1)^{-1}$, 至此便可求得仿射变换的各个参数。

在求出了仿射变换的各个参数后, 两个面状要素之间自然可实现粗配准, 由于上述步骤的主要计算量集中在几何矩的计算上, 而各个三阶以内的低阶几何矩的计算仅需耗费线性时间, 故粗配准的时间复杂度亦为线性。

3.1.2 计算线状要素之间的仿射变换参数

由于线状要素非封闭区域, 因此, 不能利用上述几何矩解算线状要素之间的仿射变换参数, 不过若能从线状要素上自动找到三对对应点, 则可解算仿射变换参数。显然, 由线状要素的两个端点可以获得两对对应点, 再采用以下方法可以获得第三对对应点, 该方法的关键之处在于将面积比作为参数, 对线要素的坐标予以参数化表示。设线要素为 L , 其顶点序列为 $\{l_1, l_2, \dots, l_n\}$, 以端点 l_1 作为起始点, 对 L 上的任意连续两点 l_i 和 l_{i+1} , 计算三角形 $l_1 l_i l_{i+1}$ 的面积, 设为 S_i 。而后计算 L 上的各个顶点的面积比, 见下式:

$$I_i = \frac{S_i}{\sum_{k=1}^n S_k} \quad (7)$$

按照此方法定义了一个单调递增的面积比序列函数 $\{I_1, I_2, \dots, I_n\}$, 显然 I 的值域为 $[0, 1]$, 利用这个序列函数可以反过来用 I_i 表示顶点 l_i 的坐标, 事实上, 对于任意 $I \in [0, 1]$, 可通过已知的对应关系通过线性插值获得 L 上与 I 相对应的点的坐标。于是 L 上任意一点坐标就可以参数化地表示为 $(x_L(I), y_L(I))$, 根据仿射变换的性质定理可知, 封闭曲线的面积之比为仿射不变量^[13], 因此, 无论 L 做何种仿射变换, 其所对应的面积比序列函数 $\{I_1, I_2, \dots, I_n\}$ 均不变。假定 L_1 和 L_2 为待配准的两个线状要素, 在 L_1 上寻找一点 P , 该点应满足这样一个性质, 即该点与 L_1 的两个端点所组成的三角形比其他任何点与 L_1 的两个端点所组成的三角形面积都大, 计算该点 P 所对应的 I_P 值, 而后根据该 I_P 值计算其在 L_2 上的对应点 Q , 则 P 和 Q 点即是第三对对应点。注意到线要素之间端点的对应情况有两种可能, 可以对这两种可能都进行仿射变换参数的解算, 然后, 在粗配准完成后, 按照文献[14]的方法计算线要素的 L2 距离, L2 距离是对衡量曲线之间距离远近的 Fréchet 距离的一种简化和近似, 它也可以较好地反映线要素之间的距离远近程度, 其计算量仅

为线性时间复杂度, 在计算出 L2 距离后, 取对应 L2 距离较小的那组仿射变换参数为正确的仿射变换参数。由线要素的仿射变换参数计算原理容易看出, 其时间复杂度亦为线性。

3.2 精配准

算法的第二个阶段为精配准。设待配准的两个要素分别为 R 和 T , R 向 T 配准且 R 和 T 已经进行了粗配准, 算法的精配准就是采用 PLICP 算法^[15]根据粗配准的结果对 R 的位置进一步精调, 以实现更为准确的配准, PLICP 算法是在传统 ICP 算法^[16]基础上的一种改进算法, 它具有更快的收敛速度。其步骤如下:

(1) 将 R 上的每个顶点 P 向 T 的每条边做投影, 可得到一系列投影点 (若无投影点, 则认为该边的两个端点中距离 P 较近的点为投影点), 在这些投影点中, 寻找和 P 距离最近的投影点, 并组成一对最近点点对, 计算所有最近点点对的距离均值。

(2) 利用这组最近点点对计算仿射变换参数。

(3) 利用计算出的仿射变换参数, 更新 R 每个顶点的坐标。

(4) 重新转步 (1), 当新计算出的距离均值与上次距离均值之差很小 (小于规定阈值) 或达到规定的迭代次数, 则终止, 否则又转步 (2)。

PLICP 算法的主要操作就是不断地进行最近投影点查询, 为了查找最近投影点, 需要和形状边界上的每个边都进行比较, 不过, 既然形状已经完成了粗配准, 可以采用以下改进方法提高查询效率, 设要素 R 上的起始点为 O , 若 R 为面状要素, 则可令 R 的主方向与边界的交点为其该起始点, 若 R 为线状要素, 则令端点为其起始点。按照上述介绍的方法以面积比为参数对 R 进行参数化表示, 设面积比参数为 r , 于是 R 边界上的任意一点坐标可以表示为 $(x_R(r), y_R(r))$, 按照相同方法可以获得要素 T 的起始点, 要素 T 的起始点与 R 的起始点应为对应关系, 同样设要素 T 的面积比参数为 t , 则 T 边界上的任意一点坐标可以表示为 $(x_T(t), y_T(t))$, 则对 R 上的任意一点 $P(x_R(r), y_R(r))$, 只有当 T 上某个顶点的面积比参数满足关系式 $\min(1 - |r - t|, |r - t|) < \text{threshold}$ 时, 才将 P 点与 T 上该顶点所在的边进行比较。这里 threshold 为阈值, 其值域也为 $[0, 1]$, 该值通常可取为 0.15。一般而言, 在矢量地图要素配准

中, FLICP算法的最大迭代次数设置为 20次即可。

在完成了精配准后, 对于 R 边界上的任意一点 P , 只需向 T 的边界上做投影, 则距离其最近的投影点即为 P 的同名对应点, 由此可以获得 R 与 T 之间所有顶点的对应关系。不过, 在进行地图的自动配准过程中, 有时并不需要获得所有顶点的对应关系, 而只是需要获得一些特征点之间的对应关系, 这些特征点通常是要素边界上的明显角点, 或者是在拓扑结构上具有重要意义的点, 利

用这些从边界上获得的特征点, 以及要素的质心就可以获得比单纯依靠质心更为精确的配准结果。

4 算法应用与验证

为了测试本文算法对同名矢量地图要素的配准效果, 利用 C#语言和 ArcEngine9.2控件编写本文算法, 并进行了验证, 以下给出多个具有代表性的实例(见图 1)。这些实例中的地图要素都存

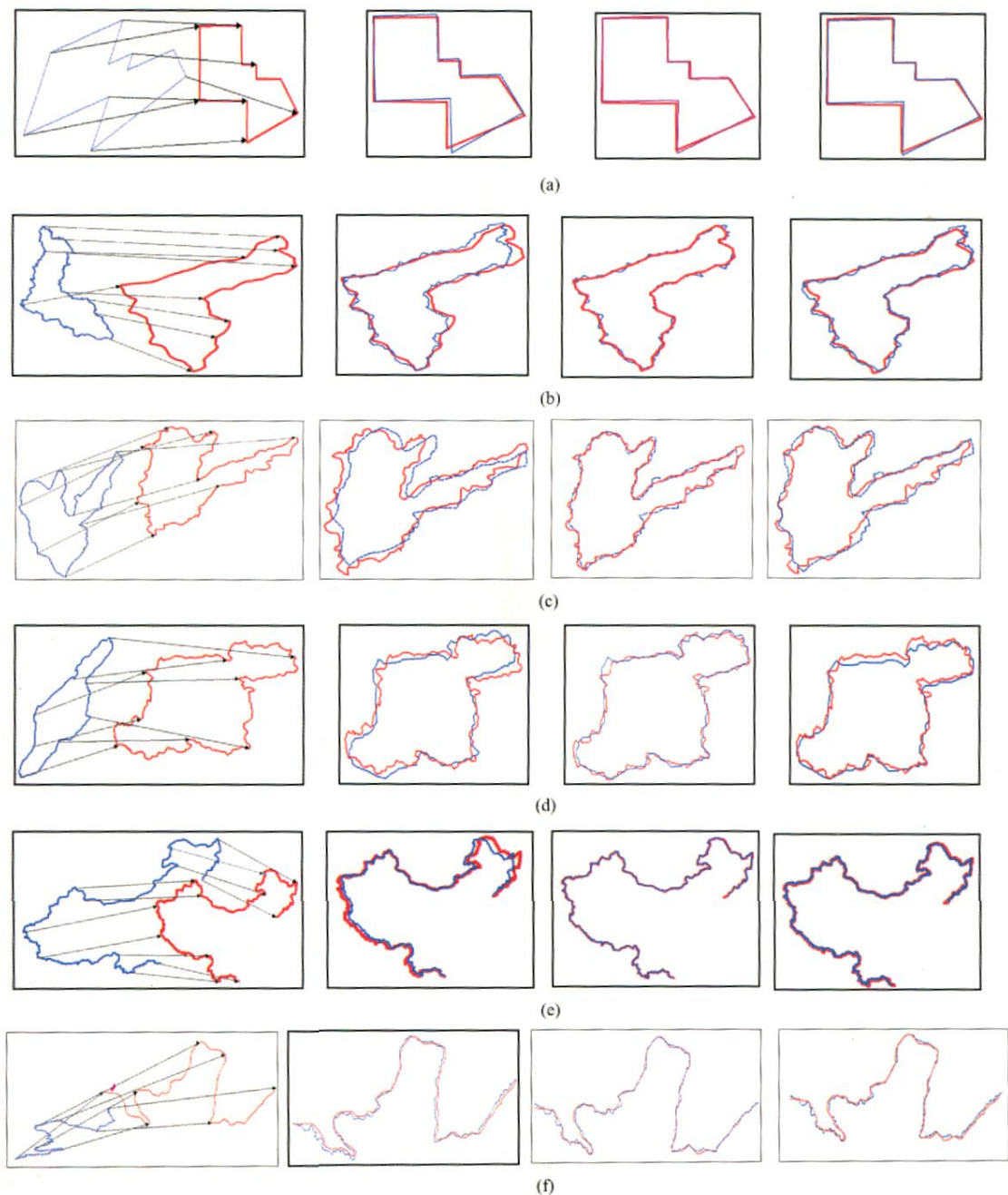


图 1 同名地图要素配准示意图

Fig. 1 Registration result of two homonymous vector map features

在明显的仿射变换关系，其中，前四个为面状要素，后两个为线状要素。在现有的 GIS 平台软件中，如 ARCGIS 软件，如果想对一对同名地图要素进行配准，其方法一般都是通过人工选择同名点进行配准，图 1a - 图 1f 中，最左侧图中带箭头直线的，即是人工选择同名点的配对情况，可以看出同名点的个数，以及分布情况完全符合配准的要求。接下来的从左向右各图依次为本文算法对同名地图要素粗配准、精配准的效果图，以及人工配准效果图。为了对比人工配准和本文算法配准的精度，本文采用 Douglas - Peucker 算法，进一步对待配准的地图要素进行化简以提取特征点，化简后的地图要素与原始地图要素在形状上均较为接近，以确保特征点能够较为均匀地分布在地

图要素的整个边界上。对这些同名地图要素进行配准后，先将这些特征点在相对应的同名地图要素边界上的最近投影点作为它们的同名点，然后，统计了各个距离误差指标，其结果见表（1）。由于地图要素的边界信息主要集中在特征点上，因此，通过对特征点的比较分析，可以较为可靠地判断配准精度，由表（1）可以看出，对于这些实例，待配准的地图要素其边界无论是平整规则还是蜿蜒曲折；它们之间无论是几何变形很小，还是由于尺度的差异，导致复杂程度上明显不同，在细节上存在不少变形。本文算法在平均距离误差指标和均方根距离误差指标上，都能优于人工配准，该实例表明，本文方法能够适应地图要素的形状特点，具有一定的抗噪能力。

表 1 本文算法自动配准与人工配准的精度对比
Tab. 1 Comparison of precisions between artificial and automated registrations

实例	提取特征 点个数	配准方法	最大距离误差 (图上单位)	最小距离误差 (图上单位)	平均距离误差 (图上单位)	均方根距离误差 (图上单位)
图 1a	10	人工配准	1.35	0.18	0.70	0.39
		本文算法	1.29	0.20	0.66	0.38
图 1b	36	人工配准	40.60	1.29	15.10	9.60
		本文算法	23.69	0.55	9.09	5.96
图 1c	33	人工配准	58.85	1.51	17.41	12.92
		本文算法	66.20	0.79	13.18	10.28
图 1d	28	人工配准	62.07	0.72	18.22	12.33
		本文算法	46.98	0.67	12.12	9.46
图 1e	34	人工配准	103.54	0.198	18.06	11.64
		本文算法	30.99	0.037	7.41	5.63
图 1f	34	人工配准	328.73	1.27	34.49	28.24
		本文算法	324.62	1.21	24.36	18.28

5 结论

本文提出了一种可对存在仿射变换的同名矢量地图要素，进行自动精确配准的算法。实验表明，其具有一定的抗噪能力，即使地图要素在形状细节上存在一定的变形，也仍能得到较好的配准效果。利用本文算法还可以从同名矢量地图要素上获取更多的同名特征点，这就为进一步改善配准精度，奠定了基础。本文算法的缺点：当同名地图要素在形状上存在较大变形时，将会影响到粗配准的准确性，使后续的精配准容易陷入局

部最优，从而使得最终的配准效果较差。不过考虑到在大多数情况下，同名地图要素在形状上通常相似程度很高（即便不高，亦可在同名地图要素的自动识别过程中予以剔除），故本文算法在一般情况下是切实有效的。

参考文献：

[1] 张晓东,李德仁,龚建雅,秦前清.一种基于面特征的遥感影像与 GIS 数据配准方法[J]. 遥感学报,2006,10(3): 373- 380.
[2] Dai X L, Khorram S A. Feature-Based Image Registration

- Algorithm Using Improved Chain-Code Representation Combined with Invariant Moments[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(5): 2351~2362.
- [3] 韦燕凤, 赵忠明, 闫冬梅, 曾庆. 基于特征的遥感图像自动配准算法[J]. 电子学报, 2005, 33(1): 161~165.
- [4] 文贡坚, 吕金建, 王继阳. 基于特征的高精度自动图像配准方法[J]. 软件学报, 2008, 19(9): 2293~2301.
- [5] Ton J, Jain A K. Registration Landsat Images by Point Matching[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1989, 27(5): 642~650.
- [6] Sebastian T B, Klein P N, Kimia B B. On Aligning Curves[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(1): 116~125.
- [7] S Belongie, J. Malik, and J. Puzicha. Shape Matching and Object Recognition Using Shape Contexts[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(4): 509~522.
- [8] Zitova B, Flusser J. Image Registration Methods: A Survey[J]. Image and Vision Computing, 2003, 21(11): 977~1000.
- [9] Tang H X, Wei H. CTHDP: An Affine Invariant Method for Matching Contours[C]. Proceedings of the Fourth International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Guangzhou, 2005: 5088~5093.
- [10] 吴健康. 数字图像分析[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1989.
- [11] Leu J G. Computing a Shape Moments from Its Boundary[J]. Pattern Recognition, 1991, 10: 949~957.
- [12] Zuliani M, Bhagavathy S, Manjunath B S, Kenney C S. Affine Invariant Curve Matching[C]. Proceedings of the International Conference on Image Processing, 2004.
- [13] 孙即祥. 模式识别中的特征提取与计算机视觉不变量[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- [14] Cobb M, Chuang M, Foley H. A Rule-based Approach for the Conflation of Attributed Vector Data[J]. GeoInformatica, 1998, 2(1): 7~35.
- [15] Censi A. An ICP Variant Using a Point-to-line Metric[C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation Pasadena, CA, USA, 2008: 19~23.
- [16] Besl P, McKay N. A Method for Registration of 3-D Shapes[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2): 239~256.

Shape-based Approach to Registration of Homonymous Vector Map Features

ZHAO Dongbao¹, SHENG Yehua¹, WEI Yongqiang²

(1. Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, MOE, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China;

2. Information Center of Huanghe River Committee, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Map Registration plays a very important role in many fields of GIS. An automated shape-based approach to affine transformation registration of two homonymous vector map features is put forward in this paper. This approach includes two stages which are coarse registration and fine registration. In the first stage, geometry moments are computed only through boundary for polygon features and three pairs of corresponding points are recognized according to some theorems of affine transformation invariants for line features, which will cause that six initial parameters of affine transformation be solved, and thus two map features can overlap with each other roughly according to solved parameters. In the second stage, fine registration is realized by an improved iterative closest points method using a point-to-line metric based on coarse registration result. Experiments show that this algorithm presented in this paper can still achieve a more accurate registration result compared with artificial registration even when there are many slight deformations between shape boundaries of two homonymous vector map features, which mean that it is robust to noise to some degree. Because this algorithm take complicated shape characteristics of map features into account, it is more suitable for registration of vector map features than other methods. After fine registration is fulfilled, homonymous corresponding points can be recognized and matched from shape boundary of vector map features based on registration result, which will lay solid foundation for following entire map registration.

Key words: shape-based registration; map registration; map features registration