

免测绘型数字交通精确制图程序研究

刘燕君¹, 鲍远律², 罗斌¹

(1. 安徽大学计算智能与信号处理教育部重点实验室, 230039, 合肥;

2. 中国科学技术大学自动化系 GPS 实验室, 230026, 合肥)

摘要: 针对传统地图制图必须进行精密测绘或航空摄影以获得地理图像及位置坐标的问题, 提出了一种与传统过程反序操作的全新的免测绘型数字交通精确制图方法. 该方法根据城市栅格地图可智能地提取交通网络信息, 从而获得矢量地图; 利用道路 GPS 轨迹(含准确经纬度) 叠加于矢量地图, 取得地图校正采样控制点; 通过拓扑变换来完成地图节点坐标的精确校正, 并为应用地图道路结构特征的带有闭环控制的道路聚类过程和动态离散拓扑变换实现数字地图的非线性校正, 提出了离散非线性校正算法. 以合肥城区的地图生成过程为例进行了实验, 结果证明了免测绘制图方法在生成高精度数字地图上是有效的.

关键词: 模式识别; 数字地图; 拓扑变换; 全球定位系统; 非线性校正

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)06-0104-07

Cartography for Digital Traffic Map Without Survey

LIU Yanjun¹, BAO Yuanlü², LUO Bin¹

(1. Key Laboratory of Intelligent Computing and Signal Processing of Ministry of Education, Anhui University, Hefei 230039, China;

2. GPS Laboratory, Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: The existing map-making is based on precise surveying and mapping or aerial photography for geographic pattern and position coordinates. With reverse order process, a new accurate digital traffic cartography method without surveying and mapping is developed. The method acquires vector map via intelligent extracting traffic network from the raster urban map, uses GPS track road (including accurate longitude and latitude) superposition in vector map to obtain map correction sampling control points, and completes map node coordinates of accurate calibration through the topological mapping. The key theoretical research results in the road clustering based on the road structure characteristics of raster map with closed-loop control and nonlinear calibration on the vector map by dynamic discrete topological transformation, thus the discrete nonlinear correction algorithm is put forward. The experimental map-making processes for the urban area of Hefei proved the validity of the cartography method with high precision.

Keywords: pattern recognition; digital map; topological mapping; global positioning system; nonlinear correction

传统的制图方式以测绘技术为主^[1], 技术成熟且程序完整. 本文研究了一种与传统过程反序操作的全新的数字交通精确制图程序, 制图过程是: 先进行彩色栅格地图道路层识别, 以获得城市交通网络

矢量地图; 再利用道路 GPS 轨迹(含准确经纬度) 叠加于矢量地图, 取得地图校正采样控制点; 最后通过拓扑变换来完成地图节点坐标的精确校准. 采用本文制图程序免去了测绘过程, 所以极大地降低了制

收稿日期: 2011-11-24. 作者简介: 刘燕君(1982—), 女, 讲师. 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60974092); 安徽省高等学校省级自然科学研究重点项目(KJ2012A008, KJ2012A010); 安徽大学 211 学术创新团队项目(02303402-34020008).

网络出版时间: 2012-03-13

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20120313.1634.003.html>

图成本。

新的制图程序包括地图道路层智能识别、交通网络矢量化及矢量地图精确拓扑校正这 3 个关键环节。

1 地图道路层智能识别

经扫描的交通旅游地图在计算机屏幕上便成为 24 bit 的 BMP 格式栅格点阵彩色图像. 像素 p_{ij} 可以 3 维向量的 RGB 值来表示, 即 $p_{ij} = [R(p_{ij}), G(p_{ij}), B(p_{ij})]$. p_{ij} 与颜色 $C_k = [R_k, G_k, B_k]$ 的距离为非负实数, 即 $D(p_{ij}, C_k) = \max[|R(p_{ij}) - R_k|, |G(p_{ij}) - G_k|, |B(p_{ij}) - B_k|]$.

地图道路层识别过程如图 1 所示, 它由 3 个功能模块构成: 地图道路层初始聚类; 通过噪声点消除生成二值图像; 基于道路特征判别实现过识别路段消除。

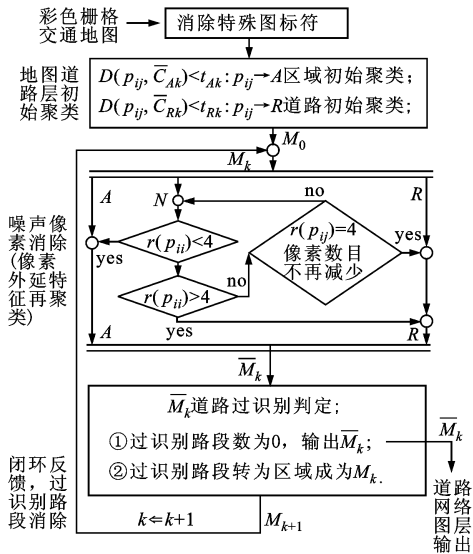


图 1 地图道路层识别过程

1.1 彩色交通地图道路层初始聚类

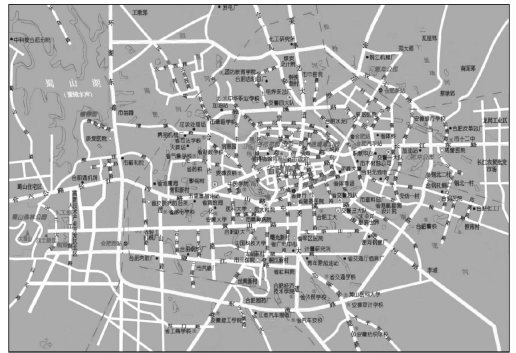
彩色交通地图由道路像素 R 、区域(非道路)像素 A 及噪声像素 N 这 3 类像素构成. 噪声像素是指, 所有不能明确判断是否属于道路或区域的像素。

交通地图上的道路和区域是分别采用不同的几种固定颜色表示的, 所以通过地图道路层初始聚类, 很容易获得初始聚类所需的道路像素 RGB 中心值集合 $\bar{C}_R = \{\bar{C}_{R1}, \bar{C}_{R2}, \dots, \bar{C}_{Rm}\}$ 和区域像素 RGB 中心值集合 $\bar{C}_A = \{\bar{C}_{A1}, \bar{C}_{A2}, \dots, \bar{C}_{An}\}$. 取道路颜色距离阈值 t_{Rk} , 将 $D(p_{ij}, \bar{C}_{Rk}) \leq t_{Rk} (k=1, 2, \dots, m)$ 的像素 p_{ij} 聚类为道路层白色 $p_{ij} \rightarrow C_{p_{ij}} \rightarrow C_R \equiv (255, 255, 255)$; 取区域颜色距离阈值 t_{Ak} , 将 $D(p_{ij}, \bar{C}_{Ak}) \leq t_{Ak} (k=1, 2, \dots, n)$ 的像素 p_{ij} 聚类为区域层橙色 $p_{ij} \rightarrow$

$C_{p_{ij}} \rightarrow C_A \equiv (160, 140, 166)$; 其余像素保留原色, 并作为噪声像素 N . 初始聚类后的地图图像记为 M_0 , 称为基图, 作为进一步处理的图源. 合肥市旅游地图及初始聚类后的基图 M_0 如图 2 所示。



(a)合肥市旅游地图(24 bit)



(b)基图 M_0 (24 bit)

图 2 合肥市旅游地图及初始聚类后的基图 M_0

1.2 噪声再聚类后的二值图像

利用基于噪声像素 p_{ij} 的 8 个方向外延特征 $r(p_{ij}) \in [1, 8]$ 的栅格地图噪声去除算法^[2], 可将 M_k 上位于道路中的主体噪声像素 ($r(p_{ij}) > 4$) 聚类为道路层白色 $p_{ij} \rightarrow C_{p_{ij}} \rightarrow C_R$, 位于区域中的主体噪声像素 ($r(p_{ij}) < 4$) 聚类为区域层橙色 $p_{ij} \rightarrow C_{p_{ij}} \rightarrow C_A$. 经过反复处理, 最后剩下 $r(p_{ij}) = 4$ 的噪声像素位于道路区域边缘, 将其聚类为道路层白色 $p_{ij} \rightarrow C_{p_{ij}} \rightarrow C_R$, 便可获得二值图像 $\bar{M}_k$. 图 3 是基图 M_0 及经过首次噪声再聚类后的二值图像 $\bar{M}_0$. 处理过程中导致 $\bar{M}_k$ 上出现的多余路段称为“过识别路段”, 如何消除它, 则成为提取准确道路网络的关键。

1.3 基于道路特征判别的过识别路段消除

本文采用的闭环反馈过识别路段消除算法^[3]的步骤如下。

步骤 1 噪声再聚类. 待处理图像 M_k (首次为 M_0) 经噪声再聚类生成二值图像 $\bar{M}_k (k=0, 1, \dots)$.

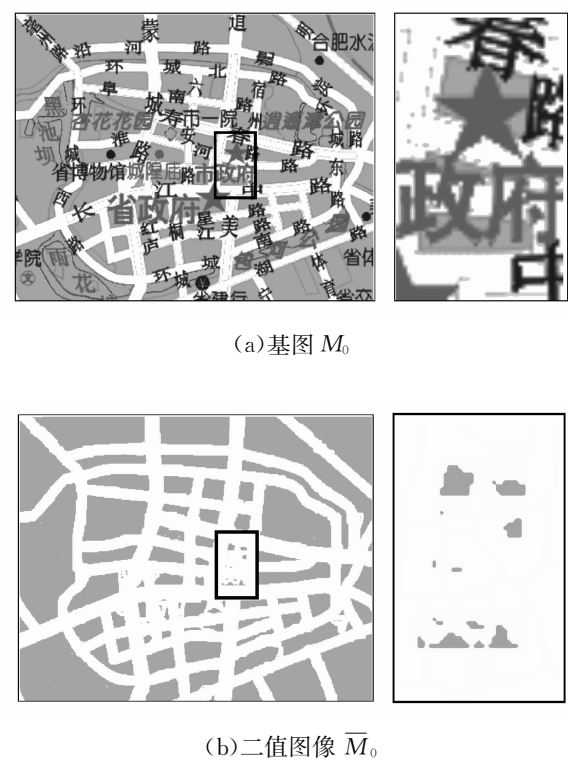


图 3 基图 M_0 及经过首次噪声再聚类后的二值图像 $\bar{M}_0$

步骤 2 过识别路段判定. 用骨架提取算法^[4]提取二值图像 $\bar{M}_k$, 得到道路中心线 $L = \{u_i | 1 \leq i \leq n\}$, 其中 u_i 表示道路中心线 L 的像素(见图 4 轮廓线). 将像素 u_i 与道路边的距离记为 z_s 或 z_m , 逐点检查, 找出 z_s 或 z_m 小于或等于半个路宽 $h = w/2$ (本文 $w = 6$) 的 u_i ($u_{w/2}$), 并把 u_i 及 $u_{w/2}$ 判定为过识别路段像素.

步骤 3 过识别路段消除. 将过识别路段像素全部聚类为区域层橙色 $p_{ij} \rightarrow C_{p_{ij}} \rightarrow C_A$, 以获得二值辅助图像 $\dot{M}_k$.

步骤 4 反馈处理与结果输出. 对于二值图像 $\bar{M}_k$, 若找不到过识别路段像素(等价于 $\dot{M}_k = \bar{M}_k$), 则输出道路识别结果 $\bar{M}_k$; 否则, 在二值辅助图像 $\dot{M}_k$ 上, 将已识别的道路层上的所有像素恢复为基图 M_0 的相应像素, 以获得待反馈处理的新图像 M_{k+1} (24 bit). 上转步骤 1.

以下以局部地图为例来说明处理过程. 初始聚类后的基图 M_0 见图 4a, 对 M_0 基于外延特征噪声去除而获得的二值图像 $\bar{M}_0$ 见图 4b, 对 $\bar{M}_0$ 进行过识别路段消除而获得的二值辅助图像 $\dot{M}_0$ 见图 4c, 在 $\dot{M}_0$ 上把道路层的所有像素恢复为基图 M_0 属性

而获得的新的待处理图像 M_1 见图 4d, 在首次反馈的初始时刻对 M_1 基于外延特征噪声去除而获得的 $\bar{M}_1$ 见图 4e, 在 $\bar{M}_1$ (对 $\bar{M}_1$ 基于道路特征判别的过识别路段消除处理后的结果 $\dot{M}_1$ 未画出) 上把道路层的所有像素恢复为基图 M_0 属性而获得的下一幅待处理的规范化地图 M_2 见图 4f, 再次反馈后对 M_2 基于外延特征噪声去除得到的 $\bar{M}_2$ 见图 4g. 对于 $\bar{M}_2$, 若找不到过识别路段像素, 则停止反馈处理, 并将道路中心线作为道路网络直接输出, 输出的矢量化结果如图 5 所示.

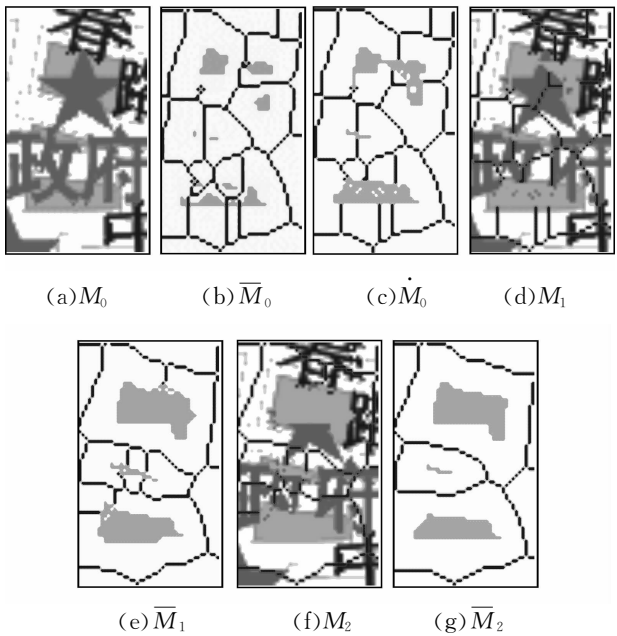


图 4 闭环反馈过识别路段消除过程中基图 M_0 、中间生成图像及道路层中心线的输出结果

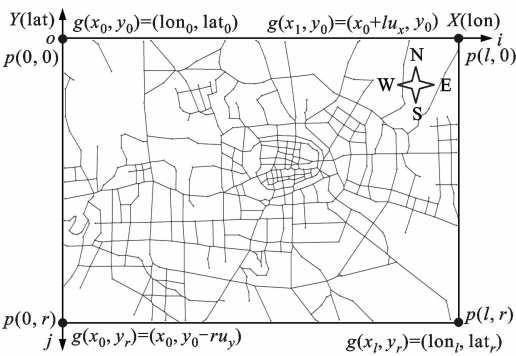


图 5 矢量地图节点坐标系 P 与矢量地图大地坐标系 G 下的道路网络直接输出结果

2 交通网络矢量化

2.1 矢量地图节点坐标系

数字地图的地理图形数据库是由有限的节点及

节点之间的拓扑连接构成的. 矢量节点坐标系定义为整数平面坐标系 $P=\{p(i, j)\}$, 其横轴 i 向右, 纵轴 j 向下, 坐标系中每一个点 $p_{ij}=p(i, j)$ 的位置坐标为 (i, j) . 对一幅宽 $l+1$ 像素、高 $r+1$ 像素的矢量地图, 将地图左上角置于原点 $p(0, 0)$, 则该地图幅面在矢量节点坐标系中的数学模型为

$$M=[p_{ij} \mid 0 \leq i \leq l, 0 \leq j \leq r] \quad (1)$$

图5为合肥交通网络矢量化后的交通矢量地图, 图宽为2 048像素, 高为1 386像素.

2.2 矢量地图大地坐标系

数字地图上各点的位置数据(经纬度)是以大地坐标系为基准的. 矢量地图节点坐标系与矢量地图大地坐标系 $G=\{g(x, y) \mid -\pi \leq x \leq \pi, -\pi/2 \leq y \leq \pi/2\}$ 之间的一一对应关系如下: 由矢量地图节点坐标系 P 的原点 $p(0, 0)$ 表示大地经纬度为 $g(\text{lon}_0, \text{lat}_0)$; 矢量地图节点坐标系 P 上的任意一点 $p(i, j)$ 与大地坐标 $g(x, y)$ (见图5)的坐标变换关系为

$$\begin{aligned} p(i, j) &\rightarrow g(x, y) = \\ g(\text{lon}_0 + i u_x, \text{lat}_0 - j u_y) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} g(x, y) &\rightarrow p(i, j) = \\ p[(x - \text{lon}_0) \mid u_x, (\text{lat}_0 - y) \mid u_y] \end{aligned} \quad (3)$$

式中: u_x 与 u_y 分别表示矢量地图东西与南北方向上的最小分辨率. 下面讨论中一律使用矢量地图大地坐标系, 这样较为直观、方便, 而实际操作时则对应矢量地图的节点数据.

2.3 矢量地图道路网络数据库

矢量地图图形由点(单元)、线(道路)和面(多边形)构成. 矢量图形数据库中对点、面位置的定义较为简单, 对线(道路)实体需要定义网络拓扑的数据结构, 包括节点(含坐标)、弧段、道路及其相互连接的关系, 相关内容如下.

(1)线(道路)节点集合 N_R 由线实体上所有的 $\bar{N}$ 个节点 n_i 的顺序集合构成, 即

$$N_R = \{n_i \mid i = 1, 2, \dots, \bar{N}\} \quad (4)$$

第 i 个线节点 n_i 在道路节点集合 N_R 的序号(ID) $I(n_i)=i$ 为正整数, $1 \leq i \leq \bar{N}$.

(2)弧段集合 S_R 由矢量地图上线实体中所有的 $\bar{n}_S$ 条弧段 s_k 的顺序集合构成, 即

$$S_R = \{s_k \mid k = 1, 2, \dots, \bar{n}_S\} \quad (5)$$

第 k 条弧段 s_k 由组成它的所有 $\bar{n}_{s_k}$ 个节点 $n_i^{s_k}$ 顺序构成, 以其序号 $I(n_i^{s_k})$ 存储, 其中

$$s_k = \{I(n_i^{s_k}) \mid n_i^{s_k} \in N_R, i = 1, 2, \dots, \bar{n}_{s_k}\} \quad (6)$$

式(6)隐含着节点 $n_i^{s_k}$ 之间的顺序连接关系. 弧段 s_k 首尾两个节点为大节点, 构成弧段 s_k 的两个终端, 弧段 s_k 中的所有中间节点必为小节点.

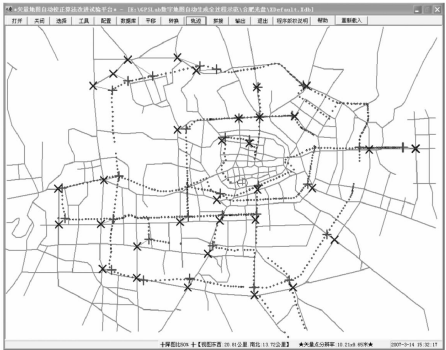
(3)道路集合 R_R 的结构与弧段集合类似.

3 数字地图精确拓扑校正

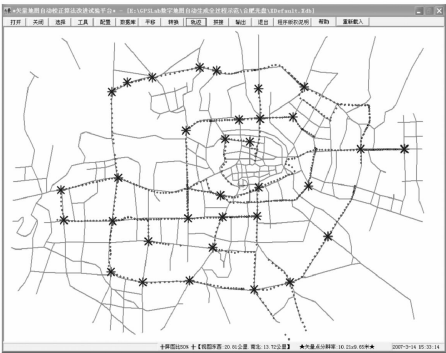
3.1 矢量地图拓扑校正问题的数学描述

动态离散拓扑校正前后的合肥城区交通矢量地图如图6所示, 待校正的交通矢量地图 M 见图6a, 校正结果见图6b. 设有 n 个采样点并记做 G_n , 用 $g_i=g(x_i, y_i)$ 表示第 i 个采样点 g_i 的当前经度为 x_i 、纬度为 y_i , 则

$$\begin{aligned} G_n &= \{g_1, g_2, \dots, g_n\} = \\ \{g(x_1, y_1), g(x_2, y_2), \dots, g(x_n, y_n)\} \end{aligned} \quad (7)$$



(a)校正前



(b)校正后

×:待校准的采样点集(34个点);+:采样点集的精确位置;
...:GPS道路轨迹

图6 动态离散拓扑校正前后的合肥城区交通矢量地图

采样点集 G_n 的精确位置记为 $\hat{G}_n$, 即

$$\begin{aligned} \hat{G}_n &= \{\hat{g}_1, \hat{g}_2, \dots, \hat{g}_n\} = \\ \{\hat{g}(\hat{x}_1, \hat{y}_1), \hat{g}(\hat{x}_2, \hat{y}_2), \dots, \hat{g}(\hat{x}_n, \hat{y}_n)\} \end{aligned} \quad (8)$$

式中: $\hat{g}_i=\hat{g}(\hat{x}_i, \hat{y}_i)$ 表示精确位置点 $\hat{g}_i$ 的经、纬度.

数字地图精确拓扑映射 $T(\cdot)$ 定义为: 在保持矢量地图拓扑结构的前提下, 采样点集 G_n 向精确

位置点集 $\hat{G}_n$ 映射,即

$$T(G_n) = T\{g_1, g_2, \dots, g_n\} = \hat{G}_n = \{\hat{g}_1, \hat{g}_2, \dots, \hat{g}_n\} \quad (9)$$

流行的矢量地图线性校正算法难以实现式(9)映射,由此本文提出了矢量地图的动态离散拓扑校正算法 $T(M)$,其在实现校正(式(9)映射)的同时,还能实现矢量地图所有节点的拓扑校正(见图 6b).

3.2 矢量地图动态离散拓扑校正框架

$T(\cdot)$ 可分解为 n 个子拓扑变换 $T_k(\cdot)$, $k=1, 2, \dots, n$, 则

$$T(M) = T_n(T_{n-1}(\dots T_k(\dots T_2(T_1(M))\dots)\dots)) \quad (10)$$

记第 k 次校正后的地图为 $\hat{M}_k = T_k(\hat{M}_{k-1})$, $\hat{M}_0 = M$ 为待校正矢量地图图源, $\hat{M} = \hat{M}_n$ 为校正结果, 则

$$T(M) = \hat{M}_n = T_n(\hat{M}_{n-1}) = T_n(T_{n-1}(\hat{M}_{n-2})) = T_n(T_{n-1}(\dots T_2(T_1(\hat{M}_0))\dots)) \quad (11)$$

子拓扑变换 $\hat{M}_k = T_k(\hat{M}_{k-1})$ 需要在 $\hat{M}_{k-1}$ 上实现单采样点 g_k 的精确校正, 此时已校正的采样点集为 $\hat{G}_{k-1} = \{\hat{g}_1, \hat{g}_2, \dots, \hat{g}_{k-1}\}$, 待校正点集为 $\bar{G}_k = \{g_k, g_{k+1}, \dots, g_n\}$.

第 k 次精确位置点集

$$\hat{G}_k = T_k(\hat{G}_{k-1}, g_k) =$$

$$[T_k(\hat{G}_{k-1}), T_k(g_k)] = [\hat{G}_{k-1}, \hat{g}_k] \quad (12)$$

为此需将 $\hat{M}_{k-1}$ 分解为离散块 A_k 及其补集(不变块)

$$A_k^c: \hat{M}_{k-1} = A_k \cup A_k^c, \hat{G}_{k-1} \subset A_k^c, \{g_k, \hat{g}_k\} \in A_k$$

$$T_k(\hat{M}_{k-1}) =$$

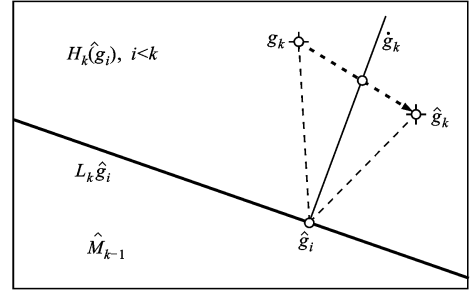
$$\begin{cases} T_k(A_k) = \hat{A}_k \\ \text{with } [g_k, \hat{g}_k] \in A_k, T_k(g_k) = \hat{g}_k \\ T_k(A_k^c) = A_k^c \\ \text{with } \hat{G}_{k-1} \in A_k^c, T_k(\hat{G}_{k-1}) = \hat{G}_{k-1} \end{cases} \quad (13)$$

该子拓扑变换 $T_k(\cdot)$ 在实现 $g_k \rightarrow \hat{g}_k$ 的同时, 保持了 $\hat{G}_{k-1}$ 不变. 子拓扑变换 $\hat{M}_k = T_k(\hat{M}_{k-1})$ 基于节点与采样点之间的拓扑距离, 对离散块 A_k 内的所有节点位置进行拓扑映射, 并把 A_k 内边界节点映射为自己, 可保证空间 $\hat{M}_k$ 上 $\hat{A}_k$ 与 A_k^c 无缝衔接.

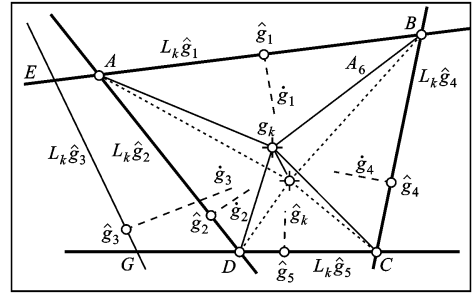
已校正的点集 $\hat{G}_{k-1}$ 不得再变动位置, 这样就限

制了 A_k 的范围. 单个已校正点 $\hat{g}_i$ 把 A_k 限制在如下的半平面内: 连接 $\hat{g}_i$ 和待校正点对 $g_k, \hat{g}_k$, 过 $\hat{g}_i$ 做角 $\angle g_k \hat{g}_i \hat{g}_k$ 平分线 $\hat{g}_i \hat{g}_k$ 的垂线 $L_k \hat{g}_i$, 这样把 $\hat{M}_{k-1}$ 划分为两半, 取 g_k 与 $\hat{g}_k$ 所在的半平面记为 $H_k(\hat{g}_i)$ (见图 7a), 则 $A_k \subset H_k(\hat{g}_i)$. 若子拓扑变换 $\hat{M}_k$ 已校正了 $k-1$ 个点 $\hat{G}_{k-1}$, 则 A_k 取为 $k-1$ 个半平面的交集(见图 7b), 即

$$A_k = \bigcap_{i=1}^{k-1} H_k(\hat{g}_i) \quad (14)$$



(a) 单一校正点 $\hat{g}_i$ 对 A_k 的边界限制



(b) 所有已校正点 $\hat{g}_i$ ($i < k$) 获得的 A_k

图 7 A_k 的确定过程示意图

3.3 离散非线性拓扑校正算法

离散非线性拓扑校正算法步骤如下.

步骤 1 $T_1(\hat{M}_0) = \hat{M}_1$: 地图平移使 $T_1(g_1) = \hat{g}_1$, 离散块 A_1 为全平面. 地图平面平移是实现 g_1 到 $\hat{g}_1$ 的移位, 地图上的所有矢量节点 h 均做相应的平移, 即

$$h(x, y) \rightarrow \hat{h}(x', y'): \begin{cases} x' = x + \hat{x}_1 - x_1 \\ y' = y + \hat{y}_1 - y_1 \end{cases} \quad (15)$$

步骤 2 $T_2(\hat{M}_1) = \hat{M}_2$: 地图平面绕 $\hat{g}_1$ 做一次旋转和放缩, 使 $T_2(g_2) = \hat{g}_2$. 离散块 A_2 为除固定点 $\hat{g}_1$ 以外的全平面. 地图平面绕 $\hat{g}_1$ 做一次旋转和缩放, 使点 g_2 移向精确位置 $\hat{g}_2$: $g_2 \rightarrow \hat{g}_2$, 地图上的所有矢量节点 h 均做相应的一次旋转和缩放, 即

$$\mathbf{h}(x, y) \rightarrow \hat{\mathbf{h}}(x', y'):$$

$$\begin{cases} \frac{y' - \hat{y}_1}{x' - \hat{x}_1} = \tan[\alpha + \arctan \frac{y - \hat{y}_1}{x - \hat{x}_1}] \\ \frac{((x' - \hat{x}_1)^2 + (y' - \hat{y}_1)^2)^{1/2}}{((x - \hat{x}_1)^2 + (y - \hat{y}_1)^2)^{1/2}} = \beta \end{cases} \quad (16)$$

式中:放大倍数 β 和逆时针旋转角度 α 分别为

$$\beta = \frac{|g_2 - \hat{g}_2|}{|g_2 - g_1|} = \frac{((\hat{x}_2 - \hat{x}_1)^2 + (\hat{y}_2 - \hat{y}_1)^2)^{1/2}}{((x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2)^{1/2}}$$

$$\alpha = \arctan \frac{\hat{y}_2 - \hat{y}_1}{\hat{x}_2 - \hat{x}_1} - \arctan \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

以上步骤 1、2 是地图两点定标用的仿射变换,本质上的离散非线性拓扑校正算法从步骤 3 开始。

步骤 3 $T_k(\hat{M}_{k-1}) = \hat{M}_k (k \geq 3)$. 离散块 A_k 可能为有限区域或无限区域^[5],下面分别讨论这 2 种情况。

(1) A_k 为有限区域. 此时 A_k 必为一凸 m 多边形 ($m < k$), g_k 与 $\hat{g}_k$ 位于 A_k 内. 连接第 k 个校正点 g_k (精确点 $\hat{g}_k$) 至 A_k 各顶点,将 A_k 分解成 m 个实线边三角形 $\triangle g_k L_k \hat{g}_{i_j}$ (虚线边三角形 $\triangle \hat{g}_k L_k \hat{g}_{i_j}$), 如图 7b 所示 ($k=6, m=4$), 即

$$A_k = A_k^{m\Delta} = \bigcup_{j=1}^m \triangle g_k L_k \hat{g}_{i_j} = \bigcup_{j=1}^m \triangle \hat{g}_k L_k \hat{g}_{i_j} \quad (17)$$

式中: $i_j \in \{1, 2, \dots, k-1\}; j=1, 2, \dots, m$.

$T_k(\cdot)$ 对 A_k 自身映射可视为 m 个相邻三角形 (非邻接边 $L_k \hat{g}_{i_j}$) 的三角映射 $T_k^\Delta(\cdot)$ 之和 (见图 7b), 即

$$T_k(A_k) = T_k(A_k^{m\Delta}) = T_k(\bigcup_{j=1}^m \triangle g_k L_k \hat{g}_{i_j}) = \bigcup_{j=1}^m T_k^\Delta(\triangle g_k L_k \hat{g}_{i_j}) = \bigcup_{j=1}^m \triangle \hat{g}_k L_k \hat{g}_{i_j} = \hat{A}_k = \hat{A}_k^{m\Delta} \quad (18)$$

式中: $T_k^\Delta(\cdot)$ 为三角形 (含边界) 上所有节点的映射, 即以三角形 $\triangle g_k AB$ 及其像空间 $\triangle \hat{g}_k AB$ (为表达方便起见, 将两三角形公共边 $L_k \hat{g}_{i_j}$ 记为 AB) 为例, 任意矢量节点 $\mathbf{h} \in \triangle g_k AB$ 可映射为 $T_k^\Delta(\mathbf{h}) = \hat{\mathbf{h}} \in \triangle \hat{g}_k AB$, 并位于线段 $\hat{g}_k p$ 上, 且满足

$$\frac{\overline{\hat{g}_k \hat{\mathbf{h}}}}{\overline{\hat{g}_k p}} = \frac{\overline{g_k \mathbf{h}}}{\overline{g_k p}} \quad (19)$$

式中: $\overline{\hat{g}_k \hat{\mathbf{h}}}$ 表示线段 $\hat{g}_k \hat{\mathbf{h}}$ 的长度; p 为 $g_k \mathbf{h}$ 的延长线与两三角形公共边 AB 的交点. $\triangle g_k AB$ 及其像空间 $\triangle \hat{g}_k AB$ 内部节点的映射关系如图 8 所示。

检查 $A \rightarrow \hat{A}_k, T_k^\Delta(\cdot)$ 具备 A_k 内相邻三角形边

界节点映射到 $\hat{A}_k$ 内的一致性, 也保证了像空间 $\hat{M}_k$ 上 $\hat{A}_k$ 与 A_k^c 的无缝衔接。

合肥城区矢量地图校正过程中的离散块 A_7 及 $\hat{M}_7 = T_7(\hat{M}_6)$ 的有限区域校正效果如图 9 所示。

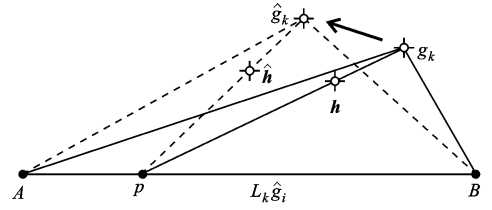
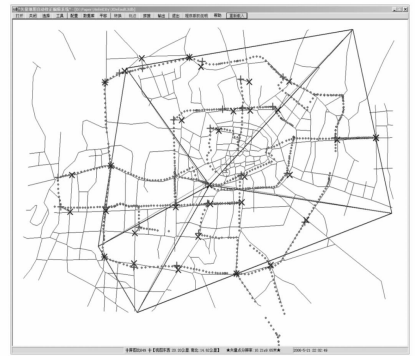
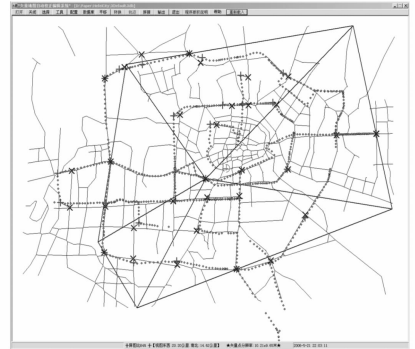


图 8 $\triangle g_k AB$ 及其像空间 $\triangle \hat{g}_k AB$ 内部节点的映射关系



(a) 离散块 A_7 (校正前)



(b) $\hat{M}_7 = T_7(\hat{M}_6)$ 的校正效果

图 9 合肥城区矢量地图校正过程 $\hat{M}_7 = T_7(\hat{M}_6)$ 示意图

(2) A_k 为无限区域. 此时 A_k 为无穷大半径的扇形或扩展扇形区域, 如图 10 所示. 无限区域离散块与有限区域离散块相比, 它们的相同之处是均含 $m-2$ 个对应的三角形对, 处理方法与有限区域相同, 即 $T_k(A_k^{(m-2)\Delta}) = T_k^\Delta(A_k^{(m-2)\Delta}) = \hat{A}_k^{(m-2)\Delta}$. 无限区域离散块比有限区域离散块多出了 3 块伸向无限远处的区域, 其中一块是顶点为 g_k (映射点 $\hat{g}_k$) 的扇形 $A_k^\vee$ (映射块 $\hat{A}_k^\vee$), $T_k(A_k^\vee) = T_k^\Delta(A_k^\vee) = \hat{A}_k^\vee$ 为 $A_k^\vee$ 平移至 $\hat{A}_k^\vee$, 另外两块是伸向无穷远处的长条形区

域 A_k^1, A_k^2 (映射块 $\hat{A}_k^1, \hat{A}_k^2$), 实际上可视为顶点在无穷远处的特殊三角形, 也可用三角映射 $T_k^\Delta(\cdot)$ 来处理. 对于无限区域离散块情况, $T_k(\hat{M}_{k-1}) = \hat{M}_k$ 由下式实现

$$\begin{aligned} T_k(A_k) &= T_k(A_k^{(m-2)\Delta} + A_k^1 + A_k^2 + A_k^\vee) = \\ &= T_k^\Delta(A_k^{(m-2)\Delta}) + T_k^\Delta(A_k^1) + T_k^\Delta(A_k^2) + \\ &= T_k^\Delta(A_k^\vee) = \hat{A}_k^{(m-2)\Delta} + \hat{A}_k^1 + \hat{A}_k^2 + \hat{A}_k^\vee \quad (20) \end{aligned}$$

合肥城区矢量地图中离散块 A_3 及 $\hat{M}_3 = T_3(\hat{M}_2)$ 的校正效果如图 11 所示.

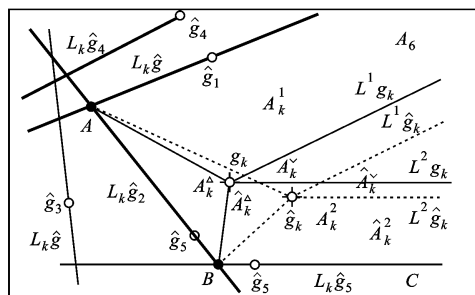
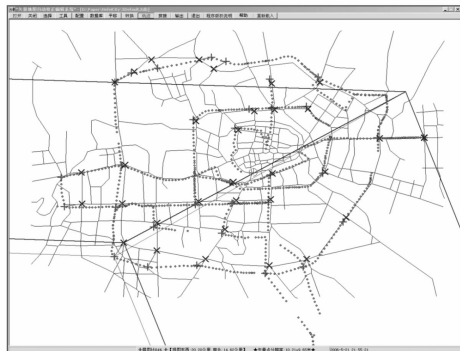
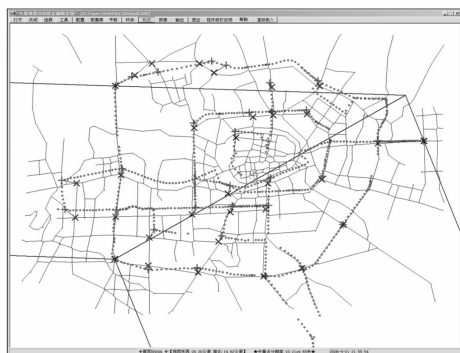


图 10 A_k 为无限区域



(a) 无限区域离散块 A_3 (校正前)



(b) $\hat{M}_3 = T_3(\hat{M}_2)$ 的校正效果

图 11 无限区域离散块 A_3 的校正过程 $\hat{M}_3 = T_3(\hat{M}_2)$

4 结 论

为了克服矢量地图线性校正中产生的误差, 本文提出了一种离散非线性校正算法. 该算法直接利用 GPS 车辆的道路行驶轨迹来产生采样校正点集, 由此省去了地图制图的测绘过程.

新的数字地图制图程序中使用了两项关键技术: ①在印刷地图道路层的识别抽取环节采用基于地图道路结构特征的闭环反馈控制进行了道路再聚类调整; ②在矢量地图精密校正环节采用矢量地图动态离散拓扑进行了校正, 在实现采样校准点精密校正的同时完成了区块节点的相关性校正.

免测绘型数字交通精确制图程序还包括了对地图地理单位属性数据库的添加及编辑, 从而实现了道路节点位置的自适应修正.

参考文献:

- [1] KO K F G. Introduction to digital cartography and mapping tools [EB/OL]. [2010-02-12]. <http://ezinearticles.com/?Introduction-to-Digital-Cartography-and-Mapping-tools&id=3746040>.
- [2] 季方, 鲍远律. 基于外延特征的地图噪声去除算法 [J]. 中国图像图形学报, 2004, 9(9): 1062-1068.
JI Fang, BAO Yuanlu. A method erasing noises on raster map based on extension character [J]. Journal of Image and Graphics, 2004, 9(9): 1062-1068.
- [3] 李洋, 张晓冬, 鲍远律. 交通地图图像中道路识别与道路信息提取 [J]. 北京交通大学学报, 2011, 35(2): 109-113.
LI Yang, ZHANG Xiaodong, BAO Yuanlu. Image recognition and road information extraction from traffic map [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2011, 35(2): 109-113.
- [4] 吕哲, 王福利, 常玉清, 等. 改进的形态学骨架提取算法 [J]. 计算机工程, 2009, 35(19): 23-25.
LÜ Zhe, WANG Fuli, CHANG Yuqing, et al. Improved morphological skeleton extra-ction algorithm [J]. Computer Engineering, 2009, 35(19): 23-25.
- [5] BAO Yuanlu, XU Hao, LIU Zhenan. Vector map geo-location using GPS tracks [C/CD]//GEOINFORMATICS 2007: Cartographic Theory and Models. Bellingham, WA, USA: SPIE, 2007: 675116.1.

(编辑 苗凌 武红江)