

数字地图合并的平差原理与方法

童小华^{1,2} 邓愔愔¹ 史文中³

(1 同济大学测量与国土信息工程系, 上海市四平路 1239 号, 200092)

(2 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

(3 香港理工大学土地测量与地理资讯学系, 香港九龙红)

摘要: 提出了一种基于最小二乘平差的数字地图合并方法, 采用平差原理以求得实体调整合并后的空间位置。实验表明, 与其他方法相比, 该方法具有较高的精度, 且较好地保持了原有实体的特征。

关键词: 地图合并; 数据融合; 最小二乘平差

中图法分类号: P283.7; P207.2

地图自动合并是在同名实体匹配的基础上建立两个或两个以上地图数据库之间的局部坐标转换关系, 从而获得图形和属性数据的融合, 实现同一地区不同来源地图数据库的集成。由于在匹配过程中存在各种不确定性, 以及地图比例尺、成图精度的影响, 使得图中某些实体的同名匹配实体无法确定, 因此在调整合并这一步, 不仅要调整匹配实体的位置, 还要利用匹配实体调整未匹配实体的位置。国内外已有部分学者对此进行了研究^[1-6]。对于城市地图, 图形实体大多为房屋及道路, 其边界顶点为明显地物点^[6, 7], 具有显著的特征(如直角或平行), 图形合并前后, 需严格保持原有形状。由此, 本文提出了一种基于平差原理的图形合并方法, 该方法不仅能较大程度地消除空间数据差异, 而且较好地保持了原有实体的特征。

1 数字地图图形调整合并平差方法

1.1 数字合并的平差原理

文献[8]提出了采用整体平差的方法进行矢量数据集的图形综合。将综合过程中需要满足的若干要求称作约束条件(constraint), 如简化约束、平滑约束、夸大约束、冲突移位约束等, 将图形综合看作是一个坐标移位的过程, 因而将构成图形的点的坐标调整值作为待求解的参数, 可得:

$$f(x_1, y_1, \dots, x_n, y_n) = c_{11} \cdot \Delta x_1 + c_{12} \cdot \Delta y_1 + \dots + c_{n1} \cdot \Delta x_n + c_{n2} \cdot \Delta y_n = \text{constraint}_k \quad (1)$$

式中, constraint_k 表示第 k 个约束值; $(\Delta x_i, \Delta y_i)$ 表示第 i 个点的坐标调整量; n 为总点数。在此将约束值 constraint_k 作为观测值, 由于并不能同时满足所有的约束条件, 观测值之间会有冲突, 因此引入余差 v , 可得:

$$Ax = l + v \quad (2)$$

式中, A 为系数阵; x 为参数向量; l 为常数向量。按照间接平差的最小二乘解法可得坐标调整量。

在本文的数字合并过程中, 同样存在各种约束。在进行了点匹配之后, “调整图”中同名点匹配成功的点(称为匹配点), 它们的几何位置调整可直接由“参照图”中相应的同名点来确定(加权平均或直接调整到对应点), 其他没有匹配到同名点的点称为未匹配点。对于城市地图数字合并, 至少需要满足如下两个要求: ①调整实体空间位置; ②保持实体原有的形状(如直角或平行)。因此, 可以根据这两种要求列出数字合并过程中的各种约束建立平差模型, 按最小二乘法来处理。

1.2 数字合并的平差模型

将同一地区不同来源的图形分为“调整图”与“参照图”, “调整图”中实体的空间位置需要根据“参照图”来调整。设“调整图”中点坐标为 $(x_i, y_i) (i = 1, 2, \dots, n)$, “参照图”中点坐标为 (x'_i, y'_i)

($i = 1, 2, \dots, n$)。将点移动后的位置坐标 (\hat{x}_i, \hat{y}_i) 作为平差值, 设其近似值为 (x_i^0, y_i^0), 则有:

$$\hat{x}_i = x_i^0 + \Delta x_i, \hat{y}_i = y_i^0 + \Delta y_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

式中, ($\Delta x_i, \Delta y_i$) 为坐标平移量, 是待求解的参数, 即平差值改正数。

1.2.1 坐标移位方程

“调整图”中的点应移至“参照图”中相应点的位置, 因此, 将“参照图”中相应的点坐标 (x'_i, y'_i) ($i = 1, 2, \dots, n$) 视为观测值, 可得误差方程:

$$v_{x'_i} = \Delta x_i - l_{x'_i}, v_{y'_i} = \Delta y_i - l_{y'_i} \quad (4)$$

式中, $l_{x'_i} = x'_i - x_i^0, l_{y'_i} = y'_i - y_i^0$ 。

坐标移位约束误差方程的个数即为 2 倍的匹配点个数。

1.2.2 形状方程

为使坐标调整的同时保持实体的原有形状, 需对待调整实体进行形状约束, 如保持实体边界点的拐角值, 在此采用文献[9, 10]提出的角度模型。设 i, j, k 三点构成一个特定的已知角值 β_i , 将 β_i 视为观测值, 可得误差方程:

$$v_{\beta_i} = \alpha_k \Delta x_k + b_k \Delta y_k - (\alpha_k - \alpha_j) \Delta x_i - (b_k - b_j) \Delta y_i - \alpha_j \Delta x_j - b_j \Delta y_j - l_{\beta_i} \quad (5)$$

式中, 各参数的涵义和计算参见文献[9, 10]。其中, α_k, α_j 分别为 ik, ij 方向的方位角, 由坐标平差值的近似值计算得到。可知, 当 $\beta_i = \pi/2$ (或 $3\pi/2$) 时为直角条件; $\beta_i = \pi$ 时为直线条件。

1.2.3 相对位移方程

由于未匹配点不能确定其对应点的坐标值, 需要使用相对位移约束, 即该点与相邻点的相对位移量为 0, 该条件可以使实体的内部几何结构保持不变, 则有:

$$v_{x_i} = \Delta x_i - \Delta x_{i+1}, v_{y_i} = \Delta y_i - \Delta y_{i+1} \quad (6)$$

该式只针对未匹配点, 因此相对移位约束方程的个数只与未匹配点及其相邻点个数有关。

1.2.4 其他方程

1) 面积方程

城市地图中的地块或房屋有时需要保持原有的面积, 由此可得误差方程:

$$v_s = \sum_{i=1}^n a_i \Delta x_i + \sum_{i=1}^n b_i \Delta y_i - l_s \quad (7)$$

式中, $a_i = 0.5(y_{i+1}^0 - y_{i-1}^0); b_i = 0.5(x_{i-1}^0 - x_{i+1}^0); l_s = S - 0.5 \sum_{i=1}^n x_i^0 (y_{i-1}^0 - y_{i+1}^0); S$ 由“调整图”中的实体坐标计算而得。

2) 平行线方程

道路两条边线需要保持平行关系, 对于两平

行线 ij 与 kl , 可得误差方程:

$$v_{par} = a_{ij} \Delta x_j + b_j \Delta y_j - a_j \Delta x_i - a_{kl} \Delta x_l - b_{kl} \Delta y_l + a_{kl} \Delta x_k + b_{kl} \Delta y_k - l_{par} \quad (8)$$

式中, $a_j = -\sin \alpha_j \setminus s_j; b_j = \cos \alpha_j \setminus s_j; a_{kl} = -\sin \alpha_{kl} \setminus s_{kl}; b_{kl} = \cos \alpha_{kl} \setminus s_{kl}; l_{par} = \alpha_{kl} - \alpha_j; \alpha_{kl}, \alpha_j$ 分别为 kl, ij 方向的方位角, 由坐标平差值的近似值计算得到。

3) 线段长度方程

若线状地物需要保持线段长度, 可得误差方程:

$$v_{leng} = -a_j \Delta x_i + b_j \Delta y_i + a_{ij} \Delta x_j - b_{ij} \Delta y_j - l_{leng} \quad (9)$$

其中, $a_{ij} = \cos \alpha_j; b_{ij} = -\sin \alpha_j;$

$$l_{leng} = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} - \sqrt{(x_{i+1}^0 - x_i^0)^2 + (y_{i+1}^0 - y_i^0)^2}$$

线段长度由“调整图”中的实体坐标计算而得; α_j 由坐标平差值的近似值计算得到。

4) 邻近实体距离方程

匹配时, 有些独立的线或面实体未找到对应实体, 这种情况一般是原图中没有而新图中新增添了实体, 变换时, 应根据该独立实体与邻近实体的关系进行坐标移位, 一般使用邻近实体与该独立实体的距离作为约束。首先对面实体边界或线实体逐点计算两实体之间的最短距离, 这个距离可能是点与点之间的距离, 也可能是点与线之间的距离。点与点距离的误差方程同式(9), 点与线的距离的误差方程为^[8]:

$$h_k(\hat{x}_i, \hat{y}_i, \hat{x}_j, \hat{y}_j, \hat{x}_{j+1}, \hat{y}_{j+1}) = |a \cdot \hat{x}_i + b \cdot \hat{y}_i + c| / \sqrt{a^2 + b^2} = D_{point-line} + v_{dist} \quad (10)$$

式中, a, b, c 为直线方程的系数, 由 (x_j^0, y_j^0)、(x_{j+1}^0, y_{j+1}^0) 两点确定; 点 (x_i^0, y_i^0) 到直线的距离 $D_{point-line}$ 由“调整图”中的坐标计算而得, 线性化可得误差方程:

$$v_{dist} = \left[\frac{\partial h_k}{\partial \hat{x}_i} \right]_{x_i^0} \Delta x_i + \left[\frac{\partial h_k}{\partial \hat{y}_i} \right]_{y_i^0} \Delta y_i + \left[\frac{\partial h_k}{\partial \hat{x}_j} \right]_{x_j^0} \Delta x_j + \left[\frac{\partial h_k}{\partial \hat{y}_j} \right]_{y_j^0} \Delta y_j + \left[\frac{\partial h_k}{\partial \hat{x}_{j+1}} \right]_{x_{j+1}^0} \Delta x_{j+1} + \left[\frac{\partial h_k}{\partial \hat{y}_{j+1}} \right]_{y_{j+1}^0} \Delta y_{j+1} - l_{dist} \quad (11)$$

式中, $l_{dist} = D_{point-line} - h_k(x_i^0, y_i^0, x_j^0, y_j^0, x_{j+1}^0, y_{j+1}^0)$ 。

1.2.5 各类观测值权的确定

上述各类方程(观测值)不同, 需要确定这些方程的权, 定权的方法主要有经验法、机器学习方法、约束违反定权及方差分量估计定权^[11]。本文

采用了约束违反定权法。约束违反定权法需要预先设定各类方程允许违反的阈值, 其中违反阈值由数字地图的精度确定。通过多次实验, 表 1 为本文设定的违反阈值。

表 1 违反阈值

Tab. 1 Allowed Violation

	违反阈值
坐标移位约束	0.01 m
形状约束	0.000 005 rad
相对位移约束	0.05 m

1.2.6 误差方程解算

联立各种方程, 即为间接平差问题。其一般模型为:

$$v = Ax - l \tag{12}$$

式中, 各参数意义同式(2), 其中, $x = (\Delta x_1 \ \Delta y_1 \ \dots \ \Delta x_n \ \Delta y_n)^T$; $l = (l_1 \ l_2 \ \dots \ l_k)^T$ 。解方程可得:

$$x = (A^T PA)^{-1} \cdot A^T Pl \tag{13}$$

将求得的参数 x 代入误差方程, 即得余差 v 及平差值 (\hat{x}_i, \hat{y}_i) , 坐标平差值即为点移动后的坐标。对于一对多匹配, 采取对该点对应的每一个匹配点分别列误差方程进行解算, 如“调整图”中的一点与“参照图”中的两个点匹配, 对“调整图”中的点列误差方程时, 应有两个 X 坐标移位方程和两个 Y 坐标移位方程, 参数系数相同, 差别在于观测值不同。

1.2.7 精度评定

单位权中误差的计算公式为:

$$\sigma_0 = \pm \sqrt{V^T PV} / (n - t) \tag{14}$$

其中, n 为方程式个数; t 为参数个数。

平差值的权逆阵计算公式为:

$$Q_{xx} = (A^T PA)^{-1} = N_A^{-1} \tag{15}$$

则平差值的中误差为 $\sigma_{\hat{x}_i} = \pm \sigma_0 \sqrt{Q_{\hat{x}_i \hat{x}_i}}$, 其中,

表 2 平差结果与精度估计

Tab. 2 Results of Adjustment and Precision Estimation

点号	原坐标/m		平差值/m		角度/(°)	平差值中误差/m		
	X	Y	X	Y		M_x	M_y	M_p
1	3 733.806 3	5 502.973 2	3 733.581 2	5 502.919 0	90	0.047 5	0.042 0	0.063 1
2	3 732.613 0	5 500.244 0	3 732.260 5	5 500.114 2	270	0.050 0	0.060 6	0.078 6
3	3 747.673 1	5 493.157 9	3 747.524 9	5 492.926 5	90	0.040 9	0.048 6	0.063 5
4	3 745.730 9	5 489.043 8	3 745.580 9	5 488.798 0	90	0.041 5	0.047 4	0.063 0
5	3 740.370 0	5 491.584 0	3 740.109 6	5 491.374 3	270	0.073 7	0.056 4	0.092 8
6	3 739.612 0	5 489.970 0	3 739.372 2	5 489.808 1	90	0.078 1	0.078 6	0.110 8
7	3 730.127 0	5 494.444 0	3 729.754 3	5 494.337 0	270	0.079 3	0.074 1	0.108 5
8	3 718.937 1	5 470.728 8	3 718.607 2	5 470.664 2	90	0.050 3	0.041 0	0.064 9
9	3 712.170 8	5 473.924 0	3 711.908 8	5 473.818 4	90	0.047 7	0.043 0	0.064 2
10	3 720.628 7	5 491.925 7	3 720.316 2	5 491.673 1	270	0.058 4	0.058 7	0.082 8
11	3 713.883 3	5 495.079 2	3 713.729 4	5 494.774 7	90	0.041 5	0.048 0	0.063 5
12	3 716.953 2	5 501.448 7	3 716.756 3	5 501.202 9	90	0.042 1	0.047 4	0.063 4
13	3 723.656 8	5 498.357 9	3 723.144 1	5 498.195 0	270	0.054 4	0.049 4	0.073 5
14	3 727.165 3	5 506.147 5	3 727.165 3	5 506.147 5	90	0.048 2	0.041 5	0.063 6

$Q_{\hat{x}_i}$ 为 Q_{xx} 矩阵的主元。该值反映了两幅图的接近程度。

2 基于平差原理的图形调整合并实验

2.1 实验与结果分析

本文使用 GIS 控件 MapObject 建立了一个用于地图数据合并的实验系统, 并选取同一实体的两幅图进行实验。一幅图是在 GIS 软件 Arcview 中对光栅图进行矢量化, 光栅图来自该区域的航摄相片; 另一幅图是由实地测量成图的地籍图。这两幅图分处于两个图层, 图 1 显示了该算例, 其中细实线表示的图层为实测图, 点线表示的图层为光栅矢量化图。因为实测图精度较高, 并且数据较新, 因此以光栅矢量化图为调整图, 以实测图为参照图进行调整。匹配结果如图 2 所示, 短粗实线表示点的匹配关系。本文采用距离测度以及蜘蛛编码进行匹配^[1,2], 一些同名点对之间的距离在距离阈值之内, 并且有相似的蜘蛛编码, 因此确定了同名匹配点, 以短粗实线相连, 另外一些点对之间的距离超出了阈值, 因此未找到匹配点。

联立式(4)~式(11)进行平差计算, 结果如图 2 所示, 阴影区域表示平差调整后的结果。可以看出, 匹配点调整后的位置基本在同名点上, 而未匹配点调整后的位置也与目标位置较为接近。表 2 是平差方法调整后图形实体的原坐标值、坐标平差值、角度值及平差精度。表中数据为图 1、图 2 中所示实体的顶点, 其中 2、5、6、7、10、13 点为未匹配点, 其余为匹配点。计算此时各点的拐角, 角度误差均小于 3''。因此, 该方法可以满足提出的图形合并的两个基本要求。

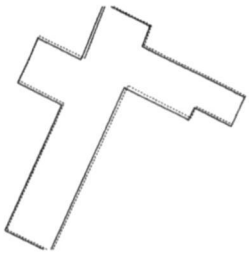


图1 实验算例
Fig.1 Original
Datasets



图2 基于平差的图
形调整合并结果
Fig.2 Results of Map Conflation

2.2 平差方法与已有调整合并算法的结果比较
坐标调整后,与相应同名点之间的接近程度
可以用距离中误差来衡量,其计算公式为^[9]:

$$m = \pm \sqrt{\frac{[\Delta_x \Delta_x]}{2n} + \frac{[\Delta_y \Delta_y]}{2n}} = \pm \sqrt{\frac{[dd]}{2n}} \quad (16)$$

式中, n 为同名点对数; (Δ_x, Δ_y) 为坐标平移后同名点之间在 x 及 y 方向的坐标差; d 为同名点对的距离。同名点对数应包括匹配点个数与未匹配点个数,因此在匹配及调整变换后,系统采用人工判读未匹配的同名点,并做上标记,然后再计算这些同名点对的点位中误差。分别用上述三种方法进行坐标变换,距离中误差的计算结果如表3所示。

表3 空间位置调整变换比较(三种方法)

Tab.3 Comparison of Distance Precision Based on Three Algorithms

	自动匹配 点对数	人工判读同 名点对数	距离中 误差/m	平均角 度差/rad
三角网剖分变换	8	6	0.124 0	0.011 5
基于拓扑关系的变换	8	6	0.106 1	0.006 4
基于平差的变换	8	6	0.059 0	0.001 6

由表3可知,在坐标变换方面,基于平差的方法效果是最好的,基于拓扑关系的方法次之,平差方法能使未匹配点移动到与目标点相差无几的位置,而三角网剖分变换的方法会使未匹配点在移动后仍与目标位置有较大的距离。调整变换前后,实体形状保持的程度可由各点变换前后转折角之差的绝对值的平均值来衡量,称为平均角度差。对三种方法的计算结果如表3所示,其共有点数均为14点。可见,在保持实体形状方面,前两种方法均会引起变形,尤其是未匹配点在一般情况下不能保持直角形状,并且有较大偏差,而基于平差的方法能够精确地保持房屋拐角点的直角形状。

3 实际算例

将本文提出的方法应用于上海某区的地籍图和地形图,如图3所示,点线代表地籍图(调整图),细实线代表地形图(参照图),图中实体全部为房屋,属于面状实体,地籍图需要依据地形图调整其坐标。首先进行点匹配,匹配点必须具有相同的结构(度及蜘蛛编码),距离阈值在此使用的是0.15 m,匹配结果如图4所示,调整图中的点为118个,参照图中的点为248个,匹配点个数为97个,然后进行点的变换。使用本文提出的最小二乘平差的数字合并方法得到的结果如图5所示(阴影部分为合并变换后的结果),计算出的距离中误差为0.048 6 m,平均角度差接近于0。平差结果显示,该方法在调整实体几何位置的同时能较好地保持原图形状。

4 结语

地图数字合并是消除同一地区不同来源地图

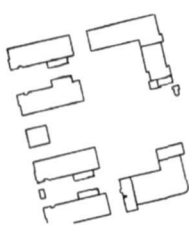


图3 上海某区地籍图与地形图的叠合图
Fig.3 Overlaying Two Maps

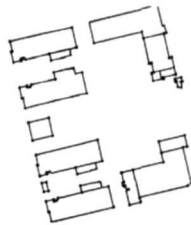


图4 地籍图与地形图的匹配图
Fig.4 Results of Map Matching



图5 地籍图与地形图的合并变换图
Fig.5 Results of Location Transformation

数据之间的空间、属性差异,以获得满足某种要求的新的数据库的技术。在对不同来源城市地图数据库合并时,根据城市地图的特点,不仅需要调整变换图形实体的位置,还需要精确保持实体的某

些特性。为了使这两步能同时进行,本文提出了一种基于最小二乘平差的数字合并算法,该方法采用了间接平差模型,能够使调整后的点较大幅度地接近目标点位,基本消除了不同图形之间空

间数据的差异, 并且精确地保持了实体原有的特征。

参 考 文 献

- [1] Saalfeld A. Automated Map Conflation[D]. Washington D C: University of Maryland, 1993
- [2] Saalfeld A. Conflation: Automated Map Compilation[J]. International Journal of Geographical Information Systems, 1988, 2(3): 217-218
- [3] Kang H. Analytical Conflation of Spatial Data from Municipal and Federal Government Agencies [D]. Ohio State: Ohio State University, 2002
- [4] Filin S, Doytsher Y. A Linear Mapping Approach to Map Conflation: Matching of Polylines[J]. Surveying and Land Information Systems, 1999, 59(2): 107-114
- [5] Filin S, Doytsher Y. A Linear Conflation Approach for the Integration of Photogrammetric Information and GIS Data[J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2000, 33(B3/1): 282-288
- [6] 张桥平. 地图数据库实体匹配与合并技术研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2002
- [7] 李德仁, 龚健雅, 张桥平. 论地图数据库合并技术[J]. 测绘科学, 2004, 29(1): 1-4
- [8] Harrie L. Simultaneous Graphic Generalization of Vector Data Sets[D]. Sweden: Lund University, 2002
- [9] 刘大杰, 史文中, 童小华, 等. GIS 空间数据的精度分析与质量控制[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1999
- [10] Tong Xiaohua, Shi Wenzhong, Liu Dajie. A Least Squares-Based Method for Adjusting the Boundaries of Area Objects[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2005, 71(2): 189-195
- [11] Harrie L. Weight Setting and Quality Assessment in Simultaneous Graphic Generalization[J]. The Cartography Journal, 2003, 40(3): 221-233

第一作者简介: 童小华, 教授, 博士, 博士后, 博士生导师。现主要从事遥感和 GIS 数据不确定性处理与质量控制研究。

E-mail: tongxhtj@yeah.net

A New Least Squares Adjustment Method for Map Conflation

TONG Xiaohua^{1,2} DENG Susu¹ SHI Wenzhong³

(1 Department of Surveying and Geoinformatics, Tongji University, 1239 Siping Road, Shanghai 200092, China)

(2 State Key Laboratory for Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(3 Department of Land Surveying and Geoinformatics, The Hong Kong Polytechnic University, Kowloon, Hong Kong, China)

Abstract: A new approach for map conflation based on least squares adjustment is presented. The constraints in map conflation are first derived, and the coordinates displacements of the conflated objects are then obtained by iterative adjustment computation. The results of the map conflation test show that the proposed method has a high precision and better ability to maintain the characteristics of the conflated objects compared with the exist methods.

Key words: map conflation; data fusion; least squares adjustment

About the first author: TONG Xiaohua, professor, Ph.D, post doctor, Ph.D supervisor. He is mainly engaged in uncertainty processing and quality control for remote sensing and GIS.

E-mail: tongxhtj@yeah.net