

文章编号: 1007-4619(2004)02-0143-07

基于空间插值的影像纠正精度的空间可视化表达

刘 春^{1,2} 史文中² 朱述龙³

(1. 同济大学 测量与国土信息工程系, 上海 200092;

2. 香港理工大学 土地测量与地理资讯学系, 地球资讯科技研究中心, 香港;

3. 郑州测绘学院 遥感信息工程系, 河南 郑州 450052)

摘 要: 现有影像纠正精度以控制点精度评定为基础, 对于精度探讨采用可视化技术从整体上进行表达。以相似变换作为影像纠正的基本模型, 推导了纠正后任意点精度与控制点精度的关系, 并基于此选择采用距离倒数乘方法作为空间插值方法, 插值影像纠正后任意点不同方向上的以及点位的精度。在此基础上, 采用精度可视化的概念对影像纠正的质量加以描述, 通过一个加密前后影像纠正的实例说明其应用的方法, 并获得了一些有益的结论。

关键词: 空间插值; 影像纠正; 精度; 空间可视化

中图分类号: TP751.1 **文献标识码:** A

1 引 言

地理信息系统(GIS)应用中, 航空影像作为数据采集的来源已为人们所重视。然而基于量测的影像处理中, 由于像片倾斜和地形起伏引起的影像变形, 需对影像进行几何纠正。目前影像的几何纠正多采用的是数字纠正。所谓的数字纠正是在遥感影像和投影参考系统中分别选择一定数量的对应点, 利用这些对应点作为控制点建立遥感影像与影像投影参考系统之间的严格的数学方程式, 对影像进行纠正。一般情况下, 控制点参考系的坐标是在对应的地形图上进行提取的, 这一方面能保证控制点位置的精度, 另一方面也能充分考虑到地形本身的特征。此外在影像纠正过程中, 除了影像的几何纠正外, 对于包括复杂地形的影像, 常常采用 DEM(数字高程模型)对影像进行正射纠正, 由于正射纠正是影像纠正中研究的一个主要问题, 本文对此暂不做具体分析。一般情况下, 选择影像上的多个控制点, 采用不同的数学模型对影像几何纠正, 纠正的质量以这些控制点纠正前后的差作为衡量指标。这种影像纠正精度评定的方法对于判断纠正质量的好坏起了很大的作用, 所以也被广泛的使用。但缺陷在于只是在统计概念上表达了影像纠正的质量, 而随着数字可视化技术的发展, 能

够采用更好的可视化方法对影像纠正的质量进行描述, 并且理解和指导纠正控制点或纠正方法的选取则对于影像纠正质量的精度评定更有意义。本文便基于这个思想对这个问题加以讨论。

由于在很多情况下, 影像是城市的中心区域, 这些影像的几何变形大多受地形的影响比较小, 本文主要侧重于几何纠正精度的可视化表达, 围绕影响的几何纠正加以考虑。在现有基于控制点精度评定的基础上, 提出的精度可视化的概念可以对整个纠正区域的纠正质量进行更细化的描述。这里精度可视化的表达形式主要有精度等值线、精度灰度图以及精度的三维视图表示等。而可视化的生成是基于空间插值的方法来得到, 这种空间插值方法的可行性, 又是通过理论上的推导加以证明的。通过精度可视化可以发现影响纠正质量的因素以及精度的分布规律。

2 影像几何纠正及精度分析

对于航空像片对, 由于像片对具有同名像控点, 所以可以通过透视的几何关系建立共线方程进行纠正, 并能得到很高的纠正精度。而对于单张平面影像的纠正则一般通过选取影像上的控制点, 采用坐标转换的方法求定转换参数, 并根据这些转换参数来获取其它点的新的坐标, 以达到坐标纠正的目的。

收稿日期: 2002-11-01; 修订日期: 2003-02-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(项目编号: 40171078)、香港特别行政区资助局项目(项目编号: 3-ZB40)和香港理工大学项目(项目编号: 1.34.9709)资助。

作者简介: 刘 春(1973—), 男, 讲师, 2000年12月获同济大学大地测量与测量工程博士学位, 主要研究方向为 GIS 空间数据不确定性理论、GIS 基础理论研究和应用系统开发, 已发表论文 40 余篇。E-mail: liuchun@mail.tongji.edu.cn

常用的图形几何纠正的方法有很多,如相似变换法、仿射变换法以及多项式拟合法等多种。图形几何纠正的质量一方面与纠正的算法有关,另一方面则与控制点的选取有关。对于纠正的质量常用的是以控制点坐标转换的误差来衡量。这里以相似变换的纠正算法为例来讨论。

2.1 影像相似变换纠正

设有 n 个控制点在新坐标系中的坐标为 (x_k, y_k) , 纠正前的坐标为 (ξ_k, η_k) ($k=1, 2, \dots, n$), 以相似变换为纠正算法有:

$$\begin{cases} x_k = T_x + \mu \cos \alpha \xi_k - \mu \sin \alpha \eta_k \\ y_k = T_y + \mu \sin \alpha \xi_k + \mu \cos \alpha \eta_k \end{cases} \quad (1)$$

$$\lambda = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ a \\ b \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \xi_1 & -\eta_1 \\ 0 & 1 & \eta_1 & \xi_1 \\ 1 & 0 & \xi_2 & -\eta_2 \\ 0 & 1 & \eta_2 & \xi_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 0 & \xi_n & -\eta_n \\ 0 & 1 & \eta_n & \xi_n \end{bmatrix}, L = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ x_2 \\ y_2 \\ \dots \\ x_n \\ y_n \end{bmatrix}, v = \begin{bmatrix} v_{x_1} \\ v_{y_1} \\ v_{x_2} \\ v_{y_2} \\ \dots \\ v_{y_n} \\ v_{y_p} \end{bmatrix} \quad (5)$$

根据最小二乘法, 转换参数可解得:

$$\lambda = (A^T A)^{-1} A^T L \quad (6)$$

2.2 控制点精度评定

一般情况下, 影响纠正的质量可以通过控制点纠正在 x 和 y 方向上的单位权中误差 S_x 和 S_y , 以及控制点纠正的精度 v 来衡量, 数学表达为:

$$v = A\lambda - L, S_x = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n v_{x_k} v_{x_k}}{n-2}}, S_y = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n v_{y_k} v_{y_k}}{n-2}} \quad (7)$$

则对于一个控制点 (x_k, y_k) , 其 x 方向和 y 方向

$$Q_{\lambda\lambda} = (A^T A)^{-1} = \frac{1}{P} \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^n (\xi_k^2 + \eta_k^2) & 0 & -\sum_{k=1}^n \xi_k & \sum_{k=1}^n \eta_k \\ 0 & \sum_{k=1}^n (\xi_k^2 + \eta_k^2) & -\sum_{k=1}^n \eta_k & -\sum_{k=1}^n \xi_k \\ -\sum_{k=1}^n \xi_k & -\sum_{k=1}^n \eta_k & n & 0 \\ \sum_{k=1}^n \eta_k & \sum_{k=1}^n \xi_k & 0 & n \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中 T_x, T_y 为平移参数, μ 为尺度参数, α 为旋转参数, 令

$$a = \mu \cos \alpha \quad b = \mu \sin \alpha \quad (2)$$

则(1)式为

$$\begin{bmatrix} x_k \\ y_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \xi_k & -\eta_k \\ 0 & 1 & \eta_k & \xi_k \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ a \\ b \end{bmatrix} \quad (3)$$

对于有 n 个控制点, 则有纠正的误差方程

$$A\lambda = L + v \quad (4)$$

式中有

上纠正的精度, 以及点位纠正的精度为

$$R_{x_k} = v_{x_k} \quad R_{y_k} = v_{y_k} \quad R_k = \sqrt{R_{x_k}^2 + R_{y_k}^2} \quad (8)$$

纠正的单位权中误差以及每个控制点的改正精度是常用的确定纠正质量的指标, 但采用这种方法只能是通过控制点从统计意义上表达出纠正的质量, 对于整个影像区域纠正质量的好坏以及空间分布很难给予直观的描述。而这正是下面要讨论和解决的内容。

2.3 任意点精度与控制点精度的关系

根据最小二乘原理, 转换参数阵 λ 求解的方差与协方差阵为^[1]

式中, $P = n \sum_{k=1}^n (\xi_k^2 + \eta_k^2) - [(\sum_{k=1}^n \xi_k)^2 + (\sum_{k=1}^n \eta_k)^2]$

一般情况下,所有控制点的选取在同一精度下的参考系统中提取的,所以在最小二乘的求解中,不存在权重的差异,因此(9)式的结果可以直接被采

$$\begin{bmatrix} q_{x_i x_i} & q_{x_i y_i} \\ q_{y_i x_i} & q_{y_i y_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \tilde{x}_i & -\tilde{y}_i \\ 0 & 1 & \tilde{y}_i & \tilde{x}_i \end{bmatrix} \cdot Q_{\lambda\lambda} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & \tilde{x}_i & -\tilde{y}_i \\ 0 & 1 & \tilde{y}_i & \tilde{x}_i \end{bmatrix}^T$$

$$= \frac{1}{P} \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^n (\xi_k^2 + \eta_k^2) - 2\tilde{x}_i \sum_{k=1}^n \xi_k - 2\tilde{y}_i \sum_{k=1}^n \eta_k + n\tilde{x}_i^2 + n\tilde{y}_i^2 & 0 \\ 0 & \sum_{k=1}^n (\xi_k^2 + \eta_k^2) - 2\tilde{x}_i \sum_{k=1}^n \xi_k - 2\tilde{y}_i \sum_{k=1}^n \eta_k + n\tilde{x}_i^2 + n\tilde{y}_i^2 \end{bmatrix}$$

$$= \frac{1}{P} \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^n (\tilde{x}_i - \xi_k)^2 + \sum_{k=1}^n (\tilde{y}_i - \eta_k)^2 & 0 \\ 0 & \sum_{k=1}^n (\tilde{x}_i - \xi_k)^2 + \sum_{k=1}^n (\tilde{y}_i - \eta_k)^2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

所以有

$$q_{x_i x_i} = \frac{1}{P} \sum_{k=1}^n (\tilde{x}_i - \xi_k)^2 + \sum_{k=1}^n (\tilde{y}_i - \eta_k)^2,$$

$$q_{y_i y_i} = \frac{1}{P} \sum_{k=1}^n (\tilde{x}_i - \xi_k)^2 + \sum_{k=1}^n (\tilde{y}_i - \eta_k)^2, q_{x_i y_i} = 0$$

(12)

则

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{x_i}^2 &= \frac{\sum_{k=1}^n v_{x_k} v_{x_k}}{n-2} \cdot \frac{1}{P} \left[\sum_{k=1}^n (\tilde{x}_i - \xi_k)^2 + \sum_{k=1}^n (\tilde{y}_i - \eta_k)^2 \right] \\ \sigma_{y_i}^2 &= \frac{\sum_{k=1}^n v_{y_k} v_{y_k}}{n-2} \cdot \frac{1}{P} \left[\sum_{k=1}^n (\tilde{x}_i - \xi_k)^2 + \sum_{k=1}^n (\tilde{y}_i - \eta_k)^2 \right] \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

可见,通过转换参数纠正的影像上任意点在 x 和 y 方向上的精度与到各控制点的距离之和成比例关系,而任意点在 x 和 y 方向上的相关性 $q_{x_i y_i}$ 为 0。由此可以认为,影像纠正以后,任意点的精度受控制点精度的影响,这种影响是以该控制点到任意点的距离倒数为权重的,距离越远,影响越小;距离越近,影响越大。

3 距离倒数的精度空间插值

由上面的分析可以发现,影像纠正后,任意点的精度与控制点的精度与相应距离的比例关系,所以考虑采用控制点精度,利用距离倒数为权的空间插

用。对于影像上任意点 i ,其纠正前的坐标为 $(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i)$,则将它纠正以后的坐标为

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \tilde{x}_i & -\tilde{y}_i \\ 0 & 1 & \tilde{y}_i & \tilde{x}_i \end{bmatrix} \cdot \lambda \quad (10)$$

则任意点的纠正以后精度的协方差阵为

$$\begin{bmatrix} \sum_{k=1}^n (\xi_k^2 + \eta_k^2) - 2\tilde{x}_i \sum_{k=1}^n \xi_k - 2\tilde{y}_i \sum_{k=1}^n \eta_k + n\tilde{x}_i^2 + n\tilde{y}_i^2 & 0 \\ 0 & \sum_{k=1}^n (\xi_k^2 + \eta_k^2) - 2\tilde{x}_i \sum_{k=1}^n \xi_k - 2\tilde{y}_i \sum_{k=1}^n \eta_k + n\tilde{x}_i^2 + n\tilde{y}_i^2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

值算法内插平面空间任意点的精度值,从而在整体上理解和认识影像纠正的精度。

距离倒数乘方法是一个加权平均插值法^[2,3],可以进行确切的或者圆滑的方式插值。方次参数控制着权系数如何随着离开一个格网结点距离的增加而下降。对于一个较大的方次,较近的数据点被给定一个较高的权重份额,对于一个较小的方次,权重比较均匀地分配给各数据点。根据式(13)的结果,对于影像纠正精度插值的方次应选为 1 次。另外距离倒数法计算值易受数据点集群的影响,计算结果经常出现一种孤立点数据明显高于周围数据点的“鸭蛋”分布模式,所以可以在插值过程中通过增加平滑参数来加以修正。数学描述上为

$$Z_j = \sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{h_{ij}^\beta} \bigg/ \sum_{i=1}^n \frac{1}{h_{ij}^\beta}, h_{ij} = \sqrt{d_{ij}^2 + \delta^2} \quad (14)$$

式中, h_{ij} 是控制点 i 和插值点 j 之间的有效距离, Z_j 是插值点 j 的插值, Z_i 是控制点 i 的值, d_{ij} 是控制点 i 和插值点 j 之间的距离, β 是插值对方次的方次,这里为 1, δ 是平滑参数,这里取 1。

4 精度空间可视化

影像纠正精度的空间插值,以控制点的精度作为基准点,可插值出影像范围内任意点的精度。选取一幅试验影像,确定要纠正的影像范围,图 1 是要纠正的影像及其控制点的分布。采用相似变换对影像纠正,根据式(8)得到各控制点的纠正精度,如表 1。

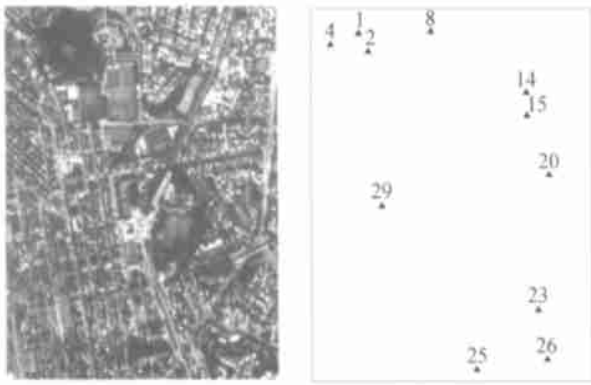


图 1 纠正的影像及其控制点分布

Fig.1 The rectification image and distribution of control points

根据这些控制点的精度值,采用距离倒数权法来空间插值,取方次为 1,平滑参数也为 1。对内插结果进行可视化,则得到如图 2 所示的 x 和 y 方向上的精度的等直线图,这种精度等直线的描述方法,是本文所探讨的精度可视化的一种表达方法,除了精度等值线图外,精度可视化还可以通过下文介绍的精度三维视图和精度灰度图来表示。

图 2 分别给出了影像纠正的 x 和 y 方向上的精度等值线图。从精度等值线图上可以看出, y 方向上的纠正精度相对 x 方向上的纠正精度差,究其原因,是由于扫描的变形在 x 方向比 y 方向上的大。由于纠正本身是采用数学模型进行的全局纠正,不

表 1 控制点纠正精度结果

Table 1 Result of the accuracy of control points after rectification

点名	x 向精度	y 向精度	点位精度	点名	x 向精度	y 向精度	点位精度
1	-5.09	1.15	5.22	20	9.05	-2.44	9.38
2	-4.53	1.48	4.76	23	0.11	-0.05	0.12
4	5.6	-1.54	5.81	25	2.85	-0.85	2.98
8	7.33	-1.97	7.59	26	-3.88	1.14	4.05
14	-5.41	1.82	5.71	29	-1.72	0.51	1.79
15	-4.33	0.74	4.40				

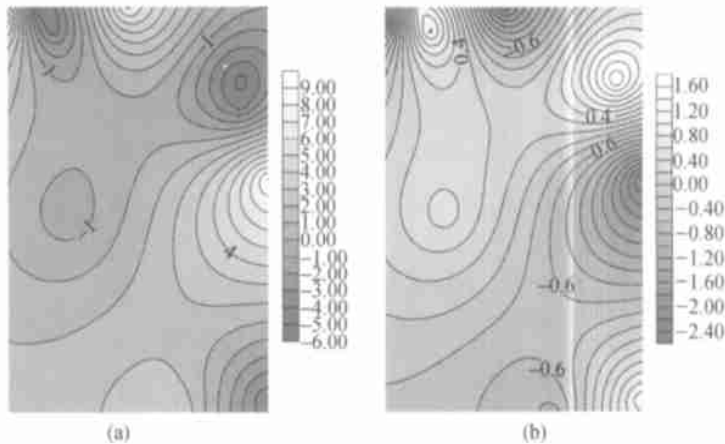


图 2 影像纠正的精度等值线图

(a) 影像纠正 x 方向精度等直线图; (b) 影像纠正 y 方向精度等直线图

Fig.2 Accuracy contour map for image rectification

(a) Accuracy in x direction; (b) Accuracy in y direction

同区域的影像纠正精度与附近控制点的精度有着很大的关系。从控制点分布图 1 与图 2、图 3 结果比较,可以看出在完全没有控制点的左下方,其精度反而要比控制点密集的区域精度要高,这是因为这

些区域的纠正主要受控制点 25 和控制点 29 的影响,而在最小二乘法解算中,这两个点的精度远高于右上方一些控制点的精度,所以虽然影像左下方没有足够的控制点,但由于控制该区域的控制点具有

很好的纠正精度。可见影响局部区域的纠正精度受最近的控制点的精度的影响最大,所以这是完全符合距离权倒数插值的基本思路的,而且结果也是相互吻合的。可见在影像的几何纠正中,控制点未必要很多,关键是具有很好的控制精度,控制点即使多了,但如果控制精度很差,反而会影响局部区域的纠正精度。这一结论与实际操作中的经验也是相互符合的。



图 3 影像纠正的点精度三维可视图

Fig.3 3D visualization of the point accuracy for the image rectification

此外通过精度可视化,可以从整个区域认识影像纠正精度的质量及其空间分布状况,而不单从控制点的精度去认识纠正质量。除了在两个方向上的精度可视化,也可以得到影像纠正后点位的精度可视化,这里对任意点的点位精度内插以后,采用三维视图的形式表示整个影像纠正的点精度,如图 3 所示。

从图 3 的精度图上可以发现,影像纠正的精度分布是不均匀的,这和控制点的选取有关系,前面控制点的选取是采用外围控制的方法,为了提高整个影像纠正的精度,可在中间加密一些控制点。图 4 为加密后的控制点选取,图 5 是采用同样方法得到的加密后点精度的三维视图。

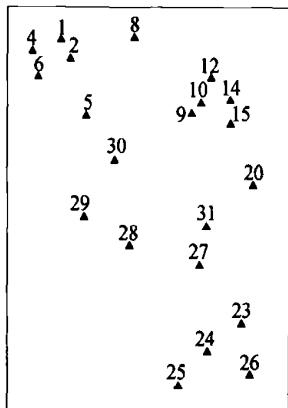


图 4 加密后的影像纠正控制点分布

Fig.4 Distribution of control points after closing up

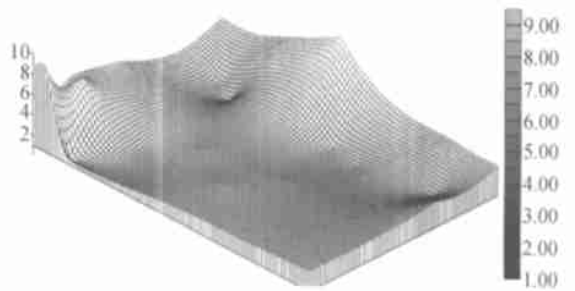


图 5 加密控制点影像纠正的点精度三维可视图

Fig.5 3D visualization of the point accuracy for the image rectification after closing up

5 控制点与精度可视化

精度可视化可以用可视化的形式描述整个影像纠正区域的精度,同时这种基于整体的精度可视化方法相比以往只从控制点的精度去认识纠正质量更全面。而空间插值的目的其实是为了实现这种精度的可视化,而且这种空间插值方法的选取是具有理论依据的。

从图 3 可以发现,影像外围控制点精度合格,基本能保证整个影像纠正的质量,所以在影像纠正控制点的选择时,应该首先确定外围控制点的精度,并确保其精度的可靠。从图 3 与图 5 的比较中可以发现,影像中间加密控制点,影响了影像中间区域的纠正质量,如果加密点的精度高于外围控制点精度,则可以提高整个影像的纠正质量,反之,则可能损坏影像纠正的质量。图 6 给出了加密控制点前后纠正质量精度灰度图的描述方式。

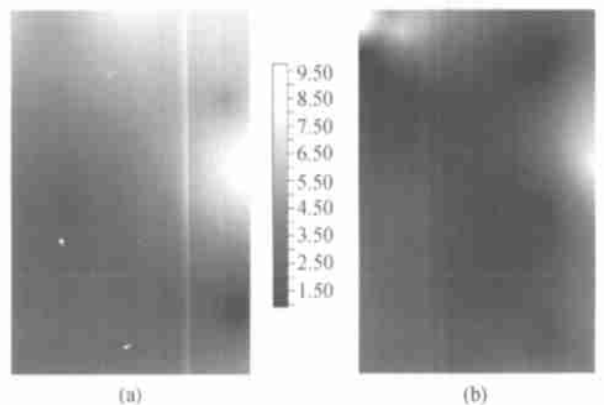


图 6 外围控制和加密的纠正精度灰度图对比

(a) 外围控制精度灰度图;(b) 加密控制点后精度灰度图

Fig.6 Accuracy comparison with accuracy grey map

(a) Accuracy grey map with boundary control points;(b) Accuracy grey map after control points closed up

这里加密的控制点精度都高于外围控制点的精度,加密控制点以后,影像纠正区域中间的纠正精度明显提高,但同时发现,由于采用最小二乘原理求解的原因,导致了边缘纠正精度略有降低,但从数值上可以发现,其影响不是很大。这一现象通过精度可视化可以很好地表现出来,并得出选取影像纠正控制点的规律:

(1) 影像纠正的控制点选取应先从外围区域选择,这样可以有效的控制整个影像的纠正精度;

(2) 采用分级纠正控制的思想,在纠正中间区域加密控制点,这些控制点的精度只有高于外围控制点的精度,才能提高对影像的纠正质量;

(3) 影像中间区域加密控制点会影响边缘区域的纠正质量,所以加密控制点应考虑并注意对边缘纠正质量的影响;

(4) 精度可视化是通过对控制点精度的空间插值来可视化得到的,它有多种形式,如精度等值线、精度三维视图以及精度灰度图等,从精度可视化上可以全面地反映纠正的质量和点对纠正质量的影响,因而也可以用来辅助决定纠正控制点的选择。

6 结 论

影像纠正是数据采集和影像处理的前提和关键,纠正质量的好坏将会影响基于影像分析的精度。本文区别于传统采用控制点精度描述影像纠正质量的方法,提出采用精度可视化的方法对影像纠正的质量作整体和全面的描述。首先以相似变换作为纠

正模型,从理论上导出了控制点精度对纠正后任意点精度的影响关系,得出了任意点纠正精度受各控制点精度的影响与该点到控制点距离成一次比例关系,由此本文提出采用距离倒数乘方法作为空间插值内插影像区域内任意点不同方向上以及点位的精度。在此基础上,提出的精度可视化以精度等值线、精度灰度图和精度三维图对精度进行可视化描述,通过一个试验影像控制点加密前后的精度可视化的给出,能有效地认识各区域的纠正质量。通过本文的探讨,对于任意点精度受控制点精度的影响从理论上给出了说明,并提出精度可视化的概念对纠正精度进行描述,更具有直观性,同时通过精度可视化对纠正方案的选取也有一个全局的指导意义,由此本文对影像采用分级纠正的效果也得以进一步体现。本文选用的纠正方法是相似变换的纠正模型,对于其他纠正模型也可以推导相应的结论,并通过选择插值参数获得影像纠正的精度可视化,具有一定的实用性。

参 考 文 献 (References)

- [1] Paul R Wolf, Charles D Ghilani. Adjustment Computations: Statistic and Least Squares in Surveying and GIS[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1997.
- [2] Davis John C. Statistics and Data Analysis in Geology[M]. New York: John Wiley and Sons., 1986.
- [3] Li X, Cheng G D, Lu L. Comparison of Spatial Interpolation Method. [J] *Advances in Earth Sciences* [J]. 2000, 15 (3): 260—265. [李新,程国栋,卢玲. 空间内插方法比较[J]. 地球科学进展, 2000, 15 (3): 260—265.]

Spatial Visualization of Image Rectification Accuracy Based on Spatial Interpolation

LIU Chun^{1,2}, SHI Wenzhong², ZHU Shu-long³

(1. Dept. of Surveying and Geoinformatics, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Dept. of Land Surveying and Geo-Informatics, The Hongkong Polytechnic University, Hung Hom, Hong Kong, China;

3. Dept. of Remote Sensing Engineering, Zhengzhou Institute of Surveying and Mapping, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: The existing method of accuracy determination for image rectification mainly from the accuracy estimation of the control points. However, adding the technology of spatial visualization to the accuracy determination and giving the whole expression for that is the main idea of this paper. So the conformal transformation model for the image rectification is taken as a beginning to deduce the relation between the accuracy of an arbitrary point and the accuracy of control points. And according to such relation, the Inverse Distance Power method is used to give the spatial interpolation for the image rectification accuracy, which also achieved the interpolation value in x or y directions and of the point moving accuracy. Based on above, the visualizations of accuracy is put forward to give the detail description for the quality of image rectification. A case image is also adopted in this paper to give the explanation for spatial visualizations of accuracy, and also some helpful conclusion is obtained for its availability.

Key words: spatial interpolation; image rectification; accuracy; spatial visualization