

中图法分类号: P208 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2011)03-0469-05

论文索引信息: 尤淑撑, 刘顺喜. 控制点误差传播模型及其应用 [J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(3): 469-473

# 控制点误差传播模型及其应用

尤淑撑, 刘顺喜

(中国土地勘测规划院, 北京 100035)

**摘要:** 为了获取遥感影像几何纠正误差空间分布情况, 提出一种纠正控制点误差传播模型。该模型首先定义了控制点误差, 然后按照控制点误差造成纠正模型参数估计的不确定, 通过纠正模型传递至整个区域的建模思路构建了控制点误差传播模型。为将模型推广至更一般的情况, 定义了表观控制点误差对误差传播模型进行修正。模拟试验表明, 应用该模型可以分析纠正模型的适用性, 以及纠正控制点数量、质量及空间分布对纠正精度的影响, 为纠正控制点选择和优化提供了一种定量分析方法, 对遥感产品应用和成果质量控制具有重要意义。

**关键词:** 空间不确定性; 遥感; 几何纠正; 控制点; 误差传播

## GCP error propagation model for geometric correction and its application

You Shucheng, Liu Shunxi

(China Land Surveying & Planning Institute, Beijing 100035 China)

**Abstract:** In order to obtain a residual error map for remote sensing data after geometric correction, a GCP error propagation model was proposed. First, GCP error source was analyzed and modeled. Second, error free for geometric correction model and the uncertainty of GCP caused uncertainty of model parameter which may then be propagated to all the whole area considered were assumed. Finally, a general GCP error is defined to revise error propagation model and this alteration made the model suitable for more general condition. The proposed model is suitable for appreciate GCPs number selecting, allowable GCPs error deciding and suitable spatial arranging. This model also is very useful in remote sensing product quality control because it made it clear where residual error occurred and how much it is and we can use the final product wisely.

**Keywords:** spatial uncertainty; remote sensing; geometric correction; ground control point; error propagation

## 0 引言

遥感图像在成像时, 由于投影方式、传感器外方位元素变化、传感器介质的不均匀、地球曲率、地形起伏、地球旋转等因素的影响, 使获得的遥感图像相对于地表目标存在一定的几何变形, 使图像产生了几何形状失真或位置偏移, 使不同时相、不同传感器获取的影像不能准确配准, 原始影像必须经校正, 消

除变形, 才能使之满足实际要求<sup>[1-3]</sup>。几何校正包括系统误差改正和几何精校正, 系统误差改正是对一些系统误差按实际测定的参数, 如传感器姿态等加以改正; 当系统误差改正后, 影像上还有残余误差, 一般用地面控制点作进一步的几何精校正, 即首先选取若干在整景影像均匀分布的纠正控制点, 建立影像坐标点与实地坐标点之间的几何关系, 然后选择合适的纠正模型和重采样方法, 消除或减少原始遥感影像的几何畸变<sup>[4-5]</sup>。

收稿日期: 2009-10-26; 修回日期: 2009-11-30

基金项目: 国家科技支撑项目(2008BAJ11B06); 国家高技术研究发展计划(2007AA12Z181); 国土资源部百名优秀青年科技人才计划(2008)。

第一作者简介: 尤淑撑(1975—), 男, 北京师范大学地理与遥感科学学院地图学与地理信息系统博士研究生, 主要研究方向为土地遥感应用, 已发表相关论文 20 余篇。E-mail: youshucheng@mail.cslpi.org.cn。

在纠正不确定性研究方面, Bernstein 提出检查点均方根误差是纠正控制点数量、点位精度的函数<sup>[6]</sup>; Ford 等人指出检查点误差与控制点误差和所选用多项式次数成正比, 与控制点数量成反比<sup>[7]</sup>; Forster 报道 GCP 最优分布是均匀分布于整景影像等<sup>[8]</sup>。不确定性传播研究非常薄弱, 现有的研究主要集中在地图叠置及知识推理中的不确定性传播, 对于时域不确定性、数据不完整性及逻辑不一致性的研究目前还处于初期试探阶段<sup>[9-10]</sup>。总的来说, 目前的研究成果对如何提高遥感影像的纠正精度具有一定的指导作用, 但不能预测控制点精度、数量、空间分布对最终纠正结果的影响<sup>[11-16]</sup>。本文从数字遥感影像图制作质量控制角度出发, 提出控制点误差传播模型, 为纠正模型和控制点数量、质量选择及空间配置等提供一种定量分析方法。

## 1 控制点误差及传播模型的建立

### 1.1 纠正控制点误差

控制点误差包括控制点采集误差和影像定位误差。控制点采集误差取决于纠正控制资料的精度, 一般以中误差表示; 影像定位误差取决于遥感影像的空间分辨率。

1) 设遥感影像空间分辨率为  $P$ 。控制点在  $P \times P$  范围内出现概率相同, 可假设控制点在该空间范围内服从均匀分布, 即所选控制点以等概率分布在  $P \times P$  范围内, 则控制点的位置估计值为该有效像元的中心点,  $x, y$  方向估计方差分别为

$$\begin{cases} \sigma_{lx}^2 = P^2/12 \\ \sigma_{ly}^2 = P^2/12 \end{cases} \quad (1)$$

控制点定位中误差:

$$\sigma_1^2 = \sigma_{lx}^2 + \sigma_{ly}^2 = P^2/6 \quad (2)$$

2) 设纠正控制资料(如地形图、GPS 测量)的中误差为  $\sigma_c$ , 即控制点采集误差为  $\sigma_c$ , 假设  $x, y$  方向误差相互独立, 则其估计方差分别为

$$\begin{cases} \sigma_{cx}^2 = \sigma_c^2/2 \\ \sigma_{cy}^2 = \sigma_c^2/2 \end{cases} \quad (3)$$

3) 假设控制点定位误差与控制点采集误差之间相互独立, 则控制点  $x, y$  方向综合误差为

$$\begin{cases} \sigma_{rx}^2 = \sigma_{cx}^2 + \sigma_{lx}^2 = \sigma_c^2/2 + P^2/12 \\ \sigma_{ry}^2 = \sigma_{cy}^2 + \sigma_{ly}^2 = \sigma_c^2/2 + P^2/12 \end{cases} \quad (4)$$

控制点中误差为

$$\sigma_r^2 = \sigma_{rx}^2 + \sigma_{ry}^2 = \sigma_c^2 + P^2/6 \quad (5)$$

### 1.2 控制点误差传播模型

控制点误差传播模型假定不存在纠正模型误差或纠正模型误差可忽略不计时, 即纠正模型对研究区域是合适, 纠正误差主要由控制点误差引起。控制误差传播途径为控制点误差造成纠正模型参数估计不确定, 纠正不确定性通过模型参数传递至整个区域。以一次多项式纠正模型为例介绍控制点误差传播模型。

一次多项式纠正模型表示为

$$\begin{cases} x = \bar{x} + k_{11}(X - \bar{X}) + k_{12}(Y - \bar{Y}) \\ y = \bar{y} + k_{21}(X - \bar{X}) + k_{22}(Y - \bar{Y}) \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $x, y$  为输出坐标,  $X, Y$  为影像坐标,  $k_{ij} (i=1, 2; j=0, 1, 2)$  为模型参数。假设共有  $n$  个纠正控制点, 控制点对为  $\{(X_i, Y_i), (x_i, y_i)\} (i=1, 2, \dots, n)$ 。  $\bar{x}, \bar{y}$  为输出坐标平均值;  $\bar{X}, \bar{Y}$  为影像坐标平均值, 以下简称控制点集重心。

应用最小二乘法解得变换系数

$$\begin{cases} \mathbf{K}_x = [\mathbf{I}^T \mathbf{I}]^{-1} \mathbf{I}^T \mathbf{T}_x = \mathbf{A} \mathbf{T}_x \\ \mathbf{K}_y = [\mathbf{I}^T \mathbf{I}]^{-1} \mathbf{I}^T \mathbf{T}_y = \mathbf{A} \mathbf{T}_y \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $\mathbf{K}_x = \begin{pmatrix} k_{11} \\ k_{12} \end{pmatrix}$ ,  $\mathbf{K}_y = \begin{pmatrix} k_{21} \\ k_{22} \end{pmatrix}$ ,  $\mathbf{I} = \begin{pmatrix} X_1 - \bar{X} & Y_1 - \bar{Y} \\ X_2 - \bar{X} & Y_2 - \bar{Y} \\ X_3 - \bar{X} & Y_3 - \bar{Y} \\ \dots & \dots \\ X_n - \bar{X} & Y_n - \bar{Y} \end{pmatrix}$ ,

$\mathbf{T}_x = \begin{pmatrix} x_1 - \bar{x} \\ x_2 - \bar{x} \\ x_3 - \bar{x} \\ \dots \\ x_n - \bar{x} \end{pmatrix}$ ,  $\mathbf{T}_y = \begin{pmatrix} y_1 - \bar{y} \\ y_2 - \bar{y} \\ y_3 - \bar{y} \\ \dots \\ y_n - \bar{y} \end{pmatrix}$ ,  $\mathbf{A} = [\mathbf{I}^T \mathbf{I}]^{-1} \mathbf{I}^T$ ,  $a_{ij}$  为矩

阵  $\mathbf{A}$  元素。

假定控制点误差相互独立, 根据式(7)推导得模型参数方差

$$\begin{cases} \mathbf{U}_{K_x} = \mathbf{B} \mathbf{U}_x \\ \mathbf{U}_{K_y} = \mathbf{B} \mathbf{U}_y \end{cases} \quad (8)$$

式中, 矩阵  $\mathbf{B}$  中元素  $b_{ij} = (a_{ij})^2$ ,

$$\mathbf{U}_{K_x} = (\sigma_{k_{11}}^2, \sigma_{k_{12}}^2)^T$$

$$\mathbf{U}_{K_y} = (\sigma_{k_{21}}^2, \sigma_{k_{22}}^2)^T$$

$$\mathbf{U}_x = (\sigma_{x_1}^2, \sigma_{x_2}^2, \dots, \sigma_{x_n}^2)^T$$

$$\mathbf{U}_y = (\sigma_{y_1}^2, \sigma_{y_2}^2, \dots, \sigma_{y_n}^2)^T$$

$\sigma_{x_i}^2, \sigma_{y_i}^2$  分别表示第  $i$  个控制点  $x, y$  方向的方差。

同理可得模型参数协方差

$$\begin{cases} \sigma_{k_{11} \cdot k_{12}} = \sigma_{k_{12} \cdot k_{11}} = \sum_{i=1}^n a_{1i} a_{2i} \sigma_{x_i}^2 \\ \sigma_{k_{21} \cdot k_{22}} = \sigma_{k_{22} \cdot k_{21}} = \sum_{i=1}^n a_{1i} a_{2i} \sigma_{y_i}^2 \end{cases} \quad (9)$$

模型参数方差-协方差矩阵

$$\begin{cases} \Sigma_x = \begin{bmatrix} \sigma_{k_{11}}^2 & \sigma_{k_{11} \cdot k_{12}} \\ \sigma_{k_{12} \cdot k_{11}} & \sigma_{k_{12}}^2 \end{bmatrix} \\ \Sigma_y = \begin{bmatrix} \sigma_{k_{21}}^2 & \sigma_{k_{21} \cdot k_{22}} \\ \sigma_{k_{22} \cdot k_{21}} & \sigma_{k_{22}}^2 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (10)$$

任意点输出坐标方差为

$$\begin{cases} \sigma_x^2 = \sigma_x^2 + J \Sigma_x J^T \\ \sigma_y^2 = \sigma_y^2 + J \Sigma_y J^T \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $\sigma_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_{x_i}^2}{n}$ ,  $\sigma_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_{y_i}^2}{n}$ ;  $J$  为输入变量  $J = ((X - \bar{X}), (Y - \bar{Y}))$ 。

高次多项式等其他纠正模型参数的不确定性估计可采用类似的方法,即根据模型参数估计方程,求得模型参数方差-协方差矩阵,根据模型参数方差-协方差矩阵和输入变量计算任意点纠正中误差。

### 1.3 控制点误差传播模型修正

当纠正模型误差不可忽略时,须要对控制点误差传播模型进行修正,使其更好地符合实际情况。将纠正模型误差视为控制点误差的一个组成部分,由纠正模型误差和控制点误差造成的综合误差称为表观控制点误差。仍然采用  $(\sigma_{xi}, \sigma_{yi})$  表示第  $i$  个控制点  $x, y$  方向表观控制点误差。

一般而言,纠正模型误差具有空间相关性,须考虑控制点间的协方差,则模型参数方差-协方差计算公式修改为

$$\begin{cases} \sigma_{k_{1i}}^2 = \sum_{j=1}^n a_{ij}^2 \sigma_{x_i}^2 + \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n a_{ik} a_{il} \sigma_{x_k x_l} \\ \sigma_{k_{2i}}^2 = \sum_{j=1}^n a_{ij}^2 \sigma_{y_i}^2 + \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n a_{ik} a_{il} \sigma_{y_k y_l} \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \sigma_{k_{1i} \cdot k_{1j}} = \sum_{k=1}^n a_{ik} a_{jk} \sigma_{x_i}^2 + \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n a_{ik} a_{jl} \sigma_{x_k x_l} \\ \sigma_{k_{2i} \cdot k_{2j}} = \sum_{k=1}^n a_{ik} a_{jk} \sigma_{y_i}^2 + \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n a_{ik} a_{jl} \sigma_{y_k y_l} \end{cases} \quad (13)$$

一般地模型误差具有空间变异性,模型参数不确定性也具有空间变异性,计算任意点纠正误差时,假设离该点越近的控制点对该点纠正不确定性的影

响越大,反之则越小。设第  $i$  个控制点影响权重为  $w_i$ ,则任意点模型参数方差-协方差计算公式修改为

$$\begin{cases} \sigma_{k_{1i}}^2 = \sum_{j=1}^n w_j^2 a_{ij}^2 \sigma_{x_j}^2 / \sum_{j=1}^n w_j^2 + \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n w_k w_l a_{ik} a_{il} \sigma_{x_k x_l} \\ \sigma_{k_{2i}}^2 = \sum_{j=1}^n w_j^2 a_{ij}^2 \sigma_{y_j}^2 / \sum_{j=1}^n w_j^2 + \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n w_k w_l a_{ik} a_{il} \sigma_{y_k y_l} \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} \sigma_{k_{1i} \cdot k_{1j}} = \sum_{k=1}^n w_j^2 a_{ik} a_{jk} \sigma_{x_j}^2 / \sum_{j=1}^n w_j^2 + \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n w_k w_l a_{ik} a_{jl} \sigma_{x_k x_l} \\ \sigma_{k_{2i} \cdot k_{2j}} = \sum_{k=1}^n w_j^2 a_{ik} a_{jk} \sigma_{y_j}^2 / \sum_{j=1}^n w_j^2 + \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n w_k w_l a_{ik} a_{jl} \sigma_{y_k y_l} \end{cases} \quad (15)$$

权重系数可采用反距离加权法计算得到,表观控制点误差的方差-协方差矩阵由控制点残差信息近似估计。

## 2 模型评价

随机产生 100 组坐标,模拟坐标对  $x, y$  方向变化范围均为  $0 \sim 1\,000$ ,再对模拟坐标按设定的二次多项式进行变换,并对输出坐标产生 5 m 随机中误差,以原始输入坐标和附加随机误差后的输出坐标作为纠正控制点对。当以一次多项式模型进行纠正,采用修正前的控制点误差传播模型产生误差曲面图(图 1),纠正控制点中误差为 1.066 9 m,检查点的中误差为 1.964 9 m,由误差曲面预测的检查点点位中误差为 0.459 m;当以二次多项式模型进行纠正时,纠正控制点中误差为 0.525 4 m,检查点的中误差为 0.837 7 m,由误差曲面预测的检查点点位中误差为 0.835 m。说明当纠正模型适合某区域时,即由纠正模型引起的误差可忽略时,采用修正前的控制点误差传播模型可较准确地预测纠正误差分布情况,否则预测结果可能与实际情况存在一定的偏差。

同样采用一次多项式模型进行纠正,采用修正后的控制点误差传播模型产生的误差曲面如图 2 所示,预测的最小点位误差为 0.649 m、最大点位中误差为 3.775 6 m,预测的检查点误差为 1.941 8 m,与

直接采用检查点计算的中误差相近。表明修正后的控制点误差传播模型可较好地模拟纠正误差的空间分布。

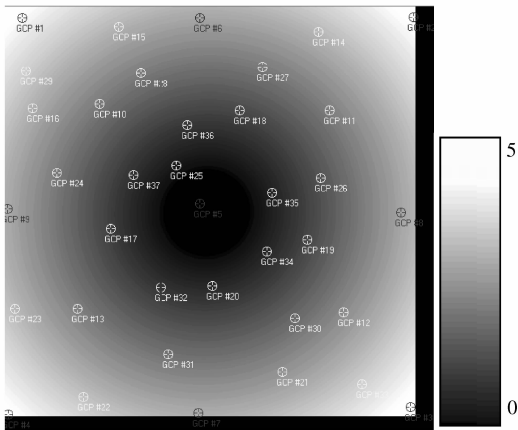


图 1 一次多项式模型误差曲面与控制点分布  
Fig. 1 Error surface assuming error-free model

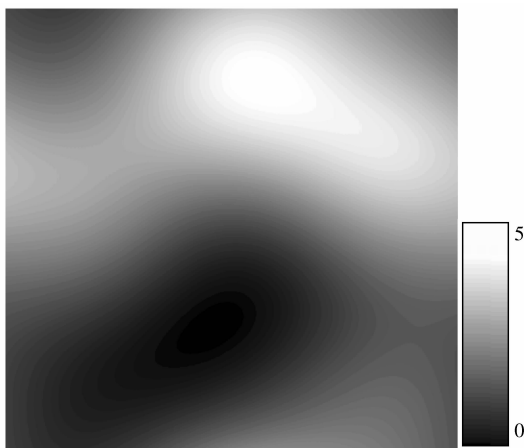


图 2 考虑纠正模型误差的一次多项式误差曲面  
Fig. 2 Error surface considering model uncertainty

### 3 模型应用

#### 3.1 确定纠正控制点数量

选择合适数量的纠正控制点,是提高调查与监测精度和降低调查成本的重要措施。控制点误差传播模型可以为确定合适纠正控制点数量提供依据。假设纠正控制点中误差为 5 m,采用二次多项式进行纠正,分别计算控制点数  $n = 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100$  时  $\sigma_{k11}^2$  变化情况 ( $\sigma_{k12}^2$  变化趋势基本一致),结果如图 3 所示。由图 3 可知,随着控制点数量的增加,  $\sigma_{k11}^2$  单调递减,  $n < 20$  时,  $\sigma_{k11}^2$  随控制点

数量增加变化较快;  $n > 30$  时,  $\sigma_{k11}^2$  随控制点数量增加变化缓慢。因此,对于此例纠正可选取 20 ~ 30 个控制点。

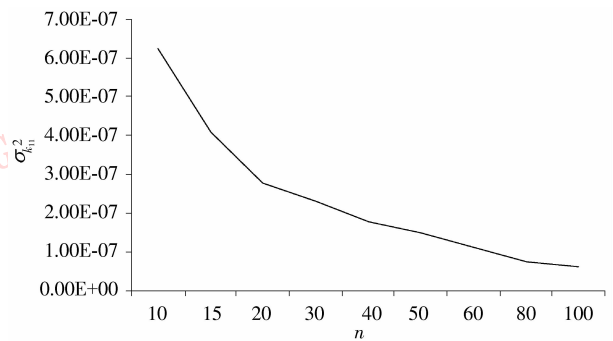


图 3  $\sigma_{k11}^2$ - $n$  变化图

Fig 3. Relationship between  $\sigma_{k11}^2$  and  $n$

#### 3.2 优化控制点空间分布

控制点误差传播模型可用于控制点空间分布优化,主要步骤为对各种控制点配置方案,首先根据纠正控制资料精度,采用控制点误差传播模型计算纠正模型参数估计方差,然后根据模型参数估计方差计算整个纠正区域的纠正误差,以平均纠正误差最小的控制点配置方案为优化结果。以二次多项式纠正模型为例,6、16、46 和 60 个控制点优化结果如图 4 所示,其最优空间配置基本特征是均匀分布和控制整景影像,与经验做法一致。

#### 3.3 纠正不确定性可视化及模型适用性评价

不确定性的可视化能够使用户直观了解不确定性大小、分布,更好地理解和使用遥感产品。对生产者而言,可以了解调查或监测区域精度是否达到要求,便于调整纠正策略;对于使用者而言,可以更好地了解产品的质量。目前,纠正误差空间分布研究主要基于空间插值,一方面需要大量均匀分布的检查点,另一方面,当某个检查点存在粗差时,将影响误差曲面空间结构,如当某区域样本点比较稀疏时无法得到可靠的误差曲面。由控制点误差传播模型可以产生误差曲面图,像素值表示该位置的纠正中误差,根据中误差,可以预测该点期望误差值及最大误差值。

此外,不同纠正模型有其适用范围和条件,如多项式模型在平坦区域纠正精度较高,对于山区,其纠正精度往往难以满足用户要求。根据前述分析,当纠正控制点配置方案确定后,应用控制点误差传播模型计算的纠正误差空间分布图反映了应用某一模型能够获得的最好纠正结果,若模拟结果精度未达

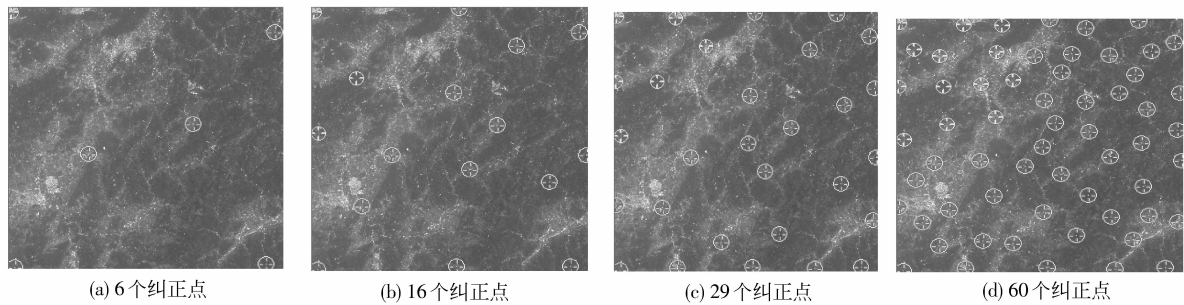


图4 纠正控制点空间结构优化

Fig.4 Distribution optimize for GCPs

到预期目标,则在当前纠正控制点配置方案下,该模型不适合目标区域遥感影像图制作。

## 4 结 论

1) 目前广泛采用的纠正误差空间分布估计方法较少考虑纠正模型信息,空间插值结果可能与实际不符,如即使用于空间插值的样点纠正误差均相同,由于所采用的纠正模型不同,纠正误差的空间分布结构可能存在较大差异;由控制点误差传播模型产生的误差曲面,综合考虑控制点和纠正模型信息,估计结果相对较为可靠。

2) 控制点误差传播模型可以指导遥感影像图制作的成果质量控制,为选择合适的纠正控制资料,确定合理的纠正控制点数量和最优空间分布结构,评价纠正模型的适用性等提供了一种定量方法。模拟试验结果表明,在设定期望输出精度的条件下,纠正控制点精度越高,所需要的控制点数量越少,反之则需要更多的纠正控制点;纠正误差与控制点空间结构分布有关;当由控制点误差传播模型计算的误差与实际情况相差较大时,则在当前控制点配置方案下,该纠正模型不适合,须选择其他纠正模型,或在纠正模型不变的情况下采取分区纠正方案或改变控制点配置方案。

## 参考文献 (References)

- [ 1 ] Giles M. Foody, Peter M. Atkinson. Uncertainty in Remote Sensing and GIS[M]. Berlin, Germany: Springer Press, 2002.
- [ 2 ] Rodolphe Devillers, Robert Jeansoulin, Fundamentals of Spatial Data Quality[M]. Berlin, Germany: Springer Press, 2006.
- [ 3 ] Biging G, Congalton R. Preparing for the 21st Century [M]. Venice, Italy: National Public House, 1989.
- [ 4 ] Russell G. Congalton. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data [J]. Remote Sensing Environment, 1991, 37(1):35-46.
- [ 5 ] Ahmed Sharker, Wenzhong Shi, Hazem Barakat. Assessment of the rectification accuracy of IKONOS imagery based on two-dimensional models[J]. International Journal of Remote Sensing, 2005, 26(4): 719-731.
- [ 6 ] Bernstein G. The accuracy of spatial database[M]. New York: Taylor and Francis, 1976, 107-114.
- [ 7 ] Ford G E, Algazi V R, Agee B G. On the correction of geometric distortion in satellite-acquired images [J]. Proceedings of the 12th Asilomar Conference on Circuits, Systems, and Computers, 2003, 21(4):341-344.
- [ 8 ] Frostier. Uncertainty in remote sensing and GIS [J]. Photogramm. Eng. Remote Sens., 1980, 34(6):387-392.
- [ 9 ] Congalton R G. A comparison of sampling Schemes used in generating error matrices for assessing the accuracy of maps generated from remotely sensed data [J]. Photogramm. Eng. Remote Sens., 1988, 54(5):593-600.
- [ 10 ] Congalton R G. Accessing Landsat classification accuracy using discrete multivariate statistical techniques [J]. Photogramm. Eng. Remote Sens., 1983, 49(12):1671-1678.
- [ 11 ] Lynn K Fenstermaker. A proposed approach for national to global scale error assessments[J]. GIS/LIS, 1991, 11(2):293-300.
- [ 12 ] Hord Michael R, William Brooner. Land-use map accuracy criteria [J]. Photogramm. Eng. Remote Sens., 1988, 42(5):671-677.
- [ 13 ] Skidmore A K, Turner B J. Map accuracy assessment using line intersect sampling [J]. Photogramm. Eng. Remote Sens., 1992, 58(10):1453-1457.
- [ 14 ] Stan Aronoff. The minimum accuracy values as an index of classification accuracy [J]. Photogramm. Eng. Remote Sens., 1995, 51(1):99-111.
- [ 15 ] Liu Chun, Tong Xiahua. Relationship of uncertainty between polygon segment and line segment for spatial data in GIS [J]. Geo-spatial Information Science (Quarterly), 2005, 8(3):183-188.
- [ 16 ] Zhang Jingxiong, Du Daosheng. Field-based models for positional and attribute uncertainty [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 1999, 28(3):244-249. [张景雄, 杜道生. 位置不确定性与属性不确定性的场模型 [J]. 测绘学报, 1999, 28(3): 244-249.]