

# 基于同名对象约束生成建筑物顶数字 表面模型

沈心一, 秦其明, 马海建

(北京大学遥感所, 北京, 100871)

**摘要:** 影像配准是生产 DEM 中是一项关键技术。在摄影测量学中, DEM 的生成算法主要有两种: 基于共线方程和有理函数 (RFM) 的模型。它们都需要已配准的立体影像对作为输入。然而建筑物的自动配准是个难题, 其顶面 DSM 的自动生成也一直难以用摄影测量的方法解决。为了解决这个问题, 本文提出一种基于同名对象和约束的配准方法。与现有方法不同之处在于, 该方法通过同名建筑对象的约束为每一对同名建筑物提供了一个几何变换函数 (GIT), 而不是整幅图像使用同一个 GIT。因为建筑与周围地面混合形成的地表是一个不连续的复杂表面, 难以用一个 GIT 精确描述; 而单个建筑顶面则近似是一个平面, 用一个简单的 GIT 就足以描述。

为实现上述方法, 本文采用面向对象的分割和基于规则的分类对影像预处理。首先在两张相片上提取建筑对象。通过简单的对象特征匹配同名对象, 实现对象级配准, 建立了同名对象约束。在此约束下 (即在每对同名对象内部) 实施像素级配准, 据此便完成了建筑物的自动配准。在此基础上, 建筑物顶 DSM 的生成可以使用前述基于共线方程或者有理函数 (RFM) 的模型来实现。

本文在试验中使用 IKONOS 立体像对实现基于同名对象和约束的配准, 并应用 RFM 模型计算 DSM, 在结果验证中通过误差模拟证明了该方法在建筑物 DSM 的自动重建上能够获得满意的精度。

**关键词:** 面向对象分割, 建筑物, 同名对象约束, 立体像对, DSM

---

**作者简介:** 沈心一 (1985-), 男, 北京大学遥感所博士研究生, 现从事摄影测量与遥感方面的研究。

E-mail: friedrichwilhelm@gmail.com

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

## 引言

通过摄影测量技术自动生成地形的 DEM 了广泛的应用。原理是只要立体像对的姿态已知,同时知道某个点在左右两片上的像点坐标,就可以解算出其地面三维坐标。共线方程使用外方位元素来描述两片的姿态和位置,而 RFM 则使用 80 个 RPC 参数。长久以来,摄影测量这种通过像点坐标结算地面点坐标仅仅在重建平缓地区的 DEM 中得到成熟的应用,难于扩展到陡峭地形,更不用说存在高程突变的地方了。在这些地方通常会产生较大配准误差。目前通用的基于像素的配准算法通常由两步构成。首先需要用基于灰度的方法在图像上自动匹配足够多的特征点;然后用这些已匹配的像点来拟合左右两片的 GIT 的系数。比较常用的 GIT 形式是由 Ackermann 提出的最小二乘影像匹配(Least Squares Image Matching)模型[1],它同时虑了立体影像对的几何畸变和辐射畸变。在城区等房屋密度很大的地区,这种方法精度不高,因为建筑物与周围背景构成的表面相对陡峭甚至多数是不连续的,难以用一个 GIT 来描述。所以一般情况下,4D 生产者需要额外增加一个将建筑物平滑到地面的编辑工作,因为自动计算的 DEM 在建筑物处误差很大。如果需要得到 DSM 则还要增加一个人工建模的立体测图过程。这些工作无疑降低了 DSM 的生产效率。以往的研究者也提出了一些基于对象空间或特征空间的配准算法,但是它们都存在较大局限,通常只能匹配比较规则的形状,而不是任意的建筑物。

Zhen 等(2006)提出通过边缘检测的方法提取 3 维建筑[10]。但在实践中,边缘检测的图像分割算法在高分辨率影像上效果不好。由于存在上述问题,以及受到面向对象分割在处理高分辨率图像时得到的较理想效果的启发,本文提出通过基于同名对象约束的影像配准来自动生产建筑物顶面 DSM。

## 1. 方法

### 1.1 数据选择

目前常用来生产 DEM 的几种卫星立体像对数据包括 Spot 和 IKONOS,因为它们的空间分辨率相对较高而且提供了立体拍摄模式。本文选择了 IKONOS 立体像对作为实验测试数据因为他有更高的分辨率(全立体像对全色波段达到 0.82~1m),而我们希望把实验中建筑的高程误差控制在 1.5m 内。此外,IKONOS 在立体成像时,能够达到最大 40° 的视角,立体像对有航向和旁向两种成像模式,覆盖面分别是 130km \* 56km 和 37km \* 100km,航向重叠度接近 100%,且可以获得 0.54~0.87 的基高比,因此十分利于立体测量[]。本文的实验区域如图 1

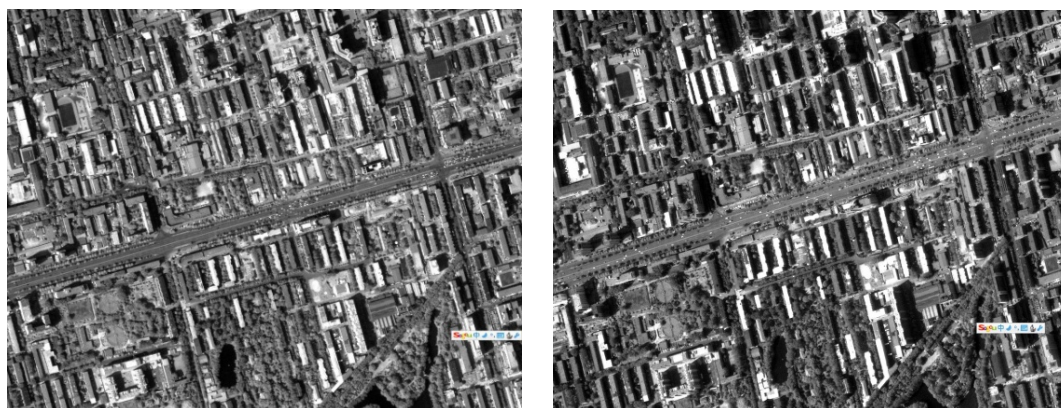


图 1 IKONOS 立体像对，实验区域

## 1.2 整体流程

从原始立体影像对到生成最终的 DSM 的流程图如图 2。

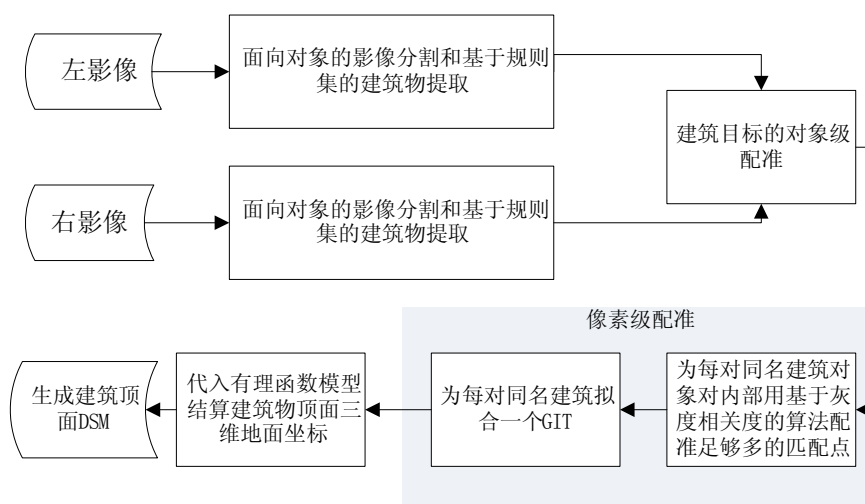


图 2 整体流程图

## 1.3 建筑物目标提取

为了避免由于采用一个 GIT 拟合不连续或突变表面造成的配准误差，本文提出为每个建筑顶面拟合一个 GIT 的思想。而仿射变换式则采用（1）式。为了做到这一点，本文首先在两幅影像上分别提取建筑物目标。而面向对象分割[4]和基于规则集的分类算法正好可以较好的完成这个工作。在我们以往的大量实验中，面向对象的分割往往比基于边缘检测或阈值分割类的分割的处理高分辨率影像效果更好。对面向对象分割算法的深入讨论已超出了本文的范围，在此从略。分割结果图三所示。

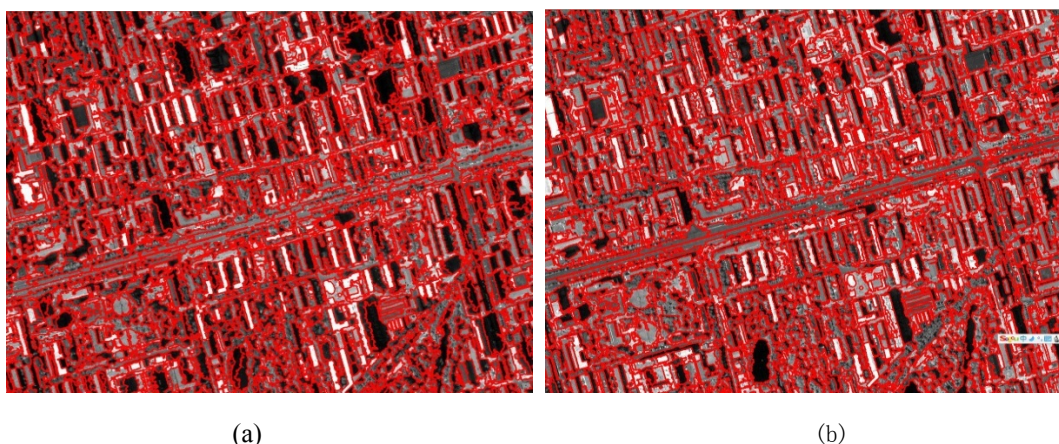


图3 (a) 左片分割结果, (b) 右片分割结果

#### 1.4 基于目标的配准模型

基于灰度相关的像素级配准通常存在下述三个问题:

1. 只有特征点才能正确配准, 而在均质区域则相对缺乏信息量。
2. 有时存在左片上一点在右片上同时存在几个匹配点, 而正确点对应的相关度并不一定最大。
3. 如果对每个像素都用基于灰度的算法搜索同名像点的话则计算了无法承受。

因此, 在实际工作中, 通常采用足够多的那些与周围对比特征性最强 (称之为特征点, 如角点, 边界等), 且能够找到相关度很高的唯一匹配点作为拟合点, 对立体像对的GIT系数进行拟合; 然后用这个GIT去计算左片上给定点在右片上的同名像点。本文中仍然使用最小二乘影像匹配模型[1], GIT可以写为 (1) 式:

$$g_1(x, y) + n_1(x, y) = h_0 + h_1 g_2(a_0 + a_1 x + a_2 y, b_0 + b_1 x + b_2 y) + n_2(x, y) \quad (1)$$

其中:  $x, y$  表示左片的像平面坐标;  $g_1(x, y)$  表示左片上该点灰度;  $n_1(x, y)$  and

$n_2(x, y)$  分别表示左右两片加性随机噪声;  $h_0, h_1$  分别表示系统加性和成性畸变;

$x' = a_0 + a_1 x + a_2 y$   $y' = b_0 + b_1 x + b_2 y$  表示同名像点的右片像平面坐标

##### 1.4.1 对象级配准

通过面向对象的分割和基于规则集的分类完成建筑物对象的提取后, 就可以开始匹配同名建筑物对象了。这一步只需采用匹配若干个对象特征即可完成。在大量的对象特征中, 本文选择了三个较为简单且区分效率很高的特征, 分别是:

I. 对象的中心像素坐标, 通过 (2) 式计算:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{pixel_i \in obj} x_i \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{pixel_i \in obj} y_i \quad (2)$$

II. 对象的灰度均值通过(3)式计算:

$$\bar{g} = \frac{1}{n} \sum_{pixel_i \in obj} g_i \quad (3)$$

III. 对象的长宽比通过下列步骤计算[4]:

1 通过最小外接矩形计算长宽比:

a. 其填充度表达式如下:

$$f = \frac{A_{obj}}{A_{boundingbox}}$$

分子分母分别表示对象和对象的最小外接矩形的面积。最小外接矩形可以通过旋转投影法快速高精度的近似求出[4]。

b. 长宽比表达式如下:

$$\Upsilon = \frac{l}{w} = \frac{a^2 + ((1-f)b)^2}{A_{boundingbox}}$$

其中 a, b分别为最小外接矩形的长和宽。

2通过对对象坐标协方差矩阵的特征值计算长宽比:

坐标协方差矩阵定义如下:

$$S = \begin{bmatrix} Var(X) & Cov(XY) \\ Cov(XY) & Var(Y) \end{bmatrix}$$

其中: X表示对象所有像元的横坐标, Y表示纵坐标。Var表示方差, Cov表示协方差。则长宽比可表达为:

$$\Upsilon = \frac{l}{w} = \frac{eig_1(S)}{eig_2(S)}$$

其中  $eig_1(S)$  表示S矩阵的较大特征值,  $eig_2(S)$  表示S矩阵的较小特征值。

取1, 2 两种算法中的较小结果作为最终的长宽比值。

显然, 两幅影像上同名对象的中心坐标差应该在一个较小范围内变化, 所以第一个特征可以匹配大部分对象, 当使用了第一个特征时, 仍存在不能唯一匹配到同名建筑对象情况时, 再使用第二个灰度均值特征, 仍未匹配完所有对象时, 再使用长宽比这一形状特征。绝大多数情况下此三种特征可以匹配全部建筑物对象, 而长宽比特征由于计算量稍大, 可以放在最后考虑以提高总体效率。

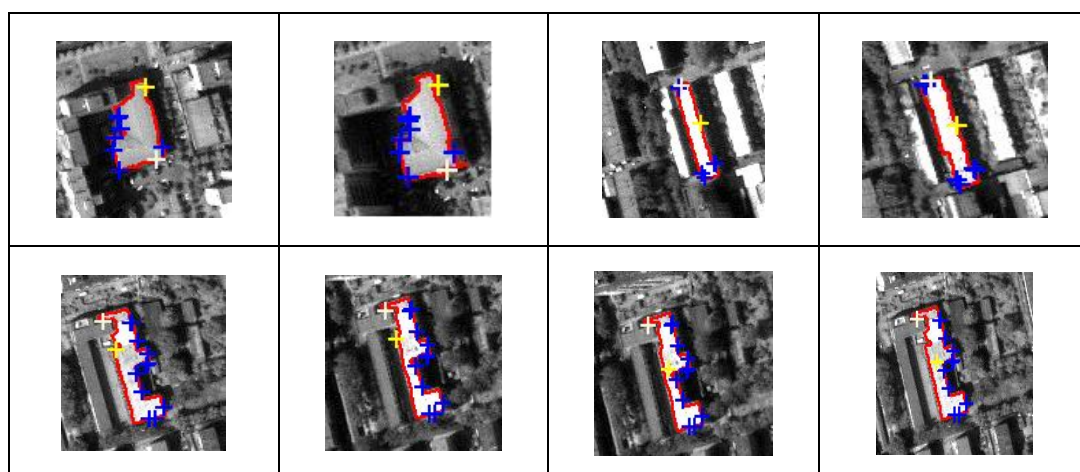
#### 1.4.2 像素级配准

完成了对象级配准后,像素级配准便可以在同名对象的约束下实施。这个过程同样需要使用基于灰度的算法搜索同名像点。基本步骤和传统摄影测量方法[7]类似:首先在左对象上寻找特征点,即在局部反差较大的像素。在本文的实验中发现入选的像素通常是边界像素,因此也可以直接在面向对象分割结果中的边界像素中搜索特征点以缩小搜索范围。然后用局部二维窗口的相关系数为相似性测度在同名对象内部来搜索特征的同名像点,相关系数的计算公式[7]如

下:

$$\rho(c, r) = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (g_{i,j} \cdot g'_{i+r, j+c}) - \frac{1}{m \cdot n} (\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n g_{i,j}) (\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n g'_{i,j})}{\sqrt{[\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n g_{i,j}^2 - \frac{1}{m \cdot n} (\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n g_{i,j})^2] [\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n g_{i,j}'^2 - \frac{1}{m \cdot n} (\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n g_{i,j}')^2]}} \quad (4)$$

最后将这些匹配点带入最小二乘影像匹配模型来拟合(1)式中GIT的系数。为了有多余观测,至少需要9对匹配点来拟合一个对象的GIT,本文中通常使用12对。同名对象的约束体现在每个同名建筑对象分别用一个GIT来拟合,避免了一个GIT同时拟合建筑物顶面和周围地面这种不连续表面时造成的误差。像素级匹配的结果在图3中给出。其中十字叉中心对应的点表示同名像点的位置,蓝色和白色叉表示基于灰度算法找到的同名像点(拟合点),黄色则代表任意给定左对象上一点,通过GIT计算出来的同名像点。第奇数幅图像均为左影像上的建筑物对象,第偶数幅图像表示其在右影像上的同名对象。把通过GIT计算拟合点的同名像点,与基于灰度得到的拟合点的同名像点的均方根误差比较作为配准误差为0.37像素,表明本文方法在建筑物顶面上的配准误差小于0.5像素。





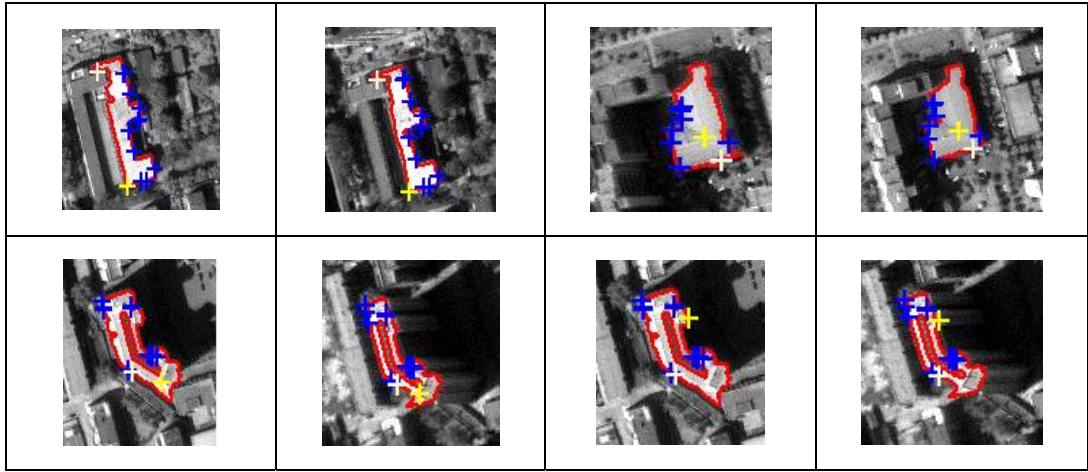


图3 配准结果图

### 1.5 通过RFM模型计算建筑物顶面DSM

完成基于同名对象约束的配准后，就可以开始计算建筑物顶面的三维坐标了。将同名像点的像平面坐标和初始地面三维坐标代入有少量地面控制点（GCP）的 RFM 模型，经过平差迭代，便可以得到地面三维坐标。若需要得到规则网格下得 DSM，则需要对得到的不规则 DSM 点进行插值，这部分内容已经超出本文的范围，在此从略。

#### 1.5.1 标准有理函数模型

标准的RFM模型可以写成（5）式：

$$s = \frac{Nums(U, V, W)}{Dens(U, V, W)}, l = \frac{Num(U, V, W)}{Dens(U, V, W)} \quad (5)$$

其中（s，1）表示归一化的像平面坐标，U, V, W分别表示归一化的纬度、经度和高程。而归一化公式可以写成（6）式：

$$\begin{cases} U = (\phi - \phi_0) / \phi_s \\ V = (\lambda - \lambda_0) / \lambda_s \\ W = (h - h_0) / h_s \\ s = (x - x_0) / x_s \\ l = (y - y_0) / y_s \end{cases} \quad (6)$$

其中 $\phi, \lambda, h$ 分别表示纬度、经度和高程；（x，y）表示像以像素为单位的像平面坐标。（5）

式中的有理函数的分子分母均可写成（7）式的形式：

$$\begin{aligned} p = & a_1 + a_2V + a_3U + a_4W + a_5VU + a_6VW + a_7UW + a_8V^2 + a_9U^2 + a_{10}W^2 + a_{11}UWV + a_{12}V^3 \\ & + a_{13}VU^2 + a_{14}VW^2 + a_{15}V^2U + a_{16}U^3 + a_{17}UW^2 + a_{18}V^2W + a_{19}U^2W + a_{20}W^3 \end{aligned} \quad (7)$$

80个有理函数系数加上10个归一化系数共90个系数在space imaging提供的立体相对RPC参数文件中给出。解算地面三维坐标需要首先对有理函数进行线性化，然后根据最小二乘平差模型[7]从初值迭代解算。本文解算的时候，经纬度和高程的初始值从google earth的对应

位置得到。

### 1.5.2 带控制点的有理函数模型[3]

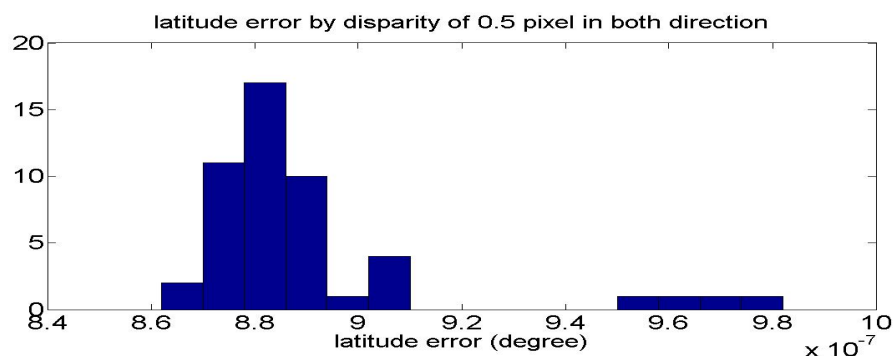
卫星位置和姿态的误差造成图像上像素的横纵坐标分别存约29和17个像素的误差,造成最终的结果误差过大,(C. S. Fraser et al)研究表明这个误差是由卫星星历误差造成的系统偏移,各点偏移基本相同,不属于随机误差,可以通过少量地面控制点显著降低。在几种带GCP的RFM模型中,本文选择了7参数的RFM&ST(有理函数&物方相似变换模型),因为他的物理意义明确,精度更高。可以写成(8)式

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \lambda R \begin{bmatrix} X_{RPC} \\ X_{RPC} \\ X_{RPC} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中R表示旋转矩阵,由三个旋转角算出, $\lambda$ 表示比例因子, $[X_0, Y_0, Z_0]^T$ 表示便宜项,显然,至少需要7个GCP解算这些参数。

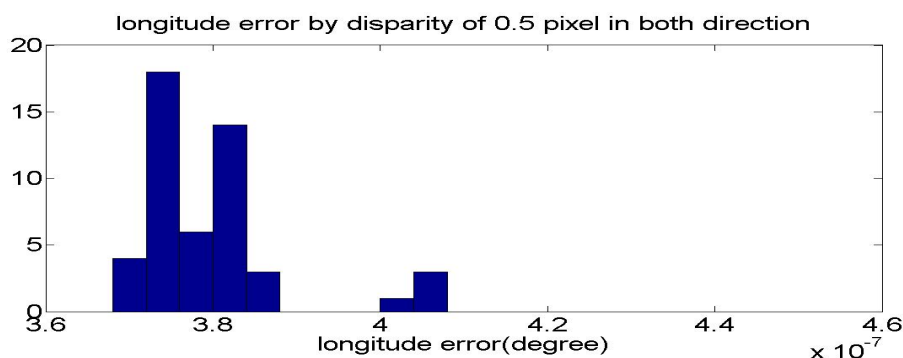
## 2 精度评定

本文使用覆盖北京城区的IKONOS立体像对截取1280\*998像素大小进行了验证,通过解算分布在33个建筑物顶面上的50个点对误差来估计误差。考虑到在广泛分布的建筑物顶面上实施差分GPS的困难,本文通过误差模拟来估计模型本身的误差。将在两个方向上人为加入0.5像素偏移作为误差上限,加入50个验证点的原始视差,带入RFM&ST模型解算出这50个点加入配准误差上限后的三维坐标,与未加入配准误差前解算的三维坐标比较可以得到这些点的误差分布直方图如图4

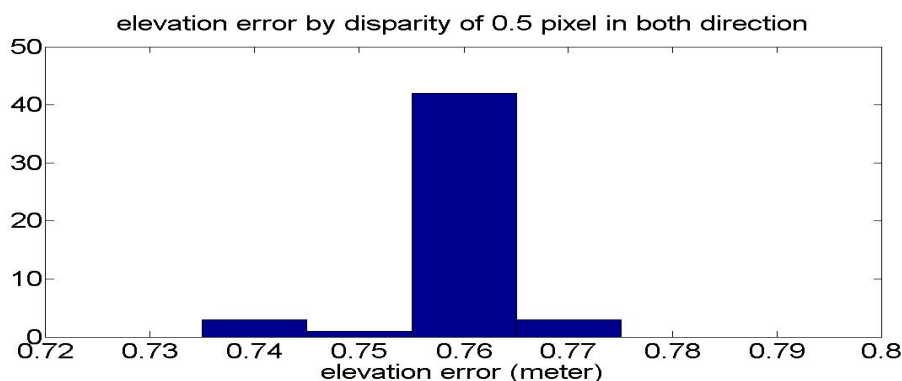


a 纬度误差分布图





b 经度误差分布图



c 高程误差分布图

图4 两个方向上0.5像素的配准误差引起的三维坐标误差分布图。图a, b以度为单位分别为纬度、精度误差。

图c以米为单位, 为高程误差。

图4表明, 92%的点的纬度误差误差小于 $9.1 \times 10^{-7}^\circ$ , 精度误差小于 $3.88 \times 10^{-7}^\circ$ , 转换到长度单位则约为0.10m and 0.043m, 96%的点的高程误差在0.765米内最大X, Y, Z误差分别为0.11, 0.046m和0.775m。说明本文提出的方法对于基于摄影测量原理自动生成建筑物顶面DSM有一定价值。

### 3致谢:

感谢武汉大学遥感学院的周军其副教授为本文实验提供的IKONOS立体相对数据。

### 参考文献:

- [1] Ackermann F. High Precision Digital Image Correlation, Proceedings of the 39<sup>th</sup> Photogrammetric Week., University of Stuttgart, 1983
- [2] 江万寿, 郑顺义, 张祖勋等, 航空影像特征匹配研究, 武汉大学学报信息科学版, 2003, 28(5): 510-513
- [3] 刘军, 王冬红, 毛国苗, 基于RPC 模型的IKONOS 卫星影像高精度立体定位, 测绘通报, 2004, 9: 1-3
- [4] M. Baätz and U. Benz. User Guide, Definiens Imaging. 76-165, 2000-2004

- [5] 燕琴, 张祖勋, 张剑清, 异轨遥感CCD 影像外方位元素的解求, 武汉大学学报信息科学版 2001, 26(3): 270-276
- [6] 杨贵军, 柳钦火, 高分辨率星载遥感立体像对3D 测量模型, 地理与地理信息科学, 2006, 22(6): 17-20
- [7] 张剑清, 潘励, 王树根, 摄影测量学, 武汉, 武汉大学出版社, 2002
- [8] Zhang, Zuxun; Zhang, Jianqing, Facet based differential registration of remote sensing images, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2001 Vol. 2: 712-714
- [9] 张祖勋, 张剑清, 广义点摄影测量及其应用, 武汉大学学报·信息科学版, 2005, 30(1): 1-5
- [10] Zhen X. and Yun Z. "Automatic 3D Building Extraction from Stereo IKONOS Images", *Digital Object Identifier*, 3283-3286, 2006

## DSM GENERATION OF BUILDINGS BASED ON CORRESPONDING OBJECT CONSTRAINT

Shen Xinyi, Qin Qiming, Ma Haijian

Institute of Remote Sensing and GIS, Peking University, Beijing 100871, China

Corresponding author: Shen Xinyi Tel: +86-10-62764430; Fax: +86-10-62751159;

Email: friedrichwilhelm@gmail.com

### Abstract

Common methods for DEM generation are based on collinearity equation, and rational function model. Either of them requires registered stereo pair as input. In order to register each point of building roof precisely, this paper proposes a corresponding image object constrained registration method based on object oriented image segmentation. Compared with current methods, the proposed method provides one geometric image transform (GIT) function for each pair of building roof because one GIT could fit better for just one roof than the combination of building roof and the surrounding ground.

The whole process consists of four steps. It first segments both images separately by object oriented segmentation and then extract building objects by rule-based classification. Then it uses three simple object features to match the corresponding buildings in the two images, which is called object-level registration and sets the constraint of corresponding objects. In the third step, pixel level registration is conducted within each corresponding building resulting one GIT for each. The last step is to calculate DSM of building roof by RFM with GCPs. In the validation section, a simulation way is conducted to estimate the accuracy of the proposed method on IKONOS stereo pair.

**Keywords:** object oriented segmentation; building patches; corresponding object constraint; stereo pair; DSM