

航空影像与数字地面模型的配准

李平湘

(武汉测绘科技大学遥感与信息工程学院, 武汉市珞喻路 39 号, 430070)

摘 要 介绍了一个通过确定航空摄影飞机的空间位置和姿态来辅助飞机导航的算法。该算法将航摄像片与已知数字地面模型配准, 从而获取像片(飞机)的空间位置和姿态。

关键词 数字地面模型; 地形配准; 航空影像

分类号 P231, TB869

在本文中, 利用飞机上连续摄取的地面影像的相对定向建立的 DEM(称作恢复高程模型 REM), 与由该地区地形图得到的数字高程模型(简称 BEM)的配准来确定飞机的空间位置和姿态。首先对 REM 和 BEM 的高程信息分别进行零交叉处理, 提取出地形起伏发生突变的“悬崖曲线图”。然后, 对每一根悬崖曲线作折线拟合, 检测出所拟合的折线的端点和转折点作为特征点, 充分利用每一个特征点附近的坡向、坡度信息进行特征点匹配计算。最后根据匹配点分别在 REM 和 BEM 中的坐标进行绝对定向, 求出 REM 和 BEM 之间的相似变换参数。再根据建立 REM 时的相对定向参数与上述绝对定向参数推求出像片在 BEM 中的位置和姿态。作者用实际的航摄资料和地形数据进行了试验。由文中方法所得结果与解析测图仪和立体测图仪上结果相比, 角元素相差 15' 左右, 线元素相差平面为 25m 左右, 高程 2m 左右。计算结果与理论推导是吻合的。

1 悬崖图的提取

“悬崖”的定义是用高斯拉普拉斯(LOG)滤波将 DEM 卷积后获得的零交叉点连接而成的线。首先, 对高程模型的高程数据用 LOG 滤波进行卷积和零交叉处理。采样公式为:

$$\nabla^2 G(i, j) = \frac{1}{2\pi\sigma^6} (r^2 - 2\sigma^2) e^{-r^2/2\sigma^2} \quad (1)$$

其中, $-M \leq i \leq M$, $-M \leq j \leq M$, $r^2 = i^2 + j^2$, M 为滤波半径, 近似选为 $5.1\sigma^2$; σ 为 4 作为期望精度。令 $e[i, j]$ 是感兴趣的 DEM, $c[i, j]$ 是期望的悬崖图。DEM 可用下式卷积:

$$V[i, j] = \sum_{m=-M}^M \sum_{n=-M}^M \nabla^2 G[m, n] e[i-m, j-n] \quad (2)$$

$0 \leq i \leq N_x$, $0 \leq j \leq N_y$, N_x, N_y 分别是 DEM 的行、列数。定位零交叉公式为:

$$c[i, j] = \begin{cases} 1 & \text{当 } V[i, j] > 0 \text{ 和 } (V(i, j-1) < 0 \text{ 或 } V(i, j+1) < 0) \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

由零交叉计算所提取出的悬崖曲线如图 1 所示。图 1a 为 REM 悬崖图, 图 1b 为 BEM 悬崖图。

2 特征点检测

特征点是指对“悬崖曲线”进行折线拟合后的端点和转折点。

首先根据悬崖曲线的两端点(如图2所示A、B点),建立直线方程:

$$A_0x + A_1y + A_2 = 0 \quad (3)$$

其中, $A_0 = \frac{1}{x_B - x_A}$, $A_1 = \frac{1}{y_A - y_B}$,

$$A_2 = \frac{y_A x_B - x_A y_B}{(y_B - y_A)(x_B - x_A)}$$

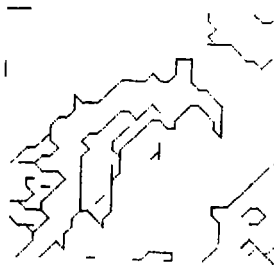


图 1a

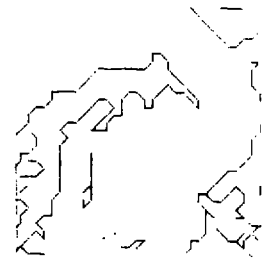


图 1b

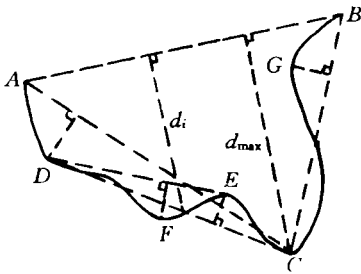


图 2



图 3a



图 3b

然后计算曲线AB上每一点到直线AB的距离 d_i :

$$d_i = \frac{|A_0 x_i + A_1 y_i + A_2|}{\sqrt{A_0^2 + A_1^2}} \quad (4)$$

若 d_{max} 满足 $d_{max} > \epsilon$, ϵ 为一给定阈值,则 d_{max} 所对应的曲线点为转折点。同理,检测出曲线上相邻两个转折点(或端点)间的新转折点。直到相邻两特征点间的 $d_{max} \leq \epsilon$,转入下一对相邻特征点检测。检测出的全部转折点和端点如图3所示。

3 坡度、坡向模型的计算

常规的数字影像匹配是利用灰度变化进行的,这里的DEM配准则利用了地面起伏信息——坡度作为特征点匹配的判据。

为了匹配时的方便,这里将地表起伏分为坡度和坡向。计算坡度、坡向采用了拟合平面的方法。将DEM每一网格作为一个计算单元,建立如图4所示的坐标系。用每个单元的4个角点的三维坐标来拟合一个平面,取该平面的法矢量与铅垂方向上的单位矢量的夹角的正切值作为该计算单元的平均坡度。拟合方程为:

$$z = Ax + By + C \quad (5)$$

用最小二乘法求解可得:

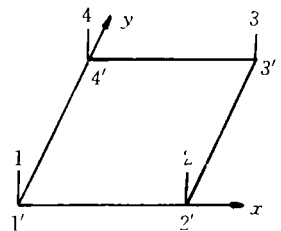


图 4

$$\begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (z_2 - z_1 + z_3 - z_4)/2\Delta x \\ (z_4 - z_1 + z_3 - z_2)/2\Delta y \\ (3z_1 + z_2 - z_3 + z_4)/4 \end{bmatrix} \quad (6)$$

拟合平面的法矢量为:

$$n = [A, B, -1]^T = \left[\frac{z_2 - z_1 + z_3 - z_4}{2\Delta x}, \frac{z_4 - z_1 + z_3 - z_2}{2\Delta y}, -1 \right]^T \quad (7)$$

所求计算单元的平均坡度为:

$$\text{tg}\alpha = \sqrt{\left(\frac{|n| \cdot |\rho|}{n \cdot \rho}\right)^2 - 1} = \sqrt{\left(\frac{z_2 - z_1 + z_3 - z_4}{2\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{z_4 - z_1 + z_3 - z_2}{2\Delta y}\right)^2} \quad (8)$$

其中, ρ 为铅垂方向的单位矢量。

坡向表示坡面倾斜的方向。将投影到水平面的坡向分成 10 种情况,如图 5 所示。当地面水平,即坡度为 0° 时,取坡向值 T 为 0。当坡度为 90° 时,取 T 为 9。当坡向倾向 x 轴负方 $\pm 22.5^\circ$ 范围时,取 T 为 1,其余类推。

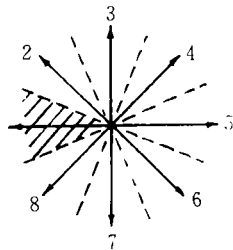


图 5

4 基于坡度的 DEM 特征点匹配

4.1 选择候选匹配点

选择候选匹配点,即根据坡向值,从所有 BEM 的特征点中找出 REM 的每一特征点全部可能的匹配点。

假定 REM 中某一特征点 P 的坡向为 T_0 ,则 P 点的候选匹配点坡向值满足:

$$T = \begin{cases} 0, 9, T_0 \text{ 或 } T_0 \pm 1 & \text{当 } 0 < T_0 < 9 \\ 0, 1, 2, \dots, 9 & \text{当 } T_0 = 0 \text{ 或 } 9 \end{cases} \quad (9)$$

4.2 二级匹配

二级匹配,即利用坡度数据从 REM 的多个候选匹配点中检测出唯一正确的匹配点。

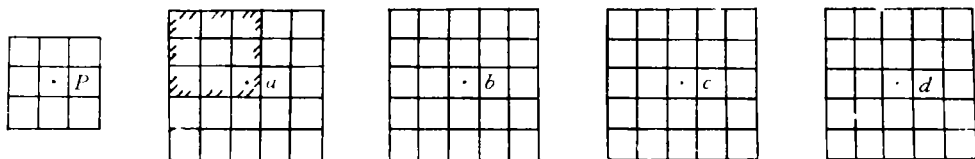


图 6

图 6 中 P 为目标点,将以 P 为中心的 3×3 邻域作为目标区。设 P 点有 a, b, c, d 4 个候选匹配点,则将以候选点为中心的 5×5 邻域作为匹配的搜索区。顺次在搜索区中取一 3×3 坡度阵列与目标区进行坡度差的平方和计算,求出一个 $\rho(i, j)$,其中 ρ_{\min} 所对应 BEM 的 (i, j) 点即为 P 点的匹配点:

$$\rho(i, j) = \sum_{m=0}^2 \sum_{n=0}^2 (S_{mn} - a_{mn})^2 \quad (10)$$

其中, i, j 为搜索区当前与 P 点匹配的计算阵列的中心点行、列号; $\rho(i, j)$ 为第 (i, j) 点的匹配度量; S_{mn} 为目标区 3×3 坡度元素; a_{mn} 为搜索区中 (i, j) 点邻域 3×3 坡度元素。

对 REM 中各特征点作如上计算,即得到 REM 中每一特征点在 BEM 中对应的匹配点。

4.3 匹配点最终筛选

首先,在上述匹配点对中找出 ρ 值偏小的 4 对匹配点,求出它们各自对应的 x, y 坐标差的平均值 $\Delta x, \Delta y$:

$$\Delta x = \sum_{i=1}^4 (x_{Ri} - x_{Bi})/4, \Delta y = \sum_{i=1}^4 (y_{Ri} - y_{Bi})/4 \tag{11}$$

其中, x_{Ri}, y_{Ri} 表示 REM 中特征点 i 的 x, y ; x_{Bi}, y_{Bi} 表示 BEM 中匹配点的 x, y 。

接下来,计算 4 对点的 $\Delta x_i, \Delta y_i$,并与 $\Delta x, \Delta y$ 比较:

$$\Delta x_i = x_{Ri} - x_{Bi}, \Delta y_i = y_{Ri} - y_{Bi} \quad i = 1, 2, 3, 4 \tag{12}$$

$$|\Delta x_i - \Delta x| \leq \epsilon, |\Delta y_i - \Delta y| \leq \epsilon \tag{13}$$

对两个 DEM 来说,由于存在相似变换,同名点在 x 和 y 方向上的位移理论上应是两个定值,并满足(13)式。否则,去掉该对点,重新取一比前 4 对次小的匹配点对替换,重新按(12)、(13)计算,直到均满足(13)式。 ϵ 为一给定阈值,与地面起伏和采样间隔有关。

最后,对所有匹配点对按(12)式计算 $\Delta x_i, \Delta y_i$,用(13)式判断。凡满足(13)式,则保留为正确匹配点对,否则去掉。图 7 所示为最后所得匹配点结果与悬崖曲线套合示意图。



图 7a



图 7b

4.4 REM 与 BEM 配准

有了 REM 与 BEM 的正确匹配点对,即可解求出 REM 与 BEM 之间的相似变换参数。变换通式为:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_B = \lambda \cdot R \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_R + \begin{bmatrix} \Delta x_0 \\ \Delta y_0 \\ \Delta z_0 \end{bmatrix} \tag{14}$$

其中, $[x, y, z]_R^T$ 为 REM 中特征点坐标; $[x, y, z]_B^T$ 为与 REM 特征点匹配的 BEM 特征点坐标; $[\Delta x_0, \Delta y_0, \Delta z_0]^T$ 为 REM 相对于 BEM 在 x, y, z 上的平移量; λ 为两模型比例缩放系数; R 为两模型间旋转的 3 个转角 (Φ, Ω, k) 的方向余弦矩阵。

REM 与 BEM 配准,即要求出 7 个相似变换参数 $\lambda, \Phi, \Omega, K, \Delta x_0, \Delta y_0$ 和 Δz_0 。根据图 7 所示的匹配点对的 $(x, y, z)_R$ 和 $(x, y, z)_B$,用最小二乘平差求出上述 7 个参数,即实现了 REM 与 BEM 的配准。

5 航摄像片与 BEM 的配准

建立 REM 时所得的相对定向元素为:

$$\text{左片 } X_{S1} = Y_{S1} = Z_{S1} = 0, \varphi_1 = \omega_1 = \kappa_1 = 0$$

$$\text{右片 } X_{S2} = B_X, Y_{S2} = B_Y, Z_{S2} = B_Z, \varphi_2 = \varphi_2, \omega_2 = \omega_2, \kappa_2 = \kappa_2$$

经过 REM 与 BEM 配准,已获得 REM 与 BEM 的相似变换参数 $\Delta x_0, \Delta y_0, \Delta z_0, \Phi, \Omega, h, \lambda$ 。像片相对于 BEM 的直线元素为:

$$\left. \begin{aligned} \text{左片 } X_S &= \Delta X_0; Y_S = \Delta Y_0; Z_S = \Delta Z_0 \\ \text{右片 } X_{S_2} &= \Delta X_0 + \lambda \cdot B_x, Y_{S_2} = \Delta Y_0 + \lambda \cdot B_y, Z_{S_2} = \Delta Z_0 + \lambda B_z \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

由于通常情况下 φ, ω, κ 和 Φ, Ω, K 均为小角度,在推导公式中舍去二次以上小项,得:

$$\left. \begin{aligned} \text{左片 } \varphi_{\text{左}} &= \Phi + \varphi_1 = \Phi, \omega_{\text{左}} = \Omega + \omega_1 = \Omega, \kappa_{\text{左}} = K + \kappa_1 = K \\ \text{右片 } \varphi_{\text{右}} &= \Phi + \varphi_2, \omega_{\text{右}} = \Omega + \omega_2, \kappa_{\text{右}} = K + \kappa_2 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

(15)和(16)式即构成了航摄左、右像片各自6个外方位元素。

6 试验与结果分析

为了验证上述理论,用实际航摄资料分别在模拟测图仪 Topocart 和解析测图仪 C130 上读取了像片外方位元素,同时进行了航摄像片与 BEM 配准的计算。试验资料及结果比较见表 1~3。

由表 3 可以看到,外方位直线元素中 Z 方向(高程)精度较好,计算结果与 C130 所得结果仅差 1.8m。平面位置相差 25m 左右,刚好为 BEM 采样的像元宽度。外方位角元素相差在 10' ~ 20' 之间,主要是由于地面模型采样点间高差所致。

综上所述可得如下结论:

(1) 利用数字摄影测量方法进行航空影像与 DEM 的自动匹配应用于飞机导航是可行的。

(2) 像片外方位元素求解的

表 1 实验资料参数

参数名	崇阳像对	利川像对
摄影比例尺	≈1 : 20 000	≈1 : 24 500
像片尺寸	23cm×23cm	23cm×23cm
地形类别	丘陵	山地
地面采样间隔	30m	25m
实地范围	1 800m×1 800m	2 500m×2 500m
像对内最大高程	150m	840m
像对内最小高程	60m	270m
相邻像元间高差	5m 左右	15m 左右
摄影主距	150.000mm	152.230mm

表 2 崇阳像片对 Topocart 上绝对定向与自动匹配结果及比较

	φ	ω	κ	λ
微机上计算	2°04'45"	1°47'10"	0°06'24"	0.9960
Topocart 获取	2°00'00"	2°00'00"	0°00'00"	1.0000
比较	0°04'45"	- 0°12'50"	0°06'24"	- 0.0040

表 3 利川像对 C130 上所得外方位元素与微机上计算所得结果及比较

	左 片			右 片		
	微机	C130	比较	微机	C130	比较
X_S	611 819.886	611 842.136	- 22.250	613 790.249	613 811.319	- 21.070
Y_S	375 343.449	375 373.889	- 30.440	375 303.360	375 332.010	- 28.650
Z_S	5 429.156	5 427.396	1.760	5 426.088	5 424.338	1.750
φ	- 1°38'11"	- 1°17'24"	- 0°20'47"	- 1°26'19"	- 1°05'32"	- 0°20'47"
ω	0°44'06"	0°29'44"	0°14'22"	- 0°05'53"	- 0°20'19"	0°14'22"
κ	0°10'21"	0°03'17"	0°07'04"	- 0°57'19"	- 2°04'23"	0°07'04"

精度主要取决于 REM 和 BEM 的采样间隔。当地形起伏较大时,要尽量缩小采样间隔。

(3) 本方法适于 REM 与 BEM 坐标系基本一致的情况。对于导航问题,REM 与 BEM 坐标系可能差别较大。这时,如能利用其它方法获得 REM 空间姿态的 3 个角元素的较好初值,同样可以采用本方法。

(4) 若将 GPS 获取的飞机空间位置值 X_{S1}, Y_{S1} , 加上 REM 的空间辅助坐标,作为 REM 的空间位置初值,可提高 REM 与 BEM 匹配的 efficiency。

感谢:本文是在郑肇葆教授指导下完成的,在此致谢。

参 考 文 献

- 1 李平湘. 航空影像与数字地面模型配准:[学位论文]. 武汉:武汉测绘科技大学,1994
- 2 王之卓. 摄影测量原理. 北京:测绘出版社,1984.
- 3 王之卓. 摄影测量原理续编. 北京:测绘出版社,1986.
- 4 李德仁,郑肇葆. 解析摄影测量. 北京:测绘出版社,1992.

Matching Aerial Images with DEM

Li Pingxiang

(School of Remote Sensing and Informatics, WTUSM, 39 Luoyu Road, Wuhan, China, 430070)

Abstract This paper introduces an algorithm which can assist aerial navigation by determining the spatial position and posture of the aerial photographic plane. The algorithm matches aerial images with known DEM to capture the said position and posture.

Key words DEM; terrain matching; aerial image

科技简讯

由关泽群副教授主持研究的国家自然科学基金项目“图像理解与空间数据自动组织”最近通过专家通信鉴定。

该研究从图像的内在地理学规律出发,首先从地理区位理论,分析与图形相对应的地理要素间的空间关系,并从静态空间结构着手,把要素之间的关系提取出来,组织成计算机能识别的知识表达形式,编制知识自动获取软件。同时,将拓扑学理论应用于图像编码与数据结构,编制了图形拓扑数据结构自动形成软件。

该研究提出了栅格矢量转换、四叉树表达和定性推理等图像理解和空间数据自动组织理论,形成图像空间数据自动组织的技术方案,实现了在计算机上获取多种空间信息和局部几何信息,最终实现图像的自动判读。其成果影像信息系统、空间数据获取与处理、图像理解与识别的智能化,具有十分重要的理论研究意义和技术应用前景。(周)