

地貌测量中图像特征的匹配算法

王巍^{1,2}, 李培林², 张宇红³, 韩华亭², 杨鹏涛¹

(1. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安;

2. 空军工程大学导弹学院发射工程系, 713800, 陕西三原;

3. 西安工业大学艺术与传媒学院, 710032, 西安)

摘要: 针对地貌测量重构中的图像特征匹配问题, 提出了一种新的图像特征匹配方法. 通过对待匹配的资源图像和模板图像进行分区, 并根据灰度相关值实现区域之间的匹配, 在区域匹配的基础上再根据角点所属区域的对应关系进行角点特征匹配运算. 在角点特征匹配过程中, 利用去均值归一化相关法进行区域灰度相关运算, 从而确定出初始匹配点对. 为消除初始匹配角点对中的错误匹配点对, 保证角点特征提取的准确性和可靠性, 采用松弛迭代法、零交叉法以及最小平方中值法进行了错误匹配角点的滤除. 实验结果表明, 该算法可有效提高地貌图像特征匹配的精度和效率.

关键词: 地貌测量; 角点特征; 区域匹配; 特征匹配

中图分类号: TP391.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)07-0870-05

Image Feature Matching Algorithm Research on Topography Measurement

WANG Wei^{1,2}, LI Peilin², ZHANG Yuhong³, HAN Huating², YANG Pengtao¹

(1. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Launch Engineering Department Missile Institute of Air Force Engineering University, Sanyuan, Shanxi 713800, China;

3. School of Art & Media Communication, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China)

Abstract: To effectively realize the image feature matching for topography measurement and rebuilding, a new matching scheme is presented, where the topography resource image and model image matched are partitioned at first, and then the regions are matched according to the gray level correlation. Based on the region match, the corner feature match operation is processed following the relationship among the regions to which the corner points belong. During the corner feature match operation, the initial matching points are determined by region gray level correlation calculation with removing mean value normalization method. To eliminate the wrong matching points and assure the accuracy and reliability of corner detection, relaxation iteration algorithm, zero-crossing method and least squares escalator algorithms are adopted. The experiment results show the precision and accuracy of this algorithm for topography image feature match.

Keywords: topography measurement; corner feature; region match; feature match

地貌测量重构在飞行器巡航制导、导弹末制导以及城市规划等方面具有重要的应用意义. 在地貌测量过程中, 需要对同一景物进行多次图像采集以取得地貌图像的立体像对, 并针对地貌图像的特点, 研究一种稳定、可靠、简便的图像特征匹配方法. 国

内外众多学者在图像特征匹配方面进行了大量的研究, 并取得了丰富的研究成果^[1-5]. Beardsley 等^[6]提取角点作为特征点, 运用相关性进行匹配, 将匹配的结果用奇异值分解求取基础矩阵, 但匹配运算量却很大. Pritchett和Zisserman等^[7]提出了用单应矩

阵取代传统的灰度相似性和极线约束作为匹配准则的方法,这对于某些含有丰富平面信息的图像特别有效,但应用范围却有一定的局限性. Pili^[8]提出了一种基于奇异值分解的匹配方法,但匹配的精度有待进一步提高. 李峰等^[9-10]提出了与变形系数相关的最小二乘匹配算法和采用金字塔分解的最小二乘影像匹配算法,但该算法不具有一定的通用性. Lowe^[11]提出一种基于 SIFT(scale invariant feature transformation)方法的特征匹配算法,有效地解决了传统匹配算法对图像仿射变换、视角变化和非刚性变形的缺陷,提高了匹配算法的鲁棒性.

本文针对地貌测量的特点,提出了一种地貌特征的匹配算法,该算法首先对待匹配立体像对进行分区,并进行区域匹配,然后在区域匹配的基础上进行角点特征匹配. 在角点特征匹配过程中,采用多种方法去除了错误匹配角点,从而提高了地貌图像匹配的计算效率和匹配精度.

1 地貌图像特征匹配原理及流程

1.1 匹配原理

图像特征匹配建立在地貌图像立体像对中对对应角点特征之间的对应关系基础上,是一个二维搜索问题,可将其转化成一维搜索问题,以提高匹配精度和匹配效率.

在一维搜索情况下,确定对应角点需要考虑的问题有:①由于对应角点与已知角点是从同一空间点产生的,因此两者之间具有灰度或几何上的相似性;②由于一个空间点在成像平面上的投影只有一个像点,因此寻找对应角点时只能确定一个对应点;③对于多组对应角点来说,一组正确的匹配角点周围肯定包含许多别的正确匹配角点对;④对于空间多点来说,其在空间中的相对位置投影在二维图像上将同样保持某种位置关系.

匹配原理可以用下面一些图像匹配的基本约束来表达.

(1)外极线约束是将对应点的搜索范围从二维降为一维,源于两图像之间的对极几何原理.

(2)相容性约束是描述对应角点之间的相似性,根据本文地貌图像的特点,适合于利用角点周围区域灰度的相似性关系来描述相容性约束.

(3)惟一性约束描述了只能有一个角点与已知角点存在对应关系.

(4)顺序匹配约束描述了多组匹配点对之间的

相对位置关系.

1.2 地貌图像特征匹配流程

根据以上原理,本文采用图 1 所示的方法来进行图像特征匹配. 首先,根据同一空间景物在 2 幅图像中的粗略视差信息为特征匹配来确定合理的搜索范围,然后对图像进行分区,并根据灰度相关值实现区域之间的匹配,在此基础上根据角点所属区域的对应关系进行角点匹配运算. 角点特征匹配过程包括 4 个步骤:①确定初始匹配点对;②以松弛迭代法消除误匹配;③采用零交叉法消除交叉匹配点对,最后采用最小平方中值法将错误的匹配点对从零交叉运算后的匹配点对集合中剔除.

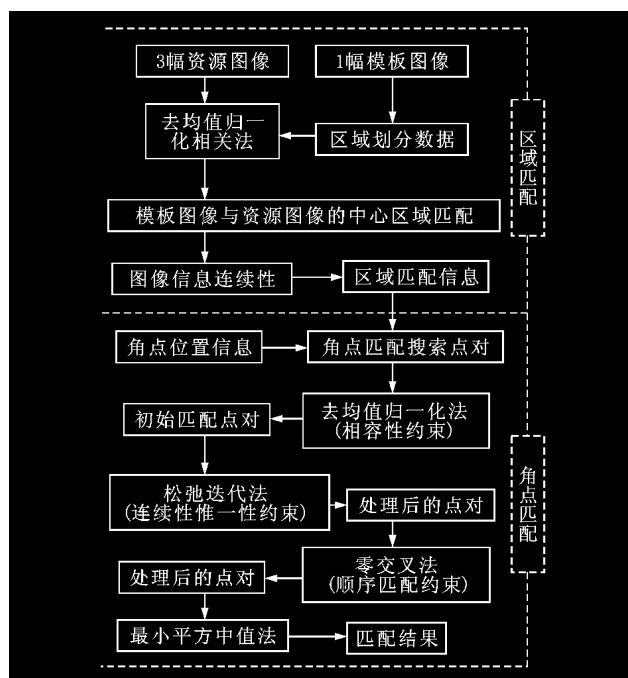


图1 地貌图像特征匹配流程图

2 区域匹配

区域匹配的目的在于为角点特征匹配确定合理的搜索范围,其步骤为:以 3 幅资源图像及 1 幅模板图像为基础,在模板图像中确定 1 个中心区域,只对中心区域与 3 幅资源图像进行区域匹配运算,其余区域根据图像信息的连续性建立匹配关系.

设待匹配的资源灰度图像为 I_r , 图像的宽和高为 $w_r \times h_r$, 模板图像中用于匹配的中心区域为 I_s , 宽和高为 $w_s \times h_s$, 并设 $\bar{I}_r$ 为 I_r 的灰度均值, $\bar{I}_s$ 为 I_s 的灰度均值, $w_s \times h_s$ 的子区域 $I_r(u, v)$ 与 I_s 间的去均值归一化相关度量

$$\rho_g(u, v) = \frac{\sum_{i=1}^{w_s} \sum_{j=1}^{h_s} (I_r(i+u, j+v) - \overline{I_r(u, v)})(I_s(i, j) - \overline{I_s})}{\left(\sum_{i=1}^{w_s} \sum_{j=1}^{h_s} (I_r(i+u, j+v) - \overline{I_r(u, v)})^2 \right)^{1/2} \left(\sum_{i=1}^{w_s} \sum_{j=1}^{h_s} (I_s(i, j) - \overline{I_s})^2 \right)^{1/2}} \quad (1)$$

式中: u, v 为子区域左上角的像素坐标, $0 \leq |u| \leq w_r$, $-w_s, 0 \leq |v| \leq h_r - h_s$.

3 角点特征匹配

3.1 确定初始匹配点对

在确定初始匹配点对时, 匹配对象为提取出的角点特征, 根据区域匹配结果, 将角点插入到其相应的区域内进行角点匹配运算. 本文将对角点的搜索范围扩大到以相匹配区域为中心的 3×3 区域, 并通过去均值归一化相关法进行区域灰度的相关运算, 以确定出初始匹配点对. 对以 2 个待匹配角点为中心的区域进行灰度相关计算, 大于或等于设定阈值的点对被确定为初始匹配点对.

3.2 松弛迭代法消除误匹配

针对初始匹配点对集合中存在一个特征点, 并且同时对应多个匹配点和大量错误匹配点对的情况, 利用松弛迭代法可纠正这类模糊和错误的匹配. 首先, 将相关法得到的初始匹配点对表示为 (m_{li}, m_{2j}) , 其中 m_{li} 是模板图像上的角点, m_{2j} 是资源图像上的角点, 定义 2 个分别以点 m_{li} 和 m_{2j} 为中心、 R 为半径的邻域 $N(m_{li})$ 和 $N(m_{2j})$.

根据连续性准则, 若 (m_{li}, m_{2j}) 为正确的匹配点对, 则在其邻域 $N(m_{li})$ 和 $N(m_{2j})$ 内必然存在更多的正确匹配点对, 将其表示为 (n_{lk}, n_{2l}) , 其中 $n_{lk} \in N(m_{li})$, $n_{2l} \in N(m_{2j})$, 且点 n_{lk} 相对于点 m_{li} 的位置关系与点 n_{2l} 相对于点 m_{2j} 的位置关系相似. 若 (m_{li}, m_{2j}) 是错误的匹配点对, 则在邻域 $N(m_{li})$ 和 $N(m_{2j})$ 内只有很少的匹配点对甚至没有, 据此定义匹配强度

$$S(m_{li}, m_{2j}) = c_{ij} \sum_{n_{lk} \in N(m_{li})} \left(\max_{n_{2l} \in N(m_{2j})} \frac{c_{kl} \delta(m_{li}, m_{2j}, n_{lk}, n_{2l})}{1 + d(m_{li}, m_{2j}, n_{lk}, n_{2l})} \right) \quad (2)$$

$$\bar{d}(m_{li}, m_{2j}, n_{lk}, n_{2l}) = \frac{d(m_{li}, n_{lk}) + d(m_{2j}, n_{2l})}{2} \quad (3)$$

$$\delta(m_{li}, m_{2j}, n_{lk}, n_{2l}) = \begin{cases} e^{-r/\epsilon_r}, & r < \epsilon_r \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

$$r = \frac{|d(m_{li}, n_{lk}) - d(m_{2j}, n_{2l})|}{\bar{d}(m_{li}, m_{2j}, n_{lk}, n_{2l})} \quad (5)$$

式中: c_{ij} 为匹配点对 (m_{li}, m_{2j}) 的相关性系数; c_{kl} 为匹配点对 (n_{lk}, n_{2l}) 的相关性系数; $\bar{d}(m_{li}, m_{2j}, n_{lk}, n_{2l})$ 为点对 (m_{li}, m_{2j}) 和 (n_{lk}, n_{2l}) 的平均距离; δ 为松弛迭代因子; $d(m, n)$ 为点 m 与 n 在欧氏空间下的距离; r 表示点的相对距离偏差; ϵ_r 是相对距离偏差阈值, 在实际计算中, 取 $\epsilon_r = 0.3$.

计算出 $S(m_{li}, m_{2j})$ 后, 用下式衡量其惟一性

$$P(m_{li}, m_{2j}) = 1 - \frac{S'(m_{li}, m_{2j})}{S(m_{li}, m_{2j})} \quad (6)$$

其中 $S'(m_{li}, m_{2j})$ 是指在 (m_{li}, m_{2j}) 的邻域内, 仅次于 $S(m_{li}, m_{2j})$ 的最大匹配强度.

3.3 零交叉法消除误匹配

通过松弛迭代法消除错误匹配后, 匹配点对中还可能存在交叉的情况. 假设 $A-A'$ 和 $B-B'$ 为 2 对匹配点对, 若在模板图像中, A 角点位于 B 角点的左侧, 而资源图像中的匹配角点 A' 位于 B' 的右侧, 此时称 $B-B'$ 匹配对与 $A-A'$ 匹配对水平交叉. 垂直交叉的情况类似, 此时匹配结果不满足顺序性约束条件, 因此必须消除匹配交叉现象. 针对匹配点对存在交叉的情况, 可以利用零交叉法来消除, 包括水平消除和垂直消除, 水平消除过程和垂直消除过程原理相同, 在此仅以水平消除为例进行分析.

对于模板图像中的某个角点, 其对应的匹配角点位于资源图像中的某个区域之中, 假设这对匹配角点对为已知匹配点对, 在模板图像的已知角点周围, 可能存在多组其他匹配角点对与已知匹配角点对产生水平交叉, 实际计算时, 可统计模板图像中的已知角点所在的中心区域范围内的每个角点对应的匹配对的水平交叉数, 删除具有最大水平交叉数的那对匹配, 然后再进行统计计算, 反复进行, 直至所有匹配对的水平交叉数为 0 时终止. 在计算水平交叉数时, 可以根据顺序性约束, 缩小搜索的范围, 将角点搜索范围限制在以已知角点所在区域为中心的左右共 5 列区域内, 因此提高了计算效率. 同理, 对于垂直交叉, 角点的搜索范围可以定为以已知角点所在区域为中心的上下共 5 行区域内.

设模板图像灰度函数为 $f_T(x, y)$, 资源图像灰度函数为 $f_R(x, y)$, $P_T = f_T(i, j)$ 为模板图像的已知角点, $Q_T = f_T(i_0, j_0)$ 是该角点对应的交叉角点

分布范围内的角点,如果 P_T 和 Q_T 及其匹配点满足水平顺序匹配约束,则记 $S(P_T, Q_T) = 0$; 否则,记 $S(P_T, Q_T) = 1$. P_T 的水平交叉数为

$$C(i, j) = \sum_{n \in [0, N]} S(P_T, Q_T) \quad (7)$$

式中: N 为模板图像中交叉角点分布范围内的匹配角点数. 统计总水平的交叉数为

$$T = \sum_{m \in [0, M]} C(i, j) \quad (8)$$

其中 M 为松弛迭代后的匹配点对数. 找出并消除具有最大水平交叉数的匹配角点,其灰度函数为 $f_T(k, l)$,这组匹配角点对的水平交叉数为

$$C(k, l) = \max_{m \in [0, M]} C(i, j) \quad (9)$$

得到新的匹配角点对,进行下一轮处理,直至 $T=0$ 为止.

3.4 最小平方中值法消除误匹配

通过最小平方中值法,将错误的匹配点对从零交叉运算后的匹配点对集合中剔除掉,其原理为通过解下列非线性最小化问题来估计参数

$$\min \text{med}_i r_i^2 \quad (10)$$

$$r_i^2 = d^2(m_{2i}, F_j m_{1p}) + d^2(m_{1p}, F_j^T m_{2i}) \quad (11)$$

$$d(m_{2i}, F_j m_{1p}) = \frac{|m_{2i}^T F_j m_{1p}|}{((F_j m_{1p})_1^2 + (F_j m_{1p})_2^2)^{1/2}} \quad (12)$$

式中: r_i^2 为第 i 对匹配点中各点与对应极线距离的残差平方; F_j 为基础矩阵; m_{1p}, m_{2i} 为匹配点对的矩阵. 在零交叉校正后的 n 对匹配点 $((m_i, m'_i), i=1, 2, \dots, n)$ 中,抽取 m 个样本,每个样本由 $p(p=2)$ 对匹配点组成. 对每个样本,使用二点法计算 F_j ,对每个 F_j ,可确定相对于整个匹配点对集的残差平方的中值

$$M_j = \text{med}_{i=1,2,\dots,n} (d^2(m_{2i}, F_j m_{1p}) + d^2(m_{1p}, F_j^T m_{2i})) \quad (13)$$

对应于最小中值的 F_j 被用于错误匹配点的去除.

4 地貌图像特征匹配实验

根据本文介绍的地貌图像特征匹配算法,对假山模型、阵地模型和立体中国地图模型在不同平移向量条件下拍摄了一系列图像,获得的图像均为 1 280 像素 $\times$ 960 像素,并在匹配之前进行了灰度化处理. 区域匹配效果对照如图 2 所示,程序处理结果显示区域匹配算法能够准确地搜索到 3 幅模板图像中心区域在资源图像中的正确匹配位置,根据图像连续性建立的对应区域匹配对也同样符合正确的匹配关系. 采用图像区域匹配算法可以得到一组准确、可靠的区域匹配对,能够满足后续角点特征匹配的要求.

从表 1 的数据中可以看出,初始匹配点对的数量远远大于所提取出的角点特征数量,表明初始匹配点对中含有大量的错误匹配对,以及一对多个点的错误匹配问题,而随着匹配约束的逐步应用,匹配点对数量在大幅度减少,其中松弛迭代法消除的匹配点对最多. 由最小平方中值法消除错误匹配后确定出的最终匹配角点对,与初始匹配角点对的数量相比有大幅度减少. 在图 2c 的实验中,最终匹配角点对与模板图像角点数量的比值最大为 19.2%,最小为 17.98%.

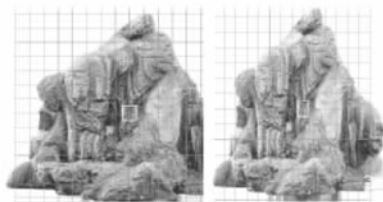
在匹配过程中,各个步骤的耗时情况如表 2 所示. 从表 2 中可以看出,耗时较多的在于区域匹配、松弛迭代法消除误匹配和最小平方中值法消除误匹配的过程. 利用本文所提出的图像特征匹配方法,在计算机主频为 2.8 GHz,内存为 512 MB 的计算机上对 1 280 像素 $\times$ 960 像素的图像进行特征匹配运算,需要耗时 960 s 左右,达到了较高的计算效率.

表 1 角点特征匹配各个步骤匹配点对的结果

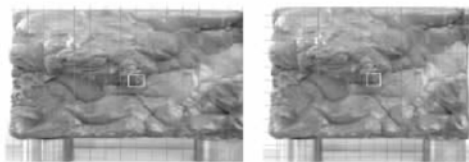
实验编号	模板图像角点数	资源图像角点数	初始匹配数	松弛迭代处理后匹配数	零交叉处理后匹配数	最小平方中值处理后匹配数	最终角点匹配率/%
1	10 589	10 987	88 512	6 113	5 764	2 032	19.20
2	11 957	11 962	99 276	7 897	6 489	2 150	17.98
3	13 825	13 548	96 863	7 113	6 384	2 497	18.10

表 2 图像特征匹配各个步骤的计算耗时情况

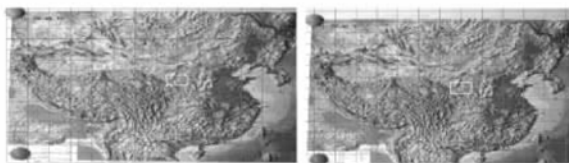
实验编号	区域匹配	初始匹配点对确定	松弛迭代消除误匹配	零交叉消除误匹配	最小平方中值法消除误匹配	总耗时/s
1	221.86	87.83	436.77	31.26	142.58	949.86
2	223.45	89.25	491.45	38.21	164.85	982.34
3	223.15	97.26	405.23	35.42	158.96	945.41



(a)实验1的资源图像 (b)实验1的模板图像



(c)实验2的资源图像 (d)实验2的模板图像



(e)实验3的资源图像 (f)实验3的模板图像

图2 图像区域的匹配实验(1 280 像素×960 像素)

5 结 论

本文针对地貌测量重构中图像特征的特点,通过对图像特征匹配原理的分析,提出了一种地貌图像特征匹配方法.由于在角点特征匹配运算之前先进行了区域匹配,缩小了角点特征匹配运算时的搜索范围,因此可以有效地提高算法的计算效率.大量实验表明,利用该方法对1 280 像素×960 像素的复杂纹理图像进行匹配,计算耗时在960 s左右,而直接进行角点特征匹配则需要数小时.本文算法可有效地对资源图像与模板图像进行区域匹配,并能对错误的匹配角点对进行过滤,可剔除约80%的错误匹配点对,从而保证了角点特征匹配时的准确性和可靠性.由于地貌图像纹理复杂,角点数量多,角点特征错误匹配率很高,因此该算法适用于地貌测量重构时的图像特征匹配运算.本文算法在建立区域匹配对应关系时,利用了匹配区域在水平方向和垂直方向上的连续性假设,因此算法对旋转变换和仿射变换较为敏感.

参考文献:

[1] YAN Ke, SUKTHANKAR R. PCA-SIFT: a more distinctive representation for local image descriptors [C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pat-

tern Recognition. New York, USA: IEEE Computer Society Press, 2004: 506-503.

[2] MILOLAJCZYK K, SCHMID C. A performance evaluation of local descriptors [J]. IEEE Trans: Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27(10): 1615-1630.

[3] LOWE D G. Object recognition from local scale-invariant features[C]//International Conference on Computer Vision. Alamitons, CA, USA: IEEE Computer Society Press, 1999: 1150-1157.

[4] MILOLAJCZYK K, SCHMID C. Scale & affine invariant interest point detectors [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(1):63-86.

[5] MAXIME L, LONG Quan. Robust dense matching using local and global geometric constraints[C]//Proceedings of the 16th International Conference on Pattern Recognition. Alamitons, CA, USA: IEEE Computer Society Press, 2000: 968-972.

[6] BEARDSLEY P, TORT P, ZISSERMA A. 3D model acquisition from extended image sequences[C]//Proceedings of the 4th European Conference on Computer Vision. London, England: Springer-Verlag, 1996: 683-695.

[7] PRITCH P, ZISSERMA A. Matching and reconstruction from widely separated views in 3d structure from multiple images of large-scale environments[C]//Lecture Notes in Computer Science 1506. Freiburg, German: Springer-Verlag, 1998: 219-224.

[8] PILU M. A direct method for stereo correspondence based on singular value decomposition[C]//Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition. San Juan, Piscataway, NJ, USA: IEEE Computer Society Press, 1997: 445-453.

[9] 李峰,周源华.变形系数相关的最小二乘匹配算法[J].上海交通大学学报,1999,33(11):1391-1394.
LI Feng, ZHOU Yuanhua. Distortion parameter correlating least square matching algorithm[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1999, 33(11): 1391-1394.

[10] 李峰,周源华.采用金字塔分解的最小二乘影像匹配算法[J].上海交通大学学报,1999,33(5):513-515.
LI Feng, ZHOU Yuanhua. Least square matching algorithm using pyramid decomposing [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1999, 33(5): 513-515.

[11] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91-110.

(编辑 管咏梅)