

基于匹配支持度的一种稳健性影像匹配

秦绪文¹, 官小平², 关泽群²

(1. 中国国土资源航空物探遥感中心, 北京 100083; 2. 武汉大学遥感信息工程学院, 武汉 430079)

摘要: 提出了一种新的计算匹配支持度数学模型, 该模型使影像匹配的稳健性得到增强。首先, 利用 Harris 算子在影像上提取特征点, 根据相关系数建立特征点的候选匹配对应关系; 然后, 根据影像的长度变形、方向变形、灰度变形及双向一致性条件, 计算匹配支持度; 最后, 根据双向一致性较强条件的松弛迭代法, 消除候选匹配的模糊性。实践结果表明, 该算法能建立一一对应且稳健性较强的匹配结果。

关键词: 匹配支持度; 长度变形; 方向变形; 灰度变形; 双向约束条件

中图分类号: TP 391; P 231.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-070X(2003)03-0041-04

0 引言

在数字摄影测量和计算机视觉中, 单个场景中不同图片同名点的匹配仍是一个瓶颈问题。在过去的 20 a 中, 虽然做了大量的工作, 但其结果仍然不是很满意。匹配算子分为区域匹配、特征匹配以及结构匹配。区域匹配要求有较精确的初始值; 特征匹配在确定特征的对应关系时也需要一些初始值; 结构匹配虽然不要先验知识, 但其结构元不容易准确地检测出来, 这将对结构匹配的发展形成障碍。所以, 特征匹配和区域匹配算子仍是数字摄影测量和计算机视觉中经常使用的算子。近 10 a 来, 计算机视觉研究者更加注意研究算子的稳健性, 因为误差是无可避免的。研究者采用更加严格的数学模型和更多的约束条件, 使误差尽可能小^[1~3, 5, 6]。在文献[1]中, 只从几何方面的角度计算匹配支持度, 未考虑灰度信息, 所以匹配的稳健性较差, 存在较多伪匹配; 在文献[2]、[3]中, 采用了概率松弛法, 以特征

窗口的相关系数作为相容系数, 但此松弛迭代过程是单向的, 不能建立一一对应的匹配, 而且其算法主要适用于航空影像, 对几何形变较大的近景影像不适用。本文采用长度变形、方向变形、灰度变形及双向一致性约束方法, 计算匹配支持度, 使得该匹配算子具有更强的稳健性。

1 匹配支持度的计算

1.1 候选匹配的建立

候选匹配建立之前, 必须在左右影像上提取角点。在数字摄影测量领域, 有大量的角点算子被提出, 这些算子一般分为两类: 第一类, 提取边缘链接成链码; 第二类, 直接以影像的灰度为基础, 提取特征点。在影像匹配中, 一般采用第二类算子。在数字摄影测量中, 兴趣算子用得较多, 其速度快, 精度高, 但是存在着阈值选取的问题。在此, 我们采用 Harris 角点算子, 该算子具有很强的稳健性, 对噪声及光照条件等情况不敏感。其公式如下

$$C(i, j) = \begin{bmatrix} g\det x^2(i, j) & g\det x(i, j) \cdot g\det y(i, j) \\ g\det x(i, j) \cdot g\det y(i, j) & g\det y^2(i, j) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$R(i, j) = \det C(i, j) - k \cdot \text{trace}^2 C(i, j) \quad (2)$$

在(1)、(2)式中:

① \det 表示对影像进行差分运算, $\det x$, $\det y$ 分别表示利用 Sobel 算子对原始影像进行 X、Y 方向差分得到的差分影像;

② $g\det$ 表示对差分影像进行高斯滤波, $g\det x$,

$g\det y$ 表示高斯滤波后得到的差分影像;

③ $R(i, j)$ 为兴趣值;

④ $C(i, j)$ 为 2 像元 \times 2 像元方块矩阵, trace 为矩

阵的迹;

⑤ 计算局部极大值,对矩阵 $R(i, j)$ 中的每一元素,在其 3 像元 \times 3 像元(或 5×5)邻域寻找极大值,若最大值为该元素,则该元素标记为候选特征点;

⑥ 根据 R 值对候选特征点进行排序,其前 n (提取特征点的个数)个为特征点,对特征点进行加权重心化,使其达到子像素精度。 k 一般取 0.04。

$$Score(m_1, m_2) = \sum_{i=-n}^n \sum_{j=-m}^m [I_1(u_1 + i, v_1 + j) - \bar{I}_1(u_1 + v_1)] \cdot [I_2(u_2 + i, v_2 + j) - \bar{I}_2(u_2 + v_2)] / (2n + 1)(2m + 1)\sigma(I_1)\sigma(I_2) \quad (3)$$

$$\bar{I}_k(u, v) = \sum_{i=-n}^n \sum_{j=-m}^m I_k(u + i, v + j) / [(2n + 1)(2m + 1)] \quad (4)$$

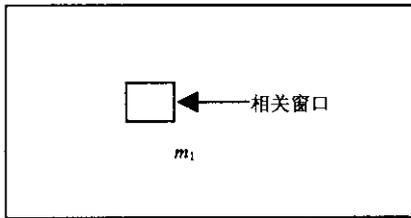
$$\sigma(I_k) = \sqrt{\sum_{i=-n}^n \sum_{j=-m}^m I_k^2(u, v) / (2n + 1)(2m + 1) - I_k^2(u, v)} \quad (5)$$

式中, $I_k(i, j)$ 为影像灰度值; $\bar{I}_k(u, v)$ 为窗口均值; $Score(m_1, m_2)$ 为左右窗口的相关系数; $\sigma(I_k)$ 为方差。

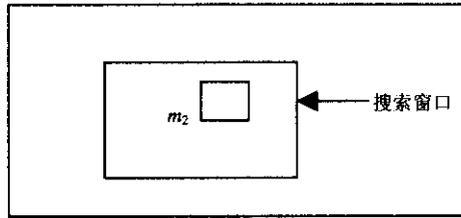
相关系数大小从 -1 到 1 不等,也即从完全不相关到完全相关。给定一对匹配点,如果认为是候选

实验证明,该算子是较理想的角点特征提取算子。

在图 1 影像(a)中,给定一个特征点 m_1 ,以该点为中心,挖取大小为 $(2n + 1)(2m + 1)$ 的相关窗口;在图 1 影像(b)中,以此点位置为中心,选取大小为 $(2u + 1)(2v + 1)$ 的搜索窗口,将特征点 m_1 与搜索窗口中的所有特征点 m_2 做相关匹配,公式如下



影像 (a)



影像 (b)

图 1 候选匹配对的建立

1.2 匹配支持度计算方法

候选匹配若为正确匹配,则其周围有较多的候选匹配,反之所相反。所以,匹配支持度定义为邻域候选匹配对该候选匹配的支持程度。在文献[1]中,匹配支持度的概念被提出,但其公式只考虑几何变形,未利用任何灰度信息。在文献[2]、[3]中,虽未

明确定义匹配支持度的概念,但其迭代公式中有着相类似的变量。此算法未考虑较大的几何变形,而且其松弛迭代过程是单向的,只适用于航空影像。

本文定义匹配支持度的公式如(6)~(9)式,匹配支持度越大,则候选匹配越正确。

$$S_M(m_{1i}, m_{2j}) = \left(\sum_{n_{1k} \in N(m_{1i})} \left[\max_{n_{2l} \in N(m_{2j})} \frac{(1 + C(i, j, k, l) + \delta(i, j, k, l)) \cdot c_{kl}}{2 + \log(\text{dist}(i, j, k, l))} \right] \right) / sn \quad (6)$$

$$\text{dist}(i, j, k, l) = [d(m_{1i}, n_{1k}) + d(m_{2j}, n_{2l})] / 2 \quad (7)$$

$$\delta(i, j, k, l) = \begin{cases} e^{-r/\epsilon_r} & \text{当 } r < \epsilon_r \text{ 和 } \theta \leq \pi/2 \text{ 时} \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (8)$$

$$r = \frac{|d(m_{1i}, n_{1k}) - d(m_{2j}, n_{2l})|}{\text{dist}(i, j, k, l)} \quad (9)$$

参考图 2 对以上公式作如下说明:

① r 为长度变形变量,长度变形越大,对候选匹

配支持程度的贡献越小,当其大于某一阈值 $\epsilon_r = 0.3$ 时,贡献为 0;

② θ 为方向变形变量,当它大于阈值 $\pi/2$ 时,对匹配支持度的贡献为 0,换句话说,也就是影像的方向变形不可能超过 $\pi/2$;

③ $C(i, j, k, l)$ 为灰度变形变量,其描述为图 2 影像(a)中特征点对 (m_{1i}, n_{1k}) 连线特征窗口与图 2 影

像(b)中特征点对 (m_{2j}, n_{2l}) 连线特征窗口的相关系数数值,也就是候选匹配点对 (m_{1i}, m_{2j}) 和 (n_{1k}, n_{2l}) 间的相容系数,相容系数越大,则对匹配支持度的贡献就越大。 $d(m_{1i}, n_{1k})$ 为特征点对 (m_{1i}, n_{1k}) 连线特征窗口的长度, $d(m_{2j}, n_{2l})$ 为特征点对 (m_{2j}, n_{2l}) 连线特征窗口的长度。 $dist(i, j, k, l)$ 为其平均长度;

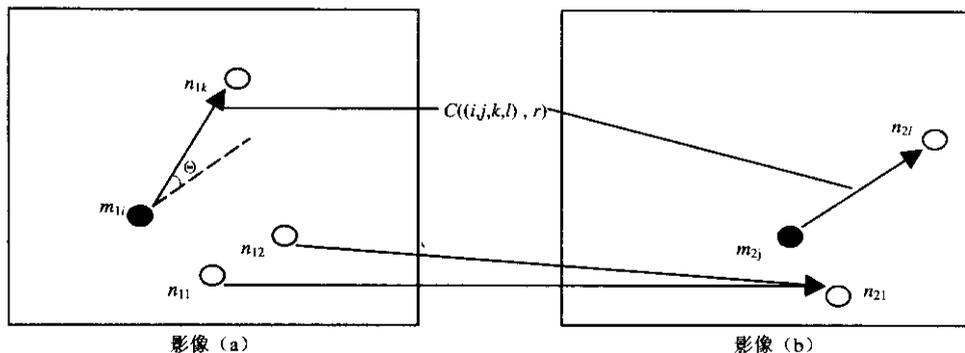


图 2 匹配支持度的计算

为了取得匹配支持的对称,我们对公式做如下修改:在计算和以前,如果有几个点 $n_{1k} \in N(m_{1i})$ 与同一点 $n_{2l} \in N(m_{2j})$ 取得最大值,则只有取得最大值的点被计算。这样左右像对一一对应, $S_M(m_{1i}, m_{2j}) = S_M(m_{2j}, m_{1i})$ 。 sn 为计算总和的匹配点对个数。

2 松弛迭代消除匹配的模糊性

如果我们定义能量函数为所有候选匹配支持度的和,即

$$\Pi = \sum_{(m_{1i}, m_{2j})} S_M(m_{1i}, m_{2j}) \quad (10)$$

则消除匹配模糊性问题等价于最小化能量函数 Π 。松弛法是其中一种方法,其迭代过程如下:

- 迭代{
 - 计算每一个候选匹配支持度
 - 通过最小化能量更新匹配
- }直到能量平衡。

为使能量最小,本文采用如下方法更新匹配。

(1)选择那些具有最大匹配支持度的候选匹配为潜在正确匹配,其思想为:若 (m_{1i}, m_{2j}) 被选为潜在正确匹配,则 (m_{1i}, m_{2j}) 的匹配支持度比与 m_{1i}, m_{2j} 相连的所有候选匹配的匹配支持度都大;

(2)在潜在正确匹配中,根据匹配支持度大小,选择前 $p/100$ 的潜在正确匹配为正确匹配,因为潜在正确匹配支持度越大,其为正确匹配的可靠性越大。为了使迭代不陷入局部极值,本文试验 $p=20$;

(3)消除匹配支持度为 0 的候选匹配,消除所有与正确匹配 m_{1i}, m_{2j} 相连接的候选匹配,重新计算匹

④双向一致性约束条件。以上定义的匹配支持是不对称的,由于计算匹配支持的过程是单向的,也即是 $S_M(m_{1i}, m_{2j}) \neq S_M(m_{2j}, m_{1i})$,所以这种不对称情况当几个点 $n_{1k} \in N(m_{1i})$ 是单个点 $n_{2l} \in N(m_{2j})$ 的候选匹配时发生(图 2)。

配支持度,下一次潜在正确匹配的选择在未被选为正确匹配的候选匹配对中进行;

(4)收敛条件是,被选为正确匹配的匹配支持度大于某一阈值,根据式(6),本文试验获得的匹配支持度为 0.15。

3 试验与结论

根据上述算法,对一幅近景影像进行实验(图 3),图上白色的十字丝表示特征点对。



图 3 配准结果

该影像特征不是很明显,变形较大,而且其表面重复纹理给匹配带来了较大困难。根据本文算法,共获得 211 对特征点。通过这些匹配点对,根据式(11),采用最小方差中值法,可得到稳健的基础矩阵,从而得到外极线方向的视差 Q 值。统计结果如表 1 所示。

$$(x_L \ y_L \ 1)F(x_R \ y_R \ 1)^T = 0$$

$$F = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中, $(x_L \ y_L \ 1)$ 为左像齐次坐标; $(x_R \ y_R \ 1)$ 为右像齐次坐标; F 为基础矩阵。

表 1 匹配结果统计

Q	匹配点对数	百分比/%
≤ 0.1	19	9.0
≤ 0.5	41	19.4
≤ 1	55	26.1
≤ 2	74	35.1
≥ 2	22	10.5

根据以上统计, 该匹配算法中的正确率可达到 90% 左右, 效果比文献 [1] 提出的 60% 正确率略好。影像配准是数字摄影测量与计算机视觉处理的关键环节, 其成功与否直接关系到后续处理。下一步研

究, 将是如何利用匹配好的特征点, 进行射影重建和欧几里德重建。

参考文献

[1] Zhang Z, Derche R, Faugeras O, et al. A robust technique for matching two uncalibrated images through the recovery of the unknown epipolar geometry[J]. Artificial Intelligence Journal, 1995, 78: 87-119.

[2] 吴晓良. 影像匹配的松弛途径[D]. 武汉: 武汉测绘科技大学, 1993.

[3] 张祖勋, 张剑清. 数字摄影测量[M]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1996.

[4] Levy M. A new theoretical approach to relaxation, application to edge detection[A]. Pattern Recognition, 9th International Conference[C]. 1988: 208-212.

[5] Gold S, Rangarajan A. A graduated assignment algorithm for graph matching[J]. IEEE Tans. Patt. Anal. Mach. Intel. 1996, 18(4): 377-388.

[6] Haili Chui, Anand Rangarajan. A new Algorithm for Non-Rigid Point Matching[A]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition[C]. 2000.

A ROBUST MATCHING ALGORITHM BASED ON MATCHING SUPPORT

QIN Xu-wen¹, GUAN Xiao-ping², GUAN Ze-qun²

(1. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing 100083, China;
2. School of Information Engineering in Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract : This paper proposes a new mathematical model for defining the matching support, which can remarkably improve the stability of matching. First, the interesting points are extracted by Harris algorithm, and the candidate matches can be found through correlation. Then the matching support can be calculated according to length distortion, direction distortion, gray distortion, and double faces constraint. Finally, relaxation is used to eliminate ambiguity of the matches. The experiment proves that, with this algorithm, we can establish relatively robust results characterized by one-to-one correspondence.

Key words : Matching support; Length distortion; Direction distortion; Gray distortion; Double faces constraint

第一作者简介: 秦绪文(1977-), 男, 2000 年 6 月获武汉测绘科技大学摄影测量与遥感学士学位, 主要从事遥感地质的科研和生产工作。

(责任编辑: 刁淑娟)