

遥感影像匹配中的反定位误匹配剔除算法

杨 晟¹ 李学军¹ 朱诗兵¹

(1 中国人民解放军装备学院,北京市 3380 信箱 90 号,101416)

摘 要:图像匹配的准确率和精度一直是瓶颈问题,直接制约遥感影像的自动化处理。在简要分析现有典型误匹配剔除方法的基础上,提出了能够适应遥感影像自动化匹配与处理的 REPRAM(Reverse Positioning Refining Algorithm in Matching)算法,给出了 REPRAM 排除法和优选法的原理和性能分析,在不需要相机的外参数、内参数以及控制点的情形下,相对分离了正确同名点与错误同名点之间的相互影响,尽量保留正确同名点,最大限度剔除错误同名点。大量遥感影像和航拍影像测试表明,算法的稳健性强,在初始匹配正确率为 30% 的情况下,在设定误差容限内,算法的可靠率仍能在 99.5% 以上。

关键词:特征匹配;误匹配剔除;最小二乘法;RANSAC 算法

中图分类号:P237.3

图像匹配是遥感图像处理与摄影测量中最重要和最困难的任务^[1],准确率一直是瓶颈问题。点特征匹配由于其良好性能和精度而得到广泛应用^[2],得到尽可能多的匹配点和尽可能少的误匹配是立体匹配中的两个重要方面。虽然很多匹配算法^[3-4]得到了很好的发展和应用,在不同视点较大局部变形下的图像匹配仍是个棘手的问题,并且误匹配难免存在。通常误匹配有两类:① 错误定位造成的误匹配点,这通常由图像中的噪声和定位算子性能引起;② 错误匹配,常由非匹配点的局部相似性等造成。如果前期的初始同名点中有误匹配点,尤其数量较多时,对后续的相机参数估算、相对定向、三角构网和稠密匹配等影响很大。

对于高分辨率影像而言,投影关系通常因密度、光照、变形、各种地形引起的较大畸变等不同,事实上很难完全做到用一个整体的参数或模型来描述图像间的变换关系^[5],而粗差污染常常使得统计规律很不可靠,使得最小二乘估计稳健性非常差^[6]。通常的 RANSAC(random sample consensus)过程逐步排除视差较大的点或距离核线较远的点,而一些外点(偏离拟合模型的匹配点)的影响较为明显,导致很多算法不收敛、收敛于局部极值或者收敛门限很宽。一些针对性的算法在粗差所占数据的比例较大或接近样本的统计

量时,处理效果会有所下降,而且极易受到正确规律与异常匹配的相互干扰,往往牺牲很多正确匹配点。

为了尽量降低正确同名点被判为误匹配点的概率,并在尽可能降低误匹配被判为正确的概率的同时,减少处理过程中误匹配点和正确匹配点之间的相互干扰,提出一种遥感影像自动匹配中的反定位误匹配剔除算法(REPRAM),并对其性能进行了研究和试验测试。其前提是不需要相机参数和相对定向,影像间已经采用一些特征点提取与匹配算法进行了初始匹配;目的是在不同初始正确匹配率下,尤其是初始匹配率较低时,消除匹配中的误匹配点。

1 REPRAM 算法原理与描述

典型的定位系统有 GPS、伽利略(GNS-2)系统和北斗卫星导航定位系统等。其基本原理是通过测量多颗卫星与观测点之间的距离,在已知卫星空间位置的条件下,通过联立测距方程解算观测点的坐标。为了提高测距精度,通常测量观测点与多颗卫星之间的接收时间差进行差分定位。在平面中^[7],假设观测点的坐标为 (X, Y) ,其与各测站 (X_i, Y_i) , $i=1, 2, 3, \dots$ 的距离分别为 $s + s_i$, i

收稿日期:2013-03-20。

项目来源:国防预研基金资助项目(20060826(重大专项))。

$=1, 2, 3, \dots$, 即:

$$(X - X_i)^2 + (Y - Y_i)^2 = (s + s_i)^2 \quad (1)$$

将式(1)逐两项相减, 整理出未知数的系数矩阵 A^* , 常数项向量 b^* , 并采用适当的加权策略, 即加权矩阵 Q_j , 则可采用最小二乘解算出未知点坐标:

$$\begin{bmatrix} X & Y \end{bmatrix}^T = (A^{*T} Q_j A^*)^{-1} A^{*T} Q_j b^* \quad (2)$$

可知, 平面上观测点与3个基站(或具有测距能力的锚节点)即可确定平面空间点的位置。

如果不考虑图像的变形、视角变化和误匹配, 在一幅图中的点与其周围不共线的3个点的距离信息和该三个点的像素坐标, 可在另一幅图中唯一解算该点对应的像素位置。然而, 误匹配在所难免, 具有重叠区域的图像间也难免存在变形。

1.1 算法的思想

为了排除错误的匹配点, 尽量保留正确的匹配点而不受误匹配点的影响, 可假设在第一幅图中的匹配点均正确, 在第二幅图中的匹配点采用“测距信息”(即参考点与临近点之间的像素距离)限制下的定位过程的逆过程(即反定位)对匹配点进行一致性判断, 如果距离的变化在测距误差范围内, 则保留, 否则为误匹配。一致性判断原理为: 对任意正确匹配点, 其周围的测距信息的正确率大于或等于参考区域的初始正确匹配数量(如果某些误匹配点在参考点的正确“测距”圆上活动时, 周围的测距信息的正确率将大于初始正确匹配率); 而对于错误匹配的点而言, 其周围的测距信息的正确率接近0, 只有在某些随机分布的误匹配点正好落在正确“测距”圆上时稍大于0, 但这种巧合的极限值一般不会超过3, 因为平面上不共线3点及距离信息唯一确定平面空间一点。

1.2 算法的描述

图1示意了两块匹配图像同名点的局部分布(10对), 分别对应左右两图的点对为 $[A_i, B_i]$, 用虚线相连, 其中 $i=1, 2, 4, 6, 7, 9, \dots$ 为正确的匹配点对, $i=3, 5, 8, \dots$ 表示误匹配点对。

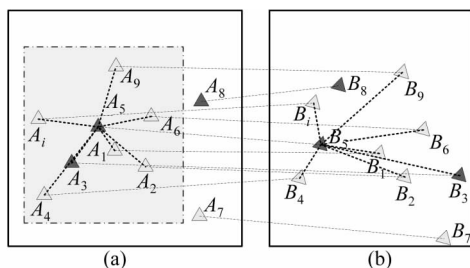


图1 含有误匹配的初始匹配局部示意图

Fig. 1 Part of the Rough Corresponding Points

对于图1(a)中的任意点 A_i , 设 A_i 的像素坐标为 $[x_A(i), y_A(i)]$, 图1(b)中对应的同名点 B_i 的像素坐标为 $[x_B(i), y_B(i)]$ 。假设这10个点均在有效处理范围内, 设 $L_A(i, j) = \sqrt{[x_A(i) - x_A(j)]^2 + [y_A(i) - y_A(j)]^2}$, 相应地, $L_B(i, j) = \sqrt{[x_B(i) - x_B(j)]^2 + [y_B(i) - y_B(j)]^2}$ 。

对于遥感影像, 假设图1(a)中的两点距离和对应图1(b)中两点距离, 有如下对应关系:

$$L_B(i, j) = (s + k)L_A(i, j) + n(i, j) \quad (3)$$

式中, k 为形变系数, 或称测距比例误差, 表示图像的变形与参考点对之间距离的大致比例关系; $n(i, j)$ 表示随机噪声; s 表示参考区域的局部尺度比例因子。对于局部遥感图像来讲, 尤其是相同航线的相邻航片, s 接近1, 在处理该类图像时, 赋值为1。

对于线阵相机, 如果未进行畸变校正的图像局部变形较大, 可放宽 k ; 对于其他不同尺度的图像, 建立 $L_B(i, j)/L_A(i, j)$ 的局部统计直方图, 由于误点的尺度接近随机分布, 而正确的点接近一致分布, 统计信息中只有一个未知数, 不存在多参数间的相关性影响, 故可在局部角度接近一致的约束下稳健地确定最接近的尺度因子 s 。对于透视变形较小的影像对, 可认为整个图像全局间的尺度变化近似一致, 无需多次求解。于是, 定义误差函数:

$$e(i, j) = |L_B(i, j) - sL_A(i, j) - kL_A(i, j)| \quad (4)$$

设 ϵ 为一个相对较小量, 当 $e(i, j) > \epsilon$ 时, 认为“测距”信息不合理; 否则, 认为距离范围合理。然后统计合理的数量和不合理的数量。假设当前处理区域的同名点的总数为 N , 初始匹配正确率为 η 。如果不合理的点的数量超过 m ($m \geq 4$), 认为该点为误匹配点, 记为 REPRAM 排除法; 如果正确的点的数量大于或等于3, 认为该点合理, 记为 REPRAM 优选法。通常情况下, 为了提高算法的运算速度, 只要未被排除掉, 或者被优选, 就认为其为正确的匹配点。

对于具有一定视角变化、尺度变化和一些地形变化比较剧烈的立体相对, 可在局部利用 RANSAC 算法进行仿射变换拟合, 记为 $F_{A \rightarrow B}$, 并提高测距误差容限 k , 即

$$L_B(i, j) = (1 + k)F_{A \rightarrow B}\{L_A(i, j)\} + n(i, j) \quad (5)$$

再利用 REPOSAL 算法处理。

2 REPRAM 算法概率模型与性能分析

假若参考邻域的内接圆的半径为 R , 且 $L_A(i_0, j_0) \leq R$, 如果误匹配点在处理区域内均匀分布, 取随机噪声 $n(i, j)$ 的绝对值的均值, 设为 r , 记 $L_B(i_0, j_0)$ 为 l 。

对于 REPRAM 排除法来讲, 设 $p_1(T)$ 表示最终判断为正确的概率, $p_1(T|F)$ 表示误匹配点被判断为正确的概率, $p_1(F|T)$ 表示正确的匹配点被判断为误匹配的概率, 经过排除法处理后, 则:

$$p_1(T) = \eta[1 - p_1(F|T)] + (1 - \eta)p_1(T|F) \tag{6}$$

其中,

$$p_1(F|T) = \begin{cases} 0, N(1 - \eta) \leq m \\ (1 - \eta)[1 - \pi l(kl + r)/R^2]^m, \text{其他} \end{cases} \tag{7}$$

即在 $N(1 - \eta) > m$ 的情形下, 并且数量为 $N(1 - \eta)$ 的误匹配点中, 超过 m 对同名点分布在合理的测距圆环之外时发生, 该圆环的外半径和内半径分别为 $\pi l + (kl + r)$ 和 $\pi l - (kl + r)$ 。

类似地, 错误的匹配点被判断为正确的概率, 仅当该点在参考范围的正确同名点的数量小于 m , 并且错误的均匀分布的点中分布在有效测距圆环范围之外的数量要小于 $m - N\eta$, 即其中分布在合理测距圆环范围之内的错误点的数量超过 $N(1 - \eta) - (m - N\eta) = (N - m)$ 对, 即:

$$p_1(T|F) = \begin{cases} 0, N\eta > m \\ (1 - \eta)[\pi l(kl + r)/R^2]^{N-m}, \text{其他} \end{cases} \tag{8}$$

当 $R = 36, k = 0.1, r = 1.5, N = 10$ 时, 初始匹配正确率 η 对可靠率的影响如图 2 所示。

对于 REPRAM 优选法, 参考同名点的邻域内同名像点的距离信息不需要全部计算, 符合优选条件的同名点对保留, 即测距信息合理的数量超过 3 个。则 REPRAM 优选法的最终被判为正确的概率为:

$$p_2(T) = \eta[1 - p_2(F|T)] + (1 - \eta)p_2(T|F) \tag{9}$$

其中,

$$E[p_2(F|T)] = \begin{cases} (1 - \eta) [1 - k\pi/3 - \pi r/(2R)]^{3-N\eta}, \\ N(1 - \eta) \geq 3 \text{ 和 } N\eta < 3 \\ 0, N\eta \geq 3 \end{cases} \tag{10}$$

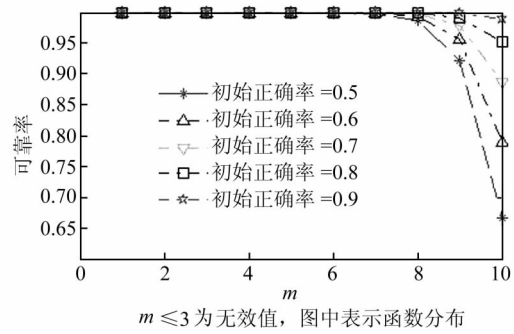


图 2 初始匹配正确率对 REPRAM 排除法可靠率的影响
Fig. 2 Effect Between the Match Ratio and the Reliability for REPRAM Excluding Part

$$E[p_2(T|F)] = \begin{cases} 0, N(1 - \eta) < 3 \\ (1 - \eta)[k\pi/3 + \pi r/(2R)]^3, \text{其他} \end{cases} \tag{11}$$

通常情况下, 参考点邻域的正确同名点数会超过 3 (如果不超过, 增加参考区域范围), 则 REPRAM 优选法的可靠率的数学期望可简化为:

$$E[p_2] = 1 - \frac{E[p_2(T|F)]}{\eta/(1 - \eta) + E[p_2(T|F)]} \tag{12}$$

此时, 初始匹配正确率 η 对可靠率的影响如图 3 所示。

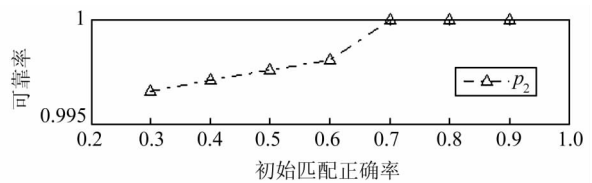


图 3 初始匹配正确率对 REPRAM 优选法可靠率的影响

Fig. 3 Effect Between the Match Ratio and the Reliability for REPRAM Including Part

对于 REPRAM 排除法, 当 $N\eta > m$ 与 $N(1 - \eta) > m$ 同时满足时, 存在最优临界条件, 可靠性几乎等于 100%。此时, 需要参考同名点的邻域内的同名点总数应超过 $2m$, 并且正确的同名点的数量和错误的同名点的数量均应超过 m 。对于 REPRAM 优选法, 当参考点邻域正确同名点的数量超过 3 个和误匹配点的数量少于 3 个时, 算法的可靠性会出现最高。

由于误匹配分布的规律与图像特征和匹配算法均有关, 不难证明, 如果误匹配点的分布服从高斯分布, 剔除算法的可靠性会提高; 误匹配点的分布服从随机分布时, 性能和均匀分布相近。对于测距误差范围内的误匹配点, REPRAM 算法不能有效处理, 此时, 可以采用更合理的“测距误

差”模型进行优化,或者从匹配算法上进行局部特征点临近抑制。特别地,如果局部的误匹配比例非常高,正确的匹配数量少于3个时,这些区域的点将被全部剔除,此时,可以适当增大参考点邻域的范围,使绝大部分该情形下的处理区域内的正确匹配点的数量超过3个。

3 算法的实现与讨论

为了从一定程度上验证 REPRAM 算法的实际效果,分别与一般的统计规律剔除方法^[8],视差估计剔除算法^[9],最小二乘局部仿射模型拟合算法(最小二乘)进行了对比。第一组图片为嫦娥二

号月图片段(左,~7 m/pixel,2010-10)与日本月亮女神对应片段(右,~7 m/pixel,2007-09),场景大小约为 5.6 km×4.2 km,为不同相机拍摄的推扫式相机影像;第二组为宽基线下不同视角拍摄的中国字画的处理效果(0.12 cm/pixel,字画 5 m×3 m),同时存在较大变形、旋转、尺度和视角变化;第三组为保定某鉴定场的航拍遥感影像测试效果(6 cm/pixel,530 m×402 m)。试验中,初始匹配方法为 SIFT 算法^[10,11],正确率为匹配数量与经过最小二乘确认和人工逐点确认后匹配数量的比,分别见图 4 和表 1,表 1 中的(a)、(b)、(c)行与图 4(a)~4(c)对应。

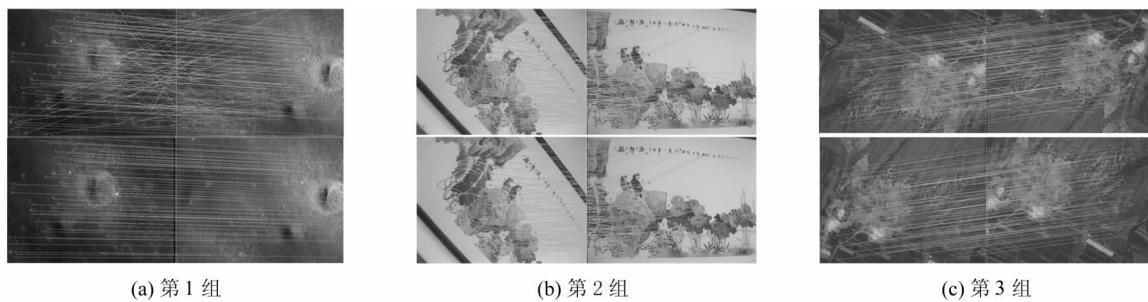


图 4 初始匹配与本文 REPRAM 算法处理后效果

Fig. 4 Disposing Results of REPRAM for Image Pairs

表 1 几种算法的剔除效果

Tab. 1 Refining Results of Several Methods

	初始匹配		统计规律剔除		视差估计剔除		最小二乘拟合剔除		本文 REPRAM 算法	
	数量	正确率/%	结果点数	正确率/%	结果点数	正确率/%	结果点数	正确率/%	结果点数	正确率/%
图 4(a)	163	42	3	0	36	27	145	34	54	100
图 4(b)	186	76	8	100	54	86	143	92	142	100
图 4(c)	127	85	109	100	79	88	127	83	109	100

经过大量测试和数值分析, m 取值 $4 \sim N(1 - \eta)$ 之间较为合理, k 的取值在 $[0.01, 0.2]$ 内即可。在不知道初始匹配正确率时,可采用缺省值 0.5; k 接近透视变形以及相机畸变在局部的比例关系,通常比较小,比如取 0.1,有效测距范围越大,误差的范围越大,区分能力越差。

通常,在 $\eta > 0.5$ 时,采用 REPRAM 优选法或 REPRAM 排除法并用,即当判断符合优选或排除算法要求时,参考点与其他的点的距离不需要继续解算,此时的可靠性大于 REPRAM 优选法和 REPRAM 排除法的最低可靠率,例如当 $m \in [4, 6]$ 时,可靠率超过 97%。当初始匹配正确率较低时,建议仅采用 REPRAM 优选法,例如 $\eta = 0.3$ 时,在设定的误差函数下,可靠率超过 99.5%。上述测试中,均达到 100%。

4 结 语

本文提出了能够适应遥感影像自动化匹配与处理的 REPRAM 算法,给出了 REPRAM 排除法和 REPRAM 优选法的原理和性能分析,算法在处理过程中分离了正确同名点与错误同名点之间的相互影响,能够尽可能剔除错误的同名点,同时保留正确的同名点,具有很高的可靠性,可在较低的初始匹配正确率下(大于 0.3)获得非常可靠的处理效果。而且,REPRAM 算法能够适应图像的旋转、变形及尺度变化,具有很强的稳健性,这将为遥感影像的自动化匹配与处理提供重要保证。

参 考 文 献

- [1] Xing Y J, Meng J J, Sun J, et al. An Improved Region-growth Algorithm for Dense Matching [J]. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2006(18):323-326
- [2] 邓宝松,高宇,魏迎梅,等. 一种评价仿射不变性特征定位误差的新方法[J]. 中国图像图形学报, 2008(13):291-297
- [3] Li Jing, Allinson N M. A Comprehensive Review of Current Local Features for Computer Vision[J]. Neurocomputing, 2008(71):1 771-1 787
- [4] Mikolajczyk K, Tuyelaars T, Schmid C, et al. A Comparison of Affine Region Detectors[J]. International Journal of Computer Vision, 2005, 65(1/2): 43-72
- [5] Megyesi Z. Dense Matching Methods for 3D Scene Reconstruction from Wide Baseline Images [D]. France; Eotvos Lorand University, 2009
- [6] 郭建锋,赵俊. 粗差探测与识别统计检验量的比较分析[J]. 测绘学报, 2012,5(1):14-18
- [7] Yang Sheng, Zhu Shibing, Tang Yueping. A Robust 3D Ranging and Analytic Location for Mobile Wireless Sensor Nodes[C]. ICIECS 2009, Wuhan, China, 2009
- [8] 熊艳艳,吴先球. 粗大误差四种判别准则的比较和应用[J]. 大学物理实验, 2010(23): 66-68
- [9] 王旭,王旭,王彤. GPS 高程拟合中剔除粗差的方法[J]. 测绘工程, 2009(18):55-62
- [10] 刘进,闫利. 图像相关匹配算法的快速实现[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2007,32(8):684-687
- [11] 李芳芳,肖本林,贾永红. SIFT 算法优化及其用于遥感影像自动配准[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, 34(10): 1 245-1 249

第一作者简介:杨晟,博士生。主要研究方向为遥感图像自动处理、数字地球、无线传感器网络以及对应系统的研制与开发工作。
E-mail:1019_yangsheng@sina.com

The Reverse Positioning Refining Algorithm for Auto-matching of the Remote Sensing Images

YANG Sheng¹ LI Xuejun¹ ZHU Shibing¹

(1 The Academy of Equipment, P. O. X 3380, Beijing 101416, China)

Abstract: Image matching is one of the most important and challenging areas in computer vision and remote sensing. Especially for the wide base line images with large distortions, the accuracy and reliability of the matching is a bottleneck in the auto-disposition given the large volume of images. Based on an analysis of the latest refining methods, the Reverse Positioning Refining Algorithm in Matching (REPRAM) composed of REPRAM Excluding and the REPRAM Including parts is proposed. The theory and properties are discussed in relation to the refining ability for excluding more bads and including more rights, where the mutual impact is separated. Thus, there is no need for extrinsic and intrinsic parameters of the camera or control points. Although the original reliability of the rough couples is about 30 percent, the algorithm works robustly with a high degree of reliability above 99.5 percents under the ranging error threshold for several kinds of remote sensing images as well as for close shot pictures.

Key words: feature matching; mismatch refining; least square method; random sample consensus algorithm

About the first author: YANG Sheng, Ph. D candidate. He majors in the auto-disposing of remote sensing imagery, digital earth, wireless sensor networks, and the implementation of the application systems.

E-mail: 1019_yangsheng@sina.com