

文章编号 1004-924X(2013)08-2146-08

应用尺度不变特征变换的多源遥感影像特征点匹配

刘志文^{1,2,3*}, 刘定生¹, 刘 鹏¹

(1. 中国科学院 对地观测与数字地球科学中心, 北京 100094;
2. 中国科学院 电子学研究所, 北京 100190; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:针对多源遥感影像之间灰度值非线性变化导致特征点匹配率大幅度下降的问题,提出了一种利用光谱信息的多源遥感影像特征点匹配算法。首先,以光谱信息对遥感影像波段进行线性拟合,使待匹配影像与参考影像之间的灰度值由非线性转变为线性或者近似线性变化。接着,在拟合的遥感影像上采用改进的尺度不变特征变换(SIFT)算法进行匹配。最后,采用随机抽样一致性算法剔除误匹配点对。与常用特征点检测算法(SIFT, 梯度位置朝向直方图(GLOH), RS-SIFT)的对比实验结果表明,本文所用的 ETM+ 影像全色与多光谱影像的特征点匹配率提高了 4% 左右,CBERS-02B 和 HJ-1B 卫星多光谱影像的正确特征点匹配个数增加了 8 对。因此,在多源遥感影像特征点匹配中,本文所提算法优于其它检测算法,可以极大地改善匹配效果。

关键词:图像处理;特征点匹配;尺度不变特性变换(SIFT);多源遥感影像;多光谱

中图分类号:TP752;TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132108.2146

SIFT feature matching algorithm of multi-source remote image

LIU Zhi-wen^{1,2,3*}, LIU Ding-sheng¹, LIU Peng¹

(1. *Center for Earth Observation and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;*
2. *Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;*
3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)
** Corresponding author, E-mail: zwliu@ceode.ac.cn*

Abstract: Many traditional feature point algorithms can not handle more complex nonlinear brightness changes because the gray between multi-source remote sensing images is nonlinear changes. To cover the shortage, a Scale Invariant Feature Transform(SIFT) feature matching algorithm of multi-source remote sensing images was proposed. First, the approximate linear gray value between multi-source remote sensing images was achieved through linear fitting of the bands of the images. Then, an improved SIFT algorithm was adopted to match the fitted remote sensing images. Finally, the random sample Consensus algorithm was used to remove the false matching point pairs. In comparison with other feature matching algorithms (SIFT, Gradient Location Orientation Hologram(GLOH), RS-SIFT). The experimental results show that the feature matching rate increases by about 4% between ETM+ panchromatic and multispectral images and the number of correct matches of key points in-

收稿日期:2012-12-25;**修订日期:**2013-02-16.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 41001265);国家发展改革委员会“遥感卫星应用国家工程实验室建设”项目(No. O92601101C)

creases by about 8 point pairs between CBERS-02B and HJ-1B images. It concludes that the proposed method significantly outperforms many state-of-the-art methods under multi-source remote sensing images.

Key words: image processing; feature point matching; Scale Invariant Feature Transform (SIFT); multi-spectral remote image; multi-spectra

1 引 言

尺度不变特征变换 (Scale Invariant Feature Transform, SIFT) 是一种基于点特征的特征检测描述方法^[1]。该算法具有缩放、旋转和部分仿射不变性,能够抗拒一定光照变化和视点变换,这种特征有较高的辨别能力,因此, SIFT 算法广泛应用于各种图像匹配技术中,尤其在计算机视觉和模型识别方面有很多成功的应用^[2-6]。但是,在遥感领域中,由于波段或传感器不同,遥感成像的灰度值呈非线性变化,而 SIFT 算法只能抗拒光照条件下的灰度值线性变化或近似线性变化,因此无法解决多源遥感图像特征点匹配问题。

针对多源影像特征点匹配算法问题,目前存在的算法主要有:Z. Yi, C. Z 和 X. Yang^[7]提出的 SR-SIFT 算法,该算法通过用尺度限制剔除误匹配点对,从而提高匹配精度。pMustafa Teke 和 Alptekin Temizel^[8]也对 SURF 算法进行了类似处理。Jian Chen 和 Jie Tian 用“对称 SIFT”解决了由于灰度值变化导致的匹配影像特征点的主方向与参考影像特征点主方向成 180°的情况^[9],但其不适用其它情况。Mehmet Firat VURAL, Yasemin YARDIMCI, Alptekin TEMIZEL 也作了一些相似的研究^[10]。Mahmudul Hasan^[11]在 SIFT 算法的基础上,提出除了利用特征点的描述算子外,还增加了特征点之间的空间领域信息进行匹配。Feng Tang 和 Suk Hwan Lim 则提出了一种新的 SIFT 描述算子 OSID (Ordinal Spatial Intensity Distribution)^[11-12],此描述算子对灰度值单调变化的情况有不变性,他们认为灰度呈单调增长的变化情况具有普遍性。实际上,在遥感领域中,多源影像的灰度值之间变化更复杂,而不仅仅是单调增长一种情况。

总之,虽然这些算法对多源遥感影像的特征点匹配有一定的改进效果,但须有匹配条件的限

制,没有从本质上解决这个问题。本文结合 SIFT 特点,利用光谱信息拟合的多源遥感影像,使待匹配影像与参考影像之间的灰度值由非线性转变为线性或者近似线性,并且利用位置一致性算法去除误匹配点对^[16]。与常用特征点匹配算法比较,该算法可以获得较多的匹配点。

2 尺度不变特征变换

2004 年,David. G. LOWE^[1]在总结现有的基于不变量技术的特征检测方法的前提下,提出了一种基于尺度空间的,对图像缩放、旋转、平移及灰度线性变化具有不变性的图像局部特征点描述子。该算法首先在尺度空间进行特征检测,并确定关键点的位置和所处的尺度,然后使用关键点邻域梯度的主方向作为该点的方向,以实现算子对尺度和方向的无关性,从而得到一种对尺度和方向无关的算子。SIFT 匹配算法包括以下几步:

(1) 尺度空间极值提取

在图像多尺度空间中寻找每一个尺度空间中的极值点,得到极值点所在像素的位置。

(2) 亚像素精度和候选特征点筛选

获得以浮点数表示的精确位置,剔除低对比度极值点和在边缘上容易受噪声影响的候选特征点。

(3) 候选特征点方向赋值

对每一个候选特征点邻域像素点梯度进行高斯加权,获得对应的梯度幅度大小和梯度方向。把梯度方向平均划分为 36 个区间形成了一个直方图。直方图中值最大的区间为主要方向,最大值为梯度的幅度值。

(4) 计算特征点描述算子

计算以每一个特征点为中心的区域每个像素的梯度值,使用 128 维的特征描述向量对其进行描述。

(5) 特征点匹配

2 个匹配特征点,最近的欧式距离与次近的欧式距离小于某个比例阈值,则认为正确匹配点对。

3 多源遥感影像特征点匹配技术

针对多源遥感影像特征点匹配存在的问题,本文在 SIFT 特征点匹配算法改进的基础上,提出了一种适合于多源遥感影像的特征点匹配技术。首先利用光谱信息对多源遥感图像进行线性拟合,使匹配影像的灰度值之间尽量满足线性变化;再用改进的 SIFT 算法匹配特征点;最后,采用随机抽样一致性算法(RANSAC)^[23] 除去候选匹配点中的误匹配点对。具体的算法流程如下:

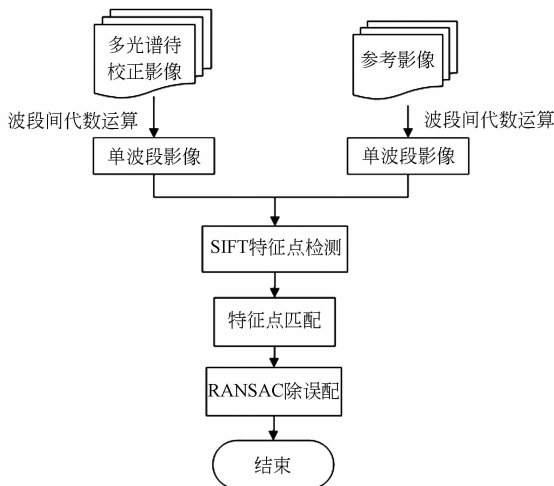


图 1 多源遥感影像匹配流程图

Fig. 1 Flowchart of feature matching algorithm for multi-source remote sensing images

3.1 多光谱影像光谱特性分析

在相同频率范围内的相同地物具有一致的地物光谱特征(反射、吸收、辐射),这些特征不随成像条件的改变而变化。因此,在成像条件一致的情况下,频率范围相同的多源遥感影像中的对应像素,灰度呈近似线性变化。证明如下:

在入射光强度大小不同,其它成像条件相同的情况下,假设待匹配影像成像时光强度是参考影像成像时光强度的 n 倍,由于为同一地物点,那么对应的反射率是相同的,故两影像的入瞳辐亮度对关系如下:

$$L_1(\lambda) = n * L_2(\lambda), \quad (1)$$

式中, $L_1(\lambda)$ 为待匹配影像一像素点的入瞳辐亮度, $L_2(\lambda)$ 为参考影像对应像素点的入瞳辐亮度。入瞳辐亮度 $L(\lambda)$ 与影像值 DN 之间具有如下关系:

$$L(\lambda) = L_{\min}(\lambda) + \frac{L_{\max}(\lambda) - L_{\min}(\lambda)}{255} \times DN, \quad (2)$$

其中,假定影像灰度值为 $0 \sim 255$, $L_{\max}(\lambda)$ 和 $L_{\min}(\lambda)$ 分别为灰度值 255 和 0 时的光谱辐亮度。

结合式(1)和式(2)可得如下结论:

$$DN_1 = a \times DN_2 + b. \quad (3)$$

$$a = n \times \frac{L_{2\max} - L_{2\min}}{L_{1\max} - L_{1\min}}$$

$$b = \frac{n \times L_{2\min} - L_{1\min}}{L_{1\max} - L_{1\min}} \times 255$$

其中, DN_1 为待匹配影像的像素值, $L_{1\max}$ 和 $L_{1\min}$ 分别为待匹配影像光谱辐亮度最大和最小值; DN_2 为参考影像对应像素值, $L_{2\max}$ 和 $L_{2\min}$ 分别为参考影像光谱辐亮度的最大和最小值。

3.2 多光谱影像波段拟合

根据上节的分析,有如下结论:在成像条件一致的情况下,相同频率范围的两幅遥感影像波段的对应像素灰度值呈线性变化,理论上能获得较好的特征点检测效果。为了获得相同频率范围的两幅待匹配的遥感影像,下面分两种情况进行描述:

(1) 波段和多光谱波段拟合

大多数卫星上同时搭载有全色和多光谱传感器。理想情况下,各个多光谱波段可以较好地分离且与全色波段覆盖的光谱范围相同。理论上全色波段的辐射能量等于各多光谱波段辐射能量的总和。因此,可以定义几个权重来估计全色波段的辐射值。故全色波段与其光谱范围覆盖下的多光谱波段近似满足如下线性关系:

$$Pan = \sum_i \omega_i MS_i, \quad (4)$$

式中, Pan 为拟合的全色波段, MS_i 为全色波段光谱范围覆盖下的多光谱波段, ω_i 为相应波段的加权系数。加权系统的确定至关重要,这里根据 Boggione 等提出的全色与多光谱传感器的光谱响应曲线覆盖的面积^[20] 得到拟合系数。这样就可以用拟合的 Pan 波段与真实的全色波段进行特征点匹配。

(2) 多光谱影像拟合

按照 Z. Zeng^[21-22] 的描述,多光谱遥感影像

中每一个像素可以用二次多项式进行表达:

$$\hat{D} = a + b\lambda + c\lambda^2, \quad (5)$$

在式(1)中, \hat{D} 是灰度值 D 的拟合值, D 是波段影像中像素的实际灰度值。 λ 是多光谱影像中的波长变量; a, b 和 c 为二次多项式中的估计系数。

当解算出拟合表达式后,可以得到表达式 $\hat{D} = a + b\lambda + c\lambda^2$ 中在波长值为 λ_0 的 \hat{D} 值。因此,可以得到在相同波长处的两幅单波段遥感影像,而且两幅单波段遥感影像对应像素的灰度值呈近似线性变化。

3.3 波段拟合后影像特征点提取

对多源遥感影像进行拟合处理后,拟合后的遥感影像灰度值之间仍然与真正的线性变化有一定的差距,但在大尺度下它们之间更接近于线性变化,所以在建立尺度空间时,可以适当提高尺度因子,本文中采用的尺度因子为 $\sigma = 1.5$ 。

3.4 特征点匹配

在匹配点对中主要存在两种匹配错误情况:第一种是尺度相差较大的匹配点对错误^[11];第二种是在不对应的位置确实存在距离很“近”的点。对于第一种错误应考虑分辨率相同的两幅遥感图像在理想状态下它们相同位置的特征点应该在尺度空间相同组中检测到,所以在匹配特征点中,选取的尺度限制应与遥感影像分辨率比值相一致。对于第二种错误,通常采用提高比例阈值来减少这种误匹配,本实验中比例阈值取 2.5。

3.5 误匹配点剔除

虽然在上一步中采取提高比例阈值来减少第二种错误,但仍存在误匹配点对。本文采用随机抽样一致性算法(RANSAC)^[23]去除候选匹配点中的误匹配点对。

4 测试实验

在测试实验中,分别对全色与多光谱波段之间和不同传感器的多光谱影像之间进行特征点匹配,并且与 SIFT、GOM-SIFT、SR-SIFT 算法的检测效果进行比较。

4.1 全色与多光谱波段特征点匹配

在遥感应用中,往往需要对不同波段进行匹

配,尤其是多光谱波段与全色波段。实验中采用拟合的全色波段与全色波段匹配的方法。由于拟合的全色波段与多光谱波段大小相同,因此,将拟合的全色波段与真实的全色波段进行特征点匹配,实质上是对全色与多光谱波段特征点匹配。另外拟合后的全色波段与真实全色波段对应位置灰度值之间有更好的线性变换,因此,此方法能获得更好的匹配效果。

以 2001 年 9 月 11 日俄罗斯哈巴罗夫斯克边疆区奥列利湖附近的 ETM + 影像(path/row112/022)为例进行测试实验。

(1) 拟合影像

根据 Boggione^[20]等计算得到的拟合系数,取波段 2, 3, 4 作为待拟合影像,加权系数分别为: $\omega_2 = 0.25, \omega_3 = 0.23, \omega_4 = 0.52$,那么拟合的全色波段表达式为:

$$Pan = \omega_2 MS_2 + \omega_3 MS_3 + \omega_4 MS_4. \quad (6)$$

(2) 特征点匹配

本文算法利用拟合的全色波段与真实的全色波段进行特征点匹配。在 SIFT、GOM-SIFT、SR-SIFT 检测算法中,随机选取多光谱中任一波段(实验选用波段 3)与真实的全色波段特征点匹配。

匹配效果如图 2 所示,图 2(d)为本文算法的特征点检测效果图,其总匹配点对为 242 对,正确匹配率为 100%。图 2(a)、2(b)、2(c)分别为采用 SIFT、GOM-SIFT、SR-SIFT 检测算法进行特征点检测的结果,SIFT 匹配算法的总匹配点对为 97 对,正确匹配率为 95.88%,GOM-SIFT、SR-SIFT 与 SIFT 类似。由表 1 可见本文提出的方法明显的好于其它算法。

表 1 全色与多光谱波段特征点匹配算法比较

Tab. 1 Comparison of feature matching algorithms between panchromatic and multi-spectral bands

算法	PAN 和 MS		
	匹配数	正确匹配数	正确率
SIFT	97	93	95.88%
GOM-SIFT	97	93	95.88%
SR-SIFT	92	89	96.74%
本文算法	242	242	100%

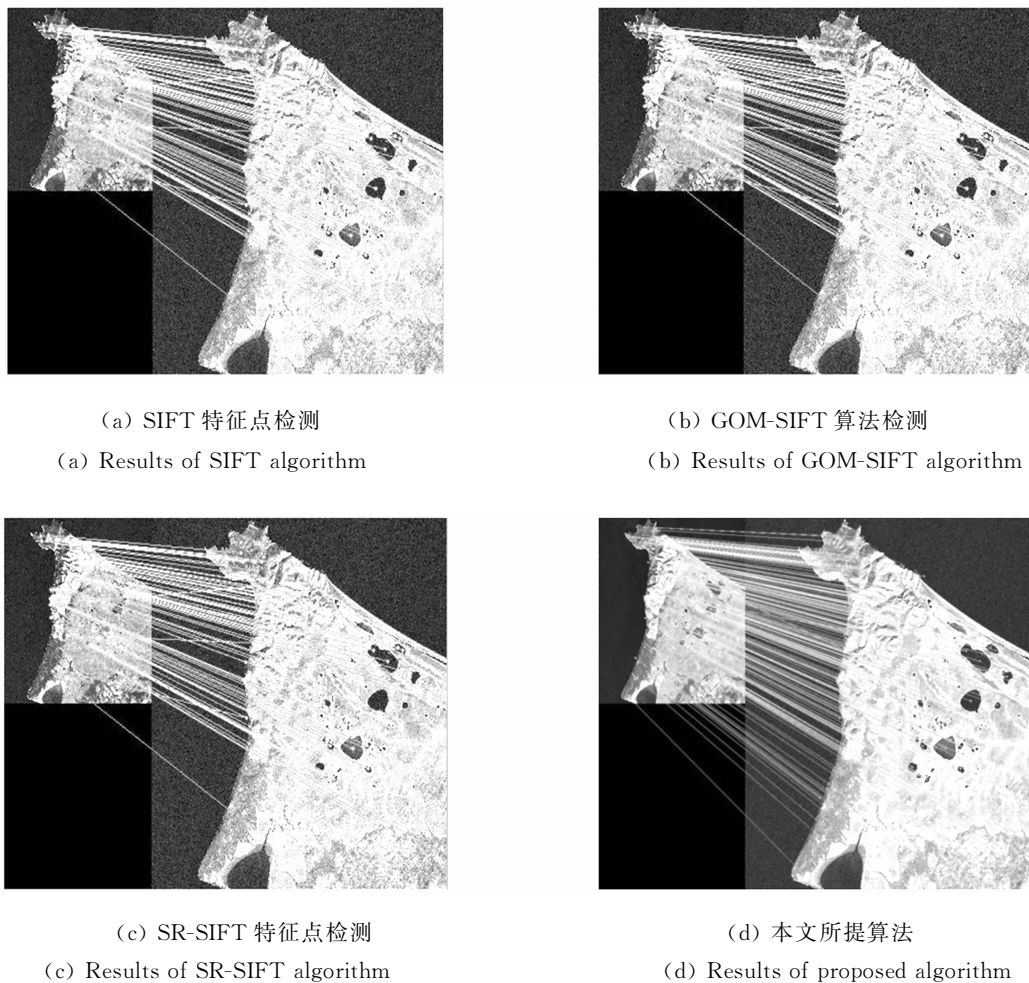


图 2 全色与多光谱影像匹配示意图

Fig. 2 Feature matching between Pan and multispectral images

4.2 多光谱与多光谱影像特征点匹配

采用 CBERS-02B 卫星的多光谱影像和 HJ-1B 卫星的多光谱影像进行测试实验。

(1) 拟合影像

取 CBERS-02B 多光谱影像中的 4 个波段及 HJ-1B 影像中的 4 个波段进行线性拟合。CBERS-02B 的 4 波段中心波长分别为 0.49、0.597、0.67、0.82，HJ-1B 的 4 波段中心波长分别为 0.485、0.56、0.66、0.88。按公式(5)进行拟合后，得到两组拟合系数及表达式。取相同波长 $\lambda_0 = 0.49 \mu\text{m}$ ，代入各自表达式中，可以得到相同波长处的两幅单波段遥感影像。

(2) 特征点匹配

本文算法在拟合的两幅影像之间进行特征点匹配；在 SIFT、GOM-SIFT、SR-SIFT 检测算法

中，分别随机选取 CBERS-02B 多光谱影像和 HJ-1B 多光谱影像中任一波段（本实验 CBERS-02B 影像采用波段 1，HJ-1B 影像采用波段 3）进行特征点匹配实验。

表 2 多光谱影像特征点检测算法的比较

Tab. 2 Comparison of feature point detection algorithms for multispectral images

算法	CBERS-02B 和 HJ-1B		
	匹配数	正确匹配数	正确率
SIFT	4	4	100%
GOM-SIFT	4	4	100%
SR-SIFT	4	4	100%
本文算法	12	12	100%

匹配效果如图 3 所示,图 3(d)为本文算法的特征点检测效果图,本文所提算法总匹配点对为 12 对,正确匹配率为 100%。图 3(a)、3(b)、3(c)分别采用 SIFT、GOM-SIFT、SR-SIFT 检测算法

进行特征点检测实验,在 SIFT 检测算法中,总匹配点对为 4 对,正确匹配率为 100%,GOM-SIFT、SR-SIFT 算法与 SIFT 类似。本文提出的方法明显的好于其它算法。

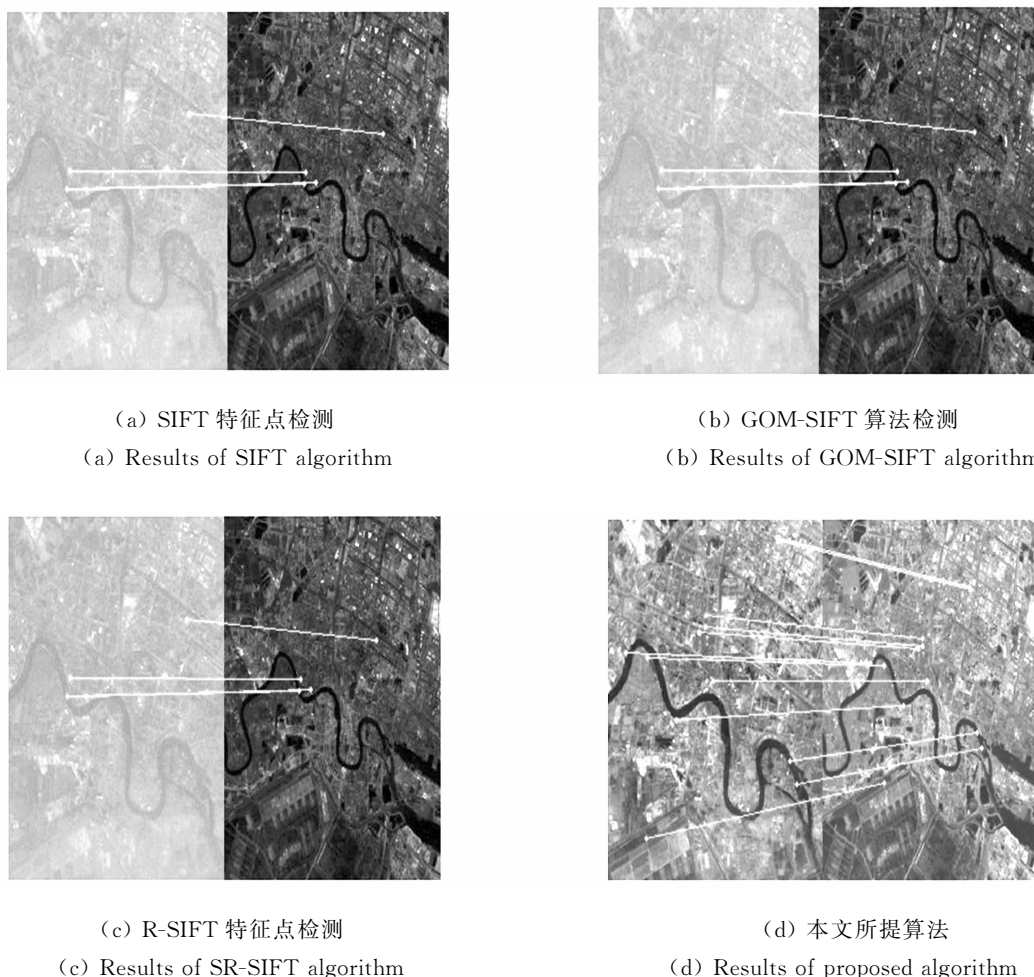


图 3 CBERS-02B 与 HJ-1B 多光谱影像匹配示意图

Fig. 3 Feature matching of multispectral images for CBERS-02B and HJ-1B

5 结 论

本文针对多源遥感影像之间由于灰度值非线性变化,导致特征点匹配率下降的问题,提出了一种利用光谱信息的多源遥感影像特征点匹配算法。利用遥感影像的光谱信息使多源遥感影像之间灰度值由非线性变化转变为线性或者近似线性变化,从而减少了由于灰度值之间的非线性对特

征点匹配的影响。通过与其它特征点匹配算法的对比实验表明,所用的 ETM+ 影像的全色与多光谱波段的特征点匹配率提高了 4% 左右, CBERS-02B 和 HJ-1B 卫星多光谱影像的正确特征点匹配增加了 8 对。因此,在多源遥感影像特征点匹配中,本文提出的特征点匹配算法可以得到更多的匹配点对和正确的匹配点对,本文提出的方法对于提高多源遥感影像特征点匹配率具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004,60(2):91-110.
- [2] 李英,李静宇,徐正平. 结合 Surf 与聚类分析方法实现运动目标的快速跟踪[J]. *液晶与显示*, 2011, 26(4):544-550.
- LI Y, LI J Y, XU ZH P. Moving target fast tracking using SURF and cluster analysis method [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2011,26(4):544-550. (in Chinese)
- [3] 丘文涛,赵建,刘杰. 结合区域分割的 SIFT 图像匹配方法[J]. *液晶与显示*, 2012,27(6):827-831.
- QIU W T, ZHAO J, LIU J. Image matching algorithm combining SIFT with region segmentation [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012,27(6):827-831. (in Chinese)
- [4] ZHOU H Y, YUAN Y, SHI CH M. Object tracking using SIFT features and mean shift [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2009,113(3):345-352.
- [5] 纪华,吴元昊,孙宏海,等. 结合全局信息的 SIFT 特征匹配算法[J]. *光学精密工程*, 2009,17(2):439-444.
- JI H, WU Y H, SUN H H, *et al.*. SIFT feature matching algorithm with global information [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(2):439-444. (in Chinese)
- [6] ZHAO Z S, TIAN Q J, WANG J Z, *et al.*. Image match using distribution of colorful SIFT [C]. 2010 *International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition (ICWAPR)*, 2010:150-153.
- [7] YI Z, ZHIGUO C, YANG X. Multi-spectral remote image registration based on SIFT [J]. *Electronics Letters*, 2008,44(2):107-108.
- [8] TEKE M, TEMIZEL A. Multi-spectral satellite image registration using scale-restricted SURF [C]. *20th International Conference on Pattern Recognition (ICPR)*, 2010:2310-2313.
- [9] CHEN J, TIAN J. Real-time multi-modal rigid registration based on a novel symmetric-SIFT descriptor [J]. *Progress in Natural Science*, 2009,19(5):643-651.
- [10] VURAL M F, YARDIMCI Y, TEMIZEL A. Registration of multispectral satellite images with orientation-restricted SIFT [C]. *IEEE International Conference on Science and Remote Sensing Symposium*, 2009:III-243-III-246.
- [11] TANG F, LIM S H, CHANG N L. An improved local feature descriptor via soft binning [C]. *17th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, 2010:861-864.
- [12] TANG F, LIM S H, CHANG N L, *et al.*. A novel feature descriptor invariant to complex brightness changes [C]. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2009:2631-2638.
- [13] BOGGIONE G, PIRES E, SANTOS P, *et al.*. Simulation of a Panchromatic band by spectral combination of multispectral ETM+ bands [C]. *in Proc. ISRSE, Honolulu*. 2003.
- [14] ZENG Z. A new method of data transformation for satellite images: I. Methodology and transformation equations for Tm images [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2007,28(18):4095-4124.
- [15] ZENG Z. A new method of data transformation for satellite images: II. transformation equations for spot, noaa, ikonos, quick bird, aster, mss and other images and application [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2007,28(18):4125-4155.
- [16] FISCHLER M A, BOLLES R C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography [J]. *Communications of the ACM*, 1981,24(6):381-395.

作者简介:



刘志文(1979—),男,湖北天门人,博士研究生,主要从事遥感图像处理,特征点检测等方面的研究。E-mail:zwliu@ceode.ac.cn



刘鹏(1977—),男,博士,主要从事遥感图像处理,图像处理中的逆问题等方面的研究。E-mail:pliu@ceode.ac.cn

导师简介:



刘定生(1955—),男,研究员,博士生导师,主要从事遥感图像处理、并行计算、网格等方面的研究。E-mail:dslu@ceode.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)