

文章编号 1004-924X(2014)04-1071-07

基于兴趣点的遥感影像可匹配性度量

巨西诺*, 郭文普, 孙继银, 高 晶
(第二炮兵工程大学, 陕西 西安 710025)

摘要: 为了提高基准图制备的有效性, 研究了遥感影像的可匹配性, 并针对点特征提出了基于兴趣点度量遥感影像可匹配性的度量指标。首先, 利用非下采样 Contourlet 变换的高频系数提取图像的局部极值点作为兴趣点; 然后, 利用兴趣点的高频系数和方向特性定义兴趣点的幅值特性和结构特性。最后, 分析兴趣点幅值特性和结构特性与实际匹配概率的关系, 构建可匹配性度量指标。实验结果表明, 可匹配性度量指标与实际匹配概率的线性相关性高于 0.9, Spearman 相关系数高于 0.85, 评估结果准确性高、单调性好。利用该指标对图像可匹配区域进行筛选, 其制备的基准图的平均匹配概率大于 95%, 比传统方法提高了 15.4%, 改善了基准图制备的效率和可靠性。

关键词: 遥感图像; 兴趣点; 非下采样 Contourlet 变换; 可匹配性; 基准图

中图分类号: TP752; TP391 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142204.1071

Matching probability metric for remote sensing image based on interest points

JU Xi-nuo*, GUO Wen-pu, SUN Ji-yin, GAO Jing

(The Second Artillery Engineering College, Xi'an 710025, China)

* Corresponding author, E-mail: jxnwawj@163.com

Abstract: To improve the effectiveness of reference map preparation, the matching probability of a remote sensing image was investigated. A matching probability metric for the remote sensing image was proposed based on interest points. Firstly, the local extreme points obtained from high frequency coefficients of non-subsampled Contourlet transform were set as interest points. Then, the amplitude and structure properties of interest points were defined by the frequency coefficients and direction information. Finally, the matching metric was established based on the analysis of the relationship between amplitude and structure properties and real matching probability. Experiments show that the correlation coefficient of the metric and real matching probability is greater than 0.9 and the Spearman rank order correlation coefficient is greater than 0.85 with high accuracy and consistency. Matching region extraction by using the proposed index gives the average matching probability of more than 95% for reference maps, increasing 15.4% more than traditional methods. It improves the efficiency and the reliability of reference map preparation.

Key words: remote sensing image; interest point; non-subsampled Contourlet transform; matching probability; reference map

收稿日期: 2013-07-12; 修订日期: 2013-09-10.

基金项目: 部委基金资助项目 (No. 5132202XX)

1 引言

下视景象匹配测量精度高、自成体系、系统耗能小,是武器系统复合制导中的关键技术之一。景象匹配的三要素是基准图、实时图和匹配算法。在景象匹配制导过程中,基准图是飞行器预定航线上的数字地图信息,主要来源于遥感影像;实时图是飞行器飞经目标区时,由弹载传感器获得的实时景物信息;匹配算法是计算两者相似性的方法。由此可见,基准图的质量和匹配算法的选择与景象匹配精度紧密相关。基准图制备是景象匹配中的一个重要环节,它从事先选取的目标区附近的影像中选取适用于匹配制导并具有一定特征的图像,通过校正预处理、特征提取等过程生成基准图。但在实际应用中经常出现制备好的基准图可匹配性不强,或某区域基准图数目过少不满足航迹规划需求的现象,造成资源的极大浪费。因此,在制备基准图之前需要对遥感影像图源进行筛选,选取适合制备基准图的图像。

与传统的图像质量评价不同,在景象匹配的特定背景下,其质量应定义为图像的可匹配性。面向景象匹配的图像质量评价不能脱离匹配算法独自描述。目前国内外对图像可匹配性估计的研究很少,关注的焦点主要是基准图选取准则。它们主要通过信息熵、方差、独立像元数、自匹配数、重复模式等指标^[1-4]对图像进行逐层筛选得到适合匹配的区域。这些指标主要是对图像的灰度值进行统计,分析图像的信息复杂度,而没有考虑不同匹配算法对匹配结果的影响,从而导致基准图制备指标与匹配概率相关性低,制备的基准图可靠性不高。基于特征的图像匹配方法是目前研究的热点,其中兴趣点具有计算简单、信息含量高、稳定性强等优点,是景象匹配中常用的特征之一。目前,经典的兴趣点提取算法有 Harris^[5]、尺度不变特征变换算法(Scale Invariant Feature Transform, SIFT)^[6]、加速鲁棒特征(Speed Up Robust Feature, SURF)^[7]等。在此基础上,许多人对这些算法进行了改进^[8-11]。这些算法本质上是提取边缘上的特殊点、灰度极值点或尺度极值点等鲁棒性较强的点。针对兴趣点匹配算法,预测图像

的可匹配性必须分析图像中兴趣点的含量和分布情况,以此对其可匹配性进行估计。

为了分析遥感影像中兴趣点的信息含量和信息复杂度,本文采用非下采样 Contourlet 变换(Nonsubsampled Wavelet Contourlet Transform, NSCT)^[12]取局部极值点作为兴趣点,分析兴趣点的幅值特性和结构特性,构建基于兴趣点的图像可匹配性度量指标,该指标与实际匹配概率相关性高,能够满足面向景象匹配的图像质量评价需求。

2 非下采样 Contourlet 变换兴趣点检测

2.1 非下采样 Contourlet 变换

Contourlet 变换^[13]利用 Laplace 塔形分解(LP)和方向滤波器组(Directional Filter Banks, DFB)实现了多分辨率、多方向、多尺度的图像“稀疏”表示。为了实现 Contourlet 变换的平移不变性,Cunha 等人提出了非下采样 Contourlet 变换(NSCT)。NSCT 基于非下采样的塔形结构和非下采样的方向滤波器进行分解,可以在分解过程中得到更加完整的特征信息。图 1 为 NSCT 的分解流程图。

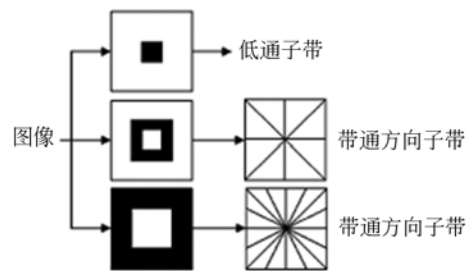


图 1 NSCT 分解流程

Fig. 1 Process of NSCT decomposing

2.2 兴趣点检测

NSCT 主要用来提取图像不同方向的高频信息。分析 NSCT 系数可知,图像的能量集中在低频子带,明显的高频信息(如显著边缘、角点等)在多个高频子带中都有较大的值;微弱的细节信息只在特定子带中有较大值;噪声引起的高频信息在所有子带中的值都较小。根据该特性,该方法选取高频信息大于阈值的点作为兴趣点,具体方法如下:

step1: 对图像进行 8 方向的 NSCT 变换,得到 8 个方向的高频系数,对其取绝对值得到 C_{ij}^k 。其中: (i, j) 为点坐标, $k=1, \dots, 8$ 表示 8 个分解方向;

step2: 定义阈值 T , 当 $C_{ij}^k > T$ 时, 该点为对应子带的候选兴趣点;

step3: 对各子带提取的候选兴趣点, 采用 3×3 窗口进行遍历, 提取高频系数 C_{ij}^k 的局部极值点作为最终兴趣点;

step4: 合并各子带的显著点得到图像最终的兴趣点集 Λ 。

其中: 阈值 T 是通过分析不同畸变条件下兴趣点的重复率^[14]确定的。通过计算 500 幅不同遥感影像在不同畸变条件下的兴趣点的重复率确定阈值。令 $s = \max\{C_{ij}^k\}$, 依次选取阈值为 $s/10, s/9, \dots, s/2$, 其兴趣点平均重复率如图 2 所示。分析图 2 可知, 当阈值 $T = \max\{C_{ij}^k\}/4$ 时, 平均重复率变化趋于稳定, 其平均重复率大于 0.85, 能够满足实际需求, 因此, 实验中定义 $T = \max\{C_{ij}^k\}/4$ 。

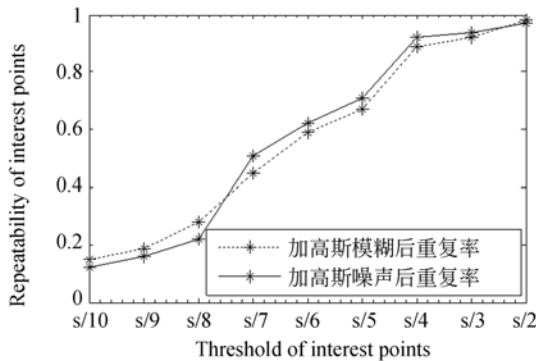


图 2 不同阈值下的兴趣点重复率

Fig.2 Repeatability of interest points under different thresholds

3 基于兴趣点的遥感影像质量评价

3.1 兴趣点幅值特性

分析 NSCT 系数可知, 其绝对值越大, 则对应图像的特征越显著, 因此, 将兴趣点在不同方向子带的 NSCT 系数的绝对值的最大值定义为该兴趣点的幅值 E :

$$E(i, j) = \max\{C_{ij}^k | k=1, \dots, 8, (i, j) \in \Lambda\} \quad (1)$$

考虑到在多个方向都有较高系数值点的显著

性更高、更加稳定, 利用兴趣点显著子带数目 n 对兴趣点的幅值进行加权, 加权后的幅值如式(2)所示:

$$EW = (1 + n/8) \cdot E \quad (2)$$

3.2 兴趣点结构特性

兴趣点的结构特性主要考虑其方向特性和分布特性。对应于 NSCT 分解的 8 个子带, 若兴趣点 (i, j) 在第 n 个子带的系数值大于阈值 T , 则将该子带对应方向定义为兴趣点主方向。由于一些兴趣点在多个方向都有较大的系数值, 主方向难以判定, 因此, 采用下述方法定义兴趣点的方向特性。

step1: 对每个子带中的系数进行判定, 若 $C_{ij}^k > T$, 则其对应子带中的方向值赋为 1, 反之为 0;

step2: 对 8 个子带的方向值进行顺序排列, 得到一组二进制序列, 该二进制序列表示了兴趣点的方向特性;

step3: 为了表示方便, 将二进制序列转化为十进制值, 以此表示兴趣点的方向。

利用兴趣点的位置和方向信息, 参考物理学相关概念, 定义兴趣点的归一化转动惯量 (Normalized Moment of Inertia, NMI) 特征作为其结构特征。NMI 显示了兴趣点的离散性, 其值越大, 说明兴趣点分布越均匀, 其值越小, 说明分布越不均匀。从物理学上讲, NMI 是图像绕质心的归一化转动惯量, 具体定义如下:

$$NMI = \frac{\sqrt{\sum_{(i,j) \in \Lambda} \sqrt{((i-\bar{i})^2 + (j-\bar{j})^2)} \cdot f(i,j)}}{\sum_{(i,j) \in \Lambda} f(i,j)} \quad (3)$$

式中: $f(i, j)$ 表示图像的方向值, \bar{i}, \bar{j} 为兴趣点的质心, 定义如下:

$$\bar{i} = \frac{\sum_{(i,j) \in \Lambda} i \cdot f(i, j)}{\sum_{(i,j) \in \Lambda} f(i, j)} \quad (4)$$

$$\bar{j} = \frac{\sum_{(i,j) \in \Lambda} j \cdot f(i, j)}{\sum_{(i,j) \in \Lambda} f(i, j)} \quad (5)$$

3.3 基于兴趣点的图像质量评价指标

通常情况下, 兴趣点数目越多, 则表示图像的信息越丰富, 但相似兴趣点也就越多, 易造成误匹配。兴趣点离散性越低, 说明兴趣点分布越不均匀, 匹配效果越好。当兴趣点数目少时, 显著目标

也少,同样不适合匹配。因此,必须综合考虑兴趣点的幅值特性和结构特性。在一幅图像中考虑单个兴趣点的幅值是没有意义的,本文将图像中所有兴趣点的幅值进行叠加并将其定义为图像信息含量 ES。ES 用于表示图像的幅值特性,具体定义如下:

$$ES = \sum_{(i,j) \in \Lambda} EW(i,j). \quad (6)$$

仿真实验具有高效、可靠、经济和可在控制环境中多次重复运用的特点。在导弹武器系统研制过程中,由于飞行实验代价高昂,故主要采用仿真方法对匹配算法的性能、基准图适配度进行分析^[15]。图 3 和图 4 是某地区 SPOT 卫星影像采用基于 Harris_Hausdorff 匹配算法^[16]进行多次景象匹配仿真实验^[15]得到的匹配概率与 ES 和 NMI 值之间的对应关系图,所选基准图大小为 128×128 ,实时图大小为 16×16 。

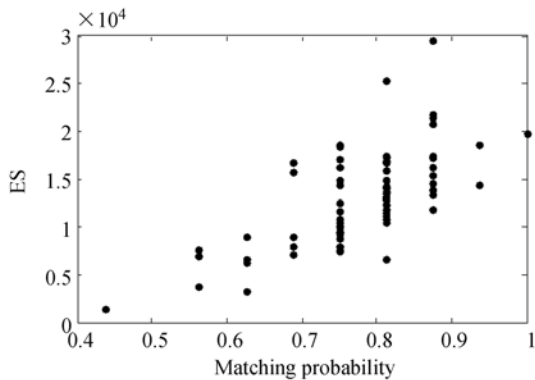


图 3 匹配概率与 ES 对应关系

Fig. 3 Relationship between matching probability and ES

从图 3 和图 4 可以看出,ES 值与实际匹配概率的变化趋势基本一致,而 NMI 值则与实际匹配概率的变化趋势相反。从而可知,ES 和 NMI 呈单调递减关系。ES 越大,表明兴趣点信息含量越大,兴趣点数目越多,兴趣点显著性越高;NMI 越小,则图像兴趣点分布越不均匀,相似区域少,特征唯一性强。仿真实验中,由于实时图选取的随机性、畸变模型的复杂性以及点分布的不确定性,使得图 3 中同一匹配概率下点分布的离散性较大。为了提高 ES 指标与匹配概率的相关性,利用 NMI 特征对 ES 进行加权,构建图像可匹配性评价指标 IPQA:

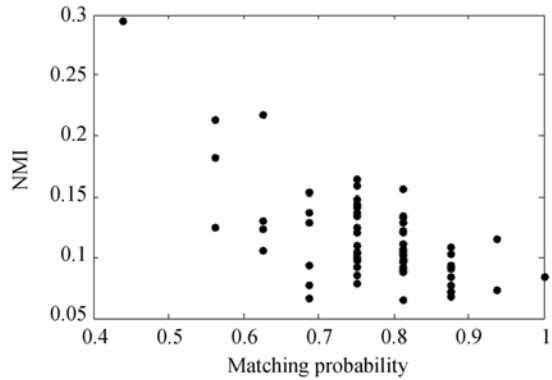


图 4 匹配概率与 NMI 对应关系

Fig. 4 Relationship between matching probability and NMI

$$IPQA = \frac{ES \times e^{-NMI}}{M \times N}, \quad (7)$$

其中: $M \times N$ 为图像大小。

IPQA 越大,其对应的可匹配性越好,反之,可匹配性越差。大量实验分析表明,当 $IPQA > 1$ 时,其实际匹配概率基本趋近于 1,因此采用指数函数对其进行归一化:

$$IQA = 1 - e^{-\lambda \times IPQA}, \quad (8)$$

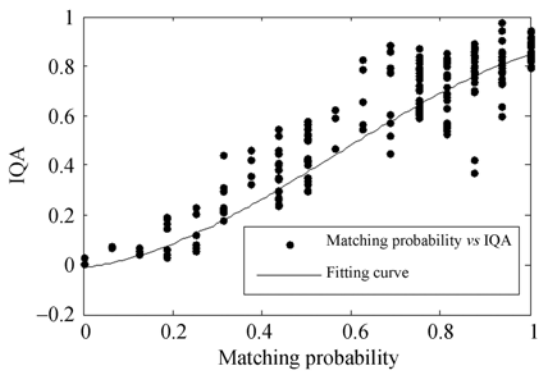
其中: λ 为调整系数,实验中取 $\lambda = 2$ 。

4 实验与分析

为了验证指标的有效性本文选取 200 幅不同卫星、不同地区的遥感影像,分析其在不同兴趣点匹配算法下的匹配概率。选择的兴趣点匹配算法有文献[11]、文献[16]和文献[17]中提出的三种方法,分别表示为算法一、算法二和算法三,基准图大小为 128×128 ,实时图大小为 16×16 。本文采用仿真方法^[15]计算其实际匹配概率。利用 Matlab 曲线拟合工具箱计算实际匹配概率与评价指标 IQA 的对应关系,如图 5 所示。

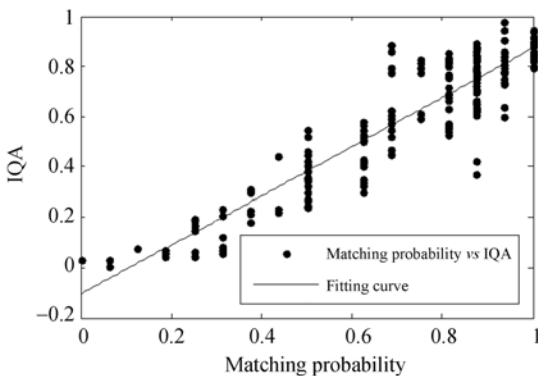
对图 5 中各拟合结果进行评估,选取 3 个评价标准^[18]对匹配概率和 IQA 指标的一致性进行评估。(1)线性相关系数(Correlation Coefficient, CC),其用于反映评估的准确性;(2)Spearman 相关系数(Spearman Rank Order Correlation Coefficient, SROCC),其用于反映评估的单调性。(3)离出率(Outlier Ratio, OR),其用于反映评估的稳定性。

采用 CC、SROCC、OR3 个指标对不同算法的



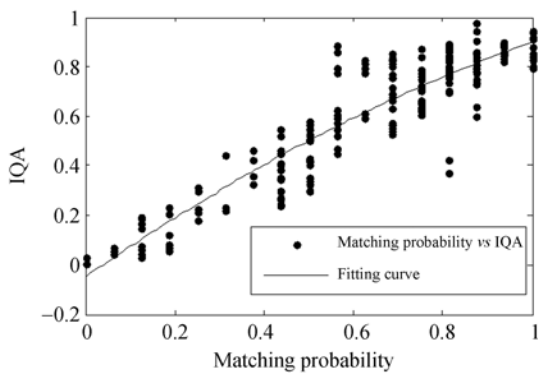
(a) 算法一匹配概率与 IQA 指标对应关系

(a) Relationship between matching probability and IQA of method 1



(b) 算法二匹配概率与 IQA 指标对应关系

(b) Relationship between matching probability and IQA of method 2



(c) 算法三匹配概率与 IQA 指标对应关系

(c) Relationship between matching probability and IQA of method 3

图 5 3 种算法的匹配概率与 IQA 指标的对应关系
Fig. 5 Relationship between matching probability and IQA for 3 algorithms

曲线拟合结果进行评价,结果如表 1 所示。

表 1 曲线拟合结果评价

Tab. 1 Assessment for fitting results

指标	算法一	算法二	算法三
CC	0.920 8	0.919 6	0.917 3
SROCC	0.868 1	0.857 5	0.869 0
OR	0.045 0	0.055 0	0.055 0

分析表 1 可知,3 种匹配算法的实际匹配概率与评价指标 IQA 的相关性都大于 0.9,而其 SROCC 都大于 0.85,这说明评估结果准确性高、单调性好。OR 指标反映超出置信区间的点所占比例,其值越小,表示评估越稳定。表 1 中 OR 最大值为 0.055。这说明曲线拟合异常点较少,评估结果稳定性好。

由于匹配算法和畸变因素的复杂性,预测的可匹配性与实际匹配概率存在一定误差。对于不同特征点匹配算法,其匹配概率也是不同的,准确地预测匹配概率是不可行的,只能在一定误差范围内对可匹配性进行预测。在景象匹配的特定背景下,只需要选择适合制备基准图的遥感影像,而且不需要进行定量描述。因此,基于兴趣点的质量评价指标可以定义为一个量化分类模型,对可匹配性进行定性描述,即对图像可匹配性进行分类: {可匹配区域; 不确定区域; 不可匹配区域}。通过大量实验对分类方法进行如下定义:

$$\begin{cases} \text{if } IQA < 0.6, \text{ image} \in NMR \\ \text{if } 0.6 \leq IQA < 0.8, \text{ image} \in DMR, \\ \text{if } IQA \geq 0.8, \text{ image} \in MR \end{cases} \quad (9)$$

式中: NMR、DMR 和 MR 分别表示不可匹配区、不确定匹配区和可匹配区。当图像属于可匹配区时说明该图像能够提取稳定的兴趣点,能够制备基准图,并且适用于点特征匹配算法。反之,当图像属于不可匹配区时,表明该图像无法提取足够的稳定信息,不适合制备基准图。当图像属于不确定区域时,其 IQA 值越大,则其是可匹配区的概率越高,反之,其是可匹配区的概率越小。此时,该图像不适合进行点特征匹配,难以判断是否适合制备基准图,需要对其进行进一步分析。

对利用传统方法和本文指标制备基准图的可靠性进行了比较。图 6 为实验中选用的 SPOT 遥感影像,其分辨率为 2.5 m;大小为 1 500 pixel

$\times 1\ 500$ pixel;基准图大小定义为 128 pixel $\times 128$ pixel;遍历步长为 64 ;实时图大小定义为 16 pixel $\times 16$ pixel。首先,采用信息熵、方差、独立像元数、自匹配数、重复模式等传统方法制备基准图,标记为基准图序列一,其中,各指标阈值为大量统计实验得到的经验阈值。其次,利用本文指标选取可匹配区域制备基准图,标记为基准图序列二。最后,在本文指标提取的可匹配区中采用传统基准图选取准则提取基准图,标记为基准图序列三。对 3 组基准图序列分别采用 Harris_Hausdorff 匹配算法^[16]进行多次景象匹配仿真实验得到平均匹配概率,对比结果如表 2 所示。

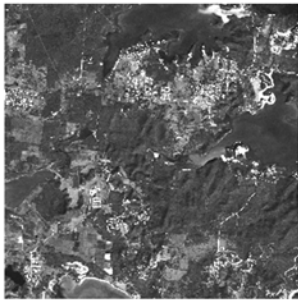


图 6 SPOT 遥感影像

Fig. 6 SPOT remote sensing image

表 2 基准图可匹配性评价

Tab. 2 Matching capability assessment for reference maps

基准图	序列一	序列二	序列三
提取基准图数目	71	53	47
不可用基准图数目	14	5	0
平均匹配概率/(%)	79.80	91.25	95.20

参考文献:

- [1] ZHANG X CH, HE ZH W, LIANG Y H, *et al.*. Selection method for scene matching area based on information entropy [C]. 2012 *Fifth International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID)*, 2012, 1: 364-368.
- [2] 曹菲, 杨小冈, 缪栋, 等. 景象匹配制导基准图选定准则研究[J]. 计算机应用研究, 2005, (5): 137-139.
- CAO F, YANG X G, MIU D, *et al.*. Study on reference image selection roles for scene matching guidance [J]. *Application Research of Computers*,

2005, (5): 137-139. (in Chinese)

表 2 中,不可用基准图是指匹配概率低于 85%的基准图。从表 2 可以看出,传统方法提取的基准图中不可用基准图所占比例高,平均匹配概率低,不能满足实际需求。而本文指标提取的基准图中不可用基准图比例低,平均匹配概率高于 90%。将两种方法结合,其平均匹配概率达到了 95%以上,能够满足景象匹配需求。与传统基准图制备选取准则相比,本文指标针对性更强,基准图制备可靠性更高。此外,传统基准图选取准则中重复模式、自匹配数等指标需要进行大量遍历操作,耗时长,不适合实时计算。利用本文指标提取的可匹配区可以缩小遍历区域范围,提高制备效率。

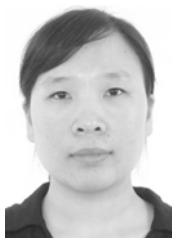
5 结 论

为了提高基准图制备的可靠性,本文利用 NSCT 算法提取了稳定的兴趣点,分析兴趣点的幅值特性和结构特性,构建了基于兴趣点的遥感影像可匹配度量指标。实验证明,该指标与实际匹配概率线性相关系数高于 0.9, Spearman 相关系数高于 0.85,评估结果准确性高、单调性好。在实验中,针对该指标选取的可匹配区,采用传统准则制备的基准图平均匹配概率达到了 95.2%,比传统方法提高了 15.4%。本文指标不仅可以提高基准图制备的可靠性,还可以提高基准图制备效率。另外,该指标还可以为景象匹配算法的选择提供决策支持。

- [3] 杨小冈, 曹菲, 黄先祥, 等. 景象匹配仿真中基准图的制备方法研究[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(4): 850-852.
- YANG X G, CAO F, HUANG X X, *et al.*. Reference image preparation approach for scene matching simulation [J]. *Journal of System Simulation*, 2010, 22(4): 850-852. (in Chinese)
- [4] 赵锋伟, 沈振康, 刘扬, 等. 景象匹配评估系统中图像特征指标的选择(一)图像统计特征[J]. 红外与激光工程, 2001, 30(4): 187-191.
- ZHAO F W, SHEN ZH K, LIU Y, *et al.*. Selection of image feature set in performance evaluation

- system of scene matching algorithm (Part 1: image statistic feature) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2001, 30(4):187-191. (in Chinese)
- [5] HARRIS C, STEPHENS M. A combined corner and edge detector [C]. In *Proceedings of the Alvey Vision Conference*, 1988, 147-151.
- [6] LOWE D G. Distinctive image features from scale invariant keypoints [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2): 91-110.
- [7] BAY H, ESS A, TUYTELAARS T, et al.. Speeded-Up Robust Features(SURF)[J]. *International Journal on Computer Vision and Image Understanding*, 2008, 110(3): 346-359.
- [8] 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)
- [9] 唐永鹤,卢焕章. 基于灰度差分不变量的快速局部特征描述算法[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(2): 447-454.
 TANG Y H, LU H ZH. Fast local feature description algorithm based on grey value differential invariants [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(2): 447-454. (in Chinese)
- [10] 贾平,徐宁,张叶. 基于局部特征提取的目标自动识别[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(7): 1898-1905.
 JIA P, XU N, ZHANG Y. Automatic target recognition based on local feature extraction [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(7): 1898-1905. (in Chinese)
- [11] PANG Y W, LI W, YUAN Y, et al.. Fully affine invariant SURF for image matching [J]. *Neurocomputing*, 2012, 85: 6-10.
- [12] DA CUNHA A L, ZHOU J P, DO M N. The nonsubsampled Contourlet transform: theory, design and applications [J]. *IEEE Transaction on Image Processing*, 2006, 15(10): 3089-3101
- [13] DO M N, VETTERLI M. The Contourlet transform: an efficient directional multiresolution image representation [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2005, 14(12): 2091-2106.
- [14] SCHMID C, MOHR R, BAUCKHAGE C. Evaluation of interest point detectors [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2000, 37(2): 151-172.
- [15] 杨小冈,左森,黄先祥,等. 图像匹配综合实验与仿真系统研究[J]. *系统仿真学报*, 2010, 22(6): 1360-1364.
 YANG X G, ZUO S, HUANG X X, et al.. Integral experiment and simulation system for image matching [J]. *Journal of System Simulation*, 2010, 22(6):1360-1364. (in Chinese)
- [16] WU J M, JING Z L, WU Z, et al.. Study on an improved Hausdorff distance for multi-sensor image matching [J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2012, 17(2): 513-520.
- [17] LIU X Z, TIAN Z, CHAI C Y, et al.. Multiscale registration of remote sensing image using robust SIFT features in steerable-domain [J]. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 2011, 14(2): 63-72.
- [18] Final report from the video quality experts group on the validation of objective models of video quality assessment [OL]. (2003-07-01), <http://www.vqeg.org>

作者简介:



巨西诺(1986—),女,河北邢台人,博士研究生,2007年、2009年于第二炮兵工程学院分别获得学士、硕士学位,主要从事景象匹配与图像质量评价等方面的研究工作。E-mail: jxnwawj@163.com



郭文普(1976—),男,河北河间人,副教授,2005年、2011年于第二炮兵工程学院分别获得硕士、博士学位,主要从事景象匹配与网络信息安全等方面的研究工作。E-mail: gwperpao2002@yahoo.com.cn