

## 方向矩异源图像匹配算法\*

李 想<sup>1,2</sup>, 朱遵尚<sup>1</sup>, 尚 洋<sup>1</sup>, 于起峰<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学 航天科学与工程学院, 湖南 长沙 410073; 2. 中国人民解放军 95835 部队, 新疆 乌鲁木齐 841700)

**摘要:**全天候高精度导航与制导需要可靠的可见光与红外、可见光与合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)的异源图像匹配算法。提出了一种基于方向矩的异源图像匹配算法:利用像素层次设计异源不变特征,描述像素点与其邻域各方向相似程度,通过统计比较各像素的相似性测度,实现不同传感器图像间的可靠匹配。进行了批量图像匹配实验,在可见光与红外、可见光与SAR异源图像间取得了超过90%的匹配正确率。较传统异源匹配算法,该算法大大提高了匹配正确率,在导航与制导领域有广阔的应用前景。

**关键词:**异源图像;图像匹配;景象匹配;红外;合成孔径雷达;方向矩

**中图分类号:**TP391.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2015)01-153-06

## Multimodal image registration based on orientation-moment

LI Xiang<sup>1,2</sup>, ZHU Zunshang<sup>1</sup>, SHANG Yang<sup>1</sup>, YU Qifeng<sup>1</sup>

(1. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. The PLA Unit 95835, Wulumuqi 841700, China)

**Abstract:** Multimodal image registration between visible, infrared and SAR images is the key technology to all-weather high-precision navigation and guidance. Based on an invariant feature designed at the pixel level, the orientation-moment, which describes the similarity of a pixel with its neighbors in different orientation, a multimodal image registration algorithm, that matches multisensor images by analyzing such similarities, is proposed. In matching tests, including visible, infrared and SAR images, it has reached a success rate of more than 90%. Comparing with traditional multimodal image registration algorithms, this method greatly improved the success rate, and had broad application prospects in navigation and guidance.

**Key words:** multimodal image; image registration; scene matching; infrared; synthetic aperture radar; orientation-moment

目前的高分辨率卫片基准图多是可见光成像,红外和合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)成像的分辨率相对较低。为了获得全天候导航和制导能力,飞行器多采用红外或SAR成像系统。因此,为实现全天候高精度导航/制导,可靠的可见光与红外、可见光与SAR等异源图像匹配算法成为关键。

景象/图像匹配技术是计算机视觉里的经典研究对象,Brown<sup>[1]</sup>和 Zitová<sup>[2]</sup>等先后对图像配准算法进行了较全面的综述<sup>[3-6]</sup>。但大多数匹配算法只针对同源图像,对异源图像无能为力。现有的异源匹配算法<sup>[7-8]</sup>主要可分为两类:

### 1) 基于特征的匹配

基于特征的匹配一般包括特征检测、特征描述、特征匹配和配准参数解算四个环节。根据特征的种类又可以分为:

基于点特征的匹配<sup>[9]</sup>:使用点特征检测算法检测角点、极值点、交叉点、端点等点特征,然后使用鲁棒性较好的特征配准算法(如松弛匹配法)对点特征集合进行匹配,最终实现异源图像的配准。

基于线特征的匹配<sup>[10]</sup>:使用边缘检测算法检测图像中的边缘轮廓,通过对线特征的匹配实现异源图像的配准。

基于区域特征的匹配:使用分割算法将图像分割成不同的区域,通过对分割区域的匹配实现异源图像的配准。

如何保证异源图像间点特征、线特征和区域特征的重复检出性是基于特征匹配的难点。朱宪伟<sup>[11]</sup>提出了结构支持度的概念,避免了特征检测在匹配位置计算结构支持度,取得了较好的匹配效果。

\* 收稿日期:2014-05-06

作者简介:李想(1984—),男,湖南邵阳人,工程师,博士研究生,E-mail:lixiang\_nudt@foxmail.com;

于起峰(通信作者),男,中国科学院院士,博士,博士生导师,E-mail:yuqifeng@vip.sina.com

### 2) 基于区域的匹配

基于区域的匹配省略了特征检测的环节,直接在像素层次上进行计算。经典的算法包括:

**互信息法<sup>[12-13]</sup>:**互信息是 Shannon 信息论的一个基本概念,是两个随机变量统计相关性的测度。由于不需要对不同成像模式下图像灰度间关系作任何假设,互信息法可用于任意异源图像的配准。但由于对窗口信息量和计算量的需求,互信息法在匹配率和实时性上离景象匹配要求都有差距,目前主要应用于医学异源图像匹配。

**梯度相关法:**由于异源图像同名点附近的灰度变化量仍存在一定联系,因此利用梯度算子将原图像变换到梯度模图像,再利用相关算法进行配准。较常用的是 Sobel 算子与标准化协方差相关算法的组合。

基于区域的异源匹配算法由于对图像特征和内容没有特定的假设,因而具有更好的适应性。其关键依然是如何在像素层次设计具有异源不变性的特征。Keller<sup>[14]</sup>提出了隐相似性(implicit similarity)的概念,利用异源图像间梯度强度的对应关系实现异源图像的配准。Kim<sup>[15]</sup>利用异源图像间灰度强度与边缘方向的联系实现可见光与红外图像的配准。李壮<sup>[16]</sup>提出了基于空间子区一致性的异源图像匹配方法,能够在可见光与 SAR 图像间取得较高匹配率,但算法计算量较大,难以满足实时性要求。其他异源匹配方法还包括交叉累积剩余熵(Cross-Cumulative Residual Entropy, CCRE)<sup>[17-19]</sup>、Hausdorff 距离<sup>[20]</sup>、多尺度自相似性(multiscale self-similarities)<sup>[21]</sup>以及尺度不变特征转换(Scale-Invariant Feature Transform, SIFT)描述子<sup>[22]</sup>等。

由于乘性噪声等影响,可见光与 SAR 图像匹配要难于可见光与红外图像匹配。总体看来,异源匹配(特别是可见光与 SAR 图像匹配)在国际上仍属于尚未解决的难题。

## 1 异源匹配不变特征设计

异源图像同名点灰度不再保持联系,仅考虑单像素的灰度没有意义。因此,异源图像匹配算法必须考虑像素点及其邻域。以像素点为中心,在其邻域建立极坐标系,用距离  $\rho$  与方位  $\theta$  来表述邻近的像素,如图 1 所示。

基于特征的匹配算法常采用点、线、区域三种特征,而图像中的像素点一般也属于这三种特征。具体每种特征又有各自的参数,如点特征的尺度,线特征的宽度、朝向,区域特征的纹理、尺度和矩,

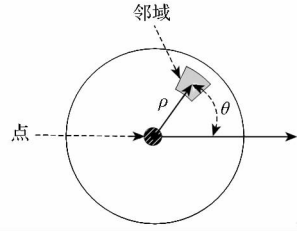


图 1 中心点与邻域极坐标系

Fig. 1 Central point and polar coordinates in the neighborhood of the pixel

等等。

异源图像之间的点、线、区域特征仍具有对应性,这是本文匹配算法的基础与来源。虽然因异源传感器影响,同名点灰度、纹理发生改变,但点特征仍然对应点特征,且尺度大致保持;线特征上的像素点仍然对应线特征,且线特征的宽度与方向大致不变;区域特征内的点仍然对应同一区域内部,且区域的形状大致对应。

基于特征的匹配算法需要特征检测,且匹配率受特征检测的影响较大。本文算法不变特征设计的核心就是避免进行这三类特征的检测与分类,直接建立一套统一可计算的描述指标,通过指标参数的不同反映不同的特征。首先给出三类特征及其参数的定义(图 2):

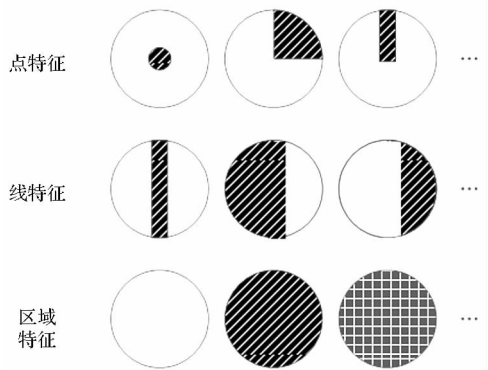


图 2 像素点分类

Fig. 2 Categories of pixels according to its neighborhood

1) 点特征:当大于一定尺度  $\rho$  时,邻域与中心区域不一致,则称该点属于尺度  $\rho$  下的点特征。图 2 中第 2 个和第 3 个点特征给出的角点和线端点,可认为是  $\rho = 0$  的点特征。

2) 线特征:在一定方向  $\theta$  上,邻域与中心区域一致,则称该点是对应方向  $\theta$  的线特征。

3) 区域特征:在给定尺度  $\rho$  的所有方向  $\theta$  上,邻域与中心区域在灰度或纹理上一致,则称该点在尺度  $\rho$  下属于区域特征。

一方面,即使像素属于同一类特征,在特征的尺度、方向以及强度等参数上仍存在不同,需要定

量描述;另一方面,将图像千变万化的像素严格划分成上述三类难以实现也不合适。因此,设计不变特征时主要考虑定义怎样的测度来模糊描述像素符合三类特征的程度。下面给出不变特征中心方向矩与对称方向矩的定义。

符号说明:

1)  $\mathbf{M}$  表示方向矩矢量,  $C$  表示两个方向矩矢量的相关系数,  $S$  表示实时图图像与基准图搜索窗口图像的相似性, 采样距离为  $N$ , 采样方向数为  $D$ 。

2) 下标  $rt$  表示实时图像, 下标  $ref$  表示基准图像。  $\mathbf{M}_{rt}(i, j)$ ,  $\mathbf{M}_{ref}(i, j)$  分别为实时图、基准图像素  $(i, j)$  的方向矩矢量,  $\mathbf{M}_{rt}(i, j, k)$ 、 $\mathbf{M}_{ref}(i, j, k)$  分别为实时图、基准图像素  $(i, j)$  方向矩矢量的第  $k$  个分量。

算法 1: 中心方向矩匹配

1) 如图 3 所示, 对实时图和基准图像素  $(i, j)$

$$C^2(i, j) = \frac{\left( \sum_{k=1}^D \mathbf{M}_{ref}(i, j, k) \times \mathbf{M}_{rt}(i, j, k) \right)^2}{\left( \sum_{k=1}^D \mathbf{M}_{rt}(i, j, k) \times \mathbf{M}_{rt}(i, j, k) \right) \times \left( \sum_{k=1}^D \mathbf{M}_{ref}(i, j, k) \times \mathbf{M}_{ref}(i, j, k) \right)} \quad (2)$$

对于均匀区域, 式(2)会出现分母为零的情形, 须分如下情况进行处理:

a) 如果  $\sum_{k=1}^D \mathbf{M}_{ref}(i, j, k) \times \mathbf{M}_{ref}(i, j, k) = 0$  且

$\sum_{k=1}^D \mathbf{M}_{rt}(i, j, k) \times \mathbf{M}_{rt}(i, j, k) = 0$ , 令相关系数为 1;

b) 如果  $\sum_{k=1}^D \mathbf{M}_{ref}(i, j, k) \times \mathbf{M}_{ref}(i, j, k) = 0$ , 但

$\sum_{k=1}^D \mathbf{M}_{rt}(i, j, k) \times \mathbf{M}_{rt}(i, j, k) \neq 0$ , 则令像素  $(i, j)$  矩矢量每个分量  $\mathbf{M}_{ref}(i, j, k) = \text{mean}_k(\mathbf{M}_{rt}(i, j, k))$ , 再用式(2)来计算相关系数;

c) 如果  $\sum_{k=1}^D \mathbf{M}_{rt}(i, j, k) \times \mathbf{M}_{rt}(i, j, k) = 0$ , 但

$\sum_{k=1}^D \mathbf{M}_{ref}(i, j, k) \times \mathbf{M}_{ref}(i, j, k) \neq 0$ , 则令像素  $(i, j)$  矩矢量每个分量  $\mathbf{M}_{rt}(i, j, k) = \text{mean}_k(\mathbf{M}_{ref}(i, j, k))$ , 再用式(2)来计算相关系数;

3) 对所有像素  $(i, j)$  计算  $C^2(i, j)$  并求和, 最大值对应的位置即为匹配位置。

$$S = \sum_j \sum_i C^2(i, j) \quad (3)$$

方向矩设计主要考虑如下原则:

1) 应能在噪声和纹理的干扰下, 描述中心像

的每一方向  $\theta_k$  ( $\theta \in [0, 2\pi)$ ,  $k = 1, 2, \dots, D$ ), 计算距离  $1 \sim N$  处采样像素灰度  $f_n$  与中心像素灰度  $f_0$  之差, 乘以距离并求和得到  $\theta_k$  方向的矩分量, 用以描述中心像素与  $\theta_k$  方向像素的相似程度。

$$\mathbf{M}(i, j, k) = \sum_{n=1}^N [(f_n - f_0) \times \sqrt{\Delta x_n^2 + \Delta y_n^2}] \quad (1)$$

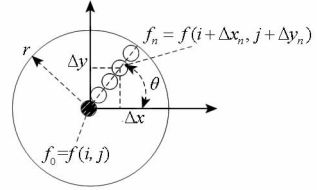


图 3 中心方向矩定义

Fig. 3 Definition of center orientation-moment

2) 计算实时图和基准图像素  $(i, j)$  的矩矢量  $\mathbf{M}_{rt}(i, j)$  与  $\mathbf{M}_{ref}(i, j)$  相关系数的平方  $C^2(i, j)$ , 如式(2)所示。

素与其邻域在各方向上的相似程度。

2) 邻域内像素与中心像素距离越远, 属于同一目标的概率越低, 其灰度值接近的概率也越低, 因而如果发生(灰度值接近), 其隐含的信息量(权重)应更大。

3) 相关系数采用归一化互相关, 但没有进行零均值化, 一方面是尽量减少计算量; 另一方面是考虑到式(1)中减去中心像素灰度, 已经是一种相对量, 如果再进行零均值, 有重复之嫌。

4) 由于异源图像可能出现对比度反转, 同名点方向矩可能负相关, 采用相关系数平方和作为方向矩相似度评价准则, 避免较耗时的判断运算。

算法 1 主要利用中心像素与邻域进行比较, 但中心像素也有可能受到噪声和纹理的干扰, 此算法的另一变型是:

算法 2: 对称方向矩匹配

1) 如图 4 所示, 对实时图和基准图像素  $(i, j)$  的每一方向  $\theta_k$  ( $\theta \in [0, \pi)$ ,  $k = 1, 2, \dots, D$ ), 计算此方向上采样距离  $N$  以内所有像素灰度重心, 以矩的形式描述。

$$\mathbf{M}(i, j, k) = \sum_{n=1}^N [(f_n - f_{-n}) \times \sqrt{\Delta x_n^2 + \Delta y_n^2}] \quad (4)$$

2) 计算实时图和基准图像素  $(i, j)$  的矩矢量

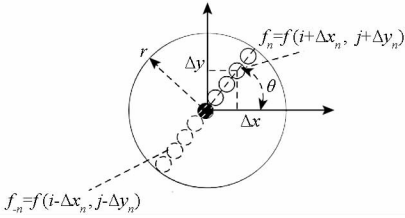


图 4 对称方向矩定义

Fig. 4 Definition of symmetrical orientation-moment

$M_{ri}(i, j)$  与  $M_{ref}(i, j)$  相关系数的平方  $C^2(i, j)$ , 分母为零情形处理与算法 1 类似。

3) 对所有像素  $(i, j)$  计算  $C^2(i, j)$  并求和, 最大值对应的位置即为匹配位置。

以中心方向矩为例, 根据其定义, 给出极坐标表示的图 2 中各类像素点方向矩矢量 (见图 5)。该方向上邻域像素与中心像素灰度越接近, 其方向矩分量越接近零; 邻域像素与中心像素灰度差越大, 方向矩分量绝对值越大。从图 5 还可以看出, 即使出现对比度翻转、某一区域灰度或纹理变化, 其方向矩形状仍会保持, 同名点方向矩特征仍保留相关性。

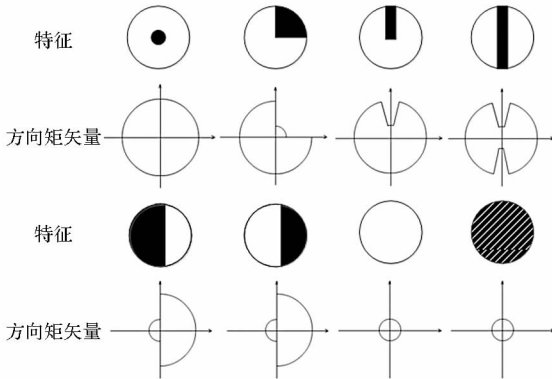


图 5 各类像素点的中心方向矩

Fig. 5 Center orientation-moment of pixels

利用方向矩进行匹配的系数图如图 6 所示, 其中最大值点即为匹配点。图中, 左上为红外实时图像, 左下为配准的目标可见光基准图; 右边分别为根据式 (3) 计算的匹配系数斜视与侧视图, 其中最高峰为正确匹配位置。

## 2 异源图像匹配实验

为衡量各算法相对传统基于互信息以及梯度相关算法的匹配率、实时性等性能, 使用 SAR 与可见光匹配图像对、红外与可见光匹配图像对进行批处理测试。为增强实时性, 基准图都在匹配前进行了预处理, 匹配时只需对实时图窗口进行特征计算。

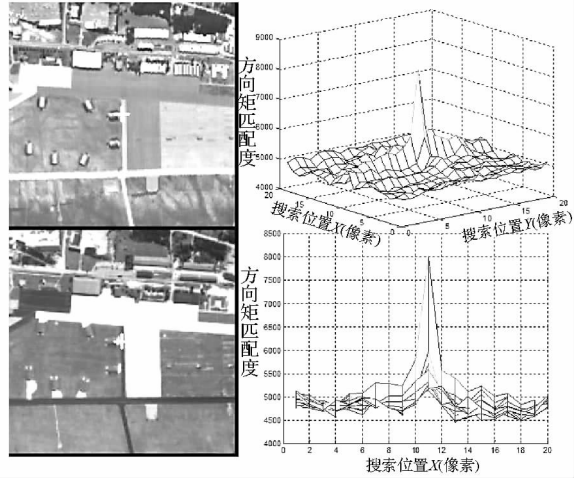


图 6 方向矩匹配系数图

Fig. 6 Searching result of orientation-moment

参数选择:

1) 模板大小: 在同一分辨率下, 模板 (匹配窗口: 匹配选取的基准图和实时图切片) 越大景象重复概率越小, 但计算量增大; 反之计算量减小, 但景象重复概率大, 匹配率降低。为在同一条件下衡量不同算法性能, 统一采用  $151 \times 151$  像素大小的模板。

2) 搜索步长: 测试表明各算法搜索步长取  $1 \sim 5$  像素区别不大, 因此都采用 5 像素步长搜索, 以提高计算效率。

3) 搜索范围: 真实景象匹配可以在惯导误差范围内进行搜索, 没有必要做全图搜索, 因此测试算法都在以预测位置为中心的  $101 \times 101$  像素范围内搜索。

4) 方向数: 对方向进行量化, 方向数越多, 分辨率越高, 但计算量也越大。测试中算法 1 (中心方向矩匹配) 将  $[0, 2\pi)$  均分成 8 个方向, 即  $i * \pi/4, i = 0, \dots, 7$ ; 算法 2 (对称方向矩匹配) 将  $[0, \pi)$  均分为 4 个方向, 即  $i * \pi/4, i = 0, \dots, 3$ 。

5) 采样半径: 采样半径应大到能克服噪声的影响, 又最好不要超过最小特征尺度避免损失信息。由于基准图特征在事先进行了预处理, 采样半径对计算量影响不明显。测试中, 采样半径取 5 像素。

6) 为评价算法匹配效果, 各算法对 SAR 与可见光图像对进行了 1045 次匹配, 对红外与可见光图像对进行了 463 次匹配, 统计正确率和计算时间结果如表 1 所示。本文算法都取得了 90% 左右的匹配正确率, 相比传统算法有较大提高。

表 1 异源图像匹配实验结果

Tab.1 Matching result of multimodal image

	算法 1	算法 2	梯度相关	互信息
SAR 与可见光匹配率	90.0%	92.8%	63.3%	48.3%
红外与可见光匹配率	90.3%	87.3%	64.4%	71.7%
耗时(ms)	1174.6	765.2	343.4	968.5

部分 SAR 与可见光图像对匹配结果如图 7 所示。在实时图(SAR 图像)中以固定的间隔选点作为目标,然后在基准图预测位置附近  $101 \times 101$  像素区域内用 5 像素步长进行搜索。可见:正确匹配的目标点也整齐排列。以匹配位置与真值距离误差小于 1 步长(5 像素)为判据统计匹配正确率。

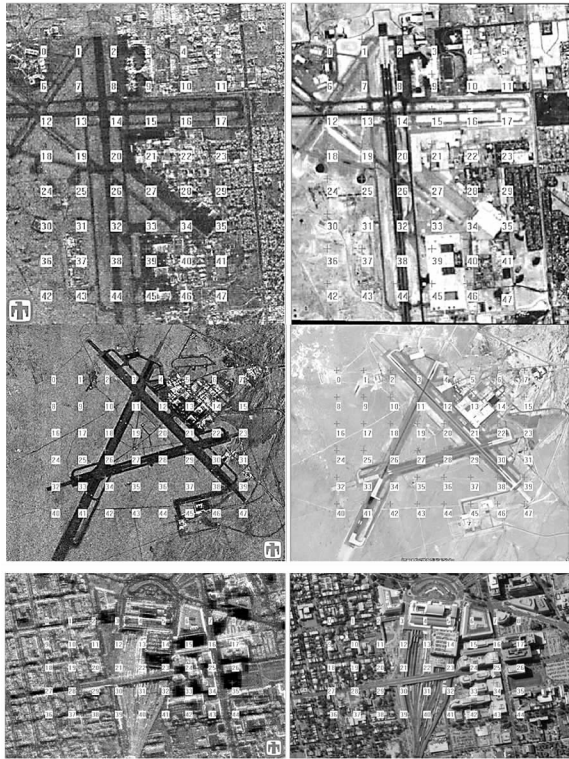


图 7 SAR 实时图(左)与可见光基准图(右)匹配结果  
Fig.7 Matching result of SAR(left) and visible(right) images

部分红外与可见光图像对匹配结果如图 8 所示,目标点选取与结果统计方法与 SAR 图像匹配一致。

图 9 显示了同一场景 SAR 与可见光图像不同算法的匹配结果,本文算法取得了 100% 的正确率,而传统的梯度相关与互信息法出现了较多错误。

实验总结如下:

1) 对不同种类的异源图像,本文算法都达到

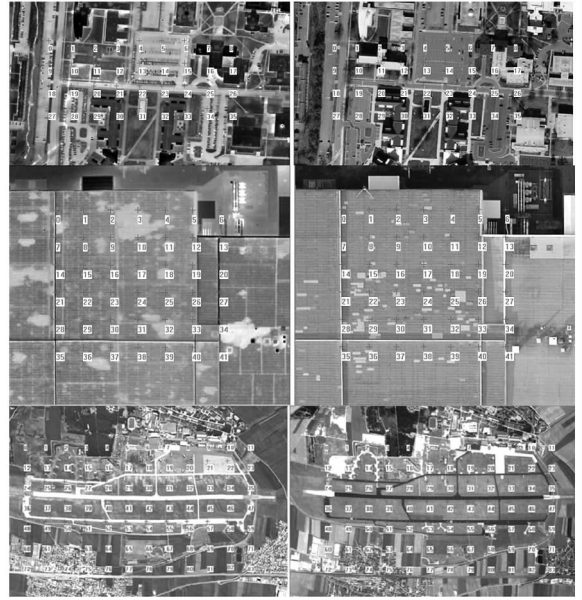


图 8 红外实时图(左)与可见光基准图(右)匹配结果  
Fig.8 Matching result of infrared(left) and visible(right) images

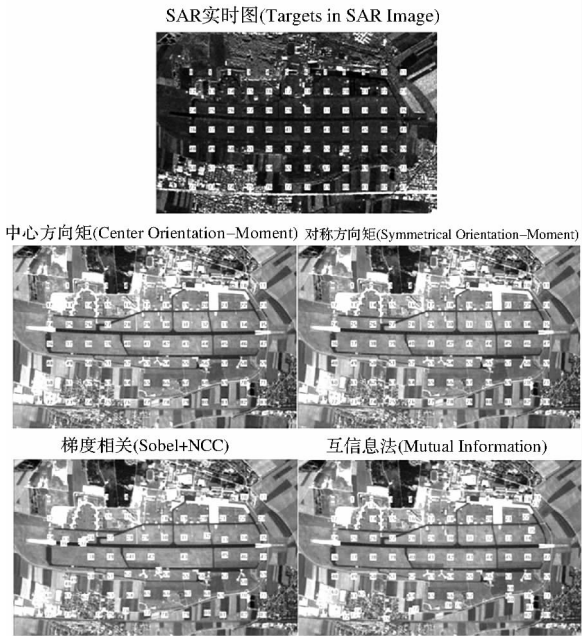


图 9 不同算法匹配结果对比  
Fig.9 Matching result of different algorithm

90% 左右的匹配正确率,相对传统算法有了较大提升。出错的匹配大多是由于存在景象差异或模板信息不足的情形。

2) 由于抗噪声的改进,算法 2 在 SAR 与可见光匹配中的表现略优于算法 1;但由于方向数少了一半使其在红外与可见光匹配中逊于算法 1。

3) 算法 2 同等角度分辨率下方向维度数仅有算法 1 的一半,使其计算量少于算法 1。算法 2 在实时性上优于互信息法,但弱于梯度相关算法。算法 1 耗时较长。

4) 模板越大则计算量越大,为提高实时性,

模板应越小越好。但实验也表明增大模板有利于提高匹配率,有些匹配错误由模板信息不足引起。因此,应根据景象特性,按照匹配率和实时性指标要求综合确定模板大小等算法参数。

### 3 结论

由于异源图像的灰度没有直接联系,其匹配与同源图像存在较大不同。本文通过对异源图像规律进行观察与总结,进而在像素层次设计具有异源不变性特征,提出了基于方向矩特征的异源图像匹配算法。利用像素与其一定距离内不同方位像素相似性的统计量——方向矩作为测度,可靠实现了 SAR 与可见光、红外与可见光图像的匹配。通过异源图像库对算法的匹配正确率进行了测试,证明本文算法较大地改善了异源匹配的正确率。算法在全天候高精度导航/制导等领域有广阔的应用前景。

### 参考文献 (References)

- [1] Brown L G. A survey of image registration techniques [J]. ACM Computing Surveys, 1992, 24(4): 325–376.
- [2] Zitová B, Flusser J. Image registration methods: a survey [J]. Image and Vision Computing, 2003, 21(11): 977–1000.
- [3] Dawn S, Saxena V, Sharma B. Remote sensing image registration techniques: a survey [M]. USA: Springer Berlin Heidelberg, 2010: 103–112.
- [4] Brown L G. A survey of image registration techniques [J]. ACM computing surveys (CSUR), 1992, 24(4): 325–376.
- [5] Wyawahare M V, Patil P M, Abhyankar H K. Image registration techniques: an overview [J]. International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition, 2009, 2(3): 11–28.
- [6] Deshmukh M, Bhosle U. A survey of image registration [J]. International Journal of Image Processing, 2011, 5(3): 245.
- [7] 王鲲鹏, 徐一丹, 于起峰. 红外与可见光图像配准方法分类及现状 [J]. 红外技术, 2009, 31(5): 270–274.  
WANG Kunpeng, XU Yidan, YU Qifeng. Classification and state of IR/Visible image registration methods [J]. Infrared Technology, 2009, 31(5): 270–274. (in Chinese)
- [8] 汪汉云, 王程, 李鹏, 等. 多源遥感图像配准技术综述 [J]. Computer Engineering, 2011, 37(19).  
WANG Hanyun, WANG Cheng, LI Peng, et al. Review of multi-source remote sensing image registration techniques [J]. Computer Engineering, 2011, 37(19). (in Chinese)
- [9] Li Y, Stevenson R. Multimodal image registration by iteratively searching keypoint correspondences [C]. SPIE Electronic Imaging. International Society for Optics and Photonics, 2013: 86660E–86660E–8.
- [10] Li B, Wei W, Hao Y. Multi-sensor image registration based on algebraic projective invariants [J]. Optics Express, 2013, 21(8): 9824–9838.
- [11] 朱宪伟. 基于结构特征的异源图像配准技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009.  
ZHU Xianwei. Study on structure features based registration of multi-sensor images [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008. (in Chinese)
- [12] Maes F, Collignon A, Vandermeulen D, et al. Multimodality image registration by maximization of mutual information [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 1997, 16(2): 187–198.
- [13] Shen L R, Huang X S, Yan Y Z, et al. Robust multisensor image matching using bayesian estimated mutual information [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 321: 541–548.
- [14] Keller Y, Averbuch A. Implicit similarity: a new approach to multi-sensor image registration [C]//Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2003: 18–20.
- [15] Kim Y S, Lee J H, Ra J B. Multi-sensor image registration based on intensity and edge orientation information [J]. Pattern Recognition, 2008, 41(11): 3356–3365.
- [16] 李壮. 异源图像匹配关键技术研究 [D]. 国防科学技术大学, 2011.  
LI Zhuang. Research on key technologies of multi-sensor images matching [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)
- [17] Li C, Chen Q, Gu G H, et al. IR and visible images registration method based on cross cumulative residual entropy [C]//Proceedings of SPIE Defense, Security, and Sensing. International Society for Optics and Photonics, 2013: 870430–870430–10.
- [18] Zhang Y M, et al. Registration for SAR and optical image via cross cumulative residual entropy and ratio operator [J]. Advanced Materials Research, 2012, 452–453: 954–958.
- [19] Hasan, M. Pickering M R, Jia X P. Robust automatic registration of multimodal satellite images using CCRE with partial volume interpolation [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50: 4050–4061.
- [20] Li Q, Qu G Z, Zhao X, et al. Multisensor image registration using modified hausdorff distance [C]//Proceedings of SPIE, 2011, 8002: 15–22.
- [21] Sun H, Lin L, Zou H X, et al. Multimodal remote sensing image registration using multiscale self-similarities [C]//Proceedings of International Conference on Computer Vision in Remote Sensing (CVRS), 2012: 199–202.
- [22] Wang L, Niu Z, Wu C Y, et al. A robust multisource image automatic registration system based on the SIFT descriptor [J]. International Journal of Remote Sensing, 2012, 33(12): 3850–3869.