

文章编号:1001-2486(2011)01-0031-04

基于空间子区一致性的异源图像匹配方法*

李 壮,杨 夏,雷志辉

(国防科技大学 航天与材料工程学院,湖南 长沙 410073)

摘要:提出一种基于空间子区一致性的异源图像匹配方法。该方法中,将图像划分为许多大小相同的子区;分别计算邻近子区间的灰度直方图距离,得到一种图像结构特征描述——似邻矩阵;利用似邻矩阵计算图像间的子区一致性;采用改进的搜索策略,快速获得匹配结果。实验结果表明,该方法在正确率和计算时间方面均优于传统方法。

关键词:图像处理;图像匹配;似邻矩阵;子区一致性;异源图像

中图分类号:TP391.41 **文献标识码:**A

Multi-sensor Image Matching Based on Spatial Sub-area Congruency

LI Zhuang, YANG Xia, LEI Zhi-hui

(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A novel multi-sensor image matching method based on spatial sub-area congruency is proposed. In this method, images were segmented into sub-areas with same size. The structure feature represented by matrix of surrounding similarity was obtained by calculating the similarity of intensity histogram of each pair of adjacent sub-areas, and was used to compute spatial sub-area congruency. Through employing optimized searching algorithm, the matching result was acquired. Experimental results show that the proposed method can match multi-sensor images stably and fast and outperforms conventional methods.

Key words: image processing; image matching; matrix of surrounding similarity; sub-area congruency; multi-sensor images

飞行器视觉导航可靠性好,精度高,无累计误差,是国际上研究的热点之一。光学卫星图像精度高、易获取,适合用作视觉导航基准图。合成孔径雷达(SAR)不受云、雨、雾、光照等自然因素的影响,能够全天时全天候工作,特别适合用来获取飞行器实时图。对 SAR 图像与光学图像进行匹配是视觉导航的一个关键技术。

国际上主流的异源图像匹配方法可以分为基于特征的方法和基于区域的方法。基于特征的方法包括:Yong 利用边缘信息匹配红外图像与可见光图像^[1]、Wegner 通过检测图像中的桥梁特征匹配图像^[2]、Hong 利用轮廓特征进行异源图像匹配^[3]、苏娟等基于结构边缘特征与虚拟角点进行 SAR 图像与光学图像的匹配^[4]。这些方法通常要求异源图像中能够检测到对应的特征,只适用于图像之间存在较小差异的情况。当异源图像差异较大或者存在严重斑点噪声时,提取对应特征会非常困难,从而难以应用上述方法进行匹配。

基于区域的方法将整幅图像的灰度或梯度信

息进行匹配。常用的基于区域的异源图像匹配方法包括灰度匹配方法^[5]、梯度匹配方法^[6]、相位一致性方法^[7]、隐含相似性方法^[8]、互信息方法^[9]等。其中灰度和梯度匹配方法适应性较差;相位一致性方法与互信息方法是医学图像处理中常用的匹配方法,具有一定的抗噪声能力,但是计算时间很长;隐含相似性方法对实时图像噪声较敏感。

本文提出基于空间子区一致性的异源图像匹配方法,实现步骤如下:将图像划分为许多大小相同的子区;分别计算每个子区与其周围子区的直方图距离,得到一种图像结构特征描述——似邻矩阵;采用优化搜索方法,寻找基准图中似邻矩阵与实时图似邻矩阵最相似的窗口,即为匹配结果。由于似邻矩阵融合了基于特征方法和基于区域方法的优点,故该方法能够快速可靠的对异源图像进行匹配。

1 特征描述

传统的图像表示方法以像素为单元,计算图

* 收稿日期:2010-09-13

基金项目:国家高技术研究发展计划资助项目(2007AA12Z121)

作者简介:李壮(1982—),男,博士生。

像局部的灰度或者梯度特征。这些方法能够在同源图像匹配中得到较好的结果,但是对于成像差异较大的异源图像,同名点的灰度和梯度都有很大区别,提取的特征也明显不同。

尽管异源图像差异明显,但是通过扩大场景范围,人类能够轻松看出两图之间的相似性。图1中每一行两幅图像为同一区域的光学图像和SAR图像。可以看出,随着区域逐渐变大,场景内容增多,两图的对应关系变得更加明显。此例说明可以通过建立大区域上的特征描述进行图像匹配。

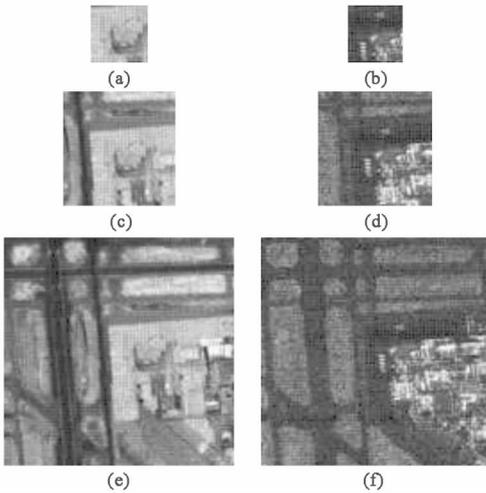


图1 场景内容与图像相似性

Fig.1 Scene content and image similarity

为了匹配异源图像,必须建立能够提取异源图像的共同属性的特征描述。一般来说,异源图像中较稳定的共同属性是边缘特征和同质区域特征。在异源图像中,某些非同质区域可能呈现较大结构差异。因此,特征描述还要具有一定的鲁棒性,即使图像中存在一部分非同质区域,也能可靠对异源图像进行匹配。

下面给出一种满足共性特征提取和鲁棒性要求的图像结构特征描述方法。该方法将图像分为许多大小相同的子区,用相邻子区间的相似性及位置关系约束作为图像结构特征描述。由于该特征描述用3维矩阵表示,矩阵中的元素为图像中一对相邻子区间的相似度,故将此特征描述命名为似邻矩阵。

对于图像 I ,将图像划分为长宽均为 w 的子区。用 $I_{i,j}$ 表示第 i 行,第 j 列的子区。分别计算每个子区与其附近其它子区的相似度。对于两个子区 $I_{i,j}$ 与 $I_{m,n}$,它们之间的相似性可以有多种计算方法。综合考虑计算速度和鲁棒性,本文选择灰度直方图重叠面积作为子区相似度量。若 $h_{i,j}$

与 $h_{m,n}$ 分别是 $I_{i,j}$ 与 $I_{m,n}$ 的灰度直方图,则子区 $I_{i,j}$ 与 $I_{m,n}$ 的相似性为:

$$S_{i,j,m,n} = Sim(I_{i,j}, I_{m,n}) = \sum_{k=1}^N \min(h_{i,j}(k), h_{m,n}(k)) \quad (1)$$

子区 $I_{i,j}$ 与其附近其它子区的相似度按照约定顺序排列,构成相似向量 $V_{i,j}$,全部子区的相似向量构成的矩阵 M , M 称为图像的似邻矩阵。为了减少计算量,我们只计算子区8邻域的相似度。相似向量为:

$$V_{i,j} = [S_{i,j,i+1,j}, S_{i,j,i+1,j+1}, S_{i,j,i,j+1}, S_{i,j,i-1,j+1}, S_{i,j,i-1,j}, S_{i,j,i-1,j-1}, S_{i,j,i,j-1}, S_{i,j,i+1,j-1}]$$

全部相似向量构成似邻矩阵 M ,如图2所示, M 为3维矩阵,矩阵中元素的前两维下标表示子区在图像中的位置,第三维下标表示子区邻域方向。

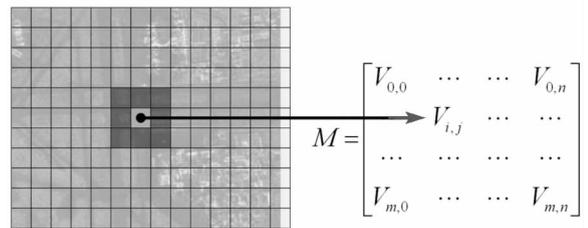


图2 建立似邻矩阵示意图

Fig.2 Matrix of surrounding similarity

若将子区看作算法运算单元,则子区相似性事实上是子区间的“差分”,固定似邻矩阵第三维坐标得到的二维图像即为子区在不同方向上的“差分图”。采用直方图计算子区相似性增加了算法对噪声的鲁棒性,特别适合存在严重斑点噪声污染的SAR图像。

2 空间子区一致性图像匹配

2.1 空间子区一致性

对于两幅图像的似邻矩阵 M_a 和 M_b ,它们的Chamfer距离为:

$$Chamfer(M_a, M_b) = \frac{1}{N_i \cdot N_j \cdot N_k} \sum_i \sum_j \sum_k |M_a(i,j,k) - M_b(i,j,k)| \quad (2)$$

定义空间子区一致性为负的Chamfer距离,由于 N_i, N_j, N_k 对于给定的图像为常数,则空间子区一致性简化为:

$$C(M_a, M_b) = - \sum_i \sum_j \sum_k |M_a(i,j,k) - M_b(i,j,k)| \quad (3)$$

空间子区一致性能够提取异源图像中共有的特征,而不受灰度变化和噪声的影响。图 3 说明这一性质,其中,图 3(a)是一副光学基准图,图 3(b)是从基准图中选取一块区域,并进行灰度变换添加斑点噪声后的图像,它们之间满足异源图像差异性特点。分别计算图 3(b)与图 3(a)中不同窗口的空间子区一致性,得到如图 3(c)所示空间子区一致性强度分布图。可以看出,在正确对应位置,其空间子区一致性强度远大于其它位置的空间子区一致性强度。因此,可以利用空间子区一致性特征对异源图像进行匹配。

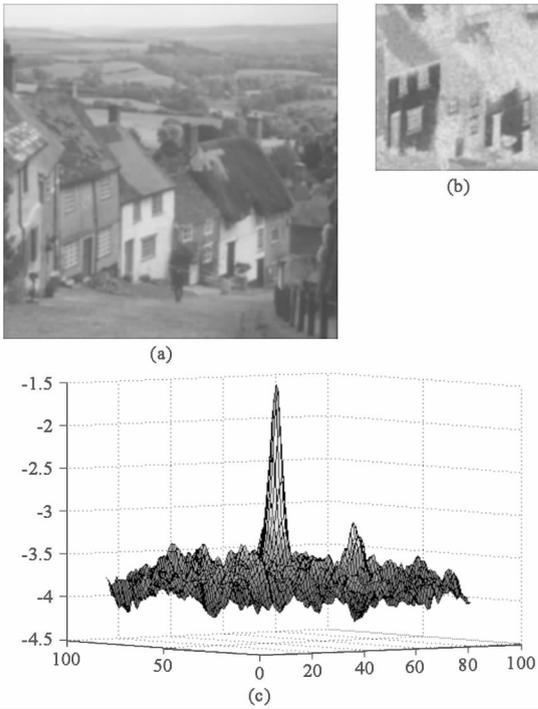


图 3 空间子区一致性强度分布图

Fig.3 Spatial sub-area congruency value

2.2 优化匹配方法

本文旨在解决下面的匹配问题:给定两幅异源图像 I_R 和 I_S ,其中 I_R 对应较大的场景 $Scene_R$,称为基准图, I_S 对应较小的场景 $Scene_S$,称为实时图,场景约束为 $Scene_R \supset Scene_S$,即实时图场景完全包含于基准图场景,寻找 I_S 中心在 I_R 中的对应位置。在 I_R 中遍历所有可能与 I_S 匹配的图像变换参数 $\{C_i\}$,选取对应的窗口 $\{W_i\}$,分别计算 W_i 与 I_S 的似邻矩阵,计算它们的空间子区一致性 S_i ,则匹配结果为 C_{i_0} ,其中 $i_0 = \operatorname{argmax}_i(S_i)$ 。

分析上述匹配方法可知,若不同的窗口包含相同子区,则该子区的相似向量被重复计算了多次。针对传统搜索策略存在的问题,下面提出一种能够减少冗余计算的搜索匹配算法。首先对基

准图进行偏移子区划分,当子区高宽为 w ,搜索步长为 b 时,分别以 (mb, nb) 为起始点划分子区,其中 $m, n \in [0, \dots, \operatorname{Ceil}(w/b) - 1]$, $\operatorname{Ceil}(a)$ 表示向正无穷方向取整。图 4 为当 $w = 9, b = 3$ 时隔行子区划分示意图,图中共有 9 种子区划分图。计算所有非边界子区的相似性向量。对每种子区划分,分别在 x, y 方向间隔 w 选取窗口,调用对应的相似性向量组成该窗口似邻矩阵,计算与实时图似邻矩阵间的空间子区一致性。选择空间子区一致性最大的窗口作为实时图最佳匹配结果。

对于许多视觉导航任务,基准图在任务开始前加载到导航系统,由于基准图的子区划分及各个子区的相似性与实时图无关,故可以在任务加载前离线计算。事实上,如果基准图只用于与实时图匹配,完全可以抛开基准图图像本身,只加载子区相似性向量。离线计算基准图子区相似性向量大大降低了实时匹配的计算量,3.1 节的实验结果显示,计算时间比在线实时计算基准图所需时间低一个量级。

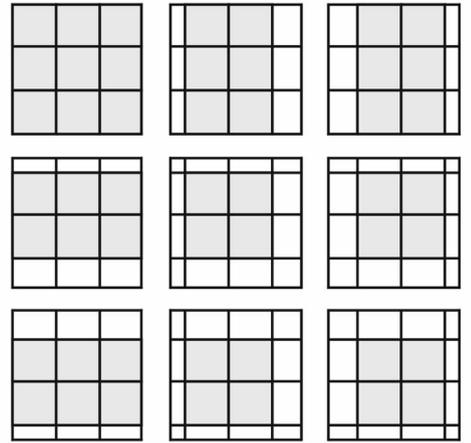


图 4 $w = 9, b = 3$ 偏移子区划分示意图

Fig.4 Sub area segmentation with $w = 9, b = 3$

3 实验结果与分析

分别进行算法匹配可靠性测试和匹配精度测试。首先用不同种类异源图像测试算法适应性;然后用匹配难度较高的 SAR 图像与光学图像测试算法匹配成功率;最后采用仿真图像考核匹配成功情况下的匹配精度。

3.1 匹配可靠性实验

分别用红外图像与可见光图像、SAR 图像与可见光图像对算法进行测试。图 5 是四组匹配结果图,其中图 5(a)为红外光实时图与可见光基准图匹配;图 5(b)为可见光实时图与红外光基准图匹配;图 5(c)为 SAR 实时图与可见光基准图匹

配;图 5(d)为可见光实时图与 SAR 基准图匹配。实时图中的十字丝指示图像中心,基准图中的十字丝指示实时图中心在基准图中的匹配位置。对于不同种类的异源图像,空间子区一致性匹配方法都能获得正确匹配结果。

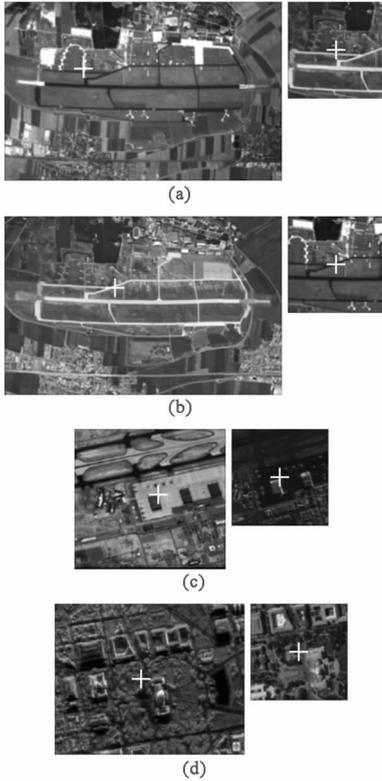


图 5 用空间子区一致性方法匹配异源图像
Fig.5 Matching multi-sensor images based on spatial sub-area congruency

选择 30 组不同场景的 SAR 图像和光学图像进行匹配,记录匹配成功率和平均处理时间。将本文方法匹配结果与互信息及相位一致性方法的匹配结果进行了对比,对比情况如表 1。其中本文方法的匹配成功率最高,互信息方法次之,相位一致性方法最低。本文方法处理时间远低于互信息方法和相位一致性方法。另外,本文方法对基准图进行离线计算时,实时匹配时间在原有基础上减少一个量级。因此,在飞行器视觉导航等对实时性要求较高的异源图像匹配任务中,本文算法具有较大的优势。

表 1 各种方法匹配结果比较

Tab.1 Compare of result of different methods

	匹配成功率	处理时间/s
相位一致性方法	10%	22.56
互信息方法	43%	120.93
本文方法	87%	2.04
本文方法(离线计算)	87%	0.37

3.2 匹配精度实验

对于网上下载的异源图像,采用手工选择控制点,用最小二乘方式进行匹配,每次选点得到的匹配结果总存在几个像素的差别,这使得很难获得匹配真值。为此,本文采用仿真异源图像对算法精度进行考核。首先选择内容丰富的光学卫星图像作为基准图。取基准图上的一部分区域,进行非线性灰度变换并加入斑点噪声,得到仿真实时图。通过对多组仿真图像的匹配实验得到匹配误差均值为 0.54 像素。

4 结论

通过对异源图像的分析发现,大区域的结构信息作为一种稳定特征可以用来进行图像匹配,从而提出了用似邻矩阵描述图像大区域的结构特征,基于空间子区一致性的异源图像匹配新方法。通过不同种类的图像进行测试实验,验证了该方法的有效性。与传统的匹配方法相比,该方法的匹配成功率更高,计算时间更少,在采用离线计算方式时,能够满足大多数视觉导航系统的实时性要求。

参考文献:

- [1] Yong S K, Jae H L, Jong B R. Multi-sensor Image Registration Based on Intensity and Edge Orientation Information[J]. Pattern Recognition, 2008, 41: 3356 - 3365.
- [2] Wegner J D, Soergel U. Registration of SAR and Optical Images Containing Bridges over Land [C]//Proceedings of EARSel Workshop Remote Sensing-new Challenges of High Resolution, March 2008.
- [3] Pan C, Zhang Z, Yan H, et al. Multisource Data Registration Based on NURBS Description of Contours [J]. International Journal of Remote Sensing, 2008, 29: 569 - 591.
- [4] Su J, Lin X G, Liu D Z. A Multi-sensor Image Registration Algorithm Based on Structure Feature Edges [J]. Acta Automatica Sinica, 2009, 35(3): 251 - 257.
- [5] Suri S, Reinartz P. On the Possibility of Intensity Based Registration for Metric Resolution SAR and Optical Imagery [C]//Proceedings of 12th AGILE International Conference on Geographic Information Science, Hannover Germany, June 2009.
- [6] Eldad H, Jan M. Intensity Gradient-based Registration and Fusion of Multi-modal Images[C]//Proceedings of MICCAI, 2006, 726 - 733.
- [7] Peter K. Image Features from Phase Congruency [J]. Journal of Computer Vision Research, 1999, 1(3): 2 - 26.
- [8] Keller Y, Averbuch A. Multisensor Image Registration via Implicit Similarity[J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2006, 28(5): 794 - 801.
- [9] Pluim J, Maintz J, Viergever M. Mutual Information Based Registration of Medical Images: A Survey [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2003, 22(8): 986 - 1004.