

差异特征与融合算法的集值映射关系的建立

牛涛, 杨风暴, 王肖霞, 安富, 李大威

(中北大学信息与通信工程学院, 山西太原 030051)

摘要: 针对红外偏振和光强图像现有融合算法无法随着图像差异特征的变化而优化选择的问题, 提出了图像差异特征和融合算法的集值映射关系的建立方法。通过图像差异特征的分析与提取构建了差异特征集, 将典型融合算法构建为融合算法集, 利用数据包络分析法计算每个差异特征对各融合算法的融合有效度并构造融合有效度分布, 通过对多组图像的融合有效度分布合成, 建立差异特征与融合算法的集值映射关系。实验证明, 所建立的集值映射关系可以优化选择融合算法, 将互补性强的差异特征有效融合。

关键词: 红外偏振; 光强图像; 差异特征; 融合算法; 集值映射

中图分类号: TN219 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)03-1073-07

Establishment of set-valued mapping between difference characteristics and fusion algorithms

Niu Tao, Yang Fengbao, Wang Xiaoxia, An Fu, Li Dawei

(School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: To solve the problem that infrared polarization and intensity image fusion algorithm is not optimal selection along with the change of difference characteristics, a method of establishing the set-valued mapping between difference characteristics set and fusion algorithms set was presented. Different characteristics set was formed with difference characteristics which was obtained by the analysis and extraction of image characteristics, and fusion algorithm set consisted of typical fusion algorithms. Fusion effective measure of each characteristic corresponding to fusion algorithms was calculated by data envelopment analysis and then constructed to be a distribution. Multi-group fusion effective measure distributions were synthesized in order to establish the set-valued mapping of difference characteristics and fusion algorithms set. Experimental results show that the set-valued mapping can select the optimal fusion algorithm, and have the highly complementary characteristics fused effectively.

Key words: infrared polarization; intensity image; difference characteristics; fusion algorithm; set-valued mapping

收稿日期: 2013-11-22; 修订日期: 2013-12-31

基金项目: 教育部高等学校博士学科点专项科研资助(博导类)(20121420110004); 国家自然科学基金(61171057);
山西省回国人员科研资助(20120706ZX)

作者简介: 牛涛(1989-), 女, 硕士生, 主要从事红外信息处理方面的研究。Email: nt775264379@126.com

导师简介: 杨风暴(1968-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事红外信息处理方面的研究。Email: yangfb@nuc.edu.cn

0 引言

红外偏振成像通过探测红外线的偏振度、偏振角等物理量^[1],探测到普通光强成像无法探测到的偏振信息,极大地提高红外探测能力。在目标探测过程中,红外偏振成像与光强成像具有很大的互补性^[2],因而将两类图像融合,有利于目标识别处理和人员观察、减少信息丢失。目前,红外偏振和光强图像融合一般依据图像差异的先验估计信息来确定融合模型和算法,然而在真实的目标检测识别中,图像的差异特征很难提前有效确定,必须依靠具体的成像条件和探测系统实时获取;并且图像的差异特征类型、差异幅度是随机变化的,事先确定的融合模型和算法很难发挥有效作用,不可避免地出现许多失效的情况,这种传统“先验假设”的融合方法成为了制约红外图像融合技术发展的瓶颈。本质上,由于图像差异特征变化是复杂动态的,具有不确定性,且融合算法的优势性能具有很大的模糊性,不建立差异特征与融合算法之间的关系,必然无法实现融合算法的优化选择。

已有学者对上述问题展开研究,分析影响融合性能的多种因素,以便有针对性地选择融合算法进行融合。笔者的课题组前期对红外双色中波图像进行差异特征的形成机理研究,分析、提取图像差异特征,研究融合模型和算法,发现在不同的融合算法下,如果各种不同的差异特征要按照一定的准则选择相应的融合算法,那么差异特征与融合算法间动态、不确定、复杂的集值映射关系的建立是必要的。学者李君灵、赵宗贵提出过多类差异信息柔性融合的概念,也仅从理论上解释了差异信息与融合方法之间存在对应关系。目前,相关文献中都没有深入研究差异信息与融合方法的对应关系是如何建立的,差异信息如何根据对应关系选择最优融合方法。因此,探索差异信息与融合方法的集值映射关系成为红外图像融合研究的新方向。

研究目的是建立差异特征和融合算法之间复杂的集值映射关系,实现融合算法的优化选择,解决上述瓶颈问题。具体内容包括:以红外偏振和光强图像为对象,剖析两类图像差异特征形成机理,探索差异特征表示与提取的方法;构建差异特征集和融合算法集,以融合算法集为论域,构造差异特征类集中每个差异特征对应融合算法子集的融合有效度分布;合成多组图像的融合有效度分布,建立集值映射关系。

1 差异特征集和融合算法集

1.1 差异特征的分析与提取

偏振和光强两类图像的红外成像特性的差异是形成图像差异特征的主要因素,成像特性包括目标(和背景)的辐射特性、大气传输特性、成像仪响应特性等。(1) 红外光强成像主要对景物的红外辐射强度成像,其主要与景物的温度、辐射率等有关;红外偏振成像主要是对目标(和背景)多个不同方向的偏振量进行光强成像,其主要与景物材料性质、表面粗糙度等有关。(2) 利用偏振技术可以抑制大气辐射背景,提高物体的识别效果,有效地克服了大气对红外成像的影响^[3]。(3) 偏振成像需要在不同的度下进行多次光强成像,通过计算才能得到一幅偏振图像,成像过程复杂,实时性较差,但偏振度是辐射值之比,偏振测量无需准确的辐射量校准就可以达到相当高的精度;光强成像过程简单,实时性较好,但需要对成像设备进行及时的定标校准,否则所测得的红外辐射亮度和温度不能反映被测物的真实辐射温度和亮度。

根据上述成像特性差异分析,偏振和光强图像特征不同,在红外光强图像中主要以亮度差异区分物体,当物体间辐射差异较小时,亮度识别比较困难,而物体间的偏振差异可能较大,便于二者区分;目标处于复杂场景时,目标与背景对比度较低,不利于目标识别,而红外偏振成像可以抑制复杂的背景,提高目标的识别效果^[4];同一目标在光强图像中温度高的部位亮,温度低的部位暗,物体轮廓比较模糊,而红外偏振成像可以获得目标的几何形状信息,其边缘和轮廓特征明显。因此,差异特征的表示与提取从空间形状特征(包括纹理、几何特征)、统计特征、代数特征等方面进行。

1.2 差异特征集的构建

一般描述红外偏振和光强图像特征数目庞大,不易于对其进行观察分析,因此,先对红外偏振和光强图像的原始特征进行归一化处理,得到偏振和光强图像的特征分布,经过显著差异分析,选择能够满足偏振和光强图像形成机理的有效差异特征,构建差异特征集 $T_i, i \in \{1, 2, \dots, m\}$ 。选择不同场景的四组红外偏振和光强图像^[5-8],处理局部区块图像更有利于提取出有效的特征,因此宜对偏振和光强图像的局部区块进行研究。图 1(a1)、(b1),图 1(a2)、(b2),图 1(a3)、(b3),图 1(a4)、(b4)为 4 组图像,分别记为图组

IMA、IMB、IMC、IMD。以每组图像中白色方框区块为研究对象,所选择的区块均经过了严格的校正和匹配,对其进行特征提取,选择有效差异特征,构建差异特征集合。



(a) 偏振图像 (b) 光强图像
(a) Polarization images (b) Intensity images

图1 红外偏振和光强图像

Fig.1 Infrared polarization and intensity images

将提取出的 20 个图像特征纳入这 4 组研究对象的原始特征空间,这些特征量包括图像的灰度均值、标准差、粗糙度、对比度、方向度、平均梯度、平均自相关函数、区域面积、边界频率、HU 矩组(7 个)、平滑度、三阶矩、一致性、熵。将这些特征按上述顺序进行编号,分别记为 0~19 号特征。因每种特征的量纲不同,在数量级上可能存在较大差异,为便于分析它们的显著性差异,现将研究对象的 20 个特征进行标准化处理,其特征分布如图 2 所示。

经显著性差异分析,由图 2 可以看出:0、1、3、6、8、17 号特征在 4 组样本区块中有差异,但是 17 号特征差异微小,故将该特征去除,则差异显著的 0、

1、3、6、8 号特征构成差异特征集 $T_i, i \in \{1, 2, \dots, 5\}$, 具体为灰度均值、标准差、对比度、自相关函数和边界频率,依次记作 $T_1、T_2、T_3、T_4、T_5$,并用偏振和光强图像特征(即 $T_{i1}、T_{i2}$)的相对差异分别描述各差异特征值,由公式(1)来计算。

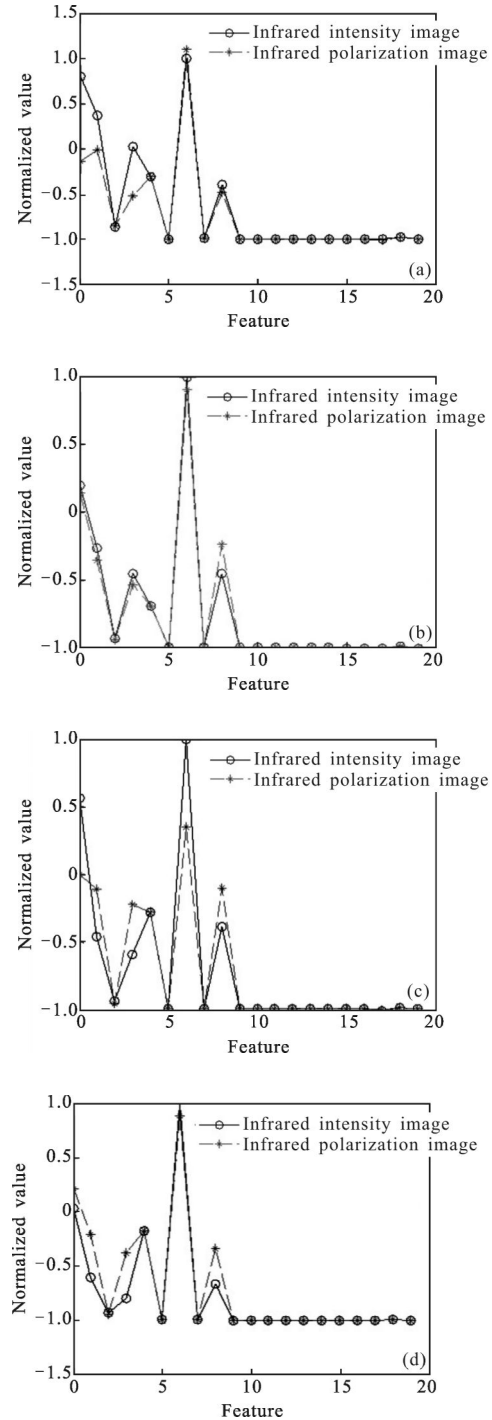


图2 四组偏振和光强图像区块的特征分布

Fig.2 Respectively four features distribution of polarization and intensity images block

$$\Delta T_i = \frac{|T_{i1} - T_{i2}|}{(T_{i1} + T_{i2})/2} \quad (1)$$

1.3 融合算法集的构建

一般图像融合算法复杂而多样,不易于对其进行统计,因此将典型融合算法构建为融合算法集 A_i , $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ 。图像融合在处理过程中所处的阶段,按照信息的抽象程度,从目标识别层次上划分,图像融合可分为以下 3 个层次^[9]:(1) 像素级图像融合;(2) 特征级图像融合;(3) 决策级图像融合。迄今为止,图像融合方法主要是在像素级上进行的,像素级融合中常用的典型融合算法为加权融合、调制融合、金字塔变换融合、PCA 融合、小波变换融合、非下采样 Contourlet 变换(NSCT)融合等,这些典型融合算法构成融合算法集 A_j , $j \in \{1, 2, \dots, 6\}$,典型融合算法依次记作 A1、A2、A3、A4、A5、A6。

2 集值映射关系的建立

随着拍摄场景、成像条件等的不同,图像差异特征的变化呈现随机性和不确定性,融合算法融合各种图像特征的能力具有模糊性,为了寻找融合算法随着差异特征改变而变化的优化方式,差异特征和融合算法集值映射关系的建立就尤为重要。集值映射关系的建立拟采用构造差异特征集中每个差异特征对各融合算法的融合有效度分布的方法。在一定的融合算法下,融合两类图像的差异特征,判定融合后图像的特征对于融合前两类图像特征是否有效融合,那么称该有效融合程度为融合有效度,记作 θ , $\theta \in (0, 1]$,融合有效度越趋近于 1,则特征融合效果越好。利用数据包络分析法计算融合有效度,进而构造融合有效度分布。

2.1 融合有效度

数据包络分析方法^[10](Data Envelopment Analysis, DEA)直接使用输入、输出数据建立非参数的经济数学模型,是一种多输入多输出的分析方法,即要素输入与输出之间的相对效率评价的系统分析方法。该方法主要是通过保持决策单元 (Decision Making Units, DMU)的输入或者输出不变,借助于数学规划和统计数据比较决策单元之间的相对效率,对决策单元做出评价,它能充分考虑对于决策单元本身最优的输入输出方案,因而能够更理想地反映决策单元自身的特点。DMU 指的是同质的(或同类型的)个

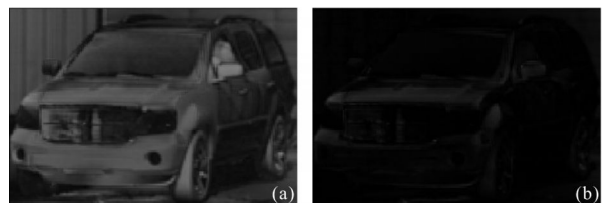
体,即评价的对象,可以将一定“输入”转化为一定“输出”。鉴于数据包络分析法可以预测多种方案间的相对有效性,利用该方法评价各融合算法(DMUs)的相对有效程度,由 CCR 模型计算得到红外偏振和光强图像差异特征对各融合算法的特征融合有效度。常见的融合评价指标是直接比较融合后图像之间的优劣,而基于 DEA 的融合有效度先从统计学角度测算了融合后图像将融合前两类图像的差异特征有效融合的程度,再比较不同融合算法的融合有效度。

CCR 模型是最基本的 DEA 模型之一,由 Chames, Cooper 和 Rhodes 建立。假设有 m 项输入、 s 项输出的第 $j(j=1, 2, \dots, n)$ 个决策单元,其输入向量为 $X_j=(x_{1j}, \dots, x_{mj}, \dots, x_{mj})$,输出向量为 $Y_j=(y_{1j}, \dots, y_{sj}, \dots, y_{sj})$,则从输出角度测算决策单元 (X_0, Y_0) 技术效率的模型,得到各决策单元的技术有效值 θ ,该模型为:

$$\begin{cases} \min \theta \\ \text{s.t.} \sum_{j=1}^n \lambda_j X_j \leq \theta X_0 \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j Y_j \geq Y_0 \\ \lambda_j \geq 0, j=1, 2, \dots, n \\ \theta \text{ 无约束} \end{cases} \quad (2)$$

以 4 组图像区块为例,根据 CCR 模型计算差异特征对融合算法集 A_j , $j \in \{1, 2, \dots, 6\}$ 的特征融合有效度。设每组中两类图像的差异特征 (T_{i1}, T_{i2}) 作为输入向量 X_j ,即 $X_j=(T_{i1}, T_{i2})$,经不同融合算法融合后,融合后图像的特征 (T_{ij}) 作为输出向量 Y_j ,即 $Y_j=(T_{ij})$,每组图像在输入向量不变的情况下评价各融合算法的融合有效度,从该差异特征角度测算各融合算法的特征融合有效度,代入公式(2)计算 θ_j 。

首先,对图组 IMA 进行 MATLAB R2010a 编程,经融合算法后得到各融合后图像如图 3 所示,并计算两类图像差异均值 (T_{i1}, T_{i2}) 和融合后图像均值 T_{ij} ,分别作为 CCR 中的输入和输出值,见表 1。



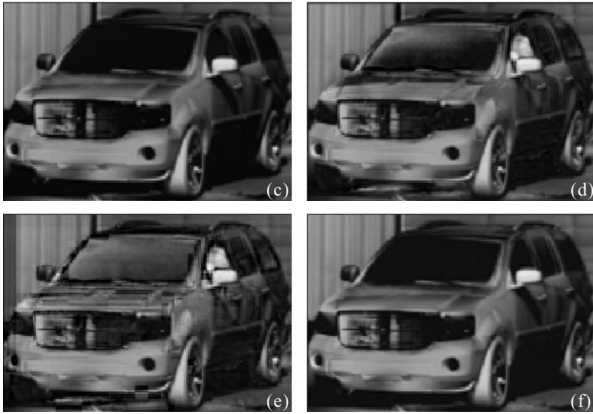


图 3 图组 IMA 分别经 A1、A2、A3、A4、A5 和 A6 融合后的图像
Fig.3 Respectively fused image of IMA by A1, A2, A3, A4, A5 and A6

表 1 输入和输出值

Tab.1 Input and output values

Image IMA	Output	Input (Mean difference)	
A_j	T_f	T_{11}	T_{12}
A1	51.3742	54.3281	38.9812
A2	9.3104	54.3281	38.9812
A3	65.2007	54.3281	38.9812
A4	75.5337	54.3281	38.9812
A5	75.8382	54.3281	38.9812
A6	56.2008	54.3281	38.9812

其次，将表1中图组 IMA 的输入和输出值作为 CCR 模型的输入和输出向量，经 DEAP 2.1 计算，得到差异均值 $T1$ 特征对各融合算法的融合有效度 θ_f ，见表 2。

表 2 差异均值的融合有效度

Tab.2 Fusion effective measure of mean difference

Algorithm	IMA	IMB	IMC	IMD
A_j	θ_{1j}	θ_{2j}	θ_{3j}	θ_{4j}
A1	0.677	0.783	0.668	0.771
A2	0.123	0.309	0.355	0.320
A3	0.860	0.830	0.617	0.886
A4	0.996	0.568	0.646	0.788
A5	1.000	1.000	1.000	1.000
A6	0.741	0.823	0.804	0.832

最后，分别计算图组 IMB、IMC、IMD 差异均值 $T1$ 对各融合算法的融合有效度 θ_{2j} 、 θ_{3j} 、 θ_{4j} ，计算结果见表 2。

重复上述步骤，分别计算 $T2$ 、 $T3$ 、 $T4$ 、 $T5$ 对各融合算法的融合有效度。

由于数据包络分析法自身的优点是它所评价决策单元的有效性与输入输出量纲选取无关，且无须任何权重假设，而以决策单元输入输出的实际数据求得有效程度，排除了很多主观因素，具有很强的客观性，因此，基于 DEA 的融合有效度客观地评价了算法的融合效果。

2.2 集值映射关系

利用上节中图组 IMA、IMB、IMC、IMD 差异均值对各融合算法的融合有效度 θ_{2j} 、 θ_{3j} 、 θ_{4j} ，构建 4 组图像的差值均值对各融合算法的融合有效度分布，如图 4 所示。

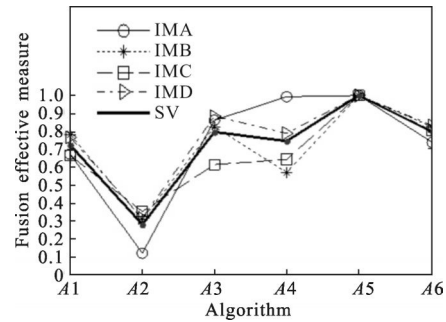


图 4 差异均值的融合有效度分布及差异均值与融合算法的集值映射

Fig.4 Fusion effective measure distribution of mean, set-valued mapping between mean and fusion algorithms

集值映射关系是根据差异特征优化选择各融合算法而形成的映射关系，图 4 中 4 组图像差异均值的融合有效度分布反映了差异均值与各融合算法的一对多的映射关系。为了综合考虑多组图像的映射关系，将 4 组图像区块的差异均值的融合有效度分布进行合成，合成后的 θ_{1j} 融合有效度分布即为差异均值与各融合算法的集值映射关系。该集值映射关系的建立是利用平均法对四组图像的融合有效度分布进行合成，合成结果如图 4 所示。

选择融合有效度从高到底依序为最高和次高的融合算法的图像融合效果较好，则认为融合算法分别为最优和次优。根据差异均值与融合算法的集值

映射关系可知,针对差异均值特征,小波、NSCT 融合算法的融合效果较好。

同理,得到差异标准差、对比度、自相关函数和边界频率的融合有效度分布及集值映射,如图 5~8 所示。根据集值映射关系可知,对于标准差特征,PCA 和小波融合算法的融合效果较好;对于对比度

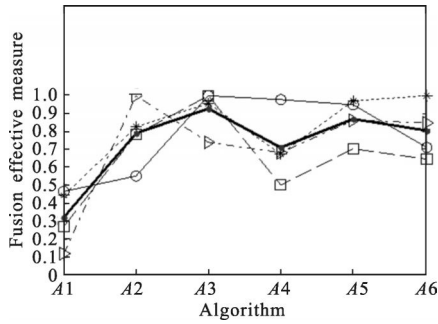


图 5 标准差的融合有效度分布及标准差与融合算法的集值映射
Fig.5 Fusion effective measure distribution of standard deviation, set-valued mapping between standard deviation and fusion algorithms

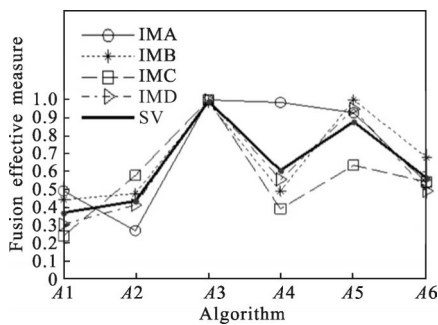


图 6 对比度的融合有效度分布及对比度与融合算法的集值映射
Fig.6 Fusion effective measure distribution of contrast, set-valued mapping between contrast and fusion algorithms

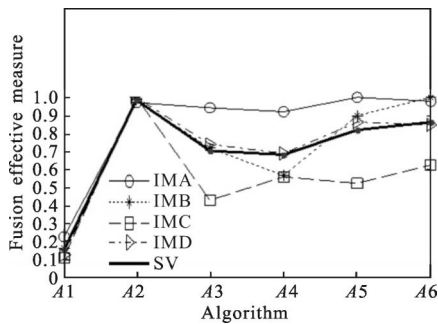


图 7 自相关的融合有效度分布及自相关与融合算法的集值映射
Fig.7 Fusion effective measure distribution of autocorrelation, set-valued mapping between autocorrelation and fusion algorithms

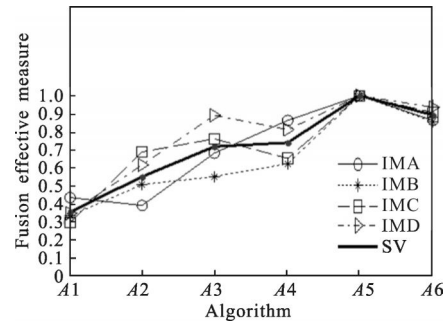


图 8 边界频率的融合有效度分布及边界频率与融合算法的集值映射
Fig.8 Fusion effective measure distribution of boundary frequency, set-valued mapping between boundary frequency and fusion algorithms

特征,PCA 和小波融合算法的融合效果较好;对于自相关特征,调制和小波融合算法的融合效果较好;对于边界频率特征,小波和 NSCT 融合算法的融合效果较好。

3 集值映射关系的验证分析

集值映射关系的建立旨在将偏振和光强图像互补的特征最优融合,由有效差异特征优化选择融合算法,即由互补性越强的特征选择的算法融合效果越优。因此,互补性强、差异性大的差异特征是否选择最优融合算法是衡量集值映射关系是否可行的重要指标。表 3 为 4 组图像的差异特征值。

鉴于不同图组差异特征值不同,从表 3 中可以看出各特征差异最大的图组分别是图组 IMA、IMD、IMD、IMC、IMD。由上述特征差异值最大的图组衡量文中建立的集值映射关系是否选择了最优融合算法。分析结果如下:(1)从图 4 中 IMA 均值融合有效度分布可知最优融合算法是小波融合,与均值和算法的集值映射关系所表征的最优融合算法一致。(2)从图 5 中 IMD 标准差融合有效度分布可知最优融合算法是调制融合,与标准差和算法的集值映射关系所表征的次优融合算法一致。(3)从图 6 中 IMD 对比度融合有效度分布可知最优融合算法是 PCA 融合,与对比度和算法的集值映射关系所表征的最优融合算法一致。(4)从图 7 中 IMA 自相关融合有效度分布可知最优融合算法是调制融合,与自相关和算法的集值映射关系所表征的最优融合算法一致。

(5) 从图8中IMA边界频率融合有效度分布可知最优融合算法是小波融合,与边界频率和算法的集值映射关系所表征的最优融合算法一致。综上,说明了互补性强差异特征通过集值映射关系选择相应的融合算法,且融合效果较好。

表3 图像的差异特征值

Tab.3 Value of differences in the characteristics of images

	Mean difference	Standard deviation difference	Contrast difference	Autocorrelation difference	Boundary frequency difference
IMA	0.7011	0.3289	0.7067	0.0457	0.1485
IMB	0.0592	0.1231	0.1477	0.0800	0.3470
IMC	0.4372	0.4900	0.6208	0.4737	0.4001
IMD	0.1692	0.6642	1.0143	0.0399	0.7187

4 结论

对于差异特征与融合算法间动态、不确定、复杂的关系,采用差异特征对各融合算法的融合有效度分布建立二者的集值映射关系;集值映射关系的建立解决了融合算法随着差异特征的变化而优化选择的问题,反应了差异特征可以按照一定的准则选择相应的融合算法;基于集值映射关系差异特征互补性强的两类图像融合效果较好。

在实验过程中,为了使融合有效度分布的合成效果更好,建议选取的研究对象越多越好。随着偏振红外图像融合技术的发展逐渐趋向于自适应融合,差异特征与融合算法的集值映射关系的研究成为构建自适应融合模型的基础,差异特征驱动下的自适应融合模型是后续需要重点研究的方向之一。

参考文献:

- [1] Yang Fengbao, Li Weiwei, Lin Suzhen, et al. Study on fusion of infrared polarization and intensity images [J]. *Infrared Technology*, 2011, 33(5): 262-266. (in Chinese) 杨风暴,李伟伟,蔺素珍,等. 红外偏振与红外光强图像的融合研究[J]. *红外技术*, 2011, 33(5): 262-266.
- [2] Yang Fengbao, Wei Hong. Fusion of infrared polarization and intensity images using support value transform and fuzzy combination rules [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2013, 60: 235-243.
- [3] Zou Xiaofeng, Wang Xia, Jin Weiqi, et al. Atmospheric effects on infrared polarization imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 304-308. (in Chinese) 邹晓风,王霞,金伟其,等. 大气对红外偏振成像系统的影响[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(2): 304-308.
- [4] Zhang Chaoyang, Cheng Haifeng, Chen Zhaohui, et al. Polarimetric imaging of camouflage screen in visible and infrared wave band [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(3): 423-427. (in Chinese) 张朝阳,程海峰,陈朝辉,等. 伪装遮障的光学与红外偏振成像[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(3): 423-427.
- [5] Lavigne D A, Breton M. A new fusion algorithm for shadow penetration using visible and midwave infrared polarimetric images [C]//13th Conference on Information Fusion, 2010: 1-7.
- [6] Lavigne D A, Breton M, Fiournier G, et al. A new passive polarimetric imaging system collecting polarization signatures in the visible and infrared bands [C]//SPIE, 2009, 7300: 1-10.
- [7] Ratliff Bradley M, Boger James K. Image processing methods to compensate for IFOV errors in microgrid imaging polarimeters [C]//SPIE, 2006, 6240: 1-12.
- [8] Tyo J S, Goldstein D L, Chenault D B, et al. Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(22): 5453-5467.
- [9] Peng Yiyue, He Weiji, Gu Guohua, et al. Visible and infrared image fusion based on multi-level method and image contrast improvement [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(4): 1095-1099. 彭逸月,何伟基,顾国华,等. 多层次及对比度提升的红外和可见光图像融合 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(4): 1095-1099. (in Chinese)
- [10] Wei Quanling. Data Envelopment Analysis [M]. Beijing: Science Press, 2004: 5-18. (in Chinese) 魏权龄. 数据包络分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2004: 5-18.