

## 基于偏振成像的红外图像增强

周 强,赵巨峰,冯华君,徐之海,李 奇,陈跃庭

(浙江大学 现代光学仪器国家重点实验室,浙江 杭州 310027)

**摘 要:** 针对红外图像对比度低,细节纹理较弱的特点,利用物体偏振特性提出基于偏振成像的红外图像增强方法,即获取红外偏振度图像并与源光强图像融合。首先,分析了偏振成像理论,利用偏振成像技术获取偏振图像。其次,为了能够充分获取偏振度图中的信息,运用剪切波变换对图像进行多尺度分解。最后,采用区域特征匹配融合策略,得到增强图像。为测试方法的有效性,搭建实验装置,进行实拍图像实验。主观与客观评价结果均表明,增强后的图像较原图像具有更加丰富的图像细节与偏振目标信息,对目标识别与探测具有重要意义。

**关键词:** 红外图像增强; 偏振; 剪切波; 区域特征匹配; 融合

**中图分类号:** TN219 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)01-0039-09

## Infrared image enhancement using polarization imaging

Zhou Qiang, Zhao Jufeng, Feng Huajun, Xu Zhihai, Li Qi, Chen Yueting

(State Key Laboratory of Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** Since the low contrast and lack of details in infrared imagery, a polarization imaging based enhancement method was proposed. Fusing the infrared polarization image and intensity image, this infrared image enhancement approach made the target areas prominent. Firstly, the polarization imaging theory was analyzed, and then polarization images were obtained using the polarization imaging technology. Secondly, the information of polarization images could be well acquired with the help of Shearlets based multi-scale image decomposition. Finally, the enhanced fused result was got with region feature matching. To test the effectiveness of this method, experimental device was built to get real images. Compared with original image, both the subjective and objective evaluation results indicate that the enhanced images have much more image details and polarization information, which is useful for target detection and recognition.

**Key words:** infrared image enhancement; polarization; Shearlets; region feature matching; fusion

收稿日期:2013-05-11; 修订日期:2013-06-03

基金项目:国家自然科学基金(61275021,61178064)

作者简介:周强(1989-),男,硕士,主要从事光学成像方面的研究。Email:21130051@zju.edu.cn

导师简介:冯华君(1963-),男,教授,博士生导师,主要从事光学遥感方面的研究。Email:fenghj@zju.edu.cn

## 0 引言

红外图像反应地物的热辐射特性。由于红外探测隐蔽性好,成像距离很远,并且能够排除大气云雾的干扰,观测到遮蔽物下的目标,具有很强的环境适应性,红外成像技术为现代战争中强有力的侦查手段。同时其缺点也较明显:红外图像中目标与背景对比度低,画面一般较暗,信噪比低,边缘模糊,细节纹理较弱,灰度分布集中<sup>[1]</sup>。随着红外伪装技术的发展,新型的红外伪装涂料使得目标不易被红外相机探测。对于红外图像以上的特点,图像的新型增强技术的研究,对于目标探测与识别,红外图像的增强具有重大意义。

以往的红外图像的增强手段,主要直接对红外光强图像进行图像处理,调整灰度直方图<sup>[2]</sup>;基于人眼视觉特性的增强算法<sup>[3]</sup>;以及图像的分形增强处理<sup>[4]</sup>等方法,这些方法依赖于单幅图像,增强图像已有的信息,对于质量较差的红外图像,增强效果非常有限。另一方面,红外成像往往无法获得目标轮廓等细节信息,某些目标特征会被红外热辐射掩盖。

文中利用偏振成像方法获取图像中的偏振特征,研究表明<sup>[5]</sup>,人造物以及水面等物体都具有一定的偏振度,且与其本身辐射强度无关,偏振图像能够凸显部分地物轮廓及表面偏振特征<sup>[6]</sup>。融合偏振图像与光强图像,能够加强红外图像中地物轮廓,体现目标偏振特征。

## 1 表面热辐射偏振理论模型

### 1.1 物体的红外辐射偏振度

辐射入射到物体表面时,物体的吸收率  $\alpha$ ,反射率  $\rho$  与透射率  $\tau$  关系为:

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (1)$$

对于不透明物体  $\tau = 0$ , 而物体的发射率  $\varepsilon = \alpha \varepsilon_0$ ,  $\varepsilon_0$  为物体比辐射率,结合公式(1)则有:

$$\varepsilon = \varepsilon_0(1 - \rho) \quad (2)$$

假设物体是理想光滑反射表面,表面可看成是由微小面元组成,微小面元的偏振度  $P$  根据玻恩-沃耳夫相干矩阵由公式(3)计算得到。

$$P = \left| \frac{\rho_s - \rho_p}{2 - \rho_s - \rho_p} \right| \quad (3)$$

式中:  $\rho_s$ 、 $\rho_p$  分别为电磁波  $s$  分量与  $p$  分量反射系数,物体红外辐射同样遵守菲涅耳定律。根据菲涅耳定律,表面反射率  $\rho$  的定义如公式(4)。

$$\begin{cases} \rho_s = \frac{\sin^2(\theta - \theta')}{\sin^2(\theta + \theta')} \\ \rho_p = \frac{\tan^2(\theta - \theta')}{\tan^2(\theta + \theta')} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\theta$  以及  $\theta'$  为入射角与折射角。根据公式(3)、(4)与菲涅耳折射定律可推导出偏振度公式(5)。

$$P = \left| \frac{\rho_p - \rho_s}{2 - \rho_p - \rho_s} \right| = \frac{(n-1/n)^2 \sin^2 \theta}{n^2 + n^2 \cos^2 \theta + 2 \cos^2 \theta - \sin^2 \theta / n^2 + 4 \cos \theta \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} \quad (5)$$

式中:  $n$  为物体折射率;  $\theta$  为辐射出射角。由公式(5)可知物体偏振度与材料折射率、成像辐射角有关。

### 1.2 介质与金属偏振度分析

根据公式(5)分析理想光滑表面偏振度与辐射出射角的关系。金属折射率为复数,表示为:  $\tilde{n} = n - \chi_i$ ,  $n$  表示折射率,  $\chi$  表示吸收系数; 介质折射率为实数。分别画出金属与介质偏振度和出射辐射角的关系如图 1(取铁折射率  $n=1.78$ , 吸收系数  $\chi=3.03$ , 介质折射率  $n=1.5$ ) 所示。

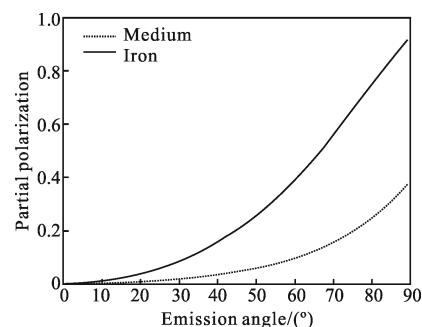


图 1 出射辐射角与偏振度关系曲线

Fig.1 Curve between emission angle and partial polarization

图 1 表明,理想的金属与介质面元辐射出射角越大相应的红外偏振度越大,考虑到粗糙表面的影响,根据参考文献[7]中关于金属粗糙表面偏振度的分析,粗糙表面不影响出射角与偏振度的变化趋势。

辐射出射角即是探测器与面元法线的夹角,图 1 曲线趋势说明了红外成像中物体边缘对应的偏振度较大,反应在偏振度图像中,物体边缘得以凸显,增强了物体的轮廓特征;此外,介质与金属偏振度的差异,对于在热红外图像中亮度表现相当的金属与

介质通过偏振成像后得以对比度的增强。融合偏振度图与原红外光强图能够达到很好的图像增强效果。

## 2 Stokes 图像获取

物体的偏振信息可以用 Stokes 图像来描述,入射光通过起偏器或相位延迟器,通过周期性的改变起偏角或相位延迟角,得到一组出射光强度值,对这些强度值做傅里叶分析得到 4 个 Stokes 参数图像,分别表示辐射总强度  $S_0$ ,不同坐标下分解入射辐射获得的线偏振分量  $S_1$ 、 $S_2$ ,辐射的圆偏振分量  $S_3$ 。绝大多数的圆偏振分量在仪器检测范围内可以忽略<sup>[8]</sup>。取  $S_3=0$ 。

旋转起偏器,起偏角  $\theta$  与 Stokes 参量之间存在公式(5)所示的关系<sup>[9]</sup>, $I_\theta$  表示获得的光强图像, $S_0$ 、 $S_1$ 、 $S_2$  表示 Stokes 的三个分量。

$$I_\theta = S_0 + S_1 \cos(2\theta) + S_2 \sin(2\theta) \quad (5)$$

根据公式(5),至少需要三个起偏角对应的光强值即可算出  $S_0$ 、 $S_1$ 、 $S_2$ ,通常取  $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $120^\circ$ ,或者  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $145^\circ$ 。文中采用多角度测量计算偏振图像,采用多角度测量计算 Stokes 参量可以减小测量误差和图像噪声对偏振度图与偏振相角图的影响。

旋转红外偏振片在  $360^\circ$  内采集  $n$  幅图像,根据公式(6)~(8)计算偏振参数图像。

$$S_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_{\theta_i} \quad (6)$$

$$S_1 = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n I_{\theta_i} \cos(2\theta_i) \quad (7)$$

$$S_2 = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n I_{\theta_i} \sin(2\theta_i) \quad (8)$$

若采集角度间隔相等,则有:  $\theta_i = 2\pi i/n$ 。偏振度描述为  $P$ ,偏振相角描述为  $\alpha$ ,可用公式(9)、(10)计算得到。

$$P = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0} \quad (9)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{S_1}{S_2}\right) \quad (10)$$

## 3 基于剪切波的偏振图像融合算法

### 3.1 剪切波

剪切波(Shearlets)是 2005 年提出的一种多分辨率小波<sup>[10]</sup>,以其有更全面的尺度和方向性应用于图

像多尺度分析,能够充分的表达图像的细节信息,剪切波变换正逐步应用于图像去噪与边缘检测。剪切波的尺度分解与轮廓波相似,都是基于方向滤波器的拉普拉斯金字塔分解。剪切波的方向滤波器由剪切矩阵产生,在方向上的分解没有数量限制,因此方向解析力优于轮廓波<sup>[11]</sup>。

剪切波分解流程如图 2 所示。

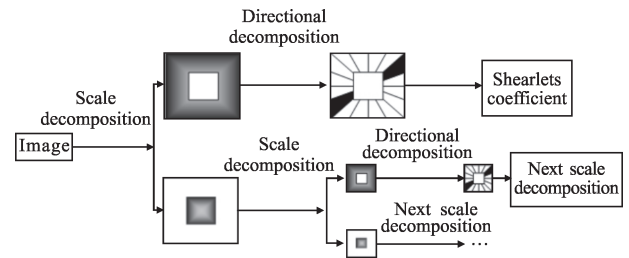


图 2 剪切波分解流程

Fig.2 Diagram of image Shearlets decomposition

剪切波能够充分表征物体边缘特征,是由于其支撑基具有一定斜率并且成梯形分布,根据剪切波理论<sup>[10]</sup>,如图 3(a)所示,假设剪切波分解尺度为  $j$ ,方向因数为  $L$ ,则每一个剪切波系数位在大小为  $2^j \times 2^j$ ,斜率为  $2^{-L}$  的梯形对上。剪切波支撑基的大小与方向都与尺度  $j$  有关,当  $j$  变大,支撑基面积变大,斜率随之改变,使得剪切波具有各向异性,有效感知曲线方向,较好的表示图像边缘特征,如图 3(b)所示。红外偏振图像轮廓特征明显,则运用剪切波能够充分的解析出偏振信息。

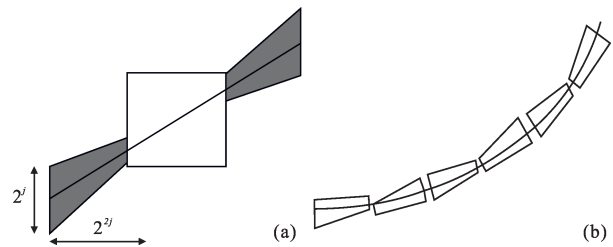


图 3 剪切波支撑基

Fig.3 Support basis for Shearlets

### 3.2 融合规则

运用剪切波变换分别将光强图像与偏振图像分解在不同尺度与方向上的高频系数和近似低频系数,这里尺度  $j$  取 3,每一尺度分解方向均为 6。对分解后的高低频系数运用一定的融合规则生成新的融合系数,最后经过剪切波逆变换得到融合图像。

融合规则采用区域特征匹配法,选取红外图像中显著区域与偏振图像中轮廓、偏振目标特征,使得

融合后的图像比原红外光强图具有更多的细节信息。

基于剪切波的融合框架如图 4 所示。

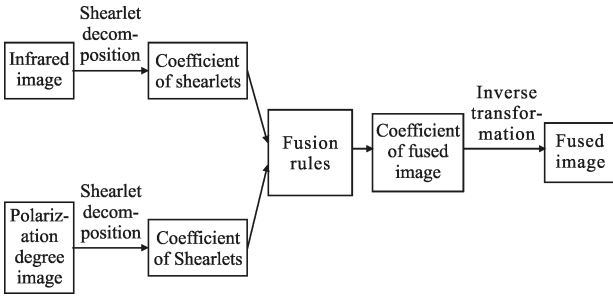


图 4 基于剪切波的融合框架

Fig.4 Framework for Shearlets based fusion

### 3.2.1 低频融合规则

剪切波分解得到的低频图像为图像的近似描述,

$$M^{A,B}(m,n) = \frac{2 \sum_{\Delta m, \Delta n \subset Q} |W^A(m+\Delta m, n+\Delta n)| |W^B(m+\Delta m, n+\Delta n)|}{\sum_{\Delta m, \Delta n \subset Q} |W^A(m+\Delta m, n+\Delta n)|^2 + \sum_{\Delta m, \Delta n \subset Q} |W^B(m+\Delta m, n+\Delta n)|^2} \quad (12)$$

式中:  $M^{A,B}(m,n)$  为两图像以  $m,n$  为中心的  $Q$  区域内相似度, 其值在 0~1 之间,  $W^A$  与  $W^B$  表示图像 A 与 B 的区域低频系数。定义  $T_{low}$  为低频融合相似性判断

$$F_L(m,n) = \begin{cases} W^A(m,n), M^{A,B}(m,n) < T_{low} \text{ 且 } E^A > E^B \\ W^B(m,n), M^{A,B}(m,n) < T_{low} \text{ 且 } E^B > E^A \\ c_A(m,n) \times W^A(m,n) + c_B(m,n) \times W^B(m,n), M^{A,B}(m,n) \geq T_{low} \end{cases} \quad (13)$$

式中: 权值  $c_A, c_B$  的计算如公式(14)。

$$\begin{cases} c_A(m,n) = \frac{E_A(m,n)}{E_A(m,n) + E_B(m,n)} \\ c_B(m,n) = \frac{E_B(m,n)}{E_A(m,n) + E_B(m,n)} \end{cases} \quad (14)$$

待融合两图像中低频差异较大, 一方面为了突出偏振图中的偏振信息, 另一方面保留光强图像中亮度信息, 通过实验测定阈值  $T_{low}$  取值在 0~0.5。

### 3.2.2 高频融合规则

剪切波高频系数表示图像不同方向与尺度的细

$$M_{j,k}^{A,B}(m,n) = \frac{2 \sum_{q \subset Q} h(q) |W_{jk}^A(m,n) - \overline{u_{jk}^A}(m,n)| |W_{jk}^B(m,n) - \overline{u_{jk}^B}(m,n)|}{\sum_{q \subset Q} h(q) |W_{jk}^A(m,n) - \overline{u_{jk}^A}(m,n)|^2 + \sum_{q \subset Q} h(q) |W_{jk}^B(m,n) - \overline{u_{jk}^B}(m,n)|^2} \quad (16)$$

定义  $T_{high}$  为高频融合相似性判断的阈值, 通过实验测定  $T_{high}$  取, 作为相似区域判定值。高频融合

$$F_{H,j,k}(m,n) = \begin{cases} W^A(m,n), M_{j,k}^{A,B}(m,n) < T_{high} \text{ 且 } D_{j,k}^A > D_{j,k}^B \\ W^B(m,n), M_{j,k}^{A,B}(m,n) < T_{high} \text{ 且 } D_{j,k}^B > D_{j,k}^A \\ c_A(m,n) \times W^A(m,n) + c_B(m,n) \times W^B(m,n), M_{j,k}^{A,B}(m,n) \geq T_{high} \end{cases} \quad (17)$$

红外光强图像中表现为除去细节的区域灰度图像, 红外偏振图像表现为强偏振物体特征的区域灰度, 各自的目标区域的特征通过区域能量的大小判断<sup>[12]</sup>。

局部区域能量的度量用公式(11)表示,  $E(m,n)$  表示以  $m,n$  为中心的区域  $Q$  内的平均能量, 区域  $Q$  大小为  $Q_1 \times Q_2$  根据具体情况可选择  $3 \times 3, 5 \times 5$  或  $7 \times 7$ 。  $W$  表示低频剪切波系数。

$$E(m,n) = \frac{\sum_{\Delta m, \Delta n \subset Q} |W(m+\Delta m, n+\Delta n)|^2}{Q_1 \times Q_2} \quad (11)$$

由于红外图像与处理后偏振图像局部区域会存在较大的变化, 引入区域能量相似度来度量区域能量的差异, 具体表示为公式(12):

的阈值, 若  $M^{A,B}(m,n) < T_{low}$ , 则表示两图像区域不相似, 低频系数选取区域能量大者。反之, 取两图像系数的加权平均。具体表示如公式(13):

节信息, 融合图像细节信息的度量用区域加权方差表示, 对于尺度  $j$ , 方向  $k$  以  $m,n$  为中心的区域加权方差表示如公式(15)。

$$D_{j,k}(m,n) = \sum_{q \subset Q} h(q) |W_{jk}(m,n) - \overline{u_{jk}}(m,n)|^2 \quad (15)$$

式中:  $h(q)$  表示高斯权系数矩阵;  $\overline{u_{jk}}(m,n)$  为区域系数平均值。

高频区域相似度的描述与低频类似, 相似度

$M_{j,k}^{A,B}(m,n)$  写成公式(16)。

系数计算如公式(17):

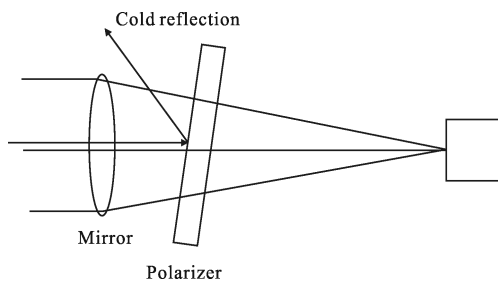


式中,权值  $c_A, c_B$  由公式(18)给出。

$$\begin{cases} c_A(m, n) = \frac{D_A(m, n)}{D_A(m, n) + D_B(m, n)} \\ c_B(m, n) = \frac{D_B(m, n)}{D_A(m, n) + D_B(m, n)} \end{cases} \quad (18)$$

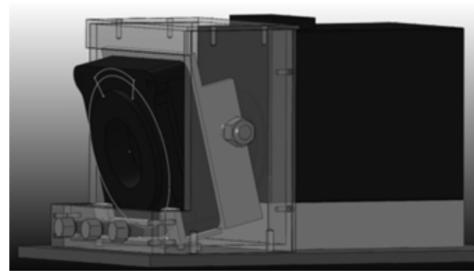
### 4 实验

实验装置原理如图 5 所示,实验采用制冷型中波(MWIR)红外相机与非制冷型长波(LWIR)红外相机分别做两组实验,中波相机工作波段为  $3\sim 5\ \mu\text{m}$ ,长波为  $8\sim 14\ \mu\text{m}$ ,在相机镜头前加装红外偏振片获取偏振图像,偏振片采用  $\text{BaF}_2$  金属线栅偏振片,由于加装偏振片后的制冷型中波红外相机出现“冷反射”现象,调整偏振片光轴,使其与红外相机光轴成  $11^\circ$  夹角<sup>[13]</sup>。旋转偏振片  $360^\circ$  内每隔  $30^\circ$  采集一幅图像,共采集 12 幅不同角度的偏振图像。



(a) 实验光路图

(a) Diagram of the light path



(b) 实验装置结构图

(b) Setup of the experiment

图 5 实验原理图

Fig.5 Experimental schematic diagram

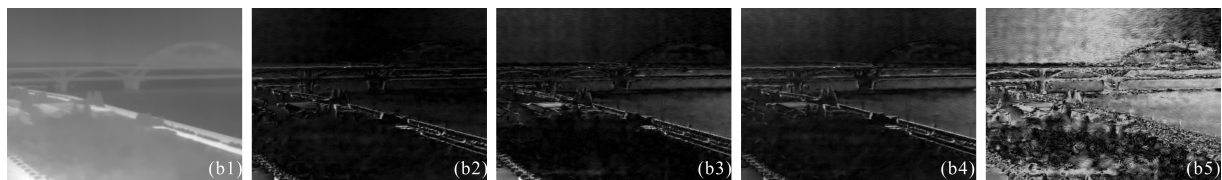
由于偏振度公式(9)与偏振角公式(10)都有除法运算,图像中噪声经过除法运算会被放大,必须进行去噪处理,实验利用参考文献[14]中方法对 12 幅序列图像去噪处理。去噪处理前后的序列图像运用公式(6)~(10)计算得到  $S_0, S_1, S_2$  以及偏振度  $P$  与偏振角 图像,如图 6 所示,其中(a1)~(a5)分别为利用原始图(未去噪)计算得到的  $S_0, S_1, S_2, P$  与  $\alpha$  图像,(b1)~(b5)为使用去噪图计算得到的  $S_0, S_1, S_2, P$  与  $\alpha$  图像。

根据图 6,从去噪前后的原始图计算所得偏振图像来看,噪声对偏振图像的影响很大。偏振图像的计算中由于噪声被明显放大,导致偏振图像信噪比减小,目标信息不够明显。为了研究序列图像不同噪声水平对计算后得到的偏振图像的影响,对序列图



(a) 利用未去噪图计算得到偏振各图像

(a) Calculated polarization images using original image



(b) 使用去噪图计算得到偏振各图像

(b) Calculated polarization images using denoised image

图 6 长波红外偏振图像

Fig.6 LWIR polarization images

像加上不同方差水平的高斯噪声,计算后的各偏振图像信噪比如表 1 所示,图像信噪比 $SNR=10\lg(S^2/N^2)$ , $N$ 表示噪声图像求和结果, $S$ 表示未加噪声的图像求和结果。

表 1 不同噪声对偏振图像的影响

Tab.1 Effect of polarization images with different noise levels

Noise variance	$S_0$ SNR /dB	$S_1$ SNR /dB	$S_2$ SNR /dB	$P$ SNR /dB	$\alpha$ SNR /dB
0.000 01	48.67	9.80	11.35	14.35	9.83
0.000 1	42.81	2.76	4.97	4.76	5.2
0.001	33.01	-2.99	-2.36	-6.49	3.74

从表 1 中可得,噪声方差为 0.000 01 的水平下,计算得到的偏振图像信噪比较低,特别是  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $P$

与  $\alpha$  图像,噪声使图像质量明显下降;当噪声加大到 0.001 时,噪声信号大于图像信号。结果表明,在获取的序列图像中,即使微小的噪声水平也会对偏振图像产生较大的影响。因此,在偏振成像中对序列图像的去噪处理是非常必要的。运用参考文献[14]所述的去噪方法能够有效去除噪声,且对有用的图像信息损失较小。

图 6 中,由于远处的汽车分解在水平方向偏振度大于垂直方向,而房顶分解在垂直方向的偏振度大于水平方向,因此图 6(b2)中汽车景物比较明显,而图 6(b3)中房顶特征明显。通过  $S_1$  与  $S_2$  图像计算得到的偏振度图像(b4)中汽车与房顶特征都比较明显。结合 3 节所述融合方法,运用剪切波变换及基于区域相似性的融合规则对图 6(b1)与(b4)融合,融合后的图像效果如图 7 所示。

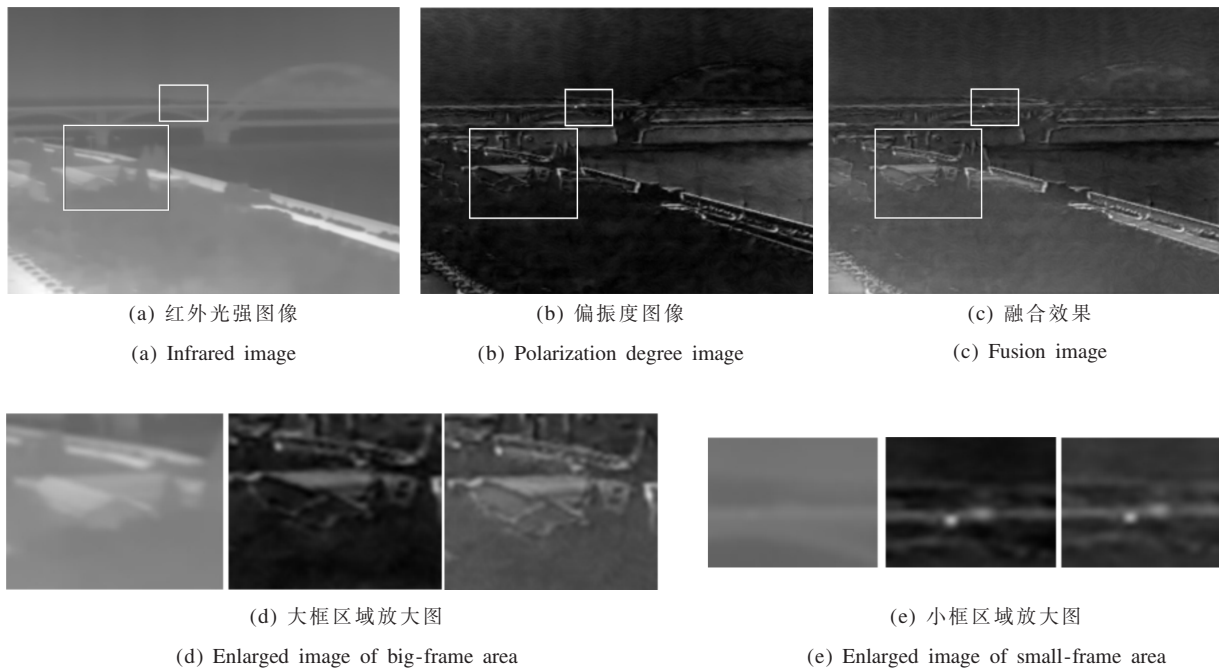


图 7 长波红外图像融合效果

Fig.7 LWIR fusion images

图 7(d)中偏振度图像中灰度值较大的屋顶表现出强偏振特性,而在光强图像中并不明显;图 7(e)所示,比较光强图像,偏振图像中出现了车体目标。通过偏振成像手段,能够识别出具有强偏振特性的目标。另一方面,光强图像中道路,房屋等场景由于热辐射较强而亮度较高,但由于不具有偏振特征,在偏振图像中无法分辨。融合后的图像偏振目标明显,同

时也保留了红外光强图像中路面、屋顶等信息,图像细节丰富。主观上图像对比度大,道路房屋特征明显,人眼视觉效果好于原图像。

客观评价融合前后两图像,选择图像信息熵,边缘强度与图像清晰度来评价。信息熵通过计算图像灰度概率分布情况衡量图像包含的信息量,其值越大说明信息量越大;边缘强度衡量图像边缘锐利程

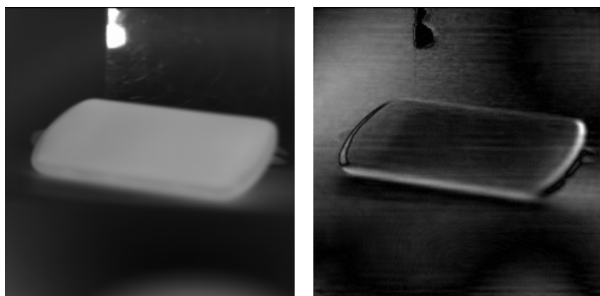
度,值越大说明边缘越锐利;清晰度是图像邻域方差的度量,反应图像纹理清晰程度,其值越大说明图像越清晰。计算图 7 中原图与融合后的增强图的各项评价参数,结果如表 2,从表中可知,融合后的图像信息量,边缘细节与清晰度都优于原图像。

表 2 长波实验原图与增强图像客观评价

Tab.2 Evaluation of enhanced image and original image in LWIR experiment

	Information entropy	Edge strength	Definition
Original image	6.294 9	13.046 8	1.246 4
Enhanced image	6.509 4	38.210 3	5.457 3

图 8 所示为制冷型中波红外相机实验结果,拍摄背景为反光的金属铝板,铝板前放置一手机。原图像中背景反光区域与手机整体表现为高亮度,而在偏振度图像中手机轮廓突出。融合后的图像增强了原图像景物的边缘轮廓信息,使得图像中的手机结构层次分明,对比度强,视觉效果更好。列出原图像与融合后的图像评价参数如表 3。



(a) 红外光强图像

(b) 偏振度图像

(a) Infrared image

(b) Polarization degree image

(c) 融合效果

(c) Fused image

图 8 中波红外图像融合效果

Fig.8 MWIR fusion images

表 3 中波实验原图与增强图像客观评价

Tab.3 Evaluation of enhanced image and source image in MWIR experiment

	Information entropy	Edge strength	Definition
Original image	6.437 6	15.711 3	1.471 5
Enhanced image	6.924 5	29.365 5	4.141 9

## 5 讨论

### 5.1 方法比较

文中通过偏振成像的方法增强红外光强图像,在红外图像中突出红外目标与偏振目标;而以往增强方法,增强后图像无法体现具有偏振特性的目标特性。为比较参考文献[2]所述方法与文中方法,同样引入信息熵、边缘强度与清晰度等评价指标。采用图 7(a)与图 8(a)等红外图像作为实验对象,其增强结果的评价如表 4、5 所示。

表 4 长波红外图像增强效果对比

Tab.4 Comparison of LWIR enhancement results

	Information entropy	Edge strength	Definition
Original image	6.294 9	13.046 8	1.246 4
Reference method	6.250 8	20.287 1	1.945 5
Reference method	6.509 4	38.210 3	5.457 3

表 5 中波红外图像增强效果对比

Tab.5 Comparison of MWIR enhancement results

	Information entropy	Edge strength	Definition
Original image	6.437 6	15.711 3	1.471 5
Reference method	6.324 9	18.083 5	1.707 1
Reference method	6.924 5	29.365 5	4.141 9

表 4 与表 5 说明,经过参考文献[2]增强后的图像信息熵比原图像减小,而文中方法处理后图像信息熵增加,说明文中方法提升了图像信息熵,表现更为优秀。经过文中方法处理后图像边缘强度与清晰度比原图像提高一倍,提高幅度大于参考文献[2],也证明文中方法增强效果更佳。

## 5.2 阈值的选择

根据第 3 节所述,融合规则中相似度阈值的取值不同,红外增强图像的效果也会不同。根据融合规则,在高频与低频中,阈值越大,融合图像更能表现出单一图像特征;阈值越小,则融合结果大多来自两图像的加权。讨论高频阈值  $T_{\text{high}}$  与低频阈值  $T_{\text{low}}$  对增强效果的影响,首先研究  $T_{\text{low}}$  的取值。表 6 列出图 7(c) 在不同  $T_{\text{low}}$  下的图像评价指标,  $T_{\text{high}}$  设为 0.5。

表 6 不同低频系数阈值下的融合比较

Tab.6 Comparison of fusion images using different

$T_{\text{low}}$			
$T_{\text{low}}$	Information entropy	Edge strength	Definition
0.1	6.489 4	37.064 4	5.456 4
0.2	6.494 2	37.065 0	5.456 0
0.3	6.501 5	37.057 2	5.455 9
0.4	6.514 3	37.066 5	5.453 1
0.5	6.492 5	37.036 4	5.302 9
0.6	6.501 9	36.015 6	5.293 3
0.7	6.495 9	36.026 1	5.293 4
0.8	6.479 6	36.183 5	5.315 6
0.9	6.433 5	36.272 9	5.331 6

根据表 6,  $T_{\text{low}} < 0.5$  时信息熵值与  $T_{\text{low}} > 0.5$  时相当,信息熵在  $T_{\text{low}}$  取 0.4 时最大;边缘强度与清晰度在  $T_{\text{low}} < 0.5$  时均比  $T_{\text{low}} \geq 0.5$  时大。因此,  $T_{\text{low}}$  取值在 0~0.5 区间时,偏振融合图像整体评价效果较好。

同样,将  $T_{\text{low}}$  设为 0.4,列出不同高频阈值  $T_{\text{high}}$  下,增强图像的评价指标见表 7。

表 7 不同高频系数阈值下融合比较

Tab.7 Comparison of fusion images using different

$T_{\text{high}}$			
$T_{\text{high}}$	Information entropy	Edge strength	Definition
0.1	6.522 0	36.703 4	5.417 6
0.2	6.520 5	36.767 5	5.428 5
0.3	6.518 5	36.866 7	5.440 5
0.4	6.516 1	36.958 7	5.447 1
0.5	6.514 3	37.066 5	5.453 1
0.6	6.512 0	37.569 7	5.457 0
0.7	6.511 3	37.982 1	5.462 5
0.8	6.509 4	38.210 3	5.457 3
0.9	6.509 8	38.103 1	5.466 3

表 7 说明,信息熵随着  $T_{\text{high}}$  的增大而略有减小,但边缘强度与清晰度在  $T_{\text{high}} > 0.5$  时均大于  $T_{\text{high}} < 0.5$ 。因此,  $T_{\text{high}}$  取值在 0.5~1 区间时,偏振融合图像整体评价效果较好。

按照以上阈值选择方式,对不同红外图像的增强效果进行测试比较,结果表明:  $T_{\text{low}}$  取值在 0~0.5,  $T_{\text{high}}$  取值在 0.5~1 时图像增强效果较好。在实际应用中,建议  $T_{\text{low}}$  取值为 0.4,  $T_{\text{high}}$  取值为 0.8。

## 6 结论与分析

文中针对红外图像增强,提出基于偏振成像融合的方法。实验说明,偏振成像有助于目标探测识别,特别是具有偏振特性的人造目标,比如汽车,房顶等,但不具有偏振特性的目标则不会出现在偏振图像中,而往往出现在光强图像里。文中所述的融合算法能够获取目标区域,增强后的图像很好地体现目标特征。

实验的关键在于获取精确、高信噪比的偏振图像,在实验中由于需要旋转偏振片,带来图像位移误差会对偏振图像产生很大影响,图 7 中偏振图像由于微小的位移有一定的误差,进一步的工作在于图像配准或是研究平移不变的偏振图像计算方法,此外改进偏振度、偏振角的获取方法,避免图像的除法运算是提高信噪比的关键。实验结果表明:剪切波的多分辨率能够充分解析图像中边缘信息,融合图像中边缘轮廓清晰,基于区域特征匹配的融合规则,保留了红外光强图像低频特性与偏振图像中的偏振特性,效果明显,达到了红外图像增强的目的。

### 参考文献:

- [1] Tang Liangrui, Zhang Yue, Li Shourong. A restraining crosstalk method of infrared image based on fuzzy theory[J]. *Infrared Technology*, 2006, 28(5): 283-286. (in Chinese)  
唐良瑞,张悦,李守荣.基于模糊理论的红外图像像元串音抑制算法[J]. *红外技术*, 2006, 28(5): 283-286.
- [2] Song Yanfeng, Shao Xiaopeng, Xu Jun. New enhancement algorithm for infrared image based on double plateaus histogram[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(2): 308-311. (in Chinese)  
宋岩峰,邵晓鹏,徐军.基于双平台直方图的红外图像增强算法[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(2): 308-311.



- [3] Yu Tianhe, Dai Jingmin. New technology of infrared image contrast enhancement based on human visual properties [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(6): 951–954. (in Chinese)  
于天河, 戴景民. 结合人眼视觉特性的红外图像增强新技术[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(6): 951–954.
- [4] Yu Tianhe, Dai Jingmin. Multifractal theory based infrared image enhancement technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(1): 184–188. (in Chinese)  
于天河, 戴景民. 基于多重分形的红外图像增强技术[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(1): 184–188.
- [5] B Ben-Dor. Polarization properties of targets and backgrounds in the infrared [C]//Proceedings of SPIE, Advances in Optical Thin Films IV, 1992, 1971: 68–76.
- [6] Yang Wei, Gu Guohua, Chen Qian, et al. A wavelet-based adaptive fusion algorithm of infrared polarization imaging [C]//Proceedings of SPIE, International Symposium on Photo Electronic Detection and Imaging, 2011, 8193: 819324–1.
- [7] Wang Zhen, Hong Jing, Ye Song, et al. Study on effect of metal surface roughness on polarized thermal emission [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(8): 1500–1502. (in Chinese)  
汪震, 洪津, 叶松, 等. 金属表面粗糙度对热红外偏振特性影响研究[J]. *光子学报*, 2007, 36(8): 1500–1502.
- [8] Zhao Yongqiang, Gong Peng, Pan Quan. Object detection by spectro polarimetric imagery fusion [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(10): 3337–3345.
- [9] Zhao Yongqiang, Pan Quan, Cheng Yongmei. Imaging Spectropolarimetric Remote Sensing and Application [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011: 42–43. (in Chinese)  
赵永强, 潘泉, 程咏梅. 成像偏振光谱遥感及应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 42–43.
- [10] Labate D, Lim W Q, Kutyniok G, et al. Sparse multidimensional representation using Shearlets [C]//Proceedings of SPIE, Wavelets XI, 2005, 5914: 254–262.
- [11] Miao Qiguang, Shi Cheng, Xu Pengfei, et al. A novel algorithm of image fusion using shearlets [J]. *Optics Communications*, 2011, 284: 1540–1547.
- [12] Feng Huajun, Zhao Jufeng, Xu Zhihai, et al. Fast target enhancement in thermal infrared imagery [C]//37th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW–THz), 2012: 1–2.
- [13] 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): 5453–5469.
- [14] Aleksandra Pizurica, Wilfried Philips, Ignace Lemahieu, et al. A versatile wavelet domain noise filtration technique for medical imaging [J]. *IEEE Trans Med Imaging*, 2003, 22(3): 323–331.