

# 基于提升小波的低对比度目标偏振识别技术

张 肃<sup>1</sup> 付 强<sup>1</sup> 段 锦<sup>2</sup> 战俊彤<sup>1</sup> 姜会林<sup>1</sup>

<sup>1</sup>长春理工大学空间光电技术研究所, 吉林 长春 130022

<sup>2</sup>长春理工大学电信学院, 吉林 长春 130022

**摘要** 针对低对比度环境下拍摄目标图像所产生的低识别率问题,提出了一种基于小波提升算法的偏振信息融合方法,该方法采用偏振技术进行目标探测,应用小波提升算法所具有的计算量少、处理速度快等优点将偏振度和偏振角等信息分解为高频和低频部分,分别对高、低频系数采用不同规则进行融合,使得融合后目标边缘轮廓完全从低对比度环境中凸显出来,且细节信息完整、清晰,易于人眼对目标的识别。通过对大量低对比度场景下的目标进行识别及对融合结果进行评价,实验表明,该方法能有效地提高低对比度环境下目标的识别效率,验证了算法的可行性。

**关键词** 成像系统;目标识别;图像融合;低对比度目标;小波提升算法

中图分类号 O436.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0211002

## Low Contrast Target Polarization Recognition Technology Based on Lifting Wavelet

Zhang Su<sup>1</sup> Fu Qiang<sup>1</sup> Duan Jin<sup>2</sup> Zhan Juntong<sup>1</sup> Jiang Huilin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Space Opto-Electronics Technology Institute, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

<sup>2</sup>Electronics and Information Engineering Institute, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

**Abstract** To resolve the low recognition ratio problem of the target captured in the low contrast environment, a polarization information fusion method based on wavelet lifting algorithm is proposed. The target is detected by the use of polarization technology, and the wavelet lifting algorithm with the advantage of less computation and higher processing speed is applied to decompose the polarization angle and degree of the polarization into high and low parts, then these two parts are fused with different rules to make the target edge contour distinguish from the low contrast background with full and clear details, which is more suitable for human eyes to recognize the target. A large number of target recognition experiments in low contrast environment and fusion results evaluation standards show that the proposed algorithm can effectively enhance the target recognition ratio, and its feasibility in low contrast environment is verified.

**Key words** imaging systems; target recognition; image fusion; low contrast target; wavelet lifting algorithm

**OCIS codes** 110.5405; 260.5430; 100.7410; 100.3005

## 1 引 言

相机成像主要是通过探测物体所反射光的强度来达到探测目标的目的,而对于战场环境及实际应用中的一些低对比度场景仅仅对光强进行探测已无法满足对目标识别的需求<sup>[1]</sup>。偏振作为光横波性质的外在表现,不仅能获得目标的光强分布,还能得到目标对应于每一点上的偏振信息,易于在低对比度背景下凸显目

收稿日期: 2014-08-15; 收到修改稿日期: 2014-09-18

作者简介: 张 肃(1985—),女,博士,助理研究员,主要从事偏振成像、光学信息处理等方面的研究。

E-mail: susiezhang21@126.com

标图像<sup>[2-3]</sup>。

为了进一步获得目标信息,近年来,许多研究者将获得的光强、偏振度(DoLP)及偏振角等信息进行融合,得到满足不同目标探测需求的融合结果。El-Saba等<sup>[4]</sup>采用逻辑算子的方法融合偏振图像与非偏振图像,可以很好的探测矿物质目标,但是融合后的结果只有轮廓等用于定位的信息,缺少细节信息。王新等<sup>[5]</sup>根据得到的偏振片各角度上的光强图像采用传统算术加权法融合目标的斯托克斯偏振图像,但得到的结果对比度较低,损失了较多的目标细节。近年来很多研究者在偏振探测的基础上致力于寻求一种高质量、高识别率的图像融合方法,小波作为时频分析常用的工具具有多尺度特性,能够将图像分解为高频和低频信息再分别进行处理,可弥补原有方法仅在一种尺度上融合且规则单一的缺陷。基于此,潘泉等<sup>[6]</sup>应用此算法计算斯托克斯参数图像,得到更易于识别的偏振信息。张晶晶等<sup>[7]</sup>又在此基础上应用两次小波分解算法完成了对两个波段上所探测到的目标的融合,获得了丰富的光谱信息。但对于以上方法,多数只考虑了偏振融合后的效果,并未考虑计算量及计算时间的提升,尤其在使用液晶相位延迟器(LCVR)实时调节偏振角度时,缺乏对偏振结果融合的实时性分析<sup>[8-9]</sup>。

本文提出了基于小波提升算法的偏振融合方法,该算法使整个变换过程只在空域进行,不再局限于傅里叶变换,大量减少计算时间及存储空间,且高、低频根据各自特点分别采用不同的融合规则,使得融合后的图像定位准确、细节清晰<sup>[10]</sup>。分别采用不同的图像质量评价标准进行效果评价<sup>[11]</sup>,验证了该算法的可行性。

## 2 目标的偏振探测技术

### 2.1 偏振图像检测的实验装置图

图1为偏振图像检测的实验装置原理图,采用波长532 nm的激光器作为光源,经准直扩束系统后形成一束能量均匀放大的平行光,由滤光片1滤除杂光,并由偏振片1进行起偏,此时有足够多的能量均匀照射在目标上。在接收端,经偏振片2检偏,并由滤光片滤除杂光后,得到的目标强度图像由电荷耦合器件(CCD)探测,并在电脑(PC)上显示结果。在实验过程中,分别通过调节偏振片为0°,60°,120°来得到不同角度下的强度图像,获得斯托克斯矢量及偏振度、偏振角等信息,并对这些信息进行后续的图像融合以达到目标检测的目的。为了对比加入偏振前后图像的变化,在同样的实验条件下,取下起偏与检偏片,其他元件位置及参数均保持不变,此时拍摄到的为普通光强图像,便于后续的实验对比和检测图像的配准。图2为实际的实验装置图。

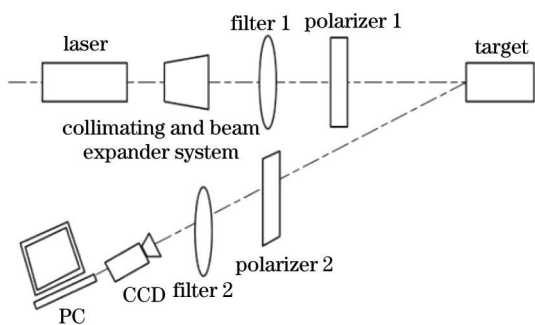


图1 偏振图像检测装置的实验原理图

Fig.1 Experimental schematic diagram of polarization image detection device

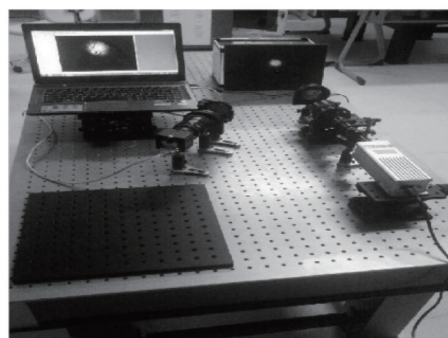


图2 实验装置图

Fig.2 Diagram of experimental device

### 2.2 偏振图像检测的基本原理

光束经光学系统后,出射光束的斯托克斯矢量  $S'$  和入射光束的斯托克斯矢量  $S$  之间存在以下关系

$$S' = M \cdot S, \tag{1}$$

式中  $M$  为穆勒矩阵,用来描述光学系统中元件的特性,若经过多个器件,则

$$S' = M_n M_{n-1} \cdots M_1 \cdot S. \tag{2}$$

由于自然界中圆偏振分量极少,易被噪声覆盖,测量仪器无法准确检测,所以在实际的探测中,圆偏振

对整个探测结果几乎没有影响,只考虑线偏振光的情况。则当线偏振的偏振方向与 X 轴的夹角为  $\theta$  时,此时穆勒矩阵可以表示为

$$M_p = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ \cos 2\theta & \cos^2 2\theta & \cos 2\theta \sin 2\theta & 0 \\ \sin 2\theta & \cos 2\theta \sin 2\theta & \sin^2 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

代入(1)式,有

$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ \cos 2\theta & \cos^2 2\theta & \cos 2\theta \sin 2\theta & 0 \\ \sin 2\theta & \cos 2\theta \sin 2\theta & \sin^2 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I'(\theta) \\ Q'(\theta) \\ U'(\theta) \\ V'(\theta) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中  $S=[I \ Q \ U \ V]^T$ ,  $S'=[I'(\theta) \ Q'(\theta) \ U'(\theta) \ V'(\theta)]^T$ 。  $I'(\theta)$  即为实验中 CCD 探测到的光强图像

$$I'(\theta) = \frac{1}{2}(I + Q \cos 2\theta + U \sin 2\theta), \quad (5)$$

由(5)式可知,当调节偏振片为不同的角度  $\theta (0^\circ, 60^\circ, 120^\circ)$  时,有

$$\begin{cases} I'(0^\circ) = \frac{1}{2}(I + Q \cos 0^\circ + U \sin 0^\circ) = \frac{1}{2}(I + Q) \\ I'(60^\circ) = \frac{1}{2}(I + Q \cos 120^\circ + U \sin 120^\circ) = \frac{1}{2}\left(I - \frac{1}{2}Q + \frac{\sqrt{3}}{2}U\right), \\ I'(120^\circ) = \frac{1}{2}(I + Q \cos 240^\circ + U \sin 240^\circ) = \frac{1}{2}\left(I - \frac{1}{2}Q - \frac{\sqrt{3}}{2}U\right) \end{cases}, \quad (6)$$

解得

$$\begin{cases} I = \frac{2}{3} \times [I'(0^\circ) + I'(60^\circ) + I'(120^\circ)] \\ Q = \frac{2}{3} \times [2I'(0^\circ) - I'(60^\circ) - I'(120^\circ)], \\ U = \frac{2}{\sqrt{3}} \times [I'(60^\circ) - I'(120^\circ)] \end{cases}, \quad (7)$$

则线偏振度和偏振角分别为

$$\begin{cases} X_{\text{DoLP}} = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} \\ \phi = \frac{1}{2} \arctan(U/Q) \end{cases}. \quad (8)$$

### 3 基于小波提升的图像融合算法

图像融合技术是对各图像上信息进行综合的过程,所得结果具有分辨率高、图像质量好、信息丰富等特点,在目标的探测过程中,获得更多的目标信息,有利于后续的认识和分析工作。

应用小波提升算法的优点,可在较短的时间内将图像分解为低频和高频部分。对于高频部分,先计算图像中水平、垂直及对角线方向上的局部区域空间频率,选择待融合区域,再由相关系数确定融合系数;低频部分则是选择能量匹配度系数的方法确定融合规则。最后分别对融合结果进行一致性检测,获得清晰、高质量图像。

#### 3.1 图像小波提升变换的实现过程

对信号  $x_j(2^j), j \in Z^+$  进行小波提升变换主要通过分裂、预测及更新三个步骤完成。

1) 分裂:将初始信号  $x_j(2^j)$  分割成两个互不相交的子集  $x_{j-1}$  和  $d_{j-1}$ ,若其中一个子集为偶数序列,相应地,另一个子集则为奇数序列,即

$$\text{split}(x_j) = (\text{even}_{j-1}, \text{odd}_{j-1}) = (x_{j-1}, d_{j-1}). \quad (9)$$

2) 预测: 由于两个序列之间存在相关性, 可以用其中一个序列来预测另一个序列, 若已知偶数序列, 则奇数序列可通过预测算子  $P$  表示为

$$d_{j-1} = P(x_{j-1}). \quad (10)$$

对于  $P$  的逼近性能, 可用奇数序列实际值与预测值间的差异  $d_{j-1}$  来表示, 即

$$d_{j-1} := d_{j-1} - P(\text{even}_{j-1}) = d_{j-1} - P(x_{j-1}). \quad (11)$$

这一差异也就是小波变换中的小波集。

3) 更新: 完成以上两个步骤后, 由于得到的采样序列  $x_{j-1}$  的性能并不能与原信号  $x_j$  的整体性能保持一致, 则需对  $d_{j-1}$  用更新算子  $U$  来进行更新, 以保持更多的原信号中的性质, 即

$$x_{j-1} := \text{even}_{j-1} + U(d_{j-1}) = x_{j-1} + U(d_{j-1}). \quad (12)$$

总结以上步骤, 小波提升的分解算法可表示为

$$\begin{cases} \{\text{even}_{j-1}, d_{j-1}\} := \text{split}(x_j) \\ d_{j-1} := P(x_{j-1}) \\ x_{j-1} := U(d_{j-1}) \end{cases} \quad (13)$$

对于小波提升算法的重构过程则是颠倒上述步骤, 并将符号位置互换即可。图 3 为小波提升分解与重构过程的示意图。

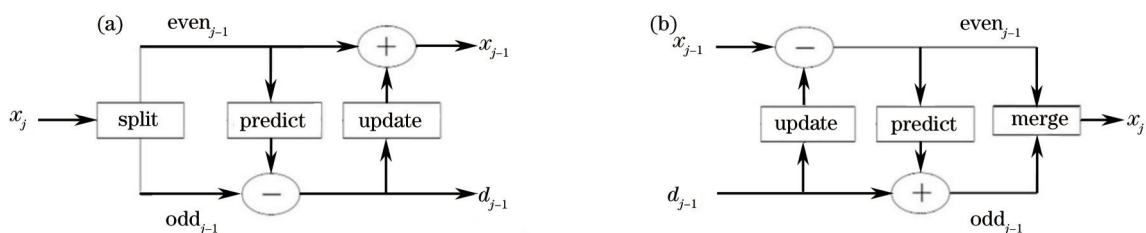


图 3 小波提升算法的(a)分解和(b)重构过程

Fig.3 (a) Decomposition and (b) reconstruction course of wavelet lifting algorithm

### 3.2 小波滤波器的提升算法

在实际应用中, 通过选择不同的小波滤波器, 并进行上述提升过程, 便可完成一次小波提升分解。当对滤波器进行提升时, 图 3(a)中的预测与更新过程则可用图 4 中的多相位矩阵形式表示, 此时的分解过程可表示为

$$\begin{bmatrix} x_{j-1}(z) \\ d_{j-1}(z) \end{bmatrix} = p(z) \begin{bmatrix} x_j^e(z) \\ z^{-1}x_j^o(z) \end{bmatrix}, \quad (14)$$

式中多相位矩阵  $p(z)$  用高通滤波器  $G(z)$  和 low 通滤波器  $H(z)$  可表示为  $p(z) = \begin{bmatrix} \bar{H}_e(z) & \bar{G}_e(z) \\ \bar{H}_o(z) & \bar{G}_o(z) \end{bmatrix}$ , 角标 o 和 e 分别表示奇、偶采样。

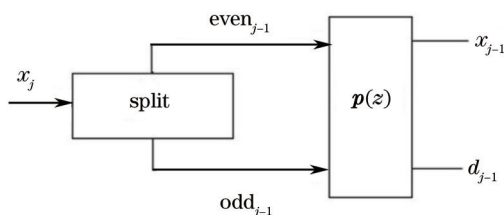


图 4 小波提升分解的多相位矩阵表示形式

Fig.4 Polyphase matrix representation method of wavelet lifting decomposition

对于一对互补滤波器  $H$  和  $G$ , 应用 Euclidean 算法, 容易验证, 总存在劳伦多项式  $s_i(z^{-1})$ 、 $t_i(z^{-1})$  满足以下

多相位矩阵分解关系式

$$p(z) = \prod_{i=1}^m \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -s_i(z^{-1}) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -t_i(z^{-1}) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/K & 0 \\ 0 & K \end{bmatrix}, \quad (15)$$

式中  $K$  为非零常数。 $s_i(z^{-1})$  和  $t_i(z^{-1})$  分别对应着 3.1 节中介绍的小波提升过程的更新与预测步骤, 分别实现用高通滤波器对低通滤波器的提升和低通滤波器对高通滤波器的提升, 称为原始提升和对偶提升。

将(15)式得到的多相位矩阵代入到(14)式中, 则根据图 4 的分解过程便可完成一次小波提升分解。选择较常用的 9-7 小波进行提升, 分解后的结果如图 5 所示, 其中 4 个部分从上到下、从左到右依次表示原图的低频近似信息和垂直、水平、对角线方向上的高频信息。

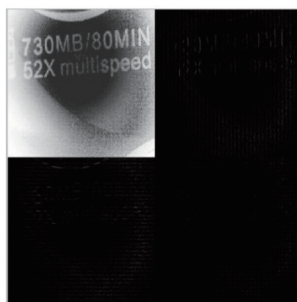


图 5 图像经一次小波提升分解后的结果(9-7小波)

Fig.5 Decomposition result of image with one level wavelet lifting (9-7 wavelet)

在相同的实验条件下(实验环境英特尔酷睿 i5 2450 M 处理器, 主频为 2.5 GHz), 应用 Matlab 软件进行计算, 选择不同的小波基函数, 分别进行传统小波一次分解和小波提升算法分解, 所用时间如表 1 所示, 可以看出应用小波提升算法后分解时间明显缩短, 更易于实际应用。

表 1 传统小波与小波提升算法进行一次分解所用时间的比较

Table 1 Decomposition time comparison of traditional and lifting wavelet algorithm

| Wavelet function | Time of lifting algorithm /s | Time of traditional wavelet /s |
|------------------|------------------------------|--------------------------------|
| Haar             | 0.069                        | 0.099                          |
| db4              | 0.127                        | 0.134                          |
| sym4             | 0.115                        | 0.137                          |
| bior5.5          | 0.142                        | 0.152                          |

### 3.3 提升小波的图像融合

若两图像经小波提升算法  $j$  阶分解后的低频和表示垂直、水平、对角线高频信息的系数分别为  $C_{A_j}^1$ 、 $C_{V_j}^1$ 、 $C_{H_j}^1$ 、 $C_{D_j}^1$  和  $C_{A_j}^2$ 、 $C_{V_j}^2$ 、 $C_{H_j}^2$ 、 $C_{D_j}^2$ , 则应用如下算法分别对低频、高频进行处理。

#### 3.3.1 低频信息的融合

待融合图像 1 和 2 的局部区域能量  $E_j^1(x, y)$  和  $E_j^2(x, y)$  分别表示为

$$E_j^1(x, y) = \sum_{m=-(M-1)/2}^{(M-1)/2} \sum_{n=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} W(m, n) \times [C_{A_j}^1(x + m, y + n)]^2, \quad (16)$$

$$E_j^2(x, y) = \sum_{m=-(M-1)/2}^{(M-1)/2} \sum_{n=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} W(m, n) \times [C_{A_j}^2(x + m, y + n)]^2, \quad (17)$$

式中  $C_{A_j}^1$  和  $C_{A_j}^2$  分别为图像 1 和 2 经小波提升分解后得到的低频系数,  $j$  为分解级数, 窗口函数  $W = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$ ,

其大小  $M \times N$  为  $3 \times 3$ 。

两幅图像之间的局部区域能量匹配度  $M_{12}$  为<sup>[12]</sup>

$$M_{12}(x,y) = \frac{2 \sum_{m=-(M-1)/2}^{(M-1)/2} \sum_{n=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} C_{A_j}^1(x+m,y+n)C_{A_j}^2(x+m,y+n)}{E_j^1(x,y) + E_j^2(x,y)}. \quad (18)$$

$M_{12}$  反映了待融合图像间的匹配程度,  $M_{12}$  的值越大, 则说明两图像间的匹配性越好。当其值大于某一预先给定的阈值  $T$  ( $0.5 \leq T < 1$ ) 时, 则认为此时的相关性是较好的。经过大量的实验验证, 当  $T=0.75$  时, 此时可以充分表征图像间的相关性。

对于  $M_{12} \geq T$  的部分, 融合后的低频系数  $C_{A_j}^f(x,y)$  定义为

$$C_{A_j}^f(x,y) = K_j^1(x,y)C_{A_j}^1(x,y) + K_j^2(x,y)C_{A_j}^2(x,y), \quad (19)$$

式中  $K_j^1(x,y)$ 、 $K_j^2(x,y)$  分别为图像 1 和 2 在整个局部区域能量中所占的比例, 即

$$\begin{cases} K_j^1(x,y) = \frac{E_j^1(x,y)}{E_j^1(x,y) + E_j^2(x,y)}. \\ K_j^2(x,y) = 1 - K_j^1(x,y) \end{cases} \quad (20)$$

反之, 当  $M_{12} < T$  时, 采用局部区域能量取大的方法抑制图像间匹配性较差的现象, 即

$$C_{A_j}^f(x,y) = \begin{cases} C_{A_j}^1(x,y), & E_j^1(x,y) \geq E_j^2(x,y) \\ C_{A_j}^2(x,y), & E_j^1(x,y) < E_j^2(x,y) \end{cases}. \quad (21)$$

### 3.3.2 高频信息的融合

对于小波提升分解后的高频部分  $C_v$ 、 $C_h$  和  $C_d$ , 对其中垂直方向的高频系数  $C_v$  进行融合处理, 其他方向的高频系数依照此方法依次处理即可。

选取  $M \times N$  为  $3 \times 3$  的窗口大小, 在这一窗口中, 分别计算高频系数水平方向上的频率  $H_f$ 、垂直方向的频率  $V_f$  和对角线方向上的频率  $D_f$ , 表示为

$$\begin{cases} H_{F_j}^i(x,y) = \sqrt{\frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=2}^N [C_{V_j}^i(x,y) - C_{V_j}^i(x,y-1)]^2}{M(N-1)}} \\ V_{F_j}^i(x,y) = \sqrt{\frac{\sum_{x=2}^M \sum_{y=1}^N [C_{V_j}^i(x,y) - C_{V_j}^i(x-1,y)]^2}{(M-1)N}} \\ D_{F_j}^i(x,y) = \sqrt{\frac{\sum_{x=2}^M \sum_{y=2}^N [C_{V_j}^i(x,y) - C_{V_j}^i(x-1,y-1)]^2}{(M-1)(N-1)}} + \sqrt{\frac{\sum_{x=2}^M \sum_{y=2}^N [C_{V_j}^i(x-1,y) - C_{V_j}^i(x,y-1)]^2}{(M-1)(N-1)}} \end{cases}, \quad (22)$$

则整个图像空间频率为

$$S_{F_j}^i = \sqrt{(H_{F_j}^i)^2 + (V_{F_j}^i)^2 + (D_{F_j}^i)^2}, \quad (23)$$

式中  $i$  的取值分别为 1 和 2, 对应着图像 1 和图像 2。

若对两幅图像中的高频系数进行融合, 则要确定两幅图像间的相关性, 用相关系数  $R$  表示为

$$R = \frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [C_{V_j}^1(x,y) - u_1][C_{V_j}^2(x,y) - u_2]}{\sqrt{\left\{ \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [C_{V_j}^1(x,y) - u_1]^2 \right\} \left\{ \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [C_{V_j}^2(x,y) - u_2]^2 \right\}}}. \quad (24)$$

窗口大小仍为  $3 \times 3$ ,  $u_1$  和  $u_2$  分别为图像 1 和 2 的高频系数对应在此窗口下的像素均值。  $R$  的取值与图像 1 和 2 之间的匹配性密切相关, 且当  $R=1$  时, 两图像达到完全匹配。通过选取不同的阈值定义图像间的相关程度便可求出融合后的高频系数, 如下所示:

1) 高度相关:  $R \geq 0.8$ , 空间频率与高频融合系数间的关系为

$$C_{v_j}^F(x,y) = \begin{cases} R \times C_{v_j}^1(x,y) + (1-R) \times C_{v_j}^2(x,y), & S_{F_j}^1 \geq S_{F_j}^2 \\ (1-R) \times C_{v_j}^1(x,y) + R \times C_{v_j}^2(x,y), & S_{F_j}^1 < S_{F_j}^2 \end{cases} \quad (25)$$

2) 中度相关:  $0.3 < R < 0.8$ , 有

$$C_{v_j}^F(x,y) = \begin{cases} T_j^1(x,y)C_{v_j}^1(x,y) + T_j^2(x,y)C_{v_j}^2(x,y), & S_{F_j}^1(x,y) \geq S_{F_j}^2(x,y) \\ T_j^2(x,y)C_{v_j}^1(x,y) + T_j^1(x,y)C_{v_j}^2(x,y), & S_{F_j}^1(x,y) < S_{F_j}^2(x,y) \end{cases} \quad (26)$$

式中权重系数

$$T_j^1(x,y) = \frac{S_{F_j}^1(x,y)}{S_{F_j}^1(x,y) + S_{F_j}^2(x,y)} = 1 - T_j^2(x,y). \quad (27)$$

3) 低度相关:  $R \leq 0.3$ , 有

$$C_{v_j}^F(x,y) = \begin{cases} C_{v_j}^1(x,y), & S_{F_j}^1(x,y) \geq S_{F_j}^2(x,y) \\ C_{v_j}^2(x,y), & S_{F_j}^1(x,y) < S_{F_j}^2(x,y) \end{cases} \quad (28)$$

通过以上步骤,便可完成垂直方向的高频系数融合,对于水平及对角线方向的高频信息融合,则重复上述过程。

### 3.3.3 一致性检测

为了使融合后的系数,在高频处轮廓更加清晰、流畅,在低频处不出现突变点、突变线等现象,要对融合后的系数进行一致性检测。其基本思想是检测中心像素邻域内的融合系数分别来源于图像1和图像2的个数,并取在此区域中个数多的图像对应的像素定义该 $3 \times 3$ 邻域内的中心点。具体公式如下:

$$C_j^F(x,y) = \begin{cases} C_j^1(x,y) & \text{DecM}(x,y) = 1, \quad C_j^1(x,y) \geq C_j^2(x,y) \\ C_j^2(x,y) & \text{DecM}(x,y) = 0, \quad C_j^1(x,y) < C_j^2(x,y) \end{cases} \quad (29)$$

$$C_j^F(x,y) = \begin{cases} C_j^1(x,y), & \sum_{i=m-1}^{m+1} \sum_{j=n-1}^{n+1} \text{DecM}(i,j) \geq 6 \\ C_j^2(x,y), & \sum_{i=m-1}^{m+1} \sum_{j=n-1}^{n+1} \text{DecM}(i,j) < 6 \end{cases} \quad (30)$$

式中  $\text{DecM}(i,j)$  为一致性检测的测量矩阵。 $C_j^F$  为融合后的系数,分别代表着融合后的低频系数  $C_{A_j}^F$  和高频系数  $C_{v_j}^F$ ,  $C_{H_j}^F$  和  $C_{D_j}^F$ 。

综上所述,基于小波提升算法的图像融合过程可用图6表示,即先对两幅图像进行小波提升分解,得到的高频和低频部分分别进行融合,再对融合后的高频和低频部分做小波提升逆变换,便可得到融合后的图像。

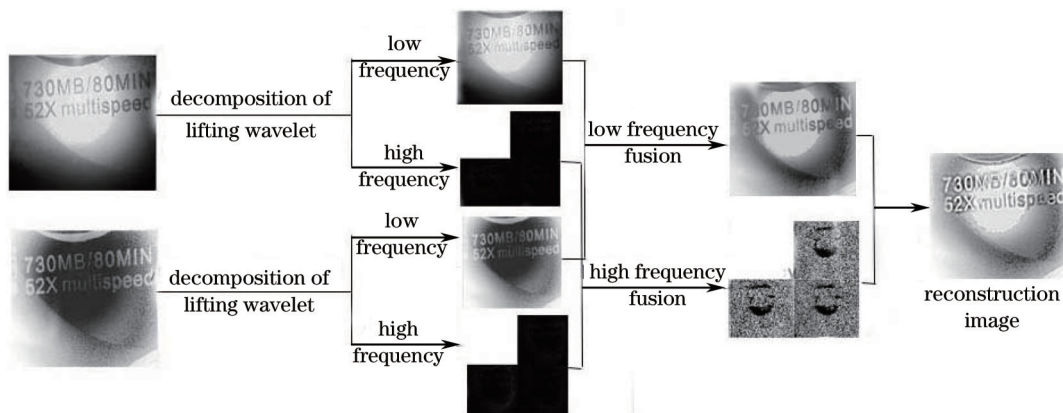


图6 基于小波提升算法的图像融合过程

Fig.6 Image fusion course based on wavelet lifting algorithm

## 4 实验结果

应用2.1节中所介绍的实验装置,采用基于小波提升算法的融合方法,对100种低对比度目标进行实验,易于人眼的识别率可达90%以上,下面仅以室内螺钉及室外高楼目标作为实例,给出实验结果。

对一黑色背景(非金属)下钉有黑色铁钉的低对比度场景进行偏振成像,调节 CCD 相机的光圈数为 1.4, 焦距为 50 mm 进行接收,则在偏振片分别调整为  $0^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $120^\circ$  和未加偏振片时,得到的探测结果如图 7 所示,从图中可以看出,在加入偏振片前后,铁钉的轮廓信息明显加强,且角度越大,铁钉的细节信息越明显,偏振信息更有利于对低对比度环境下金属物质的探测。

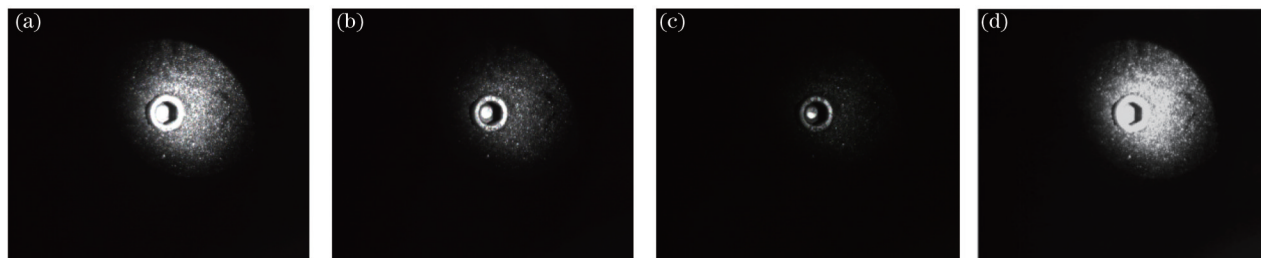


图 7 探测光强图像结果。(a)  $0^\circ$  偏振;(b)  $60^\circ$  偏振;(c)  $120^\circ$  偏振;(d) 未加偏振

Fig.7 Detection results of light intensity. (a)  $0^\circ$  polarization; (b)  $60^\circ$  polarization; (c)  $120^\circ$  polarization; (d) unpolarized

为了更进一步得到偏振信息,将图 7 中的结果应用(7)和(8)式进一步处理,得到线性偏振信息的斯托克斯矢量  $I$ 、 $Q$ 、 $U$  及偏振度、偏振角等信息,如图 8 所示。

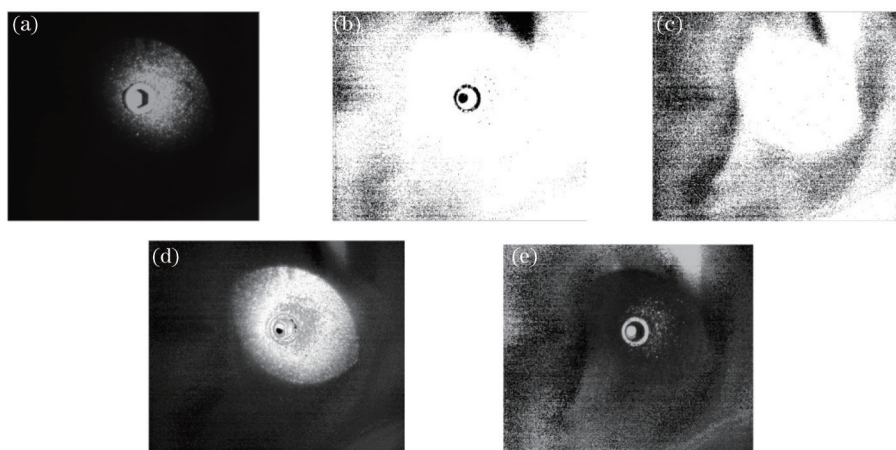


图 8 偏振信息图像。(a)  $I$  图像;(b)  $Q$  图像;(c)  $U$  图像;(d) 偏振度图像;(e) 偏振角图像

Fig.8 Image of polarization information. (a)  $I$  image; (b)  $Q$  image; (c)  $U$  image; (d) image of degree of polarization; (e) image of polarization angle

由于偏振度和偏振角中综合了大量的图像信息,而光强  $I$  图像中主要集中了目标的亮度信息,所以用基于小波提升算法的融合方法将偏振度、偏振角及光强  $I$  图像进行融合,其中选择 db4 小波函数,得到的结果如图 9 所示,从图中可以看出,相对于未加偏振片时的图像,融合后的图像既具有足够的亮度信息,又包含丰富的细节信息,目标轮廓清晰凸显,且螺钉上的字迹“HEV 12.5”清晰可见,相对于未加偏振时的图像,实现了螺钉上字迹再现的过程,易于识别,且整个融合过程所用时间为 0.809 s。

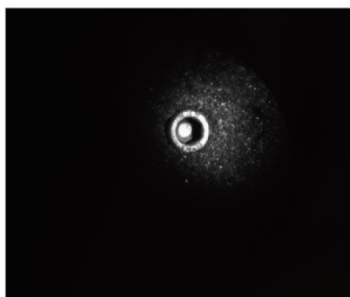


图 9 融合图像

Fig.9 Fused image



图 10 为另一组室外实验结果,在雾天环境下对室外距离 500 m 的大楼进行探测,选择 CCD 相机的光圈数为 1.5,焦距为 26 mm 进行实验,其中图 10(a)~(c)分别为将偏振片调节为 0°、60°、120°三个角度下的光强图像,图 10(d)为未加偏振片时直接对室外环境拍摄的图像,图 10(e)和(f)分别为光强  $I$  图像和偏振度图像,图 10(g)为应用本文算法对偏振度图像和光强图像的融合图像。从图中可以看出,由于雾天环境,直接对室外目标拍摄对比度极低,不易于识别,而融合后图像与未加偏振时拍摄的图像相比,目标轮廓清晰、凸显,更易于人眼识别。相对于室内实验注重识别目标细节信息,室外远距离探测主要是对目标轮廓进行识别。为了更客观的评价融合后的结果,分别采用对比度(标准差)、清晰度(平均梯度)及空间频率这三方面指标来评价偏振融合图像与未加偏振时图像的质量,结果如表 2 所示。由表 2 可知,偏振信息融合后的图像[图 10(g)]与未加偏振片时的图像[图 10(d)]相比,对比度提高约一半,清晰度提高了 10 倍以上,空间频率也有了大幅度提升,从理论分析的角度进一步验证了此算法对低对比度目标识别的可行性。

表 2 质量评价结果

Table 2 Results of quality evaluation

| Evaluation standard       | Degree of contrast  | Clarity   | Spatial frequency            |
|---------------------------|---|---|------------------------------|
| Equation                  | $S_{cl} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [I(i,j) - \mu]^2}{MN}}$ | $G = \frac{\sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{N-1} \sqrt{\frac{[I(i,j) - I(i+1,j)]^2 + [I(i,j) - I(i,j+1)]^2}{2}}}{(M-1)(N-1)}$ | $S_f = \sqrt{R_f^2 + C_f^2}$ |
| Unpolarized image         | 48.93   | 2.91  | 16.53                        |
| Polarization image fusion | 74.05   | 36.59   | 63.02                        |

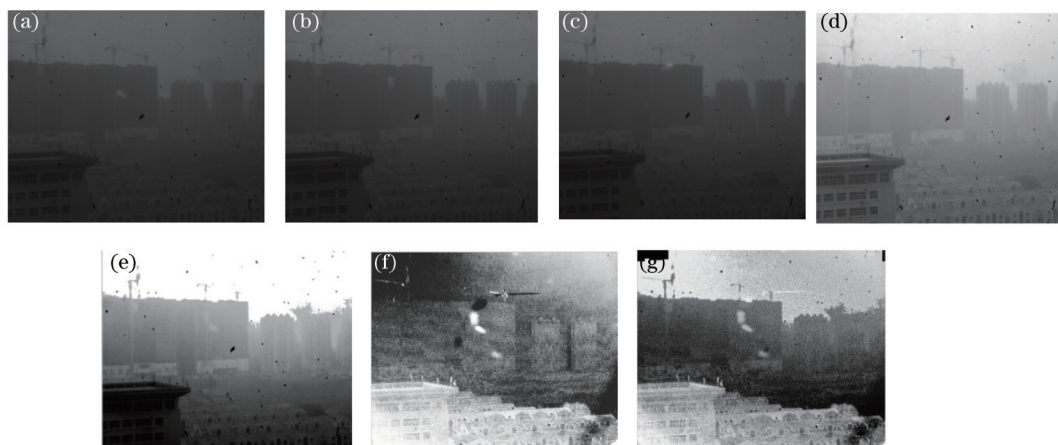


图 10 室外偏振实验结果。(a) 0°偏振图像; (b) 60°偏振图像; (c) 120°偏振图像; (d) 未加偏振图像; (e)  $I$  图像; (f) 偏振度图像; (g) 融合图像

Fig.10 Polarization experimental result in outdoor. (a) 0°polarization image; (b) 60° polarization image; (c) 120° polarization image; (d) unpolarized image; (e)  $I$  image; (f) image of degree of polarization; (g) fused image

## 5 结 论

在对目标的识别与探测过程中,目标由于自身及周围背景环境的低对比度影响所产生的低识别率、甚至无法识别的问题,采用了偏振探测的方法,对得到的偏振信息应用小波提升的图像融合算法,将偏振探测所得到的光强图像与偏振度图像进行融合,不仅使计算时间有所提升,且以对比度、清晰度及空间频率作为评价标准,验证了偏振图像融合算法的可行性,改善了低对比度目标的低识别效率,在偏振成像探测领域具有很好的应用前景。

## 参 考 文 献

1 Tang Peijun, Chen Feihu, Tang Zhilie. Visualization of polarization state and its imaging method [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33 (8): 0826002.

- 唐珮珺, 陈飞虎, 唐志列. 偏振态的可视化及其成像技术的研究 [J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0826002.
- 2 J Guan, J Zhu. Target detection in turbid medium using polarization-based range-gated technology [J]. Opt Express, 2013, 12(21): 14152-14158.
- 3 Li Zhanfeng, Wang Shurong, Huang Yu, *et al.*. A method on measurement of Mueller matrix elements for polarizaiton correlation [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 0628001.  
李占峰, 王淑荣, 黄煜, 等. 用于偏振修正的缪勒矩阵元素的测量方法 [J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0628001.
- 4 A El-Saba, T Bezuayehu. Fusion of Stocks vector imagery using simple logical operators: Application to the problem of surface land mine detection [C]. SPIE, 2008, 6972: 69720Q.
- 5 Wang Xin, Wang Xueqin, Sun Jinzuo. Study of target identification based on polarization imaging and image fusion [J]. Laser & Infrared, 2007, 37(7): 676-678.  
王新, 王学勤, 孙金祚. 基于偏振成像和图像融合的目标识别技术 [J]. 激光与红外, 2007, 37(7): 676-678.
- 6 Pan Quan, Zhao Yongqiang, Zhang Hongcai. Stokes image calculation based on pixel level image fusion [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25(z1): 703-705.  
潘泉, 赵永强, 张洪才. 基于像素层图像融合的偏振图像计算方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(z1): 703-705.
- 7 Zhang Jingjing, Fang Yonghua. Novel image fusion algorithm for multi-band polarimetric image based on visible light [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(6): 1067-1072.  
张晶晶, 方勇华. 基于可见光的多波段偏振图像融合新算法 [J]. 光学学报, 2008, 28(6): 1067-1072.
- 8 Tang Feilong, Li Zhongliang, Bu Yang, *et al.*. Calibration of rotating quarter-wave method based polarimeter [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0912005.  
汤飞龙, 李中梁, 步扬, 等. 旋转波片法偏振检测装置器件参数校准 [J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0912005.
- 9 Tang Feilong, Li Zhongliang, Bu Yang, *et al.*. Method of improving measurement accuracy of Stokes parameters [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(4): 0408006.  
汤飞龙, 李中梁, 步扬, 等. 一种提高偏振光斯托克斯参量测量精度的方法 [J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0408006.
- 10 I Daubechies, W Sweldens. Factoring Wavelet Transforms into Lifting Steps [M]. Berlin: Springer, 2000. 131-157.
- 11 Yin Wen, Li Yuanxiang, Zhou Zeming, *et al.*. Remote sensing image fusion based on sparse representation [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0428003.  
尹雯, 李元祥, 周则明, 等. 基于稀疏表示的遥感图像融合方法 [J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0428003.
- 12 Wang Jiangan, Xiao Weian. A method for image fusion based on area feature measure [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2003, 1(2): 57-59.  
王江岸, 肖伟岸. 区域性特性量测的图像融合方法 [J]. 光学与光电技术, 2003, 1(2): 57-59.

栏目编辑: 苏岑