

文章编号:1004-4213(2010)s1-0043-5

# 基于 HSI 颜色空间和小波变换的多光谱图像 和偏振图像融合实验研究

陈振跃,王霞,邹晓风

(北京理工大学 光电学院,北京 100081)

**摘 要:**偏振成像技术是当前光电成像领域研究的热点之一.为了更好地实现目标探测识别,本文研究了基于 HSI 颜色空间的偏振图像和多光谱图像的融合算法,对每一个波段内的偏振图像进行融合并映射到 HSI 颜色空间;然后对实验所选取的三个波段的 H、S、I 图层进行小波系数融合,并将融合图像在 RGB 颜色空间输出显示.给出了融合图像的客观评价参数,通过与前人的实验对比,表明该算法更加适合于人眼的视觉特性.融合图像用颜色凸显目标的偏振信息,能够将目标和背景明显区分开来,很大程度地提高了目标探测识别的质量.

**关键词:**偏振图像;图像融合;HSI 颜色空间;小波变换

**中图分类号:**O436

**文献标识码:**A

**doi:**10.3788/gzxb201039s1.0043

## 0 引言

多光谱图像与传统的单波段图像或彩色图像相比,其每一个像元可以获得一个连续的光谱曲线.目标对象往往具有不同的光谱特性,多光谱图像由于波段较窄、波段较多,因此能够提供目标连续的光谱信息,具有高的光谱分辨率.

传统的 CCD 成像都是利用物体反射光的光强大小来成像,而偏振图像则是利用物体反射光的偏振信息来成像,它有着前者所没有的优势.当光经介质表面反射后,光的偏振态可能发生变化,其偏振态不仅与入射光的方向有关,还与介质本身有关.由菲涅尔公式可知,一束光经介质表面反射、散射和透射时,其光束的偏振态可能发生变化,会产生由自身性质和光学基本定律决定的偏振特征<sup>[1]</sup>.不同物体或相同物体的不同状态(粗糙度、空隙度、含水量、材料的理化特性)产生不同的偏振状态.采用偏振成像的方法,可将其偏振信息提取出来加以利用,用以区分在普通图像中难以区分的物体.由于偏振和波长是不相关的,因此偏振信息和光谱信息是互补的.所谓偏振图像和多光谱图像的融合,实质上就是建立起一种从偏振图像到多光谱图像的映射关系,将二者的互补信息融合到一幅图像之中.

Le Hors, Lenaic Hartemann<sup>[2]</sup> 等人提出了一种

简单的 RGB 偏振图像和多光谱图像融合方法,将 R、G、B 三个波段的强度图像进行融合得到新的强度图像,将三个波段的偏振度图像进行融合得到新的偏振度图像.这种方法简单易懂,但是并没有将光谱信息和偏振信息有效地结合.叶松、汤伟平<sup>[3]</sup> 等提出了一种基于 HSI 颜色空间的偏振图像融合算法,但是它没有有效地整合多个波段的光谱信息. Zhao, Y, Zhang, L<sup>[1]</sup> 等人提出了一种改进的 RGB 融合算法,通过目标和背景不同的颜色信息实现对对象分离,但是复杂背景的颜色信息可能与目标对象的颜色相同,这时对象分离的效果不甚明显.本文提出了一种基于 HSI 颜色空间和小波变换的融合算法.在 HSI 空间,通过对每一个波段的四幅线偏振图像进行计算,得到相应的强度、偏振度和偏振角信息,再此基础上,通过小波变换的方法实现多波段偏振信息的融合.

## 1 偏振信息描述

物体的反射光多为部分偏振光,常用 Stokes 矢量  $(I, Q, U, V)^T$  表示其偏振信息.其中,  $I$  表示反射光的总强度,  $Q$  表示水平方向上线偏光的强度,  $U$  表示  $45^\circ$  方向上线偏光的强度,  $V$  表示圆偏振光矢量.在地表物体的反射中,  $V$  往往很小,常近似为零.

当一束光线沿  $z$  轴传播只通过一个单理想线偏

**基金项目:**武器装备预研基金(No. 9140A01060110BQ0108)和北京理工大学基础研究基金(No. 20090442017)资助

**第一作者(通讯作者):**陈振跃(1987—),男,硕士研究生,主要研究方向为偏振成像、红外成像及图像融合. Email:czybit@foxmail.com

**导师:**王霞(1972—),女,副教授,博士,主要研究方向为光电成像技术及图像处理技术. Email:angelniuniu@bit.edu.cn

**收稿日期:**2010-08-10; **修回日期:**2010-10-20

振片系统时,如图1.

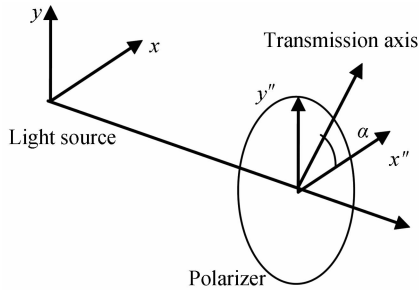


图1 单理想线偏振片模型

Fig.1 Single ideal line polarizer model

此时与参考方向成  $\theta$  角的理想线偏片的 Mueller 矩阵表示为<sup>[4]</sup>

$$\mathbf{M}_p = \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ \cos 2\theta & \cos^2 2\theta & \cos 2\theta \sin 2\theta & 0 \\ \sin 2\theta & \cos 2\theta \sin 2\theta & \sin^2 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

出射光的斯托克斯矢量为

$$\mathbf{S}_{out} = \begin{bmatrix} s'_0 \\ s'_1 \\ s'_2 \\ s'_3 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_p \times \mathbf{S}_{in} = \mathbf{M}_p \times \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

可以得到出射光的光强为

$$I = S'_0 = (S_0 + S_1 \cos 2\theta + S_2 \sin 2\theta) / 2 \quad (3)$$

出射光强是  $\theta$  的函数,用  $I$ 、 $Q$ 、 $U$  和  $V$  表示为

$$I(\theta) = (I + Q \cos 2\theta + U \sin 2\theta) / 2 \quad (4)$$

旋转偏振片改变偏振成像角,令  $\theta$  分别等于  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  和  $135^\circ$ ,将有方程组

$$\begin{cases} I_0 = \frac{1}{2} (I + Q \cos 0^\circ + U \sin 0^\circ) = \frac{1}{2} (I + Q) \\ I_{45} = \frac{1}{2} (I + Q \cos 90^\circ + U \sin 90^\circ) = \frac{1}{2} (I + U) \\ I_{90} = \frac{1}{2} (I + Q \cos 180^\circ + U \sin 180^\circ) = \frac{1}{2} (I - Q) \\ I_{135} = \frac{1}{2} (I + Q \cos 270^\circ + U \sin 270^\circ) = \frac{1}{2} (I - U) \end{cases} \quad (5)$$

各个偏振成像角对应的出射光强值可由成像器件测量得到,反解方程可以得到

$$\begin{cases} I = \frac{1}{2} (I_0 + I_{45} + I_{90} + I_{135}) \\ Q = I_0 - I_{90} \\ U = I_{45} - I_{135} \end{cases} \quad (6)$$

相应的偏振特征参数

$$\begin{cases} \text{DoLP} = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} \\ \text{AoP} = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{U}{Q} \right) \end{cases} \quad (7)$$

此时偏振度 (DoP) 退化为线偏振度 (DoLP).

## 2 图像获取

根据第2节中对偏振光的描述,本文采集三个波段的  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$  的线偏振图像.其中,滤光片分别选取为中心波长为 475 nm、峰值半宽度  $10 \pm 2$  nm 的蓝色滤光片,中心波长 572 nm、峰值半宽度  $10 \pm 2$  nm 的绿色滤光片以及中心波长 600 nm、峰值半宽度  $10 \pm 2$  nm 的红色滤光片.实验原理如图2.

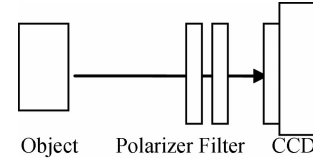


图2 多光谱偏振成像系统

Fig.2 Multi-spectral and polarization imaging system

实验中目标选用放在芦荟花盆中的长条形铁片、圆形的铝片和方形的铜片,背景为实验室内部环境.

## 3 融合实验

### 3.1 HSI 颜色空间到 RGB 颜色空间转换

HSI 颜色空间有多种模型,这里我们采用基于圆形的 HSI 模型.图中  $H$  表示色度,往往以红色为起始位置,随着度数的增大,颜色沿着逆时针变化.  $S$  表示饱和度,它的大小与中心(某一亮度对应的平面与亮度轴的交点)到某一彩色点之间的距离相对应,距离越大,饱和度越大.亮度值由包含该彩色点且与亮度轴垂直的平面与轴的交点决定.

由 HSI 颜色空间到 RGB 颜色空间的转换方法有很多种<sup>[5]</sup>,下面给出圆柱形变换公式.如果给出  $[0, 1]$  内的 HSI 值,要在相应的值域找到对应的 RGB 值,可将  $H$  乘以  $360^\circ$ ,这时色调值返回原来的  $[0^\circ, 360^\circ]$  的范围.在原始色分割中有 3 个相隔  $120^\circ$  的扇形,如图3.通过判断  $H$  的范围,可以确定二者之间的转换关系,见表1.

表1 HSI 颜色空间到 RGB 颜色空间的转换公式

$H$	HSI $\rightarrow$ RGB Transformation formula
$[0^\circ, 120^\circ]$	$B = I(1 - S)$ $R = I(1 + S \cos H / \cos(60^\circ - H))$ $G = 3I - (B + R)$
$[120^\circ, 240^\circ]$	$R = I(1 - S)$ $G = I(1 + S \cos(H - 120^\circ) / \cos(180^\circ - H))$ $B = 3I - (G + R)$
$[240^\circ, 360^\circ]$	$G = I(1 - S)$ $B = I(1 + S \cos(H - 240^\circ) / \cos(300^\circ - H))$ $R = 3I - (G + B)$

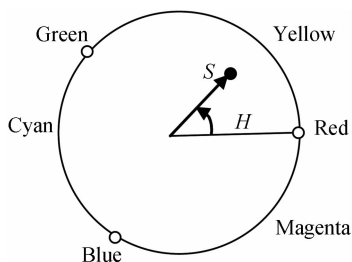


图3 HSI 与 RGB 对应关系

Fig. 3 Relationship between HSI and RGB color system

### 3.2 偏振图像与 HSI 颜色空间的映射关系

HSI 颜色模式是一种基于人对颜色的心理感受的颜色模式,能够更好的适用于人眼观察.另外,HSI 颜色模型与偏振成像获取的强度( $I$ )、偏振度(DoLP)、偏振角(AoP)参数有一定的映射关系,如图4所示.这为基于 HSI 颜色空间实现对偏振图像的融合提供了依据.

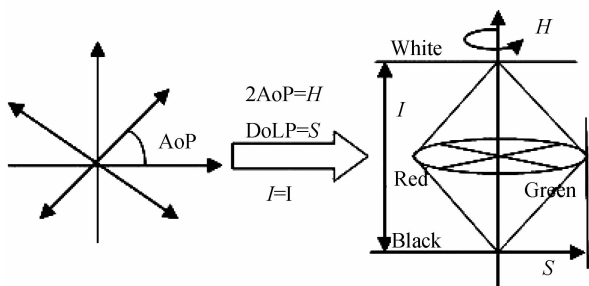


图4 偏振信息与 HSI 颜色空间映射关系

Fig. 4 Polarization information mapping to HSI color space

### 3.3 融合实验

为了将多个波段的光谱和偏振信息融合,本文提出一种基于 HSI 颜色空间和小波图像融合的方法.具体算法为:

1) 分别将红、绿、蓝波段的四幅线偏振图像融合,得到每个波段内的  $I$ 、DoLP 和 AoP 图像,根据图4所示的对应关系将这三个参数映射到 HSI 颜色空间,得到相应的  $H$ 、 $S$ 、 $I$  分量.

2) 分别对三个波段的  $H$ 、 $S$ 、 $I$  分量进行 3 层小波分解.考虑到小波分解层次与光谱损失的关系<sup>[6]</sup>以及小波基的选取原则<sup>[7]</sup>,实验选取  $DB_2$  小波基,

对图像进行 3 层小波分解.

3) 分别对三个波段的  $H$ 、 $S$ 、 $I$  分量进行小波系数融合、重构.在低频区域选用灰度值平均的融合策略.在高频区域,选用基于相关系数的加权平均的融合策略.通过计算每两幅图像之间的相关系数,确定加权因子.最终得到融合后  $H'$ 、 $S'$ 、 $I'$  分量.

高频区域基于相关系数的加权融合规则基本思想为:

待融合的图像  $A$ 、 $B$  的相关系数定义为

$$C(A, B) = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (A - \bar{A})(B - \bar{B})}{\sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (A - \bar{A})^2 \times \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (B - \bar{B})^2}} \quad (8)$$

式中,  $A$ 、 $B$  是指  $H$  (或  $S$  或  $I$ ) 参数所对应的三幅图像中的两幅图像,  $\bar{A}$ 、 $\bar{B}$  分别为图像  $A$ 、 $B$  的像素灰度的平均值,权值  $\omega_1$ 、 $\omega_2$  可以定义为

$$\begin{cases} \omega_1 = \frac{1}{2}(1 - |C(A, B)|) \\ \omega_2 = 1 - \omega_1 \end{cases} \quad (9)$$

因此,融合公式为

$$F(m, n) = \omega_1 A(m, n) + \omega_2 B(m, n) \quad (10)$$

特殊情况下,若  $C(A, B) = 0$  时,  $\omega_1 = \omega_2 = 0.5$ .

4) 适当调整  $I'$  的大小,以保证最终融合图像的亮度.根据表一中的对应关系将  $H'$ 、 $S'$ 、 $I'$  分量映射到 RGB 颜色空间,最后显示输出.

## 4 结果与分析

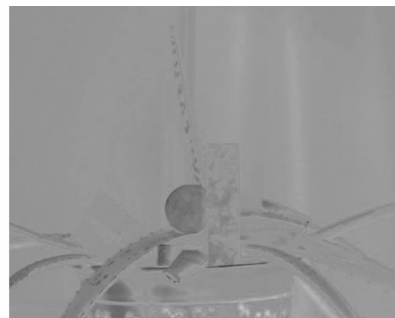
根据 3.3 中的融合算法,将 600 nm、572 nm、475 nm 波段的偏振图像在 HSI 颜色空间融合,得到结果如图 5(a). 而采用传统的直接 RGB 颜色空间融合的方法(以下简称算法一),依次将强度、偏振度和偏振角送到 R、G、B 三个通道,得到的结果如图 5(b). 改进的 RGB 融合方法(以下简称算法二)得到的结果如图 5(c),文献[1]提出的算法(以下简称算法三)得到的结果如图 5(d). 目标在可见光波段的非偏图像如图 5(e).



(a)Based on proposed algorithm in this paper



(b)Based on algorithm 1



(c)Based on algorithm 2

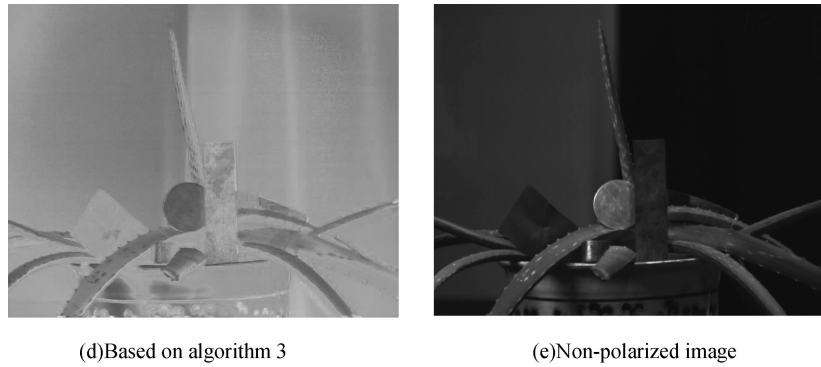


图 5 融合图像和非偏图像

Fig. 5 Fused image and non-polarized image

根据偏振特征与 HSI 颜色空间的映射关系以及 HIS 颜色空间与 RGB 颜色空间的对应关系,对本文算法所得到的融合图像分析为:

可以从图像的亮度特征来分析目标反射的强度特性,从色彩特征来分析目标的偏振角特性,而图像的颜色饱和度则由偏振度的大小决定.图 5(a)中偏振角按红、绿、蓝颜色的方向增大,颜色饱和度越大,对应的偏振度越大.

另外可以看出,算法一的融合结果不同通道之间相互干扰严重,将强度分量送入 R 通道,图像整体偏红,很难看出其他细节;算法二虽然能够一定程

度上凸显各个分量的信息,但是目标的边缘不够清晰,目标和背景不易区分.而本文提出的算法,不仅能保留光谱图像所表现的低频特征,又突出了偏振特征,从而改善图像目标的识别能力.

引入基于人眼视觉系统 (Human Visual System, HVS) 的融合图像评价指标.根据文献[8],一幅彩色图像的细节可用一个“对比度指数”描述.具体的评价过程<sup>[8]</sup>如图 6:第一步,融合图像映射到色空间 Y、Cb 和 Cr 三通道;第二步,对每一个通道进行低通处理得到一系列低通图像,同时采用相邻低通图像作差得到相应的带通图像;第三步,用带通

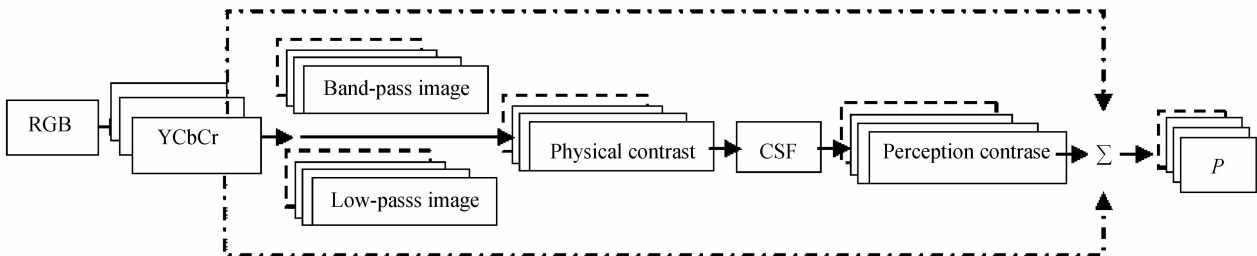


图 6 基于人眼视觉的图像融合质量评价流程

Fig. 6 Process of fused image quality assessment based on HVS

度与相应的低通图像之比得到一系列不同频带的物理对比度;第四步,考虑人眼对比度敏感函数 (Contrast Sensitive Function, CSF) 后计算感知对比度;第五步,对某一个频带所有像素感知对比度求平均得到这个频带的对比度指数;第六步,对这个频带的三个通道对比度指数求和,得到评价彩色图像评价因子  $P$ ,  $P$  值越大,表明融合效果越好.针对不同的融合算法得到的评价因子  $P$  值如表 2.

表 2 不同融合算法的评价因子对比

Table 2 Comparison of fusion performance evaluation for different algorithms

Fused image in the paper	Algorithm 1	Algorithm 2	Algorithm 3
$P$	0.2437	0.2418	0.2407

## 5 结论

偏振成像和多光谱成像在目标的探测识别中占有重要的地位,如何将偏振信息和多光谱信息进行融合,对于目标探测识别具有重要的意义.本文提出了一种基于 HSI 颜色空间和小波变换的融合算法,在更好的适应人眼视觉特性的情况下有效地将这两种信息融合起来,不仅提高了对目标自身特性的探测能力,同时也有效地抑制了背景噪声的干扰,对于对象识别和目标探测具有积极的意义.

### 参考文献

- [1] ZHAO Y, ZHANG L, ZHANG D, *et al.* Object separation by polarimetric and spectral imagery fusion[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2009, **113**: 855-866.
- [2] LE HORS L, HARTEMANN P, BREUGNOT S. Multispectral polarization active imager in the visible band[C]. *SPIE*, 2000, **4035**: 380-389.

- [3] YE Song, TANG Wei-ping, SUN Xiao-bing, *et al.* Characterization of the polarized remote sensing images using IHS color system[J]. *Remote Sensing Information*, 2006(2): 11-17.  
叶松, 汤伟平, 孙晓兵, 等. 一种采用IHS空间表征偏振遥感图像的方法[J]. *遥感信息*, 2006(2): 11-17.
- [4] DONG Ning. The study on mid-infrared polarization imaging [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2008.  
董宁. 中波红外偏振成像技术实验研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2008.
- [5] ZHANG Xue-xi, YANG Yi-min. Common color space and its conversions in color image project[J]. *Computer Engineering and Design*, 2008, **29**(5): 1210-1212.  
张学习, 杨宜民. 彩色图像工程中常用颜色空间及其转换[J]. *计算机工程与设计*, 2008, **29**(5): 1210-1212.
- [6] YANG Xuan, PEI Ji-hong, YANG Wan-hai. Disadvantage of the methods based on wavelet transform in high-resolution and multispectral fusion image [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2002, **21**(1): 77-80.  
杨焯, 裴继红, 杨万海. 小波变换方法在高分辨率多光谱图像融合中存在的问题[J]. *红外与毫米波学报*, 2002, **21**(1): 77-80.
- [7] WANG Xin-fan. Selection and optimization of wavelet base[J]. *Journal of Zhuzhou Institute of Technology*, 2003, **17**(5): 33-35.  
汪新凡. 小波基选择及其优化[J]. *株洲工学院学报*. 2003, **17**(5): 33-35.
- [8] CHEN Y, BLUM R S. A new automated quality assessment algorithm for image fusion[J]. *Image and Vision Computing*, 2009, **27**(10): 1421-1432.

## Polarimetric and Multi-spectral Image Fusion Based on HSI Color System and Wavelet Transform

CHEN Zhen-yue, WANG Xia, ZOU Xiao-feng

(School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Polarization imaging technique is a hot spot in the field of optoelectronic imaging. Due to its great significance in the quality of object detection and recognition, polarization image and multi-spectral image fusion algorithms based on HSI color space were discussed. In each band, four line polarized images were fused to get three images which stood for intensity(I) image, degree of polarization(DoLP) image and angle of polarization(AoP) image, and they were mapped into HSI color space. Then a wavelet transform based method was introduced to reconstruct the wavelet coefficients of H, S, I layer in the three bands respectively. The final fusion result was shown in RGB color space. Experiments indicate that the proposed algorithm integrates spectral information and polarization information effectively and can improve the quality of target detection and recognition.

**Key words:** Polarization image; Image fusion; HSI color space; Wavelet transform