

## 基于彩色偏振图像的HSV空间目标增强方法

梁建安 刘斌 梁美彦 郭亚飞

### Target enhancement method in HSV color space based on color polarized image

LIANG Jian'an, LIU Bin, LIANG Meiyan, GUO Yafei

引用本文:

梁建安, 刘斌, 梁美彦, 等. 基于彩色偏振图像的HSV空间目标增强方法[J]. 应用光学, 2023, 44(3): 548–555. DOI: 10.5768/JAO202344.0302002

LIANG Jian'an, LIU Bin, LIANG Meiyan, et al. Target enhancement method in HSV color space based on color polarized image[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(3): 548–555. DOI: 10.5768/JAO202344.0302002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0302002>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于低照度三基色图像去噪及融合彩色图像增强方法研究

Color image enhancement based on LLL tricolor image denoising and fusion

应用光学. 2018, 39(1): 57–63 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0102003>

#### 利用目标和大气偏振信息的雾天图像重构方法

Fog image reconstruction using target and atmospheric polarization information

应用光学. 2019, 40(5): 829–837 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0502007>

#### 水下目标物偏振成像特性研究

Experimental study on polarization imaging characteristics of underwater targets

应用光学. 2019, 40(1): 27–32 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0101005>

#### 非共轴四通道偏振成像方法研究

Research on non-coaxial four-channel polarization imaging method

应用光学. 2019, 40(1): 68–72 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0102001>

#### 基于无人机的光电与SAR图像融合技术研究

Fusion method of optical image and SAR based on UAV

应用光学. 2017, 38(2): 174–179 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0201004>

#### 红外偏振成像系统光学设计

Optical design of infrared polarization imaging system

应用光学. 2018, 39(3): 316–320 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0301003>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 03-0548-08

# 基于彩色偏振图像的 HSV 空间目标增强方法

梁建安, 刘斌, 梁美彦, 郭亚飞

(山西大学 物理电子工程学院, 山西 太原 030000)

**摘要:** 针对复杂背景条件下目标难以识别的问题, 采用彩色偏振成像技术, 提出了一种基于彩色偏振图像的目标增强方法。该方法首先根据分焦平面彩色偏振相机获得的数据得到彩色线偏振度 (degree of linear polarization, DoLP)、彩色偏振角 (angle of polarization, AoP) 和彩色强度 ( $S_0$ ) 图像; 然后利用目标和背景的彩色偏振特性差异大的特点提取 DoLP、AoP 和  $S_0$  的视觉显著度, 使目标得到初步的增强; 随后将 3 种视觉显著度图像转到 HSV 空间进行融合, 最后转到 RGB 空间显示。使用对比度和矢量角度距离作为客观评价指标开展实验, 多个实验场景数据表明, 融合图像的对比度和矢量角度距离分别比融合前图像最高提升了 3.971 倍和 1.711 倍。

**关键词:** 偏振成像; 目标增强; 视觉显著度; HSV 颜色空间; 图像融合

中图分类号: TN29

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0302002

## Target enhancement method in HSV color space based on color polarized image

LIANG Jian'an, LIU Bin, LIANG Meiyan, GUO Yafei

(College of Physical and Electronic Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030000, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the target is difficult to identify under complex background conditions, the color polarization imaging technology was adopted to propose a target enhancement method based on the color polarization image. Firstly, the degree of linear polarization (DoLP), angle of polarization (AoP) and color intensity ( $S_0$ ) images were obtained according to the data from the split-focal plane color polarization camera. Then, the visual salience of DoLP, AoP and  $S_0$  was extracted by using the large difference of color polarization characteristics between targets and backgrounds, so that the targets were initially enhanced. Moreover, the three visual salience images were transferred to HSV space for fusion, and finally transferred to RGB space for display. Experiments were conducted by using contrast and vector angle distance as the objective evaluation indexes. The multiple experimental scene data show that the contrast and vector angular distance of the fused images are 3.971 times and 1.711 times higher than those of the images before fusion, respectively.

**Key words:** polarization imaging; target enhancement; visual salience; HSV color space; image fusion

## 引言

偏振、强度、波长都是光的基本属性。物体的偏振特性由其本身的物理属性决定, 比如粗糙程度、水分含量、介质等, 还与光照强度和观察角度有关。与常见的可见光、红外成像相比, 偏振成像可以获取物体多维度的偏振信息, 呈现物体的轮廓和细节, 发现传统图像中不能分辨的部分<sup>[1]</sup>, 例

如可以用偏振相机替代传统相机来分辨物体表面的缺陷<sup>[2]</sup>, 还可以通过解析物体的偏振信息来识别目标, 因此偏振成像在地质勘探<sup>[3]</sup>、生物医学<sup>[4]</sup>、军事演练<sup>[5]</sup>、海洋开发<sup>[6]</sup>中有很大的应用价值。

在现实场景中, 复杂的背景往往会干扰目标的提取和识别, 对目标进行增强就显得尤为重要, 图像融合方法就是一种有效的目标增强方法。目

收稿日期: 2022-07-21; 修回日期: 2022-09-25

基金项目: 国家自然科学基金 (11804209); 山西省应用基础研究计划项目 (201901D211172, 201901D211173); 山西省中央引导地方科技发展资金项目 (YDZX20201400001547); 山西省高等学校科技创新项目 (2020L0048, 2019L0064)

作者简介: 梁建安 (1988—), 女, 博士研究生, 讲师, 硕士生导师, 主要从事偏振成像、图像处理、机器视觉研究。

E-mail: liangjianan@sxu.edu.cn

通信作者: 梁美彦 (1984—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事深度学习、机器学习以及智能图像处理研究。

E-mail: meiyianliang@sxu.edu.cn

前, 偏振图像融合方法主要有: 基于多尺度分析的融合算法<sup>[7-9]</sup>、基于学习的融合算法<sup>[10-11]</sup>和伪彩色融合算法<sup>[12-13]</sup>。例如 ZHANG<sup>[7]</sup>等人提出了一种基于多尺度卷积稀疏分解 (MCSF) 的图像融合方法, 在可视化数值评价上获得了较好的效果。陈卫<sup>[11]</sup>等提出了一种基于 FWA (fireworks algorithm) 的红外偏振图像融合方法, 对红外强度和红外偏振图像的特征进行了保留, 在相对熵、总结构相似性、总互信息指标上优于其他算法。徐国明<sup>[13]</sup>等提出了一种伪彩色偏振图像融合方案, 将偏振图像经过直方图规范化后转入 IHS (intensity, hue, saturation) 颜色空间, 得到了伪彩色融合结果, 强化了目标, 凸显了特征。随着偏振融合技术的发展, 研究者往往都是将基于多尺度分析的算法或者基于学习的算法与伪彩色算法相结合, 以此来更好地增强目标, 例如: 张家民<sup>[14]</sup>等就结合了多尺度分析和伪彩色融合方法, 提出了一种 HSL-RGB (hue, saturation, light-red, green, blue) 图像融合技术, 有效减少了多个偏振态图像之间的互补性和冗余性, 最终表明了这项融合技术在目标探测方面的显著效果。XU<sup>[15]</sup>等结合了学习算法和伪彩色算法, 提出了一种基于字典学习的偏振图像快速融合方法, 赋予了物体颜色信息, 提高了运行效率。此外, 目前偏振图像融合针对的源图像主要有同波段的不同类型图像, 例如将可见光波段的强度图像和偏振度图像进行融合<sup>[16]</sup>, 以及不同波段的同类型图像, 例如将可见光波段与红外波段的偏振度图像进行融合<sup>[17]</sup>。源图像的多样以及融合算法的多样使得偏振融合方法能有效应用于目标增强领域。

虽然现有的偏振图像融合方法对图像进行了彩色化, 使得目标增强效果有了一定的提升, 但是仍然缺少直接针对彩色偏振图像的融合方法。此外, HSV (hue, saturation, value) 颜色空间由于其各自独立的颜色通道, 研究者常常在该颜色空间内进行颜色分割。因此, 本文结合彩色偏振图像的特点和 HSV 颜色空间提出了一种目标增强的方法。研究结果表明, 该方法在人眼主观视觉效果和客观指标数据上均取得了明显的提升。

## 1 彩色偏振成像理论

### 1.1 彩色偏振成像原理

典型的偏振成像方法主要有分时法 (DoT)<sup>[18]</sup>、分振幅法 (DoAM)<sup>[19]</sup>、分孔径法 (DoAP)<sup>[20]</sup> 和分焦平面法 (DoFP)<sup>[21]</sup>。分焦平面法在结构体积、成像速度和误差控制上具有明显优势, 因此本文采用该成像方式。

图 1 是彩色分焦平面法成像示意图。图 1(a) 是彩色分焦平面相机, 该相机由焦平面、Bayer 阵列滤光片、微偏振阵列组成。每  $4 \times 4$  个像元构成一个模块组, 每个模块组中有 4 个颜色通道, 从左到右分别是 R 通道、G 通道、G 通道和 B 通道, 属于经典的 Bayer 阵列排列方式, 由于人眼视觉对绿色更为敏感, 因此有 2 个 G 通道。每个颜色通道又包含 4 个偏振通道, 偏振通道的偏振角度从左到右分别是  $90^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $135^\circ$  和  $0^\circ$ 。对采集到的图像数据按照偏振角度进行插值, 即可生成  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  和  $135^\circ$  的彩色偏振图像, 成像过程如图 1(b) 所示。

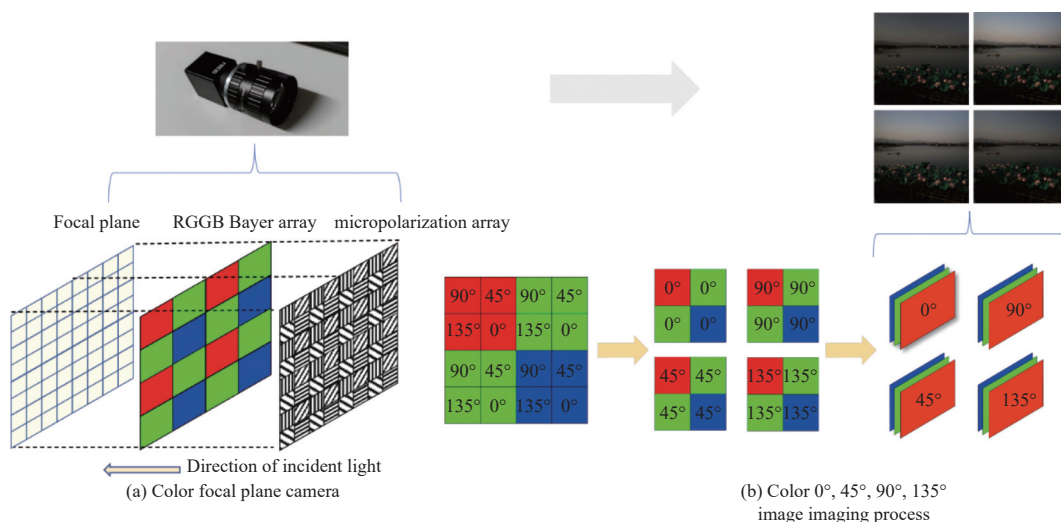


图 1 彩色分焦平面成像过程

Fig. 1 Imaging process of color split-focal plane

## 1.2 Stokes 矢量表示法

在获得  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  和  $135^\circ$  的彩色偏振图像后,将这4个角度的彩色偏振图像进行颜色通道分离,分别得到 R、G、B 通道下的  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  和  $135^\circ$  图像,然后由 Stokes 矢量矩阵可得 R、G、B 通道下的 DoLP 图像、AoP 图像和  $S_0$  图像,最后得到 RGB 空间的彩色 DoLP 图像、彩色 AoP 图像和彩色  $S_0$  图像。

Stokes 矢量矩阵常用来量化描述物体的偏振状态。设 Stokes 矩阵为

$$\mathbf{S} = [S_0, S_1, S_2, S_3] \quad (1)$$

式中:  $S_0$  表示系统接收的总辐射强度;  $S_1$  表示平行和垂直偏振方向上的辐射强度差;  $S_2$  表示两条对角线方向上的辐射强度差;  $S_3$  表示右旋圆偏振光与左旋圆偏振光强度差,当  $S_3$  为正值时,表示右旋圆偏振光占优势。在实际应用中,右旋圆偏振光与左旋圆偏振光强度很小,可忽略不计,即  $S_3 = 0$ 。设  $I_\theta$  表示不同角度下的光强,则 Stokes 矢量矩阵参量为

$$\begin{cases} S_0 = \frac{1}{2}(I_{0^\circ} + I_{45^\circ} + I_{90^\circ} + I_{135^\circ}) \\ S_1 = I_{0^\circ} - I_{90^\circ} \\ S_2 = I_{45^\circ} - I_{135^\circ} \end{cases} \quad (2)$$

由下列 Stokes 矢量矩阵公式可得线偏振度和偏振角:

$$P_{\text{DoLPc}} = \frac{\sqrt{S_{1c}^2 + S_{2c}^2}}{S_{0c}} \quad (3)$$

$$P_{\text{AoPc}} = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{S_{2c}}{S_{1c}} \right) \quad (4)$$

式中:  $c \in (\text{R}, \text{G}, \text{B})$ , 表示颜色通道。

## 2 目标增强方法

为了实现目标增强,本文采用视觉显著度提取目标的轮廓和细节,然后在 HSV 颜色空间中进行融合以增强目标。首先对相机采集得到的  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  和  $135^\circ$  这4个方向的彩色偏振图像通过 Stokes 矢量法进行预处理,得到彩色 DoLP 图像、彩色 AoP 图像和彩色  $S_0$  图像,再分别通过视觉显著度模型提取彩色 DoLP、AoP 和  $S_0$  图像的显著度,初步提取目标,然后将显著度图像按照相应的规则映射到 HSV 颜色空间以增强目标,最后转到 RGB 空间进行展示。方案流程图如图2所示。

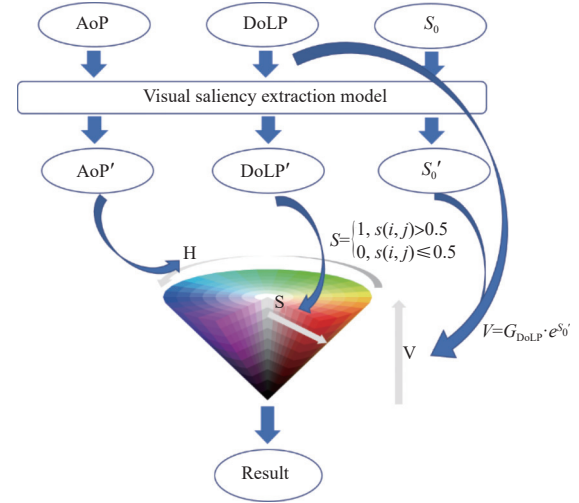


图2 方案流程图

Fig. 2 Flow chart of scheme

### 2.1 视觉显著度提取

自然界中常见的目标和背景往往具有不同的偏振特性。在彩色偏振特性图像中,目标在一定程度上会得到突出,而背景杂波得到抑制。因此利用视觉显著度可以对目标进行提取,进一步增大目标和背景的差异。这样,目标得到增强而背景得到抑制,人眼能够在图像中更精准地对目标进行定位。因此,本文采用基于小波变换的视觉显著度提取模型<sup>[22]</sup>,提取目标的显著特征。

该模型先将显著度图像转到 CIE Lab 颜色空间进行小波分解与重构,因为该颜色空间中的亮度通道和双色通道类似于人类感知。在进行小波分解时,选用 Daubechies 小波,因为它的滤波器大小与计算时间、整体结果的计算相匹配。在小波重构时,忽略低频部分,在保留图像轮廓和细节的同时,提高了效率。在进行小波分解与重构后会生成两个特征映射图像,分别是全局显著度图和局部显著度图,再将这两个显著度图进行融合,就得到了最终的显著度图。

全局  $s_G(x, y)$ 、局部  $s_L(x, y)$ 、最终  $s(x, y)$  显著度图可由式(5)~式(7)得到:

$$s_G(x, y) = \left\{ \lg \left[ p[f(x, y)]^{-1} \right] \right\}^{1/2} \cdot I_{K \cdot K} \quad (5)$$

$$s_L(x, y) = \left\{ \sum_{s=1}^N \arg \max \left[ f_s^L(x, y), f_s^a(x, y), f_s^b(x, y) \right] \right\} \cdot I_{K \cdot K} \quad (6)$$

$$s(x, y) = s'_L(x, y) \times e^{s'_G(x, y)} \cdot I_{K \cdot K} \quad (7)$$

式中:  $I_{K \cdot K}$  是  $K \cdot K$  的高斯低通滤波器;  $p[f(x, y)]^{-1}$  是概率密度函数,特征在给定位置的可能性可以用

概率密度函数来定义;  $N$  为小波分解的层次;  $f_s^L(x, y)$ 、 $f_s^a(x, y)$ 、 $f_s^b(x, y)$  分别是 L、a、b 通道在  $s(s \in (1, N))$  比例尺度下的特征图;  $s'_G(x, y)$ 、 $s'_L(x, y)$  分别是归一化的全局和局部显著度图。

以楼道场景为例, 将彩色 DoLP 图像、彩色 AoP 图像和彩色  $S_0$  图像分别通过基于小波变换的视觉显著度提取模型, 得到 DoLP、AoP 和  $S_0$  的显著度图像, 如图 3 所示。从图 3 可以看到, DoLP 显著度图像初步提取出了标识牌目标, 并且在一定程度上显示了标识牌目标的细节, 但存在部分细节模糊、不利于人眼观察的情况。AoP 显著度图像很好地提取了标识牌目标的轮廓, 但缺少目标细节信息。 $S_0$  显著度图像则对目标和轮廓都有所显示, 但目标细节提取效果并不明显。由此实验可以看出, DoLP、AoP 和  $S_0$  的显著度图对目标的提取效果各不相同, 且都达不到最佳显示效果。因此, 可以将这 3 幅图像进行融合, 进一步增强目标。

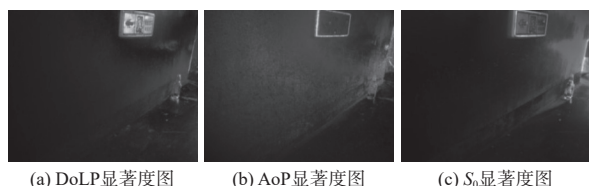


图 3 楼道场景显著度图

Fig. 3 Saliency images of corridor scene

## 2.2 HSV 空间融合

HSV 是除 RGB 颜色模型之外应用非常广泛的一种颜色模型, 该模型由色调 (Hue)、饱和度 (Saturation) 和明度 (Value) 组成。HSV 颜色空间相较于 RGB 颜色空间, 没有相互耦合的红绿蓝颜色通道, 而是相互独立的 H、S、V 通道, 在进行图像融合时, 可以单独对某一通道进行变换, 且不会破坏各颜色通道之间的相互关系。因此本文在 HSV 空间中进行图像融合, 既保留了彩色偏振图像中的偏振信息, 又抑制了背景中的杂波, 对目标进行了增强。

一般来说, DoLP 和  $S_0$  图像的像素大小范围是 0~255, S 通道和 V 通道的范围也是 0~255, 因此通常将 DoLP 图像映射到饱和度 S 通道, 将  $S_0$  图像映射到明度 V 通道。 $P_{AoP} \in (0^\circ, 180^\circ)$ , H 通道范围是  $0^\circ \sim 360^\circ$ , 两者呈线性关系, 因此将 AoP 图像映射到色调 H 通道<sup>[23-24]</sup>。本文结合前人的融合思路, 根据 H、S、V 通道不同的物理意义来设置不同的映射规则, 提出了一种新的融合方法, 以此来增强

目标。

3 个通道内的融合规则如下:

a) 将 AoP 显著度图像映射到 H 通道, 该通道决定了目标的颜色。

b) 将 DoLP 显著度图像映射到 S 通道, 并在 S 通道中对像素点  $S(i, j)$  的值取阈值, 阈值规则如 (8) 式所示。设置阈值是为了将目标区域的饱和度值在归一化后变为 1, 使得饱和度最大化, 同时将非目标区域的饱和度最小化, 这就使得目标和背景的饱和度差异最大化, 更能突出目标。

$$S(i, j) = \begin{cases} 1, & s(i, j) > 0.5 \\ 0, & s(i, j) \leq 0.5 \end{cases} \quad (8)$$

c) 将  $S_0$  显著度图像和彩色 DoLP 图像灰度化后的图像进行指数相乘, 并赋值到 V 通道。显著度图像是二维图像, 彩色 DoLP 图像是三维图像, 二者不能直接融合, 因此需要将彩色 DoLP 图像灰度化。V 通道融合是为了提升图像整体的明亮程度, 有利于图像的可视化。

$$V = G_{DoLP} \cdot e^{s_0'} \quad (9)$$

式中:  $s_0'$  是  $S_0$  显著度图像,  $G_{DoLP}$  是彩色 DoLP 图像灰度化后的图像, 两者的归一化后的范围是 (0, 1), 因此  $V \in (0, e)$ 。而在 HSV 空间中, V 通道在归一化后的范围是 (0, 1), 为了避免 V 通道数据失真, 我们在 V 通道设置阈值, 这样既保持了数据的真实性, 又保留了目标区域亮度高的优势。

## 3 实验结果与分析

本次实验使用的相机是 LUCID 公司的 2 448×2 048 像素的分焦平面彩色偏振相机。为了验证我们的方法能够有效增强目标, 分别在楼道、停车场和湖边等场景开展实验。

### 3.1 实验结果

图 4 是楼道场景图, 目标是标识牌。从图 4 可以看出, 彩色 DoLP 图像中目标较为明显, 并且图像中的杂物干扰受到了一定的抑制作用, 但是目标和背景颜色差异小。彩色 AoP 图像虽然清晰地显示了目标的轮廓, 但是目标细节非常模糊, 不利于人眼观察。彩色  $S_0$  图像中的目标清晰, 但是和背景的颜色相近, 两者之间的对比度较小, 并且楼道中杂物对目标起到了一定的干扰作用。融合后的图像对目标进行了颜色增强, 既突出了目标的轮廓, 又显示出目标的细节, 并且目标与背景的颜色差异大, 使人眼能方便地从图像中找寻到目标,

快速地聚焦于目标。

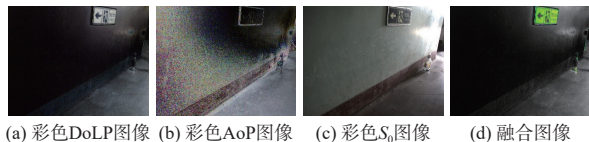


图4 楼道场景图

Fig. 4 Images of corridor scene

图5是停车场场景图,汽车目标在图中用红色方框圈出,放大后显示在图像右下角。从图5可以看出彩色 DoLP 图像目标周围的树木、建筑物等杂乱背景得到抑制,减少了对目标的干扰。彩色 AoP 图像显示出了目标的轮廓,但是目标的细节被掩盖了。彩色  $S_0$  图像中目标虽然很清晰,但是树木等植被和建筑物等都对目标产生了很大的干扰。融合后的图像对目标进行了颜色增强,同时减少了周围物体对目标的干扰,提升了目标和周围物体之间的对比度,使得人眼可以清晰地分辨出目标。

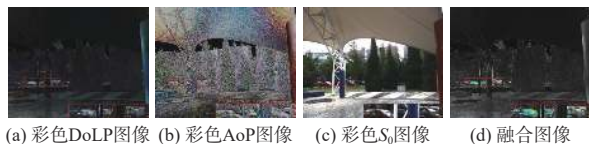


图5 停车场场景图

Fig. 5 Images of parking lot scene

图6是湖边场景图,巡逻车目标在图中用红色方框圈出,放大后显示在右下角。从图中可以看出,仅凭人眼很难发现远处岸边树下的巡逻车。在彩色 DoLP 图像中,周围环境对目标的干扰得到了一定的抑制,但是目标在图像中并没有突出。在彩色 AoP 图像中,周围环境对目标的显示起到了很大的干扰作用。在彩色  $S_0$  图像中,目标虽然可以显示,但是由于目标太小,周围环境对目标同样存在干扰。融合后的图像对目标进行了颜色增强,同时减少了周围环境对目标的干扰,使得目标在图像中得以凸显。

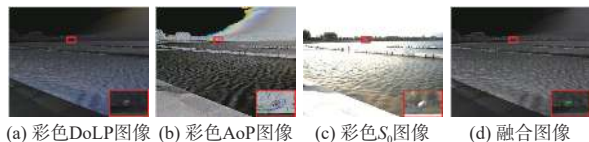


图6 湖边场景图

Fig. 6 Images of lakeside scene

从以上实验结果可以发现,融合后的图像中,杂乱背景得到了抑制,目标都得到了颜色增强,目

标与背景的对比度变大,使得人眼能够快速找到并分辨出图像中的目标。特别地,对于停车场场景和湖边场景,成像图中的目标很小,融合后的图像使小目标增强并凸显,帮助人眼迅速地从场景中定位目标。以上实验说明,本文提出的融合方法能够有效地抑制杂乱背景、增强目标,并且适用于小目标的增强,体现了本文融合方法应用范围的广泛。

### 3.2 实验分析

本文采用目标和背景之间的对比度,以及 RGB 空间中的矢量-角度距离色差公式<sup>[25]</sup>作为实验结果的客观评价指标。

#### 3.2.1 对比度分析

在图像中,目标是我们所需要探测的物体,背景是目标周围的物体。目标和背景的对比度为

$$C = \frac{|X_r - X_R| + |X_g - X_G| + |X_b - X_B|}{(X_r + X_R) + (X_g + X_G) + (X_b + X_B)} \quad (10)$$

式中:  $X_r$ 、 $X_g$ 、 $X_b$ 和 $X_R$ 、 $X_G$ 、 $X_B$ 分别表示彩色图像目标和背景在不同颜色通道下的平均像素值。表1是3.1节中3组实验场景图像的对比度计算结果。

表1 3组实验图像的对比度计算结果

Table 1 Calculation results of contrast of 3 groups of experimental images

| Number | Color DoLP image | Color AoP image | Color $S_0$ image | Fusion image  |
|--------|------------------|-----------------|-------------------|---------------|
| 1      | 0.1675           | 0.0491          | 0.0716            | <b>0.2376</b> |
| 2      | 0.2938           | 0.0288          | 0.1898            | <b>0.3585</b> |
| 3      | 0.1164           | 0.2338          | 0.3512            | <b>0.5419</b> |

从表1可以看出,融合图像的对比度比彩色 DoLP 图像平均高了 1.438 倍,比彩色 AoP 图像平均高了 3.971 倍,比彩色  $S_0$  图像平均高了 3.375 倍。因为彩色 DoLP 图像一般可以体现出目标的细节,与融合图像效果相差最小,所以融合图像的对比度数据相较于彩色 DoLP 图像的提升最少。当目标和背景的对比度越大,则目标在图像中越突出,人眼就可以更快地发现目标。结合 3.1 节实验结果可以发现,对比度评价结果和人眼观察结果是一致的。

#### 3.2.2 矢量角度距离分析

设 RGB 颜色空间中两个颜色的坐标分别是  $x_1 = (r_1, g_1, b_1)$ 和 $x_2 = (r_2, g_2, b_2)$ ,在本文中,  $r_1$ 、 $g_1$ 、 $b_1$ 和 $r_2$ 、 $g_2$ 、 $b_2$ 表示的是目标区域和背景区域在红绿蓝通道中的平均分量。矢量角度距离为

$$d = \sqrt{\frac{S_r^2 \cdot (r_1 - r_2)^2 + S_g^2 \cdot 2 \cdot (g_1 - g_2)^2 + S_b^2 \cdot (b_1 - b_2)^2}{4 \cdot 255^2}} + S_\theta \cdot S_{\text{ratio}} \cdot \theta^2 \quad (11)$$

式中:

$$\theta = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left( \frac{r_1 \cdot r_2 + g_1 \cdot g_2 + b_1 \cdot b_2}{\sqrt{(r_1^2 + g_1^2 + b_1^2) \cdot (r_2^2 + g_2^2 + b_2^2)}} \right)$$

$$S_\theta = \frac{\frac{|m_1 - m_2|}{m_1 + m_2}}{\frac{|r_1 - r_2|}{r_1 + r_2} + \frac{|g_1 - g_2|}{g_1 + g_2} + \frac{|b_1 - b_2|}{b_1 + b_2}} \cdot S_m^2$$

$$S_m = \min \left( \frac{m_1 + m_2}{\sum (r, g, b)}, 1 \right)$$

$$S_{\text{ratio}} = \frac{\max(r_1, r_2, g_1, g_2, b_1, b_2)}{255}$$

3.1 节中 3 组实验场景的矢量角度距离如表 2 所示。由(11)式可得, 矢量角度距离越大, 两个颜色之间的色差越大, 即目标和背景的颜色差异越大, 则目标在整个图像中相较于背景更加突出。从表 2 可以看出, 在前 2 个场景中, 彩色 DoLP 图像的矢量角度距离要大于彩色 AoP 图像和彩色  $S_0$  图像, 但在第 3 个场景中却相反, 这是因为第 3 个场景中目标最小, 彩色 DoLP 图像中目标和背景的颜色差异小, 导致彩色 DoLP 图像矢量距离较小。但是在 3 组图像中, 融合图像的矢量角度距离均高于彩色 DoLP 图像、彩色 AoP 图像和彩色  $S_0$  图像, 其比彩色 DoLP 图像平均高了 1.711 倍, 比彩色 AoP 图像平均高了 1.579 倍, 比彩色  $S_0$  图像平均高了 1.574 倍。综合来看, 融合图像中目标和背景的颜色差异最大, 目标会更加突出, 这与人眼观察结果也是一致的。

表 2 3 组实验图像的矢量角度距离计算结果

Table 2 Calculation results of vector angle distance of three groups of experimental images

| Number | Color DoLP image | Color AoP image | Color $S_0$ image | Fusion image  |
|--------|------------------|-----------------|-------------------|---------------|
| 1      | 0.0693           | 0.0533          | 0.0679            | <b>0.0968</b> |
| 2      | 0.0806           | 0.0249          | 0.0145            | <b>0.1437</b> |
| 3      | 0.1251           | 0.2177          | 0.2065            | <b>0.2298</b> |

## 4 结论

本文提出了一种基于彩色偏振图像的目标增强方法, 通过视觉显著度的方法提取彩色 DoLP、AoP 和  $S_0$  图像中的目标特征, 然后在 HSV 空间中

进行融合, 达到抑制背景杂波、增大目标和背景对比度的目的。首先, 由彩色偏振相机采集到的  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  和  $135^\circ$  这 4 个方向的彩色偏振图像得到彩色 DoLP、AoP 和  $S_0$  图像。然后使用基于小波的视觉显著度提取模型得到彩色 DoLP、AoP 和  $S_0$  图像的显著度图像, 使得目标得到初步的增强。再次, 映射到 HSV 颜色空间, 在 H 通道赋予图像颜色, 在 S 通道提高目标和背景的对比度, 在 V 通道提升图像整体的亮度, 使得目标和背景的对比度达到最大, 最大化的凸显出目标, 最后转到 RGB 空间得到目标突出的最终图像。实验结果表明, 该方法对目标周围的背景杂波起到了很好的抑制作用, 并对图像中的目标进行颜色增强, 提升了目标和背景的对比度, 使得人眼可以迅速并准确地发现图像中的目标。同时, 该方法在目标和背景对比度以及矢量角度距离上也有了很大的提升, 这与人眼观察结果相一致。除此之外, 该融合方法对小目标也进行了增强, 帮助人眼迅速地从场景中定位目标。但是, 该方法对图像中的某些非目标区域也会进行增强, 容易对目标形成干扰, 因此, 未来我们会针对这一问题进行进一步的研究。

## 参考文献:

- [1] 李欣, 高明, 冯斌. 彩色偏振成像目标-背景对比度增强方法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(12): 312-318.  
LI Xin, GAO Ming, FENG Bin. Research on object-background contrast enhancement method for color polarization imaging[J]. Advances in Lasers and Optoelectronics, 2018, 55(12): 312-318.
- [2] 高阳, 万新军, 解树平. 偏振相机的透明元件应力测量[J]. 应用光学, 2022, 43(2): 284-290.  
GAO Yang, WAN Xinjun, XIE Shuping. Stress measurement of transparent elements based on polarized camera[J]. Journal of Applied Optics, 2022, 43(2): 284-290.
- [3] 郑逢勋, 朱家乙, 侯伟真, 等. 卫星遥感中不同偏振量对气溶胶反演的影响分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(7): 2212-2218.  
ZHENG Fengxun, ZHU Jiayi, HOU Weizhen, et al. Ana-

- lysis of the influence of different polarizations on aerosol retrieval in satellite remote sensing[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2021, 41(7): 2212-2218.
- [4] ALALI S, VITKIN A. Polarized light imaging in biomedicine: emerging mueller matrix methodologies for bulk tissue assessment[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2015, 20(6): 61104.
- [5] 王霞, 苏子航, 赵家碧, 等. 基于交织序列的偏振方向映射方法[J]. *应用光学*, 2021, 42(5): 877-883.  
WANG Xia, SU Zihang, ZHAO Jiabi, et al. Sequence-interleaving mapping method for direction of polarization[J]. *Journal of Applied Optics*, 2021, 42(5): 877-883.
- [6] 赵恩好, 王建国, 樊兴涛, 等. 偏振激发能量色散x射线荧光光谱仪在野外矿区现场实验室的应用探讨[J]. *冶金分析*, 2019, 39(4): 31-37.  
ZHAO Enhao, WANG Jianguo, FAN Xingtao, et al. Discussion on the application of polarized excitation energy dispersive X-ray fluorescence spectrometer in field laboratory in field mining areas[J]. *Metallurgical Analysis*, 2019, 39(4): 31-37.
- [7] ZHANG K, ZHANG F, FENG Z. Fusion of panchromatic and multispectral images using multiscale convolution sparse decomposition[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2020, 29(3): 426-439.
- [8] 于洵, 杨烨, 姜旭, 等. 基于偏振光谱成像的目标识别方法研究[J]. *应用光学*, 2016, 37(4): 537-541.  
YU Xun, YANG Ye, JIANG Xu, et al. Recognition of camouflage targets by polarization spectral imaging system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2016, 37(4): 537-541.
- [9] 周浦城, 张洪坤, 薛模根. 基于颜色迁移和聚类分割的偏振图像融合方法[J]. *光子学报*, 2011, 40(1): 149-153.  
ZHOU Pucheng, ZHANG Hongkun, XUE Mogen. Polarization image fusion method based on color transfer and cluster segmentation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(1): 149-153.
- [10] 陈国洋, 吴小俊, 徐天阳. 基于深度学习的无监督红外图像与可见光图像融合算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(4): 151-160.  
CHEN Guoyang, WU Xiaojun, XU Tianyang. Unsupervised infrared image and visible light image fusion algorithm based on deep learning[J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2022, 59(4): 151-160.
- [11] 陈卫, 孙晓兵, 乔延利, 等. 基于FWA的红外偏振图像智能融合方法[J]. *红外与毫米波学报*, 2020, 39(4): 523-532.
- CHEN Wei, SUN Xiaobing, QIAO Yanli, et al. Intelligent fusion method of infrared polarization images based on FWA[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2020, 39(4): 523-532.
- [12] TYO S J, RATLIFF B M, ALENIN A S. Adapting the hsv polarization-color mapping for regions with low irradiance and high polarization[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(20): 4759-4762.
- [13] 徐国明, 袁宏武, 薛模根, 等. 全偏振参量低秩稀疏分解伪彩色图像融合[J]. *系统工程与电子技术*, 2020, 42(11): 2450-2460.  
XU Guoming, YUAN Hongwu, XUE Mogen, et al. Pseudo-color image fusion with low-rank sparse decomposition of full polarization parameters[J]. *Systems Engineering and Electronic Technology*, 2020, 42(11): 2450-2460.
- [14] 张家民, 时东锋, 黄见. 图像融合在偏振关联成像中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(12): 365-371.  
ZHANG Jiamin, SHI Dongfeng, HUANG Jian. Application of image fusion in polarization correlation imaging[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(12): 365-371.
- [15] XU G M, XUE M G, YUAN G L, et al. Polarization image fast fusion method based on online dictionary learning[C]// *International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2013, Imaging Spectrometer Technologies and Applications*. [S.l.]: SPIE, 2013: 89100N.
- [16] 沈薛晨, 刘钧, 高明. 基于小波-Contourlet变换的偏振图像融合算法[J]. *红外技术*, 2020, 42(2): 182-189.  
SHEN Xuechen, LIU Jun, GAO Ming. Polarization image fusion algorithm based on wavelet-contourlet transform[J]. *Infrared Technology*, 2020, 42(2): 182-189.
- [17] 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.  
ZHANG Jingjing, FANG Yonghua. A new algorithm for multi-band polarization image fusion based on visible light[J]. *Acta Optics*, 2008, 28(6): 1067-1072.
- [18] 张玉梅. 全Stokes偏振成像技术的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015: 9-20.  
ZHANG Yumei. Research on full Stokes polarization imaging technology[D]. Nanjing: Nanjing Science and Technology University, 2015: 9-20.
- [19] 李宁馨, 秦朝朝, 于可新. 基于Labview的分振幅激光偏

- 振动态检测研究[J]. 量子电子学报, 2018, 35(4): 408-413.
- LI Ningxin, QIN Chaochao, YU Kexin. Research on dynamic detection of sub-amplitude laser polarization based on Labview[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2018, 35(4): 408-413.
- [20] 王琪, 梁静秋, 梁中翥, 等. 分孔径红外偏振成像仪光学系统设计[J]. 中国光学, 2018, 11(1): 92-99.
- WANG Qi, LIANG Jingqiu, LIANG Zhongzhu, et al. Optical system design of split-aperture infrared polarization imager[J]. China Optics, 2018, 11(1): 92-99.
- [21] PERKINS R, GRUEV V. Signal-to-noise analysis of Stokes parameters in division of focal plane polarimeters[J]. Optics Express, 2010, 18(25): 25815-25824.
- [22] IMAMOGLU N, LIN W, FANG Y. A saliency detection model using low-level features based on wavelet transform[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2013, 15(1): 96-105.
- [23] WOLFF L B, MANCINI T A, POULIQUEN P, et al. Liquid crystal polarization camera[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1997, 13(2): 195-203.
- [24] TYO J S, PUGH E N, Engheta N. Colorimetric representations for use with polarization-difference imaging of objects in scattering media[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1998, 15(2): 367-374.
- [25] 杨振亚, 王勇, 杨振东, 等. RGB颜色空间的矢量-角度距离色差公式[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(6): 154-156.
- YANG Zhenya, WANG Yong, YANG Zhendong, et al. The formula of vector-angle distance color difference in RGB color space[J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(6): 154-156.