

## 融合偏振距离与颜色空间的阴影下目标增强算法

周志强<sup>1</sup>, 王昕<sup>1,2\*</sup>, 杨天<sup>1</sup>, 崔浩<sup>1</sup>, 高隽<sup>1</sup><sup>1</sup>合肥工业大学计算机与信息学院, 安徽 合肥 230601;<sup>2</sup>智能互联系统安徽省实验室, 安徽 合肥 230601

**摘要** 针对阴影造成的低光照、低对比度和高噪声等问题,为提高阴影下目标的检测、识别精度,借鉴生物偏振视觉机理,在偏振距离理论及算法的基础上,提出一种与“色调-饱和度-强度”颜色空间(HSI color space)融合的偏振距离强度(PDI)模型。该模型利用偏振角信息作为估算方式设定阈值范围,将偏振距离信息与原始光强信息融合为新的强度通道,并与原始色调及饱和度信息融合,最终获取PDI模型映射结果。搭建实测实验装置,并开展4组对比实验。结果表明,与其他3种现有目标增强算法相比,所提算法在灰度对比度、信杂比和Fish距离指标上均取得显著提升,能够使阴影下目标与背景间的差异得到明显提高。

**关键词** 图像处理; 偏振成像; 阴影; 偏振距离; 目标增强; 图像融合

中图分类号 O436.3

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221968

## Algorithm of Target Enhancement Under Shadow that Combining Polarization Distance and Color Space

Zhou Zhiqiang<sup>1</sup>, Wang Xin<sup>1,2\*</sup>, Yang Tian<sup>1</sup>, Cui Hao<sup>1</sup>, Gao Jun<sup>1</sup><sup>1</sup>School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei 230601, Anhui, China;<sup>2</sup>Intelligent Interconnected Systems Laboratory of Anhui Province, Hefei 230601, Anhui, China

**Abstract** Aiming at the problems of low light, low contrast, and high noise caused by shadows, a polarization distance intensity (PDI) model fused with the “hue-saturation-intensity” color space (HSI color space) is proposed based on the theory and algorithm of polarization distance using the biological polarization vision mechanism for reference to improve the detection and recognition accuracy of targets under shadows. The model uses the angle of polarization information as the estimation method to set the threshold range, fuse the polarization distance information and the original light intensity information into a new intensity channel, and fuse with the original hue and saturation information to finally obtain the mapping result of the PDI model. The actual measurement experimental device was set up, and four groups of comparative experiments were conducted. Compared to the other three existing target enhancement algorithms, the proposed algorithm achieves significant improvement in gray contrast, signal-to-clutter ratio, and Fish distance indicators, and could improve the difference between the target and the background under shadow significantly.

**Key words** image processing; polarization imaging; shadow; polarization distance; target enhancement; image fusion

## 1 引言

阴影在物体完全或者部分遮挡光源时产生,可分为投射阴影和自阴影两类。投射阴影是光源照射方向上物体在平面上的投射区域,自阴影则是物体未被直接照射区域<sup>[1]</sup>,本实验所涉及阴影均为投射阴影。通常阴影区域比太阳光或其他光源直接照射的区域更

暗,除了强度信息,阴影区域的色调、饱和度属性也可能与光源直接照射的区域不同。阴影的存在会导致区域中目标与背景之间的对比度降低,对目标的检测、识别造成误差<sup>[2-3]</sup>,而传统的图像增强方法在检测阴影区域目标时往往达不到理想效果,因此,有学者研究利用偏振信息处理阴影场景。Lin等<sup>[4]</sup>开展基于偏振信息的阴影分离与对比度提高的研究,针对多个光源下多

收稿日期: 2022-06-30; 修回日期: 2022-07-07; 录用日期: 2022-07-19; 网络首发日期: 2022-07-29

基金项目: 国家自然科学基金(62171178, 61971177, 61801161)、安徽省自然科学基金(1908085QF282)

通信作者: \*wangxin@hfut.edu.cn

重阴影的影响,利用偏振度信息分离重叠阴影、提升对比度。Tyo 等<sup>[5]</sup>提出适用于低光照和高偏振区域的 hue-saturation-value(HSV)颜色空间映射算法,该算法可以在低光照环境下使偏振信号在映射中放大。

偏振作为光的一项基本属性,反映光在传播过程中能量分布的偏向性,利用偏振信息可揭示光强、波长及频率以外的物体特征<sup>[6-8]</sup>。目前,偏振成像已广泛应用于多个领域,如目标探测<sup>[9-10]</sup>、偏振去雾<sup>[11]</sup>、仿生导航<sup>[12]</sup>、去除反光<sup>[13]</sup>、三维重建<sup>[14]</sup>等。人类的视觉系统主要通过光强和颜色来区分不同物体,无法直接感知偏振信息<sup>[15-16]</sup>,因此,如何获取、处理并以适当的方式呈现偏振信息是如今受到广泛关注的研究方向。

与人类不同的是,许多动物的视觉系统对偏振信息格外敏感,例如招潮蟹<sup>[17]</sup>、螳螂虾<sup>[18]</sup>、章鱼<sup>[19]</sup>等等。越来越多的研究发现,大量的海洋生物与陆生生物利用偏振信息来捕猎、交流、寻找栖息地等,而这种将视野中的偏振光模式用于行为反应的能力被称为偏振视觉<sup>[20-21]</sup>。How 等<sup>[22]</sup>基于对生物偏振视觉的研究,类比颜色模型中的“颜色距离”,提出“偏振距离”的概念。在此基础上,Zhong 等<sup>[23]</sup>分析多种形式的偏振距离模型,得出四通道模型能显著提高目标与背景之间对比度的结论。另外,受螳螂虾眼球运动模式的启发,Zhong 等<sup>[24]</sup>又提出一种自适应预处理偏振信息机制,该机制可增强目标与背景之间的对比度,但直接应用到阴影下目标的增强效果不佳。

针对上述问题,本文在偏振信息自适应预处理和四通道偏振距离模型的基础上,结合 HSI 颜色空间<sup>[25-26]</sup>,提出改善的阴影环境下目标增强的偏振距离强度模型,简称 PDI 模型。在 HSI 颜色空间模型的基础上,所提方法保留了饱和度通道和色调通道,同时利用偏振角(AOP)信息作为估算方法设定阈值范围<sup>[5]</sup>,将原始光强信息与偏振距离(PD)信息融合成新的强度通道。设定的阈值范围可以将偏振距离信息中的目标信息单独提取并与原始光强中的背景区域信息融合,并在颜色空间模型中使目标与背景之间的颜色差异得到增强。对比实验结果表明,所建立的 PDI 模型可获得较好的目标增强效果。

## 2 相关理论

### 2.1 斯托克斯偏振成像

通常在描述光的偏振状态时使用 Stokes 矢量,Stokes 矢量可以表示为  $(i, q, u, v)^T$ ,其中,  $i$  为光强,  $q$  和  $u$  分别为两个方向上的线偏振光,  $v$  为圆偏振光,由于自然界中的圆偏振光较少,因此不作考虑,设定  $v = 0$ 。

在研究偏振信息时,通常需要获取 4 个不同方向的包含偏振信息的亮度图像  $i_\theta$ ,  $\theta \in \{0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ\}$ ,方法是将偏振片分别旋转至 4 个参考角度后获取包含偏

振信息的图像,通过这 4 个角度信息来计算线偏振度(DOLP)和 AOP。DOLP 和 AOP 的计算方式如下:

$$i = \frac{1}{2} [i(0^\circ) + i(45^\circ) + i(90^\circ) + i(135^\circ)], \quad (1)$$

$$q = i(0^\circ) - i(90^\circ), \quad (2)$$

$$u = i(45^\circ) - i(135^\circ), \quad (3)$$

$$\begin{cases} d = \frac{\sqrt{q^2 + u^2}}{i} \\ a = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{u}{q}\right) \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $d$  为 DOLP;  $a$  为 AOP。

### 2.2 自适应预处理与四通道模型

当入射光为部分偏振光时,根据生物视觉理论相关研究<sup>[24]</sup>可知,感光细胞  $R$  的偏振灵敏度可用余弦函数  $R(\varphi, d)$  表示:

$$R(\varphi, d) = 1 + \left[ \frac{d(S_p - 1)}{S_p + 1} \right] \cos(2\varphi - 2\varphi_{\max}), \quad (5)$$

式中:  $\varphi$  是相对于参考方向所获取的偏振方向;  $\varphi_{\max}$  是偏振灵敏度  $R(\varphi, d)$  获得最大值时选取的  $\varphi$  值;  $S_p$  是每个光感受器的偏振灵敏度(后续设定  $S_p = 10$ )。如果从静态水平来看,感光细胞  $R$  的偏振灵敏度可以表示为

$$\begin{cases} R_\theta(a, d) = 1 + \left[ \frac{d(S_p - 1)}{S_p + 1} \right] \cos(2a - 2\varphi_\theta) \\ \theta \in \{0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ\} \end{cases}, \quad (6)$$

式中:  $\varphi_\theta$  为感光细胞绒毛取向。自适应处理后偏振灵敏度可表示为

$$\begin{cases} R_\theta(a, d) = 1 + \left[ \frac{d(S_p - 1)}{S_p + 1} \right] \cos[2a - 2(a + \theta)] \\ \theta \in \{0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ\} \end{cases} \quad (7)$$

最后得到感光细胞的偏振光活性值,即 4 个角度的预处理偏振分量  $S_\theta$ ,  $\theta \in \{0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ\}$ :

$$S_\theta = i \cdot R_\theta(a, d). \quad (8)$$

将预处理后 4 个角度的目标和背景的偏振分量分别放入图 1 的仿生四通道模型<sup>[23]</sup>中,其中,目标节点  $P_{10}$  通过对预处理后  $0^\circ$  和  $90^\circ$  这 2 个角度的偏振分量进行对数运算获得作用于下一级节点的信号,节点  $P_{20}$  和  $P_{30}$  的处理方式为将上一级节点传输的信号与各自节点对应的偏振分量进行对数运算,如式(9)所示。背景节点  $P_{1B}$ 、 $P_{2B}$  和  $P_{3B}$  与对应的目标节点处理方式一致,最终将获取的节点信息  $P_{30}$  和  $P_{3B}$  代入式(10)后进行计算得出偏振距离。

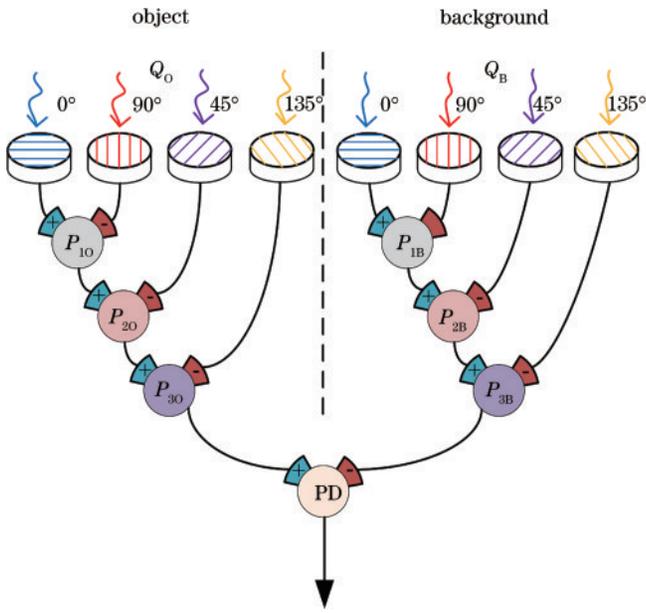


图 1 仿生四通道模型

Fig. 1 Model of a bionic four-channel

$$\begin{cases} P_{10} = \ln(S_0) - \ln(S_{90}) \\ P_{20} = P_{10} - \ln(S_{45}) \\ P_{30} = P_{20} - \ln(S_{135}) \end{cases}, \quad (9)$$

$$D_{PD} = \frac{|P_{30} - P_{3B}|}{2(\ln S_p)}. \quad (10)$$

### 2.3 PDI模型

HSI颜色空间是计算机视觉处理中常见的一种颜色空间,同时研究表明相比于RGB颜色空间,HSI颜色空间更接近人类视觉系统<sup>[27]</sup>。HSI模型如图2(a)所示。从RGB颜色空间向HSI颜色空间的转换如下:

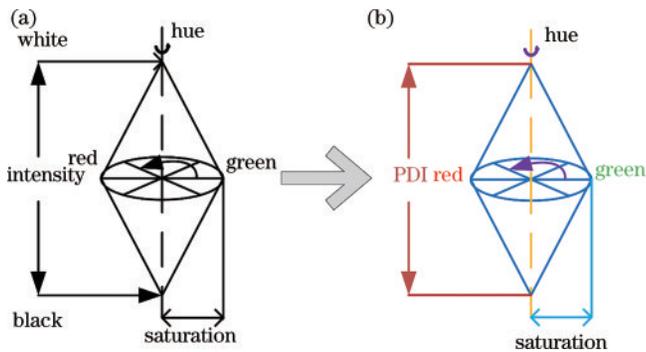


图 2 映射改进方案。(a)HSI模型; (b)PDI模型

Fig. 2 Mapping improvement program. (a) HSI model; (b) PDI model

$$\begin{cases} H = \begin{cases} \theta, & B \leq G \\ 360 - \theta, & B > G \end{cases} \\ S = 1 - \frac{3}{R + G + B} [\min(R + G + B)] \\ I = \frac{1}{3}(R + G + B) \end{cases}, \quad (11)$$

$$\theta = \arccos \left\{ \frac{\frac{1}{2}[(R - G) + (R - B)]}{[(R - G)^2 + (R - B)(G - B)]^{1/2}} \right\}, \quad (12)$$

式中:  $H$ 代表色调;  $S$ 代表饱和度;  $I$ 代表强度;  $R$ 、 $G$ 、 $B$ 分别代表红绿蓝三个颜色通道的信息。以往的偏振信息与HSI颜色空间研究表明,常见的偏振映射<sup>[28]</sup>为

$$\begin{cases} 2a \rightarrow H \\ d \rightarrow S \\ I \rightarrow I \end{cases}. \quad (13)$$

HSI颜色空间另一个优势在于3个量的独立性较高,即改变其中单一量的数值并不会对其他2个量的数值造成影响,只会改变最终3个分量融合的结果。Tyo等在式(13)的基础上将线偏振度信息和光强信息融合成强度通道信息,此方案适用于低光照高偏振度的目标区域。阴影的主要影响是阴影区域的亮度要低于光源直接照射的区域,即强度信息要弱一些,目标与背景之间的对比度较低。偏振距离信息的概念与颜色距离相似,范围从0~1,且偏振信息对于目标与背景之间的对比度提高有着显著效果。本研究在Tyo等的基础上进行改进,对于饱和度通道和色调通道保持不变,但由于改变强度通道对饱和度通道和色调通道不造成影响,因此在强度通道的处理上,将偏振距离信息与强度信息融合,在保留光强信息的同时利用偏振信息在提高目标与背景对比度中的优势进一步提高对比度,光强信息与偏振距离信息融合的结果为PDI,映射方案如图2(b)所示。

### 2.4 图像融合算法

为了将偏振距离信息与光强信息融合达到提高目标与背景之间对比度的目的,设想通过设置特定阈值范围将偏振距离信息中目标信息最大化提取、背景信息用原始光强信息补充,将两者融合成代替强度通道的PDI信息,与色调和饱和度信息融合成最终结果图。相比于自然界中的物体,人造物体在偏振信息方面表现得更为强烈,同时这也是偏振信息在探测、对比度提高等方面体现明显优势的原因。

当DOLP相对于线性斯托克斯矢量的测量不确定度较高时,AOP统计量已被证明很好地近似于高斯分布;而当DOLP接近线性斯托克斯参数的测量不确定度时,AOP上的分布不再很好地近似于高斯分布<sup>[29]</sup>。因此,可利用AOP信息作为一种估算方式<sup>[5]</sup>来进行融合:

$$\Delta = \sqrt{1 - \left\{ E_N[\cos(2a)]^2 + E_N[\sin(2a)]^2 \right\}}, \quad (14)$$

$$\begin{cases} \cos(2a) = \frac{q}{\sqrt{q^2 + u^2}} \\ \sin(2a) = \frac{u}{\sqrt{q^2 + u^2}} \end{cases}, \quad (15)$$

式中： $\Delta$ 值范围为 0~1，不同值获取信息的类型不同； $E_N$ 为期望运算，实际上是对于每个像素点周围一个范围内的点进行估算，本实验  $N$  值取 3，即对每个像素点周围的  $3 \times 3$  窗口内的值进行期望运算。图 3 展示了实验原始图以及阈值范围  $\Delta$  值的实验图。在图 3(b) 中发现，目标飞机模型以及底座颜色黑白相间且轮廓保持

较好，周围环境在颜色方面较黑，阴影区域颜色表现黑色居多且分布较为均匀。由于  $\Delta$  值范围为 0~1，图中颜色越浅即越接近白色时， $\Delta$  值越接近 1；相反，图中颜色越深即越接近黑色时， $\Delta$  值越接近 0。因此，选取合适的阈值范围融合偏振距离信息和光强信息是值得探索的。

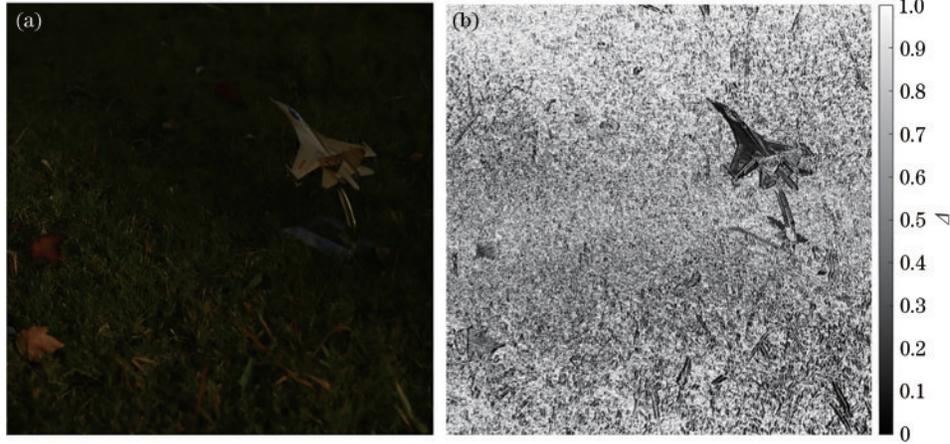


图 3 原始图和阈值范围  $\Delta$  实验图。(a) 原始图；(b) 阈值范围  $\Delta$  实验图

Fig. 3 Original image and experimental image of threshold range  $\Delta$ . (a) Original image; (b) experimental image of threshold range  $\Delta$

### 3 实验与结果分析

#### 3.1 实验场景的建立与图像采集

实验光源采用户外太阳光直接照射，成像设备选用尼康 D850 相机，如图 4 所示。目标与背景的  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  和  $135^\circ$  这 4 个角度的偏振信息通过手动旋转相机前的偏振片获取，实验场地为合肥工业大学翡翠湖校区。



图 4 偏振成像装置

Fig. 4 Polarization imaging device

由于光强较弱，阴影区域会大幅度降低人眼分辨目标和背景的能力，为了更好地说明问题，在选择实验场景或者目标时，要选择目标与背景颜色相近的（在阴影区域通过颜色视觉信息不易直接分辨出目标与背景），同时将曝光时间设置在  $1/800 \sim 1/200$  s 内，感光

度 (ISO) 设置为 ISO-100，共设计 4 组实验来验证所提算法的有效性。

实验场景 1：黄色金属飞机模型与枯黄草地背景。在此场景中，飞机模型与背景颜色相近且飞机模型处于阴影区域中，可见度较低，背景中也存在树叶等其他干扰。

实验场景 2：黑色金属井盖且周围环绕白色水泥与草地背景。在此场景中，由于阴影区域的光强较低且较暗，黑色金属井盖在阴影环境下可见度较低，同时背景中也存在部分树叶与草丛的干扰。

实验场景 3：橡胶材质的蜘蛛模型与草地背景。在此场景中，蜘蛛模型呈黑色，与枯叶颜色相似，具有很强的伪装效果，通过颜色视觉信息很难将蜘蛛与背景区分。

实验场景 4：透明球与草丛灌木背景。在此场景中，透明球放置在灌木丛的阴影处，且透明球部分被草木遮挡，可见度低且不易分辨。

#### 3.2 对比分析指标

在上述 4 个实验场景下收集 4 组实验数据进行对比，分别从主观分析和客观分析两方面对实验结果进行分析与讨论。其中，客观分析指标包括灰度对比度 (GSC)、信杂比 (SCR) 和 Fisher 距离 (FD)。

灰度对比度：计算目标与背景区域之间的平均灰度值。值越大，表示两区域之间的差异性越明显，如下：

$$C_{GSC} = \frac{|\bar{g}_o - \bar{g}_b|}{\bar{g}_o + \bar{g}_b}, \quad (16)$$

式中： $\bar{g}_o$  和  $\bar{g}_b$  分别为目标区域和背景区域的灰度平

均值。

信杂比:用于计算目标信号和杂波信号之间的分离程度。值越大,表示效果越优,如下:

$$R_{SCR} = \frac{|\bar{g}_O - \bar{g}_B|}{\sigma_B}, \quad (17)$$

式中: $\sigma_B$ 为背景区域的标准差。

Fisher距离:在噪声环境下计算目标与背景之间区分程度。如下:

$$D_{FD} = \frac{(\bar{g}_O - \bar{g}_B)^2}{\nu_O + \nu_B}, \quad (18)$$

式中: $\nu_O$ 和 $\nu_B$ 分别为目标和背景区域的方差。

### 3.3 阈值范围判定

为测定适合的阈值范围融合偏振距离信息和光强信息,对不同时间、不同地点的 20 组实验中的目标区域进行均值计算,分别统计每个区间中的实验个数,如图 5 所示。从图 5 可以发现,目标区域的均值多数处于均值较大的范围中,即阈值范围图中的目标区域在多组实验中表现较白,以此选取一个合适的阈值节点来进行融合。例如:在阈值大于 0.3 或者 0.4 时,选取偏振距离信息进行融合可以尽可能满足实验要求。

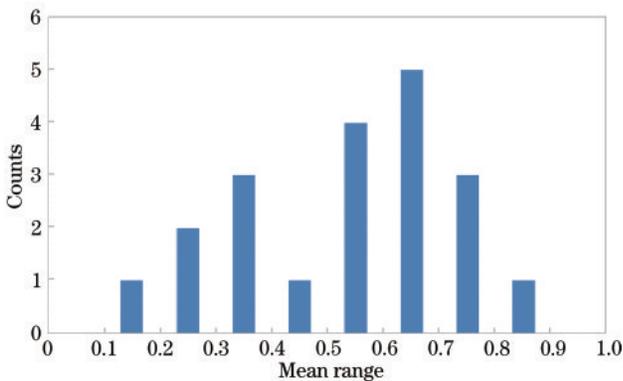


图 5 均值范围统计图

Fig. 5 Statistical chart of mean range

对于第 3.1 节所描述的 4 种实验场景的不同阈值节点分别进行实验统计分析,在阈值 $\Delta$ 范围 0~1 中均匀选取 11 个节点分别计算第 3.2 节中所述的 3 种实验对比指标,如图 6~8 所示。其中,纵坐标所表示的 3 种对比指标结果,均进行了归一化处理。

从图 6~8 可以发现,对于飞机、井盖和蜘蛛实验,阈值节点选择 0.3 均为最优结果,而玻璃球实验的最优节点为 0.6 或 0.7。当节点选择 0.4 时,对于飞机、井盖和蜘蛛的表现稍差,但影响较弱,却可以提高玻璃球实验结果。综合图 5~8 这 4 组实验结果,选择 0.4 作为阈值节点,当 $\Delta$ 值的范围为 $0.4 \leq \Delta \leq 1$ 时,选取偏振距离信息,当 $\Delta$ 值的范围为 $0 \leq \Delta < 0.4$ 时,选取光强信息。

### 3.4 实验结果分析

图 9(a)~(d)和图 9(e)~(h)分别为原始光强图和

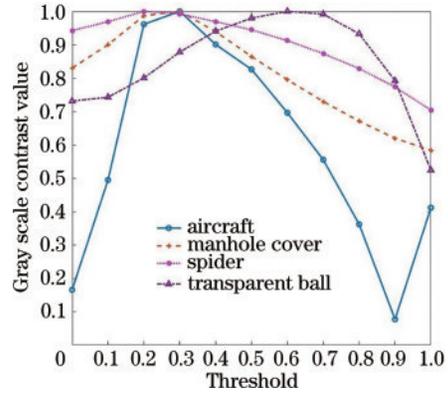


图 6 不同阈值节点的灰度对比度值

Fig. 6 Gray scale contrast value of the different threshold nodes

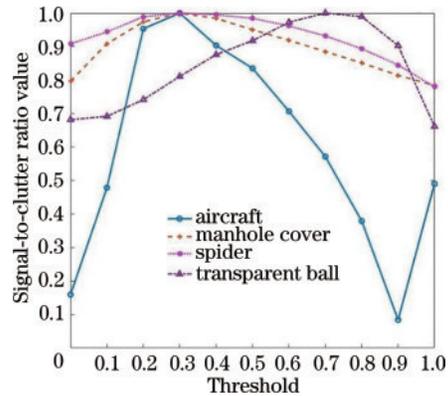


图 7 不同阈值节点的信杂比值

Fig. 7 Signal-to-clutter ratio value of different threshold nodes

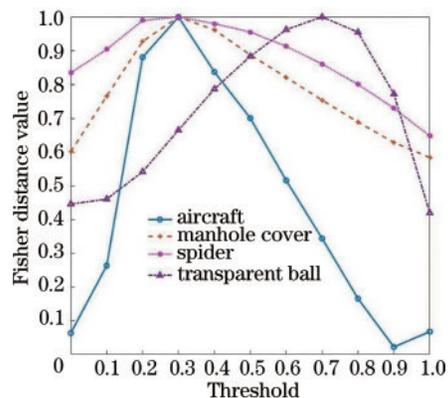


图 8 不同阈值节点的 Fisher 距离值

Fig. 8 Fisher distance value of different threshold nodes

AOP 图像,图 9(i)~(l)为 Lin 等提出的 DOLP 方案实验结果图,图 9(m)~(p)为 Tyo 等提出的低光照高偏振模型下的实验结果图,图 9(q)~(t)为 Zhong 等提出的四通道偏振距离模型下的实验结果图,图 9(u)~(x)为基于 HSI 颜色空间的 PDI 模型下的实验结果图。对于 4 种场景,均将其放置在阴影处,并且在场景 3 和 4 中存在明显的干扰物,因此对于目标与背景之间的区分实验是具有意义的。

从图 9 可以发现:AOP 图像中信息表现较为丰富,场景 1 和 2 中目标与背景之间的区分较为明显,但

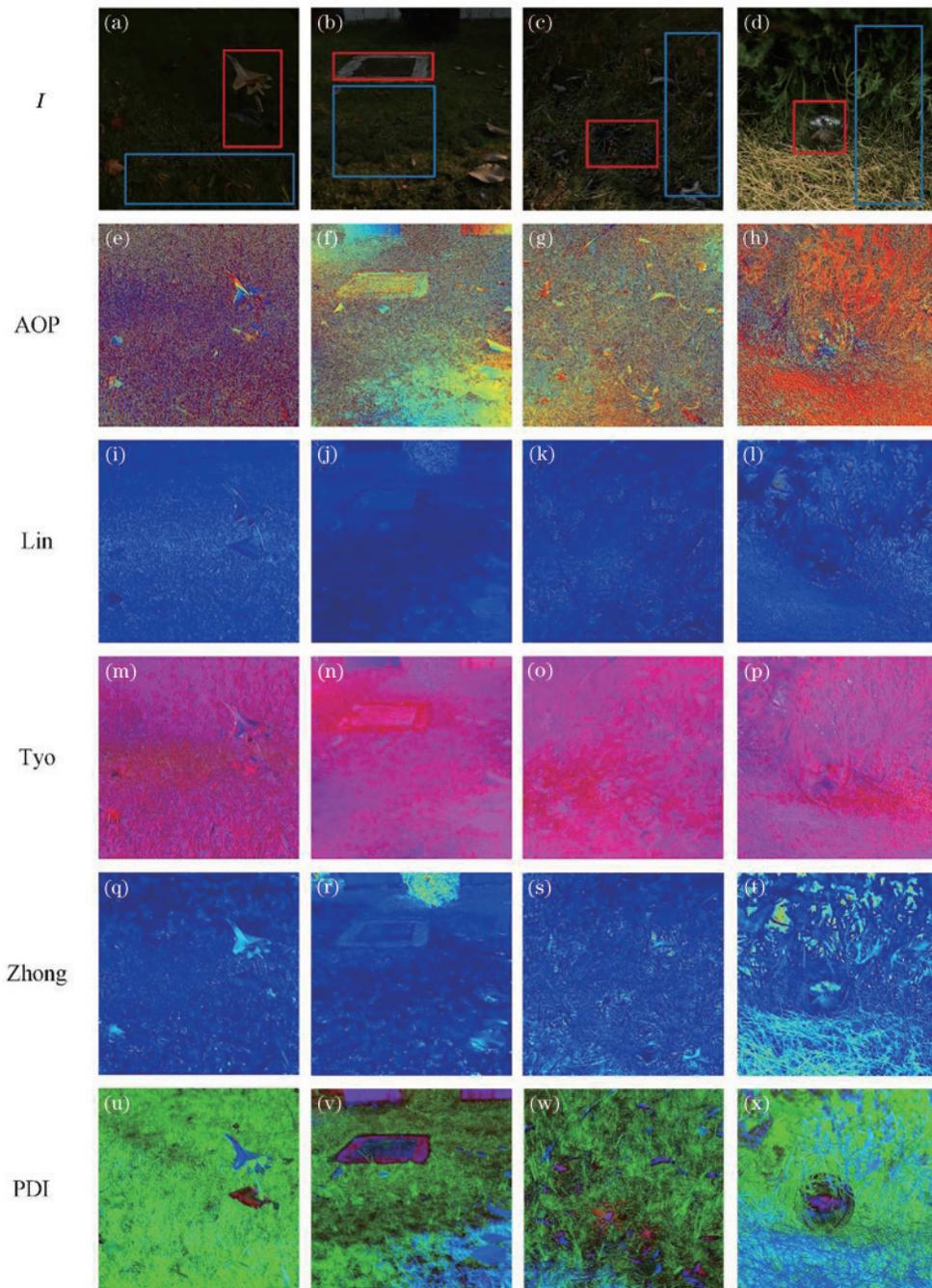


图9 4种实验场景的结果图。(a)~(d)原始光强图;(e)~(h)偏振角实验图;(i)~(l) Lin方案实验图<sup>[4]</sup>, (m)~(p) Tyo方案实验图<sup>[5]</sup>;(q)~(t) Zhong方案实验图<sup>[23]</sup>;(u)~(x) PDI模型实验图

Fig. 9 Graphs of experimental results for four experimental scenarios. (a)–(d) Original light intensity graphs; (e)–(h) experimental graphs of the angle of polarization; (i)–(l) experimental graphs of Lin’s scheme<sup>[4]</sup>; (m)–(p) experimental graphs of Tyo’s scheme<sup>[5]</sup>; (q)–(t) experimental graphs of Zhong’s scheme<sup>[23]</sup>; (u)–(x) experimental graphs of the PDI model in this paper

对于更为复杂的场景3和4,仅隐约看见目标轮廓,人眼难以进行准确识别;Lin等提出的方案中,DOLP信息对于目标轮廓的保留表现良好,但目标的纹理信息难以体现,同时从场景4可以看出透明球几乎被灌木所遮挡,难以分辨;Tyo等提出的模型中,场景1和2中目标轮廓和纹理表现良好,但场景3和4中目标几乎湮没在背景中,同时实验结果整体表现出粗糙感,由于此模型适用于高偏振环境,而场景3和4中目标与背景的偏振信息相似,导致DOLP与AOP信息表现较差,故

实验整体效果不佳;Zhong等提出的偏振距离模型中,目标与背景的分效果要优于上述3种实验结果,偏振距离信息对于目标的轮廓以及纹理信息表现突出、易于区分,但偏振距离信息在目标与背景的轮廓和纹理均相似的情况下,难以快速准确区分,例如场景3中的蜘蛛目标,蜘蛛的腿部与背景中的草丛纹理和轮廓在偏振距离信息中表现得极其相似,尤其是较小的蜘蛛模型表现的偏振距离信息与草丛几乎一样,难以分辨;所提模型中的目标与背景易于区分,较好保留了目

标和背景的轮廓以及纹理信息,同时目标与背景之间具有明显区分度,例如场景 3 的蜘蛛和场景 4 的透明球,蜘蛛的腿部关节以及弯曲情况呈现效果良好、易于分辨,在透明球实验中,相比于前 4 种方法,所提模型更能体现球体的轮廓,同时在原始图中被灌木遮挡而处于黑暗中的球体部分也可清晰观察。综合上述分

析,所提模型处理结果在主观评价上表现出更优的目标显著性。

利用灰度对比度、信杂比和 Fisher 距离这 3 种衡量指标来定量比较目标与背景之间的对比度差异。表 1~3 分别列举 3 种衡量指标在 4 种场景下的原始光强图像和 4 种模型的实验数据。

表 1 多场景下灰度对比度值

Table 1 Gray scale contrast value in multiple scenes

Serial number	Target	$I$	AOP	Lin	Tyo	Zhong	PDI
Experiment one	Aircraft	0.0868	0.0459	0.0992	0.0206	<b>0.2223</b>	0.1139
Experiment two	Manhole cover	0.1115	0.0287	0.1376	0.0509	0.2474	<b>0.2899</b>
Experiment three	Spider	0.0028	0.0062	<b>0.1912</b>	0.0066	0.1569	0.0958
Experiment four	Transparent ball	0.2339	0.1077	0.1923	0.0955	0.0759	<b>0.2594</b>

表 2 多场景下信杂比值

Table 2 Signal-to-clutter ratio value in multiple scenes

Serial number	Target	$I$	AOP	Lin	Tyo	Zhong	PDI
Experiment one	Aircraft	0.4454	0.1261	0.2931	0.1019	0.6683	<b>1.0503</b>
Experiment two	Manhole cover	0.5117	0.1115	0.4869	0.0898	0.6749	<b>1.3773</b>
Experiment three	Spider	0.0106	0.0242	0.4331	0.0438	0.3721	<b>0.4789</b>
Experiment four	Transparent ball	0.8350	0.5451	0.3376	0.7102	0.1859	<b>2.5167</b>

表 3 多场景下 Fisher 距离值

Table 3 Fisher distance value in multiple scenes

Serial number	Target	$I$	AOP	Lin	Tyo	Zhong	PDI
Experiment one	Aircraft	0.0386	0.0082	0.0288	0.0215	0.1247	<b>0.3551</b>
Experiment two	Manhole cover	0.1025	0.0077	0.0919	0.0047	0.2067	<b>2.6003</b>
Experiment three	Spider	0.0004	0.0003	0.0626	0.0008	0.0557	<b>0.0752</b>
Experiment four	Transparent ball	0.2069	0.1165	0.0766	0.1959	0.0190	<b>2.1592</b>

从表 1 可以看出,原始光强、AOP、Lin 等提出的方案和 Tyo 等提出的方案图像总体效果较差。在实验 2 与实验 4 中,所提 PDI 模型在灰度对比值对照实验中表现最优,同时实验 1 和实验 3 中 PDI 模型效果较差。从图 9 可以看出,在选取飞机和蜘蛛目标时会选取部分背景信息,PDI 模型中背景绝大部分选用原始光强信息,这可能是造成实验数据并非最优的原因。整体数据显示,所提模型效果良好。从表 2 数据可以看出,除实验 2 以外,其余 3 组实验中 AOP、Lin 等提出的模型和 Tyo 等提出的模型实验数据与原始光强数据相比均为负提升,而所提 PDI 模型数据的 4 组实验均有明显提升,相对于 Zhong 等提出的偏振距离模型提升 28.7% 以上。从表 3 数据可以看出,所提 PDI 模型相比于其余 4 种方案提升效果明显,相对于 4 种方案中表现较优的偏振距离模型,所提模型效果最高提升近 12.6 倍。

## 4 结 论

针对阴影环境下目标存在检测与识别困难的问题,提出一种融合偏振距离信息和原始光强信息的

PDI 模型。利用阈值范围信息将偏振距离信息中的目标区域与原始光强信息中背景区域单独提取并融合成新的强度通道信息,与原始饱和度、色调信息进一步融合获取目标增强图像,共设计 4 种实验场景,将金属飞机模型、金属井盖、橡胶蜘蛛模型和透明球等 4 种实验目标分别放置于不同阴影环境中,通过实验对比,所提 PDI 模型相较于 AOP、Lin 等提出的模型、Tyo 等提出的模型和 Zhong 等提出的偏振距离模型能够清晰保留目标轮廓和纹理信息,目标与背景之间区分更为明显,易于目标物体的识别,且灰度对比度、信杂比和 Fisher 距离这 3 种衡量指标也同样显示出所提 PDI 模型提升效果显著,相比于次优的偏振距离模型,所提算法提升 28.7% 以上,最高提升近 12.6 倍。

## 参 考 文 献

- [1] Shahtahmassebi A R, Yang N, Wang K, et al. Review of shadow detection and de-shadowing methods in remote sensing[J]. Chinese Geographical Science, 2013, 23(4): 403-420.
- [2] Ibrahim I, Yuen P W, Hong K, et al. Illumination invariance and shadow compensation via spectro-

- polarimetry technique[J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(10): 107004.
- [3] Reda M, Shen L H, Zhao Y Q. Image enhancement of shadow region based on polarization imaging[M]//Lin Z C, Wang L, Yang J, et al. *Pattern recognition and computer vision. Lecture notes in computer science*. Cham: Springer, 2019, 11858: 736-748.
- [4] Lin S S, Yemelyanov K M, Pugh E N, Jr, et al. Separation and contrast enhancement of overlapping cast shadow components using polarization[J]. *Optics Express*, 2006, 14(16): 7099-7108.
- [5] Tyo J S, 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.
- [6] 尹佳琪, 王世勇, 李范鸣. 基于改进主成分分析的分焦平面偏振图像去噪算法[J]. *光学学报*, 2021, 41(7): 0710002.  
Yin J Q, Wang S Y, Li F M. Division-of-focal-plane polarization image denoising algorithm based on improved principal component analysis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(7): 0710002.
- [7] Wang H, Hu H F, Li X B, et al. An angle of polarization (AoP) visualization method for DoFP polarization image sensors based on three dimensional HSI color space[J]. *Sensors*, 2019, 19(7): 1713.
- [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): 5453-5469.
- [9] 朱鹤筹, 曲宏松. 海面背景耀光的自适应抑制系统[J]. *光学学报*, 2022, 42(12): 1201006.  
Zhu H Q, Qu H S. Adaptive suppression system of sea background flare[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(12): 1201006.
- [10] 刘飞, 孙少杰, 韩平丽, 等. 水下偏振成像技术研究及进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(6): 0600001.  
Liu F, Sun S J, Han P L, et al. Development of underwater polarization imaging technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(6): 0600001.
- [11] Zhang W F, Liang J, Ren L Y, et al. Fast polarimetric dehazing method for visibility enhancement in HSI colour space[J]. *Journal of Optics*, 2017, 19(9): 095606.
- [12] 厉祥, 张然, 路淑芳, 等. 基于米散射蒙特卡罗法的紫外偏振透云研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(17): 1701001.  
Li X, Zhang R, Lu S F, et al. Ultraviolet polarization employing Mie scattering Monte-Carlo method for cloud-based navigation[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(17): 1701001.
- [13] Pang Y X, Yuan M K, Fu Q, et al. Progressive polarization based reflection removal via realistic training data generation[J]. *Pattern Recognition*, 2022, 124: 108497.
- [14] Liang J, Tian X B, Tu X Z, et al. Color full stokes polarization fringe projection 3D imaging[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 130: 106088.
- [15] Zhao Y, Zhang L, Zhang D, et al. Object separation by polarimetric and spectral imagery fusion[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2009, 113(8): 855-866.
- [16] Kruse A W, Alenin A S, Vaughn I J, et al. Overview of visualization strategies for polarimetric imaging data[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10655: 106550S.
- [17] How M J, Christy J H, Temple S E, et al. Target detection is enhanced by polarization vision in a fiddler crab[J]. *Current Biology*, 2015, 25(23): 3069-3073.
- [18] Thoen H H, How M J, Chiou T H, et al. A different form of color vision in mantis shrimp[J]. *Science*, 2014, 343(6169): 411-413.
- [19] Momeni M, Titus A H. An analog VLSI chip emulating polarization vision of octopus retina[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2006, 17(1): 222-232.
- [20] Heinze S. Polarization vision[M]//Jaeger D, Jung R. *Encyclopedia of computational neuroscience*. New York: Springer, 2014: 1-30.
- [21] Foster J J, Temple S E, How M J, et al. Polarisation vision: overcoming challenges of working with a property of light we barely see[J]. *The Science of Nature*, 2018, 105(3): 27.
- [22] How M J, Marshall N J. Polarization distance: a framework for modelling object detection by polarization vision systems[J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2013, 281(1776): 20131632.
- [23] Zhong B B, Wang X, Wang D Q, et al. Target-background contrast enhancement based on a multi-channel polarization distance model[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2021, 16(4): 046009.
- [24] Zhong B B, Wang X, Gan X, et al. A biomimetic model of adaptive contrast vision enhancement from mantis shrimp[J]. *Sensors*, 2020, 20(16): 4588.
- [25] Ibraheem N A, Hasan M M, Khan R Z, et al. Understanding color models: a review[J]. *ARPN Journal of Science and Technology*, 2012, 2(3): 265-275.
- [26] 宫剑, 吕俊伟, 刘亮. 基于颜色空间融合与上下文显著性的红外偏振图像目标增强[J]. *光学学报*, 2019, 39(10): 1001002.  
Gong J, Lü J W, Liu L. Target enhancement of infrared polarization image based on color space fusion and context-aware saliency[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(10): 1001002.
- [27] 曹红燕, 刘长明, 沈小林, 等. 基于自适应阈值和局部色调映射的低照度图像处理[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(4): 0410017.  
Cao H Y, Liu C M, Shen X L, et al. Low illumination image processing based on adaptive threshold and local tone mapping[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(4): 0410017.
- [28] 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.
- [29] Kupinski M, Chipman R, Clarkson E. Relating the statistics of the angle of linear polarization to measurement uncertainty of the Stokes vector[J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(11): 113108.