

汗潜指纹紫外偏振反射特性研究 (特约)

王 峰^{1,2}, 贾 榕^{1,2*}, 刘 晓^{1,2}, 翟 昊^{1,2}, 王孙晨^{1,2}, 吴云智^{1,2}

1. 中国人民解放军陆军炮兵防空兵学院 信息工程系, 安徽合肥 230031;
2. 偏振光成像探测技术安徽省重点实验室, 安徽合肥 230031)

摘 要: 汗潜指纹是犯罪现场最常见的指印类型, 具有特征消失快且不易被检测等特点。根据其特点, 使用紫外偏振成像探测技术进行目标检测, 相比传统强度图像, 偏振参量图像可以提高目标对比度, 有助于辨别不同背景中的目标。但紫外偏振成像探测技术对角度、波段及客体材料等较为敏感, 所以通过设计合理的实验, 分析了汗潜指纹紫外偏振反射特性随角度、波段及客体材料的变化特点。结果表明: 汗潜指纹在不同角度下表现出规律的偏振特性; 在系统提供的四个光谱偏振通道中, 近紫外波段相比之下有很好的可重复性和区分性; 不同客体材料偏振特性差异变化较大, 对比分析样本的紫外偏振反射特性能有效提高潜指纹的探测和识别性能, 为汗潜指纹紫外偏振成像探测技术提供依据。

关键词: 汗潜指纹; 紫外偏振; 偏振参量; 偏振反射特性; 偏振成像探测

中图分类号: O436.3 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20201011

Study on UV polarization reflection characteristics of sweat latent fingerprints(*Invited*)

Wang Feng^{1,2}, Jia Rong^{1,2*}, Liu Xiao^{1,2}, Zhai Hao^{1,2}, Wang Sunchen^{1,2}, Wu Yunzhi^{1,2}

- (1. Department of Information Engineering, Chinese Academy of People's Liberation Army Artillery Air Defense Academy, Hefei 230031, China;

2. Key Laboratory of Polarized Light Imaging Detection Technology in Anhui Province, Hefei 230031, China)

Abstract: Sweat latent fingerprint was the most common type of fingerprint on crime scenes, featuring features that disappeared quickly and were not easily detected. According to its characteristics, the UV polarization imaging detection technology was used for target detection. Compared with the traditional intensity image, the polarization parameter image could improve the target contrast and help to distinguish the targets in different backgrounds. However, the UV polarization imaging detection technology was sensitive to angles, bands and guest materials. Therefore, through the design of reasonable experiments, the characteristics of the UV polarization reflection characteristics of the sweat latent fingerprints with angle, band and guest materials were analyzed. The results show that the sweat latent fingerprints exhibited regular polarization characteristics at different angles; among the four spectral polarization channels provided by the system, the near-ultraviolet bands are well reproducible and distinguishable; the polarization characteristics of different guest materials varied greatly. The UV-polarized reflection characteristics of the comparative analysis samples effectively improved the detection and recognition performance of latent fingerprints, and provided a basis for the UV-polarized imaging detection technology of sweat latent fingerprints.

Key words: sweat latent fingerprint; UV polarization; polarization parameter; polarization reflection characteristics; polarization imaging detection

收稿日期: 2020-03-05; 修订日期: 2020-04-20

作者简介: 王峰 (1972-), 男, 教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事新型光电成像探测技术方面的研究。Email: wfssky@sina.com

通讯作者: 贾榕 (1994-), 男, 硕士生, 主要从事偏振成像探测技术方面的研究。Email: jr2803114834@163.com

0 引言

汗潜指纹是目前为止最常见也是中最早应用于指纹识别技术的一类指纹,汗潜指纹的显现已成为刑事侦查中重要的环节。指纹研究人员应用光学(如光谱成像^[1])、物理学(如粉末法^[2])、化学(如茚三酮^[3])等多学科知识来显现汗潜指纹。在大多数技术中,是将各种异物引入进行标记来增强指纹显现,涉及使用这些材料的化学或物理过程可能会降低或损坏指纹,此外,使用这些材料可能会妨碍对同一样品的进一步法医检验。研究表明,任何物体表面产生反射光的时候会携带物体表面特性所决定的偏振信息,它们的光谱偏振信息是其表面固有的性质。偏振光成像技术不仅可以获取目标强度和光谱的信息,还可以获得一些可以反映目标的细节特征的偏振信息,如偏振度和偏振角等,通过这些信息的获取可以提高现场潜指纹检测与识别准确度^[4]。

国外对汗潜指纹等目标的偏振成像检测研究较早,2006年美国宾夕法尼亚大学的Lin提出了基于偏振特性的非接触式汗潜指纹显现方法,实现了现场汗潜指纹的有效成像与图像恢复^[5];2015年韩国汉阳大学的An I设计使用椭圆偏仪对汗潜指纹进行成像检测^[6],获取了多种材料的汗潜指纹图像并验证了该方法可以对摩擦拭过后的指纹仍能清晰成像;然而国内对偏振成像技术起步较晚,但近年来也有少数学者对汗潜指纹偏振成像进行了研究,2014年安徽省偏振光成像探测技术安徽省重点实验的韩裕生使用主动偏振光对汗潜指纹实现偏振成像检测,得到了图像质量较好的汗潜指纹偏振参量^[7];2018年中国科技大学的张磊设计了主动光源的潜指纹检测系统,使用潜指纹的偏振图像与强度图像融合进行指纹检测^[8]。但是以上的研究多是围绕偏振成像获取图像及图像清晰度的提升,而缺乏从本质上分析汗潜指纹的偏振反射特性。

为了定量描述汗潜指纹在不同探测环境下的紫外偏振反射特性,文中采用紫外偏振成像探测系统,通过多角度光谱偏振反射测量架获取了稳定的偏振信息,对比分析了汗潜指纹紫外偏振反射特性随角度、波段及客体材料变化的特点,获取的紫外偏振反射特性为紫外偏振成像探测提供更多的光学信息。

1 基本原理

1.1 偏振成像探测的基本原理

在通常情况下,偏振特性用斯托克斯向量和 Mueller 矩阵表述。在自然条件下,目标的偏振特性研究主要从测量辐射光的斯托克斯向量入手,通常把斯托克斯向量 $[S_0, S_1, S_2, S_3]^T$ 写成 $[I, Q, U, V]^T$ 。其中, I 为非偏振光强度; Q 和 U 分别代表两个方向上的线偏振度; V 代表圆偏振度^[9]。

斯托克斯向量 (I, Q, U, V) 具有强度的量纲,可以使用光电的方法进行测量。假设来自目标的辐射偏振态的 Stokes 参量为 $S_i = [I_i, Q_i, U_i, V_i]^T$,线性偏振器件(透射方向为 θ)的 Mueller 矩阵 M_α ,出射光偏振态的斯托克斯参量为 $S_o = [I_o, Q_o, U_o, V_o]^T$,则有^[10]:

$$S_o = \begin{bmatrix} I_o \\ Q_o \\ U_o \\ V_o \end{bmatrix} = M_\alpha S_i = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ \cos 2\theta & \cos^2 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta & 0 \\ \sin 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta & \sin^2 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_i \\ Q_i \\ U_i \\ V_i \end{bmatrix} \quad (1)$$

由于自然地物辐射偏振态 V 分量都极其微小,一般计算中认为其为0,则有:

$$I_{(\alpha)} = \frac{1}{2} [I + Q \cos(2\alpha) + U \sin(2\alpha)] \quad (2)$$

式中: α 是偏振器件法线与参考坐标轴的夹角。线偏振度DOLP和偏振角AOP分别为:

$$DOLP = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} \quad (3)$$

$$AOP = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{U}{Q}\right) \quad (4)$$

如果只要求获得入射光线偏振态的 Stokes 参量,则需在取的三个角度位置上进行测量。当选取的 α 分别为 0° 、 60° 和 120° ,根据公式(1)可以计算得到来自目标光波的 Stokes 参量数据,可得目标 Stokes 参量:

$$\begin{cases} I_i = \frac{2}{3}(I_o(0^\circ) + I_o(60^\circ) + I_o(120^\circ)) \\ Q_i = \frac{2}{3}(2I_o(0^\circ) - I_o(60^\circ) - I_o(120^\circ)) \\ U_i = \frac{2}{\sqrt{3}}(I_o(60^\circ) - I_o(120^\circ)) \end{cases} \quad (5)$$

根据斯托克斯矢量以及线偏振度的定义,令 $P_i = \text{DOLP}$, 可以计算出电矢量在 x 轴方向上的分量 E_x 、在 y 轴方向上的分量 E_y 以及二者之差 $E_x - E_y$ ^[11]:

$$\begin{cases} E_x = a_x \cos(\tau + \varphi_x) \\ E_y = a_y \cos(\tau + \varphi_y) \\ E_x - E_y = a_x \cos(\tau + \varphi_x) - a_y \cos(\tau + \varphi_y) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\tau = \omega t - \frac{2\pi}{\lambda}Z$; a_x 、 a_y 分别为偏振光 x 、 y 振动分量的振幅; φ_x 、 φ_y 分别为偏振光 x 、 y 振动分量的相位。

根据上面的公式可以计算出差分信息 PDI:

$$\text{PDI} = I_{\max} + I_{\min} = \frac{(1 + P_i) * I_i}{2} - \frac{(1 - P_i) * I_i}{2} \quad (7)$$

根据公式 (3)~(7), 可以得到被测目标的 I 、 Q 、 U 、 DOLP 、 AOP 、 E_x 、 E_y 、 $E_x - E_y$ 和 PDI 等多偏振参量图像。

1.2 偏振二向分布函数

目标的光学散射特性在光学领域有重要的作用, 目标材料、表面结构决定在空间的反射分布函数特性及光谱反射特性和偏振反射特性^[12]。偏振光谱二向反射函数 (PBRDF) 在描述物体对光束偏振态的变换作用的同时还包含光强度的空间分布信息, 使用该函数表示物体表面的光散射情况更加全面准确。PBRDF 可以表示为:

$$f_r(\theta_i, \theta_r, \phi, \lambda) = \frac{dL_r(\theta_i, \theta_r, \phi)}{dE_i(\theta_i, \phi)} \quad (8)$$

式中: λ 为波长; $dL_r(\theta_i, \theta_r, \phi)$ 为目标出射方向的辐射亮度; $dE_i(\theta_i, \phi)$ 为入射光入射到目标表面的辐照度; θ_i 、 θ_r 分别表示入射角和探测角; ϕ 表示方位角。

文中通过设置不同探测波长 λ 、入射角 θ_i 、探测角 θ_r 及方位角 ϕ 等条件, 测量目标的偏振度和偏振角等多个偏振参量的光谱强度来实现目标偏振反射特性的研究, 如图 1 所示。

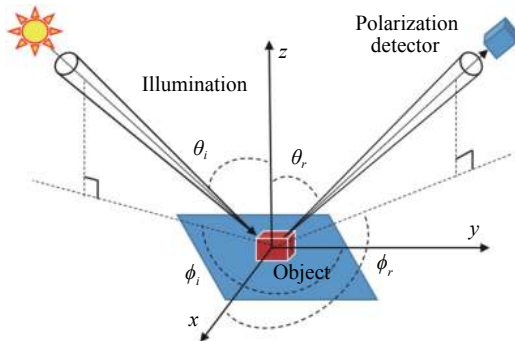


图 1 PBRDF 几何关系图

Fig.1 PBRDF geometric relationship diagram

2 实验及偏振反射特性分析

2.1 紫外偏振反射特性实验

2.1.1 实验方法

实验流程图如图 2 所示。实验使用主动紫外偏振成像探测系统进行数据采集, 首先调整光源入射角 θ_i 和成像系统探测角 θ_r , 入射角 θ_i 范围为 $20^\circ \sim 70^\circ$, 探测角 θ_r 范围为 $20^\circ \sim 70^\circ$, 角度间隔为 10° ; 入射光线的方位角 ϕ_i 固定为 180° , 反射光线的方位角 ϕ_r 分别设定为 $0^\circ \sim 180^\circ$, 间隔为 30° ; 然后调整滤光片转轮模块和偏振片滑动模块, 设置不同的探测波段, 采集汗潜指纹 0° 、 60° 和 120° 的偏振图像; 最后解析每组样本的 I 、 Q 、 U 、 DOLP 、 AOP 、 E_x 、 E_y 、 $E_x - E_y$ 和 PDI 等多参量偏振图像, 绘制目标偏振反射特性变化曲线。分析实验数据可以看出, 当反射光的方位角 ϕ_r 为 90° 时, 目标起偏效果最好, 所以下面的研究主要考虑反射光线

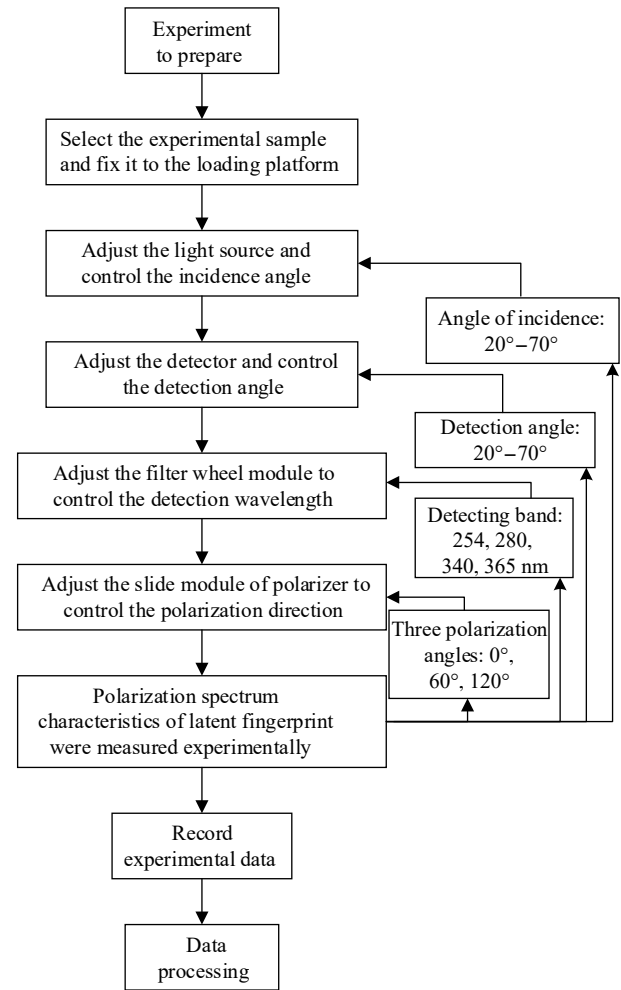


图 2 实验流程图

Fig.2 Experimental flow chart

方位角为 90°的情况。

2.1.2 实验设备及样品

文中使用的是一套分时型紫外偏振成像系统^[13], 系统实物图如图 3 所示。

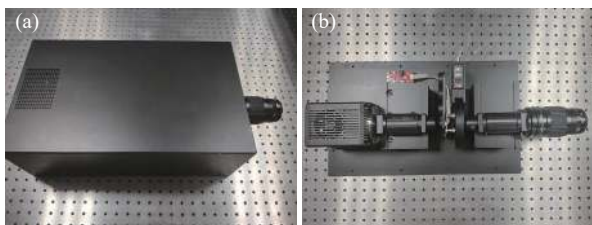


图 3 紫外偏振成像探测系统: (a) 外观图; (b) 俯视图

Fig.3 UV polarization imaging detection system: (a) Appearance; (b) Top view

该成像系统是由紫外镜头、消色差透镜组、偏振片滑动模块、滤光片转轮模块和探测器等部件组成,

有效工作波段为 210~400 nm, 系统分辨率为 2 048 pixel×2 040 pixel, 系统焦距为 78 mm, 系统功耗≤66 W, 光谱切换速度为≤0.5 s。

实验选用氙灯光源作为主动光源实物图如图 4 所示, 光源参数如表 1 所示。



图 4 氙灯光源: (a) 实物图; (b) 光斑

Fig.4 Xenon light source: (a) Physical map; (b) Spot

表 1 氙灯光源的性能指标

Tab.1 Xenon light source performance indicators

| Power/W | Current/A | Voltage/V | Spectral range/nm | Parallel spot diameter/mm | Degree of instability |
|---------|-----------|-----------|-------------------|---------------------------|-----------------------|
| 500 | 26 | 20 | 250-2 500 | 46 | ≤1% |

在实验样品中, 样品 A 是玻璃镜面, 样品 B 是金属漆板, 样品 C 是瓷砖, 样品 D 是塑料板, 样品 E 是凸版纸, 样品 F 是打印纸。实验目标是在样品上残留

的汗潜指纹, 汗潜指纹是将手洗净后, 戴上乳胶手套等待 10 min 后, 手指在客体材料的表面适度按捺形成的, 指纹尺寸为 3 cm×3 cm。如图 5 所示。

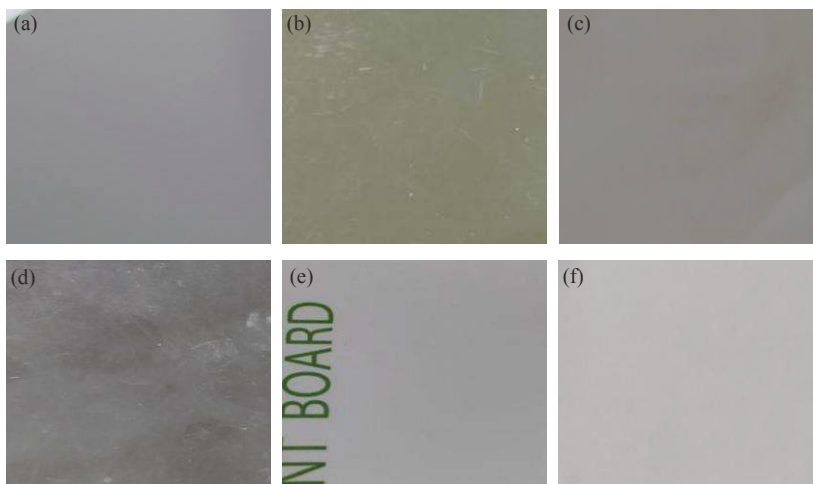


图 5 指纹样本: (a) 玻璃镜面; (b) 金属漆板; (c) 瓷砖; (d) 塑料板; (e) 凸纸板; (f) 打印纸

Fig.5 Fingerprint samples: (a)Glass mirror; (b) Metallic lacquered board; (c) Ceramic tile; (d) Plastic plate; (e) Convex paperboard; (f) Printing paper

2.1.3 实验数据结果

实验采用 3 次测量结果取平均作为每组数据的

最终结果, 下面选取一组样品 A 上汗潜指纹作为实例, 对目标板上的汗潜指纹进行偏振成像, 设置紫外

偏振成像探测系统, 获取三个方向的偏振图像, 应用公式 (4)、(5)、(6)、(8) 和 (9) 进一步解析多偏振参量, 图 6 为汗潜指纹偏振参量解析图对比。

实验结果表明, 对偏振图像进行多偏振参量解析, 综合了大量的图像信息, 偏振参量 S_0 、 S_1 和

$E_x - E_y$ 主要集中了亮度信息, 而 E_y 和 DOLP 图像包含了丰富的细节信息, 指纹的整体轮廓在客体背景下清晰凸显。所以对比分析各个偏振参量图像, 改变探测条件, 找到汗潜指纹偏振信息的变化规律, 有利于分析汗潜指纹的表面属性及汗潜指纹的检测。

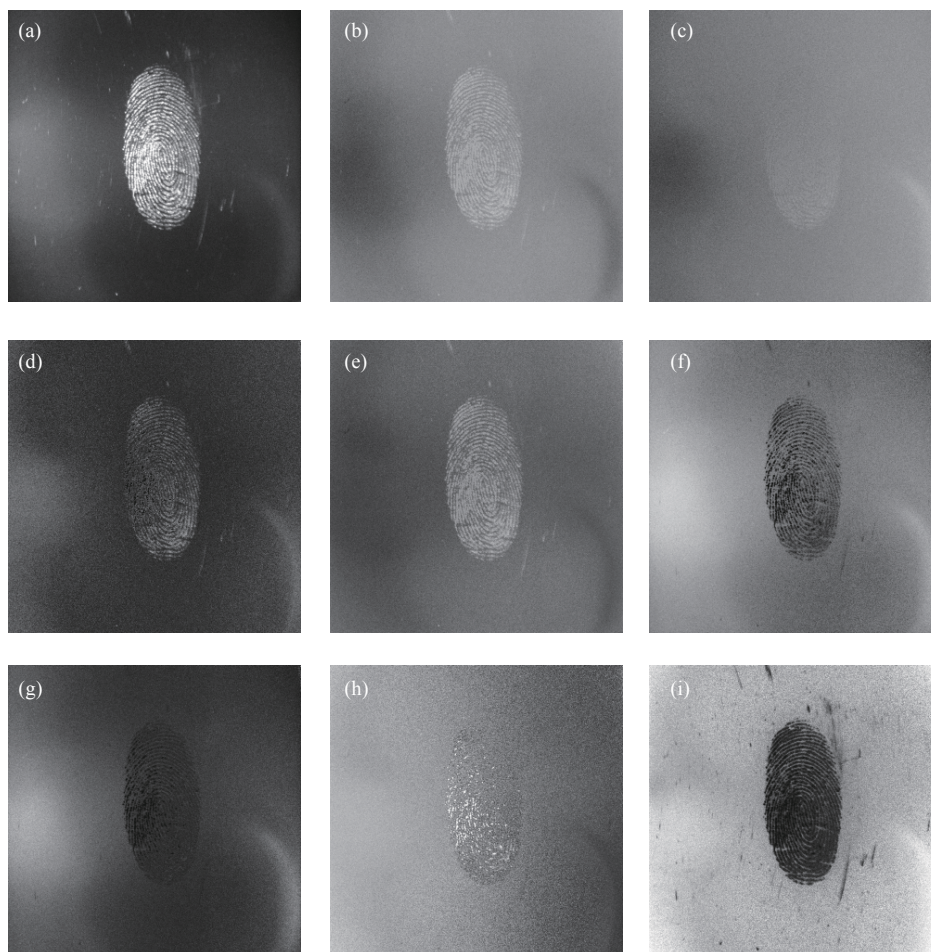


图 6 汗潜指纹偏振参量解析图:(a) S_0 图; (b) S_1 图; (c) S_2 图; (d) E_x 图; (e) $E_x - E_y$ 图; (f) E_y 图; (g) PDI 图; (h) AOP 图; (i) DOLP 图

Fig.6 Sweat latent fingerprint polarization parameter analysis: (a) S_0 map; (b) S_1 map; (c) S_2 map; (d) E_x map; (e) $E_x - E_y$ graph; (f) E_y map; (g) PDI map; (h) AOP map; (i) DOLP map

2.2 紫外偏振反射特性分析

2.2.1 汗潜指纹紫外偏振反射特性多角度分析

当手指压在一个物体表面时, 只有极少数的指纹沉淀物被留在物体的表面上, 而其中 99% 的成分是水, 水很快蒸发留下沉淀物的微观图, 其中一半的成分是无机物, 如氯化钠、氯化钾、氯化钙、钙盐等, 这些物质对于指纹检测是无效的, 剩下的一半是复杂的有机成分, 如油脂、氨基酸、维生素等^[4]。

通过折反射率数据库信息可以找到汗潜指纹的反射率以及布儒斯特角^[15], 如图 7 和表 2 所示。由反

射光的偏振特性分析可知, 反射光偏振特性在入射角 θ_r 取目标的布儒斯特角值时最强, 此时, 观测角 θ_r 与入射角 θ_i 相等, 成像系统接收的偏振特性最大。总之, 角度的选取与成像系统接收的偏振特性密切相关。

由测得的数据可以验证, 汗潜指纹的偏振参量随角度改变变化较大。根据入射角和探测角的组合, 计算出汗潜指纹不同偏振参量, 图 8 为汗潜指纹多角度下的偏振参量变化曲线。

从图 8 可以看出, 相同探测条件下: (1) 汗潜指纹偏振参量 S_0 、 S_1 、 E_x 、 $E_x - E_y$ 、PDI 和 DOLP 随角度改

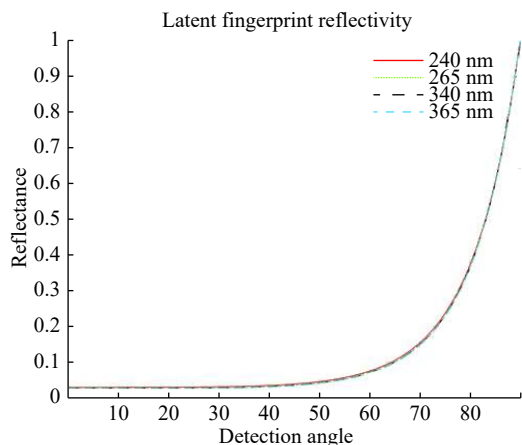


图 7 汗潜指纹反射率曲线

Fig.7 Sweat latent fingerprint reflectance curve

变起伏变化较大,在成像检测时受角度影响较明显,找到其特征角度利于汗潜指纹的检测;

(2)当探测角不变时,汗潜指纹偏振参量 S_0 、 S_1 、 E_x 和 $E_x - E_y$ 随着入射角的增大而增大,当达到镜面反射角度时,镜面反射作用增强,偏振参量受镜面反射光影响较大,图像中目标与背景难以区分,在镜面反射角度附近相对值较低,当入射角超过镜面反射角度时偏振参量随着角度增大而增大;

表 2 汗潜指纹布儒斯特角

Tab.2 Sweat latent fingerprint Brewster angle

| Band/mm | 240 | 265 | 340 | 365 |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|
| Brewster point/(°) | 53.68 | 53.53 | 53.48 | 53.41 |

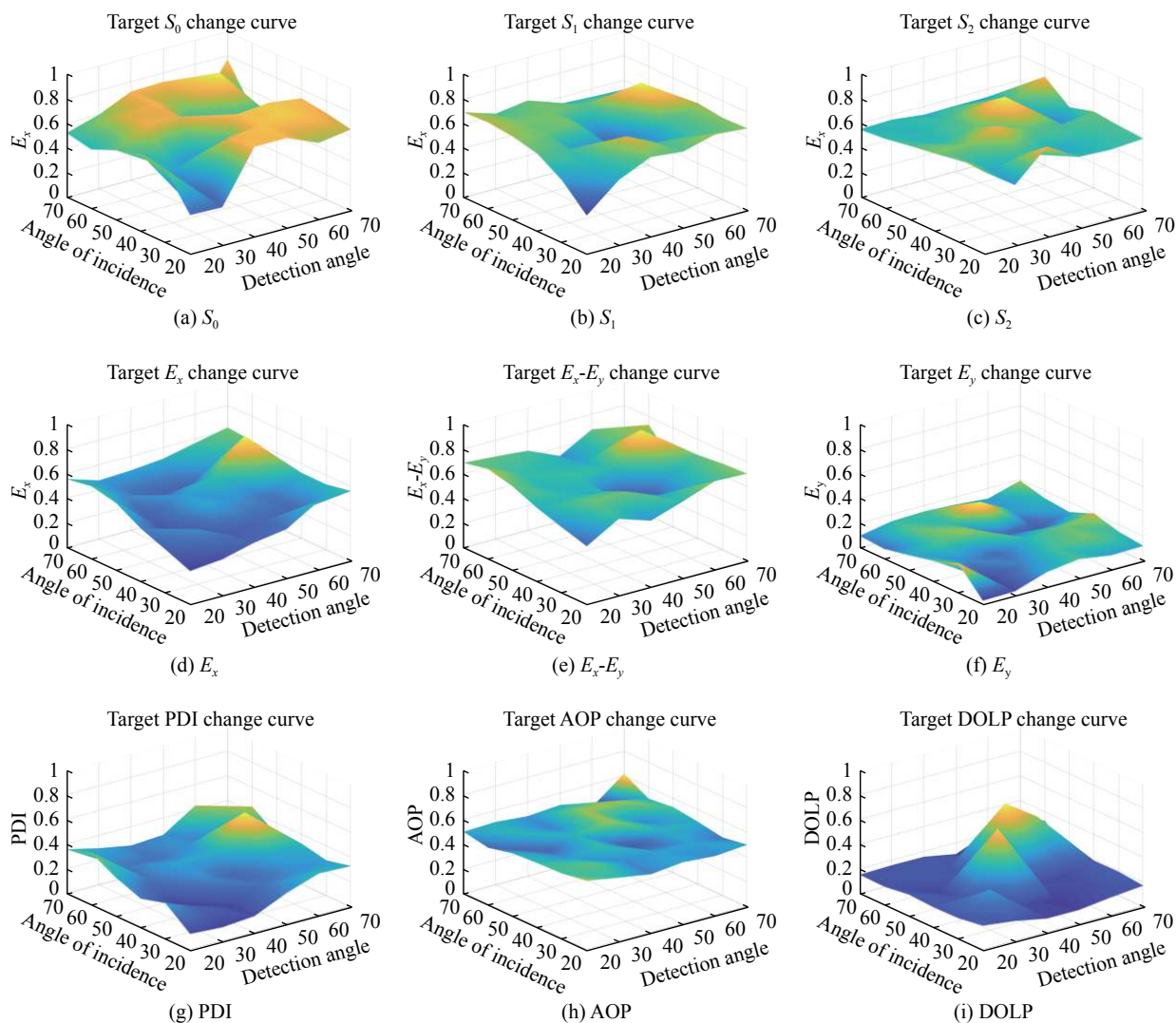


图 8 汗潜指纹多角度下的偏振参量变化: (a) S_0 图; (b) S_1 图; (c) S_2 图; (d) E_x 图; (e) $E_x - E_y$ 图; (f) E_y 图; (g) PDI 图; (h) AOP 图; (i) DOLP 图

Fig.8 Polarization parameters of sweat latent fingerprints at multiple angles: (a) S_0 map; (b) S_1 map; (c) S_2 map; (d) E_x map; (e) $E_x - E_y$ map; (f) E_y map; (g) PDI map; (h) AOP map; (i) DOLP map

(3) 当探测角不变时,汗潜指纹偏振参量PDI和DOLP随着入射角的增大而增大,当达到镜面反射角度时,受镜面反射光影响较小,在镜面反射角度附近相对值较高,并在布儒斯特角附近达到最大值,利于潜指纹的检测和表面属性分析,当入射角超过镜面反射角度时偏振参量随着角度增大而减小。

2.2.2 汗潜指纹紫外偏振反射特性多波段分析

根据目标偏振反射特性可知,目标在布儒斯特角处偏振信息较丰富,所以为了研究不同波段对汗潜指纹偏振反射特性的影响,将探测角度设置为布儒斯特角 53°。以样本 A 为客体材料进行成像检测,采集不同波段条件的汗潜指纹偏振参量图像进行分析,如

图 9 所示。

从图 9 可以看出:(1) 在相同探测波段条件下,各偏振参量在不同探测波段中变化规律近似,随着波段的增加,各偏振参量呈上升趋势,各自变化趋势相似但有差异。

(2) 随着波段的增加,汗潜指纹偏振参量 S_0 和 DOLP 变化较大,使用该偏振参量进行目标检测时受波段影响较大,优先选用近紫外波段;其余偏振参量成像检测时受波段影响较小。

(3) 探测波段在 365 nm 波段,各偏振参量同时取得较大值,有利于潜指纹检测和表面属性分析。

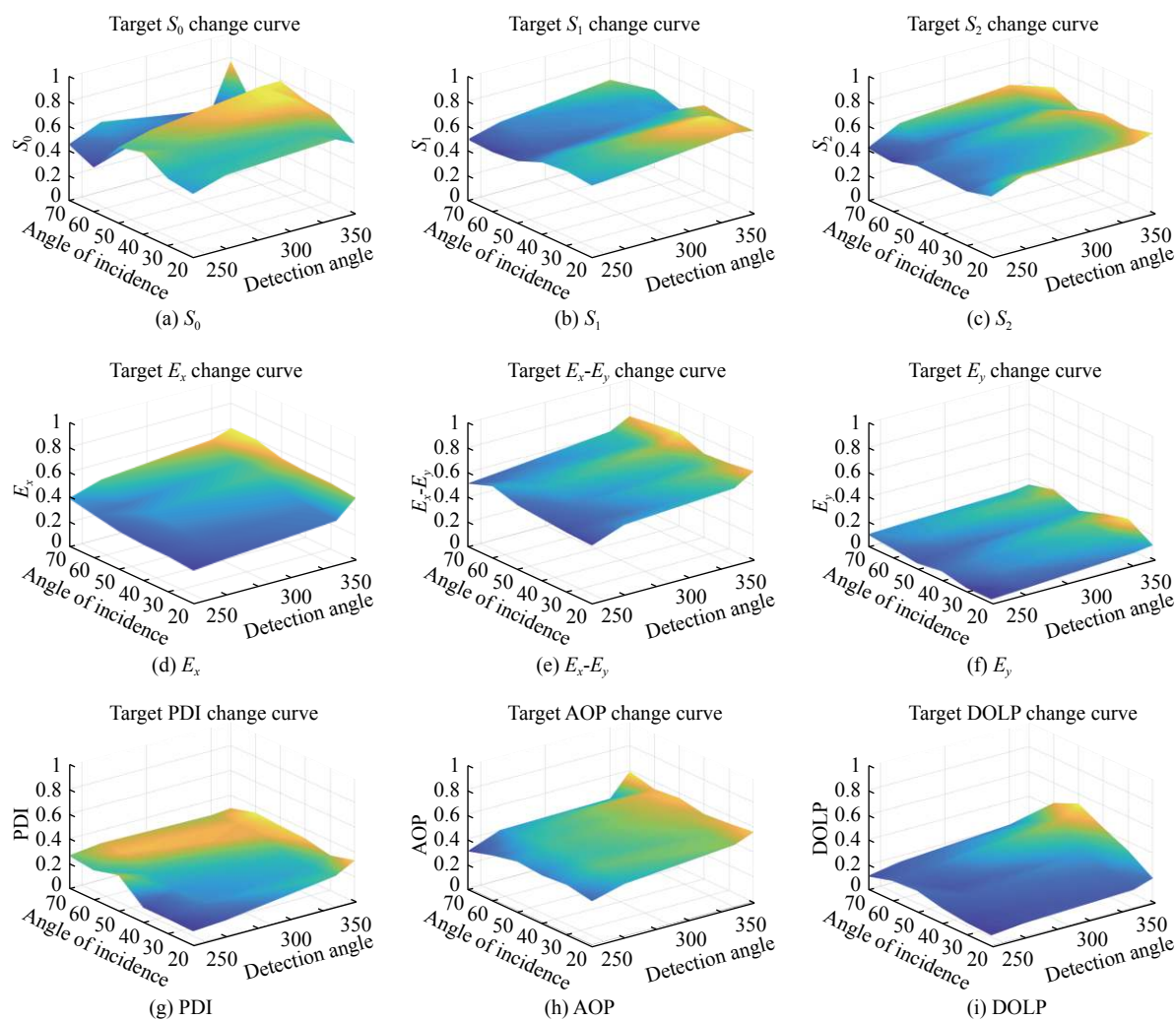


图 9 汗潜指纹多波段下的偏振参量变化: (a) S_0 图; (b) S_1 图; (c) S_2 图; (d) E_x 图; (e) E_x-E_y 图; (f) E_y 图; (g) PDI 图; (h) AOP 图; (i) DOLP 图
 Fig.9 Polarization parameter variation under multi-band of sweat latent fingerprint: (a) S_0 map; (b) S_1 map; (c) S_2 map; (d) E_x map; (e) E_x-E_y map; (f) E_y graph; (g) PDI map; (h) AOP map; (i) DOLP map

2.2.3 汗潜指纹紫外偏振反射特性多客体材料分析

为了研究客体材料对汗潜指纹偏振反射特性的影响,需要采集不同客体材料条件的汗潜指纹偏振参量图像进行分析,其中设定探测角为 53°,波段为

365 nm。虽然客体材料种类不同,但各材料之间粗糙度无相互关联性,所以客体材料变化不连续。图 10 为汗潜指纹不同客体材料下的偏振参量变化曲线。

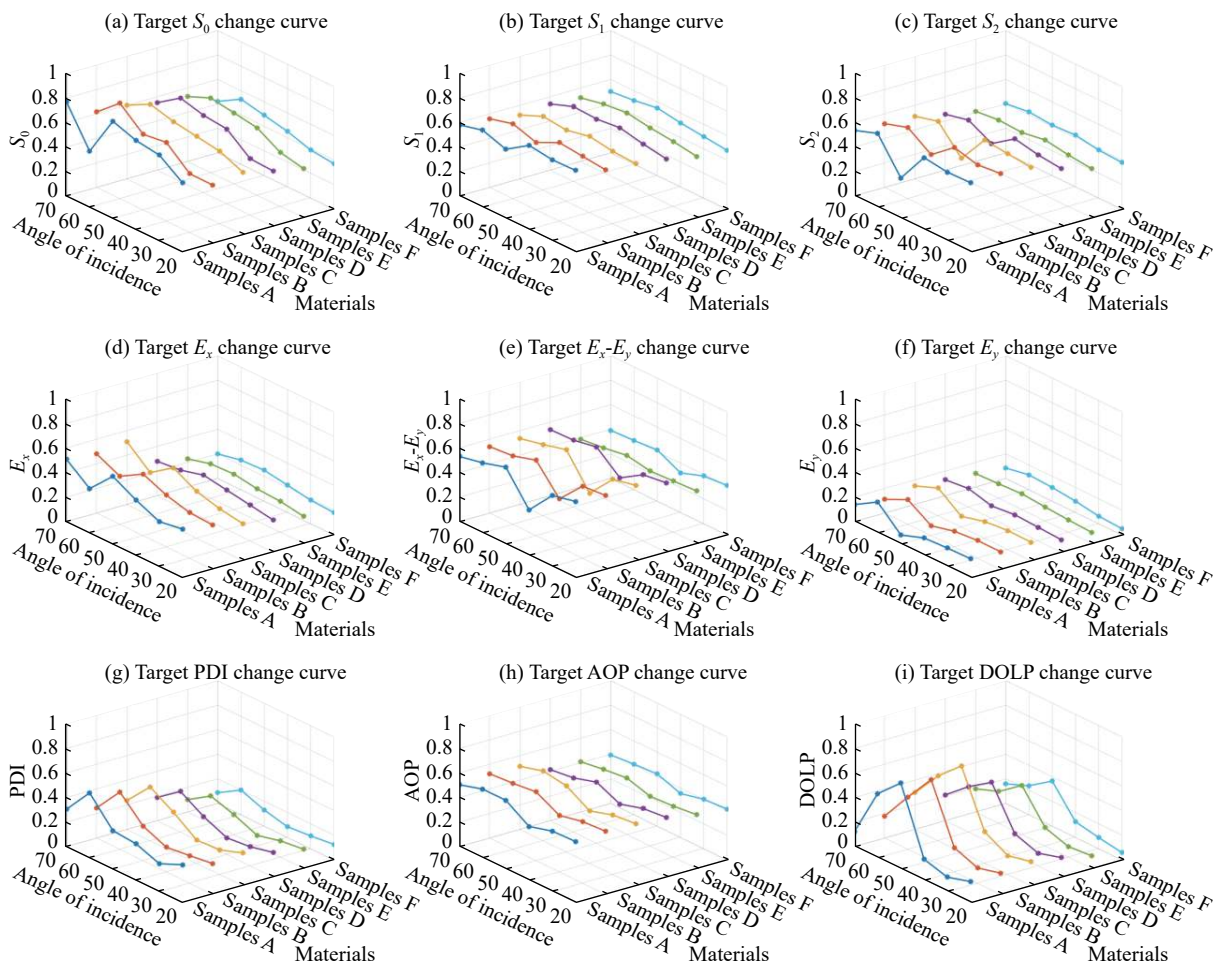


图 10 不同客体材料潜指纹的偏振参量变化: (a) S_0 图; (b) S_1 图; (c) S_2 图; (d) E_x 图; (e) E_x-E_y 图; (f) E_y 图; (g) PDI 图; (h) AOP 图; (i) DOLP 图
Fig.10 Polarization parameters of latent fingerprints of different guest materials: (a) S_0 map; (b) S_1 map; (c) S_2 map; (d) E_x map; (e) E_x-E_y map; (f) E_y map; (g) PDI map; (h) AOP map; (i) DOLP map

从图 10 可以看出: (1) 对于玻璃、金属和瓷类客体材料,其表面较为光滑,表面反射主要是单次反射,单次反射主要产生镜面反射,可观测的偏振信息较明显,所以汗潜指纹偏振参量在这几类客体材料取值相对较高;对于塑料和纸类客体材料,其表面较为粗糙,表面反射主要是多次反射,多次反射中漫反射所占比例大,所以汗潜指纹偏振参量在这几类客体材料取值相对较低;

(2) 汗潜指纹偏振参量 S_0 、 S_1 、 S_2 、 E_x 、 E_x-E_y 、PDI、AOP和DOLP在样品 A、B、C 等几类相对光滑客

体上数值较大,所以这些偏振参量易于在该类客体材料对汗潜指纹进行成像检测;

(3) 汗潜指纹偏振参量 S_0 、 S_1 、 S_2 、 E_x-E_y 、PDI、AOP和DOLP在样品 D、E、F 等几类相对粗糙客体上数值较大,易于在该介质对汗潜指纹进行成像检测。

3 结 论

文中在紫外波段对汗潜指纹目标进行了偏振光学特性理论分析及相关实验,对比并分析了汗潜指纹偏振反射特性随角度、探测波段和样本材料的变化规

律。通过测量分析可以得到以下结论: (1) 偏振成像技术能够探测得到汗潜指纹多角度偏振反射特性, 其获取的偏振信息更加稳定准确, 并且能有效避免目标镜面反射导致能量过强使得图像不稳定的情况; (2) 汗潜指纹的偏振参量表现出明确的规律性, 可以将偏振参量作为汗潜指纹识别研究的有效因子; (3) 客体材料上汗潜指纹对紫外波段光谱的反射和吸收不同, 对于所设置的客体材料, 玻璃、金属和瓷砖类材料上的汗潜指纹以单次反射为主, 探测到的光谱信息较多, 而塑料和纸类材料上的汗潜指纹以多次散射为主, 探测到的光谱信息较少, 可以利用汗潜指纹的多角度偏振信息研究客体材料上汗潜指纹的光谱散射和吸收效应。将潜指纹的传统强度信息与偏振信息像结合, 能够得到更多的目标特征信息, 可以有效提高目标对比度, 便于潜指纹的检测与识别。

参考文献:

- [1] Li Hongxia, Niu Jieqing, Chen Jingrong, et al. Research on non-destructive visualization of latent fingerprints on paper by fluorescent imaging [J]. *Progress in Laser and Optoelectronics*, 2016, 53(2): 230–234. (in Chinese)
- [2] Zhu Lili, Li Hui. Ultrasonic modulation optical imaging of scatterers and absorbers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(2): 132–137. (in Chinese)
- [3] Han Junliang. Trace Inspection [M]. Beijing: China Democracy Legal System Press, 2007.
- [4] Song Minmin, Wang Shuang, Lv Tao. Weak and small target detection under infrared polarized imaging [J]. *Infrared*, 2015, 36(10): 1–4.
- [5] Shih-Schön Lin, Yemelyanov K M, Pugh E N J, et al. Polarization-based and specular-reflection-based noncontact latent fingerprint imaging and lifting [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2006, 23(9): 2137–2153.
- [6] Ihsin An. Application of imaging ellipsometry to the detection of latent fingermarks [J]. *Forensic Science International*, 2015, 253: 28–32.
- [7] Han Yusheng, Mao Baoping, Zhou Yuan. Research on detection method of latent fingerprint polarization imaging based on active polarized light [J]. *Infrared*, 2014, 35(8): 5–9.
- [8] Zhang L, Yuan H W, Li X M. Active polarization imaging method for latent fingerprint detection [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2018, 50(9): 353.
- [9] Guo Zecheng, Wang Feng, Zhang Jun, et al. Experimental research on water spill detection based on infrared polarization characteristics [J]. *Infrared Technology*, 2010, 32(2): 113–116.
- [10] Zhang Yumei. Research on full Stokes polarization imaging technology [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015.
- [11] Xie Chen, Wang Feng. Experimental research on infrared polarized radiation characteristics of camouflage coating [J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(10): 890–894.
- [12] Yuan Bo, Gao Jing, Yang Fanchao, et al. Study on the polarization optical properties of space target materials [J]. *Journal of Photonics*, 2017, 46(1): 65–72.
- [13] Jia Rong, Wang Feng, Liu Xiao. Design and experiment of time-sharing ultraviolet polarization imaging detection system [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2020, 57(2): 220–228.
- [14] Wang Tianwu. Research on laser fingerprint detection and imaging technology [J]. *China Science and Technology Information*, 2006(21): 312–313.
- [15] Daimon M, Masumura A. Measurement of the refractive index of distilled water from the near-infrared region to the ultraviolet region [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(18): 3811–3820.