

分时型紫外偏振成像探测系统设计与实验

贾镛^{1,2*}, 王峰², 刘晓²

¹中国人民解放军陆军炮兵防空兵学院研究生大队, 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 潜指纹是刑事侦查中重要的证据。为了研究基于紫外偏振成像技术的潜指纹无损检测, 利用背照式 sCMOS 探测器, 提出了紫外偏振成像方案。分析了紫外偏振成像的基本工作原理, 设计了由双胶合透镜光学系统、异步旋转机械结构和自动调谐电子学系统构成的分时型紫外偏振成像探测系统, 并通过实验验证了该系统的功能和性能。结果表明, 利用该系统可以实现对潜指纹等弱特征目标的无损检测。相较于传统强度信息检测, 该方法获取的偏振信息提高了目标与背景的对比度, 凸显了目标的细节特征, 为偏振成像探测应用于潜指纹无损检测提供了实验依据。

关键词 成像系统; 紫外偏振; 潜指纹; 双胶合透镜; 异步旋转; 自动调谐

中图分类号 O436.3

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.021105

Design and Experiment of Time-sharing Ultraviolet Polarization Imaging Detection System

Jia Rong^{1,2*}, Wang Feng², Liu Xiao²

¹Graduate Team, Artillery Air Defense Academy, Chinese People's Liberation Army, Hefei, Anhui 230031, China;

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

Abstract Latent fingerprint is an important evidence in criminal investigation. In order to study the nondestructive detection of latent fingerprint based on ultraviolet (UV) polarization imaging technology, the back-illuminated sCMOS detector is used to study the UV polarization imaging scheme. The basic working principle of UV polarization imaging is analyzed, and the time-division UV polarization imaging detection system consisting of double-glued lens optical system, asynchronous rotating mechanical structure and automatic tuning electronics system is designed. The experiment verifies the function and performance of the system. The results show that the system can realize the non-destructive detection of weak feature targets such as latent fingerprints. Compared with the traditional intensity information detection method, the polarization information obtained by the method improves the contrast between the target and the background, highlights the details of the target, and provides experimental basis for the application of polarization imaging detection in latent fingerprint nondestructive detection.

Key words imaging systems; ultraviolet polarization; latent fingerprint; double cemented lens; asynchronous rotation; automatic tuning

OCIS codes 110.5405; 260.2130; 260.7190; 040.5160

1 引言

偏振成像探测是一种新型光电探测技术, 可以获取探测目标的偏振信息。该信息不仅能够反映目标的辐射强度, 而且能够凸显目标的边缘和纹理特

征, 表征目标的偏振特性。偏振成像探测技术可将工作波段从紫外波段扩展到可见光波段、红外波段和太赫兹波段^[1]。

20 世纪 70 年代, 国外已经开展了偏振成像技术及系统的研究。例如: 日本采用电调谐滤光片和

收稿日期: 2019-05-14; 修回日期: 2019-06-09; 录用日期: 2019-07-10

基金项目: 国家自然科学基金(41406109)、安徽省自然科学基金(1708085QD90)

* E-mail: 2803114834@qq.com

电机旋转的方式实现了可见光波段的偏振成像系统;美国研制出分时型、分孔径型、分焦平面型、分束型和微纳金属线栅型偏振成像探测器和探测系统,开展了地面目标、海洋目标和空中目标的实验研究^[2-3]。随着偏振成像技术研究的深入,偏振成像系统具有体积小、成本低、精度高和适用范围广等特点。国内偏振成像技术研究的基础相对较弱,研究工作主要在科研院所和部分高校展开,但是也取得了一些成果。例如,中国科学院安徽光学精密机械研究所研制了可见光波段的偏振 CCD 相机,北京理工大学光电学院探索了分时型与分振幅型红外偏振成像探测机理和系统^[4]。近 20 年来,国内科研单位主要研究可见光和红外波段的偏振成像技术,并将其应用于天文探测、生物医学以及目标检测等领域^[5-6]。

偏振成像技术利用目标反射的偏振光成像,可

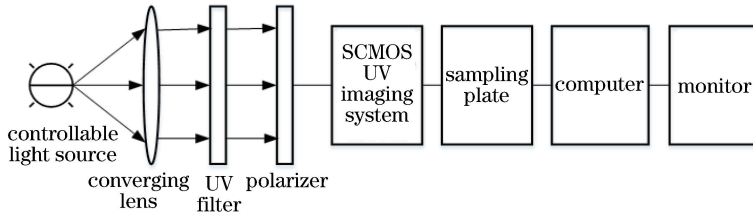


图 1 紫外偏振成像探测原理图

Fig. 1 Schematic of UV polarization imaging detection

I, Q, U, V 是 Stokes 向量的四个参数。入射光偏振态的 Stokes 参量为 $S_i = [I_i, Q_i, U_i, V_i]^T$, 出射光偏振态的 Stokes 参量为 $S_o = [I_o, Q_o, U_o, V_o]^T$, 则有^[9]

$$S_o = MS_i = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_i \\ Q_i \\ U_i \\ V_i \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中, M 矩阵为 4×4 的 Mueller 矩阵, 它表征了光学系统对入射光偏振态的影响, 可以将入射光和出射光联系起来。

线性偏振器件(透射方向为 θ) 的 Mueller 矩阵 M_α 为

$$M_\alpha = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ \cos 2\theta & \cos^2 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta & 0 \\ \sin 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta & \sin^2 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

将(2)式代入(1)式可计算出入射光的 Stokes 矢量。自然物中反射光线中的 V 都极其微小, 因此一般工程检测和计算中都认为其为 0, 则有

以消除镜面反光和减少背景干扰, 具有提高目标和背景的对比度并凸显目标细节特征的优势^[7], 因此偏振成像技术可用于对弱小目标的探测。在紫外波段中, 潜指纹等弱小目标对紫外线具有吸收、反射、散射作用和荧光效应^[8], 本文将偏振成像技术拓展到紫外波段用于潜指纹的无损检测, 设计并搭建了分时型紫外偏振成像探测系统, 实现了对潜指纹等弱特征目标进行连续、快速的无损探测, 获得了良好的检测效果。

2 紫外偏振成像基本原理

偏振成像探测主要是通过对偏振调制器件的设置来测量目标的偏振信息, 配合相应的解析算法最终可获取目标的全部或部分偏振信息, 如偏振度、偏振角。紫外偏振成像探测原理如图 1 所示。

$$I_\alpha = \frac{1}{2} [I + Q \cos(2\alpha) + U \sin(2\alpha)], \quad (3)$$

式中, α 为偏振元平面法线与参考坐标轴的夹角。线偏振度 D_{LP} 和偏振角 A_P ^[7] 公式为

$$D_{LP} = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I}, \quad (4)$$

$$A_P = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{U}{Q}\right). \quad (5)$$

如果只要求获得入射光线偏振态的 Stokes 参量, 则须选取三个不同角度进行测量。当选取的 α 分别为 $0^\circ, 60^\circ$ 和 120° 时, 根据(2)式可以计算出目标光波的 Stokes 参量数据。对(3)、(4)、(5)式作变换, 可得

$$\begin{cases} I_i = \frac{2}{3} [I_o(0^\circ) + I_o(60^\circ) + I_o(120^\circ)] \\ Q_i = \frac{2}{3} [2I_o(0^\circ) - I_o(60^\circ) - I_o(120^\circ)] \\ U_i = \frac{2}{\sqrt{3}} [I_o(60^\circ) - I_o(120^\circ)] \end{cases} \quad (6)$$

根据线偏振度和 Stokes 矢量的定义, 令 $P_i = D_{LP}$, 可以分别计算出 Stokes 矢量在 x 轴、 y 轴方向上的分量 E_x, E_y , 以及二者之差 $E_x - E_y$ ^[10]:

$$\begin{cases} E_x = a_x \cos(\tau + \varphi_x) \\ E_y = a_y \cos(\tau + \varphi_y) \\ E_x - E_y = a_x \cos(\tau + \varphi_x) - a_y \cos(\tau + \varphi_y) \end{cases}, \quad (7)$$

式中, $\tau = \omega t - \frac{2\pi}{\lambda}Z$, ω 为光的角频率, λ 为波长, Z 为光程, 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(7)式可以计算出差分信息 P_{DI}

$$P_{DI} = \frac{(1 + P_i) \times I_i}{2} - \frac{(1 - P_i) \times I_i}{2}. \quad (8)$$

根据(4)~(8)式,可以得到被测目标的 I 、 Q 、 U 、 D_{LP} 、 A_P 、 E_x 、 E_y 、 $E_x - E_y$ 和 P_{DI} 等参量偏振图像。

紫外偏振成像探测系统采用主动成像探测方式,当紫外光照射到客体表面时,由于目标和客体表面对紫外光吸收、反射的差异,客体表面和目标反射的偏振光会明显不同。这部分偏振光会携带反映目标特征的目标材料、纹理和物化信息,最后在探测器上形成清晰的图像。

3 紫外偏振成像系统设计

3.1 总体设计

紫外偏振成像系统采用单光路旋转分时系统结构,能够实现对静态目标的偏振成像探测,且单光路旋转分时系统配准要求低。成像系统要求能够进行滤光片和偏振片切换,同时可以实现对潜指纹等小视场的成像探测,因此在设计中使用紫外空气间隙消色差双合透镜组合^[11-12]。系统框图如图2所示。

紫外偏振成像探测系统主要由紫外光镜头、滤光片转轮模块、偏振片滑动模块、sCMOS相机、消色差透镜组、图像处理系统及相关电源和控制器等组成。本文开展的紫外偏振成像系统设计与研究是为了满足长焦距、小视场的要求,能够在小视场中检测到弱特征目标及其细节特征。其主要技术指标如表1所示。

3.2 光学系统设计

3.2.1 光学参数计算

根据光学系统设计的要求,应计算出系统光学参量,比如,系统焦距、 F 数、视场角、系统放大率和探测波段等。根据光学成像分析,系统焦距 f 、像面大小 s (垂直或水平)、系统作用距离 W_D 和场景大小 F_v 的关系式^[13]为

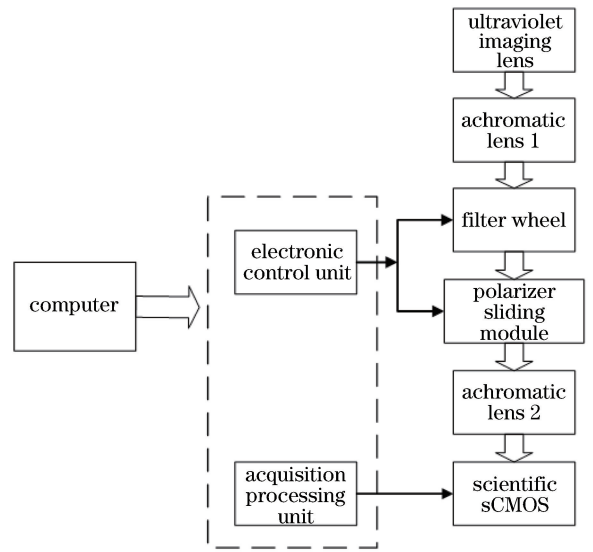


图2 紫外偏振成像探测系统框图

Fig. 2 Block diagram of UV polarization imaging detection system

表1 紫外偏振成像系统的性能指标

Table 1 Performance index of UV polarization imaging system

Parameter	Value
Center wavelength /nm	254,280,340,365
Center wavelength deviation	± 2
Half wavelength /nm	10 ± 2
Clear aperture /mm	25.0
Transmittance /%	> 75
Focal length /mm	78
Switching time /s	< 0.5
Image resolution	2048×2040
System volume / (cm \times cm \times cm)	$56 \times 24 \times 17$
System power consumption /W	66

$$\frac{F_v}{W_D} = \frac{s}{f}. \quad (9)$$

视场角的大小决定了光学系统的视野范围。视场角越小,系统光学倍率就越大。视场角 W 的计算式为

$$W = 2 \times \arctan \frac{F_v}{W_D}. \quad (10)$$

系统放大率 β 可表示为

$$\beta = \frac{2y}{F_v}, \quad (11)$$

式中, $2y = N\sigma$ 为探测器光敏面尺寸, N 为像素数, σ 为像素宽度。探测器参数如下: 像元尺寸为 $6.5 \mu\text{m} \times 6.5 \mu\text{m}$, 有效像素数为 2048×2040 。

系统设计使用的紫外镜头焦距为 78 mm, F 数

为 3.8;根据(10)式计算可得 $W=9.74^\circ$;根据(11)式计算可得 $\beta=16$;系统的光学波段为 250~400 nm。

3.2.2 光学仿真及优化

紫外偏振的光学系统结构主要分反射和折射两种。紫外辐射较弱,而且紫外探测器的探测灵敏度相对较低,应采用大相对孔径的光学系统来提高系统的接收灵敏度。由于镜头和 sCMOS 之间有滤光片转轮模块和偏振片滑动模块,设计紫外光学镜头时应预留一定空间。光学镜头设计为折反式系统。折反式系统采用球面反射镜作为主镜,并加入适当的折射元件来补偿球面产生的像差,可改善轴外成像质量。折反式系统具有外形尺寸小、相对孔径大、分辨力高、透射比高、光能损失少等优点,设计时可满足小视场的要求。

分时型紫外偏振成像系统结构由前置镜头、消色差透镜组等组成。消色差双胶合透镜能够使波长为 λ_1 和 λ_2 的光线聚集在一个焦点上,而中间的光线略呈离焦。焦点和透镜的弥散斑直径比等效单透镜小,但因存在高级球差,小视场时系统性能良好。在元件之间加入一个小空气间隙来平衡五级球差和固有三级相差,从而提高系统的综合性能。系统光路如图 3(a)所示。

光学系统具有一定的孔径和视场,对于入射角不同的光线,其在水平方向和竖直方向上的成像效果均有差异,从而产生几何像差,所以使用 Zemax 对光学系统进行设计和优化,并用调制传递函数(MTF)曲线图、场曲与畸变图以及系统点列图来评价系统的成像质量^[14],分别如图 3(b)、(c)、(d)所示。

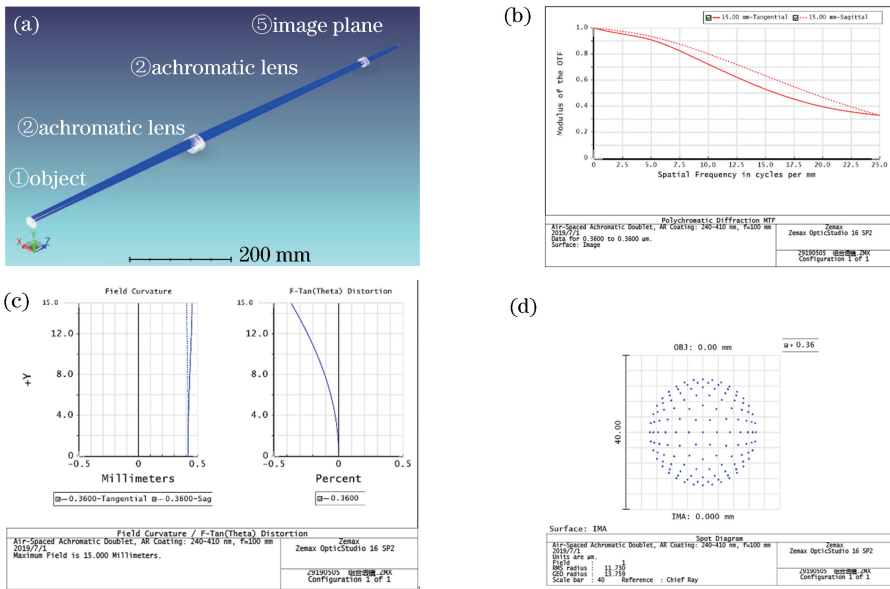


图 3 光学系统设计图。(a)系统光路图;(b)系统 MTF 曲线图;(c)系统场曲与畸变;(d)系统矩阵点列图

Fig. 3 Optical system design drawing. (a) System light path diagram; (b) system MTF graph; (c) system field curvature and distortion; (d) system matrix point map

系统各个视场在奈奎斯特频率(12.1 lp/mm)处调制传递函数大于 0.6,接近衍射极限(见图 3(b));不同波段的场曲值都在 0.4 mm 以内,而畸变量都在 4%以内(见图 3(c));最大的方均根(RMS)半径不超过 22 μm ,说明探测器像元可以有效接收目标信号,满足设计要求(见图 3(d))。

3.3 机械结构和电子学系统设计

系统将光学系统、转轮及 sCMOS 探测器通过笼式结构集成在一起,实现了一体化设计。系统材料选择质量轻、强度高、形变小的氧化发黑的铝质材料。笼式结构使用 4 根坚固的钢制支杆,其中的光学元器件沿着共同的光轴安装,既能保证光路一致

性,又能适应温度变化、振动冲击等环境要求^[15],为构建光机系统提供了一种高度灵活、快速对准的方法,使得成像系统对配准要求低。其中,消色差双合透镜使用卡环安装到旋转式移动透镜套筒上,移动槽有双向螺旋,并沿着光轴约线性移动 5 cm,系统光机结构如图 4 所示。

3.3.1 滤光片转轮模块

滤光片转轮模块将滤光片嵌入滤光片转轮中的相应位置,在步进电机的控制下随转轮一起转动,实现滤光片的切换,如图 5 所示。

滤光片转轮通过步进电机驱动转轮实现滤光片的切换^[16]。转轮通过 USB2.0 连接计算机上位机,

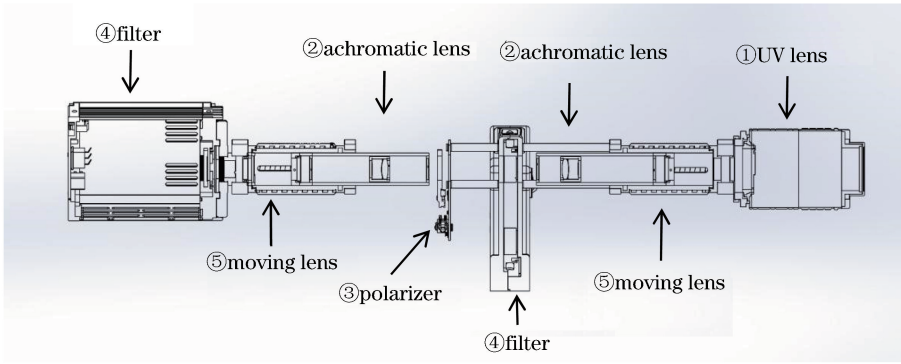


图 4 系统光机结构图

Fig. 4 System optomechanical structure

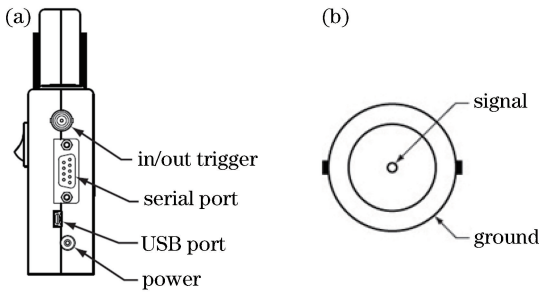


图 5 滤光片转轮模块。(a)转轮信号接口；
(b) BNC 输入输出触发端

Fig. 5 Filter wheel module. (a) Wheel signal interface;
(b) BNC input and output trigger

当上位机输出滤光片切换位置的指令后，刺刀螺母连接器(BNC)触发器会接收到一个低脉冲信号，随后触发器单元会产生一个 10 ms 的高脉冲信号，该信号可以使步进电机工作，使转轮旋转至指定位置，转轮指标如表 2 所示。

表 2 转轮指标
Table 2 Wheel indicator

Parameter	Value
Current /A	2.08
Voltage /V	12.6
Frequency /Hz	47-63
Baud rate / (kbit · s ⁻¹)	115.2
Data bit	8
Precision / (°)	±2
Switching time /s	<0.5

3.3.2 偏振片滑动模块

偏振片滑动模块通过螺纹压片镶嵌在偏振片滑动模块相应位置，利用步进电机切换偏振片达到改变偏振方向的目的。偏振片滑动模块使用压电谐振电机技术，适合偏振片进行线性移动^[17]。滑动模块包含位移台、用于控制位移台的接口板、安装支架和

电源，如图 6 所示。

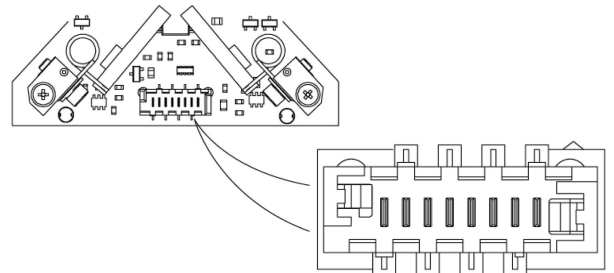


图 6 接口板电路图与滑动安装座

Fig. 6 Interface board circuit diagram and sliding mount

利用压电元件在特定超声频率下的振动可实现滑动安装座的线性移动。每台步进电机都有一种超声谐振频率推动位移台向前运动，又有另一种超声谐振频率拉动位移台向后运动。让步进电机以一种谐振频率工作，步进电机机的顶端会以严格的椭圆路径顺时针循环运动；以另一种谐振频率驱动步进电机时，电机的顶端会按照原路径逆时针循环运动。两种谐振频率大约为 100 kHz。步进电机顶端的总位移与其驱动的机械负载和施加给压电元件的电压具有函数关系。在无负载，处于一种谐振频率，且最大驱动电压为 5 V 的情况下，进行椭圆路径运动时，步进电机顶端扩展与收缩的幅度小于几微米。

3.4 软件设计

本文的软件设计主要包括光谱波段调谐、偏振态调制、图像采集和处理。其中，在光谱波段调谐过程中，通过滤光片转轮控制软件，上位机将所有串行命令以 ASCII 码的形式通过 USB 接口发送；偏振态调制使用偏振片滑动模块控制软件，对滑动模块的微控制器传输指令，按照设定的协议进行模块移动，当偏振片完成滑动后步进电机复位，数模转换模块(D/A)输出 0 信号，等待下一次操作；图像采集和处理是上位机通过 USB3.0 或 CameraLink 数据接

口与 sCMOS 探测器相连,将软件开发工具包进行二次开发,增加偏振信息处理的功能,把该功能的函数做成动态链路库并放到库函数中^[17],系统软件总流程图如图 7 所示。

4 紫外偏振成像系统性能验证

分时型紫外偏振成像系统的总体结构外观图如图 8 所示。

系统非均匀性是指在均匀辐射条件下系统获取图像像素灰度值不一致的情况。图像非均匀性是由光学系统和探测器的噪声造成的。系统均匀性定标是指在相同均匀辐射亮度下,将各像元的输出信号校正到同一参考值上。本文使用的是两点校正法^[18],同时考虑系统增益和偏置误差,假设探测器的光敏元响应是线性响应的,则可以表示为

$$V(i, j, \phi) = k_{i,j} \phi + b_{i,j}, \quad (12)$$

式中: ϕ 为光辐射亮度, $k_{i,j}$ 为增益系数, $b_{i,j}$ 为偏置误差。那么取两个不同亮度 ϕ_1 和 ϕ_2 , (i, j) 像元的输出信号分别为 $V(i, j, \phi_1)$ 和 $V(i, j, \phi_2)$, $\bar{V}(\phi_1)$ 和 $\bar{V}(\phi_2)$ 分别是探测器输出信号的均值,那么两点校正法可以表示为

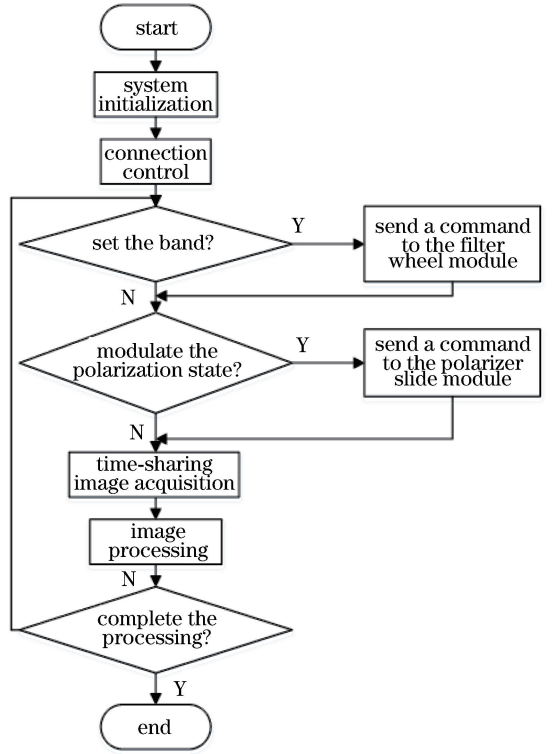


图 7 系统软件总流程图

Fig. 7 General flow chart of system software

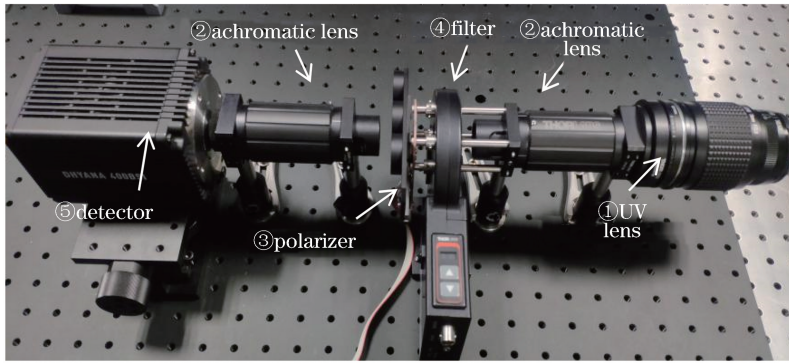


图 8 紫外偏振成像探测系统

Fig. 8 UV polarization imaging detection system

$$\begin{cases} \bar{V}(\phi_1) = k_{i,j} V(i, j, \phi_1) + b_{i,j} \\ \bar{V}(\phi_2) = k_{i,j} V(i, j, \phi_2) + b_{i,j} \end{cases}, \quad (13)$$

可以得到

$$\begin{cases} k_{i,j} = \frac{\bar{V}(\phi_1) - \bar{V}(\phi_2)}{V(i, j, \phi_1) - V(i, j, \phi_2)} \\ b_{i,j} = \frac{\bar{V}(\phi_2) V(i, j, \phi_1) - \bar{V}(\phi_1) V(i, j, \phi_2)}{V(i, j, \phi_1) - V(i, j, \phi_2)} \end{cases} \quad (14)$$

系统的响应性与均匀辐射之间的线性关系良好,所以选择精度较高的两点校正法进行系统均匀性校

正。在系统线性响应范围内,将积分球调整至稳定状态,设置两个辐射亮度,每个辐射亮度连续采集 10 组图像,取平均值作为该辐射亮度的均匀图像。经过非均匀性校正后,非均匀性从 8.1% 降至 0.597%。从校正后的图像来看,图像均匀性有了较大改善。365 nm 波段非均匀性校正前后的图像对比如图 9 所示。

在实验中,利用氙灯光源作为主动光源,紫外偏振成像系统对金属漆板进行汗潜指纹无损检测,紫外偏振成像探测系统采集的 365 nm 的潜指纹,如图 10 所示。

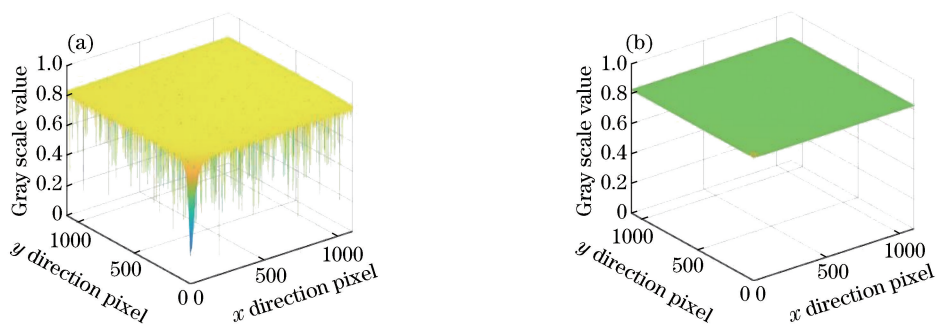


图9 非均匀性校正前后对比图。(a)非均匀性校正原始图;(b)非均匀校正后的图像

Fig. 9 Non-uniformity correction image. (a) Non-uniformity correction original image; (b) non-uniformly corrected image

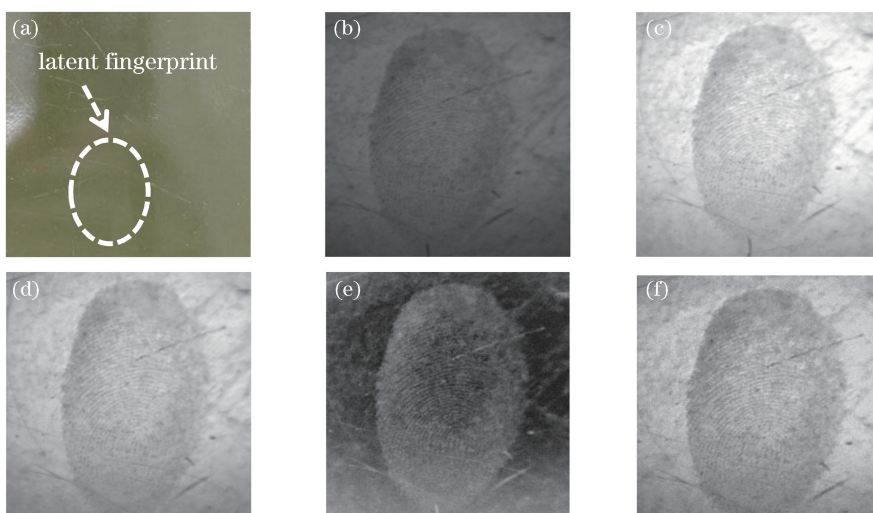


图10 金属漆板表面潜指纹紫外偏振图像。(a)彩色数码图像;(b) 0°偏振方向图;(c) 60°偏振方向图;(d) 120°偏振方向图;(e) Q图;(f) P_{DI} 图

Fig. 10 Surface latent fingerprint UV polarization image of metal lacquered board. (a) Color digital image; (b) 0° polarization pattern; (c) 60° polarization pattern; (d) 120° polarization pattern; (e) Q figure; (f) P_{DI} diagram

标准差、信息熵、对比度和信噪比 4 个属性可用来评价偏振参量图像。标准差是图像像素灰度值相对于均值的离散程度,图像信息量越大,标准差越大;信息熵反映图像纹理信息,纹理细节越丰富,信息熵越大;对比度是描述融合图像中指纹有效区域与背景特征的相对显著程度;信噪比是指纹有效区域与背景噪声的比值。文中以汗潜指纹为例,在实验中获得强度图像和偏振参量图像中选择指纹区域和背景区域,结果如表 3 所示。

实验表明,在解析出各个偏振参量后,Q图对比度比I图增强了,信噪比提高了1.2倍, P_{DI} 图的标准差和信息熵均比I图高,说明 P_{DI} 图轮廓和细节显示较为清楚,表现出更强的偏振特性。紫外偏振成像探测系统检测潜指纹时,可以抑制背景干扰,提高潜指纹对比度并凸显指纹细节,而且系统可以转换不同紫外波段,相较多波段成像设备,具有单色性好、背景干扰小等优势。实验中发现,不同客体材料、环境条件及潜指纹个体差异对系统的成像结果也有影响。

表3 图像评价指标结果

Table 3 Image evaluation index result

Parameter	I figure	Q figure	U figure	D_{LP} figure	A_P figure	P_{DI} figure	E_x figure	E_y figure ($E_x - E_y$) figure
Information entropy	6.637	6.653	6.650	6.371	6.51	6.610	6.732	6.4772
Standard deviation	1.480	1.475	0.790	0.766	0.8955	1.584	0.847	1.3857
Contrast	16.713	17.163	2.016	7.830	5.458	12.76	2.449	11.376
Signal-to-noise ratio	6.769	8.100	1.757	1.997	2.564	3.3276	5.603	6.465

5 结 论

设计了分时型紫外偏振成像系统,获取了潜指纹的紫外偏振信息。该系统的工作波段为 210~400 nm,焦距为 78 mm,通光孔径为 25 mm,系统通过电调谐与机械调谐的方式对潜指纹等弱特征目标进行了连续、快速的成像检测,具有检测结果明确、成像质量良好的特点。分时型紫外偏振成像系统的设计推动了紫外偏振成像技术的研究,有助于分析目标的紫外偏振特性,为潜指纹等弱特征目标的无损检测提供了重要支撑。

参 考 文 献

- [1] Zhao J S. Developments of polarization imaging technology[J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(12): 743-750, 772.
赵劲松. 偏振成像技术的进展[J]. *红外技术*, 2013, 35(12): 743-750, 772.
- [2] Yang W. Research on the key techniques for the polarization information extraction and application in the target detection[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2017.
杨蔚. 目标探测中偏振信息提取的关键技术与应用[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
- [3] An I. Application of imaging ellipsometry to the detection of latent fingermarks[J]. *Forensic Science International*, 2015, 253: 28-32.
- [4] Chen W L, Wang X, Jin W Q, et al. Experiment of target detection based on medium infrared polarization imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(1): 7-11.
陈伟力, 王霞, 金伟其, 等. 采用中波红外偏振成像的目标探测实验[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(1): 7-11.
- [5] 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.
- [6] Han Y S, Mao B P, Zhou Y. Research on polarization imaging detection method of latent fingerprints based on active polarized light [J]. *Infrared*, 2014, 35(8): 5-9.
韩裕生, 毛宝平, 周远. 基于主动偏振光的潜指纹偏振成像检测方法研究[J]. *红外*, 2014, 35(8): 5-9.
- [7] Chen W, Qiao Y L, Sun X B, et al. Method for water surface sun glint suppression based on polarized radiation image fusion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(5): 0529001.
陈卫, 乔延利, 孙晓兵, 等. 基于偏振辐射图融合的水面太阳耀光抑制方法[J]. *光学学报*, 2019, 39(5): 0529001.
- [8] Zhao C, Huang L H, Ling L Q, et al. Detection of latent fingerprints on porous paper [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(7): 0704003.
赵成, 黄立华, 凌丽青, 等. 渗透性纸张上潜在指印检测技术研究[J]. *中国激光*, 2018, 45(7): 0704003.
- [9] Guo Z C, Wang F, Zhang J, et al. The study of water-surface oil spill based on infrared polarization characteristics [J]. *Infrared Technology*, 2010, 32(2): 113-116.
郭泽成, 王峰, 张骏, 等. 基于红外偏振特性的水面溢油检测实验研究[J]. *红外技术*, 2010, 32(2): 113-116.
- [10] Xie C, Wang F. Research on infrared polarization radiation properties experiment of camouflage coating [J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(10): 890-894.
谢琛, 王峰. 伪装涂层红外偏振辐射特性实验研究[J]. *红外技术*, 2015, 37(10): 890-894.
- [11] Wang J N. Research and design of chromatic confocal displacement sensor[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
王津楠. 光谱共焦位移传感器研究与设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [12] Chang Z, Wang Y, Si F Q, et al. Design and implementation of ultraviolet imaging system based on scientific grade CCD [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(8): 0804002.
常振, 王煜, 司福祺, 等. 基于科学级 CCD 的紫外成像系统设计及实现[J]. *中国激光*, 2017, 44(8): 0804002.
- [13] Jin G P, Pang Q C. Development of UV fingerprint identification device [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(2): 198-202.
靳贵平, 庞其昌. 紫外指纹检测仪的研制[J]. *光学精密工程*, 2003, 11(2): 198-202.
- [14] Xu J, Liu F, Liu J T, et al. A design of real-time unipath polarization imaging system based on Wollaston prism[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(13): 134201.
许洁, 刘飞, 刘杰涛, 等. 基于渥拉斯顿棱镜的单路实时偏振成像系统设计[J]. *物理学报*, 2016, 65(13): 134201.
- [15] Qian H H, Ye Q H, Meng B H, et al. The polarized radiometric theoretical error of spaceborne directional

- polarimetric camera [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017, 37(5): 1558-1565.
- 钱鸿鹄, 叶擎昊, 孟炳寰, 等. 星载多角度偏振成像仪偏振辐射测量的理论误差分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(5): 1558-1565.
- [16] Zhang H Y, Li Y, Yan C X, et al. Three-dimensional polarization ray tracing calculus for partially polarized light [J]. Optics Express, 2017, 25(22): 26973-26986.
- [17] Zhao S M, Zhang W H, Wang L, et al. Propagation and self-healing properties of Bessel-Gaussian beam carrying orbital angular momentum in an underwater environment [J]. Scientific Reports, 2019, 9: 2025.
- [18] Wang H L, Liang J Q. Optimization and calibration of a snapshot medium-wave infrared full-polarization-imaging system [J]. Optics Communications, 2018, 421: 56-65.