

基于扫频光学相干层析的墨迹鉴别方法研究

吴彤^{1,2*}, 吴超^{1,2}, 潘瑞斌^{1,2}, 张磊^{1,2}, 赫崇君¹, 王吉明², 路元刚¹, 刘友文^{2**}

¹南京航空航天大学空间光电探测与感知工业和信息化部重点实验室, 江苏 南京 210016;

²南京航空航天大学理学院, 江苏 南京 211106

摘要 当前墨迹伪造造成的经济损失逐年增加, 基于此, 提出一种基于扫频光学相干层析(SSOCT)的墨迹鉴别方法。使用自主搭建的 SSOCT 成像系统采集墨迹样品背向反射光强随深度下降的数据, 通过数据拟合获得墨迹层的衰减系数, 用以区分同种颜色不同品牌墨水在白纸上书写的墨迹。实验测得百乐牌墨迹衰减系数范围为 0.1333~0.1434, 得力牌墨迹衰减系数范围为 0.1501~0.1695, 英雄牌墨迹衰减系数范围为 0.1748~0.1892。重建了使用三种墨水书写的“OCT”字母的 X-Y 横截面图像, 实现了墨迹的鉴别与区分, 验证了方法的可行性。

关键词 测量; 墨迹鉴别; 扫频光学相干层析; 衰减系数; 阈值处理

中图分类号 TB133

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.1104007

Identification of Ink Marks Using Swept Source Optical Coherence Tomography

Wu Tong^{1,2*}, Wu Chao^{1,2}, Pan Ruibin^{1,2}, Zhang Lei^{1,2}, He Chongjun¹,
Wang Jiming², Lu Yuangang¹, Liu Youwen^{2**}

¹Key Laboratory of Space Photoelectric Detection and Perception, Ministry of Industry and Information Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China;

²College of Science, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 211106, China

Abstract At present, the economic loss caused by the forgery of ink marks is increasing annually. This study presents a method for identifying ink marks using swept source optical coherence tomography (SSOCT). To acquire the back-scattered light intensity from ink marks written on white paper, a custom-built SSOCT system was used. The attenuation coefficient of each ink mark was obtained by data fitting, which was used to distinguish ink marks written with different brands of ink of the same color. Experiments show that the attenuation coefficient of PILOT ink, Deli ink, and Hero ink is in the range of 0.1333–0.1434, 0.1501–0.1695, and 0.1748–0.1892, respectively. We reconstructed X–Y cross-sectional images of characters written using different brands of ink. The ink marks can be distinguished successfully by the proposed method, which validates its feasibility.

Key words measurement; ink mark identification; swept source optical coherence tomography; attenuation coefficient; threshold processing

OCIS codes 120.5700; 110.4500; 070.2590; 220.4830

1 引言

民事与刑事案件中, 字迹造假产生的经济损失逐年增多。部分案件中有用颜色相近甚至相同的墨水对签名进行涂改、伪造的情况, 这一情况单凭肉眼无法分辨真伪。传统的墨迹鉴别方式有显微分光光

度法^[1-4]、显微红外光谱法^[1]、红外透射光谱法^[5]、反射光谱法^[6]、光谱分析^[7-14]以及光致红外荧光摄影法^[15]等。2009年吴国萍等^[1]用显微分光光度法结合显微红外光谱法对黑色中性笔字迹进行了鉴别。2010年杜建民^[6]利用反射光特性对书写痕迹进行了鉴别。2014年侯进令等^[5]用红外透射光谱分析

收稿日期: 2020-06-01; 修回日期: 2020-06-23; 录用日期: 2020-07-09

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(NS2020067)、江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX18_0111)、南京航空航天大学空间光电探测与感知工业和信息化部重点实验室开放课题资助(NJ2020021-5)、中央高校基本科研业务费资助(NJ2020021)

* E-mail: wutong@nuaa.edu.cn; ** E-mail: ywliu@nuaa.edu.cn

法对添加的字迹进行了鉴别。2018年曹艳萍等^[7]用光谱分析法对文件中的签名进行了鉴别。同年王正豪等^[4]用显微分光光度法对黑色圆珠笔字迹进行了测定。2018年,刘辉等^[15]用光致红外荧光摄影成像显现出被擦拭的可消退字迹。字迹鉴别领域以光谱分析法和显微分光光度法为主,其他方法作为补充。以上传统方法易受环境的影响,需要将样品带入特定环境的实验室中,进行变量控制的检测和鉴别,无法实现对样品的在线检测、原位检测,不利于在刑侦领域及民用领域的实际应用。

光学相干层析(OCT)成像是20世纪90年代提出的一种非接触、高分辨率、高成像速度的光学成像方法^[16-24]。在非生物检测方面如古代瓷器釉面结构特征研究^[25]、特殊陶瓷材料质量检测^[26]、区分淡水无核珍珠与海水有核珍珠等^[27]已获得广泛应用。在刑侦物证检测方面:2010年Choi等^[28]使用OCT技术对假币进行鉴别;2013年Meissner等^[29]利用OCT技术对现场指纹进行检测;2016年Zhang等^[30]使用SSOCT技术对不同品牌的车漆进行区分;2018年刘康康等^[31]基于OCT对刑侦方面常见的电工胶带进行鉴别。

本文提出基于扫频光学相干层析(SSOCT)的墨迹鉴别方法。用近红外光照射纸张上的墨迹,以墨迹背向散射光光强随纸张深度的衰减系数为鉴别指标进行墨迹鉴别。用SSOCT系统采集使用同种颜色不同品牌墨汁在白纸上书写的墨迹的三维后向散射光强度信号数据,根据光强衰减模型对后向散射光强度信号数据进行曲线拟合并提

取衰减系数,根据墨迹衰减系数的差异进行阈值处理,并将衰减系数的值作为该位置的颜色值,完成对不同品牌墨迹的鉴别。

2 方 法

如图1所示,墨迹浸润纸张的样品可以看作是由墨汁逐渐渗入纸张形成的。其中箭头代表照射样品的探测光,渐变色块代表墨迹样品,最上层墨汁残留最多,颜色最深,随着深度的增加,渗入纸张的墨汁逐渐减少,颜色逐渐变淡。样品臂探测光照射墨迹样品表面并穿透,探测光一部分反射,另一部分继续透射照射下一层。由每一层返回的后向散射光和参考光发生的干涉形成干涉光谱信号。从样品不同深度返回的背向散射光叠加形成包含样品全部深度信息的干涉光谱。通过分析处理干涉光谱信号,可测得墨迹鉴别信息。

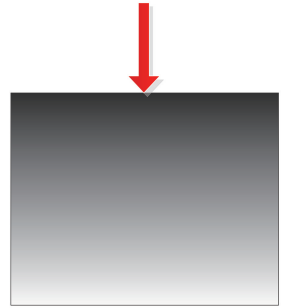


图1 墨迹样品模型示意图

Fig. 1 Model of the ink mark sample

忽略样品色散的影响,干涉光谱信号可表示为^[32-34]

$$I(k(t)) = S(k(t)) \left| a_R \exp[i2k(t)z_R] + \int_0^{\infty} a(z_S) \exp[i2k(t)z] dz_S \right|^2, \quad (1)$$

式中: $k(t)$ 为扫频光源输出的随时间变化的激光波数; $S(k(t))$ 为光源功率谱密度函数; a_R 为参考臂平面镜反射系数; z_R 和 z 分别为从参考臂平面镜和样品臂中的样品返回光的单程光程; z_S 为样品深度坐标; $a(z_S)$ 为样品不同深度的后向散射系数。不

同墨迹相邻层 $a(z_S)$ 的差值不同,即可从轴向扫描信号曲线中提取衰减系数用以鉴别墨迹。调节从参考臂平面镜返回的光程与从样品臂样品表面返回的光程,使两者相等,并以参考臂平面镜表面为参考面,即 $z_R=0$,设 $a_R=1$,则干涉光谱信号可写为

$$I(k(t)) = S(k(t)) \left| 1 + \int_0^{\infty} a(z_S) \exp[i2k(t)z_S] dz_S \right|^2 =$$

$$S(k(t)) [1 + A(k(t))] [1 + A^*(k(t))] = S(k(t)) [1 + 2\text{Re}(A(k(t))) + A(k(t))A^*(k(t))], \quad (2)$$

其中干涉光谱信号 $A(k(t))$ 表示 $a(z_S)$ 的傅里叶变换, $\text{Re}(A(k(t)))$ 表示 $A(k(t))$ 的实数部分。由(2)式可见,原始干涉光谱信号分三部分,第一部分为直流项,第二部分为参考臂和样品臂的干涉项,第三部分为样品

中不同样品层之间后向散射光的互相关项。对干涉光谱信号进行傅里叶逆变换即可得 $a(z_s)$ 。对(2)式进行傅里叶逆变换可得

$$i(z) = FT^{-1}[S(k(t))] \otimes FT^{-1}\{[1 + A(k(t))][1 + A^*(k(t))]\} = \Gamma(z) \otimes [\delta(z_s) + a(z_s)] \otimes [\delta(z_s) + a(-z_s)] = \Gamma(z) \otimes [\delta(z_s) + a(z_s) + a(-z_s) + C(a(z_s))], \quad (3)$$

其中 $\Gamma(z)$ 是 $S(k(t))$ 的傅里叶逆变换。在(3)式中,第一项代表零光程差处的直流项,第二项代表从样品不同深度返回的后向散射系数信息,第三项为第二项的复共轭项^[35],第四项 $C(a(z_s))$ 代表 $a(z_s)$ 的自相关项。对探测到的干涉光谱信号进行傅里叶变换,即可获得样品的后向散射系数信息。

3 实 验

3.1 全光纤型 3D SSOCT 成像系统

搭建的全光纤型 SSOCT 成像系统示意图如图 2 所示,该系统主要由扫频光源、光纤耦合器、环形器、二维扫描振镜系统、平衡探测器构成。扫频光

源(Axsun Inc., USA)中心波长为 1310 nm,带宽为 135 nm,扫频频率为 50 kHz。从扫频光源发出的光由 10/90 光纤耦合器分束,10%进入参考臂,90%进入样品臂。参考臂包括光纤准直镜、反射镜。样品臂包括振镜系统和聚焦物镜。振镜系统中的 X、Y 两个平面镜按一定频率振动,使探测光对样品进行二维扫描。两个环形器将来自样品臂和参考臂的返回光传导至 50/50 光纤的耦合器中,使其进行干涉。形成的干涉光谱信号由平衡探测器进行光电转换,并由数据采集卡采集,最终传入计算机进行数据处理和图像重建。搭建的 SSOCT 系统的实测轴向分辨率为 $6 \mu\text{m}$, 横向分辨率为 $16.68 \mu\text{m}$, 成像深度为 5.41 mm。

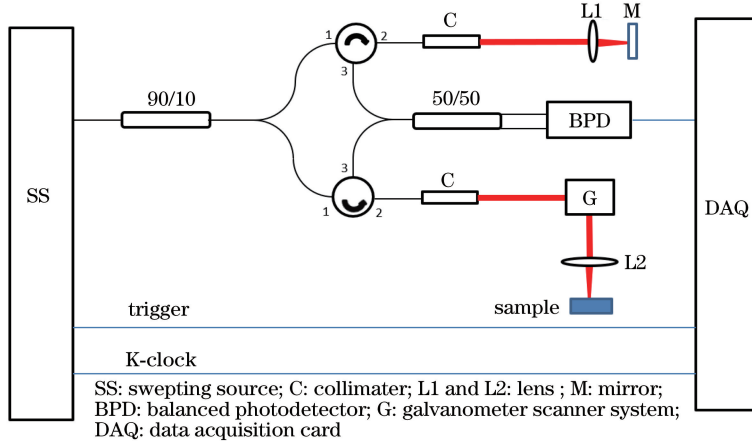


图 2 SSOCT 系统示意图

Fig. 2 Schematic of the SSOCT system

3.2 测定三种品牌墨迹的衰减系数

标定实验以颜色相同的三种品牌(得力、百乐、英雄)蓝墨汁为样品,用棉签在同一张白纸上均匀涂抹形成墨迹样品。待墨迹完全干燥固定后,用 SSOCT 系统重复扫描墨迹区域 10 次并获得对应的 10 组原始数据。使用计算机将原始数据处理后获得轴向扫描信号,将获得的 10 组轴向扫描信号数据进行平均,以平均后的轴向扫描信号数据作为标定实验的预处理数据进行曲线拟合处理。

选用高斯光强模型拟合曲线数据,提取衰减系数,即

$$I(z) = I_0 \exp(-bz), \quad (4)$$

其中 I_0 代表样品臂探测光的初始强度, b 代表衰减

系数。

用钢笔吸取得力蓝墨汁在白纸上写出字母“O”,吸取英雄蓝墨汁写出字母“C”,吸取百乐蓝墨汁写出字母“T”。与标定实验相同的数据处理方法得到预处理数据。实际书写字符时,着笔力度不同会导致不同横向位置的墨迹层起始深度位置略微不同。为了去除着笔力度不同对墨迹鉴别的影响,以预处理数据中 $a(z_s)$ 的最大值对应的轴向位置为起始位置进行曲线拟合。用(4)式对平均后的墨迹数据的后向散射光强度信号进行曲线拟合并提取衰减系数。将衰减系数按照实际位置排列成新矩阵。对衰减系数矩阵进行阈值处理即对每个衰减系数值按照标定实验获得的衰减系数区间进行映射,将阈

值处理后的矩阵进行伪彩色成像,即可得到区分品牌后的带有“OCT”字母的图像。

4 结 果

4.1 墨迹标定实验结果

图 3 所示为标定实验中使用的样品以及使用该样品获得的 OCT 强度图像和对应的后向散射光强度信号曲线。其中样品分别为用得力墨水

[图 3(a1)]、百乐墨水[图 3(a2)]和英雄墨水[图 3(a3)]形成的墨迹。图 3(b1)、图 3(c1)、图 3(d1)、图 3(e1)分别为白纸、英雄墨迹、百乐墨迹、得力墨迹的 OCT 强度图像。图 3(b2)、图 3(c2)、图 3(d2)、图 3(e2)分别代表白纸、英雄墨迹、百乐墨迹、得力墨迹的后向散射光强度信号曲线。由图中可以看出,单靠 OCT 强度图像无法区分不同品牌的墨水。

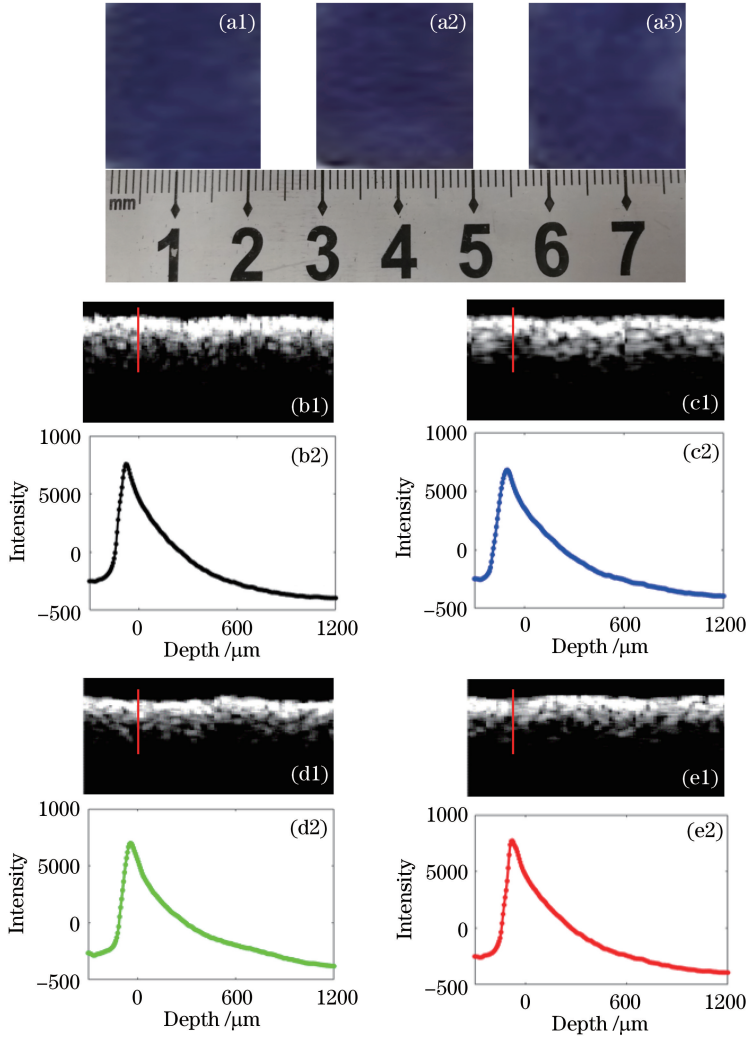


图 3 标定实验中使用的墨迹样品及实验测得的 OCT 图像和轴向扫描信号。(a1)得力墨迹样品;(a2)百乐墨迹样品;(a3)英雄墨迹样品;(b1)和(b2)白纸的 OCT 图像和对应标线位置的轴向扫描信号;(c1)和(c2)英雄墨迹的 OCT 图像和对应标线位置的轴向扫描信号;(d1)和(d2)百乐墨迹的 OCT 图像和对应标线位置的轴向扫描信号;(e1)和(e2)得力墨迹的 OCT 图像和对应标线位置的轴向扫描信号

Fig. 3 Ink mark samples used in the calibration experiment and the measured OCT images and their axial scan signal. (a1) Sample of Deli ink mark; (a2) sample of PILOT ink mark; (a3) sample of Hero ink mark; (b1) and (b2) OCT image of a white paper and the axial scan signal corresponding to the line in the Fig. 3(b1), respectively; (c1) and (c2) OCT image of Hero ink mark and the axial scan signal corresponding to the line in the Fig. 3 (c1), respectively; (d1) and (d2) OCT image of PILOT ink mark and the axial scan signal corresponding to the line in the Fig. 3 (d2); (e1) and (e2) OCT image of Deli ink mark and the axial scan signal corresponding to the red line in the Fig. 3 (e2), respectively

取图 3 中后向散射光强度信号曲线峰值以后的数据并归一化得到图 4(a)。取图 4(a)中方框内的数据进行拟合后得到图 4(b)。图 4(a)中带有菱形数据点的曲线为得力墨迹归一化实测值曲线,带有圆圈数据点的曲线为英雄墨迹归一化实测值曲线,带有星型数据点的曲线为百乐墨迹归一化实测值曲线,带有方形数据点的曲线为白纸归一化实测值曲线。图 4(b)中菱形数据点为得力墨迹归一化实测值,点线为得力墨迹拟合曲线;圆圈数据点为英雄墨迹归一化实测值,虚线为英雄墨迹拟合曲线;星型数据点为百乐墨迹归一化实测值,

点划线为百乐墨迹拟合曲线;方形数据点为白纸归一化实测值,实线为白纸拟合曲线。可以看出三种品牌墨迹(点线、虚线、点划线)的拟合曲线斜率与白纸(实线)相差较大,白纸的反射光强衰减较快,墨迹衰减较慢。三种墨迹之间反射光强的衰减速度也有差异,其中百乐墨迹(点划线)衰减最慢,得力墨迹(点线)次之,英雄墨迹(虚线)在 3 种墨迹中衰减最快。对应衰减系数 b 的范围分别为白纸 0.1816~0.2080,百乐墨迹阈值范围 0.1333~0.1434,得力墨迹范围 0.1501~0.1695,英雄墨迹范围 0.1748~0.1892。

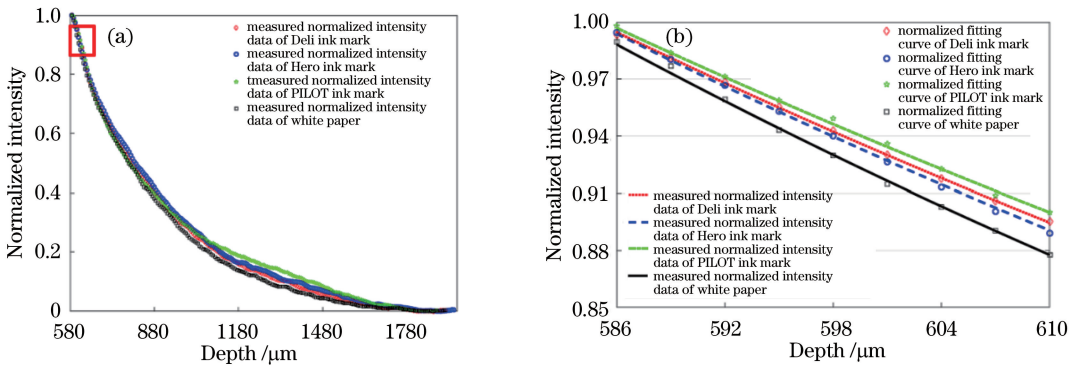


图 4 不同品牌墨迹和白纸的归一化强度数据和拟合曲线。(a)归一化强度数据;(b)归一化拟合曲线

Fig. 4 Normalized intensity data and the fitting curves of the different brands of ink mark and the white paper.

(a) Normalized intensity data; (b) normalized fitting curves

4.2 不同品牌同种颜色的墨迹鉴别结果

为验证墨迹鉴别方法的可行性,鉴别样品为分别用三种品牌蓝墨汁在同一张纸上写出的“OCT”字母。样品实际拍摄照片如图 5(a)所示,其中字母“O”使用得力牌蓝墨汁书写,字母“C”使用英雄牌蓝墨汁书写,字母“T”使用百乐牌蓝墨汁书写,单靠肉眼无法区分三种品牌的墨迹。图 5(b)为字母样品的 OCT 强度图像,可以看出 OCT 强度图像显示的

字迹对比度低,且不能区分三种不同品牌的墨迹。图 5(c)为对衰减系数矩阵按标定实验获得的衰减系数区间进行映射,即将位于 0.1333~0.1434 区间的衰减系数值映射为 1,将位于 0.1501~0.1695 区间的衰减系数值映射为 2,将位于 0.1748~0.1892 区间的衰减系数值映射为 3,并将阈值处理后的新矩阵生成伪彩色编码图像。从图 5 可清楚地区分出同种颜色不同品牌的三种墨汁书写的字迹,且字母

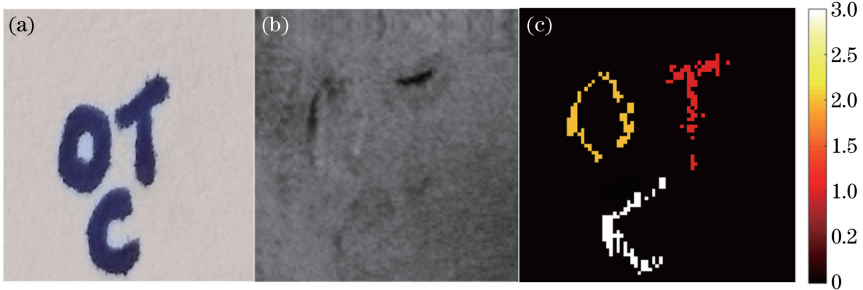


图 5 字迹样品实物照片及 OCT 图像。(a)字迹样品实物照片;(b)字迹样品 OCT 强度图像;(c)用所提出方法重建的字迹样品伪彩色图像

Fig. 5 Photograph and the OCT images of the handwriting sample. (a) Photograph of the handwriting sample written using the three kinds of ink; (b) OCT intensity image of the handwriting sample; (c) false color image of the handwriting sample reconstructed using the proposed method

显示完整。

5 结 论

提出一种基于 OCT 技术、以衰减系数为依据的墨迹鉴别方法。通过拟合后向散射光强度下降曲线,提取衰减系数。实验中测得三种品牌墨迹的衰减系数:百乐墨迹为 0.1333~0.1434,得力墨迹为 0.1501~0.1695,英雄墨迹为 0.1748~0.1892。应用本文方法可鉴别使用同种颜色不同品牌墨水书写的字母,验证了本文方法的可行性。所提方法采用的鉴别设备结构简单,易于小型化、集成化,且该方法对环境因素的影响不敏感,可以做到原位检测、在线检测,未来有望用于民用签名防伪、戳迹防伪等侦查工作中。

参 考 文 献

- [1] Wu G P, Zhao Y, Qin J. Identification of different black gel ink pen writings by microscopic spectrophotometry and FTIR microspectrometry[J]. *Journal of Instrumental Analysis*, 2009, 28(9): 999-1003.
吴国萍, 赵瑜, 秦晋. 显微分光光度法与显微红外光谱综合方法在黑色中性笔字迹鉴定中的应用[J]. *分析测试学报*, 2009, 28(9): 999-1003.
- [2] Shi Y Z, Chen Z C, Lin X F. Advances of non-destructive analysis techniques of Raman spectrometry and infrared spectrometry[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2005, 33(2): 272-276.
施玉珍, 陈志春, 林贤福. 拉曼光谱与红外光谱无损检测技术新进展[J]. *分析化学*, 2005, 33(2): 272-276.
- [3] Xu L, Wang N Y, Ba S H, et al. Application and progress of Fourier transform attenuated total reflection infrared spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2004, 24(3): 317-319.
徐琳, 王乃岩, 霸书红, 等. 傅里叶变换衰减全反射红外光谱法的应用与进展[J]. *光谱学与光谱分析*, 2004, 24(3): 317-319.
- [4] Wang Z H, Cui L, Zhao P C. Spectrophotometric determination of common black ballpoint pens [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2018, 45(10): 219-221.
王正豪, 崔岚, 赵鹏程. 显微分光光度法测定常见黑色圆珠笔字迹[J]. *广东化工*, 2018, 45(10): 219-221.
- [5] Hou J L, Zhang J. A Study on adding text to infrared transmission spectral imaging test [J]. *Journal of Hubei University of Police*, 2014, 27(4): 162-164.
侯进令, 张剑. 红外透射光谱成像检验添加文字的研究[J]. *湖北警官学院学报*, 2014, 27(4): 162-164.
- [6] Du J M. A study on feasibility of verifying handwriting with reflectivity [J]. *Journal of Chongqing University of Arts and Sciences (Natural Science Edition)*, 2010(1): 85-88.
杜建民. 利用反射光特性检验书写色痕的可行性研究[J]. *重庆文理学院学报(自然科学版)*, 2010(1): 85-88.
- [7] Cao Y P, Xu C Y, Liu Y. Application of spectroscopic analysis in documents examination[J]. *Journal of Yulin University*, 2018, 28(6): 1-5.
曹艳萍, 徐超宇, 刘艳. 光谱分析法在文件检验中的应用进展[J]. *榆林学院学报*, 2018, 28(6): 1-5.
- [8] Kumar R, Sharma V. A novel combined approach of diffuse reflectance UV-VIS-NIR spectroscopy and multivariate analysis for non-destructive examination of blue ballpoint pen inks in forensic application[J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2017, 175: 67-75.
- [9] Nam Y S, Park J S, Lee Y, et al. Application of micro-attenuated total reflectance Fourier transform infrared spectroscopy to ink examination in signatures written with ballpoint pen on questioned documents [J]. *Journal of Forensic Sciences*, 2014, 59(3): 800-805.
- [10] Zhang J Z. A study on nondestructive determination of erasable gel pen ink stains based on FTIR [J]. *Journal of Liaoning Police Academy*, 2014, 16(1): 62-65.
张金庄. 基于红外光谱无损区分可擦中性笔墨水色痕的研究[J]. *辽宁警专学报*, 2014, 16(1): 62-65.
- [11] Hu P, Hao H G. Based on gray-scale analysis using infrared spectral imaging technology for identification of changed handwritings documents [J]. *Paper Science & Technology*, 2016, 35(5): 73-76.
胡萍, 郝红光. 基于红外技术的灰度分析鉴别添改文件[J]. *造纸科学与技术*, 2016, 35(5): 73-76.
- [12] Hu S L, Shen H, Dai W L, et al. Study on application of micro-XRF mapping analysis in identification of a new kind of black paper evidence [J]. *Journal of Instrumental Analysis*, 2009, 28(7): 824-828.
胡孙林, 沈辉, 戴维列, 等. 微束 X 射线荧光光谱分析技术在一种黑色纸张物证检验中的应用研究[J]. *分析测试学报*, 2009, 28(7): 824-828.
- [13] Suzuki M, Akiba N, Kurosawa K, et al. Differentiation of black writing ink on paper using luminescence lifetime by time-resolved luminescence spectroscopy [J]. *Forensic Science International*,

- 2017, 279: 281-287.
- [14] Bai C C, Liang L N, Lin L X, et al. Differentiation of ink jet printings by microscopic Raman spectroscopy[J]. *Forensic Science and Technology*, 2014(5): 41-44.
白萃萃, 梁鲁宁, 林雷祥, 等. 显微共焦拉曼光谱技术区分喷墨打印机打印的彩色图文墨迹[J]. *刑事技术*, 2014(5): 41-44.
- [15] Liu H, Wang J T, Dai X J. Reappearance of fading writing of erasable pen with photo-fluorescence fluorophotography [J]. *Journal of Sichuan Police College*, 2018, 30(1): 49-53.
刘辉, 王江涛, 代雪晶. 采用光致红外荧光摄影显现可擦笔消褪字迹[J]. *四川警察学院学报*, 2018, 30(1): 49-53.
- [16] Huang D, Swanson E, Lin C, et al. Optical coherence tomography [J]. *Science*, 1991, 254(5035): 1178-1181.
- [17] Wang R K, Zhang A, Choi W J, et al. Wide-field optical coherence tomography angiography enabled by two repeated measurements of B-scans [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(10): 2330-2333.
- [18] Jia Y Q, Liang Y M, Zhu X N. Simulation of optical coherence tomography using Monte Carlo method[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(7): 3861-3866.
贾亚青, 梁艳梅, 朱晓农. 光学相干层析信号的模拟分析与计算[J]. *物理学报*, 2007, 56(7): 3861-3866.
- [19] Liang Y M, Zhou D C, Meng F Y, et al. A new broadband fiber light source for optical coherence tomography[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(6): 3246-3250.
梁艳梅, 周大川, 孟凡勇, 等. 一种新型的专用于光学相干层析系统的宽带光纤光源[J]. *物理学报*, 2007, 56(6): 3246-3250.
- [19] Liang Y M, Zhou D C, Meng F Y, et al. A new broadband fiber light source for optical coherence tomography[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(6): 3246-3250.
梁艳梅, 周大川, 孟凡勇, 等. 一种新型的专用于光学相干层析系统的宽带光纤光源[J]. *物理学报*, 2007, 56(6): 3246-3250.
- [20] Gao Y Z, Yuan Y, Ma Z H. High-resolution cortical blood flow imaging based on optical coherence tomography[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(11): 111101.
高英哲, 袁毅, 马振鹤. 基于光学相干层析成像的皮层血流高分辨率成像[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(11): 111101.
- [21] Wang Q, Peng H L, Wang P H, et al. Dither removing of three-dimensional optical coherence tomography retinal image [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(3): 0317001.
汪权, 朋汉林, 汪平河, 等. 光学相干层析成像眼底视网膜三维图像去抖动方法[J]. *光学学报*, 2019, 39(3): 0317001.
- [22] Luo S T, Fan Y W, Chang W, et al. Boundary region of stomach mucinous carcinoma with swept source optical coherence tomography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(5): 0517001.
罗斯特, 范应威, 常玮, 等. 扫频光学相干层析成像应用于判断黏液型胃癌边界区域[J]. *光学学报*, 2018, 38(5): 0517001.
- [23] Hou F, Yang Z H, Gu W Q, et al. Intraoperative three-dimensional imaging of neck tissues based on optical coherence tomography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(1): 0117001.
侯方, 杨子晗, 谷文青, 等. 基于光学相干层析技术的术中颈部组织三维成像[J]. *光学学报*, 2019, 39(1): 0117001.
- [24] Gao Y, Li Z L, Zhang J H, et al. Automatic measurement method for corneal thickness of optical coherence tomography images [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(3): 0311003.
高阳, 李中梁, 张建华, 等. 光学相干层析成像图像中角膜厚度的自动测量方法[J]. *光学学报*, 2019, 39(3): 0311003.
- [25] Yan X, Dong J Q, Li Q H, et al. Preliminary research in section structure characteristics of ancient glaze based on OCT technology[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(9): 0908001.
严鑫, 董俊卿, 李青会, 等. 基于 OCT 技术对古代瓷釉断面结构特征的初步研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(9): 0908001.
- [26] Yang S S, Mi L, Zhu R, et al. Non-invasive investigation of microstructure of ding kiln porcelain with optical coherence tomography [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(2): 0208002.
杨珊珊, 米磊, 朱锐, 等. 光学相干断层成像技术在定窑瓷器检测中的应用[J]. *中国激光*, 2016, 43(2): 0208002.
- [27] Dong J Q, Li Q H. Research on nondestructive measurement of sea pearls using optical coherence tomography technique [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(4): 0417004.
董俊卿, 李青会. 应用 OCT 成像技术对海水珍珠的无损测量研究[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(4): 0417004.
- [28] Choi W J, Min G H, Lee B H, et al. Counterfeit detection using characterization of safety feature on banknote with full-field optical coherence tomography [J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2010,

- 14(4): 316-320.
- [29] Msissner S, Breithaupt R, Koch E. Fingerprint fake detection by optical coherence tomography [J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8571: 85713L.
- [30] Zhang N, Wang C M, Sun Z W, et al. Characterization of automotive paint by optical coherence tomography [J]. Forensic Science International, 2016, 266: 239-244.
- [31] Liu K K, Meng L, Zhang N, et al. Characterization of electrical tapes by optical coherence tomography [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(1): 011101.
刘康康, 孟利, 张宁, 等. 基于光学相干层析技术的电工胶带检验方法[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(1): 011101.
- [32] Hausler G, Lindner M W. "Coherence radar" and "spectral radar": new tools for dermatological diagnosis[J]. Journal of Biomedical Optics, 1998, 3(1): 21-31.
- [33] Chen T C, Cense B, Pierce M C, et al. Spectral domain optical coherence tomography: ultra-high speed, ultra-high resolution ophthalmic imaging[J]. Archives of Ophthalmology, 2005, 123(12): 1715-1720.
- [34] Bentaleb-Machkour Z, Jouffroy E, Rabilloud M, et al. Comparison of central macular thickness measured by three OCT models and study of interoperator variability [J]. The Scientific World Journal, 2012, 2012: 1-6.
- [35] Szkulmowska A, Wojtkowski M, Gorczynska I, et al. Coherent noise-free ophthalmic imaging by spectral optical coherence tomography[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2005, 38(15): 2606-2611.