

光学相干层析技术在朱墨时序检验中的初步研究

蒋鹏¹, 王蔚昕², 张宁^{2*}, 王成铭³, 黄威², 石高军², 许小京², 高树辉^{1**}

¹中国人民公安大学侦查与刑事科学技术学院, 北京 100038;

²公安部物证鉴定中心现场物证溯源技术国家工程实验室, 北京 100038;

³清华大学低维量子物理国家重点实验室, 北京 100084

摘要 朱墨时序一直以来都是法庭科学文件检验领域中的难题之一。鉴于此, 首先利用一种新型的光学断层成像技术, 即光学相干层析(OCT)技术对朱墨时序进行检验, 该技术具有原位、无损、快速和高分辨率等优点。利用一套中心波长为 900 nm 的频域 OCT 系统对三种不同类型的朱墨时序样本进行 OCT 成像检验, 比较不同类型样品朱墨交叉区域的二维断层 OCT 图像的特征差异, 并分析特征差异产生的原因。初步实验研究结果表明, 利用 OCT 技术可以为朱墨时序的判断提供一种有效的处理手段, 为补充和丰富现有的方法体系奠定基础。

关键词 成像系统; 光学相干层析; 朱墨时序; 断层图像分析; 文件检验

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.221101

Preliminary Study on Determining the Sequence of Intersecting Lines Using Optical Coherence Tomography

Jiang Peng¹, Wang Weixin², Zhang Ning^{2*}, Wang Chengming³, Huang Wei²,
Shi Gaojun², Xu Xiaojing², Gao Shuhui^{1**}

¹School of Forensic Science and investigation, People's Public Security University of
China, Beijing 100038, China;

²National Engineering Laboratory for Forensic Science, Institute of Forensic Science, Ministry of Public Security,
Beijing 100038, China;

³State Key Laboratory of Low-Dimensional Quantum Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract Determination of the sequence of intersecting lines has always been one of the difficult problems in the field of forensic science document inspection. Considering this, we first use a new technology for optical tomography, specifically optical coherence tomography (OCT), to study the sequence of intersecting lines. A frequency-domain OCT system with a center wavelength of 900 nm is used to perform imaging and inspection on three different types of intersecting lines samples, to compare the feature differences of 2D tomographic OCT images of the intersecting lines of different types of samples and to analyze the feature differences. Preliminary experimental results show that OCT technology can provide an effective method for the judgment of the sequence of intersecting lines and can lay a foundation for supplementing and enriching the existing ecosystem of measurement techniques.

Key words image systems; optical coherence tomography; sequence of intersecting lines; tomography analysis; document examination

OCIS codes 110.4500; 110.6955; 110.6960

1 引言

朱墨时序检验是对文件与朱墨交叉重叠部位的

检验, 可以用来判断检验文件上的字迹与印文形成的先后顺序, 即判断是先盖章后打印(写字), 还是先打印(写字)后盖章。近年来, 随着犯罪手段日益智能化

收稿日期: 2020-02-17; 修回日期: 2020-03-26; 录用日期: 2020-03-30

基金项目: 北京市科技新星计划(xx219110)、公安部技术研究计划(2017JSYJC19)

*E-mail: zhangning@cifs.gov.cn; **E-mail: gaoshuhui@ppsuc.edu.cn

和隐蔽化,文件朱墨时序的检验越来越受到科研工作者的重视,而且成为法庭科学文件检验领域的难题之一,如有伪造者和变造者在预留印文的空白纸页上添加所需的正文内容,从而制作伪造或变造文件,还有在伪造的文书上加盖印章等。针对这类问题,朱墨时序的检验是判断该类文件真伪和相对制成时间的关键方法,为揭露犯罪事实提供有力的证据^[1]。

传统的朱墨时序检验方法包括有损检验和无损检验两类。有损检验法包括粉末吸附法、剥离减层法、交叉点切面镜检法、粘取法、溶压转印法和脱色法等^[2],上述方法的检验会消耗检材,并对检材造成不可逆的损害,从而难以进行再次检验,不利于保留证据的原始性和完整性。无损检验法包括显微观察检验^[3]、测量笔画增宽度法^[4]、表面成分分析法^[2]、定影转印法^[5]、电阻测量法^[6]和光谱检验法^[7]等。显微观察检验法包括扫描电镜检验法^[8]、荧光显微镜检验法^[9]、体式显微镜检验法^[10]、生物显微镜检验法^[10]、激光共聚焦显微镜检验法^[11]、偏光显微镜检验法^[12]、原子力显微镜检验法^[13]和三维立体显微镜检验法^[14]。体式显微镜检验法具有放大倍率较小以及对朱墨区域中的特征获取不足的缺点,操作过程主要依赖实验人员的经验;荧光显微镜检验法操作复杂,要求鉴定人员在实际的案件中选择合适的激发光源、放大倍率以及激发和压制滤光片,并综合运用共聚焦和图像处理等技术;显微三维立体成像技术检验法的准确度受限于三维成像中景深拓展所用切片的数量,操作时间较长,在实际的文件鉴定中,纸张、衬垫物和盖印压力会对结果产生影响。光谱检验法包括拉曼光谱检验法^[15]、显微分光光度检验法^[16]、傅里叶红外检验法^[17]、光谱成像检验法^[18]和视频荧光光谱检验法^[19]等。

近年来,光学相干层析(OCT)技术是引入法庭科学领域中的一种新型光学断层成像手段,具有原位、非接触、无损、高分辨和真三维断层成像等特点。该技术是由麻省理工学院的 Fujimoto 教授等^[20]在 1991 年提出,并且使用该技术得到了离体人视网膜图像。OCT 技术在医学领域中得以应用,主要涉及眼科疾病诊断^[21-23]、心血管系统诊断^[24-26]、皮肤科系统诊断^[27]、血糖检测^[28-29]、牙齿检验^[30-31]和癌症诊断^[32-35]等。近年来,OCT 技术逐渐引入到法庭科学领域中,已应用于伪造货币的检验^[36]、真伪指纹的检验^[37]、血迹形态分析^[38]、毛发检验^[39]、潜指纹检验^[40]、车身油漆物证的检验^[41]和电工胶带的检验^[42]等,并取得了初步的效果。但在

文件检验领域,特别是朱墨时序检验方面,鲜有利用 OCT 技术进行鉴别。本文利用 OCT 技术对朱墨时序问题进行检验鉴定,OCT 技术所具有的断层高分辨成像能力为朱墨时序的判别提供一种新型可靠的技术手段,从而成为现有技术的一种有力补充,进一步丰富现有的方法体系。

2 样品及方法

2.1 样品

在朱墨样品的制备方面,选用型号为 LaserJet 1505 的惠普激光打印机(简记为 J)、型号为 R330 的爱普生喷墨打印机(简记为 P)、型号为(Uni) UB-150 的三菱透视签字笔(简记为 S)、型号为 B3748 的齐心办公含印泥的印章(简记为 U)、型号为 683 的 Gongzi 含印泥的印章(简记为 N)和型号为 9864 的得力含印泥的印章(简记为 Y)在白色 A4 纸上进行朱墨交叉重叠部位的检验。印泥为一种红色印泥,主要成分为苯酚、木棉或氯化石蜡油、艾绒或蓖麻油、重晶石粉、白艳华、涂料黄、硫化汞和大红粉等。印油分为油溶性印油和水溶性印油两种,其中油溶性印油的主要成分为非极性溶剂、矿物油、植物油、表面活性剂、颜料、树脂油和油溶性染料,水溶性印油的主要成分为水、极性溶剂、水溶性染料和水溶性树脂。

选用的材料包含三种字迹材料以及两种不同性质的印油和一种印泥,对其进行组合可以获得 6 种朱墨时序的样品,即先激光打印字迹后 683 印泥(简记为 JN)、先 683 印泥后激光打印字迹(简记为 NJ)、先签字笔字迹后 B3748 水性印油(简记为 SU)、先 B3748 水性印油后签字笔字迹(简记为 US)、先喷墨打印字迹后 9864 油性颜料系快干印油(简记为 PY)和先 9864 油性颜料系快干印油后喷墨打印字迹(简记为 YP)^[43],样品全貌图像如图 1 所示。

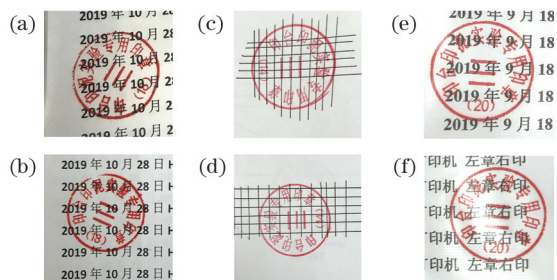


图 1 不同类型的朱墨时序样品。(a) JN; (b) NJ; (c) SU; (d) US; (e) PY; (f) YP

Fig. 1 Different types of sequence of intersecting lines.

(a) JN; (b) NJ; (c) SU; (d) US; (e) PY; (f) YP

2.2 设备和方法

频域 OCT 系统具有高速、稳定和高分辨成像的优点,因此非常适用于朱墨时序样本的检验。由于朱墨样品中的字迹或印章都是极薄的一层物质,若获取其空间结构和分布信息,要求检验系统具备较高的纵向分辨率,即深度方向可分辨的最小距离(相干长度)。根据相干成像原理,光源的中心波长越短,则纵向分辨率越高,因此频域 OCT 系统主要采用 850 nm 波段的近红外光。相比于 1310 nm 波段,850 nm 波段的频域 OCT 系统有更好的纵向分辨率。一般来说,频域 OCT 系统主要由超辐射发光二极管(SLD)光源、分光装置、参考臂、样品臂、光谱探测模块和计算机等部分组成^[44],结构如图 2 所示。该系统的基本工作原理是宽带光源发出的光经过光纤耦合器后一分为二,一部分的光经过物镜和扫描振镜后在样品上聚焦^[45],样品的散射光和背

向反射光按原路返回,另一部分的光进入参考臂后在平面镜上反射,反射光按原路后返回,此时样品臂和参考臂返回的光发生干涉^[46],在探测端使用光谱仪对干涉光谱进行探测,并进行一系列傅里叶变化等图像处理操作后,就可以实现样品在纵向深度方向的一维扫描。通过样品臂的扫描振镜可以实现样品的横向扫描,一维扫描振镜可以产生二维 OCT 图像,二维扫描振镜可以产生三维 OCT 图像^[47]。

系统中 SLD 光源的中心波长为 900 nm,带宽可达 150 nm,到达样品的光功率为 1~2 mW。系统的纵向分辨率为 3.0 μm (空气中),横向分辨率为 4 μm ,在空气中的最大成像深度为 1.9 mm,扫描速率为 36 kHz,该系统可以实现 93 dB 的高信噪比成像。系统使用型号为 LSM02-BB 的扫描物镜,工作距离为 18 mm。实验截取二维 OCT 图像的长度为 2.00 mm,深度为 0.94 mm。

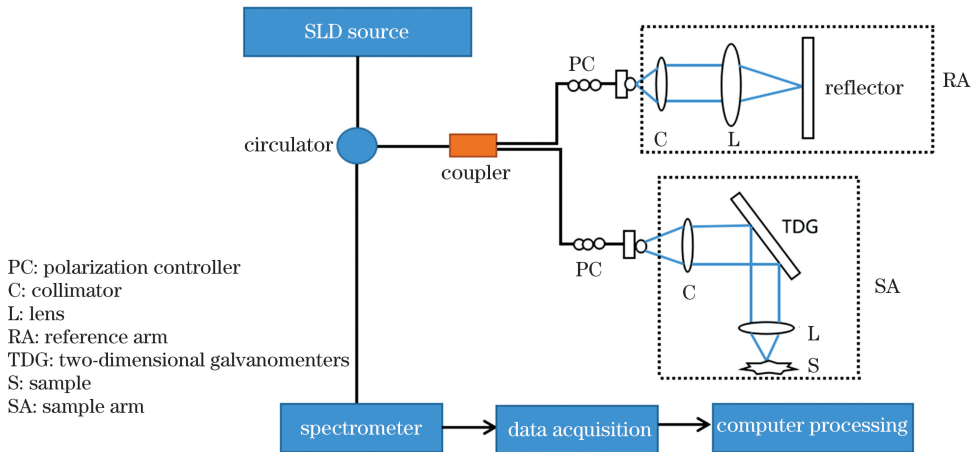


图 2 频域 OCT 系统的示意图

Fig. 2 Schematic of frequency domain OCT system

3 结果与讨论

3.1 激光打印机与印泥的朱墨时序

OCT 系统使用近红外光作为光源,该光源对朱墨时序样品有一定的穿透能力。使用 OCT 系统来探测样品内部的背向散射光和反射光,因此可以通过 OCT 图像直观地反映光在不同样品中穿透能力的强弱。若光的穿透能力越强,则返回信号就越多,在图像中呈现亮区,反之则越少,呈现暗区。当激光打印字迹与印泥形成不同时序的朱墨交叉样品时,若碳粉、印泥和纸张的成分在立体空间上的分布存在差异,则对光的吸收和散射能力也存在差

异。对 NJ 和 JN 两个不同朱墨时序的样品进行 OCT 成像实验,样品扫描区域如图 3(a)和图 3(b)箭头所示,图 3(c)和图 3(d)分别为图 3(a)和图 3(b)的二维 OCT 断层图像,图 3(e)和图 3(f)分别为图 3(c)和图 3(d)虚线处的纵向一线信号。从图 3 可以看到,光在两种物质的交界面处产生很强的散射光和反射光;在空气与样品的交界面处,即图 3(c)和图 3(d)中的上表面亮线,光在二维 OCT 断层图像中表现出较强的信号;在朱墨交叉区域,由于黑色碳粉层的吸光能力较强,相比于只有印泥区域或纸张区域,朱墨交叉区域能够穿透的光较少,所以信号强度呈现急剧衰减的趋势。

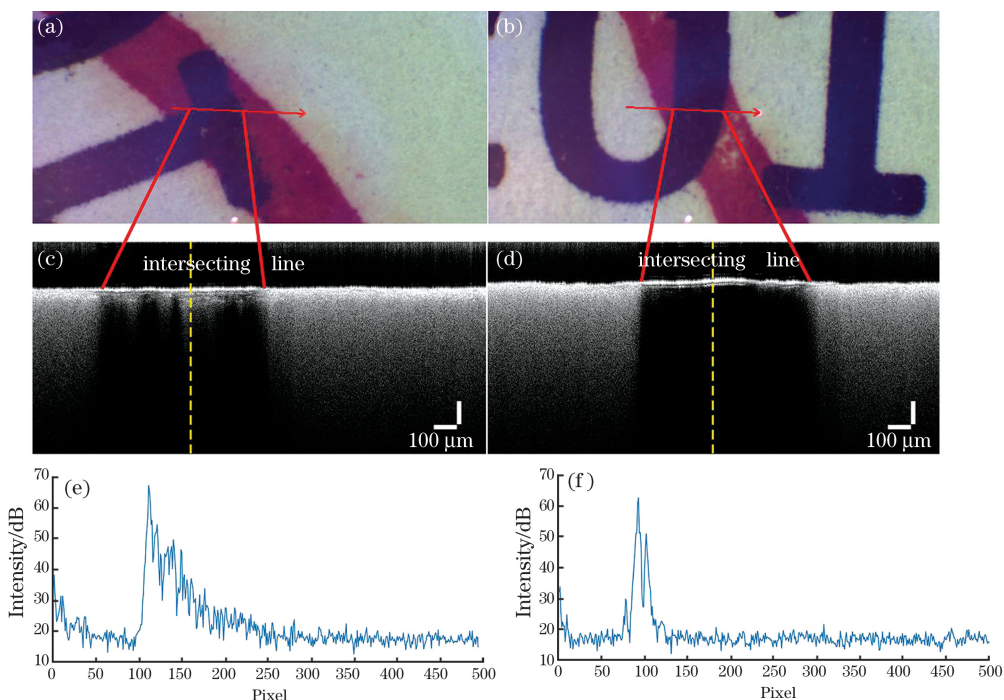


图3 NJ和JN样品的OCT成像实验结果。(a) NJ照片；(b) JN照片；(c) NJ的二维OCT断层图像；(d) JN的二维OCT断层图像；(e)图(c)虚线处的纵向一线信号；(f)图(d)虚线处的纵向一线信号

Fig. 3 OCT imaging experiment results of NJ and JN samples. (a) NJ photo; (b) JN photo; (c) two-dimensional OCT tomographic image of NJ; (d) two-dimensional OCT tomographic image of JN; (e) longitudinal signal at dotted line in Fig. (c); (f) longitudinal signal at dotted line in Fig. (d)

光在两种朱墨时序交叉部位的穿透能力存在明显差别,不同的朱墨时序交叉区域呈现不同的OCT图像特征。先朱后墨的朱墨交叉部位,在样品表面以下的一定深度范围内会观察到较多的返回光信号,说明光的穿透深度相对较深,穿透能力较强,如图3(c)所示。先墨后朱的朱墨交叉部位,在样品表面以下的深度未观察到明显的返回光信号,说明光的穿透深度较浅,穿透能力较弱,如图3(d)所示。从图3(e)和图3(f)可以看到,朱墨时序交叉部位的A-scan信号有明显差异,产生这个现象的原因:在先朱后墨的情况下,当印泥位于激光打印字迹的下方时,由于后打印的缘故,并在激光打印机加热辊的加热作用下,黑色碳粉颗粒、印泥和纸张的结合较为紧密,光的穿透能力较好,而在先墨后朱的情况下,黑色碳粉颗粒与纸张紧密结合,而印泥只是在空间中简单的物理覆盖在碳粉层之上,三者没有紧密结合,集中的碳粉层会阻挡光的进一步穿透,因此呈现图3(d)的朱墨交叉区域OCT图像特征。

3.2 签字笔和印油的朱墨时序

因印章使用的是水性印油,当盖印时印油颗粒

会渗透到纸张纤维的缝隙中,并且整合到纸张的纤维中。签字笔是水性签字笔,签字笔的墨水由添加剂、表面活性剂、着色剂和溶剂组成。添加剂包括树脂,着色剂由染料、颜料和碳黑组成,溶剂主要采用有机醇类。

对签字笔的笔迹与水性印油形成的朱墨时序样品进行检验,即对US和SU两个朱墨时序的样品进行OCT成像实验,样品扫描区域如图4(a)和图4(b)箭头所示,图4(c)和图4(d)分别为图4(a)和图4(b)的二维OCT断层图像。从图4(c)和图4(d)可以看到,两个朱墨交叉部位的OCT图像之间的特征存在差异。对于由签字笔和水性印油形成的不同朱墨时序的朱墨交叉部位而言,在先朱后墨的朱墨交叉部位,当写字时笔尖会对纸张纤维、墨水和印油产生较大的力,使得印油与纸的结合较为紧密,则光的穿透能力较强;在先墨后朱的朱墨交叉部位,墨水与纸张紧密结合在一起,而印油和纸张纤维不能紧密结合为一个整体,则光的整体穿透能力较弱。因此,当先朱后墨,即印油处于签字笔字迹的下方时,通过朱墨交叉部位的二维OCT断层图像可以发现,由于纸张纤维、签字笔墨

水和印油三者的紧密结合,则朱墨交叉部位的反射信号呈现逐渐衰减的趋势,如图 4(c)所示。但是,当先墨后朱,即印油处于签字笔字迹的上方时,通过样品朱墨交叉部位的二维 OCT 断层图像可以发现,由于印油覆盖在紧密结合的纸张和签字笔墨水之上,则朱墨交叉部位中间位置的反射信号呈现急

剧衰减的趋势,但是印章在朱墨时序区域的边缘部分有渗透,所以在朱墨交叉区域的左侧仍有一部分光信号,如图 4(d)所示。样品 US 和 SU 的纵向一线信号,如图 4(e)和图 4(f)所示。从图 4(e)和图 4(f)可以看到,样品 US 和 SU 的信号强度存在差异。

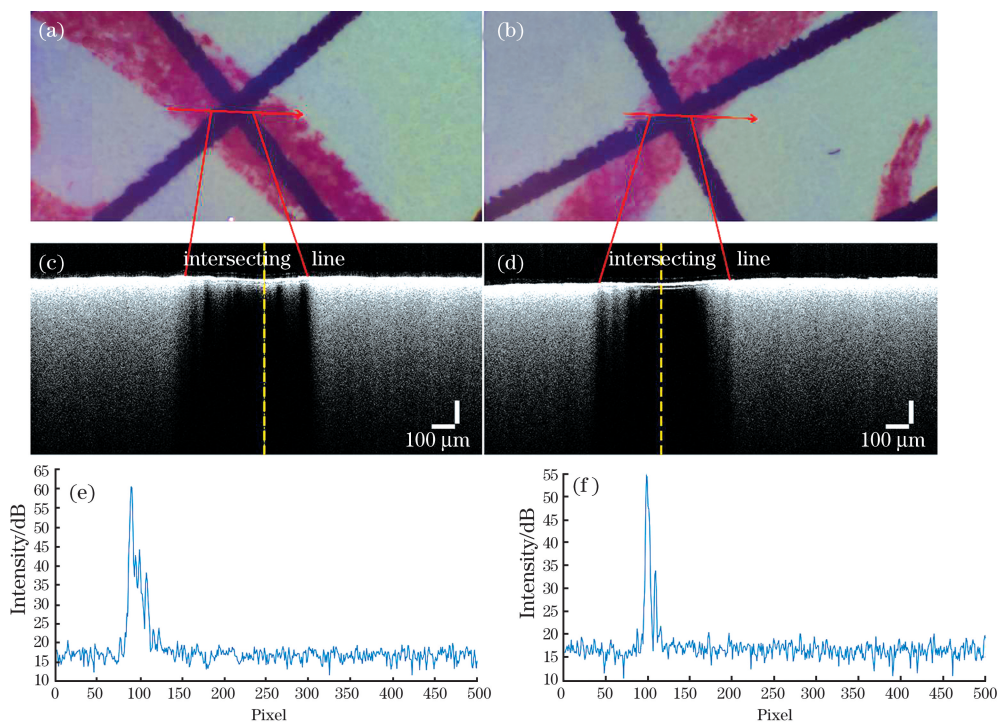


图 4 US 和 SU 样品的 OCT 成像实验结果。(a) US 照片;(b) SU 照片;(c) US 的二维 OCT 断层图像;(d)样品 SU 的二维 OCT 断层图像;(e)图(c)虚线处的纵向一线信号;(f)图(d)虚线处的纵向一线信号

Fig. 4 OCT imaging experiment results of US and SU samples. (a) US photo; (b) SU photo; (c) two-dimensional OCT tomographic image of US; (d) two-dimensional OCT tomographic image of SU; (e) longitudinal signal at dotted line in Fig. (c); (f) longitudinal signal at dotted line in Fig. (d)

3.3 喷墨打印机和印油的朱墨时序

喷墨打印机的墨水可以分为颜料墨水和染料墨水,其中颜料墨水是一种悬浮剂,而染料墨水具有水溶性的性质,着色剂在墨水介质中可以完全溶解,实验选用的是染料墨水。

对喷墨打印机与印油形成的朱墨时序样品进行检验,对 YP 和 PY 两个朱墨时序的样品进行 OCT 成像实验,样品扫描区域如图 5(a)和图 5(b)箭头所示,图 5(c)和图 5(d)分别为图 5(a)和图 5(b)的二维 OCT 断层图像。从图 5(c)和图 5(d)可以看到,喷墨打印字迹与印油形成的朱墨交叉部分的朱墨时序无法从 OCT 图像上进行判断。原因在于喷墨打印机先产生小墨滴,再利用喷墨头把细小的墨滴导引至设定的位置上^[48],无论是先墨后朱还是先朱后墨,喷墨打印机的墨水与印油

中的成分互溶性很好,使得喷墨打印机的染料墨水、印油和纸张纤维三者结合成一个整体,则光的穿透性很强,所以在二维 OCT 图像中表现出很强的散射信号,因此在这种情形下不同朱墨时序的样品无法通过二维 OCT 断层图像来判断。

3.4 讨论

3.1~3.3 节使用的三种“朱”和三种“墨”是比较有代表性的样本,其中“朱”包含最常用的水性和油性的印油,“墨”包含激光打印机和签字笔的油墨,这些都在案件中使用最为广泛。针对每组样品均重复进行多次实验,并选取多个区域进行重复测试,均得到与上述实验类似的结果。实验初步将 OCT 技术应用在朱墨时序的检验中,为朱墨时序的检验提供一种新的处理手段。相比于其他典型方法,如三维立体显微镜检验法和荧光显微镜检验法

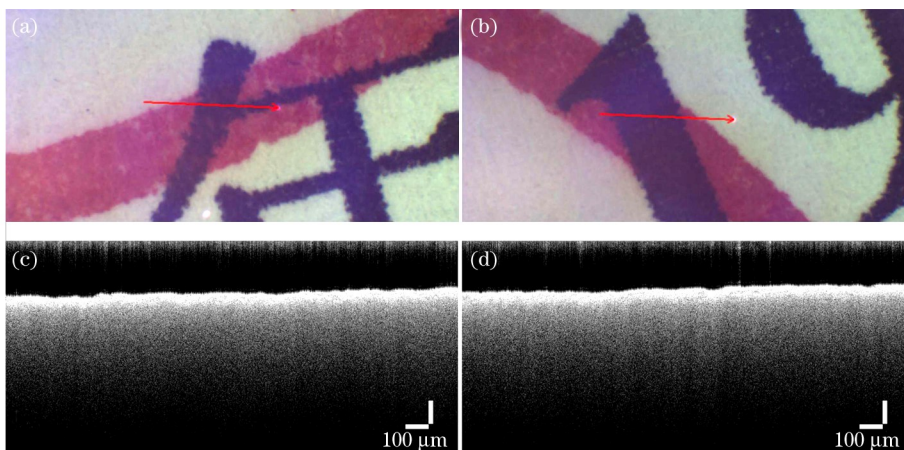


图5 YP和PY样品的OCT成像实验结果。(a) YP照片；(b) PY照片；(c) YP的二维OCT断层图像；(d) PY的二维OCT断层图像

Fig. 5 OCT imaging experiment results of YP and PY samples. (a) YP photo; (b) PY photo; (c) two-dimensional OCT tomographic image of YP; (d) two-dimensional OCT tomographic image of PY

等,所提方法获得的是深度特征和分层信息,实际检验中可以作为一种补充数据,并与传统方法的优势进行互补。在后续的实验,将针对朱墨样本的物理和化学性质进一步提取定量特征,从而更有效地鉴别朱墨时序。

4 结 论

利用OCT技术对三种不同种类的朱墨时序样品(激光打印机和印泥、签字笔和印油、喷墨打印机和印油)进行成像检验,得到6组不同朱墨时序样品的二维OCT断层图像。初步实验研究结果表明,对于激光打印机和印泥以及签字笔和印油的情况,不同朱墨时序样品的朱墨交叉区域在二维OCT断层图像上的特征均存在差异,并对这种差异形成的原因进行分析。利用朱墨时序样品的二维OCT断层图像,并根据光在不同样品中的穿透能力强弱,实现对朱墨时序的辅助检验。但是对于喷墨打印机和印油等互溶性样品的检验仍然存在一定的局限性,需要对其进行进一步研究。总而言之,OCT技术具有原位、无损、快速、直观和高分辨断层成像的优势,在实践中将OCT技术与传统检验方法结合使用,可以提高朱墨时序的鉴别准确度。

参 考 文 献

[1] Poulin G. Establishing the sequence of strokes: the state of the art[J]. International Journal of Forensic Document Examiners, 1996, 2(1): 16-32.
[2] Han W. Theory and new technology of identification of seals and stamps identification about forensic

science [M]. Beijing: Chinese People's Public Security University Press, 2018: 7-15.

韩伟. 法庭科学印章印文鉴定理论与新技术[M]. 北京: 中国人民公安大学出版社, 2018: 7-15.

[3] Ellen D. The scientific examination of documents: methods and techniques [M]. 2nd ed. London: Taylor & Francis, 1997.

[4] Feng C, Liu K M, Li J. The research of sequence determination of seal and printed characters by measuring the stroke width[J]. Forensic Science and Technology, 2012(2): 35-38.

冯超, 刘坤明, 李静. 测量笔画增宽度判断激光打印文件朱墨时序初探[J]. 刑事技术, 2012(2): 35-38.

[5] Wang X G, Hao H G, Wang J S, et al. Experimental study on the timing of printed text and laser printed handwriting using fuser transfer method [J]. Journal of Chinese People's Public Security University (Science and Technology), 2011, 17(2): 5-8.

王晓光, 郝红光, 王锦生, 等. 利用定影转印法判定印文与激光打印字迹时序的实验研究[J]. 中国人民公安大学学报(自然科学版), 2011, 17(2): 5-8.

[6] Han W. A study on identification of analyzing the sequence of handwriting and stamp by resistance measurement technology [J]. Journal of Criminal Investigation Police University of China, 2019(5): 97-102.

韩伟. 利用电阻测量技术鉴别朱墨时序[J]. 中国刑警学院学报, 2019(5): 97-102.

[7] Radley R W. Determination of sequence of ball point pen writing utilizing infrared luminescence techniques

- [J]. Journal of the Forensic Science Society, 1982, 22(4): 373-375.
- [8] Kim J, Kim M, An J, et al. Determination of the sequence of intersecting lines using focused ion beam/scanning electron microscope[J]. Journal of Forensic Sciences, 2016, 61(3): 803-808.
- [9] Li B, Ouyang G L, Zhao P N. Preliminary study on determining the sequence of intersecting lines by fluorescence technique [J]. Journal of Forensic Sciences, 2018, 63(2): 577-582.
- [10] Jia Y W, Zou M L. Inspection of Chinese criminal science and technology encyclopedia [M]. Beijing: Chinese People's Public Security University Press, 2002.
贾玉文, 邹明理. 中国刑事科学技术大全文件检验 [M]. 北京: 中国人民公安大学出版社, 2002.
- [11] Cheng K C, Chao C H, Jeng B S, et al. A new method of identifying writing sequence with the laser scanning confocal microscope[J]. Journal of Forensic Sciences, 1998, 43(2): 348-352.
- [12] Wei S, Liu S, Chen W N, et al. Sequencing of the crossed stamp impression and printed text by polarized microscope[J]. Chinese Journal of Forensic Sciences, 2018(4): 60-63.
魏松, 刘烁, 陈维娜, 等. 偏振光显微镜判断激光打印文件朱墨时序实验初探[J]. 中国司法鉴定, 2018(4): 60-63.
- [13] Kasas S, Khanmy-Vital A, Dietler G. Examination of line crossings by atomic force microscopy [J]. Forensic Science International, 2001, 119 (3): 290-298.
- [14] Song Z Y, Bai X F. Sequencing of cross strokes by three-dimensional stereomicroscope [J]. Chinese Journal of Forensic Sciences, 2018(3): 56-60.
宋朝阳, 白晓峰. 利用三维立体显微镜判断笔画交叉时序探究[J]. 中国司法鉴定, 2018(3): 56-60.
- [15] Fabiańska E, Kunicki M. Raman spectroscopy as a new technique for determining the sequence of intersecting lines[J]. Problems of Forensic Sciences, 2003, 53: 60-73.
- [16] Li B. An examination of the sequence of intersecting lines using microspectrophotometry [J]. Journal of Forensic Sciences, 2016, 61(3): 809-814.
- [17] Bojko K, Roux C, Reedy B J. An examination of the sequence of intersecting lines using attenuated total reflectance Fourier transform infrared spectral imaging[J]. Journal of Forensic Sciences, 2008, 53(6): 1458-1467.
- [18] Bao R, Zhang C X. Research on the application of spectral imaging in sequencing writing and stamp impressions [J]. Chinese Journal of Forensic Sciences, 2008(5): 36-38.
暴仁, 张淙溪. 光谱成像检验法在朱墨时序鉴定中的应用[J]. 中国司法鉴定, 2008(5): 36-38.
- [19] Kaur R, Saini K, Sood N C. Application of video spectral comparator (absorption spectra) for establishing the chronological order of intersecting printed strokes and writing pen strokes[J]. Science & Justice, 2013, 53(2): 212-219.
- [20] Huang D, Swanson E, Lin C, et al. Optical coherence tomography [J]. Science, 1991, 254(5035): 1178-1181.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] Cense B, Chen T C, Park B H, et al. *In vivo* birefringence and thickness measurements of the human retinal nerve fiber layer using polarization-sensitive optical coherence tomography[J]. Journal of Biomedical Optics, 2004, 9(1): 121-125.
- [24] Chen Z P, Zhao Y H, Srinivas S M, et al. Optical Doppler tomography [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 1999, 5(4): 1134-1142.
- [25] 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.
- [26] Li P, Li P. Mass sample optical coherence tomography angiography technology and application [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(3): 0307001.

- 李培, 李鹏. 多样本光学相干血流运动造影技术及应用[J]. 中国激光, 2018, 45(3): 0307001.
- [27] Welzel J, Lankenau E, Birngruber R, et al. Optical coherence tomography of the human skin[J]. Journal of the American Academy of Dermatology, 1997, 37(6): 958-963.
- [28] Fu L, Su Y, Li G H, et al. Application of maximum likelihood type estimates in noninvasive blood glucose monitoring *in vivo* using optical coherence tomography[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(3): 031701.
付磊, 苏亚, 李果华, 等. 广义极大似然估计在 OCT 无创血糖监测中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(3): 031701.
- [29] Su Y, Meng Z, Wang L Z, et al. Correlation analysis and calibration of noninvasive blood glucose monitoring *in vivo* with optical coherence tomography[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(7): 0704002.
苏亚, 孟卓, 王龙志, 等. 光学相干层析无创血糖检测中相关性分析及标定[J]. 中国激光, 2014, 41(7): 0704002.
- [30] Sun W, Li J N, Qi L Y, et al. Detection of dental root fractures based on endoscopic swept source optical coherence tomography [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(8): 0811002.
孙伟, 李嘉男, 戚蒗源, 等. 内窥扫频光学相干层析探测牙齿根裂的研究[J]. 光学学报, 2019, 39(8): 0811002.
- [31] Shi B Y, Meng Z, Liu T G, et al. Non-distorted imaging depth of optical coherence tomography system in human dental tissues [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0217001.
石博雅, 孟卓, 刘铁根, 等. OCT 系统对人体牙齿组织的非失真成像深度的研究[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0217001.
- [32] Wang Z G, Durand D B, Schoenberg M, et al. Fluorescence guided optical coherence tomography for the diagnosis of early bladder cancer in a rat model [J]. Journal of Urology, 2005, 174(6): 2376-2381.
- [33] Si P J, Wang L, Xu M E, et al. Tumor cell invasion imaging based on optical coherence tomography[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(9): 0907003.
斯培剑, 王玲, 徐铭恩. 基于光学相干层析成像技术的肿瘤细胞侵袭成像[J]. 中国激光, 2019, 46(9): 0907003.
- [34] 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, 杨子哈, 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.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] Meissner S, Breithaupt R, Koch E. Fingerprint fake detection by optical coherence tomography [J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8571: 85713L.
- [38] Laan N, Bremmer R H, Aalders M C G, et al. Volume determination of fresh and dried bloodstains by means of optical coherence tomography [J]. Journal of Forensic Sciences, 2014, 59(1): 34-41.
- [39] Choi W J, Pi L Q, Min G, et al. Qualitative investigation of fresh human scalp hair with full-field optical coherence tomography [J]. Journal of Biomedical Optics, 2012, 17(3): 036010.
- [40] Dubey S K, Anna T, Shakher C, et al. Fingerprint detection using full-field swept-source optical coherence tomography[J]. Applied Physics Letters, 2007, 91(18): 181106.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] Chen J T, Chen W N. Research on the application of micro 3D stereo imaging technology in sequencing writing and stamp impressions [J]. Journal of Railway Police College, 2016, 26(2): 36-40.
陈建涛, 陈维娜. 基于显微三维立体成像技术的朱墨

- 时序鉴别方法[J]. 铁道警察学院学报, 2016, 26(2): 36-40.
- [44] Drexler W, Fujimoto J G. Optical coherence tomography[M]. Berlin: Springer, 2008.
- [45] Zhang Q Q. Spectral domain optical coherence tomography and the application in biomedicine[D]. Tianjin: Nankai University, 2012: 25.
张芹芹. 谱域光学相干层析成像技术及其生物医学应用研究[D]. 天津: 南开大学, 2012: 25.
- [46] Wang L. Research and implementation of wideband high resolution frequency synthesizer[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017: 8.
- 王雷. 光学相干层析系统中的三维成像技术[D]. 成都: 电子科技大学, 2017: 8.
- [47] Zhang N. Study of the endoscopic spectral-domain optical coherence tomography[D]. Beijing: Tsinghua University, 2014: 3.
张宁. 内窥镜频域光学相干 CT 研究[D]. 北京: 清华大学, 2014: 3.
- [48] Pan W B. Modeling and analysis of thermal bubble inkjet based on hybrid system theory [D]. Xi'an: Xidian University, 2010: 7-9.
潘文宾. 基于混杂系统理论的热泡式喷墨的建模与分析[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010: 7-9.