

# 光学相干层析技术在打印文书朱墨时序判别中的实验研究

蒋鹏<sup>1</sup>, 吴迪<sup>1</sup>, 谢菲<sup>1</sup>, 高树辉<sup>1\*</sup>, 蔡能斌<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中国人民公安大学侦查学院, 北京 100038;

<sup>2</sup>上海市现场物证重点实验室, 上海 200083

**摘要** 打印文书与印章交线先后顺序的判断是鉴定文件真伪和相对制成时间的关键内容。利用中心波长为 900 nm 的谱域光学相干层析(OCT)系统对激光打印机和喷墨打印机与油性和水性两种印油印章制成的若干相交线样本进行检测,通过获取的交线区域二维断层成像和三维立体图像,比较两类打印机制成的样本在 OCT 检验下的成像特征,进而判断朱墨时序。对 120 个样品,包括 30 组激光打印机与印油的朱墨时序样品和 30 组喷墨打印机与印油的朱墨时序样品进行了比较研究,每组样品均选取了多个区域重复测试。实验结果表明,激光打印机和喷墨打印机形成的相同朱墨时序样本的 OCT 图像在透射光亮度分布上形成的反差是不一致的,这可为判别打印文书和印章的交线顺序提供参考。

**关键词** 成像系统; 光学相干层析技术; 朱墨时序; 打印文书; 印章; 实验研究

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1011005

## Experiment of Optical Coherence Tomography in Determining the Sequence of Intersecting Lines of Printed Documents

Jiang Peng<sup>1</sup>, Wu Di<sup>1</sup>, Xie Fei<sup>1</sup>, Gao Shuhui<sup>1\*</sup>, Cai Nengbin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Investigation, People's Public Security University of China, Beijing 100038, China;

<sup>2</sup>Shanghai Key Laboratory of Crime Scene Evidence, Shanghai 200083, China

**Abstract** The intersection of a printed document and stamp-seal determined in a sequence is one important method for confirming the authenticity and relative manufacturing time of document components. The spectral domain optical coherence tomography (OCT) system having a wavelength of 900 nm is used to examine several intersecting line samples made using laser and inkjet printers with oil-based and water-based stamp seals, thus obtaining 2D tomographic and 3D stereo images of the intersection line region to compare the imaging characteristics presented using two types of printers and determine the intersecting line sequence. This study investigated 120 intersecting line samples, including 30 groups made by laser printers and stamp seals and 30 groups obtained using inkjet printers and stamp seals. Each group of samples was repeated multiple times, and multiple areas were selected to repeat the test. The experimental results show that the contrast in the luminance distribution of the transmitted light reflected in the OCT images of the same intersecting line sequence formed by laser and inkjet printers differed. This can provide a reference for discriminating the intersection line sequence of printed documents and stamp seals.

**Key words** imaging systems; optical coherence tomography; intersecting line sequence; printed document; stamp seal; experimental research

收稿日期: 2021-07-01; 修回日期: 2021-08-11; 录用日期: 2021-08-27

基金项目: 中国人民公安大学基本科研业务费(2021XXFZ001)、中国人民公安大学公共安全行为科学实验室开放课题基金(2020SYS18)、上海市现场物证重点实验室开放课题基金(2021XCWZK03)

通信作者: \*gaoshuhui@ppsuc.edu.cn

## 1 引言

在文件检验活动中,判断文书制作时间和证明文件真伪常需鉴定打印文书与印章印文的先后顺序。现有的检验方法虽然成熟,但具有局限性,例如荧光显微镜检验法<sup>[1]</sup>需要共聚焦与图像处理技术相结合才能获取高质量的图像;偏光显微镜检验法<sup>[2]</sup>对墨粉分散型激光打印文字的朱墨顺序检验效果较差。传统的无损检验法大都是基于光学仪器所反映的待测样本表面二维信息进行观察和分析的。由于打印文字和印章交线的不同先后顺序会呈现出不同的纵向痕迹重叠结构,若想同时获得待测样本的纵向深度信息,只能通过切片进行有损检验,不利于样本证据的完整保存。

光学相干层析(OCT)技术<sup>[3]</sup>是20世纪90年代发展起来的一种新型光学断层成像技术,具有原位、非接触、无损、高分辨、真三维断层成像等特点。近年来,国内外研究人员开始挖掘OCT技术在法庭科学领域的潜力。2014年,Laan等<sup>[4]</sup>通过OCT技术对不同客体上各类血迹形态进行三维成像,并对溅射角度进行分析,为现场重建提供了帮助。同年,Brown等<sup>[5]</sup>通过OCT技术观察到不同时段尸蝇的形态特征差异,为推断死者的死亡时间提供一定依据。2016年,Zhang等<sup>[6-7]</sup>利用OCT技术对汽车油漆物证进行二维剖面 and 三维立体成像。2018年,Zhang等<sup>[8]</sup>又利用自主搭建的OCT系统重现了隐藏于不同类型胶带下的潜在指印。2020年,蒋鹏等<sup>[9]</sup>对激光打印机、喷墨打印机、签字笔3种样品的朱墨交叉区域二维断层OCT图像的特征差异进行了初步对比分析,为该项技术应用于朱墨时序判定提供了重要参考,但并未对同种类型的朱墨时序样本二维断层OCT图像所反映光学特征的共性和差异进行深度剖析和比对,未对交叉区域三维图像进行辅助判别。

本文利用OCT技术高分辨、强层析等成像特点,获得打印文字与印文相交线区域的二维截面和三维立体图像,并选取特征区域进行比对分析,比较激光打印机和喷墨打印机分别与印章形成朱墨时序样本的OCT图像的光学信号特征差异,拟为朱墨时序检验提供方法补充。

## 2 设备与方法

### 2.1 实验设备

谱域OCT(SD-OCT)技术<sup>[10]</sup>作为光学低相干

干涉测量技术,其核心是迈克耳孙干涉仪,利用宽带光源的低相干性来进行样本深度位置信息的定位。实验所用的OCT系统原理如图1所示,主要由超辐射发光二极管(SLD)光源、光纤耦合器、参考臂(主要由准直器、反射镜构成)、样本臂(主要由准直器、物镜、扫描振镜构成)、光谱仪、计算机等部分构成。其工作原理<sup>[11]</sup>如下:系统以SLD作为照明光源,其发出的宽带近红外光经过光纤耦合器时被分成两束,一束进入参考臂,经平面镜反射后原路返回;另一束则射向样本臂,经过准直器、物镜、扫描振镜后聚焦在样本上,样本的反射光和散射光经物镜收集后原路返回,从样本臂和参考臂返回的光经过光纤耦合器发生干涉并传输到光谱仪中,光谱仪检测到的光谱干涉信号进入计算机后进行一系列傅里叶变换等图像处理,最终实现样本的剖面成像。

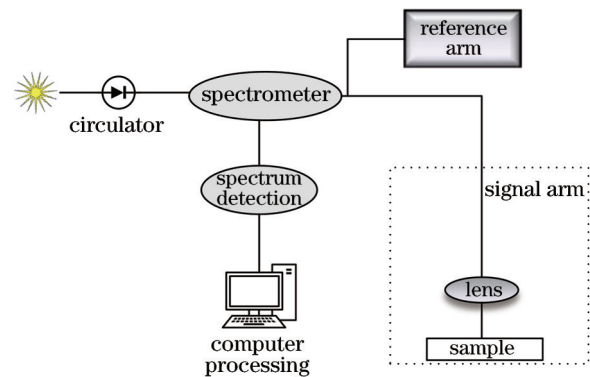


图1 谱域OCT系统工作原理图

Fig. 1 Schematic diagram of spectral domain OCT system

在光谱域OCT系统中,系统的横向分辨率和轴向分辨率是相互独立的,横向分辨率取决于光源的中心波长 $\lambda$ 和样本臂中聚焦物镜的数值孔径( $NA, R_{NA}$ ):

$$\Delta x = 0.37 \frac{\lambda}{R_{NA}}. \quad (1)$$

轴向分辨率表征系统对样本纵向层析成像所能分辨的最小距离,即相干长度,由光源中心波长 $\lambda$ 和光源带宽 $\Delta\lambda$ 决定:

$$\Delta z = \frac{2 \ln 2}{\pi} \cdot \frac{\lambda^2}{\Delta \lambda}. \quad (2)$$

谱域OCT系统的成像深度<sup>[12]</sup>与光源波长、功率所能穿透样本的深度、样本对各光源波长的散射和反射特性有关,但光谱仪的分辨率是影响其成像深度的最主要因素。在不考虑样本折射率的影响下,谱域OCT系统的成像深度可表示为

$$Z_{\max} = \frac{\lambda^2}{4\delta\lambda}, \quad (3)$$

式中： $\delta\lambda$ 为波长表示的光谱分辨率。由式(2)可知，系统的轴向分辨能力和光源的中心波长呈负相关，即可以通过增大光源带宽或降低光源的中心波长来提高 OCT 系统的轴向分辨率；由式(3)可知，系统成像深度和光源中心波长呈正相关，即可以通过增加光源的中心波长来增大系统的成像深度。因此，要根据待测样本性质和检验目标对 OCT 系统光源的中心波长进行选择。

实验中，待测样本上的字迹油墨和印章痕迹都是一层极薄的物质，为了更为清晰准确地获取其内部空间结构分布，要求系统具有较高的轴向分辨率。实验采用中心波长为 900 nm 的 SLD 光源的谱域 OCT 系统。在空气中，系统的横向分辨率为 4.0  $\mu\text{m}$ ，轴向分辨率为 3.0  $\mu\text{m}$ ，带宽为 150 nm，空气中最大成像深度为 1.9 mm，扫描速率为 36 kHz，信噪比可达 93 dB，到达样品的光功率约为 1 mW，扫描物镜型号为 LSM02-BB，工作距离为 18 mm，实验采集的朱墨时序样本区域大小为 2.0 mm  $\times$  1.2 mm。

### 2.2 实验方案

本实验组对 120 个样品(30 组激光打印机与印泥印油的朱墨时序样品、30 组喷墨打印机与印泥印油的朱墨时序样品)进行了研究，样品制作的时间间隔相同(盖章、打印及扫描成像之间)，盖印为一人操作，力度和均匀度控制相对稳定。每组样品都重复了多次，选取了多个区域进行重复测试，得到了类似的结果，由于篇幅限制，选择了其中 4 组数据(2 组 HP 激光打印机与印泥印油的朱墨时序样品、2 组 Canon 和 Brother 喷墨打印机与印泥印油的朱墨时序样品)进行展示，如表 1 和表 2 所示。激光打印机 L1、喷墨打印机 P1 与油溶印油 1 代表第 1 组实验结果，激光打印机 L2、喷墨打印机 P2 与水溶印油 2 代表第 2 组实验结果，共 8 个样本(如表 3 所示)，S 代表先盖印章，再打印文书，P 代表先打印文书，再

表 1 打印机的种类  
Table 1 Types of laser printer

No.	Brand	Type	Model
L1	HP	Laser printer	Laser Jet M1522nf
L2			Color Laser Jet CP5225
P1	Canon	Ink jet printer (thermal bubble)	iP7280
P2	Brother	Ink jet printer (micro piezoelectric)	T300

表 2 印油的种类  
Table 2 Types of stamp-pad ink

No.	Brand	Type	Model
1	Deli	Oil-based	NO. 9874
2		Water-based	No. 9868

表 3 样本编号  
Table 3 Sample No.

Group number	Sample ID	Printer	Stamp-pad Ink
Group 1	L1-S	L1	1
	L1-P		
	P1-S	P1	
	P1-P		
Group 2	L2-S	L2	2
	L2-P		
	P2-S	P2	
	P2-P		

盖印章。本实验严格采用控制变量法。实验所用的纸张是得力佳宣的 70 g/m<sup>2</sup> 的 A4 纸；样本制作时，不同打印机都正常打印输出样本。

## 3 结果与讨论

基于 OCT 断层成像对激光打印机、喷墨打印机分别与印章印文的朱墨时序样本进行实验研究，图 2~5 中的(a)和(b)中的矩形框代表样本的感兴趣区域(ROI)，中间线段为自左向右的扫描方向和路径；(c)和(d)代表二维 OCT 断层图像，即扫描路径所对应的横截面图像；(e)和(f)代表三维 OCT 立体图像，即 ROI 处样品的上表面；(a)、(c)、(e)为先盖章后打印的结果，(b)、(d)、(f)为先打印后盖章的结果。

### 3.1 激光打印机的结果与分析

从第 1 组激光打印机 OCT 成像结果(图 2)可以看出：先盖章后打印的样本 L1-S 在 OCT 二维断层图中，有少量光返回信号，其交线处的三维成像有些许噪声点；而先打印后盖章的样本 L2-P 在 OCT 二维断层图中，无光返回信号，其交线处的三维成像无噪声点。从第 2 组激光打印机 OCT 成像结果(图 3)可以看出：先盖章后打印的样本 L2-S 在 OCT 二维断层图中，有大量光返回信号，且信号较连续，其交线处的三维成像噪声明显；而先打印后盖章的样本 L2-P 在 OCT 二维断层图中，有少量光返回信号，且信号不连续，其交线处的三维成像几乎无噪声。

因此，在激光打印机与印章的交线顺序 OCT 判别中，先盖章后打印的样本，其二维断层成像的光返回信号强，光穿透能力较强，穿透深度深；其三维立



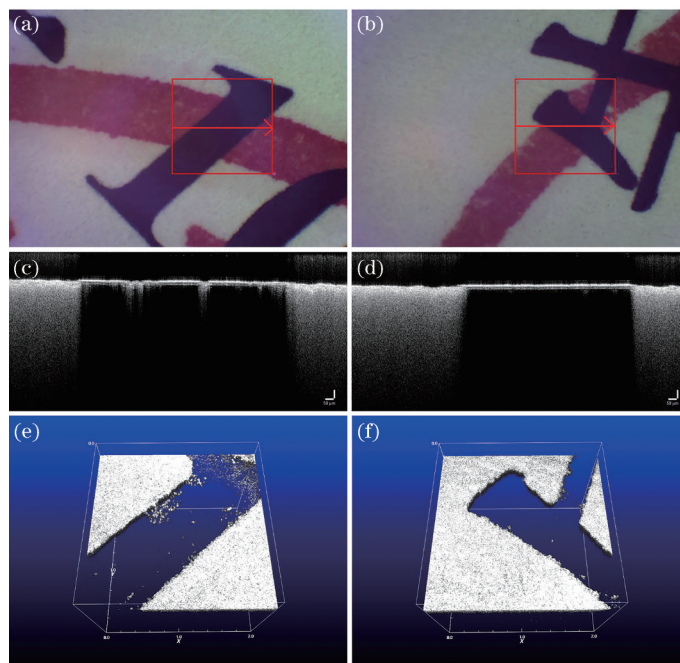


图 2 样本 L1-S 与 L1-P 的 OCT 成像对比。(a) 样本 L1-S 的成像区域原貌；(b) 样本 L1-P 的成像区域原貌；(c) 样本 L1-S 的 OCT 二维成像；(d) 样本 L1-P 的 OCT 二维成像；(e) 样本 L1-S 的 OCT 三维成像；(f) 样本 L1-P 的 OCT 三维成像

Fig. 2 OCT imaging comparison between sample L1-S and sample L1-P. (a) Original appearance of imaging area of sample L1-S; (b) original appearance of imaging area of sample L1-P; (c) OCT two-dimensional imaging of sample L1-S; (d) OCT two-dimensional imaging of sample L1-P; (e) OCT three-dimensional imaging of sample L1-S; (f) OCT three-dimensional imaging of sample L1-P

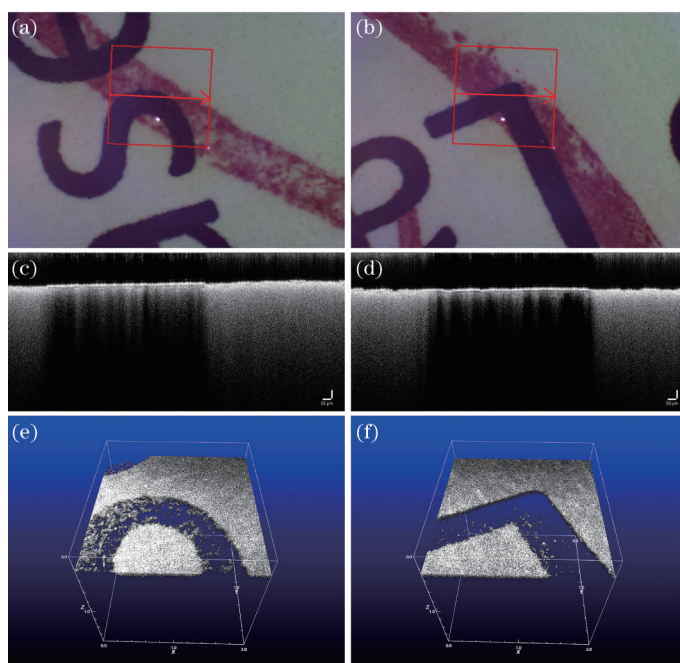


图 3 样本 L2-S 与 L2-P 的 OCT 成像对比。(a) 样本 L2-S 的成像区域原貌；(b) 样本 L2-P 的成像区域原貌；(c) 样本 L2-S 的 OCT 二维成像；(d) 样本 L2-P 的 OCT 二维成像；(e) 样本 L2-S 的 OCT 三维成像；(f) 样本 L2-P 的 OCT 三维成像

Fig. 3 OCT imaging comparison between sample L2-S and sample L2-P. (a) Original appearance of imaging area of sample L2-S; (b) original appearance of imaging area of sample L2-P; (c) OCT two-dimensional imaging of sample L2-S; (d) OCT two-dimensional imaging of sample L2-P; (e) OCT three-dimensional imaging of sample L2-S; (f) OCT three-dimensional imaging of sample L2-P

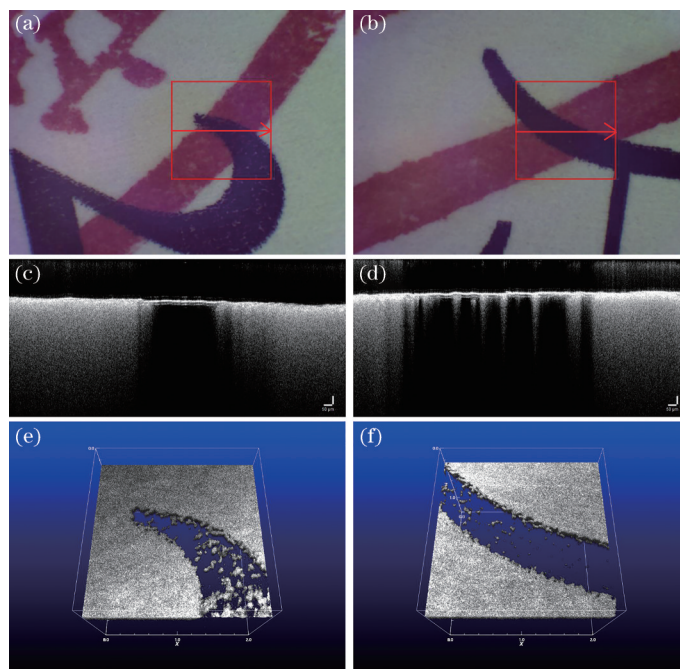


图 4 样本 P1-S 与 P1-P 的 OCT 成像对比。(a) 样本 P1-S 的成像区域原貌；(b) 样本 P1-P 的成像区域原貌；(c) 样本 P1-S 的 OCT 二维成像；(d) 样本 P1-P 的 OCT 二维成像；(e) 样本 P1-S 的 OCT 三维成像；(f) 样本 P1-P 的 OCT 三维成像

Fig. 4 OCT imaging comparison between sample P1-S and sample P1-P. (a) Original appearance of imaging area of sample P1-S; (b) original appearance of imaging area of sample P1-P; (c) OCT two-dimensional imaging of sample P1-S; (d) OCT two-dimensional imaging of sample P1-P; (e) OCT three-dimensional imaging of sample P1-S; (f) OCT three-dimensional imaging of sample P1-P

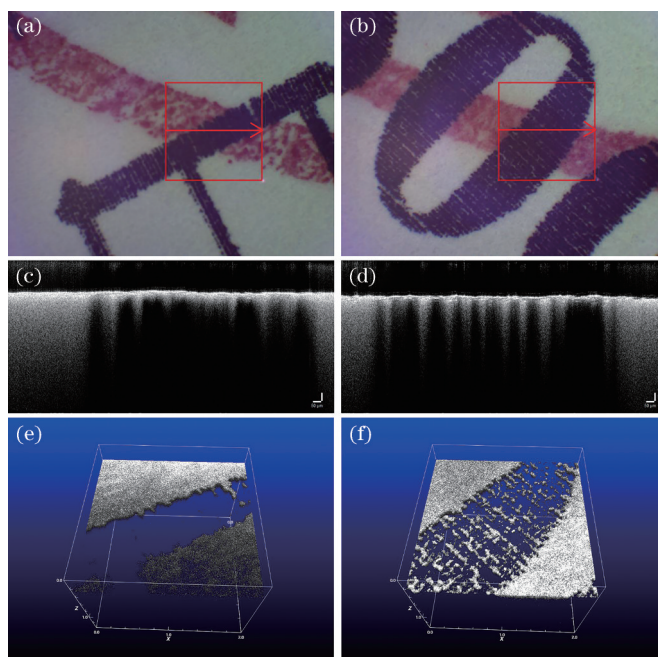


图 5 样本 P2-S 与 P2-P 的 OCT 成像对比。(a) 样本 P2-S 的成像区域原貌；(b) 样本 P2-P 的成像区域原貌；(c) 样本 P2-S 的 OCT 二维成像；(d) 样本 P2-P 的 OCT 二维成像；(e) 样本 P2-S 的 OCT 三维成像；(f) 样本 P2-P 的 OCT 三维成像

Fig. 5 OCT imaging comparison between sample P2-S and sample P2-P. (a) Original appearance of imaging area of sample P2-S; (b) original appearance of imaging area of sample P2-P; (c) OCT two-dimensional imaging of sample P2-S; (d) OCT two-dimensional imaging of sample P2-P; (e) OCT three-dimensional imaging of sample P2-S; (f) OCT three-dimensional imaging of sample P2-P

体成像在交线处的噪点多。先打印后盖章的样本,其二维断层成像的光返回信号弱,光穿透能力差,穿透深度浅;其三维立体成像在交线处的噪点少。

### 3.2 喷墨打印机的结果与分析

从第 1 组喷墨打印机 OCT 成像结果(图 4)可以看出:先盖章后打印的样本 P1-S 在 OCT 二维断层图中,无光返回信号,其交线处的三维成像有些许噪声点;而先打印后盖章的样本 P2-P 在 OCT 二维断层图中,有断续光返回信号,其交线处的三维成像有些许噪声点;其中[图 4(e)]右下角的强烈反射信号并非反映朱墨时序交线处的成像特点,而是反映了无印章纯墨迹区域的成像特点。从第 2 组喷墨打印机 OCT 成像结果(图 5)可以看出:先盖章后打印的样本 P2-S 在 OCT 二维断层图中,有较连续的光返回信号,光穿透深度浅,其交线处的三维成像无噪声点;而先打印后盖章的样本 P2-P 在 OCT 二维断层图中,有断续光返回信号,光穿透深度深,其交线处的三维成像噪声明显。

因此,在喷墨打印机与印章的交线顺序 OCT 判别中,先盖章后打印的样本,其二维断层成像的光返回信号弱,光穿透能力差,穿透深度浅;其三维立体成像在交线处的噪点少。先打印后盖章的样本,其二维断层成像的光返回信号强,光穿透能力较强,穿透深度深;其三维立体成像在交线处的噪点多。

### 3.3 讨论

由于激光打印机的碳粉不溶于两类印油,喷墨打印机的墨水溶于两类印油,因此印油的种类对两类打印机形成文书的朱墨时序检验几乎无影响。而两类打印机由于工作原理存在差异,打印机对朱墨时序检验影响较大。由非交叠区域印章信号的三维分布情况可见,光在单独纸张和单独印油中穿透效果均好,但在单独墨迹中的穿透效果却差。墨迹用量由打印机自动控制,大量实验结果表明,墨的新旧程度不影响实验结果。

#### 3.3.1 激光打印机文书

激光打印机的型号不同,OCT 成像的效果亦不同。图 2 中,印章印油充足均匀,无论先朱后墨还是先墨后朱,光穿透强度和光返回信号均不强;而图 3 中,印章印油不充足但均匀,其光穿透强度和光返回信号较强,如[图 2(c)]和[图 2(d)]所示,其光返回强度明显分别低于[图 3(c)]和[图 3(d)]的光返回强度。但在先盖章后打印时,均呈现出光穿透强

度和光返回强度高于先打印后盖章的现象。因此,在光穿透强度和光返回信号较强的二维图像中,不同朱墨时序区分度明显,其对应的三维成像区分效果一致。

#### 3.3.2 喷墨打印机文书

在两组喷墨打印机实验中,第 1 组是热泡式喷墨打印机,第 2 组是微压电式喷墨打印机。图 4 中,印章印油充足均匀,其二维 OCT 断层图像光返回信号差别明显,三维 OCT 立体图像噪点差别不明显;图 5 中,印章印油不充足但均匀,其二维 OCT 断层图像的光返回信号不明显,三维 OCT 立体图像噪点差别明显。虽然二维成像光返回信号的强弱对比不明显,但是其光穿透的深度对比明显。且无论何种喷墨打印机,在先打印后盖章的情况下,其二维成像的光返回信号都呈现出不连续的情况。

因此,在 120 组样本中,同类型打印机所制同一朱墨时序的样本,其 OCT 成像呈现了不同程度的光返回信号;不同类型打印机所制同一朱墨时序的样本,其 OCT 成像呈现了不同的光返回信号分布形态。由此可见,同一品牌的激光打印机,型号不同,其打印效果亦不同;不同类型的喷墨打印机,喷墨原理不同,其打印效果亦不同。但是由于激光打印机和喷墨打印机的工作原理存在本质差异,在 OCT 下,两类打印机的墨迹和印章印文的交线处呈现本质性不同的成像特点。因此,在实际鉴定过程中,对于不同类型的乃至不同型号的打印机,其所制的朱墨时序检材样本在 OCT 下的成像效果是不一致的。由于本实验涉及的打印机型号范围不广,不排除存在某类型号打印机的制作样品难以通过 OCT 检验去鉴别朱墨时序的情况。

## 4 结 论

1) 激光打印机与印油交线处的 OCT 成像特点与喷墨打印机相反。

利用 OCT 检验时,对于同一朱墨时序,由于两类打印机在工作原理、耗材及介质、打印速度等方面的不同,其形成的打印文书与印油的交线处的光信号特征有区别,具体表现如下:

激光打印文书,其墨迹与印油互不相溶。在先盖章后打印时,墨迹、印文和纸张在激光打印机的高温高压下紧密结合,光对其穿透能力强,则光返回信号强;在先打印后盖章时,仅墨迹和纸张紧密结合,印油由于不与墨迹相溶,并覆盖在文书之上,



光对其穿透能力弱,则光返回信号弱。

喷墨打印文书,其墨迹与印油相溶,且喷墨打印机主要使用颜料型的墨水,属于悬浮溶液,有悬浮的固体颗粒,透光率较低。在先盖章后打印时,墨迹和印油相溶,并有固体颗粒物悬浮,则透光率较低,光返回信号弱;在先打印后盖章时,墨迹和纸张在喷墨打印机的加热作用下紧密结合,由于喷墨打印文书呈现印刷文字条纹现象[图 5(b)],即印油与墨迹为条纹相间分布,交线处反射光弱,纯印油处反射光强,因此二维断层图像呈现出断续的光返回信号。

2) OCT 二维断层成像结合三维成像结果可作为辅助鉴别朱墨时序的依据。

实验结果表明:OCT 二维断层图像对多数打印文书的朱墨时序能判别;当光返回强度较低时,三维成像图的判别效果较差;当光返回强度较高的时候,三维成像图的判别效果较好,因此有些样品二维成像结果不明显而三维成像却有明显特征。同时,并非所有的打印文书在 OCT 检验下都能呈现较明显的判别效果。因此,在 OCT 成像结果明显的情况下,OCT 二维成像可作为打印文书与印章形成时间的主要判别依据,三维成像图可在光穿透强度和光返回信号较强的时候作为辅助判别依据;在鉴别成像结果较为模糊的情况下,OCT 二维成像和三维成像仅可作为辅助鉴别朱墨时序的依据。

本实验组利用 OCT 技术初步探究了喷墨打印机和激光打印机形成文书的朱墨时序问题,以期丰富朱墨时序检验的方法体系,补充现有的检验技术,但还需进一步加大样本量,并综合考虑多种影响因素,从而为打印文书与印文的朱墨时序鉴定标准提供依据。

### 参 考 文 献

- [1] Wu X, Fang F, Li B. Determination of the sequence of intersecting lines between toners and seals by laser fluorescence microscope[J]. Journal of Forensic Sciences, 2019, 64(6): 1761-1768.
- [2] 魏松. 偏光显微镜检验激光打印文字与印文朱墨时序问题研究[D]. 北京: 中国人民公安大学, 2019.  
Wei S. The research on sequential identification of crossed laser printed text and seal by polarized optical microscope[D]. Beijing: Chinese People's Public Security University, 2019.
- [3] Zhang N, Jiang P, Wang W, et al. Initial study for the determination of the sequence of intersecting lines between gel pens and seals by optical coherence tomography[J]. Journal of Forensic Sciences, 2020, 65(6): 2071-2079.
- [4] Laan N, Bremmer R H, Aalders M C, 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.
- [5] Brown K, Harvey M. Optical coherence tomography: age estimation of *Calliphora vicina* pupae *in vivo*?[J]. Forensic Science International, 2014, 242: 157-161.
- [6] 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.
- [7] Wang C M, Zhang N, Sun Z W, et al. Recovering hidden sub-layers of repainted automotive paint by 3D optical coherence tomography[J]. Australian Journal of Forensic Sciences, 2019, 51(3): 331-339.
- [8] Zhang N, Wang C M, Sun Z W, et al. Detection of latent fingerprint hidden beneath adhesive tape by optical coherence tomography[J]. Forensic Science International, 2018, 287: 81-87.
- [9] 蒋鹏, 王蔚昕, 张宁, 等. 光学相干层析技术在朱墨时序检验中的初步研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(22): 221101.  
Jiang P, Wang W X, Zhang N, et al. Preliminary study on determining the sequence of intersecting lines using optical coherence tomography[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(22): 221101.
- [10] 崇博, 朱永凯. 谱域光学相干层析系统轴向分辨率提高方法[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 217001.  
Chong B, Zhu Y K. Method to improve axial resolution of spectral domain optical coherence tomography[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 217001.
- [11] 张宁, 黎智辉, 许小京. 光学相干断层成像检验技术[J]. 刑事技术, 2015, 40(5): 409-416.  
Zhang N, Li Z H, Xu X J. Optical coherence tomography: principles and applications in forensic science[J]. Forensic Science and Technology, 2015, 40(5): 409-416.
- [12] 解晓晨. 谱域 OCT 成像系统关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.  
Xie X C. Research on key technologies of spectral optical coherence tomography imaging system[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.