

光学相干层析技术在法庭科学领域的研究进展与应用展望

吴迪¹, 高树辉^{1*}, 张宁^{2**}, 陆一帆¹, 谢菲¹, 张浩¹, 琚三元¹, 曾浩然¹, 王成铭³

¹中国人民公安大学侦查学院, 北京 100038;

²公安部物证鉴定中心, 北京 100038;

³北京鉴知技术有限公司, 北京 100038

摘要 对物证的传统光学检验存在不便获取样本空间结构、针对性差、操作过程繁琐等不足。光学相干层析技术(OCT)具有原位、非侵入、高分辨率、高速、低成本等优点,在法庭科学领域有很大应用潜力。通过文献分析,阐述OCT的成像原理,针对此技术在法庭科学的不同研究方向,如指纹检验、法医学检验、文件检验、生物物证检验等,论述了OCT在物证鉴定领域应用的可行性,展望了OCT在法庭科学领域中的研发思路、方法及应用前景。

关键词 光学相干层析技术; 法庭科学; 物证鉴定; 研究进展; 应用展望

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220944

Research Progresses and Application Prospects of Optical Coherence Tomography in Forensic Science

Wu Di¹, Gao Shuhui^{1*}, Zhang Ning^{2**}, Lu Yifan¹, Xie Fei¹, Zhang Hao¹, Ju Sanyuan¹, Zeng Haoran¹, Wang Chengming³

¹School of Investigation, People's Public Security University of China, Beijing 100038, China;

²Institute of Forensic Science, Ministry of Public Security, Beijing 100038, China;

³JINSP Co., Ltd., Beijing 100038, China

Abstract The traditional optical inspection of physical evidence has some drawbacks, including difficulties in obtaining sample spatial structure, poor pertinence, and cumbersome operation process. Optical coherence tomography (OCT) has the benefits of being in situ, noninvasive, high resolution, high speed, and low cost, which has potential uses in the field of forensic research. Through literature analysis, this study introduces the imaging principle of OCT. This study analyzes the viability of using OCT in the field of material evidence identification to apply this technology in many forensic science research directions, such as fingerprint inspection, forensic science, document inspection, and biological evidence inspection. The research and development ideas, methods, and application prospects of OCT in the field of forensic science have been examined.

Key words optical coherence tomography; forensic science; physical evidence identification; research progress; application prospect

1 引言

法庭科学领域中的物证检验在确定侦查方向、认定嫌疑人等方面发挥了重要作用,由于物证的种类和数量繁多,对物证检验技术提出了很高的要求。光学

相干层析技术(OCT)^[1]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,在法庭科学领域的无损检测方面有着重要的应用价值和广阔的发展前景。本文从物证检验角度,对近年来国内外学者利用OCT

收稿日期: 2022-03-09; 修回日期: 2022-04-21; 录用日期: 2022-06-07; 网络首发日期: 2022-06-17

基金项目: 中国人民公安大学基本科研业务费项目(2021XXFZ001)、上海市现场物证重点实验室开放课题基金(2021XCW-ZK03)、北京市科技新星计划(Z191100001119039)

通信作者: *gaoshuhui@ppsuc.edu.cn; **zhangning@cifs.gov.cn

在指纹检验、法医学检验、文件检验、生物物证识别等法庭科学领域的应用进行研究,为 OCT 在法庭科学领域创新发展提供启示和借鉴。

2 光学相干层析技术概述

OCT 是一种低相干干涉技术,最早由美国麻省理工学院的 Swanson 等^[2]提出并应用于获取离体人视网膜和冠状动脉壁的层析图像。其基本原理和超声技术相似,采用的是可见或近红外波段的宽带光源而非超声源^[3]。相较于传统的超声成像、X 射线计算机扫描、核磁共振等技术,OCT 具有更快的成像速度和更高的空间分辨率,与共聚焦显微等高分辨技术相比,又具有更出色的断层成像能力,因此 OCT 凭借在分辨率和成像深度方面的优势填补了传统技术的空白。此外,OCT 能够以非侵入性的方式对样本进行检测,并且无需经过预处理即可实时获取样本内部的三维结构信息,这些优势都使得 OCT 在医学、材料、生物等领域获得广泛的研究与应用^[4-7]。

2.1 OCT 基本原理

OCT 主要涉及的仪器是基于低相干光的迈克耳孙干涉仪,如图 1 所示,早期时域 OCT(TD-OCT)系统的主要结构包括宽带光源、参考臂、样品臂、探测器和信号处理系统。宽带光源发出的光进入光纤型迈克耳孙干涉系统,经光纤耦合器一分为二,分别进入参考臂和样品臂。在参考臂中的光束经准直系统打在反射镜上并原路返回;在样品臂中的分光束经准直后聚焦于待检样品的内部结构,样品不同深度的背向散射光原路返回至干涉系统。当参考臂和样品臂返回的两束光的光程差满足相干长度时就能发生干涉,干涉信号由光电探测器检测并传输至计算机信号处理系统,计算机对干涉信号进行解调并对样品结构信息进行重构。这样通过参考臂反光镜的轴向运动,就可改变等光程点在样品中的不同深度,实现一维 A-scan 纵向深度扫描。

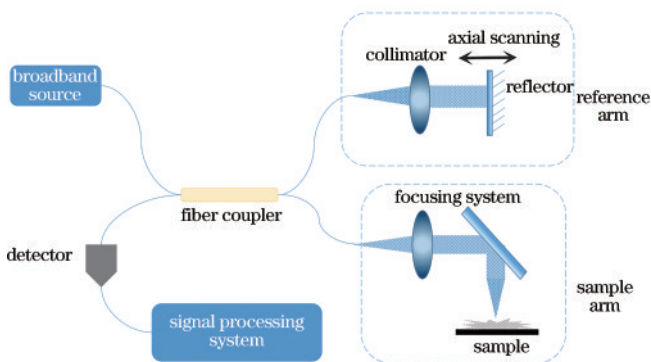


图 1 时域 OCT 系统原理示意图

Fig. 1 Schematic of time-domain OCT

由于参考臂的机械扫描速度大大限制了时域 OCT 系统的成像速度,因此研究人员发明了频域 OCT(FD-OCT)系统,取消了参考臂的机械扫描,提

高了成像速度并且有更高的信噪比^[8],推动了该项技术的应用和发展。频域 OCT 根据信号探测方式不同分为光谱域 OCT(SD-OCT)和扫频 OCT(SS-OCT)两种:光谱域 OCT 利用光谱仪对干涉光谱信号进行解析,经过傅里叶变换得到样品不同深度的背向散射信息;扫频 OCT 使用快速可调谐扫频激光器作为光源,在不同时间发出的单波长光束对样本进行快速扫描,由点探测器对干涉信号进行检测,经傅里叶变换后获取样品的深度信息,实现断层成像。

2.2 OCT 系统的主要性能参数

2.2.1 分辨率

光谱域 OCT 系统的轴向分辨率 δz 由宽带光源的相干长度 l_c 是光源自相干函数包络的半峰全宽(FWHM)^[9],可表示为

$$\delta z = l_c = \frac{2 \ln 2}{\pi} \times \frac{\lambda_0^2}{\Delta \lambda}, \quad (1)$$

式中: λ_0 表示宽带光源的中心波长; $\Delta \lambda$ 表示光源光谱的半峰全宽。光源的谱宽和中心波长决定了轴向分辨率,因此采用更短中心波长和更宽光谱带宽的光源可以提高光谱域 OCT 系统的轴向分辨率^[10]。

相较于传统的显微成像系统,OCT 系统一个最大的优点就是轴向分辨率和横向分辨率相互独立,互不相关,因此可以通过优化横向扫描方式提高横向分辨率,而不影响轴向分辨率。与常规光学显微镜类似,光谱域 OCT 系统的横向分辨率主要受样品臂聚焦后的瑞利斑尺寸影响,而瑞利斑尺寸与样品臂中聚焦物镜的数值孔径 N_A 和光源的中心波长 λ_0 有关^[11],横向分辨率可表示为

$$\Delta x = \frac{2 \lambda_0}{\pi N_A} = \frac{4 \lambda_0}{\pi} \times \frac{f}{d}, \quad (2)$$

式中: f 为样品臂中聚焦物镜的焦距; d 是照射在聚焦物镜上的光束直径。由式(2)可看出,增大聚焦物镜的数值孔径 N_A 可以提高系统的横向分辨率,但在聚焦系统中横向分辨率同时受焦深(DOF, b)影响,二者关系可表示为

$$b = \frac{\pi \Delta x^2}{2 \lambda_0}. \quad (3)$$

从式(3)看出,横向分辨率的数值减小会导致焦深减小,系统在焦深范围外的成像性能就会下降,因此在 OCT 系统的设计搭建过程中,应根据实际应用对焦深和横向分辨率的参数设置进行考量。

2.2.2 最大深度成像范围

时域 OCT 系统的一维 A-scan 纵向深度信号是通过参考臂的轴向扫描实现的,因此时域 OCT 系统的最大深度成像范围取决于参考臂中反射镜的最大移动距离。频域 OCT 取消了参考臂的轴向扫描,提高了成像速度和精度,但在一定程度上也损失了成像的深度。常用的光谱域 OCT 最大深度成像范围主要取决于光源的中心波长和光谱仪的分辨率^[12],此外还受光源功率、

待测样品的吸收和反射特性等参数的影响^[13],系统最大成像范围可表示为

$$z_{\max} = \frac{\lambda_0}{4n\delta\lambda}, \quad (4)$$

式中: n 表示光在待测样品中的折射率; $\delta\lambda$ 表示光谱仪的分辨率。由式(4)可看出,在保持光谱仪的分辨率一定的情况下,采用中心波长较长的光源可以提供更大深度的成像范围,但据前面分析可知中心波长的增加会降低轴向分辨率,因此需要根据检测对象的性质选择合适的系统配置。

3 研究方法

采用文献研究法,对“Web of Science Core

Collection”、“Pubmed”、“Scopus”三个数据库的相关文献进行分析。在2000年至2022年的时间设定中使用关键词组合“Optical Coherence Tomography” AND “Forensic”、“Optical Coherence Tomography” AND “Forensic Medicine”、“Optical Coherence Tomography” AND “Evidence”、“Optical Coherence Tomography” AND “Postmortem”进行高级检索,得到了1248条检索数据,在数据的预处理过程中进行去重,并剔除了没有法医学检验和鉴定目的的文献,最终获得相关文献数据共计62篇。利用CiteSpace软件对获得的文献数据进行知识图谱绘制并分析,绘制的关键词时间线图谱和关键词突现图谱分别如图2和图3所示。

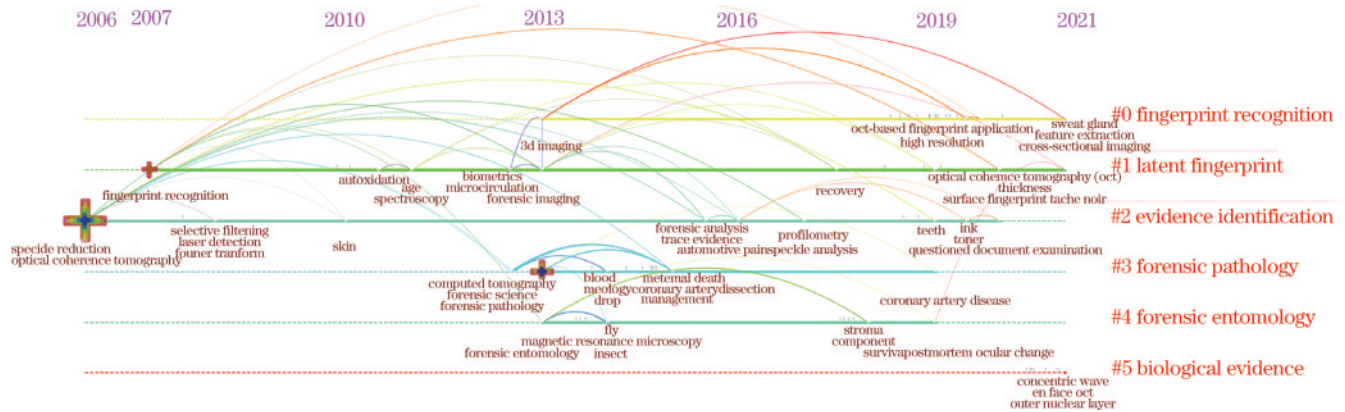


图2 关键词时间线图谱

Fig. 2 Keywords changing with timeline

Top 7 Keywords with the Strongest Citation Bursts

Keywords	Year	Strength	Begin	End	2006–2021
optical coherence tomography	2006	1.65	2006	2010	
fingerprint recognition	2006	1.43	2007	2010	
forensic science	2006	1.46	2013	2015	
forensic pathology	2006	1.32	2013	2014	
forensic entomology	2006	1.22	2013	2014	
automotive paint	2006	1.30	2016	2016	
internal fingerprint	2006	1.97	2020	2021	

图3 关键词突现图谱

Fig. 3 Keywords with the strongest citation bursts

从图2关键词时间线图谱中可以看到,近20年间OCT在法庭科学中6个方向的应用受到国内外学者的重视,这6个方面分别是指纹识别(fingerprint recognition)、潜在指印(latent fingerprint)、物证鉴定(evidence identification)、法医病理学(forensic pathology)、法医昆虫学(forensic entomology)、生物物证(biological evidence)。其中OCT在指纹识别、潜在指印、物证鉴定3个方向的研究呈现出较好的时间跨度和延续性,表明OCT在这三个方向的应用具有一定的可行性和前沿性。此外,图2还展现出近几年来OCT在法医病理学、法医昆虫学、生物物证等方向的新的应用进展,这与超高速OCT系统的迅速发展密切相关。

结合图3关键词突现图谱同样可以发现,6个研究方向代表了OCT在法庭科学领域应用的重要方面,其中指纹识别和潜在指印的相关研究表现出持续且较长的突现周期,具有较高影响力和关注度。

基于对上述初步分析结果的总结归纳,围绕OCT在法庭科学中指纹检验、法医学检验、文件检验、生物物证检验、其他物证检验5个方面的应用进行分析,以期为推动OCT在法庭科学领域的应用进展提供参考。

4 OCT在物证检验鉴定领域中的研究进展

4.1 指纹检验

OCT在指纹检验领域的研究通常从两个方面入手:一是对犯罪现场中承痕客体上的潜在指印开展显现和提取;二是利用设备直接从手指处获取指纹进行识别。前者的研究主要集中于对不同承痕客体上指印特征的显现效果,后者的研究主要集中于OCT在指纹识别技术的应用。

犯罪现场中的玻璃、塑料等光滑非渗透性客体上容易遗留有作案人的指纹,Dubey等^[14-15]使用改进后的全场OCT对玻璃和盖玻片夹层的潜在指印进行检测。该系统采用超辐射发光二极管(SLD)和声光可调滤波

器(AOTF)的组合作为扫描光源,在分束器的一侧镀上氧化铝薄膜作为参考镜,待测样本放在分束器另一侧,即可获得干涉条纹。该实验证明了OCT对潜在指纹显现的可行性。胶带是犯罪现场常出现的重要物证,由于胶带粘面的黏性特点,胶带通常粘在一起或附着在某种基底上,在胶带之间或胶带与基底之间很可能遗留犯罪嫌疑人的潜在指纹。Liu等^[16]利用频域OCT系统显现了两条红色电工胶带夹层间的潜在指纹图层。张宁团队^[17]设计搭建了带有手持探头的谱域OCT系统,获取了指纹在不同类型胶带粘面上的二维横截面和三维立体图像。该团队^[18-19]随后对多层胶带的重叠指纹、红色油漆覆盖的血指纹等疑难指纹进行检测和区分。上述结果显示,相较于传统的胶带粘面指纹显现方法,OCT无需对物证样品进行任何剥离、染色等预处理,即可无损、快速、高效地获取隐藏在胶带之间或胶带与基底之间的潜在指纹信息。

指纹识别作为当下应用最为广泛的生物识别技术,其安全模式的重要性不言而喻,现有的指纹识别系统大都基于手指表面乳突花纹的二维图像来进行鉴别,无法区分真实指纹和伪造指纹。Cheng等^[20]采用中心波长为1300 nm的OCT系统对指尖的真实指纹和人工材料制成的伪造指纹进行检测,从二维截面图中观察到真实皮肤角质层、表皮层、真皮层形成的层级结构以及皮肤表面乳突纹线和小犁沟的排列分布,而伪造指纹的OCT图像中则显示出不属于正常皮肤特征的额外层。此外作者对真实指纹和伪造指纹在不同深度的A-scan信号进行自相关分析,由于真实指纹内部各组织分化后理化性质发生变化,而人工材料内部分布均匀,因此二者的自相关曲线存在明显差异,证明了OCT系统结合自相关分析后有应用于指纹自动识别的潜力。Sven等^[21]利用中心波长为1320 nm的扫频OCT获得了真实指纹和伪造指纹膜的三维立体图像,分析了真伪指纹具有的不同汗腺导管连接情况,该OCT在人工区分结果和自动分类结果中均达到较高准确度。王凯聪等^[22]在真实指尖的OCT二维截面图像中观察到伪造指纹膜不具备的多层结构和乳突纹线中汗腺的分布情况,有望为增强生物识别系统的安全性提供启示。Bossen等^[23]提出了一种利用指尖乳头层进行指纹识别的安全方法,利用频域OCT采集了不同种族、年龄、职业志愿者指尖的横截面图像并建立指纹数据库,在检测过程中由于受OCT采集视场限制和个体移动限制,检测结果差异较大。当去除异常测量值后,错误拒绝率(FRR)降至5%。同时实验指出不同年龄群体指纹的OCT图像存在差异,作者认为可以通过皮肤弹性随年龄增长而降低来解释,这一发现对个体年龄和OCT指纹图像间建立了联系。

OCT的高分辨断层成像特点提供了更多可供鉴别的生物特征,拓展了指纹识别模式范畴。Liu等^[24]

提出了一种基于活体血流的皮肤微循环高分辨率成像方法,利用多普勒OCT(Doppler OCT)对位于真皮层的乳头层毛细血管网络进行检测,经处理和渲染后得到血管网络的伪彩图。乳头毛细血管网络位于皮肤表面下数百微米处,因此这种模式识别方法不易受到指尖表面的污垢、皱纹、表面损伤或划痕的影响,为指纹的个体识别和验证提供了一种高安全性的方法。Zam等^[25]利用频域OCT系统和correlation mapping optical coherence tomography(cmOCT)显现了指尖表皮下指纹和血管网络分布等附加生物特征,获取了活体样本指尖位于真皮和表皮交界处指纹亚表面的断层图像,能清晰观察到汗腺、毛细血管血液循环等难以伪造的附加生物特征,提供了一种多模式生物特征指纹识别的方案,如图4所示。同时,根据毛细血管血液循环闭塞情况的差异,作者提出将OCT用于区分活体与尸体手指指纹的猜想。

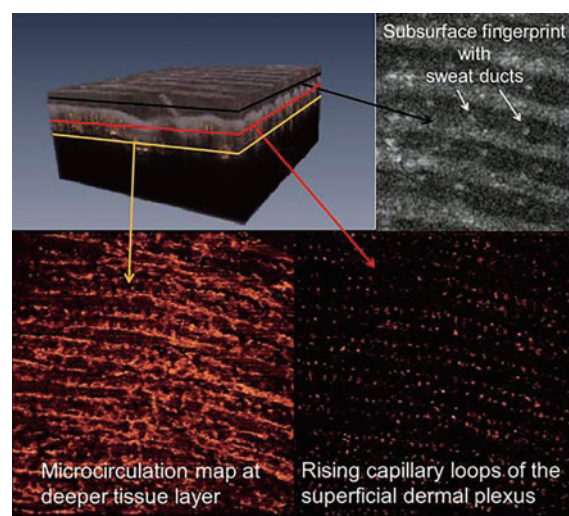


图4 手指的相关映射光学相干层析成像^[25]

Fig. 4 cmOCT imaging of the finger^[25]

指纹的第三级特征,如单条乳突纹线上汗孔的数量、位置、形貌等,因其永久性、独特性和复杂性,可作为身份识别特征而受到广泛关注,具有极高的鉴定价值^[26]。但由于其密度高和特征细微等特点,目前尚没有提取汗孔信息的有效方法。Sun等^[27]利用中心波长为1300 nm的OCT系统获得了指纹上的汗孔分布图,为了验证汗孔位置的准确性,对人工标注结果与OCT提取结果进行位置比对,结果发现真阳性率为95.29%,假阳性率为99.99%,为提取活体手指汗孔信息提供新方法。

近几年,有研究人员将深度学习应用于OCT图像中的生物特征提取,提升检测系统对生物特征的识别性能。Raja等^[28]利用深度神经网络对不同深度的指纹OCT图像进行特征提取和识别,提出了基于AlexNet CNN的全场OCT指纹图像保护框架,并通过大量实验证明了其高精度性和适用性。Ding等^[29]利用深度

学习方法同时自动提取了表面指纹、内部指纹和汗腺,借助 OCT 体积数据中的空间相关性提出了一种结合残差学习、双向卷积长短时记忆和混合扩张卷积的改进 U-Net(简称 BCL U-Net),用于对 OCT 体积数据进行分割,基于表面指纹和内部指纹数据库实现了对两

类指纹的重建。同时实验证明了皮下内部指纹与表面指纹的一致性,并且在某些特定应用中内部指纹具有补充或代替表面指纹的潜力。

基于上面研究的分析,对 OCT 系统在指纹检验中的应用参数及方法进行总结,如表 1 所示。

表 1 OCT 系统在指纹检验中的应用参数和方法汇总

Table 1 Summary of application parameters and methods of OCT system in fingerprint inspection

Application	System type	Parameter	Object	Trace material	Method	Reference
Fingermarks development	Full-field swept-source OCT	SLD power: 7.5 mW; High SNR; Center wavelength: 842.5 nm; FWHM: 48.3 nm; Maximum imaging depth: 0.418 mm	Glass	White fluid	Morphological analysis	[14-15]
	Spectral-domain OCT	SLD power: 13 mW; SNR: 100 dB; Center wavelength: 832 nm; FWHM: 60.4 nm; Maximum imaging speed: 70 kHz	Red electrical tape, tan box-sealing tape, scotch tape	Sweat oil	Morphological analysis	[16-17]
	Spectral-domain OCT	Center wavelength: 832 nm; FWHM: 60.4 nm; Maximum imaging speed: 70 kHz; Depth resolution: $\sim 6 \mu\text{m}$	Slide covered with paint	Red stamp-pad ink, blood	Morphological analysis	[18-19]
Fingerprints identification	Time-domain OCT	SLD power: 375 μW ; Center wavelength: $(1300 \pm 15)\text{nm}$; Resolution: $\sim 25 \mu\text{m}$; Maximum imaging depth: 2.2 mm (in air)	Plastic, cement, liquid silicon rubber	—	Autocorrelation analysis	[20]
	Swept-source OCT	Center wavelength: 1320 nm; FWHM: 120 nm; Resolution: $\sim 13 \mu\text{m}$; Maximum imaging speed: 20 kHz	Thin layer fakes, sweat glands	—	Manual classification, automatic analysis	[21]
	Fourier-domain OCT	Wavelength: 1300 nm; Depth resolution: 5.5 μm ; Maximum imaging depth: 3.5 mm (in aqueous solution)	Paraffin wax, capacitor black glue, sweat glands	—	Morphological analysis	[22]
	Fourier-domain OCT	SLD power: 10 mW; Center wavelength: 1325 nm; FWHM: 100 nm; Depth resolution: 12 μm in air, 8.8 μm in skin; Maximum imaging depth: 3 mm	Internal fingerprint, paraffin wax	—	FAR, FRR	[23]
	Swept-source OCT	SLD power: 16 mW; Center wavelength: 1310 nm; FWHM: 80 nm; Depth resolution: 9.3 μm in air, 6.6 μm in skin; Maximum imaging speed: 50 kHz	Subcutaneous capillary	—	Intensity-based Doppler variance, morphological analysis	[24]
	Swept-source OCT	Center wavelength: 1325 nm; Depth resolution: 12 μm ; Maximum imaging speed: 16 kHz	Sub-surface fingerprints, sweat glands, capillary	—	Correlation mapping optical coherence tomography	[25]

4.2 法医学检验

4.2.1 法医昆虫学

法医昆虫学常基于昆虫的生长发育和演替规律进行死后时间间隔 (PMI) 推断^[30-33],目前在法医学上的对象多针对卵、幼虫或蛹的发育历期^[34-36],未发育的

蛹类与尸体建立了更长的时间联系,因此有着更高的鉴定价值。但由于蛹的发育过程缓慢,形态变化细微,因此确定蛹的年龄比幼虫的年龄更困难。此外,对腐烂尸体上蛹类及幼虫年龄的确定通常是通过解剖、切片或组织染色完成的^[37-38],这将对证据造成不可

逆的破坏。Brown 等^[39]利用 OCT 对现场中的蝇蛹及蛹壳形态进行成像,发现第 4 天和第 10 天蝇蛹形态差异非常明显,作者认为该技术具有根据蛹龄近似推断死亡时间的潜力。Choi 等^[40]对虫类的外部形态和内部结构进行三维重建,对幼虫到成虫各变态阶段的外部形态和内脏器官进行可视化呈现,实现了对昆虫细胞结构的活体分析。Ravichandran 等^[41]通过谱域 OCT 系统对蚊虫内部结构进行形态学分析,并与组织学图像结合,证明了该项技术用于蚊虫解剖分析的可行性,以期对某些传染性疾病导致的病理性死亡提供溯源依据。

4.2.2 法医病理学

法医病理学是建立在病理学的基础之上,运用相关的医学专业知识进行有关暴力死亡和非暴力死亡的死亡征象、死亡原因、死亡方式、死亡时间、死亡地点、个体识别和致伤物推断的一门科学^[42]。眼部的死后分析是法医病理学和移植学的一个重要课题,由于死后眼部的检查结果可能对推断死亡时间间隔 (PMI) 或在某些情况下确定死亡的原因有很大帮助^[43-44],死后眼部体征的评估是标准尸检的一部分。McNabb 团队^[45]提出了一种 OCT 结合组织病理学综合分析尸体眼中视网膜结构的方法,该方法在有效分析神经组织的同时避免晶状体的光学干扰。Napoli 团队^[46-48]采用便携式谱域 OCT 系统先后对绵羊角膜和人类角膜进行检测,以三维模式描述死后不同时间中央角膜厚度的形态学变化,通过对角膜微观结构的分析,验证了 OCT 用于评估死后角膜形态变化的可行性。此外,作者发现在死亡 3 h 后角膜基质层的 OCT 图像中形成了基质波,并将其命名为“Nioi-Napoli 特征”,作为一种新的眼部尸检特征。在角膜 OCT 伪彩图像中还测到前房幅度逐渐降低、角膜曲率改变等一系列死后眼部特征变异,通过对巩膜、虹膜、玻璃体和视网膜进行尸检,也获得了生理性信息,为 PMI 提供了依据^[49-50]。

冠状动脉疾病 (CAD) 的死后诊断对确定死亡原因和案件性质都至关重要^[51]。常规尸体冠状动脉的检查方法主要是针对冠状动脉的横断面切片的,肉眼观察动脉内部狭窄的严重程度,但这无法获取冠状动脉病变涉及的纵向范围特征信息,并且传统解剖的破坏性常常导致对血管损伤、病变部分的破坏或遗漏,丧失了进一步对组织病理学检查的解剖基础^[52]。OCT 在对心血管相关猝死案例的死因分析和伤病鉴定等方面展现出巨大潜力。Brezinski 等^[53]首次实现对冠状动脉体外 OCT 高分辨率成像。Kume 等^[54]描述了不同类型冠状动脉血栓的 OCT 图像特征,利用 OCT 对动脉斑块进行评估并且区分了红色和白色血栓,通过尸检证实了不同类型冠状动脉血栓 OCT 表征的准确性。Prati 等^[55]将 OCT 用于冠状动脉粥样硬化评估。Adlam 等^[56]通过将 OCT 与死后 CT 冠状动脉造影

(PMCTA) 结合来评估冠状动脉病变程度,讨论了该项技术在微创性尸检方面的潜力。王成铭^[57]分别利用 OCT 与标准法医病理组织处理方法对冠心病死者进行检测并对结果进行比对,发现 OCT 图像与苏木精-伊红染色法 (HE) 结果对应较好,表明 OCT 能够在尸体心脏组织不做切片和染色的前提下识别肉眼不可见的病变区域,并且通过 OCT 显现的血凝块对法医病理学检验具有重要意义。

4.3 文件检验

在文件检验活动中,要判断文书制作时间和证明文件真伪,常需鉴定字迹与印章印文的先后顺序,传统的无损检验法只能通过切片来检测朱墨的空间结构分布情况,这将不利于保存证据的完整性。张宁团队^[58]采用中心波长为 900 nm 的频域 OCT 系统对 3 种印油和 3 种笔形成的 18 个朱墨时序样本进行检测,对获取的二维截面和三维立体图像进行特征比对分析,证明了 OCT 在朱墨时序检测问题上的有效性,在盲测实验中验证了 OCT 操作的便捷性和结果的准确性。

不同人的握笔姿势和运笔力量存在差异,笔压 (APF) 特征成为笔迹检验的一个稳定的特征。Neto 等^[59]提出了一种通过两种互补光学无损技术检验签名笔迹真伪的新方法,即首先通过多光谱光学滤波器 (MOF) 确定笔迹样本的感兴趣区域 (RoI),再利用 OCT 对笔压进行分类和量化,结果表明真实和伪造字迹的笔压差异明显,笔迹深度的精确测量可以用来进行特征量化研究。

个人身份证件及票据查验对维护国家和社会安全都具有重要意义^[60]。OCT 在检测文档亚表面特征方面具有巨大潜力,Choi 等^[61]和 Marques 等^[62]应用 OCT 的光学切片能力观察到纸币和身份证件均具有微米级多层涂层结构,通过层间光程等换算特征与标准值的对比可以实现对证件票据的快速、无损、高分辨率、低成本的亚表面分析与鉴别。此外,Moran 等^[63]还将 OCT 成功用于油画检验。

4.4 生物物证识别

4.4.1 毛发检验

毛发作为犯罪现场中常见的生物检材,具有极高的检验和鉴定价值^[64]。Choi 等^[65]对新鲜头皮发干细胞结构的 OCT 断层图像进行形态学分析,揭示了头发内部微结构,并定性地指出皮质区黑色素颗粒的密度是决定头发颜色强度的主要因素,同时给出自然状态下毛发细胞的三维组织学描述,OCT 展现出在个体识别方面的潜力。

皮肤毛囊遍布全身且各部位的毛囊分布密度和形态都有显著差异,是一种蕴含信息量极大的生物特征。Wang 等^[66]设计并搭建了谱域 OCT 系统,对志愿者额头和耳前部位皮肤进行三维立体成像,从三维立体数据中提取毛囊的直径、方向、密度和形状等作为特征参数,对表皮下毛囊分布进行可视化展示,从而发现了基

于年龄、性别和民族的重要个体间的差异,并提出个体面部毛囊的三维特定模式,有助于对人身鉴定的初步推断。

4.4.2 血迹形态分析

传统血迹体积测量方法需从非渗透性客体表面刮取血迹,或对带有血渍的渗透性客体进行切割,以获取血迹重量,计算血迹体积,这种有损检验将对原始物证造成破坏。Laan 等^[67]使用中心波长为 1300 nm 的 OCT 系统对滴落在玻璃和不规则客体表面的血迹进行检测,通过对血迹表面不同部位 A-scan 信号的突变区域进行分析,获取其空间信息并测得血迹体积和不确定度,与通过量瓶测得的新鲜血液的实际体积的误差约为 2%,当血液在不规则表面或以一定的速度滴落在客体表面时误差有所增加,实验结果还显示干燥血迹和新鲜血迹的体积比约为 19%~28%,具体数值受供体和抗凝剂的影响。由于受设备扫描区域和分辨率的限制,对直径较大和厚度较小的血迹进行精确测量存在技术困难,但仍为血迹形态重建和体积测量提供了一种无损检验方法。

4.5 其他物证检验

4.5.1 枪弹痕迹检验

涉枪案件是各级公安机关重点打击对象^[68],枪弹痕迹检验主要对弹头和弹壳痕迹的形成机理和变化规律进行分析。传统频域 OCT 由于扫描区域过小而应用受限。Grulkowski 等^[69]将垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 作为扫描频域 OCT 的光源,极大地拓展了成像范围和成像深度,作者用该项技术提取了掩盖在凝胶下约 8 cm 处的弹头和弹壳物证信息,从 OCT 图像清晰识别出子弹类型,为掩藏痕迹的无损显现和提取提供了可能。

4.5.2 车漆物证检验

汽车车身油漆碎片及油漆附着物是刑事案件现场和交通事故现场常见的物证种类^[70]。目前常用于检测和分析汽车油漆的方法主要有裂解气相色谱/质谱法 (Py-GC/MS)、扫描电子显微镜检测法 (SEM)、傅里叶变换红外光谱法 (FTIR)、拉曼光谱法等。然而这些方法只能表征车漆最外层或外侧部分样品的信息,车漆具有多层结构,若要获得其内部信息,则需在分析测试之前对车漆进行切片处理,这将破坏原始证据, OCT 的无损断层成像特点在检测车漆物证方面具有显著优势。刘宁宁^[71]通过 OCT 二维截面图像对颜色和层级结构相同的车漆样本进行检验,并探究了不同颜色车漆中各漆层反映的光学信号异同及产生原因。Zhang 等^[72]自主搭建了中心波长为 832 nm 的频域 OCT 系统,通过车漆的 B-scan 图像观察到车漆的层级结构,并以扫描电子显微镜 (SEM) 图像为参考来验证检测准确性。结果表明,二者都清晰直观地展现了车漆内部的空间结构和漆层数量,图 5 中四层车漆结构由上至下依次为清漆层 (clear coat)、面漆层 (base

coat)、中涂层 (primer surfacer)、底漆层 (primer),由于 OCT 图像中的距离代表光程而非几何路径,因此 OCT 图像中的漆层厚度与 SEM 图像中的厚度并不完全吻合。为了区分 OCT 截面图像中外观相似的不同油漆,对车漆 OCT 图像特征进行量化,作者基于 8 种不同品牌车漆样本的 OCT 图像结果差异,对车漆样本二维截面图中的 A-scan 信号进行配准和平均,总结并提取了 OCT 图像中光程、光学衰减系数、散射强度比等 6 个特征并进行独立 t 检验。结果表明 OCT 特征参数对不同品牌的车漆样本存在显著性差异 ($P < 0.05$),证明了利用 OCT 二维截面图像及其光学特征参数区分不同品牌车漆样本的可行性,补充和拓展了现有车漆检验和鉴定方法。

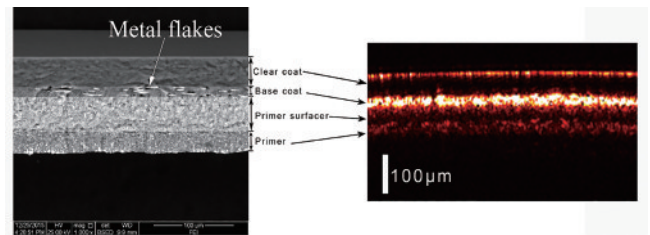


图 5 SEM 图像(左)和 OCT 图像(右)对比^[72]

Fig. 5 Comparison between the SEM image (left) and the OCT image (right)^[72]

在交通肇事逃逸案件中,作案人为了掩盖证据常对肇事车辆的损坏区域进行重新喷漆和修补,检测和恢复重新喷漆后的车漆损伤原貌能为确定嫌疑车辆提供关键证据。Wang 等^[73]利用谱域 OCT 系统对重新修补和喷漆的车漆表面下隐藏损伤区域进行重现,如图 6 所示,实验结果表明, OCT 能够以非侵入的方式、较高的速度、相对较低的成本实现对汽车油漆表层及其内部结构的高分辨率重建,克服了现有检验方法的局限性。

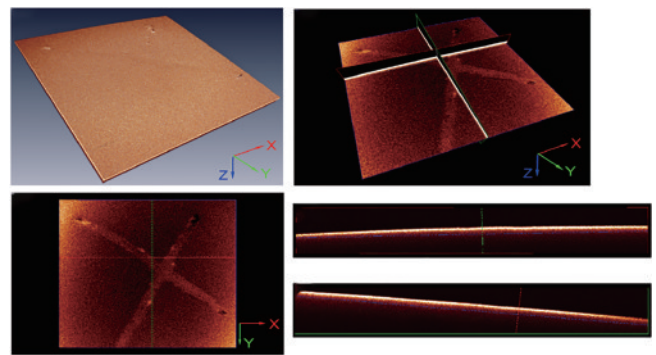


图 6 重建受损车漆的 OCT 图像^[73]

Fig. 6 OCT images of reproducing the damaged paint^[73]

4.5.3 胶带物证检验

胶带常被作为一种工具出现在某些特定犯罪现场,例如,在绑架案件中用于捆扎绑架对象;在爆炸现场捆绑爆炸装置;碎尸案件包裹隐藏尸块;包装包裹内

的毒品等^[74]。刘康康等^[75]利用频域 OCT 系统对不同品牌的电工胶带进行统计学检验并发现具有显著性差异,在电工胶带的三维 OCT 重建中验证了这一结论并对其微观结构的差异性进行形态学描述,为胶带物证的识别和溯源指明方向。

5 OCT 在法庭科学领域的应用展望

作为一种新兴的无损检验技术手段,OCT 凭借众多优势在法庭科学领域有了不断应用,通过文献研究可见,其在指纹检验、法医学检验、文件检验、生物物证检验和其他物证检验方面展现出巨大的应用前景。但该项技术目前在法庭科学领域不少方向还处于起步阶段,结合现阶段公安技术检验和鉴定工作的应用需求,未来 OCT 有望在以下 4 个方面取得新的进展和突破。

5.1 提高成像速度

在提高成像速度方面,目前商用光谱域 OCT 受到图像传感器集成时间和数据传输时间的限制,线速度可达几百 kHz,对现阶段毫米级的范围成像所需时间平均在数秒,但在现场中需要对潜在痕迹所处区域进行大范围扫描,所需时间十分漫长。已经有研究人员提出基于脉冲时间拉伸的扫频光源^[57]、垂直腔面发射激光器^[69]、傅里叶锁模扫频激光器^[76]的超高速 OCT 系统搭建方案,但这些方案仍在数据采集和实时成像等方面有着瓶颈,未来在保持较高信噪比和分辨率的基础上提升 OCT 的扫描速度能将进一步扩大该项技术的实际应用价值。

5.2 扩大成像范围

在扩大成像范围方面,频域 OCT 系统的成像范围为 2~6 mm,在医学中足够用来进行视网膜和内窥镜成像,但无法满足在犯罪现场中更大范围的成像需求。超高速 OCT 以及智能机械装置的发展为扩大 OCT 系统的成像范围提供了可能,但与此同时,更大范围的成像需要更高性能的数据采集和处理系统,这都将成为 OCT 在该领域应用推广的重要问题。

5.3 提高成像质量

在提高成像质量方面,OCT 作为一种高分辨率的断层成像技术,在数据采集过程中对周围环境条件要求较高,环境中的噪声会对结果造成干扰,同时 OCT 基于低相干干涉的原理使得图像中不可避免地存在散斑噪声^[77],都会降低成像结果的质量。此外,在系统搭建过程中,光学器件自身有时会对图像造成负面影响,例如透镜的畸变。高质量的 OCT 图像能呈现更直观的可视化结果,也能为后期图像检验和特征参数提取提供前提条件,因此在未来可基于设备搭建和图像处理两方面的改进提高 OCT 成像质量。

5.4 拓宽技术融合度

在分析和鉴定方面,OCT 能够对待测样品的内部结构进行实时二维截面和三维效果呈现,为了更为客

观准确地表征物证间的同一或差异特性,同时充分利用 OCT 采集到的三维体数据和图像信息,在未来考虑将机器学习、深度学习的方法与 OCT 相结合,以期得到定量或半定量的多元可视化结果,为物证的检验与鉴定提供补充依据。

6 结语

OCT 具有高分辨、强层析、真三维无损成像等优点,并且在检测过程中无需对样品进行预处理,能显著提高检验效率和图像质量,其在物证检验鉴定领域具有广阔的应用前景,对未来物证鉴定具有重要意义。未来 OCT 在法庭科学领域中的发展方向是将系统进一步集成化和实用化,通过将 OCT 系统的数据采集和处理模块集成到便携式设备,在犯罪现场中实现原位检测。同时,可以考虑将超高速 OCT 成像系统中样品臂与机械臂相结合,以满足犯罪现场中大范围扫描的实用需求,并且 OCT 对潜在物证具有很好的显现效果,在实际现场中可能进一步发现更多元的痕迹证据,拓展该项技术的应用范畴。

参 考 文 献

- [1] Alsayed E Z, Hariri I, Sadr A, et al. Optical coherence tomography for evaluation of enamel and protective coatings[J]. Dental Materials Journal, 2015, 34(1): 98-107.
- [2] Swanson E, Izatt A J, Bee M K, et al. Optical coherence tomography[C]//LEOS'92 Conference Proceedings, November 16-19, Boston, MA, USA. New York: IEEE Press, 1991: 656-657.
- [3] 张宁. 内窥镜频域光学相干 CT 研究[D]. 北京: 清华大学, 2014.
Zhang N. Study of the endoscopic spectral-domain optical coherence tomography[D]. Beijing: Tsinghua University, 2014.
- [4] Qian Y Y, Liu L, Shi Y H, et al. Assessment of anterior chamber by ultrasound biomicroscopy and anterior segment optical coherence tomography in patients with inflammatory glaucoma[J]. The Journal of International Medical Research, 2019, 47(12): 5950-5956.
- [5] Del-Valle M, Lins E, Ana P. Assessment of simulated osteoporosis in alveolar bone using optical coherence tomography[J]. Journal of Biophotonics, 2019, 12(12): e201900171.
- [6] Hua R, Ning H. Using optical coherence tomography angiography to guide the treatment of pathological myopic patients with submacular hemorrhage[J]. Photodiagnosis and Photodynamic Therapy, 2019, 28: 105-109.
- [7] Sciarone D F G, McLaughlin R A, Argarini R, et al. Visualising and quantifying microvascular structure and function in patients with heart failure using optical coherence tomography[J]. The Journal of Physiology, 2022(17): 600.

- [8] Leitgeb R A, Hitzberger C K, Fercher A F. Performance of Fourier domain *vs.* time domain optical coherence tomography[J]. *Optics Express*, 2003, 11(8): 889-894.
- [9] Fercher A F. Optical coherence tomography-development, principles, applications[J]. *Zeitschrift Für Medizinische Physik*, 2010, 20(4): 251-276.
- [10] Wojtkowski M, Srinivasan V J, Ko T H, et al. Ultrahigh-resolution, high-speed, Fourier domain optical coherence tomography and methods for dispersion compensation[J]. *Optics Express*, 2004, 12(11): 2404-2422.
- [11] Qi B, Himmer A P, Gordon L M, et al. Dynamic focus control in high-speed optical coherence tomography based on a microelectromechanical mirror[J]. *Optics Communications*, 2004, 232: 123-128.
- [12] Choma M A, Sarunic M V, Yang C, et al. Sensitivity advantage of swept source and Fourier domain optical coherence tomography[J]. *Optics Express*, 2003, 11(18): 2183-2189.
- [13] Hillman T R, Sampson D D. The effect of water dispersion and absorption on axial resolution in ultrahigh-resolution optical coherence tomography[J]. *Optics Express*, 2005, 13(6): 1860-1874.
- [14] Dubey S K, Mehta D S, Anand A, et al. Simultaneous topography and tomography of latent fingerprints using full-field swept-source optical coherence tomography[J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2008, 10(1): 015307.
- [15] 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.
- [16] Liu K K, Meng L, Zhang N, et al. Visualization of latent fingerprints beneath opaque electrical tapes by optical coherence tomography[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10611: 106110U.
- [17] 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.
- [18] 吴迪, 陆一帆, 曾浩然, 等. 基于光学相干层析技术显现多层胶带粘面重叠指印的新方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(6): 0611002.
Wu D, Lu Y F, Zeng H R, et al. Optical coherence tomography based method for developing overlapped fingermarks on the multi-layer adhesive tape[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(6): 0611002.
- [19] Zhang N, Wang C M, Li Z G, et al. Separation of overlapping fingerprints in multilayered carrier using optical coherence tomography[J]. *Journal of Forensic Identification*, 2019, 69(3): 356-366.
- [20] Cheng Y Z, Larin K V. Artificial fingerprint recognition by using optical coherence tomography with autocorrelation analysis[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(36): 9238-9245.
- [21] Sven M, Ralph B, Edmund K. Fingerprint fake detection by optical coherence tomography[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8571: 85713L.
- [22] 王凯聪, 李金华, 房文汇. 光学相干层析技术在指纹识别中的应用[J]. *光谱学与光谱分析*, 2020, 40(S1): 317-318.
Wang K C, Li J H, Fang W H. Application of optical coherence tomography technology in fingerprint recognition [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2020, 40(S1): 317-318.
- [23] Bossen A, Lehmann R, Meier C. Internal fingerprint identification with optical coherence tomography[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(7): 507-509.
- [24] Liu G J, Chen Z P. Capturing the vital vascular fingerprint with optical coherence tomography[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(22): 5473-5477.
- [25] Zam A, Dsouza R, Subhash H M, et al. Feasibility of correlation mapping optical coherence tomography (cmOCT) for anti-spoof sub-surface fingerprinting[J]. *Journal of Biophotonics*, 2013, 6(9): 663-667.
- [26] 贺晨鸽. 指纹三级特征在指印鉴定中的应用研究[D]. 上海: 华东政法大学, 2018.
He C G. The applied research of level 3 features in fingerprint identification[D]. Shanghai: East China University of Political Science and Law, 2018.
- [27] Sun S, Guo Z H. Sweat glands extraction in optical coherence tomography fingerprints[C]//2017 International Conference on Security, Pattern Analysis, and Cybernetics (SPAC), December 15-17, 2017, Shenzhen, China. New York: IEEE Press, 2017: 579-584.
- [28] Raja K B, Raghavendra R, Auksorius E, et al. Subsurface and layer intertwined template protection using inherent properties of full-field optical coherence tomography fingerprint imaging[C]//2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), June 16-17, 2019, Long Beach, CA, USA. New York: IEEE Press, 2019: 2397-2404.
- [29] Ding B J, Wang H X, Chen P, et al. Surface and internal fingerprint reconstruction from optical coherence tomography through convolutional neural network[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2021, 16: 685-700.
- [30] Ma T, Huang J, Wang J F. Study on the pupal morphogenesis of *Chrysomya Rufifacies* (Macquart) (Diptera: Calliphoridae) for postmortem interval estimation [J]. *Forensic Science International*, 2015, 253: 88-93.
- [31] Amendt J, Richards C S, Campobasso C P, et al. Forensic entomology: applications and limitations[J]. *Forensic Science, Medicine, and Pathology*, 2011, 7(4): 379-392.
- [32] Arnott S, Turner B. Post-feeding larval behaviour in the blowfly, *Calliphora Vicina*: effects on post-mortem interval estimates[J]. *Forensic Science International*, 2008, 177(2/3): 162-167.
- [33] Amendt J, Campobasso C P, Gaudry E, et al. Best practice in forensic entomology: standards and guidelines [J]. *International Journal of Legal Medicine*, 2007, 121(2): 90-104.

- [34] Voss S C, Magni P, Dadour I, et al. Reflectance-based determination of age and species of blowfly puparia[J]. *International Journal of Legal Medicine*, 2017, 131(1): 263-274.
- [35] Boehme P, Spahn P, Amendt J, et al. The analysis of temporal gene expression to estimate the age of forensically important blow fly pupae: results from three blind studies[J]. *International Journal of Legal Medicine*, 2014, 128(3): 565-573.
- [36] Davies K, Harvey M L. Internal morphological analysis for age estimation of blow fly pupae (Diptera: Calliphoridae) in postmortem interval estimation[J]. *Journal of Forensic Sciences*, 2013, 58(1): 79-84.
- [37] Frere B, Suchaud F, Bernier G, et al. GC-MS analysis of cuticular lipids in recent and older scavenger insect puparia[J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2014, 406(4): 1081-1088.
- [38] Moore H E, Adam C D, Drijfhout F P. Potential use of hydrocarbons for aging *Lucilia sericata* blowfly larvae to establish the postmortem interval[J]. *Journal of Forensic Sciences*, 2013, 58(2): 404-412.
- [39] Brown K, Harvey M. Optical coherence tomography: age estimation of *Calliphora Vicina* pupae *in vivo*? [J]. *Forensic Science International*, 2014, 242: 157-161.
- [40] Choi K S, Wijesinghe R E, Lee C, et al. *In vivo* observation of metamorphosis of *Plodia interpunctella* Hübner using three-dimensional optical coherence tomography[J]. *Entomological Research*, 2017, 47(4): 256-262.
- [41] Ravichandran N K, Wijesinghe R E, Lee S Y, et al. Non-destructive analysis of the internal anatomical structures of mosquito specimens using optical coherence tomography[J]. *Sensors*, 2017, 17(8): 1897.
- [42] Pinheiro J. Introduction to forensic medicine and pathology[M]//Schmitt A, Cunha E, Pinheiro J. *Forensic anthropology and medicine*. Totowa: Humana Press, 2007: 13-37.
- [43] Koehler K, Sehner S, Riemer M, et al. Post-mortem chemical excitability of the iris should not be used for forensic death time diagnosis[J]. *International Journal of Legal Medicine*, 2018, 132(6): 1693-1697.
- [44] Balci Y, Basmak H, Kocaturk B K, et al. The importance of measuring intraocular pressure using a tonometer in order to estimate the postmortem interval [J]. *The American Journal of Forensic Medicine and Pathology*, 2010, 31(2): 151-155.
- [45] McNabb R P, Tian J, Farsiu S, et al. Retinal imaging in human autopsy eyes using a custom optical coherence tomography periscope[J]. *Biomedical Optics Express*, 2017, 8(9): 4152-4159.
- [46] Napoli P E, Nioi M, Gabiati L, et al. Repeatability and reproducibility of post-mortem central corneal thickness measurements using a portable optical coherence tomography system in humans: a prospective multicenter study[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 14508.
- [47] Nioi M, Napoli P E, Demontis R, et al. Morphological analysis of corneal findings modifications after death: a preliminary OCT study on an animal model[J]. *Experimental Eye Research*, 2018, 169: 20-27.
- [48] Napoli P E, Nioi M, D' Aloja E, et al. Post-mortem corneal thickness measurements with a portable optical coherence tomography system: a reliability study[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 30428.
- [49] Nioi M, Napoli P E, Demontis R, et al. Postmortem ocular findings in the optical coherence tomography era: a proof of concept study based on six forensic cases[J]. *Diagnostics*, 2021, 11(3): 413.
- [50] Nioi M, Napoli P E, Paribello F, et al. Use of optical coherence tomography on detection of postmortem ocular findings: pilot data from two cases[J]. *Journal of Integrated OMICS*, 2018, 8(1): 5-7.
- [51] Roberts I S, Benamore R E, Benbow E W, et al. Post-mortem imaging as an alternative to autopsy in the diagnosis of adult deaths: a validation study[J]. *The Lancet*, 2012, 379(9811): 136-142.
- [52] Li Y, Wei Z B, Ding Y H, et al. Application of intravascular imaging in forensic autopsy[J]. *Journal of Forensic Medicine*, 2019, 35(3): 332-336.
- [53] Brezinski M E, Tearney G J, Bouma B E, et al. Imaging of coronary artery microstructure (*in vitro*) with optical coherence tomography[J]. *The American Journal of Cardiology*, 1996, 77(1): 92-93.
- [54] Kume T, Akasaka T, Kawamoto T, et al. Assessment of coronary arterial thrombus by optical coherence tomography[J]. *The American Journal of Cardiology*, 2006, 97(12): 1713-1717.
- [55] Prati F, Guagliumi G, Mintz G S, et al. Expert review document part 2: methodology, terminology and clinical applications of optical coherence tomography for the assessment of interventional procedures[J]. *European Heart Journal*, 2012, 33(20): 2513-2520.
- [56] Adlam D, Joseph S, Robinson C, et al. Coronary optical coherence tomography: minimally invasive virtual histology as part of targeted post-mortem computed tomography angiography[J]. *International Journal of Legal Medicine*, 2013, 127(5): 991-996.
- [57] 王成铭. OCT 超高速成像方法研究及在临床和法庭科学中的应用[D]. 北京: 清华大学, 2018.
- Wang C M. Ultrahigh speed OCT and its applications in clinical and forensic study[D]. Beijing: Tsinghua University, 2018.
- [58] Zhang N, Jiang P, Wang W X, 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.
- [59] Neto O N, Sarkis J E S, Siqueira A N, et al. A new method for measuring pen pressure in forensic handwriting analysis-a proof of concept study[J]. *The Analyst*, 2021, 146(6): 1973-1980.
- [60] Baechler S, Margot P. Understanding crime and fostering security using forensic science: the example of turning false identity documents into forensic intelligence [J]. *Security Journal*, 2016, 29(4): 618-639.
- [61] 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.
- [62] Marques M J, Green R, King R, et al. Sub-surface characterisation of latest-generation identification documents using optical coherence tomography[J]. *Science & Justice*, 2021, 61(2): 119-129.
- [63] Moran T C, Kaye A D, Rao A, et al. The roles of X rays and other types of electromagnetic radiation in evaluating paintings for forgery and restoration[J]. *Journal of Forensic Radiology and Imaging*, 2016, 5: 38-46.
- [64] Bisbing R E, Wolner M F. Microscopical discrimination of twins' head hair[J]. *Journal of Forensic Sciences*, 1984, 29(3): 780-786.
- [65] 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.
- [66] Wang C M, Xie L C, Xu X J, et al. Preliminary analysis of facial hair follicle distribution for forensic identification using OCT[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10497: 1049708.
- [67] 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.
- [68] 李岳松. 运用 Evofinder 枪弹自动识别系统对 QSZ92 式 9 mm 手枪数字化建档的研究[D]. 北京: 中国人民公安大学, 2019.
- Li Y S. Performance evaluation of a Chinese norinco QSZ-92 registered ballistic database using the Evofindersystem[D]. Beijing: Chinese People's Public Security University, 2019.
- [69] Grulkowski I, Liu J J, Potsaid B, et al. High-precision, high-accuracy ultralong-range swept-source optical coherence tomography using vertical cavity surface emitting laser light source[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(5): 673-675.
- [70] 刘宁宁, 许小京, 张宁, 等. 基于光学相干层析(OCT)技术的车身油漆无损断层成像研究[J]. *刑事技术*, 2016, 41(5): 367-371.
- Liu N N, Xu X J, Zhang N, et al. Studies on optical coherence tomographic images from nondestructive paint chips of motor vehicles[J]. *Forensic Science and Technology*, 2016, 41(5): 367-371.
- [71] 刘宁宁. 基于光学相干层析技术检验汽车车身油漆的实验研究[D]. 北京: 中国人民公安大学, 2017.
- Liu N N. Examination of automotive paint by optical coherence tomography[D]. Beijing: Chinese People's Public Security University, 2017.
- [72] 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.
- [73] 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.
- [74] 罗瑞彪. 疑难手印显现[M]. 北京: 群众出版社, 2005.
- Luo R B. Development of difficult fingerprints[M]. Beijing: The Mass Publishing House, 2005.
- [75] 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.
- 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.
- [76] Klein T, Wieser W, Eigenwillig C M, et al. Megahertz OCT for ultrawide-field retinal imaging with a 1050 nm Fourier domain mode-locked laser[J]. *Optics Express*, 2011, 19(4): 3044-3062.
- [77] Schmitt J M, Xiang S H, Yung K M. Speckle in optical coherence tomography[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 1999, 4(1): 95-105.