# 激光写光电子学进展

# 光学相干层析成像在指尖生物特征识别中的应用

苗清然,王海霞\*,于洋,张怡龙

浙江工业大学计算机科学与技术学院,浙江 杭州 310023

**摘要** 指尖作为人体最方便采集的部位之一一直是生物特征识别研究的重点。随着指纹等外部指尖生物特征抵抗环境 干扰能力差和容易被伪造等问题的出现,人们开始关注指尖内部的生物特征。光学相干层析成像技术能够非侵入地对 指尖的内部结构进行三维成像,并从中获取内部指纹、汗孔和汗腺等更加安全稳定的指尖内部生物特征。在过去的近二 十年中,众多的研究者针对这一方向开展了研究。对光学相干层析成像技术、光学相干层析成像技术对指尖生物特征的 采集、该技术在生物特征识别和防伪方面的应用等进行了总结,最后分析了当前的技术限制和发展前景,旨在为该方向 的持续发展提供理论支持。

关键词 光学相干层析成像;指尖内部结构;指尖生物特征识别;防伪 中图分类号 TN29 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230484

# **Application of Optical Coherence Tomography in Fingertip Biometrics**

Miao Qingran, Wang Haixia<sup>\*</sup>, Yu Yang, Zhang Yilong

College of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China

**Abstract** The fingertip is one of the most convenient part for collection of the human body to be used for measurements and has been the focus of biometric identification research. As external fingertip biometrics, such as fingerprints, have shown poor resistance to environmental interference and easy forgery, internal fingertip biometrics have begun to receive attention. Optical coherence tomography (OCT) enables non-invasive three-dimensional imaging of the internal structure of a fingertip. From the measured volume data, secure and stable internal fingertip biometric features, such as internal fingerprints, sweat pores, and sweat glands, have been obtained. Therefore, in the past two decades, the use of OCT has received substantial research attention. Research progresses on OCT in fingertip biometrics acquisition, and its applications in biometric identification and anti-counterfeiting are presented in this paper. Finally, an analysis of the current technical limitations and development prospects is presented. The findings can provide theoretical support for sustainable development of this research field.

Key words optical coherence tomography; fingertip internal structure; fingertip biometrics; anti-counterfeiting

# 1引言

生物特征对每个个体而言都是永久、独特且不会 丢失的,因此广泛应用于安全领域。在各种生物特征 中,指纹由于优秀的唯一性和持久性<sup>[1]</sup>成为目前应用 最广的生物特征。从边境检查、门禁系统到支付认证, 指纹识别已经深入到生活的各个方面。指纹一般是指 手指指尖皮肤表面的凹凸结构,即脊线和谷线,构成了 代表个体不同身份的生物特征信息,采集方法主要有 油墨法<sup>[1]</sup>、光学传感<sup>[2]</sup>、电容传感<sup>[3]</sup>和射频<sup>[4]</sup>等。随着指 纹识别技术的发展和应用,外部表皮指纹的缺陷也逐渐暴露出来。年龄、工作和外部环境因素都会造成其 老化、磨损,降低指纹识别的准确性与有效性;还有部 分人群由于患有皮纹症天生就没有外部指纹<sup>[5]</sup>,这给 指纹识别造成了极大的挑战。同时,由于外部指纹容 易伪造,自动指纹识别系统(AFIS)容易受到指纹模、 假手指等造假方式的恶意攻击。

其实指尖从表面到皮下都包含丰富的身份特征, 外部指纹只是其中最容易应用的一种。根据生物学知 识,指尖皮肤包含外部表皮指纹、皮下内部指纹、汗孔

先进成像

收稿日期: 2023-01-10; 修回日期: 2023-02-15; 录用日期: 2023-02-22; 网络首发日期: 2023-03-09

基金项目:浙江省领军创新创业团队(2021R01002)、国家自然科学基金(61976189, 62276236)

和汗腺等特征。随着技术的发展和对安全要求的提高,探索和提取新的指尖内部特征已成为一个重要趋势。光学相干层析成像技术(OCT)作为一种具有非侵入式、无损、高分辨率特点<sup>[6-7]</sup>的新一代生物成像技术目前已在医学领域得到了广泛的应用。相比其他一些成像技术,例如超声成像、核磁共振成像(MRI)、X-射线计算机断层(CT)等,OCT具备较高的分辨率;同时,与共聚焦显微、多光子显微技术等超高分辨技术相比,OCT又具有更强大的层析能力。作为目前最强大的组织成像工具之一,OCT系统能够采集到皮下几毫米的指尖深度体数据,从而获取内部指纹、汗孔和汗腺等高安全生物特征,为指尖生物特征识别和防伪的发展带来了新的方向。

基于 OCT 的指尖皮下生物特征处理技术的发展 已经进行了大约 20年<sup>[8]</sup>,尽管这些工作都证明 OCT 采 集的指尖皮下生物特征比传统的外部指纹具有更好的 抗干扰能力和防伪性能,但是其实际应用还远不如外 部指纹。究其原因,一方面是 OCT 系统自身在指纹采 集上的局限性,另一方面是缺乏适当的处理方法。因 此本文从这两方面总结了近年来 OCT 在指尖生物特 征识别领域的研究进展。本文对 OCT 系统及其在指 尖生物特征采集上的应用、OCT 采集的指尖皮下生物 特征识别和防伪方法进行了系统的梳理;发现并讨论 了限制 OCT 在指尖生物特征识别的实际应用的问题 以及未来的发展前景。本文旨在为 OCT 系统的设计 和改进提供参考,并为研究者对皮下生物特征的识别、 防伪算法的研究提供支持。

# 2 光学相干层析成像技术

#### 2.1 OCT的基本原理

OCT系统的核心是迈克耳孙干涉仪<sup>[9-10]</sup>,它基于 低相干干涉测量(LCI)来产生深度剖面图,通过来自 样品内部的背向散射光与经过已知参考路径<sup>[10-11]</sup>的光 发生相干干涉实现测量。图1展示了基于迈克耳孙干 涉仪的OCT设备基本光路,来自光源的入射光经分光 后分为参考光束和样品光束(探测光束)。样品光束沿 轴向穿透样品后发生散射,参考光束准直到参考镜。 来自样品的携带内部微观结构信息的散射光与从参考 镜反射的光发生干涉,干涉信号被探测器接收。

OCT系统的性能评价指标主要包括光源参数、轴向分辨率、横向分辨率、采集深度、灵敏度和采集速率。 其中光源参数包括中心波长 $\lambda_0$ 、带宽 $\Delta\lambda$ 、相干长度 $L_c$ 和发射强度。光源相干长度 $L_c$ 由中心波长 $\lambda_0$ 和带宽  $\Delta\lambda决定,在真空中其关系<sup>[12]</sup>可以表示为$ 

$$L_{\rm c} = \frac{4\ln 2}{\pi} \cdot \frac{\lambda_0^2}{\Delta \lambda} \approx 0.88 \cdot \frac{\lambda_0^2}{\Delta \lambda}, \qquad (1)$$

式中: $\Delta\lambda$ 更准确的定义为光源强度(具有高斯光谱)的 半峰全宽(FWHM)处对应的波长带宽。轴向分辨率  $R_{\varepsilon}$ 通常被定义为 $L_{\varepsilon}$ 的一半<sup>[12]</sup>,表达式为

#### 第 60 卷第 8 期/2023 年 4 月/激光与光电子学进展



图 1 基于迈克耳孙干涉仪的 OCT 基本光路<sup>[12]</sup> Fig. 1 Basic optical path of OCT scheme based on Michelson interferometer<sup>[12]</sup>

$$R_z = \frac{L_c}{2} \approx 0.44 \cdot \frac{\lambda_0^2}{\Delta \lambda_0}$$
 (2)

横向分辨率R<sub>x</sub><sup>[13]</sup>的表达式为

$$R_x = 1.22 \cdot \frac{\lambda_0}{2NA_{\text{obj}}},\tag{3}$$

式中:NA<sub>obj</sub>为样品臂聚焦镜的数值孔径。R<sub>z</sub>和R<sub>x</sub>的 值越小,分辨率越高。OCT系统的理论最大深度 Z<sub>max</sub><sup>[14]</sup>定义为

$$Z_{\max} = \frac{\lambda_0^2 N}{4n \cdot \Delta \lambda}, \qquad (4)$$

式中:N为探测器阵列的有效元素数;n为样品的平均 折射率。一般来说,较大的 $\lambda_0$ 更适合成像更深的结构<sup>[15]</sup>,但会降低分辨率。同时 $\Delta\lambda$ 也会影响到系统的轴 向分辨率:在大多数情况下,光源的发射带宽越宽,轴 向分辨率和对比度就越好<sup>[16-17]</sup>;但是如果 $\Delta\lambda$ 过宽,色 差<sup>[18]</sup>和色散<sup>[19]</sup>的程度会显著增加,反而导致轴向分辨 率降低。OCT系统的灵敏度,也称为光学动态范围, 可以定义为完美反射镜产生的信号功率与最弱样品反 射率产生的信号功率的比值<sup>[20]</sup>。采集速率是指一个单 位时间内A-Scan的次数,它可能会受到探测器性能等 因素的影响,它也是实际应用中的一个关键指标。

由式(2)~(4)可以发现,光源的参数决定了OCT 系统的分辨率和采集深度,因此光源是影响OCT系统 性能的关键因素。表1列出了几种在OCT中被广泛 使用的光源的参数。一般来说,采用宽光谱、高发射功 率和波长在近红外区域的OCT系统在生物组织测量 中更能达到令人满意的测量深度、分辨率和灵敏度。 目前OCT中使用最为广泛的光源是超发光二极管 (SLD)。SLD价格便宜且具有宽光谱<sup>[16]</sup>,使用SLD搭 建的OCT系统的轴向分辨率通常在10~15 μm。边 发射发光二极管(edge-emitting LED)的分辨率相对较 好且成本较低<sup>[21]</sup>,但发射功率相比SLD小1个数量级, 因此结合多个LED或SLD是提高分辨率的一种方

Table 1Light sources in OCT system							
Source	Center wavelength /nm	Bandwidth /nm	Emission power /nW	Reference			
Edge-emitting LED	1300, 1500	50-100	0.02-0.3	[21]			
Multiple QW LED/SLD	800,1480	90	15, 5 max	[22-23]			
Ti: Sapphine laser	830	70	14	[24]			
SLS	$1310 \pm 15$	80,100	10	[25-32]			
SLD	800-850,1300-1375	15-220	0.375-5	[14, 33-44]			
LED	850	30	900	[45-46]			

表1 OCT系统中的光源

法<sup>[22-23]</sup>。为了实现快速的高分辨率OCT成像,研究者 开发了高功率、宽带宽的Ti:Sapphine激光源<sup>[24]</sup>,然而 这种激光源在实际使用中体积庞大且昂贵,不利于实 际使用。此外,一种能够快速扫描的扫频激光源 (SLS)也被开发用于OCT成像<sup>[25-26]</sup>,制造这种激光器 的常用技术是采用腔内窄带波长扫频滤波器<sup>[27]</sup>。对超 宽带宽光源的另一个尝试是采用热光源,如卤素、钨和 氙气灯<sup>[28]</sup>,采用这种光源可以搭建结构更加紧凑且成 本较低的OCT系统<sup>[29]</sup>。目前在高分辨率指尖生物特 征成像的需求下,大多数OCT系统都采用SLD和 SLS作为光源<sup>[30]</sup>。

#### 2.2 OCT的发展概述

OCT系统发展至今经历了几项重大的创新,其中 最具代表性的成果是时域OCT(TD-OCT)和傅里叶 域/频域OCT(FD-OCT)。FD-OCT中主要有两种方 法,分别称为谱域OCT(SD-OCT)和扫频OCT(SS-OCT)。此外,在指尖生物识别技术的应用领域,另一 种被称为全场OCT(FF-OCT)的技术也值得关注。

基于光纤迈克耳孙干涉仪的OCT系统是由 Huang 等在1991年开创的<sup>[47]</sup>,此类型的系统也被称为 TD-OCT。TD-OCT 通过探测干涉仪中反射镜的反 射光和样品的后向散射光产生的干涉信号来获取样品 的深度信息。以图 2(a)为例<sup>[34]</sup>,大多数 TD-OCT 会在 参考臂上配备一个平移镜(或扫描延迟线<sup>10]</sup>),通过机 械运动实现轴向扫描和侧向扫描,这在很大程度上限 制了数据采集的速度<sup>[48]</sup>。为了解决TD-OCT的缺点, Fercher 等<sup>[49]</sup>提出了FD-OCT。FD-OCT包含基于频 域检测技术的 SD-OCT 和基于可调谐扫频光源的 SS-OCT两种方法<sup>[50]</sup>。如图 2(b)所示,SD-OCT从光谱仪 的线阵电荷耦合元器件(CCD)中并行采集不同深度 对应的频率信号[34,51],使深度扫描可以在没有机械运 动的情况下进行<sup>[10]</sup>,大大提高了成像速度<sup>[52]</sup>。不同于 采用光谱仪这类分光设备的 SD-OCT, SS-OCT 采用 改变光源的方法提升采集速度<sup>[48]</sup>。它是由 Fercher



图 2 OCT 系统示例。(a)时域 OCT<sup>[34]</sup>; (b) 谱域 OCT<sup>[44]</sup>; (c) 扫频 OCT<sup>[30]</sup>; (d) 全场 OCT<sup>[36]</sup>

Fig. 2 Example of OCT systems. (a) TD-OCT<sup>[34]</sup>; (b) SD-OCT<sup>[44]</sup>; (c) SS-OCT<sup>[30]</sup>; (d) FF-OCT<sup>[36]</sup>

等<sup>[31]</sup>提出的,系统图<sup>[30]</sup>如图2(c)所示。在SS-OCT 中,宽带弱相干激光器被扫频光源取代,其光波长随时 间变化呈周期性转变,每当激光器扫描超过一个波长 间隔时,探测器就会收集一次A-Scan信号。与SD-OCT相比,SS-OCT具有更高的测量灵敏度和信噪 比,但SD-OCT具有更高的轴向分辨率和更低的成 本,因此SD-OCT仍然是目前应用最广泛和商业化程 度最高的 OCT 系统。FF-OCT 是一种成本较低的 OCT变体,它由Boccara研究小组于1998年提出,其 示意图<sup>[36]</sup>如图 2(d)所示。传统的 OCT 要求在一个或 两个方向上横向扫描照明点以分别获得 B-Scan 或三 维体数据,然后再从体数据中提取出合适纵向深度上 的指纹图像。但是FF-OCT在发光二极管的全场照 明下<sup>[46]</sup>,使用面阵CCD作为探测器阵列进行采集,因 此不需要扫描就可以直接获取深度方向上的截面图像 (en-face), 当只涉及 en-face 图像的采集时, FF-OCT 速度远快于标准OCT系统。然而热光源的使用限制 了FF-OCT系统的灵敏度和成像深度。

# 3 OCT对指尖生物特征的采集

# 3.1 指尖信息组成和OCT测量

生物学研究表明,皮肤主要由三层结构组成,它们 是表皮、真皮层和皮下组织。表皮是一个惰性的外层, 真皮层含有毛细血管,皮下组织含有脂肪细胞。OCT 已被证明能够对活体组织的深层皮下进行无侵入成

#### 第 60 卷第 8 期/2023 年 4 月/激光与光电子学进展

像<sup>[53]</sup>。在指尖的皮肤中,OCT能对表皮清晰成像,部 分系统能达到真皮层。如图3所示,指尖表皮的顶部 有角质层,其轮廓提供了表皮指纹<sup>[8]</sup>。汗腺通常呈螺 旋状或椭圆形结构<sup>[54]</sup>,皮肤表面处汗腺的开口就是汗 孔。在角质层和表皮之间的活性表皮连接处代表内部 指纹<sup>[44]</sup>。内部指纹作为外部指纹的母模板,确保了外 表皮上受到浅切或其他轻伤后的指纹能够重现。

OCT系统在采集生物特征时通常会进行深度扫描和横向扫描。OCT从一系列相邻的LCI深度扫描 (A-Scan)中合成一个横断面图像(B-Scan)。一系列 相邻的B-Scan形成一个三维的体数据(C-Scan)。如 图4所示,对采集的体数据(伪彩色)进行提取后,可以 得到真皮指纹、皮下汗腺(汗孔)等生物特征,采集的体 数据大小主要是由系统的设计和实际的采集需求决定 的<sup>[55]</sup>。图5显示了一些外部指纹受到不同程度的磨损 或破坏时的内部指纹情况。成功获得这些新特征将给 生物特征识别和防伪安全领域带来新的发展。



图 3 指尖皮下信息的 B-Scan 扫描图像<sup>[8]</sup> Fig. 3 B-Scan image of fingertip subcutaneous information<sup>[8]</sup>



图 4 OCT 系统的指尖生物特征成像示意图<sup>[55]</sup> Fig. 4 Schematic of fingertip biometric imaging using OCT system<sup>[55]</sup>

# 3.2 OCT系统在指尖特征采集上的应用

OCT已广泛应用于医学、工业检验和考古学等领域<sup>[56]</sup>。Ohmi等<sup>[29,57]</sup>将OCT的应用扩展到指尖生物特征领域。此后,OCT系统在指尖生物特征的采集和识别中的应用已经开始。他们使用OCT系统采集指尖图像,并描述了指纹的光学特性。他们发现指纹的凹部分比凸部分有更高的透光率。此外,这种透光率色

散可以对应于指纹的脊线和谷线。指纹不受表面挤压 和褶皱的影响。在近二十年来关于OCT与指尖生物 特征相结合的相关研究和探索中,主要的应用可以概 括为两方面:指尖生物特征识别,内部指纹、汗孔和汗 腺可以作为外部指纹的补充或外部指纹的替换;欺骗 攻击检测,利用指尖下的皮下二维或三维结构信息进 行防伪。表2列出了目前应用于指尖生物特征研究的



图 5 内部指纹的抗干扰性能 Fig. 5 Internal fingerprint anti-interference performance

表	2 J	用于指尖	生物识知	别研究的	OCT 系纺	č
Table 2	OCT	`systems	used in	fingertip	biometric	research

No.	Туре	Light source	$\lambda_0 / nm$	$\Delta\lambda$ /nm	$R_z/\mu m$	$R_x/\mu m$	Power /mW	A-Line rate /kHz	Reference
1	TD-OCT	SLD	850	15					[33, 58]
2	TD-OCT	SLD	$1300 \pm 15$	15			0.375	40	[34-35, 38,59-60]
3	SD-OCT	SLED	1310				17		[14]
4	SD-OCT	Ti: Sapphire oscillator	830	70			14		[24]
5	TD-OCT	SLD	824	20					[37]
6	SD-OCT	SLD	840		8	12			[41]
7	SD-OCT	SLD	1308	47			3		[57]
8	SD-OCT	SLD	1325	100	11	20	10	146	[61]
9	SD-OCT	Superlum D-series broadlighter	845	107	4	30			[62]
10	SD-OCT	Broadband source	848	46	7	10	4.81	18	[63]
11	SS-OCT	SLD	1325	100	12	8.8	10	16	[32,64-66]
12	SS-OCT	SLD	1325	100	12	15		512	[67-69]
13	SS-OCT	A swept source	1320		13	13		20	[70]
14	FF-OCT	Fiber-bundle-coupled halogen							[53]
15	FF-OCT	A halogen lamp							[66]
16	FF-OCT	Near-infrared LED light							[45,71-72]

OCT系统,由于不同种类OCT系统的性能不同,主要的应用领域和应用程度也不尽相同。TD-OCT作为早期OCT,受到扫描机制的影响,其信号灵敏度、信噪比和扫描速度都较低。因此,TD-OCT在指尖生物识别技术中的应用主要集中在防伪上,而不是识别。SS-OCT和SD-OCT是在OCT系统基础上进行改进得到的,显著提高了扫描速度和成像信噪比。其中,SS-OCT具有较高的测量灵敏度和信噪比,而SD-OCT具有较高的相位稳定性和轴向分辨率。SS-OCT和SD-OCT同属于FD-OCT,被称为第二代OCT,也是目前在该领域最常用的采集系统,既可以

用于识别,也可用于防伪。FF-OCT放弃了冗余的3D 数据采集,使快速获取深度方向截面图像成为可能,然 而,该系统的灵敏度和深度在一定程度上受到了限制, 因此应用较少。

# 4 基于OCT的指尖生物特征识别

在利用OCT采集指尖的二维和三维数据后,可以 从中提取出各种新的内部生物特征来进行个人识别。 到目前为止,提取的对象主要包括内部指纹和汗腺 (汗孔)。

# 4.1 内部指纹

4.1.1 基于FD-OCT的指纹采集与处理

目前用于内部指纹采集的 OCT 设备主要是 SS-OCT和SD-OCT。Bossen等<sup>[32]</sup>于2010年通过改装商 用SS-OCT设备,在其样品臂的手持式探头上安装了 一个3mm厚的玻璃盖板采集指尖体数据,然后使用 ImageJ软件计算了深度方向上像素坐标在25到210 之间的图像切片均值,获得了第一张内部指纹的二维 图像。他们共组织了51名年龄在20岁到65岁之间、 从事不同类型工作、不同种族的志愿者,共获得153组 指尖体数据。Zam 等<sup>[68]</sup>利用同样的方法采集了两名志 愿者的手指,获得了6组体数据,并通过手动分割的方 法获得了它们的内部指纹。还有诸多研究者[14,40,42]也 同样采用了将加装玻璃盖板作为指纹采集窗口的方 法。他们的结果都表明SS-OCT可以对手指的内部结 构进行三维成像,并可以从三维体积数据中提取内部 指纹进行识别。基于SS-OCT的研究结果,内部指纹 提取方法也在不断发展。Khutlang等<sup>[64]</sup>利用奇异值检 测对OCT采集的三维数据进行分割。该方法将深度 为10到20像素的表皮像素值作为目标类别,将表皮层 作为排斥类别,在处理前,首先将表皮层拉直以去除指 尖的曲率,之后把内部指纹定义为目标类和拒绝类之 间的边界。Akhoury 等<sup>[65]</sup>在 B-Scan 图像中使用 K-Means聚类来拟合活性表皮层的位置,并进行了活表 皮层交界处的定位;之后又在B-Scan中通过模糊C-Means聚类近似活性表皮层的位置,使用Sobel算子检 测活表皮层的精确轮廓。他们共采集了10根手指,得 到了55组体数据,结果表明其中74%的高质量的内部 指纹与光学全反射对应的指纹有真正的匹配,96%的 内部指纹具有真正的交叉匹配。

除SS-OCT系统外,基于SD-OCT的内部指纹研究工作也在逐步开展。考虑到OCT能够同时采集内部和外部指纹,da Costa等<sup>[41]</sup>将商业SD-OCT与能够测量手指对透明盖板压力的自制装置结合,研究两种指纹变形能力的差异。2014年,Korohoda等<sup>[72]</sup>采用Sylwestrzak等<sup>[62]</sup>设计的SD-OCT系统实现了指尖内部结构的获取。他们还提出了一种从三维OCT体数据中提取表皮和内部指纹的方法,处理步骤中涉及的指标包括用于去噪的中值滤波器、用于边缘检测的Sobel算子、皮肤层阈值等。他们提取出二维指纹图像后发现也可以使用一般的标准指纹识别算法识别内部指纹,同时初步证明了内部指纹可以作为磨损的外部指纹的替代特征的结论。

当采用 SS-OCT 与 SD-OCT 系统对指尖生物特 征进行采集时,需要进行三维体数据的成像。由于系 统扫描速度较慢,手指必须保持静止数十秒甚至一分 钟以上,才能得到质量较好的指纹。由于活体生物的 组织会自发抖动,因此成像速度越快产生的伪影就越 少,成像速度的缓慢也同时导致了成像质量的降低。

如第3节所述,TD-OCT在深度方向上需要逐点扫描 参考臂以获得完整的深度信息,这样的机械扫描机制 严重限制了它的成像速度,其A-Scan扫描速率一般为 几百赫兹,因而主要应用于防伪。对于SS-OCT,成像 速度主要取决于扫频速度,Breithaupt等<sup>[73]</sup>实现了每秒 8×10<sup>4</sup>次A-Scan的采集速率。在SD-OCT中,成像速 度主要由线性摄像机的线扫描率控制。Aum等<sup>[40]</sup>利 用 InGaAs 线 扫 描 相 机 (Goodrich 公 司, USA) 以 92 kHz A-Scan速率获得光谱信息。它可以在1s内获 得 OCT 扫描的原始体数据(256×256 A-Scan)。为了 提高对原始数据的处理速度,他们还引入了Kim等<sup>[39]</sup> 提出的GPU优化方案。Yu等<sup>[74]</sup>提出了一种采集速率 为 60 kHz A-Scan 的 SD-OCT 系统,该系统速度略低 于Aum等<sup>[40]</sup>的方案,但他们提出了一种对比度增强技 术来提高图像的对比度,并获得了质量更好的内部 指纹。

同时许多从三维数据中提取内部指纹的算 法<sup>[43-44,60,63]</sup>被提出。Liu等<sup>[24]</sup>通过在320到470的深度 范围内求均值获得了内部指纹。Liu等<sup>[42]</sup>提出了一种 基于投影的方法,分别重建角质层、脊部(活表皮层)和 谷部(乳头真皮乳头层)对应的多个皮下指纹,然后将 它们融合;他们<sup>[75]</sup>后来又创新性地使用HDCRes-34网 络对体数据进行层分割,采用加权组合的方法融合三 层信息,重建内部指纹。他们的方法在特征数量、脊线 密度和等错误率(EER)等方面表现良好。Wang等<sup>[76]</sup> 提出了一种混合层次聚类,来分离角质层和活性表皮 层的轮廓。陈朋等<sup>[77]</sup>设计了一种基于结构点聚类的自 适应OCT指纹提取方法;此外,他们还提出了一种自 适应的离群值去除策略,来消除错误结构点的干扰。 此后随着神经网络的不断发展, Sousedik等<sup>[78]</sup>利用神 经网络去除层轮廓的异常点。Wang等<sup>[63]</sup>首次将三维 全卷积网络(3D FCN)应用于OCT指尖数据分割,该 网络同时自动进行角质层和活性表皮层的分割,并且 通过三维卷积保留了层间的空间依赖性。Ding 等<sup>[79]</sup> 将深度学习方法引入内部指纹提取过程,实现了内外 指纹和汗孔图像的同步提取。他们使用的 SD-OCT 系统来自于Sun等<sup>[14]</sup>在2020年设计的集成系统,他们 在文献[14]中提出了一种分别采用全内反射(TIR)和 ST-OCT 同步获取外部指纹和内部指纹的指纹采集 系统,利用自制的梯形棱镜,集成了 TIR 和 OCT 的 光路。

总结目前现有的OCT内部指纹的提取算法,大致 可分为基于 en-face 的方法和基于轮廓的方法两类<sup>[8]</sup>。 在指纹所在的深度上选择一个面切片,或在相邻深度 范围内取多个面切片的图像平均值的方法称为基于 en-face 的内部指纹提取方法。基于轮廓的提取方法 通过检测活性表皮层的精确位置来准确地提取内部指 纹。这种基于轮廓的提取方法不仅可以反映指纹中内 脊和内谷的生物结构特征,还提供了通过深度信息获

#### 特邀综述

取指纹的可能性。基于轮廓的提取方法又可以分为基 于梯度的轮廓提取方法和基于深度学习的轮廓提取 等,具体细节可参考文献[8]。根据处理方法的分类对 内部指纹提取进行了总结,如表3所示,包括对应采用的系统和涉及的数据库等。

Extraction method			Database			
		OCT technology	Volumo	Number of	Area /	Reference
			volume	fingers	$(mm \times mm)$	
En-face-based method		Thorlabs swept source OCT ,	153	51	$14 \times 14$	[32]
		OCS1300SS	12	2	$5 \times 5$	[68]
		Custom spectral-domain OCT	9	3	4×4.6	[24]
			50	10	$12 \times 14$	[40]
				150	$15 \times 15$	[42]
				1	$5 \times 5$	[73]
Contour-based method	Gradient-based	Thorlabs swept source OCT , OCS1300SS	Each consisting of 512 B-Scan		10×10	[30]
			13		$10 \times 10$ & $15 \times 15$	[56]
			50 B-Scan	1		[64]
			55	10	$10 \times 10$ & $15 \times 15$	[66]
		Custom spectral-domain OCT	Each consisting of 49 B-Scan			[72]
			2		$15 \times 10$	[76]
			20 each consisting of 1000 B-Scan		15×10	[77]
		Wasatch Photonics Inc, spectral-domain OCT	4	2	$4 \times 4$	[80]
	Learning-based	Custom spectral-domain OCT	114		$15 \times 12$	[63]
			1572	210	$14 \times 18$	[79]

#### 表 3 现有的基于 en-face 和基于轮廓的内部指纹提取方法的工作

Table 3 Existing works of en-face-based methods and contour-based methods to extract internal fingerprints

#### 4.1.2 基于FF-OCT的指纹采集与处理

FD-OCT 的成像方式导致即使只需要单一的内 部指纹图像也必须先获取三维数据,这使得指纹成像 速度较慢,并且会产生大量冗余数据。为了解决这一 问题, Harms等<sup>[69]</sup>采用了FF-OCT, 并证明商用FF-OCT能够提供手指皮肤的"内表面"光学切片的结论。 事实上,早在2008年,Watanabe等<sup>[80]</sup>就采用一个具有 超高速相机和SLD的宽视场OCT(WF-OCT)系统得 到了内部指纹图像,该系统生成的指纹图像分辨率低 于需求,而且超高速相机也非常昂贵。Auksorius等<sup>[81]</sup> 采用硅基相机和近红外 LED 灯搭建低成本的 FF-OCT进行手指成像,他们指出内部指纹图像可以在不 到1s的时间内获得。但是FF-OCT是通过牺牲轴向 分辨率获得低廉的价格和快速的性能的。因此由于皮 肤厚度随个体而异,FF-OCT不能总在适当的深度定 位内部指纹,这使得目前的FF-OCT在实践中无法获 得清晰、准确的内部指纹。

#### 4.2 汗孔与汗腺

在传统的指纹识别系统中,指纹中包含的生物特

征由粗到细可分为三级<sup>[82-83]</sup>:第一级特征指的是整体 的脊线流动模式;二级特征主要是指细节点,例如脊线 的分叉和端点;第三级特征中最重要的是汗孔,汗孔的 特征独立于脊线,可以单独作为一种识别特征。因此, 使用汗孔可以显著提高识别的性能<sup>[84]</sup>。事实上,汗孔 不仅出现在皮肤表面,也出现在皮下。在指尖角质层 与活性表皮层之间存在着三维螺旋状的皮下汗腺,而 汗腺在皮肤表面的开口就是通常认为的汗孔;而汗腺 的横截面或其所在的位置被定义为皮下汗孔。表皮汗 孔、汗腺和皮下汗孔都是信息丰富的指尖生物特征。 但是由于表皮汗孔会随着人体的排汗而开启或关闭, 皮下的汗孔和汗腺则不会,这导致从外部指纹中提取 的表皮汗孔数量通常远少于实际汗腺的数量。因此, 皮下汗孔和汗腺在指纹识别领域更有前景。

汗孔、汗腺等手指的精细细节已被证明可以提高 指纹识别的准确性<sup>[85]</sup>。但是从传统的指纹图像中提取 汗孔的分布是很困难的,因为指尖外表面变化会影响 指纹图像质量。OCT可以提取更稳定的皮下汗孔和 汗腺的信息。由于技术限制,现在还没有直接使用三

#### 第 60 卷第 8 期/2023 年 4 月/激光与光电子学进展

维汗腺作为识别特征的方法,因此皮下汗孔的相关工 作是本文讨论的重点。目前获取皮下汗孔的方法主要 分为根据汗腺的横截面提取和根据汗腺的位置提取两种。两种方法的提取流程大致如图6所示。



图 6 两种汗孔提取方法的大致流程 Fig. 6 Approximate process of two methods of sweet pore extraction

第一类提取皮下汗孔的方法包括两步,第一步是 利用 OCT 体数据的 en-face 图像重建皮下汗腺横截面 图像。2010年,Liu等<sup>[24]</sup>证明了SD-OCT可以准确目 稳定地绘制指尖内汗腺的分布。SD-OCT的深度测量 能力允许皮下汗腺与脊线分开成像。汗腺的分布与汗 孔的分布相同,因为每个汗腺的顶部都是汗孔。他们 通过对 SD-OCT 采集的指尖体数据的 100 到 270 µm 深度的 en-face 图像进行平均,获得了皮下汗孔图像, 但是并没有提取到三维的汗腺结构。Zam 等<sup>[68]</sup>使用相 关图谱OCT(cmOCT)采集指尖,得到了汗孔的分布。 但是这两项工作都采用手动设置深度的方式,因此只 能获取少量皮下汗孔图像。汗腺的深度来自不同的个 体,这还没有被考虑过。Ding等<sup>[82]</sup>提出了一种自适应 的皮下汗孔图像重建方法来解决深度设置的问题,该 方法通过活性表皮层的自动检测估计汗腺的位置。第 二步是从汗腺横截面图像中提取出皮下汗孔。目前该 方面的工作还比较少。现有的研究成果是 Ding 等<sup>[82]</sup> 设计的一个扩展的U-Net网络,该网络从皮下汗孔图 像中提取汗孔位置,可以防止U-Net降采样导致的汗 孔信息丢失,同时实现准确的提取。

第二类方法是从汗腺位置识别皮下汗孔。该方法 首先从三维体数据中提取三维汗腺,然后通过将汗腺 映射到二维平面来获得汗孔。该方法主要面对3方面 的挑战。首先,单个腺体的直径非常小,考虑到当前 OCT系统的分辨率,这使得汗腺在体数据中的占比很 小;其次,OCT系统中固有的散斑噪声和光强衰减降 低了图像质量,影响了汗腺细节的提取;最后,汗腺和 一些手指组织在灰度上有很高的相似性。Sun等<sup>[41]</sup>专 注于OCT指尖数据中的汗腺提取,他们使用SD-OCT 作为采集设备,通过Frangi过滤器来检测汗腺的位置, 并通过阈值法对其进行分割,但该方法容易受到散斑 噪声和其他皮下组织的影响。Ding等<sup>[79]</sup>设计了BCL-U网络来直接分割汗腺,他们的工作重点在外部和内 部指纹的提取上,对汗腺的讨论并不深入。王海霞 等<sup>[86]</sup>提出了一种改进的多任务U-Net,用于在指尖提 取皮下汗腺。该网络基于OCT体数据的强空间相关 性,利用三维卷积核从三维体数据中提取汗腺。同时, 他们提出了一种新的基于柱体拟合映射的策略,得到 各汗腺的倾斜方向,该方法需要进行三维分割,因此计 算成本较高。

# 5 基于OCT的指尖生物特征防伪

指纹识别在现代数字社会中得到广泛应用,已成 为可靠个人识别的代名词。虽然每个人的指纹都是独 特的,但目前广泛使用的外部指纹仪只能采集二维外 部指纹,外部指纹可以很容易地被乳胶、胶水和明胶等 方式伪造并轻松地骗过识别系统<sup>[87-89]</sup>。OCT系统已被 证明能够探测手指皮肤表面以下1~3 mm内的信息, 并呈现收集到的三维信息,从体积数据中可以获得内 部指纹、汗腺和血管。当观察到指纹的内部结构时,就 可以清楚地区分出指纹的真实性<sup>[90]</sup>。更深、更稳定的 指尖生物识别技术确保了指纹信息的更高安全性,这 也意味着更先进、更安全的AFIS可能在未来得到 普及。

图 7 展示了王海霞等根据不同类型的人工假指纹 和真实手指采用 OCT 系统进行测量得到的 B-Scan 图



A: surface of the fingerprint film; B: fingerprint film; C: stratum corneum; D: conductive silver particles; E: viable epidermis; F: surface of the artificial finger; G: artificial finger model; H: sweat gland



像<sup>[91]</sup>。可以看出,图7(a)~(k)中假样本与真实手指有 明显差异。OCT测量为识别真实指纹和假指纹提供 了强有力的工具。在OCT相关应用中,所使用的数据 主要是指分布在角质层和活性表皮层中的数据,如汗 腺、皮下指纹等不随时间动态变化的信息。防伪措施 主要通过3种方式实现:对A-Scan形式的深度信息进 行分析;对B-Scan图像构建防伪特征;对体积数据中 的汗腺和内部指纹进行验证。

早在2006年, Cheng等<sup>[34-36]</sup>和 Manapuram等<sup>[59-60]</sup>就 使用OCT来区分人工指纹和真实指纹。图2(a)为他 们研究中使用的TD-OCT系统示意图。在接下来的 两年里,他们还针对假手指和真手指的OCT三维体数 据进行了一系列研究<sup>[35,60]</sup>。他们多年的研究已经证 明,能够通过分析TD-OCT采集的一维、二维或三维 数据来进行假体检测<sup>[21]</sup>, 以增强指纹系统的安全性。 Akbari等<sup>[38]</sup>基于相同的系统, 提出了对人工层与真实 皮肤之间进行边缘搜索的自动防伪方法。2011年, Nasiri-Avanaki等<sup>[37]</sup>提出了一种改进的TD-OCT系 统, 通过重新配置发送到三个扫描仪(*x*横向、*y*横向和 *z*深度)的信号, 可以在C-Scan和B-Scan之间切换, 除

了破译真实皮肤层之间的假层,它还能够采集 en-face 图像进行传统的模式识别。2013年,石博雅等[92]使用 自己研制的全光纤OCT系统分别对人体手指以及被 商用指纹识别系统识别通过的人造指模进行成像,获 得了二者的二维OCT图像和对应的一维信号,同时获 得人造指模的三维OCT图像,通过对比分析二者在深 度方向上的微结构信息以及光学特性可以准确地识别 出人造指模。在后面的防伪研究中,FD-OCT 因较高 的分辨率而被研究人员采用。Meissner等<sup>[70]</sup>使用SS-OCT 获取指尖指纹。他们不仅通过人工分析 B-Scan 图像的层排列辨别真假,还通过检测汗腺来区分手指 的真假。与 Meissner 等采用的人工识别方法不同, Darlow 等<sup>[93]</sup>提出了一种自动进行欺骗检测的方法。 他们使用SS-OCT系统通过提取两种特征来区分真实 手指和人工手指,采用了540组真实指尖扫描数据和 28组假指尖数据进行实验,结果显示该方法的检测准 确率可达100%。然而,Liu等<sup>[42]</sup>认为Darlow等提出的 方法结果完全依赖于采集设备。因此他们使用 SD-OCT 作为采集设备,并提出了两种新的抗欺骗特征, 即深度-双峰特征和次单峰特征。由于制作大量不同

种类的人工指纹难度很大,因此他们使用了真假各90 组数据进行实验,该系统同样可以达到几乎100%的 精度,虽然实验的数据量比较小。王海霞等<sup>[91]</sup>通过对 手指物理特性进行研究,探索了假指纹样品的制作过 程,利用硅胶、聚二甲基硅氧烷(PDMS)、电容器胶、玻 璃胶、环氧树脂等材料制作了11种假指纹样品,基于 SD-OCT系统<sup>[14]</sup>,采集了66个假样本的198组体数据 和160个真实样本的1280组体数据,提出的基于注意 力残差网络的指纹防伪方法的准确率接近100%。这 些研究皆表明基于OCT系统采集的指尖生物特征在 防伪中具有强大潜力。

# 6 技术限制和发展前景

在过去的十年里,各种OCT系统已经用于指尖生物特征成像。然而,多年的研究和开发并没有完全解决OCT系统在指尖生物识别领域应用中遇到的所有问题。OCT的技术局限性主要体现在以下几个方面。

# 6.1 OCT系统局限性

OCT系统已采用多种指尖生物特征进行成像,但 是在系统的成像区域、成像速度、成像深度、系统成本 与尺寸等方面还需要优化。

成像区域:在指尖生物识别技术的实际应用中,特征的面积越大,匹配和识别结果就越准确。指纹的成像面积至少需要20mm×20mm,若想要更好的效果 需要达到25mm×25mm<sup>[73]</sup>。然而如表3所示,当前 关于OCT指尖生物特征的研究大多在指尖的小区域 进行,大面积的成像会导致边界处的图像质量由于离 焦而下降。采用长焦深的镜头虽然能够改善成像的散 焦情况,但是横向分辨率与焦深之间存在制约关系,当 焦深变长时,横向分辨率与焦深之间存在制约关系,当 加利尔利尔利尔之间的 是称为并接,可以实现横向分辨率和焦深之间的 平衡,但执行时间和复杂性也会相应增加。因此更好 的解决方案仍然需要探索。

成像速度:速度已成为影响OCT真正应用于指尖 生物识别的主要因素。与传统的指尖表皮生物识别的 采集速度相比,应用于指尖生物识别的三维体积数据 采集速度确实过于缓慢了。假设要采集的指尖区域为 25 mm×25 mm,并且汗腺采集的分辨率要求为 1500 dpi,这意味着需要1500×1500次A-Scan(25 mm÷ 25.4 mm/inch×1500 pixels/inch≈1500 A-Scan)。 如果OCT系统能实现40 kHz A-Scan的线性扫描速 度,则采集时间接近1 min(1500×1500÷40000= 56.25 s)。TD-OCT的成像速度受到步进电机和扫描 机制的影响,其成像速度明显慢于FD-OCT。对于 SD-OCT系统,A-Scan速率由检测光谱仪中相机的速 度决定。对于SS-OCT系统,A-Scan速率由扫频激光 源的扫描速度决定。因此,为了提高成像速度,采用更 快的CCD相机或扫频光源是解决方案之一。

成像深度:OCT系统在测量过程中主要利用物体

#### 第 60 卷第 8 期/2023 年 4 月/激光与光电子学进展

的后向散射光信号,因此必须考虑被测物体的光学衰减系数。手指皮肤的光衰减系数较大,这限制了其深度。为了提高深度,在OCT系统设计中通常采用高功率和长波长光源。然而,光源的波长直接影响到系统的轴向分辨率。从式(2)和式(4)中可以看出,光源的波长越长,带宽越窄,系统的探测深度就越深。但轴向分辨率正好相反。深度和轴向分辨率相互制约,以平衡的方式解决这个问题无疑是一个巨大的挑战。

系统成本与尺寸:在科学研究中,OCT设备通常 安装在一个带有数据分析工作站的大型光学平台上。 相比之下,在实际应用中现有的指尖生物识别采集设 备往往是可移动的和小型化的。因此,OCT系统的小 型化是一种必然的趋势。如何设计出紧凑的系统,实 现OCT技术在指尖生物识别中的应用将是一个巨大 的挑战。此外,从设备成本的角度来看,更高的采集性 意味着更好的系统组件,如光源和CCD,这意味着更 昂贵的价格。显然,这也是设备量产化过程中需要解 决的问题。

#### 6.2 皮下特征提取算法的局限性

根据目前的研究现状,可以采集和提取OCT指尖 的静态生物特征,包括内外指纹、皮下汗孔和汗腺。但 是想要平衡它们的提取速度和准确性有一定难度。例 如,在预设的深度下,基于 en-face 的方法提取内部指 纹的速度较快,但所得到的图像质量较低。若采用基 于轮廓的提取方法就要为确定适当的深度而进行额外 的计算。同时,目前皮下汗孔的提取方法精度并不理 想。皮下汗腺不仅小,有时还不够清楚,无法确定确切 的位置。此外,噪声也会对汗腺的提取造成严重干扰。 如图3所示,在OCT采集的B-Scan图像中存在大量散 斑噪声。当入射光射入生物组织时,不同组织粒子表 面散射的光在空间上发生干涉形成散斑,这在OCT成 像中是不可避免的<sup>[94]</sup>。散斑噪声不仅降低了图像的对 比度,还会导致结构信息的丢失。目前对皮下血流和 血管等动态信息的探索仍处于起步阶段,还很少有可 靠的提取方法。

#### 6.3 新特征应用的局限性

将OCT系统采集到的新特征应用于指尖生物特 征识别是一个新的研究领域和未来的发展趋势。目前 将内部指纹应用于身份识别的研究或实际应用的案例 较少,部分原因是缺乏大型数据库,需要时间和数据来 验证基于OCT的新内部特征识别的性能。只有将新 发现的特征投入实际应用,才能更好地促进这项技术 的可持续发展。关于皮下汗腺作为新一代生物特征的 研究还处于起步阶段。首先是汗腺本身的螺旋结构是 否独特,还有待研究。其次,由于汗腺特征非常小,能 否准确提取将给后续的识别带来挑战,开发一种算法 来识别这些微小和高精度的特征也将是一项艰巨的任 务。除传统算法外,随着深度学习在图像处理和数据 分类方面的不断发展,也有不少研究者将其应用于皮

下汗腺的提取和识别,但是成果还比较少,期待在未来 深度学习将会在OCT指尖生物特征识别领域具有更 加广泛的应用并发挥更大的作用。最后,OCT采集的 三维指尖体数据虽然能够提供更高安全的身份认证, 但这也意味着用户将提供个人完整的指尖数据,更高 安全性的同时也伴随着更高的风险,因此对个人指尖 体数据隐私的保护也至关重要。目前对于OCT指纹 数据的加密通常采用图像加密的方法,但是每组体数 据都包含大量图片,仅采用图像加密的方法进行加密 和解密都将耗费大量时间;识别时反复加密解密也可 能会造成数据出现错误,影响结果。因此需要开发一 些针对OCT指尖体数据的加密方法。

# 7 结 论

从使用OCT设备采集到第一组指尖体数据到今 天已经走过了近20年的时间,在生物特征识别技术发 展和社会安全要求的推动下,相关技术和算法迅速发 展。从OCT技术、OCT对皮下生物特征的采集、基于 OCT的生物特征识别和防伪4方面阐述了该方向的 研究进展,总结了主要的研究成果,分析了技术限制和 发展前景。虽然基于OCT的生物特征识别和防伪距 离广泛应用还有很长的路要走,但是研究人员一直在 积极探索合理可行的解决方案,相信在未来该方向依 然会继续蓬勃发展。

#### 参考文献

- Maltoni D, Maio D, Jain A K, et al. Handbook of fingerprint recognition[M]. London: Springer, 2009.
- [2] Soifer V, Kotlyar V, Khonina S, et al. Optical digital methods of fingerprint identification[J]. Optics and Lasers in Engineering, 1998, 29(4/5): 351-359.
- [3] Lee J W, Min D J, Kim J, et al. A 600-dpi capacitive fingerprint sensor chip and image-synthesis technique[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 1999, 34(4): 469-475.
- [4] Ureten O, Serinken N. Bayesian detection of Wi-Fi transmitter RF fingerprints[J]. Electronics Letters, 2005, 41(6): 373-374.
- [5] Burger B, Fuchs D, Sprecher E, et al. The immigration delay disease: adermatoglyphia – inherited absence of epidermal ridges[J]. Journal of the American Academy of Dermatology, 2011, 64(5): 974-980.
- [6] 吴迪,高树辉,张宁,等.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[J].激光与光电子学进展,2023,60(12):1200001.
  Wu D, Gao S H, Zhang N, et al. Research progress and application prospects of optical coherence tomography in forensic science[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023,60(12):1200001.
- [7] 王海霞,杨熙丞,梁荣华,等.基于轻量级U-Net神经 网络提取OCT内指纹和外指纹[J].高技术通讯,2019, 29(11):1063-1072.

#### 第 60 卷第 8 期/2023 年 4 月/激光与光电子学进展

Wang H X, Yang X C, Liang R H, et al. OCT internal and external fingerprints generation based on a lightweight U-Net neural network[J]. Chinese High Technology Letters, 2019, 29(11): 1063-1072.

- [8] Yu Y, Wang H X, Zhang Y L, et al. Methods and applications of fingertip subcutaneous biometrics based on optical coherence tomography[J]. IEEE Transactions on Biometrics, Behavior, and Identity Science, 2023, 5(1): 126-150.
- [9] Jaffe G J, Caprioli J. Optical coherence tomography to detect and manage retinal disease and glaucoma[J]. American Journal of Ophthalmology, 2004, 137(1): 156-169.
- [10] Gambichler T, Jaedicke V, Terras S. Optical coherence tomography in dermatology: technical and clinical aspects
   [J]. Archives of Dermatological Research, 2011, 303(7): 457-473.
- [11] Chang S D, Sherif S, Mao Y X, et al. Swept-source fullfield optical coherence microscopy[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7386: 738604.
- [12] Tomlins P H, Wang R K. Theory, developments and applications of optical coherence tomography[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2005, 38(15): 2519-2535.
- [13] Huang D, Shure M. Handbook of optical coherence tomography[J]. Ophthalmic Surgery, Lasers & Imaging, 2003, 34(1): 78-79.
- [14] Sun H H, Zhang Y L, Chen P, et al. Synchronous fingerprint acquisition system based on total internal reflection and optical coherence tomography[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(10): 8452-8465.
- [15] Sainter A, King T A, Dickinson M R. Effect of target biological tissue and choice of light source on penetration depth and resolution in optical coherence tomography[J]. Journal of Biomedical Optics, 2004, 9(1): 193-199.
- [16] Schmitt J M. Optical coherence tomography (OCT): a review[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 1999, 5(4): 1205-1215.
- [17] Povazay B, Bizheva K, Unterhuber A, et al. Submicrometer axial resolution optical coherence tomography[J]. Optics Letters, 2002, 27(20): 1800-1802.
- [18] Kempe M, Thon A, Rudolph W. Resolution limits of microscopy through scattering layers[J]. Optics Communications, 1994, 110(5/6): 492-496.
- [19] Hitzenberger C K, Baumgartner A, Fercher A F. Dispersion induced multiple signal peak splitting in partial coherence interferometry[J]. Optics Communications, 1998, 154(4): 179-185.
- [20] Fercher A F, Drexler W, Hitzenberger C K, et al. Optical coherence tomography-principles and applications[J]. Reports on Progress in Physics, 2003, 66(2): 239-303.
- [21] Derickson D J, Beck P A, Bagwell T L, et al. Highpower, low-internal-reflection, edge emitting lightemitting-diodes[J]. Hewlett-Packard Journal, 1995, 46 (1): 43-48.
- [22] Lin C F, Lee B L. Extremely broadband AlGaAs/GaAs

#### 特邀综述

superluminescent diodes[J]. Applied Physics Letters, 1997, 71(12): 1598-1600.

- [23] Poole P J, Davies M, Dion M, et al. The fabrication of a broad-spectrum light-emitting diode using high-energy ion implantation[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1996, 8(9): 1145-1147.
- [24] Liu M Y, Buma T. Biometric mapping of fingertip eccrine glands with optical coherence tomography[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22(22): 1677-1679.
- [25] Chen M H, Li H, Chen R. Swept laser source based on acousto-optic tunable filter[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9297: 92970Q.
- [26] Momiyama H, Sasaki Y, Yoshimine I, et al. Improvement of the depth resolution of swept-source THz-OCT for non-destructive inspection[J]. Optics Express, 2020, 28(8): 12279-12293.
- [27] Yun S H, Boudoux C, Tearney G J, et al. High-speed wavelength-swept semiconductor laser with a polygonscanner-based wavelength filter[J]. Optics Letters, 2003, 28(20): 1981-1983.
- [28] Auksorius E, Boccara A C. Fingerprint imaging from the inside of a finger with full-field optical coherence tomography[J]. Biomedical Optics Express, 2015, 6(11): 4465-4471.
- [29] Ohmi M, Haruna M. Ultra-high resolution optical coherence tomography (OCT) using a halogen lamp as the light source[J]. Optical Review, 2003, 10(5): 478-481.
- [30] Darlow L N, Connan J, Akhoury S S. Internal fingerprint zone detection in optical coherence tomography fingertip scans[J]. Journal of Electronic Imaging, 2015, 24(2): 023027.
- [31] Fercher A F, Hitzenberger C K, Sticker M, et al. A thermal light source technique for optical coherence tomography[J]. Optics Communications, 2000, 185(1/2/ 3): 57-64.
- [32] Bossen A, Lehmann R, Meier C. Internal fingerprint identification with optical coherence tomography[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22(7): 507-509.
- [33] Shiratsuki A, Sano E, Shikai M, et al. Novel optical fingerprint sensor utilizing optical characteristics of skin tissue under fingerprints[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5686: 80-87.
- [34] 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.
- [35] Cheng Y Z, Larin K V. In vivo two- and threedimensional imaging of artificial and real fingerprints with optical coherence tomography[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(20): 1634-1636.
- [36] Chang S, Cheng Y, Larin K V, et al. Optical coherence tomography used for security and fingerprint-sensing applications[J]. IET Image Processing, 2008, 2(1): 48-58.
- [37] Nasiri-Avanaki M R, Meadway A, Bradu A, et al. Antispoof reliable biometry of fingerprints using *en-face*

optical coherence tomography[J]. Optics and Photonics Journal, 2011, 1(3): 91-96.

- [38] Akbari N, Sadr A. Automation of fingerprint recognition using OCT fingerprint images[J]. Journal of Signal and Information Processing, 2012, 3(1): 117-121.
- [39] Kim J H, Aum J, Han J H, et al. Optimization of compute unified device architecture for real-time ultrahigh-resolution optical coherence tomography[J]. Optics Communications, 2015, 334: 308-313.
- [40] Aum J, Kim J H, Jeong J. Live acquisition of internal fingerprint with automated detection of subsurface layers using OCT[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(2): 163-166.
- [41] 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, 2018: 579-584.
- [42] Liu F, Liu G J, Wang X Z. High-accurate and robust fingerprint anti-spoofing system using optical coherence tomography[J]. Expert Systems With Applications, 2019, 130: 31-44.
- [43] Liu F, Liu G J, Zhao Q J, et al. Robust and highsecurity fingerprint recognition system using optical coherence tomography[J]. Neurocomputing, 2020, 402: 14-28.
- [44] Liu F, Shen C X, Liu H Z, et al. A flexible touch-based fingerprint acquisition device and a benchmark database using optical coherence tomography[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(9): 6518-6529.
- [45] Auksorius E, Boccara A C. Fast subsurface fingerprint imaging with full-field optical coherence tomography system equipped with a silicon camera[J]. Journal of Biomedical Optics, 2017, 22(9): 096002.
- [46] Raja K B, Auksorius E, Raghavendra R, et al. Robust verification with subsurface fingerprint recognition using full field optical coherence tomography[C]//2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), July 21-26, 2017, Honolulu, HI, USA. New York: IEEE Press, 2017: 646-654.
- [47] Huang D, Swanson E A, Lin C P, et al. Optical coherence tomography[J]. Science, 1991, 254(5035): 1178-1181.
- [48] 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.
- [49] Fercher A F, Hitzenberger C K, Kamp G, et al. Measurement of intraocular distances by backscattering spectral interferometry[J]. Optics Communications, 1995, 117(1/2): 43-48.
- [50] 孙占.高速光学相干层析成像系统搭建与手部指纹采集
  [D].北京:清华大学,2018.
  Sun Z. High speed optical coherence tomography system and imaging of fingerprints[D]. Beijing: Tsinghua University, 2018.

#### 特邀综述

- [51] Wojtkowski M, Leitgeb R, Kowalczyk A, et al. In vivo human retinal imaging by Fourier domain optical coherence tomography[J]. Journal of Biomedical Optics, 2002, 7(3): 457-463.
- [52] 鲍文,丁志华,王川.基于谱域光学相干层析系统中光 谱涨落的指纹获取[J].激光生物学报,2013,22(1):79-83.
  Bao W, Ding Z H, Wang C. Spectral fluctuation based on spectral domain optical coherence tomography for

fingerprint detection[J]. Acta Laser Biology Sinica, 2013, 22(1): 79-83.
[53] Laude B, de Martino A, Drévillon B, et al. Full-field optical coherence tomography with thermal light[J].

Applied Optics, 2002, 41(31): 6637-6645.

- [54] Cimalla P, Walther J, Mehner M, et al. Simultaneous dual-band optical coherence tomography in the spectral domain for high resolution *in vivo* imaging[J]. Optics Express, 2009, 17(22): 19486-19500.
- [55] Yu Y, Wang H X, Sun H H, et al. Optical coherence tomography in fingertip biometrics[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2022, 151: 106868.
- [56] Darlow L N, Connan J. Efficient internal and surface fingerprint extraction and blending using optical coherence tomography[J]. Applied Optics, 2015, 54(31): 9258-9268.
- [57] Ohmi M, Nohara K, Ueda Y, et al. Dynamic observation of sweat glands of human finger tip using alloptical-fiber high-speed optical coherence tomography[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2005, 44(6L): L854.
- [58] Ohmi M. Comparison of 0.8 µm and 1.3 µm images of optical coherence tomography using fiber-optic lowcoherence interferometers[J]. Proceedings of Microoptics Conference, 2001: 88-91.
- [59] Manapuram R K, Ghosn M, Larin K V. Identification of artificial fingerprints using optical coherence tomography technique[J]. Asian Journal of Physics, 2006, 15(1): 15-27.
- [60] Larin K V, Cheng Y Z. Three-dimensional imaging of artificial fingerprint by optical coherence tomography[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6944: 184-189.
- [61] da Costa H S G, Maxey J R, Silva L, et al. Evaluation of fingerprint deformation using optical coherence tomography[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 8946: 89460I.
- [62] Sylwestrzak M, Szkulmowski M, Szlag D, et al. Realtime imaging for Spectral Optical Coherence Tomography with massively parallel data processing[J]. Photonics Letters of Poland, 2010, 2(3): 137-139.
- [63] Wang H X, Yang X C, Chen P, et al. Acquisition and extraction of surface and internal fingerprints from optical coherence tomography through 3D fully convolutional network[J]. Optik, 2020, 205: 164176.
- [64] Khutlang R, Nelwamondo F V. Novelty detection-based internal fingerprint segmentation in optical coherence tomography images[C]//2014 Second International Symposium on Computing and Networking, December

10-12, 2014, Shizuoka, Japan. New York: IEEE Press, 2015: 556-559.

- [65] Akhoury S S, Darlow L N. Extracting subsurface fingerprints using optical coherence tomography[C]// 2015 Third International Conference on Digital Information, Networking, and Wireless Communications (DINWC), February 3-5, 2015, Moscow, Russia. New York: IEEE Press, 2015: 184-187.
- [66] Darlow L N, Connan J. Study on internal to surface fingerprint correlation using optical coherence tomography and internal fingerprint extraction[J]. Journal of Electronic Imaging, 2015, 24(6): 063014.
- [67] Saigusa H, Ueda Y, Yamada A, et al. Maximumintensity-projection imaging for dynamic analysis of mental sweating by optical coherence tomography[J]. Applied Physics Express, 2008, 1: 098001.
- [68] 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.
- [69] Harms F, Dalimier E, Boccara A C. En-face full-field optical coherence tomography for fast and efficient fingerprints acquisition[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9075: 90750E.
- [70] Meissner S, Breithaupt R, Koch E. Defense of fake fingerprint attacks using a swept source laser optical coherence tomography setup[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8611: 86110L.
- [71] Auksorius E, Boccara A C. Internal fingerprint imaging with full-field optical coherence tomography[C]//Imaging and Applied Optics 2016, July 25-28, 2016, Heidelberg. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2016: AIT1B.1.
- [72] Korohoda P, Dabrowski A, Pawlowski P. Optical coherence tomography for fingerprint acquisition from internal layer-a case study[C]//2014 Signal Processing: Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications (SPA), September 22-24, 2014, Poznan, Poland. New York: IEEE Press, 2014: 176-180.
- [73] Breithaupt R, Sousedik C, Meissner S. Full fingerprint scanner using optical coherence tomography[C]//3rd International Workshop on Biometrics and Forensics (IWBF 2015), March 3-4, 2015, Gjovik, Norway. New York: IEEE Press, 2015.
- [74] Yu X J, Xiong Q Z, Luo Y M, et al. Contrast enhanced subsurface fingerprint detection using high-speed optical coherence tomography[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(1): 70-73.
- [75] 刘凤,张文天,刘浩哲,等.基于深度学习的亚表面指 纹重构[J].计算机学报,2021,44(10):2033-2046.
  Liu F, Zhang W T, Liu H Z, et al. Deep learning based fingerprint subsurface reconstruction[J]. Chinese Journal of Computers, 2021, 44(10):2033-2046.
- [76] Wang H X, Ma L T, Chen P. External and internal fingerprint extraction based on optical coherence tomography[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10827: 108271E.

#### 特邀综述

[77] 陈朋, 于洋, 马灵涛, 等. 自适应的 OCT 内外部指纹提 取算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2019, 31(6): 961-970.

Chen P, Yu Y, Ma L T, et al. Adaptive OCT internal and external fingerprint extraction[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2019, 31(6): 961-970.

- [78] Sousedik C, Busch C. Quality of fingerprint scans captured using Optical Coherence Tomography[C]// IEEE International Joint Conference on Biometrics, September 29 - October 2, 2014, Clearwater, FL, USA. New York: IEEE Press, 2014.
- [79] 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.
- [80] Watanabe Y, Sato M. Three-dimensional wide-field optical coherence tomography using an ultrahigh-speed CMOS camera[J]. Optics Communications, 2008, 281 (7): 1889-1895.
- [81] Auksorius E, Raja K B, Topcu B, et al. Compact and mobile full-field optical coherence tomography sensor for subsurface fingerprint imaging[J]. IEEE Access, 2020, 8: 15194-15204.
- [82] Ding B J, Wang H X, Chen P, et al. Subcutaneous sweat pore estimation from optical coherence tomography
   [J]. IET Image Processing, 2021, 15(13): 3267-3280.
- [83] Feng J J, Jain A K. Fingerprint reconstruction: from minutiae to phase[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(2): 209-223.
- [84] Liu F, Zhao Y H, Liu G J, et al. Fingerprint pore matching using deep features[J]. Pattern Recognition, 2020, 102: 107208.
- [85] Jain A K, Chen Y, Demirkus M. Pores and ridges: highresolution fingerprint matching using level 3 features[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2007, 29(1): 15-27.
- [86] 王海霞,王如欣,张怡龙,等.基于轻量级 3D-Unet神 经网络的 OCT 皮下汗腺提取研究[J].高技术通讯, 2022, 32(7):737-748.

Wang H X, Wang R X, Zhang Y L, et al. OCT subcutaneous sweat gland extraction based on a lightweight 3D-Unet neural network[J]. Chinese High Technology Letters, 2022, 32(7): 737-748.

- [87] Matsumoto T, Matsumoto H, Yamada K, et al. Impact of artificial "gummy" fingers on fingerprint systems[J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4677: 275-289.
- [88] Ghiani L, Yambay D, Mura V, et al. LivDet 2013 fingerprint liveness detection competition 2013[C]//2013 International Conference on Biometrics (ICB), June 4-7, 2013, Madrid, Spain. New York: IEEE Press, 2013.
- [89] Arora S S, Cao K, Jain A K, et al. 3D fingerprint phantoms[C]//2014 22nd International Conference on Pattern Recognition, August 24-28, 2014, Stockholm, Sweden. New York: IEEE Press, 2014: 684-689.
- [90] 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.
- [91] 王海霞,潘栋,梁荣华,等.基于注意力残差网络的OCT指纹防伪方法[J].计算机辅助设计与图形学学报,2022,34(3):392-402.
  Wang H X, Pan D, Liang R H, et al. Anti-spoofing research of OCT fingerprint based on attention residual network[J]. Journal of Computer-Aided Design &. Computer Graphics, 2022, 34(3): 392-402.
- [92] 石博雅, 孟卓, 刘铁根, 等. 全光纤光学相干层析系统 用于人造指纹的识别[J]. 光电子·激光, 2013, 24(12): 2404-2408.
   Shi B Y, Meng Z, Liu T G, et al. Identifying artificial

fingerprint by using optical coherence tomography[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2013, 24(12): 2404-2408.

- [93] Darlow L N, Webb L, Botha N. Automated spoofdetection for fingerprints using optical coherence tomography[J]. Applied Optics, 2016, 55(13): 3387-3396.
- [94] Schmitt J M, Xiang S H, Yung K M. Speckle in optical coherence tomography: an overview[J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3726: 450-461.