

基于相位敏感谱域光学相干层析术的 潜指纹获取方法*

鲍文 丁志华[†] 王川 梅胜涛

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

(2012年6月24日收到; 2013年1月30日收到修改稿)

本文提出一种基于相位敏感谱域光学相干层析术 (spectral domain optical coherence tomography, SD-OCT) 的遗留指纹获取方法, 该方法具有非接触、无损、快速和高灵敏度优势. 实验结果显示, 即使在低对比度条件下, 本方法也能较好地再现遗留指纹, 证明相位敏感谱域光学相干层析术可以准确、可靠地识别潜指纹.

关键词: 潜指纹, 谱域光学相干层析术, 相位敏感**PACS:** 42.25.Kb, 42.30.Wb, 87.64.-t, 89.20.Mn**DOI:** 10.7498/aps.62.114202

1 引言

指纹具有特异性和稳定性特点, 利用物体表面遗留的指纹, 通过科学鉴定, 可以直接认定遗留指纹的具体人^[1], 所以指纹被称为“证据之首”. 但是, 随着形势的发展和犯罪手段的日趋改变, 近几年来, 在我们接触到的实际案件中很少遇到条件较好的指纹, 更多见的是条件较差的潜指纹. 由于其对比度低、变化大、面积小、特征少且不稳定, 给检验工作带来了很大困难. 现有提取潜指纹的方法大多操作繁琐且精度不高^[2-4]. 所以在世界范围内, 潜指纹的探测仍然是一个被重点关注的研究课题^[5].

获取物体表面遗留指纹的方法可分为物理方法、化学方法、光学方法三大类. 最常用、最方便的方法是物理方法中的粉末法. 即用玻璃纤维刷或毛刷将各种粉末刷到指纹区域, 其通过物理机械或静电作用与乳突纹线上的指纹残留物发生吸附, 从而显出遗留指纹^[6]. 然而, 用粉末刷刷显指纹时, 容易对指纹纹线造成破坏, 并且刷显时粉末颗粒悬浮于空气中, 容易进入呼吸道, 对工作者造成较大的毒副作用, 且粉末法提取过程慢, 现场会留有痕迹,

可能会影响侦查. 化学方法主要有碘熏法、茚三酮法等, 有过程繁琐、指纹显现效果不好等缺陷. 现行的光学指纹获取方法主要为紫外光照射法, 其对遗留指纹图案的光学对比度要求较高, 而且, 紫外线会对指纹颗粒中的 DNA 等成分有损坏, 对后续侦查有一定影响^[7-9].

光学相干层析术^[10,11] (optical coherence tomography, OCT) 是一种非侵入、非接触微米级分辨率的成像技术, 它基于光学相干门来获得组织内部的层析结构. SD-OCT 是第二代 OCT 技术, 相比第一代时域 OCT 技术, 在成像速度、信噪比和灵敏度等方面具有明显优势^[12,13], 在眼科成像领域已发挥重要作用. 由于 OCT 系统能够对生物组织进行高分辨率的实时在体成像, 所以原则上可以用 OCT 系统直接对手指成像^[14], 得到手指的三维结构图像, 实现三维指纹信息的获取. 但将 OCT 技术直接用于潜指纹信息获取的研究则鲜有报道.

本文报道一种基于 SD-OCT 相位信息提取光滑物体表面遗留指纹的方法. 利用希尔伯特 (Hilbert) 变换提取干涉光谱的相位信息, 并经相位解包裹等处理, 得到指纹的“高度”信息, 从而实现指纹的显现.

* 国家自然科学基金 (批准号: 61275196, 60978037, 60878057) 和国家高技术研究发展计划 (批准号: 2006AA02Z4E0) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: zh.ding@zju.edu.cn

2 方法

本文采用的 SD-OCT 系统原理图如图 1 所示. 宽带光源的光经耦合器分光分别抵达参考臂和样品臂, 从参考臂和样品臂返回的光在耦合器汇合并发生干涉, 该干涉信号在快速光谱仪中被分为对应于不同波长的干涉光谱信号, 由线阵 CCD 接收.

图 1 中样品部分的放大图显示了光滑物体表面遗留指纹图案中指纹点与非指纹点对入射样品光的不同反射情况. 在阐述本文的方法之前, 我们

先来了解一下光滑物体表面遗留指纹图案的特征. 图 2 为利用共聚焦显微镜 (OLS4000) 采集得到的玻璃平板上刻意留下的指纹图案. 可以看出, 因乳突纹线上的指纹残留物遗留在玻璃平板上, 形成了与指纹图案相对应的高度分布. 如果要能探测到这种高度分布就能确定指纹的特征, 但由于指纹残留的油脂颗粒尺度在微米量级 (如图中标注的颗粒高度为 $1.5 \mu\text{m}$), 现行 SD-OCT 系统的轴向分辨率很难区分这种细微高差. 因此, 基于 OCT 结构图像的方法不能实现遗留指纹的识别.

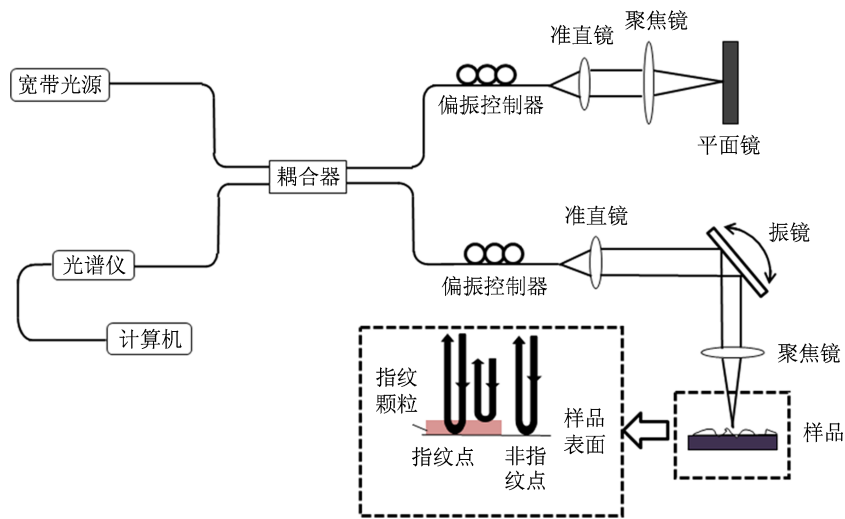


图 1 SD-OCT 系统图

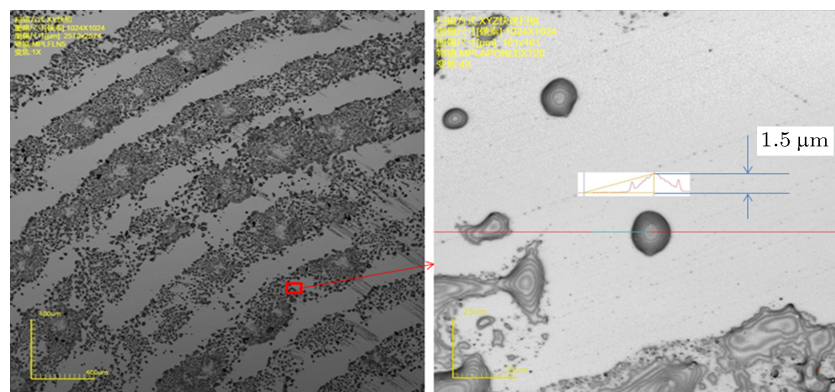


图 2 OLS4000 共聚焦显微镜采集的指纹图案

鉴于指纹遗留物与其所在光滑表面共处于 OCT 轴向分辨单元内, 无法从结构图像中分辨出这种细节, 但指纹点处的等效组合反射面与非指纹点处的单一反射面对应的干涉相位不同, 为此, 本文采用相位信息来获取遗留指纹图案的等效高

差分布.

光谱仪探测到的干涉光谱可表达为

$$\begin{aligned} \tilde{I}(k) = & S(k)\rho_R + S(k)\rho_S \\ & + 2S(k)\sqrt{\rho_R\rho_S} \cos(2k\Delta d + \theta), \end{aligned} \quad (1)$$

这里 k 为波数, $S(k)$ 为宽带光源的光谱强度, ρ_R 和 ρ_S 分别为参考臂和样品臂的反射系数, Δd 是参考臂和样品臂的光程差, 由它来表征光滑表面遗留指纹图案的高差分布, θ 为两干涉臂的初始相位差.

(1) 式中第一项为参考臂反射光光强, 第二项为样品臂反射光光强, 第三项为参考臂和样品臂的干涉项, 包含了相位信息, 去直流项后得到干涉项

$$\tilde{I}(k) = 2S(k)\sqrt{\rho_R\rho_S}\cos(2k\Delta d + \theta). \quad (2)$$

对交流项 $\tilde{I}(k)$ 实施 Hilbert 变换, 可得到相位信息

$$\phi(k) = 2k\Delta d + \theta. \quad (3)$$

故 Δd 可通过拟合 $\phi-k$ 曲线后, 求其斜率得到. 需要指出: 指纹遗留物与其所处表面的反射率不同,

所以基于等效组合反射面相位信息得到的高度并非油脂颗粒的实际高度, 但这并不影响遗留指纹图案的正确提取

图 3 展示了表面轮廓等效高度测量的光谱相位提取过程. 图 3(a) 为从玻璃样品表面特定位置处返回样品光与参考光的干涉光谱, (b) 为去除直流项后的干涉光谱, (c) 为对 (b) 实施 Hilbert 变换得到的局部相位分布图, (d) 为对 (c) 解包裹后的相位. 对解包裹后的相位进行直线拟合, 拟合直线的斜率即与探测点的等效高度相对应. 利用 OCT 探头对遗留指纹所在的表面进行二维扫描, 即可获得指纹的等效高度分布图, 由此便可提取出指纹图案.

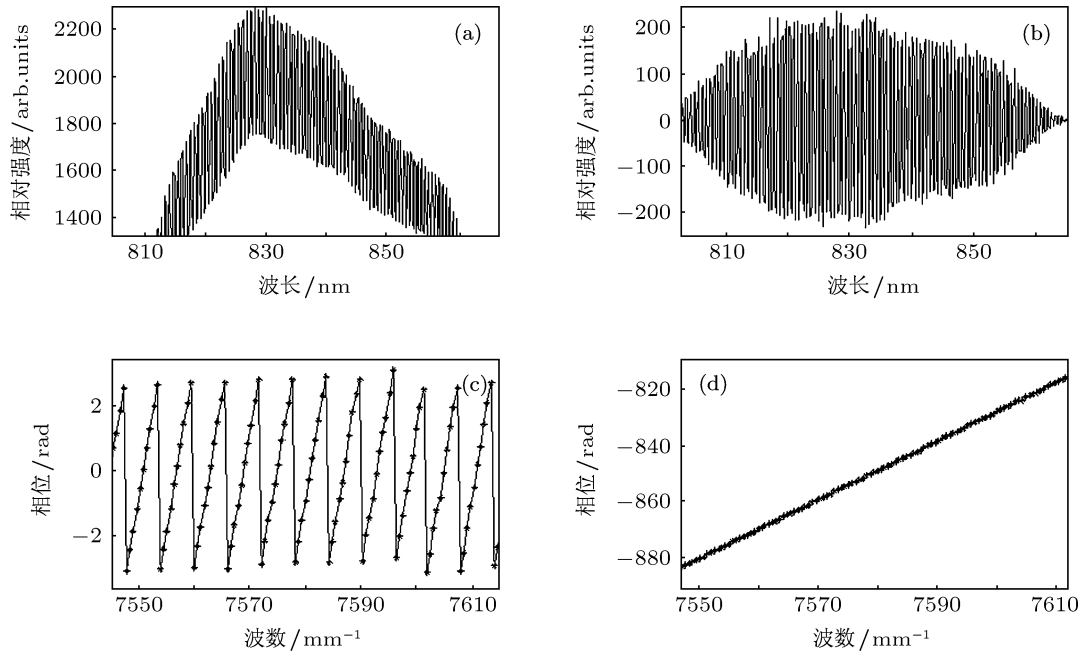


图 3 表面轮廓等效高度测量的光谱相位提取过程 (a) 对应于玻璃平板表面的干涉光谱; (b) 去除直流项后的干涉光谱; (c) 包裹相位 (局部放大); (d) 解包裹后相位 (局部放大)

3 实验

实验采用本实验室已建立的 835 nm 中心波段的 SD-OCT 系统. 该系统的光谱分辨率为 0.0674 nm, 轴向扫描 (A-scan) 速度为 29 kHz, 轴向分辨率为 7.5 μm , 最大成像深度为 2.56 mm, 最大信噪比为 115 dB.

待测量指纹样品如图 4 所示, 它由 Canon DS126231 相机拍摄得到, 可以看出, (a), (b), (c) 的对比度由大到小.

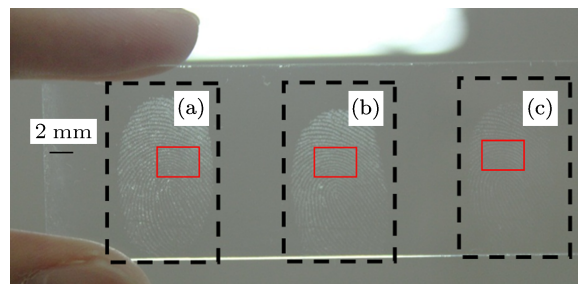


图 4 3 个对比度不同的指纹样品 (a), (b), (c) 为 Canon DS126231 相机拍摄的对对比度从大到小的玻璃表面指纹图样

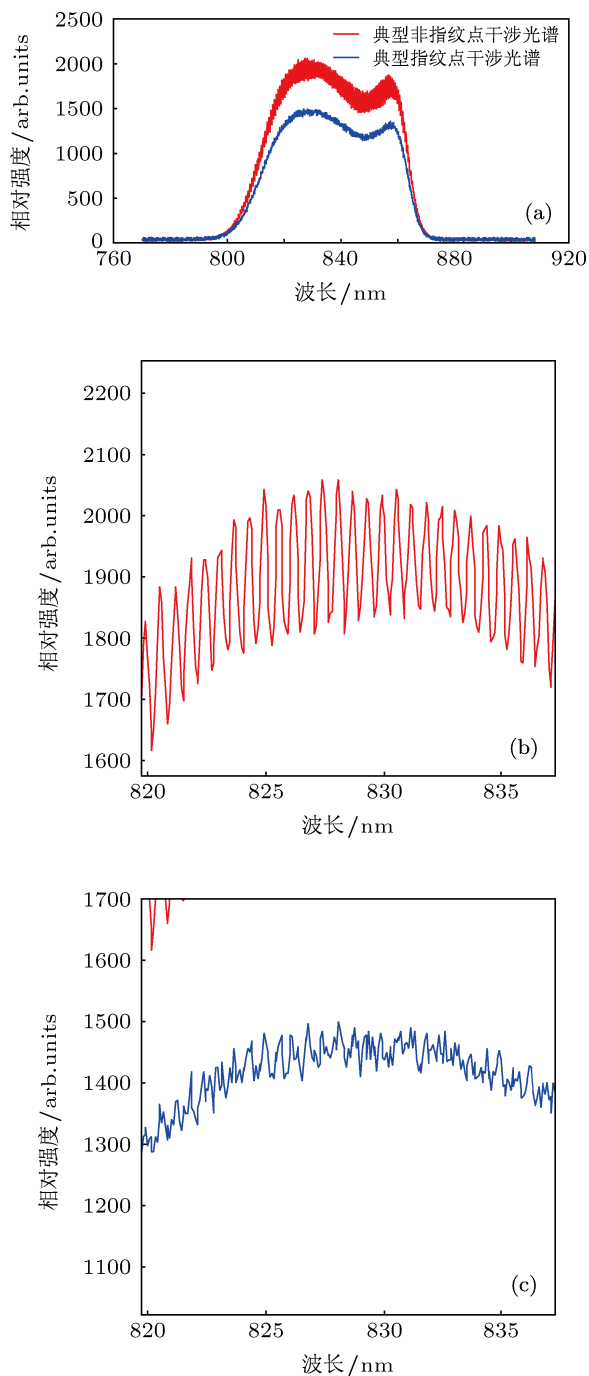


图5 样品干涉光谱 (a)为样品表面两个点的干涉光谱;(b)为(a)中非指纹点干涉光谱的局部放大图;(c)为指纹点干涉光谱的局部放大图

下面先以图4(a)的指纹为例,分析指纹点的干涉光谱和相位.图5(a)为图4(a)中典型指纹点与非指纹点的干涉光谱,红色为典型非指纹点的干涉光谱,即玻璃平板的干涉光谱,蓝色为典型指纹点的干涉光谱,由局部放大图5(b),(c)可以看出指纹点

由于存在指纹油脂颗粒散射等因素,干涉光谱较为混乱.

干涉光谱去掉直流项后进行 Hilbert 变换即得相位信息,如图6所示,(a),(b)分别为玻璃表面指纹点和非指纹点的相位信息,显然指纹点的相位比非指纹点的相位混乱得多;然后,对相位信息解包裹,得到图7所示解包裹相位曲线和拟合直线,可见指纹点由于指纹颗粒散射和相位泄漏等因素导致曲线线性度很差,这是指纹点与非指纹点的区别,得到拟合直线斜率即可对应得到前文所述的遗留指纹采样点的等效高度.整个平面的高差图即为遗留指纹图案,如图8(a)所示.

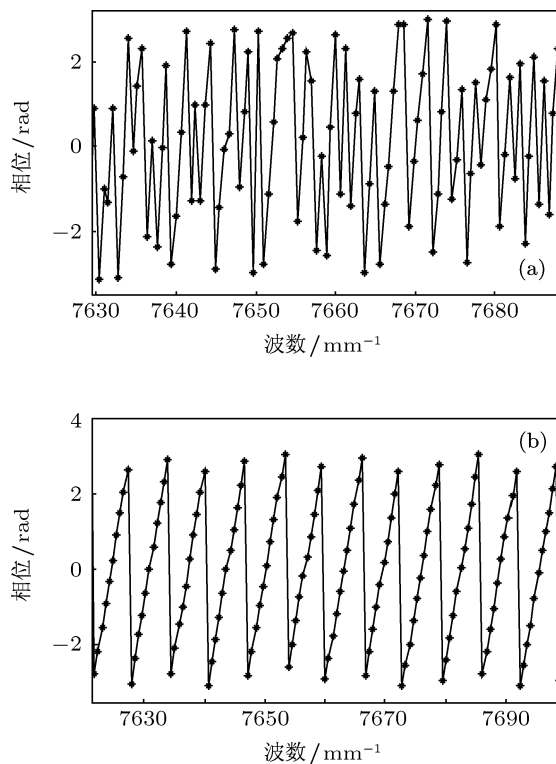


图6 两个探测点的相位信息 (a)指纹点的相位信息(局部放大);(b)非指纹点的相位信息(局部放大)

为了证明相位方法获取指纹信息的敏感性,我们针对图4中三个不同对比度的遗留指纹,分别通过上述相位方法得到指纹图案,如图8(a),(b),(c)所示.

由此可见相机下对比度很低的遗留指纹利用SD-OCT相位提取方法,也能高对比重建指纹图案因此,SD-OCT相位方法是重现潜指纹的潜在技术.

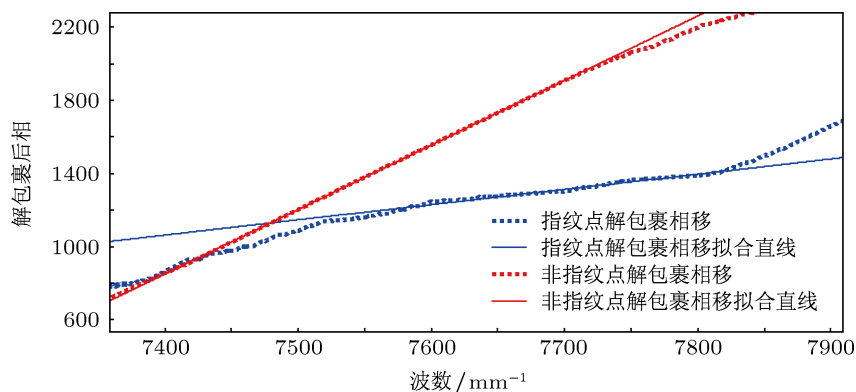


图7 解包裹后的相位 (局部放大)

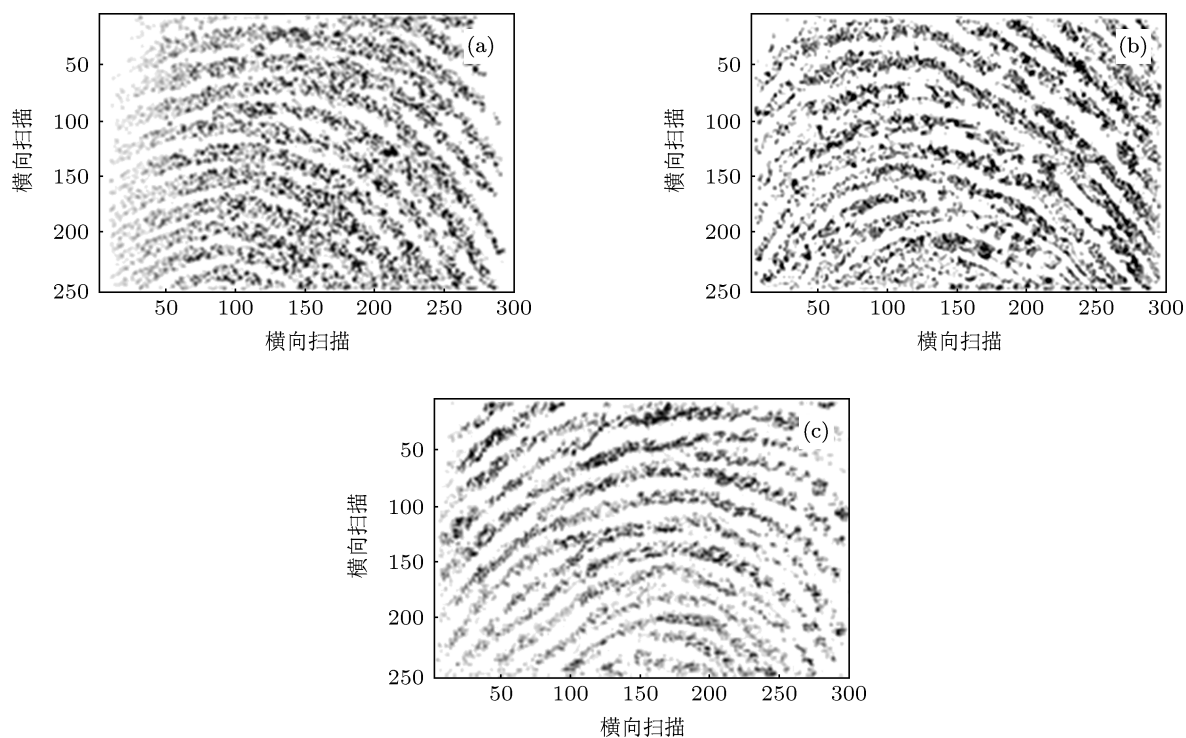


图8 基于相位方法重建的指纹图案 (a), (b), (c) 分别对应图4(a), (b), (c) 中的方框区域

4 结论

本文提出了一种提取并重建光滑表面遗留指纹的新方法, 即利用 SD-OCT 系统的相位敏感性得到光滑表面上遗留的指纹信息, 该方法可以避免指纹表面的破坏和对工作者造成的毒副作用, 也不会对取样表面留下痕迹, 是一种非接触式的无损检测技术, 不会对后续的进一步侦查产生任何负面影响.

该方法基于 SD-OCT 的相位敏感性, 使用希尔伯特变换对去直流干涉光谱进行处理得到相位信息, 对相位解包裹并直线拟合基于拟合, 直线的斜率提取等效高度信息, 进而形成指纹图案. 实验结果表明, 利用该方法可以高质量重建低光学对比度的潜指纹, 即利用 OCT 系统干涉光谱相位的敏感性可以对潜指纹进行对比度的有效增强, 进而实现潜指纹的准确识别.

- [1] Faulds H 1880 *Nature* **22** 605
 [2] Williams D K, Schwartz R L, Bartick E G 2004 *Appl. Spectrosc.* **58** 313
 [3] Exline D L, Wallace C, Roux C, Lennard C, Nelson M P, Treado P J 2003 *J. Forensic Sci.* **48** 1047
 [4] Zhang X G 2004 *Forensic Sci. Technol.* **4** 36 (in Chinese) [张秀国 2004 刑事技术 **4** 36]
 [5] Chris L 2007 *Aust. J. Forensic Sci.* **39** 73
 [6] Zhao K, Zhao T 2008 *J. Hunan Public Acad.* **20** 94 (in Chinese) [赵科, 赵韬 2008 湖南警察学院学报 **20** 94]
 [7] Dalrymple B E, Duff J M, Menzel E R 1977 *J. Forensic Sci.* **22** 106
 [8] Shao L F, Hao J P, Chang B N, Chen S, Liu H, Liu K H, Qu H Y, Li X J 2012 *Forensic Sci. Technol.* **1** 24 (in Chinese) [邵丽芳, 郝金萍, 常柏年, 陈松, 刘寰, 刘开会, 曲会英, 李孝君 2012 刑事技术 **1** 24]
 [9] Fregeau C J, Germain O, Founrey R M 2000 *J. Forensic Sci.* **45** 345
 [10] Huang D, Swanson E A, Lin C P, Schuman J S, Stinson W G, Chang W, Hee M R, Flotte T, Gregory K, Puliafito C A, Fujimoto J G 1991 *Science* **254** 1178
 [11] Yang Y L, Ding Z H, Wang K, Wu L, Wu L 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1773 (in Chinese) [杨亚良, 丁志华, 王凯, 吴凌, 吴兰 2009 物理学报 **58** 1773]
 [12] Wang K, Ding Z H 2008 *Chin. Opt. Lett.* **6** 902
 [13] Jia Y Q, Liang Y M, Zhu X N 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3861 (in Chinese) [贾亚青, 梁艳梅, 朱晓农 2007 物理学报 **56** 3861]
 [14] Bossen A, Lehmann R, Meier C 2010 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **22** 507

Phase sensitive spectral domain optical coherence tomography for latent fingerprint detection*

Bao Wen Ding Zhi-Hua[†] Wang Chuan Mei Sheng-Tao

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

(Received 24 June 2012; revised manuscript received 30 January 2013)

Abstract

Despite the advances made in areas such as DNA profiling, fingerprints are still considered to be the best form of personal identification for criminal investigation purposes. A variety of physical chemical and optical techniques are available for the enhancement and detection of latent fingerprints. However, existing frequently-used fingerprint detection methods show some disadvantages such as harm to fingerprints, slow extraction, potential side effects, leaving trails, high contrast demand and so on. A new method based on phase sensitive spectral domain optical coherence tomography (SD-OCT) for latent fingerprints detection is proposed. This method has advantages of non-contact non-destructive, high-speed and high-sensitivity. The experimental results demonstrate that using this method to deal with fingerprints of low contrast also leads to satisfactory results, proving that the sensitivity of SD-OCT can be used for accurate and reliable latent fingerprint recognition.

Keywords: latent fingerprint, spectral domain optical coherence tomography, phase sensitive

PACS: 42.25.Kb, 42.30.Wb, 87.64.-t, 89.20.Mn

DOI: 10.7498/aps.62.114202

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61275196, 60978037, 60878057), and the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2006AA02Z4E0).

[†] Corresponding author. E-mail: zh_ding@zju.edu.cn