

文章编号: 1002-1582(2025)05-0626-08

基于视频光谱结合多项式纹理映射 技术鉴别黑色书写墨迹

田紫雲, 陈维娜*, 孙林杰, 潘正浩
(中国人民公安大学 侦查学院, 北京 100038)

摘 要: 当前黑色书写墨迹的检验方法普遍存在操作复杂、损坏检材等问题; 为了探寻快速无损鉴别黑色墨迹的方法; 采用视频光谱结合多项式纹理映射技术 (PTM), 考察了市场上 114 支不同品牌型号的黑色签字笔, 首先用视频光谱仪进行红外光吸收检验和荧光检验, 在此基础上 PTM 检验获得其反射率可视化图像, 并进行量化分析; 结果显示不同墨迹 PTM 图像的灰度值和平均光密度值存在差异, 且具有负相关性线性关系, 可以区分视频光谱法难以区分的黑色墨迹。

关 键 词: 多项式纹理映射; 文件检验; 视频光谱; 黑色书写墨迹; 反射率

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

Identification of black handwriting ink tracks based on video spectrum combined with polynomial texture mapping

TIAN Ziyun, CHEN Weina*, SUN Linjie, PAN Zhenghao

(Investigation College, People's Public Security University of China, Beijing 100038, China)

Abstract: Current examination methods of black handwriting ink tracks generally suffer from operational complexity and damage to samples. To find a rapid and non-destructive method, this experiment investigated 114 black pens of different brands and models, adopting the method of video spectrum combined with polynomial texture mapping (PTM). First, infrared light absorption test and fluorescence test were carried out with a video spectrometer. On this basis, obtain its reflectance visualization image by PTM, and perform quantitative analysis. The result showed the gray value and average optical density of PTM images varied among different tracks, and exhibited a negative linear correlation, enabling the distinction of black ink tracks that video spectroscopy cannot differentiate.

Keywords: polynomial texture mapping; document examination; black handwriting ink tracks; reflectance

0 引 言

近年来, 随着经济纠纷案件增多, 对收据、发票、合同、借条等文书检材的检验需求日益增长。针对常见的黑色签字笔添加、篡改文书内容

的情况, 签字笔书写墨迹的检验值得重点关注。

目前国内的技术手段主要有光学检测方法和化学成分分析两类方法。光学检测方法, 具体有红外光检验^[1]、视频荧光检验^[2]、同轴光垂直落射^[3]、拉曼光谱法 (包括普通拉曼光谱仪^[4]、傅里

收稿日期: 2025-01-18; 收到修改稿日期: 2025-05-26

基金项目: 中央高校基本科研业务费项目资助 (2024JKF09) 结合深度学习与反射变换成像技术的形态类物证智能识别

作者简介: 田紫雲 (2001—), 女, 硕士研究生, 从事文件检验研究。3237458485@qq.com

陈维娜 (1984—), 女, 副教授, 从事疑难文件检验及鉴定、语音同一认定技术方面的研究。

* 通讯作者: 645421515@qq.com

叶变换拉曼光谱技术^[5]、基于金胶或银胶的表面增强拉曼光谱技术^[6,7]、高光谱成像技术^[8,9]、可见光分光光度计^[10,11]等等。化学成分分析,具体有薄层色谱法^[12]、气相色谱法^[13]、高效液相色谱法^[14]、加压毛细管电色谱法^[15]、质谱法^[16]等等。然而,这些方法虽然能够鉴别墨迹主要成分,但都存在缺点,一是设备昂贵,难以普及;二是操作复杂,耗时较长;此外还可能对检材造成破坏。

多项式纹理映射技术(Polynomial Texture Mapping, PTM)是一种计算机成像方法,首先于2001年被惠普实验室研究员 Tom Malzbender、Dan Gelb等发明^[17,18]。现已成为文化遗产^[19-21]、法庭科学^[22-23]等领域的新兴重要技术手段,后来也被称为反射变换成像技术(Reflectance Transformation Imaging, RTI)。在国内,该技术首先应用于考古领域^[24],近年来也开始应用于法庭科学中,比如痕迹检验^[25]、文件检验^[26]等等。尤其在文件检验领域中,已先后有研究人员探究了该技术在纸张检验^[27]、书写笔压^[28,29]、钢印印文^[30,31]、变造文件^[32]的应用,并尝试将其量化。

本实验收集了市场上114种不同品牌型号的黑色签字笔,采用当下文件检验领域最普及的视频光谱仪对墨迹进行红外光吸收检验和荧光检验,同时使用超视觉成像仪拍摄墨迹图像得到PTM图像,通过控制变量寻找可量化指标,统计分析其数据效果,与视频光谱检验结果结合起来,探讨能否做到以量化标准来区分不同的黑色书写墨迹,从而开发一种更便捷有效的检验方法,实现不同品牌型号黑色签字笔墨迹的无损快速鉴别。

通过分析比较黑色书写墨迹PTM图像的信息,来鉴别添加、篡改笔迹,在文件检验领域具有重要的应用价值和广阔的发展前景。

1 原理

签字笔墨水主要由溶剂、着色剂和包含分散剂、增稠剂、消泡剂、润滑剂等在内的表面活性剂和添加剂等组成^[33]。着色剂由三种组分组成,为碳黑、颜料和染料^[34],根据其含量的不同可将签字笔的墨水分为染料型和颜料型两大类。染料型墨水主要以有机染料为着色剂,其着色剂颗粒小,以单分子方式完全溶解在墨水中^[35],因此不易堵塞笔头,但易晕染扩散。颜料型墨水以无机和有机颜料为着色剂,黑色颜料型墨水里面的着色剂即碳黑。其着色剂为固体小颗粒外部包裹一层特殊的树脂和表面活性剂^[36],使颜料着色剂悬浮在水基凝胶中,因此具有抗水性。

由于不同品牌型号的签字笔在着色剂成分含量、表面活性剂种类及含量以及添加剂配比等方面存在差异^[37],因此其墨迹具有可鉴别性。

1.1 视频光谱检验

视频光谱检验法是借助视频光谱仪(文检仪),利用吸收和荧光原理,在特定光照条件下得到明显对比现象一种检验方法^[38-40]。该方法快速直观,文检仪成为司法鉴定中必备的实验仪器。其中最常用的是红外光吸收检验和荧光检验,原理分别为吸收检验原理和荧光检验原理^[41]。

1.1.1 吸收检验

吸收检验,是指不同物质在白光照射下显出不同颜色是不同物质本身对不同频率光选择吸收的效果。对于不同的黑色墨迹来说,可见光下均为黑色,然而其墨迹各色料的组分不同,对红外线的吸收及反射程度也不同,使用红外光照射时则会呈现不同层次的影像^[42]。吸收红外线则呈黑色,反射红外线则呈无色或浅色。

1.1.2 荧光检验

荧光检验是指不同物质在一定波长和一定强度的激发光照射下,能够产生不同波长和强度的荧光。颜料型墨水的有机成分受激发后会产生荧光,而染料型墨水由碳元素和无机组分组成,对红外光完全吸收,不产生荧光。不同品牌型号的黑色签字笔墨水在特定激发光照射下,在近红外区荧光的波长和强度往往是不同的。相同的原理已经成熟地应用于朱墨时序的检验当中^[43,44]。

1.2 多项式纹理映射技术

PTM技术能够实现变换光照角度的互动式补光拍摄,捕捉物体表面细微形态并进行三维效果渲染重建。其拍摄和计算的原理简要介绍如下。

第一步是通过图像获得每个像素点的法向量信息,并进行编码。这一步由双向反射分布函数(Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF)来实现^[45]。BRDF是出射光方向与入射光方向在单位面积下的反射光强度之比,是与波长 λ 有关、由入射光方向 (θ_i, φ_i) 和出射光方向 (θ_e, φ_e) 决定的函数

$$\text{BRDF}(\theta_i, \varphi_i, \theta_e, \varphi_e, \lambda) \quad (1)$$

双向纹理函数(Bidirectional Texture Function, BTF),能够满足BRDF在空间上随着位置参数即横纵坐标 x, y 变化,即囊括每个像素点的着色

$$\text{BTF}_{(r,g,b)}(\theta_i, \varphi_i, \theta_e, \varphi_e, x, y) \quad (2)$$

固定相机位置,也就是观察方向即出射光方向 (θ_e, φ_e) ,BTF可简化为至于入射光方向和横

纵坐标参数有关的函数

$$BTF_{(r,g,b)}(\theta_i, \varphi_i, x, y) \quad (3)$$

第二步是将第一步得到的法向量信息结合 Phong 光照模型进行渲染^[46]。Phong 光照模型是针对局部光照的 BRDF 模型, 实质是环境光、漫反射光、镜面反射高光三种光线强度模型的叠加。

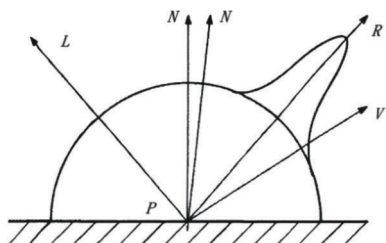


图 1 Phong 光照模型示意^[47]

在此基础上, Malzbender 等给出了计算颜色通道强度 C 的公式^[48], 表示为

$$C = a_0 L_x^2 + a_1 L_y^2 + a_2 L_x L_y + a_3 L_x + a_4 L_y + a_5 \quad (4)$$

式中 a_0 到 a_5 是多项式系数; L_x 到 L_y 是参数化的入射光方向。由此可将该像素点的法向量以及反射率等信息储存为灰度信息, 即 PTM 图像。

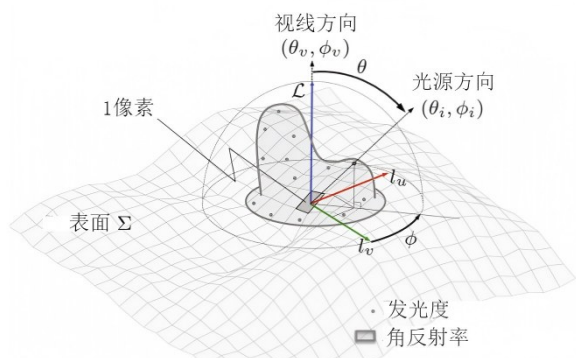


图 2 由入射光方向计算颜色通道强度模型示意^[49]

在 PTM 技术的基础上发展成为 RTI 技术, 其计算基本原理是光度立体技术^[50]。其原理和过程如图 3、4 所示。

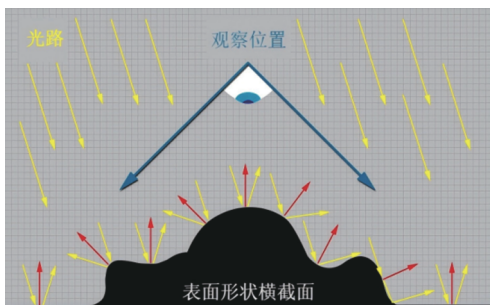


图 3 被摄物体表面法向量示意^[51]

图像上像素点亮度的一般模型为

$$I = \sum_{i=1}^k \rho_i f_i(N, L, V) \quad (5)$$

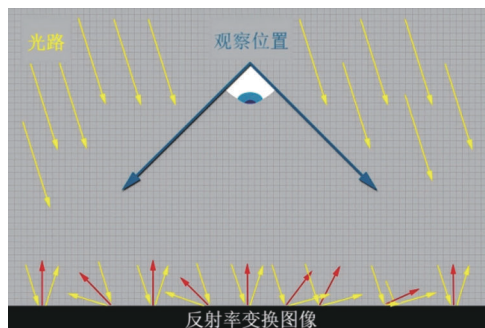


图 4 RTI 技术储存法向量示意^[51]

式中, I 为图像上一像素点的亮度值; ρ_i 为材料 i 的表面反射率; f_i 即 ERDF, 与物体表面法向量 N 、光照方向 L 、观察方向 V 有关。RTI 软件将计算出的每个像素点法向量的 x 、 y 、 z 坐标值分别映射到 R、G、B 通道的灰度上, 形成伪彩色图像, 也即 RTI 法线图。

以笔迹为例, 如图 5 所示, 笔迹 RTI 法线图和笔迹 PTM 图像可以消除其原有黑色的干扰, 视觉上直观呈现了笔迹压痕和反射率的对比。

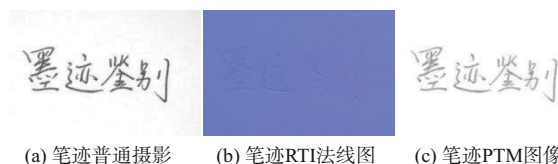


图 5 笔迹图像对比

1.3 灰度及光密度

灰度, 是指把白色与黑色之间按对数关系分成 0 至 255 若干级, 在图像领域有广泛用途。光密度, 也称吸光度, 是材料所具有的能减缓光的传播速度并产生折射效应的一种复杂的特性。

本实验中, 墨水组分的反射率不同会导致墨迹在某些光照角度下反射出不同灰度和亮度, 在其 PTM 图像中呈现为不同的灰度值和光密度值。

2 实验设计

2.1 实验样本制作

本次实验用笔为从市场采购的共 29 种品牌的不同型号共 114 支黑色签字笔, 每支笔的品牌、型号等信息统计如表 1 所示。基本上涵盖了目前国内市面上可见的高档、中档、低档黑色签字笔。

将所有签字笔每 20 支为一组, 每组在同一张 A4 纸上一次书写一横。由此共获得 6 张检材, 共计 114 个样本单位。由于书写压痕对光照角度有一定影响, 统一选择 5 张 A4 纸作为书写衬垫物, 并且控制运笔力度尽量小, 同时保证墨迹均匀流畅。

表 1 实验所用黑色签字笔

编号	品牌	型号
Y1—Y10	爱好	GP2100/B832/GP1042/GP1341/ GP1300/GP2001/AH—2000A/B489/ 8761/RP3002
Y11—Y13	白雪	PVR—155/PVN—166/N05
Y14—Y22	百乐	LJU—10EF/B2P/BL—G2—5/BL— P50/BL—G1—5T/ LJP—20S5/V5/BL—SG—5/BL— WG—5
Y23—33	斑马	JJ77—BK/C—JJ100—BK/JJZ33/ JJ29—R1—BK1/ Z—Grip/JJZ66—W/C—JJ6—CN— BK/JJ15—BK/ JJZ15W—BK/JJZ58—BK/JJM88—BK
Y34	宝克	PC1828
Y35	贝发	ZP001
Y36—Y37	宾乐美	G610/G310
Y38	超时	CS—R458
Y39—Y47	晨光	GP1008/AGPJ0601/AGPH7302/ AGP02328/GP1350/AGPK0101/ AGPY5501/GP1163/ARPM2001
Y48—Y65	得力	S657/S115/S60—ST/ A647/A621/GT4/ S1629/S08/S128/S856/ S08—E/S09/V69/ A566/6600ES/A426/33633
Y66—Y71	点石	DS—904/DS—060/DS—067/D500/ Mate10/DS—0108
Y72—Y79	东米	903/930/911M/932/928/977/957/902
Y80	国誉	WSG—PR3035W
Y81	简菲	/
Y82—Y84	金芯	JX—3563/JX—3511/JX—3513
Y85	劲马	HO—333
Y86	蓝果	G5
Y87—Y93	派通	BLN75Z—A/BLN105—A/BLN75 AW/BLN75—A/ BLN75TL—A/BLN25—A/BLP75—A
Y94—Y95	齐心	GP302/A1
Y96	如益	70.5
Y97	锐意	S—GEL
Y98—Y104	三菱	UMN—105/UMN—207/UMN— 155N—05/UM—100/ UB—155/UMN—S—05/UB—150
Y105	施耐德	Xtra803
Y106—Y109	图米	TM—043/TM—070/TM—072L/ TM—061
Y110	五千年	W—3021
Y111	小米	MJZXB02WC
Y112	一木林	YML—9703
Y113	宥田	YT—045
Y114	真彩	ZC101K

2.2 实验仪器条件

2.2.1 硬件

北京瑞源华德科技有限公司的华德瑞鹰 VSC80 文件检验工作站（视频光谱仪）；南京易纹兴智能科技有限公司的超视觉成像仪 DT 系列。

2.2.2 软件

Image J、Image Pro Plus 6.0。

2.3 实验方法

本文鉴别区分黑色墨迹的实验方法为视频光谱结合 PTM 技术。

第一步进行视频光谱检验初步区分墨迹性质。依次将样本放置在文检工作站的样品台上，进行红外光吸收检验和荧光检验。本实验中，红外光吸收检验采用滤波片 780nm 的入射泛光源照射，荧光检验采用滤波片 695nm 的 640nm 的强光源照射。拍照均采用自动曝光模式，参数设置为曝光时间 2.3ms，光圈 46%，亮度 127。

第二步利用超视觉成像仪配套专业软件 SuperRTI 和 RTIViewer 获得 PTM 图像进一步区分观察具体墨迹反射率。打开 SuperRTI，新建 LRGB 型 PTM 项目。本实验中，相机参数为快门 1/60 秒，光圈 f4，ISO800，图像质量 Jpeg Small1 Fine，图片储存格式 jpg，另外穹顶光源选择 48 个灯位，灯位选择环形照明，穹顶半径 210.00mm。系统自动拍摄 48 张不同方向打光的照片后进行 PTM-LRGB 反射率计算，计算完成后使用 RTIViewer 打开该 rti 格式文件得到 PTM 图像。

对 114 个样本单位进行重复实验。观察其在红外光吸收检验、荧光检验和 PTM 图像中的表现，并尝试量化 PTM 图像中的灰度值和光密度值进行比较。实验流程如图 6 所示。

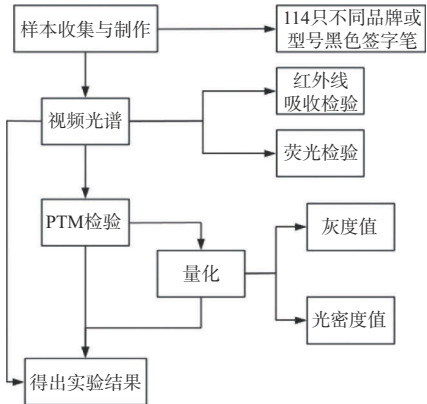


图 6 实验流程路径图

3 实验结果分析

3.1 视频光谱成像结果

在红外光吸收检验下，若墨迹吸收红外线则

呈黑色, 反射红外线呈无色或颜色变浅; 在荧光检验下, 若墨迹不发荧光则仍是黑色, 否则会呈现强度不等的荧光。如图 7 所示。

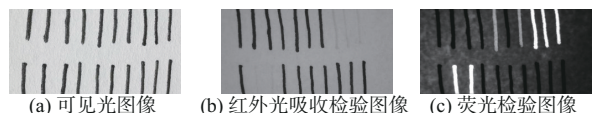


图 7 视频光谱成像结果对比

将红外光吸收检验和荧光检验的结果作为分类标准进行分类统计, 结果如图 8, 可将 114 种墨迹分为四大类: 吸收红外线且不发荧光、反射红外线且发荧光、吸收红外线且发荧光、反射红外线且不发荧光。

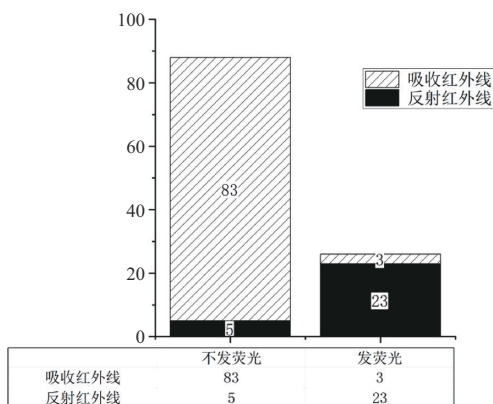


图 8 视频光谱成像结果

视频光谱法确实能够快速无损地鉴别染料墨、颜料墨以及二者的混合墨水。一般情况下, 染料墨反射红外光, 发荧光; 颜料墨吸收红外光, 不发荧光; 混合墨情况介于两者之间。然而, 该方法对于既吸收红外线又不发荧光的纯碳素类墨迹和既反射红外线又发荧光的纯染料墨难以进一步区分。

3.2 PTM 成像结果

物质表面的反射率不同, 在某些光照角度下会呈现出不同灰度和亮度。如图 9 所示, PTM 图像在 RTIViewer 中相同光照角度下 (即控制辐照方向 x 、 y 坐标值不变) 影像呈现为不同的灰度。灰色越深, 反射光越弱; 灰色越浅, 反射光越强。

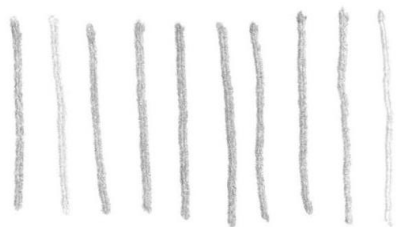


图 9 笔迹 PTM 图像

因此, 对于占比 73% 的既吸收红外线又不发荧光的纯碳素类黑色墨迹, PTM 可以将其区分。如图 10 所示, 依次是三支样本的墨迹的红外光

吸收检验图像、荧光检验图像、PTM 检验图像。这三种墨迹既吸收红外线又不发荧光, 文检仪下无法区分, 然而可以通过 PTM 图像直观地区分开来。

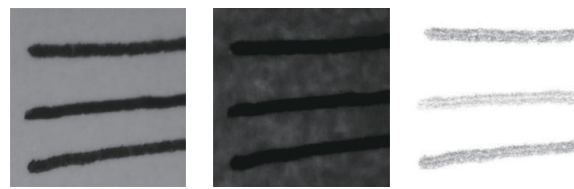


图 10 既吸收红外线又不发荧光的纯碳素类黑色墨迹图像

3.3 量化分析

一般情况下, 当两种墨迹反射率存在明显差异时, 即可作为确定添加篡改的依据。值得注意的是, 不同光照角度下墨迹的反射光差异表现不一: 某些角度下差异显著, 另一些角度下较为接近, 因此 RTIViewer 作为显示反射率动态可视化的软件, 具有独特优势。使用者可以拟合出任意光照角度下的影像, 从而找到两种墨迹反射率差异最明显的角度。

为实现多种墨迹同步比对, 需要建立量化指标体系。需要在 RTIViewer 中控制辐照方向为一个合适的坐标值固定不变, 分别用 Image J 和 IPP 测量其每种书写墨迹的灰度值和平均光密度值, 即可对所有的墨迹统一进行量化对比。本文中经过多次试验, 认为选择控制辐照方向为 $x=-0.26$, $y=-0.33$ 固定不变可以得到相对较好的效果, 并在此条件基础上进行量化分析。

以光密度值为横轴, 灰度值为纵轴作散点图, 结果如图 11。可以看到, 黑色书写墨迹的灰度值与平均光密度值呈负相关线性关系。即墨迹的反射光越强, 灰度值越高, 光密度值越低; 反射光越弱, 灰度值越低, 光密度值越高。

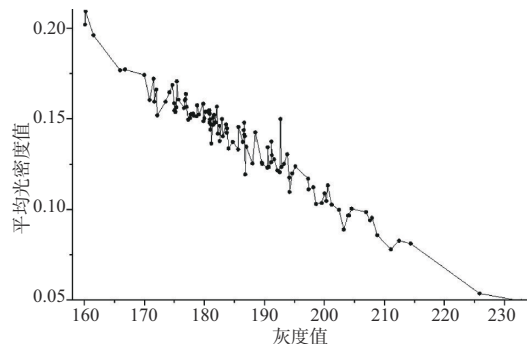


图 11 平均光密度值与灰度值的关系

通过对墨迹的 PTM 图像灰度值和平均光密度值的测量结果, 可以看到不同黑色书写墨迹的灰度值和平均光密度值均有一定差异, 这是由不同黑色书写墨迹的具体组分的差异导致的。证实了

在一定范围内可以从PTM图像的灰度值和光密度值这两个维度对不同黑色书写墨迹作定量的区分。

3.4 综合评断

为了更贴合实际案件鉴定需求,下面对于这四类墨迹,尤其是占比样本量最多的两类墨迹,再进行一些深入探讨。

吸收红外线、发荧光的墨迹样本只有3个,分别是Y35(贝发ZP001)、Y57(得力S656)以及Y81(简菲直液笔),数量非常之少,目前看与品牌型号并无联系。反射红外线、不发荧光的墨迹样本有5个,均为日产百乐品牌,型号分别为B2P、BL-G2-5、BL-G1-5T、BL-SG-5、BL-WG-5,且对红外光吸收检验的情况均为反射部分红外线,即墨迹变浅。其他品牌暂未发现。

对于占总数近73%的既吸收红外线又不发荧光的纯碳素类黑色墨迹,其光密度值与灰度值关系散点图如图12。可以根据散点聚集程度,从而将其大致分为四类:灰度值 $X < 170$, X 在170~190之间, X 在190~210之间, $X > 210$ 。

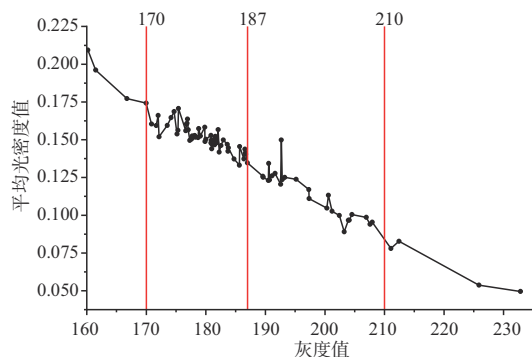


图12 光密度值与灰度值的关系(纯颜料墨)

对于占总数近20%的既反射红外线又发荧光的纯染料墨,其光密度值与灰度值关系散点图如图13。同理,可将其大致分为四类:灰度值 $X < 180$, X 在180~188之间, X 在188~195之间, $X > 195$ 。

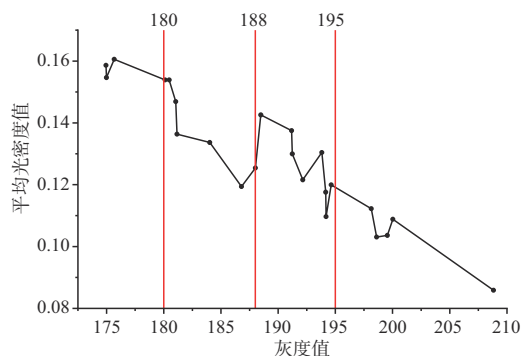


图13 光密度值与灰度值的关系(纯染料墨)

4 结 论

本文基于视频光谱结合PTM技术的原理和方法来鉴别区分黑色书写墨迹。首先基于视频光谱原理,对114支不同品牌型号的黑色签字笔墨迹进行了红外光吸收检验和荧光检验。而后基于PTM,采集各墨迹的PTM图像,精确测量固定光照参数下每种书写墨迹PTM图像的灰度值和平均光密度值,对结果进行量化分析。

实验结果表明,视频光谱仪可将墨迹区分为吸收红外线且不发荧光(73%)、反射红外线且发荧光(20%)、吸收红外线且发荧光、反射红外线且不发荧光这四类墨迹,但同类墨迹之间无法区分。而PTM技术所量化得到的不同墨迹的PTM图像的灰度值和平均光密度均各不相同,呈现出稳定的负相关线性关系,从而可以区分视频光谱法难以区分的黑色墨迹,为有效鉴别不同签字笔的黑色书写墨迹提供了新的技术方法。

相较于传统检验方法,PTM技术对检材快速无损检验且标准简单、直观方便。通过PTM技术对检材快速无损拍照生成PTM图像,当检材份数较少时,可直接使用RTIViewer软件动态观察PTM图像来辨别是否为添加、篡改笔迹;当检材份数较多时,则可在同一条件下测量其灰度值或平均光密度值进行横向对比。这项研究能为司法实践提供一个新的方法和思路,能够有效满足案件中关于文书检材有无添加篡改的检验需求。

参考文献:

- [1] 曹艳萍,王照,韩瑞芳.傅里叶变换红外光谱技术鉴别黑色笔墨种类[J].榆林学院学报,2013,23(02):27—31.
Cao Yanping, Wang Zhao, Han Ruifang. Identification of black ink by Fourier transform infrared spectroscopy[J]. Journal of Yulin University, 2013, 23(02): 27—31.
- [2] 刘聪,杨尚鹏.荧光检验法判定打、复印文字朱墨时序的适用性研究[J].造纸装备及材料,2021,50(09):150—152.
Liu Peng, Yang Shangoeng. Research on the applicability of fluorescence test method to determine the ink timing sequence of typed and copied text[J]. Papermaking Equipment & Materials, 2021, 50(09): 150—152.
- [3] 林祥,庄顺,袁彬彬,等.同轴光垂直落射显微观察区分黑色签字笔墨水种类研究[J].海峡科学,2017,(02):41—42.
Lin Xiang, Zhuang Shun, Yuan Binbin, et al. The research on coaxial light vertically epimicroscopic observation to distinguish black rollerballs ink type[J]. Straits Science, 2017, (02): 41-42.
- [4] 周珺.基于LRS-Ⅲ型拉曼光谱仪检测黑色笔迹[J].大学物理实验,2014,27(06):27—29.
Zhou Jun. Based on the LRS-Ⅲ raman spectrometer to detect black handwriting[J]. Physical Experiment of College, 2014, 27(06): 27—29.
- [5] 王志国,孙素琴,周群,等.黑色签字笔墨水的NIR FT-Raman

- 光谱法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2001, (06):794—797.
- Wang Zhiguo, Sun Suqin, Zhou Qun, et al. Studies of black roller pen inks by NIR FT-Raman spectrometry[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2001, (06):794—797.
- [6] 陈宁, 李舒莹, 张晓霞. 基于金胶的表面增强拉曼光谱检验黑色书写墨迹[J]. 刑事技术, 2016, 41(03):203—205.
- Chen Ning, Li Shuying, Zhang Xiaoxia. Analysis of handwriting from black roller and gel ink pen by surface-enhanced Raman spectroscopy based on gold colloid[J]. Forensic Science and Technology, 2016, 41(03):203—205.
- [7] 陈宁, 徐文峰, 张晓霞, 等. 基于银胶的表面增强拉曼光谱检验黑色签字笔墨迹[J]. 广东公安科技, 2015, 23(03):22—26+44.
- Chen Ning, Xu Wenfeng, Zhang Xiaoxia, et al. Analysis of handwriting from black roller and gel ink pen by surface-enhanced Raman spectroscopy based on silver colloid[J]. Guangdong Public Security Science and Technology, 2015, 23(03):22—26+44.
- [8] 张倩, 陈维娜, 郝红光. 高光谱成像技术在文件检验应用的研究综述[J]. 应用化工, 2020, 49(01):165—170.
- Zhang Qian, Chen Weina, Hao Hongguang. A review of research on hyperspectral imaging technology in document inspection applications[J]. Applied Chemical Industry, 2020, 49(01):165—170.
- [9] 郝艳丽, 张彪. 利用光谱成像技术检验添改字迹的研究[J]. 电子质量, 2022, (07):143—147.
- Hao Yanli, Zhang Biao. An experimental study on the inspection of altered handwriting by spectral imaging technology[J]. Electronics Quality, 2022, (07):143—147.
- [10] 申思, 石智峰. 光学方法区分黑色签字笔墨水种类的研究[J]. 广东公安科技, 2013, 21(03):12—14+30.
- Shen Si, Shi Zhifeng. The study of optical methods to distinguish the types of black signature pen inks[J]. Guangdong Public Security Science and Technology, 2013, 21(03):12—14+30.
- [11] 叶卓龙, 王长亮, 崔岚. 利用显微分光光度计鉴别黑色中性笔墨水[J]. 中国司法鉴定, 2019, (03):40—44.
- Ye Zhuolong, Wang Changliang, Cui Lan. Using microspectrophotometry to distinguish black gel ink[J]. Chinese Journal of Forensic Sciences, 2019, (03):40—44.
- [12] 王志勇, 王炳娟, 邹洪. 薄层色谱法鉴别黑色签字笔油墨种类[J]. 理化检验(化学分册), 2009, 45(01):14—15+18.
- Wang Zhiyong, Wang Bingjuan, Zou Hong. Identification of category of blank gel pen ink by TLC[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part B: Chemical Analysis) 2009, 45(01):14—15+18.
- [13] 李继民. TLC法鉴别黑色签字笔油墨种类的研究[J]. 公安大学学报(自然科学版), 2002, (06):11—14.
- Li Jimin. Research on the identification of black rollerball Ink-Types by TLC method[J]. Journal of People's Public Security University of China (Science and Technology), 2002, (06):11—14.
- [14] 陈跃, 王珊珊, 苑金鹏, 等. 高效液相色谱-飞行时间质谱法区分黑色签字笔种类[J]. 山东科学, 2015, 28(05):80—84.
- Chen Yue, Wang Shanshan, Yuan Jinpeng, et al. Black gel ink type distinction by high performance liquid chromatogram-time of flight mass spectrometer[J]. Shandong Science, 2015, 28(05):80—84.
- [15] 黄晓晶, 黎路, 李鹏, 等. 加压毛细管电泳法在鉴别圆珠笔油墨中的应用[J]. 色谱, 2007, (03):437—438.
- Huang Xiaojing, Li Lu, Li Peng, et al. Application of pressurized capillary electrochromatography in identification of ballpoint pen inks[J]. Chinese Journal of Chromatography, 2007, (03):437—438.
- [16] 王舒超, 崔岚, 宋辉, 等. 气相色谱-质谱法分析 3 种常见品牌喷墨打印机 84 种墨水制备的墨迹样本中挥发性溶剂成分[J]. 理化检验(化学分册), 2021, 57(09):781—787.
- Wang Shuchao, Cui Lan, Song Hui, et al. Analysis of volatile solvent components in ink samples prepared by 84 kinds of inks from 3 common brands of inkjet printers by Gas chromatography-mass spectrometry[J]. Physical and Chemical Examination (Chemistry Branch), 2021, 57(09):781—787.
- [17] Malzbender T, Gelb D, Wolters H, et al. Polynomial texture maps[C]//Computer Graphics and Interactive Techniques. Los Angeles, USA: ACM, 2001:519—528.
- [18] ResearchGate. Compression of polynomial texture maps [EB/OL]. [2001-11]. https://www.researchgate.net/publication/2383871_Compression_of_Polynomial_Texture_Maps
- [19] S N T M, J A V, J P O. Applications of reflectance transformation imaging for documentation and surface analysis in conservation[J]. International Journal of Conservation Science, 2013, 4(SPL.ISS.):535—548.
- [20] Silvia F, Anna R, Biancamaria A, et al. Application of reflectance transformation imaging to experimental archaeology studies[J]. Heritage, 2020, 3(4):1279—1286.
- [21] Małgorzata G, Tomasz L. Applications of Reflectance Transformation Imaging (RTI) for books and objects on paper[J]. Journal of Paper Conservation, 2023, 24(1):16—30.
- [22] Clarke S, Christensen M A. Reflectance Transformation Imaging (RTI) of saw marks on bones[J]. Journal of Forensic Radiology and Imaging, 2016, 733—737.
- [23] Britny M, Carolyn R. Reflectance Transformation Imaging (RTI) for the documentation of saw mark characteristics[J]. Journal of Forensic Sciences, 2020, 65(5):1692—1697.
- [24] 刘颖, 刘倩, 李大湘, 等. 基于 PTM 模型文物纹理映射算法[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(12):209—214.
- Liu Ying, Liu Qian, Li Daxiang, et al. Cultural relic texture mapping algorithm based on PTM model[J]. Computer Engineering and Applications, 2020, 56(12):209—214.
- [25] 徐少良. 基于反射变换成像技术的线形痕迹检验研究[D]. 北京:中国人民公安大学, 2020.
- Xu Shaoliang. Research on linear trace detection based on reflection transform imaging[D]. People's Public Security University of China, 2022.
- [26] 梁适. RTI在笔迹三维特征检验中的应用初探[D]. 上海:华东政法大学, 2018.
- Liang Shi. The application of RTI in the three-dimensional Feature test of handwriting[D]. East China University of Political Science and Law, 2018.
- [27] 林红, 裴雷, 刘宁, 等. 反射变换成像技术显现喷墨打印机星形轮齿痕个体特征[J]. 中国刑警学院学报, 2018, (02):79—82.
- Lin Hong, Pei Lei, Liu Ning, et al. Reflection transform imaging technique reveals individual characteristics of star gear marks in inkjet printer[J]. Journal of the Chinese Criminal Police Academy, 2018, (02):79—82.
- [28] 刘宁. 运用反射变换成像技术显现黑色签名字迹书写笔压[J]. 警察技术, 2015, (05):32—34.
- Liu Ning. Using reflection transform imaging technique to re-

- veal black signature writing pen pressure[J]. Police Technology, 2015, (05):32—34.
- [29] 张树彬, 韩星周. 基于反射变化成像技术对临摹签名笔压特征的分析初探[J]. 警察技术, 2024(1):77—80.
Zhang Shubin, Han Xingzhou. A preliminary study on the analysis of pen pressure characteristics of tracing signatures based on reflection transform imaging technology[J]. Police Technology, 2024(1):77—80.
- [30] 吴晓. 基于RTI技术对钢印印文的检验技术研究[J]. 法制博览, 2022, (02):88—90.
Wu Xiao. Research on inspection technology of Steel seal based on RTI technology[J]. Legal Review, 2022, (02):88—90.
- [31] 朱明新, 李阳, 张里. 反射变换成像技术在钢印印文检验中的应用[J]. 刑事技术, 2016, 41(02):167—169.
Zhu Mingxin, Li Yang, Zhang Li. Application of reflection transform imaging technology in Steel seal examination[J]. Criminal Technology, 2016, 41(02):167—169.
- [32] 吴晓, 林红. 反射变换成像技术在打印变造文件中的应用[J]. 科教导刊(中旬刊), 2018, (08):53—54+123.
Wu Xiao, Lin Hong. Application of reflection transform imaging technology in printing altered documents[J]. Science and Education Guide (Mid-Day Issue), 2018, (08):53—54+123.
- [33] 霍晓伟. 颜料型中性墨水性能优化研究[D]. 太原:太原理工大学, 2020.
Huo Xiaowei. Study on the performance optimization of pigmental gel ink[D]. Taiyuan University of Technology, 2020.
- [34] 何海洋, 赵鹏程, 何宁, 等. 基于气相色谱技术研究黑色中性笔字迹中3种溶剂随书写时间的变化规律[J]. 理化检验(化学分册), 2021, 57(09):769—775.
He Haiyang, Zhao Pengcheng, He Ning, et al. Study on the variation of three solvents in the handwriting of black gel pen with writing time based on gas chromatography[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part B: Chemical Analysis), 2021, 57(09):769—775.
- [35] 费颖颖. 染料型中性墨水的配方设计[D]. 大连:大连理工大学, 2013.
Fei Yingying. Formulation of black dye-based gel ink[D]. Dalian University of Technology, 2013.
- [36] 胡永辉. 颜料型中性墨水制备过程[J]. 中国制笔, 2023, (03):39—42.
Hu Yonghui. Preparation processes of pigmental gel ink[J]. China Writing Instruments, 2023, (03):39—42.
- [37] 王瑞华. 签字笔墨水的组成分析[J]. 商场现代化, 2012, (10):105.
Wang Ruihua. Analysis of the composition of the ink of the signature pen[J]. Market Modernization, 2012, (10):105.
- [38] 杨旭, 施少陪, 徐彻, 等. 荧光检验法在朱墨时序鉴定中的应用研究[J]. 中国司法鉴定, 2014, (05):52—58.
Yang Xu, Shi Shaopei, Xu Che, et al. Application of fluorescence examination in the sequencing of stamping and printing[J]. Chinese Journal of Forensic Sciences, 2014, (05):52—58.
- [39] 陈维娜, 杨春松, 杨旭. 视频荧光光谱图像技术鉴别复印纸[J]. 发光学报, 2018, 39(05):713—722.
Chen Weina, Yang Chunsong, Yang Xu. Forensic differentiation of copy paper by image processing techniques of video fluorescence spectroscopy[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2018, 39(05):713—722.
- [40] 徐素芳. VSC40文检仪检验原理及在法学实验教学中的应用[J]. 实验室研究与探索, 2012, 31(08):443—448.
Xu Sufang. Principle and application of VSC40 document retrieval instrument in experimental teaching of law[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2012, 31(08):443—448.
- [41] 朱秀敏, 吴建武, 吴琼. 光谱成像技术在文件检验中的应用[J]. 光电技术应用, 2014, 29(01):40—42+48.
Zhu Xiumin, Wu Jianwu, Wu Qiong. Application of spectral imaging technology in document inspection[J]. Electro-optic Technology Application, 2014, 29(01):40—42+48.
- [42] 罗顿, 贾晓光. 数码照相机与视频荧光鉴别仪的物证检验应用比较[J]. 政法学刊, 2004, (03):71—72.
Luo Dun, Jia Xiaoguang. A comparative study on the application of digital camera and video fluorescence detector in the examination of material evidence[J]. Journal of Political Science and Law, 2004, (03):71—72.
- [43] 熊玉英, 钟婷. SYW-650E型视频荧光文检仪在朱墨时序中应用的探索[J]. 广东公安科技, 2021, 29(03):34—36.
Xiong Yuying, Zhong Ting. Exploration of the application of SYW-650E video fluorescence document retrieval instrument in the ink timing sequence[J]. Guangdong Public Security Science and Technology, 2021, 29(03):34—36.
- [44] 刘聪, 杨尚鹏. 荧光检验法判定打、复印文字朱墨时序的适用性研究[J]. 造纸装备及材料, 2021, 50(09):150—152.
Liu Cong, Yang Shangpeng. Research on the applicability of fluorescence test method to determine sequence of stamping and printing of typed and copied text[J]. Papermaking Equipment & Materials, 2021, 50(09):150—152.
- [45] 魏巍. 基于反射变换成像的表面痕迹检测技术研究[D]. 中国科学院大学, 2019.
Wei Wei. Application of reflectance transformation imaging for display of traces [D]. Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [46] 朱信冉. 基于反射变换成像的笔迹检测与识别技术研究[D]. 中国科学院大学, 2020.
Zhu Xinran. Research on handwriting detection and recognition technology based on reflectance transformation imaging[D]. Chinese Academy of Sciences, 2020.
- [47] 孙家广, 胡事民. 计算机图形学基础教程(第二版)[M]. 北京:清华大学出版社, 2005.
Sun Jiaguang, Hu Shimin. Computer graphics fundamentals (2nd Edition) [M]. Beijing:Tsinghua University Press, 2005.
- [48] Malzbender T, Gelb D, Wolters H. Polynomial Texture Map (PTM) file format[EB/OL]. (2018-06) (2024-8-20), <https://www.digitalpreservation.gov/formats/fdd/fdd000487.shtml>.
- [49] Pitard G, Le Goïc G, Mansouri A, et al. Robust anomaly detection using reflectance transformation imaging for surface quality inspection[C]//The 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH '01). Los Angeles, USA:ACM, 2001:550—561.
- [50] 徐少良, 郭威, 韩雨彤, 等. 反射变换成像技术应用进展[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(08):43—50.
Xu Shaoliang, Guo Wei, Han Yutong, et al. Application progress of reflection transform imaging[J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2022, 59(08):43—50.
- [51] Cultural Heritage Imaging. Reflectance Transformation Imaging (RTI) [EB/OL]. [2021-02-01]. <http://culturalheritageimaging.org/Technologies/RTI/index.html>.