

## 基于反射变换成像技术对同种笔添改字迹的检验

孙林杰, 陈维娜\*

中国人民公安大学侦查学院, 北京 100038

**摘要** 为解决法庭科学文件检验领域中的添改字迹问题,首次采用反向变换成像(RTI)技术以多种模式呈现同种墨迹交叉笔画的三维特征,用于检验同种类型笔书写字迹的笔画交叉时序。首先制作十字交叉、倾斜交叉、点位交叉三种样本,并分成“先横后竖”和“先竖后横”两类,每类制作 50 个样本。随后利用 RTI 技术对 1200 个样本进行成像检验,利用检出率来反映不同 RTI 模式检验各类样本的效果。最后在法线可视化模式下,基于样本种类对检出率进行方差分析(ANOVA)。初步实验结果表明:圆珠笔、中性笔在十字交叉样本和倾斜交叉样本中的检验效果最好,检出率高达 95%,在点位交叉样本中检出率为 70%;秀丽笔、纤维笔在十字交叉样本和倾斜交叉样本中检验效果也较理想,检出率分别为 85% 和 65%,但是在点位交叉样本中检验效果一般,检出率仅为 25%。在笔画检验效果最佳的法线可视化模式下进行单因素 ANOVA,发现样本种类之间的检出率具有显著差异。RTI 技术为文件检验方法体系的补充和丰富提供新的可能性,在文件检验领域具有广阔的发展前景。

**关键词** 反射变换成像; 添改字迹; 文件检验; 笔画交叉时序

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP241159

## Handwriting Alteration Detection with the Same Pen Using Reflectance Transformation Imaging Technique

Sun Linjie, Chen Weina\*

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

**Abstract** To address the issue of handwriting alteration in the field of court scientific document examination, we employ reflection transformation imaging (RTI) technique to capture the three-dimensional characteristics of cross-strokes in handwritten characters. The proposed method allows us to examine cross-stroke sequences from the same type of ink across multiple modes. First, we create three types of samples: cross-crossing, tilt-crossing, and point-crossing, dividing each into two categories based on stroke order: “first horizontal then vertical” and “first vertical then horizontal”, with 50 samples in each category. Second, 1200 samples are imaged and analyzed using the RTI technique to evaluate the detection rates of various samples under different RTI modes. Analysis of variance (ANOVA) is then performed on the detection rates in normal visualization mode. Preliminary experimental results show that the ballpoint pens and neutral pens exhibit the best test effectiveness in cross-crossing and tilted-crossing samples, with detection rates of up to 95%. Show pens and fiber pens also perform well in these categories, with detection rates of 85% and 65% respectively. But their detection effect decreases in point-crossing samples, with a detection rate of only 70% for ballpoint pens and neutral pens, and 25% for Show pens and fiber pens. ANOVA reveals notable differences in detection rates between sample types in normal visualization mode. RTI technology offers new opportunities for enhancing document inspection methods and shows promising potential for future development in this field.

**Key words** reflection transformation imaging; handwriting alteration; document examination; cross-stroke sequence

## 1 引言

添改文件是在原来真实文件上添加、改写部分内

容从而改变原来真实文件而形成的内容虚假的可疑文件<sup>[1]</sup>,添改笔画是检验添改文件的重要依据。

在传统添改文件的检验研究和实践中,对添改笔

收稿日期: 2024-04-23; 修回日期: 2024-05-25; 录用日期: 2024-06-03; 网络首发日期: 2024-06-11

基金项目: 中国人民公安大学刑事科学技术双一流创新研究专项(2023SYL06)

通信作者: \*645421515@qq.com

画进行鉴别时主要分析笔画的墨迹成分,主要采用光谱和色谱分析等仪器分析方法。光谱法主要有红外光谱法<sup>[2]</sup>、拉曼光谱法<sup>[3-4]</sup>,色谱法主要有薄层色谱法<sup>[5]</sup>、气相色谱-质谱法<sup>[6]</sup>、超高液相色谱法<sup>[7]</sup>、裂解气相色谱法<sup>[8]</sup>、加压毛细管电色谱法<sup>[9]</sup>。仪器分析方法可对书写笔迹的墨迹成分进行有效的鉴别,通过鉴别笔迹的墨迹成分是否一致,从而确定检验的文件是否为添改文件。但是仪器分析方法的操作设备比较昂贵,操作复杂,且仅限于检测添改笔迹的墨迹成分不一致的情况,当墨迹成分一致时,此种方法不能对文件进行鉴别。除了对墨迹成分进行检验以外,还可以对笔画的交叉时序进行检验<sup>[10-14]</sup>,通过分析书写字迹笔画的交叉时序从而判断笔画是否经过添改,可为确认文件是否被添改提供线索,从而进一步确认文件的真实性。但笔画交叉时序的判断易受墨水颜色洒散等现象的影响,往往很难判断。反射变换成像(RTI)技术能消除墨迹颜色的影响,从笔画的三维痕迹特征方面判断书写笔画的交叉时序<sup>[15-18]</sup>,从而为检验添改文件提供重要的鉴定依据。

RTI是一种允许研究人员从多个光线角度记录和表现物体、处理其颜色和反射特性的技术,相较于传统的目视检查或摄影,RTI能更全面地研究物体表面<sup>[19-24]</sup>,已应用于多个领域,包括历史考古学<sup>[25-26]</sup>、古病理学<sup>[27-28]</sup>和古代涂鸦<sup>[29-30]</sup>。在文件检验领域,RTI技术已被用于研究笔迹<sup>[31-34]</sup>,特别是彩色和无色笔迹,从而揭示肉眼不易辨别的二维和三维细节,准确提取书写内容、书写特征和笔顺特征等信息,为检验添改文件提供一种新型检验方式,具有广阔的应用前景。

## 2 原理

RTI一词最早由惠普实验室的Malzbender等提出,他发明了被称为多项式纹理映射(PTM)的图像处理方法<sup>[35]</sup>。PTM也被称为RTI,采用单相机多光(SCML)进行数据采集,是一种从二维图像中获得物体表面三维信息的数字采集技术,通过在不同的照明条件下用固定相机捕捉静止对象的一组图像,实现多种影像重现,从而获取物体表面的三维信息。

RTI技术的原理需要考虑光照方向、表面法线和反射率之间的关系。光从表面反射使光的入射角和反射角与表面法线形成相等的角度<sup>[36]</sup>。由于相机的位置固定,且知道每张图像中的光线来源,通过从各种光线位置进行采样,RTI软件可计算图像中每个像素的表面法线。以下是RTI的基本原理(图1)。

设 $I(x, y, z, \theta)$ 表示在给定的光照方向角 $\theta$ 下,位置 $(x, y)$ 处的像素强度值,假设 $N_x(x, y)$ 、 $N_y(x, y)$ 和 $N_z(x, y)$ 是在该位置处的表面法线( $n$ )的 $x$ 、 $y$ 和 $z$ 分量。RTI的基本原理是将像素强度值 $I$ 与光照方向和

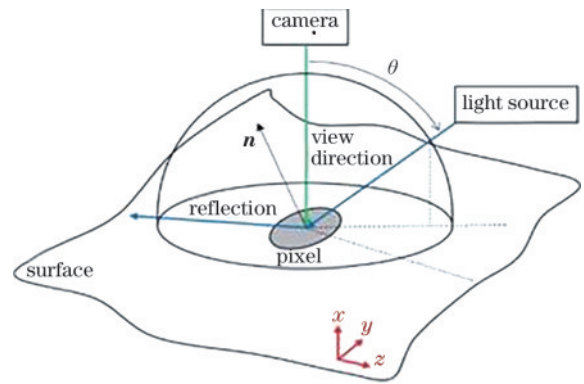


图1 RTI原理

Fig. 1 Principle of RTI

表面法线之间的关系建模为函数。典型的建模方式为

$$I(x, y, \theta) = \rho(x, y) \cdot L(x, y, \theta) \quad (1)$$

式中: $\rho(x, y)$ 为位置 $(x, y)$ 处的反射率,可根据观察到的像素强度值和已知的光照方向来估计; $L(x, y, \theta)$ 为光源在给定方向角 $\theta$ 下的光照强度。一种常见的估计方式是使用光学反射定律,根据入射光线和表面法线之间的夹角来计算反射率。假设光源是均匀的,则 $L(x, y, \theta)$ 可简化为与光照方向无关的常数。

同时Malzbender等也提出一个数学模型,用入射光照方向的函数来描述图像中每个像素的亮度信息。归一化光矢量投影到图像平面的 $x$ 坐标和 $y$ 坐标由光照方向 $(l_u, l_v)$ 给出,每个像素的亮度函数由 $l_u$ 和 $l_v$ 的二次多项式<sup>[37]</sup>近似表示:

$$L(u, v, l_u, l_v) = a_0(u, v)l_u^2 + a_1(u, v)l_u + a_2(u, v)l_u l_v + a_3(u, v)l_v + a_4(u, v)l_v + a_5(u, v) \quad (2)$$

式中: $u$ 和 $v$ 为归一化光矢量的二维方向参数; $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 、 $a_4$ 、 $a_5$ 均为常数。RTI技术是一种数字图像技术,它基于数字摄影和表面反射成像模型来记录和处理被摄物体的颜色信息和表面纹理信息,获得的影像比单张摄影图像含有更丰富的信息,适用于非透明、非金属、表面漫反射的物体<sup>[37]</sup>。RTI技术是一种合成影像的方法,它需要利用数十张同一对象的数字摄影照片。在拍摄这些照片时,相机和对象必须保持静止以确保能使用相同的光源从不同角度进行拍摄,在每个光源下生成一张照片。RTI技术允许用户以任意光照角度重新布光来观察图像,实验人员可通过相关软件实时改变入射光的角度,从而观察到多种光效,实验流程如图2所示。RTI文件可通过RTI Reviewer以两种模式进行观察:1)镜面反光增强模式,展示被摄物在不同入射角度的光源照射下的反射光形态;2)法线可视化模式,显示被摄物除去颜色信息的三维立体形态<sup>[20]</sup>。大量样本实验结果表明,在镜面反光增强模式和法线可视化模式下可更清楚地分辨出交叉笔画的先后顺序。

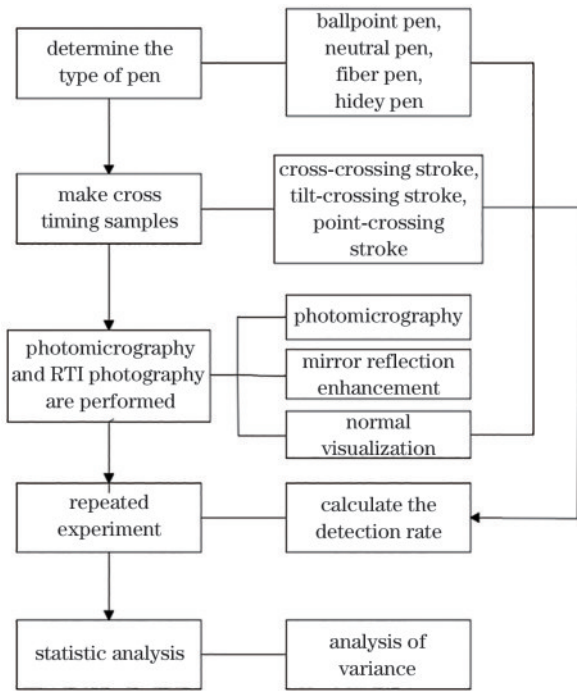


图 2 RTI 实验流程

Fig. 2 Flowchart of RTI experiment

### 3 实验设计

#### 3.1 实验样本制作

实验使用日常生活中常见的 4 种笔(表 1),其中黑色中性笔和蓝色圆珠笔的笔尖较坚硬,黑色秀丽笔和黑色纤维笔的笔尖较软。为讨论十字交叉笔画、倾斜交叉笔画、点位交叉笔画的时序特征,首先将 4 种笔在 A4 打印纸上按照“先横后竖”的顺序书写制作“十”字、“4”字、“7”字,然后按照“先竖后横”的顺序书写制作“十”字、“4”字、“7”字,总共得到 24 种书写字迹的交叉笔画样本。在每张 A4 纸上对每种书写字迹交叉笔画样本书写 50 个,共获得 1200 个检验样本。需要特别注意在每张 A4 纸上写上书写笔的种类和型号以便后续进行区分。

表 1 实验所用书写笔

Table 1 Writing pens used for experiments

Type	Brand	Model	Color	Ink type
Ballpoint pen	Chenguang	ABP88402	Blue	Oily
Neutral pen	Chenguang	AGPK3508	Black	Water-based
Fiber pen	Deli	ASP21801	Black	Water-based
Show pen	Deli	N0. 75516	Black	Oily

#### 3.2 实验仪器条件

硬件:超视觉成像仪(南京易纹兴智能科技有限公司);SuperRTI 010 成像系统;Canon EOS 5D Mark IV 相机、DT-cake-001 光源、穹顶照明灯及其电动升降支架、调焦支柱、底座、载物台、控制电路、控制程序、台式计算机和高清显示器、SIGMA 微距镜头(105 mm F2.8)、文件翻拍架、RTI 设备主机、遥控器、快门连接

线、压纸板、电动滑台、发光二极管(LED)灯珠。

软件: Adobe Photoshop 2023; RTI builder; RTI Viewer; Image Pro Plus; Origin; SPSS。

#### 3.3 实验方法

在相同模式下重复  $n$  次实验,运用 RTI 技术成功检验出笔画先后顺序的事件  $A$  出现  $m$  次,则称比值  $m/n$  为事件  $A$  发生的频率。随着  $n$  的增大,该频率围绕某一常数  $p$  上下波动,且波动的幅度逐渐减小直至趋于稳定,这个频率的稳定值即为该事件的检出率  $q$ ,记为

$$P(A) = \frac{m}{n} = q \quad (3)$$

检测效果的判定标准如下:  $q > 70\%$  表明检验效果非常好;  $30\% < q \leq 70\%$  表明检验效果较好;  $0 < q \leq 30\%$  表明检验效果一般;  $q = 0$  表明检验不出来。

本次实验的显微摄影样本图片采用未经合成的最原始的显微图片,RTI 摄影照片为样本在反射增强模式和法线可视化模式下的图片。超视觉成像仪相机采取的放大倍数为 3,光圈选为 F4,快门时间为  $1/60$  s,感光量为 800,图片存储格式为 jpg,穹顶光源采用 44 位。首先利用超视觉成像仪对 4 种类型的笔形成的 24 种交叉笔画时序样本进行成像检验,比较相同类型笔形成的样品的墨迹交叉区域图像的特征差异,从而判断笔画的先后顺序。然后分别对十字交叉笔画样本、倾斜交叉笔画样本、点位交叉笔画样本进行 50 次重复实验,通过比较样本在显微摄影、镜面反光增强模式、法线可视化模式下的检出率来反映交叉时序样本的检验效果。最后采用 SPSS 统计软件处理数据,在法线可视化模式下对不同种类样本的检出率进行方差单因素分析,显著性值  $P < 0.05$  表示样本种类差异具有统计学意义。

### 4 实验结果分析

#### 4.1 十字交叉笔画时序

十字交叉样本的笔画交叉范围较大,可形成完整的三维痕迹,检出率较高。用“+++”表示时序判断效果非常好( $q > 70\%$ ),“++”表示判断效果较好( $30\% < q \leq 70\%$ ),“+”表示判断效果一般( $0 < q \leq 30\%$ ),“X”表示无法判断( $q = 0$ ),不同方法对十字交叉样本的检测结果如表 2 所示。

中性笔和圆珠笔都属于硬笔,笔尖较硬,不同模式的检测效果不同:在显微摄影下,圆珠笔样本可判断出笔画先后顺序,但检验效果一般;RTI 摄影下,镜面反光增强模式会增强镜面反射效果,在“先横后竖”样本(图 3)中横画出现中断现象,竖画完整,检验效果优于显微摄影;法线可视化模式可消除墨迹对判断的影响,“先竖后横”样本(图 4)中横竖笔画出现明显的交叠现象,横画的三维特征完整,检验效果最好。中性笔的检验效果与圆珠笔一致,在十字交叉样本实验中检出率可达 95%。



表 2 十字交叉笔画样本检测结果

Table 2 Detection results of cross-crossing stroke samples

Type	First horizontal then vertical			First vertical then horizontal		
	Micrography	Mirror reflection enhancement	Normal visualization	Micrography	Mirror reflection enhancement	Normal visualization
Ballpoint pen	+	++	+++	+	++	+++
Neutral pen	+	++	+++	+	++	+++
Fiber pen	+	++	+++	+	++	+++
Show pen	+	+	++	+	++	++

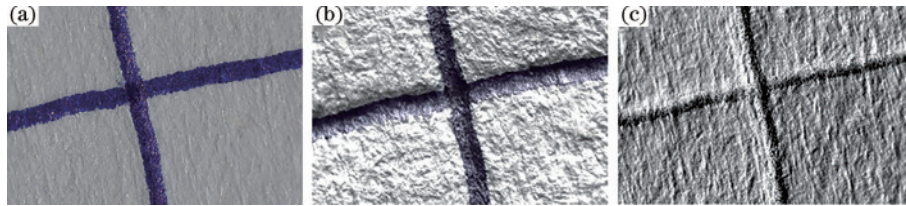


图 3 圆珠笔(先横后竖)笔画的检验效果。(a)显微摄影;(b)镜面反光增强;(c)法线可视化  
Fig. 3 Test effect of strokes by ballpoint pen (first horizontal then vertical). (a) Micrography; (b) mirror reflection enhancement; (c) normal visualization

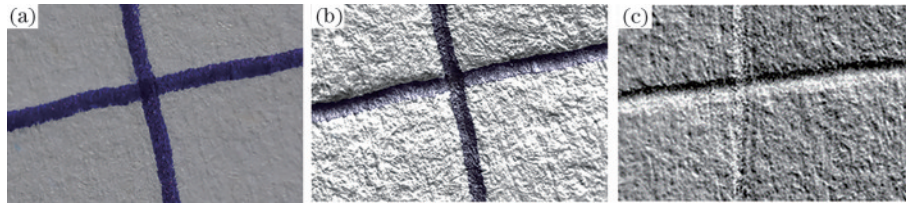


图 4 圆珠笔(先竖后横)笔画的检验效果。(a)显微摄影;(b)镜面反光增强;(c)法线可视化  
Fig. 4 Test effect of strokes by ballpoint pen (first vertical then horizontal). (a) Micrography; (b) mirror reflection enhancement; (c) normal visualization

纤维笔的笔尖较软,正常书写力度下形成的三维痕迹相对于使用硬笔书写时较浅。由图 5、6 可知:在显微摄影下,笔画交叉部分出现油墨洒散现象,判断笔画先后顺序的效果较差;镜面反光增强模式下,样本特

征与显微摄影特征相同,横画出现中断现象,竖画完整,检验效果一般;法线可视化模式下检验效果最好,横竖笔画出现交叠现象,但纤维笔的三维特征不如圆珠笔和中性笔明显。秀丽笔的检验效果与纤维笔一



图 5 纤维笔(先横后横)笔画的检验效果。(a)显微摄影;(b)镜面反光增强;(c)法线可视化  
Fig. 5 Test effect of strokes by fiber pen (first horizontal then vertical). (a) Micrography; (b) mirror reflection enhancement; (c) normal visualization

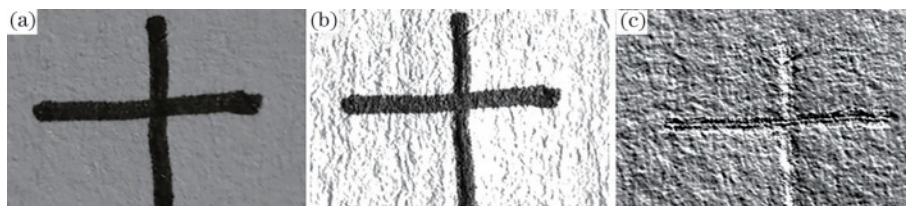


图 6 纤维笔(先竖后横)笔画的检验效果。(a)显微摄影;(b)镜面反光增强;(c)法线可视化  
Fig. 6 Test effect of strokes by fiber pen (first vertical then horizontal). (a) Micrography; (b) mirror reflection enhancement; (c) normal visualization

致,在十字交叉样本实验中检出率可达 85%。

#### 4.2 倾斜交叉笔画时序

倾斜交叉样本的交叉部分较多,形成的三维痕迹整齐光滑,检出率较高。不同方法对倾斜交叉样本的检测结果如表 3 所示。

由图 7、8 可知:在显微摄影下,可判断笔尖较坚硬的圆珠笔书写样本的笔画先后顺序,但检验效果一

般;镜面反光增强模式下效果较好,在“先横后竖”(图 7)中可观察到竖画完整圆润,在交叉处竖画将倾斜笔画一分为二,打断倾斜笔画的连贯性;法线可视化模式的图像中横竖笔画出现明显的交叠现象(图 8),最直观地反映出交叉笔画的三维特征,检验效果最好。中性笔的检验效果与圆珠笔一致,在倾斜交叉样本实验中检出率可达 95%。

表 3 倾斜交叉笔画样本检测结果  
Table 3 Detection results of tilt-crossing stroke samples

Type	First horizontal then vertical			First vertical then horizontal		
	Micrography	Mirror reflection enhancement	Normal visualization	Micrography	Mirror reflection enhancement	Normal visualization
Ballpoint pen	+	++	+++	++	++	+++
Neutral pen	+	++	+++	+	++	+++
Fiber pen	+	++	++	+	++	++
Show pen	+	+	++	+	+	++



图 7 中性笔(先横后竖)笔画的检验效果。(a)显微摄影;(b)镜面反光增强;(c)法线可视化  
Fig. 7 Test effect of strokes by neutral pen (first horizontal then vertical). (a) Microphotography; (b) mirror reflection enhancement; (c) normal visualization



图 8 中性笔(先竖后横)笔画的检验效果。(a)显微摄影;(b)镜面反光增强;(c)法线可视化  
Fig. 8 Test effect of strokes by neutral pen (first vertical then horizontal). (a) Microphotography; (b) mirror reflection enhancement; (c) normal visualization

由图 9、10 可知:在显微摄影下,笔尖较软的秀丽笔书写后油墨之间出现互溶现象,难以判断笔画先后顺序;“先竖后横”样本在镜面反光增强模式观察下,横画的完整性相较于普通模式更明显,检验

效果更好;在法线可视化模式下,秀丽笔形成的三维痕迹较浅,检验效果一般。纤维笔的检验效果与秀丽笔一致,在倾斜交叉样本实验中检出率可达 65%。



图 9 秀丽笔(先横后竖)笔画的检验效果。(a)显微摄影;(b)镜面反光增强;(c)法线可视化  
Fig. 9 Test effect of strokes by Show pen (first horizontal then vertical). (a) Microphotography; (b) mirror reflection enhancement; (c) normal visualization





图 10 秀丽笔(先竖后横)笔画的检验效果。(a)显微摄影;(b)镜面反光增强;(c)法线可视化

Fig. 10 Test effect of strokes by Show pen (first vertical then horizontal). (a) Microphotography; (b) mirror reflection enhancement; (c) normal visualization

4.3 点位交叉笔画时序

点位交叉样本形成的痕迹范围较小且容易发生重

叠,4种笔的检出率普遍较低。不同方法对点位交叉样本的检测结果如表4所示。

表4 点位交叉笔画样本检测结果

Table 4 Detection results of point-crossing stroke samples

Type	First horizontal then vertical			First vertical then horizontal		
	Micrography	Mirror reflection enhancement	Normal visualization	Micrography	Mirror reflection enhancement	Normal visualization
Ballpoint pen	X	+	++	X	+	++
Neutral pen	X	+	++	X	+	++
Fiber pen	X	+	+	X	+	+
Show pen	X	X	+	X	X	+

由图11、12可知:显微摄影下,笔尖较坚硬的中性笔书写的点位交叉特征不明显,检验人员不能直接判断笔画的先后顺序;反光增强模式下,“先竖后横”样本的竖画完整,容易超过横画产生多余部分痕迹;在法线可视化模式下可观察到三维特征,中性笔“先横

后竖”样本中的点位交叉部分竖画完整,竖画起笔部分压住横笔部分,同样在“先竖后横”样本中横画终止部分覆盖竖画起笔部分,检验效果一般。圆珠笔的检验效果与中性笔一致,在点位交叉样本实验中检出率可达70%。



图 11 中性笔(先横后竖)笔画的检验效果。(a)显微摄影;(b)镜面反光增强;(c)法线可视化

Fig. 11 Test effect of strokes by neutral pen (first horizontal then vertical). (a) Microphotography; (b) mirror reflection enhancement; (c) normal visualization

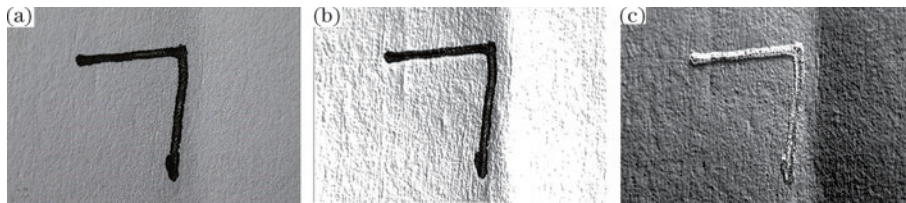


图 12 中性笔(先竖后横)笔画的检验效果。(a)显微摄影;(b)镜面反光增强;(c)法线可视化

Fig. 12 Test effect of strokes by neutral pen (first vertical then horizontal). (a) Microphotography; (b) mirror reflection enhancement; (c) normal visualization

由图13、14可知:对于笔尖较软的纤维笔,显微摄影难以判断笔画的交叉时序;反光增强模式依旧难以判断笔画的交叉时序;在法线可视化条件下,纤维笔形成的三维特征不明显,较难区分笔画顺序。秀丽笔的检验效果与纤维笔一致,在点位交叉样本实验中检出

率仅为25%。

4.4 单因素方差分析

基于上述实验,在法线可视化模式下样本的检出率最高,检验效果最好,其中中性笔与圆珠笔在该模式下的平均检出率高达90%。在法线可视化模式下使



图 13 纤维笔(先横后竖)笔画的检验效果。(a)显微摄影;(b)镜面反光增强;(c)法线可视化

Fig. 13 Test effect of strokes by fiber pen (first horizontal then vertical). (a) Micrography; (b) mirror reflection enhancement; (c) normal visualization

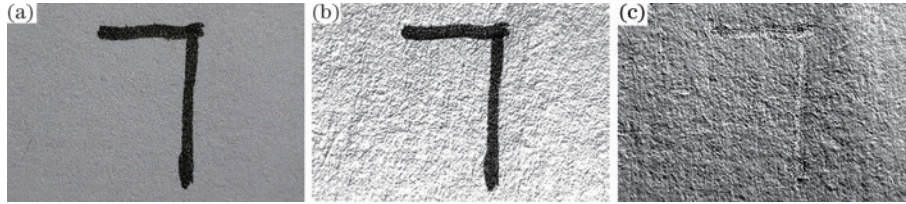


图 14 纤维笔(先竖后横)笔画的检验效果。(a)显微摄影;(b)镜面反光增强;(c)法线可视化

Fig. 14 Test effect of strokes by fiber pen (first vertical then horizontal). (a) Micrography; (b) mirror reflection enhancement; (c) normal visualization

用单因素方差分析不同样本类型的检出率是否存在差异。结果显示,样本类型之间的检出率差异具有统计学意义,组间方差与组内方差的比值( $F$ )为 5.70,  $P=0.025<0.05$ 。最小显著性差异(LSD)事后检验结果显示(表 5):十字交叉样本组与点位交叉样本组( $P=0.012<0.05$ )之间具有显著差异;倾斜交叉样本组与

点位交叉样本组( $P=0.025<0.05$ )之间具有显著差异;十字交叉样本组与倾斜交叉样本组( $P=0.668>0.05$ )之间没有显著差异。结果证明,样本的种类对样本检出率具有显著影响,十字交叉样本和倾斜交叉样本均与点位交叉样本具有显著性差异,而十字交叉样本和倾斜交叉样本之间没有显著性差异。

表 5 样本种类方差结果

Table 5 Results of variance for sample types

Sample type 1	Sample type 2	Average mean difference / %	Standard error / %	$P$	Upper limit of confidence interval / %	Lower limit of confidence interval / %
Cross-crossing	Tilt-crossing	6.00	13.54	0.668	-24.62	36.62
	Point-crossing	42.25	13.54	0.012	11.63	72.87
Tilt-crossing	Cross-crossing	-6.00	13.54	0.668	-36.62	24.62
	Point-crossing	36.25	13.54	0.025	5.626	66.87
Point-crossing	Cross-crossing	-42.25	13.54	0.012	-72.87	-11.63
	Tilt-crossing	-36.25	13.54	0.025	-66.874	-5.63

## 5 结 论

利用 RTI 技术对 4 种笔形成的交叉笔画时序样品(十字交叉样本、倾斜交叉样本和点位交叉样本)在显微摄影、镜面反光增强模式、法线可视化模式进行成像检验,得到 24 组不同笔画交叉时序样品的三维图像,并分析不同模式进行笔顺先后顺序的判断效果。实验结果表明,3 种模式检验同种笔添改笔画时,法线可视化模式的检验效果最好。中性笔与圆珠笔在法线可视化模式下得到的三维图像效果最好,能准确地辨别区域的特征,平均检出率高达 90%,检验效果最好。纤维笔与秀丽笔在法线可视化下形成的三维痕迹不明显,点位交叉样本的检出率不超过 30%,检验效果最差。在法线可视化模式下对样本种类的检出率进行单

因素方差分析,结果显示,样本类型之间的检出率差异具有统计学意义,  $F=5.70$ ,  $P=0.025<0.05$ , 样本种类对检出率有显著性影响。总而言之,RTI 技术具有原位、无损、快速、直观和高分辨成像的优势,可为文件检验提供一种前景广阔的鉴定技术。在实际的检验鉴定中,可将 RTI 技术与传统检验方法结合,不断提高检验添改笔画的准确度。

## 参 考 文 献

- [1] 暴仁. 污损文件检验[M]. 北京: 群众出版社, 2014: 174-175.  
Bao R. Inspection of defiled documents[M]. Beijing: Mass Publishing House, 2014: 174-175.
- [2] 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(2): 27-31.



- Cao Y P, Wang Z, Han R F. On the identification of black ink types by the Fourier transform infrared spectroscopy[J]. Journal of Yulin University, 2013, 23(2): 27-31.
- [3] 雷霏, 王雅晨, 孙其然, 等. 表面增强拉曼光谱对黑色圆珠笔快速鉴别的检测研究[J]. 中国司法鉴定, 2023(6): 62-68.
- Lei F, Wang Y C, Sun Q R, et al. Rapid identification of black ballpoint pen by surface-enhanced Raman spectroscopy[J]. Chinese Journal of Forensic Science, 2023(6): 62-68.
- [4] 徐彻, 汤纯, 杨延勇, 等. 显微激光拉曼光谱法鉴别黑色圆珠笔油墨的初步研究[J]. 法医学杂志, 2000, 16(4): 244-245.
- Xu C, Tang C, Yang Y Y, et al. Preliminary study on identification of black ballpoint pen ink by microscopic laser Raman spectrometry[J]. Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2000, 16(4): 244-245.
- [5] 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(1): 14-15, 18.
- Wang Z Y, Wang B J, Zou H. Identification of category of blank gel pen ink by TLC[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part B: Chemical Analysis), 2009, 45(1): 14-15, 18.
- [6] 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(9): 781-787.
- Wang S C, Cui L, Song H, et al. Analysis of volatile solvent components in ink blot samples prepared by 84 inks from 3 common brands of ink-jet printers by GC-MS[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part B: Chemical Analysis), 2021, 57(9): 781-787.
- [7] 沈畅, 邹积鑫, 廉哲, 等. 超高效液相色谱法区分四色喷墨打印墨迹[J]. 刑事技术, 2019, 44(3): 238-241.
- Shen C, Zou J X, Lian Z, et al. Discrimination of four-color dye-based inkjet marks by UPLC[J]. Forensic Science and Technology, 2019, 44(3): 238-241.
- [8] 赵鹏程, 王彦吉, 赵彦军, 等. 裂解气相色谱法分析蓝色中性笔字迹的书写墨水种类及墨迹随书写时间的变化规律[J]. 色谱, 2007, 25(5): 762-765.
- Zhao P C, Wang Y J, Zhao Y J, et al. Classification of blue gel inks and investigation of change rule of the ink with writing age using pyrolysis gas chromatography[J]. Chinese Journal of Chromatography, 2007, 25(5): 762-765.
- [9] 黄晓晶, 黎路, 李鹏, 等. 加压毛细管电色谱法在鉴别圆珠笔油墨中的应用[J]. 色谱, 2007, 25(3): 437-438.
- Huang X J, Li L, Li P, et al. Application of pressurized capillary electrochromatography in identification of ball pen ink[J]. Chinese Journal of Chromatography, 2007, 25(3): 437-438.
- [10] 白国华, 鲁逸林, 连园园. 拉曼光谱 3D 成像技术确定黑色交叉笔画顺序的研究[J]. 光散射学报, 2020, 32(1): 63-71.
- Bai G H, Lu Y L, Lian Y Y. Study of Raman spectroscopy 3D profilometry to determine the sequence of black pen ink crossings[J]. The Journal of Light Scattering, 2020, 32(1): 63-71.
- [11] 罗意. DESI-MSI 技术检验交叉笔画书写时序的实验研究[D]. 上海: 华东政法大学, 2023.
- Luo Y. Experimental research of DESI-MSI sequencing of handwriting lines[D]. Shanghai: East China University of Political Science and Law, 2023.
- [12] 雷曜鸣, 李彪. 判定笔画交叉顺序方法述评[J]. 铁道警察学院学报, 2020, 30(1): 56-63.
- Lei Y M, Li B. Review of methods for judging stroke crossing order[J]. Journal of Railway Police College, 2020, 30(1): 56-63.
- [13] 崔宗兰. 超景深显微镜判定非连笔交叉笔画先后顺序初探[J]. 中国刑警学院学报, 2017(2): 89-91.
- Cui Z L. Primary investigation on estimating the sequence of disconnected strokes with super depth of field microscope[J]. Journal of Criminal Investigation Police University of China, 2017(2): 89-91.
- [14] 王少仿. 无交叉笔画状态下激光打印文字与圆珠笔书写文字的时序判断[J]. 警察技术, 2012(3): 37-39.
- Wang S F. Timing judgment of laser printed text and ballpoint pen written text without cross stroke[J]. Police Technology, 2012(3): 37-39.
- [15] 孔兆琪. 基于三维特征检验激光打印字迹与书写字迹笔画交叉顺序的探究[D]. 上海: 华东政法大学, 2022.
- Kong Z Q. A study to determine the sequence of intersecting laser printed and pen strokes based on 3D features[D]. Shanghai: East China University of Political Science and Law, 2022.
- [16] 雷曜鸣, 李彪, 王长亮. 基于文件三维扫描建模的书写笔画交叉时序研究[J]. 河北公安警察职业学院学报, 2020, 20(3): 20-23, 32.
- Lei Y M, Li B, Wang C L. A study on the crossing time sequence of writing strokes based on 3D scanning modeling of documents[J]. Journal of Hebei Vocational College of Public Security Police, 2020, 20(3): 20-23, 32.
- [17] 宋朝阳, 白晓峰. 利用三维立体显微镜判断笔画交叉时序探究[J]. 中国司法鉴定, 2018(3): 56-60.
- Song Z Y, Bai X F. Sequencing of cross strokes by three-dimensional stereomicroscope[J]. Chinese Journal of Forensic Sciences, 2018(3): 56-60.
- [18] 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 S. The application of RTI in handwriting 3D character[D]. Shanghai: East China University of Political Science and Law, 2018.
- [19] Wei W, Huang L H, Zhu X R, et al. Application of reflectance transformation imaging for the display of handwriting traces[J]. Chinese Optics Letters, 2019, 17(11): 111101.
- [20] 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, 2022.
- Xu S L. Study on linear trace examination based on reflectance transformation imaging[D]. Beijing: Chinese People's Public Security University, 2022.
- [21] 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(2): 88-90.
- Wu X. Research on inspection technology of steel seal



- based on RTI technology[J]. *Legality Vision*, 2022(2): 88-90.
- [22] 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(2): 79-82.  
Lin H, Pei L, Liu N, et al. An experimental study on revealing the indentation of the star wheels of inkjet printers with reflectance transformation imaging[J]. *Journal of Criminal Investigation Police University of China*, 2018(2): 79-82.
- [23] 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(2): 167-169.  
Zhu M X, Li Y, Zhang L. Application of reflectance transformation imaging (RTI) in test of steel seal prints[J]. *Forensic Science and Technology*, 2016, 41(2): 167-169.
- [24] Lemesle J, Robache F, Le Goic G, et al. *Surface reflectance: an optical method for multiscale curvature characterization of wear on ceramic-metal composites*[J]. *Materials*, 2020, 13(5): 1024.
- [25] Florindi S, Revedin A, Aranguren B, et al. *Application of reflectance transformation imaging to experimental archaeology studies*[J]. *Heritage*, 2020, 3(4): 1279-1286.
- [26] Mytum H, Peterson J R. *The application of reflectance transformation imaging (RTI) in historical archaeology*[J]. *Historical Archaeology*, 2018, 52(2): 489-503.
- [27] Newman S E. *Applications of reflectance transformation imaging (RTI) to the study of bone surface modifications*[J]. *Journal of Archaeological Science*, 2015, 53: 536-549.
- [28] Morrone A, Pagi H, Torv M, et al. *Application of reflectance transformation imaging (RTI) to surface bone changes in paleopathology*[J]. *Anthropologischer Anzeiger*, 2020, 78(4): 295-315.
- [29] DiBiasie Sammons J F. *Application of reflectance transformation imaging (RTI) to the study of ancient graffiti from Herculaneum, Italy*[J]. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 2018, 17: 184-194.
- [30] Min J, Yoo E, Choi H, et al. *Interpretation through digital imaging: reflectance transformation imaging (RTI) as a tool for understanding paintings*[J]. *International Journal of Contents*, 2020, 16(2): 41-50.
- [31] Gargano M, Longoni M, Pesce V, et al. *From materials to technique: a complete non-invasive investigation of a group of six ukiyo-E Japanese woodblock prints of the oriental art museum E. chiossone (Genoa, Italy)* [J]. *Sensors*, 2022, 22(22): 8772.
- [32] 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(5): 32-34.  
Liu N. Using reflection transformation imaging technology to show the writing pressure of black signature handwriting[J]. *Police Technology*, 2015(5): 32-34.
- [33] 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*, 2018(8): 53-54, 123.  
Wu X, Lin H. Application of reflection transform imaging technology in printing and changing files[J]. *The Guide of Science & Education*, 2018(8): 53-54, 123.
- [34] Min J, Ahn J, Ahn S, et al. *Digital imaging methods for painting analysis: the application of RTI and 3D scanning to the study of brushstrokes and paintings*[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2020, 79(35): 25427-25439.
- [35] 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(8): 0800003.  
Xu S L, Guo W, Han Y T, et al. Application progress of reflectance transformation imaging[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(8): 0800003.
- [36] Dai J, Huang L H, Guo K, et al. *Reflectance transformation imaging of 3D detection for subtle traces* [J]. *Chinese Optics Letters*, 2021, 19(3): 031101.
- [37] Małgorzata G, Tomasz Ł. *Applications of reflectance transformation imaging (RTI) for books and objects on paper*[J]. *Journal of Paper Conservation*, 2023, 24(1): 16-30.