

反射变换成像技术应用进展

徐少良, 郭威*, 韩雨彤, 国中正

中国人民公安大学侦查学院, 北京 100038

摘要 反射变换成像技术是一种数字图像采集技术, 具有交互式重新任意布光, 多种模式影像重建, 细微三维特征显示的特点。主要介绍了反射变换成像技术的基本原理、发展历程, 分析了其在文化遗产和法庭科学领域的应用情况, 并对反射变换成像技术在法庭科学领域的应用进行了展望。

关键词 反射变换成像; 法庭科学; 检验鉴定; 三维特征

中图分类号 D918.9 文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0800003

Application Progress of Reflectance Transformation Imaging

Xu Shaoliang, Guo Wei*, Han Yutong, Guo Zhongzheng

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

Abstract Reflectance transformation imaging is a type of digital image acquisition technology, which has the characteristics of interactive arbitrary light distribution, multimode image reconstruction, and subtle three-dimensional feature presentation. This study mainly introduces the basic principle and development of the reflectance transformation imaging technology, analyzes its application in the cultural heritage and forensic science field, and presents the potential application of this technology in the forensic science field.

Key words reflectance transformation imaging; forensic science; inspection and appraisal; three-dimensional feature

1 引言

反射变换成像(RTI)技术是一种数字图像采集技术, 可以从采集到的二维图像中获得被摄物体表面三维形态信息。在不同的光源方向条件下用固定相机拍摄静止对象的一系列图像, 并将多张不同光位下的照片合成为一个 RTI 文件, 能够捕捉物体表面法向量信息和颜色, 从而获取物体表面三维信息并将其可视化, 而且可以从任何方向对对象进行虚拟的交互式重新照明, 实现多种影像重现。

2001年, 惠普实验室的研究人员 Malzbend 等^[1]提出 RTI 技术的前身多项式纹理映射(PTM)技术。之后, 美国文化遗产成像组织(CHI)对 RTI 技术进

行了持续的研究与开发^[2]。RTI 技术最初应用于文化遗产领域, 为考古和文物保护方面研究提供了新的方法。随着计算机技术和数字图像技术的迅猛发展, RTI 技术的应用由文化遗产研究领域逐渐扩展至法庭科学领域。

2 反射变换成像技术基本原理

RTI 技术的拍摄方法并不复杂。固定相机和被摄物体, 在暗室条件下从不同的方向照射被摄物体, 拍摄物体在每一个光照方向下的影像, 通过 RTI 合成软件把这些张影像合成为一个 RTI 文件, 运用 RTI 查看软件即可对合成的 RTI 图像进行查看, 如图 1 所示。

收稿日期: 2021-03-09; 修回日期: 2021-04-26; 录用日期: 2021-05-12

基金项目: 公安部技术研究计划项目(2020JSYJC21)、中央高校基本科研业务费项目(2021JKF203)

通信作者: *gd928@sina.com

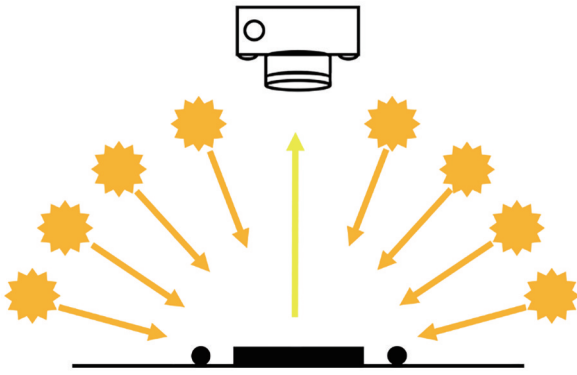


图 1 RTI 拍摄方法示意

Fig. 1 Schematic diagram of RTI shooting method

运用 RTI 技术拍摄物体时,一般在拍摄画面范围内放置一至两个反光球来标定光源的方向,如图 2 所示。根据反光球的位置及反光球上高光点的位置即可求出光源方向向量 L ,具体步骤如下:将高光点与相机镜头相连即可得到观察方向向量 V ,将高光点与反光球球心相连可得到高光点处表面法向量 N , L 与 V 关于 N 对称,如图 3 所示。将若干张影像合成为一个 RTI 文件时,已知若干张图像中同

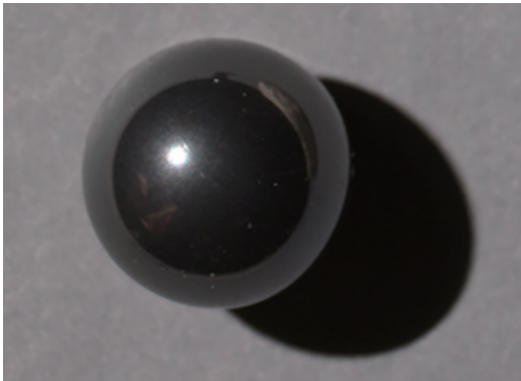


图 2 反光球

Fig. 2 Reflective ball

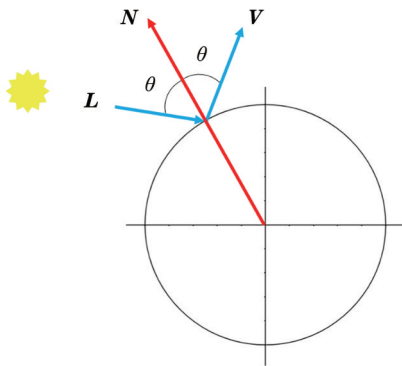


图 3 光源方向求解示意图

Fig. 3 Schematic diagram of light source direction solution

一个像素点在不同光照方向下的不同灰度值等数据,可以建立相关模型将光源方向与每个像素点的灰度值建立联系,实现虚拟的交互式重新布光。

在 RTI 图像中,每个像素不仅储存有 RGB 数据,还有法向量数据。RTI 技术可以计算出被摄物体表面法向量,将法向量方向信息储存下来并将法向量可视化。RTI 计算物体表面法向量的基本原理为光度立体技术。光度立体技术最早由 Woodham^[3-4] 提出,即根据物体在同一位置下不同光照方向的若干张图像,依据图像的亮度来计算物体表面法向量,进而由物体表面法向量重建物体表面形状。摄影图像是现实三维世界的反映,包含着大量的三维信息。一幅二维图像中每一个像素的亮度都受到物体位置、拍摄位置、光照分布、物体材料表面反射性质、光源性质等多方面影响。图像上像素点亮度^[5]的一般模型为

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

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 表示光照方程,与物体表面法向量 N 、光照方向 L 、拍摄方向 V 有关。因为实际物体大多是由多种材料混合的,所以亮度 I 为各种材料 ρ 下的亮度集合。故根据不同的光照条件和物体表面材质建立一个符合实际情况的光照模型,就能计算出物体表面的法向量。

RTI 合成软件计算出每个像素点的法向量后,将法向量信息连同 RGB 颜色一起储存下来,如图 4 和图 5 所示。在查看时,RTI 可以根据每个像素点法向量的不同方向,赋予每个像素点不同的颜色,即将每个像素点的法向量的 x 、 y 、 z 坐标值分别对应 R、G、B 通道灰度值,形成伪彩色图像(法线图),将

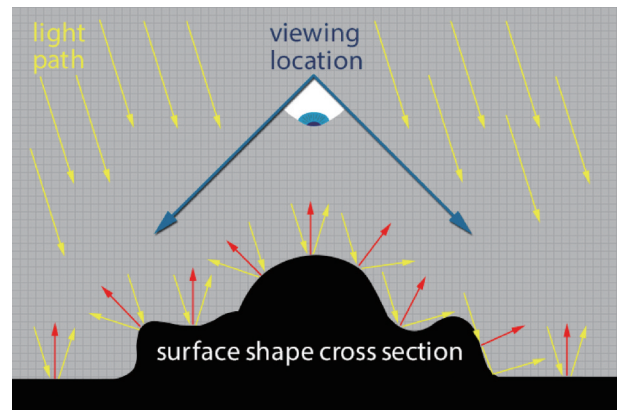


图 4 物体表面法向量^[6]

Fig. 4 Normal vector of object surface^[6]

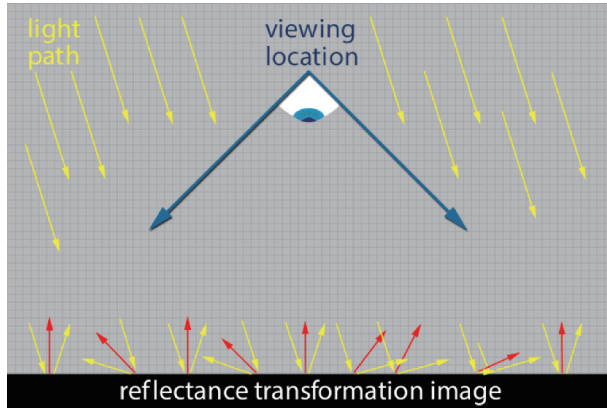


图 5 RTI图像中储存的法向量信息^[6]

Fig. 5 Normal vector information stored in the RTI image^[6]

法向量可视化,其中 x 、 y 的取值范围为 $[-1, 1]$,对应R、G通道灰度值范围为 $[0, 255]$, z 的取值范围为 $[0, 1]$,对应B通道灰度值范围为 $[128, 255]$ 。图6为笔迹普通摄影,图7为笔迹RTI法线图。从图中可以看出,笔迹RTI法线图可以消除其原有黑色墨迹的干扰,清晰地呈现了笔迹压痕,为文件检验人员检验其是否为模仿笔迹提供参考。原因在于法

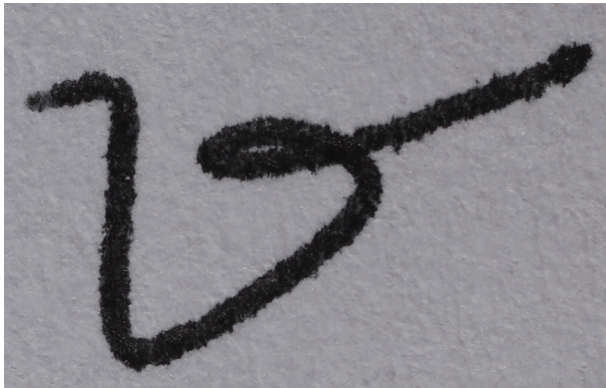


图 6 笔迹普通摄影

Fig. 6 Ordinary photographic image of handwriting

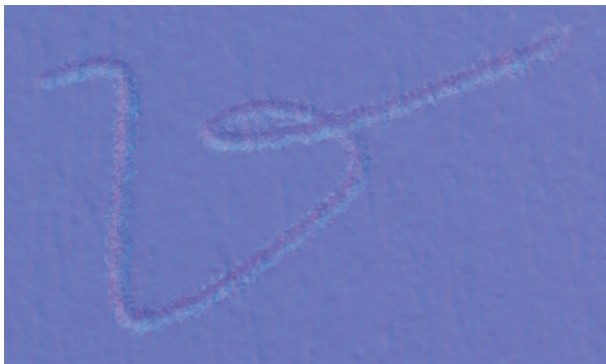


图 7 笔迹RTI法线图

Fig. 7 RTI normal image of handwriting

线图的颜色只与物体表面的三维形态有关,所以法线图可以消除物体本身颜色的干扰,清晰展现物体表面立体信息。

3 反射变换成像技术的应用

3.1 反射变换成像技术在文化遗产领域的应用

RTI技术被提出后,在文化遗产领域^[7]得到了广泛的应用。2010年,英国艺术和人文研究理事通过 Digital Equipment and Database Enhancement for Impact 计划的资助进行了名为“古代文献文物的反射变换成像系统”的研究项目,该项目旨在广泛了解RTI的最新技术和未来在更广泛领域的应用潜力及它在古代文献和其他考古数据的应用。研究人员基于RTI技术开发了许多穹顶捕获系统,捕获了广泛的具有代表性的古代文献和考古文物样本,促进了文化遗产领域RTI数据库的分类和管理,为长期数据采集和发展制定了可持续的计划^[8]。

随后,关于RTI技术在文化遗产领域的应用研究出现大幅增长,许多文化遗产研究人员利用RTI技术来观察文物表面的细节纹理,并获得了良好的效果。对于以纸张为载体的文物,Tamayo等^[9]认为RTI在绘画和纸质物品的详细记录方面是非常有效的,有助于观察由于保存不当导致的图片层和纸张支撑物上的许多细微变化,可以用作文化遗产的数字化保存方式,如图8所示。对于骨骼、岩石等较为坚硬质地的文物,Newman^[10]研究了RTI技术在考古骨骼标本研究中的应用,并指出RTI技术突出了细微的骨骼表面细节,包括切割痕迹、条纹、蚀刻和抛光,并且使用便利。Sammons^[11]讨论了RTI技术在意大利赫库兰尼姆古代涂鸦中的应用后,指出RTI增强了涂鸦墙面的表面形态和颜色,并且可供研究人员对文化遗产进行远程分析。Kotoula等^[12]运用RTI对美国加利福尼亚州主普雷托洞穴的壁画进行了研究,认为RTI提供了纹理和三维感知的增强可视化,能够对象形图进行虚拟视觉评估,并且强调RTI数据采集是一种非接触式方法,符合保护要求,生成的交互式文件增强了常见风化模式的可视化,并支持协作分析。Bennison-Chapman等^[13]运用RTI技术对西亚 Boncuklu Höyük 地区的黏土文物上遗留手印进行了大量研究,RTI使研究人员更加方便地查看黏土文物上的手印,成像效果清晰,细节突出,研究结果为探索新石器时代社区内劳动分布和分工的细节提供了参考。Mytum等^[14]

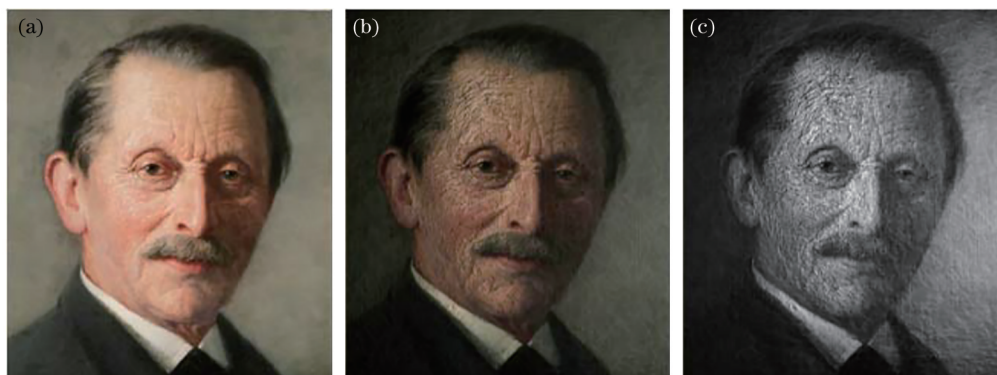


图8 RTI中可视化的画布上的油画纹理。(a)平面光;(b)漫反射增益;(c)镜面反光增强^[9]

Fig. 8 Oil on canvas texture visualized in RTI. (a) Plane light; (b) diffuse reflection gain; (c) specular reflection enhancement^[9]

运用RTI研究了大量文物,包括陶管、模制玻璃、墓碑及骨骼、铜合金文物,指出RTI在大部分材料上都是有效的,在考古领域具有较大的运用空间。

对于RTI的特点和优势,有研究人员将RTI与其他成像技术结合起来使用并进行比较。2016年,Porter等^[15]运用RTI和近景摄影测量的三维建模方法对索卢特雷(法国勃艮第)旧石器时代遗址上的一件雕刻进行了研究,指出RTI技术成本低廉,有助于文化遗产的数字化传播。Caine等^[16]于2019年采用了一种混合的方法将传统的考古研究与structure from motion(SFM)和RTI相结合发现,RTI能够显示出石头上褪色的字母,甚至恢复丢失已久的名字,并且镜面反射增强效果显著,但同时指出RTI也有局限性。由于RTI主要在二维表面上工作,对于沿着圆柱面延伸的文本不能全部捕获,而近距离SFM让研究人员可以在任何角度、变焦水平和光线方向上获取信息,RTI和SFM这两个工具都有各自的优势,根据任务要求协调、组合这些不同成像方法方能收获良好效果。2020年,Solem等^[17]以涂鸦等微型切口为研究对象,提出了基于图像的建模(IBM)和RTI结合的两种新方法(组合1:运用RTI技术获取图像,然后使用IBM软件进行处理;组合2:获取RTI图像后,先使用RTI软件分别处理每个拍摄位置的图像,然后再使用IBM软件进行后处理),并评估了这些方法的可用性、时效性、成本效益和准确性。Solem等发现通过RTI穹顶获取RTI图像,结合RTI软件和IBM软件进行后处理,可以在时间、成本和精度上做到较好兼顾。

3.2 反射变换成像技术在法庭科学领域的应用

近几年,RTI技术在法庭科学领域也得到了发展。捕捉细微颜色和表面变化细节的能力使RTI

在检查表面变化(如骨头上的工具印痕)方面具有较大潜力。2016年,Clarke^[18]通过RTI照片与传统摄影照片的比较,研究了RTI是否可用于保存和分析骨骼上的锯痕,发现RTI在可视化骨骼上的工具痕迹方面的表现非常优秀。2020年,Martlin等^[19]研究了RTI在记录和呈现骨骼切面特征方面的应用,认为RTI是一种廉价、易于获取和易于使用的技术。RTI准确地记录了骨骼切割表面的三维特征,并允许进行类似于传统显微镜分析的虚拟检查,如图9所示,圆圈里骨骼断面的锯齿状痕迹在RTI图像[图9(b)]中更为明显。在刑事侦查活动中,RTI允许与其他专家共享准确、互动的数字记录,以供远程分析或保留证据,以供将来在法庭上提交和审查。在美国,联邦调查局已经使用RTI技术来检查模糊的凹痕笔迹,加利福尼亚州司法部用它来研究软基底上的脚印,圣马特奥警察局也用它来观察模糊的指纹^[20]。

国内对RTI技术在法庭科学领域的应用研究大多集中在文件检验领域。2015年,江苏警官学院刘宁^[21]发布了RTI技术在法庭科学领域的研究成果。刘宁通过实验研究了RTI技术在提取签名笔压特征方面的效用,发现RTI技术不仅能够呈现签名书写压痕及其节奏的细致三维形态和表面质地,而且能够完全排除黑色墨迹的干扰,可以获得文件检验领域其他现有方法无法获得的效果,为签名笔迹检验提供了一个有力工具。之后,RTI技术在文件检验领域的应用研究逐渐增多。常州市公安局朱明新等^[22]通过RTI技术有效提高了钢印印文图像的清晰度。RTI技术除了传统的图像数据采集以外,还可以通过数字方法增强物体表面的形状与颜色属性。RTI技术处理后的钢印印文更有利于直观比对检验和重合比对检验,为钢印印文检验提供了

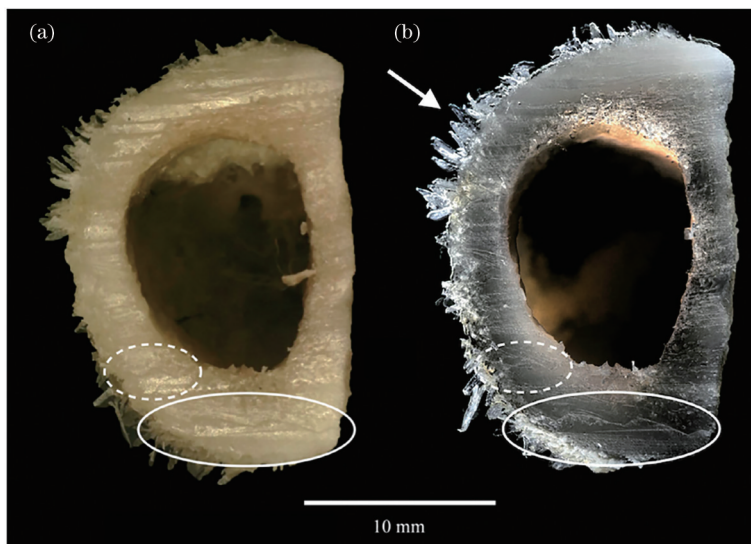


图 9 数字显微照片和漫反射增益渲染的 RTI 图像对比。(a) 数字显微照片; (b) 漫反射增益渲染的 RTI 图像^[19]

Fig. 9 Comparison of digital micrograph and RTI image rendered with diffuse gain. (a) Digital micrograph; (b) RTI image rendered with diffuse gain^[19]

有力解决手段。中国刑警学院林红等^[23]运用 RTI 技术呈现了照片纸上的喷墨打印机星形轮齿尖及其对应齿孔痕迹的细微形态,如图 10 所示,其中

RTI 法线图进行了灰度化处理。实验结果表明,照片纸上的微小星形轮齿痕能够反映其造痕主体金属齿的独特形态,为打印机的个体识别提供可靠的

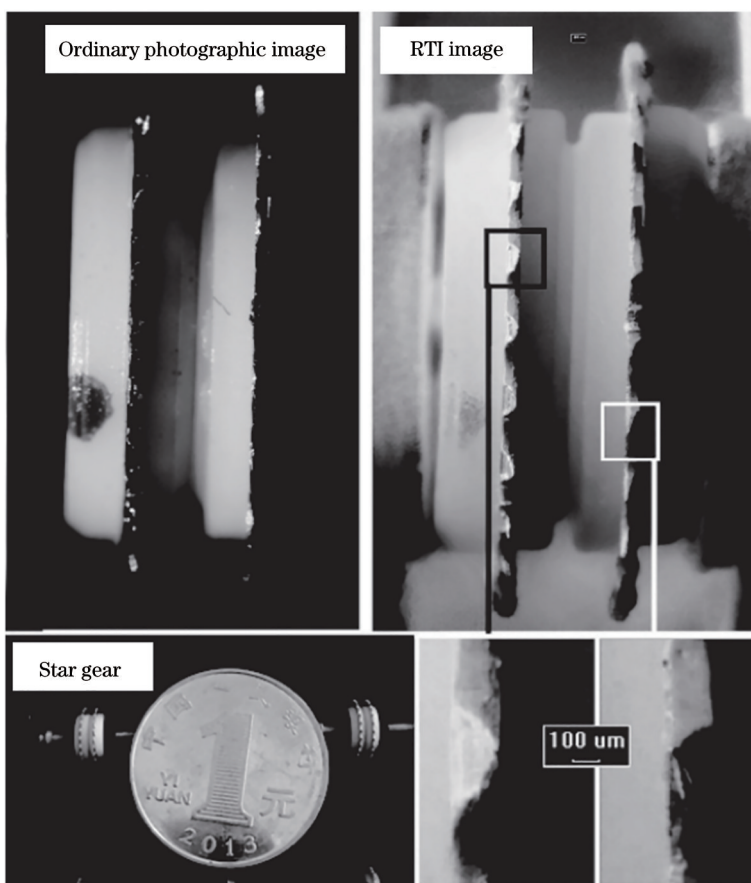


图 10 一对星形轮的普通摄影图像与 RTI 法线图^[23]

Fig. 10 Ordinary photographic image and RTI normal image of a pair of star gears^[23]

依据,具有一定的司法实践应用价值。吴晓等^[24]利用 RTI 技术来显现笔迹压痕与打印文字交错部位的细节特征,发现 RTI 可有效提高成像清晰度,能够将特征的三位形态清晰显现。华东政法大学梁适^[2]运用 RTI 技术对笔迹三维特征进行研究,发现 RTI 在笔迹检验中能得到较好的运用,如根据笔迹三维特征判断笔种类型、笔顺特征检验打印文件中的签名时序等。将 RTI 运用到笔迹鉴定领域拓宽了笔迹检验的渠道,也为笔迹鉴定意见的准确性提供了多一重的保障。

在传统的痕迹检验领域,RTI 作为一门新兴技术,逐渐受到学者和刑事技术人员的关注。广东警官学院梁锦成等^[25]通过实验研究了 RTI 技术在显现一系列痕迹特征上的效果,发现 RTI 技术在某些金属痕迹上,不仅可以把物体的三维效果反映出来,而且可以排除一些视觉干扰,可以获得传统技术层面上无法获得的效果。江苏警官学院蒋俊平等^[26]利用 RTI 技术对枪弹痕迹、钳剪痕迹等进行了采集实验,发现 RTI 技术能够去除金属反光和杂色对痕迹特征的影响,细致表现痕迹物证的表面纹理结构,有利于痕迹特征的发现和利用。苏州市公安局吴江分局沈页等^[27]使用激光扫描共聚焦显微镜和 RTI 技术对枪弹痕迹进行成像记录,实验结果表明,激光扫描共聚焦显微镜适用于显现细小痕迹,图像分辨率高但是视场小,无法表现处于反光和阴影的痕迹部位,RTI 技术能够去除反光和杂色的干扰获得痕迹特征的三维形态,且视场大。

RTI 技术是量化痕迹特征的有效工具。刘宁等^[28]对签名样本的笔压特征进行了实验,提取了法线图上的法线数据,实验结果表明,从法线图获取的三维数据与激光共聚焦显微镜形成的三维数据基本一致。北京大学倪想^[29]通过对照实验考查了 RTI 技术在量化签名笔迹笔压痕迹特征方面的作用,同时选定合适数学模型分析笔压痕迹的变化情况,认为可以利用 RTI 技术对笔迹笔压痕迹进行量化,从而为笔压特征的同一认定提供了一种新思路。

4 结论与展望

随着科学技术的迅猛发展,物证检验鉴定的技术方法不断革新。DNA 技术、化学仪器分析技术、电子物证等技术的崛起,使得这些新兴证据在侦破案件中的作用越来越大。而传统的痕迹类证据检

验鉴定^[30]部分仍处于经验性、定性化阶段,易受检验人员主观因素影响。物证的检验鉴定走向自动化、标准化是大趋势,对于一些痕迹类物证的检验,缺乏科学、客观的标准使其陷入尴尬的境地。传统痕迹证据作为案件现场最常见的物证,蕴含大量反映案件情况的信息,需要有力的技术支持才能使其发挥最大的价值。

RTI 作为一门新兴技术,为证据的检验鉴定提供了新的思路。RTI 在痕迹检验、文件检验等法庭科学领域的应用能够帮助技术人员更加深入地挖掘证据内包含的信息。RTI 有多种影像重建模式:默认模式可以有效去除镜面反光;镜面反光增强模式可以分别处理颜色和反光。对于易受反光干扰的金属和玻璃痕迹,RTI 可以有效地避免反光对观察痕迹的影响。RTI 法线可视化模式能够有效去除背景图案干扰,对于颜色复杂背景的痕迹显现提取具有显著优势。RTI 技术可以实现交互式重新任意布光。在刑事诉讼活动中,由于现有技术条件限制,一些证据无法做到长时间无损保存,RTI 技术为保存证据提供了新的思路。RTI 技术在将证据数字化保存的同时,能够呈现细致的三维形态特征,而且允许人们在计算机上模拟任意方向的打光效果,大大方便了在未来重新查看证据。同时,证据的数字化保存为侦查活动中对证据进行远程分析提供了便利。RTI 法线可视化模式较为准确和方便地记录并呈现立体痕迹的三维信息,具有从三维角度量化痕迹证据的潜力。RTI 在法庭科学领域具有广阔的应用前景。

RTI 技术作为一种成像方法,除了上述优势外,也面临着一些挑战。因为 RTI 技术采集的原始图像依赖相机,所以无法兼顾采集图像的范围和精度,无法同时满足大范围、高精度的图像采集。在拍摄小物体表面的细节特征时,由于景深限制,无法清晰捕获超过景深范围的立体特征,如沿圆柱体表面延伸的痕迹信息。利用 RTI 进行物证的分析检验要求有较高的成像精度,相机镜头的畸变和图像噪点影响着 RTI 图像的证据价值。

未来,为了使 RTI 技术更好地应用于法庭科学领域,首先要追踪数字摄影技术和立体成像技术的最新成果,力求在图像采集和成像环节尽可能减小误差。其次根据物证检验的特点及需求,建立集拍摄、计算、成像、测量于一体,支持数据库建立与检索和远程共享分析的智能化系统,为证据的采集、

保存、分析提供新的思路。同时,多焦点 RTI 是一个重要的发展方向,以便突破景深限制,采集呈现更大深度变化的痕迹特征。此外,RTI 图像的连续采集和拼接有待进一步探索研究,以保证在较高精度下采集大型物体的全貌。基于此,将 RTI 技术与法庭科学相结合,有助于从立体痕迹证据的三维特征入手将痕迹数字化,把传统的经验转化为科学的数据和标准,促进证据检验鉴定不断走向信息化、标准化、自动化。

参 考 文 献

- [1] Malzbender T, Gelb D, Wolters H. Polynomial texture maps[EB/OL]. [2021-02-01]. <https://www.hpl.hp.com/research/ptm/papers/ptm.pdf>.
- [2] Liang S. The application of RTI in handwriting 3D character[D]. Shanghai: East China University of Political Science and Law, 2018: 2-17.
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: 2-17.
- [3] Woodham R J. Photometric stereo: a reflectance map technique for determining surface orientation from image intensity[J]. Proceedings of SPIE, 1979, 0155: 136-143.
- [4] Woodham R J. Photometric method for determining surface orientation from multiple images[J]. Optical Engineering, 1980, 19(1): 191-139.
- [5] Hertzmann A, Seitz S M. Example-based photometric stereo: shape reconstruction with general, varying BRDFs[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27(8): 1254-1264.
- [6] Cultural Heritage Imaging. Reflectance Transformation Imaging (RTI) [EB/OL]. [2021-02-01]. <http://culturalheritageimaging.org/Technologies/RTI/index.html>.
- [7] Giachetti A, Ciortan I M, Daffara C, et al. A novel framework for highlight reflectance transformation imaging[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2018, 168: 118-131.
- [8] Earl G, Basford P J, Bischoff A S, et al. Reflectance transformation imaging systems for ancient documentary artefacts[C]//Electronic Visualisation and the Arts, EVA 2011, July 6-8, 2011, London, UK. [S.l.: s.n.], 2011: 147-154.
- [9] Tamayo S N M, Andres J V, Pons J O. Applications of Reflectance Transformation Imaging (RTI) for documentation and surface analysis in conservation[J]. International Journal of Conservation Science, 2013, 4: 535-548.
- [10] 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.
- [11] Sammons J F D. 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.
- [12] Kotoula E, Robinson D W, Bedford C. Interactive relighting, digital image enhancement and inclusive diagrammatic representations for the analysis of rock art superimposition: the main Pleito cave (CA, USA) [J]. Journal of Archaeological Science, 2018, 93: 26-41.
- [13] Bennison-Chapman L E, Hager L D. Tracking the division of labour through handprints: applying Reflectance Transformation Imaging (RTI) to clay 'tokens' in Neolithic West Asia[J]. Journal of Archaeological Science, 2018, 99: 112-123.
- [14] Mytum H, Peterson J R. The application of Reflectance Transformation Imaging (RTI) in historical archaeology[J]. Historical Archaeology, 2018, 52(2): 489-503.
- [15] Porter S T, Huber N, Hoyer C, et al. Portable and low-cost solutions to the imaging of Paleolithic art objects: a comparison of photogrammetry and reflectance transformation imaging[J]. Journal of Archaeological Science: Reports, 2016, 10: 859-863.
- [16] Caine M, Maggen M, Altaratz D. Combining RTI & SFM. A multi-faceted approach to inscription analysis [C]//Electronic Imaging and the Visual Arts Florence 2019, May 8-9, 2019, Florence, Italy. [S.l.: s.n.], 2019: 97-104. .
- [17] Solem D Y E, Nau E. Two new ways of documenting miniature incisions using a combination of image-based modelling and reflectance transformation imaging[J]. Remote Sensing, 2020, 12(10): 1626.
- [18] Clarke S, Christensen A M. Reflectance Transformation Imaging (RTI) of saw marks on bones [J]. Journal of Forensic Radiology and Imaging, 2016, 7: 33-37. .
- [19] Martlin B, Rando C. Reflectance transformation imaging (RTI) for the documentation of saw mark characteristics[J]. Journal of Forensic Sciences, 2020, 65(5): 1692-1697.
- [20] Mark M, Tom M, Alan C. Image-based empirical information acquisition, scientific reliability, and long-term digital preservation for the natural sciences

- and cultural heritage[EB/OL]. [2021-02-01]. <https://diglib.org/handle/10.2312/egt.20081050.T2>.
- [21] Liu N. Using reflectance transformation imaging to display the writing pressure of black signature handwriting[J]. *Police Technology*, 2015(5): 32-34.
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.
- [22] 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.
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.
- [23] 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.
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.
- [24] Wu X, Lin H. Application of reflection transform imaging in printing and changing files[J]. *The Guide of Science & Education*, 2018(8): 53-54, 123.
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(8): 53-54, 123.
- [25] Liang J C, Liao C Y. Application of RTI technology in trace[J]. *Science & Wealth*, 2016, (12): 480-481.
梁锦成, 廖承业. RTI技术在痕迹当中的应用[J]. *科学与财富*, 2016, (12): 480-481.
- [26] Jiang J P, Ni R H. New imaging technology of three dimensional traces on metal objects[M]//The new vision of forensic comparative science: the application of reflectance transformation imaging. Nanjing: Phoenix Science Press, 2019: 153-159.
蒋俊平, 倪茹涵. 金属物体上立体痕迹的新型成像技术[M]//法庭比对科学的新视觉: 反射变换成像技术应用研究. 南京: 江苏凤凰科学技术出版社, 2019: 153-159.
- [27] Shen Y, Xu X Y, Bai C C. A comparative study on the use of LSCM and RTI to record gun marks[M]//The new vision of forensic comparative science: the application of reflectance transformation imaging. Nanjing: Phoenix Science Press, 2019: 160-168.
沈页, 许欣源, 白翠翠. 运用LSCM与RTI技术记录枪痕的比较研究[M]//法庭比对科学的新视觉: 反射变换成像技术应用研究. 南京: 江苏凤凰科学技术出版社, 2019: 160-168.
- [28] Liu N, Zhang L C. A preliminary study on quantifying three bit features of document surface based on reflectance transformation imaging[M]//The new vision of forensic comparative science: the application of reflectance transformation imaging. Nanjing: Phoenix Science Press, 2019: 2-11.
刘宁, 张力超. 基于反射变换成像技术量化文件表面三位特征的初步探究[M]//法庭比对科学的新视觉: 反射变换成像技术应用研究. 南京: 江苏凤凰科学技术出版社, 2019: 2-11.
- [29] Ni X. Research on pen pressure feature quantization based on reflectance transformation imaging[M]//The new vision of forensic comparative science: the application of reflectance transformation imaging. Nanjing: Phoenix Science Press, 2019: 13-26.
倪想. 基于反射变换成像技术的笔压特征量化初探[M]//法庭比对科学的新视觉: 反射变换成像技术应用研究. 南京: 江苏凤凰科学技术出版社, 2019: 13-26.
- [30] Wang Z. Technical specification for inspection of tool marks on common bearing objects[M]. Beijing: Chinese People's Public Security University Press, 2012.
王震. 常见承痕客体上工具痕迹检验技术规范[M]. 北京: 中国人民公安大学出版社, 2012.