

高光谱成像的纸币真伪鉴别研究

张振清^{1, 2, 3}, 董丽娟^{2*}, 黄宇⁴, 陈兴海⁴, 黄威⁵, 孙勇⁶

1. 铁道警察学院刑事科学技术系, 河南 郑州 450053
2. 山西大同大学微结构电磁功能材料山西省重点实验室, 山西 大同 037009
3. 郑州大学公共安全研究院, 河南 郑州 450001
4. 无锡谱视界科技有限公司, 江苏 无锡 214000
5. 公安部物证鉴定中心, 北京 100038
6. 同济大学物理科学与工程学院先进微结构材料教育部重点实验室, 上海 200092

摘要 人民币是中华人民共和国的法定货币, 人民币的真假直接关系到我国社会的和谐与稳定。百元钞票作为我国最大面额钞票, 其真假的鉴定显得更为重要。以2005版的百元钞票为例, 利用可见/近红外高光谱成像仪获取一张真钞与两张假钞正、背面高光谱影像数据, 然后分别在百元钞票的正、背面选取4个特征点, 以分析百元真假钞票在正、背面的光谱反射率差异。从真钞正面四个特征位置的光谱反射率曲线可知, 不同特征点处, 真钞与假钞之间的有些图案的光谱反射率差异较大, 有些图案的光谱反射率则差异并不显著。而不同批次的假钞, 其不同位置的光谱反射率也存在较大的差异。对于真假钞背面的分析可知, 不同特征点, 在不同的波段, 真钞与假钞以及假钞之间的光谱反射率同样有一定的差异。根据真钞与假钞正、背面8个特征点的光谱反射率曲线变化特征, 选取500, 660和870 nm三个波长的灰度图, 观察到真钞与假钞在不同特征点的灰度图均表现出明显的差异。真钞在500 nm处的图像轮廓清晰, 在660和870 nm两个波长, 无论是正面或背面, 真钞均有多处特征位置有异于假钞, 因此可用660或870 nm区别百元真假钞。为了突出真钞与假钞之间的图像差异, 利用基于波段运算得到百元真钞与假钞的灰度图。由图可知, 在正、背面上, 真钞在多个地方均区别于假钞。由真假钞正面的前12个主成分的灰度图可知, 无论从真、假钞正面或是背面, 每一主成分均有真钞显著区别于假钞的地方。根据真假钞正背面的纹理特征图可知, 真钞的纹理特征显著区别于假钞。研究表明百元真钞与不同版本的假钞在可见/近红外光谱范围内光谱反射率差异显著, 近红外特征波段、光谱运算、主成分分析、纹理特征等技术均可探寻到百元真假钞在正、背面存在的位置差异。由此可知, 可见/近红外高光谱成像技术可实现不同版本百元真假钞的鉴定, 并为假币的溯源提供了可能性和理论支持, 此技术在公安实战中具有实际意义。

关键词 高光谱成像; 光谱分析; 主成分分析; 伪币鉴别

中图分类号: S127 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)09-2903-10

引言

随着我国国民经济的快速发展, 中国作为世界第二大经济体, 人民币在国际支付中所占的份额越来越高。然而越来越多的高仿真人民币出现在流通领域, 严重地威胁了我国的

金融安全, 危害了国内的社会秩序。因此, 加快人民币真假的鉴定研究, 是保证我国金融安全, 维护人民币在国际金融市场地位的重要技术保证^[1]。传统的人民币真伪的鉴定一般是通过“一看、二摸、三听、四测”的方法进行的, 对于人民币流通量大的领域, 则通常通过验钞机等设备测试进行预防。然而对于一些“高仿”人民币, 以上方法往往无法检验出

收稿日期: 2021-04-15, 修订日期: 2021-06-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0803806, 2018YFC0807203-3), 国家自然科学基金项目(91850206, 11974261), 山西省科技创新团队项目(201805D131006), 山西省重点研发计划项目(201903D121026), 河南省科技攻关项目(192102310515, 212102310387)资助

作者简介: 张振清, 1980年生, 铁道警察学院刑事科学技术系副教授 e-mail: zhangzhenqing1980@163.com

* 通讯作者 e-mail: donglijuan_2012@163.com

来,需要研究新的更科学、更准确的鉴别方法^[2]。

目前国内、外很多专家学者针对人民币的真假鉴定进行了一系列的研究。廖昱博等基于拉曼光谱分析技术,识别伪造、变造的人民币,而且还可以分辨不同来源的假币^[3]。黄鹰等采用荧光光谱分析法,对钞票真伪进行识别^[4]。Woo June Choi 等通过全场光学相干断层扫描技术探析钞票的内部结构,用来区分钞票的真伪^[5]。陈强等利用发光光谱成像技术对真伪人民币进行检验,并且可以较好的区分开真假人民币以及不同来源的假币^[6]。王妍校通过分析假币的近红外光谱,来溯源假币的来源^[7]。蔡能斌等通过成像光谱仪获取真假人民币的光谱影像集,以对假币进行鉴别^[8]。曹丽琴等利用真伪纸币的光谱差异性对纸币真伪进行鉴别分析^[9]。Ioan Cristinel Negru 等基于红外光谱和质谱法识别钞票的真伪^[10]。Hoong Ta Lim 等利用高光谱成像仪,对流通的新加坡聚合物钞票进行了真假鉴定^[11]。Wang 采用“增量”容差算法提取钞票的主要颜色和纹理特征,区分真伪钞票^[12]。Radigya M Correia 等利用近红外光谱仪并结合主要成分分析和偏最小二乘判别分析对真伪钞票进行分析鉴别^[13]。刘海玲等基于太赫兹脉冲成像技术,对真假人民币进行有效地鉴定^[2]。

虽然专家学者们对真假钞的鉴定做了许多研究,但目前未有利用可见近红外成像高光谱对真假钞进行鉴别分析,特别是针对同一版本人民币出现的多种版本假钞正背面进行分析研究。高光谱成像集成了常规成像和光谱学,可从标本中获得空间和光谱信息。该技术使研究人员能够分析痕迹的化学组分,同时可视化它们的空间分布。高光谱成像为纸币的真伪性的检测,识别提供了巨大的潜力^[14-15]。

利用可见近红外高光谱系统测量 2005 版百元真钞以及两个版本百元假钞,通过分析真钞与不同版本的假钞在可见近红外光谱范围内高光谱反射率的差异以及运用近红外特征波段、光谱运算、主成分分析、纹理特征等技术手段,旨在快速探索出真钞与假钞之间以及不同版本、不同来源假钞之间的差异。不但为快速、准确鉴定人民币真假提供技术支持,而且还可以准确地对假钞的来源地进行溯源,在公安实战中具有实际意义。

1 实验部分

1.1 样品

以 2005 版百元人民币为实验样本,其中所用的两张百元假钞由公安部物证鉴定中心提供。假币逼真度高,伪装性极好,从肉眼上无法区分真假币。真币编码为:F80G749599,假币编码为:HB90269566 和 HB90237038。

1.2 仪器

人民币可见/近红外光谱图像数据的采集利用的是 GaiaSorter 高光谱分选仪系统(江苏双利合谱科技有限公司),该系统主要由光谱成像系统(GaiaFiled Pro-V10E)、卤素灯、暗箱、计算机组成。

高光谱分选仪光谱范围为 400~1 000 nm,光谱分辨率(FWHM)为 2.8 nm,可以区别极近似物质之间的细微差别。

配套的消色差镜头为 23 mm 焦距,视场角范围为 22°,镜头的通光范围是 300~1 200 nm。Gaiafield Pro-V10E 光谱仪为逐线推扫成像,每线的最大像素数为 1 920 个,每个像素在 400~1 000 nm 范围内的波段数最多为 1 440 个。可以通过采集控制软件 Specview 在实验前进行波段数和像素数的选择。每行像素数可以选择 1 920, 960(相邻两个像素合并为 1 个)和 480(相邻 4 个像素合并为 1 个)。波段数可以选择 1 440, 720(相邻两个光谱波段值合并为 1 个), 360(相邻 4 个光谱波段合并为 1 个)和 176(相邻 8 个光谱波段值合并为 1 个)。

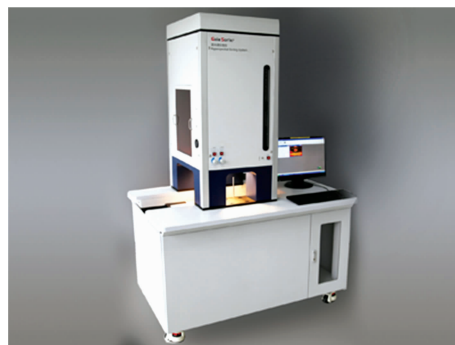


图 1 GaiaSorter 高光谱分选仪

Fig. 1 GaiaSorter hyperspectral sorter

图 2 为采集得到的百元钞正面与背面的高光谱立方体图像。与传统的只具有 X 轴和 Y 轴的二维平面图像相比,高光谱图像除了 X 轴和 Y 轴,还有代表光谱维的 Z 轴。其成像的过程是钱币随暗箱内的电动平移台匀速移动,逐线推扫成像。X 轴是光谱仪狭缝长度方向经过镜头后能探测到的视场角范围,代表的是线推扫的空间像素数。Z 轴为一定光谱范围内的光谱通道数量。Y 轴为推扫方向的累计线数的数量,可以根据所测物品的长短通过软件进行控制。

1.3 方法

在采集纸币的高光谱数据前,需要先根据光源的亮度调节仪器的曝光时间。即,将条形白板放在镜头下调节位置,使得刚好覆盖在镜头和狭缝采集成像的范围内,点击软件上的自动曝光按钮,经过 3 s 后会在曝光时间栏自动得到一个经过优化的曝光时间。得到曝光时间后,点击白帧按钮,采集白板数据 DN_{white} ,然后盖上镜头盖,点击黑帧按钮,得到背景暗电流的数据 DN_{dark} 。

纸币数据采集:三张百元钞票清理表面污渍后将其压平,然后按照假钞 1、假钞 2、真钞的顺序依次排列放置于暗箱的扫描平台上。为了减少背景信息对目标图像反射率的影响,在图像采集过程中使用黑色背景以减少背景反射所带来的误差。在利用 SpecView 采集软件进行光谱图像采集时,经过多次调试后,物镜高度设置为 31 cm,曝光时间设置为 11 ms,平台移动速度分别设置为 $4.8 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

参数设置完成后,打开 Camera Setting 相机设置窗口,将 Spatial 选择 960,即每线保存 960 个像素,将 Spectral 选择 176,即每个像素保存 176 个光谱通道。然后点击 Capture Panel 采集窗口的“采集”按钮,3 张钱币就会以每秒 4.8 mm

的速度，在电动平移台上移动，同时光谱仪同步开始推扫成像。暗箱内部有 4 个带磨玻璃表面的卤素灯，分别从暗箱的 4 个不同位置对被测钱币进行照射，保证了从任何角度看去都没有阴影。

采集百元钞的正面光谱图像时，任意选择三个波长的灰度图组成伪彩色图对扫描结果进行展示；然后利用同样的设置和步骤再采集百元钞的背面光谱图像。经过以上采集数据后，得到百元钞正面和背面的三维图像如图 2 所示。

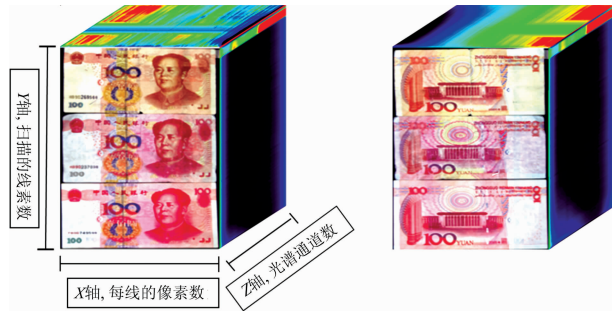


图 2 百元钞正面与背面的三维立体图

Fig. 2 Three-dimensional perspective views of the front and back of 100 yuan RMB

1.4 光谱图像预处理

试验获取的图像数据为 DN 值，为无量纲数据，需转化为反射率数据方可进行下一步的分析^[16]，由 DN 值转为反射率值的转换公式如式(1)所示。

$$R_{ref} = \frac{DN_{raw} - DN_{dark}}{DN_{white} - DN_{dark}} \quad (1)$$

式(1)中， R_{ref} 是校正过的图像， DN_{raw} 是原始图像， DN_{white} 为白板校正图像， DN_{dark} 是黑板校正图像。

试验得到的光谱含有由仪器和试验条件等引起的噪声，对这些噪声的处理有助于减少噪声对光谱分析的影响，突出光谱的有效信息。Savitzky-Golay (SG)平滑算法可以有效消除光谱数据中的随机噪声，消噪效果受平滑点数的影响^[17]；选择 SG 二次多项式 5 点平滑对光谱数据进行处理，同时去除 400~1 000 nm 前后 50 nm 低信号的光谱以减少分析结果的误差。

2 结果与讨论

2.1 百元真钞与假钞的光谱分析

图 3 分别为百元假钞(第一、二张)与百元真钞(第三张)正背面的成像光谱 RGB(RGB 分别为 640, 550 和 460 nm)伪



(a)



(b)

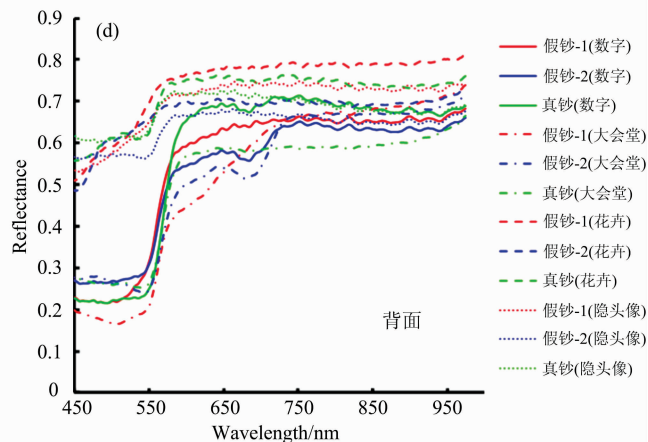
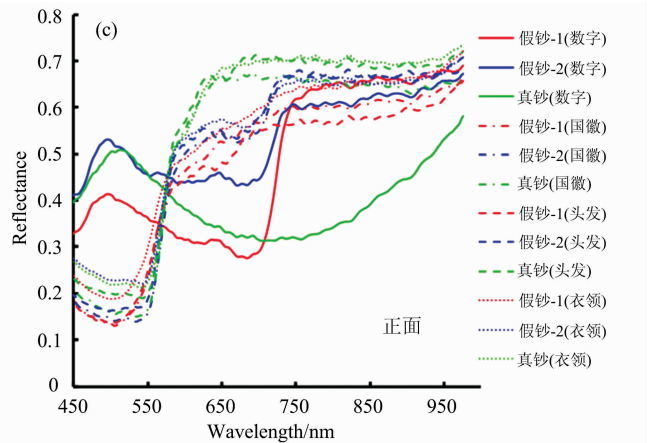


图 3 真钞与假钞正背面特征点的光谱反射率曲线

Fig. 3 Spectral reflectance curves of the characteristic points on the front and back of real and counterfeit 100 yuan RMB banknotes

彩色图以及真假钞正背面 4 个特征位置的光谱反射率曲线。真假钞正面的 4 个特征位置分别为人民币左下角的 100 数字、右上角的国徽、毛主席右边的头发以及毛主席衣服的衣领处[图 3(a)所示]。真假钞背面的 4 个特征点分别为人民币右上角的 100 数字、人民大会堂、人民币花卉的花边以及右边的毛主席隐形头像[图 3(b)所示]。从真假钞正面四个特征位置的光谱反射率曲线可知,真钞与假钞的光谱反射率差异较大,假钞之间的光谱反射率同样有较大差异[图 3(c)所示]。对于真假钞正面的分析可知,100 数字处光谱在 450~950 nm 范围内差异显著,在 450~700 nm 范围内,总体上第二张假钞的光谱反射率高于真钞,真钞的光谱反射率则高于第一张假钞;在 700~950 nm 范围内,真钞的光谱反射率均小于假钞。国徽处在 575~725 nm 光谱范围内,真钞与假钞的反射率差异较大,在 450~575 以及 725~950 nm 范围内,差异并不显著。毛主席头发处在 450~575 nm 范围内无显著差异,但在 575~950 nm 真钞与第一张假钞差异显著,在 575~740 nm 范围内真钞与第二张假钞差异显著,在 740~950 nm 范围内,真钞与第二张假钞差异不显著。毛主席衣领处在 590~950 nm 范围内差异显著,在 450~590 nm 范围内差异不显著。

对于真假钞背面[图 3(d)所示]的分析可知,100 数字处在 450~500 nm 光谱范围内,第二张假钞的反射率高于第一张假钞,第一张假钞与真钞的反射率无显著差异;在 575 nm 范围内,真钞的光谱反射率值高于两张假钞,第一张假钞的反射率值则高于第二张假钞。大会堂处在 450~540 nm 范围内,第一张假钞的反射率低于第二张假钞与真钞;在 575~950 nm 范围内,真钞与两张假钞的光谱反射率差异显著。真钞的花卉处光谱在 520 nm 附近有一峰值,在 540 nm 附近有一谷值,然而 2 张假钞在 520 和 540 nm 附近均无峰值与谷值;在 555~950 nm 范围内,第一张假钞的光谱反射率高于真钞,而真钞的光谱反射率高于第二张假钞。在隐形头像处,第二张假钞光谱反射率变化趋势与真钞相似,但真钞的光谱反射率值高于假钞。在 450~510 nm 范围内,真钞的光谱反射率值高于第一张假钞;在 510~550 和 600~950 nm 范围内,第一张假钞的反射率值高于真钞;在 550~600 nm 之间,真钞与第一张假钞的变化趋势一致且反射率值相近。

2.2 百元真钞与假钞的图像分析

根据图 3 中真钞与假钞正背面 8 个拓征点的光谱反射率曲线变化特征,选取 500, 660 和 870 nm 三个波长的灰度图观察真钞与假钞在不同位置的显示差异,如图 4 所示。



图 4 百元真钞与假钞的正反面在 500, 660 和 870 nm 的灰度图

Fig. 4 The grayscale images of the front and back of the real and counterfeit 100 yuan RMB banknotes at 500, 660 and 870 nm

从图4的真假钞的正面可知,在500 nm处真钞正面的纹理清晰度高于假钞,但无其他显著差异[图4(a)所示]。在660 nm处,真钞与假钞在多处有明显差异。其中在真钞与假钞的正面,真钞的左下角有2个100字样,而假钞只有1个100字样;真钞的左边有毛主席的头像,而假钞没有;真钞左上角的国徽颜色很淡,基本上看不清,而假钞显示很清晰;真钞右边的毛主席头像与其他位置如“中国人民银行”字样颜色较淡,而假钞在这些位置的颜色显示深于真钞[图4(b)所示]。在870 nm处,第二张假钞除了左下角的几个数字,无其他图像信息。而第一张假钞图像信息较为丰富,与660 nm的灰度图相似;真钞在870 nm同样有2处毛主席头像,在左下角同样有2个100字样,而假钞只有1处毛主席头像或者没有,左下角无100字样或显示不清,真钞在其他地方无显著特征[图4(c)所示]。

从图4的真假钞的背面可知,与正面相似,在500 nm的灰度图处,真钞背面的纹理清晰度高于假钞,但无其他显著差异[图4(d)所示]。在660 nm的灰度图,真钞的右侧有毛主席头像及100字样,而假钞没有;真钞的左侧图像轮廓清晰,而假钞轮廓模糊[图4(e)所示]。在870 nm的灰度图,真钞的右侧依然有毛主席头像及100字样,在人民币的左侧,真钞的人民大会堂左侧显示清晰,右侧无显示,而假钞左右两侧均无显示[图4(f)所示]。

综合分析真钞与假钞的正背面在500, 660和870 nm三个波段的灰度图可知,真钞在500 nm处的图像轮廓清晰,在660和870 nm两个波段,无论是正面或背面,真钞均有多处特征位置有异于假钞,因此可用660或870 nm区别百元真假钞。

波段运算为多幅图像的混合运算提供了简单的方法,通过波段运算可以突出目标物的某一特性或者细节^[17]。本工作采用简单的四则波段运算,目的是为了突出真钞与假钞之间的图像差异。根据图3真钞与假钞8个不同位置的光谱反射率的变化规律,选取520 nm处的反射率减去540 nm处的反射率,得到图5真钞与假钞正背面的灰度图[图5(a)];选取870 nm处的反射率减去660 nm处的反射率,得到真钞与假钞正背面的灰度图[图5(b)];选取870 nm处的反射率减去500 nm处的反射率,得到真钞与假钞正背面的灰度图[图5(c)]。

由图5可知,520 nm处的反射率减去540 nm处的反射率的灰度图,在正面上,真钞在毛主席头像、花卉、小圆圈等多个地方区别于假钞;在背面上,大会堂、100数字、右上角图案等多个地方,真钞与假钞显示不同。870 nm处的反射率减去660 nm处的反射率的灰度图,在正面上,在毛主席头像、国徽、右上角100数字及下方图案等多个地方,真钞的显示与假钞存在较大区别;在背面上,真钞在大会堂的图案显示上区别于假钞。870 nm处的反射率减去500 nm处的反射率的灰度图,在正面上真钞左下角无100字样,而2张假钞均有100字样,花卉上“壹佰元”,真钞显示清晰于假钞;在背面上,除颜色差异及清晰度不一样外,真假钞难以辨别。

2.3 百元真钞与假钞的主成分分析

主成分分析(principal component analysis, PCA)是一种

最基本的数据降维方法,主要是通过对数据的协方差矩阵进行特征值分解,特征值分解后的特征向量对应数据的主成分,特征值对应数据在各个主成分上的权重^[18]。利用PCA变换去除高光谱图像波段间的相关性,去除冗余信息;经过PCA变换后,大部分信息集中在前几个主成分分量中,其他的主成分分量以噪声为主^[19]。

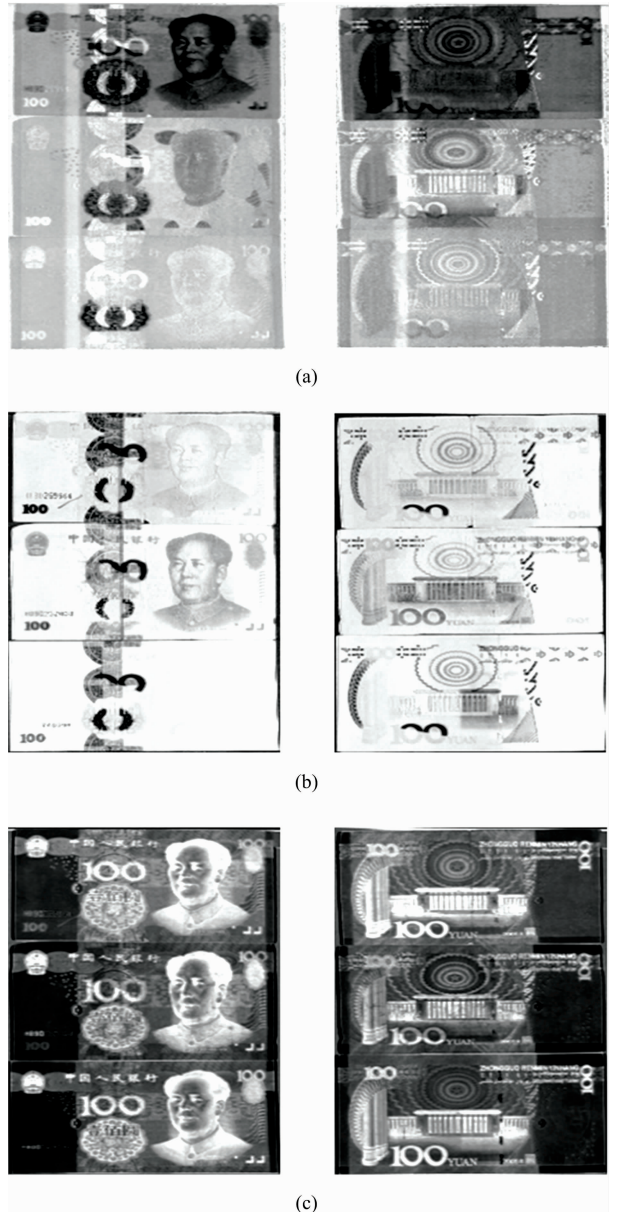


图5 基于波段运算的百元真钞与假钞灰度图
Fig. 5 The grayscale images of the real and counterfeit 100 yuan RMB based on band operation

图6为真假钞正面的前12个主成分的灰度图。从图可知,每一主成分均有真钞显著区别于假钞的地方,其中第3~7主成分真钞区别于假钞的地方较多,比如第3主成分,在毛主席头像、左下角的100字样、右上角的100字样、花卉、国徽周边图案等多个地方,真钞可区别于假钞。第1主成分和第2主成分覆盖的信息较多,真钞在花卉上的“壹佰元”

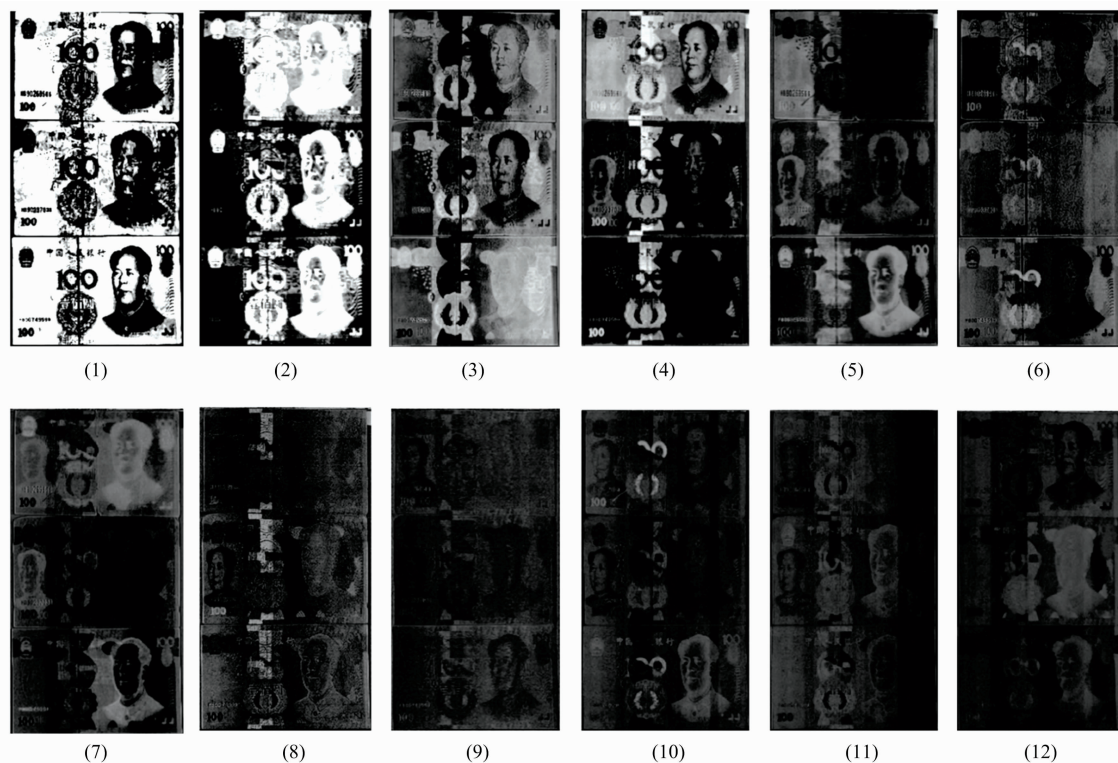


图 6 百元真钞与假钞正面的前 12 个主成分

Fig. 6 The first 12 principal components for the front sides of the real and counterfeit 100 yuan RMB

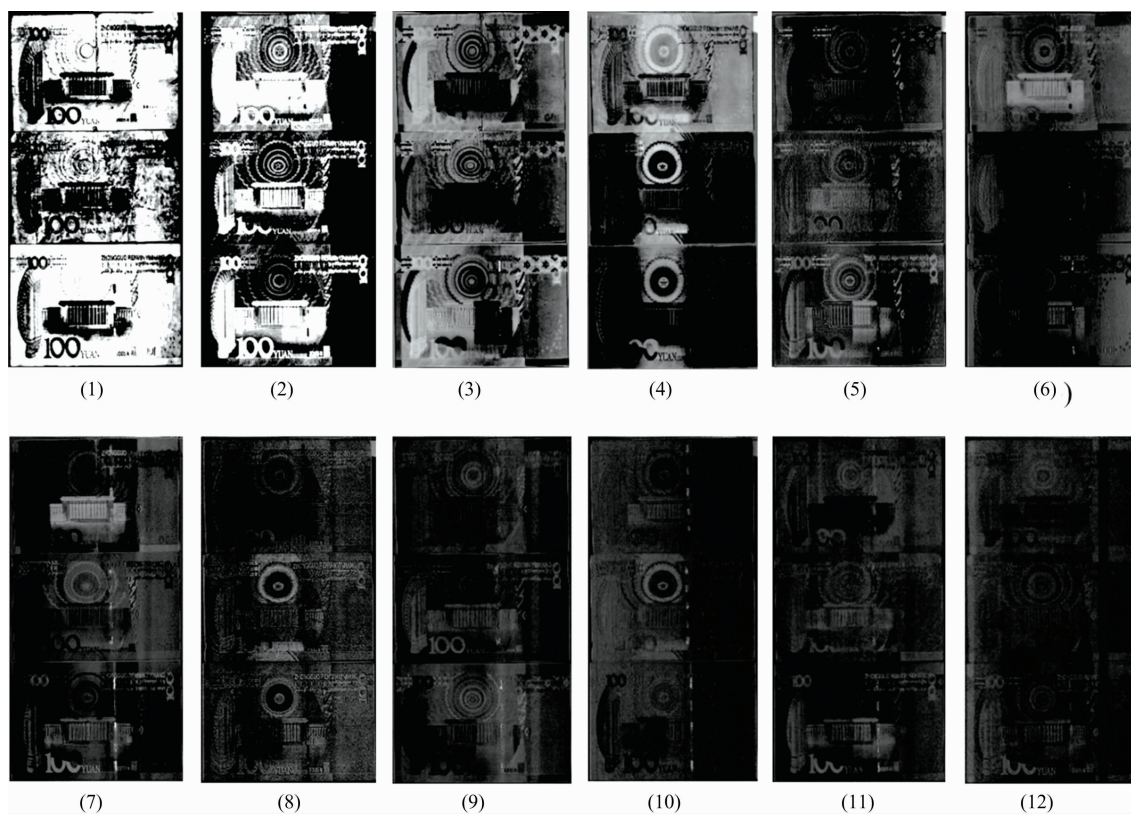


图 7 百元真钞与假钞背面的前 12 个主成分

Fig. 7 The first 12 principal components for the back sides of the real and counterfeit 100 yuan RMB

字体、毛主席头像等地方与假钞的显示不同。第 8~12 主成分虽然所含噪声较多,但在毛主席头像、100 字样等地方,真钞与假钞的显示均不相同。

图 7 为真假钞背面的前 12 个主成分的灰度图,从图中可知,每一主成分也均有真钞区别于假钞的地方,主要集中在大会堂、右上角的 100 字样、左上角的 100 字样、左下角的 100 字样、中间的花卉。左边的图案等多个地方。其中第 3~5 主成分的灰度图中,真钞区别于假钞的地方较多。在第一主成分中,真钞的图案及轮廓的清晰度高于假钞。在第 8~12 主成分虽然所含噪声较多,但仍多处有较为显著的差异可区别真钞与假钞。

2.4 百元真钞与假钞的纹理分析

纹理特征提取的主要方法有统计方法、模型方法、信号处理方法和结构方法等。统计方法是基于像元及其领域的灰度属性来研究纹理区域中的统计特性,而灰度共生矩阵及其特征提取的方法一直是重要的统计纹理分析方法之一。

不同的图像由于纹理尺度的不同,灰度共生矩阵可以有

很大的差别。Haralick 等在灰度共生矩阵(gray level co-occurrence matrix)的基础上根据纹理的特点提出了基于灰度共生矩阵的纹理量化方法^[20],如表 1 所示。

表 1 基于灰度共生矩阵的纹理特征及其作用

Table 1 Texture features and its effect based on gray level co-occurrence matrix

序号	名称	作用
1	均值	反映了灰度的平均情况
2	方差	反映了灰度变化的大小
3	逆差矩	反映了局部同质性,当共生矩阵沿对角线集中时,其值较大
4	对比度	反映了影响纹理的清晰度
5	非相似度	与对比度相同,用来检测相似性
6	熵	是图像所具有的信息量的度量
7	角二阶矩	反映了图像灰度分布的均匀性
8	相关性	反映某种灰度值沿某个方向的延伸长度



图 8(a) 真假钞正面在 550 nm 灰度图的纹理信息

从左到右依次为均值、方差、逆差矩、对比度、非相似度、熵、角二阶矩、相关性

Fig. 8(a) The texture informations of the grayscale images of the front sides of the real and counterfeit banknotes at 550 nm

From left to right are the mean, variance, inverse difference moment, contrast, dissimilarity, entropy, angle second-order moment, correlations, respectively

灰度共生矩阵在一定程度上反映了纹理图像中各灰度级在空间上的分布特性,是纹理分析领域中最常用的特征之一^[21]。利用真钞与假钞正背面 8 个特征点的光谱反射率曲线变化特征,选取 500 nm 波段的灰度图计算其纹理信息,如图 8 所示。

图 8(a)为真假钞正面在 550 nm 波段的纹理特征图,从左到右,从上到下依次为均值、方差、逆差矩、对比度、非相似度、熵、角二阶矩和相关性。从图 8(a)可知,从宏观角度看,真假钞正面在 550 nm 处的纹理特征并无显著差别,但从细微角度看,真假钞正面的文字信息,如中国人民银行、

100、壹佰圆以及编号等,在 550 nm 处真钞的纹理显示的更加清晰完整。真钞中间的条杠与假钞相比,也更加的清晰。真钞的熵、角二阶矩和相关性这三个纹理特征与假钞相比轮廓更加清晰,且比假钞的轮廓大。

图 8(b)为真假钞背面分别在 550 nm 波段的纹理特征图,从左到右,从上到下依次为均值、方差、逆差矩、对比度、非相似度、熵、角二阶矩和相关性。从图 8(b)可知,真假钞背面在 550 nm 处除了方差、对比度这两个纹理特征中真假钞在中间花卉有所区别外,其余的纹理特征并无显著区别。

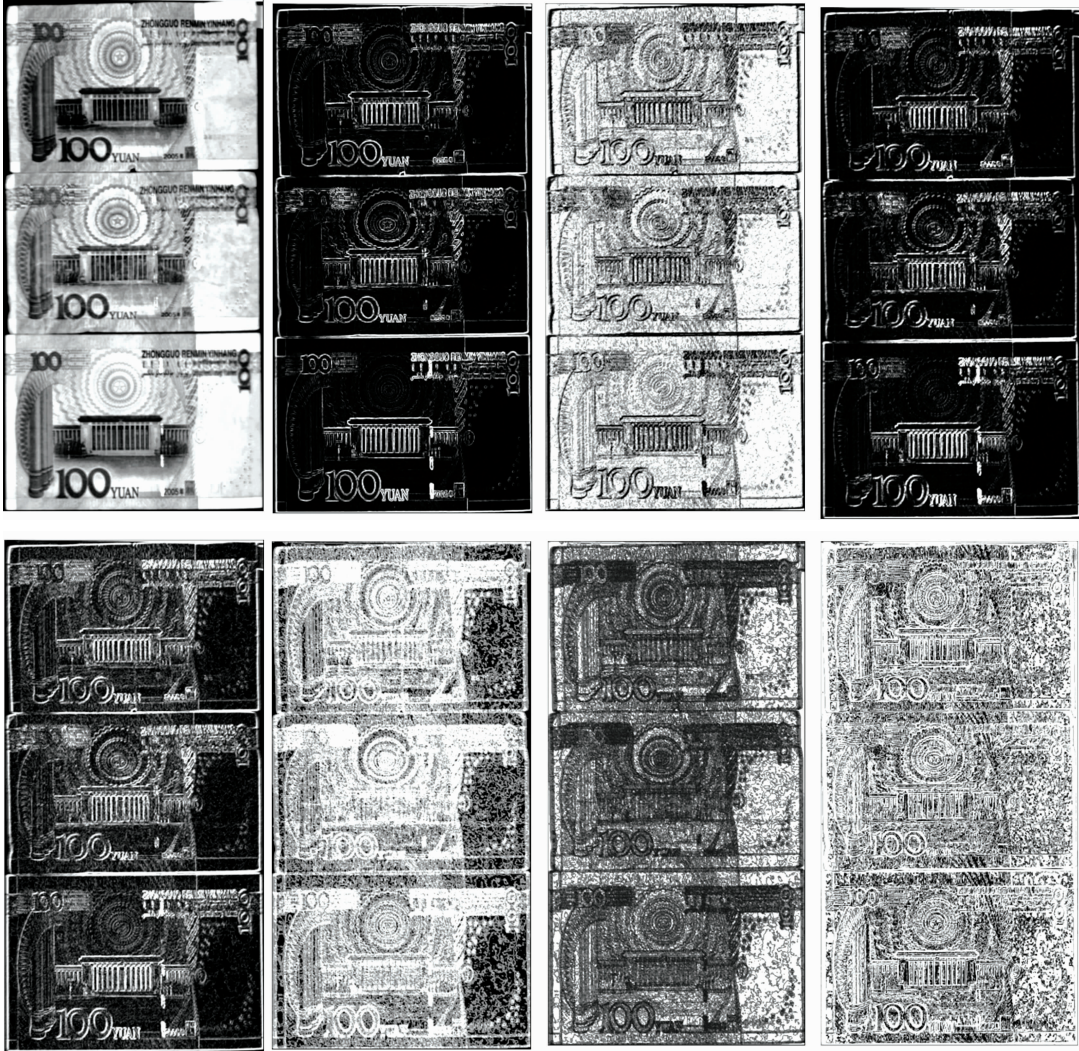


图 8(b) 真假钞背面在 550 nm 灰度图的纹理信息

从左到右依次为均值、方差、逆差矩、对比度、非相似度、熵、角二阶矩、相关性

Fig. 8(b) The texture informations of the grayscale images of the back sides of the real and counterfeit banknotes at 550 nm

From left to right are the mean, variance, inverse difference moment, contrast, dissimilarity, entropy, angle second-order moment, correlations, respectively

3 结 论

通过分析百元钞中 2005 版真钞与 2005 版不同批次假钞

的正背面的光谱反射率可知,在 400~1 000 nm 光谱范围内,真钞与假钞之间的有些图案的光谱反射率差异较大,有些图案的光谱反射率则差异并不显著。而不同批次的假钞,其不同位置的光谱反射率也存在较大的差异。这与真假钞所

用颜料及工艺有很大关系,而且不同来源的假币油墨成分也不相同。通过对比真假钞正背面单波段、波段运算、主成分分析12个主成分的灰度图和550 nm处的纹理特征可知,基于单波段的灰度图,近红外波段可在钞票的正面毛主席头像、左下角的100字样区别于假钞,在钞票的背面,真钞可在毛主席头像、大会堂、右下角的100字样区别于假钞,而可见光的波段,真假钞较难区分;基于波段运算的灰度图,真钞在正面上如毛主席头像、国徽、右上角100数字、小圆圈及下方图案等多个地方区别于假钞,在背面上,真钞在大

会堂、100数字、右上角图案等地方可区别于假钞;基于主成分分析的灰度图,无论是正面或反面,有信号的灰度图,真钞均可区别于假钞,有些主成分存在多处可区别于真假钞的地方;在550 nm处,真钞与假钞正背面的均值、方差、逆差矩、对比度、非相似度、熵、角二阶矩和相关性这8个纹理特征均有所区别。

研究结果为通过高光谱成像技术进行真伪币鉴别和假币溯源鉴定提供了可能性和理论支持,也为其他类型的真假钞的验证做了技术铺垫。

References

- [1] XUE Li-ming, WU Jie, WANG Jun-min(薛利明, 吴杰, 王军敏). *Computer & Digital Engineering(计算机与数字工程)*, 2019, 47(6): 1364.
- [2] LIU Hai-ling, ZHAI Dong-wei, YANG Yu-ping, et al(刘海玲, 翟东为, 杨玉平, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2018, 38(7): 35.
- [3] LIAO Yu-bo, LAI Zhao-sheng, MENG Yao-yong, et al(廖昱博, 赖昭胜, 孟耀勇, 等). *Chinese Journal of Lasers(中国激光)*, 2008, (10): 1619.
- [4] HUANG Ying, XIE Yan-hong, YI Xin-jian(黄鹰, 谢艳红, 易新建). *Journal of Applied Optics(应用光学)*, 2008, (4): 629.
- [5] Choi W J, Min G, Lee B H. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2010, 14(4): 316.
- [6] CHEN Qiang, YANG Zhi-chao, SUN Yang, et al(陈强, 杨志超, 孙阳, 等). *Forensic Science and Technology(刑事技术)*, 2012, (2): 16.
- [7] WANG Yan-yan(王妍桢). *Journal of Yunnan Police Officer Academy(云南警官学院学报)*, 2013, (6): 95.
- [8] CAI Neng-bin, LIU Fu-jun, WEN Si-bo(蔡能斌, 刘夫军, 温思博). *Image Technology(影像技术)*, 2013, 25(1): 14.
- [9] CAO Li-qin, WEI Li-fei, DING Jing-feng(曹丽琴, 魏立飞, 丁景峰). *China Printing and Packaging Study(中国印刷与包装研究)*, 2013, 5(6): 48.
- [10] Negru I C, Vasilache V, Sandu I. *Materiale Plastice*, 2017, 2(54): 321.
- [11] Lim H T, Murukeshan V M. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 98: 168.
- [12] Wang J M, Fan Y Y, Li N. *Journal of Electronic Imaging*, 2017, 26(4): 043011-1.
- [13] Radigya M C, Eloilson D, Flavia T, et al. *Forensic Chemistry*, 2018, 8: 57.
- [14] Edelman G, Leeuwen T G V, Aalders M C G. *Forensic Science International*, 2012, 223(1): 72.
- [15] Zhao Y F, Hu N N, Wang Y N, et al. *Cluster Computing*, 2018, 1(3): 1.
- [16] HE Hong-ju, HU Li-ping, LI Wu, et al(何洪巨, 胡丽萍, 李武, 等). *Food and Nutrition in China(中国食物与营养)*, 2016, 22(10): 53.
- [17] Yao X, Huang Y, Shang G, et al. *Remote Sensing*, 2015, 7(11): 14939.
- [18] Jolliffe I T. *Principal Component Analysis. Second Edition*, New York: Springer, 2002: 1.
- [19] HUO Lei-gang, FENG Xiang-chu(霍雷刚, 冯象初). *Journal of Electronics & Information Technology(电子与信息学报)*, 2014, 36(11): 2723.
- [20] LI Zhi-feng, ZHU Gu-chang, DONG Tai-feng(李智峰, 朱谷昌, 董泰锋). *Geology and Exploration(地质与勘探)*, 2011, 47(3): 456.
- [21] LI Nan, LIANG Ming, HUO Hong, et al(李楠, 梁明, 霍宏, 等). *Journal of Xi'an University of Science and Technology(西安科技大学学报)*, 2007, 27(1): 58.

Identification of True and Counterfeit Banknotes Based on Hyperspectral Imaging

ZHANG Zhen-qing^{1, 2, 3}, DONG Li-juan^{2*}, HUANG Yu⁴, CHEN Xing-hai⁴, HUANG Wei⁵, SUN Yong⁶

1. Department of Criminal Science and Technology, Railway Police College, Zhengzhou 450053, China

2. Shanxi Provincial Key Laboratory of Microstructure Electromagnetic Functional Materials, Shanxi Datong University, Datong 037009, China

3. Institute of Public Safety Research, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China

4. Wuxi Spectrum Vision Technology Co., Ltd., Wuxi 214000, China

5. Institute of Forensic Science, Ministry of Public Security, Beijing 100038, China

6. MOE Key Laboratory of Advanced Micro-Structured Materials, School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China

Abstract RMB is the legal currency of the people's Republic of China. The authenticity of RMB is directly related to the harmony and stability of the society. As the most significant denomination bill in China, identifying the authenticity of 100 yuan RMB is more critical. In the paper, we use the visible/near-infrared hyperspectral imager to obtain the hyperspectral image data of an actual bill and two fake bills. Then select four feature points on the front and back of the bill to analyze the spectral differences between the front and back of the bill. From the spectral reflectance curves of the four characteristic positions on the front of the authentic and counterfeit banknote. It can be seen that the spectral reflectance of some patterns between the real and the counterfeit banknote varies greatly at different characteristic points, while that of some patterns is not significant. Moreover, for different batches of counterfeit banknotes, the spectral reflectance at different locations also has large differences. The analysis of the back of real and counterfeit banknotes shows that with different feature points, the spectral reflectivity between the real and the counterfeit banknote is also different in different bands. According to spectral reflectance curves of the 8 characteristic points on the front and back of the genuine and the counterfeit banknote, the grayscale images of the wavelengths at 500, 660 and 870 nm were selected. It was observed that the grayscale images of real and counterfeit banknotes showed obvious differences at different feature points. The image contour of the real banknote at 500 nm is clear. In 660 and 870 nm, no matter on the front or back, the real banknote has several characteristic positions different from the counterfeit banknotes. Therefore, it can be used to distinguish the real 100-yuan banknote at 660 or 870 nm. In order to highlight the difference between real banknotes and counterfeit banknotes, the gray-scale image of real and counterfeit banknotes of 100 yuan is obtained by band calculation. As can be seen from the figure, real banknotes are different from counterfeit banknotes in many places on the front and back sides. From the grayscale image of the first 12 principal components on the front of genuine and counterfeit banknote, it can be seen that there exist significant differences in each principal component no matter from the front or the back. According to the texture feature map on the front and back of the real and fake banknotes, it can be seen that the texture characteristics of the real banknotes are significantly different from the fake banknotes. The results show that the spectral reflectance of 100 yuan real banknotes is significantly different from that of different versions of counterfeit banknotes in the visible/near-infrared spectral range, and the differences between the front and back positions of 100 yuan real banknotes can be found by the near-infrared characteristic band, spectral operation, principal component analysis and texture characteristics. Therefore, visible/near-infrared hyperspectral imaging technology can be used to identify 100 yuan real and fake banknotes and provide the possibility and theoretical support for the traceability of counterfeit banknotes. The technology has practical significance in the actual practice of public security.

Keywords Hyperspectral imaging; Spectroscopic analysis; Principal component analysis; Identification of forged banknotes

(Received Apr. 15, 2021; accepted Jun. 18, 2021)

* Corresponding author