

一种纳米颗粒上转换发光防伪编码方法

段思邈¹, 李敏^{1*}, 夏宇¹, 江梦慈², 曾和平^{1,2}

¹上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093;

²华东师范大学精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200062

摘要 提出了一种新型的基于纳米颗粒上转换发光的防伪编码方法。该方法将 MATLAB 图像处理算法、支持向量机分类和径向基函数神经网络分类相结合, 通过分析纳米材料在 980 nm 抽运激光激发下产生的绿光和红光的上转换发光光谱信息, 及该纳米材料在防伪基底上的空间分布特征, 实现了一种具有高防伪度及建库与识别自动化的防伪方式。实验验证了所制作出的防伪标识难复制且其特征图样具有高稳定性, 鉴定准确率可达 95.4%。

关键词 材料; 荧光和发光材料; 防伪; 支持向量机; 稀土纳米颗粒

中图分类号 O433 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP54.121601

An Anti-Counterfeiting Encoding Method Based on Nanoparticle Upconversion Luminescence

Duan Simiao¹, Li Min¹, Xia Yu¹, Jiang Mengci², Zeng Heping^{1,2}

¹ School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

² State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200062, China

Abstract A novel anti-counterfeiting encoding method based on the nanoparticle upconversion luminescence is proposed. This method combines the image processing algorithms based on MATLAB, support vector machine (SVM) classification and radial basis function neural network classification. With the analysis of the upconversion luminescence spectral characteristics of the green and red lights emitted from the nano-materials which are pumped by the 980 nm laser, and the spatial distribution characteristics of these nano-materials on the anti-counterfeiting substrate, the anti-counterfeiting method with a high-security and an automatic capability of database building and pattern recognizing is realized. The experiment confirms that it is difficult to replicate the prepared anti-counterfeiting markings whose characteristic patterns have a high stability, and the identification accuracy is up to 95.4%.

Key words materials; fluorescent and luminescent materials; anti-counterfeiting; support vector machine; rare-earth nanoparticles

OCIS codes 160.2540; 220.4241; 160.4236; 100.3008

1 引言

上转换纳米发光材料一般是利用掺稀土元素的无机化合物制作而成的一种纳米颗粒^[1-2]。由于上转换纳米发光材料的激发光源为不可见光, 材料在受激发前肉眼是不可识别的, 因此保密性好; 制备好的发光材料不易褪色变形且吸附性强, 因此稳定性高。故纳米上转换发光材料可以应用在防伪领域。目前, 常用的纳

收稿日期: 2017-05-27; 收到修改稿日期: 2017-07-08

基金项目: 国家自然科学基金(11504237, 61505106)

作者简介: 段思邈(1992—), 女, 硕士研究生, 主要从事超快激光和纳米制造技术方面的研究。

E-mail: Smile_Duan@126.com

导师简介: 曾和平(1966—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事超分辨成像和量子探测方面的研究。

E-mail: hpzeng@phy.ecnu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: minli_1220@163.com

米材料防伪方式是将上转换发光材料作为添加剂掺入油墨中,印刷出固定样式,通过红外光照射激发后,观测显现出的图样与激发出的可见光波长,进而达到防伪的目的^[3-5]。但这种防伪过程本质上是对上转换材料的加密,一旦识别所用上转换材料的种类与浓度,便极易仿制,因此该方法防伪可靠度不高。

本文根据上转换发光光谱和纳米材料在基质上随机分布的特点,提出了一种新型的纳米颗粒上转换发光防伪编码方法。该方法首先用稀土掺杂的纳米上转换材料制作防伪标识并拍照,然后使用 MATLAB 图像处理算法处理图片、提取特征信息并编码,最后用支持向量机库(libsvm)工具箱进行分类训练建库与预测,再辅以径向基函数(RBF)神经网络训练与测试,对所预测结果进行进一步判定。利用这种防伪编码方法,提取了防伪标识在激光激发下发出的可见光颜色与亮度分布的特征信息,并进行了鉴定,图像鉴定的准确率可达到 95.4%,验证了该方法的可行性。

2 纳米颗粒上转换发光防伪编码方法

通过观察研究上转换纳米颗粒在基底空间中随机分布的特点,提出了一种新的纳米颗粒上转换发光防伪编码方法。由于空间分布的随机性,若能有效提取出随机分布在介质上的纳米颗粒的特征信息并进行编码,则可以建立独一无二的防伪模型,只有持有原介质的人才能拍摄到上转换发光信息并通过防伪鉴定。

建立防伪度高,及建模与防伪过程自动化的方法,从建库到防伪识别分为 5 个主要步骤:1) Yb/Er:NaYF₄ 纳米稀土颗粒的制备;2) 防伪图样的制作;3) 防伪图案特征信息的编码;4) 防伪模型库的建立;5) 防伪鉴定。

2.1 制备 Yb/Er:NaYF₄ 稀土纳米颗粒

上转换材料的发光是一种双光子或多光子吸收过程,激活离子吸收两个或多个低能量红外光子,通过无辐射弛豫达到发光能级,进而跃迁到基态发出高能量的可见光光子,也是一种吸收长波进而激发出短波的光致发光现象。稀土离子能级的禁戒跃迁特性,使其具有较长的寿命,进而可以有效实现双光子或多光子效应^[6]。稀土上转换发光材料主要由基质材料提供发光位置^[7-8],由敏化离子扩大吸收光截面面积^[9-10],将吸收的光能通过能量转移传给激活离子,促进激活离子到达激发态,进而跃迁至基态发出可见光^[11]。

基质材料一般为稀土氧化物或氟化物,敏化离子与激活离子一般为稀土离子,而 Yb/Er:NaYF₄ 是一种已知的发光效率较高的上转换发光材料^[12-14]。因此,本文采用 Yb/Er:NaYF₄ 作为上转换发光材料。用激光烧结法合成 Yb³⁺、Er³⁺ 摩尔分数分别为 16%、1.6% 的 Yb/Er:NaYF₄ 材料,并进行压片处理。采用图 1(a)所示的装置图对压片的上转换光谱进行测量,其中 CCD 为图像传感器,测量步骤为:采用 980 nm 的红外光激发上转换发光材料,样品发出红色和绿色的可见光;样品发出的光经透镜会聚后,使用 700 nm 的低通滤光片滤除抽运源的散射光,选出样品受激辐射产生的光;最后采用美国 Ocean Optics 公司生产的 HR4000 光谱仪测量发光光谱,结果如图 1(b)所示。可以看出,Yb/Er:NaYF₄ 材料样品在 980 nm 红外光的激发下,主要产生了波长为 525 nm 和 545 nm 的绿光以及波长为 660 nm 的红光。

采用激光消融法^[15-16],用单脉冲能量为 5 μJ、功率为 2 W 的高功率皮秒脉冲激光器消融稀土压片,持续

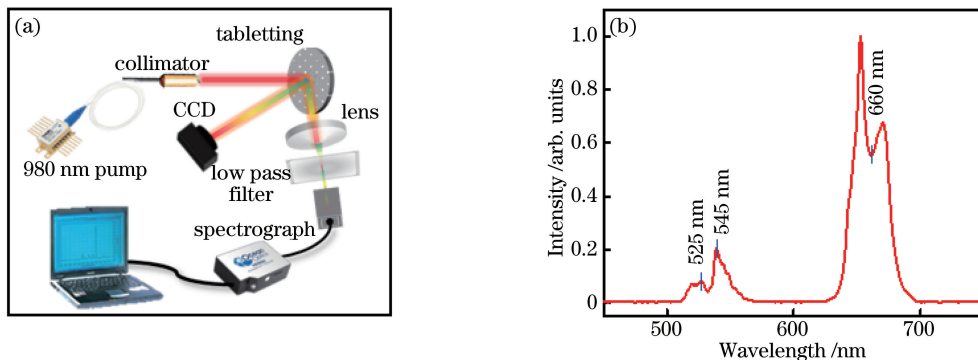


图 1 (a)实验装置示意图;(b) 980 nm 激光激发下的 Yb/Er:NaYF₄ 发光光谱

Fig. 1 (a) Schematic of experimental setup; (b) emission spectrum of Yb/Er:NaYF₄ pumped by 980 nm laser

时间为 5 h, 制备出尺寸在纳米量级、在液体中随机分布的上转换材料 $\text{Yb}/\text{Er}:\text{NaYF}_4$ 。由于浓度较高, 纳米级别的颗粒形成了纳米聚集体, 其发出的光能被肉眼或成像器件识别。

2.2 制作防伪图样

将制备出的含有纳米稀土材料的液体滴在基底上, 并制作出多组防伪图案样张。使用图 1(a) 所示的实验装置, 将压片换成防伪图样。使用 980 nm 抽运源照射激发图样上的上转换材料, 并用 CCD 对防伪图样进行拍摄以便后续处理。稀土材料未被激发时, 图样不显示任何信息; 当其被特定激光激发时, 即可显现出绿色和红色的可见光, 分别由 $^2\text{H}_{11/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ 、 $^4\text{S}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ 、 $^4\text{F}_{9/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ 跃迁产生。其中, 525 nm 和 545 nm 的绿色可见光主要由 Yb^{3+} 与 Er^{3+} 之间的能量转移(ET)、合作上转换(CU)和 Er^{3+} 间的基态吸收(GSA)、激发态吸收(ESA)、交叉弛豫(CR)产生^[17]; 660 nm 的红色可见光则主要由 Er^{3+} 的无辐射弛豫、CR 以及 Yb^{3+} 与 Er^{3+} 之间的能量传递产生^[18-20], 具体的发光能量传递图如图 2 所示。

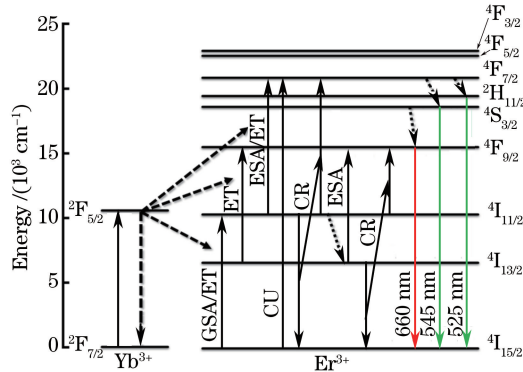


图 2 980 nm 激发下 $\text{Yb}/\text{Er}:\text{NaYF}_4$ 的上转换发光能量传递示意图

Fig. 2 Energy transfer diagram of $\text{Yb}/\text{Er}:\text{NaYF}_4$ upconversion luminescence under 980 nm pumped laser

不同的发光颜色与随机的位置分布组成了独特的防伪样张, 防伪信息不仅包含了激发产生的光的波长, 还涵盖了颜色分布的特征指纹信息, 故防伪图样极难被复制, 可以有效减少造假行为。并且利用所提方案制作出的特征图样稳定性高、抗环境干扰能力强、高温下不易褪色变形, 是一种稳定性极高的防伪图案。经验证, 将防伪图案置于日光下暴晒 2 天, 防伪图案没有变化。

同时, 为了后续的模式分析与处理, 在制作防伪图案时可采用固定形状卡位法控制防伪图案的边界形状, 以便后续对拍摄的图片进行旋转分析。固定形状卡位法是给基底加上特定形状的轮廓, 使稀土纳米颗粒只能分布在轮廓内部的一种方法。卡位轮廓如图 3(a) 所示。

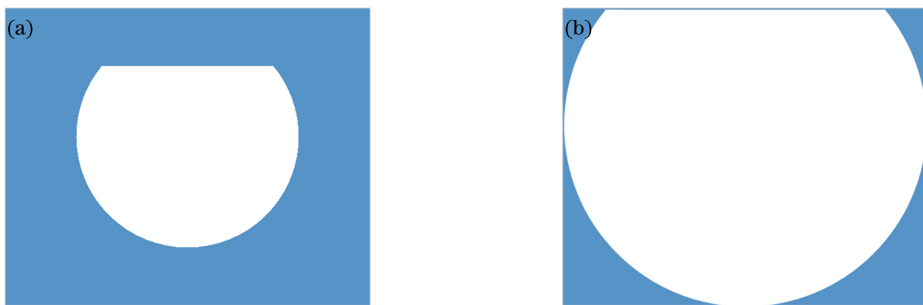


图 3 (a) 防伪图案卡位轮廓; (b) 裁剪后范围示意图

Fig. 3 (a) Outline of anti-counterfeiting pattern; (b) schematic of pattern range after cutting

2.3 防伪图案特征信息的编码

纳米颗粒发光防伪识别是基于防伪图案的空间编码, 即用 980 nm 激光照射激发防伪图案并进行拍摄, 提取拍摄图片的颜色亮度与位置信息, 并进行编码生成图片本身的特征向量。防伪领域特征信息提取的关键是在准确提取特征信息的同时兼顾保密性的要求。

在特征信息提取前, 需要对拍摄的防伪图片进行预处理, 对应的实际处理效果如图 4 所示, 具体步骤如下。

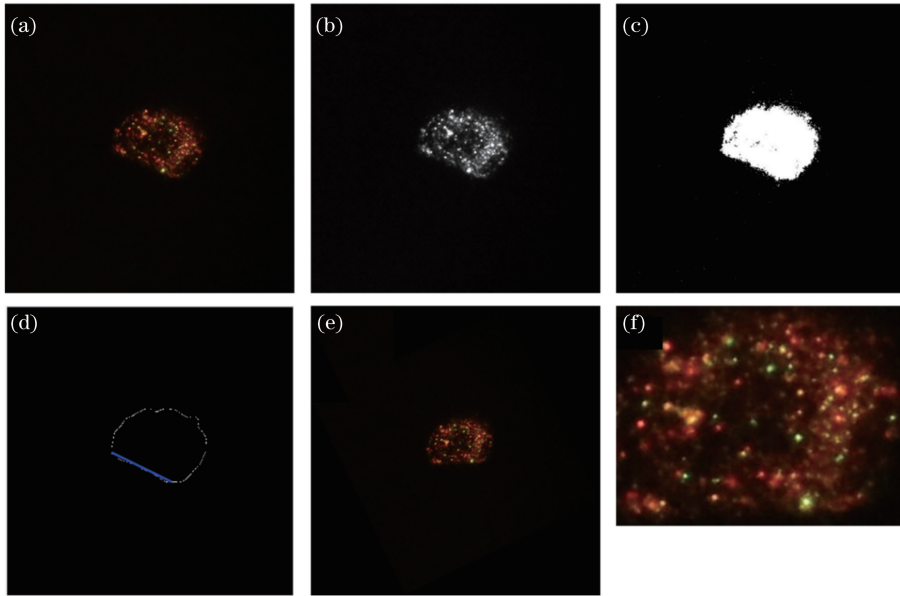


图4 防伪图片预处理效果图。(a)原图;(b)对比度调节;(c)图像二值化;(d) Canny 边缘检测与直线检测;(e)旋转;(f)裁剪
Fig. 4 Pretreatment effect pictures of anti-counterfeiting images. (a) Original image; (b) contrast adjustment; (c) image binarization; (d) Canny edge detection and straight line detection; (e) rotation; (f) clipping

1) 对图片进行灰度处理与对比度调节,使图片中发光区域与背景区域的分界更为清晰。

2) 设置合适的阈值将图片转为二值图片,以二值图片的最大连通区域基本覆盖原图发光区域为宜。

3) 使用 Canny 算子边缘检测法描绘出发光范围边界,由于制作防伪时的“卡位”与前面的二值处理,因此边缘检测结果接近真实边缘。本文中卡位形状为切去一角的圆,故在边缘检测后对边缘进行霍夫变换直线检测,寻找卡位形状中的直线边缘。

4) 根据边缘直线的斜率对原图片进行旋转。

5) 对旋转后的图片进行二值处理,方法与步骤 2) 相同,根据二值图像的边缘对旋转后的图片进行裁剪,使裁剪后的发光区域覆盖整张图片,裁剪效果如图 3(b) 所示。

6) 由于步骤 4) 是根据一条直线的斜率进行旋转,得到的图可能为正立的防伪图案或旋转 180° 后的图案,需再次根据步骤 3) 提取裁剪后图片中的直线,根据直线与上下边缘的距离来判定是否需要再次旋转,如果需要则旋转 180° 。

7) 为了更清楚地识别图片的特征信息,需要对旋转完成的图片再次进行对比度的调整,使图片的特征信息更为明显。

上述步骤即为对拍摄图片的预处理,结束后即可进行图案特征信息的提取。

提取预处理完的图片中的绿色或红色色域,并设置合适的阈值将选定色域转为二值图片,此阈值比步骤 2) 中的阈值高,目的在于提取出主要特征信息对应的特征区域。由前文可知,防伪图片的主要颜色是由 $^2H_{11/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ 、 $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ 跃迁产生的绿光和由 $^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ 跃迁产生的红光,故防伪图片中绿色、红色的颜色亮度与 Yb/Er:NaYF₄ 纳米稀土颗粒的掺杂浓度有关。图 5 所示为特征信息提取示意图,可以看出,绿色色域与红色色域的分布不尽相同,分别设定合适的阈值后,可以提取出相应的亮度信息特征。由于亮度信息与纳米颗粒的掺杂浓度相关,因此采取此种提取方式可以满足防伪图样保密性的要求。

根据提取出的特征区域,由二值图像求出连通区域面积大小,将连通区域的面积从大至小排序,取出前 N 个特征区域。对每个特征区域,计算平均亮度、面积、坐标位置 x 和 y 四种特征信息,并分别对每个特征区域的四种特征信息进行归一化。其中,将亮度和面积的大小归一化到 $0 \sim 1$, x 和 y 则分别按照图片的长与宽进行归一化处理。因为裁剪时按照整体区域边界裁剪,所以按照边界分别对 x 、 y 进行归一化可以消除每次拍摄时长宽比例不一样造成的影响。

最后,将根据图片所选取的 $(4 \times N)$ 个特征信息展开为一维特征向量。至此,防伪信息提取完毕,得到一

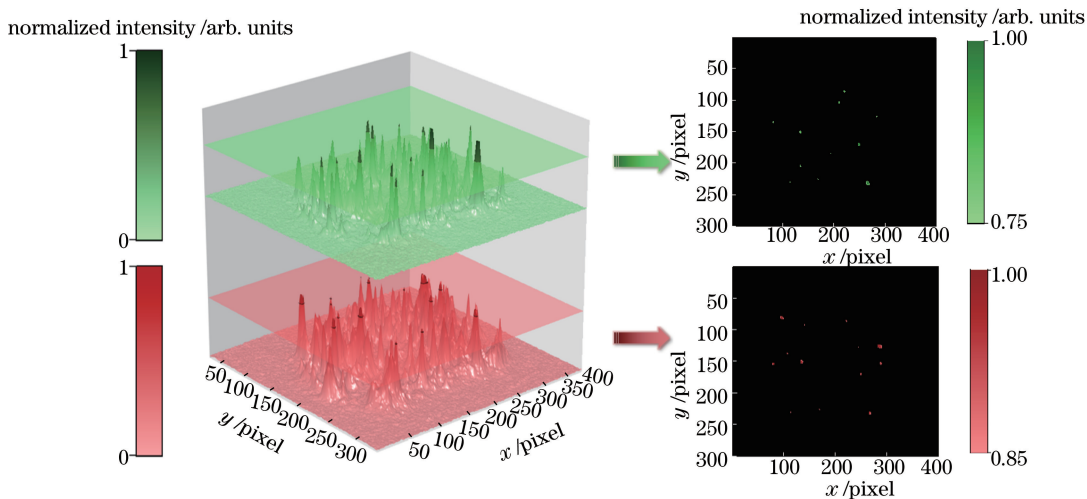


图 5 特征信息提取示意图

Fig. 5 Schematic of feature information extraction

个代表图片发光分布的特征向量,完成了对防伪图样特征信息的编码。

2.4 建立防伪模型库

防伪模型库的建立流程如图 6(a)所示。用 980 nm 激光照射 2.2 小节中制作的防伪图案并进行拍摄。对每一种图案,从不同角度拍摄若干张图片作为训练素材,使用 2.3 小节中的方法处理图片并提取其中的上转换发光强度及位置分布特征信息的编码。对多组图案的图片进行处理后,得到所有图片的由特征向量组成的特征向量组。该特征向量组即是进行支持向量机(SVM)训练的数据。另外生成一列表示各特征向量所属防伪图案的数组作为训练标签。SVM 使用非线性映射将低维不可分的向量组转换为高维特征空间,在高维空间中构造合适的线性超平面,使不同类的数据点间间隔最大,进而完成分类。采用 libsvm3.1 工具箱^[21],使用上述训练数据与标签训练模型,建立防伪模型库。实验中所有流程均用 MATLAB 编写,可实现数据库建立与防伪鉴定的全自动化。

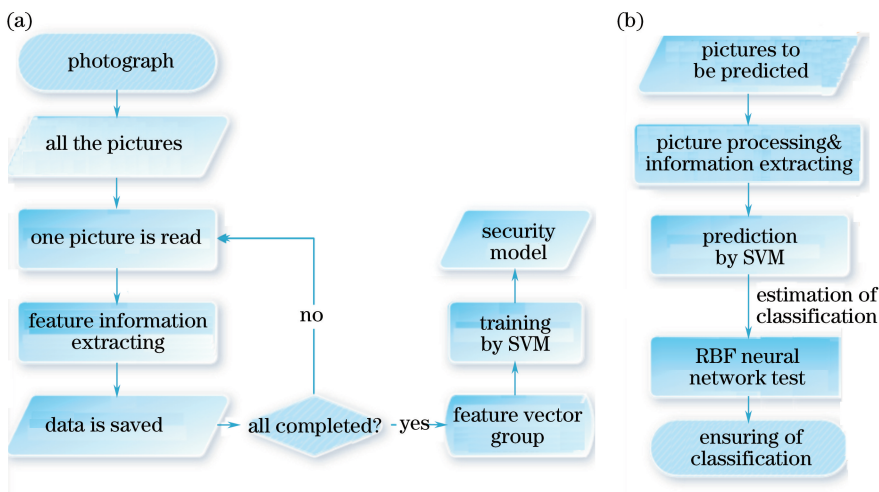


图 6 (a)创建防伪模型流程图;(b)防伪鉴定流程图

Fig. 6 (a) Flow chart of creating anti-counterfeiting model; (b) flow chart of anti-counterfeiting identification

2.5 防伪鉴定

进行防伪鉴定时,只需在 980 nm 激光激发下,对待鉴定图样拍摄一张照片,即可实现图样类别的自动鉴别。采用 SVM 进行分类识别,不仅可以判定出所拍照片是否属于防伪库,还可以判定出其在防伪库中的所属类别。

具体流程如图 6(b)所示。将识别者拍的发光照片(待预测真伪的图片)进行图片处理,并提取发光色彩强度及位置分布特征信息,方法与建立模型库时的方法相同(见 2.2 小节)。然后使用 2.4 小节中建立的模型库进行 SVM 预测,判定该图片在库中的所属类别。在此基础上,对防伪库特征向量组进行 RBF 神经网络训练,以 SVM 的训练数据作为神经网络训练的输入层样本数据 P ,以训练标签即训练数据对应的正确分类作为训练的目标输出 T ,建立 RBF 神经网络模型。将待预测图片的特征信息放入训练完成的模型中,可以得到该图片属于各组的置信度,设置合适的阈值可将防伪库内与库外的特征信息分别映射到 1 与 0^[22]。根据 SVM 的预测结果加上 RBF 神经网络的模拟训练,可以在有效进行库内、库外图样判别的同时,进一步确认待预测图片是否确实属于 SVM 预测分类。

所提建库与鉴定方法均采用 SVM 进行分类与识别,SVM 的高容错率及 RBF 神经网络的辅助判定,大大提高了所提方法的准确度。

3 纳米颗粒发光空间防伪标识方法的使用效果

实验一选择了两个不同的防伪图样,每种图样在不同角度下拍摄 65 张照片。对每个图样取 35 张照片作为模型库建立的训练数据,剩余 30 张作为需进行防伪鉴定的待预测照片,待鉴定照片共 60 张。分别使用 2 张、3 张、……、35 张照片作为建立模型库的训练数据,采用 SVM 进行预测,最终测试结果的准确率如图 7(a)所示。可以看出,随着训练数据的增多,识别准确率会有一定的提升,达到 10 张后,训练准确率趋于稳定,接近 100%。

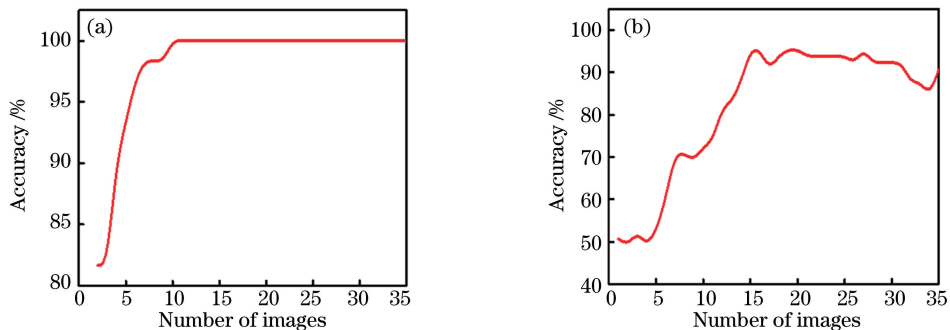


图 7 (a)库内图样识别准确率与建库数据规模间的关系;(b)含库外图样的识别准确率与建库数据规模间的关系

Fig. 7 (a) Pattern identification accuracy inside library versus database size;
(b) pattern-outside-library-contained pattern identification accuracy versus database size

实验二同样选择了两个不同的防伪图样,并分别在不同角度下拍摄 65 张照片。每个图样取 35 张照片作为训练数据,剩余 30 张照片作为待预测数据,再额外添加 5 张不属于任何一个图样的照片作为待预测数据,待鉴定照片共 65 张。分别使用 1 张、2 张、3 张、……、35 张照片作为建立模型库的训练数据,采用 SVM 训练与 RBF 神经网络测试相结合的方式,对图片的类别进行预测的同时,判定图片是否属于已知的防伪模型库,最终测试结果的准确率如图 7(b)所示。可以看出,建库训练数据过少或过多,均会导致防伪鉴定的准确率降低,最佳的建库图片数量为 15~25 张。在本次试验中,建库图片为 15 张时鉴定的准确率最高,为 95.4%。

4 防伪应用

在实际应用中,防伪人员将防伪图案制作在需防伪物品上,利用上述方法在红外光照射下拍摄若干张上转换发光照片并提取特征信息,将此防伪图案的发光分布信息加入数据库。鉴定真伪时,在红外光激发下拍摄照片并提交至数据库,即可完成比对与验证。由于防伪材料在基底上随机分布,即使造假人员获得了真实的防伪照片,也极难通过此照片在其他物品上制作出相同分布的上转换防伪材料。

此外,也可将发光材料印刷为特定的图案,如公司商标、包含物品特定信息的二维码等,先进行初步的图案防伪再结合上述的防伪方式,进而实现多重防伪。

5 结 论

针对传统印刷防伪的不足,设计了一种新型的纳米颗粒上转换发光防伪编码方法。当测试图片均来自库内图样时,方案识别的准确率接近 100%;而当测试数据同时含有库内与库外数据时,识别准确率高达 95.4%。该防伪图样具有稳定性高、不易褪色变形、保存时间久等特点。上转换发光防伪编码方法具有高准确性,在防伪领域有着很好的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Wang F, Han Y, Lim C S, *et al.* Simultaneous phase and size control of upconversion nanocrystals through lanthanide doping[J]. *Nature*, 2010, 463(7284): 1061-1065.
- [2] Fu Y, Shi Y, Xing M M, *et al.* Up-conversion luminescence properties of NaYTiO₄: Yb³⁺, Er³⁺ under 1550 and 980 nm excitations[J]. *Journal of Materials Science*, 2017, 52(1): 408-414.
- [3] Liu Y L, Ai K L, Lu L H. Designing lanthanide-doped nanocrystals with both up- and down-conversion luminescence for anti-counterfeiting[J]. *Nanoscale*, 2011, 3(11): 4804-4810.
- [4] You M L, Zhong J J, Hong Y, *et al.* Inkjet printing of upconversion nanoparticles for anti-counterfeit applications[J]. *Nanoscale*, 2015, 7(10): 4423-4431.
- [5] 徐峰, 林敏, 游民黎. 喷墨打印机用上转换荧光墨水及其制备方法: CN104371424B[P]. 2016-11-23.
- [6] Gai S L, Li C X, Yang P P, *et al.* Recent progress in rare earth micro/nanocrystals: soft chemical synthesis, luminescent properties, and biomedical applications[J]. *Chemical Reviews*, 2014, 114(4): 2343-2389.
- [7] Patzke G R, Zhou Y, Kontic R, *et al.* Oxide nanomaterials: synthetic developments, mechanistic studies, and technological innovations[J]. *Nanotechnology*, 2011, 42(14): 826-859.
- [8] Qiu J, Kawamoto Y. Blue up-conversion luminescence and energy transfer process in Nd³⁺-Yb³⁺-Tm³⁺ co-doped ZrF₄-based glasses[J]. *Journal of Applied Physics*, 2002, 91(3): 954-959.
- [9] Liang L F, Wu H, Hu H L, *et al.* Enhanced blue and green upconversion in hydrothermally synthesized hexagonal NaY_{1-x}Yb_xF₄: Ln³⁺ (Ln³⁺ = Er³⁺ or Tm³⁺) [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2004, 368(1/2): 94-100.
- [10] Wang F, Liu X G. Upconversion multicolor fine-tuning: visible to near-infrared emission from lanthanide-doped NaYF₄ nanoparticles[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2008, 130(17): 5642-5643.
- [11] Ye Shuai, Song Jun, Chen Linchun, *et al.* Research on photoluminescence of Nd³⁺ doped NaYF₄: Yb, Er/Tm upconversion nanoparticles[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(8): 0816005.
叶帅, 宋军, 陈林春, 等. Nd³⁺ 掺杂的 NaYF₄: Yb, Er/Tm 上转换纳米颗粒的光谱分析[J]. *光学学报*, 2015, 35(8): 0816005.
- [12] Zhang H, Li Y J, Lin Y C, *et al.* Composition tuning the upconversion emission in NaYF₄: Yb/Tm hexaplate nanocrystals[J]. *Nanoscale*, 2011, 3(3): 963-966.
- [13] Yi G S, Lu H C, Zhao S Y, *et al.* Synthesis, characterization, and biological application of size-controlled nanocrystalline NaYF₄: Yb, Er infrared-to-visible up-conversion phosphors[J]. *Nano Letters*, 2004, 4(11): 2191-2196.
- [14] Yang F, Guo H, Yang J S, *et al.* Effect of different factors on intensity of up-conversion luminescence of NaYF₄: Yb, Er/Tm [J]. *Materials Review*, 2009, 23(13): 24-27.
- [15] Tomko J, Nadeo J J, Jimenez R, *et al.* Size and polydispersity trends found in gold nanoparticles synthesized by laser ablation in liquids[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2015, 17(25): 16327.
- [16] Nath A, Laha S S, Khare A. Effect of focusing conditions on synthesis of titanium oxide nanoparticles via laser ablation in titanium-water interface[J]. *Applied Surface Science*, 2011, 257(7): 3118-3122.
- [17] Chu Linlin, Li Linjun, Yu Xiaoyang, *et al.* Research progress on the up-conversion continuous wave green laser with the Er³⁺ doped crystal[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(2): 020004.
楚琳琳, 李林军, 于晓洋, 等. Er³⁺ 掺杂晶体绿光上转换连续波激光研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(2): 020004.
- [18] Yang Jianhu, Dai Shixun, Jiang Zhonghong. Upconversion emission of rare earth ions and its recent developments[J]. *Progress in Physics*, 2003, 23(3): 284-298.
杨建虎, 戴世勋, 姜中宏. 稀土离子的上转换发光及研究进展[J]. *物理学进展*, 2003, 23(3): 284-298.

- [19] Yang H G, Dai Z W, Zu N N. UV and visible upconversion luminescence in $\text{Er}^{3+}:\text{YAG}$ under red laser excitation[J]. Chinese Physics B, 2007, 16(6): 1650-1654.
- [20] Li Dongyu, Huang Zhen, Quan Jun, *et al.* Improved upconversion luminescence and temperature sensing performance of $\text{ZrO}_2:\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}/\text{Li}^+$ nanocrystals[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(12): 1206004.
李栋宇, 黄贞, 全军, 等. $\text{ZrO}_2:\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}/\text{Li}^+$ 纳米晶的上转换荧光特性与温度传感研究[J]. 中国激光, 2015, 42(12): 1206004.
- [21] Chang C C, Lin C J. LIBSVM——A library for support vector machines[CP/OL]. (2016-10-18) [2016-12-22]. <http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/libsvm/>.
- [22] Wang Linghui, Wang Yingxin, Liu Yuanyuan, *et al.* Establishment and the usage of terahertz spectral database[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(8): 0815002.
王凌辉, 王迎新, 刘圆圆, 等. 太赫兹光谱数据库的建立和使用[J]. 中国激光, 2012, 39(8): 0815002.