

# 数字图像重压缩检测研究综述

王志锋<sup>1</sup> 朱琳<sup>1</sup> 曾春艳<sup>2</sup> 闵秋莎<sup>1</sup> 夏丹<sup>1</sup>

(华中师范大学数字媒体技术系 武汉 430079)<sup>1</sup> (湖北工业大学电气与电子工程学院 武汉 430068)<sup>2</sup>

**摘要** 随着数字图像处理技术的广泛应用,数字图像处理软件在给人们的生活带来便利的同时,由恶意篡改图像所引发的一系列社会问题也亟待解决,因此能够对图像的真实性和完整性进行判断的数字图像取证技术显得尤其重要。篡改图像必然会经过重压缩这一步骤,因此数字图像重压缩检测能够为数字图像取证提供强有力的辅助依据。文中对数字图像重压缩检测研究进行了系统的梳理,提出了数字图像重压缩检测的技术框架,详细阐述了无损图像压缩历史检测、有损压缩图像双重压缩检测、有损压缩图像多重压缩检测以及其他格式的重压缩检测的取证算法和思路,对现有算法进行了性能分析和评价。然后,总结了图像重压缩检测的应用。最后,分析了数字图像重压缩检测目前存在的问题,并对未来的发展方向进行了展望。

**关键词** 图像篡改,图像取证,双压缩,压缩历史检测

中图分类号 TP391 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.09.003

## Survey on Recompression Detection for Digital Images

WANG Zhi-feng<sup>1</sup> ZHU Lin<sup>1</sup> ZENG Chun-yan<sup>2</sup> MIN Qiu-sha<sup>1</sup> XIA Dan<sup>1</sup>

(Department of Digital Media Technology, Central China Normal University, Wuhan 430079, China)<sup>1</sup>

(School of Electrical and Electronic Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)<sup>2</sup>

**Abstract** With the wide application of digital image processing technology, the softwares of digital image processing have brought more convenience in our work and daily life, but a series of social problems caused by malicious tampered images also need to be solved, so the digital image forensics technology, which can judge the authenticity and integrity of the image, is particularly important. Since tampered images are always accompanied with the process of recompression, recompression detection can provide strong supporting evidence for digital image forensics. This paper systematically analyzed the current research of recompression detection, proposed a general framework for recompression detection, and elaborated the history detection of lossless images compression, double compression detection of loss images, multiple compression detection of lossless images, and recompression detection of other formats. This paper also analyzed and evaluated the performance of the existing algorithms, and then summarized the application of image compression detection. Finally, this paper analyzed the existing problems of recompression detection, and prospected the future development directions.

**Keywords** Image tampering, Image forensics, Double compression, Compression history detection

## 1 引言

随着计算机与数字多媒体技术日新月异的发展,数字图像已逐渐成为人们日常生活中不可或缺的重要媒体之一。随着对数字图像需求的日益增加,智能手机、数码相机、扫描仪等图像生成设备日渐普及,随之发展的数字图像处理技术也被广泛地应用于人们的生活和工作中。现如今,大多数流行的数字图像处理软件如 Photoshop、美图秀秀等都具有高度智能化、操作简便的特点。基于这些特点,不具备任何图像处

理专业知识的普通人也能够轻易地修改、编辑、合成图像。数字图像处理技术的发展给人们的生活带来便利的同时,也引发了一系列潜在的信息安全问题。尽管大多数的图像编辑、合成等操作只是为了使内容美观,或者出于娱乐、工作等目的,但是恶意篡改所带来的社会危害却在持续扩展中。不法分子利用图像处理软件对图像进行恶意篡改,破坏新闻、司法等领域的真实性和公平性,对社会的稳定造成了非常恶劣的影响。恶意篡改的图像正在不断地侵蚀社会的信任体系,因此能够对图像的真实性和完整性做出判断

收到日期:2017-07-03 返修日期:2017-09-16 本文受国家自然科学基金项目(61501199),湖北省自然科学基金(2017CFB683),国家科技支撑计划项目(2015BAK33B02)资助。

王志锋(1985-),男,博士,副教授,CCF会员,主要研究方向为信号处理、机器学习与数据挖掘,E-mail:zfwang@mail.ccnu.edu.cn;朱琳(1993-),女,硕士生,主要研究方向为数字图像处理、数字图像取证;曾春艳(1986-),女,博士,讲师,CCF会员,主要研究方向为信号处理、压缩感知理论与模式识别,E-mail:cyzeng@hbut.edu.cn(通信作者);闵秋莎(1984-),女,博士,讲师,主要研究方向为数字图像处理、三维重建与模式识别;夏丹(1985-),女,博士,讲师,主要研究方向为虚拟现实技术、数字图像处理。

的数字图像取证技术显得尤为重要。

数字图像取证技术作为一个具有前瞻性的研究领域,已经引起了大量国内外科研工作者的关注。数字图像处理技术、人工智能、模式识别、机器学习等学科知识的逐步完善,也给数字图像取证的研究打下了坚实的基础。目前,数字图像取证技术主要分为两类:主动取证和被动取证<sup>[1]</sup>。主动取证需要提前在图像中添加数字水印、数字签名等,而现实中大量的图像事先并未添加这些标记,这使得该类取证方法的可操作性低;相比而言,不需要对图像做预处理的被动取证技术的应用范围更广。实际操作中,图像编辑的最后一步都要重新保存新图像,其中必然会经过重压缩这一过程,因此对数字图像的重压缩检测的研究已经成为数字图像取证中的一个重要分支。数字图像重压缩检测技术的发展时间不长,理论研究和实际应用均处于起步阶段,国内外的研究者还在对特征的提取和匹配等方法进行初步的探索。总体来说,数字图像的重压缩检测技术还未形成一个成熟完整的体系。

本文首先描述了数字图像篡改操作的一般模型以及检测研究的技术框架;然后详细阐述了无损图像压缩历史检测、有损压缩图像双重压缩检测、有损压缩图像多重压缩检测以及其他格式的重压缩检测的取证算法和思路,并简要进行了性能分析和评价;接着介绍了 JPEG(Joint Photographic Experts Group)图像重压缩检测的应用;最后分析了数字图像重压缩检测现存的问题,并对未来的发展方向进行了展望。

## 2 数字图像重压缩检测框架

### 2.1 数字图像篡改操作的一般模型

研究数字图像篡改操作,首先需要分析图像篡改操作的一般模型,如图 1 所示。实际生活中,自然图像大多源自于数码相机或者智能手机等常见数码设备。这些数码设备生成自然图像的过程为:数码设备将自然场景成像,然后进行压缩存储,最后输出自然图像。其中,图像压缩这一步骤分为有损压缩和无损压缩。智能手机默认设置为有损压缩,输出 JPEG 格式的图像;数码相机可以通过设置数码设备的参数,来控制压缩的方式,例如输出无损压缩的 RAW 格式或有损压缩的 JPEG 格式的图像。由于 JPEG 格式是数码设备的常见输出格式,该格式在互联网和生活中应用最为广泛,而被篡改的数字图像往往也是 JPEG 格式,因此假设图 1 所示的操作模型中的图像在相机存储前就进行了第一次压缩,输出 JPEG 格式的图像。

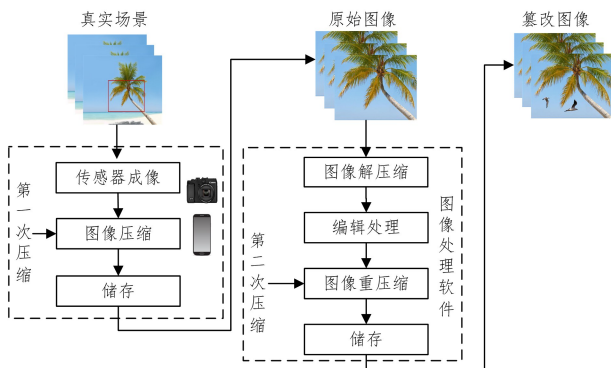


图 1 篡改操作的一般模型

Fig. 1 General model for tamper operation

为了达成某种非法目的,篡改者必然会在 Photoshop 等常用的图像编辑软件中进行操作。篡改者将原始图像在空间域中进行解压缩后对图像进行篡改操作,例如合成、润饰、增强等,最后将篡改后的图像保存为新文件,在“保存”的过程中对图像进行再次压缩,因此重压缩是图像篡改操作中必然会经历的一个过程。由此可知,图像只要经过了重压缩操作就有被篡改的可能性,对重压缩的检测能够为数字图像取证提供支撑性证据。

### 2.2 数字图像重压缩检测的技术框架

针对数字图像重压缩的检测这一研究问题,本文提出了一个基于数字图像重压缩检测的技术框架,如图 2 所示。目前,数字图像重压缩检测的主要研究任务包含以下两个方面<sup>[2]</sup>。

(1)压缩鉴别。该任务的主要目的是判断图像是否经过了两次或多次压缩操作,并据此对图像的真实性进行初步的判定。该过程对进一步确认图像是否经历篡改提供了辅助认证。

(2)量化因子和量化矩阵的估计。计算压缩图像的初次 JPEG 图像压缩量化因子和量化矩阵,得到原始 JPEG 图像的压缩信息,将其作为判断图像中是否存在隐秘信息的重要依据。

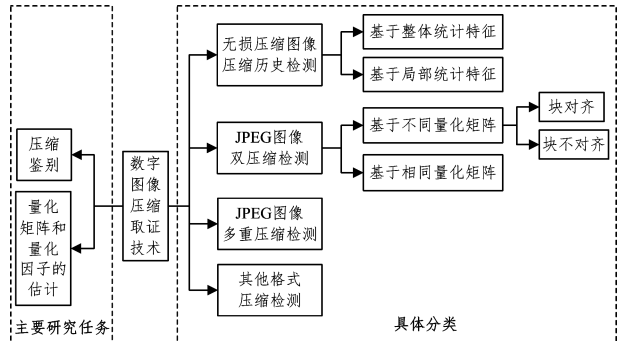


图 2 数字图像压缩取证技术框架

Fig. 2 Technical framework of digital image compression forensics

根据检测过程中待测图像压缩格式的不同,本框架将图像重压缩检测技术具体分为以下 4 类:

- (1)基于无损压缩图像的压缩历史检测;
- (2)基于 JPEG 图像的双压缩检测;
- (3)基于 JPEG 图像的多重压缩检测;
- (4)基于其他格式的压缩检测。

## 3 无损图像压缩历史检测

如上文所述,在现实生活中存在的原始图像大部分是 JPEG 格式。某些情况下,在利用数字图像处理软件对原始图像进行编辑后,为了保留丰富的图像信息,减少压缩所造成的信息丢失,篡改者会将 JPEG 图像进行解压缩操作并保存为比较常见的 BMP 格式(Bitmap)或 TIFF 格式(Tag Image File Format)等无损压缩格式的文件。JPEG 图像被重压缩并保存为 BMP 图像的流程如图 3 所示<sup>[3]</sup>。该操作虽然保证了图像的质量,但是丢失了 JPEG 图像的标头信息,从而使相应的量化矩阵无处可寻,给图像的篡改检测增加了难度。目前,探索无损压缩图像的压缩历史(即判断图像在被保存为 BMP

图像之前是否经过了 JPEG 压缩,并计算该 JPEG 压缩的量化因子)已经引起了相关研究人员的关注。本文根据提取统计特征范围的不同将现有检测方法分为基于全局统计特征和基于局部统计特征两类,其主要特征如表 1 所列,其中识别效果根据对应文献中所述的检测时间和检测效果进行综合考量,记为“一般”“好”“很好”3 个档次。

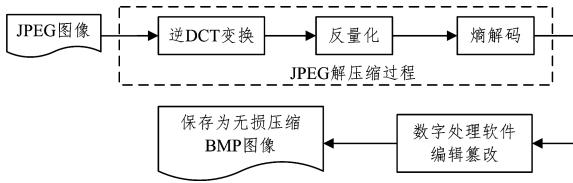


图 3 JPEG 图像被重压缩并保存为 BMP 图像的流程图

Fig. 3 Flow chart of JPEG image being saved as BMP image after recompression operation

表 1 无损压缩历史检测的特征分类

Table 1 Characteristic classification of lossless compression

history detection		
类别	特征	识别效果
全局统计特征	Benford <sup>[7]</sup>	一般
	统计因子直方图 <sup>[3]</sup>	好
局部统计特征	AC 系数 <sup>[8]</sup>	好
	块间差异 <sup>[9-10]</sup>	很好
	网格特征 <sup>[11]</sup>	好

### 3.1 基于全局统计特征的压缩历史检测

基于全局统计特征的压缩历史检测方法是通过对检测图像的某些全局特征,根据特征差异来判断图像是否为经过了 JPEG 压缩的无损压缩图像,并且能够利用该特征得到 JPEG 压缩的量化因子。该方法运算简单且计算量小,能够适应大多数压缩情况,但是对于差异性图像(具有色调单一、整体平滑、复杂纹理等特征的图像)会失效。

Shi 等提出了一个基于 Benford 定律<sup>[4-6]</sup>的新统计模型<sup>[7]</sup>。虽然单压缩图片的量化 DCT(Discrete Cosine Transform)系数的首位有效数字 1-9 的概率分布并没有完全拟合 Benford 定律,但是其遵循一个类似的公式,称之为广义 Benford 定律,如式(1)所示:

$$p(x) = N \log_{10} \left( 1 + \frac{1}{s + x^q} \right), x = 1, 2, \dots, 9 \quad (1)$$

其中,  $N$  是归一化参数,  $s$  和  $q$  是根据不同图像、不同的量化步长所得到的不同的模型参数。图像经过压缩后破坏了上述规律分布,因此可以将其作为判断依据来检测图像是否经过了重压缩。对于该规律在重压缩检测中的应用,文献[7]指出其可以用来检测 BMP 图像是否经过了 JPEG 压缩的操作,并能够粗略地估计出经过重压缩的图像的初次 JPEG 压缩质量因子。检测 BMP 图像压缩历史的具体实验方法是将待检测的图像以 100 作为质量因子进行一次 JPEG 压缩,然后分析得到 JPEG 图像的量化 DCT 系数首位有效数字分布图。如果待测的 BMP 图像之前未进行过 JPEG 压缩,则实验图像在理论上应该满足广义 Benford 模型,因此该方法可以根据此原理进行 BMP 图像的压缩历史检测。但是,其存在一些应用的局限性,因为广义 Benford 定律是一个自然定律,所以数值不能太集中或者分散,一些单一色调或者周期性强的图像就不符合这一规律,并且因图像尺寸过小而导致的样本数量

少也会影响该规律的适用性。对于原始量化因子的估计,文献[7]中的方法利用不同的质量因子重新压缩已经判定为经过了 JPEG 压缩的图像,然后分析其直方图的距离。距离最小的曲线所对应的质量因子数即可被粗略地判定为图像的原压缩质量因子。

Yang 等提出了一种创新的统计因子直方图来估算 BMP 图像的 JPEG 压缩历史<sup>[3]</sup>。在统计意义上,直方图上的 bin 指数的增加将导致对应的因子值单调减小。根据该规律,未经过 JPEG 压缩的 BMP 图像的归一化因子直方图呈单调减小,而经过 JPEG 压缩的直方图不满足该规律,出现了很多非单调的奇异值。基于这些特点提出了基于因子直方图的单调性来确定 BMP 图像的压缩历史的方法,并通过因子直方图中局部最大值的 bin 指数来估计各频率的量化步长。该算法降低了计算量,检测结果相比文献[7]有了明显的提升。

近来,Luo 等<sup>[8]</sup>发现经过 JPEG 压缩的 BMP 图像的 AC 系数分布在阈值  $(-1, 1)$  内的数量比在阈值  $(-2, -1) \cup (1, 2)$  内的数量多得多。该方法的创新点是将上述两者之间的系数比值作为一个一维特征来判断 BMP 图像是否经过了 JPEG 压缩操作。由于存在舍入误差,经过了 JPEG 压缩的图像的 AC 系数与一个给定的频率成分的相应量化步长并不完全成倍数,但是它们大部分都属于范围  $(-1, 1)$ ,通过去除这种舍入效应,提出了一种有效的估计量化矩阵的方法。当 JPEG 图像再次进行压缩时,如果再使用相同的量化表来对原始的 JPEG 图像进行压缩,则最原始的像素将保持不变,此时将压缩质量因子设置为 100(即所有的量化步长均等于 1)。基于这一观察,可以得到一个简单有效的从解压缩的图像提取 JPEG 量化表的方法:假设量化表的范围是已知的,即标准 JPEG 表的质量因子的范围为  $[1, 100]$ ,该方法首先用全部可能的量化表对待测图像  $J_1$  进行再压缩操作,得到它的重压缩版本  $J_2(i), i \in \{1, 2, \dots, 100\}$ 。  $J_1$  的质量矩阵  $QF$  可通过式(2)得到:

$$QF = \arg \max_i (R(J_1, J_2(i))), i = 1, 2, \dots, 100 \quad (2)$$

### 3.2 基于局部统计特征的压缩历史检测

基于局部统计特征的压缩历史检测方法主要是对图片进行分块,通过计算图像的块间差异或者特征判断待测图像是否为经过了 JPEG 压缩的无损压缩图像。相比全局统计特征,该方法能够更好地抵抗差异性图像,但是计算复杂度较高,运算成本增加。

Fan<sup>[9-10]</sup>将每个压缩的图像留下的具有不连续性的跨越块边界作为判断 BMP 图像是否经过了 JPEG 压缩的依据。该方法的原理是:没有经历有损压缩的图像块间的差异应该是类似的,而经历过有损压缩的图像块间的差异明显。计算块内和跨越一个块边界的样本差异,如图 4 所示,对每个块进行如下计算<sup>[9]</sup>:

$$Z'(i, j) = |A - B - C + D| \quad (3)$$

$$Z''(i, j) = |E - F - G + H| \quad (4)$$

其中,字母 A 到 H 与图 4 上的点的像素值对应。该方法首先通过计算获得两个概率直方图,然后计算这两个直方图的绝对差值,最后设定一个经验阈值。通过比较待测图像的绝对差值和经验阈值的大小,即可对图像是否经过了 JPEG 压缩进行判断。针对量化因子的估计,该方法使用 DCT 系数的概

率分布进行最大似然估计来得到原始量化矩阵<sup>[9-10]</sup>。此算法的不足之处在于当量化因子超过 95 时,检测会失效。

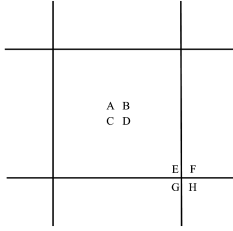


图 4 块内样本和跨越一个块边界的样本的差异

Fig. 4 Differences of interblock samples and samples across block boundary

Neelamani 等提出了一种基于网格的方法<sup>[11]</sup>:首先,设计了一种基于 JPEG 压缩历史的统计算法,并且选择了最大后验估计;然后,在 DCT 系数符合三维六面体网格的情况下,设计了一种基于盲格的 JPEG 图像压缩历史检测算法。盲算法利用 JPEG 图像在压缩过程中对三维晶格近正交基进行了编码,因此采用新的网格算法和最近正交晶格算法进行检测。

### 4 有损压缩图像重压缩检测

JPEG 标准图像压缩格式已经在数码相机和数字图像处理软件等场合中被广泛使用。在现实情况中,篡改者大多会将通过图像处理软件编辑过的图像保存为常用的 JPEG 标准格式,以节省存储空间并保证图像质量。因此,针对 JPEG 图像格式的篡改检测技术的研究已经越来越受到研究者的关注。若待检测的 JPEG 图像被判定为已经经过了重压缩操作,则可以初步得出该图像已被人为篡改的基本结论。JPEG 图像第一次和第二次压缩的量化矩阵不同将导致某些特征出现差异,现有的大部分算法都是据此来进行检测的,但是当两次压缩的量化矩阵相同时,特征差异会消失,算法将失效。因此,本文将有损压缩图像重压缩检测分为基于不同量化矩阵的压缩检测和基于相同量化矩阵的压缩检测。具体特征分类如表 2 所列,其中识别效果根据对应文献中所述的检测时间和检测效果进行综合考量,记为“一般”“好”“很好”3 个档次。

表 2 有损压缩图像重压缩检测的特征分类

Table 2 Characteristic classification of recompression detection of lossy compressed images

类别	特征	识别效果	
不同量化矩阵	周期性偏差 <sup>[12]</sup>	一般	
	量化 DCT 系数 <sup>[13-16]</sup>	分别计算直流-交流系数以及交流-交流系数的差分绝对值 <sup>[17]</sup>	一般
	块对齐	DCT 量化系数直方图的差异 <sup>[14-15]</sup>	好
		压缩前后的 DCT 系数差异 <sup>[16]</sup>	好
	块不对齐	DCT 系数首位有效数字 <sup>[7]</sup>	一般
		首位有效数字 <sup>[7,17-18]</sup>	DCT 系数低频点首位有效数字 <sup>[17]</sup>
相同量化矩阵	基于 markov 模型的 DCT 系数首位有效数字 <sup>[18]</sup>	很好	
	块不对齐	相邻系数差 <sup>[19]</sup>	好
		JPEG 系数百分比 <sup>[21]</sup>	好
	块对齐	量化噪声 <sup>[22]</sup>	很好
扰动阈值 <sup>[23]</sup>		一般	
相同量化矩阵	截断误差和舍入误差 <sup>[24]</sup>	好	
	块属性的收敛 <sup>[25]</sup> (只针对 JPEG-100 的情况)	好	

### 4.1 基于不同量化矩阵的压缩检测

按照首次压缩和第二次压缩的 JPEG 图像的分块 DCT 网格之间的对齐情况,将基于不同量化矩阵的压缩检测细分为基于块对齐的重压缩检测和基于块不对齐的重压缩检测。

#### 4.1.1 基于块对齐的重压缩检测

针对经过重压缩的图像存在一些周期性特征的原理,Popescu 和 Farid 提出了一种新方法<sup>[12]</sup>,该方法通过检测经过了傅立叶变换后的 JPEG 图像的系数直方图所潜在的周期性偏差来判断待测图像是否经历了重压缩的操作。当一幅图像经过了重压缩操作时,直方图上显示出经过重压缩和单压缩后图像所对应的特征存在明显不同,呈现出周期性。对于压缩过程中第一次的量化步长比第二次的量化步长小的情况,该方法得到的检测精度最高;但是当两次压缩操作的量化系数的比值为整数时,直方图将失去周期性特性,从而导致检测失效。由此得知,该方法的应用存在一定的局限性,因为在对 JPEG 图像进行压缩操作的关键步骤——量化的过程中,对于不同的 DCT 系数均采用不同的量化步长,而在实际的操作中第二次量化步长是第一次量化步长整数倍的情况很多,这将导致实验结果出现很大的偏差。

由于上述方法具有局限性,研究者开始考虑从量化 DCT 系数出发来开展图像特征的研究。韩晓东等<sup>[13]</sup>对 9 个 DCT 系数低频点进行差分计算,分别得到直流-交流系数的差分绝对值以及交流-交流系数的差分绝对值的分布,最终得到一个 171 维的特征。文献<sup>[13]</sup>利用支持向量机 SVM(Support Vector Machine)对隐写过程中的二次 JPEG 压缩和载体图像直接得到的二次 JPEG 压缩所引起的 DCT 系数统计规律的变化进行了一个分类判别,进而判断图像是否进行了二次压缩。王浩明等<sup>[14]</sup>从 DCT 量化系数直方图的差异入手,根据篡改图像第一次和第二次压缩的质量因子(分别记为  $QF_1$  和  $QF_2$ ,后同)的不同,将其分为  $QF_1 > QF_2$  和  $QF_1 < QF_2$  两种情况进行讨论。

对于第一种情况,对图像在水平方向和垂直方向进行每隔 4 个像素的  $32 \times 16$  的重叠分块,采用文献<sup>[15]</sup>的方法将待检测的图像缩小 0.98 并利用  $QF_2$  进行压缩得到参考图像,同时计算参考图像的 DCT 系数直方图  $H_r$  和待检测图像 DCT 系数直方图  $H_t$  之间的  $sim$  值,如式(5)所示:

$$sim(H_t, H_r) = \frac{\sum_{u \in R} |H_t[u] - H_r[u]|}{\frac{1}{2} \sum_{u \in R} |H_t[u] + H_r[u]|} \quad (5)$$

经验  $sim$  值可以由大量的实验数据训练得到。如果待测图像经过计算得到的  $sim$  值超过该经验值,即可判定待测图像已经经历了重压缩操作。

对于第二种情况,对图像进行不重叠的  $32 \times 16$  的正常分块,然后进行 DCT 变换,通过观察 DCT 系数的直方图是否满足广义高斯分布或者拉普拉斯分布即可判别待测图像是否经过了重压缩操作。段新涛等<sup>[16]</sup>继续研究 DCT 系数的规律,并发现未篡改区域和已篡改区域经过了压缩存储后的 DCT 系数呈现出不同的特性。其基于贝叶斯准则的理论知识,将经过了双重压缩的图像的效应块和单次压缩效应块的概率值利用后验概率来表示,分别生成对应的图像后验概率密度图;接着对后验概率密度图进行优化,采用粒子群算法设定自适

应阈值,该阈值能够进行分类判断;最后,为了对篡改区域进行检测和分离,通过后验概率密度图来表示。该方法能有效地从篡改图像中定位出篡改区域,其优越性在于不受被篡改图像的位置、大小和个数的限制。

首位有效数字模型在某种程度上能够掩盖量化步长所带来的倍数问题。Fu 等得到了基于 Benford 定律的新统计模型<sup>[7]</sup>,在 3.1 节中已对该模型做了简要介绍。JPEG 图像经过重压缩操作后,破坏了该模型的一般规律,如图 5 所示,因此可以据此来进行图像的重压缩检测。实验结果表明,该方法取得了很好的检测结果。随着研究的进一步发展, Li 等提出利用式(1)表示的广义 Benford 定律对重压缩图像进行篡改检测<sup>[17]</sup>,并经过实验探究得出, DCT 系数的低频部分能够产生更有效的检测结果。因此,该方法将图像划分为不重叠的  $8 \times 8$  块,对每个块分别进行 DCT 变换,仅提取每块 DCT 系数中按照 zig-zag 顺序排序的 20 个 AC 系数低频点进行实验,最终可以得到一个 180 维的特征向量。最后的实验结果表明,该方法能够得到更精确的检测结果。由于 JPEG 图像形成和压缩过程中的 DCT 系数有自相关性,因此个体模型的 DCT 系数的首位有效数字之前也有相关性, Markov 过程是表征数据之间相关性的一种十分有用的方法,故可以利用马尔科夫链拟合基于 DCT 系数的首位有效数字的模型。 Dong 等利用此原理对上述实验进行了进一步的改善<sup>[18]</sup>,利用 Markov 模型将前人提出的一阶特征提升为二阶特征。此方法利用监督学习的方法来对图像进行分类检测,这样虽然增加了实验复杂度,但提高了实验精度。

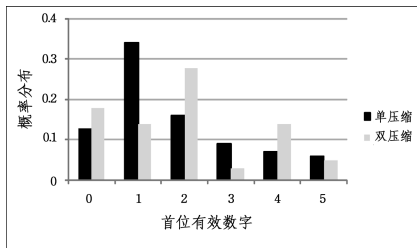


图 5 单压缩图像和对应的双压缩图像的首位有效数字概率分布的对比

Fig. 5 Comparison of probability of first digits for single compressed images and corresponding double compressed images

在对图片进行重压缩时会改变 JPEG 的系数值,从而影响像素的邻域值和系数差的统计特征。 Chen 基于此原理,提出了基于相邻系数差的重压缩检测方法<sup>[19]</sup>。该方法使用了保留大量图像信息的亮度通道,分别利用垂直、水平、主对角线、副对角线这 4 个方向上的 JPEG 系数的 2 维差分矩阵得到 4 个特征向量,并设定阈值范围为  $[-4, 4]$ ,在此基础上对这 4 个特征向量进行 markov 的一步概率转移操作,最后得到一个 324 维的特性向量,并利用 SVM 分类器来判定 JPEG 的重压缩检测率。该方法对于  $QF_1 < QF_2$  的情况效果很差,但是对于  $QF_1 > QF_2$  的情况具有不错的实验效果。朱秀明等<sup>[20]</sup>针对 JPEG 图像经过了压缩后潜在的“方块效应”这一特性进行了进一步的研究。“方块效应”是指在 JPEG 压缩图像的概率分布图的傅里叶变换幅度谱中出现的具有规律性间隔的亮点现象。通过研究发现,待测图像在进行了多次压缩

后,各亮点处的幅度之和占总频谱幅度之和的比例的变化幅度很小;反之,若待测图像没有经过 JPEG 压缩的操作,则该指标将会呈现出明显的变化。因此,给压缩前后得到的比例差值设定一个经验阈值,即可对图像进行篡改检测并分类。该文没有给出经验阈值的提取方法,但是给相关研究提供了一个很好的思路。

#### 4.1.2 基于块不对齐的重压缩检测

Bianchi 等<sup>[21]</sup>对 JPEG 图像的压缩和解压缩过程进行了研究,然后对这两种情况下的熵解码图像和 DCT 系数进行了推导,最后用极大似然估计法来判断待检测图像是重压缩图像还是单压缩图像。对 JPEG 图像进行裁剪操作,得到指定的有效区域,并将其复制到另一个宿主 JPEG 图像上,最后保存为 JPEG 格式。这一系列操作可估计出图像的 JPEG 块网格,篡改区域的 JPEG 块网格与宿主的 JPEG 块网格存在不一致性,该操作被称为非对齐的双重 JPEG 压缩。可以通过估计非对齐的双重 JPEG 压缩图像的移位来识别不同的 JPEG 图像是否经过了重压缩。检测方法基于不同情况下的 JPEG 系数(即量化 DCT 系数)非零百分比,能够更好地定位篡改区域,并能够对常见的篡改情况进行处理,如大小变换、强大的旋转和模糊等,具有优良的鲁棒性。该方法不用指定的图像数据集,也不需要对其进行训练和分类,因此应用范围更广。针对同样的问题, Chen 假定所有的源图像都是 JPEG 格式,并基于 JPEG 图像在空间域的周期性特征,提出了在变换域的篡改检测算法。

基于量化噪声模型, Chen 提出了另外一种创新性的方法<sup>[22]</sup>。该方法采用图像复原技术来解决实际的篡改检测问题。

量化噪声模型如下:

$$Ax = c = c' + n' = c'' + n'' \quad (6)$$

其中,  $A$  代表大小为  $64 \times 64$  的 DCT 组件基础矩阵,  $x$  代表大小为  $8 \times 8$  块的初始强度,  $c'$  和  $c''$  分别代表一次、二次压缩后的量化 DCT 系数向量,  $n'$  和  $n''$  分别是对应的量化噪声。根据量化限制集合理论,得到:

$$c' - \left\lfloor \frac{q'}{2} \right\rfloor \leq c \leq c' + \left\lfloor \frac{q'}{2} \right\rfloor \quad (7)$$

$$-\left\lfloor \frac{q''}{2} \right\rfloor \leq c' - c'' \leq \left\lfloor \frac{q''}{2} \right\rfloor \quad (8)$$

$$-\left( \left\lfloor \frac{q'}{2} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{q''}{2} \right\rfloor \right) \leq c - c'' \leq \left\lfloor \frac{q'}{2} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{q''}{2} \right\rfloor \quad (9)$$

一个 JPEG 图像的压缩次数越多,噪声量化直方图就越趋近于高斯分布。该方法首先根据块效应的原理(偏移块  $b'$  比  $b$  在高序的 AC 中有更多非 0 值,  $b$  和  $b'$  应该仍然有相似的高频信息),对图像进行解块,然后进行低频补偿,此处只补偿低频的 15 个 DCT 系数,最后修正量化噪声模型。

#### 4.2 基于相同量化矩阵的压缩检测

上述方法都基于两次量化矩阵不相同的前提条件,但是对于检测相同的量化矩阵压缩的情况,它们不能有效地描述当图像经过了相同的量化矩阵压缩后所引起的统计数据的轻微偏差。 Huang 等<sup>[23]</sup>提出扰动阈值法来尝试该问题。基于 JPEG 系数在经过连续的同量化矩阵对图像进行压缩

的情况下呈现出的单调减小这一特性,提取经过压缩的测试图片的待测 JPEG 系数,对其应用一个随机扰动策略,判断其为单压缩图像或者重压缩图像。在判定过程中,需要根据经验找到一个合适的随机扰动率,对于不同的图像,这个比率将在一个动态的阈值范围内变化,该方法的重点即为找到这个合适的比率。实验结果表明,对于压缩因子大于 70 的情况,该方法表现良好。Yang 等<sup>[24]</sup>利用图像量化过程中产生的误差提出了一种创新的方法,首先将给定的 JPEG 图像解压缩,形成一个重构图像。该方法分别计算了重构图像的 IDCT (Inverse Discrete Cosine Transformation) 系数和像素值之间的截断误差和舍入误差,并基于此得到误差图像。然后利用误差块,分别提取两个 13 维的特征向量来表征 JPEG 单压缩图像和重压缩图像之间的统计差异。最后使用支持向量机 SVM 判定 JPEG 图像是否经过了重压缩操作。在同等量化因子的条件下,该方法比 Huang 的方法有更好的实验结果。近年来,Lai 和 Böhme<sup>[25]</sup>在压缩质量因子为 100 (JPEG-100) 的情况下对灰度位图进行多次压缩的多压缩检测,提出一个针对 JPEG-100 压缩历史的模型:

$$x^{t+1} = \text{tr}(\lfloor \text{IDCT}(\lfloor \text{DCT}(x^t) \rfloor) \rfloor), t \geq 0 \quad (10)$$

其中,  $x^0$  代表灰度图像的强度矩阵,上标 0 代表图像从未被压缩过;  $\lfloor \cdot \rfloor$  代表舍入;  $\text{tr}(\cdot)$  表示截断的取值范围。DCT 和 IDCT 表示将图像划分成不重叠的  $8 \times 8$  块,然后分别进行 DCT 和逆 DCT 变换。通过块属性的收敛特性对其进行检测。该方法目前仅针对灰度图像的 JPEG-100 压缩检测。

## 5 有损压缩图像的多重压缩检测

篡改者为了达到“天衣无缝”的效果,在图像正式发布前往往都进行了反复的精心编辑。图像在编辑过程中可能经过了多次保存,或者在互联网的传播过程中不断地被各个平台自动压缩。上述这两个因素都导致网络上流传的很多图像已经过了不确定次数的压缩,因此研究多重压缩的检测也是很有必要的。现有的算法大部分都是针对 JPEG 重压缩的篡改检测,但对经历了多重压缩的篡改检测效果不佳。国内外已有数位学者从该问题着手,提出了一些有效的检测方法。

韩洪立等<sup>[26]</sup>主要针对网络上大量存在的低质量图像进行研究,并提出了有效的方法。该方法通过计算单压缩图像和重压缩图像的 DCT 系数中的 DC 系数的量化误差来判断图像的压缩痕迹。文献<sup>[26]</sup>使用了去压缩检测法,结合了 Farid 等<sup>[27]</sup>提到的 JPEG Ghost 对压缩的数据进行恢复,然后再对待测图像进行压缩痕迹的检测,最后不断重复上述实验过程,逐步找到被篡改图像的全部压缩痕迹。该方法能够对 JPEG 图像的多重压缩进行有效的检测,但是对于多次压缩的量化因子很接近的情况容易检测失效。Pasquini 等<sup>[28]</sup>提出通过 BF (Benford-Fourier) 系数的平均值来进行数字图像多重压缩篡改检测,并且估计出对应的量化因子。该方法的主要思想是通过给出的 BF 系数的统计特征,得到图像被压缩一次或者多次的概率,并通过预测误差来计算条件概率值,从而进行量化因子的估计。该方法的检测效果很好,但是依赖于数据库的训练。

## 6 其他格式的重压缩检测

随着图像压缩技术的发展,不断有新的图像压缩技术出现在大众的视野中并发挥着更优越的性能。支持透明背景的 PNG (Portable Network Graphics) 无损压缩格式、支持动态图像的 GIF (Graphics Interchange Format) 无损压缩格式、国际 JPEG 委员会制定的全新的无损/有损压缩并行的 JPEG2000 格式等,均已在移动和网络环境下被广泛使用。研究这些新兴图像压缩技术的篡改检测,可以为篡改检测技术的发展打下基础。目前已有研究者对 JPEG2000 格式的重压缩篡改检测提出了一些有效的检测方法。

JPEG2000 格式是以小波变换为基础的静止图像编码标准<sup>[29-30]</sup>,满足了用户对高压压缩率和压缩图像的互动性和可伸缩性的要求;使用一个统一的压缩结构对图像分量进行无缝压缩,每个分量的深度高达  $1 \sim 32 \text{ bit}$ <sup>[31]</sup>;支持无损压缩和有损压缩这两种模式的相互转换,支持“兴趣度”的计算以及对感兴趣区域进行自由编码;对错误编码的鲁棒性性能更强。JPEG2000 压缩及解压过程如图 6 所示<sup>[32-36]</sup>。

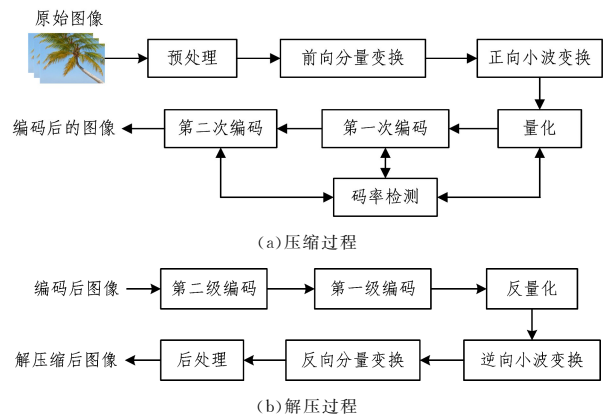


图 6 JPEG2000 压缩及解压过程

Fig. 6 Compression and decompression processes of JPEG2000

王海英<sup>[37]</sup>基于 JPEG 图像重压缩后的 DWT (Discrete Wavelet Transform) 系数的统计特性进行重压缩检测。在图像的重压缩过程中,图像的第二次压缩是针对图像的第一次压缩熵解码之后的数据进行的操作,因此对各子带码块的位平面编码这一步骤会出现二次比特截断(比特截断可以理解为将原始数据量化成偶数)的现象,从而使得第一次压缩时子带的 DWT 系数的奇数个数相对于偶数个数会有明显的减少(此特征现象主要出现在第二次压缩码率小于第一次压缩码率的情况下,反之则表现不明显)。该方法利用 Daubechies (9,7) 小波基进行 5 级小波分解,因为 DWT 系数的非零值会随着频率的增加而减少,而且高频子带有很多无效的零值会对观察数据的特性产生消极的影响。此处只观察了 5HL, 5LH, 4HL, 4LH 子带的直方图及各自对应的傅里叶变换后的直方图。通过观察发现,经过二次压缩的子带 DWT 系数的直方图相对于一次压缩的直方图,出现零值数据点的个数存在明显的差异,还出现了偶数点变多且相邻奇数点变少的现象。因为该特征所表现出的周期性并不是很明显,所以使用较大的峰值所引起的极差(极差是指用峰值点的数据减去傅里叶变换后的最小模值所得到的差值)现象来进行篡改检测。

凡昭<sup>[38]</sup>受前人提出的对 JPEG 图像重压缩的检测方法的启发,提出了一种基于空域的马尔科夫特征的盲检测算法。文献[38]讨论了 DCT 域和空域中 JPEG2000 图像的两次压缩的特征值分布情况,检测方式与文献[21]相似。此方法将待测图像与自身向不同的 4 个方向的位移图像做差值;然后使用马尔科夫模型对差值矩阵进行建模,并使用转移概率矩阵刻画二阶统计特性;最后使用支持向量机 SVM 对图像数数据库的特征向量进行训练和检测。该方法对第二次压缩质量高于第一次压缩质量的情况有较好的实验效果。

周超等<sup>[39]</sup>结合 LOCP(Local Ordinal Contrast Pattern)特征提出一种创新的检测法。首先对图像进行离散小波变换,得到 3 个高频边带(分别记为 LH,HL,HH),并分别对 3 个高频边带提取对应的 LOCP 特征,然后对其进行直方图统计,计算得出基于 LOCP 特征的向量。将上述 3 个 256 维的 LOCP 特征向量合并为 768 维的特征向量,并将其作为该图像的特征向量,然后使用支持向量机 SVM 对其进行训练和分类。最后的检测结果相对于上述两种方法有一定提升,但是对于  $QF_1 > QF_2$  的情况仍没有改进。

## 7 图像重压缩检测的应用

### 7.1 合成图像的篡改检测

在对图像进行篡改操作的过程中,复制-粘贴是常见的手段,篡改图像保存为新文件时会经历图像压缩过程。假设原始图像为未压缩图像,经历复制-粘贴操作后,宿主图像只经历了一次压缩,复制-粘贴块则经历了二次压缩。相关研究者针对此特性,利用图像重压缩的特征来检测合成图像。

Qu 等<sup>[40]</sup>提出了移位重压缩的概念。根据合成图像中的复制-粘贴块边缘在经历了再次复制后会产生重压缩特性这一原理,利用独立向量分析法分析独立值分布图的对称性,最后判断图像是否经过了移位重压缩操作。该方法针对图像的二次压缩质量因子较高的情况表现出略高的准确率,但是并不能很好地应对存在复制-粘贴的操作手段而区域不明确(可能经过了边缘模糊等常见篡改操作)的情况。因此,该方法的局限性在于只能对图像是否经过了重压缩进行判断,而对复制-粘贴区域的准确定位失效。赵洁<sup>[41]</sup>根据该原理进行了一些改进,提出一种偏移量估计法。首先对复制区域和篡改区域的 JPEG 重压缩偏移量的平均信息损失量进行了计算,然后根据各区域不同的重压缩偏移量来对复制区域和篡改区域进行判定和区分,最后对复制-粘贴区域 SAM(SAM 是一个  $8 \times 8$  的矩阵,此矩阵的每个元素和 SAM 块像素点的值一一对应,峰值点位置是纯白色亮点)的峰值点的位置进行统计计算,这样就可以有效定位篡改区域。此方法引入 HSI(Hue, Saturation, Intensity)彩色图像特征对 SIFT(Scale-Invariant Feature Transform)特征点匹配进行了优化,具有较强的鲁棒性。

He 等<sup>[42]</sup>基于 JPEG 图像的 YUV 通道的 DCT 系数和量化矩阵的压缩效应,分别构建了 Y,U,V 这 3 个通道的 DCT 系数,因为高频部分的大部分数值为 0,所以实际上是每个通道的低频直方图,通过检测每一个  $8 \times 8$  块的 DCT 系数直方图在整体直方图中所占的比例来生成篡改块的概率分布直方图。利用这些直方图,可以通过融合概率给出该块的正态性。

然后,对正态图进行映射,取一个经验阈值来区分可能篡改的块和未篡改块。通过这样的操作,能够生成待测图像的 4 维特征向量。最后,使用支持向量机 SVM 进行分类决策。该方式不适用于异源复制-粘贴图像和经历了低质量压缩因子的图像。

### 7.2 图像源识别

在对图像进行源识别之前,有一个关键的步骤——估计原始量化步长。对于如何估计位图的量化步长,Lukás 等率先提出了一种有效的估计原始量化矩阵的方法<sup>[43]</sup>,基于此方法,还能判断图像是否为重压缩图像。此方法只选择了 DCT 系数中的低频部分,找到了每个  $8 \times 8$  块的 JPEG 系数(即量化 DCT 系数)联合的概率分布直方图,重压缩图像的“双峰值”或“缺失值”等统计性偏差被用来作为检测的基准。该方法不适用于两次量化因子相同的情况。在两次量化因子不同时,被压缩图像的 JPEG 系数呈现出若干个峰值,而单压缩图像所对应的直方图呈平滑状态。文中建议首先估计选定的低频量化步骤,然后再应用神经网络分类器,并利用其余的一些标准矩阵的低频步骤来估计系数,从而得到所需的初级量化矩阵。接着,Fridrich 还提出了一种新的估计原始量化矩阵的方法<sup>[44]</sup>。首先计算图像中特定区域的所有 DCT 系数绝对值的概率分布直方图,将其定义为  $h_0$ ;接着将图像分割为指定像素大小,以此来打乱 JPEG 图像的块结构;然后利用候选量化矩阵  $Q^{1,1}, \dots, Q^{1,n}$  对图像进行压缩;最后将  $n$  个 JPEG 文件解压缩,再用量化矩阵  $QF_2$  进行量化,从  $n$  个重压缩 JPEG 图像文件中得到直方图  $h(Q^{1,1}), \dots, h(Q^{1,n})$ 。最终,原始量化矩阵可被估计为  $QF_1 = \arg \min_{Q^{1,m}} \| h(Q^{1,m}) - h_0 \|$ 。

有损 JPEG 压缩是通过利用不同的压缩量化表来控制压缩量实现的。由于不同的数码相机采用不同的压缩量化表,且相机的压缩量化表与图像处理软件的压缩量化表不同,如果能够得到图像压缩量化表,对比已知相机数据库,即可确认图像的来源。根据该理论,Farid<sup>[45]</sup>对 10153 种不同品牌、不同型号的相机的压缩量化表进行了详细的分类,此方法为图像的重压缩检测和原始量化表估计提供了一种全新的思维方式。当判断一幅图像是否经过了重压缩操作时,可以对其原始量化表进行估计,对比相机的原始量化表即可准确地判断出图像来源。随着人们对数字图像处理软件应用的普遍,Kornblum<sup>[46]</sup>对市面上存在的各种比较热门的图像软件的量化表建立了一个数据库 Calvin,该库包括 100 个标准量化表、扩展标准量化表、Photoshop 中所包含的量化表等总共 13 个量化表。用户可以将未知来源的图像量化表放进 Farid 和 Kornblum 的库中,如果图像的量化表和他们提供的量化表一致,则图像极有可能已经被篡改。

### 7.3 图像隐密分析

信息隐藏技术在当前已经成为各大研究所的研究热点,现阶段流行的隐写算法 F5<sup>[47]</sup>和 OutGuess<sup>[48]</sup>等都会经历 JPEG 图像的再压缩过程,因此图像重压缩对于信息隐藏也是一种重要的初判手段。戴蒙<sup>[49]</sup>提出可以对待测图片进行重压缩的检测,该检测结果可以作为图像是否被隐写的辅助证据。该文提出基于抖动模式的检测方法。首先将原始图像的 AC 系数定义为  $k$ ,该系数理论上满足 Laplacian 分布或者

广义高斯分布,第一次和第二次压缩后的 AC 系数分别记为  $k_1, k_2$ 。如果重压缩前后  $k_2 > k_1$ ,则可以判断出重压缩图像的分布必定呈抖动模式,反之也成立。根据系数直方图上是否有突起的抖动点来判断图像是否经过了 OutGuess 隐写的二次压缩。Pevny<sup>[50]</sup> 构建的盲分类器能够检测 JPEG 图像是否经过了隐写操作,并且能够分类出 6 类流行的 JPEG 隐写嵌入算法。该分类方法包括一个重压缩检测法和两个独立的隐密分类法。首先将待测图像进行重压缩检测,若判定该图像为重压缩图像,则将其进行特定的隐密分析,反之则进行普通的隐密分析。对于该算法,图像重压缩检测的准确性将直接影响到隐密分析的准确性,这间接说明了重压缩检测的重要性。李星<sup>[51]</sup> 则利用本文第 2 节所述的 DCT 系数的首位有效数字特征,结合图像的全局 DCT 系数直方图、单频率系数直方图、块内系数的共生矩阵特征、空域块效应这 4 个方面,分别提取对应的特征向量并进行联合,最后使用支持向量机 SVM 构造隐写算法的分类检测器。实验结果表明,该方法优于前述方法,并具有较强的鲁棒性。

## 8 数字图像重压缩检测研究未来展望

在数字图像广为应用的多媒体时代,针对数字图像重压缩检测技术的研究在规范图像多媒体市场秩序、司法认证等方面都具有十分重要的社会意义。虽然现有科研工作者已经在图像的重压缩检测领域取得了一定的科研成果,但是该领域还处于依靠基础理论、方法零散、应用局限性大的初级阶段。目前存在的不足主要集中在:基于图像统计特性的取证算法过于依赖训练样本和分类器的选取;大部分算法的鲁棒性都不高,难以满足实际应用的要求;取证算法往往需要预先训练,对于常见的盲检测性能不佳;对于相同量化矩阵、多重压缩等情况,暂还没有很好的解决办法;大部分取证的方法都没有一个统一的衡量标准。因此,数字图像重压缩检测技术的研究在未来还有很广阔的空间。

数字图像重压缩检测技术的研究发展方向可以总结为以下几个方面。

### (1) 为数字图像重压缩检测建立统一的模型

未来的数字图像重压缩检测应该主要集中在对统一模型的建立上,可以建立以下两个方面的模型。

1) 生成模型。该模型主要有两类:①对不同型号的数码相机、手机等设备所生成的自然图像进行分类;②对不同数字图像处理软件中的压缩操作、不同数字图像压缩格式对数字图像统计特征的不同影响建立一个生成模型,在不同的生成模型下对待测图像是否经过了重压缩操作进行检测。

2) 取证模型。该模型通过不同算法的检测方式,例如特征分类、经验值判断、融合方式等,分别建立对应的模型,并在取证模型中对待测图像进行重压缩检测。

### (2) 提升算法的可扩展性与融合性

现有的大部分算法依赖于图像的统计特性,而统计特性依赖于一定大小的图像和实验样本,并且基于图像统计特性的取证算法往往过分依赖于训练样本和分类器的选取,这些条件在实际中是很难达到的,从而限制了其应用范围。上文提到的大部分算法的正确率和检测率都没有达到 100%,尤

其是针对第二次压缩比第一次压缩的量化因子小的情况,很多算法的效果都不理想。

此外,大部分算法的鲁棒性都不高,很多算法只能针对简单的图像进行重压缩操作,当图像发生了旋转、放大或缩小等常见的篡改行为时,这些算法便会失效。对于相同量化矩阵、多重压缩检测等问题,目前还没有很完善的解决方案,需要更多的算法研究来填补这一空白。

最后,现在已经提出了很多有效的特征或者算法,但是所针对的对象各有侧重。可以考虑如何对这些已有的成果进行优化,例如将检测过程中得到的特征向量进行特征融合、特征降维等操作,通过扩大有效特征维数和降低特征冗余等手段得到高的检测率。优化目标是对算法进行科学的改进,以降低算法的时间复杂度,提高检测结果的正确率。

### (3) 深化理论研究,扩展实际应用范围

很多取证算法都需要大量的源图像进行预训练,但在实际应用中由于无法预知被篡改区域的图像来源,这些取证算法的检测效果并不能达到预期,因此应该尽可能地提出不依赖于训练数据库的数字图像重压缩盲检测技术。在实际的取证应用中,大多数情况下并不知道待测图像经过了何种篡改,并且图像篡改的手段往往不止一种。有些篡改手段,例如重采样、模糊、添加白噪声等,会破坏图像空域或者频域的特征,这就限制了很多依靠特征来进行检测的算法的应用,如何攻克这一难点也是目前相关研究者所面临的难题。

此外,很多算法都是利用提取训练数据库得到的经验值来对未知待测图像做出是否经过篡改的判定,但是经验值的选取往往没有任何系统理论支持,仅仅是基于实验中的经验选取,不具有很强的说服力,因此在检测中应该尽量避免主观人为设定经验值,寻求科学依据。只有不依靠经验设定和主观因素的方法才能得到广泛的应用。未来可以关注深化理论研究这一个研究点,使经验值的选取有理有据,具有可用性和可扩展性。

在算法的应用扩展方面,图像、声音、视频等多媒体的某些特性是息息相关的,可以考虑将检测图像重压缩中使用的一些特征或者算法应用到视频、声音取证的领域,扩展特征和算法的应用范围。对于一些隐写模式,例如比较流行的 F5 和 OutGuess,如果输入的宿主图像原始也为 JPEG 图像,那么其也能够产生重压缩图像,数字图像重压缩取证的检测结果可以作为图像是否被隐写的辅助证据。因此,在隐密图像的检测领域,对待测图像的重压缩检测也可以作为一个重要的研究出发点。

### (4) 制定数字图像重压缩检测的统一标准

目前,对数字图像重压缩检测没有统一的标准。现有方法很多都是使用自创的数据库或者某些开源数据库,这些图像可能来自于不同的数码设备。由于训练样本和测试样本不同,这些差异性的耦合度较低,将导致同一算法在不同的图像数据库中产生不同的检测结果,因此无法比较各算法间的优劣,对于实验结果的判定没有一个统一的标准模型。同样,对于不同的常用图像格式,例如 JPEG, PNG, GIF, JPEG2000 等,都是使用单独的算法来检测,没有一个能够适应大部分格式的通用算法。因此,今后的发展重心应该是建立权威性的

数据库标准和基于通用格式的算法模型。

(5)结合最新的研究成果,探索新的重压缩取证理论体系  
近年来,由于信息与计算机等领域研究的快速发展,一些与重压缩取证研究相关的领域也在不断创新方法和手段。目前发展迅猛的深度学习、计算机视觉、统计机器学习、云计算、大数据等都能够为数字图像重压缩检测这一研究领域提供有价值的参考。已有相对数量的算法在检测阶段使用了支持向量机 SVM 等统计机器学习的方法,并取得了比前人更有效的检测结果。随着研究的进一步深入,一定有更优秀的机器学习算法(如卷积神经网络、深度神经网络和深度堆叠网络等深度学习方法)应用在图像重压缩的取证领域来取得更高的检测精度。

**结束语** 针对近年来数字图像重压缩检测的相关研究,本文进行了系统的梳理,首先提出了数字图像重压缩检测的技术框架,并总结了无损图像压缩历史检测、有损压缩图像双重压缩检测、有损压缩图像多重压缩检测以及其他格式的重压缩检测的取证算法和思路,对现有算法进行了性能分析和评价。接着总结了图像重压缩检测的应用。最后分析了数字图像重压缩检测现存的问题并对未来的发展方向进行了展望。

### 参考文献

- [1] ZHOU L N. Study of Digital Forensics Based on Image Content. [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2007. (in Chinese)  
周琳娜. 数字图像盲取证技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2007.
- [2] GUO Y P. Compression History Analysis and Detection of Digital Image[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009. (in Chinese)  
郭一平. 数字图像压缩历史的分析与检测[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- [3] YANG J, ZHU G, HUANG J, et al. Estimating JPEG compression history of bitmaps based on factor histogram[J]. Digital Signal Processing, 2015, 41(C): 90-97.
- [4] HILL T P. A Statistical Derivation of the Significant-Digit Law [J]. Statistical Science, 1995, 10(4): 354-363.
- [5] NEWCOMB S. Note on the Frequency of Use of the Different Digits in Natural Numbers[J]. American Journal of Mathematics, 2014, 4(1): 39-40.
- [6] BENFORD F. The Law of Anomalous Numbers[J]. Proceedings of the American Philosophical Society, 1938, 78(4): 551-572.
- [7] FU D, SHI Y Q, SU W. A generalized Benford's law for JPEG coefficients and its applications in image forensics[J]. Proc Spie, 2007, 6505(1): 58-61.
- [8] LUO W, HUANG J, QIU G. JPEG Error Analysis and Its Applications to Digital Image Forensics[J]. IEEE Transactions on Information Forensics & Security, 2010, 5(3): 480-491.
- [9] FAN Z, DE QUEIROZ R L. Identification of bitmap compression history: JPEG detection and quantizer estimation[J]. IEEE Transactions on Image Processing A Publication of the IEEE Signal Processing Society, 2003, 12(2): 230-235.
- [10] FAN Z, QUEIROZ R D. Maximum likelihood estimation of JPEG quantization table in the identification of bitmap compression history[C]// International Conference on Image Processing. IEEE, 2000: 948-951.
- [11] NEELAMANI R, QUEIROZ R D, FAN Z, et al. JPEG compression history estimation for color images[J]. IEEE Transactions on Image Processing A Publication of the IEEE Signal Processing Society, 2006, 15(6): 1365-1378.
- [12] POPESCU A C. Statistical Tools for Digital Image Forensics [D]. Hanover: Dartmouth College, 2004.
- [13] HAN X D, PING X J, ZHANG T. New Detection Algorithm of Double Compression in JPEG Image[J]. Computer Engineering, 2010, 36(4): 140-143. (in Chinese)  
韩晓东, 平西建, 张涛. 一种新的 JPEG 图像二次压缩检测算法[J]. 计算机工程, 2010, 36(4): 140-143.
- [14] WANG H M, YANG X Y. Detection Method for JPEG Image Based on the Difference of DCT Coefficient Histograms[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2014, 46(1): 41-46. (in Chinese)  
王浩明, 杨晓元. 一种基于 DCT 系数直方图差异的 JPEG 图像篡改检测[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2014, 46(1): 41-46.
- [15] WANG J W, LIU G J, DAI Y W, et al. A New Method for Estimating the Primary Quantization Step of JPEG Double-Compression[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(4): 836-839. (in Chinese)  
王俊文, 刘光杰, 戴跃伟, 等. 一种估计 JPEG 双重压缩原始量化步长的新方法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(4): 836-839.
- [16] DUAN X T, PENG T, LI F F, et al. Blind Separation of Tampered Images Based on JPEG Double Compression Properties [J]. Journal of University of Jinan (Science and Technology), 2017, 31(2): 87-96. (in Chinese)  
段新涛, 彭涛, 李飞飞, 等. 基于 JPEG 重压缩特性的篡改图像盲分离[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2017, 31(2): 87-96.
- [17] LI B, SHI Y Q, HUANG J. Detecting doubly compressed JPEG images by using Mode Based First Digit Features[C]// IEEE Workshop on Multimedia Signal Processing, 2008. IEEE, 2008: 730-735.
- [18] DONG L, KONG X, WANG B, et al. Double Compression Detection Based on Markov Model of the First Digits of DCT Coefficients[C]// Sixth International Conference on Image and Graphics. IEEE Computer Society, 2011: 234-237.
- [19] CHEN C, SHI Y Q, SU W. A Machine Learning Based Scheme for Double JPEG Compression Detection[C]// 2008 19th International Conference on Pattern Recognition. IEEE, 2008: 1-4.
- [20] ZHU X M, XUAN G R, YAO Q M, et al. Re-sampling detection in information forensics [J]. Computer Applications, 2006, 26(11): 2596-2597. (in Chinese)  
朱秀明, 宣国荣, 姚秋明, 等. 信息取证中图像重采样检测[J]. 计算机应用, 2006, 26(11): 2596-2597.
- [21] BIANCHI T, PIVA A. Detection of Nonaligned Double JPEG Compression Based on Integer Periodicity Maps [J]. IEEE Transactions on Information Forensics & Security, 2012, 7(2): 842-848.
- [22] CHEN Y L, HSU C T. Detecting Recompression of JPEG Images via Periodicity Analysis of Compression Artifacts for Tampering Detection[J]. IEEE Transactions on Information Forensics & Security, 2011, 6(2): 396-406.
- [23] HUANG F, HUANG J, SHI Y Q. Detecting Double JPEG Compression With the Same Quantization Matrix[J]. IEEE Transac-

- tions on Information Forensics & Security, 2010, 5(4): 848-856.
- [24] YANG J, XIE J, ZHU G, et al. An Effective Method for Detecting Double JPEG Compression With the Same Quantization Matrix[J]. IEEE Transactions on Information Forensics & Security, 2014, 9(11): 1933-1942.
- [25] LAI S Y, BÖHME R. Block convergence in repeated transform coding: JPEG-100 forensics, carbon dating, and tamper detection [C]// IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. IEEE, 2013: 3028-3032.
- [26] HAN H L, LI Y Z, NIU S Z, et al. Detecting Compression Traces in Multiple JPEG-Compressed Image[J]. Journal of Applied Sciences-Electronics and Information Engineering, 2014, 32(6): 596-604. (in Chinese)  
韩洪立, 李叶舟, 牛少彰, 等. 多重 JPEG 压缩图像的压缩痕迹检测[J]. 应用科学学报, 2014, 32(6): 596-604.
- [27] FARID H. Exposing Digital Forgeries From JPEG Ghosts[J]. IEEE Transactions on Information Forensics & Security, 2009, 4(1): 154-160.
- [28] PASQUINI C, BOATO G, PEREZ-GONZALEZ F. Multiple JPEG compression detection by means of Benford-Fourier coefficients[C]// IEEE International Workshop on Information Forensics and Security. IEEE, 2014: 113-118.
- [29] PENNEC E L, MALLAT S. Sparse geometric image representations with bandelets[M]. New York, IEEE Press, 2005.
- [30] JIANG Y X, ZHONG Z F, WANG L W. A wavelet coding preprocessing algorithm based on Bayesian estimation for image compression[C]// International Conference on Machine Learning and Cybernetics. IEEE, 2005: 5467-5472.
- [31] WAKIN M B, ROMBERG J K, CHOI H, et al. Wavelet-domain approximation and compression of piecewise smooth images[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(5): 1071-1087.
- [32] SONG T, GUO S X, LI W. JPEG2000 and Realization of Its Coding System Theory [J]. Modern Electronics Technique, 2005, 28(9): 47-49. (in Chinese)  
宋涛, 郭树旭, 李伟. JPEG2000 及其编码系统的实现[J]. 现代电子技术, 2005, 28(9): 47-49.
- [33] ZHANG D, ZHANG M, ZHANG J, et al. Novel algorithm for context-adaptive variable length coding[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2006, 40(5): 783-786. (in Chinese)  
张丁, 张明, 张瑾, 等. 一种新的自适应变长码编码算法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2006, 40(5): 783-786.
- [34] CHEN K F, LIAN C J, CHEN H H, et al. Analysis and architecture design of EBCOT for JPEG-2000[C]// IEEE International Symposium on Circuits and Systems. IEEE, 2001: 765-768.
- [35] 孙延奎. 小波分析及其应用(重点大学计算机教材)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [36] TAUBMAN D. High Performance Scalable Image Compression with Ebcot[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9(7): 1158.
- [37] WANG H Y. Detection Doctored Images Based on Double JPEG 2000 Compression [D]. Tianjin: Tianjin University, 2008. (in Chinese)  
王海英. 基于 JPEG2000 双压缩的图像篡改检测[D]. 天津: 天津大学, 2008.
- [38] FAN Z. The Research of Forged Image Detection Aiming at Splicing and Double JPEG2000 Compression [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011. (in Chinese)  
凡昭. 面向拼接与 JPEG2000 双压缩的篡改图像检测研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
- [39] ZHOU C, XU S S, HUANG Y L, et al. JPEG2000 Secondary-Compression Detection based on LOCP Feature[J]. Information Security and Communications Privacy, 2014, 12(11): 97-100. (in Chinese)  
周超, 徐赛赛, 黄豫蕾, 等. 基于 LOCP 特征的 JPEG2000 二次压缩检测[J]. 信息安全与通信保密, 2014, 12(11): 97-100.
- [40] QU Z, LUO W, HUANG J. A convolutive mixing model for shifted double JPEG compression with application to passive image authentication [C]// IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. IEEE, 2008: 1661-1664.
- [41] ZHAO J, GUO J C, ZHANG Y, et al. Automatic detection and localization of image forgery regions based on offset estimation of double JPEG compression[J]. Journal of Image and Graphics, 2015, 20(10): 1304-1312. (in Chinese)  
赵洁, 郭继昌, 张艳, 等. JPEG 图像双重压缩偏移量估计的篡改区域自动检测定位[J]. 中国图象图形学报, 2015, 20(10): 1304-1312.
- [42] HE J, LIN Z, WANG L, et al. Detecting Doctored JPEG Images Via DCT Coefficient Analysis [C]// European Conference on Computer Vision. Springer-Verlag, 2006: 423-435.
- [43] LUKÁŠ J, FRIDRICH J. Estimation of primary quantization matrix in double-compressed JPEG images[C]// Proceedings of Digital Forensic Research Workshop. 2003: 5-8.
- [44] FRIDRICH J, GOLJAN M, DU R. Steganalysis based on JPEG compatibility[J]. Proc Spie, 2001, 4518: 275-280.
- [45] FARID H. Digital Image Ballistics from JPEG Quantization: TR 2006-583[R]. Dartmouth College, 2008.
- [46] KORNBLUM J D. Using JPEG quantization tables to identify imagery processed by software[J]. Digital Investigation, 2008, 5(Suppl): S21-S25.
- [47] WESTFELD A. F5-A steganographic algorithm: High capacity despite better steganalysis [J]. Fourth Information Hiding Workshop, 2001, 2137(1): 289-302.
- [48] PROVOS N. Defending against statistical steganalysis[C]// Conference on Usenix Security Symposium. USENIX Association, 2001: 24-24.
- [49] DAI M, LIN J J, MAO J F. The Analysis and Detection of Double JPEG Compression[J]. Journal of Image and Graphics, 2006, 11(11): 2599-2602. (in Chinese)  
戴蒙, 林家骏, 毛家发. JPEG 二次压缩的分析与检测[J]. 中国图象图形学报, 2006, 11(11): 2599-2602.
- [50] PEVNY T, FRIDRICH J. Determining the stego algorithm for JPEG images[J]. Information Security IEE Proceedings, 2006, 153(3): 77-86.
- [51] LI X, ZHANG T, HE Z Y, et al. Multi-class Steganalyzer with Recompression Detection for JPEG Images[J]. Journal of Applied Sciences, 2013, 31(2): 190-196. (in Chinese)  
李星, 张涛, 何赞园, 等. 结合重压缩检测的 JPEG 图像多类隐写分析[J]. 应用科学学报, 2013, 31(2): 190-196.