

文章编号:1009-3087(2014)01-0041-06

一种基于 DCT 系数直方图差异的 JPEG 图像篡改检测

王浩明¹,杨晓元^{1,2*}

(1. 武警工程大学 密码与信息安全保密武警部队重点实验室,陕西 西安 710086;2. 武警工程大学 网络与信息安全研究所,陕西 西安 710086)

摘 要: JPEG 图像是人们日常接触最广泛的图像格式,因此对此类图像的篡改检测有着更加重要的意义。以 JPEG 图像篡改压缩后篡改区域相当于一次压缩为理论基础,研究了一次压缩和双 JPEG 压缩的基本原理,分析了质量因子 Q_1 、 Q_2 之间的大小关系对双压后图像 DCT 系数直方图统计特性所引起的变化,并分 2 种情况对图像进行分块求其 DCT 系数直方图,根据不同的方法判定图像块经过了一次还是二次压缩,从而在此基础上提出了一种基于 DCT 系数直方图的 JPEG 图像篡改检测算法。实验表明,该算法不仅运算复杂度低,而且对篡改区域有很好的检测和定位效果。

关键词: 图像取证;JPEG 压缩;直方图

中图分类号: TP391

文献标志码: A

Detection Method for JPEG Image Based on the Difference of DCT Coefficient Histograms

WANG Hao-ming¹, YANG Xiao-yuan^{1,2*}

(1. Key Lab. of Cryptology & Info. Security Under the Chinese Armed Police Force, Eng. Univ. of the Chinese Armed Police Force, Xi'an 710086, China; 2. Inst. of Network & Info. Security, Eng. Univ. of the Chinese Armed Police Force, Xi'an 710086, China)

Abstract: JPEG format of images is the most widely used image format in people's daily life, so the tamper detection on this kind of image has a more important significance. Under the theoretical basis that the tampered area in the compressed JPEG image is equivalent to one compression, the basic principles of one and double compressed JPEG image were researched. The influence of the size of relationship between quality factors Q_1 and Q_2 on the histogram of DCT coefficients of the double compressed image was analyzed, and two cases were carried out to find its histogram by the image block DCT coefficients. Then different methods were used to determine whether the image block was compressed once or twice. Finally, image tamper detection algorithm for JPEG image based on DCT coefficients histogram was proposed. Experiments showed that the algorithm is not only low computational complexity, but also has a good detection and location results.

Key words: image forensics; JPEG compressed; histogram

随着高精度数码产品的大众化普及以及 Photo-shop 等图像编辑和处理工具的飞速发展,不管是专业的还是非专业的用户为了达到虚构事实、掩人耳目等目的,都可以轻而易举地造出非常逼真的篡改图像。由此以来,对数据图像的篡改和伪造检测问题已经变成一个急需解决的问题,正是在此背景下,数字图像取证技术应运而生,成为当下众多学者及科研机构研究的一个热门领域。

数字图像取证技术主要分为主动取证和被动取证,主动式取证技术是预先对数字图像嵌入数字水印或签名,通过提取水印、签名的手段进行取证。但是目前绝大多数的数字图像没有事先嵌入水印,水印的嵌入也会在一定程度上影响数字图像的质量,并且图像的攻击和篡改也会使水印产生失真。相比之下,数字图像被动取证技术作为一种在不依赖任何预签名提取或预嵌入信息对图像的真伪和来源进行鉴别的技术,只需要取证方的参与就可以实施取证,即被动数字图像取证是直接依据媒体本身进行鉴别的,不需要事先对数字图像做任何预处理,实用性更强。

收稿日期:2013-06-20

基金项目:陕西省自然科学基金资助项目(2012JM8014);国家自然科学基金资助项目(61379152)

作者简介:王浩明(1986—),男,助教,硕士.研究方向:数字图像处理. E-mail: wanghaomingwj@126.com

* 通信联系人 E-mail: xyangwj@126.com

JPEG 图像作为目前各类数码设备最广泛支持及网络中最流行的一种图像格式,针对 JPEG 图像篡改的盲检测的研究具有非常重要的实际意义。目前针对 JPEG 图像的检测技术主要集中在二次压缩特性及块效应检测等方面。基于二次压缩特性检测技术的理论依据是不同的量化系数所形成的周期效应,而基于块效应的检测技术则是因为在压缩过程中不同的压缩质量因子造成的块效应不同。He 和 Lin 等^[1]通过分析图像 DCT 系数的双重量化效应实现图像篡改的检测。Fridrich 等^[2]最先提出了一种估计 JPEG 双重压缩原始量化步长的方法。Ye^[3]和李晟^[4]等则用一次压缩的质量因子对图像进行再压缩,通过篡改区域的压缩失真会大于非篡改区域的方法,实现 JPEG 图像的篡改检测。Farid^[5]则采用不同的质量因子对待检的 JPEG 图像进行再压缩,当压缩质量因子与篡改区域的质量因子相同时,在篡改区域产生的失真最小,由此来实现对篡改区域的检测。Li 等^[6]采用提取块效应网格的不匹配特性来实现对篡改区域的定位,但对篡改区域的识别需要人工完成。

作者以 JPEG 图像篡改压缩后篡改区域相当于一次压缩为理论基础,通过分析 JPEG 图像经过一次压缩和二次压缩质量因子大小与 DCT 系数直方图之间关系,分 2 种情况对图像进行分块求其 DCT 系数直方图,根据不同的方法判定图像块经过了一次还是二次压缩,从而实现对篡改区域的检测与定位。特别是在二次压缩质量因子比一次压缩质量因子小时,DCT 系数直方图在文献[1]中所述的周期模式并不是很明显^[7],因此采用文献[8]中对待检图像缩小 0.98 来近似原始未压缩图像的方法,生成只经过一次压缩的参考图像的直方图,然后计算该直方图与原始图像 DCT 系数直方图之间的相似值来判定一次还是二次压缩,从而提出了一种新的 JPEG 图像篡改检测算法,实验证明此方法有效。

1 预备知识

给出所需的一些分析假设与基本概念、原理,主要有篡改区域不具有二次压缩特性的分析,一次和二次 JPEG 压缩原理及其直方图效果分析。

1.1 篡改区域不具有二次压缩特性分析

在一幅 JPEG 图像经过双压缩以后,特别在二次压缩质量因子大于一次压缩质量因子时,DCT 系数直方图具有明显的零值和双峰现象。在一幅

JPEG 篡改图像中包括篡改部分和非篡改部分,那么非篡改部分可以认定为经过了双压缩,篡改部分则可以认定为经过了一次压缩,不具有双压缩的一些特性,主要有以下几个原因:

1) 如果篡改部分从无损格式图像中复制粘贴过来,没有经过第一次 JPEG 压缩过程,则认定为一次压缩。

2) 如果篡改区域来自于原始图像本身或从另外的 JPEG 图像,篡改者更加注重内容形式上的统一,从而无暇顾及篡改区域的 DCT 块和原始图像中非篡改区域 DCT 块位置上的对应关系。如果 DCT 块间不能相互对应,DCT 和 IDCT 就不能进行互逆的变换,这就造成了篡改区域相当于只经过了一次压缩。当然,这些 DCT 块也有可能凑巧相互对应,但其发生概率仅为 1/64,可以忽略。

3) 如果对篡改区域或其边缘进行羽化、平滑、缩放等操作,那么这些边缘块就不可能包含完整的 8×8 像素,因此这些边缘块相当于只经过了一次压缩。由于以上几个因素,导致被篡改部分失去了双压缩特性,相当于只经过了一次压缩。

1.2 JPEG 压缩原理及流程

JPEG 压缩是一种有损压缩,主要由预处理、DCT 变换(离散余弦变换)、量化、Huffman 编码等流程构成。它利用了人的视觉系统的特性,采用有损编码和无损编码相结合来去掉视角不敏感的数据和数据本身的冗余信息,将人眼敏感的数据保留,以达到相对于人眼视觉特性而言,基本保持图像不变。而且通过提高数据列的信息熵,实现提高压缩编码效率。

JPEG 解压缩过程是将 JPEG 图像数据恢复到压缩编码前的图像数据。如图 1 所示,整个过程基本上为压缩过程的逆过程,主要包括 Huffman 解码、反量化、IDCT(反离散余弦变换),然后将 YUV 颜色空间转换为 RGB 颜色空间,并将一个个 8×8 的数据块按顺序存储,实现图像 JPEG 的解码过程。JPEG 压缩与解压缩框图如图 1 所示。

1.3 二次 JPEG 压缩原理及直方图分析

1.3.1 二次 JPEG 压缩原理

双 JPEG 压缩是对原始图像分别使用不同的量化矩阵 M_1 (一次量化矩阵) 和 M_2 (二次量化矩阵) 进行二次 JPEG 压缩。当且仅当 $M_1 \neq M_2$ 时,DCT 系数 D_{ij} 才被认为是经二次压缩^[9],具体压缩过程如图 2 所示。

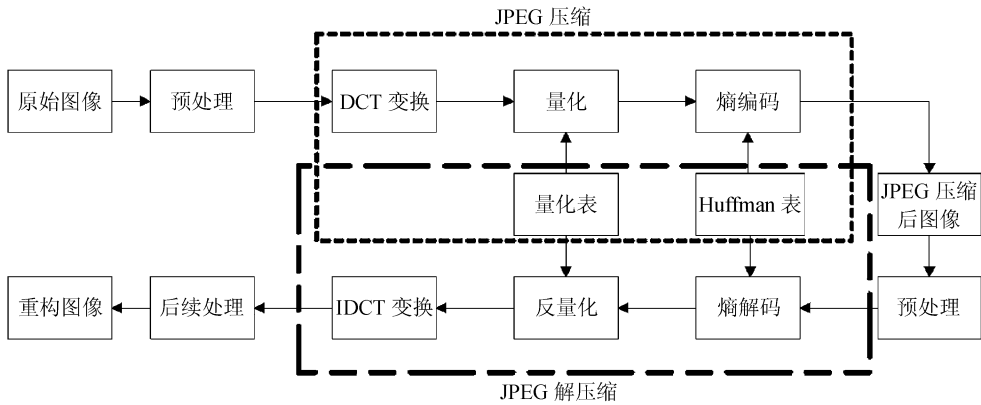


图1 JPEG 压缩与解压缩过程

Fig.1 Process of JPEG compression and decompression

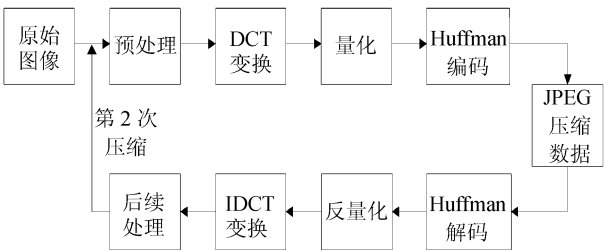


图2 双 JPEG 压缩过程

Fig.2 Process of Double JPEG compression

1.3.2 二次压缩 DCT 系数直方图分析

假设 k_1 为第1次压缩的 AC 系数, k_2 为第2次压缩的 AC 系数,它们的量化表和对应的量化质量因子分别为 $q_1、q_2、Q_1、Q_2$ 。

$$k_2 = \text{round}\left[\frac{k_1 \cdot q_1}{q_2}\right] \tag{1}$$

round 为量化取整,令 $r = q_1/q_2$ 。所以在 k_1 已知 的情况下, k_2 由 r 决定。式(1)等价于

$$k_2 - 0.5 \leq rk_1 \leq k_2 + 0.5 \tag{2}$$

假如 $k_2 = k_1$,则式(2)等价于

$$k_1 - 0.5 \leq rk_1 \leq k_1 + 0.5,$$

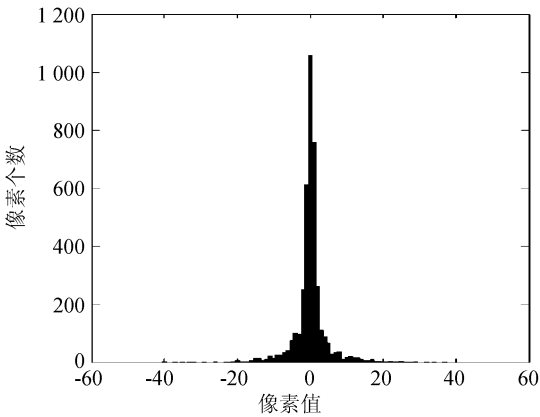
并且一定成立。

通过分析计算,令上式成立 r 的取值范围为 $[0.95,1.05)$,因此引起 k_1 和 k_2 关系发生变化的取值范围可以划分成3个区间: $r_1 \in (0,0.95), r_2 \in [0.95,1.05), r_3 \in [1.05,100)^{[7]}$ 。

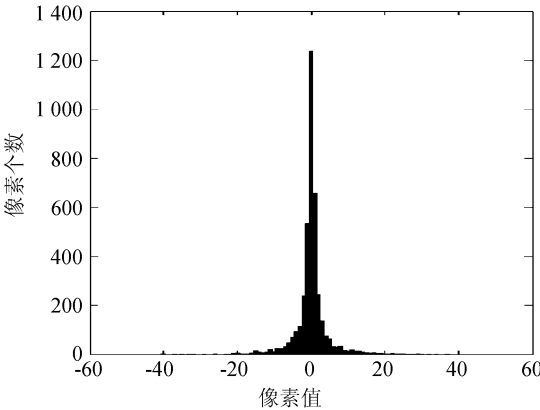
情况1:当 $r = r_1$ 即 $Q_1 > Q_2$ 时的检测方法。

对于此类篡改图像,其二次量化系数大于一次量化系数,二次量化后的 DCT 系数直方图应周期性的出现极大值和极小值,但作者通过大量实验及参照文献[7]中的研究结果,发现这种周期性在直方图中并不是很明显,其 DCT 系数直方图仍然近似于广义高斯分布。所以在此情况下,不能以此来判断图像块经过了一次压缩还是二次压缩。图3(a)为

Lena 未压缩图像经过 $Q_1 = 85、Q_2 = 50$ 压缩后 DCT 系数 D_{10} 处的直方图,图3(b)为 $Q_1 = 50$ 压缩后 DCT 系数 D_{10} 处的直方图。通过对比发现,2幅图像的 DCT 系数直方图并没有本质的区别,都近似于广义高斯分布。



(a) $Q_1=85 \rightarrow Q_2=50$



(b) $Q_1=50$

图3 一次和二次压缩在 DCT 系数 D_{10} 处的直方图对比

Fig.3 Contrast of DCT coefficient histograms at D_{10}

between one and double compressions

下面给出针对此类图片的检测方法:

1) 读取待检测图像的头文件,获得质量压缩因子,其 DCT 系数直方图记为 H_i 。

2) 采用文献[8]中对待检图像缩小 0.98 来近似原始未压缩图像的方法, 对图像进行缩小并使用步骤 1) 中获得的质量因子进行压缩, 生成参考图像, 记其 DCT 系数直方图为 H_r , 然后根据式(3) 计算参考图像的直方图 H_r 与待检图像直方图 H_l 之间的 Sim 值。图 4 给出了通过对原始待检图像缩小 0.98 来近似原始未压缩图像实际效果。图 4(a) 是原始未压缩的 512×512 灰度 Lena 图, 首先进行 $Q_1 = 88, Q_2 = 55$ 的压缩, 然后对其进行 0.98 的缩小, 再进行 $Q_2 = 55$ 压缩得到的 DCT 系数 D_{10} 处的直方图, 图 4(b) 是原始图像直接进行 $Q_1 = 55$ 压缩的 DCT 系数 D_{10} 处的直方图。从图中可以看到这种操作是一种较好的近似方法。

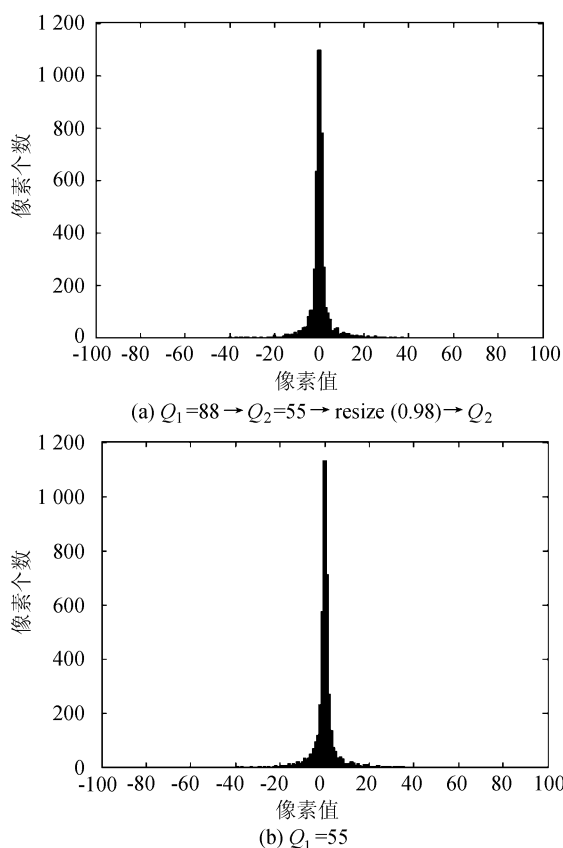


图 4 DCT 系数直方图分析

Fig. 4 DCT coefficient histograms analysis

3) 通过实验设定阈值, 如果 Sim 值小于一个给定的阈值, 就可认为存在双重压缩^[8]。如果大于阈值则判定图像只经过了一次压缩。

$$sim(H_l, H_r) = \frac{\sum_{u \in R} |H_l[u] - H_r[u]|}{\frac{1}{2} \sum_{u \in R} |H_l[u] + H_r[u]|} \quad (3)$$

情况 2: 当 $r = r_3$ 即 $Q_1 < Q_2$ 的检测方法。

当待检测图像属于情况 2 时, 如果待检测图片

经过了双压缩, DCT 系数直方图必出现零点和双峰现象, 如图 5 所示。如果图像没有经过一次压缩, 则其 DCT 系数直方图满足广义高斯分布或 Laplacian 分布。

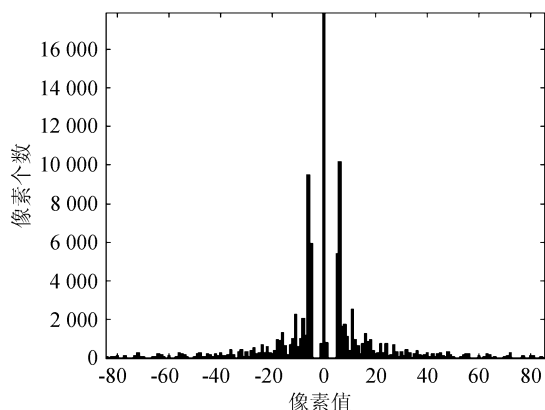


图 5 $Q_1 = 55, Q_2 = 90$ 的 DCT 系数直方图

Fig. 5 DCT coefficient histogram of $Q_1 = 55, Q_2 = 90$

2 JPEG 图像篡改检测算法

通过研究 JPEG 图像的一次和两次压缩在 DCT 系数直方图上的差别, 特别是在二次压缩质量因子大于一次压缩质量因子时, DCT 系数直方图有明显的 0 值与双峰现象。即使是二次压缩因子比一次压缩质量因子小, 在 DCT 系数直方图差别不大的情况下, 在 1.3.2 节中提出了针对此类情况的解决方法, 因此, 将 JPEG 篡改图像的检测转化成对图像子块的一压和双压的判别, 从而实现对篡改区域的定位。具体检测流程图见图 6。

图 6 中标注的情况 1 和 2 为第 1.3 节中所设定的情况。事先假设待检测图像为已知的篡改图像, 并且篡改区域是一个连通的区域并且面积应保持在一个合理的范围, 不能太小^[10]。

具体算法描述如下:

Step1: 对待检测图像压缩因子的判断。如果整幅图像 DCT 系数直方图满足 Laplacian 分布或广义高斯分布或近似满足以上分布, 则认定此图像满足情况 1。如果直方图有明显的双峰及零值现象, 则认定此图像的压缩因子满足情况 2。

Step2: 首先当双压缩前后质量因子满足情况 1 时, 对图像在水平和垂直方向进行每隔 4 个像素的 32×16 的重叠分块, 当质量因子满足情况 2 时进行 32×16 正常分块, 根据 1.3.2 节中提出的方法, 对分属于不同情况的图像采用不同的检测算法, 排除具有明显二次压缩特性的块, 找出一压的块并设定为疑似的篡改区域。

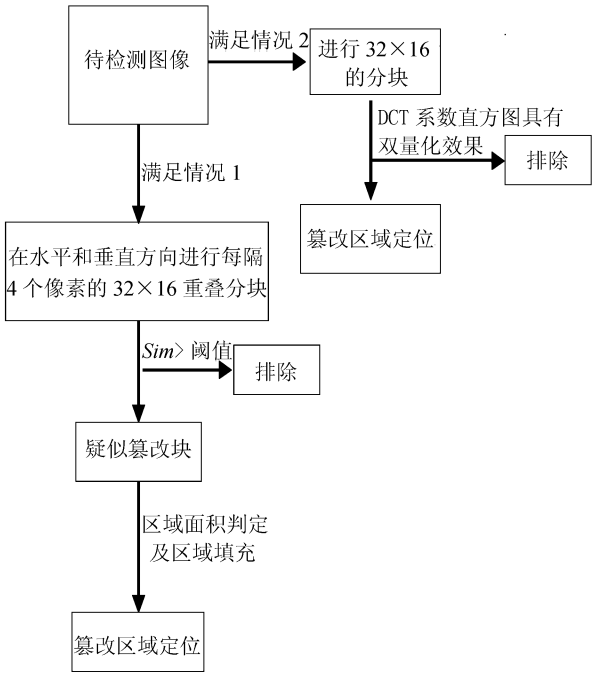


图 6 算法流程图

Fig.6 Flow diagram of algorithm

Step3:通过区域填充和区域面积阈值等手段完成最终的篡改区域定位,并通过二值法进行显示。

3 实验结果与分析

实验中所选取彩色的 JPEG 图像,实验平台为 Windows 7 操作系统,双核 2.1 GHz,内存 3 GB,编程环境为 Matlab 2008。用 Photoshop 对数字图像根据不同的压缩因子进行篡改和存储,应用本文算法对其进行检测。检测结果如图 7 所示。

本文算法的核心就是对图像块的一次压缩和双压缩的判定。为了对算法的有效性进行检测,共收集了 110 幅来自于不同相机的 JPEG 照片,并且为了更好地满足本文算法对图像质量压缩因子的要求,特地把所有图像转换成原来尺寸的 90%,并以 BMP 格式保存,然后先在 Matlab 2008a 里使用压缩因子 Q_1 对 BMP 图像进行压缩,随后用 Photoshop 软件对其进行篡改,最后再使用压缩因子 Q_2 对篡改后的图像进行再压缩。二次压缩前后所采用的压缩因子满足情况 1 和 2,并且 $|Q_1 - Q_2| \in \{5, 10, 15, 20\}$,则总共生成图像 880 幅,使用本文算法进行检测,结果见表 1。在实验中,检测率由式(4)计算得:

$$R_d = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \frac{D_i \cap E_i}{E_i} \tag{4}$$

其中, D_i 和 E_i 分别表示在图像 i 中检测出的篡改区域及真实的篡改区域, n 表示图像的总数,在此 $n = 110$ 。

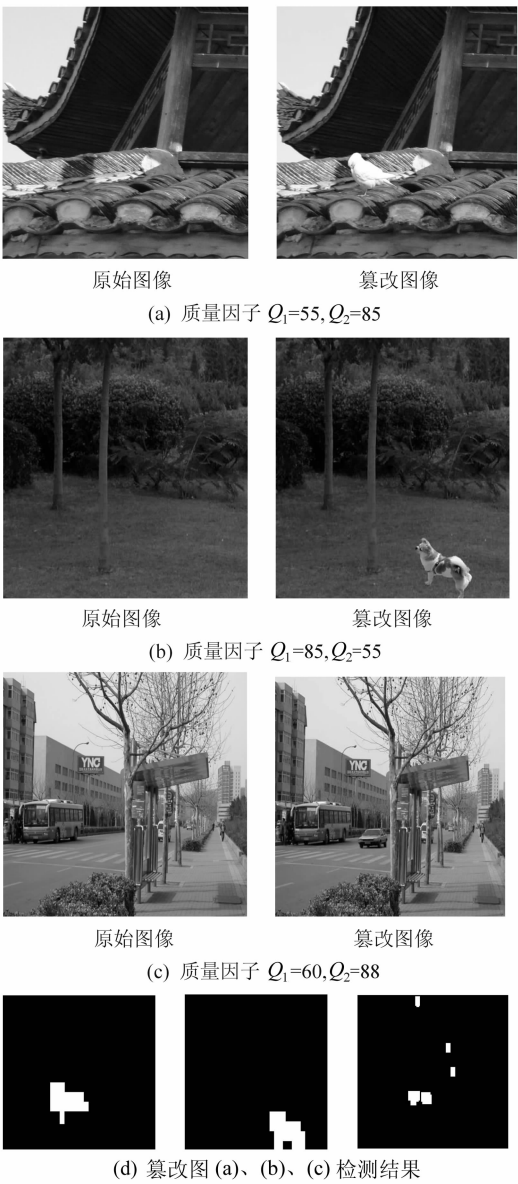


图 7 图像篡改与检测结果

Fig.7 Image tampered and detection results
表 1 算法检测率

Tab.1 Detection efficiency of algorithm

	$ Q_1 - Q_2 = 5$	$ Q_1 - Q_2 = 10$	$ Q_1 - Q_2 = 15$	$ Q_1 - Q_2 = 20$
情况 1	13.9	50.1	79.6	86.3
情况 2	14.5	61.3	95.8	99.6

由表 1 可知,在待检测图像属于情况 2 时,算法的检测准确率随着二次压缩前后质量因子的大小变化而变化,最高可以达到 99.6%。然而当属于情况 1 时,检测的准确率有所下降,主要原因集中在 3 个方面:1)直方图的相似性阈值设定不当,导致二次压缩图像块被认定为篡改块;2)基于双 JPEG 压缩统计特性的检测方法对于极为单一背景的篡改图像具有局限性,使得 DCT 系数失去统计特性,导致误

判;3)当质量因子差值小于 5 时,二次压缩相当于一
次压缩,造成二次压缩前后直方图差别不大,所以
检测率较低。

4 结论与展望

JPEG 图像作为一种最流行的图像格式,针对此
类图像的篡改检测变得越来越迫切。从 DCT 量化
系数直方图的差异入手,根据篡改图像的一次和二
次压缩质量因子的不同,将其分成 2 种情况,采用不
同的方法进行检测。通过实验可以看出所提算法具
有较高的运算效率和检测率。有一定的研究和应用
价值。下一步的研究工作将主要集中在如何更加准
确判定待检图像初始压缩质量因子的大小及当二
次压缩因子 Q_1 、 Q_2 不属于文中所涉及的 2 种情况,而
属于另外一种情况,即 $k_2 = k_1$ 时,如何对其进行篡
改检测。总而言之,针对图像篡改手段和方法的各
种各样,单一的取证技术已经无法满足实际的取证
和鉴定需要,因此需要多角度、全方位去考虑,综合
运用多种取证技术对各类篡改进行检测。

参考文献:

- [1] He J F, Lin Z C, Wang L F, et al. Detecting doctored
JPEG images via DCT coefficient analysis[C]. 9th Euro-
pean Conference on Computer Vision, Heidelberg: Spring-
er, 2006, LNCS 3953: 423 – 435.
- [2] Lukas J, Fridrich J. Estimation of primary quantization
matrix in double compressed JPEG images[C]//Digital
Forensic Research Workshop Proceedings. Cleveland, OH,
USA, 2003: 67 – 84.
- [3] Ye Shuiming, Sun Qibin, Chang Eechien. Detecting digital
image forgeries by measuring inconsistencies of blocking
artifact[C]. IEEE International Conference on Multimedia
and Expo, Beijing, China, IEEE, 2007: 12 – 15.
- [4] Li Sheng, Zhang Xinpeng. Detection of composite images
based on JPEG compression properties[J]. Journal of Ap-

plied Sciences, 2008, 26(3): 281 – 287. [李晟, 张新鹏. 利
用 JPEG 压缩特性的合成图像检测[J]. 应用科学学报,
2008, 26(3): 281 – 287.]

- [5] Farid H. Exposing digital forgeries from JPEG ghosts[J].
IEEE Transactions on Information Forensics and Security,
2009, 4(1): 154 – 160.
- [6] Li Weihai, Yu Nenghai, Yuan Yuan. Doctored JPEG image
detection[C]. IEEE International Conference on Multime-
dia and Expo, Hannover, Germany, IEEE, 2008: 253 – 256.
- [7] Dai Meng, Lin Jiajun, Mao Jiafa. The analysis and detec-
tion of double JPEG compression[J]. Journal of Image
and Graphics, 2006, 11(11): 1619 – 1622. [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): 1619 – 1622.]
- [8] Wang Junwen, Liu Guangjie, Dai Yuewei, et al. A new
method for estimating the primary quantization step of
JPEG double-compression[J]. Journal of Electronics &
Information Technology, 2008, 31(4): 836 – 839. [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, 2008, 31(4): 836 –
839.]
- [9] Yu Xueyan. The method of detecting doctored images
based on double JPEG compression effect[D]. Shanghai:
Shanghai Normal University, 2007. [于雪燕. 一种基于双
JPEG 压缩的数字图像篡改的检测方法[D]. 上海: 上海
师范大学, 2007.]
- [10] Popescu A C, Farid H. Statistical tools for digital foren-
sics[C]//Proceedings of the 6th International Workshop
on Information Hiding. Toronto, Canada, 2004: 128 – 147.

(编辑 杨 蓓)