

基于首位数字特征的双重 MPEG 压缩检测算法

王 琬^① 蒋兴浩^{①②} 孙钺锋^{*①②}

^①(上海交通大学电子信息与电气工程学院 上海 200240)

^②(信息内容分析技术国家工程实验室 上海 200240)

摘要: 视频双重压缩检测是检测视频篡改的有效方法,可用于鉴定视频的真实性与可靠性。该文针对离散余弦变换交流系数首位数字的概率分布与对数定律的拟合关系,选取了一种 12 维的首位数字特征,并采用支持向量机进行双重 MPEG 压缩的检测。对比实验证明该算法具有较高的准确率和效率。

关键词: 数字视频;篡改检测;双重压缩;首位数字特征;支持向量机

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)12-3046-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.00535

Exposing Double MPEG Compression Based on First Digit Features

Wang Wan^① Jiang Xing-hao^{①②} Sun Tan-feng^{①②}

^①(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

^②(National Engineering Laboratory for Information Content Analysis Technologies, Shanghai 200240, China)

Abstract: Video forgeries can be effectively detected by discriminating double MPEG compression, in order to authenticate the truism and reliability of digital videos. Through delving into the fitting results of the first digit distribution of Alternating Current (AC) coefficients with logarithmic law, a double MPEG compression detection algorithm is proposed by extracting a 12-D first digit feature and employing Support Vector Machine (SVM). Experiments show that this algorithm has high accuracy and efficiency.

Key words: Digital video; Forgery detection; Double compression; First digit feature; Support Vector Machine (SVM)

1 引言

现今,数字视频监控系统的的应用愈加广泛,这些监控系统拍摄的视频一旦遭到篡改,会降低其作为司法证据的有效性。因此,如何可靠地鉴定视频的真实性具有重要意义,数字图像与视频的篡改检测已成为研究者们关注的热点^[1]。

视频被动篡改检测技术始于 2006 年,该技术无需对视频进行预处理或提取先验知识,仅通过分析视频特征来完成检测。Kobayashi 等人^[2]提出利用噪声等级函数的不一致性检测视频篡改。Goodwin 等人^[3]则通过提取噪声残差与量化残差特征,利用多模态融合实现了 copy-move 检测。从双重压缩角度检测篡改的研究多针对图像双重 JPEG 压缩。Fu 等人^[4]首次使用带参数的对数定律建模,利用离散余弦

变换(DCT)交流(AC)系数首位数字的概率分布与对数定律的拟合情况实现检测,但要求两次压缩的量化参数不同。Huang 等人^[5]则利用多次压缩情况下 DCT 系数的变化趋势解决了二次压缩与首次压缩量化参数相同时的检测。将双重压缩应用于视频篡改检测由 Wang 等人^[6]提出,其依据是二次压缩为 DCT 系数直方图引入的周期性特征。Chen 等人^[7]则首次将首位数字概率分布的方法应用于 MPEG 视频,算法针对每个图像组(GOP)提取每帧中 AC 系数首位数字的概率分布,采用带参数的对数定律拟合得出 36 维特征,利用该特征判断视频是否经过双重压缩。Su 等人^[8]则提出利用双重压缩视频中量化后的 DCT 系数分布呈现的凸函数特性进行检测。

本文提出了一种基于 12 维首位数字特征的双重 MPEG 压缩检测算法。仅从视频每个 GOP 的 I 帧中统计量化后的 AC 系数首位数字概率分布,使用带参数的对数定律拟合构成 12 维特征,再由支持向量机(SVM)实现单次压缩与双重压缩视频的分类。

2012-05-07 收到, 2012-09-21 改回

国家自然科学基金(61071153, 61272439, 61272249), 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-10-0569)和上海市青年科技启明星计划项目(10QA1403700)资助课题

*通信作者: 孙钺锋 tfsun@sjtu.edu.cn

2 Benford 定律与应用

Benford 定律^[9]指出，实际生活得出的数据中，以 1 为首位数字的数出现的概率约为总数的 1/3，以越大的数字为首位数字的数出现的概率越低，其概率分布符合

$$p(x) = \lg(1 + 1/x) \tag{1}$$

式中 x 表示首位数字，取值为 1-9， $p(x)$ 为以 x 为首位数字的数的概率值。若自然生成的数据经过篡改，其首位数字的概率分布将不再符合 Benford 定律。

近年来，该定律在图像处理领域得到应用。JPEG 编码中，AC 系数首位数字的概率分布符合 Benford 定律。而对于量化后的 AC 系数，首位数字为 1 的增多，首位数字较大的减少，概率分布不再直接符合 Benford 定律。通过增加参数将 Benford 定律泛化，得出带参数的对数定律，即可对量化后的 AC 系数首位数字概率分布建模^[4]：

$$p(x) = N \lg [1 + 1/(s + x^q)] \tag{2}$$

式中 N, s, q 为可变参数。

实验表明，若使用不同的量化参数对图像进行二次压缩，量化后的 AC 系数首位数字的概率分布与带参数的对数定律的拟合度有所下降。因此，这种首位数字概率分布是否符合带参数的对数定律可作为双重 JPEG 压缩的判断依据。

3 双重压缩检测算法

3.1 首位数字特征的选取

由于 MPEG 编码与 JPEG 编码流程的相似性，利用量化后的 AC 系数首位数字的概率分布检测双

重压缩的算法理应适用于 MPEG 视频。文献[7]为验证该推论，编码得到单次压缩与使用不同量化参数双重压缩的 MPEG 视频，从 I, P, B 帧中分别提取量化后的 AC 系数首位数字的概率分布(其中 P 帧与 B 帧采用一个 GOP 中全部 P 帧和 B 帧中概率分布的平均值)。而后，使用带参数的对数定律进行拟合。

图 1 给出了单次压缩视频 I 帧和 P 帧的拟合结果(B 帧与 P 帧相似)，可见，单次压缩视频中量化后的 AC 系数首位数字的概率分布与带参数的对数定律的拟合度很高。双重压缩视频的拟合结果见图 2。当二次压缩的输出比特率较首次压缩有所增大时，量化后的 AC 系数首位数字概率分布明显违背带参数的对数定律。而当二次压缩的输出比特率减小时，这种概率分布在视觉上仍然符合对数定律的趋势，但其拟合度略低于单次压缩视频。图 3 为对数坐标系下的重绘曲线，可见，双重压缩视频中量化后的 AC 系数首位数字的概率分布偏离拟合曲线的程度大于单次压缩的视频。

深入研究单次压缩视频的帧内编码帧(I 帧)与帧间编码帧(P/B 帧)，即可发现 AC 系数首位数字概率分布与对数定律的拟合情况有所区别。图 1 的帧间编码帧中，首位数字为 1 的 AC 系数比例很高(80%以上)，而只有极少 AC 系数首位数字为 7, 8, 9。这是因为 P 帧与 B 帧采用运动补偿机制，帧间编码宏块编码传输的仅仅是预测残差，而预测残差中包含的信息较少，导致 AC 系数数值整体偏小，量化后大多数为 1。因此，相对帧内编码帧，帧间编码帧中 AC 系数首位数字概率分布与带参数的对数定律的拟合结果略差。

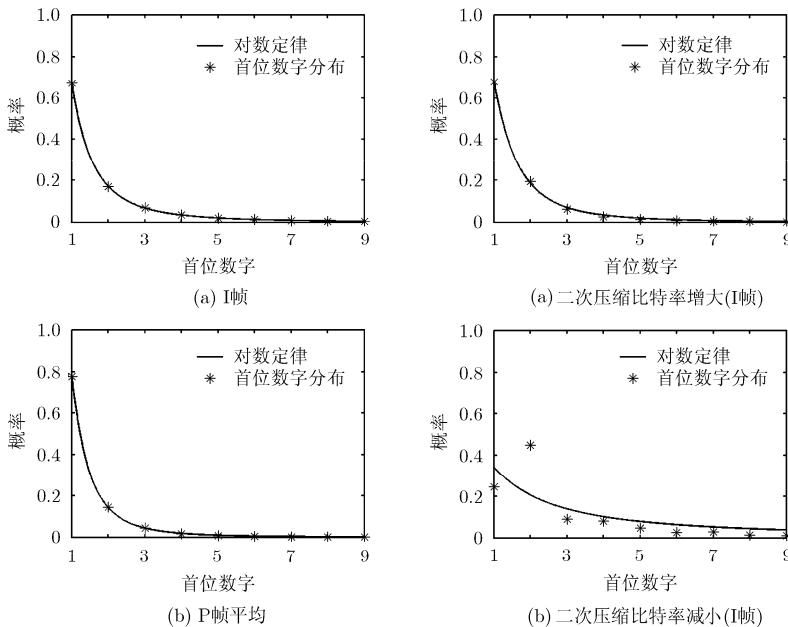


图 1 单次 MPEG 压缩视频中量化后的 AC 系数首位数字概率分布

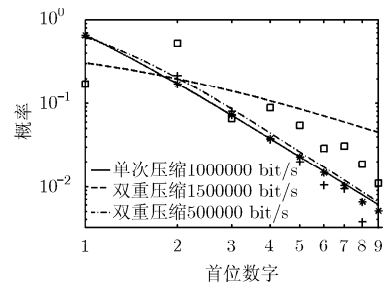


图 3 对数坐标系下单次与二次 MPEG 压缩的拟合结果

图 2 二次 MPEG 压缩视频中量化后的 AC 系数首位数字概率分布

进一步,对单次压缩和二次压缩(比特率减小)视频中量化后的 AC 系数首位数字概率分布与对数定律的拟合结果进行定量分析比较,计算适合度统计值——误差平方和(SSE),均方根误差(RMSE)和确定系数(R-square)。SSE 与 RMSE 越接近 0, R-square 越接近 1,拟合度越高。I 帧, P 帧和 B 帧平均的量化后的 AC 系数首位数字概率分布拟合结果见表 1。

表 1 I/P/B 帧拟合结果的适合度统计值

		误差平方和	均方根误差	确定系数
单次压缩	I 帧	0.00000913	0.00123350	0.99997000
	P 帧平均	0.00017285	0.00536740	0.99972000
	B 帧平均	0.00007225	0.00347010	0.99989000
二次压缩	I 帧	0.00005865	0.00312640	0.99987000
	P 帧平均	0.00015074	0.00501240	0.99979000
	B 帧平均	0.00009357	0.00394910	0.99988000

由表 1 可知,单次压缩视频中, P/B 帧的拟合结果的适合度统计值相对于 I 帧较差。而且, P/B 帧的拟合结果针对单次压缩与二次压缩比特率减小两种情况不易区分,可能导致误判。而由于单次压缩视频中 I 帧拟合度极高,因此从 I 帧的拟合结果能够准确区分这两种情况。基于以上分析,与文献[7]中提取 I 帧, P 帧平均, B 帧平均的量化后的 AC 系数首位数字概率分布并拟合得出 36 维特征相比,本文仅提取 I 帧中的量化后的 AC 系数首位数字概率分布(9 维)及相应的适合度统计值(SSE, RMSE, R-Square)构成 12 维首位数字特征。

3.2 双重 MPEG 压缩检测算法

SVM 的基本原理是通过非线性映射将原本低维空间中线性不可分的样本集映射到高维特征空间,使其线性可分。它利用训练阶段构建的最优分割超平面实现对测试样本所属类别的判断。由于量化后的 AC 系数首位数字概率分布与视频内容和比特率相关,采用静态阈值划分拟合度高低的无法保证准确性,故本算法选用 SVM 实现分类。算法框架见图 4。

算法流程如下:

(1)针对训练和测试视频,分别提取 I 帧的 DCT 系数,并统计量化后的 AC 系数首位数字概率分布。

(2)将首位数字概率分布与带参数的对数定律拟合,计算适合度统计结果 SSE, RMSE 与 R-Square。

(3)将首位数字概率分布与 3 个适合度统计值共

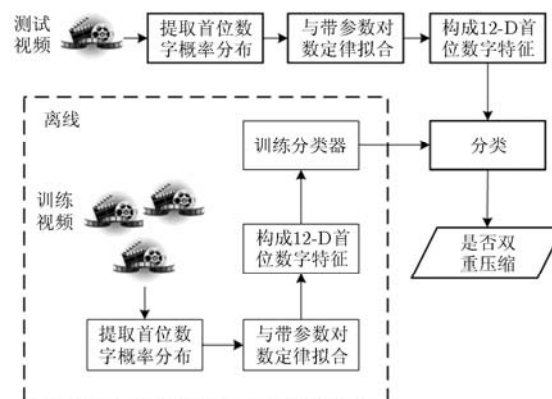


图 4 双重 MPEG 压缩检测算法框架

同组成 12 维首位数字特征。

(4)经过训练后, SVM 能够为每个 GOP 给出是否经过双重压缩的判断结果。设共计 N 个 GOP 的视频中,有 M 个 GOP 被判断为经过双重压缩,定义比重 D 为

$$D = M / N \quad (3)$$

若 D 大于阈值 T , 可认为该视频经过双重压缩。阈值 T 可根据 TNR(True Negative Rate)与 TPR(True Positive Rate)的需求灵活设置,与文献[7]相同,本文选取 T 为 0.50。

4 仿真实验与分析

4.1 实验数据

本文针对 12 段(Bus, Container, Crew, Football, Foreman, Hall, Ice, Mobile, Mother and Daughter, News, Tempete, Waterfall), 18 段(增加 City, Coastguard, Flower, Harbour, Silent, Soccer)与 24 段(增加 Big Buck Bunny, Deadline, Elephants Dream, Paris, Vectra, Walk)YUV 序列进行实验,长度超过 300 帧的 YUV 序列截取其中 300 帧。将上述 YUV 序列编码为 MPEG-2 恒定比特率(CBR)视频,输出比特率分别为 500000 bps, 750000 bps, 1000000 bps, 1250000 bps 和 1500000 bps。为实现双重压缩,再将比特率为 1000000 bps 的视频解码,使用其它 4 种比特率二次编码。这样,每段 YUV 序列生成 5 个单次压缩视频和 4 个双重压缩视频。

4.2 双重 MPEG 压缩检测

SVM 选用高斯核,每段 YUV 序列对应的视频片段轮流作为测试视频,其它视频片段用于训练。12 段 YUV 序列(对应 96 个 MPEG 视频)的详细实验结果见表 2。表中的数据即式(3)中定义的 GOP 比重,比重大于 0.50 的视频即被判定为双重 MPEG 压缩视频。可得出以下结论:

表 2 双重 MPEG 压缩检测实验结果

比特率(bps)YUV 名称	500000		750000		1250000		1500000	
	ori ^(a)	dbl ^(b)	ori	dbl	ori	dbl	ori	dbl
Bus	0.42	0.58	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00
Container	0.00	0.96	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00
Crew	0.08	0.56	0.00	0.68	0.00	1.00	0.00	1.00
Football	0.57	0.71	0.38	0.95	0.19	1.00	0.00	1.00
Foreman	0.08	0.64	0.00	0.92	0.00	0.96	0.00	1.00
Hall	0.00	0.92	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00
Ice	0.00	0.70	0.00	0.95	0.00	0.95	0.00	1.00
Mobile	0.00	0.96	0.00	0.96	0.00	1.00	0.00	1.00
Mother	0.12	0.92	0.00	1.00	0.00	0.92	0.00	1.00
News	0.12	1.00	0.40	0.68	0.16	1.00	0.12	1.00
Tempete	0.05	1.00	0.00	0.95	0.00	1.00	0.00	1.00
Waterfall	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.24	1.00

注：(a)表示单次压缩的 MPEG 视频，(b)表示双重压缩的 MPEG 视频，加粗部分表示误判。

(1)对于二次压缩输出比特率增大的情况，准确率为 100%，且多数视频中，所有 GOP 均被正确判断为双重压缩(GOP 比重为 1.00)。这证实了二次压缩比特率增大时，量化后的 AC 系数首位数字概率分布明显违背带参数的对数定律。

(2)96 个视频中仅出现 1 次误判(表中加粗)，TNR 为 97.92%，TPR 为 100.00%。误判是由于首位数字特征对视频内容与输出比特率的敏感性导致的，特别是对于输出比特率较小的情况，较大的量化步长导致的粗量化会增大检测的难度。

本算法与文献[7]的算法进行了对比实验，见图 5，文献[7]的准确率为在本文视频库中实验得出。可见，仅采用 I 帧的 12 维特征较组合 I 帧，P 帧与 B 帧的 36 维特征将平均准确率提高了 7%左右。特征向量维数的降低也能够降低计算复杂度，算法耗时对比见表 3，表中数据为每个视频的平均耗时。可见本算法可将耗时由 28.06 s 降低至 12.28 s。

增大实验样本的情况下，本算法的准确率见表 4。可见增大视频类别后仍能得出较高的准确率，TNR 与 TPR 在一定范围内保持稳定。准确率的轻

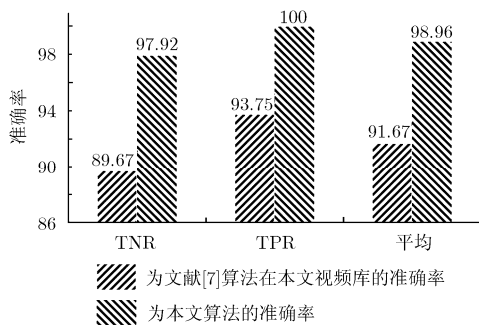


图 5 本文算法与文献[7]算法的对比实验结果

表 3 算法耗时比较(s)

	概率分布提取	对数定律拟合	SVM 分类
36-D	6.19	21.69	0.18
12-D	4.72	7.44	0.12

表 4 双重 MPEG 压缩检测准确率(%)

YUV 序列	TNR	TPR	平均
12 段	97.92	100.00	98.96
18 段	100.00	95.83	97.92
24 段	98.96	95.83	97.40

微下降是由于量化后的 AC 系数首位数字概率分布对视频内容的敏感性，改变 SVM 的训练样本会带来分类准确率的波动。

5 结束语

本文基于 AC 系数首位数字的概率分布与对数定律的拟合关系，从双重 MPEG 压缩角度实现了视频篡改的检测。算法仅提取 I 帧相关的 12 维首位数字，相对于 36 维特征而言，提高了检测准确率，且计算复杂度有所降低。实验结果显示，本文提出的算法能够准确、有效地实现视频篡改检测。

参考文献

[1] Rocha A, Scheirer W, Boulton T, et al. Vision of the unseen: current trends and challenges in digital image and video forensics[J]. *ACM Computer Surveys*, 2011, 43(4), DOI: 10.1145/1978802.1978805.

[2] Kobayashi M, Okabe T, and Sato Y. Detecting forgery from static-scene video based on inconsistency in noise level

- functions[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2010, 5(4): 883-892.
- [3] Goodwin J and Chetty G. Blind video tamper detection based on fusion of source features[C]. Proceedings of International Conference on Digital Image Computing: Techniques and Applications, Noosa, QLD, Australia, Dec. 6-8, 2011: 608-613.
- [4] Fu Dong-dong, Shi Yun-qing, and Su Wei. A generalized Benford's law for JPEG coefficients and its applications in image forensics[C]. Proceedings of the 9th Conference on Security, Steganography and Watermarking of Multimedia Contents IX, San Jose, CA, USA, Jan. 29, 2007, 6505: L5051.
- [5] Huang Fang-jun, Huang Ji-wu, and Shi Yun-qing. Detecting double JPEG compression with the same quantization matrix[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2010, 5(4): 848-856.
- [6] Wang Wei-hong and Farid H. Exposing digital forgeries in video by detecting double MPEG compression[C]. Proceedings of the Multimedia and Security Workshop, Geneva, Switzerland, Sep. 26-27, 2006: 37-47.
- [7] Chen Wen and Shi Yun-qing. Detection of double MPEG compression based on first digit statistics[C]. Proceedings of the 7th International Workshop on Digital-forensics and Watermarking, Busan, Korea, Nov. 10-12, 2008: 16-30.
- [8] Su Yu-ting and Xu Jun-yu. Detection of double-compression in MPEG-2 videos[C]. Proceedings of the 2nd International Workshop on Intelligent Systems and Applications, Wuhan, China, May 22-23, 2010: 5473474.
- [9] Benford F. The law of anomalous numbers[J]. *Proceedings of the American Philosophical Society*, 1938, 78: 551-572.
- 王 琬: 女, 1989年生, 硕士生, 研究方向为视频篡改检测、多媒体信息安全.
- 蒋兴浩: 男, 1976年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为多媒体信息安全、视频内容分析.
- 孙钊锋: 男, 1975年生, 讲师, 硕士生导师, 研究方向为视频篡改检测、视频内容分析.