

基于三维 DCT 的彩色图象自适应水印算法

程卫东^{1,2}, 黄继武¹, 刘红梅¹

(1. 中山大学电子与通信工程系, 广东广州 510275; 2. 成都信息工程学院电子系, 四川成都 610041)

摘 要: 本文提出了一种基于 3D-DCT 的彩色图象自适应水印算法. 证实了 RGB 彩色图象的 3D-DCT 比 2D-DCT 具有更好的能量汇聚性质并因此具有更大的感觉容量, 从而允许嵌入更强的水印信号. 在此基础上, 提出了利用人眼彩色视觉特性来自适应控制水印嵌入强度的方法. 实验证明该算法较好地平衡了隐形水印的不可见性和稳健性之间的矛盾, 所隐藏的水印对常规性攻击, 如 JPEG 压缩、加性噪声、图象滤波、彩色变化和亮度/对比度变化等, 具有很好的抵抗能力.

关键词: 彩色图象水印; 3D-DCT; 彩色视觉特性; 自适应水印; 稳健性

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 12A-1778-04

A Color Image Watermarking Algorithm Based on 3D-DCT

CHENG Wei-dong^{1,2}, HUANG Ji-wu¹, LIU Hong-mei¹

(1. Dept. of Electronic and Communication Engineering, ZhongShan University, Guangzhou, Guangdong 510275, China;

2. Dept. of Electronics, Chengdu University of Information Technology, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: In this paper, an adaptive color image watermarking algorithm based on 3D-DCT (Three Dimensional-Discrete Cosine Transform) is proposed. The algorithm demonstrates that 3D-DCT outperforms 2D-DCT in terms of energy concentration. Since the 3D-DCT coefficients of a color image have larger magnitudes than that of the 2D-DCT coefficients, the 3D-DCT coefficients have larger perceptual capacity and then allow to embed stronger watermark signal. Based on 3D-DCT, we propose to change the watermark strength adaptively by taking account of the perceptual feature of human visual system. The experimental results show that the proposed algorithm can trade-off the conflict of transparency and robustness of invisible watermark well, the thus generated watermark can withstand under the common attacks, such as JPEG compression, additive noise, image filtering, color and luminance/contrast alteration very well.

Key words: color image watermarking; 3D-DCT; color visual characteristic; adaptive watermarking; robustness

1 引言

数字图象水印^[1-3]在最近几年得到了人们的充分重视, 并逐渐成为多媒体信号处理领域的一个研究热点. 但已提出的水印算法基本上都是针对灰度图象的, 彩色图象水印算法尚未得到充分的研究.

尽管针对灰度图象的水印算法通过某些修正也可以用于彩色图象, 比如, 对彩色图象的 RGB 分量分别按灰度图象算法处理, 或者将 RGB 分量变换为 YUV 分量, 仅对 Y 分量(亮度)^[4,5]按灰度图象算法处理, 或仅在其中一个分量嵌入水印^[6,7]等, 但这些方法都不能充分利用彩色图象的自身特点.

本文提出了一种基于 3D (Three Dimensional) 分块 DCT (Discrete Cosine Transform) 的彩色图象水印算法. 提出该算法的依据如下:

(1) 变换域的水印算法其不可见性和稳健性比空域算法

要好^[8]. 对于 RGB 彩色图象而言, 3D-DCT 除了具有 2D-DCT 所拥有的优点外, 还可进一步把水印信号能量均匀扩散到 RGB 分量中, 以保证水印的不可见性和稳健性.

(2) 在水印不可见条件下, 在变换域中, 嵌入水印的位置和嵌入水印强度对确保水印的稳健性十分重要. Cox^[2]等人提出水印应嵌入在视觉系统感觉最为重要的分量上. 该嵌入对策已逐步成为一种共识. 3D-DCT 方法比 2D-DCT 具有更好的能量汇聚性质, 从而允许嵌入更强的水印信号, 提高水印的稳健性.

(3) 为了平衡水印的不可见性和稳健性之间的矛盾, 可以充分利用人的视觉系统特性来合理分配水印信号的能量. 对于黑白图象, 已有不少利用视觉屏蔽特性的自适应算法提出^[9-11]. 本文提出的自适应算法则是利用视觉系统的彩色视觉特性来实现的.

收稿日期: 2001-05-14; 修回日期: 2001-09-04

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 69975011, 60172067, 60133020)、广东省自然科学基金 (No. 980442)、广州市重大科技攻关 (2000-Z-004-01)、教育部骨干教师资助

本文结构如下,第 2 节从水印稳健性的角度,描述、讨论了三维 DCT 及其系数分布,指出了 3D-DCT 应用于彩色图象水印的优越性.第 3 节介绍所提出的自适应水印嵌入算法.第 4 节是水印提取过程.实验结果和有关讨论在第 5 节给出.第 6 节是结论.

2 三维 DCT 及其系数分布

2.1 3D-DCT 及其计算

对于 RGB 彩色数字图象 $f(x, y, z)$, (z 代表 R, G, B 彩色分量), 其 $8 \times 8 \times 3$ 的分块 3D-DCT 表示为 $F_j(u, v, w)$, 其中 $0 \leq u, v < 8, 0 \leq w < 3$. 3D-DCT 的计算可以利用其可分离性质,先在 (x, y) 方向进行 2D-DCT,然后在 z 方向做 1D-DCT,也可直接采用 3D-DCT 快速算法^[12].

2.2 水印嵌入对策

为了使水印具有较好的稳健性,用来嵌入水印的 DCT 系数应满足如下条件^[2,8]:

(1) 在经过常见的信号处理和噪声干扰后仍能很好地保留,即这些 DCT 系数不应过多地为信号处理和噪声干扰所改变.这个要求是为了保证水印在嵌入图象后有较好的稳健性.当加入水印的 DCT 系数被改变较小时,水印便更可能被保留,这是显然的.

(2) 具有较大的感觉容量 (perceptual capacity), 以便嵌入水印后不会引起原始图象视觉质量的明显改变.在图象中嵌入水印可视为在强背景下添加一个弱信号.根据 Weber 定律和视觉系统的对比度特性,较大的感觉容量意味着在主观视觉效果不变的前提下有较大的改变余地.这也意味着可以嵌入较强的水印信号.

人们普遍认为,视觉系统对图象的低频成分的改变比较敏感.因此,早期的水印算法都通过改变高频或中频分量来嵌入水印.这实际上忽视了一个问题:一般情况下,图象低频分量的幅度远大于中/高频分量(几十倍,甚至上百倍以上.空间频率越高,系数的平均振幅越小.),因而具有大得多的感觉容量.在满足不可见性的前提下,尽管对低频分量的改变比例要小于中/高频分量,但允许改变的绝对幅度却大得多. Cox^[2]等在其经典论文中提出水印应放在低频分量,以改善稳健性.文献[8]也对该嵌入对策给予了证实.实际上,低频 AC(交流)系数作为嵌入水印的位置的较好选择已被逐渐采用,并得到共识.文献[8]发展了上述嵌入对策,指出:从稳健性的角度出发,在保证水印不可见性的前提下,DC 分量比 AC 分量更适合于嵌入水印.

上述分析表明,变换域系数的大小对水印稳健性有着直接的影响.

2.3 3D-DCT 与 2D-DCT 的系数分布

为了说明在彩色图象水印算法中采用 3D-DCT 的优点,我们从常用图象中选取具有不同纹理复杂度的图象“Lena”和“Baboon”(“Lena”代表纹理较简单的图象,而“Baboon”代表纹理较复杂的图象),对其 3D-DCT 和 2D-DCT 系数分布进行了统计分析,结果如图 1 所示.图 1 的横坐标(对数坐标)是用 Zigzag 排序的 8×8 DCT 系数的频率坐标,纵坐标是 DCT 系数的幅度绝对值.为了便于说明问题,3D-DCT 的计算采用先沿 $(x,$

$y)$ 方向进行 2D-DCT,然后在 z 方向做 1D-DCT.

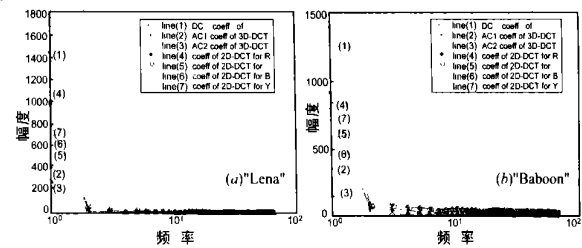


图 1 2D-DCT 与 3D-DCT 的系数分布

曲线(1)是 8×8 图象 2D-DCT 系数沿 z 方向进行 1D-DCT 后的直流系数 $F_j(u, v, 0)$, $j = 0, 1, 2, \dots, J - 1$; $u, v = 1, \dots, 7$ 的统计分布;曲线(2)、(3)分别是对应的交流系数 $AC1(F_j(u, v, 1))$ 和 $AC2(F_j(u, v, 2))$ 的统计分布.曲线(4)、(5)、(6)分别是彩色图象 R, G, B 分量的 8×8 2D-DCT 系数的统计分布.曲线(7)是对应的亮度分量 Y 的 8×8 2D-DCT 系数的统计分布.

图 1 表明,曲线 DC 的幅度大于(4)、(5)、(6),而 AC1 和 AC2 小于(4)、(5)、(6).这说明 R, G, B 分量具有较强的相关性,而这种相关性在沿 z 方向 1D-DCT 后得到了消除.对于彩色图象,2D-DCT 可以有效地去除每个分量的空域相关性,把每个分量的能量集中在少数 DCT 系数上,但各分量之间的相关性依然存在,3D-DCT 则可进一步消除 R, G, B 分量间的相关性,从而,可以把分散到 R, G, B 三个分量的能量更好地汇聚到少数的 3D-DCT 系数上.对其它图象的实验也能得到相同的结果.

分析和实验结果表明,对于彩色图象,3D-DCT 系数的幅度比各分量(RGB)或量度(Y)分量的 DCT 的幅度大,用 3D-DCT 系数来嵌入水印比用 2D-DCT 系数能更好地满足文献[2,8]提出的条件.即在满足不可见性的要求下,我们可以嵌入更大幅度的水印信号.

3 自适应水印嵌入算法

充分利用视觉特性的自适应算法是改善水印的不可见性及提高水印的稳健性的有效途径.

依据上述嵌入对策和 DCT 系数统计分析结果,本文将水印嵌入到 3D-DCT 变换域的直流和低频系数 $F_j(0, 0, 0)$ 、 $F_j(0, 1, 0)$ 、 $F_j(1, 0, 0)$ 中,即对每个 $8 \times 8 \times 3$ 块的 3D-DCT 变换域系数(192 个系数),只用 3D-DCT 变换域的 3 个系数来嵌入水印.为了嵌入尽可能高强度的水印分量,本文提出了利用视觉系统彩色视觉特性的自适应水印算法.

对视觉系统的彩色视觉特性的研究表明^[13],对于具有相同客观照度的不同彩色信号,视觉系统具有不同的主观亮度感觉:对绿色感觉最亮.换言之,视觉系统对绿色信号最为敏感.根据这一特性,本文提出了基于局部 R, G, B 分量大小来控制嵌入水印强度的自适应算法.

对每个彩色图象块,我们通过 RGB 分量的 2D-DCT 系数估计其强度.当第 j 块的 G 分量绝对值大于等于该块 R, B 分量绝对值的最大值时,说明该块以绿色分量为主,这时,嵌入较小的水印强度,以避免对该图象块过大的主观视觉失真.否则,则可嵌入较大的水印强度.嵌入方法如式(1).其中 $F_j(u,$

$v, 0$) 是 3D-DCT 变换域系数; $F_j^G(u, v), F_j^R(u, v), F_j^B(u, v)$ 分别代表 R、G、B 分量的 2D-DCT 系数; $W(k)$ 是随机水印; $1、$

$$\begin{cases} \text{When } u=v=0, F_j(u, v, 0) = \begin{cases} F_j(u, v, 0) + 1 * W(k+k) * |F_j(u, v, 0)|, & \text{if } |F_j^G(u, v)| \geq \max(|F_j^R(u, v)|, |F_j^B(u, v)|) \\ F_j(u, v, 0) + 2 * W(k+k) * |F_j(u, v, 0)|, & \text{otherwise} \end{cases} \\ \text{When } u=0, v=1, u=1, v=0, F_j(u, v, 0) = \begin{cases} F_j(u, v, 0) + 3 * W(k+k), & \text{if } |F_j^G(u, v)| \geq \max(|F_j^R(u, v)|, |F_j^B(u, v)|) \\ F_j(u, v, 0) + 4 * W(k+k), & \text{otherwise} \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

由于 DC 分量(系数 $F_j(0, 0, 0)$)的不恰当改变容易引起水印图象的块效应,对 DC 和 AC 分量采用了不同的嵌入公式.

最后,经过相应逆运算,可获得带有水印的 RGB 空域图象 $f(x, y, z)$.

图 2 为本算法的实现框图.

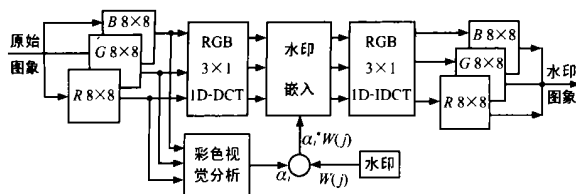


图 2 算法实现框图

4 水印检测

首先,对待测的 RGB 彩色图象(水印图象) $f^*(x, y, z)$ 与原始的 RGB 彩色图象 $f(x, y, z)$ 相减得到差值图象 $f^\#(x, y, z)$. 其次,对差值图象 $f^\#(x, y, z)$ 进行 3D-DCT 变换,得到 3D-



图 3 水印的不可见性稳健性

表 1 抗 StirMark 攻击的性能

攻击描述	Lena	Baboon
移去 17 行 5 列	13.91	33.35
四周剪去原图 50%	20.08	22.12
中值滤波(4 x4)	3.47	12.38
JPEG 质量因子 $Q_{int}=10$	13.15	35.04
X 方向尺度拉伸 20%, Y 方向尺度不变	14.71	33.43
X 方向尺度不变, Y 方向尺度拉伸 20%	12.81	36.04
反方向旋转 0.50 度并裁剪为 254 x254	7.75	19.55
正方向旋转 5.00 度并裁剪为 237 x237	- 0.57	0.69
反方向旋转 0.50 度并按比例拉伸为 256 x256	7.93	20.51
正方向旋转 1.00 度并按比例拉伸为 256 x256	0.94	6.50
X、Y 方向尺度都压缩 50%	31.83	43.72
X、Y 方向尺度都压缩 100%	20.78	41.09
X、Y 方向尺度都修剪为 253 象素点	3.75	13.89
X 方向尺度不变, Y 方向修剪为 243 象素点	- 0.55	5.50
$(u, v) = [1.007, 0.010, 0.010, 1.012] / (x, y)$	2.56	12.19
$(u, v) = [1.013, 0.008, 0.011, 1.008] / (x, y)$	3.45	13.82
Frequency mode Laplacian removal attack	11.9	7.2
高斯滤波(3 x3) / [1 2 1; 2 4 2; 1 2 1]	18.32	39.60
锐化(3 x3) / [0 - 1 0; - 1 5 - 1; 0 - 1 0]	13.42	32.29
StirMark 随机弯曲	- 0.33	6.65
Frequency mode Laplacian removal attack	11.95	38.28

2、3、4 是拉伸因子,其中 $1 < 2, 3 < 4$,由实验选定.

DCT 变换系数 $F_j(u, v, w)$. 然后按式(2)提取出可能受到攻击的水印 $W(k)$. 最后,按式(3)计算相似性.

$$W(k) = \begin{cases} F_j(u, v, 0) / |F_j(u, v, 0)|, & \text{if } u=v=0; \\ F_j(u, v, 0), & \text{if } u, v=0, 1, u=v=0, u=v=1; \\ & j=0, 1, \dots, J-1; k=1, 2, \dots, K; \end{cases} \quad (2)$$

$$= \frac{\prod_{k=1}^K W(k) W(k)}{\sqrt{\prod_{k=1}^K W(k) * W(k)}} \quad (3)$$

如果 $< T$ 则判断图象中无水印;否则,有水印. 根据文献[2], 阈值 T 选择为 $T=5$.

5 实验结果

在实验中,我们采用了两幅具有不同纹理复杂度的常用 RGB 彩色图象“Lena”和“Baboon”(均为 256 x256 x24bits)对算法进行了测试. 由于“Baboon”的纹理远复杂于“Lena”,在满足不可见性的前提下,所允许嵌入的水印能量也高于“Lena”,因此,水印的稳健性优于“Lena”. 本节给出了“Lena”的实验结果.

图 3 是“Lena”的 RGB 原始彩色图象和嵌入水印后的图象,其中水印图象“Lena”的 PSNR=44.47dB,由图可知,水印图象可以满足不可见性的要求.

图 4(a) 是图 3(b) 受 JPEG 攻击后,水印的检测性能曲线. 从图 4(a) 中可知,在 JPEG 压缩下,对被检测图象“Lena”,在其 PSNR=23.0 dB 时,相关检测系数仍然大于检测门限 T .

图 4(b) 是图 3(b) 受 Gaussian 加性噪声攻击后,水印检测的性能曲线.

本文采用了不同大小窗口的中值滤波器对图 3(b) 进行了滤波处理. 结果如图 4(c) 所示.

从图 4 性能曲线可知,本文算法具有良好的对抗 JPEG 攻击、Gaussian 噪声攻击、低通滤波攻击的性能.

本文算法对 Photoshop 提供的一些图象处理方法(如,图象菜单中提供的亮度/对比度、彩色平衡、色相/饱和度、色调均化、变化等处理,滤镜菜单中提供的模糊、纹理、杂色等处理),具有一定的稳健性. 图 3(c) 是图 3(b) 受 Photoshop 提供的彩色变化处理攻击后的情况. 其中 PSNR 为 13.2dB,水印检

测响应为 26.6。图 3(d) 是图 3(b) 用 Photoshop 提供的彩色图象转变为灰度图象,并将亮度和对比度都调节到高于原来亮度和对比度的 1/2 时的情况, PSNR = 9.98dB, 水印检测响应为 = 5.19。

本文还对 StirMark 攻击进行了性能测试。在测试的 14 大类共 65 种基本攻击中,对于“Lena”图象,正确检测为 76.92%。不能正确检测的攻击主要集中在较大角度的旋转攻击项目上(对于“Lena”,14 项旋转攻击中有 6 项错检,占攻击总项数 65 的 9.23%)。表 1 所列项目是抗 StirMark 攻击的部分攻击性能。

算法抗旋转的稳健性不太好,主要原因在于水印嵌入 DCT 域中,而 DCT 系数不具有旋转不变性。可能改善的措施包括应用几何校正方法,这是本论文的后续研究工作。

6 结论

本文根据人眼彩色视觉特性提出了基于 3D-DCT 的自适应水印算法,主要贡献如下:

- (1) 提出了应用 3D-DCT 实现彩色图象数字水印算法的思想,证实了对 RGB 彩色图象采用 3D-DCT 的合理性。
- (2) 提出并实现了依据人眼彩色视觉特性的 3D-DCT 自适应水印算法。实验证明,该算法能很好满足水印不可见性的要求,并具有良好的稳健性。
- (3) 指出了彩色数字图象水印应该能够抵抗以下的攻击,如类似 Photoshop 软件里提供的一些图象处理方法(如亮度/对比度、彩色平衡、色相/饱和度、色调均化、模糊、纹理、杂色等处理)。这些图象处理方法对图象的原始可视性没有太多的改变,而且能够派生出类似原图象的图象。数字图象水印若能抵抗这类攻击,将具有更大的实用价值。

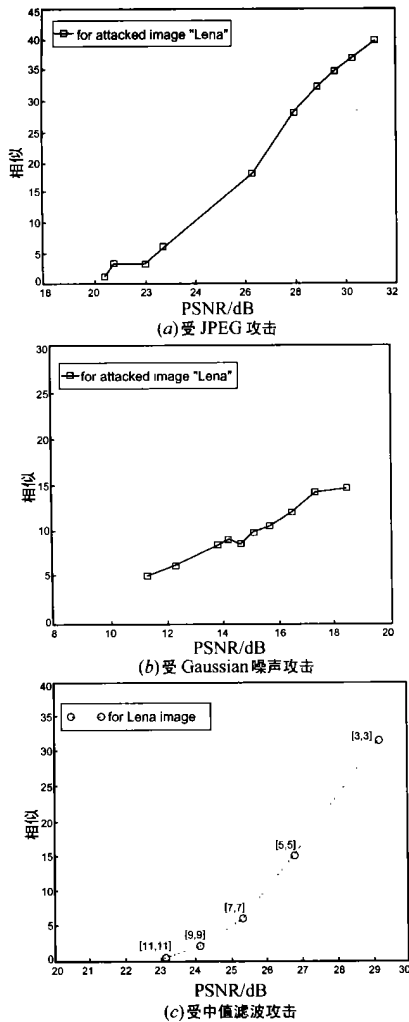


图 4 水印检测性能

参考文献:

- [1] Wolfgang R B, Podilchuk C I, Delp E J. Perceptual watermarks for digital images and video [J]. Proceedings of the IEEE, 1999, 87(7) : 1108 - 1126.
- [2] Cox I J, Kilian J, Leighton F T, Shamoon T. Secure spread spectrum watermarking for multimedia [J]. IEEE Trans. on image processing, 1997, 6(12) : 1673 - 1687.
- [3] Podilchuk C I, Zeng Wenjun. Image - adaptive watermarking using visual models [J]. IEEE Journal on selected areas in comm. 1998, 16(4) : 525 - 539.
- [4] Chu, Chee-Hung Henry, Wiltz, Anthony Wayne. Luminance channel modulated watermarking of digital images [C]. Proc. of SPIE, 1999, 3723 : 437 - 445.
- [5] Piva A, Bartolinin F, Cappellini V, Barni, M. Exploiting the cross-correlation of RGB-channels for robust watermarking of color images [C]. ICIP 99. Proceedings, 1999, 1 : 306 - 310.
- [6] Kutter M, Jordan F, Bossen F. Digital watermarking of color images using amplitude modulation [J]. J. Electron. Imaging, 1998, 7(2) : 326 - 332.
- [7] Pao-Ta Yu, Hung-Hsu Tsai, Jyh-Shyan Lin. Digital watermarking based on neural networks for color images [J]. Signal Processing, 2001, 81 : 663 - 671.
- [8] Huang Jiwu, Shi Yun Q, Shi Yi. Embedding image watermarks in DC components [J]. IEEE Trans. on circuits and systems for video technology, 2000, 10(6) : 974 - 979.
- [9] Swanson M D, Kobayashi M, Tewfik A. H. Multimedia data embedding and watermarking technologies [J]. Proceedings of the IEEE, 1998, 86(6) : 1064 - 1087.
- [10] Podilchuk C I, Zeng W. Image-adaptive watermarking using visual models [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1998, 16(4) : 525 - 539.
- [11] Huang Jiwu, Shi Yun Q. An adaptive image watermarking scheme based on visual masking [J]. IEE Electronics Letters, 1998, 34(8) : 748 - 750.
- [12] Westwater R, Furht B. Real-time Video Compression [M]. USA : Boston, Kluwer Academic Publishers, 1997.
- [13] Gonzalez R C, Wintz P. Digital Image Processing [M]. 2nd Edition, Addison - Wesley Publishing Company, Inc. , 1987.

作者简介:



程卫东 男, 1958 年生于重庆市。成都信息工程学院电子系副教授。目前主要研究方向为信息隐藏与数字水印技术。