

矢量变换域内灰度级数字水印嵌入算法

孙圣和王秋生

(哈尔滨工业大学自动化测试与控制系, 哈尔滨 150001)

摘要: 本文提出了一种新的数字静止图像的水印嵌入算法, 该算法将含有丰富细节信息的灰度级图像作为水印, 水印嵌入过程不是在传统的标量变换域(如离散余弦变换域等)内进行, 而是在矢量变换域实现. 实验结果表明该算法具有很好的稳健性.

关键词: 矢量变换; 数字水印; 版权保护; 图像处理

中图分类号: TP309 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 12A-1782-03

Gray-Level Digital Watermark Embedding Algorithm in Vector Transform Domain

SUN Sheng-he, WANG Qiu-sheng

(Dept. of Automatic Test and Control, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001, China)

Abstract: This paper proposes a novel digital watermark embedding algorithm for still images. A gray-level image with rich details is used as a watermark and embedded in vector transform domain, more than scalar transform domain used traditionally (such as discrete cosine transform domain, etc.). The better robustness of the proposed algorithm is demonstrated by experimental results.

Key words: vector transform; digital watermark; copy protection; image processing

1 引言

对数字图像、音频、视频和多媒体产品进行水印处理用来解决版权问题或检验其内容的原始性^[1]. 数字水印处理包括数字水印生成、水印嵌入、水印抽取和检测等过程. 按照水印嵌入算法的不同, 可以将数字水印处理技术划分为时域/空间域的水印嵌入算法和变换域的水印嵌入算法. 水印的时域/空间域嵌入算法具有算法简单、容易实现等优点, 但它易受到各种形式的攻击而失去版权保护和内容校验功能; 变换域水印嵌入算法可以充分利用变换域的自身特性和人的感知系统在变换域的特性(如人耳的频率特性和人的视觉特性), 提高数字水印嵌入强度和抗攻击能力, 使嵌入的水印真正起到保护数字产品知识产权作用^[2,3]. 目前数字水印嵌入算法研究的主流方向是变换域水印嵌入算法.

在数字静止图像的变换域水印嵌入算法中, 最常用变换有离散傅立叶变换(DFT)^[4], 离散余弦变换(DCT)^[5]和离散子波变换(DWT)^[6], 等等. 变换域水印嵌入算法主要利用变换域系数的三种特性: (1) 和原始图像采样数据相比, 变换域系数的相关性大大减弱; (2) 在变换域中, 较少的低阶变换域系数(如 DFT 的直流和低频系数)集中了绝大部分能量, 在这些系数中嵌入水印可以提高嵌入水印的稳健性; (3) 此外, 可以充分利用人的视觉系统(HVS)在变换域的某些特性, 提高嵌入水印的视觉不可感知性.

但无论是 DFT, DCT 还是 DWT, 它们都是标量变换, 变换

域系数都满足上述性质中的前两点; 并且在这些标量变换域中进行水印处理, 可以与现行的、通用的图像压缩标准(主要指 JPEG 标准和 JPEG2000 标准)的模型相吻合, 容易实现上述性质的第三点. 但是水印的嵌入过程可以看作是对数字图像编码的过程, 根据香农的速率-失真理论, 对数字图像的矢量编码可以获得比标量编码更好的性能^[7]. 对采样数据的矢量变换是矢量编码的过程中的重要组成部分, 因此将有良好的解相关能力和能量压缩能力的矢量变换引入嵌入水印过程, 可以获得比较好的性能. 本文采用的水印不再是一个随机序列或黑白图像, 而是一个视觉可以辨别的、含有丰富细节信息的灰度级图像.

本文的结构组成如下: 第二部分简要介绍矢量变换及其逆变换; 第三部分详细的论述数字静止图像的灰度级水印嵌入算法; 第四部分简要论述从含水印的数字图像中抽取水印的方法; 第五部分给出仿真实验结果并进行简单分析; 第六部分做出本文的结论.

2 矢量变换

假设 $x = [x_0, x_1, \dots, x_{M-1}]$ 是 $M \times M$ 的矩阵, 即 x 中含有 M 个矢量 x_0, x_1, \dots, x_{M-1} , 每个矢量 $x_m = [x_{0m}, x_{1m}, \dots, x_{(M-1)m}]^T$ 中有 M 个分量, 则矢量变换及其逆变换定义如下

$$X_l^T = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{m=0}^{M-1} x_m^T V^{ml} \quad (1a)$$

$$x_m^T = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{l=0}^{M-1} X_l^T V^{-ml} \quad (1b)$$

其中矩阵 V 是 $M \times M$ 的倾斜旋转矩阵, 即

$$V = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \vdots & \vdots & \vdots & \dots \\ \dots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 \\ 0 & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & 1 \\ -1 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}_{M \times M} \quad (2)$$

矩阵 V 有如下有用性质

- (1) $V^M = I$
- (2) $V^{-1} = V^T = V^{M-1}$
- (3) $[x_0, x_1, \dots, x_{M-3}, x_{M-2}, x_{M-1}]V$
 $= [-x_{M-2}, -x_{M-1}, x_0, x_1, \dots, x_{M-3}]$

可以证明, 公式(1)所示的矢量变换具有很好的解相关能力和能量压缩能力, 因此可以象标量变换一样用于数字图像的水印嵌入过程. 又由于 V 中的分量只有 0, -1, 1, 因此矢量变换很容易用硬件实现^[7]. 为了叙述方便, 在以下的数字图像水印算法论述中, 将 x 称为输入列矢量集合, 而将 X 称为输出列矢量集合.

3 水印的嵌入算法

假设 X 是原始的灰度级图像, 大小为 $N_1 \times N_2$, 每个像素用 G_x 位(比特)表示. 则

$$X = \{x(n_1, n_2), 0 \leq n_1 < N_1, 0 \leq n_2 < N_2\} \quad (3)$$

其中 $x(n_1, n_2) \in \{0, 1, 2, \dots, 2^{G_x} - 1\}$ 是原始图像像素 (n_1, n_2) 的强度.

假设 w 是水印-灰度级的图像, 大小为 $M_1 \times M_2$, 每个像素用 G_w 位表示, 则

$$W = \{w(m_1, m_2), 0 \leq m_1 < M_1, 0 \leq m_2 < M_2\} \quad (4)$$

其中 $w(m_1, m_2) \in \{0, 1, 2, \dots, 2^{G_w} - 1\}$ 是水印像素 (m_1, m_2) 的强度.

数字图像和水印的尺寸关系应满足如下条件:

$$M_1 \leq \frac{N_1}{2} \quad \text{且} \quad M_2 \leq \frac{N_2}{2} \quad (5)$$

在矢量变换域内, 将灰度级水印 w 嵌入到数字图像 X 中的原理如图 1 所示.

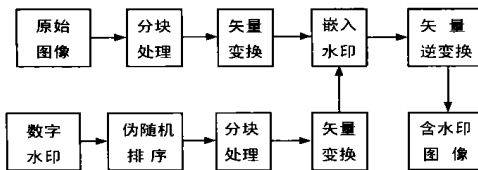


图 1 数字图像中嵌入灰度级水印的原理图

3.1 原始图像和灰度级水印的分块处理

首先, 为了提高图像采样数据的矢量变换速度, 将原始图像分割成大小相等的图像块(图像分块及其表示方法在文献[8]中有详细描述). 每个图像块的采样数据可以看作是一个输入列矢量集合.

$$X_b = \text{Block}(X) \quad (6)$$

其次, 为消除水印像素的空间相关性, 提高水印抗图像剪

切操作的稳健性, 采用文献[8]提出的二维伪随机排序方法对水印像素排序:

$$W_p = \text{Permute}(W) \quad (7)$$

最后, 为了得到和原始图像块数量相等且空间位置对应的水印块, 将伪随机排序的水印 w_p 也等分成和 X_b 数目相等的水印块. 同样, 每个水印块也可以看作是一个输入列矢量集合.

$$W_b = \text{Block}(W_p) \quad (8)$$

3.2 嵌入水印

首先, 对原始图像和排序的水印分别作基块矢量变换

$$Y_b = VT(X_b) \quad (9a)$$

$$V_b = VT(W_b) \quad (9b)$$

由于原始图像块和水印块的大小是不相等的, 即经过矢量变换得到的输出列矢量集合大小是不相等的. 为了操作方便, 必须将水印块的输出列矢量集合扩张. 补足的分量用 0 代替, 补足的矢量用 0 代替. 在扩张的过程中, 考虑到水印块的输出列矢量中分量值可能比较大, 可以将一个列矢量分解成两个, 如 $[246, 233]^T = [128, 109]^T + [118, 124]^T$. 矢量扩张过程可以表示为:

$$U_b = \text{Expand}(V_b) \quad (10)$$

经过扩张后的矢量 U_b 可以通过直接叠加的方法嵌入到 Y_b 中.

$$Y_b = Y_b + aU_b \quad (11)$$

这里 a 是比例因子, 用于控制水印嵌入的强度.

最后, 用 Y_b 代替 Y_b , 并做矢量逆变换, 就得到含水印的图像.

$$X_w = IVT(Y_b) \quad (12)$$

通常采用峰值信噪比 (PSNR) 评价原始图像和含水印图像的差别, 它可以定义为

$$\text{PSNR} = 10 \log_{10} \frac{(N_1 \times N_2) \times (\text{Max}_{n_1, n_2} x(n_1, n_2))^2}{\sum_{n_1=1, n_2=1}^{N_1, N_2} (x(n_1, n_2) - x_w(n_1, n_2))^2} \quad (13)$$

4 水印的抽取算法

本文提出的水印嵌入算法是图像依赖型的, 即从含水印的图像中抽取水印时需要原始图像, 水印的抽取过程如图 2 所示.

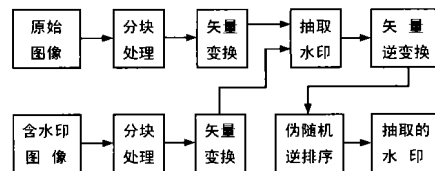


图 2 从含水印图像中抽取水印的原理图

第一步, 将含水印图像 X_w 和原始图像 X 分别作基块的矢量变换.

$$Y_b = VT(X_b) \quad (14a)$$

$$Y_{b,b} = VT(X_{b,b}) \quad (14b)$$

第二步,抽取经过扩张的水印 U_{sb} .

$$U_{sb} = (Y_{sb} - Y_b) / \quad (15)$$

并且在 U_{sb} 上进行相应的逆扩张操作.

$$V_{sb} = \text{InverseExpand}(U_{sb}) \quad (16)$$

第三步,对 V_{sb} 进行矢量逆变换得到经过像素伪随机排序的水印.

$$W_{sp} = \text{IVT}(V_{sb}) \quad (17)$$

第四步,对 W_{sp} 进行伪随机逆排序,最终得到抽取的水印-灰度级图像.

$$W_s = \text{InversePermute}(W_{sp}) \quad (18)$$

为了消除观察者经验、环境条件等因素的影响,仍采用峰值信噪比定量评价原始水印和抽取水印的相似性,它定义为

$$\text{PSNR} = 10 \log_{10} \frac{(M_1 \times M_2) \times (\text{Max}_{\forall i, j} w(m_1, m_2))^2}{\sum_{m_1=1}^{M_1} \sum_{m_2=1}^{M_2} (w(m_1, m_2) - w_s(m_1, m_2))^2} \quad (19)$$

5 实验结果

在实验中,原始图像为 256 灰度级 256×256 的 Lena 图像,如图 3(a) 所示;水印采用 256 灰度级 64×64 的 Jeep 图像,如图 4(a) 所示.在水印的嵌入过程中,对原始图像 8×8 分块,对水印 2×2 分块.

图 3(b) 是在图 3(a) 中嵌入图 4(a) 的含水印图像 (PSNR = 41.91),在视觉上 and 图 3(a) 无任何差别.图 4(b) 是从受剪切攻击的含水印图像中抽取出的水印 (PSNR = 15.94),图 4(c) 是从受 JPEG 压缩攻击的含水印图像中抽取的水印 (PSNR = 15.94),图 4(d) 是从 3(b) 中抽取的水印 (PSNR = 31.23).从实验结果看出,基于矢量变换的数字图像水印处理技术具有很好的稳健性.

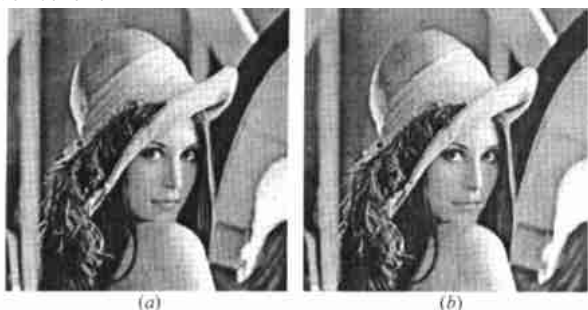


图 3 原始图像和含水印图像

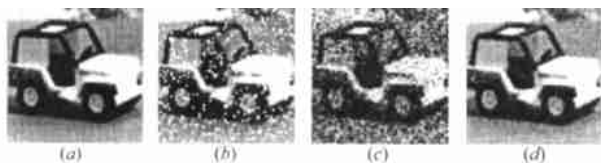


图 4 原始水印和抽取的水印

6 结论

本文提出了矢量变换域的数字图像的水印嵌入算法,实验结果表明该算法具有较好的稳健性.由于在矢量变换域的水印嵌入算法没有建立在通用的图像压缩标准模型(主要指

JPEG和JPEG2000标准)的基础上,因此抵抗有损失压缩的能力相对较差.但由于矢量变换单元的硬件结构简单,因此数字图像的矢量变换域水印处理算法很容易用硬件实现,这必然会使其具有广阔的应用前景.

参考文献:

- [1] George Voyatzis, Ioannis Pitas. The Use of Watermarks in the Protection of Digital Multimedia Products. Proceedings of the IEEE, 1999, 87(7): 1197 - 1207.
- [2] Frank Hartung, Martin Kutter. Multimedia Watermarking Techniques. Proceedings of the IEEE, 1999, 87(7): 1079 - 1107.
- [3] Mitchell D. Swanson, Mei Kobayashi, Ahmed H Tewfik. Multimedia data embedding and watermarking technologies [J]. Proceeding of the IEEE 1998, 86(6): 1064 - 1087.
- [4] J J K ÖRuanaidh, W J Dowling, F M Boland. Phase watermarking of digital images [J]. Proceedings of the International Conference on Image Processing (ICIP), September 1996, 3: 239 - 242.
- [5] Cox I, Kilian J J, Leighton F T, Shamoon T. Secure spread spectrum watermarking for multimedia [J]. IEEE Trans. Image Processing, 1997, 6: 1673 - 1687.
- [6] Chiou-Ting Hsu, Ja-Ling Wu. Multiresolution watermarking for digital images [J]. IEEE Trans. Circuits System. II, 1998, 45(8): 1097 - 1101.
- [7] Weiping Li. Vector Transform and Image Coding. IEEE Trans. Circuits and system for video technology [J]. 1991, 1(4): 297 - 307.
- [8] Chiou-Ting Hsu, Ja-Ling Wu. Hidden digital watermarks in images [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1999, 8(1): 58 - 68.

作者简介:



孙圣和 男. 1937 年出生于山东省. 哈尔滨工业大学自动化测试与控制系教授, 博士生导师, 国务院学科评议组成员, 国家科技奖评审组成员, 曾获国家科技进步二等奖 1 项, 省部级科技进步一等奖 4 项, 出版著作 6 部, 在国内外科技刊物和学术会议上发表论文 150 篇, 主要研究方向为计算机自动测试与控制技术、数字信号处理技术等.



王秋生 男. 1971 年出生于河北省. 1998 年获哈尔滨工业大学硕士学位, 现为哈尔滨工业大学自动化测试与控制系博士研究生, 目前主要研究领域有: 数字图像处理、数字语音处理、网络安全技术等.