

基于整数小波变换和人眼视觉系统的可逆水印算法

邱 群, 马小虎

(苏州大学 计算机科学与技术学院, 江苏 苏州 215006)

摘 要: 提出了一种基于整数小波变换和人眼视觉系统的可逆水印算法. 首先将宿主图像分块, 结合人眼视觉系统计算出每块的视觉熵和边熵之和并进行排序, 从而选择出合适的块进行水印信息的嵌入, 并对选中的块进行整数小波变换, 将水印嵌入到中低频子带的最低有效位上. 实验结果表明, 该算法完全可逆, 并且方法简单, 易于操作, 具有可行性.

关键词: 整数小波变换; 人眼视觉系统; 最低有效位; 可逆水印

中图分类号: TP319

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2014)10-0126-04

Reversible Watermarking Algorithm Based on Integer Wavelet Transform and Human Visual System

QIU Qun, MA Xiao-hu

(School of Computer Science and Technology, Soochow University, Suzhou 215006, China)

Abstract: A reversible watermarking algorithm based on integer wavelet transform and human visual system is proposed in this paper. Firstly, the original image is divided into blocks, the sum of visual entropy and edge entropy of each block is computed; proper blocks are selected based on human visual system to have a good invisibility, then integer wavelet transform is performed on the selected blocks, the watermark embed in the middle and low frequency sub-bands by least significant bit. The experimental results show that the proposed method is reversible, simple and easy to realize.

Key words: integer wavelet transform; human visual system; least significant bit; reversible watermarking

1 引言

数字水印技术可以作为版权保护的一种有效的手段引起了广泛关注^[1-2]. 传统的数字水印信息在嵌入一些载体信息之后会对原始图像造成一些失真, 但是在一些特殊应用的场合, 必须完整地恢复出原始载体图像, 从而可逆数字水印应运而生, 其要求在提取出嵌入信息之后必须能准确的恢复出原始图像, 是数字印领域中一个重要分支.

Honsigner 最早提出可逆水印, Tian^[3] 等提出了一种基于差值扩展和最低有效位 (Least Significant Bit, LSB) 的新算法, 该算法思想简单, 性能良好, 但是文中使用了大量的位置图信息, 冗余信息多. 文献[4]中提出了一种基于二维的差分扩张的可

逆数字水印, 大大提高了嵌入容量. Gu^[5] 提出了一种基于混沌系统的可逆鲁棒水印新算法, 通过寻找水印嵌入的最佳位置和嵌入水印时使用的阈值, 实现了鲁棒的可逆水印, 但是算法中水印的可逆对阈值的选取具有很大的依赖性, 不合适的阈值可能会直接导致水印的不可逆.

2 相关技术

2.1 整数小波变换

整数小波变换 (Integer Wavelet Transform, IWT) 完全不依赖傅里叶变换, 容易扩展, 计算时速度快, 且无需额外的开销. 同时整数小波变换不需要对系数进行量化操作, 因此不会造成量化误差. 整数小波变换主要是对信号进行一系列的操作从而实现

信号的频率分解. 主要分为分裂, 预测, 更新三个步骤. 经过这三步以后, 原始信号可以分解为低频信号和高频信号. 整数小波变换过程简单, 复杂性低, 易于实现.

分裂: 将原始信号 s_j 分成偶数序列 $even_{j-1}$ 和奇数序列 odd_{j-1} 两个不相交的子集.

$$Split(s_j) = (even_{j-1}, odd_{j-1}) \quad (1)$$

预测: $even_{j-1}$ 和 odd_{j-1} 是相关的子集, 因此我们可以通过数据之间的相关性, 利用预测算子 P , 使 $odd_{j-1} = P(even_{j-1})$, 通过二者的差值确定细节信息替代 odd_{j-1} .

$$d_{j-1} = odd_{j-1} - [P(even_{j-1})] \quad (2)$$

式中, $[]$ 表示向下取整, d_{j-1} 作为下一级的高频细节信号.

更新: 通过修改 d_{j-1} 来更新数据 $even_{j-1}$ 从而使原始信号的整体性质继续保持, 如保持平均值不变等. 主要是通过更新算子 U 产生新的子集 s_{j-1} 代替 $even_{j-1}$.

$$s_{j-1} = even_{j-1} + [U(d_{j-1})] \quad (3)$$

式中, s_{j-1} 是作为下一级的低频细节信号.

同时整数小波变换具有完全可逆的优点, 其逆变换过程如下:

$$\begin{aligned} even_{j-1} &= s_{j-1} - [U(d_{j-1})] \\ odd_{j-1} &= d_{j-1} + [P(even_{j-1})] \\ s_j &= Merge(even_{j-1}, odd_{j-1}) \end{aligned} \quad (4)$$

式中, $Merge()$ 表示将偶数与奇数序列合并, 实现信号重构.

2.2 人眼视觉系统

鲁棒性、嵌入量以及不可感知性是用来评价可逆数字水印嵌入算法的最重要的三个性能指标, 但是这三者之间是一个矛盾的统一体, 任何一个性能的增加, 都会导致其余两者的下降. 如何使三者之间达到一个平衡是一个重要的环节. 而图像的信宿是人眼, 因此图像的质量评价应该符合人眼的视觉效果, 其主要表现在三个方面: 亮度特性、频率特性和图像的类型特性^[6].

由于人眼对纹理区噪声较不敏感, 可用熵值表示图像的能量, 熵值较小的为平滑区域, 较大的为纹理区. 计算公式如下:

$$H_1 = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i \quad (5)$$

式中, p_i 是每个灰度像素在图像中的百分比, n 表示灰度级的个数, $0 \leq p_i \leq 1$; $\sum_{i=1}^n p_i = 1$. 由于 p_i 仅仅

取决于像素强度的概率分布, 因此具有相同的直方图但是灰度级分布并不相同的图像其视觉熵值并不一样. 图像的边缘是图像的最基本特征, 集中了图像的大部分信息, 研究表明, 人眼对边缘的敏感性高, 为了提高水印图像的鲁棒性, 应避免在边缘嵌入水印, 因此在选择嵌入区域时同时考虑图像块的边熵, 其计算公式如下:

$$H_2 = \sum_{i=1}^n p_i e^{1-p_i} \quad (6)$$

依据人眼视觉系统(human visual system, HVS)选取水印嵌入的块的过程如下: ①将原始载体图像进行分块, 并按照式(5)和(6)分别计算出每一块的视觉熵和边熵; ②求出每一块的视觉熵和边熵之和, 并依据其和值按照从小到大进行排序. 选取和值较小的块作为水印嵌入的块直到水印信息嵌入完成.

3 水印的嵌入和提取

3.1 水印嵌入算法

(1)对原始图像进行 4×4 不重叠分块.

(2)依据 2.2 节中的人眼视觉系统选择出合适的块作为水印的嵌入区域.

(3)对选中的块先进行一次 IWT, 得到高频子带 HH1, 中频子带 LH1, HL1 以及低频子带 LL1; 对 HH1 进行第二次 IWT, 得到高频子带 HH2, 两个中频子带 LH2, HL2, 以及低频子带 LL2.

(4)对所有的中低频子带执行如下步骤:

$$q' = q \times 2 + b \quad (7)$$

式中, q 表示中频或低频子带的系数, b 是待嵌入的水印的比特位. 因此, 在每个块中将嵌入 15 个比特位.

(5)对嵌入水印后的图像进行两次逆整数小波变换得到嵌入水印之后的图像.

3.2 水印提取算法

水印的提取过程是嵌入过程的逆过程, 具体步骤如下:

(1)对原始图像进行 4×4 不重叠分块.

(2)依据 2.2 节中的 HVS 选择出嵌入水印的块.

(3)对选中的块进行两次 IWT.

(4)对变换得到的中低频子带的系数执行如下步骤:

$$b = LSB(q') \quad (8)$$

$$q = \frac{q' - b}{2} \quad (9)$$

式中, b 表示提取出的水印信息; q 是恢复的中频或者低频子带系数。

(5) 对选中的块进行逆 IWT, 恢复出原始图像。

4 实验结果

本文采用了 Lena, Bridge, Flower 作为实验的原始载体图片, Suda 作为水印图像, 来验证算法的有效性, 如图 1 所示。图 2 是三幅嵌入水印之后的图像, 很难看出原始图像与嵌入水印之后的图像的区别, 说明图像嵌入水印之后具有很好的不可见性。图 3 列出了恢复的原始图像, 图 4 是从三幅嵌入水印的图像 Lena, Bridge, Flower 中分别提取出的水印图像。



图 1 原始图像和水印图像



图 2 嵌入水印后的图像



图 3 恢复出的原始图像



图 4 从不同嵌入水印后的图像中提取的水印

同时我们使用峰值信噪比 PSNR 作为判断水印图像的一个视觉质量的标准。用 I 表示大小为 M

$\times N$ 的原始图像, I' 表示为嵌入水印的图像, 其公式如下:

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (I(i, j) - I'(i, j))^2$$

$$PSNR = 10 \times \lg \frac{255^2}{MSE} \quad (10)$$

结构相似性 (structural similarity, SSIM) 可以从亮度, 对比度, 结构考虑图像的相似性, 是一种衡量两幅图像相似度的新指标, 其值越接近 1 越好, 表示两幅图像越相似, 本文用 SSIM 值计算出原始水印与提取水印之间的相似度。原始水印 x 和提取的水印 y 的 SSIM 值计算如下:

$$SSIM(x, y) = [l(u, v)]^\delta \times [c(u, c)]^\gamma \times [s(u, v)]^\lambda \quad (11)$$

$$l(x, y) = \frac{2u_x u_y + C_1}{u_x^2 + u_y^2 + C_1}$$

$$c(x, y) = \frac{2\sigma_x \sigma_y + C_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2} \quad (12)$$

$$s(x, y) = \frac{\sigma_{xy} + C_3}{\sigma_{xy} + C_3}$$

式中, u_x, u_y 分别是图像 x, y 的均值, σ_x, σ_y 分别为 x, y 的方差, σ_{xy} 是 x, y 的协方差。 δ, γ, λ 是用来调整 l, c, s, C_1, C_2, C_3 是常数, 通常选取远小于 1 数。文中我们选取 $\delta = \gamma = \lambda = 1$; $C_1 = 0.01, C_2 = 0.01, C_3 = 0.005$ 。

表 1 和表 2 中列出了 Lena, Bridge, Flower 三幅图像在不同嵌入量的情况下水印图像的 PSNR 值以及提取水印图像的 SSIM 值, 可以看出本文的算法在嵌入容量较高时仍然具有良好的不可见性, 且原始水印图像与恢复出的水印图像相似度很高, 误差较小, 说明该算法可以准确的提取出水印, 完整的恢复出原始图像。

表 1 不同嵌入容量下的水印图像的 PSNR 值 db

嵌入容量 ($\times 10^{-6}$)	Lena	Bridge	Flower
0.1	46.701 6	44.208 3	48.675 2
0.3	42.805 5	40.702 7	43.839 5
0.5	39.900 9	37.655 9	40.805 8
0.7	37.801 3	35.573 6	37.644 6

表 2 不同嵌入容量下提取水印的 SSIM 值

嵌入容量 ($\times 10^{-6}$)	Lena	Bridge	Flower
0.1	0.954 2	0.948 8	0.951 0
0.3	0.951 0	0.947 9	0.949 5
0.5	0.949 5	0.946 7	0.948 3
0.7	0.949 3	0.945 9	0.947 4

5 结束语

本文提出了一种基于整数小波变换和人眼视觉系统的可逆数字水印算法. 具有以下特点: (1) 算法中有效的结合人眼视觉系统, 选择出合适的块进行水印的嵌入, 保证水印嵌入之后的图像具有较好的透明性; (2) 利用 LSB 在两次 IWT 得到的所有中低频子带的系数中嵌入水印, 提高了嵌入量; (3) 整数小波变换具有的计算速度快, 不需要量化等优点, 使得算法复杂度低; (4) 水印的提取以及原始图像的恢复是嵌入的逆过程, 操作简单易行. 本文提出的算法是脆弱水印, 为了扩充应用性, 需要进一步研究鲁棒的可逆数字水印技术.

参考文献:

- [1] 赵学民, 李玲玲. 一种关系数据库的多媒体多重水印[J]. 微电子学与计算机, 2013, 30(9): 122-125.
- [2] 聂廷远, 刘海涛, 周立俭. 利用 LUT 替换的 FPGA 保护数字水印技术[J]. 微电子学与计算机, 2013, 30(1): 21-23.

(上接第 125 页)

参考文献:

- [1] Yang C H, Lin H Y, Chen H H. Writer meets reader: emotion analysis of social media from both the writer's and reader's perspectives[C]// Proceedings of International Conference on Web Intelligence. Milan, Italy: IEEE, 2009: 287-290.
- [2] Cai R, Zhang Z, Wang C, et al. Music sense: contextual music recommendation using emotional allocation modeling [C]// Proc of the ACM International Multimedia Conference and Exhibition Augshorg. Bavaia, Germany: IEEE, 2007: 553 - 556.
- [3] Yang C, Lin K, Chen H-H. Building emotion lexicon from weblog corpora[C]// Proc of 45th Annual Meeting of Association for Computational Linguistics. Prague Czech: IEEE, 2007: 133-136.
- [4] Kevin Hsin-Yih Lin, Changhua Yang. Emotion classification of online news articles from the reader's perspective[C]// proc of the 2008 IEEE/WIC/ACM International Conference on the Web Intelligence and In-

- [3] Tian J. Reversible data embedding using a difference expansion [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2003, 13(8): 890-896.
- [4] Al-Qershi O M, Ee Khoo B. Two-dimensional difference expansion (2D-DE) scheme with a characteristics-based threshold [J]. Signal Processing, 2012, 93(1): 154-162.
- [5] Gu Q L, Gao T G. A novel reversible robust watermarking algorithm based on chaotic system [J]. Digital Signal Processing, 2013, 23 (1): 213-217.
- [6] Jung S W, Ha L T, Ko S J. A new histogram modification based reversible data hiding algorithm considering the human visual system[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2011, 18 (2): 95-98.

作者简介:

邱群 女, (1987-), 硕士. 研究方向为图像处理、数字水印.

马小虎 男, (1964-), 博士, 教授, 硕士生导师. 研究方向为数字水印、模式识别、图像处理、计算机图形学.

telligent Agent Technology. Washington: IEEE, 2008: 220-226.

- [5] H Y Lin, H H Chen. Ranking reader emotions using pairwise loss minimization and emotional distribution regression[C]// Proceedings of international Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing. [s. l.]: IEEE, 2008: 136-144.
- [6] Dempster A P, Laird N M, Rubin D B. Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm[J]. Journal of the Royal Statistical Society Series B, 1977, 39(1): 1-38.
- [7] Nigam K, McCallum A, Thrun S, et al. Text classification from labeled and unlabeled documents using EM [J]. Machine Learning, 2000, 39(2): 103 - 134.

作者简介:

卢露 男, (1981-), 博士. 研究方向为数据挖掘、自然语言处理.

魏登月 男, (1984-), 博士研究生. 研究方向为数据挖掘.