

基于CL多小波的数字水印技术

苟意远 陈晓鸥

(北京大学文字信息处理技术国家重点实验室, 北京 100871)

摘要 数字水印是一种嵌入到图象、视频或者音频数据中的不可见标志,通过对水印信息的检测可达到保护多媒体数据版权的目的.为了提高数字水印系统的鲁棒性,提出了一种基于CL多小波变换的图象数字水印嵌入和检测模型.该CL多小波变换可将图象的能量集中在其最低分辨率子图象上,同时,能使最低分辨率子图象的能量进一步汇聚于其第1个分量之上.由于最低分辨率子图象受压缩、滤波等变换的影响较小,因此在CL多小波变换域嵌入数字水印可以改善水印系统的鲁棒性.为了提高水印的透明性和不可统计性,在嵌入水印之前需要对水印图象进行相应的预处理.实验表明,该水印系统具有良好的鲁棒性和透明性.

关键词 数据安全与计算机安全(520·1060) 数字水印 CL多小波 相关性 鲁棒性 透明性
中图分类号: TP309.2 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2003)05-0572-06

Watermarking Based on CL Multi-wavelet

GOU Yi-yuan, CHEN Xiao-ou

(National Key Lab of Character Information Processing in Peking University, Beijing 100871)

Abstract Digital watermark is invisible mark embedded in digital image, video or audio documents, which can be detected to protect copyright of multimedia data. The thesis describes a watermarking scheme based on CL multi-wavelets. After the CL multi-wavelet transformation of an image, most energy of the image is mainly concentrated on its lowest resolution sub-image. Moreover, most energy of the lowest resolution sub-image is further concentrated on its first component. Because lowest resolution sub-image can survive from some transformation such as compression, this scheme can improve robust of embedded watermark. But the invisibility of watermark is reduced at that time because of the sensitivity of the lowest resolution sub-image to HVS(Human Visual Model). The position to embed watermark is selected with a trade-off between robustness and invisibility. And preprocessing of the watermark image is here for declining the difference between the watermarked and original image. To deal with attack of counterfeit, it uses not additive method but replacement algorithm when embedding watermark. The correlation between the original and extracted watermark is computed to tell whether there exists watermark in the image. The performance of the proposed watermarking is invisible to HVS and robust to a variety of signal distortions, such as JPEG compression, filtering, cropping and incorporating attacks.

Keywords Digital watermarking, CL multi-wavelets, correlation, Robustness, Invisibility

0 引言

随着互联网应用范围的不断扩展,对电子信息产品版权的保护越来越受到严峻的挑战.作为电子信息产品版权保护的有力措施,数字水印技术在这一挑战的推动下取得了长足的进步.

自Schyndel在1994年提出基于LSB的水印算

法^[1]以来,数字水印领域涌现出大量的水印嵌入和检测方法.这些方法大致可以分为空间域方法和变换域方法两种.其中,由于变换域算法需要先对源数据进行一个变换,然后在变换域中完成水印的嵌入和检测,因而往往会需要较大的运算量.但是,由于压缩、滤波等等图象处理的过程经常也是在变换域完成,如果处理的过程和水印信号嵌入使用相同的变换域,那么这些处理对数字水印的影响将可以被

大大地降低,例如,将图象进行DCT变换后再在变换域嵌入水印,就可以提高水印系统抵抗JPEG压缩处理的能力,因此,选择一个合适的变换操作,然后在该变换域嵌入水印,就可以提高水印嵌入系统的鲁棒性。

由于图象数据在小波变换域呈现出许多图象处理需要的特性,因此小波变换和分析在图象处理领域有着越来越广泛的应用。近年来,多小波作为小波技术新的发展,已开始逐步进入各种应用领域。由于多小波是满足一定数学关系的多个小波的合成,而不是多个小波的简单堆积,因此必然存在某个多小波,它能够汇集所包含的多个小波的优点。对图象经过多小波处理之后,就可以得到满足不同需求的非同性质子图象。

众所周知,CL多小波是一种比较常见的多小波。图象经过CL多小波变换之后,能量就充分汇集到其最低分辨率子图象上,而且,最低分辨率子图象的能量又能够进一步集中到其第1个分量之上。这样,就可以利用CL多小波的这一特性,在适当的位置上嵌入水印信息来提高系统的鲁棒性。

1 CL多小波图象变换

小波变换的研究在近年来取得了长足的进步^[2~6],并且在图象处理领域发挥着越来越重要的作用^[7]。

由于多小波变换只能处理向量信号,故对一幅

$$N \times N \text{ 的图象 } M = \begin{bmatrix} m_{1,1} & m_{1,2} & \cdots & m_{1,N} \\ m_{2,1} & m_{2,2} & \cdots & m_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{N,1} & m_{N,2} & \cdots & m_{N,N} \end{bmatrix}$$

其中, $m_{i,j}$ 表示像素值, $1 \leq i, j \leq N$,必须先对图象的行和列进行前置滤波,然后才能将经过前置滤波后

图象的行和列按照一定的规则组成向量信号,再进行多小波变换^[2,4]。

2 CL小波域的数字水印嵌入

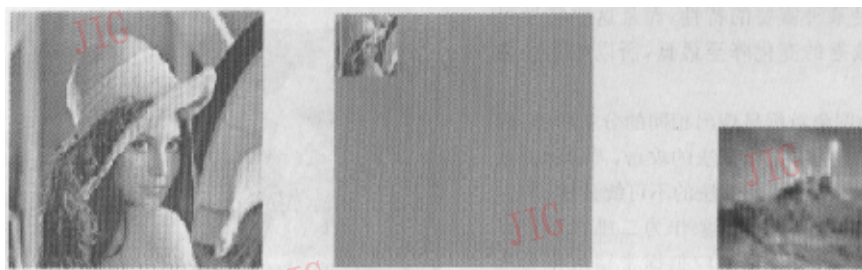
在经过多小波变换之后,一幅 $N \times N$ 的图象被分解成4幅 $\frac{N}{2} \times \frac{N}{2}$ 的子图象,这些子图象具有不同的分辨率和不同的空间方向。在这4个分量图中,由于只有左上角的分量图清晰可见,因此,只需要递归地对每次得到的左上角分量图做变换,那么在经过 n 次递归变换之后,即可以得到所需要的最低分辨率子图象。统计表明,在经过适当次数的多小波变换之后,其最低分辨率子图象就集中了图象97%以上的能量,而且,在不同分辨率子图象的4个分量图中,左上角的分量图汇集了这个图象大约96%的能量。

对图象进行多小波变换的次要依赖于图象的大小,因为变换的结果一方面应该使得最低分辨率子图象的尺寸尽可能小,另一方面,也必须保证最低分辨率子图象包含足够多的图象能量。如对于一幅 512×512 的图象,选择3~4次CL多小波变换比较合适。对 512×512 的Lena图象(如图1(a)所示)进行3次CL多小波变换后即可得到如图1(b)所示的效果。

2.1 嵌入位置选择

为了保证算法的鲁棒性,需要在图象质量敏感的地方嵌入水印,这样就使得对水印信号的破坏必然会引发图象质量的严重下降。但是,为了保证水印嵌入的透明性,需要使嵌入的水印对图象质量的影响降低到最小^[8,9]。

由于最低分辨率子图象受压缩等变换的影响较小,因此,从保证水印模型鲁棒性的角度考虑,应尽



(a) Lena 原图

(b) CL多小波变换后的Lena图象

(c) 原始水印

图1 经CL多小波变换后的Lena图象及原始水印

量把水印信号嵌入到最低分辨率子图象中,但图象质量对最低分辨率子图象的改变是敏感的,为了保证水印嵌入算法的透明性,一方面要求嵌入水印时,应使将图象数据的改变降低到最小,另一方面也要要求嵌入水印的位置应该远离最低分辨率子图象.在水印嵌入的频域算法中,为了同时保证水印信号的鲁棒性和透明性,通常选择中频区域作为嵌入水印的位置^[2].作为一种折衷,本文也采取了一种类似于此的方法.图 2 中给出了一种嵌入位置的选择模型(水印嵌入到黑色底纹标识的位置).为了保证水印算法的鲁棒性,选择的嵌入位置位于第 1 次分解之后的 LL_1 中,为了保证透明性,接下来的分解,在 $HH_n(n=2,3,4)$ 中完成.

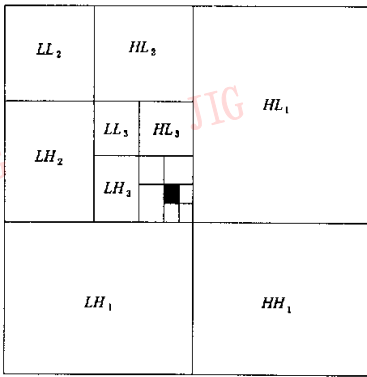


图 2 水印嵌入位置模型

本文选择图象作为二维水印信号来嵌入到原图象中,嵌入水印的起始位置由密钥控制,并通过设定的密钥来确定一个合适(需要保证鲁棒性和透明性)的块嵌入水印.

2.2 水印信号预处理

由于水印信号的嵌入必然会引起某些图象数据的变化,因此为了保证水印嵌入以后的透明性,需要把这样的变化尽可能降低^[10].一般通过预处理可以使水印信号满足某种需要的特性,而且这些特性可以保证使图象数据的变化降至最低,所以能达到透明性的要求.

由于同样的图象数据呈现出相同的分布特性,因此为了抵御统计方法对水印算法的攻击,需通过对水印信号的预处理来增强水印算法的不可统计性^[11].

在本文中,由于是选择图象作为二维水印信号来嵌入到原图象中,因此首先应根据密钥对作为水印信号的图象数据进行置换处理.由于原始水印图象像素的灰度级值从 0 到 255,但为了使得对宿主

图象数据的影响降低到最小,因此需要通过正则化处理把像素值规整到 $[0,1]$ 区间(通过除以 255 完成),然后把正则化结果乘以某一个系数 K ,使得到的结果尽可能接近于宿主图象数据中所要取代的数据.系数 $K = (C_{max}/W_{max} + \sqrt{E_c/E_w})/2$,其中, C_{max} 是宿主图象数据选定块中 CL 多小波系数的最大值, W_{max} 是水印图象数据中的最大值; E_c 是宿主图象数据选定块中,小波系数的能量和, E_w 是水印图象的能量和.

2.3 水印信号嵌入方式选择

早期的水印算法都是采取叠加的方式嵌入水印,其基于叠加方式的水印嵌入算法在水印检测和提取时,需要原始宿主图象 M 的存在,这在很大程度上限制了算法的应用空间,而且,由于水印叠加的可逆性,使任何用户均可以伪造一个自己的水印图象 I' (真正水印图象为 I),因此用嵌入水印的图象 $A(A=M+I)$ 减去 I' ,可得到另外一个新的原始图象 M' ,然后根据 I' 和 M' 就可宣称自己拥有图象 A 的版权^[7].

在近年来的研究中,使用水印信息来替换宿主图象数据的某一部分值已经成为常用的方法.本文使用的嵌入算法也是基于替换的方式,即使用经过预处理的水印信息来替换宿主图象数据经变换后的小波系数的某一块.由于前面采取了减小数据之间差异的策略,因此替换操作对原图象质量的影响非常小,这就实现了透明性的要求.

为了增强系统的自封闭性,系数 K 的值应该尽量保存到嵌入水印后的图象中.本文则直接使用选定块的第 1 个位置保存 K 的值.

如对比图 1(a)所示的 Lena 图象用本文算法嵌入水印时,即首先进行 CL 多小波变换,然后在选定的区域中嵌入水印信号(如图 1(c)所示),经过 CL 多小波反变换后,得到的嵌入水印的图象如图 3(a)所示.



(a) 嵌入水印的 Lena 图象 (b) 提取出的水印

图 3 从嵌入水印的 Lena 图象中提取水印

3 数字水印的提取

大家知道,水印检测和提取的方法由水印嵌入的方式决定.由于直接采用了替换的方式来完成水印信号的嵌入,因此数字水印的提取不需要使用原始宿主图象.

在进行水印检测时,首先对需要检测的图象做 CL 多小波变换;然后根据密钥得到嵌入水印的块的位置,由于第 1 个数据直接用来保存 K 值,故可以轻松地完成水印图象预处理的逆运算,再对每一个数据除以 K ,即得到一个规整化的结果;最后把数据放大到 $[0, 255]$ 区间,以完成一个预处理过程中置换处理的逆过程,就得到检测出的水印图象.

为了度量两幅图象之间的相似程度,需要计算两者相关度

$$\alpha = \frac{\sum_i [(v_1(i) - \bar{v}_1) \times (v_2(i) - \bar{v}_2)]}{\sqrt{\sum_i (v_1(i) - \bar{v}_1)^2} \sqrt{\sum_i (v_2(i) - \bar{v}_2)^2}} \quad i = 1, 2, \dots$$

其中, v_1 和 v_2 分别包含两幅图象的像素数据, \bar{v}_1 和 \bar{v}_2 分别表示二者的平均值.

从图 3(a) 所示的图象提取出水印图象如图 3(b) 所示.

4 实验结果分析

相对于其他变换域算法而言,在小波域嵌入的水印信息具有很好的鲁棒性,同时对原始图象的影响非常小,且能够满足透明性的要求.

本文选择了 Lena、Lion 等几幅图象首先嵌入水印,然后检测经平滑、锐化、均衡化、滤波、JPEG 压缩、JPEG2000 压缩等各种处理后图象的 PSNR 及嵌入水印前后图象间的相关度,以了解本文水印嵌入算法的鲁棒性.

嵌入水印后的图象与原宿主图象间 PSNR 及相关度如表 1 所示.

表 1 水印嵌入前后图象间 PSNR 及相关度

宿主图象	PSNR(dB)	相关度
Lena	43.274	0.996
Lion	42.845	0.995
Barbara	42.533	0.991
Peppers	42.172	0.993
Waterfall	43.537	0.998

对嵌入水印后的各图象经 3×3 的高通滤波、直方图均衡化、锐化、平滑及 JPEG 压缩处理后提取的水印信息,与原始水印信息的相关度如表 2 所示.

表 2 各种处理对水印信息的影响

宿主图象	相关度				
	高通滤波	直方图均衡化	锐化	平滑	JPEG 压缩
Lena	0.977	0.753	0.946	0.948	0.992
Lion	0.958	0.733	0.948	0.944	0.983
Barbara	0.973	0.737	0.950	0.965	0.985
Peppers	0.962	0.745	0.936	0.951	0.979
Waterfall	0.977	0.778	0.968	0.966	0.987

对嵌入水印后的各图象经过 JPEG2000 压缩、解压后提取水印信息,与原始水印信息的相关度如表 3 所示.表 3 中同时对对比了基于 CL 多小波和一种 DCT 域的水印嵌入算法在 JPEG2000 压缩下的鲁棒性,即相关度越大,说明对水印信息影响越小,算法鲁棒性越好.

表 3 JPEG2000 压缩对水印信息的影响

宿主图象	水印嵌入模式相关度	
	CL 多小波	DCT
Lena	0.921	0.510
Lion	0.910	0.552
Barbara	0.908	0.543
Peppers	0.893	0.532
Waterfall	0.923	0.517

对嵌入水印的 Lena 图象进行 3×3 的高通滤波、直方图均衡化、锐化、平滑、JPEG 压缩及 JPEG2000 压缩后得到的图象如图 4 所示,图 4 中同时显示了从经过处理的各个图象中提取出的水印.

本文提出的水印算法充分利用了 CL 多小波具有的特性,使得算法不仅对 JPEG 压缩、平滑、锐化、均衡化、滤波等处理具有良好的鲁棒性,而且在 JPEG2000 压缩后,水印算法同样也具有的良好鲁棒性,这是由于 JPEG2000 压缩算法是一种基于离散小波变换的压缩算法的缘故,其变换域的一致性,使算法相对于其他算法具备了更强的鲁棒性.

但是,对于变换域算法而言,由于水印信号的嵌入需要涉及到所有的原始图象数据,因此大多变换域算法对裁剪、旋转等几何变换的抵抗能力往往会比较弱,且 CL 多小波域的水印嵌入算法同样具有这样的问题.为了解决这一问题,可以考虑仅用图象的某些部分参与变换,但对这些部分的选择将会是另外一个难题.



图4 嵌入水印的 Lena 图象经各种处理后的图象及检测出的水印

参考文献

- 1 Van Schyndel R, Tirkel A, Osborne C. A digital watermark [A]. In: Proc. of the IEEE on International Conference on Image Processing[C], Austin, Texas, USA, IEEE Press, 1994: 86~90.
- 2 Chui C K, Lian J A. A study of orthonormal multiwavelets[J]. Applied Numerical Mathematics, 1996, 20(2): 273~298.
- 3 Geronimo J S, Hardin D P, Massopust P R. Fractal functions and wavelet expansions based on several functions[J]. Journal Approx. Theory, 1994, 78(4): 373~401.
- 4 Strela V, Heller P N, Strang G et al. The application of multiwavelet filter banks to signal and image processing [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1998, 8(4): 548~563.
- 5 Strang G, Strela V. Short wavelets and matrix dilation equations [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1995, 43(1): 108~115.
- 6 Charoenlarnpopparat C, Bose N. Multidimensional FIR filter bank design using Grobner bases [J]. IEEE Transactions on Circuits Systems II. 1994, 46(4): 434~447.
- 7 Prasad L, Iyengar S S. Wavelet analysis with applications to image processing[M]. Boca Ration, Florida, USA; CRC Press

LLC, 1997.

8 Hsu C, Wu J. Hidden digital watermarks in images[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1999,8(1): 58~68.

9 Podichuk C, Zeng W. Image-adaptive watermarking using visual models [J]. IEEE Journal Selected. Areas Communication, 1998,16(5): 525~539.

10 Cox I, Kilian J, Leighton J *et al.* Secure spread spectrum watermarking for multimedia[J]. IEEE Transactions on Image Processing. 1997,6(12):1673~1687.

11 Zeng W, Liu B. A statistical watermark detection technique without using original images for resolving rightful ownerships of digital images [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1999,8(11): 1534~1548.



苟意远 1978 年生,北京大学计算机科学技术系 2000 级硕士研究生,研究方向为基于数字水印的版权保护、面向出版的图形图像处理。



陈晓鸥 1960 年生,研究员,硕士生导师,研究方向为面向出版的图形图像处理、Web 出版及电子商务。

《中国图象图形学报》文后参考文献编排格式

1. 专著、论文集、学位论文、报告

[序号]主要责任者.文献题名[文献类型标识].出版地:出版者(或存放单位),出版年.起止页码.

- 1 刘国钧,陈绍业,王凤.图书馆目录[M].北京:高等教育出版社,1957;15~18.
- 2 张筑生.微分半动力系统的不变集[D].北京:北京大学数学系数学研究所,1983.

2. 期刊文章

[序号]主要责任者.文献题名[J].刊名,年,卷(期):起止页码.

- 1 金显贺,王昌长,王忠东等.一种用于在线检测局部放电的数字滤波技术[J].清华大学学报(自然科学版),1993,33(4):62~67.

3. 论文集中的析出文章

[序号]析出文献主要责任者,析出文献题名[A].见(In):原文献主要责任者(任选),原文献题名[C].出版地:出版者(或会议地点),出版年;析出文献起止页码.

- 1 钟文发.非线性规划在可燃毒物配置中的应用[A].见:赵玮.运筹学的理论与应用——中国运筹学会第五届大会论文集[C].西安:西安电子科技大学出版社,1996;468~471.
- 2 Middleton V, Owen M J, Elliman D G *et al.* Development in non-axisymmetric filament winding[A]. In: Proceedings of 2nd International Conference on Automated Composite'88 Noordwijkerhout [C], the Netherlands, 1988;324~335.

外文除众所周知的缩写外(如 IEEE, SPIE, USA...),其余均用全称.

参考文献类型及标识

参考文献类型	专著	论文集	报纸文章	期刊文章	学位论文	报告	标准	专利
文献类型标识	M	C	N	J	D	R	S	P

电子文献类型参考文献标识

电子参考文献类型	数据库	计算机程序	电子公告
电子文献类型标识	DB	CP	EB

载体类型标识

载体类型	联机网络	磁带	光盘	磁盘
载体标识	OL	MT	CD	DK