

图像数字水印技术中滤波器的设计和应用

伍祥生 臧晓峰

(湖南师范大学信息技术系,长沙 410081)

摘要 为了更好地进行图像数字水印的识别,基于对数极坐标仿射(LPM),设计和应用了5种滤波器,即经典匹配滤波器、振幅滤波器、相位滤波器、双态相位滤波器和改进的滤波器。为比较各种滤波器对数字水印的识别能力,将这些滤波器对嵌入图像中的数字水印进行了两种情况的检测实验。实验结果表明,当含数字水印的图像没有几何失真,即没有旋转、缩小和放大、平移等变化时,改进的滤波器、相位滤波器和双态相位滤波器均能对图像中的数字水印进行识别,改进的滤波器在图像数字水印检测中的识别能力要强于相位滤波器和双态相位滤波器;当含数字水印的图像发生微小几何变化,即旋转 10° 和尺寸缩小为原图像的0.9时,则传统的4种滤波器都不能对图像中的数字水印进行识别,但改进的滤波器仍具有对图像中数字水印进行识别的能力。

关键词 图像数字水印 对数极坐标仿射 滤波器 数字水印识别

中图分类号: TP309.7 TP391.41 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2005)01-0087-06

The Design and Application of the Filters in Digital Image Watermarking Technology

WU Xiang-sheng, ZANG Xiao-feng

(The department of information technology, Hunan Normal University, Changsha 410081)

Abstract Based on log-polar mapping, five filters have been designed and applied in this paper. In order to check the digital watermark embedded in digital images, we compared the classical matched filter, amplitude-only filter, phase-only filter, binary phase-only filter and a new filtering method. Experimental results demonstrate that the new filter, phase-only filter and binary phase-only filter can be used to identify the digital watermark in the digital images when there is no rotation, scaling and translation for the images embedded digital watermark; Suppose the image embedded digital watermark is rotated ten degree and scaled down ten percent, it can be found the classical matched filter, amplitude-only filter, phase-only filter and binary phase-only filter can't be used to identify the digital watermark in the digital images, but this new filtering method can still be used to identify the digital watermark in digital images.

Keywords digital image watermarking, log-polar mapping, filter, digital watermarking identify

1 引言

近几年数字水印技术已成为国际学术界兴起的一个前沿研究领域。随着计算机和网络技术的飞速发展,数字图像、音频和视频等多媒体数字产品愈来愈需要一种有效的版权保护方法。另外,通信系统在

网络环境下的信息安全问题也日益显露出来。数字水印技术则为上述问题提供了一种有效的解决方案。所谓数字水印(digital watermarking)技术,就是将数字、序列号、文字、图像标志等版权信息嵌入到多媒体数据中,以起到版权保护、实现秘密通信、数据文件的真伪鉴别和产品标识等作用。到现在为止,许多数字水印的方法^[1-4]已经提出,例如,Kutter等首先提出

基金项目:中国留学基金项目(2001-3048)

收稿日期:2004-04-06;**改回日期**:2004-06-28

第一作者简介:伍祥生(1953~),男,曾任湖南师范大学信息技术系主任,教授,硕士生导师,现为广东经济管理学院信息工程系教授。先后为加拿大钮芬兰纪念大学(1988年至1990年)和清华大学计算机系(1998年至1999年)访问学者,2003年2月至8月为加拿大渥太华大学信息工程学院访问教授。目前研究方向为图像处理和多媒体通信等。E-mail:wxs@hunnu.edu.cn

了第 2 代水印技术的概念,并阐述了一种基于点特征和 2 维连续小波变换的水印策略; Pun 利用噪声可见性函数(noise visibility function, NVF)来嵌入水印信息,以满足水印的不可见性,并通过离散傅里叶变换(discrete Fourier transform, DFT)和水印自身的自相关函数(autocorrelation function, ACF)来实现水印抵抗几何攻击的鲁棒性。本文的工作是将数字水印嵌入在一幅图像的对数极坐标仿射(log-polar mapping, LPM)的傅里叶幅度谱中,然后设计 5 种滤波器来对含有数字水印的图像进行处理,即使用经典匹配滤波器、振幅滤波器、相位滤波器、双态相位滤波器和改进的滤波器来对嵌入数字水印的图像进行检测和识别。实验结果表明:当含数字水印的图像没有几何变化时,改进的滤波器、相位滤波器和双态相位滤波器均能对图像中的数字水印进行识别;改进的滤波器在图像数字水印的检测中的识别能力强于相位滤波器和双态相位滤波器;当含数字水印的图像发生微小几何变化,即旋转 10° 和尺寸缩小为原图像的 0.9 时,则所设计的 4 种传统滤波器都不能对图像中的数字水印进行识别,但改进的滤波器仍具有对图像中的数字水印进行识别的能力。

2 滤波器的设计

在滤波器设计之前,先回顾一下与本文有关的基础知识。

2.1 2 维傅里叶变换和傅里叶逆变换

一幅具有 $M \times N$ 个像素的图像 $f(x, y)$ 的离散傅里叶变换和相应的逆变换(IDFT)^[5] 定义如下:

$$F(u, v) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-i2\pi(ux/M+vy/N)} \quad (1)$$

式中, $u=0, 1, 2, \dots, M-1; v=0, 1, 2, \dots, N-1$ 。

$$f(x, y) = \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} F(u, v) e^{i2\pi(ux/M+vy/N)} \quad (2)$$

式中, $x=0, 1, 2, \dots, M-1; y=0, 1, 2, \dots, N-1$ 。

2.2 2 维快速傅里叶变换

具有 $M \times N$ 个像素的图像 $f(x, y)$ 的快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)^[5] 的定义如下:

$$\begin{aligned} F(u, v) &= \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-i2\pi(ux/M+vy/N)} \\ &= \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} e^{-i2\pi ux/M} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-i2\pi vy/N} \\ &= \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} F(x, u) e^{-i2\pi ux/M} \end{aligned} \quad (3)$$

其中

$$F(x, u) = N \left\{ \frac{1}{N} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-i2\pi vy/N} \right\} \quad (4)$$

在式(3)、式(4)中, $U=0, 1, 2, \dots, M-1; V=0, 1, 2, \dots, N-1$ 。

2.3 对数极坐标仿射

若一幅图像中的点 $P(u, v) \in \mathbf{R}^2$, 则其对数极坐标仿射定义如下:

$$\begin{aligned} u &= e^\rho \cos \theta \\ v &= e^\rho \sin \theta \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $\rho \in \mathbf{R}, 0 \leq \theta < 2\pi$ 。由式(5)很容易看到, 对于一个点 $P_1(u, v)$, 将有一个点 $P_2(\rho, \theta)$ 唯一地与其相对应。

2.4 互相关函数

为了简化匹配过程, 可在空域或傅里叶频域中利用互相关(cross-correlation)函数来进行匹配。假设一个模板是 g , 一幅图像是 f , 通常模板 g 小于图像 f , 则 2 维的互相关函数定义如下:

$$r(u, v) = \frac{\sum_x \sum_y f(x-u, y-v) g(x, y)}{\sqrt{\sum_x \sum_y (f(x-u, y-v))^2}} \quad (6)$$

如果模板 g 与图像 f 准确地相匹配, 则互相关函数在相应位置处有它的峰值。

根据相关理论, 相关函数可以通过 DFT 的方法计算出来, 而计算 DFT 最有效的方法就是 FFT。基于对数极坐标仿射, 本文所选的匹配模板 g 与图像 f 的相关表达式如下:

$$R = \text{IFFT}[F(\omega_\rho, \omega_\theta) G^*(\omega_\rho, \omega_\theta)] \quad (7)$$

其中

$$\begin{aligned} F(\omega_\rho, \omega_\theta) &= \text{FFT}[f(\rho, \theta)] = A_F(\omega_\rho, \omega_\theta) e^{-i\varphi_F(\omega_\rho, \omega_\theta)} \\ G(\omega_\rho, \omega_\theta) &= \text{FFT}[g(\rho, \theta)] = A_G(\omega_\rho, \omega_\theta) e^{-i\varphi_G(\omega_\rho, \omega_\theta)} \end{aligned} \quad (8)$$

符号“*”表示为复数共轭。

根据上述相关的表达式, 就可以定义对数极坐标域中的 5 种滤波器。

(1) 经典匹配滤波器 经典匹配滤波器(classical matched filter)通常包括振幅和位相信息, 它能对各种频率成分的振幅和相位同时起作用。经典匹配滤波器在对数极坐标域中的定义如下:

$$G(\omega_\rho, \omega_\theta) = A_G(\omega_\rho, \omega_\theta) e^{-i\varphi_G(\omega_\rho, \omega_\theta)} \quad (9)$$

(2) 振幅滤波器 振幅滤波器(Amplitude-only filter)只改变各频率成分的相对振幅分布, 而不改变

其相位分布。振幅滤波器在对数极坐标域中的定义如下:

$$G_A(\omega_\rho, \omega_\theta) = A_C(\omega_\rho, \omega_\theta) \quad (10)$$

(3) 相位滤波器 相位滤波器 (Phase-only filter) 只改变空间频谱的相位, 不改变它的振幅分布。相位滤波器在对数极坐标域中的定义如下:

$$G_\varphi(\omega_\rho, \omega_\theta) = e^{-j\varphi_C(\omega_\rho, \omega_\theta)} \quad (11)$$

(4) 双态相位滤波器 双态相位滤波器 (binary phase-only filter, 简写 BPOF) 在对数极坐标域中的定义如下:

$$G_{BPOF}(\omega_\rho, \omega_\theta) = e^{-j\varphi_{BPOF}(\omega_\rho, \omega_\theta)} \quad (12)$$

其中

$$\varphi_{BPOF}(\omega_\rho, \omega_\theta) = \begin{cases} 0^\circ & G_r \geq 0 \\ 180^\circ & G_r < 0 \end{cases} \quad (13)$$

G_r 代表傅里叶变换 $G(\omega_\rho, \omega_\theta)$ 的实数部分。

(5) 改进的滤波器 大家知道, 在图像数字水印技术中, 相位信息比振幅信息更加重要。在此, 本文设计了一个不同于传统滤波器的滤波器, 即利用匹配模板的相位信息和经历了旋转、缩放和平移变化的含数字水印图像的对数极坐标仿射谱来计算它们的相关性, 其滤波过程可以由下列方程描述:

$$R_\varphi = \text{IFFT}[F_\varphi(\omega_\rho, \omega_\theta)G_\varphi^*(\omega_\rho, \omega_\theta)] \quad (14)$$

其中

$$F_\varphi(\omega_\rho, \omega_\theta) = e^{-j\varphi_r(\omega_\rho, \omega_\theta)} \quad (15)$$

为了解上述所定义的滤波器在数字水印方面的应用效果, 本文将一串伪随机数作为数字水印嵌入到 Barb 图像, 然后利用这 5 种滤波器对其进行检测和识别。

3 数字水印的嵌入算法

数字水印的嵌入一般分为空域和变换域两种方法。空域方法主要有 LSB (least significant bit) 方法、

Patchwork 方法、纹理块仿射编码法等; 变换域的方法有离散余弦变换 (discrete cosine transform, DCT)、离散小波变换 (discrete wavelet transform, DWT)、DFT 以及 Mellin-Fourier 变换等。本文使用变换域的方法进行水印嵌入, 具体数字水印嵌入的步骤如下:

(1) 产生一个数字水印数据序列 利用 PN (pseudorandom number) 发生器产生一个数字水印数据序列, 即产生一串伪随机数, 它是由正负值组成的扩展谱。

(2) 计算原图像的离散傅里叶变换。

(3) 在 DFT 域中嵌入数字水印 将数字水印数据嵌入进原图像的 DFT 幅度谱中。通常是利用如下一个简单的嵌入方程:

$$\hat{E} = E + \gamma W \quad (16)$$

其中, E 是 DFT 原图像的幅度谱, W 表示数字水印数据, \hat{E} 是原图像修改后的 DFT 幅度谱, γ 是用来完成鲁棒性和可见性之间交替换位的数字水印强度。

(4) 获取数字水印图像 应用离散傅里叶逆变换来获取数字水印图像。这样, 在嵌入过程中, DFT 幅度谱的对称性被保持, 图 1 表明了数字水印图像嵌入的过程。

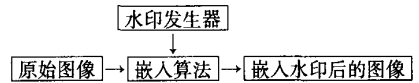


图 1 数字水印嵌入过程

Fig. 1 Embedding algorithm for digital watermark

本文使用 Barb 作为原始图像 (如图 2 (a) 所示)。数字水印可分为可视水印和不可视水印, 根据上述数字水印嵌入算法, 本文进行了可视数字水印的嵌入和不可视数字水印的嵌入。可视数字水印是指可以看见的水印, 就像插入或覆盖在图像上的标识, 它与可视的纸上水印相似, 如图 2 (b) 就嵌入



(a) Barb 原图像



(b) 含可视数字水印的 Barb 图像



(c) 含不可视数字水印的 Barb 图像

图 2 Barb 图像

Fig. 2 Barb's image

了一串可视的伪随机数在 Barb 的手腕部位;图 2 (c)则嵌入了一串不可视的同样伪随机数,其从表面上是不可察觉的。

4 滤波器的应用

在数字水印技术中,数字水印的检测是一项重要环节。检测阶段的关键是设计一个相应于嵌入过程的检测算法,其要求是检测的结果能判断数字水印的存在与否,其目的是起到版权保护、数据文件的真伪鉴别和产品标识等作用。本文的工作只是应用所设计的 5 种滤波器对嵌入 Barb 图中的数字水印进行识别。为了能从图像中识别出数字水印,该数字水印必须从含有数字水印的图像中提取出来,提取的具体步骤如下:

(1) 将含有数字水印的图像转换到对数极坐标域 应用离散傅里叶变换和对数极坐标仿射来将含有数字水印的图像转换到对数极坐标域。

(2) 利用 5 种滤波器计算互相关函数 根据式 (6)和本文所设计的 5 种滤波器,在对数极坐标仿射谱中,计算含数字水印的图像和模板 g 之间的相位谱的互相关函数。如果模板 g 与含数字水印图像 f 准确地相匹配,则互相关函数在相应的位置处有它的峰值。通过峰值的显示和互相关函数值的计算结果也说明滤波器能对数字水印进行识别。图 3 表示了数字水印的识别过程。

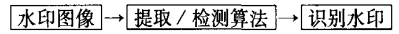


图 3 数字水印的识别

Fig. 3 The recognition of the digital watermark

4.1 识别无几何失真图像的数字水印

大家知道,图像中的数字水印通常具有低通特性,即低通滤波(如均值滤波和中值滤波)应该无法删除掉图像中的数字水印。当含数字水印的图像没有几何变化时,应用本文定义的 5 种滤波器来对含有数字水印的图像(图 2(c))进行数字水印识别实

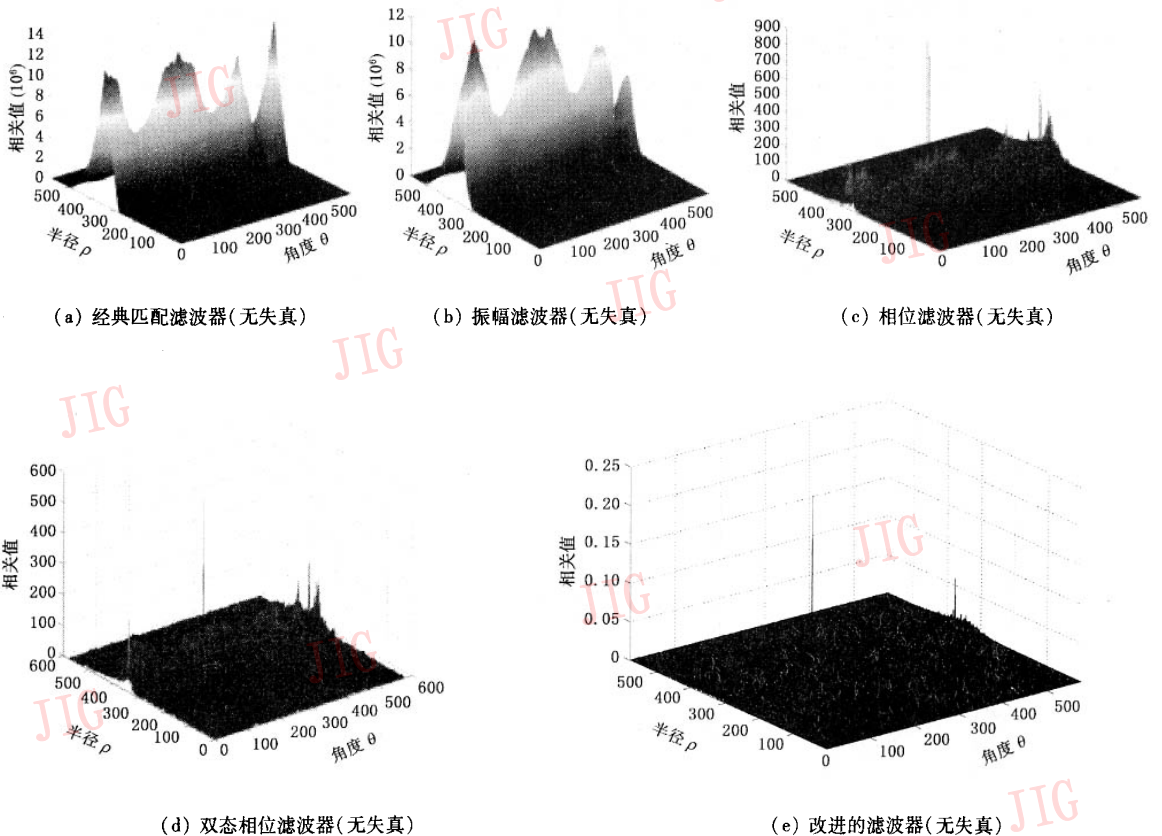


图 4 5 种滤波器对数字水印的识别图

Fig. 4 The identified image of the digital watermark

验,得出如图 4(a)、图 4(b)、图 4(c)、图 4(d)和图 4(e)所示的波形图。实验结果表明,如果含数字水印的图像没有几何失真,即图像没有旋转、缩小或放大、平移变化时,改进的滤波器、相位滤波器和双态相位滤波器均能对含数字水印图像中的水印进行很好地识别,并在相匹配的位置出现一个很尖的峰值;而经典滤波器和振幅滤波器则不能对数字水印进行很好地识别,而且在图像数字水印的检测中,改进的滤波器的识别能力强于相位滤波器和双态相位滤波器。

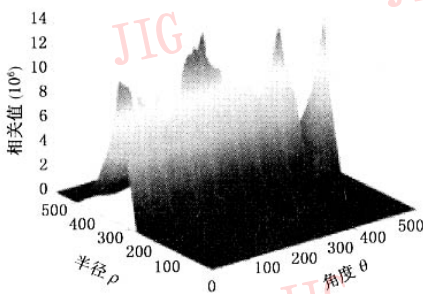
4.2 识别几何失真图像的数字水印

通常几何失真包括图像尺寸大小变化、图像旋转、裁剪、删除或增加图像线条以及反射等。据研究,很多数字水印算法对这些几何操作都是非常脆弱的,即数字水印容易被去掉。本文研究发现,有时数字水印实际还存在于图像中,只是由于图像发生了几何失真,使得一些方法和滤波器却不能对图像中的数字水印进行识别。下面的实验将说明这种情况。

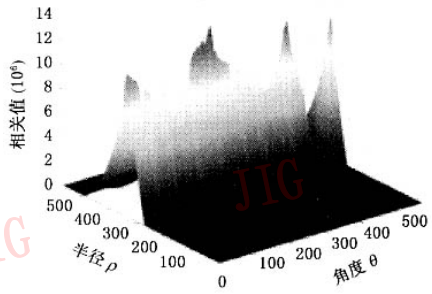
如果将上述实验条件改变一下,如,使含有数字水印的图像旋转 10° 和缩小尺寸为原来图像大小的 0.9 时,也就是说,含数字水印的图像发生了几何失真(如图 5 所示)。若用本文定义的 5 种滤波器对图 5 中的数字水印进行识别,则得出如图 6(a)、图 6(b)、图 6(c)、图 6(d)和图 6(e)所示的波形图。其结果表明,在对数极坐标域中,本文所定义 4 种传统



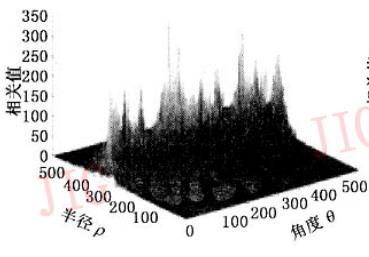
图 5 旋转和缩小的含数字水印的 Barb 图像
Fig.5 Barb's image embedded digital watermark and undergone rotation scaling transformations



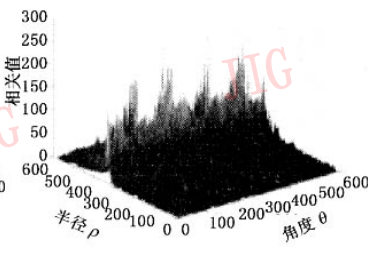
(a) 经典匹配滤波器(有失真)



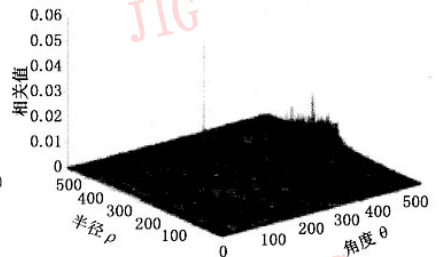
(b) 振幅滤波器(有失真)



(c) 相位滤波器(有失真)



(d) 双态相位滤波器(有失真)



(e) 改进的滤波器(有失真)

图 6 5 种滤波器对数字水印的识别图

Fig.6 The identified images of the digital watermark using five filters

的滤波器得到的波形找不出相匹配峰值的位置,这就说明,在含数字水印的图像发生几何失真时,本文所定义的经典匹配滤波器、振幅滤波器、相位滤波器和双态相位滤波器都不能对其中的数字水印进行识别;而改进的滤波器在含数字水印的图像发生几何失真时,仍能找出相匹配峰值的位置,这说明该滤波器仍具有对图像中的数字水印进行识别的能力(如图6(e)所示)。

5 结 论

数字水印技术是近年来研究出来的一种保护数字图像、音频和视频等多媒体数字产品的版权和鉴别这些数字产品真伪的有效方法。本文研究工作和所得出的实验结果表明,当含数字水印的图像没有几何失真时,本文所定义的5种滤波器中,相位滤波器、双态相位滤波器和改进的滤波器虽都能对图像中的数字水印进行识别,但相比之下,改进的滤波器能获得非常尖的相关峰值和具有比较强的识别能

力。当含数字水印的图像发生几何失真时,本文所定义的对数极坐标域中的4种传统滤波器都不能对图像中的数字水印进行识别,但改进的滤波器仍能在含数字水印的图像发生几何失真时,对图像中的数字水印进行识别。

参考文献(Reference)

- 1 Cox I, Kilian J, Leighton T, *et al.* Secure spread spectrum watermarking for multimedia [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(12): 1673 ~ 1687.
- 2 Kutter M. Watermarking resistant to translation, rotation, and scaling [J]. Proceedings of SPIE, 1998, 36(2): 423 ~ 431.
- 3 Hartung F, Kutter M. Multimedia watermarking techniques [J]. Proceedings of the IEEE, 1999, 87(7): 1079 ~ 1107.
- 4 Alghoniemy M, Tewfik A. Progressive Quantized Projection Watermarking Scheme [J]. Proceedings of ACM Multimedia, 1999, 1(2): 295 ~ 298.
- 5 Jianguang Sun. Computer Graphics (ver. 3) [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998. [孙家广等编著. 计算机图形学(第三版) [M]. 北京:清华大学出版社出版, 1998.]