

基于分数余弦变换的数字图像水印算法^①

Image Watermarking Algorithm Based on Fractional Cosine Transform

张永亮 (南昌航空大学电子信息工程学院 江西南昌 330063)

李 凌 (南京航空航天大学自动化学院 江苏南京 210016)

张先庭 (南昌航空大学 电子信息工程学院 江西南昌 330063)

摘 要: 提出了一种基于分数余弦变换的数字图像水印算法。采用二值图像作为水印信息,作加密处理后,将其自适应地嵌入到变换域中一个幅值较大的系数上。实验结果表明这种算法可以很好的保持图像的质量,并且对常见的图像处理如噪声叠加、JPEG 压缩、均值滤波、图像缩放以及图像裁剪等具有较强的鲁棒性。

关键词: 数字水印 分数余弦变换 余弦变换

1 引言

当今社会的发展已经呈现数字化和网络化两个明显的特征。人们通过互联网可以快捷方便地获得数字信息和在线服务。但同时,盗版也变得更加容易,对数字内容的管理和保护成为业界迫切需要解决的问题。数字水印作为数字产品版权保护的新技术成为研究的热点,它通过对数字产品不可觉察的修改,嵌入版权信息,当对该产品的版权有争议时,可将产品中的版权信息抽取出来,从而确认其真正的版权人。早期,水印设计者关注的是如何把信息隐藏在数字媒体中并不被发现,为此,水印信息被置于二进制数据的最低位中,但是容易被常见的图像处理如噪声叠加、JPEG 压缩、均值滤波、图像缩放以及图像裁剪等破坏;随后,出现了大量空间域^[1]内的水印算法,水印嵌入不再是修改空间域内的单个点,而是一个点集或一个区域的特征,例如均值、方差、奇偶性等,但是,嵌入水印的信息量有限,而且对几何变换敏感;相较于空间域,出现了大量变换域^[2-4](DFT、DCT、DWT)的水印算法,研究表明,变换域算法有较好的鲁棒性。

分数余弦变换^[5-6]兼有信号空间域和变换域的双重特征,作为一种有效的时频分析工具,展现了广阔的应用前景。本文提出了一种利用块分类的分数余弦变换中自适应地嵌入数字水印的技术,并通过实验验证了算法的可行性。

2 分数余弦变换

离散余弦变换的变换核有四种形式,对于其中的 DCT-I 型,其变换核为^[6]

$$C_{N+1}^I = \sqrt{\frac{2}{N}} \Gamma_m \Gamma_n \cos\left(\frac{mn\pi}{N}\right), m, n = 0, 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

$$\text{系数 } \Gamma_m \Gamma_n = \begin{cases} 1/\sqrt{2} & m, n = 0 \text{ 或 } m, n = N \\ 1 & \text{其它} \end{cases} \text{ 将 DCT-I}$$

型推广到分数阶得到离散分数余弦变换,其变换核为

$$C_N^\alpha = U_N D_N^{\alpha/\pi} U_N^T \\ = U_N \text{diag}(1, e^{-i\alpha/\pi}, \dots, e^{-i(N-1)\alpha/\pi}) U_N^T \quad (2)$$

其中, α 为分数余弦变换的阶次, $U_N = [V_0(x) | V_2(x) | \dots | V_2(N-2)(x)]$, $V_K(x)$ ($K=0, 2, 4, \dots, 2N-2$, N 为取样点数) 为 DCT-I 型的特征向量,且这些特征向量构成完备正交集。基于此, Pei SC 定义如下的分数余弦变换^[6]

$$C^\alpha[f(x)] = \sum_{m=0}^{\infty} e^{-im\alpha} A_{2m} V_{2m}(x) \quad (3)$$

其中, $A_{2m} = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) V_{2m}(x) dx$ 为 $f(x)$ 在以 $V_{2m}(x)$ 为基底上的展开式系数, C^α 为分数余弦变换的算符。 C^α 满足: (1)、 C^α 对任意实数 α 连续; (2)、 $C^0[f(x)] = f_0(x)$, $C^1[f(x)] = f_1(x)$; (3)、 $C^{\alpha+\beta}[f(x)] = C^\alpha[C^\beta[f(x)]]$, 即 C^α 满足可加性。综上所述,当 $\alpha=0$ 时,分

① 基金项目:南昌航空大学校级科研项目(EC200604057)

数余弦变换为信号本身;当 $\alpha=1$ 时,分数余弦变换就变为余弦变换。由分数余弦变换的可加性,只要作阶次为 $-\alpha$ 的分数余弦变换即可实现逆变换。

3 分数余弦变换域中的水印算法

3.1 水印嵌入

Cox 等^[3]提出强壮水印算法的一个重要原则是水印信号应该嵌入源数据中对人的感觉最重要的部分。在频谱空间中,这种重要部分就是低频分量。这里,选择分数余弦变换域中一个幅值较大的系数嵌入水印信号,因为幅值较大的系数集中了信号的大部分能量,水印嵌入后对图像影响不大,有利于提高水印算法的鲁棒性。另外,二值水印图像可以用二进制序列来表示,方便了水印的生成、管理与跟踪,并且可以在水印的生成过程中使用密码算法,从而使水印具有更高的安全性和实用性,故本文采用二值图像作为水印。水印嵌入的步骤如下:

第一步:为了与 JPEG 的压缩标准一致,将大小为 $M_1 \times M_2$ 像素的灰度图像 $F(x,y)$, $1 \leq x \leq M_1, 1 \leq y \leq M_2$ 分成 N 块相互不重叠的 8×8 像素的分块 $A_i(u,v)$, $1 \leq i \leq N, 1 \leq u, v \leq 8$, 对每一分块图像 i 作阶次为 α 的分数余弦变换得到 $C^\alpha[A_i(u,v)]$, $1 \leq u, v \leq 8$ 。

第二步:将二值水印图像 w 与密匙 h 通过异或操作,并作伪随机排列进行加密,得到加密后的水印信号 w_1 。在不知道密匙的情况下,即使盗版者提取出水印信息也无法恢复出原始二值水印图像。

第三步:选取图像块 $i, 1 \leq i \leq N$ 的分数余弦变换 $C^\alpha[A_i(u,v)]$, $1 \leq u, v \leq 8$ 中幅值第 K 大的系数(记为 $C^\alpha[A_i(u,v)|_{K_{max}}$),通过改变其幅值的大小,嵌入加密后的二值水印信息,如式(4)所示。

$$C^\alpha[B_i(u,v)|_{K_{max}}] = C^\alpha[A_i(u,v)|_{K_{max}}] \times (1 + \lambda \cdot w_1) \quad (4)$$

其中, $C^\alpha[B_i(u,v)|_{K_{max}}]$ 为嵌入水印后,图像块 i 的分数余弦变换域中幅值第 K 大的系数, λ 为水印的嵌入强度,一般取 $0 \sim 0.2$ 。通常,选择幅值很大的系数嵌入水印时,可选择较大的嵌入强度,因此,幅值的绝对变化量较大,但是水印的不可见性下降;选择幅值较小的系数嵌入水印时,虽然保证了水印的不可见性,但是嵌入强度较小,可改变的绝对幅值较小,水印易被滤波,量化等操作破坏。大量的数值实验表明,选择 $K=3$ 的系数嵌入水印是合适的。

第四步:作阶次为 $-\alpha$ 的分数余弦逆变换,如式(5)所示,得到包含水印的图像块 $B_i(u,v)$ 。

$$B_i(u,v) = C^{-\alpha}\{C^\alpha[B_i(u,v)]\} \quad 1 \leq u, v \leq 8 \quad (5)$$

则,嵌入水印后的图像 $G(x,y)$ 为

$$G(x,y) = \bigcup_{i=1}^N B_i(u,v) \quad 1 \leq u, v \leq 8 \quad (6)$$

为了检测嵌入水印后的图像的质量,采用峰值信噪比(PSNR)作客观评价,PSNR 越大则嵌入水印后的图像与原始图像越接近。

$$PSNR = 10 \times \lg \left\{ \frac{M_1 \times M_2 \times \text{Max} \forall_{i,j} F(i,j)}{\sum_{i=1}^{M_1} \sum_{j=1}^{M_2} [F(i,j) - G(i,j)]^2} \right\} \quad (7)$$

3.2 水印检测

本文提出的水印算法是图像依赖型的,即在水印提取时需要原始图像,水印检测时只要作嵌入的逆过程即可。

第一步:将原始图像 $F(x,y)$ 和含水印的图像 $G(x,y)$ 分别进行 8×8 像素分块,并对每一分块作阶次为 α 的分数余弦变换得到 $C^\alpha[A_i(u,v)]$ 及 $C^\alpha[B_i(u,v)]$, $1 \leq i \leq N, 1 \leq u, v \leq 8$ 。

第二步:分别选取分数余弦变换域 $C^\alpha[A_i(u,v)]$, $C^\alpha[B_i(u,v)]$ 中幅值第 K 大的系数,由式(4)整理得

$$w_1' = \frac{C^\alpha[B_i(u,v)|_{K_{max}}] / C^\alpha[A_i(u,v)|_{K_{max}}] - 1}{\lambda} \quad (8)$$

w_1' 为检测到的水印信号,可通过与 0 值比较而将其变为二值形式

$$w_1' = \begin{cases} 0 & w_1' \leq 0 \\ 1 & w_1' > 0 \end{cases} \quad (9)$$

第三步:将二值水印信号 w_1' 与密匙 h 进行解密,得到提取的二值水印图像 w' 。采用归一化相似系数 ρ 对原始水印 w 和提取水印 w' 的相似性作客观评价。

$$\rho(w,w') = \frac{\sum_{i=1}^{L_1} \sum_{j=1}^{L_2} (w(i,j) - \bar{w}(i,j)) \cdot (w'(i,j) - \bar{w}'(i,j))}{\sqrt{\sum_{i=1}^{L_1} \sum_{j=1}^{L_2} (w(i,j) - \bar{w}(i,j))^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{L_1} \sum_{j=1}^{L_2} (w'(i,j) - \bar{w}'(i,j))^2}} \quad (10)$$

其中, \bar{w} 为原始水印的平均值, \bar{w}' 为提取水印的平均值。 ρ 越大则提取的水印和原始水印信号越接近,将相似系数与给定的阈值进行比较即可判断水印存在与否。

4 实验结果与分析

图 1 所示是 256×256 像素的灰度图像。选取分数余弦变换域中 $K=3$ 的系数嵌入图 2 所示的 32×32

像素的二值水印图像。图 3 所示是在 $\alpha = 0.6$ 时嵌入水印后的图像,其峰值信噪比 $PSNR = 45$ 。由于充分考虑了人眼的视觉掩蔽效应,图像的主观质量很好,人眼感觉不到水印的存在。对比图 1 的原始图像,也几乎看不出差别。图 4 所示是从图 3 中提取的二值水印图

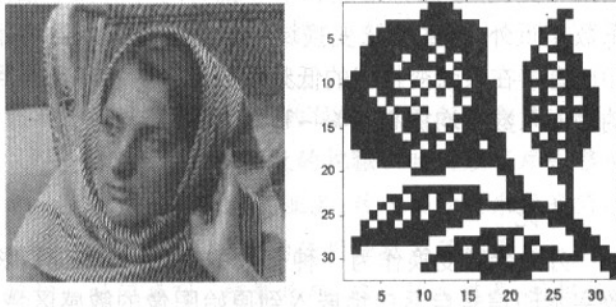


图 1 原始图像

图 2 水印图像

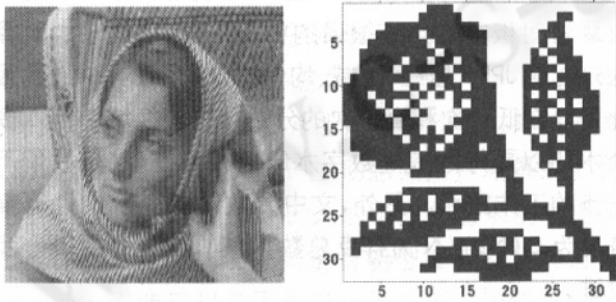


图 3 嵌入水印后的图像 图 4 提取出的水印图像, $\rho = 1$

像,其相似系数 $\rho = 1$ 。肉眼对比图 2 可见,它和原始水印图像完全一致。大量的实验表明,选择适当的嵌入强度,在 K, α 取其它值时,也可以很好地嵌入并完整地提取出水印信号。

为了检测算法的鲁棒性,对含水印的图像分别进行下面的处理:(1)、加高斯噪声:加入均值为 0,方差为 0.001 的高斯白噪声;(2)、加椒盐噪声:加入强度为 1% 的椒盐噪声;(3)、JPEG 压缩:进行质量因子为 30 的 JPEG 压缩;(4)、均值滤波:采用 3×3 均值滤波器对图像处理;(5)、图像缩放:将图像缩小一半,再放大到原始图像,其缩小和放大均采用双三次插值法;(6)、中心裁剪:在图像中心截去 $1/4$,并用黑像素代替。通过修改嵌入强度,保持嵌入水印后的图像的 $PSNR = 45$ 不变,图 5 - 图 7 作出了在变换阶次 $0 \leq \alpha \leq 1$ 时,分别选取分数余弦变换域中幅值第 $K = 3, 5, 7$ 大的系数嵌入二值水印信息后,提取出的二值水印图像与原始二值水印图像的相似系数的变化曲线。

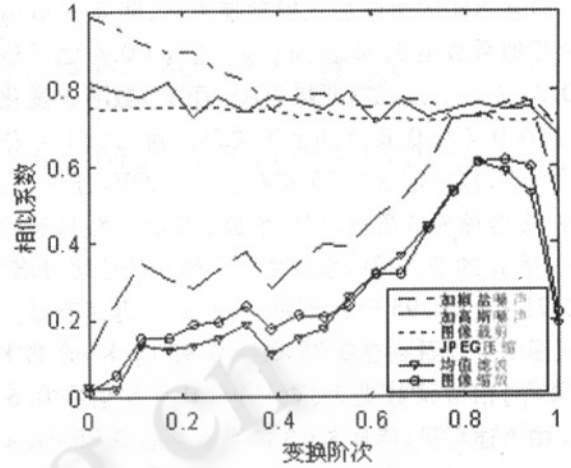


图 5 相似系数的变化曲线, $K = 3$

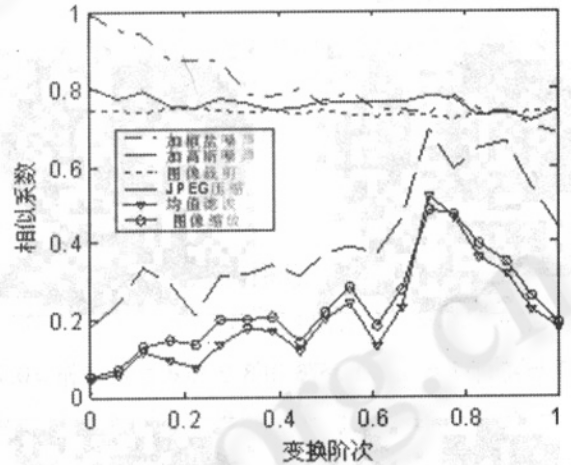


图 6 相似系数的变化曲线, $K = 5$

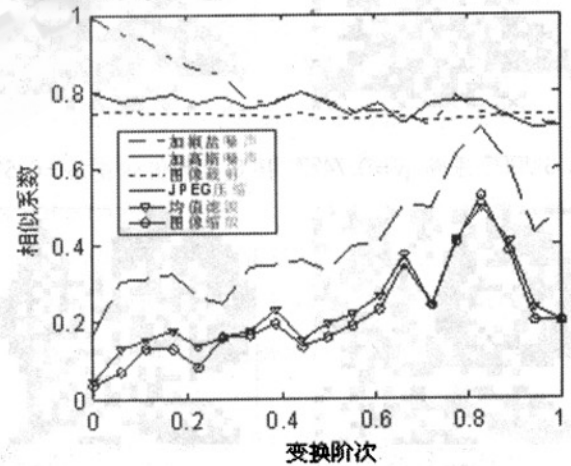


图 7 相似系数的变化曲线, $K = 7$

对比图 5 - 图 7 可见,对于加高斯噪声、加椒盐噪声及图像裁剪三种情况,相似系数的变换趋势基本相

同。对含水印的图像加入椒盐噪声后,随着 α 取值的增大相似系数由 0.98 迅速衰减,在 $\alpha > 0.4$ 之后稳定在 0.75 左右。加入高斯噪声后,相似系数随 α 变化不大,都在 0.7 和 0.8 之间上下波动。对图像中心裁剪后,相似系数稳定在 0.75 左右。对于 JPEG 压缩、均值滤波、图像缩放的情况,相似系数的变化曲线只是趋势相同,随 α 的增大相似系数由一个很小的值缓慢增大,在 $0.75 < \alpha < 0.95$ 时达到最大,然后又迅速衰减。但是从图中可以看到在 $0.75 < \alpha < 0.95$ 时, $K=3$ 较 $K=5, 7$ 时的相似系数更大、更平坦,其平均值在 0.6 以上。由上述可见,选择 $K=3$ 的系数并在 $0.75 < \alpha < 0.95$ 时在分数余弦变换域中嵌入水印有更好的鲁棒性,若以 0.5 作为水印有无的判断阈值,对于上述六种情况算法都是稳健的。



图 8.1 加高斯噪声, $\rho=0.7578$ 图 8.2 加椒盐噪声, $\rho=0.7325$

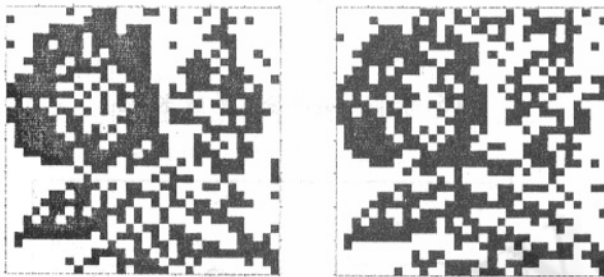


图 8.3 JPEG 压缩, $\rho=0.7427$ 图 8.4 均值滤波, $\rho=0.5938$



图 8.5 图像缩放, $\rho=0.6278$ 图 8.6 中心裁剪, $\rho=0.7356$

图 8.1 - 图 8.6 所示是在 $\alpha = 0.85, K=3$ 时的水

印检测结果,从图中也可以看出原始水印图案。另外,我们选择余弦变换域中一个低频系数位置(2,1)嵌入水印,并保持 $PSNR = 45$ 。通过实验得到上述六种情况下的相似系数分别为 0.5644, 0.6427, 0.6367, 0.5058, 0.5802, 0.7323。对比 $\alpha = 0.85, K=3$ 时的检测结果可见,除了图像缩放和中心裁剪两种情况下相似系数接近外,分数余弦变换域中自适应地嵌入数字水印比直接在余弦变换域的低频系数上嵌入水印而得到的相似系数平均提高 10% - 15%。

5 结论

分数余弦变换作为一种有效的时频分析工具,将数字水印信号自适应地嵌入到原始图像的敏感区域,较好地解决了水印的不可见性与鲁棒性之间的矛盾提高了水印算法的鲁棒性。从图 5 中也看到在 α 取值小时算法对椒盐噪声有很强的鲁棒性,而取值较大时算法对图像 JPEG 压缩、裁减、均值滤波有强的鲁棒性,因此可以在低阶次和高阶次的分数余弦变换域中嵌入多个水印以更好的提高数字水印的鲁棒性,这是我们下一步的工作重点。另外,文中分数余弦变换的计算复杂度为 $O(N^2)$ (N 为样点总数),其算法还需要进一步改进。

参考文献

- 1 Schyndel R, Tirkel A, Osborne C. A Digital Watermark. Proc. IEEE Int. Conf. on Image Proc, 1994, 2: 86 - 90.
- 2 Ruan Aih JJK, Pun T, Rotation. Scale and translation in - variant spread spectrum digital image watermarking. Signal Processing, 1998, 66(3): 303 - 317.
- 3 Cox IJ, Kilian J, Leighton FT. Secure spread spectrum watermarking for multimedia. IEEE Trans on Image Processing, 1997, 6(12): 1673 - 1687.
- 4 Xia X, Boncelet CG, Arce GR. Wavelet transform based watermark for digital images. Optics Express, 1998, 3(12): 497 - 511.
- 5 Lohmann AW, Mendlovic D, Zalevsky Z. Some important fractional transformations for signal processing. Opt. Commun, 1996, 125: 18 - 20.
- 6 Pei SC, Yeh MH. The discrete fractional cosine and sine transforms. IEEE Trans. Signal Proc, 2001, 49(6): 1198 - 1207.