数字图像水印嵌入强度的最优估计 *

金 聪[1,2], 彭嘉雄[1]

(1. 华中科技大学 图像识别与人工智能研究所 图像信息处理与智能控制教育部重点实验室,湖北 武汉 430074;
2. 华中师范大学 计算机科学系,湖北 武汉 430079)

摘 要:提出了一种在数字图像中水印嵌入强度的最优估计方法。对基于一次 Bézier 曲线融合方式的嵌入规则进行了研究。在水印图像的提取过程中,水印强度因子的选择是基于极大似然估计方法。对基于一次 Bézier 曲线融合方式的嵌入规则与加法、乘法嵌入规则的峰值信噪比进行比较,可以看出前者嵌入水印的峰值信噪比高于另外两种嵌入方法,人类视觉系统不能发觉嵌入了水印的隐秘图像与原始图像的差别;在不知道嵌入水印强度因子的前提下,可根据对水印强度因子的估计,从隐秘图像中将水印提取出来,而且提取效果令人满意;水印图像由二值图像推广到非二值图像。

关键词:数字水印; 强度因子; Bézier 曲线; 极大似然估计

中图分类号:TP391 **文献标识码**:A **文章编号**:1007-2276(2004)02-0174-04

Optimal estimation of the embedding strength for the digital image watermarking *

JIN Cong[1,2], PENG Jia-xiong[1]

(1. Institute for Pattern Recognition and Artificial Intelligence, State Key Laboratory of Education Ministry for Image Processing and Intelligent Control, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;
2. Department of Computer Science, Central China Normal University, Wuhan 430079, China)

Abstract: In this paper, an optimal estimation of the embedding strength for the digital image watermark is discussed. Under the assumptions that the original image data are an i.i.d. random sequence from a Guassian distribution, it's shown that this embedding strength should be estimated by observing the averages of the watermarked image and briefly calculating between them. The approach is based on maximum-likelihood estimation of the watermark embedding strength. The experimental results show that this method is effective for watermark extraction. Moreover, according to the addition, multiplication and fusion embedding rules, their performances are compared and analyzed using PSNR. The conclusions obtained by experiments are useful to future research.

Key words: Digital watermarking; Strength factor; Bézier curve; Maximum-likelihood estimation

---

收稿日期:2003-05-10; **修订日期**:2003-09-08

基金项目:国家自然科学基金项目资助(F60085002);中国科学院信息安全国家重点实验室开放课题基金(03-02);湖北省教育厅重点基金项目资助(2003A012)

作者简介:金聪(1960-),女,上海人,教授,主要研究方向为信息隐藏、数字图像处理、智能信息处理。

0　引　言

数字水印[1~4]技术是目前非常热门的研究课题,其研究目的是为了保护数字产品的著作权及信息的确认,它可以标识作者、所有者、发行者及使用者等,并携带版权保护信息和认证信息,目的是鉴别出非法复制和盗用的数字产品,作为密码学的加密或置乱技术的补充,保护数字产品的合法拷贝和传播。

在版权保护技术中,利用数字信号处理技术实现的“数字水印”,将一些特殊数字串有意识地嵌入到数字声音、图像或视频等原始信号中。数字水印通常是不可见的,只有通过专用的检测器或阅读器才能提取。数字水印是信息隐藏技术的一个重要研究方向。可以将其作为标识所有者和发布者身份的有效手段,它对信息所有者和发布者是确定的,而对信息使用者则是充分隐蔽的。Mitchell D. Swason 等人已对数字水印的特性作了定义[5]。

目前数字水印方案有很多,许多公司已推出了此类产品。但由于该研究是基于计算机科学、密码学、通信理论、算法设计以及信号处理等领域的思想和概念,综合利用这些领域的最新进展,但无法避免其固有缺点,同时也受到研究方法的限制。目前大多数研究主要是集中在数字水印的设计、检测数字水印的存在上,所提出的方案或产品都存在不足,通常缺少坚实的理论基础,研究尚处于初级阶段,从理论到实际都有许多问题亟待解决。

1　数字水印图像嵌入模型

数字水印概念提出的时间虽然不长,就出现了很多嵌入方法,但人们只关注图像数字水印。为简单起见,规定嵌入水印的图像称为隐秘图像,没有嵌入水印的图像称为原始图像,而需要被嵌入的图像称为水印图像。

在原始图像中嵌入数字水印图像,实际上就是在原始图像信号的幅值上叠加信息,无论是在时域(或空间域)还是在变换域,常见的叠加方式有两种,一种是直接在原始图像信号的幅值上叠加,另一种是根据原始图像信号的幅度按比例叠加,即分别为 $q_i = p_i + \alpha w_i$ 和 $q_i = p_i(1 + \alpha w_i)$。其中,$\{p_i\}$为原始图像;$\{w_i\}$为水印图像;$\{q_i\}$是隐秘图像;而 α 是一个控制嵌入水印强度的因子。这两种嵌入方法各有特点,在数字水印的研究与应用中广泛使用。其共同点是在 p_i 的基础上嵌入需要隐藏的信息,而 p_i 本身没有发生任何变化。这样做的目的是为了避免隐秘图像与原始图像在人的视觉上产生太大的差异。其实,这样做没有对原始图像$\{p_i\}$和水印图像$\{w_i\}$进行综合考虑,在不影响人类视觉的前提下,适当对$\{p_i\}$的幅值同时做一定的修改未尝不可。而基于一次 Bézier 曲线融合方式的水印嵌入规则,正是对原始图像$\{p_i\}$和水印图像$\{w_i\}$进行综合考虑获得的。嵌入规则为:

$$q_i = (1 - \alpha)\, p_i + \alpha w_i \quad 0 \leqslant \alpha < 1 \qquad (1)$$

通过公式(1)可以得到隐秘图像$\{q_i\}$。注意,公式(1)对 w_i 是可逆的,因此这种嵌入方法还可以实现水印图像的提取。

以上三种嵌入水印方法的实际效果可通过实验来证实。在获得隐秘图像后,如何通过隐秘图像和水印图像来估计强度因子 α,并从隐秘图像中提取出水印图像?这个问题至今还没有得到很好的解决。文中将采用极大似然估计法来实现 α 的最优估计。

在以下的讨论中,至于 p_i 和 q_i 是表示空间变量(如图像的灰度)、时间变量(如音频强度)、频率变量(如 DFT 或 DCT 系数)还是表示任何其他形式的变量对讨论没有本质的影响。因此不需具体指明它们到底代表什么变量。

首先设$\{p_i\}$服从均值为零、方差为 σ^2 的高斯分布,即其概率密度函数为:

$$f(p_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\,\sigma} e^{-\frac{p_i^2}{2\sigma^2}}$$

当然,也可以根据实际情况设$\{p_i\}$服从其他分布,其研究方法类似。

定理　设序列 $P = \{p_i : i = 1, 2, \cdots, N\}$为原始图像,$W = \{w_i : i = 1, 2, \cdots, N\}$为水印图像,$Q = \{q_i : i = 1, 2, \cdots, N\}$为隐秘图像。这里 $N = m \times n$,其中 m、n 分别是图像的行数与列数。假设 P 是独立同分布随机变量序列,且随机变量 $p_i \sim N(0, \sigma^2)$,$i = 1, 2, \cdots, N$,则按一次 Bézier 曲线融合方式(即按公式(1))嵌入水印时,α 的极大似然估计量为:

$$\hat{\alpha} = \frac{\sigma^2 + \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} q_i w_i - \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} q_i^2}{2\sigma^2 - \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} q_i w_i + \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} w_i^2} \tag{2}$$

证明 因为 $p_i \sim N(0, \sigma^2)$,所以由参考文献[7]得知 $q_i = (1-\alpha)p_i + \alpha w_i \sim N(\alpha w_i, (1-\alpha)^2\sigma^2)$,因此可以得到$\{q_i\}$的联合概率密度函数:

$$f(Q;\alpha) = \prod_{i=1}^{N} \frac{1}{\sqrt{2\pi}(1-\alpha)\sigma} e^{-\frac{(q_i-\alpha w_i)^2}{2(1-\alpha)^2\sigma^2}} = \frac{1}{(\sqrt{2\pi}(1-\alpha)\sigma)^N} e^{-\frac{1}{2(1-\alpha)^2\sigma^2}\sum_{i=1}^{N}(q_i-\alpha w_i)^2}$$

而 $$\ln f(Q;\alpha) = -N\ln\sqrt{2\pi}\sigma - N\ln(1-\alpha) - \frac{1}{2(1-\alpha)^2\sigma^2}\sum_{i=1}^{N}(q_i-\alpha w_i)^2$$

从而有 $$\frac{\mathrm{d}\ln f(Q;\alpha)}{\mathrm{d}\alpha} = \frac{N}{1-\alpha} - \frac{1}{(1-\alpha)^3\sigma^2}\sum_{i=1}^{N}(q_i-\alpha w_i)^2 + \frac{1}{(1-\alpha)^2\sigma^2}\sum_{i=1}^{N}(q_i-\alpha w_i)w_i = \frac{1}{(1-\alpha)^3\sigma^2}\left\{N\sigma^2(1-\alpha)^2 - \sum_{i=1}^{N}(q_i-\alpha w_i)^2 + (1-\alpha)\sum_{i=1}^{N}(q_i-\alpha w_i)w_i\right\}$$

令 $$h(\alpha) = N\sigma^2(1-\alpha)^2 - \sum_{i=1}^{N}(q_i-\alpha w_i)^2 + (1-\alpha)\sum_{i=1}^{N}(q_i-\alpha w_i)w_i \tag{3}$$

因为 $\alpha \neq 1$,所以只需要求解方程 $h(\alpha)=0$ 即可。又由于要求嵌入的水印具有不可见性,因此有理由假设 $|\alpha|$ 很小。于是可以将 $h(\alpha)$ 用其在 $\alpha=0$ 处的一阶 Taylor 展开式代替。

由公式(3)可得到 $h'(\alpha) = -2N\sigma^2(1-\alpha) + \sum_{i=1}^{N}(q_i-\alpha w_i)w_i - (1-\alpha)\sum_{i=1}^{N}w_i^2$ 于是:

$$h'(0) = -2N\sigma^2 + \sum_{i=1}^{N} q_i w_i - \sum_{i=1}^{N} w_i^2 \tag{4}$$

另外 $$h(0) = N\sigma^2 - \sum_{i=1}^{N} q_i^2 + \sum_{i=1}^{N} q_i w_i \tag{5}$$

由公式(4)、(5)可得到 $h(\alpha) \approx h(0) + h'(0)\alpha = N\sigma^2 - \sum_{i=1}^{N} q_i^2 + \sum_{i=1}^{N} q_i w_i + \left\{-2N\sigma^2 + \sum_{i=1}^{N} q_i w_i - \sum_{i=1}^{N} w_i^2\right\}\alpha$,令 $N\sigma^2 - \sum_{i=1}^{N} q_i^2 + \sum_{i=1}^{N} q_i w_i + \left\{-2N\sigma^2 + \sum_{i=1}^{N} q_i w_i - \sum_{i=1}^{N} w_i^2\right\}\alpha = 0$

最终获得 $\hat{\alpha} = \dfrac{\sigma^2 + \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} q_i w_i - \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} q_i^2}{2\sigma^2 - \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} q_i w_i + \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} w_i^2}$,证毕。

通过对强度因子 α 的最优估计问题的讨论,得到了 α 的极大似然估计。这样,在获得隐秘图像 Q 以及水印图像 W 时可以对 α 进行估计,利用所得到的 α 估计值,能够实现从隐秘图像中提取水印图像的目的。该研究为基于一次 Bézier 曲线融合方式这种嵌入方法的应用提供了理论保证。

在以上定理的讨论中对 W 没有给出其他限制。这说明 W 既可以是通常的二值图像,也可以是灰度图像,甚至可以是彩色图像。这个结论非常有意义,因为现有的数字水印嵌入技术,所选水印基本上都是二值图像,而文中方法为灰度图像、彩色图像作为水印提供了可能。

2 实验结果

以大小为 256 ×256 的图 1、图 2 分别做原始图像 P 和水印图像 W,分别称 $p_i + \alpha w_i$、$p_i(1+\alpha w_i)$ 以及 $(1-\alpha)p_i + \alpha w_i$ 为第一、第二、第三种嵌入方法,p_i

图 1 原始图像

Fig. 1 Original image

图 2 水印图像

Fig. 2 Watermarking image

和 w_i 分别是 P 和 W 的灰度值。α 取一个值,按三种嵌入方法可以得到三个不同的隐秘图像及相应的峰值信噪比($PSNR$)。图 3～图 5 是 α 取 0.0764 时分别用第一、第二、第三种嵌入方法得到的隐秘图像。表 1 给出了 α 取不同值时相应 $PSNR$ 的结果,如图 6 和表 1 所示。通过观察表 1 或图 6 可以发现,文中嵌入方法从 $PSNR$ 的角度来看优于另外两种方法。

$\alpha=0.0764, PSNR=23.4635$

图 3　用第一种方法嵌入的隐秘图像

Fig. 3　Camouflage image by method 1

$\alpha=0.0764, PSNR=29.1365$

图 4　用第二种方法嵌入的隐秘图像

Fig. 4　Camouflage image by method 2

$\alpha=0.0764, PSNR=31.5437$

图 5　用第三种方法嵌入的隐秘图像

Fig. 5　Camouflage image by method 3

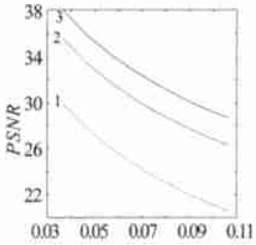

图 6　三种嵌入方法的 *PSNR*

Fig. 6　*PSNR* of three kinds of hiding methods

表 1　α 取不同值时三种嵌入方法的 PSNR

Tab. 1　PSNR of three kinds of hiding methods when α is given different values

α	0.0364	0.0464	0.0564	0.0664
Method 1	29.9034	27.7950	26.0998	24.6820
Method 2	35.5764	33.4680	31.7728	30.3550
Method 3	37.9835	35.8752	34.1800	32.7622
α	0.0764	0.0864	0.0964	0.1064
Method 1	23.4635	22.3951	21.4439	20.5866
Method 2	29.1365	28.0681	27.1169	26.2596
Method 3	31.5437	30.4753	29.5240	28.6667

为了检验文中所给 α 极大似然估计的实际效果,对图 3～图 5 所示的隐秘图像与水印图像按文中定理的方法对 α 进行估计,所得结果分别为 $\hat{\alpha}_1 = 0.0531$, $\hat{\alpha}_2 = 0.0641$, $\hat{\alpha}_3 = 0.0772$,这三个 α 的估计值中,$\hat{\alpha}_3$ 与实际的 $\alpha = 0.0764$ 绝对误差最小,这与实际情况相符。因为 $\hat{\alpha}_3$ 所对应的隐秘图像(图 5)是按第三种方法嵌入的,而文中定理的结论也是按第三种嵌入方法得到的。

按所得 α 的估计值,分别对图 3～图 5 提取水印图像,提取方法是嵌入方法的逆运算,所提取出的水印图像如图 7 所示。从图像可见,方法 3 提取的水印图像效果最好,第二种方法也不错,第一种方法效果虽然差一些,但仍可以看出大致的轮廓。

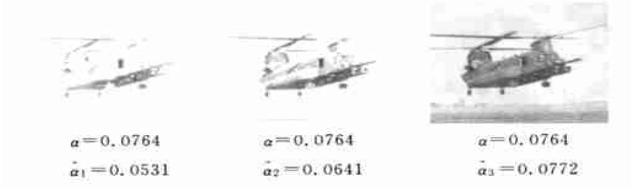

图 7　嵌入方法的逆运算水印图像

Fig. 7　Water marking of anti-hiding method

3　结　论

针对基于一次 Bézier 曲线融合方式的嵌入规则,借助极大似然估计法实现了对水印嵌入强度因子的最优估计,该研究结果主要应用于保密通信、版权保护和信息确认上。实验结果表明,基于一次 Bézier 曲线融合方式的嵌入规则在 *PSNR* 上优于已有的嵌入方法。现有的数字水印检测方法大多是基于相关运算的,只能对是否存在水印给出判断,不能具体提取水印,而给出的嵌入强度因子的最优估计,可以实现对水印的提取,且效果令人满意。

参考文献:

[1]　Cox I J, Killian J, Thomson F, et al. Secure spread spectrum watermarking for multimedia[A]. IEEE Transaction on Image Processing[C]. 1997,6:1673-1687.

[2]　Rosa A de, Barni M, Bartolini F, et al. Optimum decoding of non-additive full frame DFT watermarks[A]. In Proceedings of the Third International Information Hiding Workshop[C]. 1999. 167-179.

[3]　Hernandez J R, Perez-Gonzalez F. Statistical analysis of watermarking schemes for copyright protection of images[A]. Processing of the IEEE[C]. 1999,87. 1142-1166.

[4]　Podilchuk C I, Wenjun Z. Digital image watermarking using visual models[A]. In: SIEP Processing on Human Vision and Electronic Imaging[C]. 1997,3016. 100-111.

[5]　Swanson M D, Tewfik A H. Multimedia data-embedding and watermarking technologies[J]. Processing of the IEEE, 1998,86(6): 1064-1087.

[6]　Thomas B. An introduction to applied probability theory and random processes[M]. New York: Wiley,1971.

[7]　Gerhard W. Image Analysis, Random Fields and Dynamic Monte Carlo Methods[M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag,1995.