

基于 ICA 的数字水印的方法

刘 璐, 孙建德, 张新刚

(山东大学信息科学与工程学院, 山东济南 250100)

摘 要: 数字水印是现在多媒体信号处理研究的一个热点, 已经有许多关于数字水印嵌入和提取的方法. 增强数字水印的鲁棒性是数字水印问题的关键. 本文将独立分量分析用于数字水印, 即把承载图像和水印图像在空间域直接混叠, 并利用独立分量分析(ICA)的方法提取数字水印, 得到了很好的结果. 计算机实验结果表明这是一种鲁棒性极强的新方法.

关键词: 多媒体; 独立分量分析; 数字水印

中图分类号: TP391.4; TP911.73 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2004) 04-0657-04

A New Scheme of Digital Watermarking Based on Independent Component Analysis

LIU Ju, SUN Jian-de, ZHANG Xin-gang

(College of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China)

Abstract: The research on digital watermark is a focus of multimedia signal's processing. So far, there have been many methods to embed and extract watermark. What is important to digital watermark is how to improve its robustness. In this paper, the independent component analysis (ICA) is used in our watermark scheme, that is, we mix the host image and the watermark directly in spatial domain and then use ICA to extract the watermark. We get excellent simulated results. The simulated results show that it is a new method with very outstanding robustness.

Key words: multimedia; independent component analysis (ICA); watermark

1 引言

随着网络技术的飞速发展, 数字产品知识产权保护问题的解决变得尤为迫切. 对于数字图像来说, 原来的加密系统只能是部分解决问题, 一旦被解密, 所有者便对其作品失去了控制. 而数字水印技术就是利用了图像中的信息的冗余度或其他特性, 在图像中巧妙的隐藏了其他数字信号的技术. 它在数字产品的知识产权保护方面将起到越来越重要的作用, 因此成为最近多媒体信号处理领域的一个研究热点.

数字水印是指嵌在数字产品中的数字信号, 可以是图像、文字、符号、数字等一切可以作为标记、标识的信息. 数字水印的分类方法很多, 根据水印嵌入后的视觉感知性将其分为可见水印和不可见水印; 根据数字水印被嵌入的技术不同, 可分为空间域数字水印和变换域数字水印; 根据数字水印的提取过程中是否需要原始图像可分为盲提取水印和非盲提取水印; 根据水印应用的目的不同又可划分为: 用于版权保护的鲁棒性水印、用于保护数据完整性的易损水印和用于标示数据内容的注释水印, 等等. 其中, 用于版权保护的鲁棒性水印是目前研究的热点, 其目的是进行版权保护、所有权证明等. 它的主要要求是不可见性和鲁棒性. 所谓不可见性就是指在视

觉上不可感知, 看不到水印的存在, 即嵌入的数字水印不能引起原始图像质量的变化, 加入的水印是透明的; 鲁棒性即稳健性, 它包括水印对 JPEG 压缩、滤波、噪声等图像处理的稳健性, 也包括水印对图像的几何变换如平移、伸缩、旋转、剪裁等处理的稳健性, 也就是说在各种图像处理下, 数字水印不易被破坏.

从数字水印嵌入的技术可分为两大类: 时域法和变换域法. 时域法就是直接改变图像像素的值, 一般是在图像元素的亮度或色带中加入隐藏内容, 这类方法的缺点是鲁棒性较差. 最低有效位(LSB)方法^[1]便是这类方法中的代表, 也是较早的数字水印方法. 它把承载图像消息的 LSB 直接用水印信息的比特位代替或经过逻辑运算后代替. 该算法的主要优点是可实现高容量和较好的不可见性. 但是该算法的鲁棒性差, 图像的各种操作如压缩、剪切等, 都会破坏水印. 为了增强算法的性能, 提出了许多改进的方案, 如利用伪随机序列, 以“随机”的顺序修改图像的 LSB; 在必须使用密钥的情况下, 才能得到正确的嵌入序列等等. Gonzalez-Serrano 利用 ICA 对图像进行分析以获得图像的独立特征, 将这些特征的次要部分用水印信息代替^[3]. 这种方法对于图像压缩等处理的鲁棒性也较差.

收稿日期: 2002-06-06; 修回日期: 2003-06-10

基金项目: 国家自然科学基金(No. 30000041)、山东省自然科学基金(No. Y2000G12)和山东省优秀中青年科学家科研奖励基金(No. 01BS04)资助

变换域法是利用某种数学变换,将图像在变换域表示,通过更改图像的某些变换系数来隐藏信息,然后再利用反变换来生成隐藏了水印信息的图像。目前已有的方法主要是集中在小波变换、频域变换、DCT 变换等等。这类方法对 JPEG 压缩、噪声等稳健性好,但算法较为复杂,而且有些还会影响图像质量。如:Ohnishi 和 Matsui 利用小波变换,通过改变小波变换系数嵌入水印信息^[4]。这种方法对剪切等破坏的鲁棒性较差。O. Ruanaidh 提出了利用图像 DFT 的相位嵌入水印信息的方法^[5]。但是对于图像而言,DFT 的相位信息比较重要,这使得该方法的鲁棒性较差。Podilchuk 和 Zeng 利用 A. B. Watson 构造的基于 8×8 子块的 DCT 域视觉模型,提出了图像内容自适应的嵌入方法^[6],该方法保证了嵌入的不可见性,可以对没有完全解压缩的 JPEG 码流进行水印的嵌入和检测,但这是一种非盲的水印方案。

在已有的方法中,水印通常是一系列数字或代码,通过相应的检测方法从含有水印的图像中将它提取出来,再通过相关性运算,与一定的门限值比较来判断水印是否存在。考虑到图像包含的信息量大,而且人眼对视觉图像的直观感知性好,并且通过计算机视觉处理方法能很好地隐藏水印图像,本文将一幅灰度图像作为水印。以前的很多方法之所以不选择灰度图像作为水印,是因为图像所含的信息量太大,不能够在保证良好的不可见性的条件下,提供足够好的鲁棒性来提取出满足人们视觉效果的水印图像。这是嵌入方法和提取方法不能很好匹配造成的。而本文的方法在水印嵌入的时候将水印的全部信息嵌入,在提取的时候保证了对于水印特征信息的完全提取,使嵌入和提取达到了很好的匹配。计算机仿真结果表明,这种方法在鲁棒性等方面部分解决了现有方法中存在的问题。

2 独立分量分析

独立分量分析(ICA)是在研究盲源分离过程中出现的一种全新的信号处理和数据分析方法。利用 ICA 方法,可以在不知道源信号和传输通道的参数的情况下,根据输入源信号的统计特性,仅通过观测信号实时地恢复或提取源信号,所以,它一出现就成为盲信号处理中最主要的方法之一,是当今信号处理领域的又一个研究热点,已经在诸如模式识别、数据压缩、图像分析等方面引起重视。

2.1 问题描述

假设混叠系统有 m 个传感器和 n 个源信号组成,源信号与观察信号之间的关系如下:

$$X(t) = AS(t) \quad (1)$$

其中观察信号 $X(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t)]^T$ 是 n 个未知的源信号的混叠,而且 n 个源信号 $S(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_n(t)]^T$, $s_i(t)$, $i = 1, 2, \dots, n$ 是相互统计独立的。混叠矩阵 $A = (a_{ij})$, $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$ 。是一个 m, n 阶的矩阵。

盲源分离就是求解矩阵 W ,使得通过下面的公式可以恢复得到源信号 $S(t)$:

$$Y(t) = WX(t) = \hat{S}(t) \quad (2)$$

在没有关于混叠矩阵 A 和源信号 $S(t)$ 的任何先验信息的情

况下该问题是没有解的。因此通常认为(i)源信号 $s_i(t)$, $i = 1, 2, \dots, n$ 是平稳的随机信号,且是相互统计独立的;(ii) A 是满秩的,一般设 $m = n$; (iii)至多一个源信号为高斯的。这样利用源信号统计独立的假设,可以恢复出源信号,但源恢复的信号和源信号相比其幅度和各个源的排列次序是不确定的。

目前已经提出许多盲源分离算法^[7],其中基于最小互信息的 MMI 方法^[8]对混叠盲分离表现出良好效果,本文的数字水印提取方法就是基于该算法的。

2.2 基于互信息的 ICA 方法

根据统计独立的定义,对源信号 $S(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_n(t)]^T$, 有:

$$p_S(S) = \prod_{i=1}^n p_{s_i}(s_i) \quad (3)$$

其中 $p_S(S)$ 是多元概率密度函数, $p_{s_i}(s_i)$ 是多元的边缘概率密度函数。为衡量分离输出信号 $Y(t) = [y_1(t), y_2(t), \dots, y_n(t)]^T$ 各分量之间独立性,可以用概率密度函数的 Kullback-Leibler 的散度来表示。这种关系表示如下:

$$KL(p_Y(Y), \prod p_{y_i}(y_i)) = \int p_Y(Y) \log \frac{p_Y(Y)}{\prod p_{y_i}(y_i)} dY \quad (4)$$

由此,本文用输出矢量各分量之间互信息作为准则函数:

$$J(W) = MI(Y; y_1, y_2, \dots, y_n) = \sum_{i=1}^n H(y_i) - H(Y) \quad (5)$$

式中 $H(Y)$ 和 $H(y_i)$ 分别是联合熵和边缘熵。由于源信号及其概率密度未知,上式不能直接的使用。用 Edgeworth 展开把熵展开^[8,9],并且把他截短成四阶的累计量。这样处理主要的优点在于与它们的递减性相符的排列顺序。尽管它在形式上和 Gram-Charlie 展开是等价的,但是从使用的观点来说,它又重新整理那些系数使之有更好的渐近收敛性。

基于 Edgeworth 展开的 ICA 训练公式由下给出^[9]:

$$W(t+1) = W(t) - \eta(t)(I - f(Y)Y^T)W(t) \quad (6)$$

3 基于 ICA 的数字水印嵌入和提取

3.1 数字水印的嵌入

选择两幅大小相等的图像分别作为原始图像和水印图像,把它们看成是两个源信号 $s_1(t), s_2(t)$, 将水印图像进行弱化,得到弱化后的水印图像

$$s_2(t) = a_2(t) \quad (7)$$

选择权指数来控制它的可见性,然后随机产生一个 2×2 阶的混叠矩阵 $A = (a_{ij})$, $i = 1, 2; j = 1, 2$, 利用公式(1)作为水印嵌入的混叠模型进行混叠,那么观察信号 $X(t) = [x_1(t), x_2(t)]^T$ 就是承载图像和水印图像的混叠,在得到的混叠图像当中选择一幅作为加入了水印的图像,而另外一幅就是在提取水印的时候要用的密钥阵。

为了达到水印鲁棒性和不可见性的要求,要合理地选取弱化参数和混叠矩阵。本文先得到承载图像中灰度最小点与水印图像中灰度最大点的比例,然后再乘上一个加重系数,从而得到满足不可见性的弱化系数。在选择混叠矩阵的时候,为了达到不容易被别人获取的目的,本文随机产生符合要求的混叠矩阵,通过这个矩阵得到理想的混叠效果,在整个混叠和

检测过程中不出现混叠矩阵的任何信息.

3.2 数字水印的提取

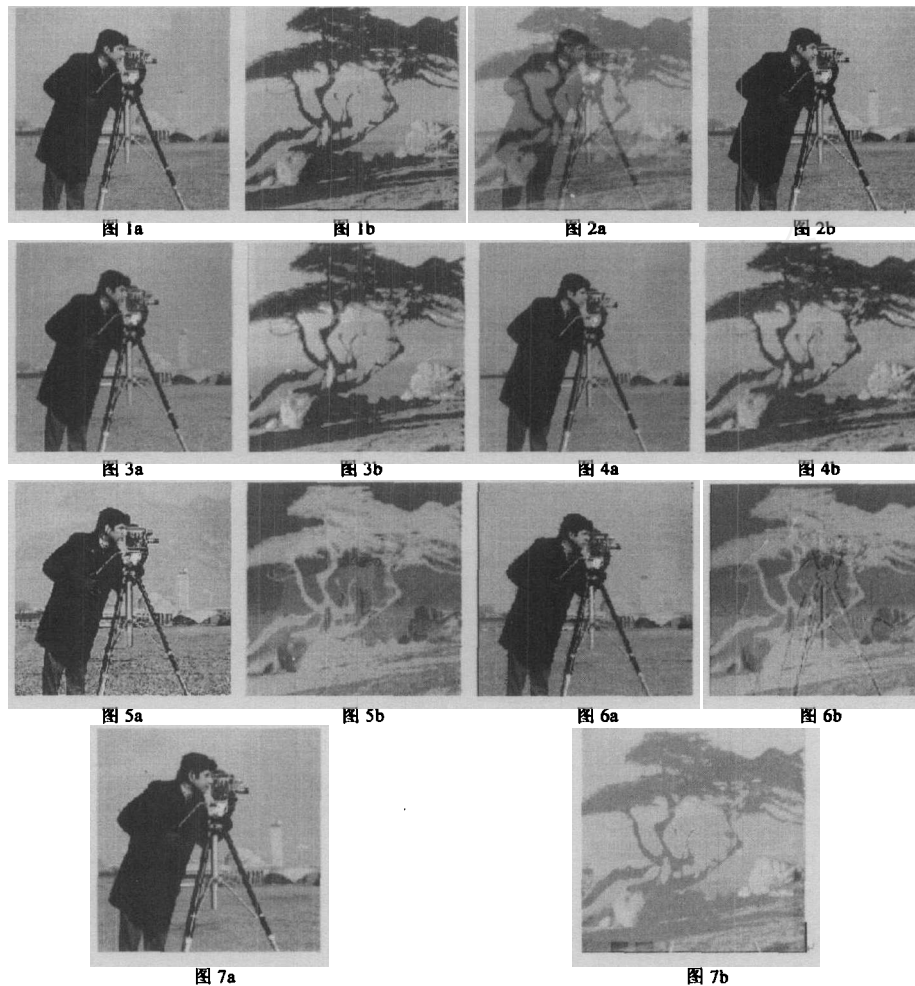
在混叠矩阵未知的情况下,进行水印的检测时,利用公式(6)训练得到分离矩阵 W ,利用公式(2)进行分离提取,得到原来的两幅图像.

本方案不用混叠矩阵和密钥阵联合起来用逆向的过程来检测水印,是因为这种检测方法对于混叠矩阵的保密性不好;并且由于水印检测的病态性,这样会使鲁棒性变差.

4 计算机仿真实验

本文选择 256×256 的 cameraman 图像为承载图像,选择

256×256 的 tree 图像为水印图像.如图 1(a)、(b)所示.混叠的图像如图 2(a)、(b)所示.用 Stirmark 攻击加入了水印的图像,然后对攻击的结果进行提取水印的实验,结果如下.图 3(a)、(b)是经过 JPEG 压缩后的图像以及从中提取出来的水印.图 4(a)、(b)是 stirmark 中的 fmlr 处理后的图像以及从中提取出来的水印.图 5(a)、(b)是 stirmark 中的 sharpening 处理后的图像以及从中提取出来的水印.图 6(a)、(b)是 stirmark 中的 median_filter 处理后的图像以及从中提取出来的水印.图 7(a)、(b)是 stirmark 中 cropping 处理后的图像以及从中提取出来的水印.



从实验结果可以看出,直接在图像中加入水印,增大了水印容量,水印的不可见性也可以通过弱化系数和加重系数控制;加入了水印的图像经过 JPEG 压缩、各种滤波、锐化、剪裁等图像处理,水印图像仍能很好地提取出来,与以往通过相关系数进行水印检测相比,本文的检测结果直观性更好,鲁棒性更强.这充分说明了本文提出的方案不但加入水印的过程简单,而且水印检测的结果良好,是一种水印的嵌入和提取匹配的新方法.

5 结束语

本文给出了一种基于 ICA 的数字水印的嵌入和提取的方法,并且通过计算机仿真实验得到了相当好的水印嵌入以及水印提取的结果,充分地显示了这种方法优越性.

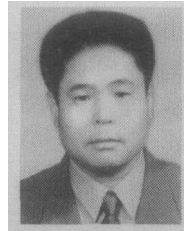
参考文献:

- [1] R G van Schyndel, A Z Tirkel, C F Osborne. A Digital Watermark [C]. in Proc. Int. Conference in Image Processing, Austin, TX, 1994.

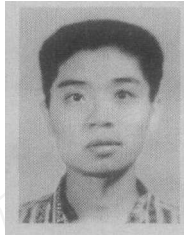
- 2.86-90.
- [2] R G van Schyndel, A Z Tirkel, C F Osborne. Towards a Robust Digital Watermark [C]. ACCV'95 Conference, Singapore, 1995. 2. 504-508.
- [3] F J Gonzalez-Serrano, et al. Independent Component Analysis Applied to Digital Image Watermarking [C]. in Proc. IEEE Int. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing, Salt Lake City, 2001. 2785-2788.
- [4] J Ohnishi, K Matsui. Embedding a seal into a picture under orthogonal wavelet transform [C]. in Proc. Int. Conference on Multimedia Computing and System, Japan, 1996. 514-521.
- [5] JJK O' Ruanaidh, WJ Dowling, FM Boland. Phase Watermarking of Digital Images [C]. Proc. of IEEE International Conference on Image Processing, Switzerland, 1996. 3. 239-242.
- [6] Christine I Podilchuk, Wenjun Zeng. Image adaptive watermarking using visual models [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1998, 16(4): 525-539.
- [7] S Amari, A Cichocki, H H Yang. A new learning algorithm for blind signal separation [C]. in Advances in Neural Information Processing Systems, 8, Cambridge, MA: MIT Press, 1996. 657-663.
- [8] Ju LIU, Kaibao Nie, Zhen-ya HE. Blind separation by redundancy reduction in a recurrent neural network [J]. Chinese Journal of Electronics, 2001, 10(3): 415-419.
- [9] HE Zhen-ya, LIU Ju, YANG Lu-xi. Blind separation of images using

edgeworth expansion based ICA algorithm [J]. Chinese Journal of Electronics, 1999, 8(3): 278-282.

作者简介:



刘 璐 男, 1965 年 4 月生, 山东临沂人, 山东大学信息科学与工程学院教授、博士生导师、通信工程系主任, 山东大学电子工程系理学硕士 (1989), 东南大学无线电工程系工学博士 (2000), 西班牙加泰罗尼亚理工大学 (UPC) 信号理论与通信系和加泰罗尼亚通信技术中心 (CTTC) 访问教授 (2002~2003), 发表论文 40 余篇, 研究方向为盲信号处理、通信信号处理和多媒体通信等。



孙建德 男, 1978 年 7 月生, 山东莱州人, 山东大学信息科学与工程学院 2001 级硕博连读生, 研究方向为多媒体信号处理、数字水印等。