

# 鲁棒的半色调图像水印综述

郑海红<sup>1)</sup> 王义峰<sup>1)</sup> 曾平<sup>1)</sup> 孔月萍<sup>1),2)</sup>

<sup>1)</sup>(西安电子科技大学计算机学院, 西安 710071) <sup>2)</sup>(西安建筑科技大学 信息与控制工程学院, 西安 710055)

**摘 要** 半色调图像的数字水印可广泛应用于打印/印刷输出的版权保护和证件、票据、货币的防伪,近几年来其研究取得了较大的进展。为使人们对该领域研究现状有一概略了解,首先论述了半色调图像水印的原理和主要研究方法;然后重点分析了直接嵌入法、间接嵌入法和半色调可视加密方法,并比较了它们的优缺点;同时通过比较发现:基于人眼视觉系统的间接嵌入法,在纸质作品的版权保护领域会有更广阔的应用前景;最后提出了鲁棒的半色调图像水印目前存在的问题和进一步的发展方向。

**关键词** 信息隐藏 数字水印 半色调图像 鲁棒性

**中图分类号**: TN918 TP309 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2007)05-0782-07

## A Review of Robust Watermarking for Halftone Images

ZHENG Hai-hong<sup>1)</sup>, WANG Yi-feng<sup>1)</sup>, ZENG Ping<sup>1)</sup>, KONG Yue-ping<sup>1),2)</sup>

<sup>1)</sup>(Department of Computer Science, Xidian University, Xi'an 710071)

<sup>2)</sup>(School of Information and Control, Xi'an University of Architecture, Xi'an 710055)

**Abstract** Watermarking techniques for halftone images have been well developed recently. They are widely used for protecting the copyright of printouts and preventing card or ticket, as well as currency from illegal forgery. Firstly the principle and implementation of watermarking for halftone images are given. Then the analysis of direct-embedding methods, indirect-embedding methods and halftone visual cryptography methods is conducted. The comparisons show that the HVS-based indirect-embedding schemes have a promising application in the copyright control of paper products. Finally the open issues and possible future research directions are pointed out.

**Keywords** data hiding, digital watermarking, halftone image, robustness

## 1 引言

近几年来,数字水印作为数字产品版权保护的有效补充办法,已成为国内外研究的热点<sup>[1]</sup>。在许多打印和出版应用中,日益猖獗的假冒伪劣行为给打印/印刷输出品的防伪带来了新的挑战。现有的大多数水印算法是针对灰度/彩色连续色调图像提出的,而打印输出、书籍、杂志等印刷品中的图像均为半色调(二值)图像,以上技术不能直接利用,因此对半色调图像数字水印技术的研究已成为热点。

根据基本用途,半色调图像水印可分为鲁棒性(robust)数字水印和脆弱性(fragile)数字水印,前者通常用于验证使用者的合法性,而后者用于证明数字作品是否已被篡改。为有效保护打印/印刷输出作品的版权,鲁棒的半色调水印正成为目前的主要研究内容。

对鲁棒半色调图像水印的基本要求有:

(1) 不可见性,水印应该是视觉上不可见的,并且在选用不同分辨率打印或印刷设备时,不能因为分辨率的变化而使水印显现。

(2) 鲁棒性,即嵌入水印的图像经过打印、扫描

基金项目:陕西省自然科学基金计划项目(2001x06);国防科技预研基金资助项目(51416050301DZ0140)

收稿日期:2006-03-06;改回日期:2006-04-10

第一作者简介:郑海红(1979~),女。2006年于西安电子科技大学获得计算机应用技术专业博士学位,现为西安电子科技大学讲师。主要研究方向为半色调图像处理。E-mail: hhzheng@mail.xidian.edu.cn

(print-scan, PS)后,水印仍具有较好的可检测性。PS过程通常包括常见图像处理(如低通滤波、对比度降低、A/D和D/A转换等)、几何失真(如裁剪、平移、旋转、缩放等)、噪声干扰(如签名、涂抹、污渍)等;另外,还包括图像在流通过程中,因打印/印刷输出品的老化而产生的色彩失真。

(3) 秘密性,嵌入过程(嵌入方法和水印结构)是秘密的,水印是统计上不可检测的。对于通过改变嵌入水印的图像来消除和破坏水印的企图,水印应该保持存在,直到图像已严重失真而丧失使用价值为止。

鲁棒性和不可见性是对鲁棒半色调水印最基本的要求,也是相互对立的两个因素。

## 2 半色调图像水印的原理和研究方法

数字半色调技术是利用人眼视觉的低通特性,把具有连续色调的原始图像转化为由离散的黑点与白点组成的半色调图案,并使之看上去具有连续色调的感觉(如图1所示)。现在已有很多数字半色调方法,其中有序抖动和误差分散方法应用最为广泛。有序抖动<sup>[2]</sup>方法复杂度低,它是将图像的每个像素与阈值模板相比较,像素值大于对应阈值时,输出1,否则输出0,抖动算法的本质在于模板的选择与构造;误差分散<sup>[3]</sup>方法的复杂度较高,但视觉效果比较好。它是通过把当前像素值加累计误差和来与固定阈值做比较,以确定输出,并根据误差分散核将产生的误差按比例分散到周围像素。

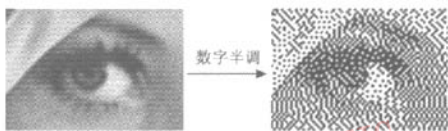


图1 数字半调过程示意图

Fig.1 The digital halftoning process

从图像处理的角度看,嵌入水印可以视为在强背景(载体)下叠加一个弱信号(水印)。由于人眼视觉系统(human visual system, HVS)分辨率受到一定的限制,因此只要叠加信号的幅度低于HVS的对比度门限,那么HVS就无法感受到水印信号的存在,这种对比度门限受视觉系统空间、时间和频率特性的影响;另一方面,从数字通信的角度看,水印编码(嵌入)可以理解为在一个宽带信道(载体)上用

扩频通信技术传输一个窄带信号(水印),而水印的译码(检测)则是一个有噪信道中弱信号的检测问题。半色调图像水印技术的原理与之大致相同,只不过在水印嵌入过程中要考虑数字半调技术。

目前,半色调图像水印的研究方法主要分为以下3类:①当不存在连续色调图像时,若需要对半色调图像进行版权保护,则只能通过改变半色调图像的像素值、奇偶特性等嵌入二值水印序列,可称这种方法为直接嵌入法,其虽然操作简单、复杂度低,但嵌入水印后的图像往往存在人眼敏感的“椒盐”噪声;②若存在连续色调图像,则将结合数字半调过程嵌入水印的方法称为间接嵌入法,该类方法嵌入水印后的图像质量虽然较直接嵌入法有明显的提高,但以增大复杂度为代价;③第3类算法是先在两幅或多幅半色调图像中嵌入可视水印(visual pattern),然后通过叠加嵌入水印后的图像显示可视水印,可称这种方法为半色调可视加密(half-tone visual cryptography, HVC)方法,它具有无条件安全性,不仅解密不需任何计算,而且对有损压缩和一般图像处理有较强的抵抗能力,但叠加后显示的可视水印的分辨率降低,而且该方法仅限于二值图像,对彩色图像则需要额外处理,此外,分存图像(shares)叠加时还需要特殊的定位信息。

直接嵌入法和间接嵌入法在检测水印之前,都需要经过打印和扫描,由于打印、扫描会引入噪声、几何失真、同步失真等,从而增大了水印检测的难度,通常要先进行预处理校正。有些预处理方法可以先充分利用激光打印机采用的半色调方法为有序抖动的这一先验知识,然后通过计算扫描图像频谱的峰值点、扫描图像的梯度值来分别估计旋转角度、图像与背景相交的边缘<sup>[4]</sup>;而有的预处理算法则是直接利用Photoshop工具进行矫正;还有的是在多个分块中嵌入相同的水印,使分块之间具有自相关性,以便利用图像自相关矩阵中的峰值点进行几何矫正<sup>[4]</sup>。另外,扫描前在图像的四角加入辅助同步黑像素,也是同步校正最常用的方法;也可以利用匹配的相关性来进行同步校正,但其复杂度高。

## 3 半色调图像水印的研究现状

鲁棒半色调图像水印的理论与算法是目前研究的主要内容,而水印的结构和嵌入策略则是影响水印鲁棒性的关键技术。由于半色调图像是一种特殊

的二值图像,因此大多数算法都采用 0,1 序列或二值图像作为水印,只有极少数选择伪随机序列、灰度图像作为水印。从实现过程来看,绝大部分算法在空域进行,而基于扩频技术的半色调图像水印<sup>[6]</sup>更具有重要意义。

### 3.1 直接嵌入法

Fu 等人提出了直接在误差分散半色调图中嵌入水印的 3 种算法,即 DHST (data hiding self toggling)、DHPT (data hiding pair toggling)、DHSPT (data hiding smart pair toggling)<sup>[7]</sup>。其中 DHST 算法是选择  $N$  个随机嵌入位置,并强制该位置上的像素值等于水印值;为保证图像局部的平均亮度,DHPT 算法是在 DHST 算法的基础上,通过修改“主”(master)、“从”(slave)互补的一对像素来嵌入水印,由于随机选择“从”像素会产生“椒盐”噪声,因此 DHSPT 算法给出了一种选择最优“从”像素的方法。由于利用以上 3 种算法嵌入水印后的图像或多或少都有“椒盐”噪声,因此为改善其视觉效果,文献[8]提出了 IS(intensity selection)算法,同时从候选位置集合中选择实施以上 3 种算法的最佳位置,该算法通常选择高亮度或低亮度区域嵌入水印,但是由于该算法需要逆半调图像(连续色调图的估计)作为参考,因此增加了算法的复杂度。针对以上 3 种算法存在的问题,Sherry 提出了增大候选“从”像素集合、构造具有蓝噪声特性的随机嵌入位置序列<sup>[9]</sup>等改进措施。

一种无损失的半色调水印方法<sup>[10]</sup>是首先对半色调图无重叠分块,并将出现频率高的块作为 C 模板(candidate pattern),然后构造与 C 模板对应的 T 模板(twin pattern),T 模板要满足与它对应的 C 模板的汉明距离为 1,但又不同于其他 C 模板和 T 模板,最后用 C 模板表示 1(0)、T 模板表示 0(1),再利用模板替换嵌入水印。该算法适用于各种半色调图,不仅能无损失地恢复原始半色调图,而且视觉效果也比较好;但是因为该算法处理任何图像都需要重新统计 C 模板,并搜索对应的 T 模板,所以算法的复杂度较高。

### 3.2 间接嵌入法

先根据二值水印选择满足相容性和互异性的有序抖动模板<sup>[11,12]</sup>或误差分散核<sup>[13]</sup>,再利用半调过程嵌入水印,是典型的间接嵌入法。其优点是不增加任何额外计算,但构造抖动模板或误差分散核比较困难,且水印嵌入量比较低。根据不同抖动模板

所产生的半色调图像具有的不同统计特性来检测水印,其水印检测的正确率较高,但是误差分散的因果性会导致半色调图像的统计特性发生改变,其水印检测的正确率稍差。

文献[7]提出先将水印随机嵌入到连续色调图,而剩余像素则利用 DHED (data hiding error diffusion) 算法进行处理,其理由是误差分散过程可降低随机嵌入水印的视觉误差,但是由于该算法忽略了分散到嵌入位置上的量化误差,从而使嵌入水印后的半色调图仍然存在“椒盐”噪声,由于 MDHED(modified data hiding error diffusion) 算法改变了误差分散系统在随机嵌入位置处的因果性,其不仅有反馈误差,而且有前馈误差,因此在一定程度上提高了图像质量。文献[14]指出,在奇偶空间中,嵌入水印前的半色调图,其局部奇偶是一个均值为 0.5,方差为 0.25 的随机变量,若通过加入噪声改变半色调图整体的奇偶(局部奇偶的平均值),则可嵌入 1bit 水印。如图 2 所示,其中  $x_{i,j}$  为连续色调图像的像素值,  $v_{i,j}$ 、 $\hat{v}_{i,j}$  为量化输入,  $Q(\cdot)$ 、 $N(\cdot)$  分别为量化函数和加噪函数,  $h_{i,j}(\cdot)$  表示误差分散核,  $w_{i,j}$  为水印图像的像素值,  $b_{i,j}$  为传统半色调图像像素值,  $b_{i,j}^{w, \text{mal}}$  (上角 w 代表 water marking) 为  $v_{i,j}$  的量化输出,  $e_{i,j}$  为量化误差,  $b_{i,j}^w$  为嵌入水印后的半色调图像像素值。虽然该方法抵抗涂改、剪切的鲁棒性较好,但水印嵌入量太低。为提高水印的安全性,文献[15]在此基础上加入了对称密钥,同时为增加水印嵌入量,又提出了其他改进算法<sup>[16,17]</sup>。为保证嵌入水印后图像的视觉效果,张真诚提出一种新水印算法<sup>[18]</sup>,该算法考虑了人眼的视觉特性,在对连续色调图像进行误差分散的同时,先寻找在一定背景下人眼对其变化不敏感的像素;然后利用环形曲线自构(torus automorphism)系统使这些像素尽量均匀地分布在半色调图像中;最后根据水印序列,通过改变半色调值序列的奇偶来嵌入水印,当需要改变

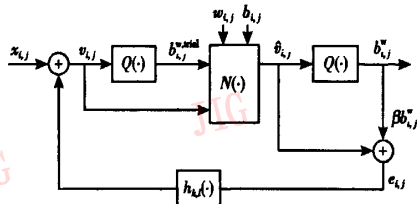


图 2 改变半色调图像整体奇偶性的水印嵌入框图

Fig. 2 Block diagram of watermark embedding by changing the global parity of halftone image

序列的奇偶时,则优先改变不敏感的像素值。虽然该算法嵌入水印后的图像质量较好,但水印嵌入量受图像内容制约。

Soo-Chang 针对有序抖动图像提出了 PSMOD (paired sub-image matching ordered dithering) 算法<sup>[19]</sup>,该算法首先用大、小相间的有序抖动模板进行半调;然后对半色调图进行位交错 (bit-interleaving) 预处理来得到明、暗相间的子图;最后通过调整明、暗子图对的顺序来嵌入二值水印。为增大水印嵌入量,可采用增大有序抖动模板,或对位交错子图再进行子图交错处理 (sub-image-interleaving) 的方法来生成更多明、暗相间的子图,而且后者解码的错误率更低,效果更好。该方法利用了区域的统计特性,不但对涂改、剪切有很好的鲁棒性,而且水印嵌入量较灵活,复杂度较低,但是该算法仅适用于有序抖动图像。

为改善嵌入水印后半色调图像的视觉效果,文献[20~23]提出了基于最优化的半色调水印方法(如图3所示),它的基本步骤是:首先利用直接嵌入法或简单的间接嵌入法在半色调图中嵌入水印;然后选择某种误差准则和搜索策略优化非水印像素。当水印嵌入量相同时,该类算法较用一般的直接、间接嵌入法嵌入水印后的图像质量高,其缺点是由于它基于迭代运算,因此复杂度高。

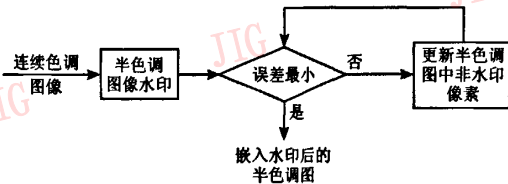


图3 文献[20~23]的水印嵌入方案

Fig.3 Watermark embedding scheme of Ref. [20~23]

Kacker 将扩频技术引入到半色调水印领域<sup>[6]</sup>(如图4所示),具有重要的意义。文献[6]通过定义基于 HVS 的误差标准、水印检测方法和搜索策略来寻找嵌入水印后的半色调图像,这种技术可满足水印检测的相关系数  $\gamma$  最高、半色调图与嵌入水印后的连续色调图的误差  $\varepsilon$  最小,其所得到的半色调图像不仅视觉效果好,而且含水印半色调图的扫描图像对常见的图像处理有很强的鲁棒性。由于该方法思路具有一般性,因此通过改变误差标准、水印检测方法或搜索策略可构造其他更简单、有效的水印嵌入算法。

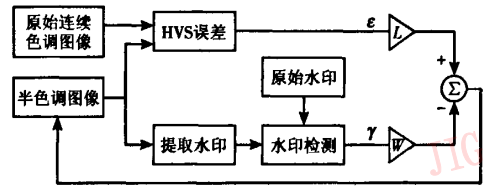


图4 文献[6]嵌入水印的框图

Fig.4 Block diagram of watermark embedding in Ref. [6]

直接法中的部分算法可应用于彩色图像,文献[13]首先将彩色图像由 RGB 颜色空间转换到 CMYK 颜色空间,然后各个彩色通道分别用变核误差分散 (kernels-altered error diffusion, KAEDF) 算法处理,最后再转换到 RGB 彩色空间,即得到嵌入水印后的彩色图像。文献[22]首先利用 DHST 直接嵌入法来嵌入水印,然后计算嵌入水印后的彩色图像与原始彩色图像在亮度上的误差,并将 DHSPT 算法中“从”像素的选择原则扩展到彩色空间,当亮度误差小于一定阈值,就在彩色空间通过选择并修改“从”像素来嵌入水印。

### 3.3 HVC

有些 HVC 算法是利用随机模板或构造共轭半色调模板来在有序抖动半色调图像中嵌入可视水印<sup>[24~26]</sup>,其中水印背景对应区域采用相同模板,前景对应区域采用共轭模板来生成两幅分存图像。

基于误差分散的 HVC 方法较多,其主要思想是根据水印前景或背景使两幅图像相关或不相关。一些算法的分存图像  $B^1$  为传统误差分散半色调图,而其他分存图像则都基于  $B^1$  采用不同策略获得。文献[27,28]算法首先对水印图像实施膨胀操作,将水印图像分成背景区域、过渡区域(膨胀前为背景区域)和前景区域,为得到分存图像  $B^2$ ,对于连续色调图与背景、前景对应的区域可采用与  $B^1$  相同的半色调方法进行处理,而处理过渡区域时,则将量化误差初始化为零,并采用新的计算方法处理。但误差分散的因果性使  $B^2$  与  $B^1$  在前景区域有不同的特性。该算法产生的分存图像叠加后,会使可视水印图像的对比度不均匀,一般平滑区域、中等灰度区域的对比度较好,但亮区域、高纹理区域的对比度不好。基于 CED (conjugate error diffusion) 的可视加密算法<sup>[29]</sup>的分存图像  $B^2$  在背景对应区域与  $B^1$  相同,而且前景对应区域可利用图2所示的加噪方法改变其统计特性,使  $B^2$  与  $B^1$  共轭,基于 CED 方法的改

进算法见文献[30~34]。Soo-Chang 等人提出了基于 NBEDF (noise balanced error diffusion) 的可视加密算法<sup>[13]</sup>, 它与 CED 算法类似, 都在量化输入前加入噪声(如图 5 所示), 不同的是, 由于它是加入固定尺度的噪声, 同时给反馈误差叠加了固定尺度的负噪声, 因此能增强叠加后可视水印的对比度。该算法可将水印分存到内容相同或不同的多幅图像, 且视觉效果都比较好。由于以上可视加密算法的分存图像  $B^i$  为传统的误差分散半色调图, 因此降低了可视加密的安全性。为克服以上缺点, JVW (joint visual-cryptography of watermarking) 算法<sup>[35]</sup> 在保证连续色调图像质量的前提下, 首先向连续色调图像中加入噪声, 然后采用 PCED (paired conjugate error diffusion) 算法来得到两幅分存图像。基于 MEBS (minimal error bit searching) 技术的可视加密算法<sup>[36]</sup> 是对多幅图像同时进行半调, 每个像素生成的半色调值构成一个多维向量, 当该向量元素进行某种布尔运算的结果与水印相同(或相反)时, 则不改变任何值, 否则修改量化误差最小的像素, 同时将误差进行分散。

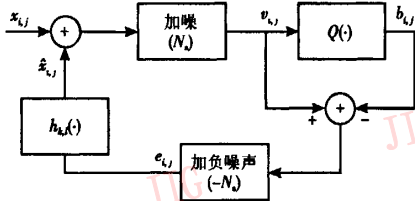


图 5 基于 NBEDF 的可视加密算法框图

Fig. 5 Block diagram of visual cryptography based on NBEDF

由于以上算法只能嵌入二值可视水印, 并且叠加后的可视水印中夹杂载体图像信息, 从而降低了可视水印的逼真度, Chai 等人将 HVC 过程抽象为最优化问题, 提出一种在多幅图像中嵌入细节丰富的灰度可视水印<sup>[37]</sup>。现以两幅图像为例进行说明, 若在  $\tilde{A}_1, \tilde{A}_2$  中嵌入水印  $\tilde{W}$ , 输入图像矢量  $P(i, j) = [\tilde{A}_1(i, j), \tilde{A}_2(i, j), \tilde{W}(i, j)]$ , 半色调图像对  $(A_1(i, j), A_2(i, j))$  可能的取值为  $(0, 0), (0, 1), (1, 0), (1, 1)$ , 而  $W(i, j) = A_1(i, j) \circ A_2(i, j)$ ,  $\circ$  表示布尔操作, 则  $[A_1(i, j), A_2(i, j), W(i, j)]$  可能的取值就构成集合  $O = \{(0, 0, 0 \circ 0), (0, 1, 0 \circ 1), (1, 0, 1 \circ 0), (1, 1, 1 \circ 1)\}$ , 而可视加密过程即为在  $O$  中搜索与输入矢量误差最小的矢量作为输出, 以获得  $A_1, A_2, W$ , 且满足  $\tilde{A}_1 \approx A_1, \tilde{A}_2 \approx A_2$ ,

$\tilde{W} \approx W$ 。该算法要求所有的输入像素必须在输出矢量的凸壳中, 若条件不满足, 就必须进行尺度缩放、色域匹配等运算。业已证明, 该算法嵌入水印后的载体图像、叠加后的可视水印图像的视觉效果都很好。

HVC 方法中的 NBEDF 算法<sup>[13]</sup>、文献[34, 36, 37]算法均可应用于彩色图像, 其基本思想为: 先将灰度方法作用于彩色图像的不同颜色平面, 然后再合成彩色图像。利用这种方法嵌入水印后的彩色图像的视觉效果较差, 其原因在于没有考虑各颜色通道之间的相关性。

## 4 存在问题和研究前景

由于在半色调图像中嵌入水印的难度较大, 因此尽管有越来越多的人投身到半色调水印技术的研究, 并取得了一些成绩, 但与其他多媒体数字水印技术相比, 许多问题的研究尚处于初级阶段, 有待进一步研究解决, 包括:

(1) 直接嵌入法和大部分间接嵌入法没有很好地利用人眼视觉系统特性。在没有连续色调图像的情况下, 直接嵌入法是唯一的选择, 但现有的直接嵌入法没有很好地利用视觉系统的特性, 且嵌入水印后的图像质量较差。因此充分利用人眼视觉特性, 在满足不可见性的要求下合理分配水印, 基于这一思想的自适应半色调水印算法需要进一步研究。另外, 半色调图像大部分基于纸质载体, 由于基于 HVS 的间接嵌入法不可见性较好, 且水印嵌入量较大, 因此应是未来发展的主流。

(2) 基于变换域的半色调水印尚未得到充分研究。在变换域中嵌入水印信号, 其能量可分布到空域的所有像素, 也有利于保证不可见性和鲁棒性, 虽然目前已有成功的尝试, 但由于复杂度较高, 而且嵌入的水印为伪随机序列, 因此如何利用变换域方法在半色调图像中嵌入有意义的水印, 仍被视为一个重要的研究方向。

(3) 彩色半色调图像水印的研究较少。由于彩色图像提供了比灰度图像更为丰富的信息, 因此彩色图像的处理正受到人们越来越多的关注。现有大多数半色调水印算法都是针对灰度图像, 而彩色半色调水印算法几乎都基于分通道的思想将灰度水印算法扩展到彩色图像, 由于嵌入水印后的图像效果较差, 因此考虑彩色图像各通道之间的相关性的半色调水印方法仍需进一步研究。

(4) PS 失真校正技术、抵抗 PS 过程的半色调水印算法研究还不够。通常打印后的图像,都有轻微旋转,其尺寸通常会变大,由于受打印机“点增益”的影响,使打印图像比理想图像更黑;另外经打印、扫描后的半色调图像,其形状、分辨率都与原来不同,这将导致水印检测正确率降低,甚至失败。目前,大多数算法对打印、扫描的分辨率有特殊要求,而且检测水印之前需首先进行预处理校正或手工校正,校正虽然能部分克服 PS 过程的攻击,但校正后的图像往往与未受攻击的半色调图像相差很大,鲁棒性较差,因此需引入纠错码等技术来增强鲁棒性。针对这种现状,对打印、扫描产生的各种失真进行校正的技术还需进一步研究,否则现有的半色调水印技术则会因鲁棒性差而难以在实际工作中得到应用。另外,对打印、扫描过程进行研究,提出能抵抗打印、扫描攻击的半色调水印算法将更有意义。由于打印-扫描是一种结合多种不同类型的攻击组成的综合攻击,因此简单组合相应的抗攻击技术是不能解决问题的。虽然该类算法的实现难度很大,但是从根本上抵抗打印、扫描攻击的一种策略,因此是今后研究的重要方向。

(5) 结合半色调图像压缩的半色调图像水印算法尚未研究。与原始图像相比,半色调图像的数据量已大大降低,但是大尺寸的半色调图(如航拍地图)的数据量仍然可观,当传输到印刷/绘图机时,由于会引起数据延迟,因此在半色调图像中嵌入水印时,有必要考虑半色调图像的压缩。目前,该领域的研究还是一片空白,其研究具有很重要的实用价值。

(6) HVC 理论体系的构建。HVC 方法虽然比较多,但思路比较相似,且目前都未涉及实际应用中的定位问题。连续色调图像的可视加密理论已比较完善,有必要将其扩展到半色调图像,以构建完善的 HVC 理论体系。

(7) 半色调图像容量问题。由于嵌入的数据量与很多因素有关,目前尚未进行研究,因此该方向也应受到人们的重视。

#### 参考文献 (References)

- 1 Langelaar C C, Steyawan L, Lagendijk R L. Watermarking digital image and video data[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2000, 17(5): 20 ~ 26.
- 2 Bayer B E. An optimum method for two-level rendition of continuous-tone pictures[A]. In: Proceedings of IEEE International Conference

- on Communications[C], New York, 1973, 1: 2611 ~ 2615.
- 3 Floyd R W, Steinberg L. Adaptive algorithm for spatial greyscale [J]. Proceedings of the Society for Information Display, 1976, 17(2): 75 ~ 77.
- 4 Solanki K, Madhoo U, Manjunath B S, et al. Estimation and undoing rotation for print-scan resilient data hiding[A]. In: IEEE Proceedings of International Conference of Image Processing [C], Singapore, 2004, 1: 39 ~ 42.
- 5 In-Gook C, Sangho H. A robust printed image watermarking based on iterative halftoning method[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2004, 2939: 200 ~ 211.
- 6 Kacker D, Allebach J P. Joint halftoning and watermarking [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2003, 51 (4): 1054 ~ 1068.
- 7 Fu M S, Au O C. Data hiding watermarking for halftone images[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2002, 11(4): 477 ~ 484.
- 8 Fu M S, Au O C. Improved halftone image data hiding with intensity selection[A]. In: Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and Systems[C], Sydney, Australia, 2001, 5: 243 ~ 246.
- 9 Sherry P, Savakis A. Improved techniques for watermarking halftone images[A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing[C], Montreal Canada, 2004, 5: 1005 ~ 1008.
- 10 Ping-Sung L, Jeng-Shyang P, Yen-Hung C, et al. A lossless watermarking technique for halftone images[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2005, 3682: 593 ~ 599.
- 11 Hel-Or H Z. Watermarking and copyright labeling of printed images [J]. Journal of Electronic Imaging, 2001, 10(3): 794 ~ 803.
- 12 Baharav Z, Shaked D. Watermarking of dither halftoned images[J]. Proceedings of SPIE on The International Society for Optical Engineering, 1999, 3657: 307 ~ 316.
- 13 Soo-Chang P, Jing-Ming G. Hybrid pixel-based data hiding and block-based watermarking for error-diffused halftone images [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2003, 13(8): 867 ~ 884.
- 14 Fu M S, Au O C. A robust public watermark for halftone images [A]. In: Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and Systems[C], Phoenix, Arizona, USA, 2002, 3: 639 ~ 642.
- 15 Au O C, Fu M S. A symmetric key watermark for halftone images [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing[C], Hong Kong, China, 2003, 3: 557 ~ 560.
- 16 Fu M S, Au O C. A multi-bit robust watermark for halftone images [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Multimedia and Expo[C], Baltimore, Maryland, USA, 2003, 1: 213 ~ 216.
- 17 Fu M S, Au O C. Correlation-based watermarking for halftone images [A]. In: Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and Systems[C], Vancouver Canada, 2004, 2: 21 ~ 24.
- 18 Zhang Zhen-cheng, Huang Guo-feng. An information hiding technique for halftone images based on human visual effects [J].

- Journal of China Institute of Communications, 2002, 23(5): 9 ~ 17.  
[张真诚, 黄国峰. 植基于人类视觉系统之半色调图像信息隐藏技术[J]. 通信学报, 2002, 23(5): 9 ~ 17.]
- 19 Soo-Chang P, Jing-Ming G, Hua L. Novel robust watermarking technique in dithering halftone images[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2005, 12(4): 333 ~ 336.
- 20 Wang H-C A. Data hiding techniques for printed binary images[A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Information Technology: Coding and Computing[C], Los Alamitos, CA, USA, 2001: 55 ~ 59.
- 21 Hsi-Chun A W. An information hiding technique for binary images in consideration of printing process[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2002, 2532: 460 ~ 467.
- 22 Muneyasu M, Lnoe M, Kitamura Y. An extension of DHSPT to color half-tone images[A]. In: Proceedings of IEEE International Symposium Communications and Information Technologies [C], Sapporo, Japan, 2004: 335 ~ 339.
- 23 In-Gook C. Look up table (LUT) method for halftone image watermarking[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2005, 3710: 275 ~ 285.
- 24 Knox K T. Digital Watermarking Using Stochastic Screen Patterns [P]. U. S. Patent 5734752.
- 25 Wang S G. Digital Watermarking Using Conjugate Halftone Screens [P]. U. S. Patent 5790703.
- 26 Wang S G, Knox K T. Embedding digital watermarks in halftone images[A]. In: Proceedings of SPIE on the International Society for Optical Engineering[C], San Jose, CA, USA, 2000, 3971: 218 ~ 227.
- 27 Fu M S, Au O C. Data hiding in halftone images by stochastic error diffusion[A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing [C], Salt Lake City, Utah, USA, 2001, 3: 1965 ~ 1968.
- 28 Zhang Guan-nan, Wang Shu-xun, Wen Quan. Watermarking algorithm for halftone images by stochastic error diffusion[J]. Journal of Jilin University, 2004, 34(10): 639 ~ 643. [张冠男, 王树勋, 温泉. 一种基于随机误差分散技术的半色调水印方法[J]. 吉林大学学报, 2004, 34(10): 639 ~ 643.]
- 29 Fu M S, Au O C. Data hiding in halftone images by conjugate error diffusion[A]. In: Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and Systems [C], Bangkok, Thailand, 2003, 2: 920 ~ 923.
- 30 Fu M S, Au O C. Self-conjugate watermarking technique for halftone images[J]. Electronics Letters, 2003, 39(4): 356 ~ 358.
- 31 Fu M S, Au O C. A novel method to embed watermark in different halftone images; data hiding by conjugate error diffusion (DHCED) [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference of Acoustics, Speech, and Signal Processing[C], Hong Kong, China, 2003, 3: 529 ~ 532.
- 32 Fu M S, Au O C. A set of mutually watermarked halftone images [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing[C], Barcelona, Spain, 2003, 2: 467 ~ 470.
- 33 Fu M S, Au O C. Steganography in halftone images; conjugate error diffusion[J]. Signal Processing, 2003, 83(10): 2171 ~ 2178.
- 34 Fu M S, Au O C. Watermarking technique for color halftone images [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing[C], Montreal, Canada, 2004, 3: 381 ~ 384.
- 35 Fu M S, Au O C. Joint visual cryptography and watermarking[A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Multimedia and Expo[C], Taipei, China, 2004, 2: 975 ~ 978.
- 36 Soo-Chang P, Jing-Ming G. High-capacity data hiding in halftone images using minimal error bit searching[A]. In: Proceedings of IEEE International Conference of Image Processing[C], Singapore, 2004, 2: 3463 ~ 3466.
- 37 Chai W W, Gerhard T, Mikel S. Digital watermarking and steganography via overlays of halftone images[A]. In: Proceedings of SPIE on the International Society for Optical Engineering, Mathematics of Data/Image Coding, Compression, and Encryption VII, with Applications[C], Denver, CL, USA, 2004, 5561: 152 ~ 163.