

基于四阶迂回相位编码的计算全息水印技术

陈家祯¹ 郑子华¹ 连桂仁¹ 叶锋¹ 陈利永²

(¹ 福建师范大学数学与计算机学院, 福建 福州 350007; ² 闽江学院计算机系, 福建 福州 350108)

摘要 利用四阶迂回相位计算全息原理实现原始图像计算全息图的制作,并将其作为水印信号嵌入到载体图像。在水印嵌入过程中选择载体图像离散余弦变换(DCT)域中频系数作为嵌入点,以提高抗 JPEG 压缩能力,而对全息水印数据的 Arnold 置乱处理可明显提高水印信息的抗剪切能力。仿真实验结果表明,基于迂回相位编码方法的计算全息水印技术在透明性和稳健性方面具有一定优势,特别在抗剪切方面具有优良性能。计算全息术及置乱的引入使所嵌入的水印具有较高的安全性。

关键词 信息光学; 全息水印; 迂回相位; 离散余弦变换

中图分类号 O438.1

OCIS 090.1760 200.3050

文献标识码 A

Computer-Generated Holographic Watermark Technology Based on Four Detour Phases Encoding Scheme

Chen Jiazhen¹ Zheng Zihua¹ Lian Guiren¹ Ye Feng¹ Chen Liyong²

(¹ College of Mathematics and Computer Science, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350007, China)
² Department of Computer Science, Minjiang University, Fuzhou, Fujian 350108, China)

Abstract The formation of computer-generated hologram(CGH) based on four detour phases encoding scheme for the original image has been proposed and the CGH is used as watermark signal to be embedded into the carrier image. Medium frequency parameters in discrete cosine transform (DCT) domain are selected as the embedded positions to get better ability of anti-JPEG compression and the Arnold scrambling can obviously improve anti-cropping ability. The experimental simulation results show that the holographic watermark technology based on the detour encoding method discussed has certain advantages in invisibility and robustness. And especially it has high performance of anti-cropping. Holography and scrambling technology can bring higher safety of the embedded watermark.

Key words information optics; holographic watermark; detour phase; discrete cosine transform

1 引言

计算全息(CGH)是将电子计算机引入到全息图的制作过程中,利用计算机计算物光波在全息平面上的光场分布,并对光场的分布在计算机内进行编码,用编码的结果控制绘图仪绘图或用阴极射线管(CRT)显示器显示,最后经光学缩版制成实用的全息图。将计算得到的全息图数据以数字图像文件的形式保存,即得到原始信息的另一种存储方式,称为全息变换^[1],对以数字图像形式保存的计算全息图可以采用与全息图的光学再现过程类似的方法,通过逆变换方式用数字手段再现原始物波数据。由于所记录的数字图像具有光学全息图的特征,信息冗余度大,利用全息图的碎片仍能再现出物体完整的像这一特性,可将计算全息图像数据任意剪切,不会影响原始记录的丢失,只是在信息再现时稍微增加了一些噪声,因此特别适用于需要进行数据完整性认证的水印应用场合。作为一种计算全息术在信息隐藏中应用的新方法,本文讨论了迂回相位编码计算全息的基本原理,并根据其实现思想对原始图像信息进行四阶迂回相位编码,编码结果用 256 色灰度图像表示,从而将原来可读的数字图像信号转变为不可阅读的计算全息图,一定程度上实现了对原始图像信号的加密处理。另外为进一步加强安全性,对所得到的全息图数据进行置乱处理使数据分布更具随机

收稿日期: 2009-08-22; 收到修改稿日期: 2009-11-02

基金项目: 福建省教育厅 B 类(JB07051)资助课题。

作者简介: 陈家祯(1971—),女,硕士,副教授,主要从事信息处理及 EDA 方面的研究。E-mail: jiazhen_chen@fjnu.edu.cn

性,提高了抗剪切能力,并成功实现了计算全息水印信号的离散余弦变换(DCT)域嵌入、提取及稳健性测试。

2 计算全息水印实现原理及制作方法

2.1 实现原理

计算全息水印的生成建立在计算全息理论上,利用计算全息编码技术实现原始信息的编码处理,不同的编码方法对应不同类型的计算全息图。采用迂回相位编码方式制作傅里叶变换全息图不需要参考光波,通过编码记录物光波傅里叶变换谱的振幅和相位信息。

设物光波表达式为

$$o(x, y) = |o(x, y)| \exp[j\varphi(x, y)]. \quad (1)$$

用计算机制作全息图必须分别对物光波和全息图进行抽样,用梳状函数可以很方便地实现对物光波的抽样,设物体的大小为 $\Delta x \times \Delta y$,总的抽样数为 $M \times N$, x_0 和 y_0 分别为物光波在 x 和 y 方向的抽样间距,经梳状函数抽样后的物光波表达式为

$$o(m, n) = \sum_{m=-M/2}^{M/2-1} \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} |o(mx_0, ny_0)| \exp[j\varphi(mx_0, ny_0)] \delta(x - mx_0) \delta(y - ny_0). \quad (2)$$

设全息图平面的抽样序号为 k 和 l ,抽样单元数与物面抽样单元数相同,取为 $M \times N$,可得(2)式的离散傅里叶变换(DFT)为

$$O(k, l) = \sum_{m=-M/2}^{M/2} \sum_{n=-N/2}^{N/2} o(m, n) \exp\left[-j2\pi\left(\frac{mk}{M} + \frac{nl}{N}\right)\right] = |O(k, l)| \exp[j\varphi(k, l)]. \quad (3)$$

由(3)式计算出的值通常为复数,复数的幅值和相位可在计算机内用迂回相位的方法实现编码。四阶迂回相位编码法^[2,3]由李威汉于1970年提出,全息图的一个单元沿 x 方向分为4等分,各部分的相位分别为 $0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3}{2}\pi$,与复平面上实轴和虚轴所表示的4个方向相对应。将全息图上待记录的一个样点的复振幅沿4个相位方向分解为4个正交分量,即(3)式还可写成

$$O(k, l) = O_1(k, l)r^+ + O_2(k, l)j^+ + O_3(k, l)r^- + O_4(k, l)j^-, \quad (4)$$

式中 r^+, j^+, r^-, j^- 为复平面上的4个基矢量,即 $r^+ = \exp(j0), r^- = \exp(j\pi), j^+ = \exp\left(j\frac{\pi}{2}\right), j^- = \exp\left(j\frac{3}{2}\pi\right)$ 。 O_1, O_2, O_3, O_4 为实的非负数,对于一个样点, $O_1 \sim O_4$ 中只有2个分量不为零,因此要描述一个样点的复振幅,只需要在这两个子单元中用开孔大小或灰度等级来表示即可。用灰度进行编码,可避免对窗口大小和位置的精确定位,容易操作^[4]。将编码结果用256色灰度图保存,即可得到基于四阶迂回相位编码的计算全息图。作为水印信号嵌入时,4个相位方向的全息图数据还可以采用灵活排列方式,需要复原时只需按约定的方式恢复再进行逆变换即可。

2.2 制作方法

文献[5]中根据光学干涉记录原理生成数字全息水印,但所生成的水印信号中含有共轭像的信息,而对原始像与再现像分离的滤波处理在一定程度上使再现像的精度下降。采用四阶迂回相位编码原理生成的计算全息水印,无需进行再现像中原始像与共轭像的分离处理操作,制作过程简单。

计算全息水印的制作过程为:

1) 将原始图像(设为二值图像,大小为 $64 \text{ pixel} \times 64 \text{ pixel}$)先经过随机相位调制模拟物光波,随机相位信号可平滑傅里叶变换谱,降低全息图的动态范围,有更好的重建效果,另一方面也使得原始数据分布具有随机性。

2) 作快速傅里叶变换(FFT),傅里叶变换谱的抽样点数与原始图像抽样点数相同,也取 $64 \text{ pixel} \times 64 \text{ pixel}$,得到模拟物光波的傅里叶变换谱信息。傅里叶变换谱点数取得越多,再现像精度越高,但生成的全息图的数据量也越大。

3) 将变换结果进行正交分解,按四阶迂回相位原理进行编码,所得到的4个相位方向的数据经256级量化处理后排列成 $128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$ 的计算全息图。

4)采用与编码时相反的过程,先进行相位恢复再作傅里叶逆变换,可恢复出原始图像信息,实验结果如图1所示。

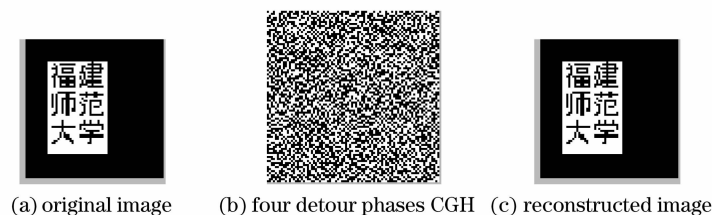


图1 四阶迂回相位计算全息模拟图

Fig.1 Computer simulation of four detour phases computer generated hologram (CGH)

从图1可见,原始图像信息以不可阅读的计算全息图的形式表现出来,若未知全息图的制作参数及相位数据的排列规律,则无法直接通过逆变换还原原始信息,因此在一定程度上实现了原始信息的加密处理。

3 计算全息水印抗剪切能力提高措施

原始图像经过全息变换后,信息被扩散到整个全息图平面上,为了减少频域数据之间的相关性,采用Arnold置乱方法对频域数据进行置乱处理,经过置乱处理后的全息图具有更好的抗剪切能力,同时还具有置乱加密的效果。另外Arnold置乱具有周期性,对于合法用户可以很容易还原出原始图像。置乱算法的周期可以根据图像大小通过编程^[6]求得。图2和图3为对生成的计算全息图分别作置乱与不作置乱处理两种情况下作裁剪所得到的复原结果。为了使结果具有可比性,对这两张全息图的裁剪位置和裁剪大小相同。图中的百分数表示剩余图像与原始图像大小比值。

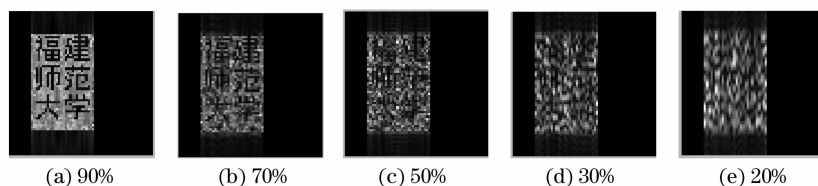


图2 对未作置乱处理的计算全息图进行不同程度裁剪后的数字再现结果

Fig.2 The reconstructed image after different cropping without scrambling for CGH

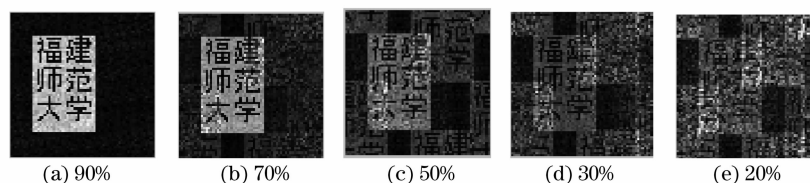


图3 对置乱处理后的计算全息图进行不同程度裁剪后的数字再现结果

Fig.3 The reconstructed image after different cropping with scrambling for CGH

从仿真实验结果可以看出,当剪裁量超过50%时,由置乱后的计算全息图所复原的再现像具有更好的主观清晰度。因此将水印信号嵌入到载体图像前作Arnold置乱处理,以获得更好的抗剪切性能。

4 计算全息水印的嵌入与提取方法

将原始信息转变为计算全息图后,对载体图像选择离散余弦变换嵌入计算全息水印以提高其抗压缩能力,离散余弦变换具有良好的能量压缩特性,考虑到人眼对低频成分比中对高频成分敏感,故选择中频系数作为嵌入点^[7,8]。

设 $f(x,y)$ 为载体图像,大小为 $M_1 \times N_1$, $H(x,y)$ 为归一化至同一灰度级的计算全息图,全息水印根据

第 2.2 节中的方法制作,并作 Arnold 置乱处理,大小设为 $M_2 \times N_2$, $M_2 < M_1$ 且 $N_2 < N_1$ 。

1) 原始图像 $f(x, y)$ 首先被分成互不重叠的 8×8 图像块,记为 $B_k, k = 0, 1, \dots, K-1$, 即

$$f(x, y) = \bigcup_{k=0}^{K-1} f_k(x', y'), \quad 0 \leq x', y' < 8. \quad (5)$$

2) 每一图像块进行 DCT 变换

$$F_k(u', v') = \text{DCT}\{f_k(x', y'), \quad 0 \leq x', y' < 8\}, \quad 0 \leq u', v' < 8. \quad (6)$$

3) 对全息水印 H 进行分块处理,所分得的图像块的数目与原始图像块数目相同,设每一个图像块的大小为 $M_3 \times N_3$,

$$H(x, y) = \bigcup_{k=0}^{K-1} h_k(x', y'), \quad 0 \leq x' < M_3, 0 \leq y' < N_3. \quad (7)$$

4) 对原始图像块的 64 个离散余弦系数按 ZigZag 次序排序,排序的系数记为 $F_k(n)$,全息水印的每一个图像块也排成一维序列的形式 $h_k(n)$,选择与全息水印序列相同长度的中频系数进行修改,即

$$\tilde{F}_k(n) = F_k(n) + \alpha h_k(n), \quad 0 \leq n < M_3 N_3, \quad (8)$$

式中 α 为水印嵌入强度。

5) 将修改后的中频系数放回到原矩阵位置,作 DCT 逆变换,得到嵌有全息水印的载体图像。

原始载体图像与可疑图像作 8×8 分块处理,计算二维 DCT 变换,选出嵌入时所使用的中频系数序列,按照与嵌入时相反的方法恢复出计算全息水印数据,即

$$h_k(n) = [\tilde{F}_k(n) - F_k(n)]/\alpha, \quad 0 \leq n < M_3 N_3. \quad (9)$$

合并每一图像块所提取的数据并作 Arnold 置乱复原,恢复全息图 4 个相位方向的数据,再利用全息图的制作参数及再现原理恢复出原始水印信号。

5 实验仿真结果与讨论

实验中载体图像为 256 色灰度图像,大小为 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$,水印图像大小为 $64 \text{ pixel} \times 64 \text{ pixel}$ 的二值图像,水印嵌入强度 $\alpha = 0.35$,得到如图 4 所示的水印嵌入结果。



图 4 基于离散余弦变换的计算全息水印算法

Fig. 4 CGH watermark algorithm based on DCT

使用峰值信噪比 (PSNR, ϕ_{PSNR}) 来衡量原始图像与嵌入水印后图像的差别,

$$\phi_{\text{PSNR}} = 10 \lg [XY \max_{x,y} f^2(x, y) / \sum_{x,y} (f_{x,y} - \tilde{f}_{x,y})^2], \quad (10)$$

式中 $f_{x,y}$ 表示未失真图像中坐标为 (x, y) 的像素点, $\tilde{f}_{x,y}$ 表示嵌入水印的图像中坐标为 (x, y) 的像素点, X 和 Y 分别为行和列的个数。可计算得原始载体图像与嵌入水印后图像的峰值信噪比为 41.2 dB, 达到数字水印透明性要求。

5.1 剪切操作对抽取计算全息水印的影响

计算全息图具有光学全息图不可撕毁性特征,因此用作水印信号将具有良好的抗剪切能力^[9,10],而对全息图数据的 Arnold 置乱处理进一步加强了抗剪切能力。实验中对含有水印的图像进行不同程度的剪切,被剪切的部分用数据零进行填充,得到的实验结果如图 5 所示,原始水印图像与提取水印图像的峰值信噪比如表 1 所示。

表 1 不同裁剪量下原始水印信号与所提取的水印信号之间的峰值信噪比

Table 1 ϕ_{PSNR} between the original watermark image and the retrieved watermark with different cropping amount

Percentage of the remaining image /%	90	70	50	30
ϕ_{PSNR} of the retrieved watermark and the original watermark	27.2669	24.2182	22.1688	20.6346

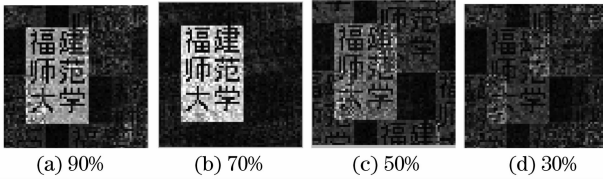


图 5 不同剪切操作下水印再现图

Fig. 5 The retrieved watermark images with different cropping amount

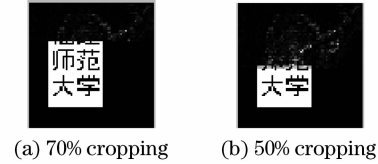


图 6 未使用全息技术水印再现图

Fig. 6 The retrieved images watermark without holographic technology

由图 5 可见,本算法在图像剩余部分超过 50% 时提取的水印具有较好的质量,即使剩余图像只留 30% 时仍可依稀辨别出完整的原始版权信息,因此该算法具有良好的抗剪切能力。而不使用全息技术,直接对原始图像作置乱处理后使用相同的方法嵌入水印,在不同的剪切量下所提取的水印信号如图 6 所示,大面积的剪切操作将使得无法看到原始水印的完整信息。

5.2 抗 JPEG 压缩功能测试

图 7 为将嵌入水印后的图像进行不同程度 JPEG 压缩后所提取的水印信号,峰值信噪比如表 2 所示。从图 7 可以看出,压缩质量越高,所抽取的水印图像越清晰,但文件尺寸也越大。从所抽取的水印图像的主观质量及抽取水印图像与原始水印图像的峰值信噪比来看,本算法对 JPEG 压缩具有良好的稳健性。

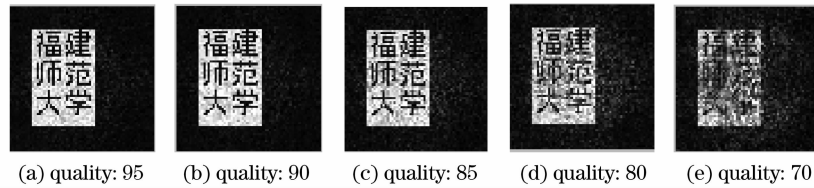


图 7 不同 JPEG 压缩质量下所提取的水印信号

Fig. 7 The retrieved watermark with different JPEG compression quality

表 2 不同 JPEG 压缩质量下所抽取水印与原始水印之间的峰值信噪比

Table 2 ϕ_{PSNR} between the retrieved watermark and the original watermark image with different JPEG compression quality

JPEG compression quality	95	90	85	80	70
ϕ_{PSNR} of the retrieved watermark and the original watermark	20.7108	20.7037	20.6799	20.6659	20.6475

5.3 抗一般几何攻击测试

旋转和尺度是几何攻击中最常见的攻击,图 8 为对含有水印的图像先进行拉伸再缩小至原始图像大小后进行水印再现的结果。再现结果表明,不同缩放程度对所提取的水印信号影响不大,本算法对图像缩放攻击具有很好的水印可提取性。图 9 为对含有水印的图像进行不同程度旋转操作后所提取的水印信号,检测时结合旋转角度检测及对原始载体图像作相同角度旋转等方法进行水印提取。从实验结果可见,本方法同样具有很好的水印可提取性。

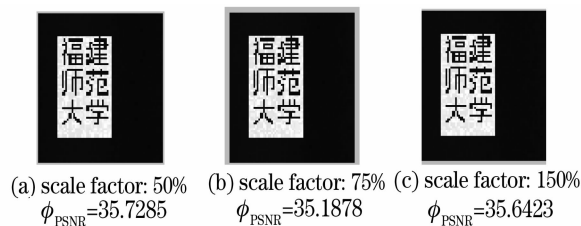


图 8 不同程度缩放后水印再现图

Fig. 8 The reconstructed watermark images with different scale factor

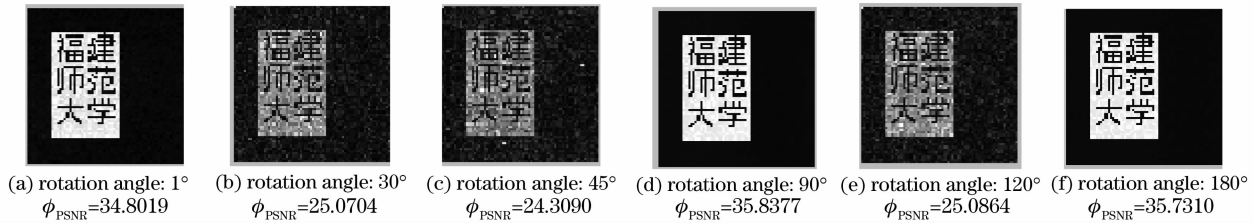


图9 不同程度旋转后水印再现图

Fig. 9 The retrieved watermark images with different rotation angle

6 结 论

提出一种按照四阶迂回相位计算全息原理实现原始图像计算全息图的制作方法,并将其作为水印信号嵌入到载体图像。为了提高水印图像的抗剪切能力,水印信号作了 Arnold 置乱处理,并选择载体图像 DCT 域的中频系数作为嵌入点以提高抗 JPEG 压缩能力。仿真实验结果表明,本算法具有良好的稳健性,特别在大面积裁剪的情况下仍可在一定程度上再现完整水印信号,对于旋转缩放等几何攻击同样具有很好的水印可提取性。全息水印的制作参数及数据置乱次数还可结合作为密钥使用,进一步提高了水印的安全性。

参 考 文 献

- Luo Jiangtao, Zheng Qingji, Guo Hong *et al.*. Holographic transformation of computer images using computer generated holography [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2002, **11**(13): 1171~1173
 雒江涛,曾庆济,郭洪等. 利用计算机全息实现数字图像的全息变换[J]. *光电子·激光*, 2002, **11**(13): 1171~1173
- Yu Zulian, Jin Guofan. Computer-Generated Hologram[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1984. 69~79
 虞祖良,金国藩. 计算机全息[M]. 北京: 清华大学出版社, 1984. 69~79
- Yu Meiwen. Optical Holography and Its Applications[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996. 297~301
 于美文. 光全息学及其应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996. 297~301
- Chen Siguo, Deng Ling. An improved methods for computing holograph detour phase encoding[J]. *Laser Journal*, 2007, **28**(6): 57
 陈仕国,邓玲. 一种改进的计算全息迂回相位编码方法[J]. *激光杂志*, 2007, **28**(6): 57
- Zhao Yajing, Zhong Jinggang. Application of all-digital holography in digital image hiding[J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(6): 854~857
 赵雅晶,钟金钢. 全数字全息术在图像信息隐藏中的应用[J]. *光学技术*, 2005, **31**(6): 854~857
- Huang Fanfuan. Image scrambling based on Arnold transforming and implementation[J]. *J. Guizhou University*, 2008, **25**(3): 276~279
 黄仿元. 基于 Arnold 变换的图像置乱算法实现[J]. *贵州大学学报*, 2008, **25**(3): 276~279
- Yu Chilian, Gu Jihua, Liu Wei *et al.*. An image digital watermark technique based on digital holography and discrete cosine transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(3): 355~361
 尉迟亮,顾济华,刘薇等. 基于数字全息及离散余弦变换的图像数字水印技术[J]. *光学学报*, 2006, **26**(3): 355~361
- Zhao Yajing, Zhong Jinggang. Digital reconstruction of T. S. Huang's Fourier CGH and the elimination of the zero-order of diffraction images[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(11): 1339~1341
 赵雅晶,钟金钢. 黄氏傅里叶计算全息图的数字再现及零级像的消除[J]. *光子学报*, 2004, **33**(11): 1339~1341
- Takai N., Mifune Y.. Digital watermarking by a holographic technique [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(5): 865~873
- Sun Liujie, Zhuang Songlin. Forgery prevention based on in-line Fourier holographic watermark with double random phase encryption [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 621~624
 孙刘杰,庄松林. 双随机相位加密同轴傅里叶全息水印防伪技术[J]. *光学学报*, 2007, **27**(4): 621~624