

数字全息图可控再现菲涅耳计算全息水印方法

陈家祯 郑子华 叶 锋 连桂仁 许 力

福建师范大学数学与计算机学院, 福建 福州 350007

摘要 提出一种基于数字全息图的可控再现菲涅耳计算全息水印方法。对水印物平面光波计算离散菲涅耳变换获得全息面上的物光波复振幅分布,为提高安全性,对物平面水印信号和衍射面信号进行双随机相位编码加密处理;对加密后的数据进行预处理及载波调制和实值编码;将编码后的信号作离散余弦变换(DCT)后以一定强度叠加于宿主全息图的中频分量,水印信号恢复无需原始宿主全息图信息,可实现盲提取。结果表明,所提出的方法具有良好的透明性,通过放大率及重建光波的控制,重建像平面的水印信号可以实现大小和位置可调;并且宿主全息图在遭受剪切、联合照片专家组(JPEG)压缩、滤波、旋转、拉伸等各类攻击的情况下,对宿主和水印信号均具有良好的数字重建质量;宿主数字全息图的零级像抑制处理不影响水印信号的提取。

关键词 全息;数字全息图;菲涅耳衍射;计算全息;数字水印;可控再现

中图分类号 O438.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.120901

Method on Controllable Reconstruction of Fresnel Computer-Generated Hologram Watermark for Digital Hologram

Chen Jiazhen Zheng Zihua Ye Feng Lian Guiren Xu Li

School of Mathematics and Computer Science, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350007, China

Abstract A method on controllable reconstruction of Fresnel computer-generated hologram watermark for digital hologram has been proposed. Complex amplitude distribution is obtained by calculating discrete Fresnel transformation of the watermark object wave in the holographic plane, and the watermark and the diffraction distribution signal are double-random-phase modulated to improve security. The encryption data are reprocessed and modulated to get real-coded CGH watermark. The encoded signal after the discrete cosine transformation is added to medium frequency component with certain intensity. The watermark can be blind extracted without the host hologram signal. The results show that the approach behaves good invisibility and is robust to many attacks such as cropping, JPEG compression, filtering, rotation, scaling, etc. The method has good digital reconstruction quality for both the host hologram and the watermark. The size and position of the watermark can be easily adjusted by changing the magnification and the reconstructed wave. The zero-order image elimination of the host hologram does not affect the extraction of the watermark.

Key words holography; digital hologram; Fresnel diffraction; computer-generated hologram; digital watermark; controllable reconstruction

OCIS codes 070.2025; 200.3050; 090.1760

1 引言

全息术利用光的干涉和衍射原理,以干涉条纹的形式记录物体发射的特定光波,并能在一定条件下再现原物体逼真的三维(3D)像^[1];数字全息术用 CCD 摄像机等光电探测器件记录三维感知信息;计算全息通过计算机综合虚拟三维物体的全息图;在数字全息和计算全息中三维物体的菲涅耳衍射光波以数字全息图的方式保存,利用计算机通过对数字全息图的衍射数值计算可以在计算机屏幕上数字重建三维物体或者通过数字微镜(DMD)进行全息 3D 显示^[2],在形貌测量、变形测量、全息防伪、全息信息存储、商业显示等领域有着

收稿日期: 2015-05-29; 收到修改稿日期: 2015-06-26; 网络出版日期: 2015-11-25

基金项目: 福建省教育厅 B 类项目(JB11020)

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

广泛的应用。伴随着3D地图、3D导航、3D购物、3D动漫等新型全息应用的发展,记录了三维物体物光波信息的全息图同样需要解决版权保护问题,文献[3]以同轴数字全息图为宿主文件探讨了三维物体的信息隐藏问题,涉及到的实验装置较复杂并需记录多张宿主及水印全息图,应用管理不便。离轴全息在物光和参考光夹角满足一定条件下,衍射光不存在相互干扰,是一种最常使用的全息记录方法,如何根据离轴数字全息图特性进行信息隐藏是一个值得探讨的问题。

本文在分析离轴数字全息图特性的基础上提出一种可控再现菲涅耳计算全息水印方法,结果表明,所提出的方法具有良好的透明性和稳健性,并且由于水印信号数字重建中球面波的引入,改善了一般文献中全息水印信号大小和位置不可调节的缺点^[4-5],水印信号灵活多变显示方式能够满足不同应用场合下的显示要求。

2 可控再现菲涅耳计算全息水印理论模型与计算方法

2.1 离散菲涅耳变换

根据菲涅耳衍射相关理论,图1所示的光路中,物平面处的图像 $u_0(x,y)$ 在波长为 λ 的单色平行光照射下,作距离为 d 的菲涅耳衍射,平面P处的光场分布可用离散菲涅耳变换表示。

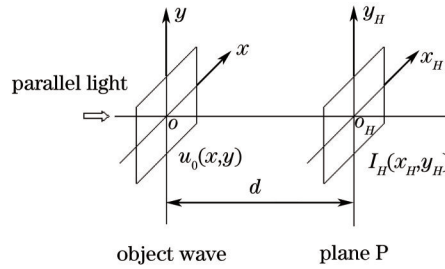


图1 菲涅耳衍射示意图

Fig.1 Schematic diagram for Fresnel diffraction

平面P处的离散菲涅耳衍射存在一次快速傅里叶变换和快速卷积^[6]两种计算方法,一次快速傅里叶变换算法计算表示为

$$U(p\Delta x_H, q\Delta y_H) = \frac{\exp(jkd)}{j\lambda d} \exp\left\{\frac{jk}{2d}[(p\Delta x_H)^2 + (q\Delta y_H)^2]\right\} \times \text{FFT}\left\{u_0(m\Delta x_0, n\Delta y_0) \exp\left\{\frac{jk}{2d}[(m\Delta x_0)^2 + (n\Delta y_0)^2]\right\}\right\},$$

$$(p, m = 0 \sim M-1, q, n = 0 \sim N-1), \quad (1)$$

式中 λ 为波长, $k = 2\pi/\lambda$, $u_0(m\Delta x_0, n\Delta y_0)$ 是物平面 $u_0(x, y)$ 的离散形式, m, n 表示取样点序号, $\Delta x_0 = \frac{\Delta X}{M}$, $\Delta y_0 = \frac{\Delta Y}{N}$ 表示物平面取样间隔, M, N 为取样数, $\Delta x_H, \Delta y_H$ 为离散傅里叶变换后对应的空域取样间隔, p, q 为取样点序号。根据 Shannon 采样定理, $\Delta x_H = \frac{\lambda d}{M\Delta x_0}$, $\Delta y_H = \frac{\lambda d}{N\Delta y_0}$ 。

离散形式的快速卷积算法可用如下公式表示,其中物平面和衍射观测平面保持相同的取样宽度:

$$U(m\Delta x_H, n\Delta y_H) = F^{-1}\left\{F[u_0(m\Delta x_0, n\Delta y_0)]H_f(m\Delta f_x, n\Delta f_y)\right\},$$

$$(p, m = 0 \sim M-1, q, n = 0 \sim N-1), \quad (2)$$

式中 $F[\cdot]$ 表示离散傅里叶变换, $\Delta f_x, \Delta f_y$ 表示频谱取样间隔, $\Delta f_x = \frac{1}{\Delta X}$, $\Delta f_y = \frac{1}{\Delta Y}$, $H_f(m\Delta f_x, n\Delta f_y)$ 表示离散形式的菲涅耳衍射传递函数,定义为

$$H_f(m\Delta f_x, n\Delta f_y) = \exp\left\{jkd\left[1 - \frac{\lambda^2}{2}[(m\Delta f_x)^2 + (n\Delta f_y)^2]\right]\right\},$$

$$(p, m = 0 \sim M-1, q, n = 0 \sim N-1). \quad (3)$$

2.2 双随机相位加密菲涅耳衍射光波

为提高水印信号的安全性,分别对物平面信号 $u_0(x, y)$ 和 P 平面处的菲涅耳衍射光波信号进行双随机相

位加密编码^[7], 设 $n_i(x, y)$ 、 $b(x', y')$ 分别表示分布于 $[0, 2\pi]$ 的独立白噪声序列, f_{FST_D} 表示距离为 D 的离散菲涅耳衍射计算。双随机相位编解码过程可描述为

$$\psi(x'', y'') = f_{\text{FST}_D} \left\{ \left\{ f_{\text{FST}_D} \left\{ u_0(x, y) \exp[jn_i(x, y)] \right\} \right\} \exp[jb(x', y')] \right\}, \quad (4)$$

解密是加密的逆过程, 解密过程可表示为

$$u_0(x, y) = f_{\text{FST}_D} \left\{ f_{\text{FST}_D} \left[\psi(x'', y'') \right] \exp[-jb(x', y')] \right\} \exp[-jn_i(x, y)]. \quad (5)$$

2.3 实值编码水印信号设计

加密后的菲涅耳衍射光波数据是复数, 为了得到实值编码水印信号, 对双随机相位加密后的菲涅耳衍射光波信号进行频域扩展数据预处理后加入载波信号进行调制和去除零级像干涉编码。数据预处理的目的是避免编码后信号中原始像与共轭像数字频谱的混叠以提高数字再现像质量, 用经过预处理后的信号作载波调制和干涉编码可得到实值菲涅耳计算全息水印信号, 并具有良好的数字再现质量。

通过载频参数控制实现实值编码全息水印信号方法为

$$\begin{aligned} H(p\Delta x, q\Delta y) &= \psi'(p\Delta x, q\Delta y)R^*(p\Delta x, q\Delta y) + \psi''(p\Delta x, q\Delta y)R(p\Delta x, q\Delta y), \\ [p &= 0, 1, \dots, L_1 \cdot (M - 1), q = 0, 1, \dots, L_1 \cdot (N - 1)], \end{aligned} \quad (6)$$

式中 $\psi'(p\Delta x, q\Delta y)$ 表示加密后衍射光波的预处理信号, 参考文献[8]中方法, 首先计算加密后菲涅耳衍射光波数据 $\psi(p\Delta x, q\Delta y)$ 的离散数字频谱, 然后用零值填充扩展的频谱域, 并作快速傅里叶逆变换, 实现空域信号的插值预处理; 再用平面参考光 $R \exp[j2\pi(\alpha_1 x + \beta_1 y)]$ 对预处理后的信号进行调制及干涉编码, 其中 α_1 、 β_1 表示载频系数, L_1 表示频域扩展倍数, 载频系数与全息水印原始像与共轭像频谱移位值 k_1 和 k_2 之间的关系由以下公式确定, 其中 $\text{rem}(\cdot)$ 表示取余运算。

$$\begin{cases} k_1 = \text{rem}(\alpha_1 L_1 M, L_1 M) \\ k_2 = \text{rem}(\beta_1 L_1 N, L_1 N) \end{cases}. \quad (7)$$

2.4 可控再现数字重建

从宿主数字全息图中恢复实值编码水印信号, 再通过频域滤波恢复 P 平面菲涅耳衍射光波信号, 用单位振幅球面波 $R_c(x, y) = \exp\left\{j\frac{k}{2z_c}[(x-a)^2 + (y-b)^2]\right\}$ 作为菲涅耳衍射分布的重建波, 再应用快速卷积算法计算数字再现像, 根据全息理论^[6], 当衍射距离 z_i 满足 $z_i = \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{z_c}\right)^{-1}$ 时, 在重建像平面 z_i 能得到物体实像, 且实像的放大率为 $M = \frac{z_i}{d}$, 参数 a, b 可控制水印信号在重建像平面的位置, 应用该特性可灵活控制水印信号在重建像平面的大小和位置以满足不同场合下的显示需求。

3 水印信号的嵌入与提取方法

离轴数字全息图表现为记录了物光波与参考光波干涉信息的数字图像^[9], 可用公式表示为

$$I_H(x_H, y_H) = [U(x_H, y_H) + R(x_H, y_H)] \cdot [U(x_H, y_H) + R(x_H, y_H)]^*, \quad (8)$$

式中 $U(x_H, y_H)$ 表示物光, $R(x_H, y_H)$ 表示平面参考光, $R(x_H, y_H) = R \exp[j2\pi(\alpha x_H + \beta y_H)]$ 。

根据(8)式宿主数字全息图中包含零级像、原始像和共轭像分量, 在频谱域表现为零级像位于低频部分, 原始和共轭像位于高频部分, 综合考虑透明性和稳健性及全息图数字再现时的一般处理流程, 将水印信号嵌入在全息图的中频分量。一方面中频分量对水印信号影响很小, 可实现盲提取, 另一方面当宿主全息图进行零级像抑制处理后水印信号仍可保留。为便于水印信号嵌入, 首先对宿主全息图作离散余弦变换^[10], 当宿主数字全息图为 $M_1 \times N_1$ 像素点大小, 对 $I_H(m_1, n_1)$ 作离散余弦变换, 其中 $I_H(m_1, n_1)$ 是宿主全息图 $I_H(x_H, y_H)$ 的离散形式。

$$Q(\xi, \eta) = \frac{2}{\sqrt{M_1 N_1}} r(\xi) r(\eta) \sum_{m_1=0}^{M_1-1} \sum_{n_1=0}^{N_1-1} I_H(m_1, n_1) \cos\left[\frac{(2m_1+1)\xi\pi}{2M_1}\right] \cos\left[\frac{(2n_1+1)\eta\pi}{2N_1}\right], \quad (9)$$

$$\text{式中 } r(\xi) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}}, & \xi = 0 \\ 1, & \xi = 1, 2, \dots, M_1 - 1 \end{cases}, r(\eta) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}}, & \eta = 0 \\ 1, & \eta = 1, 2, \dots, N_1 - 1 \end{cases}.$$

将水印信号 $H(p\Delta x, q\Delta y)$ 也作离散余弦变换(DCT)后嵌入到宿主数字全息图 DCT 系数的中频分量, α 为水印信号嵌入强度。

$$Q'_{\text{med}}(\xi, \eta) = Q_{\text{med}}(\xi, \eta) + \alpha f_{\text{DCT}}[H(p\Delta x, q\Delta y)]. \quad (10)$$

嵌入水印后的载体数字全息图在 DCT 域的结果可表示为

$$Q'(\xi, \eta) = Q_{\text{low}}(\xi, \eta) + Q'_{\text{med}}(\xi, \eta) + Q_{\text{high}}(\xi, \eta). \quad (11)$$

对 $Q'(\xi, \eta)$ 作逆 DCT 变换, 可得嵌入水印后的数字全息图为

$$I'(m_1, n_1) = \frac{2}{\sqrt{M_1 N_1}} \sum_{m_1=0}^{M_1-1} \sum_{n_1=0}^{N_1-1} r(\xi)r(\eta)Q'(\xi, \eta)\cos\left[\frac{(2\xi+1)m_1\pi}{2M_1}\right]\cos\left[\frac{(2\eta+1)n_1\pi}{2N_1}\right]. \quad (12)$$

水印提取时, 对 $I'(m_1, n_1)$ 作离散余弦变换, 在中频分量按嵌入时的逆过程恢复实值水印信号 $H(p\Delta x, q\Delta y)$, 再由该实值水印信号恢复经加密后的菲涅耳计算全息水印信号, 经双随机相位解密后, 按第 2.4 节所述方法对恢复的 P 平面衍射光波分量用球面波照射进行可控再现数字重建。

由于宿主数字全息图的 DCT 中频分量对水印信号的影响很小, 可直接利用中频分量数据完成水印信号的数字重建, 而无需原始宿主数字全息图的信息, 从而实现盲提取, 宿主全息图对水印信号的影响将表现为叠加在水印信号的高斯噪声。水印信号的数字重建过程如图 2 所示。

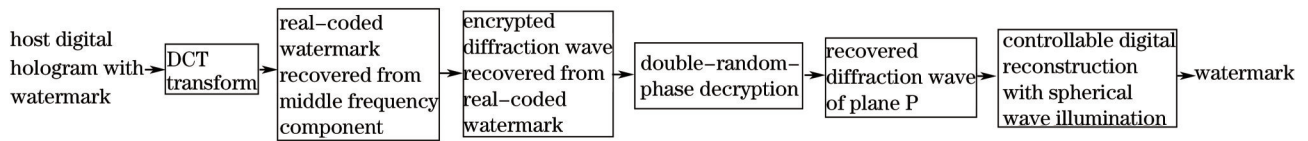


图2 水印提取方法

Fig.2 Watermark extraction method

4 实验仿真结果与讨论

4.1 嵌入与提取模拟实验结果

图 3(b)所示的用作宿主文件的离轴数字全息图中, 记录参数: 光波长 532 nm, CCD 面阵宽度 4.76 mm, 取样数 1024, 宿主物体为图 3(a)所示宽度为 30 mm “福”字符图像, 通过周边补零扩幅至 1024 pixel × 1024 pixel 大小, 图像的强度均匀, 相位均匀分布, 记录距离 $z_0 = 1500$ mm, 重建像物平面宽度 L_i 为 171.6 mm, 参考光波 $R(x, y) = A_r \exp\left[jk \frac{3L_i}{16z_i}(-x + y)\right]$; 当重建距离为 $z_i = 1500$ mm 时, 得到图 3(c)所示的宿主重建数字物光场振幅分布, 宿主物体重建像与零级衍射光能有效分离, 图 3(d)为宿主物体重建像; 图 3(e)为宿主数字全息图的 DCT 变换结果, 图中“☆”处分别表示零级像与原始及共轭像分量所处位置, 可以看出零级像集中于低频位置而原始和共轭像位于高频位置。

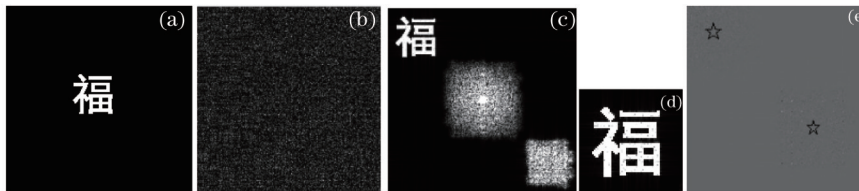


图3 宿主全息图及数字重建。(a) 经扩幅补零后水印物波信号; (b) 宿主数字全息图; (c) 宿主数字重建物光场振幅分布; (d) 宿主物体重建像; (e) DCT 变换结果

Fig.3 Host hologram and digital reconstruction. (a) Enlarged watermark with zeros; (b) host digital hologram; (c) amplitude of recovered object wave field from host hologram; (d) recovered object from host hologram; (e) DCT coefficient of host digital hologram

水印信号及随机相位模板信号如图 4(a)和 4(b)所示, 水印为灰度图像, 像素大小为 128 pixel × 128 pixel, 水印平面距全息面的距离分别为 2000 mm, 光波长为 532 nm; 按文中第 2.1~2.3 节所述方法制作 256 pixel × 256 pixel

像素大小实值菲涅耳计算全息水印信号,如图5(a)所示,其数字频谱图如图5(b)所示,设置载频参数使原始像及共轭像移位128个像素位置并不含零级像分量,从图5(b)可以看出由于采用了空域插值预处理及载波调制,水印信号数字频谱图中原始像和共轭像频谱在频谱域是分离的,从而可以更清晰再现原始水印信息。模拟实验中在宿主数字全息图3(b)的DCT域中频分量嵌入DCT变换后的计算全息水印信号,设 $\alpha = 0.2$ 的嵌入强度,得到图6所示的水印全息图,可以看出由于全息图的高频纹理特性,人眼未能明显感觉两者之间差异,具有良好的透明性,计算宿主全息图3(b)与水印全息图6之间的峰值信噪比 $P_{SNR} = 38.9865$,归一化均方差 $N_{MSE} = 0.0065$ 。

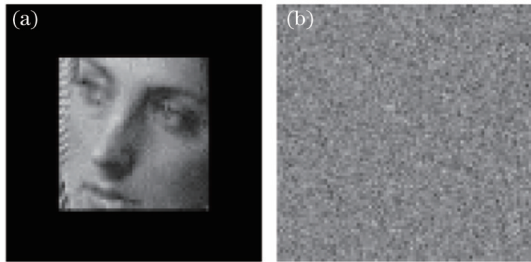


图4 水印及随机相位模板。(a) 水印信号;
(b) 随机相位模板

Fig.4 Watermark and random phase template.
(a) Watermark; (b) random phase template

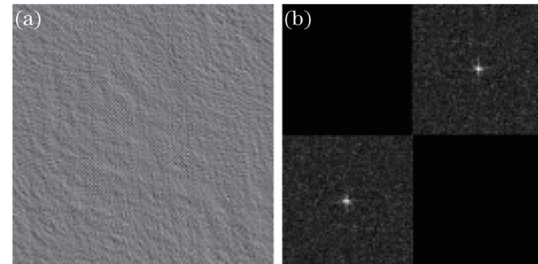


图5 实值编码菲涅耳计算全息水印信号及数字频谱图。
(a) 实值编码菲涅耳计算全息水印信号; (b) 数字频谱图

Fig.5 Real-coded Fresnel diffraction watermark signal and digital spectrum. (a) Real-coded Fresnel diffraction watermark signal; (b) digital spectrum

对含水印的宿主全息图按记录时的参数进行光学再现模拟,得到图7(a)所示的数字再现像,可以看出宿主物体仍具有较高的数字再现质量,由于在宿主全息图的DCT分量的中频部分加载水印信号,水印信号对宿主全息图数字再现的影响主要表现在原始像与共轭像以外区域的随机干扰,窗函数滤波后的物体原始像如图7(b)所示,与从原始宿主全息图3(b)中恢复的宿主物体信号之间的相似度为0.9995。



图6 水印全息图

Fig.6 Hologram embedded with watermark

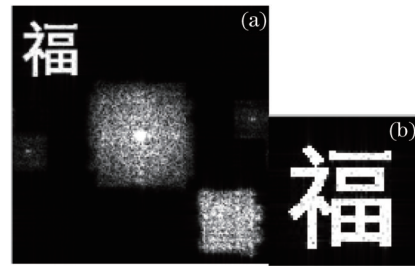


图7 宿主重建像。(a) 宿主重建物光场振幅分布;
(b) 宿主物体重建像

Fig.7 Recovered image from host hologram. (a) Amplitude of recovered object wave field from host hologram; (b) recovered object from host hologram

从水印全息图按文中第2.4节所述方法在衍射距离2000 mm处用正确的相位模板并结合放大率等重建参数恢复出的水印信号如图8所示,在重建像物平面宽度相同的情况下,通过放大率参数的控制可以很容易获得不同放大率的水印物函数重建像。图8(a)~8(d)是放大率分别为0.5,1,1.4和1.8下的水印信号重建效果,可以看出由于球面波照射,水印信号在重建像平面的大小可实现灵活控制,图9给出了放大率为0.7,水印信号移位至再现像平面左下和右上方的再现效果。以放大率 $M=1$ 时的所提取的水印重建像信号图8(b)为例,与原始水印图4(a)之间的相似度为0.9991。

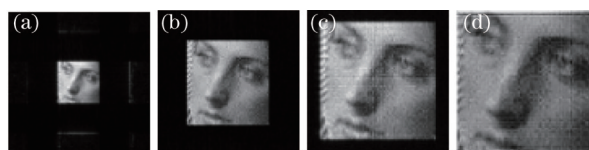


图8 不同放大率下的水印信号重建像。(a) $M=0.5$; (b) $M=1$; (c) $M=1.4$; (d) $M=1.8$

Fig.8 Watermark reconstruction image with different magnification. (a) $M=0.5$; (b) $M=1$; (c) $M=1.4$; (d) $M=1.8$

在数字全息图数字重建的过程中,为了提高再现像质量,通常在数字重建前对全息图进行抑制零级像处理,一种常用的方法是局域平均值消除法^[6],该方法通过选择合适的邻域,利用差值全息图进行数字重建。利用水印全息图与 3×3 邻域均值滤波后的全息图构成差值全息图,得到图10所示数字再现结果,可以看出全息图经过了零级像抑制处理后不论对宿主全息图中原始物波信号还是水印信号仍具有较清晰的数字再现效果,说明该方法能够适应全息图的一般处理流程。

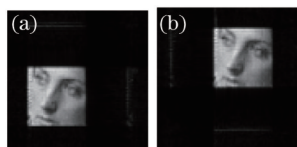


图9 移位后的水印信号

Fig.9 Watermark after shifting

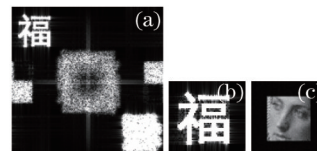


图10 零级像抑制处理后的数字再现效果

Fig.10 Digital reconstruction after zero-order image suppression

4.2 稳健性测试性能

对离轴数字全息图,水印算法的稳健性体现在常规操作下计算全息水印及宿主全息图中宿主物体数字再现的稳健性。对水印全息图进行常见攻击模拟,考察在各类攻击下宿主及水印信号的数字重建效果。

4.2.1 抗剪切性能

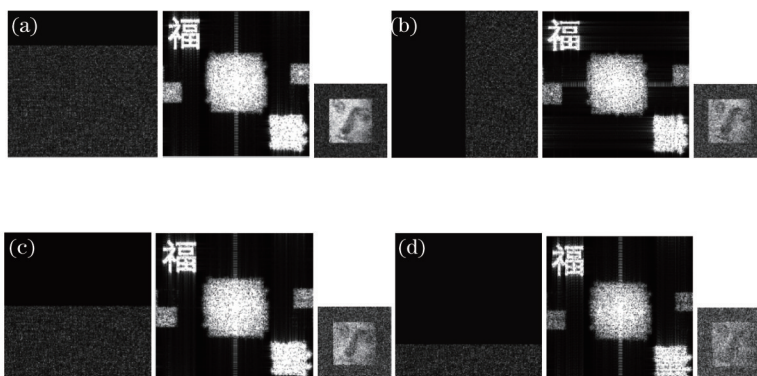


图11 抗剪切性能。(a) 25%水平剪切后的宿主和水印再现结果;(b) 50%垂直剪切后的宿主和水印再现结果;
(c) 50%水平剪切后的宿主与水印再现结果;(d) 75%水平剪切后的宿主与水印再现结果

Fig.11 Anti-cropping performance. (a) Reconstruction of host and water image with 25% horizontal cropping; (b) reconstruction of host and water image with 50% vertical cropping; (c) reconstruction of host and water image with 50% horizontal cropping; (d) reconstruction of host and water image with 75% horizontal cropping

可以看出,即使水印全息图经历了大面积剪切,仍能较好地恢复原始宿主物体和水印信号。

4.2.2 抗联合照片专家组(JPEG)压缩性能

对水印全息图进行JPEG压缩,压缩因子分别取0.9、0.8、0.7和0.6时,得到图12所示宿主全息图及水印物体数字重建像结果,说明算法具有较强的抗JPEG压缩能力。

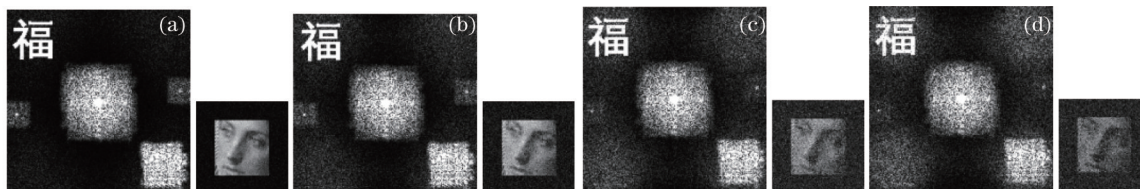


图12 抗JPEG压缩性能。(a) 压缩因子0.9;(b) 压缩因子0.8;(c) 压缩因子0.7;(d) 压缩因子0.6

Fig.12 Anti-JPEG performance. (a) Compression factor is 0.9; (b) compression factor is 0.8; (c) compression factor is 0.7; (d) compression factor is 0.6

4.2.3 抗滤波性能

对水印全息图分别应用拉普拉斯滤波器、模糊对比增强滤波器及Sobel算子滤波后,仍可清晰再现宿主全息图重建像及水印物体信息,如图13所示。



图13 抗滤波性能。(a) 二维拉普拉斯滤波及数字再现效果;(b) 高斯拉普拉斯滤波及数字再现效果;
(c) 模糊对比增强滤波后及数字再现效果;(d) Sobel算子滤波及数字再现效果

Fig.13 Anti-filtering performance. (a) Digital reconstruction effect after two-dimensional Laplacian filtering;
(b) digital reconstruction effect after Gaussian Laplacian filtering; (c) digital reconstruction effect after unsharp filtering;
(d) digital reconstruction effect after Sobel filtering

4.2.4 抗旋转性能

水印全息图逆时针旋转 30° ,对旋转后全息图校正后再进行数字重建,仍可再现宿主物体及水印信息。

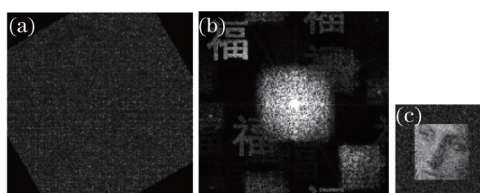


图14 抗旋转性能。(a) 旋转后的全息图;(b) 宿主全息图数字重建;(c) 水印数字重建

Fig.14 Performance of anti-rotation. (a) Hologram after rotation; (b) reconstruction of host hologram;
(c) reconstruction of watermark

4.2.5 抗拉伸性能

含水印全息图先缩小为 $4/5$ 后再拉伸至原来大小,得到重建信号如图15所示,可以看出,算法具有一定的抗拉伸能力。

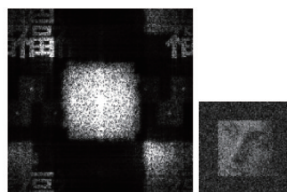


图15 抗拉伸性能

Fig.15 Anti-scaling performance

4.3 讨论

在水印信号数字重建过程中,不正确的相位模板或重建参数都将导致无法清晰再现截面信息。图16是在错误相位模板和重建距离下的截面信息再现结果,此时水印信号信息无法正确显示。



图16 错误模板和重建距离下的水印恢复信号

Fig.16 Recovered watermark object with wrong template and reconstruction distance

5 结论

利用球面波照射菲涅耳计算全息数字再现的特点,提出一种大小和位置可控的数字全息图菲涅耳计算全息水印方法,为提高安全性,物平面和菲涅耳衍射面的信号进行双随机相位加密处理,并对加密处理后的衍射光波信号进行频域扩展预处理后再进行载波调制和干涉编码以形成实值编码计算全息水印信号。将水印信号作DCT变换后嵌入到宿主数字全息图DCT域的中频分量,避开了宿主数字全息图中零级像及原

始像和共轭像分量位置,由于宿主数字全息图DCT分量的中频部分对水印信号的影响很小,因此水印信号的恢复可以直接提取DCT域中频分量,而无需宿主数字全息图的信息,实现了盲提取。结果表明,所提出的方法具有较好的透明性,并且对数字全息图进行各种攻击的情况下,不论是对宿主数字全息图的再现还是对水印信号的再现都表现出良好的稳健性。应用不同的解码参数,重建像平面水印信号大小和位置可以灵活控制,可满足不同场合下数字再现的要求。数字全息与数字水印技术的结合应用一方面扩展了数字水印的应用范围,将承载水印信号的载体文件从一般信号扩展到数字全息图,其中数字全息图可以用光学手段也可用计算机产生;借助计算全息方法水印信号可从一般一维、二维信号扩展到携带3D物体感知信息的全息水印,丰富了水印信号的类型;而数字全息术中光学信息变换方法^[11-12]及光学系统的几何结构参数也扩展了数字水印的信息变换方法并提升了算法的安全性。

参考文献

- 1 Yu Meiwen. Optical Holography and Its Application[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996: 1-41.
于美文. 光全息学及其应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996: 1-41.
- 2 Song Qinghe, Li Junchang, Gui Jinbin, *et al.*. Influence of digital holograph zoom on DMD reconstruction display[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(5): 1187-1191.
宋庆和, 李俊昌, 桂进斌, 等. 全息图像缩放对数字微镜重建显示的影响研究[J]. 光子学报, 2009, 38(5): 1187-1191.
- 3 Kishk S, Javidi B. 3D object watermarking by a 3D hidden object[J]. Opt Express, 2003, 11(8): 874-888.
- 4 Ma Jianshe, Ren Zhenbo, Su Ping, *et al.*. Multiple watermarking technique based on computer-generated hologram[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(8): 2111-2120.
马建设, 任振波, 苏萍, 等. 多重计算全息水印技术[J]. 光学精密工程, 2013, 21(8): 2111-2120.
- 5 Yu Chiliang, Gu Jihua, Liu Wei, *et al.*. 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.
- 6 Li Junchang, Xiong Bingheng. Information Optics[M]. Beijing: Science Press, 2011: 45-57, 217-233.
李俊昌, 熊秉衡. 信息光学教程[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 45-57, 217-233.
- 7 Situ G, Zhang J. Double random-phase encoding in the Fresnel domain[J]. Opt Lett, 2004, 29(14): 1584-1586.
- 8 Chen Jiazhen, Zheng Zihua, Lian Guiren. Digital realization method for Fresnel transform of multiple three-dimensional objects[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(4): 040901.
陈家祯, 郑子华, 连桂仁. 多三维物体菲涅耳变换数字实现方法[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(4): 040901.
- 9 Yu Zulian, Jin Guofan. Computer-Generated Hologram[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1984: 48-51.
虞祖良, 金国藩. 计算机制全息图[M]. 北京: 清华大学出版社, 1984: 48-51.
- 10 Zhang Chuntian, Su Yuting, Zhang Jing. Digital Image Compression[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 165-173.
张春田, 苏育挺, 张静. 数字图像压缩编码[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 165-173.
- 11 Rong Lu, Wang Dayong, Wang Yunxin, *et al.*. Phase retrieval methods in in-line digital holography[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0209006.
戎路, 王大勇, 王云新, 等. 同轴数字全息中的相位回复算法[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209006.
- 12 Xu Zhennan, Zhong Jingang. Self-calibration phase-shifting digital holographic microscopy based on carrier frequency analysis[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(12): 1209001.
徐振南, 钟金钢. 基于载频条纹分析的自定标相移数字全息显微术[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1209001.

栏目编辑: 何卓铭