

文章编号: 0253-2239(2004)11-1507-4

基于虚拟光学的三维空间数字水印系统*

彭翔^{1,2} 张鹏² 牛憨笨¹

(1 深圳大学光电子学研究所教育部光电子器件与系统重点实验室, 深圳 518060)
(2 天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘要: 数字水印已成为数字作品版权保护的一种手段。数字水印是一种嵌入到图像、视频或者音频数据中的不可见标志,通过对水印信息的检测可以达到保护多媒体数据版权的目的。先前众多的水印算法大部分是基于二维操作的(如静止图像、视频)。基于虚拟光学信息隐藏理论提出了一种三维空间的数字水印算法。该数字水印算法能成为一种多媒体数据产权保护的有效方案。对算法的测试结果表明,该算法对于噪声叠加、剪切、有损压缩等常见的信号处理操作具有较高的鲁棒性。同时,该算法由于引入了虚拟光学信息隐藏思想,将虚拟光路的几何结构参量作为密钥,设计出了多重“锁”和多重“密钥”,大大提高了水印系统的密钥空间,仿真结果表明该算法具有良好的安全性。

关键词: 信息光学; 虚拟光学; 数字水印; 版权保护

中图分类号: O438; TP309.7 文献标识码: A

3-D Spatial Digital Watermarking System Based on Virtual Optics

Peng Xiang^{1,2} Zhang Peng² Niu Hanben¹

(1 *Key Laboratory of Optoelectronics Devices and Systems of Education Ministry, Institute of Optoelectronics, Shenzhen University, 518060 Shenzhen*
2 *National Laboratory of Precision Measurement Technology and Instrumentation, Tianjin University, 300072 Tianjin*)

(Received 2 September 2003; revised 5 April 2004)

Abstract: Digital watermarks have been proposed in recent literature as a method for copyright protection of multimedia data. Digital watermark is invisible mark embedded in digital image, video or audio documents, by detecting the information of watermarking to protect copyright of multimedia data. Most published watermarking methods are based on two-dimensional (e. g., image or video) approaches. A new algorithm of digital watermarking in three-dimensional (3-D) space based on the methodology of virtualoptics is presented. The watermarking algorithm can offer an effective solution to the issue of copyright protection of multimedia data. Numerical experiments show that the embedded watermark is robust to signal manipulations, such as superposing noise, cropping and lossy compression. Because the concept of virtualoptics is introduced, the proposed scheme has good security. There are large degrees of freedom existed for designing a security lock(s)/key(s), including multiple lock(s)/key(s) and multi-dimensional lock(s)/key(s). Numerical simulation results show a good agreement with theoretical prediction.

Key words: information optics; virtual optics; digital watermarking; copyright protection

1 引 言

数字水印是实现多媒体数字作品(图像、视频、音频等)版权保护的有效办法,已成为多媒体信息安全领域的一个研究热点^[1]。对于静止图像来说,从水印算法嵌入点的选择来看,可将水印编码算法分

* 国家自然科学基金(60275012)、中国科学院模式识别国家重点实验室开放课题。

E-mail: xpeng@szu.edu.cn

收稿日期:2003-09-02;收到修改稿日期:2004-04-05

为两类:空间域水印算法和变换域水印算法。但已报道的大部分工作都是基于二维操作的(如静止图像、视频),如果能在三维空间对媒体信息进行水印的嵌入与检测,那么其鲁棒性与安全性可以更好。

最近, Takai 等^[2]发表了使用傅里叶变换全息术做水印的方案。更近一段时间, Kishk 和 Javidi^[3]发表了将数字全息技术应用到三维物体水印的工作。本文结合上述思想,并基于虚拟光学信息隐藏理论^[4~6]提出了一种在三维空间进行数字水印嵌入与检测的方法。该方法在数值模拟上类似于虚拟光学成像系统。

2 三维数字水印系统的理论模型

一个基于虚拟光学的三维数字水印系统模型如图 1 所示。 W 为水印图像、 W' 为重建的水印图像; I 为信息平面(原始图像), I' 为重建的信息平面。 Z_1 表示从水印图像到虚拟成像透镜前表面的距离, Z'_1 表示从透镜后表面到重建的水印图像平面的距离; Z_2 表示从信息平面到透镜前表面的距离, Z'_2 表示

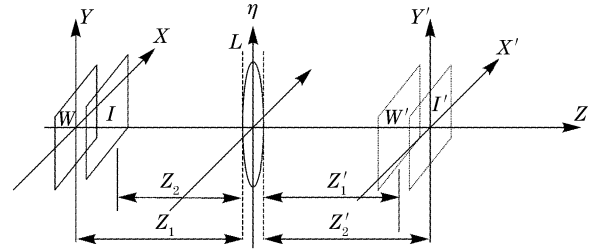


Fig. 1 Schematic diagram for a digital watermarking scheme in 3-D space based on virtualoptics

从透镜后表面到重建的信息平面的距离。

假定信息平面和水印图像由相同选定波长的相干光照明。光波由信息平面或水印图像到虚拟成像透镜的前表面的传播可由离散菲涅耳衍射变换(Discrete Fresnel diffraction, DFD)计算得出,信息平面与水印之间的空间距离表示为 $|z_1 - z_2| = \Delta z$ 。为简单起见,引入一个算子 $\text{DFD}[A, B, m, n; z_{AB}, \lambda]$ 来描述数字空间的菲涅耳衍射过程,其中, A 和 B 表示在传播方向上空间分离的两个平面,间距记为 z_{AB} ; λ 表示虚拟光波波长。由傅里叶光学理论^[7]:

$$\text{DFD}[A, B, m, n; z_{AB}, \lambda] = C \exp\left[j \frac{\pi}{\lambda z_{AB}} (m^2 \Delta \zeta^2 + n^2 \Delta \eta^2)\right] \times \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} U_A(k, l) \exp\left[j \frac{\pi}{\lambda z_{AB}} (k^2 \Delta x_0^2 + l^2 \Delta y_0^2)\right] \times \exp\left[-j 2\pi \left(\frac{km}{N} + \frac{ln}{N}\right)\right], \quad (1)$$

其中 $C = \exp(j 2\pi z_{AB} / \lambda) / (j \lambda z_{AB})$, 是一个复常数。取虚拟成像透镜的前表面 L 作为参考平面。对于信息平面(原始图像),令 $A = I, z = z_2, B = L$; 对于水印,令 $A = W, z = z_1, B = L$ 。则信息平面和水印到虚拟成像透镜前表面的 DFD 变换的加权和可表示为下式:

$$H_w = \{\omega \text{DFD}[W, L, m, n; z_1, \lambda] + (1 - \omega) \text{DFD}[I, L, m, n; z_2, \lambda]\} = \omega F_w + (1 - \omega) F_I, \quad (2)$$

其中

$$F_w = \text{DFD}[W, L, m, n; z_1, \lambda],$$

$$F_I = \text{DFD}[I, L, m, n; z_2, \lambda],$$

分别表示水印和信息平面到透镜前表面的离散菲涅耳衍射变换。 ω 表示权重因子,用来控制水印添加的强度,如可以取 $\omega = 0.25$ 。这类似于通信理论中的扩展频谱通信技术。

H_w 又经透镜的复振幅透过率函数的转换到达透镜后表面,用下式表示:

$$H'_w = H_w \times t, \quad (3)$$

其中 t 为透镜的复振幅透过率函数:

$$t(m, n) = \exp\left[-j \frac{\pi}{\lambda f} (m^2 \Delta \zeta^2 + n^2 \Delta \eta^2)\right].$$

式中的 f 为虚拟成像透镜的焦距值。

由傅里叶光学理论^[7], 嵌入水印后的图像能够在 I' 处被重建出来,其中衍射距离为 z'_2 。由(4)

式计算得出

$$1/z_2 + 1/z'_2 = 1/f, \quad (4)$$

即嵌入水印后的图像在重建平面处的复振幅分布 I_w 可由(5)式计算得出

$$I_w = \text{DFD}[H'_w]_{z=z'_2}. \quad (5)$$

接收方在收到经过通信链路传来的复振幅分布文件 I_w 后,只需进行取模平方操作即可得出其强度图像。

检测水印时,首先利用正确的参量 z'_2 对 I_w 进行逆 DFD 变换,从而得出正确的 H'_w ; 然后利用正确的参量 z'_1 对 H'_w 进行另一个离散菲涅耳衍射变换 DFD 即可从图像中抽取出水印。水印的检测过程可以用下面的方程表示:

$$W_I = \text{DFD}[H'_w]_{z=z'_1}. \quad (6)$$

从水印的检测过程我们可以看出,水印的检测过程不需要原始数据,因此属于盲水印算法。

3 仿真实验与分析

3.1 水印嵌入/检测

我们使用灰度图 Couple(256×256×8)作为原始图像,如图 2(a),水印是表示版权信息的一个二值图



(a)



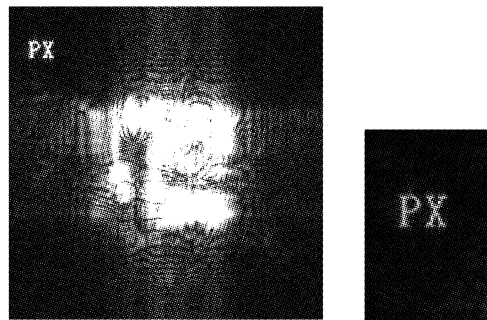
(b)

Fig. 2 (a) Original image, (b) original watermark (logo)

嵌入水印后的 Couple 图像如图 3(a)所示。从上面的结果可以看出,在视觉上无法区分原图像和嵌入水印后的图像,这体现了水印的不可见性。原始图像和嵌入水印后的图像之间的能量归一化均方



(a)



(b)

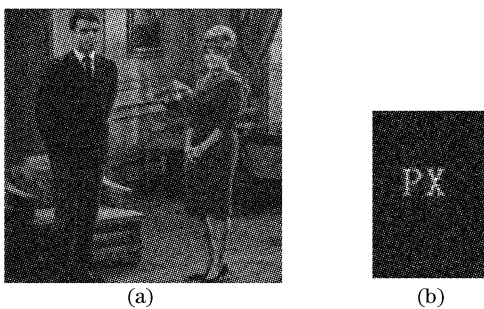
Fig. 3 (a) Watermarked image; (b) retrieved watermark

3.2 水印算法鲁棒性测试

为了验证该算法的鲁棒性,我们对图像进行了如下处理,比较实验结果。

3.2.1 叠加白噪声

由图 4(a)可以看出,叠加了噪声后的图像质量已经很差[(峰值信噪比(PSNR)为 21.41 dB],仍然



(a)

(b)

Fig. 4 (a) Noised watermarked image, (b) retrieved watermark

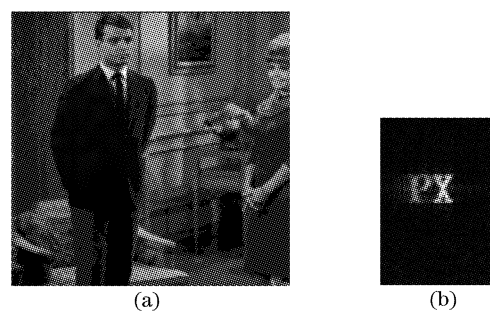
像(logo),如图 2(b)所示。在实验中,我们选取虚拟波长 $\lambda=6.23 \times 10^{-7}$ m, $z_1=1.2$ m, $z_2=3.2$ m,虚拟成像透镜的焦距 $f=z_1/2=0.6$ m。

误差(NMSE)为 0.0434,从客观上也说明了水印嵌入后对原图的影响很小。从嵌入水印后的图像中正确抽取的水印如图 3(b)所示。

能可靠地从中提取出水印图像如图 4(b),证实我们提出的算法具有较强的抗噪声能力。

3.2.2 剪切操作

含水印的图像经过裁剪操作后的图像如图 5(a)所示,从中恢复的水印图像如图 5(b)。



(a)

(b)

Fig. 5 (a) Cropped watermarked image, (b) retrieved watermark

3.2.3 有损压缩

对图像进行子采样处理后如图 6(a)所示(隔行扫描方式),子采样实际上是一种有损压缩的方法。从中恢复的水印图像如图 6(b)。

从以上实验结果可以看出,本文提出的数字水印算法具有较强的鲁棒性。

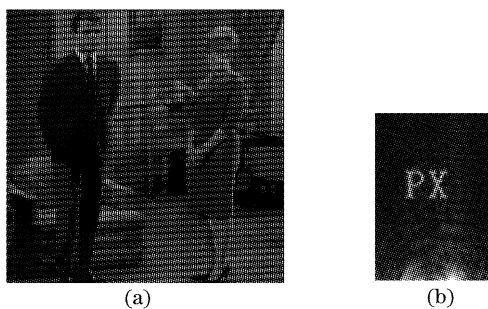


Fig. 6 (a) Interlaced watermarked image,
(b) retrieved watermark

3.3 水印算法安全性测试结果

由于虚拟光学概念的引入^[4~6],我们提出的数字水印算法具有良好的安全性。我们通过在数字域

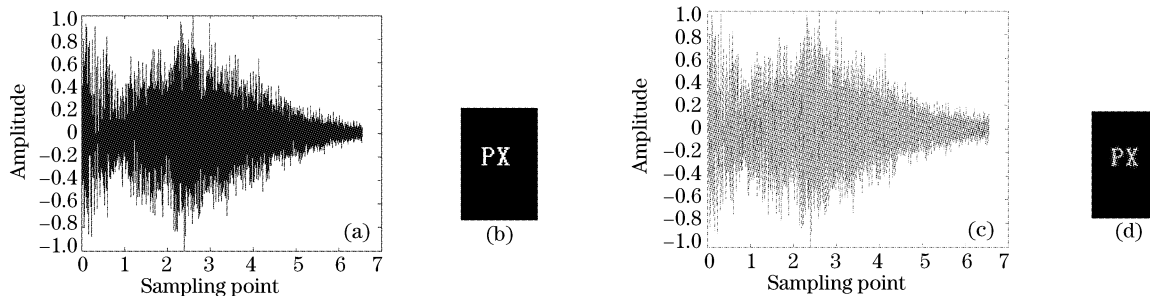


Fig. 7 (a) Original audio signal, (b) original watermark (logo), (c) watermarked audio signal, (d) retrieved watermark

结论 本文在虚拟光学信息隐藏理论的基础上,提出了一种三维数字水印算法。该算法具有以下特点:

- 1) 在三维空间进行数字水印的嵌入与检测。
- 2) 水印的检测过程不需要原始数据,属于盲水印算法。
- 3) 水印算法具有良好的透明性、鲁棒性;水印检测结果准确、复杂度低。
- 4) 水印算法具有良好的安全性,系统具有多重密钥,非授权者无法读出水印。
- 5) 该算法也可应用于音频等信息的版权保护。

参 考 文 献

1 Petitcolas F A P. Towards 'robust' watermarks-an introduction to digital watermarking, its state of the art and some key research topics. *IEE Seminar on Secure Images and Image Authentication*, 2000. 1/1~1/7

仿真光学过程中的传播规律,将虚拟光路的几何结构参量作为密钥,从而设计出了多重“锁”和多重“密钥”,这大大提高了数字水印算法的安全性,使得本算法具有较强的抵抗恶意攻击的能力。即使公开水印的检测算法,如果攻击者不知道波长 λ 、距离参量 z_1 、焦距 f 等多重密钥,也无法读出水印。

3.4 水印算法对于音频信息的测试结果

本文提出的算法可以很容易推广到音频水印领域。当对语音信息执行水印操作时,只需利用软件将语音数据读取到数字矩阵中,再利用数组操作将它的元素重新排列使之成为一个 $N \times N$ 的矩阵,然后按照对数字图像水印的步骤进行操作即可。

原始音频信号波形如图 7(a),数字水印如图 7(b),嵌入水印后的音频信号波形如图 7(c),正确抽取的水印如图 7(d)。

从人类听觉系统来说,目标数据没有明显的降质现象。实验测得原始音频信号和嵌入水印后的音频信号之间的相关系数 $|\rho|=0.9903$ 。可见我们提出的算法同样适用于音频水印领域。

2 Takai N, Mifune Y. Digital watermarking by a holographic technique. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(5): 865~873

3 Kishk S, Javidi B. Watermarking of three-dimensional object by digital holography. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(3): 167~169

4 Peng X, Cui Z Y, Tan T. Information encryption with virtual-optics imaging system. *Opt. Commun.*, 2002, **212**(4~6): 235~245

5 Peng X, Cui Z Y, Tan T. Image encryption with virtual optics. *Proc. SPIE*, 2002, **4929**: 96~104

6 Peng Xiang, Zhang Peng, Niu Hanben. Information hiding theory based on virtual optics and its implementation with parallel hardware. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2004, **24**(5): 623~627 (in Chinese)

7 Goodman J W. *Introduction to Fourier Optics*. San Francisco: McGraw-Hill, 1968