

# 一种结合随机模板编码的虚拟光学三维 数字水印系统\*

张 鹏<sup>1</sup> 彭 翔<sup>2</sup> 牛憨笨<sup>2</sup>

(1 天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

(2 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)

**摘 要** 基于虚拟光学信息隐藏理论提出了一种三维空间数字水印算法. 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, 该算法对于噪音叠加、剪切、旋转、有损压缩等常见的图像处理操作具有较高的鲁棒性. 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数作为密钥, 设计出了多重“锁”和多重“密钥”. 随机模板编码技术的引入, 更进一步提高了数字水印系统的密钥空间. 仿真实验结果表明该算法具有很好的安全性.

**关键词** 信息光学; 虚拟光学; 数字水印; 随机模板; 版权保护

**中图分类号** TP309.7      **文献标识码** A

## 0 引言

数字水印作为一种解决数字产品版权问题的有效手段, 近年来得到了人们的广泛关注, 并逐渐成为多媒体数据安全领域的一个研究热点<sup>[1~4]</sup>, 也是信息隐藏技术研究领域的重要分支, 它通过在原始数据中嵌入秘密信息——水印来证实该数据的所有权. 一个有效的数字水印技术必须具备一些基本特征: 安全性、不可感知性、鲁棒性. 但已报导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 和 Mifune 发表了使用傅里叶变换全息术做水印的方案<sup>[5]</sup>. 更近一段时间, Kishk 和 Javidi 发表了将数字全息技术应用到三维物体水印的工作<sup>[6]</sup>. 本文结合上述思想, 并基于虚拟光学信息隐藏理论<sup>[7~9]</sup>提出了一种在三维空间进行的数字水印方法. 该方法利用虚拟菲涅尔(Fresnel)衍射在三维空间的形态变化实现了水印在 3-D 空间的嵌入和盲检测, 在数值模拟上类似与虚拟光学成像系统. 其中, 随机模板编码技术的引入, 大大提高了水印系统多维密钥参数的灵敏度, 系统的安全性得到了显著的提高.

## 1 水印系统的理论模型

结合随机模板编码的虚拟光学三维数字水印系

统模型如图 1. 其中  $W$  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.  $R$  代表伪随机模板平面 PRCM (pseudo-random covering mask),  $R'$  代表重建的随机模板平面.  $Z_1$  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,  $Z_2'$  表示从透镜后表面到重建的信息平面的距离.  $Z_3$  表示从 PRCM 平面到透镜前表面的距离,  $Z_3'$  表示从透镜后表面到重建的随机模板平面的距离.

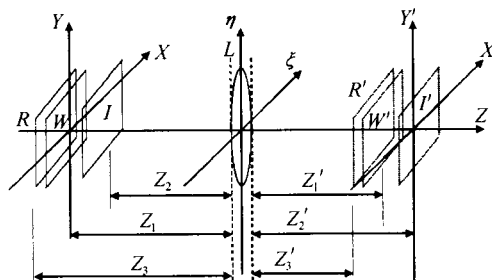


图 1 结合随机模板编码的虚拟光学三维数字水印系统  
Fig. 1 Schematic diagram for a digital watermarking scheme in 3-D space based on virtual-optical-imaging scheme (VOIS) and random mask encoding

假定信息平面、随机模板、水印图像由相同选定波长的相干光照明. 光波由信息平面、随机模板平面、水印图像到虚拟成像透镜的前表面的传播可由离散菲涅尔衍射变换 DFD (Discrete Fresnel Diffraction) 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  $DFD[A, B, m, n; z_{AB}, \lambda]$  来描述数字空间的菲涅尔衍射过程, 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  $z_{AB}$ ;  $\lambda$  表示虚拟光波波长. 由傅里叶光学理论<sup>[10]</sup>

\*国家自然科学基金(60472107, 60275012)资助项目和中国科学院模式识别国家重点实验室开放课题  
Tel: 022-87401745      Email: pengzhang@tju.edu.cn  
收稿日期: 2004-06-14

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

式中,  $C = \frac{e^{j2\pi z_{AB}/\lambda}}{j\lambda z_{AB}}$  是一个复常数.

取虚拟成像透镜的前表面  $L$  作为参考平面. 对于水印, 令  $A=W, z=z_1, B=L$ ; 对于信息平面 (原始图像), 令  $A=I, z=z_2, B=L$ ; 对于随机模板, 令  $A=R, z=z_3, B=L$ . 则水印、信息平面、随机模板到虚拟成像透镜前表面的 DFD 变换的加权和可表示为

$$H_w = \{w_1 \text{DFD}[W, L, m, n; z_1, \lambda] + w_2 \text{DFD}[I, L, m, n; z_2, \lambda] + w_3 \text{DFD}[R, L, m, n; z_3, \lambda]\} = w_1 F_w + w_2 F_I + w_3 F_R \quad (2)$$

其中,  $F_w = \text{DFD}[W, L, m, n; z_1, \lambda]$ ;  $F_I = \text{DFD}[I, L, m, n; z_2, \lambda]$ ;  $F_R = \text{DFD}[R, L, m, n; z_3, \lambda]$

分别表示水印、信息平面、随机模板到透镜前表面的离散菲涅尔衍射变换.  $w_1, w_2, w_3$  表示权重因子, 用来控制水印添加的强度.

### 1.1 水印嵌入步骤

1) 计算水印、信息平面、随机模板到虚拟成像透镜前表面的 DFD 变换的加权和  $H_w$ .

2)  $H_w$  又经透镜的复振幅透过率函数的转换到达透镜后表面, 可表示为

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

其中  $t$  为透镜的复振幅透过率函数,  $t(m, n) = \exp \left[ -j \frac{\pi}{\lambda f} (m^2 \Delta \xi^2 + n^2 \Delta \eta^2) \right]$ . 式中的  $f$  为虚拟成像透镜的焦距.

3) 计算叠加随机模板并嵌入水印后的图像在重建平面处的复振幅分布  $I_w$

$$I_w = \text{DFD}[H'_w] \Big|_{z=z'_2} \quad (4)$$

其中, 其中衍射距离为  $z'_2$  由式计算得出

$$\frac{1}{z_2} + \frac{1}{z'_2} = \frac{1}{f} \quad (5)$$

接收方收到经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.

### 1.2 水印提取步骤

1) 被授权者首先接收到正确的随机模板信息, 然后按照上述水印嵌入过程计算随机模板在其中的贡献. 即计算随机模板到透镜前表面的离散菲涅尔衍射变换并乘以虚拟透镜的复振幅透过率函数  $t$ , 然后利用衍射距离参数  $z'_2$  计算出其在重建平面出的复振幅分布, 记为  $R_{\text{PRCM}}(z=z'_2)$ ,

$$R_{\text{PRCM}}(z=z'_2) = \text{DFD}[\text{DFD}(R, L, m, n; z_3, \lambda) \times t] \Big|_{z=z'_2} \quad (6)$$

2) 计算

$$I'_w(z=z'_2) = I_w(z=z'_2) - R_{\text{PRCM}}(z=z'_2) \quad (7)$$

3) 利用正确的参数  $z'_2$  对  $I'_w$  进行逆 DFD 变换得到

$$T = \text{IDFD}[I'_w] \Big|_{z=z'_2} \quad (8)$$

其中, IDFD 表示离散菲涅尔衍射变换的反变换形式.

4) 利用正确的参数  $z'_1$  对  $T$  进行另一个离散菲涅尔衍射变换 DFD 即可抽取出水印信息. 表示为

$$W_I = \text{DFD}[T] \Big|_{z=z'_1}$$

从水印的提取过程我们可以看出, 提取水印信息并不需要原始图像, 因此属于盲水印算法, 这大大拓宽了该水印系统的应用范围.

## 2 仿真实验结果及分析

### 2.1 水印嵌入/检测

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 logo (二值图像), 如图 2(b); 伪随机模板 PRCM 如图 2(c). 在实验中, 选取虚拟波长  $\lambda = 632e-9$  m,  $z_1 = 1.2$  m,  $z_2 = 3.2$  m,  $z_3 = 3.3$  m. 原始图像和水印之间的间隔  $\Delta z = z_1 - z_2 = 2$  m. 透镜焦距  $f = \frac{z_1}{2} = 0.6$  m.

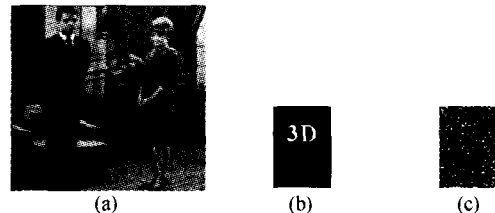


图 2 (a) Coupler 原图; (b) 原始水印图像; (c) 随机模板 PRCM

Fig. 2 (a) Original image; (b) Original watermark (logo); (c) The PRCM

嵌入水印后的 Couple 图像如图 3(a). 从嵌入水印后的图像中正确抽取的水印如图 3(b). 由图 3(a) 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误差

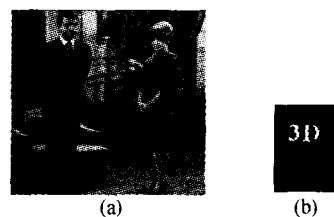


图 3 (a) 嵌入水印后的 Coupler; (b) 正确提取的水印  
Fig. 3 (a) Watermarked image; (b) Retrieved watermark

NMSE=0.0232,从客观上也说明了水印嵌入后对原图的影响很小.

### 2.2 水印算法鲁棒性检验

#### 2.2.1 噪声叠加

由图 4 (a)可以看出,叠加了噪音后的图像质量已经很差,仍然能可靠的从中提取出水印图像如图 4(b),证实提出的算法具有较强的抗噪音能力.

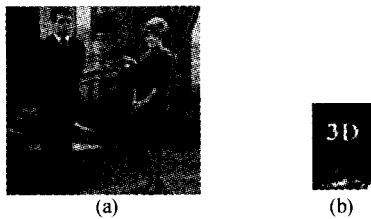


图 4 (a)叠加噪声后的图像;(b)正确提取的水印  
Fig. 4 (a)Noised watermarked-image;(b)Retrieved

#### 2.2.2 几何失真

含水印图像经过裁剪操作后如图 5(a),从中恢复的水印如图 5(b). 含水印图像经过旋转操作后如图 5(c),从中恢复的水印如图 5(d).

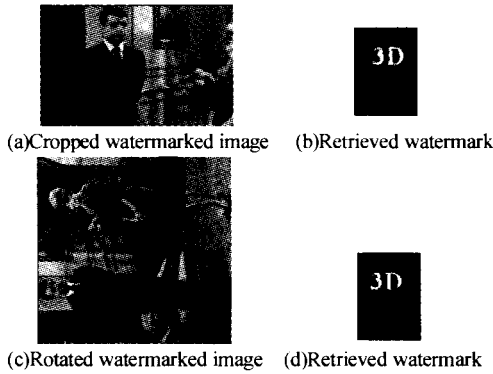


图 5 几何畸变增强测试  
Fig. 5 Robustness test for geometric distortion

#### 2.2.3 JPEG 压缩

含水印的图像经过 JPEG 压缩 (Compression factor=30%)后,提取的水印结果如图 6.



图 6 含水印图像经过 JPEG 压缩后,提取出的水印结果  
Fig. 6 The extracted watermarks from the watermarked image

### 2.3 水印系统的安全性分析

由于虚拟光学概念的引入<sup>[7~9]</sup>,本文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(如波长、焦距、衍射距离参数等),从而设计出了多重“锁”和多重“密钥”,这将大大提高数字水印算法的安全性. 即使公开水印的检测算法,如果不知道多重密钥,也无法读出水印. 另外,由于随机模板的作用,使得设计成为多维密钥的系统参数的灵敏度大大提高,并且随机模板本身的编

码信息以及随机模板到虚拟成像透镜前表面的距离参数也可设计成为水印系统的密钥. 未经授权的水印提取者若想通过穷举密钥空间的办法来获得水印密钥以便提取出水印信息,在计算上将是不可行的. 当检测者使用了错误的随机模板信息进行水印检测时,得到的水印图像如图 7.



图 7 随机模板不正确时抽取的水印  
Fig. 7 The extracted watermarks when the PRCM information is wrong

### 3 结论

本文基于虚拟光学信息隐藏思想,利用虚拟菲涅尔衍射在三维空间的形态变化,提出了一种在三维空间进行的水印嵌入和盲检测的方法. 该水印方法具有良好的不可感知性和鲁棒性. 由于在水印系统中引入了随机模板编码技术,系统的安全性得到了极大的提高. 即使公开水印的检测算法,若不获取系统的多重密钥,也将无法正确读取水印信息.

#### 参考文献

- Hartung F, Kutter M. Multimedia watermarking techniques. *Proc IEEE*, 1999, **87**(7): 1079~1107
- 潘蓉, 高有行. 一种自适应的盲水印方法. *光子学报*, 2002, **31**(9): 1146~1150  
Pan R, Gao Y X. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(9): 1146~1150
- 刘正君, 赵海发, 朱邦和, 等. 分数傅里叶域数字水印算法. *光子学报*, 2003, **32**(3): 332~335  
Liu Z J, Zhao H F, Zhu B H, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(3): 332~335
- 李媛媛, 许录平. 矢量图形中基于小波变换的盲水印算法. *光子学报*, 2004, **33**(1): 97~100  
Li Y Y, Xu L P. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(1): 97~100
- Takai N, Mifune Y. Digital watermarking by a holographic technique. *Applied Optics*, 2002, **41**(5): 865~873
- Kishk S, Javidi B. Watermarking of three-dimensional object by digital holography. *Optics Letters*, 2003, **28**(3): 167~169
- Peng X, Cui Z Y, Tan T. Information encryption with virtual-optics imaging system. *Optics Communications*, 2002, **212**(4-6): 235~245
- Peng X, Cui Z Y, Tan T. Image encryption with virtual optics. *Proc SPIE*, 2002, **4929**(1): 96~104
- 彭翔, 张鹏, 牛憨笨. 虚拟光学信息隐藏理论及并行硬件实现. *光学学报*, 2004, **24**(5): 623~627  
Peng X, Zhang P, Niu H B. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**

(5): 623~627

Francisco: McGraw-Hill, 1968

10 Goodman J W. Introduction to Fourier Optics. San

## A 3-D Digital Watermarking System Based on Virtual-Optics and Random Mask Encoding

Zhang Peng<sup>1</sup>, Peng Xiang<sup>2</sup>, Niu Hanben<sup>2</sup><sup>1</sup> National Laboratory of Precision Measurement Technology and Instrumentation, Tianjin University, Tianjin 300072<sup>2</sup> Institute of Optoelectronics, Shenzhen University, Key Laboratory of Optoelectronics Devices and Systems of Education Ministry, Shenzhen 518060

Received date: 2004-06-14

**Abstract** A new approach to digital watermarking in three-dimensional (3-D) space based on virtual-optics and random mask encoding is presented. The watermarking algorithm can offer an effective solution to the issue of copyright protection of multimedia data distributed via the communication channel. The results show that the embedded watermark is robust to normal data manipulations, such as adding noise, cropping, rotation, and JPEG compression. Because the design concept and methodology based on geometric parameters of Virtual-Optics was adopted, the proposed 3-D watermarking system has good security. There are large degrees of freedom existing for designing a security lock(s)/key(s), including multiple lock(s)/key(s) and multi-dimensional lock(s)/key(s). Numerical experiments are performed to validate the proposed method, and sensitivities of some parameters are quantitatively analyzed and illustrated. The possible dimensions of keys are roughly estimated and show a high security level.

**Keywords** Information optics; Virtual optics; Digital watermarking; Random mask; Copyright protection

**Zhang Peng** was born in May 1979. Now he is working toward the Ph. D. degree at the College of Precision Instrumentation and Optoelectronics Engineering, Tianjin University. His research interests are digital signal processing, optical information security, optical information processing, and computer vision.

