

基于光场相机的四维光场图像水印及质量评价

陈琦, 徐熙平, 姜肇国, 尹鹏, 王鹤程

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 光场相机通过在主镜组和传感器间特定位置设置微透镜阵列, 在采集物方光强的同时可记录光线方向。提出一种在频域内对光场相机获取的四维光场图像加密的图像数字水印方法。植入信息经 Base64 编码后生成二维图像, 并通过 Aronld 迭代对此图像进行均匀化处理, 建立与原始光场坐标系匹配的虚拟计算光场, 在四维傅里叶域内以切片替换的方式将加密信息植入原始光场中, 实现光场图像加密, 然后, 基于二者坐标对应关系, 应用傅里叶逆变换提取加密光场图像中的植入信息。搭建光场采集系统, 应用本文方法对采集的原始光场图像进行加密处理。实验结果表明, 加密光场图像信噪比高, 与原始光场图像相关性强, 加密光场图像无明显伪迹和失真, 算法简便快捷, 稳定可靠。

关键词 成像系统; 光场成像; 图像数字水印; 图像处理; 计算光学; 几何光学

中图分类号 O435

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0411003

Watermarking Scheme for Four Dimensional Light Field Imaging Based on Light Field Camera and Its Evaluation

Chen Qi, Xu Xiping, Jiang Zhaoguo, Yin Peng, Wang Hecheng

College of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China

Abstract The light field camera can capture direction and intensity of light rays at the same time, when setting a lenslet array at a specific position between the primary mirror group and the sensor. We propose an image digital watermarking method for four-dimensional light field image obtained by the light field camera in the frequency domain. In this method, the embedded information is compiled by Base64 to generate a two-dimensional image, and then a virtual computational light field matching the original light field coordinates is established based on the image scrambled by Aronld cat map. A slice of frequency domain is obtained from virtual computational light field after the four-dimensional Fourier transform. By means of slice substitution, the information is embedded into original light field, in order to realize the aim of encrypting light field image. Finally, the watermark information is extracted successfully, by means of the Fourier inverse transformation and image binarization. A light field acquisition system is built, and a light field image is encrypted by the proposed method. The experimental results show that the encrypted light field has a high signal-to-noise ratio and strong correlation with the original light field. The proposed method is simple, fast, and reliable. There is no obvious artifact and distortion in the encrypted light field image.

Key words image systems; plenoptic imaging; digital image watermarking; image processing; computational optics; geometric optics

OCIS codes 110.6880; 100.2000; 110.1758

1 引 言

作为一项新型三维成像技术, 光场相机通过在

传感器和主镜组间适当位置安置微透镜阵列, 使相机在采集光强信息的同时记录光线的传播方向。借助于计算机后期处理, 可以获得不同深度、视角的重

收稿日期: 2017-07-19; 收到修改稿日期: 2017-10-24

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61605016)

作者简介: 陈琦(1991—), 男, 博士研究生, 主要从事光场成像、计算光学和三维形貌测量等方面的研究。

E-mail: 1551497783@qq.com

导师简介: 徐熙平(1969—), 男, 博士, 教授, 主要从事光电信号检测、图像处理方面的研究。

E-mail: xxp@cust.edu.cn(通信联系人)

聚焦图像,并可进一步获取物体的形貌、深度信息等^[1-3]。Adelson等^[4]于1991年提出了严密的光场参数传递方程,并于1992年首次搭建了基于微透镜阵列的单透镜光场原型机。Ng等^[5]于2005年制造出首台10万像素手持光场相机。同年,Georgeiv等^[6]在Ng等^[5]的基础上通过改变微透镜阵列的位置,极大地提高了光场相机的分辨率。近年来,光场成像技术已经应用于三维形貌测量、深度信息提取和运动目标检测等光学测量领域^[7-9]。随着光场成像技术的不断发展和广泛应用,越来越多的人将目光投向光场成像领域,因此,迫切需要开发一种针对光场图像的图像数字水印方法,以加强对光场图像的版权保护。

数字水印是将一些文字、图像等标志性信息通过特定算法植入载体中,在不影响原载体使用价值的情况下,实现防伪溯源、保护版权的功能。数字水印应不影响原内容的价值和使用,并且不能被人的知觉系统觉察或注意到,只有通过专用的检测器才能被提取。二维图像数字水印技术已经较为成熟,按照加密途径可分为时域算法^[10]和空域算法^[11-12]两类。除此之外,采用相位掩模技术^[13]和元胞自动机变换技术^[14]的数字水印还被应用于多重和数字全息影像产权保护领域。但是,现有的针对单或多孔径二维图像研发的图像数字水印技术并不能直接应用在光场成像领域:一方面,光场相机获取的是整个四维光场信息,与传统相机获取的图像有较大差异;另一方面,传统加密算法较为复杂,直接将其应用于更高维的空间,可能会引入较大噪声,影响原始数据质量。因此,提出一项适用于光场图像的图像数字水印算法具有较高的现实意义。

目前,在和光场成像相近的自由视角成像领域已经有相应的水印算法研究。2010年,Koz等^[15]提出了一种适用于自由视角电视的数字水印算法,通过零值高斯分布和单位方差法得到的水印序列与高通滤波后的各子孔径图像进行相关性调制后直接添加进原始子孔径图像中,水印图像则可通过相关性检测提取出来。2010年,Liu等^[16]提出一种在Gyrator变换域内利用相位恢复技术实现图像水印的方法,提供了一种在变换域内图像加密的新思路。2011年,Tian等^[17]将基于扩展频谱的直接序列码分多址方法应用于自由视角影像中,并将多重水印频谱植入通过离散余弦变换后的子孔径图像中。目前,应用于光场图像的数字水印技术只是在光场图像主要特点的基础上对传统算法进行改进,并没有

基于光场图像的本质特征作更有针对性的研究。2015年,Paudyal等^[18]首次提出针对光场图像的数字水印算法,通过对原始光场图像重聚焦获得一组不同焦深的清晰图像,在对图像进行哈尔小波变换后,在水平和垂直两个维度分别植入水印信息,并通过仿真实验验证了该方法对原始光场图像的影响。然而,在上述方法中,四维光场信息被转换成二维图像组,原始光场图像的高维特性被忽略,本质上还是对二维图像进行水印信息植入。客观而言,上述研究推动了光场图像数字水印技术的发展,但在光场高维特性的前提下并未提出针对性的解决方案。

本文针对光场图像的四维特性,提出一种光场图像数字水印解决方案。首先,生成二维水印图像,并生成与原始光场坐标匹配的虚拟计算光场;然后,在虚拟光场的傅里叶域内切片采样,并以切片替换的方式植入原始光场图像中。光场图像为高维图像信息,需要通过数字重聚焦等方法进行后期处理后才能使用,传统针对二维图像的水印评价体系并不适用,因此,本文还提出了一种针对光场图像数字水印质量的评价方法。对加密光场图像进行剪裁、分割、噪声等攻击实验,实验仿真表明,本文方案稳健性强,对重聚焦图像及原始光场图像质量无明显影响,同时可起到版权保护作用,表明该方法具有较高的理论和现实意义。

2 实验原理

2.1 微透镜阵列光场相机原理

如图1所示,光场相机主要由主透镜组、微透镜阵列和感光元件组成。光场相机主透镜组拥有较大视场,因而可以获取更多方向的光线信息;微透镜阵列位于主透镜组和感光元件之间,安置于主透镜组焦面位置处,经主透镜组首次汇合的光线被透镜阵列离散;感光元件位于微透镜阵列后方微透镜焦面

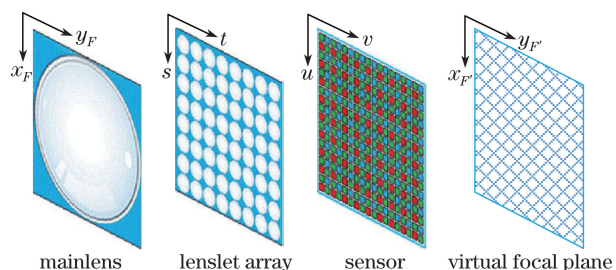


图1 光场相机成像原理及参数化表征

Fig. 1 Imaging principle and parametric representation of light field camera

处,采集四维光场信息。

通常,光场以双平面参数的形式表征,设感光元件面设为 (u, v) , u 为纵坐标, v 为纵坐标, (s, t) 为微透镜阵列面,则光场中的所有光线信息可以表示为 $L_F = (u, v, s, t)$ 。在几何光学的范畴内,所有光线都是相对独立的,每一个 (u, v) 、 (s, t) 分别对应了独立的感光像元和透镜微元。

2.2 四维光场获取

与透镜阵列对应感光像元的位置可以通过上述对应关系获取。将这些像元拼接到一起可获得子孔径图像。感光元件 $u = a, v = b$ 位置处光强信息可表示为 $I_S^{a,b}(s, t)$,感光像元个数为 $P_1 \times P_2$,微透镜个数为 $Q_1 \times Q_2$,整个光场图像可表示为

$$I_S^{a,b}(s, t) = L_F(a, b, s, t), \quad (1)$$

式中 $a, b, s, t \in \mathbf{N}^+, a \leq P_1, b \leq P_2, s \leq Q_1, t \leq Q_2$ 。

图2所示为感光元件上左右位置接收的子孔径图像。理论上,子孔径图像的数量应等同于传感器像元个数,实际上,由于存在透镜阵列的加工误差及主透镜组和透镜阵列的相差,一些子孔径图像并没有利用价值,在光场数字对焦时需要将其剔除。

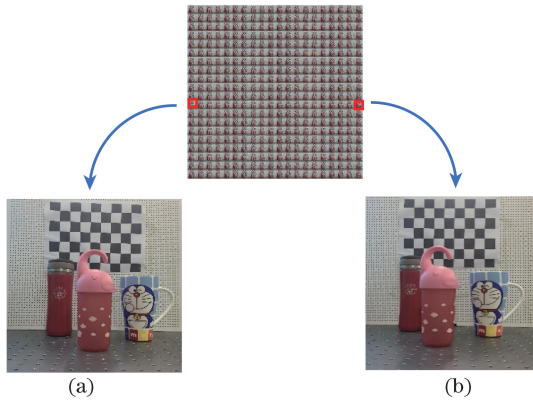


图2 两个位置子孔径图像。(a)左视角;(b)右视角

Fig. 2 Images of two sub-aperture.

(a) Left view; (b) right view

2.3 水印图像虚拟光场获取

光场相机与传统相机的最重要的区别是,光场相机在记录入射光线光强信息的同时还记录了方向信息;因此,拍照后可以通过后期软件处理,自定义焦面位置,实现了先拍照后对焦的功能。为了充分利用光场图像的高维特性,须建立与原始光场对应的二维水印图像虚拟光场。水印信息为二维图像,只有一个焦平面,通过逆用空域数字重聚焦可以获得不同深度的重构图像,从而建立二维水印图像的虚拟光场。

设 $\alpha = \frac{f_{\text{virtual}}}{f_{\text{lenslet}}}$ 为重构焦距和透镜阵列焦距比值,

重聚焦后子孔径图像可表示为

$$I_E(s, t) = \frac{\sum_{u=1}^{P_1} \sum_{v=1}^{P_2} L_F(u, v, s + \Delta s, t + \Delta t)}{Q_1 Q_2}, \quad (2)$$

其中,

$$\Delta s = \frac{1}{P_1} \left(\frac{P_1}{2} - u \right) (\alpha - 1), \quad (3)$$

$$\Delta t = \frac{1}{P_2} \left(\frac{P_2}{2} - v \right) (\alpha - 1). \quad (4)$$

显然,数字重聚焦的基本原理就是将各子孔径图像进行同样距离的位移,并将各子孔径图像拼接,形成不同焦深重聚焦图像。因此,逆用数字重聚焦变换可构建水印图像的虚拟光场,即为构建了水印图像的计算光场。在建立水印图像虚拟光场之前,通过Arnold混沌映射对水印图像进行均匀化处理。

$$\Gamma \left(\begin{bmatrix} s \\ t \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} s' \\ t' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ab \\ cd \end{bmatrix}^n \begin{bmatrix} s \\ t \end{bmatrix} \bmod N, \quad (5)$$

式中 $\begin{bmatrix} s' \\ t' \end{bmatrix}$ 和 $\begin{bmatrix} s \\ t \end{bmatrix}$ 分别表示均匀化后水印图像 I_A 和原始水印图像 I_W 的像素坐标, N 代表了水印图像的尺寸, n 代表编码次数,式中 a, b, c, d 是编码系数,满足 $|ad - bc| = 1$ 。

得到均匀化处理后的水印图像,逆用数字重聚焦变换,即可得到编码后水印图像虚拟光场:

$$L_W(u, v, s, t) = I_A(s - \Delta s, t - \Delta t). \quad (6)$$

(6)式建立的虚拟光场只有1个焦平面。为了记录及计算简便,无论进行多少次均匀化处理,编码后水印图像尺寸应与获取光场图像尺寸相同,即 $Q_1 \times Q_2$ 。为了使两个光场满足极大似然关系,得到的光场图像需要通过标准化光场函数 \hat{L}_W 调制。

$$L_M(u, v, s, t) = L_F(u, v, s, t) \hat{L}_W(u, v, s, t). \quad (7)$$

图3为水印图像虚拟光场获取原理图。

2.4 水印信息植入

基于傅里叶切片定理,提出一种不同于传统二维水印方法的光场数字水印植入技术。四维光场在某二维平面的投影等于四维光场投影方向二维切片的傅里叶逆变换,即可以通过替换四维光场特定切片实现水印信息植入。

植入水印信息之前,须将水印图像虚拟光场 $L_M(u, v, s, t)$ 与获取的原始光场 $L_F(u, v, s, t)$ 中焦深相同即 α 值相同的切片提取出来。采样切片为原始水印图像的子孔径图像,由于窗口效应的影

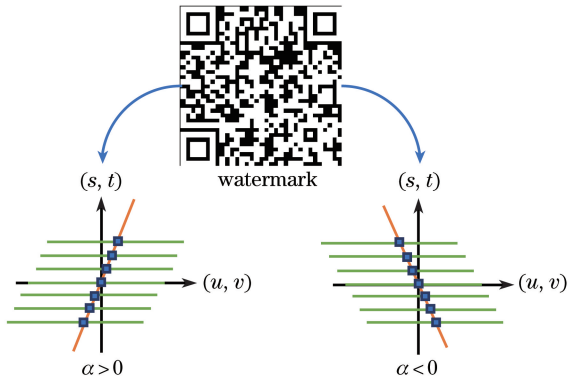


图 3 水印图像虚拟光场获取原理图
Fig. 3 Schematic of watermarking virtual light field establishment

响,采样过程中易引入其他未知量,因此保证采样切片质量对保证水印信息的完整性非常重要。通过高斯采样的方式采集不同深度即 α 值相同的切片后进行替换。

$$\mathcal{F}\{I_R(s, t)\} = \frac{\sum_{u=u_S}^{u_E} \sum_{v=v_S}^{v_E} \mathcal{F}\{I_F(u, v, s, t)\} \exp(-1.5d)}{\sum_{u=u_S}^{u_E} \sum_{v=v_S}^{v_E} \exp(-1.5d)}, \quad (8)$$

$$\begin{cases} u_S = \max(u_C - r, 1) \\ u_E = \min(u_E + r, 1) \\ v_S = \max(v_S - r, 1) \\ v_E = \max(v_E + r, 1) \end{cases}, \quad (9)$$

$$\begin{cases} u_C = \text{round}\left(\frac{s - 0.5Q_1}{Q_1}\alpha + 0.5P_1\right) \\ v_C = \text{round}\left(\frac{t - 0.5Q_2}{Q_2}\alpha + 0.5P_2\right) \end{cases}, \quad (10)$$

$$d = (u_C - u)^2 + (v_C - v)^2, \quad (11)$$

式中 $\mathcal{F}\{\cdot\}$ 代表傅里叶变换, I_R 是重聚焦图像, r 为采样半径。 u 和 v 为图像坐标, 其角标 C、S、E 分别表示中心、开始和结束。 d 是采样点间隔, 可以简化为常数以减少计算的复杂度, 但重聚焦图像 I_R 的质量也会受到影响。

保证水印信息植入的关键是从水印图像和光场图像获取的切片具有相同的 α 值。水印图像光场切片和原始光场切片可分别表示为 \mathcal{J}_W 和 \mathcal{J}_M 。通过下式将水印图像的切片植入原始四维光场图像中。

$$\hat{L}_F(u', v', s, t) = \beta \mathcal{J}_W(u, v, s, t) + (1 - \beta) \mathcal{J}_M(u, v, s, t), \quad (12)$$

式中 \hat{L}_F 为植入水印信息后得到的光场信息, β 为植入信息量的权重因子。由 (12) 式可以看出, \hat{L}_F 中

u, v 不必与 \mathcal{J}_W 和 \mathcal{J}_M 中的坐标相等。因此, 可选用的光线分配方式很多, 本文选用效果较好的均匀分布:

$$u' \sim U(1, N_1), v' \sim U(1, N_2). \quad (13)$$

虚拟光场坐标系和原始光场坐标系的对应关系是水印图像提取的关键。水印图片植入后, 通过对 \hat{L}_F 进行傅里叶逆变换还原原始四维光场信息, 或者直接存储在便于后期处理的傅里叶域内。

2.5 水印信息提取

在通过本文方法植入水印信息的光场图像中, 提取加密信息十分简便。通过傅里叶逆变换, 根据二者坐标系映射关系即可分离得到原始光场和水印信息。即便如此, 提取出的水印图像也会夹带噪声, 但是大部分可以通过图像滤波的方式去除。水印的目的是为了版权保护, 在起到版权保护作用的前提下, 应尽可能地减少水印信息携带的数据量, 既可减少工作量, 又能提高水印的稳健性。因此, 植入的水印信息可以是简单的黑白图像, 甚至是二值化图像。对于二值化图像, 在获取水印图像后, 将灰度图转换为二值化图像。图 4 为植入的原始二维图像、提取的二维图像和二值化后的图像。

$$I_B(s, t) = \begin{cases} 0, & I_G(s, t) > \tau \\ 1, & I_G(s, t) < \tau' \end{cases}, \quad (14)$$

式中 I_B 和 I_G 分别代表二值化图像和灰度图像, τ 和 τ' 是此变换的阈值, 直接决定了变换后二值化图像的质量。

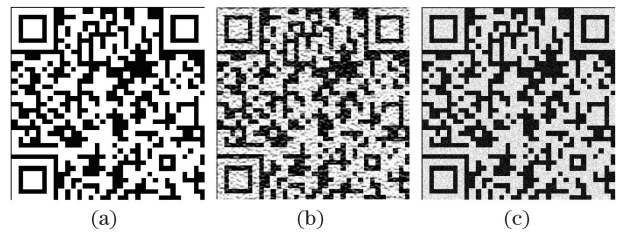


图 4 水印图像提取与二值化处理。(a) 原始图像;
(b) 提取图像; (c) 二值化图像
Fig. 4 Watermarking image extraction and binarization processing. (a) Original image;
(b) refined image; (c) binary image

至此, 四维光场图像的加密及加密信息提取全部完成。图 5 为四维光场图像水印的流程图。

3 实验分析

目前并没有针对光场图像的完整质量评价体系, 为验证该方法的可行性与有效性, 搭建如图 6 所示的含有微透镜阵列的单相机光场采集系统, 采集原始四维光场图像, 运用本文方法对采集的原始

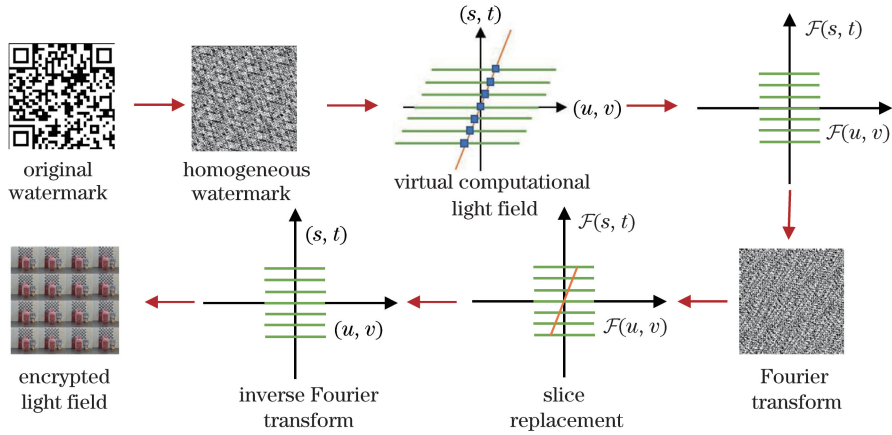


图 5 四维光场图像水印的流程图

Fig. 5 Diagram of watermarking scheme for four dimensional light field imaging

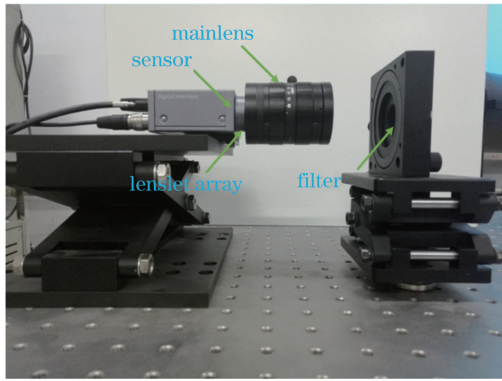


图 6 单相机光场采集系统

Fig. 6 Single camera light field acquisition system

四维光场图像植入水印信息并进行加密信息提取。在借鉴传统图像评价函数的基础上,针对光场图像的特点,提出评价加密后光场图像质量的测试方法。获得的四维光场图像分辨率为 $10 \text{ pixel} \times 10 \text{ pixel} \times 200 \text{ pixel} \times 200 \text{ pixel}$,二维水印图像分辨率为 $120 \text{ pixel} \times 120 \text{ pixel}$ 。

3.1 不可感知性与提取质量评价

不可感知性包含两个方面的要求:1)嵌入的水印信息用统计的方法是不能恢复的,或者是无法确定存在的;2)水印引起的传输图像变化对观察者的视觉系统是可见的。水印信息植入前后光场图像中水印信息的不可感知度是水印质量的客观评价指标,不可感知度主要由峰值信噪比(PSNR)决定^[19-20]。PSNR 表示信号最大可能功率和影响它的表示精度的破坏性噪声功率的比值。

$$V_{\text{PSNR}} = 10 \times \lg \left(\frac{255^2}{R_{\text{MSE}}} \right) = 10 \times \lg \left\{ \frac{M \times N \times 255^2}{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [L_{\text{F}}^{2\text{D}}(a, b) - \hat{L}_{\text{F}}^{2\text{D}}(a, b)]^2} \right\}, \quad (15)$$

式中 R_{MSE} 为原始光场和植入水印后光场图像的均方根误差, $L_{\text{F}}^{2\text{D}}$ 和 $\hat{L}_{\text{F}}^{2\text{D}}$ 分别代表了二维空间下原始光场和植入水印后的光场图像。植入水印后的图像 PSNR 越高,图像质量越好,方法越可靠。

图 7 所示为权重因子为 0.1~1.0 内不同 β 值对应的 PSNR,两种评价指标表明在所有权重因子下植入水印信息的光场图像都拥有较高质量,甚至在权重因子为 1 的情况下,植入水印后的光场图像依然有较高的质量。

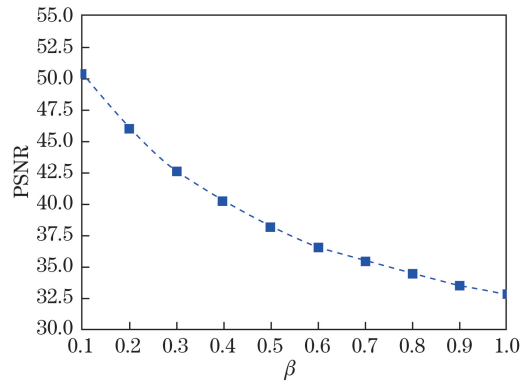


图 7 不同权重因子 β 对应的峰值信噪比

Fig. 7 PSNR values of with different weight factor β

图 8 所示为权重因子分别为 0.1~0.9 时提取的水印图像。经比较,权重因子为 0.5 和 0.6 时效果最佳。

3.2 稳健性分析

通过验证传输图像的抗切割能力,对本文方法进行稳健性分析。基于加密信息在传输图像的分布情况,采用两种方式对传输图像进行剪切研究。第一种从传输图像的中心开始剪切,如图 9(a)~(c)所示,分别以 1/16、1/9、1/4 的比例剪切,图 9(d)~(f)为提取的水印图像。第二种从传输图像边角开

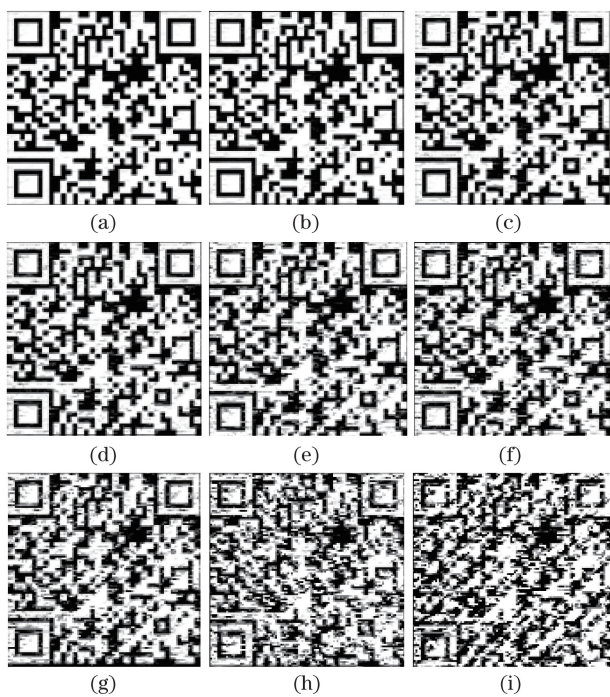


图 8 不同权重因子提取的水印图像。(a) $\beta=0.1$;
(b) $\beta=0.2$; (c) $\beta=0.3$; (d) $\beta=0.4$; (e) $\beta=0.5$;
(f) $\beta=0.6$; (g) $\beta=0.7$; (h) $\beta=0.8$; (i) $\beta=0.9$

Fig. 8 Watermarks extracted from captured light field with different weight factors. (a) $\beta=0.1$; (b) $\beta=0.2$;
(c) $\beta=0.3$; (d) $\beta=0.4$; (e) $\beta=0.5$; (f) $\beta=0.6$;
(g) $\beta=0.7$; (h) $\beta=0.8$; (i) $\beta=0.9$

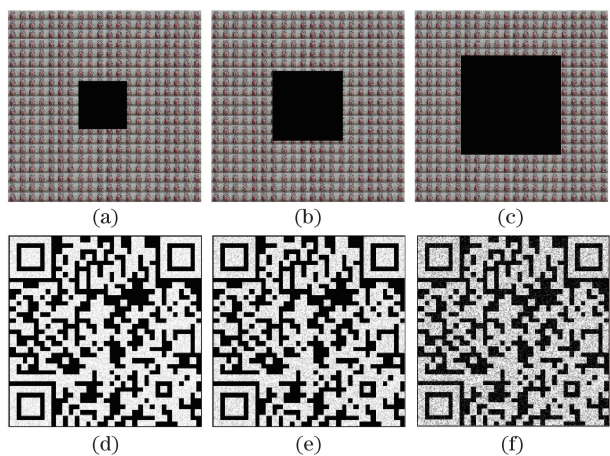


图 9 从图像中心开始剪切对水印的影响。

(a)~(c) 传输图像从中心被 1/16、1/9、1/4 阻隔;
(d)~(f) 对应的恢复水印图像

Fig. 9 Effect of occluding some of transmitted image pixels from center of transmitted image. (a) 1/16,
(b) 1/9, and (c) 1/4 of the transmitted image pixels are occluded; recovered image with
(d) 1/16, (e) 1/9, and (f) 1/4 occlusion

始做剪切,如图 10 所示。对比以上两种剪切方式可以发现,叠成水印算法具有很好的抗剪切能力,而且

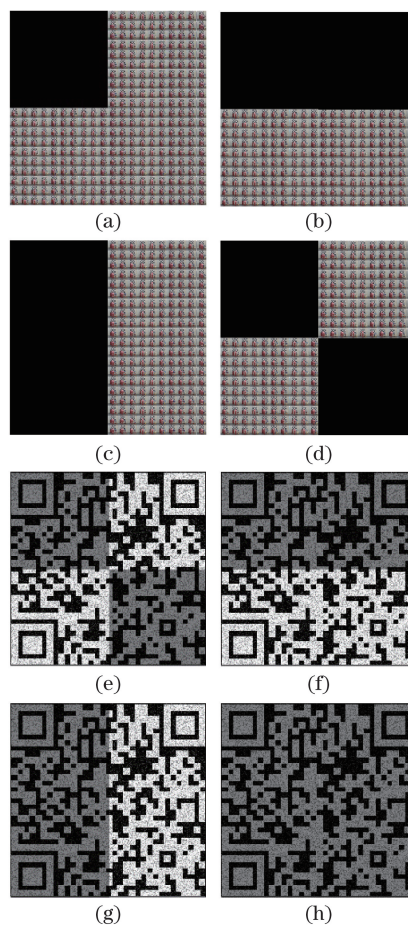


图 10 从图像边角开始剪切对水印的影响。

(a) 1 块阻隔的传输图像; (b)~(d) 不同 2 块阻隔的传输图像; (e)~(h) 对应的水印恢复图像

Fig. 10 Effect of occluding some of transmitted image pixels from corner of transmitted image.

(a) 1/4 of transmitted image pixels are occluded;
(b)-(d) 1/2 of transmitted image pixels are occluded;
(e)-(h) recovered image according to (a)-(d)

从边角开始的剪切方式可以承受更大的剪切比例,水印提取质量更高。这是因为从中心开始剪切,嵌入在传输图像不同层的密文信息均受到剪切,会产生数据丢失,公共解减少,导致水印提取质量严重下降;而从边角开始剪切,只有部分层的数据丢失,使用那些没有被剪切的层与层间的公共解仍可以提取出完整的水印信息。

3.3 攻击实验

在对传输图像的抗切割能力评测的基础上,采用打印扫描攻击实验与噪声攻击实验评估本文算法的安全性。

打印扫描攻击实验通过对加密光场图像进行印刷输出并扫描,再进行水印图像提取来验证所提算法抵抗打印扫描攻击的稳健性。打印扫描实验选用

EPSON-WF3620 一体机作为打印扫描设备,扫描、打印分辨率设置为 1200 dpi。图 11 为从扫描得到的图片中提取的水印图像。

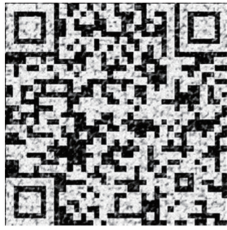


图 11 打印扫描攻击后提取出的水印图像

Fig. 11 Extracted watermark after print-scan attack

打印扫描攻击使得图像的细节信息损失较多,导致二值化后提取的水印产生了一定的损失,但是水印轮廓视觉上较为清晰,经过多次纠错后重组的二维码依然可以正确解码得到版权信息字符串。考虑到打印稿在使用时可能会受到污损,模拟涂鸦攻击来检测基于本文算法得到的图像打印稿抵抗污损的能力。实验结果如图 12 所示,虽然提取的水印图像损耗进一步增加,但最后重组的二维码依然可以解码出版权信息。

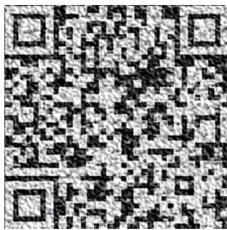


图 12 涂鸦攻击后提取出的水印图像

Fig. 12 Extracted watermark after painting attack

除了打印扫描实验,还对算法噪声攻击的稳健性进行测试。噪声实验选择加性噪声和乘性噪声进行测试,分别为高斯噪声、椒盐噪声和 Speckle 噪声。实验结果如表 1 所示。

表 1 噪声攻击实验结果

Table 1 Results of noise attacks

Attack	PSNR between original image and watermarked image /dB	Can be decoded or not
Gaussian noise (0.001)	26.7550	Yes
Gaussian noise (0.002)	26.7250	Yes
Salt & pepper noise (0.002)	29.0838	Yes
Salt & pepper noise (0.003)	29.0608	Yes
Speckle noise (0.005)	28.7566	Yes
Speckle noise (0.006)	28.7166	Yes

表 1 列举了权重因子为 0.5 时,原始水印图像

和遭到攻击后提取水印图像间的峰值信噪比,以及是否可以解码出版权信息。可以看出,本文算法对噪声的抵抗性较好,遭受攻击后图像质量下降比较严重,峰值信噪比较低,但提取的水印图像经二值化处理后可以依然可以解码。因此,数字水印技术可以很好地应用到电子稿、印刷稿版权保护中,有效保护版权所有者权益。

4 结 论

提出了一种基于光场相机采集的四维光场图像的水印方法,搭建了单相机光场采集系统,构建了二维水印图像的虚拟计算光场,通过切片替换的方式在傅里叶域内实现水印信息植入,并在加密后的四维光场图像中成功提取水印图像。实验结果证明,本文方法成功实现了水印信息在四维光场图像中的植入,加密效果良好、稳健性强、计算简便,加密后的光场图像无明显伪影,不影响后期使用。

参 考 文 献

- [1] Klug M, Burnett T, Fancello A, *et al.* A scalable, collaborative, interactive light-field display system[J]. Sid Symposium Digest of Technical Papers, 2014, 44(1): 412-415.
- [2] Lüke J P, Rosa F, Marichal-Hernández J G, *et al.* Depth from light fields analyzing 4D local structure[J]. Journal of Display Technology, 2015, 11(11): 900-907.
- [3] Kim C, Zimmer H, Pritch Y, *et al.* Scene reconstruction from high spatio-angular resolution light fields[J]. International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 2013, 32(4): 1-12.
- [4] Adelson E H, Bergen J R. The plenoptic function and the elements of early vision[M]//Landy M, Movshon J A. Computational Models of Visual Processing. Cambridge: MIT Press, 1991: 3-20.
- [5] Ng R, Levoy M, Brédif M, *et al.* Light field photography with a hand-held plenoptic camera[J]. Computer Science Technical Report, 2005, 2(11): 1-11.
- [6] Georgeiv T, Intwala C. Light field camera design for integral view photography[J]. Adobe Technical Report, 2006.
- [7] Edussooriya C U S, Dansereau D G, Bruton L T, *et al.* Five-dimensional depth-velocity filtering for enhancing moving objects in light field videos[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2015, 63(8): 2151-2163.
- [8] You S, Lu Y, Zhang W, *et al.* Micro-lens array based

- 3-D color image encryption using the combination of gravity model and Arnold transform[J]. Optics Communications, 2015, 355(2): 419-426.
- [9] Lam E Y. Computational photography with plenoptic camera and light field capture: tutorial[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2015, 32(11): 2021-2032.
- [10] Nikolaidis N, Pitas I. Robust image watermarking in the spatial domain[J]. Signal Processing, 1998, 66(3): 385-403.
- [11] Chen W, Javidi B, Chen X. Advances in optical security systems[J]. Advances in Optics and Photonics, 2014, 6(2): 120-155.
- [12] Chen W, Chen X, Stern A, *et al.* Phase-modulated optical system with sparse representation for information encoding and authentication[J]. IEEE Photonics Journal, 2013, 5(2): 6900113.
- [13] Chen W. Modulating phase via rotation for optical encoding based on correlated photon imaging[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(4): 540-543.
- [14] Hwang W J, Chan H T, Cheng C J. Hologram authentication based on a secure watermarking algorithm using cellular automata[J]. Applied Optics, 2014, 53(27): 64-73.
- [15] Koz A, Cigla C, Alatan A A. Watermarking of Free-view Video[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2010, 19(7): 1785-1797.
- [16] Liu Z, Xu L, Guo Q, *et al.* Image watermarking by using phase retrieval algorithm in gyrator transform domain[J]. Optics Communications, 2010, 283(24): 4923-4927.
- [17] Tian H, Wang Z, Zhao Y, *et al.* Spread spectrum-based multi-bit watermarking for free-view video[C]. International Workshop on Digital Watermarking, 2011: 156-166.
- [18] Paudyal P, Battisti F, Neri A, *et al.* A study of the impact of light fields watermarking on the perceived quality of the refocused data[C]. 3DTV-Conference: The True Vision-Capture, Transmission and Display of 3D Video (3DTV-CON), 2015:1-4.
- [19] Liu X L, Pan Z, Wang Y L, *et al.* Watermarking algorithm based on ptychographical imaging[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(23): 234201.
刘祥磊, 潘泽, 王雅丽, 等. 基于叠层衍射的数字水印算法研究[J]. 物理学报, 2015, 64(23): 234201.
- [20] Xie Q K, Jiang Y R, Zhang W F, *et al.* Information encryption technology based on digital watermarking and iteration algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2016: 36(6): 0607001.
解青坤, 姜艳茹, 张文飞, 等. 基于数字水印和迭代算法的信息加密技术[J]. 光学学报, 2016, 36(6): 0607001.