

# 数字全息周期像的产生机理及在抑制零级衍射上的应用

卢明峰 吴坚<sup>†</sup> 郑明

(北京航空航天大学应用物理系, 北京 100191)

(2012年9月27日收到; 2013年1月11日收到修改稿)

在数字全息成像中, 利用 CCD 的 RGB 模式采样全息图时, 全息重构像会出现特定的周期性分布. 本文从理论和实验上详细研究了这种周期像产生的机理、分布特性和应用. 研究结果显示, 由于 CCD 的光谱滤镜会使全息图的 RGB 三个单色采样阵列出现部分像素信号的缺失, 因此, 需要通过特定的 demosaicing 数学算法对缺失的像素信号进行重建以形成完整的单色采样阵列, 这是数字全息再现像周期分布产生的根源. 而基于 demosaicing 算法的采样阵列重建会在全息图频谱中引入调制函数, 导致物体再现像和零级衍射斑的周期分布差异. 本文揭示了全息图的 RGB 采样、demosaicing 算法与全息重构像周期性之间的内在关联. 最后, 讨论了结合空间移位和图像形态学技术, 利用重构像的周期性抑制零级衍射斑的应用. 所有理论与实验研究结果完全一致.

**关键词:** 数字全息, 图像周期性, 零级斑抑制

**PACS:** 42.40.Jv, 07.05.Pj

**DOI:** 10.7498/aps.62.094207

## 1 引言

在数字全息成像中, 使用黑白 CCD 相机记录的全息干涉图的再现结果显示, 物体再现像和零级衍射斑只在视场的中心区域出现, 如图 1(a) 所示, 其中再现像与零级衍射斑完全重叠. 然而, 当使用 CCD 的 RGB 模式记录全息图时, 再现像会出现周期分布现象<sup>[1-9]</sup>, 如图 1(b)–(d) 所示. 其中, 图 1(b)–(d) 分别是利用不同频率光波 (红、绿、蓝) 和基于菲涅尔重构算法获得的数字全息再现像. 从中我们可以看到明显的图像周期性分布. 对数字全息再现像的这种周期分布特性和解释以及应用, 文献 [1, 2] 曾从 CCD 最小采样频率的角度给出了初步的理论分析. 然而, 文献 [1, 2] 的研究并未充分揭示采样频率变化和全息再现像周期分布之间的内在机理. 文献 [1] 主要是提出了一种新的利用重构像的周期特性和空间移位的方法抑制同轴零级衍射, 对周期像的产生原因并未给出解释. 文献 [2] 的

工作同样基于图像的周期特性, 但增加了对空间移位法抑制零级衍射斑的更多情况的论述, 包括了离轴情形. 在对图像周期性产生机理的理论解释方面虽然给出了初步分析, 但并不完整和深入. 另外, 一些文章曾对 RGB 采样过程中基于 demosaicing 算法的重构采样阵列所致的图像频谱周期分布进行了研究<sup>[10-13]</sup>, 但其理论和结果并未涉及数字全息的 recon 计算过程, 因此并不完全适用于数字全息成像情况.

为了对基于 RGB 采样模式的数字全息周期像产生的机理和规律做出彻底的解释, 并由此进一步对周期像的分布进行调控, 以及理解和完善利用周期像抑制零级衍射的方法, 本文首先通过分析 RGB 模式的采样过程、完整单色采样矩阵的构建及其 demosaicing 算法, 详细研究了数字全息图再现过程中图像周期分布产生的根源和特点, 然后讨论了数字全息再现像周期分布的调控和利用重构像周期特性在抑制零级衍射斑方面的应用.

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: jwu2@buaa.edu.cn

## 2 完整单色采样矩阵的构建

利用 CCD 相机记录彩色图像的常见方法是在 CCD 的像素阵列前覆盖一层由一系列微小马赛克状的滤光片组成的彩色滤镜阵列 (color filter array, CFA). 不同种类的微小滤光片组成不同的排布, 并且只允许特定波长的光透过. 常见的 CFA 是 Bayer 滤镜 [10,11,14], 其滤光片阵列排布如图 2(a) 所示. 经 Bayer 滤镜后的光信号被分配到红 (Red)、绿 (Green)、蓝 (Blue) 三个初始单色采样矩阵 (monochromatic sampling array, MSA) 中, 如图 2(b) 所示. 因此在每个 MSA 中必然会有一些像素出现采样信号的缺失.

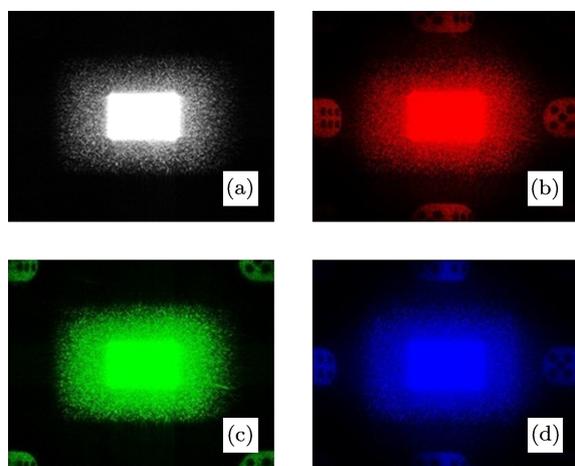


图 1 同轴数字全息图像的再现 (a) 使用黑白 CCD 记录; (b)–(d) 使用 CCD 的 RGB 模式记录

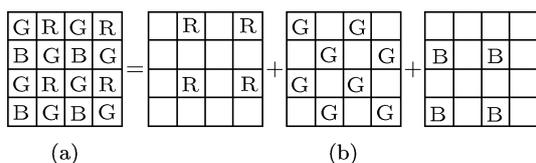


图 2 (a) Bayer 滤镜 CFA; (b) Bayer 滤镜的初始单色采样矩阵 MSA

通过特定的数学插值算法可以对初始 MSA 中缺失信号的像素进行赋值, 从而形成完整 MSA, 这一过程称为 demosaicing 过程. 其中, 邻域插值 (adjacent element interpolation, AEI) 和双线性插值 (bilinear interpolation, BI) 是两种常见的 demosaicing 算法 [12,15].

在数字全息成像中, 使用 CCD 的 RGB 模式进行全息图记录时, 需要对 R, G, B 三个单色采样矩阵分别进行重建. 首先以 R 矩阵为例, 对重构像周期性产生的机理进行分析. 数字全息图采样的初始

R 矩阵可以表达为

$$h_R(k, l) = \frac{1}{4} h(k, l) [1 - (-1)^k] \cdot [1 + (-1)^l], \quad (1)$$

其中  $h(k, l)$  为全息图,  $k = 1, 2, \dots, M$ ,  $l = 1, 2, \dots, N$ .  $M$  和  $N$  分别为 CCD 在水平和垂直方向的像素数. 初始 R 矩阵的像素采样情况如图 3(a) 所示. 显然, R 矩阵中有若干像素缺失了采样信号. 对此, 采用邻域插值的 demosaicing 算法对信号缺失的像素进行赋值以构成完整的单色 R 矩阵, 其数学表达可以写为

$$h_{RD}(k, l) = \frac{1}{4} \sum_{p=k-1}^k \sum_{q=l}^{l+1} \{h(p, q) [1 - (-1)^p] \cdot [1 + (-1)^q]\}. \quad (2)$$

采用邻域插值法的 demosaicing 算法所获得的完整 R 矩阵如图 3(b) 所示.

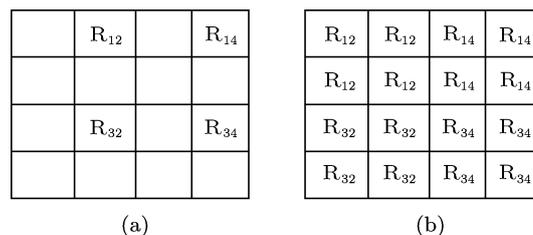


图 3 (a) 初始 R 矩阵及采样信息缺失; (b) 邻域插值法填充的完整 R 矩阵

## 3 全息再现像的周期分布

利用菲涅尔变换算法对数字全息图进行再现计算, 其再现波场的复振幅离散形式可以表示为 [16]

$$\begin{aligned} \Gamma(m, n) &= C_0 \times \text{IDFT} \{h(k, l) \times R^*(k, l) \\ &\quad \times \exp[-i\pi(k^2\Delta x^2 + l^2\Delta y^2)/\lambda d]\} \\ &= C_0 \times \text{IDFT} \{h(k, l)\} \otimes \text{IDFT} \{R^*(k, l) \\ &\quad \times \exp[-i\pi(k^2\Delta x^2 + l^2\Delta y^2)/\lambda d]\}, \quad (3) \end{aligned}$$

其中  $\Gamma(m, n)$  是再现波场的复振幅,  $m = 1, 2, \dots, M$ ,  $n = 1, 2, \dots, N$ ,  $C_0$  为复常数, IDFT 表示离散逆傅里叶变换,  $R^*(m, n)$  是再现参考光波,  $\exp[-i\pi(k^2\Delta x^2 + l^2\Delta y^2)/\lambda d]$  是点扩散函数 (point spread function, PSF),  $\Delta x$  和  $\Delta y$  为 CCD 的像素尺寸,  $\lambda$  和  $d$  分别为光波长和再现距离, 符号  $\otimes$  为卷积算符. (3) 式显示, 数字全息的重构波场实际上是由  $h(k, l)$  的 IDFT 和点扩散函数的 IDFT 的卷积确定.

### 3.1 R 矩阵的构建和周期再现像

依据 (3) 式对基于初始 R 矩阵的采样全息图  $h_R(k, l)$  进行逆傅里叶变换, 其数学表达如下:

$$\begin{aligned} H_R(m, n) &= \text{IDFT}\{h_R(k, l)\} \\ &= \frac{1}{4} [H(m, n) - H(m - M/2, n) \\ &\quad + H(m, n - N/2) \\ &\quad - H(m - M/2, n - N/2)], \quad (4) \end{aligned}$$

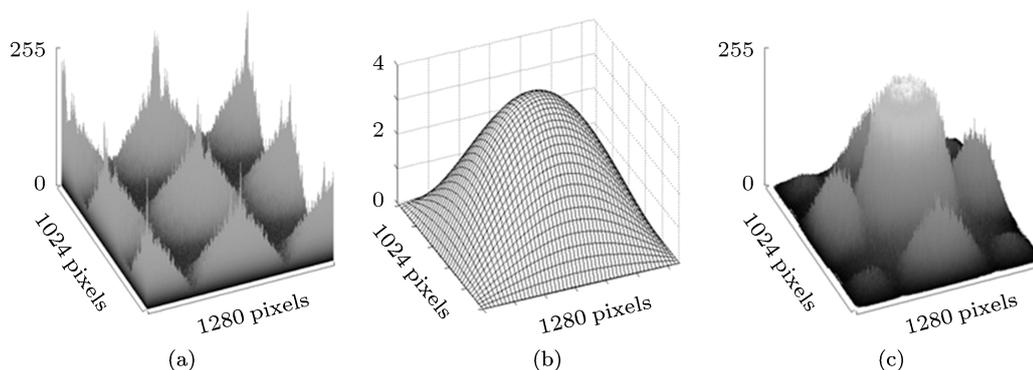


图 4 (a) 初始 R 矩阵的 IDFT 图; (b) 调制函数; (c) 完整 R 矩阵的 IDFT 图

将 (4) 式代入 (3) 式得到再现波场  $\Gamma_R(m, n)$  为

$$\begin{aligned} \Gamma_R(m, n) &= C_0 \times H_R(m, n) \otimes \text{IDFT}\{R^*(k, l) \\ &\quad \times \exp[-i\pi(k^2\Delta x^2 + l^2\Delta y^2)/\lambda d]\} \\ &= \frac{1}{4} H(m, n) \otimes \text{IDFT}\{R^* \times \text{PSF}\} \\ &\quad - \frac{1}{4} H(m - M/2, n) \\ &\quad \otimes \text{IDFT}\{R^* \times \text{PSF}\} \\ &\quad + \frac{1}{4} H(m, n - N/2) \\ &\quad \otimes \text{IDFT}\{R^* \times \text{PSF}\} \\ &\quad - \frac{1}{4} H(m - M/2, n - N/2) \\ &\quad \otimes \text{IDFT}\{R^* \times \text{PSF}\} \\ &= \Gamma_{R1}(m, n) + \Gamma_{R2}(m - M/2, n) \\ &\quad + \Gamma_{R3}(m, n - N/2) \\ &\quad + \Gamma_{R4}(m - M/2, n - N/2), \quad (5) \end{aligned}$$

其中  $\text{IDFT}\{R^* \times \text{PSF}\}$  表示  $\text{IDFT}\{R^*(k, l) \times \exp[-i\pi(k^2\Delta x^2 + l^2\Delta y^2)/\lambda d]\}$ .

从 (5) 式中可以很清楚的看到, 再现波场由 4 个相同部分组成, 彼此间隔为  $(M/2, N/2)$ . 其图像如图 5(a) 所示, 从中可以看到零级斑、物像、共轭

其中  $H(m, n) = \text{IDFT}\{h(k, l)\}$ . (4) 式清楚地显示, 初始 R 矩阵全息图的 IDFT 频谱由 4 个完全相同的频谱图像组成, 其差别仅在于彼此之间有  $(M/2, N/2)$  的间隔, 结果如图 4(a) 所示. 其中, 中心处有一个完整的频谱图, 根据离散傅里叶变换的循环周期性, 前后和左右两侧中间的频谱分别组成两个完整的频谱图, 而四个角落的频谱组成第 4 个完整频谱图. 由于再现像为灰度图像, 因此可以取  $H_R(m, n)$  的幅值描述<sup>[17,18]</sup>, 即图 4(a) 显示的是  $|H_R(m, n)|$ .

像具有相同的周期分布特性并且完全重叠. 这是因为在同轴数字全息中, 三者的频谱相互重叠在一起. 基于初始 R 矩阵的全息图由于采样周期增加一倍, 导致其频谱图出现了 4 个完全相同的图像, 但每一个频谱图中仍然同时包括了零级斑、物像和共轭像信息, 因此导致在像平面的 4 个周期再现像.

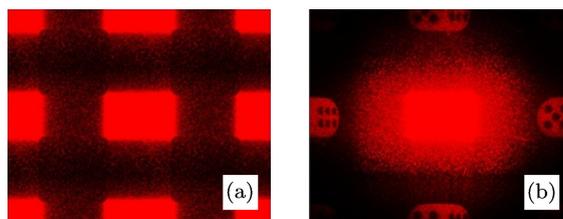


图 5 (a) 初始 R 矩阵的数字全息再现像; (b) 完整 R 矩阵的数字全息再现像

由于初始 R 矩阵的全息图是一个不完整的采样阵列, 因此, 我们通过邻域插值的 demosaicing 算法构建完整的 R 矩阵全息图  $h_{RD}(k, l)$ , 即对 (2) 式作逆傅里叶变换 IDFT:

$$\begin{aligned} H_{RD}(m, n) &= \text{IDFT}\{h_{RD}(k, l)\} \\ &= \frac{1}{4} [1 + \exp(j\omega_m)] \cdot [1 + \exp(j\omega_n)] \\ &\quad \times [H(m, n)] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -H(m-M/2, n) + H(m, n-N/2) \\
 & -H(m-M/2, n-N/2)] \\
 & = [1 + \exp(j\omega_m)] \cdot [1 + \exp(j\omega_n)] \\
 & \cdot H_R(m, n), \tag{6}
 \end{aligned}$$

其中  $\omega_m = 2\pi m/M$ ,  $\omega_n = 2\pi n/N$ . 同理, 取 (6) 式的幅值进行表征,

$$\begin{aligned}
 & |H_{RD}(m, n)| \\
 & = |1 + \exp j(\omega_m)| \cdot |1 + \exp j(\omega_n)| \cdot |H_R(m, n)| \\
 & = 4|\cos(\omega_m/2)| \cdot |\cos(\omega_n/2)| \cdot |H_R(m, n)|. \tag{7}
 \end{aligned}$$

(7) 式表明, 经邻域差值算法构建的完整  $R$  矩阵的 IDFT 频谱实际是初始  $R$  矩阵的 IDFT 频谱经函数  $\eta_R(\omega_m, \omega_n) = 4|\cos(\omega_m/2)| \cdot |\cos(\omega_n/2)|$  调制的结果, 调制函数如图 4(b) 所示, 其特点是函数值在频域中心区最大, 在边缘处值为 0. 这增加了中心区域的频谱图信号, 而使四周频谱图中的基频信号归零. 调制结果如图 4(c) 所示. 同理, 将 (6) 式代入 (3) 式可以得到再现波场  $\Gamma_{RD}(m, n)$ , 即

$$\begin{aligned}
 \Gamma_{RD}(m, n) &= C_0 \times H_{RD}(m, n) \otimes \text{IDFT}\{R^*(k, l) \\
 & \times \exp[-i\pi(k^2\Delta x^2 + l^2\Delta y^2)/\lambda d]\} \\
 &= \frac{1}{4}[\eta(\omega_m, \omega_n)H(m, n)] \\
 & \otimes \text{IDFT}\{R^* \times \text{PSF}\} \\
 & - \frac{1}{4}[\eta(\omega_m, \omega_n)H(m-M/2, n)] \\
 & \otimes \text{IDFT}\{R^* \times \text{PSF}\} \\
 & + \frac{1}{4}[\eta(\omega_m, \omega_n)H(m, n-N/2)] \\
 & \otimes \text{IDFT}\{R^* \times \text{PSF}\} \\
 & - \frac{1}{4}[\eta(\omega_m, \omega_n)H(m-M/2, n-N/2)] \\
 & \otimes \text{IDFT}\{R^* \times \text{PSF}\} \\
 & = \Gamma_{RD1}(m, n) + \Gamma_{RD2}(m-M/2, n) \\
 & + \Gamma_{RD3}(m, n-N/2) \\
 & + \Gamma_{RD4}(m-M/2, n-N/2), \tag{8}
 \end{aligned}$$

其中  $\eta(\omega_m, \omega_n) = [1 + \exp(j\omega_m)] \cdot [1 + \exp(j\omega_n)]$ .

从 (8) 式中可以看出, 再现结果同样由 4 个相同部分组成, 其区别仅在于彼此间隔为  $(M/2, N/2)$ . 再现波场的图像如图 5(b) 所示. 此时零级衍射斑仅出现在视场中心, 但物体重构像仍然具有周期性. 理论上讲, 零级斑虽然由参考光和物光构成, 但

其频谱以基频为主. 在同轴全息中, 虽然零级衍射、物体再现像和共轭像在空间和频域重叠, 但由于频谱调制函数在视场边缘的值为零, 从而使边缘的周期零级斑、共轭像和物体再现像频谱的基频均被消除, 由于物像 (包括共轭像) 存在高频, 因此仍然可以再现, 而零级噪声则得到极大抑制, 这与我们的实验结果完全一致. 另一方面, 通过实验我们可以分别记录参考光  $|R|^2$  和物光  $|O|^2$  并在全息图重构计算中减除, 但这并不能有效消除零级衍射噪声, 这是因为物光和参考光因子被包含在全息图的干涉条纹中并在波场重建的离散傅里叶变换中作为基频的直流项体现出来. 而频谱的调制函数由于在计算过程中对视场边缘基频的滤除刚好发挥作用, 由此使零级衍射得到了有效抑制.

### 3.2 G 矩阵周期再现像分析

以上对数字全息再现像的周期分布机理和特性的分析是基于  $R$  矩阵全息图的. 从图 2 可以得知, 由于  $B$  矩阵与  $R$  矩阵排布类似, 因此其再现像的周期分布特性应与  $R$  矩阵类似, 如图 1(d). 但是初始  $G$  矩阵的像素采样分布由于与上面二者不同, 因此其再现像的周期分布与  $R$  矩阵和  $B$  矩阵不同, 如图 1(c). 以下我们对基于  $G$  矩阵的采样全息图的再现像周期特性进行分析. 初始  $G$  矩阵的像素采样分布如图 6(a) 所示, 其数学上可以写为

$$h_G(k, l) = h(k, l) \times \frac{1}{2}[1 + (-1)^{k+l}]. \tag{9}$$

在此利用双线性插值的 demosaicing 算法对  $G$  矩阵中的缺失信号像素进行赋值, 如图 6(b) 所示, 则可以得到

$$\begin{aligned}
 h_{GD}(k, l) &= h(k, l) \times \frac{1}{2}[1 + (-1)^{k+l}] \\
 & + h_b(k, l) \times \frac{1}{2}[1 - (-1)^{k+l}], \tag{10}
 \end{aligned}$$

其中  $h_b(k, l) = [h(k-1, l) + h(k+1, l) + h(k, l-1) + h(k, l+1)]/4$  为双线性插值函数.

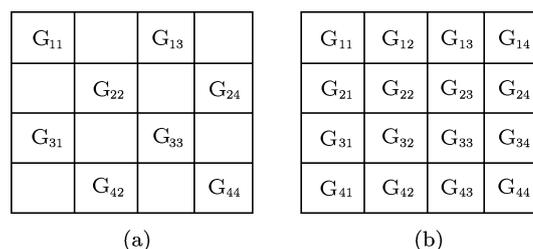


图 6 (a) 初始  $G$  矩阵; (b) 双线性插值填充的完整  $G$  矩阵

初始 G 矩阵的离散逆傅里叶变换 IDFT 为

$$H_G(m, n) = \frac{1}{2} [H(m, n) + H(m - M/2, n - N/2)]. \quad (11)$$

显然, (11) 式与 (4) 式具有很大差别. (11) 式说明, G 矩阵的频域包含两个完整图像, 分别对应图 7(a) 中的中心图像和四个角的频谱构成的图像.

基于双线性插值构建的完整 G 矩阵的离散逆傅里叶变换 IDFT 为

$$H_{GD}(m, n) = \frac{1}{2} [1 + \exp(j\omega_m) + \exp(-j\omega_m) + \exp(j\omega_n) + \exp(-j\omega_n)]$$

$$\times [H(m, n) + H(m - M/2, n - N/2)]. \quad (12)$$

插值处理前后的 G 矩阵的频谱关系为

$$|H_{GD}(m, n)| = \frac{1}{2} (2 + \cos \omega_m + \cos \omega_n) \cdot |H_G(m, n)|. \quad (13)$$

由 (13) 式可以看出, 基于双线性差值构建的 G 矩阵的频谱调制函数  $\eta_G(\omega_m, \omega_n) = (2 + \cos \omega_m + \cos \omega_n)/2$  与  $\eta_R(\omega_m, \omega_n)$  不同, 如图 7(b).  $\eta_G(\omega_m, \omega_n)$  抑制了初始 G 矩阵频谱中 4 个角的基频信号, 其结果如图 7(c) 所示.

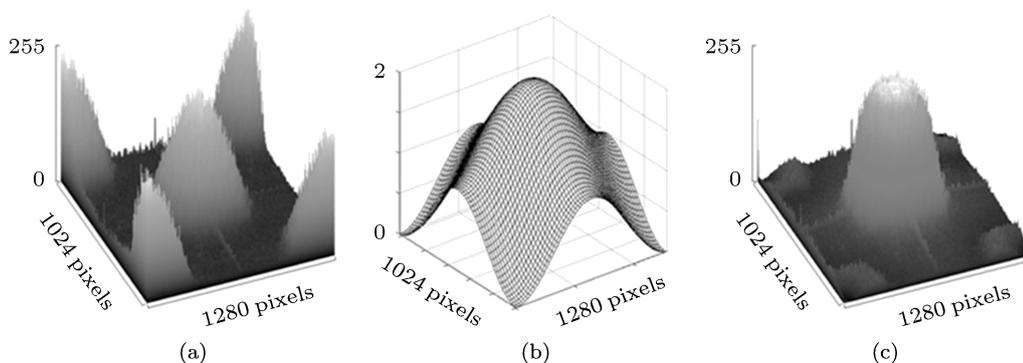


图 7 (a) 初始 G 矩阵的 IDFT 图; (b) 调制函数; (c) 完整 G 矩阵的 IDFT 图

将 (11) 和 (12) 式代入 (3) 式得到再现像如图 8 所示. 图 8(a) 是初始 G 矩阵全息图的再现像. 其中, 零级衍射像和物体再现像具有相同的周期分布特性并且完全重叠. 而图 8(b) 是经双线性插值构建后的完整 G- 矩阵全息图的再现像. 与图 5 的 R 矩阵全息图的再现像分布不同. 完整 G 矩阵全息图的再现像仅出现在视场中心和四个角上. 其中, 零级衍射像仅出现在视场中心, 与物体再现像具有不同的分布, 形成的原理与对 R- 矩阵再现像的解释类似.

#### 4 利用再现像的周期性抑制零级衍射像

利用数字全息再现像的周期特性, 可以发展一些重要的应用. 例如, 数字全息成像中的零级衍射像的抑制. 由于同轴数字全息再现像中零级衍射像与物体再现像完全重叠, 这给抑制零级衍射像带来了很大的困难. 虽然相移法是目前一种可以有效抑制零级衍射的方法, 但是它对环境的稳定性要求很高, 并且增加了全息光路的复杂性<sup>[19,20]</sup>. 鉴于数字

全息成像中常采用 CCD 的黑白模式记录全息图, 我们在此讨论一种基于 RGB 采样模式的全息图阵列获取, 结合空间移位法和形态学技术有效抑制数字全息成像中的零级衍射像的方法. 这种方法由四个步骤组成, 如图 9 所示.

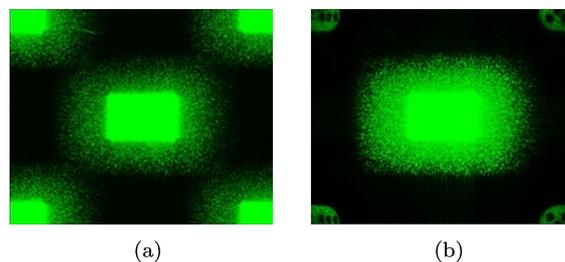


图 8 (a) 初始 G 矩阵的数字全息再现像; (b) 双线性插值构建的完整 G 矩阵的数字全息再现像

**第 1 步** 数字全息周期再现像的产生和获取. 对黑白 CCD 相机使用 RGB 模式采样并通过 demosaicing 算法获取完整的单色采样全息图阵列, 以取得形成全息图再现像周期性分布的基础.

**第 2 步** 利用空间移位方法将图 9(b) 的中心

移到四角,即将像平面的四个象限做一次对角移位,这时新的像平面的中心区域只有物像而没有零级衍射斑,如图 9(c) 所示.

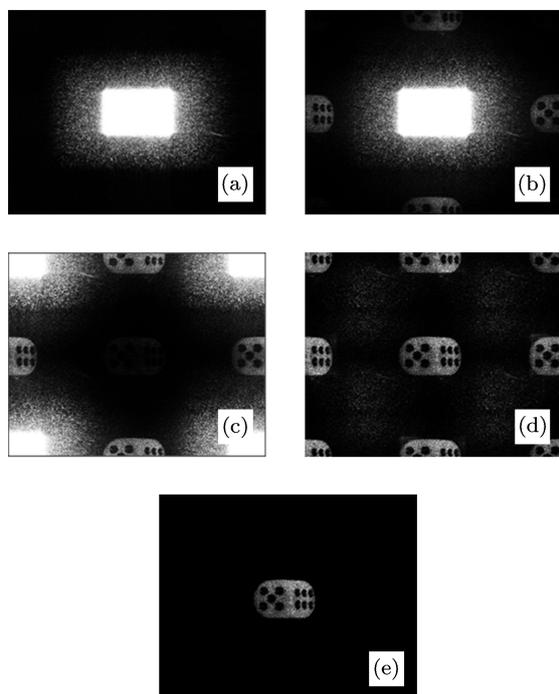


图 9 利用图像周期性抑制零级衍射像 (a) 黑白 CCD 相机获得的全息再现像; (b) 使用 RGB 模式的周期再现像的获得; (c) 全息再现像的二维空间移位; (d) 利用 (b) 与 (c) 的相乘叠加抑制零级衍射斑; (e) 利用图像形态学消除 (d) 的周期像和残留噪声

**第 3 步** 将图 9(b) 与 (c) 叠加得到如图 9(d) 所示的抑制零级衍射后的全息再现像. 在计算过程中, 我们应用了减平均值算法<sup>[21]</sup>, 以预抑制各种噪声.

其中, 第 2、3 步已经在文献 [1,2] 中论述.

**第 4 步** 利用图像形态学的数学技术识别和锁定视场中心的物体再现像, 并滤除掉周边的周期重构像以及由空间移位法导致的残留噪声, 如图 9(e) 所示, 一个清晰的物体再现像可以获得. 有关利用图像形态学抑制数字全息成像中的噪声方法将在我们的另一篇文章中进行详细论述.

## 5 结论

在数字全息成像中, 使用 CCD 的 RGB 模式记录全息图, 再现像会出现周期性分布, 通过对 CCD 的单色 R 矩阵和 G 矩阵的全息再现像周期性的分析, 本文揭示了全息图采样频率、demosaicing 算法与再现像周期分布特性之间的内在关联性, 研究得到以下结论: 1) 使用 RGB 采样模式记录全息图时, 物体再现像和零级衍射像可以呈现不同的周期性分布. 这是因为基于 demosaicing 算法完整构建的单色采样全息图在逆傅里叶变换频域受到调制函数的作用, 导致频谱图中不同位置的基频信号被抑制, 最终影响数字全息再现过程中零级衍射斑的分布. 2) 单色 R 矩阵和 G 矩阵的数字全息再现像展示的不同周期分布说明, 我们可以利用不同的滤镜函数和 demosaicing 算法人为调控再现像的分布. 3) 利用数字全息的周期性重构像的产生机理和特性, 结合空间移位技术和形态学方法, 可以发展一种有效抑制数字全息零级衍射斑的方法.

- [1] Dong Y C, Wu J 2010 *Opt. Lett.* **35** 1287
- [2] Wu J, Lu M F, Dong Y C, Zheng M, Huang M, Wu Y N 2011 *Appl. Opt.* **50** H56
- [3] Kakue T, Tahara T, Ito K, Shimozato Y, Awatsuji Y, Nishio K, Ura S, Kubota T, Matoba O 2009 *Appl. Opt.* **48** H244
- [4] Kakue T, Moritani Y, Ito K, Shimozato Y, Awatsuji Y, Nishio K, Ura S, Kubota T, Matoba O 2010 *Opt. Exp.* **18** 9555
- [5] Calabuig A, MicóV, Garcia J, Zalevsky Z, Ferreira I C 2011 *Opt. Lett.* **36** 885
- [6] Picart P, Tankam P, Song Q, Li J, Desse J M 2011 *Digital Holography and Three-Dimensional Imaging (DH)* Tokyo, Japan May 9, 2011 DWA3
- [7] Desse J M, Picart P, Tankam P 2012 *Opt. Laser Eng.* **50** 18
- [8] Li J, Peng Z, Tankam P, Song Q, Picart P 2011 *J. Opt. Soc. Am. A* **28** 1291
- [9] Tankam P, Song Q, Karray M, Li J, Desse J M, Picart P 2010 *Opt. Lett.* **35** 2055
- [10] Hirakawa K, Wolfe P J 2008 *IEEE Trans. Image Process.* **17** 1876
- [11] Hao P, Li Y, Lin Z, Dubois E 2011 *IEEE Trans. Image Process.* **20** 709
- [12] Alleysson D, Süsstrunk S, Héroult J 2005 *IEEE Trans. Image Process.* **14** 439
- [13] Dubois E 2005 *IEEE Trans. Image Process.* **12** 847
- [14] Lukac R, Plataniotis K N 2005 *IEEE Trans. Consum. Electron.* **51** 1260
- [15] Gunturk B K, Glotzbach J, Altunbasak Y, Schafer R W, Mersereau R M 2005 *IEEE Signal Process. Mag.* **22** 44
- [16] Schnars U, Jüptner W 2005 *Digital Holography* (1st Edn.) (Berlin: Springer) p44
- [17] Gonzalez R C, Woods R E, Eddins S L 2003 *Digital Image Processing Using MATLAB* (1st Edn.) (New Jersey: Prentice Hall) p108
- [18] Gonzalez R C, Woods R E 2007 *Digital Image Processing* (3rd Edn.) (New Jersey: Prentice Hall) p258
- [19] Yamaguchi I, Zhang T 1997 *Opt. Lett.* **22** 1268
- [20] Garcia-Sucerquia J, Ramirez J A H, Prieto D V 2004 *Proc. SPIE* **5622** 1353
- [21] Kreis T M, Jüptner W 1997 *Opt. Eng.* **36** 2357

# The production mechanism of image periodicity in digital holography and its application in zero-order noise suppression

Lu Ming-Feng Wu Jian<sup>†</sup> Zheng Ming

(*Department of Applied Physics, Beihang University, Beijing 100191, China*)

(Received 27 September 2012; revised manuscript received 11 January 2013)

## Abstract

An interesting fact in digital holography is that the reconstruction process of the hologram recorded by the color camera may result in some periodic distribution of images in the image plane. In this paper we describe the production mechanism, characteristics and application of image periodicity in digital hologram reconstruction. Our study shows that the image distribution characteristics in the hologram reconstruction are strongly dependent on the option of RGB sampling mode due to a color filter array being used in the CCD camera, and the relevant demosaicing process of the sampling array reconstruction. The image and the dc noise from the hologram reconstruction may be of different distribution patterns due to the modulation function in the inverse Fourier transform of a full monochromatic sampling array (MSA) with demosaicing. Thus, this work reveals the potential relationship between the demosaicing algorithm for a full MSA reconstruction, the sampling frequency in the hologram recording, and the image periodicity in the hologram reconstruction. Finally the application of the image periodicity in zero-order noise suppression is discussed.

**Keywords:** digital hologram, image periodicity, zero-order noise

**PACS:** 42.40.Jv, 07.05.Pj

**DOI:** 10.7498/aps.62.094207

---

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: jwu2@buaa.edu.cn