

基于时分复用的多平面彩色全息显示

郑华东^{1,2*}, 王震¹, 彭俊昌¹¹上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200444;²新型显示技术及应用集成教育部重点实验室, 上海 200072

摘要 深度分割复用(DDM)是一种常用的生成彩色纯相位全息图的方法,在重建单个彩色图像时能够取得良好的效果,但是在重建多平面彩色图像时,会不可避免地出现再现质量差和串扰的现象。提出一种基于时分复用生成多平面彩色纯相位全息图的迭代方法,该方法基于Gerchberg-Saxton(GS)算法,在记录全息图时,对每个通道平面施加幅度约束,重复此过程,彩色图像的红(R)、绿(G)和蓝色(B)通道信息被分别记录在三个纯相位全息图中。在再现时,RGB三色通道在相同的距离处重合,重建出目标彩色图像。展示了1幅、3幅和5幅彩色图像的重建结果,与DDM方法相比,所提方法明显提高了重建彩色图像的质量水平,有效避免了不同通道平面之间的串扰。数值模拟和光电再现均证明了所提方法的有效性。

关键词 深度分割复用; 纯相位全息图; Gerchberg-Saxton算法; 时分复用

中图分类号 O438 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/AOS231387

1 引言

显示技术对人类获取信息来说非常重要,在显示技术中,全息显示被认为是最有影响力的显示技术,因为它可以重建真实或虚拟场景的所有信息,并且不会带来视觉疲劳^[1]。彩色全息显示是一种可以记录和再现原始物体颜色和三维信息的重要技术^[2-3]。相比于单色全息图,彩色全息图可以反映物体的真实信息,所以应用更加广泛。

在过去的几十年中,由于相关技术的进步,许多著名的光学技术重新成为人们关注的焦点,其中,硅基液晶空间光调制器(SLM)可以精确控制光场^[4],从而实现以前无法实现的广泛应用。这些应用包括超分辨率显微镜^[5-6]、光学加密^[7-8]、光学捕获^[9-11]和神经元光刺激^[12-13]。目前,用于实现这种光场控制的主要方法是将SLM设备与计算机生成全息(CGH)技术相结合。SLM可以控制入射光束的幅度或相位。然而,没有能够实现复振幅调制的设备。为了解决这一限制,利用CGH方法将所需的复杂光场编码为纯相位或振幅全息图。然而,与相位编码相比,振幅编码产生的全息图的衍射效率更低。出于这个原因,用于光场控制的主要方法是相位调制,它可以明显提高衍射效率和重建精度。

在用于生成纯相位全息图的方法中,研究人员提出了基于Gerchberg-Saxton(GS)算法的迭代方法及其改进方法^[14-16]。GS算法是一种生成相位全息图的迭代计算方法,该方法将相位全息图通过傅里叶变换,之后在每个平面中施加约束并重复该过程,直到获得令人满意的全息图。原始的GS算法只能产生二维物体的相位全息图,而且仅限于全息图的傅里叶平面。后来经过改进,如迭代菲涅耳算法,便没有了这种限制^[17],从而能够生成在任何平面中再现振幅约束的相位全息图。在原有GS算法的基础上,通过引入多个平面的聚焦透镜因子,有学者提出3DGS算法来再现多个平面。2005年,Makowski等^[18]提出了一种新的生成多平面纯相位全息图的迭代方法,并将该方法扩展到三个平面,即两个物面和一个全息图本身。2019年,Zhou等^[19]提出了一种动态补偿GS(DCGS)算法,有效提高了全息显示中多平面重建的质量。2022年,Zheng等^[20]研究了一种用于全彩色全息显示的动态补偿深度分割复用(DDM)方法,该算法在迭代过程中给每个平面的复振幅加入一个动态补偿因子,有效地平衡了全彩色图像三通道的重建质量水平。这种方法在重建单个彩色图像时有良好的效果,但是在重建多个彩色平面时,会出现成像质量不佳以及不同通道之间串扰的问题。为此,提出一种基于时分复用生成多平

收稿日期: 2023-08-10; 修回日期: 2023-09-28; 录用日期: 2023-10-21; 网络首发日期: 2023-11-01

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB2802200)、国家自然科学基金(61875115, 62005154)、上海市自然科学基金(20ZR1420500)

通信作者: *bluenote2008@shu.edu.cn

面彩色纯相位全息图的方法,在编码全息图时,解决了多个彩色平面不同通道之间距离过近的问题,明显提高了彩色图像的重建质量,有效避免了不同平面之间的串扰问题。

2 原理和方法

基于动态补偿的DDM方法在编码时将图像的红

(R)、绿(G)和蓝(B)再现像设置为不同的再现距离,并记录在一张全息图里,如图1所示。在一次迭代过程中,为每个物平面的复振幅分布加入一个动态补偿因子,这样可以有效平衡彩色平面中三色通道的重建质量水平。在重建彩色图像时,利用红、绿和蓝色激光束同时照射SLM,从而实现红、绿和蓝色通道再现像在同一深度的重合。

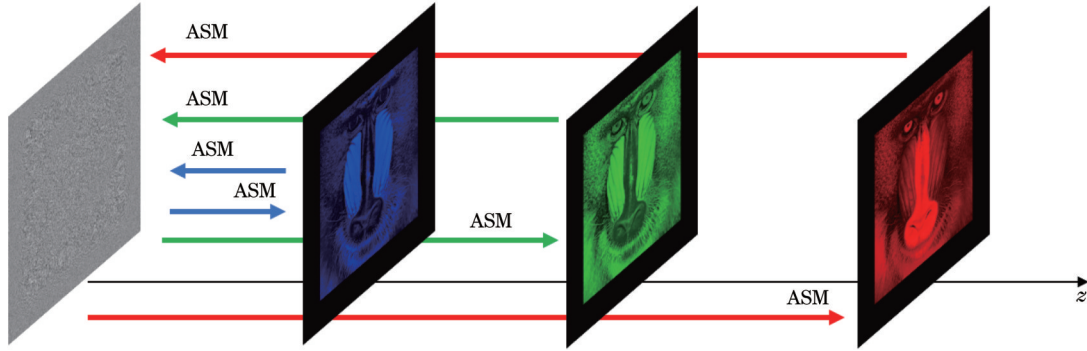


图1 基于DDM的纯相位全息图生成方案(ASM代表角谱传播, z 代表重建距离)

Fig. 1 Phase-only hologram generation scheme based on DDM (ASM represents angular spectrum propagation, and z represents the reconstructed distance)

引入相关系数 C 来评价图像的重建质量水平,表示为

$$C = \frac{\sum_M \sum_N (I_o - \bar{I}_o)(I_r - \bar{I}_r)}{\sqrt{\sum_M \sum_N (I_o - \bar{I}_o)^2} \cdot \sqrt{\sum_M \sum_N (I_r - \bar{I}_r)^2}}, \quad (1)$$

式中: I_o 为图像; I_r 为重建图像; \bar{I}_o 和 \bar{I}_r 是相应图像的平均值; M 和 N 为图像的尺寸大小。 C 值在0到1之间, C 值越大,图像的重建质量水平越高。

在某次迭代过程中,波前传播到蓝色通道平面的复振幅表达式为

$$L^B = [\varphi \cdot K^B(x, y) + (1 - \varphi) \cdot M^B(x, y)] \cdot \exp(j \cdot \phi), \quad (2)$$

式中: $K^B(x, y)$ 为波前传播到蓝色通道平面时的振幅分布; $M^B(x, y)$ 为蓝色通道的目标振幅; ϕ 是相位分布; φ 是动态补偿因子,取值在0到1之间。

添加的动态补偿因子与重建彩色图像三色通道的相关系数之间的关系可以表示为

$$\varphi_{i+1}^R = \varphi_i^R + (C_i^R - C_i^{\text{avg}})/1000, \quad (3)$$

$$\varphi_{i+1}^G = \varphi_i^G + (C_i^G - C_i^{\text{avg}})/1000, \quad (4)$$

$$\varphi_{i+1}^B = \varphi_i^B + (C_i^B - C_i^{\text{avg}})/1000, \quad (5)$$

式中: φ_i^R 、 φ_i^G 和 φ_i^B 以及 φ_{i+1}^R 、 φ_{i+1}^G 和 φ_{i+1}^B 分别为在第*i*和(*i*+1)次迭代过程中三色通道平面上的补偿因子; C_i^R 、 C_i^G 和 C_i^B 为第*i*次迭代过程中三色通道再现像的相关系数; C_i^{avg} 为 C_i^R 、 C_i^G 和 C_i^B 的平均值。

补偿因子的动态调整流程如图2所示。在每一次迭代的过程中动态地调整各个通道图像上的补偿因子的值,使得最终对应再现像的相关系数能够趋于同一

个值附近。

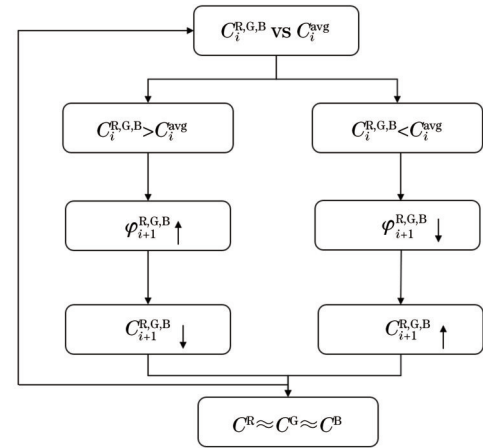


图2 补偿因子的动态调整流程图

Fig. 2 Flow chart of dynamic adjustment of compensation factor

基于时分复用的彩色纯相位全息图生成方法与DDM方法不同,它在编码时将彩色图像的红、绿和蓝色再现像设置为相同的距离,其三色通道分别被记录在三张全息图里,如图3所示。再现时,在三个相同的距离处重建出彩色平面的三色通道,进而获得彩色再现像。

基于时分复用生成彩色纯相位全息图,在第*i*次迭代过程中,从全息图传播到蓝色通道的过程可以描述为

$$F_i^B(x, y) = \text{ASM}[H_i^B(x, y)] = A_i^B(x, y) \cdot \exp[j \cdot \alpha_i^B(x, y)], \quad (6)$$

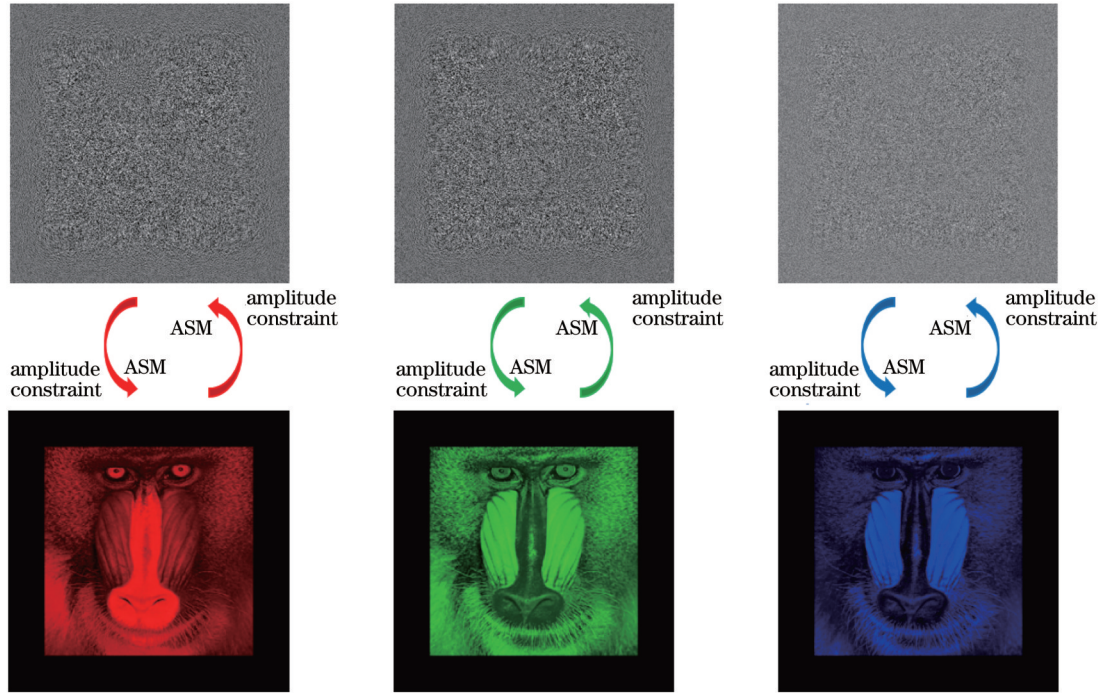


图 3 基于时分复用的单平面彩色纯相位全息图生成方案

Fig. 3 Generation scheme of single-color phase-only hologram based on time-division multiplexing

$$G_i^b(x, y) = O_i^b(x, y) \cdot \exp[j \cdot \alpha_i^b(x, y)], \quad (7)$$

$$UH_i^b(x, y) = \text{ASM}[G_i^b(x, y)] = E_i^b(x, y) \cdot \exp[j \cdot \alpha_i^b(x, y)], \quad (8)$$

$$H_{i+1}^b = \exp[j \cdot \alpha_{i+1}^b(x, y)], \quad (9)$$

式中: $\text{ASM}(\cdot)$ 表示角谱传播; $H_i^b(x, y)$ 是传播到全息图平面的经过约束后的复振幅; $F_i^b(x, y)$ 是从全息图平面传播到蓝色通道的复振幅分布, $A_i^b(x, y)$ 是其振幅分布, j 是虚数单位, $\alpha_i^b(x, y)$ 是其相位分布; $G_i^b(x, y)$ 是在蓝色通道平面经过振幅约束后的复振幅; $O_i^b(x, y)$ 是蓝色通道的幅度; $UH_i^b(x, y)$ 是蓝色通道传播到全息图平面的复振幅分布, $E_i^b(x, y)$ 是其振幅分布; $H_{i+1}^b(x, y)$ 是传播到全息图平面的经过约束后的复振幅。将其代入 $H_i^b(x, y)$, 进入下一次迭代, 重复此过程。

在编码时, 全息图与平面之间的传播为角谱传播。一般情况下, 在距离 z 处, 根据角谱传播理论公式, 有

$$U(x, y) = F^{-1} \left\{ F \left\{ A(x, y) \exp[j\alpha(x, y)] \right\} \times \exp \left[jkz \sqrt{1 - (\lambda f_x)^2 - (\lambda f_y)^2} \right] \right\}, \quad (10)$$

式中: $A(x, y)$ 为输入的振幅; $\alpha(x, y)$ 为输入的相位; F 和 F^{-1} 为傅里叶变换和傅里叶逆变换; k 是波数, 其值为 $\frac{2\pi}{\lambda}$, 其中, λ 为激光的波长; z 为传播的距离; f_x 和 f_y 为空间频率。

在使用角谱传播时, 其计算距离具有局限性。当衍射场的宽度 $L = \Delta p \times n$ (Δp 为 SLM 单个像素的尺寸; n 为采样数) 时, 有效距离为

$$z \leq L \sqrt{4\Delta p^2 \lambda^{-2} - 1}. \quad (11)$$

3 数值模拟

3.1 单幅彩色图像重建

为了验证算法的有效性以及比较两种方法的优缺点, 使用图 4(a) 所示的全彩色图像 (图像尺寸为 $1080 \text{ pixel} \times 1080 \text{ pixel}$) 进行数值模拟, 其中目标图像的尺寸为 $800 \text{ pixel} \times 800 \text{ pixel}$, 剩下周围部分用 0 填充。使用配备 Intel CPU (central processing unit, i7-9750H@2.6 GHz) 和 16 GB 内存的计算机计算全息图, 分别对两种方法进行 100 次迭代, 设置两种生成全息图方法重建彩色图像的距离为 10 cm。

在全息显示技术中, 激光散斑往往会降低全息图再现像的质量, 使用时间平均法可以将多幅全息图再现像叠加, 从而抑制散斑噪声^[21-22]。由于在生成全息图的过程中添加了不同的初始随机相位, 当按照一定的时间序列再现这些全息图的时候, 所得到的再现像的有效信息是相同的, 但它们的噪声分布是有区别的。最后通过时间积分效应将再现像的强度信息进行叠加, 从而抑制散斑噪声。在本研究中, 计算了同一目标图像的 10 幅全息图 ($T=10$), 然后通过时间平均法来达到抑制噪声的目的。

图 4(b)~(e) 为使用两种方法重建单平面的数值再现结果, 从图 4(b)、(d) 的重建结果可以看出: 两种

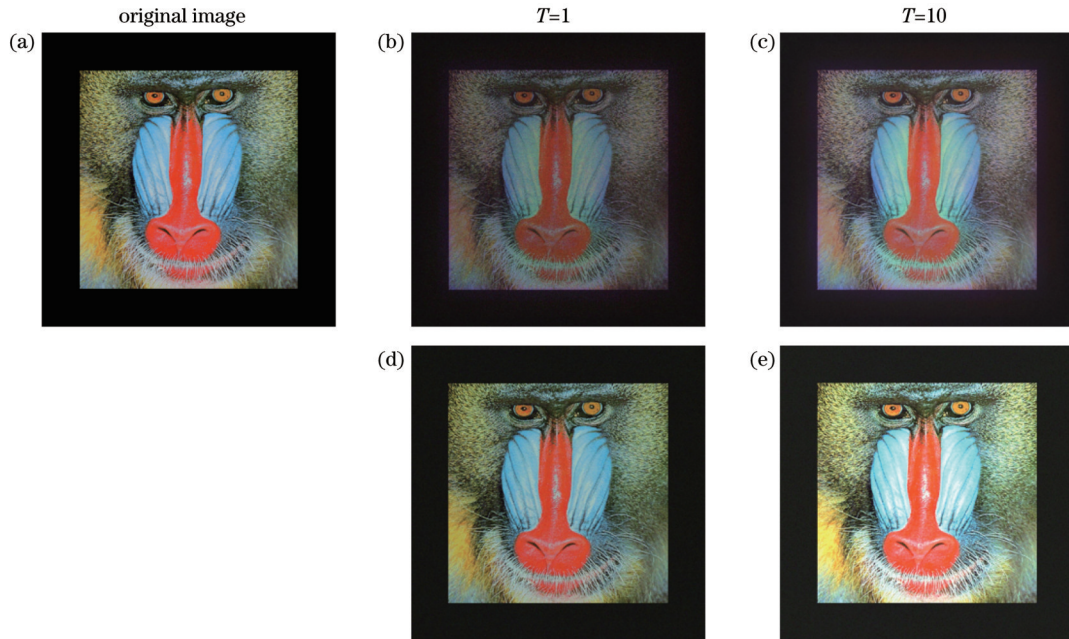


图 4 两种方法重建单平面的数值再现结果。(a)原图;(b)~(c)使用DDM方法的数值再现结果;(d)~(e)使用时分复用方法的数值再现结果

Fig. 4 Numerical reconstruction results of single-color plane by using two methods. (a) Original image; (b) - (c) numerical reconstruction results by using DDM method; (d) - (e) numerical reconstruction results by using time-division multiplexing method

方法均可以较好地重建出原始彩色图像,但是使用DDM方法重建的原始彩色图像出现了颜色偏差,这可能是在记录时全息图记录了不同颜色通道的图像所导致的;而使用时分复用方法可以很好地重建出原始彩色图像。图4(c)、(e)是两种方法使用时间平均法($T=10$)的数值重建结果,可以看出,该方法进一步增强了彩色图像的重建质量,重建质量要高于图4(b)、(d)所示结果。

图5为两种方法重建图像相关系数的比较。从图

5(a)可以看出:DDM方法在编码时加入了动态补偿因子,最终重建彩色图像三色通道的相关系数趋于同一个值附近,为0.9115;而使用时分复用方法的相关系数同样也趋于同一个值附近,为0.9946,比DDM方法相关系数高。对于重建单平面彩色图像,所提方法取得了较好的重建效果。尽管对两种方法来说,彩色图像三色通道的相关系数最终趋于同一个值附近,但是从图4可以看出,时分复用方法对于彩色图像的重建质量是更好的。

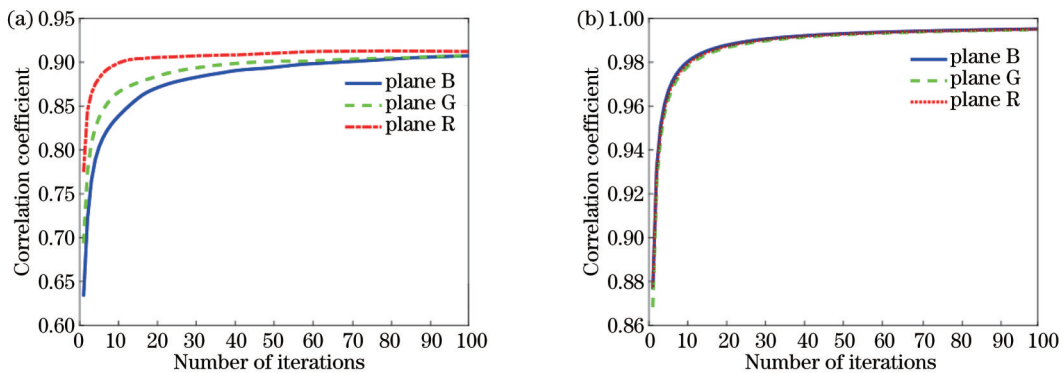


图 5 两种方法重建单平面图像的相关系数比较。(a)DDM方法;(b)时分复用方法

Fig. 5 Comparison of correlation coefficients of single-plane reconstruction by using two methods. (a) DDM method; (b) time-division multiplexing method

3.2 三幅彩色图像重建

将DDM方法和时分复用方法应用到三幅彩色图像重建中,需要合理设置不同平面之间的距离以避免串扰。为此,对于DDM方法,为了尽可能增大不同通

道平面之间的距离以避免串扰,将再现的三个平面距离设置为5.0、10.0、20.5 cm;对于时分复用方法,将再现的三个彩色图像距离设置为10、15、20 cm。对于三个重建图像,根据重建的距离从近到远将其命名为

平面 Q、平面 U、平面 V。

特别地,对于 DDM 方法来说,假设在全息记录的过程中使用波长为 λ_1 的激光进行记录,记录的距离为 z_1 ,而在全息再现的过程中,使用波长为 λ_2 的激光进行再现时,再现像的再现距离为 z_2 ,并且此时再现像的大小尺寸保持不变。则记录的波长 λ_1 和距离 z_1 与再现的波长 λ_2 和距离 z_2 可以表示为

$$z_2:z_1 = \frac{1}{\lambda_2}:\frac{1}{\lambda_1} \quad (12)$$

图 6 为两种方法的数值模拟结果。图 6(d)~(f)

是 DDM 方法经过 100 次迭代后的再现结果,可以看出,DDM 方法在再现多平面彩色图像时出现了严重的串扰,在目标平面上出现了其他平面的信息,两者重叠导致重建质量较差。图 6(g)~(i)是所提方法的三幅彩色图像再现结果,可以看出,不仅再现图像质量明显高于 DDM 方法,而且没有出现串扰现象,表明了所提方法的优越性。图 6(j)~(o)为两种方法经过时间平均法 ($T=10$) 优化后的数值再现结果,相对于单幅图像,经过 10 幅图像叠加后的三幅图像的数值再现结果质量明显提高。

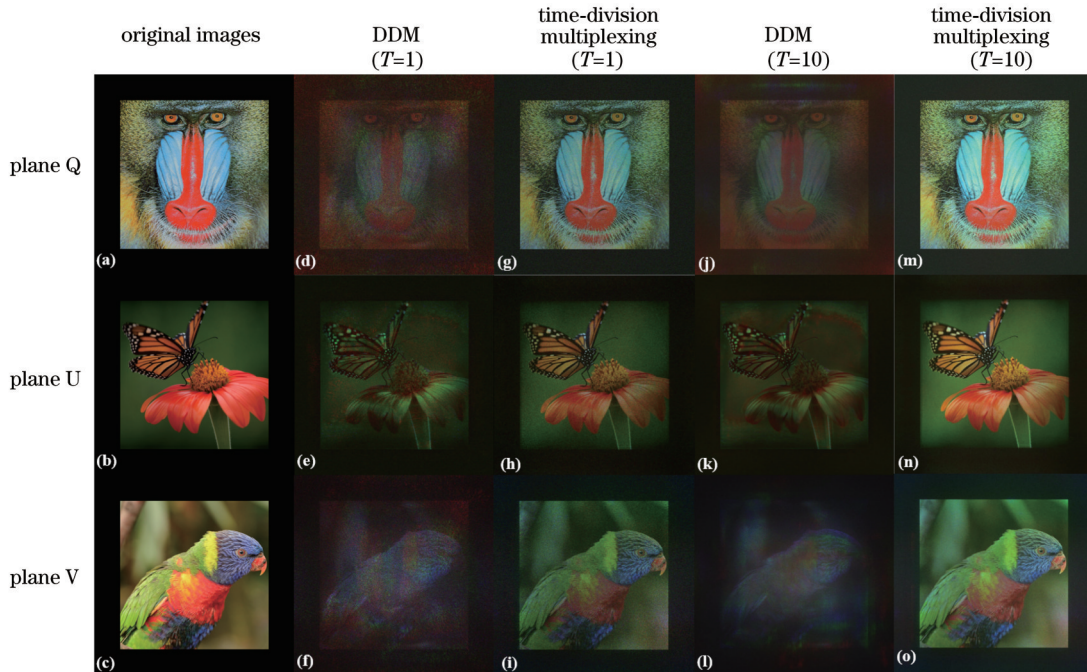


图 6 两种方法重建三平面的数值再现结果。(a)~(c)原图;(d)~(f) DDM 方法 ($T=1$);(g)~(i)时分复用方法 ($T=1$);(j)~(l) DDM 方法 ($T=10$);(m)~(o)时分复用方法 ($T=10$)

Fig. 6 Numerical reconstruction results of three planes by using two methods. (a)~(c) Original images; (d)~(f) DDM method ($T=1$); (g)~(i) time-division multiplexing method ($T=1$); (j)~(l) DDM method ($T=10$); (m)~(o) time-division multiplexing method ($T=10$)

图 7 为两种方法经过 100 次迭代后重建的三幅彩色图像的相关系数曲线。图 7(a)为 DDM 方法重建图

像的相关系数,分别为 0.6702、0.6721、0.6658。由于在迭代过程中加入了动态补偿因子,所以相关系数最

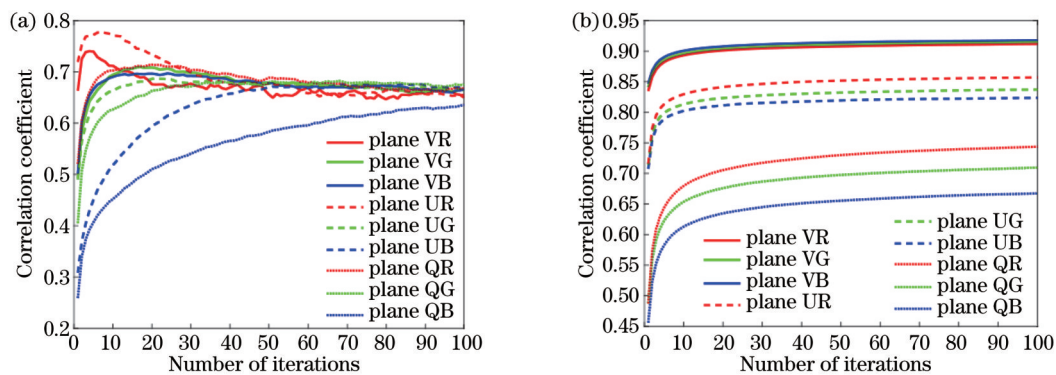


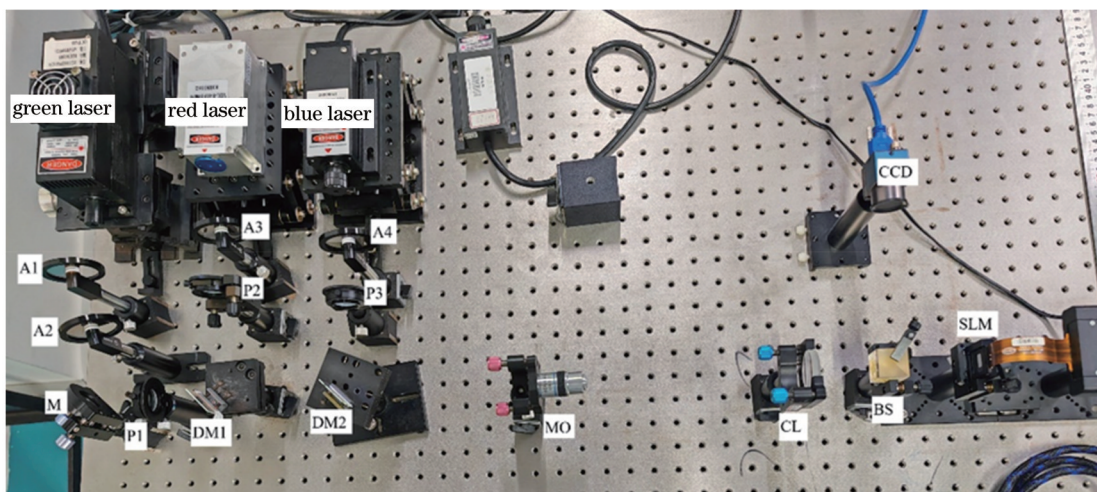
图 7 两种方法重建三平面的相关系数比较。(a) DDM 方法;(b)时分复用方法

Fig. 7 Comparison of correlation coefficients of three planes reconstruction by using two methods. (a) DDM method; (b) time-division multiplexing method

终会趋于同一个值附近。图 7(b) 为时分复用方法重建图像的相关系数, 分别为 0.9188、0.8467、0.7183。可以看出: 平面 Q 的重建质量最高, 并且其三色通道的相关系数也趋于同一个值附近; 然而另外两个平面彩色通道的相关系数并不平衡, 这可能会导致彩色图像的颜色在重建时具有一定的偏差。但对于每个通道的相关系数来说, 所提方法的 C 值仍然高于 DDM 方法, 因此所提方法的三个彩色图像的重建质量依旧高于 DDM 方法。

4 光电再现

为了进一步验证所提方法的有效性, 进行了光电再现实验。光学系统如图 8 所示, 使用红光波长为 660 nm、绿光波长为 532 nm、蓝光波长为 473 nm 的三色激光分别获取红绿蓝三通道的全息图。全息图的分辨率为 1080 pixel×1080 pixel, 像素尺寸大小为 8 μm。



P1-P3: polarizer; A1-A4: attenuator; M: mirror; DM1, DM2: dichroic mirror; MO: achromatic objective; CL: collimating lens; BS: beam splitter

图 8 彩色全息显示系统的光路图

Fig. 8 Optical path diagram of the color holographic display system

通过合理设置不同平面之间的距离, 所提方法可以再现更多的彩色平面, 并且此时 DDM 方法已经无法满足要求。为此, 进行了 5 幅彩色图像的数值模拟和光电再现实验, 结果如图 11 所示。这 5 幅图像的再现距离分别为 4、8、12、16、20 cm。图 11 第 2 列与第 4 列为不使用时间平均法的数值再现和光电再现结果; 第 3 列与第 5 列为使用了时间平均法的数值再现和光电再现结果, 时间平均法有效抑制了散斑噪声。可以看出, 对于重建的 5 幅彩色图像, 所提方法可以保持较高的再现质量, 虽然部分平面也出现了串扰, 但是彩色图像的大部分信息基本被重建出来, 因此, 所提方法是有效的。

5 讨论

所提方法在重建单幅彩色图像和三幅彩色图像时

SLM 使用的是纯相位液晶空间光调制器, 分辨率为 1920 pixel×1080 pixel, 刷新率为 60 Hz。红、绿和蓝色激光束经过准直后, 通过反射镜合成为一束光, 并照射到 SLM 上, 用于再现彩色全息图, 再现的图像用彩色电荷耦合器件 (CCD) 相机记录。

图 9 和图 10 分别为两种方法的单幅和三幅彩色平面光电再现结果, 可以看出, 无论是单幅还是三幅彩色图像, 经过光电再现后所提方法的图像质量要远高于 DDM 方法。这是因为 DDM 方法在重建单幅彩色图像编码时需要记录三个不同距离的颜色通道信息; 同样地, 重建三幅彩色图像时, DDM 方法需要记录 9 个不同距离的颜色通道信息。这极大地增加了不同通道平面之间出现串扰的可能性。而对于所提方法, 重建三幅彩色图像时, 则只需要在三个不同的距离处记录所有的通道信息, 这样可以有效避免串扰, 并且提高重建图像的质量。

展现出了优异的表现, 但是在重建 5 幅彩色图像时, 虽然依然保持了较高的再现质量, 但是不可避免会出现串扰现象。这是因为在重建多个彩色平面时, 物面的串扰主要来源于其他平面的散焦图像, 在对多个平面使用 3DGS 算法时, 对每个平面进行幅度替换会导致图像信息的丢失。不考虑平面之间的影响在迭代过程中容易陷入局部最优解。后续会努力对算法进行改进, 将相邻平面之间的干扰考虑进去, 最终通过全局优化来进一步减少多个重建平面间的串扰。

DDM 方法重建彩色图像的所有通道距离是依据式 (12) 计算出来的, 所以平面之间的距离与所提方法不同; 并且相邻两个平面之间的距离越小, 串扰现象越严重。在本实验中, 应尽量选择使两种方法重建的彩色图像质量最好的重建距离, 而不是选择相同的重建距离来进行对比实验。对重建三幅彩色图像来说, 从

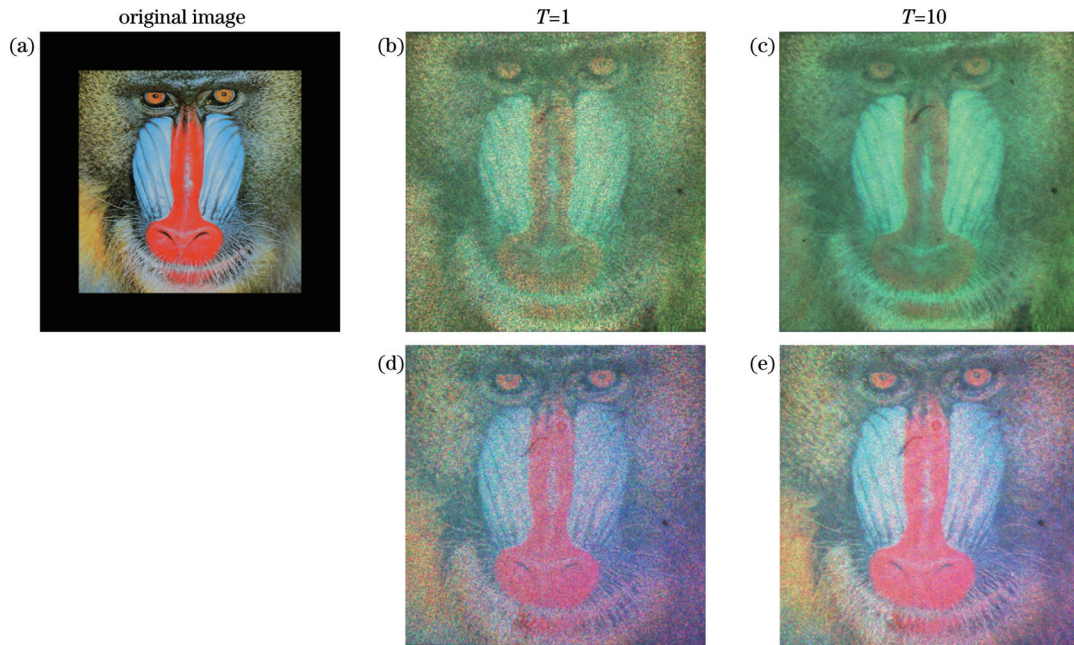


图9 两种方法重建单幅彩色图像的光电再现结果。(a)原图;(b)~(c) DDM方法;(d)~(e)时分复用方法
Fig. 9 Optical reconstruction results of single-color image by using two methods. (a) Original image; (b)~(c) DDM method;
(d)~(e) time-division multiplexing method

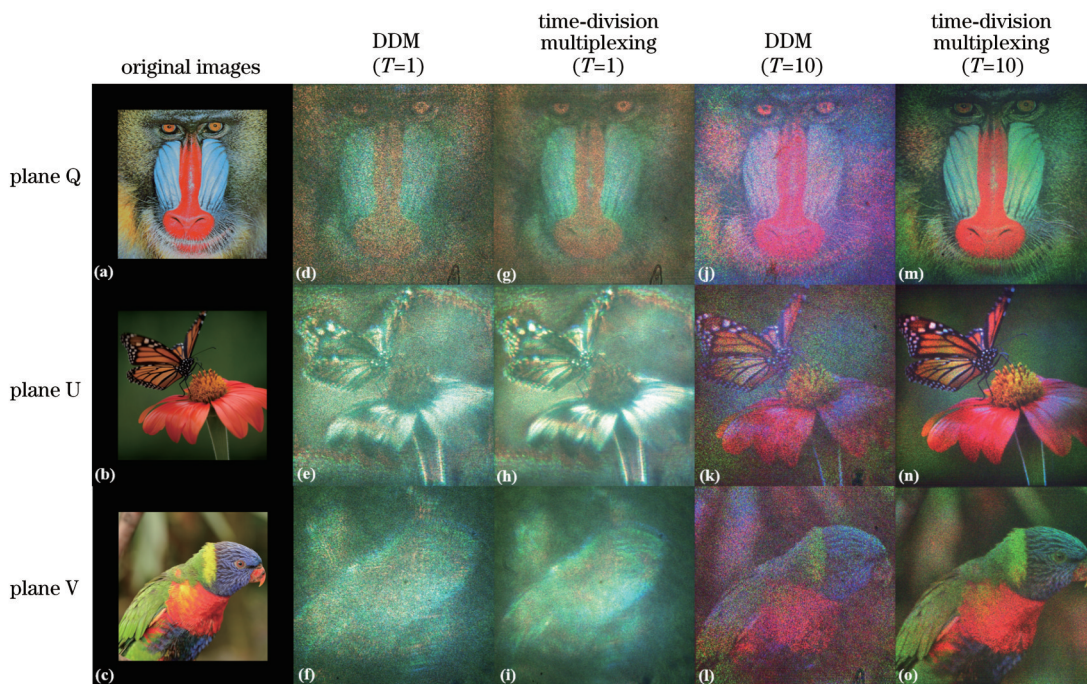


图10 两种方法重建三平面的光电再现结果。(a)~(c)原图;(d)~(f) DDM方法 ($T=1$);(g)~(i) DDM方法 ($T=10$);(j)~(l)时分复用方法 ($T=1$);(m)~(o)时分复用方法 ($T=10$)

Fig. 10 Optical reconstruction results of three planes by using two methods. (a)~(c) Original images; (d)~(f) DDM method ($T=1$);
(g)~(i) DDM method ($T=10$); (j)~(l) time-division multiplexing method ($T=1$); (m)~(o) time-division multiplexing method ($T=10$)

所提方法的数值再现结果可以看出,有两幅图像的通道的相关系数并没有趋于平衡,其红、绿和蓝色通道的相关系数具有一定的差值,在重建彩色图像时,会出现一定程度的色差。在重建多个彩色平面时,可以通过优化算法使各个彩色平面的三色通道的相关系数趋于平衡。

6 结 论

提出了一种用于重建多平面彩色图像的纯相位全息图生成方法,在该方法进行全息记录时,彩色图像的三个颜色通道分别被记录在三个全息图中。与传统的DDM方法相比,所提方法在记录时通过合理设置不

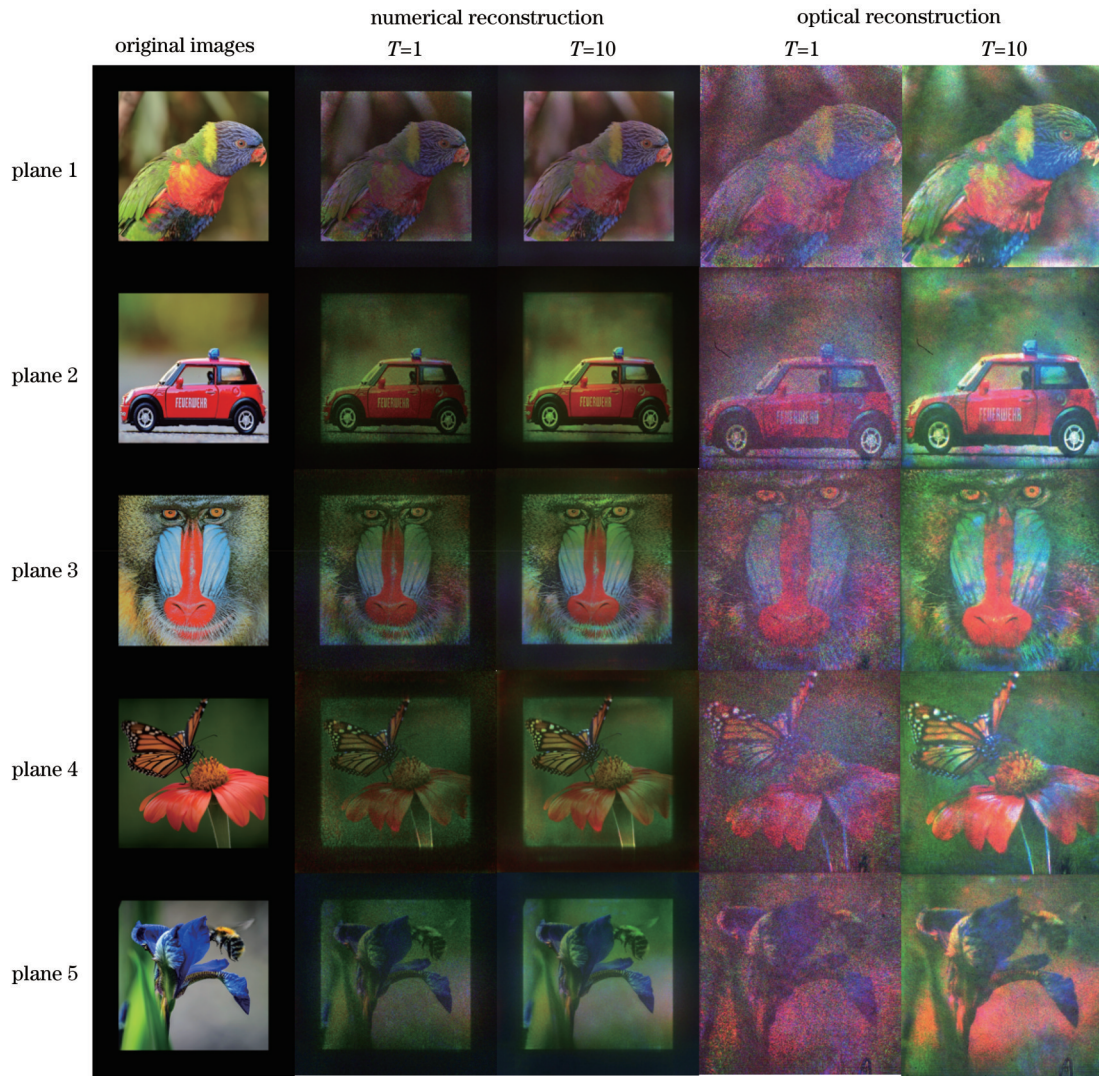


图 11 基于时分复用方法重建 5 幅彩色图像的数值再现与光电再现结果

Fig. 11 Numerical and optical reconstruction results of five color images based on time-division multiplexing method

同平面之间的距离,有效避免了不同平面之间的串扰现象;并且在重建多平面彩色图像时依然可以保持较高的质量水平。数值模拟与光学实验结果都表明了所提方法的新颖性与有效性。

参 考 文 献

- [1] Urey H, Chellappan K V, Erden E, et al. State of the art in stereoscopic and autostereoscopic displays[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(4): 540-555.
- [2] 刘娟, 皮大普, 王涌天. 实时全息三维显示技术研究进展[J]. 光学学报, 2023, 43(15): 1509001.
Liu J, Pi D P, Wang Y T. Research progress of real-time holographic 3D display technology[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(15): 1509001.
- [3] 王迪, 侯页好, 黄倩, 等. 彩色计算全息 3D 显示技术[J]. 中国激光, 2022, 49(19): 1909001.
Wang D, Hou Y H, Huang Q, et al. Color computer-generated holographic 3D display technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(19): 1909001.
- [4] Zhang Z C, You Z, Chu D P. Fundamentals of phase-only liquid crystal on silicon (LCOS) devices[J]. Light: Science & Applications, 2014, 3(10): e213.
- [5] Hussain A, Martínez J L, Lizana A, et al. Super resolution imaging achieved by using on-axis interferometry based on a spatial light modulator[J]. Optics Express, 2013, 21(8): 9615-9623.
- [6] Hussain A, Amin T, Kuang C F, et al. Simple fringe illumination technique for optical superresolution[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2017, 34(5): B78-B84.
- [7] Zea A V, Ramírez J F B, Torroba R. Secure real-time generation and display of color holographic movies[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2019, 122: 239-244.
- [8] Liu S, Guo C L, Sheridan J T. A review of optical image encryption techniques[J]. Optics & Laser Technology, 2014, 57: 327-342.
- [9] Jiao S M, Zhou C Y, Shi Y S, et al. Review on optical image hiding and watermarking techniques[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 109: 370-380.
- [10] Chen H, Guo Y F, Chen Z Z, et al. Holographic optical tweezers obtained by using the three-dimensional Gerchberg-Saxton algorithm[J]. Journal of Optics, 2013, 15(3): 035401.
- [11] Kim H, Kim M, Lee W, et al. Gerchberg-Saxton algorithm for fast and efficient atom rearrangement in optical tweezer traps[J]. Optics Express, 2019, 27(3): 2184-2196.
- [12] Anselmi F, Ventalon C, Bague A, et al. Three-dimensional imaging and photostimulation by remote-focusing and

- holographic light patterning[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011, 108(49): 19504-19509.
- [13] Nikolenko V, Watson B O, Araya R, et al. SLM microscopy: scanless two-photon imaging and photostimulation with spatial light modulators[J]. Frontiers in Neural Circuits, 2008, 2: 5.
- [14] Gerchberg R W, Saxton W O. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures [J]. Optik, 1972, 35(2): 237-246.
- [15] 王化宾, 何渝, 赵立新. 基于改进 Gerchberg-Saxton 算法的全息双面光刻方法[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(16): 1609001.
Wang H B, He Y, Zhao L X. Holographic double-sided photolithography based on improved Gerchberg-Saxton algorithm [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(16): 1609001.
- [16] Wu Y, Wang J, Chen C, et al. Adaptive weighted Gerchberg-Saxton algorithm for generation of phase-only hologram with artifacts suppression[J]. Optics Express, 2021, 29(2): 1412-1427.
- [17] Dorsch R G, Lohmann A W, Sinzinger S. Fresnel ping-pong algorithm for two-plane computer-generated hologram display[J]. Applied Optics, 1994, 33(5): 869-875.
- [18] Makowski M, Sypek M, Kolodziejczyk A, et al. Three-plane phase-only computer hologram generated with iterative Fresnel algorithm[J]. Optical Engineering, 2005, 44(12): 125805.
- [19] Zhou P C, Li Y, Liu S X, et al. Dynamic compensatory Gerchberg-Saxton algorithm for multiple-plane reconstruction in holographic displays[J]. Optics Express, 2019, 27(6): 8958-8967.
- [20] Zheng H D, Zhou C J, Shui X H, et al. Computer-generated full-color phase-only hologram using a multiplane iterative algorithm with dynamic compensation[J]. Applied Optics, 2022, 61(5): B262-B270.
- [21] Frieden B. Laser speckle and related phenomena[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1985, 20(12): 1533.
- [22] Zheng H D, Wang T, Dai L M, et al. Holographic imaging of full-color real-existing three-dimensional objects sequential with computer-generated kinoforms[J]. Chinese Optics Letters, 2011, 9(4): 040901.

Multiplane Color Holographic Display Based on Time-Division Multiplexing

Zheng Huadong^{1,2*}, Wang Zhen¹, Peng Junchang¹

¹*School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China;*

²*Key Laboratory of Advanced Display and System Application, Ministry of Education, Shanghai 200072, China*

Abstract

Objective Display technology is essential for human beings to obtain information. In display technology, holographic display is considered the most influential display technology, as it can reconstruct all the information of real or virtual scenes without visual fatigue. Color holographic display is a significant technology that can record and reconstruct the color and three-dimensional (3D) information of the original object. Compared with monochrome holograms, color holograms can reflect the real information of objects, having a more wide application. In this paper, we propose an iterative method for generating multiplane color phase-only holograms based on time-division multiplexing. This method is based on the Gerchberg-Saxon (GS) algorithm. When holograms are recorded, amplitude constraints are imposed on each channel plane, which is repeated. The red (R), green (G), and blue (B) channel information of color images is recorded in three phase-only holograms respectively. During reconstruction, RGB channels overlap at the same distances, and the target color images are reconstructed. The reconstruction results of one, three, and five color images are displayed. Compared with the deep-division multiplexing (DDM) method, the quality of reconstructed color images by the proposed method is improved, and the crosstalk between different channel planes is effectively avoided. Numerical simulation and optical reconstruction results prove the effectiveness of the proposed method.

Methods The red, green, and blue channels of color images are set to the same distances when encoding in this study. When recording, we set the amplitude of the initial holograms of three-color channels as a constant of 1 and the phase as a random. When the wavefront propagates to the object plane through angular spectrum diffraction, its amplitude information is replaced by the amplitude of the object plane. The amplitude constraint is relaxed by applying a small nonzero value to the zero-intensity region of the object plane, and the phase is preserved. The wavefront continues to propagate backward, and the amplitude in the hologram plane is replaced by a constant of 1. The phase is preserved, and the process is repeated. Eventually, their three-color channel information is recorded in three holograms respectively. When reconstructing, the three-color channels of the color images are reconstructed at the same distances, and then the color images are reconstructed. When the wavefront propagates to the object plane through angular spectrum diffraction in holographic recording, a small nonzero value is applied to it to relax the amplitude constraint of the object plane. In holographic reconstruction, the original color images are reconstructed at a set distance. It can effectively reduce the

speckle noise of the target color images by padding with zeros to the original images. As laser speckle often reduces the quality of the reconstructed images in optical experiments, we adopt the time averaging method. Through the time integration effect, the intensity information of reconstructed images of multiple holograms is superimposed to suppress speckle noise. For the optical reconstruction system, the chromatic aberration caused by the objective lens may lead to different image sizes in red, green, and blue channels. In this study, we construct an optical system with achromatic optical elements to avoid the problem of inconsistent size and distance of reconstructed images.

Results and Discussions Our proposed method shows excellent performance in both numerical simulation and optical experiment (Fig. 6). The proposed method and DDM method can reconstruct the single-color image well. However, the original color image reconstructed by the DDM method has color deviation, which may be caused by the hologram recording images of different color channels during recording. The original color image can be reconstructed well by our method. We introduce the correlation coefficient as an index to measure the quality of color image reconstruction. The correlation coefficient values of our proposed method in reconstructing single and multiple color images are higher than those of the DDM method (Fig. 7). The DDM method reconstructing multiplane color images is very limited. When recording holograms, we need to keep multiple color channels at different distances, whereas this work will be very hard within a limited calculation distance. Eventually, crosstalk will inevitably occur between different channels, leading to color deviation. Because reconstructing n color images will eventually reconstruct $n \times 3$ channels, the possibility of crosstalk between different channels greatly increases. However, when we reconstruct n color images, only n channels will be reconstructed. Our method can reconstruct more color images, but we need to pay attention to the distance setting between different images to avoid crosstalk.

Conclusions In this paper, we propose a phase-only hologram generation method for reconstructing multiplane color images. In holographic recording, the red, green, and blue color channels of color images are recorded in three holograms respectively, and finally, the original color images are reconstructed at the set distances. The traditional DDM method needs to record multiple information of different color channels when encoding. Therefore, the quality of the reconstructed images is poor and crosstalk occurs. Our method effectively avoids crosstalk between different planes by setting the distance between different planes reasonably during recording. When reconstructing multiplane color images, it can still maintain high quality. The correlation coefficients of our proposed method are significantly higher than that of the DDM method when reconstructing single and three images. Both numerical simulation and optical experiment results show the novelty and effectiveness of our proposed method.

Key words depth-division multiplexing; phase-only holograms; Gerchberg-Saxon algorithm; time-division multiplexing