

深度和波长补偿算法生成彩色计算全息图

赵 锴¹ 黄应清² 蒋晓瑜^{1*} 闫兴鹏¹

¹ 中国人民解放军装甲兵工程学院信息工程系, 北京 100072

² 中国人民解放军装甲兵工程学院训练部, 北京 100072

摘要 针对新查表法(N-LUT)在计算彩色三维场景全息图时,查找表占用的存储空间大且计算速度较慢的问题,提出了深度和波长补偿 N-LUT 算法(DWC-N-LUT)快速生成彩色三维场景的全息图。将组成三维场景的点云分割为具有特定深度的一系列二维图像,并由提前存储的深度补偿因子计算某一深度二维图像红色(R)通道的基元条纹图(PFP),通过平移此 PFP 获取物光点 R 通道在全息面上的复振幅分布。利用波长补偿因子直接得到物光点绿色(G)通道和蓝色(B)通道的复振幅分布。用飞机模型和汽车模型进行的数字模拟实验表明:DWC-N-LUT 法能够准确表现彩色三维场景的颜色和深度信息;物光点的复振幅引入随机相位可以有效降低再现像的相干噪声;DWC-N-LUT 法与 N-LUT 法相比,查找表的存储空间减小了 10 倍以上,计算速度提高了约 22%。

关键词 全息;计算全息;全息显示;彩色显示

中图分类号 O438.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0609007

Color Computer Holography Generated by Depth and Wavelength Compensating Algorithm

Zhao Kai¹ Huang Yingqing² Jiang Xiaoyu¹ Yan Xingpeng¹

¹ *Department of Information Engineering, Academy of Armored Forces Engineering, Chinese People's Liberation Army, Beijing 100072, China*

² *Department of Training, Academy of Armored Forces Engineering, Chinese People's Liberation Army, Beijing 100072, China*

Abstract To solve the problem that the memory space is large and the calculation speed is slow in the novel look up table (N-LUT) method when calculating the color hologram three-dimensional scene. The depth and wavelength compensating N-LUT method (DWC-N-LUT) is proposed to generating color hologram three-dimensional scene fast. The point cloud, which compose three-dimensional scene, are sliced as a series of two-dimensional images with defined depth. The principle fringe pattern (PFP) for red (R) channel corresponding to one depth is obtained according to the pre-stored depth compensating factors. The complex amplitude of object point for R channel is acquired by shifting the PFP. The complex amplitude of object point for G and B channel is directly generated through multiplying that for R channel by wavelength compensating factors. Numerical simulation experiments with an airplane model and a car model indicate that the color and depth of three-dimensional scene can be precisely provided with DWC-N-LUT method. The coherent noise in the reconstruction images can be obviously eliminated by adding random phase to the complex amplitude of object point. The memory space of DWC-N-LUT method is 10 times less than that of N-LUT method, and the computational speed of the proposed method is approximately improved 22% comparing with N-LUT method.

收稿日期: 2015-12-29; **收到修改稿日期:** 2016-02-17

基金项目: 全国优秀博士学位论文作者专项资金(201432)、北京市自然科学基金(4152049)、北京市科技新星计划(Z1511000003150119)

作者简介: 赵 锴(1988—),男,博士研究生,主要从事计算全息三维显示、目标识别技术等方面的研究。

E-mail: zkzhaokai1988@126.com

导师简介: 黄应清(1966—),男,硕士,教授,主要从事信息光学及目标探测与识别等方面的研究。

E-mail: huangyingqing1105@163.com

* **通信联系人.** E-mail: jiangxiaoyu2007@gmail.com

Key words holography; computer holography; holographic displays; color display

OCIS codes 090.1760; 090.2870; 090.2910

1 引 言

全息图记录了三维场景的振幅和相位信息,能够提供所有满足人眼三维感知的视觉因素,所以全息图可以真实再现三维场景^[1-2]。计算全息是全息术与计算机技术相结合的产物,即用计算机来模拟光学全息的物理过程,相对于光学全息,计算全息更加灵活,无论真实存在的或者虚拟的三维场景,只要知道其数学描述,就能够用计算机生成全息图^[1-5]。另外,计算全息是实现真三维动态显示的重要途径^[6]。

点源法(RT)是一种典型的计算全息算法;三维场景被离散为大量的自发光物光点,各个物光点在全息面上的波前相干叠加得到三维场景的复振幅分布。其原理简单,完全模拟光学全息的衍射过程,能够精确再现三维场景的波前信息,但每一个物光点都要执行一次衍射计算,因此计算速度慢^[7-10]。采用图形图像处理单元(GPU)的并行计算能力可以显著提高计算速度,但是该方法依赖计算机硬件,CRT法的计算量并没有改变^[11-13]。查表法(LUT)提前计算所有空间点源的条纹图并存储在一个数据表里,计算三维场景的全息图时直接从数据表读取相应物光点的条纹图叠加即可,因此LUT法可快速生成全息图^[14],但LUT法存在的严重问题是数据表往往占据很大的存储空间,数据表的存储空间会随着点源数目的增多而变大,而且数据表越大查表的速度会变得越慢。Kim等^[15-17]提出了新查表法(N-LUT),每个深度上存储一个基元条纹图(PFP),显著减小了数据表的存储空间。Pan等^[11]提出了分离查表法(S-LUT),用存储的水平调制因子和垂直调制因子计算物光点全息图,虽然减小了存储空间,但生成全息图的过程复杂,且存储空间会随着点源数目的增加而增加。Jia等^[18]提出了压缩查表法(C-LUT),数据表里仅存储二维图像平面的光调制因子,物光点的全息图可以由光调制因子计算生成,数据表的存储空间大大减小。利用PFP的中心对称性,Yang等^[19]提出了线扫描法(LS),只计算和存储PFP上一条扫描线的强度值,再由扫描线获得PFP,从而生成全息图,LS法减小了计算量和存储空间,但是该算法实质属于同轴全息,要用另外的方法消除零级光和共轭像的干扰。2014年,提出了压缩的新查表法(C-NLUT),用提前计算和存储的一个基本PFP和一个深度补偿PFP快速生成三维场景的灰度全息视频^[20]。2015年该研究小组在C-NLUT法的基础上提出了可调色查表法(CT-NLUT)法,实现了彩色全息视频显示,但是C-NLUT法和CT-NLUT法是利用计算机渲染技术获取三维场景某一视角的亮度和深度图像,全息图视频的每一帧再现的是三维场景某一视角的图像,不能表现三维场景的运动视差^[21]。

本文用深度补偿因子和波长补偿因子计算由点云构成的三维场景的彩色全息图,首先通过一种比较简单的方法对三维场景点云数据进行分层处理,然后使用深度补偿因子和波长补偿因子降低N-LUT法查找表的存储空间,并提高计算速度,快速生成三维场景的彩色全息图。用该方法计算了复杂的三维场景的全息图,实验结果表明:本文方法显著降低了查找表的存储空间,提高了计算速度,全息图能够准确真实地表现三维场景的颜色、深度等信息;在三维场景的物光点上引入随机相位能够有效降低再现像的相干噪声。

2 N-LUT 法

如图1所示,全息面位于 $x_h y_h$ 平面上,物空间坐标系为 $x_o y_o z_o$,三维场景被分割为 K 个与 $x_h y_h$ 平面平行的二维图像,第 k 个二维图像 I_k 对应的PFP记作 PFP_k ,在非涅耳近似条件下, PFP_k 的复振幅 $T_k(x_h, y_h)$ 为

$$T_k(x_h, y_h) = \exp\left[j \frac{\pi}{\lambda z_k} (x_h^2 + y_h^2)\right], \quad (1)$$

式中 z_k 表示第 k 个二维图像 I_k 距离 $x_h y_h$ 平面的距离, λ 为波长。二维图像 I_k 上的物光点 O_i 在全息面上的复振幅分布可以通过平移 PFP_k 相应的位置获得。提前计算并存储每个二维图像对应的PFP,计算三维场景各物光点的全息图时通过平移其所在的二维图像对应的PFP快速获取,这就是N-LUT法。相比于传统RT法,N-LUT法减小了计算量,提高了计算速度。

但是三维场景的每个二维图像都需要一个PFP,包含有 K 个二维图像的三维场景需要计算和存储 K 个

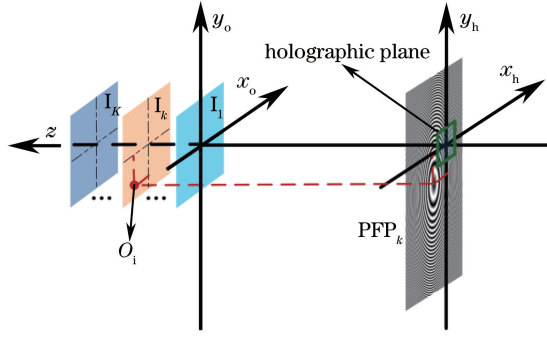


图 1 N-LUT 法原理

Fig. 1 Theory of N-LUT method

PFPs。对于大景深的三维场景,即 K 的数目较多时,需要计算和存储的 PFPs 也较多,存储 PFPs 需要占用较大的空间。分析深度和波长对 PFP 复振幅分布的影响,研究减小查找表的存储空间、提高计算速度的方法。

3 深度补偿因子

3.1 三维场景的分层方法

考虑图 1 三维场景中与 I_k 相邻的二维图像 I_{k+1} ,由(1)式可知,PFP $_{k+1}$ 的复振幅为

$$T_{k+1} = \exp \left[j \frac{\pi}{\lambda z_{k+1}} (x_h^2 + y_h^2) \right], \quad (2)$$

式中 z_{k+1} 表示二维图像 I_{k+1} 与全息面之间的距离。为了分析 PFP $_{k+1}$ 与 PFP $_k$ 之间的关系,进行如下运算

$$\frac{T_{k+1}}{T_k} = \exp \left[j \frac{\pi}{\lambda} \left(\frac{1}{z_{k+1}} - \frac{1}{z_k} \right) (x_h^2 + y_h^2) \right], \quad (3)$$

令(3)式中 $\frac{1}{z_{k+1}} - \frac{1}{z_k} = \frac{1}{\Delta z}$, 其中 Δz 是常数,则有

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{z_2} - \frac{1}{z_1} = \frac{1}{\Delta z} \\ \frac{1}{z_3} - \frac{1}{z_2} = \frac{1}{\Delta z} \\ \dots \\ \frac{1}{z_{K-1}} - \frac{1}{z_{K-2}} = \frac{1}{\Delta z} \\ \frac{1}{z_K} - \frac{1}{z_{K-1}} = \frac{1}{\Delta z} \end{array} \right., \quad (4)$$

为了使 $z_1, z_2, \dots, z_k, \dots, z_{K-1}, z_K$ 满足(4)式,需要选择合适的 K 和 Δz 。

三维场景的分层数量 K 可以根据人眼的分辨能力估计,如图 2 所示,人眼睛的两个瞳孔间距为 d ,在深度方向上的角分辨率为 θ ,点 P_1 与人眼之间的距离为 z ,假设人眼在 z 方向上能分辨出的与点 P_1 距离最近的点为 P_2 , P_1 与 P_2 间的距离为

$$\Delta z' = \frac{d}{2} \tan \left[\theta + \arctan \left(\frac{2z}{d} \right) \right] - z, \quad (5)$$

式中 $\Delta z'$ 与 z 成正比,为保证成像质量,以 $\Delta z'$ 的最小值 $\Delta z''$ 对三维场景进行等间隔分层, $\Delta z''$ 为

$$\Delta z'' = \frac{d}{2} \tan \left[\theta + \arctan \left(\frac{2z_1}{d} \right) \right] - z_1, \quad (6)$$

那么分层数 $K = \text{ceil} [(z_K - z_1) / \Delta z''] + 1$, 其中 $\text{ceil}()$ 表示取正无穷方向上的最小整数。

(4)式中各等式的左边各项和右边各项分别相加,得

$$\frac{1}{z_K} - \frac{1}{z_1} = \frac{K-1}{\Delta z}, \quad (7)$$

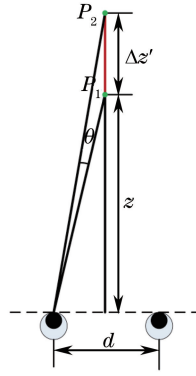


图 2 人眼对深度的分辨能力

Fig. 2 Depth resolution of human eyes

那么

$$\Delta z = \frac{(K - 1)(z_1 z_K)}{z_1 - z_K}, \quad (8)$$

把(8)式带入(4)式可以求得 $z_1, z_2, \dots, z_k, \dots, z_{K-1}, z_K$ 。

3.2 深度补偿因子

令 $\exp\left[j \frac{\pi}{\lambda \Delta z} (x_h^2 + y_h^2)\right] = \Delta T$, (3)式可记为

$$\frac{T_{k+1}}{T_k} = \Delta T, \quad (9)$$

由(9)式可得

$$T_k = T_1 (\Delta T)^{k-1}, \quad (10)$$

式中 ΔT 为深度补偿因子, 只要提前计算和存储第一个二维图像 I_1 对应的 PFP₁ 的复振幅 T_1 和深度补偿因子 ΔT , 就可以快速得到各个深度的二维图像对应的 PFP。

3.3 波长补偿因子

对于彩色三维场景, 要计算红绿蓝(RGB)三通道的全息条纹, 然后用再现出的红绿蓝三个单色像合成彩色像。假设三维场景中第 k 个二维图像 I_k 在红绿蓝三种波长条件下的 PFP_k 的复振幅分布记为

$$\begin{cases} T_k^R = \exp\left[j \frac{\pi}{\lambda_R z_k} (x_h^2 + y_h^2)\right] \\ T_k^G = \exp\left[j \frac{\pi}{\lambda_G z_k} (x_h^2 + y_h^2)\right], \\ T_k^B = \exp\left[j \frac{\pi}{\lambda_B z_k} (x_h^2 + y_h^2)\right] \end{cases}, \quad (11)$$

式中 λ_R, λ_G 和 λ_B 表示红绿蓝三种波长。

定义 ΔT_k^{GR} 和 ΔT_k^{BR} 分别为二维图像平面 I_k 对应的 PFP_k 的绿红(GR)波长补偿因子和蓝红(BR)波长补偿因子

$$\begin{cases} \Delta T_k^{GR} = \frac{T_k^G}{T_k^R} = \exp\left[\frac{\pi}{z_k} \left(\frac{1}{\lambda_G} - \frac{1}{\lambda_R}\right) (x_h^2 + y_h^2)\right], \\ \Delta T_k^{BR} = \frac{T_k^B}{T_k^R} = \exp\left[\frac{\pi}{z_k} \left(\frac{1}{\lambda_B} - \frac{1}{\lambda_R}\right) (x_h^2 + y_h^2)\right], \end{cases}, \quad (12)$$

若 $\frac{1}{\lambda_G} - \frac{1}{\lambda_R} = \frac{1}{\Delta \lambda_{GR}}, \frac{1}{\lambda_B} - \frac{1}{\lambda_R} = \frac{1}{\Delta \lambda_{BR}}$, 则(12)式可简化为

$$\begin{cases} \Delta T_k^{GR} = \exp\left[\frac{\pi}{z_k \Delta \lambda_{GR}} (x_h^2 + y_h^2)\right] \\ \Delta T_k^{BR} = \exp\left[\frac{\pi}{z_k \Delta \lambda_{BR}} (x_h^2 + y_h^2)\right]. \end{cases}, \quad (13)$$

由(13)式可知,

$$\begin{cases} \frac{\Delta T_{k+1}^{\text{GR}}}{\Delta T_k^{\text{GR}}} = \exp\left[\frac{\pi}{\Delta\lambda_{\text{GR}}\Delta z}(x_h^2 + y_h^2)\right] \\ \frac{\Delta T_{k+1}^{\text{BR}}}{\Delta T_k^{\text{BR}}} = \exp\left[\frac{\pi}{\Delta\lambda_{\text{BR}}\Delta z}(x_h^2 + y_h^2)\right] \end{cases}, \quad (14)$$

令 $\exp\left[\frac{\pi}{\Delta\lambda_{\text{GR}}\Delta z}(x_h^2 + y_h^2)\right] = \Delta T_{\text{GR}}$, $\exp\left[\frac{\pi}{\Delta\lambda_{\text{BR}}\Delta z}(x_h^2 + y_h^2)\right] = \Delta T_{\text{BR}}$, 则

$$\begin{cases} \Delta T_k^{\text{GR}} = \Delta T_1^{\text{GR}} (\Delta T_{\text{GR}})^{k-1} \\ \Delta T_k^{\text{BR}} = \Delta T_1^{\text{BR}} (\Delta T_{\text{BR}})^{k-1} \end{cases}, \quad (15)$$

式中 ΔT_1^{GR} 和 ΔT_1^{BR} 表示第 1 个二维图像平面 I_1 对应的 GR 和 BR 波长补偿因子, 也称为 GR 波长和 BR 波长基准补偿因子; ΔT_{GR} 和 ΔT_{BR} 表示 GR 波长补偿因子和 BR 波长补偿因子。由(15)式可知, 只需要提前计算和存储 ΔT_1^{GR} 、 ΔT_{GR} 和 ΔT_1^{BR} 、 ΔT_{BR} , 就可以得到第 k 个二维图像平面 I_k 的波长补偿因子 ΔT_k^{GR} 和 ΔT_k^{BR} 。

4 生成全息图

用深度补偿因子和波长补偿因子能够快速生成彩色三维场景的全息图。用 3.1 节的方法将三维场景离散为深度为 $z_1, \dots, z_k, \dots, z_K$ 的二维图像 $I_1, \dots, I_k, \dots, I_K$, 然后计算二维图像上每一个物光点的复振幅并叠加可生成三维场景的全息图。位于 I_k 上的一个物光点的复振幅计算流程如图 3 所示。

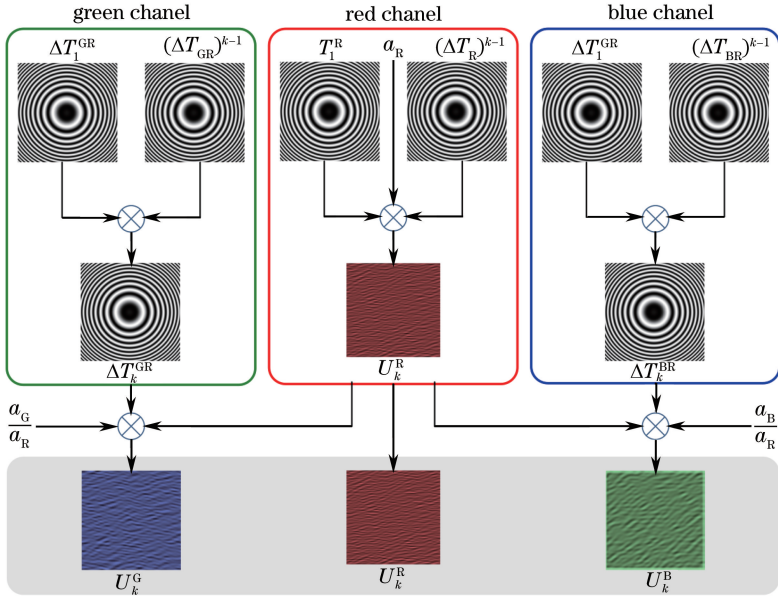


图 3 深度和波长补偿算法流程图

Fig. 3 Flow diagram of DWC-N-LUT method

图 3 中物光点的亮度值记为 (a_R, a_G, a_B) , 在 RGB 通道的复振幅分别记为: U_k^R, U_k^G 和 U_k^B 。 T_1^R 是深度为 z_1 的二维图像 I_1 的 R 通道 PFP 即 PFP_1^R 的复振幅分布, ΔT_R 为 R 通道的深度补偿因子, 由(10)式可求得 PFP_k^R 的复振幅分布 T_k^R , 再按照图 1 方法平移 T_k^R 并乘以振幅值 a_R 即可得到物光点 R 通道的复振幅为

$$U_k^R = a_R T_1^R (\Delta T_R)^{k-1}. \quad (16)$$

当 $a_R \neq 0$ 时, U_k^R 乘以 GR 波长补偿因子 ΔT_k^{GR} 和 GR 振幅比 $\frac{a_G}{a_R}$ 得到物光点 G 通道的复振幅 U_k^G , 其中 ΔT_k^{GR} 是根据(15)式求得的; 同理计算 B 通道的复振幅 U_k^B 。深度补偿因子能够减小 N-LUT 法查找表的存储空间, 波长补偿因子可以提高 N-LUT 法计算速度, 称此方法为基于深度和波长补偿的 N-LUT 算法 (DWC-N-LUT)。

当 $a_R = 0$ 时, 则 $U_k^R = 0$, $U_k^G = a_G T_1^R (\Delta T_R)^{k-1} \Delta T_k^{GR}$, $U_k^B = a_B T_1^R (\Delta T_R)^{k-1} \Delta T_k^{BR}$ 。

5 实验分析

为了验证 DWC-N-LUT 方法的正确性, 选择一个复杂的三维模型作为三维场景计算全息图, 进行数字再现实验。

5.1 三维场景的数字再现

首先用结构复杂的飞机模型作为数字模拟实验的三维场景, 如图 4 所示, 飞机模型的尺寸为 $16.43 \text{ mm} \times 9.17 \text{ mm} \times 14.05 \text{ mm}$, 即飞机模型的深度为 14.05 mm 。飞机模型包含的物光点数为 11852 个, 与全息面的最近距离 $z_1 = 592.85 \text{ mm}$, 最远距离 $z_K = 606.90 \text{ mm}$ 。

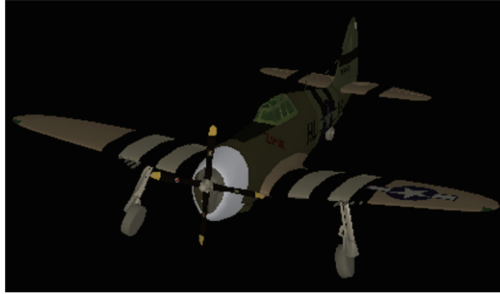


图 4 飞机模型的目标场景图像

Fig. 4 Image of object scene for airplane model

用 3.1 节所述方法对飞机模型进行分层, 假设人眼瞳孔距离 $d = 65.00 \text{ mm}$ (人眼瞳距 $65.00 \sim 75.00 \text{ mm}$), 深度方向上的角分辨率 $\theta = 10''^{[22]}$, 由 (6) 式可知, $\Delta z'' \approx 0.53 \text{ mm}$, 那么 $K = 28 \lceil \text{ceil} [(606.90 - 592.85) / 0.53] + 1 \rceil$, 将 $K = 28$ 带入 (8) 式得到 $\Delta z = -6.91 \times 10^5 \text{ mm}$, 最后根据 (4) 式计算 $z_1, \dots, z_k, \dots, z_{28}$ 。飞机模型各层的深度值如图 5 所示。

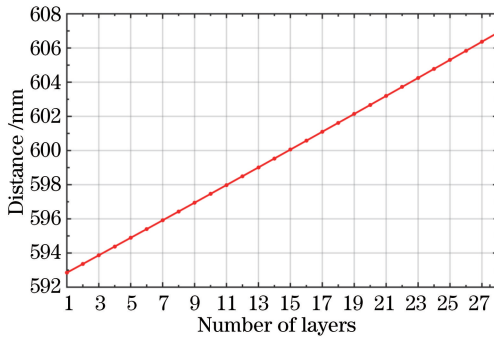


图 5 飞机模型各层的深度值

Fig. 5 Depth of each layer for airplane model

$\lambda_R, \lambda_G, \lambda_B$ 分别取 $625, 532, 473 \text{ nm}$, 按照 3.2 节和 3.3 节中的方法分别计算深度补偿因子和波长补偿因子, 用图 3 算法生成飞机模型的 RGB 全息图, 数字再现结果如图 6 所示。图 6(a)~(d) 的再现距离分别是 $592.00, 597.00, 602.00$ 和 607.00 mm 。图 4 目标场景的颜色信息在图 6 中准确重现。飞机模型能够在相应的深度聚焦成像: 图 6(a) 飞机尾翼清晰, 其他部分相对模糊; 图 6(b) 飞机尾翼和前部螺旋桨都比较模糊, 而机身的中部变得清晰; 图 6(c) 聚焦于飞机的两个机翼和起落架, 飞机的尾翼已经明显散焦; 图 6(d) 飞机尾翼严重离焦, 而前部螺旋桨清晰成像。图 6 表明: DWC-N-LUT 法能够精确表现三维场景的颜色和深度信息。

仔细观察图 6 会发现成像区域有黑色的斑纹, 仔细分析认为: 这些黑色的斑纹是同一个二维图像上不同物光点的复振幅叠加时产生的相干噪声。按照图 3 所示的算法流程, 物光点在全息面上的复振幅是用该物光点的亮度值乘以 PFP 中相应的部分得到的, 而同一个二维图像上的不同物光点的复振幅取自同一个 PFP, 它们的复振幅叠加产生相干噪声, 使成像质量变差。

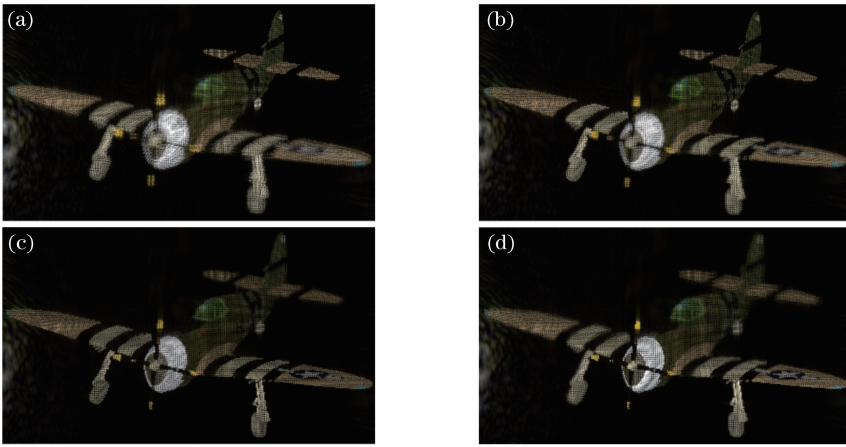


图 6 无随机相位时飞机模型的数字再现图像。(a) 592.00 mm; (b) 597.00 mm; (c) 602.00 mm; (d) 607.00 mm

Fig. 6 Numerical reconstruction images of airplane model without random phase.

(a) 592.00 mm; (b) 597.00 mm; (c) 602.00 mm; (d) 607.00 mm

为了抑制相干噪声,提高再现像质量,为每一个物光点赋予一个随机的初相位,(16)式变为

$$U_k^R = a_R \exp(j\phi_0) T_1^R (\Delta T_R)^{k-1}, \quad (17)$$

式中 ϕ_0 表示物光点的初相位。当 $a_R \neq 0$ 时,按照图 3 方法求 U_k^G 和 U_k^B ;当 $a_R = 0$ 时,则 $U_k^R = 0, U_k^G = a_G \exp(j\phi_0) T_1^R (\Delta T_R)^{k-1} \Delta T_k^{GR}, U_k^B = a_B \exp(j\phi_0) T_1^R (\Delta T_R)^{k-1} \Delta T_k^{BR}$ 。

加入随机相位后,生成的全息图在 592.00、597.00、602.00、607.00 mm 的数字再现结果如图 7 所示,图 7(a)~(d)分别在相应的聚焦深度清晰成像,而且消除了图 6 中的相干噪声,明显提高了成像质量。因此,加入随机相位能够有效抑制再现像的相干噪声。

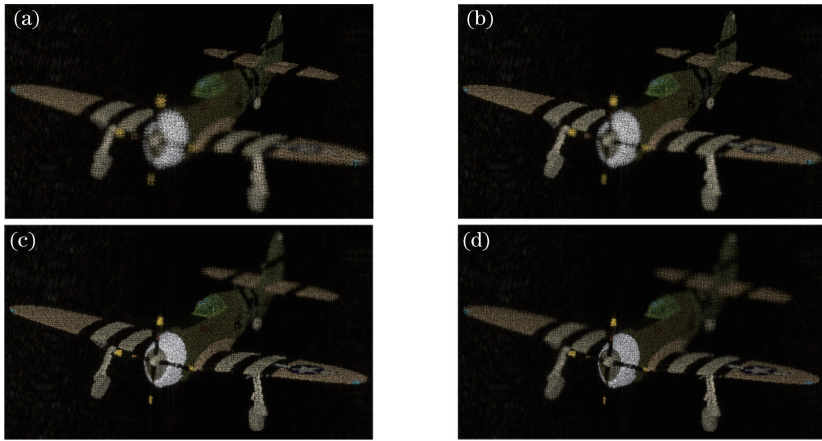


图 7 加入随机相位后飞机模型的数字再现图像。(a) 592.00 mm; (b) 597.00 mm; (c) 602.00 mm; (d) 607.00 mm

Fig. 7 Numerical reconstruction images of airplane adding random phase. (a) 592.00 mm; (b) 597.00 mm;

(c) 602.00 mm; (d) 607.00 mm

为了进一步验证 DWC-N-LUT 方法的正确性,又选择一个如图 8 所示的汽车模型进行了数字再现实验。汽车模型尺寸为 16.04 mm×9.57 mm×18.30 mm,包含 26832 个物光点,其中与全息面之间距离最近和最远的物光点到全息面之间的距离分别为 592.23 mm 和 610.53 mm,即汽车模型的深度范围为 18.30 mm。

同样用 3.1 节所述方法对汽车模型的物光点分层,此时 $\Delta z'' \approx 0.53$ mm,分层数 $K = 36 \{ \text{ceil} [(610.53 - 592.23) / 0.53] + 1 \}$, $\Delta z = -6.92 \times 10^5$ mm,图 9 为各层的深度值。

用与飞机模型实验相同的方法生成汽车模型的全息图,并进行了数字再现。图 10 和图 11 分别表示无随机相位和加入随机相位的数字再现图像,其中再现距离是 592、598、604、610 mm。与目标图像图 5 相比,汽车模型的颜色信息被准确再现,而且汽车模型的不同部分能够在其对应的深度处清晰聚焦;图 10 中存在



图 8 汽车模型的目标场景图像

Fig. 8 Image of object scene for car model

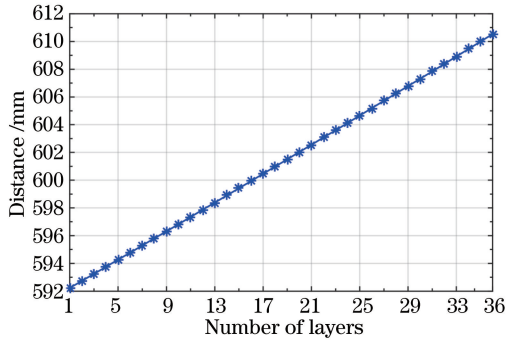


图 9 汽车模型各层的深度值

Fig. 9 Depth of each layer for car model

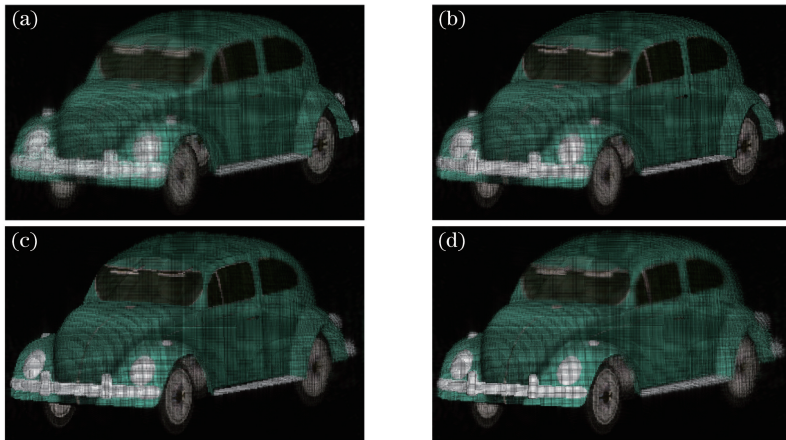


图 10 无随机相位时汽车模型的数字再现图像。(a) 592.00 mm; (b) 598.00 mm; (c) 604.00 mm; (d) 610.00 mm

Fig. 10 Numerical reconstruction images of car model without random phase. (a) 592.00 mm; (b) 598.00 mm; (c) 604.00 mm; (d) 610.00 mm

明显的相干噪声,通过引入随机相位能够消除相干造成,显著改善成像质量,如图 11 所示。

综合飞机模型和汽车模型的实验结果,可以得出:DW-N-LUT 方法能够准确再现三维场景的颜色和深度信息,通过引入随机相位,能够有效消除再现像的相干噪声。

5.2 计算复杂度分析

全息图的像素数定义为 1920×1080 ,像素尺寸设为 $8 \mu\text{m} \times 8 \mu\text{m}$;飞机模型在水平和垂直方向的尺寸分别为 16.43 mm 和 9.17 mm,那么 PFP 在水平方向的像素数为 $3974[\text{ceil}(16.43 \text{ mm}/8 \mu\text{m}) + 1920]$,垂直方向上的像素数为 $2227[\text{ceil}(9.17 \text{ mm}/8 \mu\text{m}) + 1080]$;同理汽车模型 PFP 在水平和垂直方向上的像素数分别为 $3925[\text{ceil}(16.04 \text{ mm}/8 \mu\text{m}) + 1920]$ 和 $2277[\text{ceil}(9.57 \text{ mm}/8 \mu\text{m}) + 1080]$;因此飞机模型和汽车模型 PFP 的像素数分别为 3974×2227 和 3925×2277 。

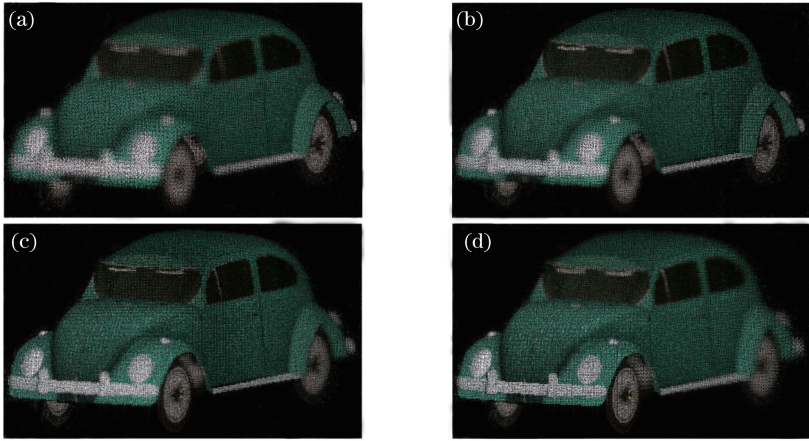


图 10 加入随机相位后汽车模型的数字再现图像。(a) 592.00 mm; (b) 598.00 mm; (c) 604.00 mm; (d) 610.00 mm

Fig. 10 Numerical reconstruction images of car model adding random phase. (a) 592.00 mm; (b) 598.00 mm; (c) 604.00 mm; (d) 610.00 mm

表 1 三种方法查找表占用的存储空间和生成全息图花费的时间

Table 1 Memory space of lookup table and computation time with three methods

	Airplane			Car		
	RT	N-LUT	DWC-N-LUT	RT	N-LUT	DWC-N-LUT
Memory space /Gb	—	44.3100	3.1650	—	57.5316	3.1962
Computation time /s	10955.22	4782.71	3743.54	24808.47	10829.19	8475.54

实验用 Intel Pentium 6 核计算机, CPU 主频为 3.70 GHz, 内存为 16 G, Microsoft Windows 764 位操作系统; 在 Matlab R2013a 平台上分别用 RT 法、N-LUT 法和 DWC-N-LUT 法计算如图 4 所示飞机模型的全息图, 为了提高计算效率, 计算全息图时的数据类型定义为单精度浮点型。三种计算方法查找表占用的存储空间和生成全息图花费的时间如表 1 所示。

N-LUT 法的查找表需要存储的 PFPs 个数与三维场景分层数量成正比, 飞机模型和汽车模型分层数分别为 28 和 36, 那么查找表要存储 84 (28×3) 和 108 (36×3) 个 PFPs; DWC-N-LUT 法的查找表需要存储 T_1^R 、 ΔT_R 、 ΔT_1^{GR} 、 ΔT_{GR} 、 ΔT_1^{GR} 和 ΔT_{BR} , 占用的存储空间相当于 6 个 PFPs。PFP 的数据类型为单精度浮点型复数, 那么飞机模型和汽车模型的一个 PFP 所占的空间约分别为 0.5275 Gb ($3974 \times 2227 \times 64 / 1024^3$) 和 0.5327 Gb ($3925 \times 2277 \times 64 / 1024^3$), 因此生成飞机模型全息图时, N-LUT 法和 DWC-N-LUT 法的查找表占用的存储空间分别为 44.3100 Gb (0.5275×84) 和 3.1650 Gb (0.5275×6), 生成汽车模型全息图时, N-LUT 法和 DWC-N-LUT 法的查找表占用的存储空间分别为 57.5316 Gb (0.5327×108) 和 3.1962 Gb (0.5327×6)。计算飞机模型和汽车模型时, N-LUT 法的存储空间是 DWC-N-LUT 法的 14 倍 ($84/6$) 和 18 倍 ($108/6$), 易知, 三维场景的深度越大, 分层数越多, N-LUT 法的查找表所占用的空间也越大, DWC-N-LUT 法的查找表与三维场景的分层数无关。

RT 法、N-LUT 法和 DWC-N-LUT 法的计算时间与三维场景的物光点个数有关, 物光点数目越多, 生成全息图所要消耗的时间越多, 由于汽车模型的物光点数远多于飞机模型, 所以计算汽车模型的全息图消耗了更多的计算时间。用 RT 法、N-LUT 法和 DWC-N-LUT 法生成同一三维模型的全息图时, DWC-N-LUT 法消耗的时间最少, DWC-N-LUT 法与 RT 法和 N-LUT 法相比, 计算速度分别提高了约 66% 和 22%。

因此, DWC-N-LUT 法在明显提高 N-LUT 法计算速度的同时, 大大降低了查找表的存储空间。

6 结 论

N-LUT 法能够显著提高 RT 法计算全息图的速度, 但是其查找表往往占据了较大的存储空间, 特别是对于大深度的彩色三维场景。提出了 DWC-N-LUT 法, 用深度和波长补偿算法快速生成彩色三维场景的全

息图,由提前计算和存储的深度补偿因子生成某一深度上 R 通道的 PFP,获得对应二维图像物光点 R 通道的复振幅分布,R 通道的复振幅乘以波长补偿因子就得到 G 通道和 B 通道的复振幅。DWC-N-LUT 法的查找表占用的存储空间仅相当于 6 个 PFPs,且只需计算三维场景 R 通道的复振幅,提高了计算速度。采用飞机模型进行数字模拟,实验结果表明:DWC-N-LUT 法能够准确表现三维场景的颜色和深度信息,物光点加入随机相位可以有效抑制再现像的相干噪声;与 N-LUT 法相比,DWC-N-LUT 法在显著减小查找表占用的存储空间的同时提高了计算速度。

参 考 文 献

- 1 Lü Naiguang. Fourier optics[M]. Beijing: China Machine Press, 2006: 226-228.
吕乃光. 傅里叶光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 226-228.
- 2 Wei Sui. Basic theory of holographic imaging[M]. Hefei: Anhui University Press, 2013: 20-23.
韦 穗. 全息成像概论[M]. 合肥: 安徽大学出版社, 2013: 20-23.
- 3 Li Fangzhan, Wang Di, Wang Cui, *et al.*. Method of large-size holographic reconstruction based on spatial multiplexing [J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(4): 0409001.
李芳转, 王 迪, 王 翠, 等. 基于空分复用的大尺寸全息再现方法[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0409001.
- 4 Wang Hui, Jin Hongzhen, Wu Dongyuan, *et al.*. Information capacity and reduction in computing holographic three-dimensional display[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0209012.
王 辉, 金洪震, 毋东元, 等. 计算全息三维显示的信息量及其简化[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209012.
- 5 Cao Xuemei, Sang Xinzhu, Chen Zhidong, *et al.*. Computer generated hologram of complex three-dimensional object based on a two-dimensional color image and the depth map[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(6): 0609002.
曹雪梅, 桑新柱, 陈志东, 等. 基于二维彩色图像和深度图的复杂三维场景的计算全息图[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0609002.
- 6 Leseberg D. Computer-generated three-dimensional image holograms[J]. Applied Optics, 1992, 31(2): 223-229.
- 7 Hong J, Kim Y, Choi H J, *et al.*. Three-dimensional display technologies of recent interest: Principles, status, and issues invited[J]. Applied Optics, 2011, 50(34): H87-H115.
- 8 Zhang H, Collings N, Chen J, *et al.*. Full parallax three-dimensional display with occlusion effect using computer generated hologram[J]. Optical Engineering, 2011, 50(7): 074003.
- 9 Ichikawa T, Yamaguchi K, Sakamoto Y. Realistic expression for full-parallax computer-generated holograms with the ray-tracing method[J]. Applied Optics, 2013, 52(1): A201-A209.
- 10 Sun Ping, Xie Jinghui, Zhou Yuanlin, *et al.*. Optical tomography based on Fresnel zone plate scanning holography[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(1): 110-114.
孙 萍, 谢敬辉, 周元林, 等. 基于菲涅耳波带板扫描全息术的光学层析成像[J]. 光学学报, 2004, 24(1): 110-114.
- 11 Pan Y, Xu X, Solanki S, *et al.*. Fast CGH computation using S-LUT on GPU[J]. Optical Express, 2009, 17(21): 18543-18555.
- 12 Ichihashi Y, Oi R, Senoh T, *et al.*. Real-time capture and reconstruction system with multiple GPUs for a 3D live scene by a generation from 4 K IP images to 8 K holograms[J]. Optical Express, 2012, 20(19): 21645-21655.
- 13 Song J, Park J, Park H, *et al.*. Real-time generation of high-definition resolution digital holograms by using multiple graphic processing units[J]. Optical Engineering, 2013, 52(1): 015803.
- 14 Lucente M. Interactive computation of holograms using a look-up table[J]. Journal of Electronic Imaging, 1993, 2(1): 28-35.
- 15 Kim S C, Kim E S. Effective generation of digital holograms of three-dimensional objects using a novel look-up table method[J]. Applied Optics, 2008, 47(19): D55-D62.
- 16 Kim S C, Kim E S. Fast computation of hologram patterns of a 3D object using run-length encoding and novel look-up table methods[J]. Applied Optics, 2009, 48(6): 1030-1041.
- 17 Kim S C, Dong X, Kwon M W, *et al.*. Fast generation of video holograms of three-dimensional moving objects using a motion compensation-based novel look-up table[J]. Optics Express, 2013, 21(9): 11568-11584.
- 18 Jia J, Wang Y, Liu J, *et al.*. Reducing the memory usage for effective computer-generated hologram calculation using compressed look-up table in full-color holographic display[J]. Applied Optics, 2013, 52(7): 1404-1412.
- 19 Yang Z, Fan Q, Zhang Y, *et al.*. A new method for producing computer generated holograms[J]. Journal of Optics, 2012, 14(9): 095702.

- 20 Kim S C, Kim E S. Fast one-step calculation of holographic videos of three-dimensional scenes by combined use of baseline and depth-compensating principle fringe patterns[J]. *Optics Express*, 2014, 22(19): 22513-22527.
- 21 Kim S C, Dong X, Kim E S. Accelerated one-step generation of full-color holographic videos using a color-tunable novel-lookup-table method for holographic three-dimensional television broadcasting[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 14056.
- 22 Patterson R. Human factors of 3D displays[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2007, 15(11): 861-872.