

文章编号: 1001-3806(2013)04-0483-04

基于数字微镜器件的计算全息 3 维显示

王 鹏, 张亚萍*, 张建强, 吴 上, 陈 伟
(昆明理工大学 理学院, 昆明 650500)

摘要: 为了进一步研究计算全息 3 维显示的方法, 以数字微镜器件为空间光调制器, 采用层析法, 结合菲涅耳衍射积分算法中的角谱法, 探讨了全息图的计算与数字微镜器件参量之间的关系, 并利用修正立轴参考光编码的方式, 得到了菲涅耳计算全息图。通过对计算全息图进行数值模拟及实验验证, 均得到了较好的再现像。结果表明, 该方法实现了 3 维物体的再现, 为计算全息 3 维显示提供了一种有效的方法。

关键词: 信息光学; 3 维显示; 角谱法; 数字微镜器件

中图分类号: O438 **文献标识码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.04.015

3-D computer generated hologram display based on digital micro-mirror device

WANG Peng, ZHANG Ya-ping, ZHANG Jian-qiang, WU Shang, CHEN Wei

(Faculty of Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: In order to achieve high-quality hologram reconstruction based on digital micro-mirror device (DMD), gray scale adjustment characteristics and Fresnel diffraction characteristics of DMDs were described in detail. Then, the principle of holographic display based on DMD was analyzed. Finally, high-quality hologram was reconstructed. The results demonstrate holographic display was improved obviously after grayscale-adjustment. The results are helpful for the display of computer generated hologram based on digital micro-mirror device.

Key words: information optics; 3-D displaying; angular spectral method; digital micro-mirror device

引 言

近年来, 3 维显示已成为国内外的一个研究热点, 在影视艺术、可视化、虚拟现实等方面有着诱人的前景。现在使用的 3 维显示技术主要有体视镜、视差挡板、投影式 3 维显示等, 而这些 3 维显示技术并不是真正的 3 维显示, 它们只能提供全部深度感中的一种或几种。真正的 3 维显示技术应该提供全部深度感, 全息术就是这样一种技术。而随着计算全息术和空间光调制器的出现, 全息技术摒弃了以往利用复杂光路通过感光胶片记录

信息, 和繁琐费时的后续处理过程, 步入实时动态再现的现阶段^[1]。数字微镜器件 (digital micro-mirror device, DMD) 是美国德州仪器公司基于数字光处理 (digital light processing, DLP) 技术的空间光调制器, 它具有高分辨率、高亮度、高对比度、高可靠性、数字控制、响应时间短等优点^[2], 因其具有良好的衍射性能, 而逐渐被应用于全息图的再现^[3]。

本文中提出了一种利用数字微镜器件实现 3 维显示的方法。该方法以 DMD 为显示器件, 通过 DMD 对全息图显示的原理, 根据菲涅耳衍射角谱理论, 分析了 DMD 的分辨率与物体采样间距的关系; 利用菲涅耳衍射角谱法, 得到了基于层析法的 3 维物体计算全息图。结合 DMD 的显示机制, 建立了全息显示系统, 实现了多层平面图像的立体重构。从光电重现方面验证了这种方法对数字微镜器件进行 3 维显示的可行性。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61007061)

作者简介: 王 鹏 (1988-), 男, 硕士研究生, 现主要从事计算全息 3 维显示的研究。

* 通讯联系人。E-mail: yaping.zhang@gmail.com

收稿日期: 2012-09-07; 收到修改稿日期: 2012-09-20

1 3 维物体全息图的制作和再现

1.1 数字微镜器件概述

DMD 是用数字电压信号控制微反射镜片执行机械运动来实现光学功能的装置^[4]。DMD 是美国德州仪器公司在 1987 年推出的专利产品,其镜面由上百万个微反射镜组成长方形阵列,每个微镜对应投影画面中的一个像素。其通过二进制脉冲宽度调制的方式改变通断时间的长短,即可获得每个像素不同灰度级的投影。由于 DMD 具有大光通量、高衍射效率、高分辨率、高对比度、高灰度等级及响应速度快等优点,而逐渐引起了人们的重视。用数字微镜器件作为空间光调制器进行全息图的光电再现的能力已经得到了实验证明^[5-6]。

DMD 高性能使得其成为 3 维全息显示技术中良好的空间光调制器件,加载全息条纹的 DMD 对入射的相干光进行振幅、相位调制,能够实现全息条纹的重构。下面将根据 DMD 的微镜结构和显示原理,考虑与全息平面不同距离的截面上的物光场采样,采用菲涅耳衍射角谱法计算 3 维物体全息图,计算各截面全息分布函数,编码合成为一张包含 3 维物体信息的计算全息图。

1.2 菲涅耳型全息图的计算

图 1 所示为菲涅耳衍射全息波前记录,其中, $x-y$ 为物光场平面, $\xi-\eta$ 为全息平面,也就是全息重构时数字微镜器件所在的平面。若要计算各层截面物光场在全息平面的衍射分布,首先要对截面物光场进行离散采样。为了充分利用 DMD 显示全息图,必须考虑物体采样和全息图采样问题。显然,全息图的采样频率由 DMD 的分辨率决定;物体的抽样频率应该由再现像的分辨率决定。而再现像最终是由 DMD 衍射形成的,所以 DMD 分辨率决定了物体的抽样间隔。

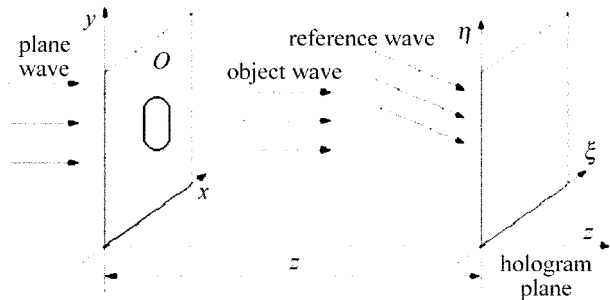


Fig. 1 Wave front recording of Fresnel hologram

据此思路,全息平面 $\xi-\eta$ 上的抽样间隔取相邻

微镜的中心间距。如图 1 所示, z 为截面物光场平面 $x-y$ 和全息平面 $\xi-\eta$ 之间的距离。在全息重构时, z 成为重构像聚焦平面与 DMD 之间的距离。

从菲涅耳衍射的角谱理论^[7-8]出发,假设截面物光场的角谱和全息平面的角谱分别为 $A_0(\xi, \eta)$ 和 $A(\xi, \eta)$,可知全息平面上光扰动的角谱与物平面上的光扰动的角谱之间的关系为:

$$A(\xi, \eta) = A_0(\xi, \eta)H(\xi, \eta) \quad (1)$$

式中,传递函数 H 表示为:

$$H(\xi, \eta) = \exp\left[jkz\left(1 - \frac{\lambda^2}{2}(\xi^2 + \eta^2)\right)\right] \quad (2)$$

式中, λ 为相干光波长,全息平面 $\xi-\eta$ 上的物光波复振幅分布可以表示为:

$$E(\xi, \eta) = \mathcal{F}^{-1}\left\{\mathcal{F}[O(x, y)] \times \exp\left[jkz\left(1 - \frac{\lambda^2}{2}(\xi^2 + \eta^2)\right)\right]\right\} \quad (3)$$

式中, $x-y$ 平面上的复振幅分布为 $O(x, y)$, \mathcal{F} 代表傅里叶变换, \mathcal{F}^{-1} 代表傅里叶逆变换, k 为波数, $k = 2\pi/\lambda$ 。若把全息图平面视为空域,对其做傅里叶变换后,与传递函数在频域里相乘,而由(3)式的变换又最终回到了空域,因此角谱法重建像面的像素大小为:

$$\Delta x = \Delta\xi, \Delta y = \Delta\eta \quad (4)$$

式中, Δx 和 Δy 为物光场平面的抽样间隔, $\Delta\xi$ 和 $\Delta\eta$ 为全息面的抽样间隔。依据 DMD 的像素微镜中心间距,取全息面的抽样间隔 $\Delta\xi = \Delta\eta = 13.7\mu\text{m}$ 。

1.3 3 维物体物光波的计算全息图

采用层析法计算 3-D 物体计算全息图的原理如下所述。其中, (x_i, y_i) 为物面(或再现像面)坐标, (ξ, η) 为全息面坐标, i 为层面数。首先将 3 维物场沿深度方向分层成像,将各层面在全息面的菲涅耳衍射复振幅叠加后,加入参考光并制作成一张全物场的全息图^[9-10]。

设总层数为 L ,第 i 层面物面 P_i 距离全息面的距离为 z_i , P_i 面上的复振幅分布为 $O_i(x_i, y_i)$,为了避免物波频谱信息丢失而使再现像失真,各层面复振幅乘以随机位相矩阵 $\varphi(x_i, y_i)$,降低物波频谱的动态范围,以利于全息图的计算和编码。结合计算机中的快速傅里叶变换算法,利用菲涅耳衍射积分算法中的角谱法,则全息面菲涅耳衍射分布可表示为:

$$E_i(\xi, \eta) = \mathcal{F}^{-1}\left\{\mathcal{F}[O_i(x_i, y_i)\varphi(x_i, y_i)] \times \exp\left[jkz_i\left(1 - \frac{\lambda^2}{2}(\xi^2 + \eta^2)\right)\right]\right\} \quad (5)$$

则各层面在全息面的衍射分布的叠加结果为:

$$E(\xi, \eta) = \sum_{i=1}^L E_i(\xi, \eta) = A_0(\xi, \eta) \exp[j\phi(\xi, \eta)] \quad (6)$$

式中, $A_0(\xi, \eta)$ 和 $\phi(\xi, \eta)$ 分别为叠加后全息面复振幅的幅值和位相, 设平面参考光为:

$$R(\xi, \eta) = R_0(\xi, \eta) \exp[j2\pi(f_\xi \xi + f_\eta \eta)] \quad (7)$$

式中, f_ξ 和 f_η 分别为 ξ 和 η 方向的倾斜因子, $R_0(\xi, \eta)$ 为参考光的幅值(设为常数 1)。将 $A_0(\xi, \eta)$ 归一化后采用博奇编码方式获得的全息图表示为:

$$h(\xi, \eta) = 0.5 \{1 + A_0(\xi, \eta) \times \cos[2\pi(f_\xi \xi + f_\eta \eta) - \phi(\xi, \eta)]\} \quad (8)$$

再现过程中, 以记录参考光的共轭光 $R^*(\xi, \eta)$ 照明全息图, 利用角谱重建法得到各再现像面的复振幅分布为:

$$O_i'(x_i, y_i) = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \mathcal{F}[h(\xi, \eta) R^*(\xi, \eta)] \times \exp\left[jkz_i \left(1 - \frac{\lambda^2}{2}(\xi^2 + \eta^2)\right)\right] \right\} \quad (9)$$

改变不同的 z_i 值, 即对全息图在不同再现面进行数字聚焦, 就可以再现出 3 维物体各层面的复振幅分布, 从而获得物体的再现像。

2 计算全息图数值模拟

采用一幅 3 维图像(像素总量为 512×512), 设其中的汉字“昆明”距离全息面为 310mm, 汉字“理工”距离全息面为 320mm, 汉字“大学”距离全息面为 330mm, 像素间距为 $13.7\mu\text{m}$, 记录波长 532.8nm 。计算全息图(像素总量 512×512)及其数字再现像如图 2 所示。

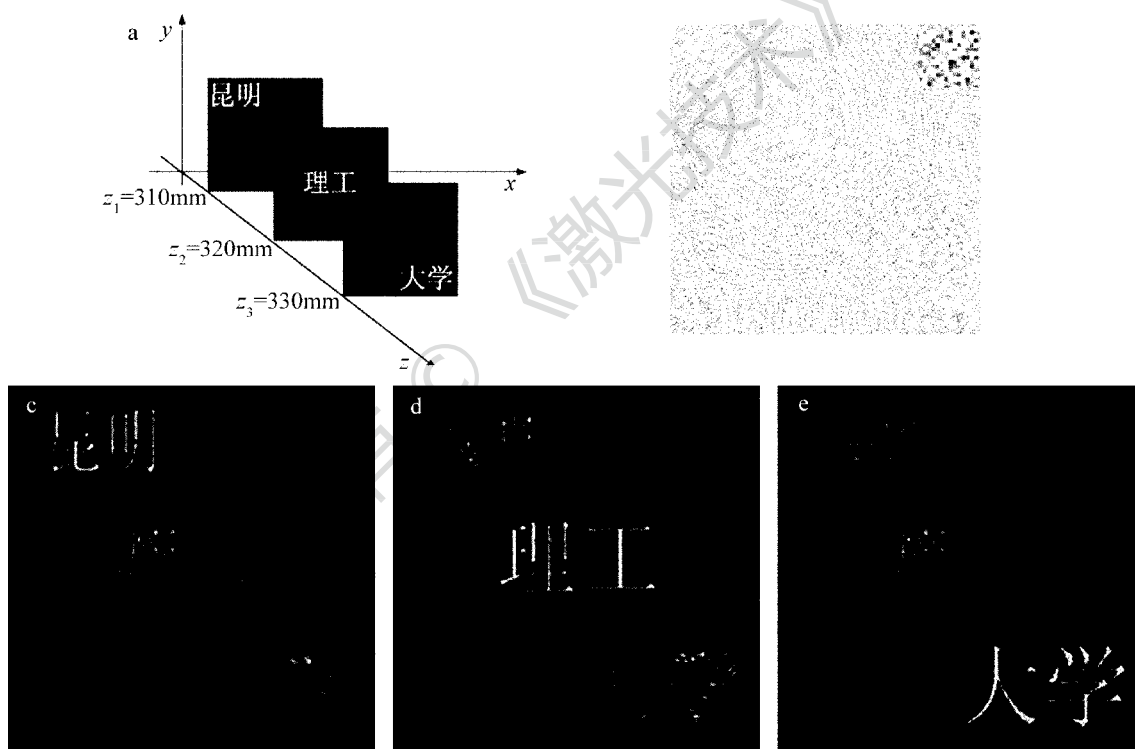


Fig. 2 Slice images hologram and numerical reconstruction

a—3-D object b—CGH c—image reconstruction with $z = 310\text{mm}$ d—image reconstruction with $z = 320\text{mm}$ e—image reconstruction with $z = 330\text{mm}$

图 2c ~ 图 2e 分别为 $z = 310\text{mm}$, $z = 320\text{mm}$ 和 $z = 330\text{mm}$ 的再现平面上的再现像。由于观察的方向是沿着 z 轴方向, 所以看到的像和物体一样。通过逐层再现, 获得了 3 维物体各层面的再现图。从再现结果可以看出, 对于某一层面的再现图, 只有此层面的汉字有清晰像, 而离焦层面标记汉字则只有模糊衍射像。

3 3 维物体全息图光电再现实验与讨论

光电再现实验中采用 532nm 半导体激光器作为参考光源, 其它设备包括空间滤波器、扩束器、焦距为 30cm 的准直透镜、观察屏等。反射式 DMD 作为空间光调制器, 其分辨率为 1024×768 像素, 像素间距为 $13.7\mu\text{m}$ 。实验光路如图 3 所示。

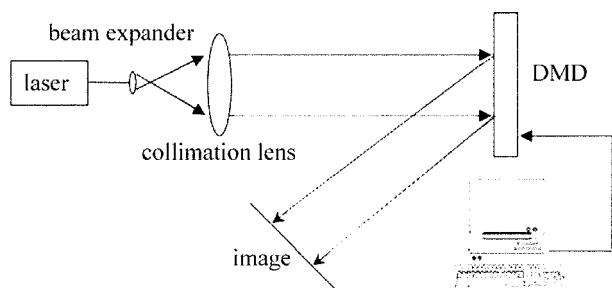


Fig. 3 Optical setup for displaying the hologram of slice images

利用图 2b 的全息图,经计算机输出至 DMD,在相干光波长为 532nm 的激光照射下,得到 3 维立体重构结果,如图 4 所示。

经 DMD 获得的光学再现像(见图 4)与原图像(见图 2a)进行比较可以看出,再现像具有很高的分辨率,人眼能够清晰分辨图像,两者具有较好的一致性,说明本文中的方法是可行的。

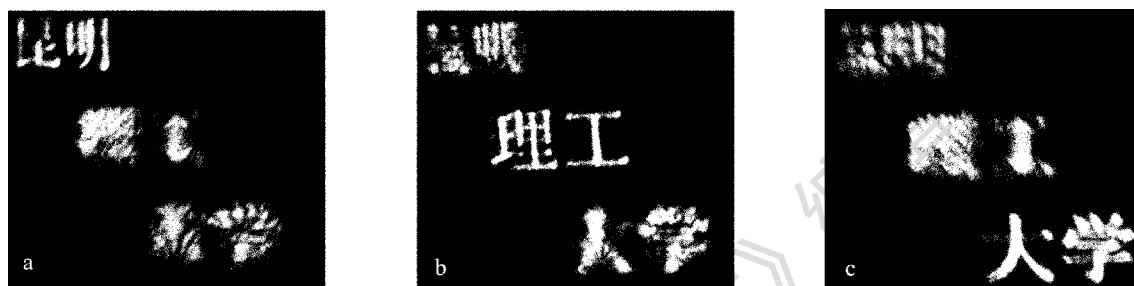


Fig. 4 Slice images of 3-D reconstruction at the distance between image and screen

a—image reconstruction with $z = 310\text{mm}$ b—image reconstruction with $z = 320\text{mm}$ c—image reconstruction with $z = 330\text{mm}$

4 结论

详细研究了基于数字微镜器件(DMD)的全息图 3 维显示的原理和实验方法,深入探讨了 DMD 的参量与物体采样之间的关系。利用菲涅耳衍射角谱法得到了基于层析法的 3 维物体计算全息图,并通过层析物体的显示实验,证实了利用数字微镜器件进行全息图 3 维显示的可行性。实验结果表明,通过数字微镜器件加载角谱法得到的全息图可以得到较清晰的 3 维物体的再现像。本文中的研究可以为计算全息 3 维显示提供理论、算法和系统实现等多方面提供借鉴。

参考文献

- [1] ZHENG H D, YU Y J, CHENG W M. Computer-generated hologram calculation for spatial reconstruction of three-dimensional object[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(5): 917-924 (in Chinese).
- [2] SONG J, GUO X W, CHEN M Y, et al. Research on hologram reconstruction using DMD[J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2008, 45(3): 576-580 (in Chinese).
- [3] YARAS F, KANG H J, ONURAL L. State of the art in holographic displays: a survey[J]. Journal of Display Technology, 2010, 6(5): 443-454.
- [4] DUDLEY D, DUNCAN W, SLAUGHTER J. Emerging digital micro-mirror device (DMD) applications[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 4985: 14-25.
- [5] LIM Y J, HAHN J K, LEE B H. Phase-conjugate holographic lithography based on micro-mirror array recording[J]. Applied Optics, 2011, 34(1): 68-74.
- [6] TU Zh Zh, TANG J, SHI D. Dynamic holographic stereogram display based on DMD and fractional fourier transform[J]. Computer Technology and Development, 2009, 19(8): 247-250 (in Chinese).
- [7] TRESTER S. Computer-simulated Fresnel holography[J]. The European Physical Journal, 2000, 21(4): 317-331.
- [8] KOZACKI T. On resolution and viewing of holographic image generated by 3D holographic display[J]. Optics Express, 2010, 18(12): 27118-27129.
- [9] ZHANG H D. Study on the key techniques of three-dimensional display based on optoelectronic holography[D]. Shanghai: Shanghai University, 2009: 47-48 (in Chinese).
- [10] KELLY D P, MONAGHAN D S, PANDEY N, et al. Digital holographic capture and optoelectronic reconstruction for 3-D displays[J]. International Journal of Digital Multimedia Broadcasting 2010, 13(7): 627-640.