

文章编号: 1001-3806(2013)05-0618-04

基于数字微镜的计算全息再现像质增强

王 鹏, 张亚萍*, 张建强

(昆明理工大学 理学院, 昆明 650500)

摘要: 为了实现基于数字微镜器件的高质量全息图再现, 阐述了数字微镜器件的灰度调制特性及其衍射特性, 探讨了数字微镜器件进行全息显示的机理, 实现了基于数字微镜器件的全息图高质量再现, 并给出了相应的数值模拟结果。结果表明, 经过灰度调整后的计算全息图再现效果有明显改善。这一结果对数字微镜用于计算全息显示是有帮助的。

关键词: 信息光学; 像质; 灰度调整; 数字微镜器件

中图分类号: O438.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.05.012

Reconstruction quality enhancement of computer generated hologram based on digital micro-mirror device

WANG Peng, ZHANG Ya-ping, ZHANG Jian-qiang

(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 gray scale adjustment. The results are helpful for the display of computer generated hologram based on digital micro-mirror device.

Key words: information optics; image quality; gray scale adjustment; digital micro-mirror device

引 言

全息显示技术是一种能提供真实深度感的 3 维显示技术^[1-2], 能提供人眼所有的立体视觉刺激。其中计算全息^[3]以其噪声低、可重复性高、可记录任何虚拟物体的优势得到了广泛的使用。自 20 世纪 90 年代以来, 空间光调制器被广泛用于光学运算、光束空间整形、相干波前调制、光学增强、激光扫描等, 在光信息处理^[4]领域尤其是投影显示技术中具有重要地位。随着数字微镜器件(digital micro-mirror device, DMD)的出现, 因为其具有较高的分辨率、较宽的响应范围和更快的响应速率等特点, 越来越广泛地应用于全息系统中^[5-6]。然而利用 DMD 进行计算全息图显示时, 因为其二进制时间脉宽调

制的特性, 使得不同全息图的占空比相差较大, 再现图像质量下降较为严重。

本文中分析了 DMD 对灰度图像的调制原理以及衍射特性, 就 DMD 进行全息显示时存在的问题作了总结和改进, 提出了利用计算全息技术, 通过调整全息图灰度改善全息再现像质、进而实现 DMD 高质量再现全息图的方法。

1 DMD 对全息图的调制及衍射

1.1 DMD 对灰度图的调制原理

DMD 由成千上万个可倾斜的铝合金微镜组成, 每个微镜面积为 $16\mu\text{m} \times 16\mu\text{m}$, 相邻镜片有 $1\mu\text{m}$ 的间隔。每个镜片均由数字电压信号控制, 输入信号经过处理后作用于 DMD 芯片, 从而控制镜片在 -10° 与 $+10^\circ$ 之间自由偏转实现光学功能。当微镜偏转 -10° 时, 微镜显示为“暗态”; 当镜片偏转 $+10^\circ$ 时, 则微镜显示为“亮态”。因此通过二进制时间脉宽调制^[6]的方式, 即可得到加载图像相应的

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: 2012-12-04; 收到修改稿日期: 2013-01-04

灰度等级。脉冲宽度越大,则微镜所在位置反射的时间就越长,表示该处的灰度值越大;脉冲宽度越小,则微镜所在位置反射的时间越短,表示该处的灰度值越小,从而完成对信号各点灰度的调制。

设一幅灰度图像的灰阶数为 M , 则每幅灰度图像在 DMD 显示时都可以分为 $m = \log_2 M$ 个比特位时间段。这样灰度图像就转化成 m 幅二值图像^[7]:

$$f(x, y) = \sum_{i=1}^m 2^{i-1} b_i(x, y) \quad (1)$$

式中, $f(x, y)$ 为量化后的灰度图像, $b_i(x, y)$ 为第 i 个比特位时间段内 DMD 显示的二值图。DMD 显示灰度图像时,用单位振幅平面波照射 DMD,其显示周期的占空比按 2^{i-1} 权重进行控制,依次显示构成灰度图的二值图像^[6]。

1.2 DMD 的衍射成像特性

以 DMD 所在的平面为 x - y 面,其在 x 和 y 方向的微镜数分别为 M 和 N ,每个镜元面积为 $\Delta x \times \Delta y$, a 和 b 为每个微镜的横向与纵向间隔,而 DMD 总面积为 $L_x \times L_y$,波数 $k = 2\pi/\lambda$ 。

设 DMD 输入信号 $U_0(x, y)$ 时,用波长为 λ 的单位振幅平行光照射后,在镜面前距离为 z 的观察面 x' - y' 上可以得到其光场分布。由 DMD 的结构和参量可知,从 DMD 反射出去的光场分布可以表示为:

$$U(x, y) = U_0(x, y) \times U_1(x, y) \quad (2)$$

式中, $U_1(x, y) = \left\{ \text{rect}\left(\frac{x}{\Delta x}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{\Delta y}\right) * \text{comb}\left(\frac{x}{a}\right) \times \text{comb}\left(\frac{y}{b}\right) \right\} \times \text{rect}\left(\frac{x}{L_x}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{L_y}\right)$ 为 DMD 窗口函数, $U_0(x, y) = \sum_{i=1}^m 2^{i-1} b_i(x, y)$ 为灰度全息图。

由于 x, y 分量没有交叉项,可设: $U(x, y) = U(x)U(y)$, 其中 $U(x)$ 表达式为:

$$U(x) = \left\{ \text{rect}\left(\frac{x}{\Delta x}\right) * \text{comb}\left(\frac{x}{a}\right) \right\} \times U_0(x) \text{rect}\left(\frac{x}{L_x}\right) \quad (3)$$

$U(y)$ 表达式与之类似,不再给出。

则按标量衍射理论,一个 DMD 显示周期在镜前距离为 z 的观察面上光场为:

$$U'(x', y') = \sum_{i=1}^m 2^{i-1} \frac{\exp(jkz)}{jkz} \iint_{-\infty}^{+\infty} b_i(x, y) U_1(x, y) \times \exp\left\{ \frac{j\pi}{z\lambda} [(x' - x)^2 + (y' - y)^2] \right\} dx dy = \frac{\exp(jkz)}{jkz} I_x(x') I_y(y') \quad (4)$$

式中, x 分量(y 分量与之类似,不再给出):

$$I_x(x') = \exp(j\pi\lambda z \xi^2) \mathcal{F}\left\{ \text{rect}\left(\frac{x}{\Delta x}\right) \right\} \mathcal{F}\left\{ \text{comb}\left(\frac{x}{a}\right) \right\} * \mathcal{F}\left\{ U_0(x) \text{rect}\left(\frac{x}{L_x}\right) \exp\left(\frac{j\pi}{z\lambda} x^2\right) \right\} \quad (5)$$

式中, $\xi = \frac{x'}{\lambda z}$ 为空间频率, \mathcal{F} 表示傅里叶变换。其中,

$$\mathcal{F}\left\{ U_0(x) \text{rect}\left(\frac{x}{L_x}\right) \exp\left(\frac{j\pi}{z\lambda} x^2\right) \right\} = \mathcal{F}\left\{ \text{rect}\left(\frac{x}{L_x}\right) \right\} * \mathcal{F}\left\{ U_0(x) \exp\left(\frac{j\pi}{z\lambda} x^2\right) \right\} \quad (6)$$

式中, $\exp(j\pi\lambda z \xi^2) \mathcal{F}\left\{ U_0(x) \exp\left(\frac{j\pi}{z\lambda} x^2\right) \right\}$ 实际是 $U_0(x)$ 的衍射成像过程。

由以上分析可知,DMD 对输入的全息图进行灰度调制,从而得到各微镜所反射光的强度,并对调制出的每一像素的光进行衍射,从而重构出原物。

2 DMD 再现全息图像质量的主要影响因素和改善方法

2.1 影响 DMD 全息再现图像质量的主要因素

(1) 若全息图的分辨率大于 DMD 分辨率时,则全息图需先缩放至 DMD 的分辨率后,再进行再现,而此缩放的过程将使原全息图的信息丢失,全息重构结果与物光场面目全非。反之,若全息图的分辨率小于 DMD 的分辨率,虽然全息图信息不会丢失,但因未能充分利用 DMD 的镜元,致使 DMD 的镜元占空比很低,导致全息再现图像质量降低。

(2) DMD 每个时刻只能显示一张黑、白二值图,通过灰度调制技术产生不同时刻再现的不同灰度的二值全息图,经衍射后叠加得到全息再现图像。但由于不同灰度的全息图占空比相差很大,导致再现像质量下降^[8]。此影响因素也是本文中重点解决的问题。

(3) 任意一个时刻从 DMD 反射出去的光波分别为照明光波的直接透射波、物光波和共轭波三部分,且直透部分在再现图像中要占有大部分的光强,从而导致重构物光场质量较低。

2.2 改善 DMD 全息再现图像质量的主要方法

(1) 利用计算全息的优势,生成与 DMD 分辨率大小相同的全息图,充分利用 DMD 的占空比,从而增强再现像的对比度,改善再现像质量。

(2) 采用全息图灰度调整的方法,改善 DMD 灰度调制技术产生的再现效果,使得全息再现图像的

质量增强。

在全息图的实际制作中,一般采用双极强度计算方法^[9]。这是因为在线性记录的条件下,可以充分利用计算全息图的空间带宽积,通过对此类全息图进行大量的分析,可知这类全息图的灰度直方图为高斯型。为此,作者考虑对直方图中占比例较小的部分灰度进行压缩,而对其它的灰度进行扩展,从而充分利用输出设备的灰度表现能力。这种方法可表述为:将原图像中灰度值 G 高于阈值 Q_1 的那些像素的灰度值都归为 Q_1 ,将原图像中灰度值低于阈值 Q_2 的那些像素的灰度值都归为 Q_2 ,然后将图像的所有灰度值按下式进行相应的变换^[10]:

$$G_1 = (G - Q_2)/(Q_1 - Q_2) \quad (7)$$

(3) 全息图再现时,合理地利用透镜可以减小直透光的影响区域,从而有效地增强再现像对比度。

3 计算全息图数值模拟

由 DMD 的灰度调制原理可知,设全息图的灰阶数为 256,则全息图可分解为 8 幅黑白二值图像。为了充分利用 DMD 的占空比,生成的计算全息图的分辨率大小与 DMD 的分辨率大小相同(1024 × 768)。为对作者提出的改进效果进行评价,本文中引入峰值信噪比和图像亮度两个指标对直接分解为 8 幅图像的全息图和进行灰度调整后的全息图的数字再现像进行评价。

3.1 峰值信噪比

$$P_{SNR} = 10 \lg \left\{ \frac{\sum_{x,y \in R} [I_1(x,y)]^2}{\sum_{x,y \in R} [I_1(x,y) - I_2(x,y)]^2} \right\} \quad (8)$$

该参量是一种评价图像的客观标准,用于评价原图像与被处理图像之间的差异。其中 $I_1(x,y)$ 是考察区域 R 内原物函数的振幅, $I_2(x,y)$ 为考察区域 R 内再现图像的振幅。

3.2 图像亮度

$$B = \iint_{x,y \in R} B(x,y) dx dy \quad (9)$$

通过计算再现图像区域 R 内各像素点的亮度 $B(x,y)$ 之和,即可获得数字再现的图像亮度,它与计算全息图的衍射效率是对应的^[11]。

3.3 数值再现像结果

为了消除极强的零级衍射斑及共轭物像的影响,对全息图进行滤波操作,然后再对全息图进行数

值再现,即得到无零级像及共轭物像干扰的单一实像,如图 1b 和图 1c 所示。

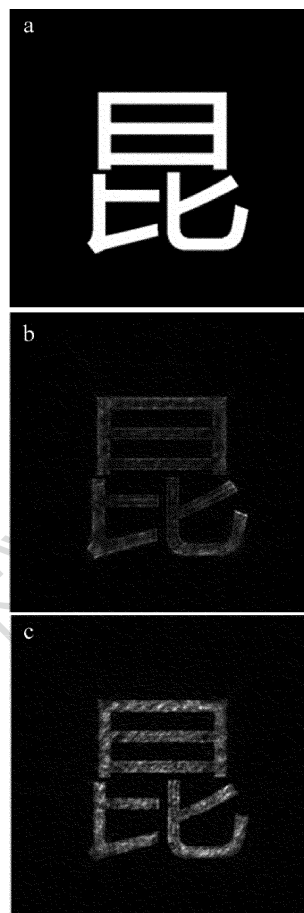


Fig. 1 a—object diaphragm b—unprocessed hologram numerical reconstruction c—processed hologram numerical reconstruction

对比图 1b 和图 1c 可以看出,经过灰度处理后的全息图数值再现像效果要明显强于直接分解为 8 幅二值图像的全息图数值再现像。

3.4 像质评价结果及分析

分别对分解为 8 幅二值图像的计算全息图和进行灰度调整后的计算全息图的再现像质进行了量化分析,计算的结果如表 1 所示,其中相对亮度的结果以亮度较大的图像的亮度作为基准求得。

Table 1 Evaluation of image quality of two computer generated holograms

coding method	unprocessed	processed
relative brightness	0.599	1
peak signal-to-noise ratio	6.985	12.822

从计算结果可以看出,在峰值信噪比和亮度两个主要评价指标上,灰度调整后的全息图再现像质量明显优于未调整灰度的全息图再现像。

4 结 论

就影响 DMD 再现全息像质的主要因素进行了分析,提出了改进方法。其中对计算全息图的灰度调整显示改进方法进行了详细的论述。本文中引入峰值信噪比和图像亮度这两个评价因子,对未处理及处理后的计算全息图进行了图像质量计算与分析。数值模拟实验表明,图像灰度调整后的全息图的再现效果要优于直接分解为 8 幅二值图像的全息图。由于这两幅全息图的差别主要在于全息图的灰度处理,可见基于 DMD 的计算全息在再现图像时,图像灰度调整的重要性。本文中提出的基于 DMD 的计算全息图重建方法,对于全息显示的进一步发展和研究有重要的指导意义。

参 考 文 献

- [1] HOU R N, YAN Y F. Elimination method of zero-order image and conjugate image of off-axis digital hologram[J]. *Laser Technology*, 2012, 36(5): 632-635 (in Chinese).
- [2] WANG Zh L, ZHANG Y A, QIAN X F. Research of reconstruction of temperature field by means of digital holography and Radon transform[J]. *Laser Technology*, 2011, 35(5): 589-592 (in Chinese).
- [3] JIAN X Zh, ZHANG H, FAN J P, *et al.* Research of computer-generated hologram based on FPGA technology[J]. *Laser Technology*, 2012, 36(1): 26-32 (in Chinese).
- [4] 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).
- [5] FAHRI Y, HOONJONG K, LEVENT O. State of the art in holographic displays; a survey[J]. *Journal of display technology*, 2010, 6(5): 443-454.
- [6] LI J Ch, SONG Q H, GUI J B. Theory research on fresnel diffraction hologram display with DMD[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(6): 1459-1463 (in Chinese).
- [7] GUO X W, DU J L, LUO B L, *et al.* Imaging model for DMD-based gray-tone lithography system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(9): 1412-1416 (in Chinese).
- [8] HU T. Enhance holographic reconstructed image displayed by DMD[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology Master Degree Dissertation, 2010: 29-33 (in Chinese).
- [9] LUCENTE M. Interactive computation of holograms using a look-up table[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 1993, 2(1): 28-34.
- [10] GAO Zh Q, LI Y. Relationship of image quality of digital hologram and grey level adjustment[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(3): 327-331 (in Chinese).
- [11] WEI T, ZHU J H, CHEN L G, *et al.* Digital holographic display based on digital micro-mirror device and quality enhancement of its reconstructed image[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(5): 952-956 (in Chinese).