

文章编号:1004-4213(2011)03-0332-4

数字微镜器件闪耀特性及其在全息显示中的应用

许富洋,李勇,高志强

(浙江师范大学 信息光学研究所,浙江 金华 321004)

摘 要:为了提高数字微镜器件的空间光调制性能,发挥其在全息显示和三维重构等方面的作用,研究了数字微镜器件的闪耀特性.结合数字微镜器件的物理结构,利用反射光栅理论分析了数字微镜器件的闪耀规律,进行了理论计算与实验修正,得出了其存在四个相对闪耀状态的结论,而通常实验所要求的 24° 角入射,为出现相对闪耀状态的最小入射角.据此,可在全息显示中选择恰当的入射角,改变数字微镜器件的闪耀状态,增强全息再现的视觉效果.以傅里叶变换全息为例进行了具体应用研究,通过再现光入射角的调节,可实现闪耀级次的调整,并增强了再现的视觉效果.实验表明,分析结果是正确的.

关键词:全息显示;数字微镜器件;闪耀特性;傅里叶变换全息

中图分类号:O438.1

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20114003.0332

0 引言

20 世纪 40 年代英国科学家 Dennis Gabor 提出了全息照相原理,60 年代激光的问世使全息技术得到了空前的发展,衍生出了全息显示、全息干涉计量、全息信息存储等技术.其中全息三维显示技术一直是人们研究的热点,早期的全息显示研究主要集中在传统的光学全息显示方面,其记录、再现的载体一般采用传统的全息记录材料. MIT 媒体实验室于 80 年代末利用高速声光调制器和扫描系统率先实现了实时三维全息显示,其中计算机可控的空间光调制器是最为关键的部件.除高速声光调制器外,目前常用的空间光调制器主要包括微型液晶显示器(Liquid Crystal Display, LCD)和数字微镜器件(Digital Micromirror Device, DMD)等. DMD 是美国德州仪器公司微电子机械技术的核心产品,具有较高的分辨率、开口率、响应速度等优点,是一种性能优良的空间光调制器^[1-2],在全息光电再现方面得到了较好的应用^[3-7]. DMD 对相干光的调制呈衍射、反射混合,类似闪耀光栅的特性^[1,8],但其相应的闪耀特性具体呈现状态及其在全息显示中的应用却鲜有报道,本文拟在这方面进行一些探讨.

1 DMD 闪耀特性研究

1.1 DMD 工作原理

DMD 由可绕对角铰链偏转的微小镜元阵列构

成,实验中 DMD 分辨率为 1024×768 ,镜元间隔 $\omega = 11.8 \mu\text{m}$,镜元长宽均为 $\omega_0 = 10.8 \mu\text{m}$,镜元沿其对角铰链可产生 $+12^\circ$ 或 -12° 的偏转,其工作原理如图 1. 每一镜元未工作时处于“自由状态”,如图 1(b)中虚线位置,加寻址电压后,则会处于“开态”或“关态”,即图中 $+12^\circ$ 、 -12° 位置. 反射镜在工作过程中,不断在“开态”与“关态”两个状态间变化,屏幕上

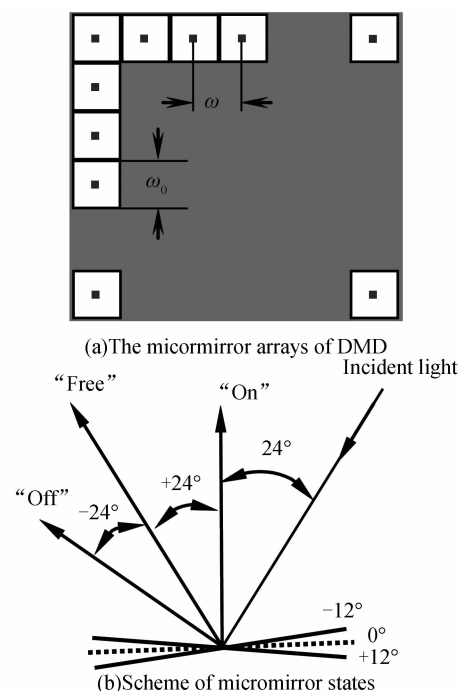


图 1 DMD 工作原理
Fig. 1 The operating principle of DMD

基金项目:国家自然科学基金(No. 60702078)资助

第一作者:许富洋(1981-),男,工程师,硕士,主要研究方向为三维显示应用及光电信息处理. Email: xfy@zjnu. cn

收稿日期:2010-09-30;修回日期:2010-11-23

相应像素分别呈现“暗”和“亮”两种状态,以脉宽调制方式完成灰度图像显示^[2].

1.2 DMD 闪耀特性探讨

假设 DMD 镜元绕图 2(a)所示对角铰链偏转,以处于“自由状态”的镜元相邻两边所在方向为轴建立 $x-y$ 坐标系,定义坐标系中斜率为+1 的方向为主对角线方向,斜率为-1 的方向为副对角线方向,则镜元偏转后,在主对角线方向,同一直线上处于“开态”的镜元位于同一平面上;在副对角线方向,同一直线上处于“开态”的镜元则两两异面。在垂直主对角线的相干平行光照射下,同一直线上的镜元,主对角线方向反射光波间不存在相位差,而在副对角线方向反射光波间则会产生相应的相位差,整体构成了特殊的可控闪耀光栅^[8].

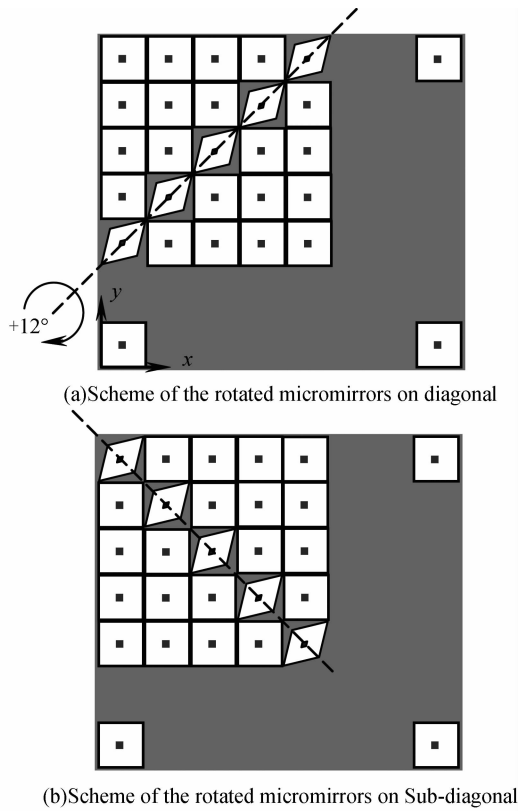


图 2 镜元偏转示意图

Fig. 2 Scheme of the rotated micromirrors

以副对角线方向上某一列处于“开态”的镜元来研究 DMD 闪耀特性,如图 3 所示,镜元中心的法线

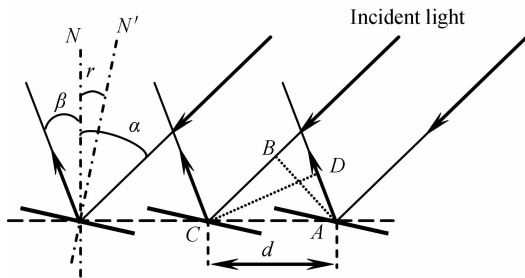


图 3 闪耀光栅结构

Fig. 3 Scheme of the blazed diffraction grating

位于同一平面上,其中 N 为 DMD 法向量方向, N' 为“开态”镜元法向量方向, $r=12^\circ$ 为两法线夹角, α 为入射角, β 为衍射角,角度均取正值,在夫朗和费衍射条件下,相邻两镜元反射光波光程差 ΔL 为

$$\Delta L = \overline{BC} - \overline{AD} = d(\sin \alpha - \sin \beta) \quad (1)$$

由 DMD 的结构可知,各镜元间距 $d = \sqrt{2}\omega$,即光栅常量 d 恒定,而镜元沿副对角线方向的宽度 a 却在 $(0, \sqrt{2}\omega]$ 范围内连续变化,并非定值,因此无法实现完全闪耀状态,但仍可以实现相对闪耀,使衍射光能向某一级相对集中^[8]. 反射光栅的光强分布具有^[9]

$$I = I_0 \frac{\sin^2 \frac{\pi a}{\lambda} [\sin(\alpha - r) - \sin(\beta + r)]}{\left\{ \frac{\pi a}{\lambda} [\sin(\alpha - r) - \sin(\beta + r)] \right\}^2} \times \frac{\sin^2 \left[\frac{N\pi d}{\lambda} (\sin \alpha - \sin \beta) \right]}{\sin^2 \left[\frac{\pi d}{\lambda} (\sin \alpha - \sin \beta) \right]} \quad (2)$$

根据式(2)可知,当实现相对闪耀时,有

$$\alpha - r = \beta + r \quad (3)$$

$$\Delta L = d(\sin \alpha - \sin \beta) = k\lambda \quad (4)$$

考虑式(2)中单缝衍射因子的影响可知,通过对入射角的调整,可实现对单缝衍射光强分布的平移调节,从而可使光栅衍射光强分布的包络线从一个位置移到另一个位置,最终使光强极大值出现在所需要的级次上,达到对不同级次的闪耀^[9].

结合式(3)和(4)可得,相对闪耀时的入射角应满足条件

$$\Delta L = 2d \sin r \cos(\alpha - r) = k\lambda \quad (5)$$

在实际使用中,DMD 显示图像时,每一个主对角线和副对角线方向上通常都会有镜元处于“开态”,因此光栅常量取 $d = \frac{\sqrt{2}\omega}{2}$, $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$,并结合已知参量代入式(5)可得

$$k = \frac{\sqrt{2}\omega \sin r}{\lambda} \cos(\alpha - r) \approx 5.48 \cos(\alpha - r) \quad (6)$$

讨论图 3 中入射光在 N 右侧的情况(左侧呈对称),由式(6)可知, k 只能取 1 到 5 这五个值,见表 1. 据此分析本文把亮度为 255 的纯白图像输入 DMD 进行实验,即使得所有镜元都处于“开态”,实验中很容易就能观察到确实存在 4 个相对闪耀状态,图 4 所示为 $\alpha = 50.5^\circ$ 时的闪耀状态. 造成理论值

表 1 相对闪耀位置角度

Table 1 Angles of the relative blazing states

k	1	2	3	4	5
Theoretical values/ $^\circ$	91.5	80.6	68.8	55.1	36.2
Experimental values/ $^\circ$	/	76.5	65.5	50.5	24.0

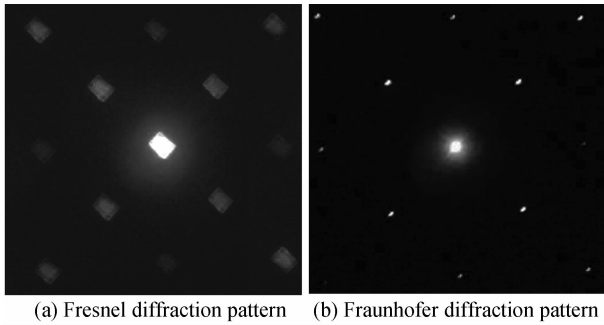


图 4 $\alpha=50.5^\circ$ 时相对闪耀的衍射图样
Fig. 4 The diffraction pattern of relative blazing with $\alpha=50.5^\circ$ 和实验值出入较大的主要原因是镜元构成的二维光栅其宽度 a 在 $(0, \sqrt{2}\omega]$ 范围内变化。

根据实验测量的结果,对理论值进行修正.以理论上 $k=5$ 的相对闪耀状态为基准,此时实验测量值 $\alpha=24.0^\circ$ 、 $r=12^\circ$,代入式(6)可得 $k=5.36$,即理论值与实验值有出入,以两者的比值为系数对式(6)进行修正,可得

$$k = \frac{5}{5.36} \times 5.48 \cos(\alpha - r) \quad (7)$$

再将相应的 k 值代入计算,可得修正后的相对闪耀状态角度,见表 2,可以发现修正后的理论值和实验值吻合得较好.从中可以知道,通常实验中所采用的 24° 角入射,即为 DMD 出现相对闪耀状态的最小入射角,另外在实验中也可以针对不同的需要灵活地调节入射角,以获取最佳的视觉效果,而不一定要以通常所要求的 24° 角入射.

表 2 修正后相对闪耀位置角度

k	1	2	3	4	5
The modified theoretical values/ $(^\circ)$	90.7	79.0	66.1	50.5	24.0

2 全息显示研究

针对数字全息中经常采用的傅里叶变换全息,本文设计实验进行了再现研究.为方便起见,选择了二维物体,采用计算机全息图的方式进行实验.

计算机全息图通常采用如图 5 所示的模型,

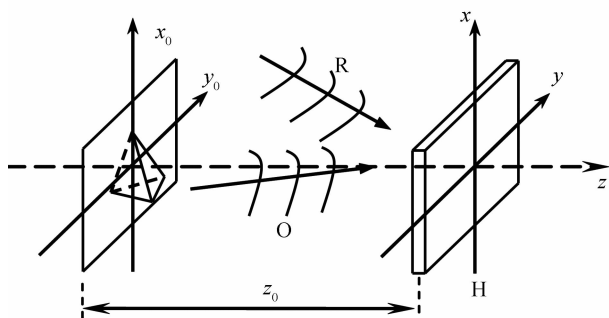


图 5 计算机全息图模型
Fig. 5 Computational model of CGH

全息面 H 位于 xy 坐标平面上, x_0y_0 坐标平面中心位于物体中心. DMD 本身存在二维光栅离散结构,根据采样定理并结合光栅衍射理论可知,镜元中心间隔 ω 决定了制全息图时参物光在 xz 或 yz 平面的最大夹角应满足^[7]

$$\sin \theta_{\max} = \lambda / \omega \quad (8)$$

计算可得 $\theta_{\max} = 3.07^\circ$,即在实验中参物夹角不可超过 3.07° .

在计算机傅里叶变换全息图时,以点光源为参考光,采用快速傅里叶算法计算,则物的采样与全息图的采样应满足

$$\Delta x = \lambda z_0 / M \omega, \Delta y = \lambda z_0 / N \omega \quad (9)$$

式中 M, N 为 x_0, y_0 方向物的采样点数, $\Delta x, \Delta y$ 为相应的采样间隔, z_0 为物到全息面的距离.为充分利用 DMD 有限的空间带宽积,减少物波信息丢失,计算时,全息图的像素数、抽样间隔均与 DMD 相一致.设 $z_0 = 1000$ mm,则可得 $\Delta x = 52.4 \mu\text{m}$, $\Delta y = 69.8 \mu\text{m}$,以通常采用的 24° 角入射,即以 $k=5$ 的相对闪耀角入射,其再现结果如图 6,图 6(a)原物模型,(b)为经二值化后的全息图片断,(c)为模拟再现结果,(d)为再现拍摄结果,由于较难拍摄,效果不如直接观察的好.为方便观看,下述再现像拍摄图均旋转了 45° .

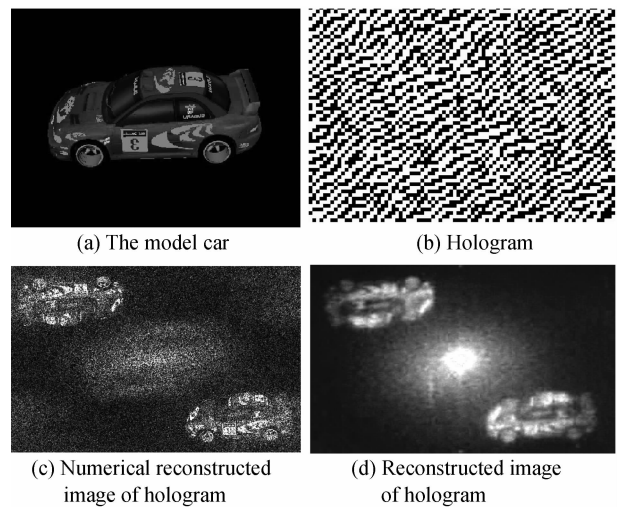


图 6 $\alpha=24.0^\circ$ 时傅里叶变换全息再现效果
Fig. 6 Results of Fourier transform holography with $\alpha=24.0^\circ$

再现时,由于零级处于两个再现像的中间,对再现效果和观察效果造成了影响.考虑到 DMD 存在多个闪耀状态,而通过入射角的调节可实现闪耀级次的调整;若使 DMD 处于 $k=4, 5$ 闪耀状态的中间,则此时 DMD 衍射图样中 $k=4, 5$ 级次的四个亮斑将会有相同的亮度,测得 $\alpha=37.5^\circ$,如图 7(a).图 7(b)为四个亮斑中间的傅里叶变换全息再现效果,左上角为原始像,右下角为对角线方向相邻的另一

级再现像的共轭像,在没有特殊要求的情况下,在实际效果上可以将两者当成原始像和共轭像,由于中间没有零级,非常有利于观察.为避免 DMD 本身衍射亮斑的影响,可在实验光路中加上滤波窗口,仅让图 7(b)中的再现像通过,再现效果如图 8,此时视觉效果与拍摄效果均最佳.

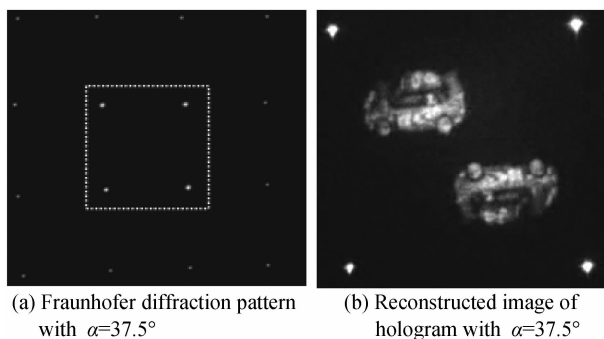


图 7 $\alpha=37.5^\circ$ 时的再现效果

Fig. 7 Experimental results with $\alpha=37.5^\circ$

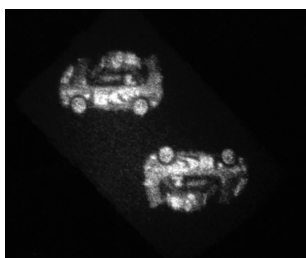


图 8 加滤波窗口后的再现效果

Fig. 8 Experimental results with filtering window

3 结论

DMD 是具有大光通量和高衍射效率的反射型空间光调制器,在全息显示方面具有良好的应用前景.基于对 DMD 衍射特性的分析,得出了 DMD 存在四个相对闪耀状态的结论,据此可以在实验中针对不同的需要灵活地调节入射角,以获取最佳的再现效果,而不一定要以通常所要求的 24.0° 角入射.

Blazing Characteristics of DMD and Its Applications in Holographic Display

XU Fu-yang, LI Yong, GAO Zhi-qiang

(Institute of Information Optics, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China)

Abstract: To improve the spatial light modulation properties of Digital Micromirror Device (DMD), and exert its performance in holographic display and three-dimensional reconstruction, blazing characteristics of DMD was investigated. With the theory of reflection grating and DMD microstructure, it was concluded that there were four relative blazing states of DMD according to theoretical calculations and experimental results. And it was drawn that incident angle of 24° as usually demanded was the least angle of blazing angles. Thus the incident angle could be adjusted properly to change the blazing states of DMD and enhance the visual effects of the holographic representation. Finally, Fourier transform holography display was investigated as an application example, and the experimental results agree well with the theoretical analysis.

Key words: Holographic display; Digital Micromirror Device (DMD); Blazing characteristics; Fourier transform holography

如上述在傅里叶变换全息再现中,调节入射角至 DMD 的中间相对闪耀状态,并在光路中加滤波窗口,可使其视觉效果最佳;对于其他类型的全息显示可根据实际的需要和后续光路的调节要求,选择恰当的入射角,这可为 DMD 在全息显示和三维重构等方面的应用提供参考.

参考文献

- [1] KREIS T, ASWENDT P, HOFLING R. Hologram reconstruction using a digital micromirror device[J]. *Optical Engineering*, 2001, **40**(6):926-933.
- [2] CHAO Yi-ping, SU Xian-yu, XIANG Li-qun. The spatio-temporal characteristic of DMD[J]. *Laser Journal*, 2002, **23**(5):16-18.
曹益平, 苏显渝, 向立群. 数字微镜器件的时空特性[J]. *激光杂志*, 2002, **23**(5):16-18.
- [3] HUEBSCHMAN M L, MUNJULURI B, GARNER H R. Dynamic holographic 3-D image projection [J]. *Optics Express*, 2003, **11**(5):437-445.
- [4] HUEBSCHMAN M L, MUNJULURI B, HUNT J, et al. Holographic video display using digital micromirrors [C]. *SPIE*, 2005, **5742**:1-14.
- [5] WEI Tao, ZHU Jian-hua, CHEN Li-gong, et al. Digital holographic display based on enhancement of its digital micromirror device and quality reconstructed image[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(5):952-956.
魏涛, 朱建华, 陈立功, 等. 基于 DMD 的数字全息显示及其再现像质增强[J]. *光子学报*, 2008, **37**(5):952-956.
- [6] TANJUNG R B A, XU Xue-wu, LIANG Xi-nan, et al. Digital holographic three-dimensional display of 50-Mpixel holograms using a two-axis scanning mirror device [J]. *Optical Engineering*, 2010, **49**(2):025801-1-025801-9.
- [7] WANG Da-peng, WEI Sui. Characterization of a digital micromirror device for computer generated holographic video [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1):50-55.
王大鹏, 韦穗. 数字微镜器件在视频全息中的应用[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1):50-55.
- [8] WANG Da-peng, WEI Sui. Phase modulation properties of digital micromirror device[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7):1255-1260.
王大鹏, 韦穗. 数字微镜器件的相位调制性质[J]. *光学学报*, 2007, **27**(7):1255-1260.
- [9] 祝绍箕, 邹海兴, 包学诚, 等. 衍射光栅[M]. 北京:机械工业出版社, 1986:47-48.