

数字微镜器件用于并行共焦测量的再研究

余 卿 余晓芬 刘文文 程伶俐

(合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要 数字微镜器件(DMD)可以控制其中每个微镜的偏转状态,相对于其他光分束器件,它可以构建出点光源大小可变、间距可调的柔性阵列光源。在前期研究的基础上,理论上推导出该阵列光源可以用于并行共焦测量,改进了测量光路,并结合实际使用找到了合适的阵列光源参数,获知了并行共焦测量系统的纵向分辨率与点光源大小的关系,最终通过对实物的测量较完善地阐述了基于 DMD 的并行共焦测量系统。

关键词 测量;数字微镜器件;柔性;阵列光源;并行共焦测量系统

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0523005

Re-Studies on Parallel Confocal Measurement System with Digital Micromirror Device

Yu Qing Yu Xiaofen Liu Wenwen Cheng Lingli

(School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China)

Abstract Compared with other beam splitting devices, digital micromirror device (DMD) can control the deflection state of every micromirror, which can construct the flexible array light source with tunable size of point light source and distance. Based on the previous researches, the theoretical model of DMD is deduced and the optical path of measurement is improved. Combined with actual usage, the suitable parameters of array light source are found. The relation between longitudinal resolution of parallel confocal microscope and the size of point light source is gotten. Finally, the parallel confocal measurement system based on DMD is proved by experiments.

Key words measurement; digital micromirror device (DMD); flexibility; array light source; parallel confocal measurement system

OCIS codes 230.0230; 180.0180; 180.1790; 130.3990

1 引 言

自从 20 世纪 50 年代 Minsky 提出了共焦显微的概念以来,共焦显微测量已经在生物医学、材料学等领域有了广泛的应用^[1~3],而其中并行共焦测量技术由于可以对被测物面上的多个点同时进行层析,大大提高了测量速度,引起了国内外专家的重视。并行法的特点是将一束光分成彼此之间光轴平行的多束光,再通过光学系统建立起并行光源、物面和 CCD 像面的共轭关系。国内外的研究者尝试利用多种方法进行光源的分束,包括针孔阵列、微透镜

阵列等^[4~7],这些方法都有一定的应用场合,但是都存在一个缺陷,就是它们制作起来比较麻烦,而且一旦制作完成,诸如孔径、孔间距(微透镜阵列上对应的参数分别是微透镜直径和微透镜间距)等都不能再改变,导致构建成的并行共焦系统的适应性较差。

为了改善这一缺陷,本文采用了数字微镜器件(DMD)作为光分束器件。首先从理论上推导了相干光被它调制后在空间中的特性^[8~11],然后探讨了一种适用于 DMD 的并行共焦光路,并通过实验研究了 DMD 构建的阵列光源中点光源的大小与所得

收稿日期: 2010-09-20; **收到修改稿日期**: 2011-01-19

基金项目: 国家自然科学基金(50775063)资助课题。

作者简介: 余 卿(1983—),男,博士研究生,主要从事光电检测方面的研究。E-mail: jorson.y@163.com

导师简介: 余晓芬(1954—),女,教授,博士生导师,主要从事精密测试技术及仪器,测量误差与仪器精度理论及应用,自动检测技术及仪表智能化等方面的研究。E-mail: yuxiaofen99@126.com

到的光强位移曲线的半峰全宽(FWHM)之间的关系,并对实物进行了测量。

2 DMD 介绍

DMD 是在 1987 年由 TI 公司发明的,它的微芯片实际上是一个快速的、能进行反射的数字光开关。一块 DMD 芯片是由一定像素的微镜阵列构成的(有多种规格:800 pixel×600 pixel,1024 pixel×768 pixel,1280 pixel×1024 pixel,⋯),每一个微镜的大小固定、彼此的间距也是固定的,且可以绕着各自的旋转轴做±12°的偏转(早期的 DMD 微镜可以绕旋转轴做±10°的偏转),即每个微镜都有三个状态: +12°,0°和 -12°。现在定义 +12°时微镜处于“ON”状态, -12°时微镜处于“OFF”状态,DMD 芯片未通电时,所有微镜均保持在 0°。图 1 是 DMD 微镜的结构示意图。

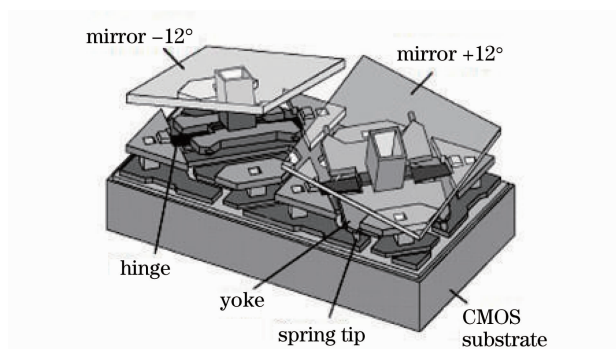


图 1 DMD 微镜的结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of DMD

从 DMD 的结构特点很容易知道,DMD 通电后,各个微镜会偏转 +12°或 -12°,假设这时有一束光照射在 DMD 表面,那么必然会在空间中产生两个反射像,且这两个反射像的光强互补,如图 2 中的 a, b ,使用过程中,只需用其中一个反射像即可。

如果照射在微镜表面的是一束激光,由于其单色性非常好,那么必然会在空间中形成微镜阵列的衍射像。因此,很有必要再用衍射的原理推导相干光照射下 DMD 在空间的特性。

3 理论推导

3.1 反射模型

可以将微镜看成是一面反射镜,遵循反射定律,定义了一些参数,如图 2 所示。入射光线与微镜平面的夹角是 θ ,当微镜绕其旋转轴做 $-\delta$ 或 $+\delta$ 的偏转时,光线就被分别反射至接收屏的 a, b 两处,形成互补像,此时 a, b 两处像的间距可以表示为

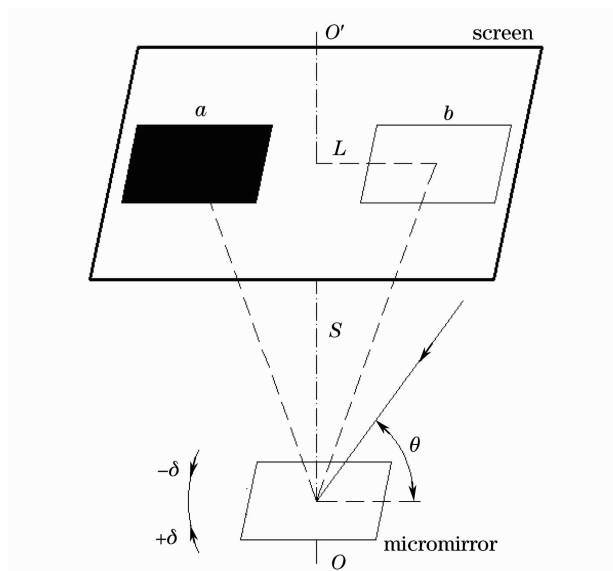


图 2 单个微镜反射模型

Fig. 2 Reflection model of a micromirror

$$2L = S[\sin(90^\circ - \theta - 2\delta) + \sin(90^\circ - \theta + 2\delta)] = 2S\cos\theta\cos 2\delta, \quad (1)$$

式中 S 表示微镜平面与接收屏的距离。

从前文已知, $\delta=12^\circ$, 而 S 也可看成是定值,所以 $2L$ 是由光线的入射角 θ 决定的: θ 越小, $2L$ 越大; 即入射角与微镜平面的夹角越小, 互补像之间的间距越大。

假定入射光强是 I_0 , 且光在传播、反射期间能量不会损失; a, b 两处的光强可以分别表示为 I_a 和 I_b , 那么它们和入射光之间存在关系:

$$I_0 = I_a + I_b. \quad (2)$$

3.2 衍射模型

实际上,光线经过 DMD 调制后的特性,并不能单纯地看作是由反射定律决定的。由于微镜阵列中每一个“小单元”之间是有间隙的,在光线的照射下,微镜单元会对光线产生作用,而彼此间的间隙则不会,因此不妨将微镜阵列看成是具有一定占空比的二维衍射光栅,并以此为模型推导它在单色光照射下的空间衍射特性。在进行这部分推导之前,首先定义几个和 DMD 相关的物理量:

X, Y 为微镜阵列 0° 时所在平面对应的直角坐标系两个指向; M 为 DMD 在 X 向的微镜数目; N 为 DMD 在 Y 向的微镜数目; α 为 DMD 在 X 向的占空比; β 为 DMD 在 Y 向的占空比; d 为相邻微镜中心之间的间距, X 向与 Y 向的值相等。由此,建立了 DMD 的理论模型 $t(x, y)$ 为

$$t(x, y) = t_x(x)t_y(y), \quad (3)$$

式中

$$\begin{cases} t_x(x) = \left[\text{rect}\left(\frac{x}{\alpha d}\right) * \frac{1}{d} \text{comb}\left(\frac{x}{d}\right) \right] \text{rect}\left(\frac{x}{Md}\right) \\ t_y(y) = \left[\text{rect}\left(\frac{y}{\beta d}\right) * \frac{1}{d} \text{comb}\left(\frac{y}{d}\right) \right] \text{rect}\left(\frac{y}{Nd}\right) \end{cases} \quad (4)$$

式中 * 表示卷积,下同。这时,让一个单位振幅的单色平面波照射在 DMD 上,那么根据菲涅耳衍射可知,在显示屏 $x_1 y_1$ 上的光波场可以表示为

$$\tilde{E}(x_1, y_1) = \iint_{-\infty}^{\infty} t(x, y) \exp\left\{ \frac{i\pi}{\lambda S} [(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2] \right\} dx dy, \quad (5)$$

式中 S 表示 DMD 表面到显示屏的间距。如果再考虑到入射光的角度 θ ,则需要引入空间频率 (μ, ν) ,如果用 θ_x 和 θ_y 来表示空间频率的话,又有 $\mu = \frac{\sin \theta_x}{\lambda}$, $\nu = \frac{\sin \theta_y}{\lambda}$,那么,就会得到

$$\tilde{E}(x_1, y_1) = \iint_{-\infty}^{\infty} t_x(x) t_y(y) \exp[i2\pi(\mu x + \nu y)] \exp\left\{ \frac{i\pi}{\lambda S} [(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2] \right\} dx dy. \quad (6)$$

如果只考虑和积分因子 dx, dy 相关的量,则可得

$$\begin{aligned} \tilde{E}(x_1, y_1) = \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda S} (x_1^2 + y_1^2) \right] \iint_{-\infty}^{\infty} \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda S} (x^2 + y^2) \right] t_x(x) t_y(y) \cdot \\ \exp\left\{ i2\pi \left[\left(\frac{\sin \theta_x}{\lambda} - \frac{x_1}{\lambda S} \right) x + \left(\frac{\sin \theta_y}{\lambda} - \frac{y_1}{\lambda S} \right) y \right] \right\} dx dy. \end{aligned} \quad (7)$$

令 $\frac{\sin \theta_x}{\lambda} - \frac{x_1}{\lambda S} = f_x$, $\frac{\sin \theta_y}{\lambda} - \frac{y_1}{\lambda S} = f_y$, 并进行傅里叶变换可得

$$\begin{aligned} \tilde{E}(x_1, y_1) = \alpha \beta M^2 d^2 \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda S} (x_1^2 + y_1^2) \right] F \left\{ \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda S} (x^2 + y^2) \right] \right\} \Big|_{f_x, f_y} * \\ \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left\{ \text{sinc}(\alpha m) \text{sinc}\left[Md \left(f_x - \frac{m}{d} \right) \right] \right\} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left\{ \text{sinc}(\beta n) \text{sinc}\left[Nd \left(f_y - \frac{n}{d} \right) \right] \right\}. \end{aligned} \quad (8)$$

从(8)式不难发现,单色光被 DMD 调制后,所形成的光波场实际上是一个二维周期性光波场,其中心在 $f_x = m/d, f_y = n/d$ 时的位置。由 f_x 和 f_y 的定义可以知道,中心坐标为

$$\begin{cases} x_1 = S \sin \theta_x - \frac{Sm\lambda}{d} \\ y_1 = S \sin \theta_y - \frac{Sn\lambda}{d} \end{cases} \quad (9)$$

当 $m = 0$ 及 $n = 0$ 时,光波场出现零级衍射图像,此时的光强也达到了最大;当 $\alpha = 1$ 且 $\beta = 1$ 时,调制后的光波场的周期性消失。从宏观上看,此时 DMD 微镜之间的间隙消失了, DMD 平面可以看成是一个完整的平面镜,但是实际上,相邻微镜之间肯定存在间隙的,即 $0 < \alpha, \beta < 1$ 始终成立,所以调制后的光波场始终是一个二维周期性衍射场。

因而,相干光经过 DMD 调制后所形成的光波场是一个包含了 DMD 自身的衍射图案、DMD 所显示图像的实像、虚像的复杂二维周期性光波场。

4 光路设计

通过理论推导,知道了相干光经过 DMD 调制后所形成的是复杂的二维周期性光波场,而在 DMD 用于并行共焦探测时,只需用到 DMD 的零级衍射图案中所包含的 DMD 所显示图像的实像。因而在光路构建上,参考了投影光路以形成所需的阵列光,同时还利用了望远镜系统,使物面移动时,光点阵列不会发生横向移动,并在 CCD 前方安置了一块透镜来进行 CCD 与 DMD 的像素匹配,最终搭建了如图 3 所示的光路图。

为了保证 DMD 形成的光点阵列不会随着物面沿光轴方向的移动而发生偏移,需要在 DMD、物面和 CCD 中的任意二者之间分别构建出望远镜系统,因而在设计的光路中,3 个透镜的焦点重合到了分光镜的中心。

实际测量中,如果单个 DMD 像素在 CCD 上所成像的大小小于 CCD 的单个像素,就会出现一个 CCD 像素同时“测量”多个 DMD 像素的灰度值的情

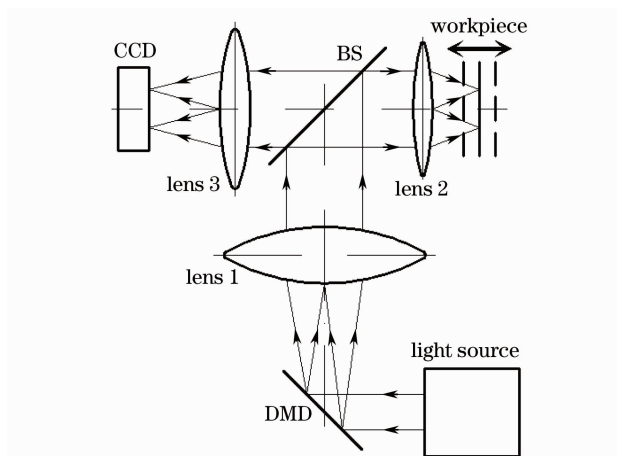


图 3 测量光路示意图
Fig. 3 Optical path for measurement

况,带来了测量误差;另外,如果单个 DMD 像素的像过小,有可能导致其成像在 CCD 像素之间的空隙中,使测量失效,如图 4 所示。

从图 4 可以看到,DMD 所成像的像素应至少大于两个 CCD 的像素,才不会出现上面所说的情况,因而系统中需要在 CCD 前方加一块焦距为 f_3 的透镜 3 来实现像素的匹配。假设 DMD 后方透镜 1 的焦距是 f_1 ,那么结合图 3 所示的光路图,DMD 在 CCD 上所成像的像素大小为

$$\delta_c = \delta_{\text{DMD}} \frac{f_3}{f_1} \quad (10)$$

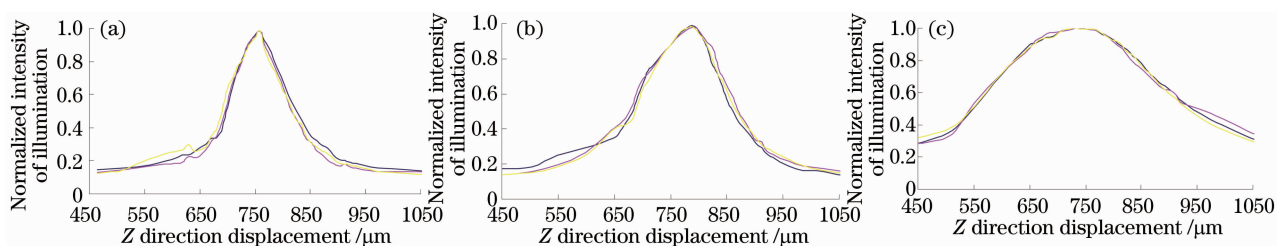


图 5 点光源大小不同的光强位移曲线。(a) 3 pixel×3 pixel, (b) 4 pixel×4 pixel, (c) 5 pixel×5 pixel
Fig. 5 Optic-intensity displacement curve of point light source with different size. (a) 3 pixel×3 pixel, (b) 4 pixel×4 pixel, (c) 5 pixel×5 pixel

图 5 中多种颜色的曲线表示多次测量的结果。显然,随着点光源的尺寸逐渐变大,光强位移曲线的半峰全宽也在变大,与之密切相关的共焦测量系统的纵向分辨率却在降低,即较小的点光源尺寸可以带来纵向分辨率的提升。但是,点光源的尺寸不能无限地变小,一方面它受到了 DMD 的单像素尺寸以及图 3 所示的透镜 1,3 的焦距比的限制;另一方面,如果点光源尺寸太小,则需要增加光功率,这样会带来比较大的背景噪声,对测量不利。综合考

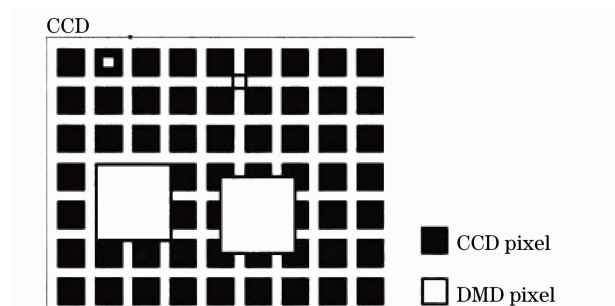


图 4 CCD 与 DMD 的像素匹配示意图
Fig. 4 Pixel matching of CCD and DMD

虑后,点光源的大小设定为 DMD 的 3 pixel×3 pixel,间距为 DMD 的 20 pixel(间距只会影响有效测量点的数量)。

在上述理论及实验的基础上,对硬币背面花纹的高度进行了测量,首先用分辨率为 10 nm 的电感测微仪对花纹的高度进行标定,其结果作为真实值;再用 DMD 构建的并行共焦系统进行测量,结果如表 1 及图 6 所示。

5 实 验

在实验之前,本课题组编制了一套软件来控制 DMD 中的每个微镜的偏转方向及偏转频率,以获得任意所需的阵列光源,且这个阵列光源中的各个点光源的大小和间距都是可调的。

为了论证 DMD 可以用于并行共焦测量,首先利用量块作为反射物面,得到了点光源大小不同情况下的光强位移曲线,如图 5 所示。

表 1 硬币背面花纹的高度测量数据

Table 1 Measured data of height from the reverse side of coin

	1	2	3	4	5	Average	Deviation	True value
Bottom height / μm	946.96	949.02	947.52	951.53	948.86	948.78	1.77	—
Top height / μm	998.54	999.42	999.44	1004.92	1001.73	1000.81	2.58	—
Height / μm	51.58	50.40	51.92	53.39	52.87	52.03	1.16	51.32

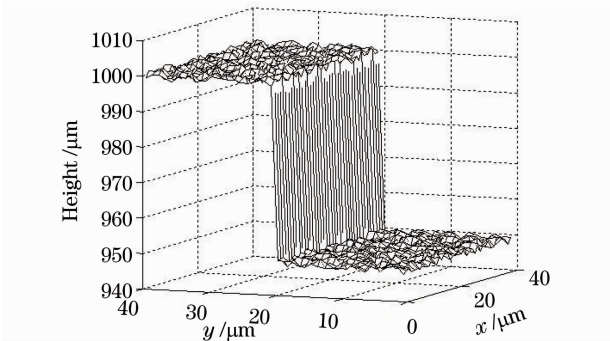


图 6 三维形貌测量结果

Fig. 6 Measured result of 3D surface profile

6 结 论

推导了 DMD 的反射及衍射模型,从理论上论证了 DMD 作为光分束器件用于并行共焦测量的可行性,同时将光源更换为激光,解决了卤素灯光源的发热问题,改进后的光路能够保证测量点在被测物移动过程中不发生横向漂移,透镜 3 的引入可使 DMD 形成的点光源尺寸减小至与 CCD 的像素一一对应,并结合实际使用情况给出了 DMD 所构建的阵列光源的参数。实验证明,随着 DMD 构建的阵列光源中点光源尺寸的减小,系统的纵向分辨率有了明显的提高;随后以硬币背面的花纹为被测物进行了高度测量实验,结果表明了 DMD 作为光分束器件用于并行共焦测量系统是具有较高的实用价值的。

参 考 文 献

- Minsky. Microscopy Apparatus [P]. U. S. Patent 3013467, 1961
- T. Wilson. Confocal Microscopy [M]. New York: Academic Press, 1990
- Wang Yonghong, Yu Xiaofen, *et al.*. A survey of the non-scanning 3-D profile confocal detecting [J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2003, **24**(4): 8~11
王永红,余晓芬等.非扫描并行三维共焦检测技术综述[J].*仪器仪表学报(增刊)*, 2003, **24**(4): 8~11
- Hu Maohai, Tao Chunkan, Gao Wanrong, *et al.*. 3D reconstruction of data field of laser confocal scanning microscope [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **29**(6): 573~575
胡茂海,陶纯堪,高万荣等.激光共焦扫描显微镜数据场的三维重建[J].*中国激光*, 2002, **29**(6): 573~575
- H. J. Tiziani, H. M. Uhde. Three-dimensional analysis by a microlens-array confocal arrangement [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(4): 567~572
- M. Ishihara, H. Sasaki. High-speed surface measurement using a nonscanning multiple-beam confocal microscope [J]. *Opt. Engng.*, 1999, **38**(6): 1035~1040
- Tian Weijian, Ding Zhihua, Guo Lürong *et al.*. A confocal method for measuring whole-field three-dimensional surface topography [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(6): 757~761
田维坚,丁志华,郭履容等.一种全场三维共焦检测的新方法[J].*光学学报*, 1998, **18**(6): 757~761
- Tian Weijian, Chen Bo, Guo Lürong *et al.*. Theoretical analysis for parallel confocal detecting method [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(10): 1381~1385
田维坚,陈波,郭履容等.并行共焦三维检测方法的理论分析[J].*光学学报*, 1999, **19**(10): 1381~1385
- Yu Daoyin, Tan Hengying. Engineering Optics [M]. Beijing: China Machine Press, 1999. 267~273
郁道银,谈恒英.工程光学[M].北京:机械工业出版社,1999. 267~273
- Han Chao, Wei Sui, Quan Xilong *et al.*. Holographic display of digital micromirror device [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 190~194
韩超,韦穗,权希龙等.数字微镜器件的全息显示[J].*中国激光*, 2010, **37**(1): 190~194
- Wang Wei, Gong Mali. Spatial light modulating characters of digital micro mirror device (DMD) at laser illumination [J]. *Electro-optic Technology Application*, 2007, **22**(3): 31~35
王巍,巩马理.数字微镜器件(DMD)在相干光照下的空间光调制特性[J].*光电技术应用*, 2007, **22**(3): 31~35
- Li Junchang, Song Qinghe, Gui Jinbin. Theory research on fresnel diffraction hologram display with DMD [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(6): 1459~1463
李俊昌,宋庆和,桂进斌.数字微镜用于菲涅耳衍射全息显示的理论研究[J].*光子学报*, 2009, **38**(6): 1459~1463