

文章编号: 1000-7032(2015)11-1325-05

基于数字微镜阵列光调制的激光防护系统

佟 洋, 徐熙平*

(长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 提出一种基于数字微镜阵列(DMD)的激光防护系统设计方案,利用DMD的光调制作用减少强激光对光电成像设备的损坏。详细介绍了系统的工作原理、DMD及CCD的选型、投影光路和光学转换系统的设计,运用相移莫尔法进行了图像像素的调校。模拟实验结果显示,该系统可在不同光斑半径和光强的条件下成功识别激光光斑中心点的像素坐标和半径,实现对光斑对应区域的微反射镜控制,激光光强可衰减70%以上。

关键词: 数字微镜阵列; 激光防护; 莫尔相移法

中图分类号: TN216 文献标识码: A DOI: 10.3788/fgxb20153611.1325

Protection System for Optoelectronic Sensors Against Laser Radiation Based on Light Modulation of DMD

TONG Yang, XU Xi-ping*

(School of Opto-electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

* Corresponding Author, E-mail: xxp@cust.edu.cn

Abstract: A design scheme of laser protection system based on digital micro-mirror device (DMD) was proposed to reduce the damage of intense laser to optoelectronic imaging equipment. The working principle of the system, the model selection of DMD and CCD, the projection optical path and the design of optical conversion system were introduced in detail. The image pixels were tuned by using the phase-shifting Moiré method. The simulation results show that the system can successfully identify pixel coordinates and radiuses of the laser spot center points in different spot radiuses and light intensities, and achieve micro-mirror control of the corresponding regions of spots. The laser light intensity can be attenuated by over 70%.

Key words: DMD module; protection system against laser radiation; phase-shifting Moiré method

1 引 言

近年来,随着光电技术的迅猛发展,光电成像技术成为重要的制导方式。由于该类设备中的光传感器等元件往往具有累计增益,因此容易受到高强度激光的辐射而损坏。为保持光电设备的稳

定运行,必须采取有效的激光防护措施。

激光防护技术主要分为基于光学相变、线性光学和非线性光学原理的三大类^[1]。主要形式有薄膜吸收或反射^[2-4]、光谱滤波、光限幅技术^[5-10]、光学开关技术等。本文提出了一种基于数码微镜阵列的激光防护方案,该方案运用光学

开关技术,通过改变微镜的反射角度和反射时间达到限制进入光电设备的激光强度的目的,有效地抑制了光饱和现象,实现了抗激光辐射的效果。

2 系统设计

基于微镜阵列的激光防护系统结构如图 1 所示。该系统主要由光学投影系统、DMD 组件、光学转换系统、CCD 模块、CPU 控制器以及各种接线组成。含有自然光和强激光的混合光进入投影系统,经调整对准到 DMD 的反射镜面;反射后的光进入光学转换系统,投射到 CCD 相机;采集的图像信息送至 CPU 进行运算,确定图像的光强饱和中心和半径,将对应的微镜控制信息传回 DMD,实现强激光的光强衰减功能。由于系统中的 CCD 的过曝光可以通过调节 CCD 的曝光时间予以消去,而激光的作用是无法消除的,因此对 CCD 曝光的调节可以区分是否为激光导致的过饱和。

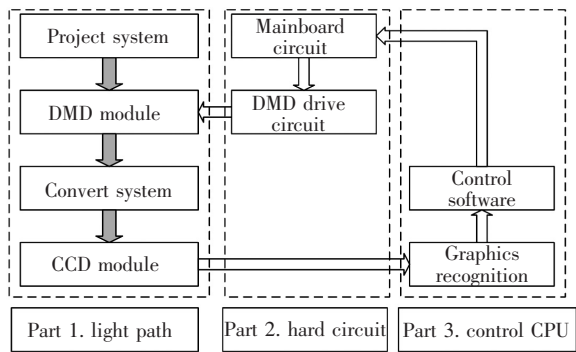


图 1 系统原理图,其中实体箭头表示光路,空心箭头表示电路连接线或信号连接线。

Fig. 1 Block diagram of the protection system against laser radiation. Solid arrows indicate the light path, and hollow arrows are electronic or digital connections.

2.1 DMD 组件与 CCD 相机

DMD 是一种数字调控的光开关器件,采用二进制脉宽调制,实现光的振幅、相位和反射方向的调整。每个 DMD 芯片上集成了数以万计的微反射镜,单个镜片可绕对角线进行 $\pm 12^\circ$ 的轻微转动,并可以独立控制。本系统通过控制微镜的偏转角度来实现对光线方向的控制。

DMD 组件是本系统实现激光防护功能的核心器件,因此必须对它的分辨率、控制精度以及响应速度等参数进行优选。综合各个参数,本系统选用了 XD-SD02 的 DMD 组件。它的分辨率为

1 024 × 768 像素,像元尺寸为 13.68 μm 。它有 3 个状态:“on”、“off”、“flat”,分别对应微镜的 3 个角: $+12^\circ$ 、 -12° 和 0° 。其中,DMD 的“flat”状态为未上电的初始状态,它不是一个可控的稳定状态。上电后,对 DMD 的控制只有两种状态:“on”和“off”。具体参数见表 1。

为了提高激光防护系统的分辨率,需要实现 CCD 相机与 DMD 组件的像元对应性,而相机的帧频也是本系统实现高性能激光防护的重要条件。因此,我们选择像素高以及与 DMD 帧频差 5 ~ 10 倍的相机型号。本设计中选取了约 140 兆像素的 CCD-ICX285AL,参数详见表 1。

表 1 DMD 组件和 CCD 相机的具体参数

Table 1 Specifications of DMD & CCD

参数	DMD	CCD
光学尺寸	14.008 mm × 10.506 mm	10.2 mm × 8.3 mm
全部像元	1 024 × 768	1 431 × 1 050
像元尺寸	13.68 μm × 13.68 μm	6.45 μm × 6.45 μm
斜边尺寸	17.51 mm	11 mm
帧频	150 Hz	15 Hz
工作波段	350 ~ 700 nm	400 ~ 800 nm

2.2 投影系统与光学转换系统

本系统的光学设计部分包括投影系统和光学转换系统,用以实现光学引擎功能。考虑投影图像的均匀性,降低能量耗损,保证成像质量,避免投影系统与光学转换系统的光机结构相互制约的问题,本设计采用了带有 TIR 棱镜的远心光路,根据全反射性质,精确设计对应倾斜边的角度,实现了光线的控制,如图 2 所示。

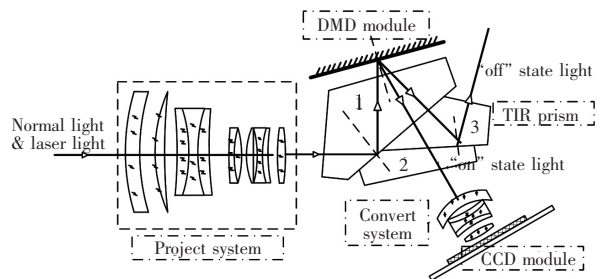


图 2 引入 TIR 棱镜的光路设计

Fig. 2 Setup of optical devices including TIR

含有自然光和激光的混合光线通过投影系统光路进入到 TIR 棱镜,通过棱镜 1 倾斜边界全反射到 DMD 反射镜面。根据 DMD 的不同状态,反射后的光线分别进入不同的反射棱镜:“on”状态

下,反射光线进入棱镜 2,直接透射出去进入光学转换系统和 CCD 相机;“off”状态下,DMD 反射的光线进入棱镜 3,并经再次全反射出去并用暗板接收,远离光学转换系统,避免干扰。

根据选定的 DMD 组件以及 CCD 相机的尺寸,光学转换系统的垂轴放大倍率为

$$\lambda = \frac{8.3}{10.506} \approx 0.79, \quad (1)$$

考虑到加工误差及分光精度,设 DMD 反射后的光锥角为 $\beta' \approx 11^\circ$,则 CCD 表面光束的光锥角 $\beta \approx 8.7^\circ$ 。若取光学转换系统的像方孔径角为 8.5° ,则物方孔径角约为 10.7° 。

3 像素调校

由于 CCD 和 DMD 的像元非常微小,像元的

阵列也并不相同,因此要实现系统的闭环控制功能,需要对两个元件间的图像传递通信进行校对。本文采用了基于相移莫尔法的像素通信调校方法,该方法通过莫尔条纹图案的相位分布辨别像素是否匹配,并且能够提供像素的错位补偿。该方法易于实行,并具有较高的精度^[11-12]。

对于已经校正畸变的系统,以 $40 \mu\text{s}$ 的数字信号控制 DMD,通过 CPU 控制 DMD 以行或列为单位的“on”和“off”态,产生以 $N(N \geq 4)$ 像素为周期的二进制明暗相间条纹。以 $1/N$ 的像素进行图像采集并复制,循环 N 次。将 N 幅图像进行对比,若出现了莫尔条纹,则 DMD 与 CCD 像元不匹配,需进行修正。 N 为 8 时,像元对应与像元错位情况分别如图 3 和图 4 所示。

相移的图像中单个像元接收的光强度表示

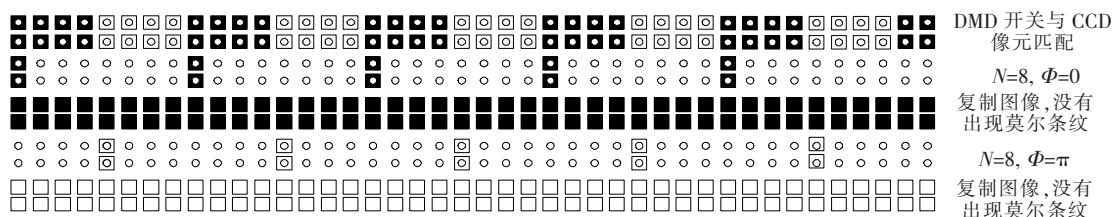


图 3 像元对应情况原理示意图

Fig. 3 Schematic introduction of pixels matching

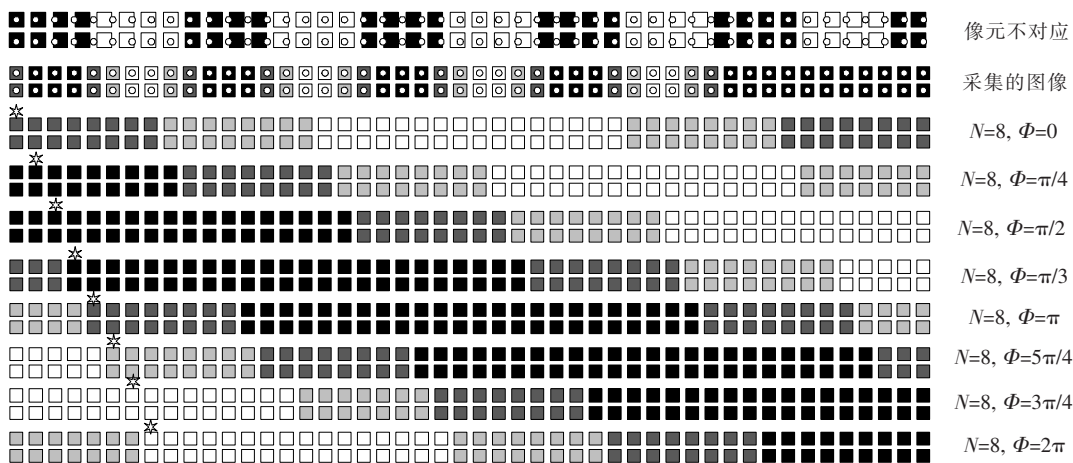


图 4 像元不对应情况时的莫尔相移法原理示意图

Fig. 4 Schematic introduction of phase-shifting Moire method

如下:

$$I_n(x, y) = I_p(x, y) + I_q(x, y) \cdot \cos[\theta(x, y) + 2\pi/n] \quad n = 0, 1, \dots, 7, \quad (2)$$

其中, $I_p(x, y)$ 表示图像的背景强度, $I_q(x, y)$ 是光栅的振幅强度, $\theta(x, y)$ 是相位初始值。莫尔条纹的相位公式如下:

$$\tan \Delta\theta(x, y) = \frac{I_n(x, y) - I_{n-2}(x, y)}{I_{n-3}(x, y) - I_{n-1}(x, y)}, \quad (3)$$

若图像分析区有相位差大于 $2\pi/N$, 说明有像素错位或失配, 其量值为

$$m = \frac{d\Delta\theta}{2\pi}, \quad (4)$$

其中, d 是标准莫尔图案的栅距。

4 测试结果

在实验室环境中,采用微型可见绿色激光器(MLL-III型,波长 532 nm)作为光源,模拟激光干扰。在光斑半径 2 mm、功率 2 mW 的激光照射下,CCD 相机采集的图像如图 5(a) 所示。进而识别饱和光斑中心并确定半径。CCD 图像采集速度为 15 F/s,提取的结果为:激光光斑中心像素坐标(383,480),光斑半径 153 像素,光强被衰减了 70.1%。根据该结果,将对应编码位置的微镜状态设置为“off”。经 DMD 调制后,饱和区的激光光线被反射到 CCD 视场以外,显示为黑色。



图 5 模拟实验结果。(a) 调制前图像;(b) 调制后图像。

Fig. 5 Result of simulation experiment. (a) Image without modulation by DMD. (b) Image with modulation by DMD.

参 考 文 献:

- [1] Meng X F, Lu C H, Ni Y R, *et al.* Application and protection of laser technology [J]. *Infrared Laser Eng.* (红外与激光工程), 2005, 34(2):136-141 (in Chinese).
- [2] Shen Z F. Preparation of specific refractive index material and optical thin films [J]. *Chin. Opt.* (中国光学), 2013, 6(6):900-905 (in Chinese).
- [3] Chen M, Ma S J, Li C F, *et al.* Eye-protection glasses against YAG laser disservice based on the bandgap reflection of

效果如图 5(b) 所示。接着,我们对不同光强以及不同光斑直径激光的干扰性能进行了测试,结果如表 2 所示。

表 2 不同光斑直径和光强条件下的防激光性能测量实验结果

Table 2 Results of experiment about the protection function under different radius and intensities of laser light

激光光斑半径/ mm	激光光强/ mW	CCD 检测 光斑直径 (像素)	滤除光强比率/ %
1	1	77	77.9
1	1.5	78	77.8
1	2	80	78.5
1	2.5	81	79.2
1	3	84	80.1
1.2	2	99	77.6
1.4	2	112	76.2
1.6	2	127	74.5
1.8	2	140	73.3
2	2	153	70.1

从实验结果可知,在光斑直径一定的情况下,激光的功率越大,系统能够衰减的激光光强比率就越高;在光强一定的条件下,光斑直径越大,激光光强衰减比例就越小。对实验结果进行总结分析可知,单位面积上的光强越大,CCD 相机采集的图像辨识度越高,系统的防护性能就越好。

5 结 论

针对激光防护安全的需求,提出一种基于数码微镜阵列的激光防护系统方案,包括投影系统、DMD 组件、光学转换系统以及 CCD 相机。根据莫尔相移法对 DMD 和 CCD 的像元匹配进行了校对,并在不同光斑半径和光强条件下对该系统的防护性能进行了模拟实验测试。实验结果表明,该系统能够将进入 CCD 视场的激光光强衰减掉 70% 以上,并且光强密度越大,系统的防护性能越好。

- one-dimensional photonic crystal [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2004, 25(3):325-328 (in Chinese).
- [4] Shi P, Fu X H, Sun Y, *et al.* Design and fabrication of double wavelength laser protective infrared antireflection coatings [J]. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2011, 38(4):182-186 (in Chinese).
- [5] Chen Z H, Xiao S, He J, *et al.* Ultrafast optical nonlinearities in GaAs at telecommunication wavelengths [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2015, 36(8):969-975 (in Chinese).
- [6] Qu S L, Du C M, Song Y L, *et al.* Nonlinear refraction and optical limiting in the nanocomposite based on C₆₀ structured system with gold nanoparticles [J]. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2002, 29(4):335-338 (in Chinese).
- [7] Song H L, Yan L H, Si J H, *et al.* Optical limiter for ultrashort laser pulses based on ultrafast optical Kerr effect [J]. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2015, 42(2):0217002-1-6 (in Chinese).
- [8] Soon B Y, Haus J, Scalora M, *et al.* One-dimensional photonic crystal optical limiter [J]. *Opt. Express*, 2003, 11(17):2007-2018.
- [9] Venkatram N, Kumar R S S, Rao D N. Nonlinear absorption and scattering properties of cadmium sulphide nanocrystals with its application as a potential optical limiter [J]. *J. Appl. Phys.*, 2006, 100(7):074309-1-7.
- [10] Huang Y, Siganakis G, Moharam M G, *et al.* Broadband optical limiter based on nonlinear photoinduced anisotropy in bacteriorhodopsin film [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, 85(22):5445-5447.
- [11] Saldner H O, Huntley J M. Profilometry using temporal phase unwrapping and a spatial light modulator-based fringe projector [J]. *Opt. Eng.*, 1997, 36(2):610-615.
- [12] Kakunai S, Sakamoto T, Iwata K. Profile measurement taken with liquid-crystal gratings [J]. *Appl. Opt.*, 1999, 38(13):2824-2828.



佟洋(1975 -),男,辽宁兴城人,博士研究生,2003年于东北师范大学获得硕士学位,主要从事 DMD 调制成像系统的研究。
E-mail: TongYang2002@163.com



徐熙平(1969 -),男,吉林人,教授,博士生导师,2004年于长春理工大学获得博士学位,主要从事光电检测技术与质量控制方面的研究。
E-mail: xxp@cust.edu.cn