

基于微型光机电系统扫描镜技术的激光散斑抑制方法

唐国先 石云波 刘俊 赵幸娟 柴鹏兰 王瑞荣

(中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 电子测试技术重点实验室, 山西 太原 030051)

摘要 激光固有的时间和空间相干性, 造成的散斑现象成为实现激光显示技术的瓶颈。针对激光显示的消散斑问题, 提出了一种基于微型光机电系统(MOEMS)扫描镜技术的散斑抑制方法, 并设计了一种简单的二维扫描镜结构, 为开发非运动式、小体积、低功耗、高速低成本电调制的 MOEMS, 实现对激光散斑的抑制, 标准化消相干器件的工艺的开发和规模化生产技术提供了参考。

关键词 激光; 显示技术; 散斑抑制; 微型光机电系统扫描镜; 消相干

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.062301

Speckle Reduction Based on MOEMS-Scanning Mirror Technology

Tang Guoxian Shi Yunbo Liu Jun Zhao Xingjuan Chai Penglan Wang Ruirong

(Key Laboratory of Instrument Science and Dynamic Measurement, Ministry of Education, Science and Technology on Electronic Test and Measurement Laboratory, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China)

Abstract The temporal coherence and spatial coherence of laser are the bottleneck of the laser display technology. To solve the speckle suppression problem, a speckle suppression method based on micro-opto-electro-mechanical system (MOEMS) scanning mirror technology is proposed. Meanwhile a simple structure of the two-dimensional micro-mirror, which will provide some references for the research of static, small size, low power consumption, high speed and low cost laser speckle suppression methods is proposed.

Key words lasers; display technology; speckle reduction; micro-opto-electro-mechanical system scanning mirror; decoherence

OCIS codes 230.4040; 140.3460; 220.4500

1 引言

显示技术历经黑白、标准彩色和数字显示时代后, 将迎来大色域全色显示时代^[1]。标准彩色时代解决了黑白向彩色转换的问题, 数字时代把标准彩色时代的模拟信号转变为数字信号, 解决了高分辨率画面稳定传输问题。由于传统显示终端仅能覆盖人眼所能识别的色彩空间的 30%, 致使 70% 的色彩无法通过显示让人们来感知。另外, 由于模拟技术对高分辨率大规模显示的渴求, 以及传统光源从亮度、色彩、色域空间、功耗到寿命等因素, 已经无法使显示技术获得所需的技术进步。显示技术领域(例如投影仪)从来没有像今天这样期待技术性的革命。激光显示技术是以红、绿、蓝(RGB)三基色激光为光源的显示技术。激光光谱带宽较窄, 且具有很高的色饱和度。激光光源充分利用了激光波长可选择和高光谱亮度的特点, 因此用来显示图像具有更大的色域, 其色域覆盖率可达荧光粉的 2 倍以上, 可达到人眼所能识别色彩空间的 90% 以上, 彻底突破前 3 代显示技术色域空间的不足, 同时完全继承了数字时代的高分辨率和数字信号等特征, 细致地再现

收稿日期: 2010-10-21; **收到修改稿日期**: 2011-01-19; **网络出版日期**: 2011-04-25

基金项目: 国家自然科学基金(61078036)资助课题。

作者简介: 唐国先(1986—), 女, 硕士研究生, 主要从事 MEMS 惯性器件的设计和激光散斑抑制方法等方面的研究。

E-mail: tangguo_tg@126.com

导师简介: 刘俊(1968—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事 MEMS 和微惯性器件方面的研究。

E-mail: liuj@nuc.edu.cn

客观世界,实现人类有史以来最完美的色彩还原;可以让大家摆脱立体眼镜的束缚,实现裸眼观看三维(3D)视频的目标。因此,激光显示技术已经成为下一代的显示技术^[2]。但是由于激光固有的时域和空域相干性,当一束激光从光学粗糙的物体表面反射到图像传感器或人眼时,或明或暗的颗粒状光强分布即激光散斑将会被探测到^[3~5]。激光散斑的存在使图像的对比度和分辨率降低,严重影响了激光显示的成像质量,成为制约和阻碍激光显示技术的主要原因。

本文提出了一种基于微型光机电系统(MOEMS)扫描反射镜器件的散斑抑制方法,并对二维扫描微镜结构进行了简单的设计和模拟仿真。当激光光束通过转动的反射镜时,入射角随着反射镜的转动而不断改变,从而改变了到达屏幕的光程,形成相互独立的散斑图样。通过叠加后人眼观察到的散斑对比度降低,达到消散斑的目的。

2 散斑的产生

图1为散斑产生实验系统图,实验中使用了一个光斑直径约为1 mm的激光器作为光源,用于调节光强的两个偏振镜(PL1和PL2)、扩束镜、玻璃屏幕以及采集图像用的电荷耦合器件(CCD),CCD分辨率为640 pixel×480 pixel。图2是在图1实验系统条件下获取的散斑图样,通过Matlab分析计算得到该散斑图样的分辨率为0.7342,图3为该散斑图样中某一列的光强分布,可看出明显的不均匀光强分布。

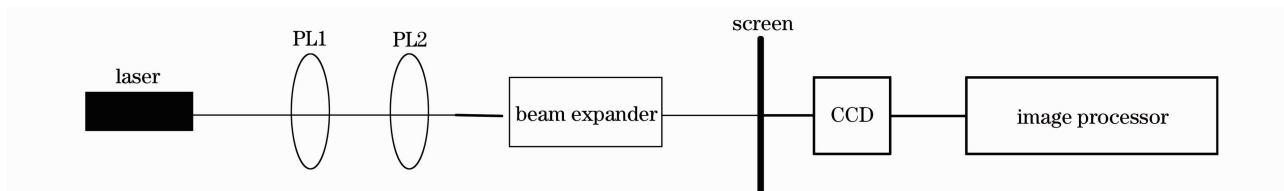


图1 散斑表征实验系统图

Fig. 1 Sketch of speckle characterization experimental system

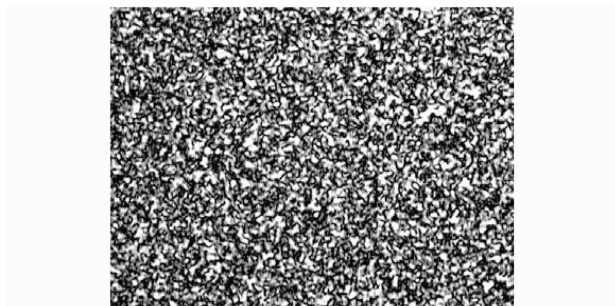


图2 散斑图样

Fig. 2 Speckle pattern

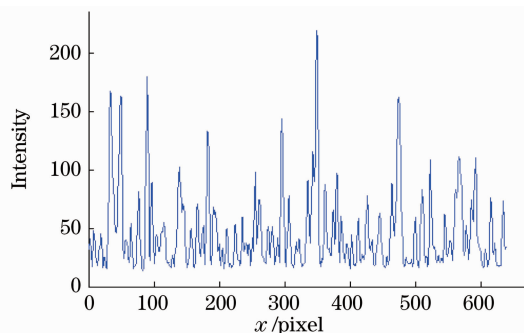


图3 强度分布

Fig. 3 Intensity distribution

3 散斑抑制理论

由于高度空域相干的激光光源不可能具有较宽的频谱,因此在激光的时间相干性消散斑方面,技术较为复杂,所以主要针对如何控制和调制空域相干性进行研究。根据随机相位散射体抑制散斑理论^[6~8],假设 M 是在人眼积分时间内相位散射屏移动的个数, K 为人眼分辨力之内的透镜分辨力个数,则观察者在视网膜上的一个点看到的总强度为

$$I = \sum_{m=1}^M I_m. \quad (1)$$

(1)式所示的图样落在一个眼睛分辨力内, K 个镜头分辨力产生 K 个不同场的和的平方值为

$$I_m = \left| \sum_{k=1}^K A_k B_k^{(m)} \right|^2 = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^K A_k A_l^* B_k^{(m)} B_l^{(m)*}, \quad (2)$$

式中 $B_k^{(m)}$ 表示由一个镜头分辨基元在第 m 个散斑图样上的场, 如果场 $B_k^{(m)}$ 是单位值并且非随机的, A_k 就是在那一个投影镜头分辨基元内, 由屏投影到视网膜上的随机散斑场。因此, 对时间集成的总强度为

$$I = \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^K A_k A_l^* B_k^{(m)} B_l^{(m)*}. \quad (3)$$

求平均强度 \bar{I} , 假设所有 $B_k^{(m)}$ 有同样的平均强度, $J_B = \overline{B^2}$ 。同时假设所有 $|A_k|^2$ 有同样的均值, 用 J_A 表示所有 A_k 的统计平均, 则

$$\bar{I} = MKJ_A J_B. \quad (4)$$

为求观察到的散斑对比度, 还必须求出观察到的强度的标准差

$$\sigma_i^2 = 2MKJ_A^2 \overline{|B|^4} + 2M(K^2 - K)J_A^2 J_B^2 + 2(M^2 - M)KJ_A^2 J_B^2 + (M^2 - M)(K^2 - K)J_A^2 J_B^2 - M^2 K^2 J_A^2 J_B^2. \quad (5)$$

对于投影系统可分为散射体刚好充满投影镜头和溢出投影镜头两种情况, 这里只讨论散射体刚好充满投影镜头的情况, 另一种情况类推可得。根据计算得出

$$\sigma_i^2 = KM(M + K - 1)J_A^2, \quad (6)$$

散斑对比度的表达式为

$$C = \frac{\sigma_i}{\bar{I}} = \sqrt{\frac{(M + K - 1)}{KM}}. \quad (7)$$

由(7)式可见当 $K=1$ 时, 无论 M 取何值, 总的散斑对比度 $C=1$, 即此时移动散射屏不能有效地降低激光散斑; 当 $K \gg M$ 时, 总的散斑对比度为

$$C = \sqrt{\frac{1}{M}}, \quad (8)$$

可见在有限时域区间, 如果有 N 个彼此独立的散斑图片叠加到一起, 则总的散斑对比度为

$$C = \sqrt{\frac{1}{N}}. \quad (9)$$

采用实时改变入射到投影屏上的激光光束角度的方法来抑制散斑。如果两束激光的最小非相干角度为 $\Delta\theta$, 总的入射光束改变角度为 θ , 则在人眼积分时间内, 产生的独立散斑数为 $N = \frac{\theta}{\Delta\theta}$, 总的散斑对比度为

$$C = \sqrt{\frac{1}{N}} = \sqrt{\frac{\Delta\theta}{\theta}}. \quad (10)$$

由(10)式可知, 在最小非相干角固定的情况下, 具有大旋转角的 MOEMS 反射镜将会更有效地降低激光散斑。

4 MOEMS 扫描显微镜散斑抑制系统

基于 MOEMS 扫描显微镜的散斑抑制系统如图 4 所示, 其中主要包括以下几个部分: 激光光源、用于对激光输出光束进行扩束整形的扩束镜部分、用于改变光束的入射角度并消除激光相干性的 MOEMS 扫描反射镜、物镜 1、用于对激光进行匀场的散射屏和全内反射棱镜 (TIR rod)、物镜 2、数字微反射器件 (DMD)、投影镜头和屏幕等。MOEMS 扫描反射镜是该系统抑制散斑的核心部件, 静电式或逆压电式 MOEMS 扫描反射镜在电学信号驱动下, 沿其旋转轴旋转。入射到微镜上的激光光束被反射、投影至屏幕上。在一定的人眼积分时间内, 具有不同光强分布的散斑图像叠加到一起, 从而降低总的散斑对比度^[9]。

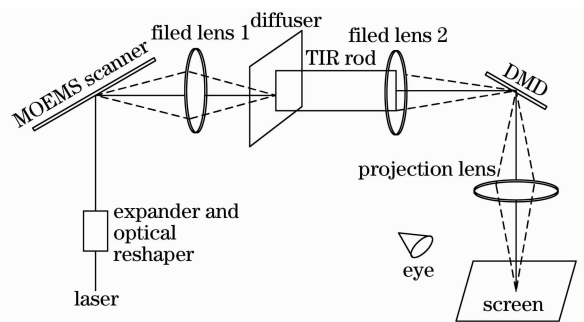


图 4 MOEMS 扫描反射镜光学系统图
Fig. 4 Sketch of the optical system based on MOEMS scanning mirror

5 MOEMS 扫描显微镜结构设计和模态仿真

5.1 设计原理

MOEMS 二维扫描显微镜的结构如图 5 所示。该结构主要由反射镜(mirror)、悬臂梁(cantilever1,2)、支撑梁(supporting beam 1,2)和外框架(framework)构成,结构简单、易于实现。表 1 给出了该显微镜结构的主要尺寸。

表 1 二维扫描显微镜结构尺寸

Table 1 Size of the two dimensional scanning mirror

	Framework	Mirror	Cantilever	Supporting beam
Length / μm	240	200	8	5
Width / μm	180	150	2	2
Thick / μm	1.5	1.5	0.5	0.5

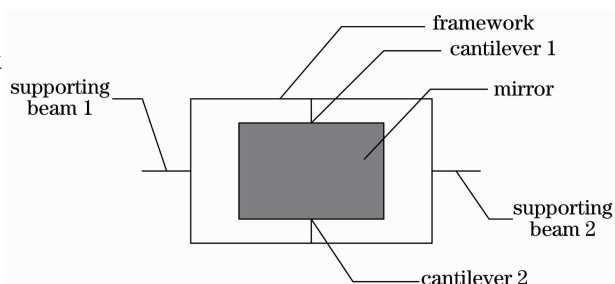


图 5 二维扫描显微镜结构

Fig. 5 Structure of the two dimensional scanning mirror

该 MOEMS 反射镜通过两个支撑梁固定到外界光路中,可以采用静电驱动或逆压电效应驱动方式使显微镜分别绕 X, Y 轴转动从而改变入射光线的角度。以静电驱动为例,该扫描反射镜的工作原理是:分别在外框和内镜下各放置一对电极,当对外框电极施加电压时,反射镜将随着外框架一起绕 X 轴转动。当驱动内部电极时,内部反射镜将围绕 X 轴和 Z 轴转动。因此,通过分别驱动外框架和内部反射镜的方式可以实现二维转动扫描。

5.2 模态仿真

用 ANSYS 有限元分析软件对该结构进行建模,得到该结构的前四阶模态分析结果如图 6 所示。由模态分析结果可以看出,该结构的一阶模态频率为 765 Hz,此时扫描反射镜绕 Z 轴旋转;二阶频率为 934 Hz,扫描镜绕 X 轴旋转;这两阶模态正好是所需的工作模态,三阶和四阶模态频率与前两阶频率相差较大,不会影响工作模态。另外,因为扫描显微镜的具体工作频率由人眼的分辨时间所决定,并且人眼分辨时间为 30 ms 左右,该扫描显微镜的工作频率远大于人眼分辨时间所决定的消相干工作频率,因此可以达到消相干的效果。

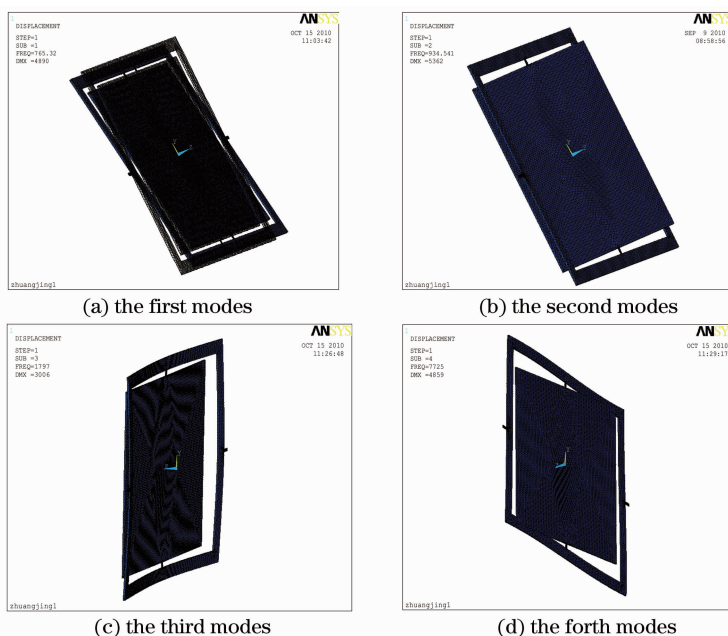


图 6 扫描显微镜结构的前四阶模态图

Fig. 6 First four modes of the scanning micro-mirror

6 可行性分析

从加工工艺方面来看,目前有表面硅工艺和体硅工艺两种主流的 MOEMS 加工技术,表面硅工艺与体

硅工艺相比具有更大的设计灵活性^[10],而且可以与集成电路(IC)工艺兼容。本文所述的微扫描反射镜可以采用表面微加工技术实现。从激光数字投影仪的光学系统集成角度讲,该 MOEMS 微反射镜器件具有体积小,非运动性消相干,易于系统集成等优点,并且能够在不对投影仪光学系统做大幅度修改的前提下有效地实现激光投影系统中的散斑抑制。因此,该散斑抑制方法具有可行性。

7 结 论

基于散斑的产生与抑制原理介绍了一种基于 MOEMS 扫描反射微镜器件的散斑抑制系统,设计了一种简单的 MOEMS 二维扫描反射镜结构,并利用 ANSYS 有限元分析软件对其进行了模态分析,对 MOEMS 散斑抑制技术及其器件设计的进一步研究提供了参考。

参 考 文 献

- 1 Qu Weiping. Laser display technology lifted colour revolutions[J]. *Equipment Device*, 2010, **242**(2): 76~79
屈伟平. 激光显示技术掀起色彩革命[J]. 设备器件, 2010, **242**(2): 76~79
- 2 Zhai Qiang. China's industrial platform for laser projection displays[J]. *Laser Display and Industrial Applications*, 2010, **39**(46): 238~242
翟 强. 中国激光显示产业平台综述[J]. 激光显示与产业应用专题, 2010, **39**(46): 238~242
- 3 Hao Li, Zhang Yue, Liu Weiqi. Speckle suppression in laser display[J]. *Laser and Infrared*, 2006, **36**(10): 927~930
郝 丽, 张 岳, 刘伟奇. 激光显示中散斑的抑制[J]. 激光与红外, 2006, **36**(10): 927~930
- 4 Li Xia, Liu Weiqi, Tian Zhihui. Speckle contrast reduction in laser display[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Display*, 2008, **23**(2): 153~156
李 霞, 刘伟奇, 田志辉. 激光显示中散斑对比度的降低[J]. 液晶与显示, 2008, **23**(2): 153~156
- 5 J. I. Trisnadi. Hadamard speckle contrast reduction[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(1): 1~13
- 6 S. C. Shin, S. S. Yoo, S. Y. Lee *et al.*. Removal of hot spot speckle on laser projection screen using both the running screen and the rotating diffuser[J]. *Displays*, 2006, **27**(3): 91~96
- 7 M. Sun, Z. Lu. Novel speckle suppression in LCoS based laser projection[C]. International Conference on Optical Instruments and Technology: Optical Systems and Modern Optoelectronic Instruments. Proc. of SPIE, 2009, **7506**: 75060
- 8 J. W. Goodman. Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications[M]. Roberts and Company Publishers, 2006. 1~384
- 9 Mingjie Sun, Zukang Lu. Speckle suppression with a rotating light pipe[J]. *Optical Engineering*, 2010, **49**(2): 1~6
- 10 Ma Wenying, Yao Jun, Ren Hao. Design and analysis of MEMS 2D electrostatic scanning mirrors[J]. *MEMS Device and Technology*, 2009, **46**(5): 296~300
马文英, 姚 军, 任 豪. MEMS 二维静电驱动扫描镜设计和分析[J]. MEMS 器件与技术, 2009, **46**(5): 296~300