

文章编号: 0258-7025(2010)03-0718-04

硅基液晶激光投影中散射体散斑抑制作用的研究

孙鸣捷^{1,2} 陆祖康^{1,2}

(¹ 浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)
(² 浙江大学国家光学仪器工程技术研究中心, 浙江 杭州 310027)

摘要 当相干光在粗糙表面散射时,会产生散斑现象。散斑严重影响了图像质量,必须加以抑制。通过散射体振动产生一系列的散斑图样,并在传感器积分时间内加以平均,可以达到抑制散斑的效果。将此方法应用于基于硅基液晶(LCoS)芯片的激光投影系统,并通过一系列实验研究了散斑对比度和散射体运动之间的关系。散斑抑制后,传感器上的散斑对比度从0.49降低到了0.065。实验表明散射体更快更大的振动和更小的单元尺寸都可以降低散斑对比度。

关键词 散射;激光投影;散斑;散射体;硅基液晶

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103703.0718

Study of Speckle Suppression by a Moving Diffuser in Liquid Crystal on Silicon Based Laser Projection System

Sun Mingjie^{1,2} Lu Zukang^{1,2}

¹ State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China
² National Engineering Research Center for Optical Instrument, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

Abstract When coherent light scattered from a rough surface, speckle is detected by an intensity detector. Speckle severely affects the image quality and therefore must be suppressed. Speckle suppression can be achieved by averaging a number of speckle configurations produced by vibrating a diffuser. The method is applied in a liquid crystal on silicon (LCoS) based laser projection system, and experiments are performed to study the relation between speckle contrast and diffuser movement. After suppression, speckle contrast on detector is reduced from 0.49 to 0.065. Experimental results indicate that larger amplitude and frequency of diffuser vibration, as well as smaller diffuse phase unit size, can reduce speckle contrast on the detector.

Key words scattering; laser projection; speckle; diffuser; liquid crystal on silicon

1 引 言

与常规照明光源相比,激光可以让投影系统的图像亮度更高、色域更广。但是激光散斑现象一直是激光投影应用中的主要问题之一,散斑严重影响了图像质量,必须加以抑制。

自从激光发明以来,散斑现象就受到很大关注。最近,又有不少关于散斑特性^[1~3]以及散斑消除方

法^[4~9]的研究。一种经典的散斑抑制方法是把一块运动的散射体加到照明光路中,有不少关于这种方法的研究^[10~12],但这些研究都没有详细提及散斑抑制和散射体运动之间的关系。

本文描述了散斑抑制方法在此系统中的作用原理并通过基于硅基液晶(LCoS)激光投影系统的实验研究了散斑抑制和散射体运动之间的关系。

收稿日期:2009-04-07;收到修改稿日期:2009-06-23

基金项目:国家863计划(2009AA01Z325)资助项目。

作者简介:孙鸣捷(1982—),男,博士研究生,主要从事光学成像方面的研究。E-mail:monkeysun@zju.edu.cn

导师简介:陆祖康(1940—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光学设计、光学成像及检测方面的研究。

E-mail:luzukang@hotmail.com

2 激光投影系统中的散斑抑制原理

当相干光线从粗糙表面散射(如屏幕),散射光线之间的干涉会产生一系列强度分布图样,这些图样在传感器(如人眼)上就形成了散斑,如图1所示。

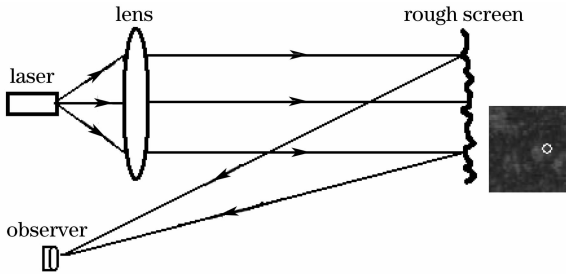


图1 散斑的形成

Fig. 1 Speckle formation

散斑的量化标准称为散斑对比度,其值定义为图像强度的标准差与均值之间的比值

$$C = \frac{\sqrt{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}}{\langle I \rangle}, \quad (1)$$

值域在0~1之间。假如评价图像为 $M \cdot N$ 的离散数字图像,那么(1)式可表示为

$$C = \frac{\sqrt{\frac{1}{M \cdot N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (I_{ij} - I_{\text{avg}})^2}}{I_{\text{avg}}}. \quad (2)$$

图2为简化的激光投影系统。在该系统中,激光束通过照明光学系统和散射体均匀照明图像显示芯片。经过图像显示芯片调制的光线通过镜头1(投影光学系统)在屏幕上成像,镜头2(眼球)再将图像成像于传感器(视网膜)上。

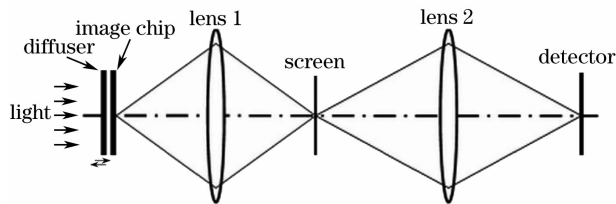


图2 简化的激光投影系统

Fig. 2 Simplified system of laser projection

Goodman^[13,14]已经证明通过在传感器积分时间内平均 A 个独立的散斑图样,最优可使散斑对比度下降为之前的 $1/\sqrt{A}$ 。

假设图像显示芯片的分辨率为 $P = M \cdot N$,那么投影屏幕上的图像也有相同分辨率。如果屏幕上第 ij 个像素点的光场为 E_{ij} ,其中 $i = 1, 2, \dots, M, j = 1, 2, \dots, N$,那么传感器上某一点的散斑强度为

$$I = \left| \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N E_{ij} \right|^2. \quad (3)$$

假设有同样 P 个相位单元格的相位板置于图像显示芯片之前,其各相位值分别为 ϕ_{ij} ,此时传感器上某一点的散斑强度变为

$$I = \left| \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \exp(i\phi_{ij}) E_{ij} \right|^2, \quad (4)$$

(4)式表示一块静止散射体的情况。

进一步假设一块振动的散射体在传感器积分时间内连续产生了 A 个不同的相位图样,那么散斑强度又变为

$$I = \frac{1}{A} \sum_{a=1}^A \left| \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \exp(i\phi_{ij}^a) E_{ij} \right|^2. \quad (5)$$

根据 A 个不同相位图样之间的关系,平均过程可不同程度地消除部分或者全部交叉项,这样就达到了散斑抑制的效果。Lowenthal等^[10]已经证明要达到 $1/\sqrt{A}$ 的抑制效果,散射体需要产生一个相当大的 A 值,也就是说 A 值越大,散斑抑制效果越明显,当 A 值趋于无穷时,可以达到理想的 $1/\sqrt{A}$ 的抑制效果。对于振动的散射体这一消散技术来说,要提高 A 值的主要方法是提高其振频和振幅。

另一方面,散射体不同的粗糙程度也会影响散斑抑制的效果。为简单起见,仅从一维方向上考虑。记光源的空间相干性为 $P(\theta)$, θ 为照明光源的出射角,屏幕上的振幅分布为 $u(x_0)$,镜头2孔径的傅里叶变换定义的点扩展函数为

$$h(x_0, x) = \frac{1}{4\pi^2 f^2} \int_{-r}^r \exp\left[-i \frac{1}{f} (x_0 + x) \cdot x_s\right] dx_s, \quad (6)$$

式中 r 为镜头2的孔径半径, f 为镜头2的有效焦距。则传感器上的振幅分布为

$$u(x) = \int_{-a}^a u_0(x_0) h(x_0, x) \exp(j\theta \cdot x_0) dx_0, \quad (7)$$

式中 a 为屏幕上图像的尺寸。

传感器探测到的散斑强度分布为

$$I(x_i) = \iint_{-\infty}^{\infty} D(x - x_i) P(\theta) \times |u(x)|^2 d\theta dx, \quad (8)$$

式中 $D(x)$ 为传感器有限孔径的分布函数,一般电荷耦合器件(CCD)或者互补金属氧化物半导体(CMOS)在有效传感区域内直接取1。 $P(\theta)$ 可以由发散角 α 的高斯函数定义

$$P(\theta) = \exp\left(-\frac{\theta^2}{2\alpha^2}\right), \quad (9)$$

将(9)式代入(8)式,所得结果再代入(1)式,最后可以得到散斑对比度关于发散角的函数

$$C = \frac{1}{\sqrt{1 + (2f^2/r^2)\alpha^2}} \quad (10)$$

取 $f=16\text{ mm}$, $r=1\text{ mm}$, 可得到如图 3 所示的曲线。

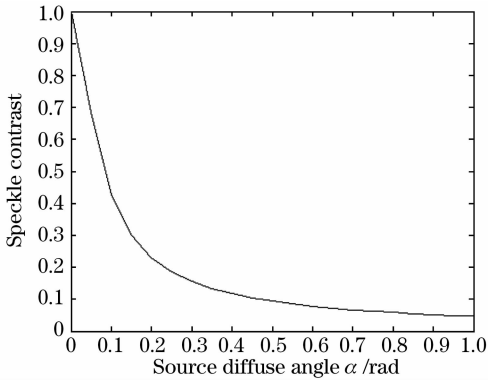


图 3 散斑对比度与光源扩散角之间的关系

Fig. 3 Speckle contrast as a function of source diffuse angle

由(10)式可知不同粗糙度的散射体对光源造成不同程度的扩散, 这会影响光源的空间相干性, 从而影响散斑对比度。

3 实验及结果

LCoS 芯片利用了液晶的光电效应, 同时用单晶硅作基板材料, 并镀有铝镜, 因此拥有良好的电子移动率, 并形成反射式的投影光路。相比于常用的液晶显示(LCD)芯片, LCoS 提高了光效率, 也避免了栅格现象, 因此受到业界越来越多的关注与研究。现有的 LCoS 投影系统, 大多以 LED 作为照明光源, 由于 LED 本身是非偏振光源, 而 LCoS 又必须用偏振光源进行照明, 因此系统中必须加入对 LED 光源进行起偏和转偏的光学器件, 光源的能量利用率低, 整个系统也较为复杂。

根据简化的激光投影系统, 建立起一套基于

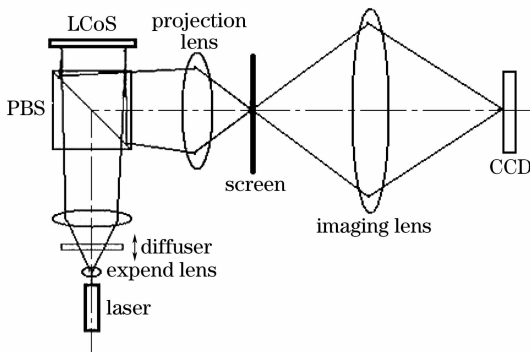


图 4 投影实验系统

Fig. 4 Experimental projection system

LCoS 芯片用于研究散斑抑制和散射体运动之间关系的投影实验系统。实验中, 光源采用 3 mW 的 He-Ne 激光器, 光调制器为 $1280\text{ pixel} \times 768\text{ pixel}$ 的 LCoS, 传感器为 $492\text{ pixel} \times 492\text{ pixel}$ 的 CCD, 以 20 ms 的积分时间进行图像采集。实验系统如图 4 所示。

表 1 实验中使用的不同粗糙度散射体的尺寸及其对光源的扩散角

Table 1 Size of ten different diffusers and diffuse angles used in experiment

Phase unit size / μm	Diffuse angle / rad
25.8	0.762
30.2	0.754
35.0	0.745
40.5	0.734
46.2	0.719
52.2	0.694
58.5	0.664
68.0	0.632
82.0	0.585
100	0.533

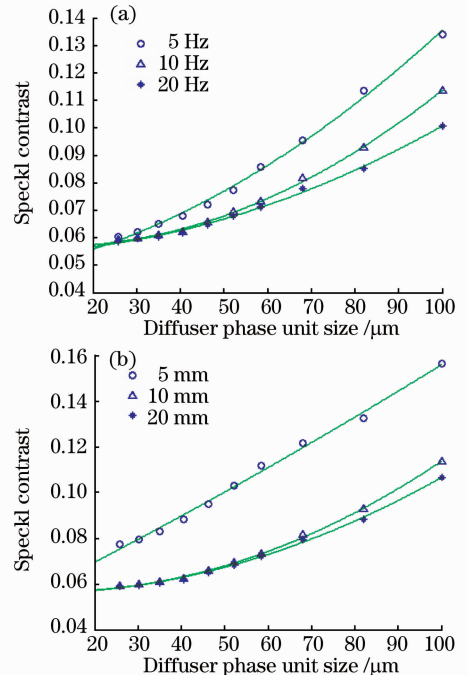


图 5 散斑对比度和散射体相位单元尺寸以及散射体运动之间的关系。散射体以 (a) 10 mm 振幅, 3 种不同频率振动; (b) 10 Hz 频率, 3 种不同振幅振动

Fig. 5 Relation between speckle contrast on the detector and diffuser phase unit size as well as diffuser movement, the diffuser vibrates (a) with 10 mm amplitude and three different frequencies; (b) with 10 Hz and three different amplitudes

实验过程中,一块 2 mm 的散射体沿光轴方向以不同的频率和振幅振动,此外共对 10 块不同相位单元尺寸的散射体进行了实验。10 种不同的散射体如表 1 所示。实验结果如图 5,6 所示。

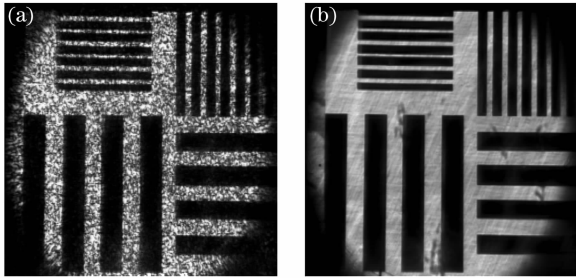


图 6 散斑抑制效果图。(a) 静止的散射体;
(b) 以 10 mm 振幅,20 Hz 频率振动的散射体

Fig.6 Speckle patterns of the experiment. (a) static diffuser; (b) diffuser vibrates with 10 mm amplitude and 20 Hz frequency

图 5 的实验结果表明较大振幅和较高频率都能得到较好的散斑抑制效果;同时,更小相位单元尺寸也能得到散斑对比度更小的图像。用(2)式对图 6 的(a),(b)分别进行计算,散斑对比度从(a)的 0.49 降低到了(b)的 0.065,表明此散斑抑制方法相当有效。

4 结 论

提出了基于 LCoS 的激光投影系统,阐述了此系统中散斑抑制的原理,建立了投影实验系统并给出了散斑抑制和散射体运动之间的关系。实验结果表明更快更大的振动和小相位单元尺寸都可以降低散斑对比度。运用此方法,投影图像的散斑对比度从 0.49 降低到了 0.065。

参 考 文 献

- O. Carvalho, B. Clairac, M. Benderitter *et al.*. Statistical speckle study to characterize scattering media: use of two complementary approaches [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(21): 13817~13831
- S. Ulyanov. Statistical properties of dynamic small-N speckles within highly scattering media [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2008, **25**(9):2207~2214
- N. A. Chang, Nicholas George. Speckle in the 4F optical system [J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(4):A13~A20
- Liu Hengbiao, Chi Jingchun. Analysis of affecting factors on surface roughness measurement based on polychromatic speckle elongation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2):279~284
刘恒彪,池景春. 基于多色散斑延长效应的表面粗糙度测量及影响因素分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2):279~284
- Kang Yusi, Liu Weiqi, Feng Rui *et al.*. Offset interference of laser TV [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4):615~619
康玉思,刘伟奇,冯睿等. 激光电视的消干涉[J]. *中国激光*, 2008, **35**(4):615~619
- Shen Tingmei, Gu Ying, Wang Tianshi *et al.*. Speckle reduction in optical coherence tomography [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(9):1437~1440
沈婷梅,顾瑛,王天时等. 光学相干层析成像中散斑噪声减小算法[J]. *中国激光*, 2008, **35**(9):1437~1440
- Li Chao, Jiang Baoguang, Xia Mingliang *et al.*. Laser speckle reduction in retina imaging illumination [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12):2245~2249
李抄,姜宝光,夏明亮等. 用于人眼视网膜成像照明的激光消散斑技术研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(12):2245~2249
- X. Kang. An effective method for reducing speckle noise in digital holography [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(2):100~103
- V. Yurlov, A. Lapchuk, S. Yun *et al.*. Speckle suppression in scanning laser display [J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(2):179~187
- S. Lowenthal, D. Joyeux. Speckle removal by a slowly moving diffuser associated with a motionless diffuser [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1971, **61**:847~851
- Masaru Matsumura. Speckle noise reduction by random phase shifters [J]. *Appl. Opt.*, 1975, **14**(2):660~665
- J. I. Trisnadi. Speckle contrast reduction in laser projection displays [C]. *SPIE*, 2002, **4657**:131~137
- J. W. Goodman. Some fundamental properties of speckle [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1976, **66**:1145~1149
- J. W. Goodman. Statistical Properties of Laser Speckle Patterns in Laser Speckle and Related Phenomena [M]. Berlin: Springer, 1984. 9~75