

激光与光电子学进展

激光投影成像中影响激光散斑抑制的参数分析及实验研究

黄艳*

漳州职业技术学院电子工程学院, 福建 漳州 363000

摘要 激光散斑是阻碍激光投影显示技术发展的一大瓶颈。基于复合散斑衬比度分析法,对影响激光投影系统中复合散斑衬比度的参数进行了分析,即统计独立散斑图样个数 N 和探测器成像镜头在投影屏幕上的分辨基元面积内的散射光波的相干面元的数量 M 。可通过调节投影镜头和成像镜头的数值孔径、投影距离及观测距离等参数改变 N 和 M ,从而达到改善激光投影系统中散斑现象的目的。并在简化的投影系统中,就随机相位片上照射光斑面积、照明系统数值孔径对激光投影成像中散斑衬比度的影响进行了系统实验分析。实验结果表明,在投影镜头尺寸一定的基础上,适当增加照射在随机相位片上光斑的面积,可有效降低散射屏幕上二次散斑图样的衬比度,且投影镜头数值孔径的减小会增加散斑现象,这为激光投影系统的小型化提出了一大挑战。该结论可为以旋转随机相位片抑制激光投影成像中的散斑提供系统设计指导。

关键词 相干光学与统计光学; 激光散斑; 散斑抑制; 复合散斑; 随机相位片; 散斑衬比度

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1303001

Parameter Analysis and Experimental Study of Influence on Laser Speckle Suppression in Laser Projection Imaging

Huang Yan*

Electronic Engineering Department, Zhangzhou Institute of Technology, Zhangzhou 363000, Fujian, China

Abstract Laser speckles create a bottleneck that hinders the development of laser projection display technology. Based on the compound speckle contrast analysis method, the parameters affecting the composite speckle lining ratio in a laser projection system are analyzed. These parameters include the number N of independent speckle samples and the number M of scattered light wave coherent elements within a single imaging-lens resolution element on the projection screen. The occurrence of speckles in the laser projection system can be reduced by changing parameters N and M . These changes can be achieved by adjusting the numerical apertures of the projection-lens and imaging-lens, projection distance, and observation distance. In the simplified projection model, the effects of the random-diffuser spot area and projection-lens numerical aperture on the speckle contrast in laser projection imaging were experimentally analyzed. The results reveal that for a certain size of the projection lens, the contrast of the secondary speckle pattern on the scattering screen can be reduced by increasing the area of the diffuser spot. The occurrence of speckles increases when the numerical aperture is reduced, thereby posing a challenge for the miniaturization of the laser projection system. The findings of this work can provide guidance for the use of a rotating random diffuser in the design of speckle suppression systems for laser projection imaging.

Key words coherent optics and statistical optics; laser speckle; speckle suppression; compound speckle; random diffuser; speckle contrast

1 引言

激光具有单色性好、方向性强、亮度高等一系列优

点,使得采用红绿蓝(RGB)激光源的投影显示系统具有其他光源无法比拟的广泛色域和亮度调节^[1-6]。因此,激光显示具有在大屏幕上呈现更强的真实感、临场

收稿日期: 2021-06-28; 修回日期: 2021-08-14; 录用日期: 2021-08-26

基金项目: 福建省中青年教育科研项目(JAT201264)

通信作者: huangyan_013@126.com

感及画面尺度调节方便等优点,此外激光光源还具有寿命长的优势。然而,众所周知,激光投影显示系统的缺点是由于激光束的相干性好,导致显示画面中有较强的散斑噪声,这是限制激光显示广泛应用的关键因素之一。

目前,消除散斑的方法主要是基于非相关和统计独立的散斑图样的叠加,在光强基础上进行空间或时间的平均,从而达到抑制散斑的目的^[7-16],例如 Lowenthal, Arsenault 等^[17-19]提出在光路中加入旋转光学元件, Rawson 等^[20]提出了振动屏幕, Wang 等^[21]提出了利用超声光栅调制激光光束的方法等。当这些抑制散斑的方法应用于激光投影成像系统中时,分析不同散斑抑制方法是如何影响人眼感知到的散斑,为激光投影成像中散斑的抑制提供系统设计指导是关键。

在实际激光投影成像系统中散斑的成因尤为复杂,人眼探测到的散斑图像是投影系统散斑化后的图像再经屏幕散射传输一段距离后才被人眼所观测到的二次散斑(或称复合散斑)。按照 Goodman^[23]提出的复合散斑理论,需考虑投影镜头及探测成像镜头对实际散斑衬比度的影响。本文利用复合散斑理论分析了

影响激光投影系统中复合散斑衬比度的参数,并在简化的投影系统中,通过实验研究了影响激光投影成像中散斑衬比度的 4 个重要因素,即随机相位片上的照射光斑面积、散射屏幕与成像系统之间的距离、照明系统及成像系统的数值孔径,并明确了他们对散斑衬比度的影响。

2 激光投影成像中散斑的形成机理及分析

2.1 激光投影成像系统中散斑形成机理

在激光投影成像系统中影响散斑特性的因素很多,为便于理论和实验的分析,本文对投影显示系统的结构进行了简化,只保留了投影成像系统所必需的光束扩束镜及消除散斑的相位调制器和投影屏幕。探测散斑的实验装置如图 1 所示,光源采用 CW TEM₀₀ Ar⁺ 离子激光器,波长为 488 nm,光源发出的光束经扩束镜调节大小后照射在旋转相位调制器上,通过相位调制器调制后的透射光经投影镜头调制后照射在屏幕上。屏幕散射光经一段距离传输后成像于散斑探测装置上。

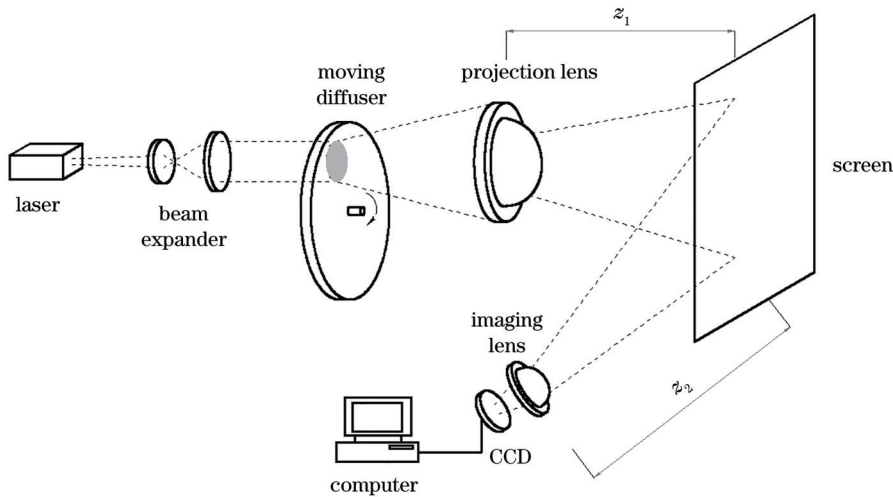


图 1 用于研究散斑特性的投影成像系统光路简图

Fig. 1 Diagram of optical path of projection imaging system used to study speckle characteristics

从图 1 中可知探测到的激光散斑来源于两个方面:一是具有高度相干性的激光在屏幕之前的光学系统中传输后在屏幕上形成的各种杂散条纹,称为一次散斑;二是屏幕散射光在自由空间传输形成的散斑,称为二次散斑。由于照射在屏幕上的激光束已经是散斑化的,因此二次散斑的形成过程是在一次散斑的驱动下形成的,是复合散斑^[22]。

2.2 二次散斑的衬比度表征

Goodman^[23]指出,当散斑形成过程是由另一散斑元胞驱动时,该散斑图样服从负指数统计。在实际中散斑图样通常不是被单个散斑图样照明,而是被 N 个独立的散斑图样之和照明,此时屏幕上散斑图样的强

度服从 Γ 密度分布,即

$$p_I(I) = \frac{2N^{\frac{N+2}{N}}}{\bar{I}^{\Gamma(N)}} \left(\frac{I}{\bar{I}}\right)^{\frac{N-1}{2}} K_{N-1} \left(2\sqrt{\frac{NI}{\bar{I}}}\right), \quad (1)$$

式中, $K_N(x)$ 是 N 阶第二类修正贝塞尔函数。当探测的不是空间一点的反射强度时,探测器积分面元探测到的散斑统计也是 Γ 分布。设探测面上探测到的散斑平均数量为 M , 则探测到的强度的密度函数为

$$p_I(I) = \frac{2(MN)^{\frac{M+N}{2}}}{\bar{I}^{\Gamma(M)} \Gamma(N)} \left(\frac{I}{\bar{I}}\right)^{\frac{M+N-2}{2}} K_{|N-M|} \left(2\sqrt{\frac{NMI}{\bar{I}}}\right), \quad (2)$$

式中参数 M 依赖于散斑的宽度和探测器的积分区域

的面积。该种复合散斑分布的 q 阶矩为

$$\bar{I}_q = \left(\frac{\bar{I}}{MN} \right)^q \frac{\Gamma(M+q)\Gamma(N+q)}{\Gamma(N)\Gamma(M)}, \quad (3)$$

则复合散斑的衬比度为

$$C = \frac{\sigma_I}{\bar{I}} = \frac{\sqrt{\bar{I}^2 - \bar{I}^2}}{\bar{I}} = \sqrt{\frac{\Gamma(M)\Gamma(2+M)\Gamma(N)\Gamma(2+N)}{\Gamma^2(1+M)\Gamma^2(1+N)} - 1} = \sqrt{\frac{N+M+1}{NM}}. \quad (4)$$

2.3 影响激光投影系统中复合散斑衬比度的参数分析

在激光投影成像系统中,复合散斑衬比度式(4)中的 N 取决于投影系统中运动漫射体产生的独立散斑图样的数量,为激光散斑抑制的时间自由度,由投影系统自由度决定。为分析方便,这里假设经旋转相位片调制后的出射光为准单色非相干光。设相位片所在平面 (ξ, η) , 屏幕所在平面 (α, β) , 根据范西特-泽尼克定理,并用泽尼克近似,入射到屏幕上的复相干因子为

$$\mu_A(\Delta\alpha, \Delta\beta) = 2 \frac{J_1 \left[\frac{\pi D \sqrt{(\Delta\alpha)^2 + (\Delta\beta)^2}}{\lambda z_1} \right]}{\frac{\pi D \sqrt{(\Delta\alpha)^2 + (\Delta\beta)^2}}{\lambda z_1}}, \quad (5)$$

式中: $\mu_A(\Delta\alpha, \Delta\beta)$ 为屏幕上散斑场的归一化振幅相关函数; $J_1(\dots)$ 为一阶贝塞尔函数; λ 为照明光波波长; z_1 为投影镜头与散射屏幕之间的距离; D 为投影系统的光瞳直径。

于是入射到投影屏幕上的光的相干面积为

$$A_c = \iint_{-\infty}^{+\infty} |\mu_A(\Delta\alpha, \Delta\beta)|^2 d(\Delta\alpha) d(\Delta\beta) = \left(\frac{\lambda z_1}{\pi D} \right)^2, \quad (6)$$

假设投影像面积为 A_s , 并且像面照明均匀,则在屏幕上有

$$N = \frac{A_s}{A_c} \quad (7)$$

个相干面积,每个相干面元都在探测面上贡献一个独立的散斑图样。

由于探测成像系统孔径限制,只有 M 个有效探测散斑个数。这里 M 是成像系统的振幅点扩展函数的等效面积 A_k 内的相干面积数量(从屏幕上看),即

$$M = \frac{A_k}{A_c}, \quad (8)$$

由式(8)可见, M 取决于成像系统的振幅点扩展函数的等效面积(或成像镜头在投影屏幕上的分辨基元面积) A_k 与散射屏幕上散射光波的相干面积 A_c 之比,如

图 2 所示。即对于给定的探测点,散斑场由投影屏幕上不同区域的散射独立的贡献组成^[23-24]。

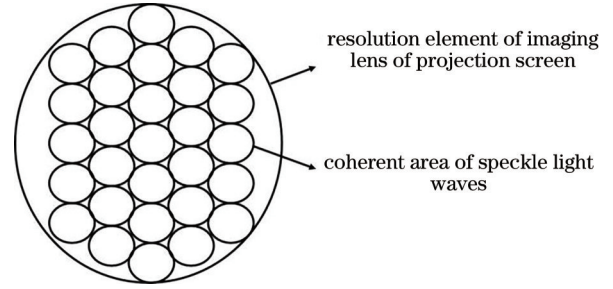


图 2 成像镜头在散射屏幕上的分辨基元内所包含的散射光波相干面元个数示意图

Fig. 2 Schematic diagram of number of coherent elements of scattered light wave contained in resolution primitive of imaging lens on scattering screen

设成像系统的透镜有一个直径为 p 的圆形光瞳函数 $P(u, v)$, 那么成像系统点扩展函数 $h(\alpha, \beta)$ 可表示为

$$h(\alpha, \beta) = \frac{1}{(\lambda z_2)^2} \iint_{\infty} P(u, v) \exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda z_2} (\alpha u + \beta v) \right] dudv = \frac{\pi P^2}{(\lambda z_2)^2} \left[2 \frac{J_1 \left(\frac{\pi P \sqrt{(\Delta\alpha)^2 + (\Delta\beta)^2}}{\lambda z_2} \right)}{\frac{\pi P \sqrt{(\Delta\alpha)^2 + (\Delta\beta)^2}}{\lambda z_2}} \right], \quad (9)$$

式中, z_2 是从成像透镜到散射屏幕的距离。这个扩展函数的等效面积为

$$A_k = \left(\frac{\lambda z_2}{\pi P} \right)^2, \quad (10)$$

式中: z_2 为探测器成像镜头到散射屏幕的距离; λ 为照明光波波长; P 为成像系统的光瞳直径。

由于投影像的面积 A_s 远大于成像镜头在投影屏幕上的分辨基元面积 A_k , 则 $N \gg M$ 。因此根据式(4)此时复合散斑衬比度可简化为

$$C \approx \sqrt{\frac{1}{M}} = \sqrt{\frac{A_c}{A_k}} = \frac{\left(\frac{\lambda z_1}{\pi D} \right)}{\left(\frac{\lambda z_2}{\pi P} \right)} = \frac{z_1 P}{z_2 D}, \quad (11)$$

由式(11)可见,观察屏幕上的散斑衬比度大小与投影镜头的直径 D 成反比。投影镜头出瞳直径越小,散斑颗粒尺度越大,即散斑现象越严重,且与成像系统光瞳直径成正比,这也是激光投影系统小型化的一大技术瓶颈。该结论可进一步推广为

$$C \approx \sqrt{\frac{NA_{\text{imaging}}}{NA_{\text{lighting}}}}, \quad (12)$$

式中 NA 代表数值孔径。 NA_{lighting} 为从散射屏幕上看到投影镜头的数值孔径, NA_{imaging} 可视为从散射屏幕上看到探测镜头的数值孔径。可见在激光投影成像系统中, 要抑制散斑需照明系统数值孔径大于成像系统数值孔径, 即 $NA_{\text{lighting}} > NA_{\text{imaging}}$ 。工程上, 可通过调节投影镜头和成像镜头的数值孔径、投影距离及观测距离等参数来调节参数 M , 从而达到改善激光投影系统中散斑现象的目的。

3 仿真分析

针对参数 N 和 M 对复合散斑衬比度 C 的影响, 根据式(4)进行仿真, 结果如图 3 所示。仿真结果表明, 当探测器镜头在投影屏幕上一个分辨基元内投影镜头分辨基元数量 M 一定时, 随着独立散斑图样数量 N 的增加, 复合散斑衬比度下降。通过图 3 可见, 当参数 N 增大两个数量级达到 100 后, 复合散斑衬比度的下降

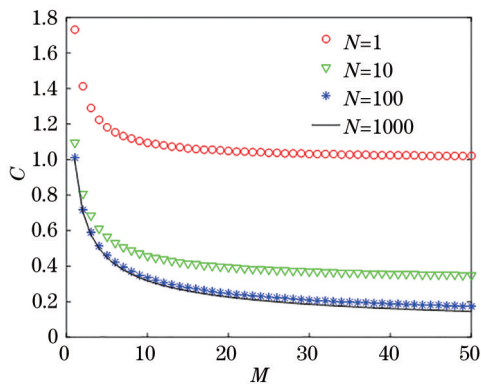
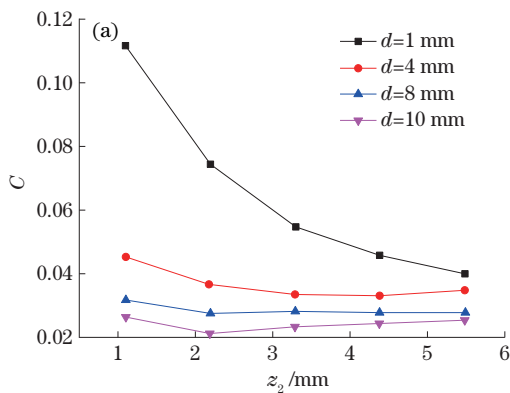


图 3 参数 N, M 与复合散斑衬比度 C 的函数关系

Fig. 3 Functional relationship between parameters N, M and composite speckle contrast ratio C



趋势明显下降, 即此时独立散斑数量 N 的个数的增加对减弱散斑衬比度作用变小。当参数 N 一定时, 随着 M 的增大散斑衬比度也会显著减小, 通过图 3 曲线图可见, 无论参数 N 为多少, 当 $M \geq 15$ 以后散斑衬比度几乎保持不变。

4 激光投影成像中散斑特性的实验研究

实验装置图 1 中的相位调制器采用加拿大 Luminit 公司生产的发散角为 30° 的随机相位片, 在电机的带动下以固定转速快速旋转产生随时间变化的连续散斑图样, 后经投影物镜成像于普通 A4 打印纸所做的投影屏幕上。探测装置采用改装后的 Nikon 显微镜和 CCD 组合而成的探测装置, 这样可避免由于 CCD 成像镜头景深问题造成的测量误差。实验中设置探测装置中显微镜物镜放大倍数为 $10\times$, 数值孔径为 0.25, CCD 的曝光时间设置为 $1/20$ s。

4.1 散斑图样衬比度与照射光斑面积的关系

调节扩束镜控制照射随机相位片上的光斑直径 d 从 1 mm 增大至 10 mm, 通过调整投影镜头与随机相位片的位置, 保持屏幕上成像面积大小不变。经投影屏幕散射后形成的散斑被探测镜头和 CCD 组合的探测装置所捕获。通过调整探测装置与散射屏幕之间的距离测量散射空间中不同位置的复合散斑衬比度随光斑直径的变化。

实验中固定投影镜头的直径为 2 cm, 即保持投影镜头的数值孔径不变, 对随机相位片上光斑直径分别为 1、4、8、10 mm 这 4 种情况下的散射空间不同位置的散斑衬比度进行了测量, 得到复合散斑衬比度 C 与散射片上光斑直径 d 和观测距离 z_2 之间的关系如图 4 所示。

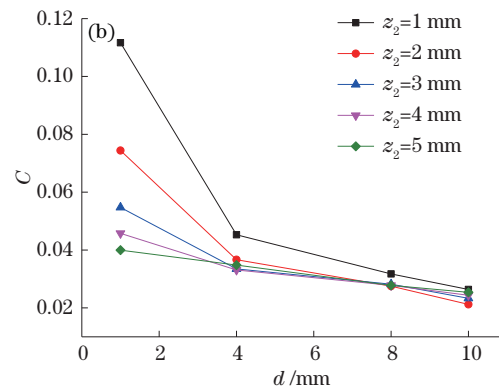


图 4 散斑图样衬比度 C 与观测距离 z_2 和光斑直径 d 的函数关系。(a) 对不同光斑直径, 散斑衬比度 C 与观测距离 z_2 的函数关系; (b) 对不同观测距离, 散斑衬比度 C 与光斑直径 d 的函数关系

Fig. 4 Speckle contrast C as a function of observation distance z_2 and spot diameter d . (a) Dependence of speckle contrast ratio C on observation distance z_2 for different spot diameters; (b) dependence of speckle contrast ratio C on spot diameter d at different observation distances

实验结果证实了之前的分析, 在激光投影成像系统中复合散斑衬比度取决于投影系统自由度 N 、投影镜头和成像镜头的数值孔径等因素。从图 4(a) 中可

以看出, 在照射光斑直径大小一定情况下, 投影系统自由度 N 保持不变, 随着观测距离 z_2 的增加, 根据式(11) M 值逐渐增大, 散斑衬比度逐渐减小。当观测距离增

加至一定值时,成像镜头在散射屏幕上的分辨单元面积内散射波的相干面元数 M 基本保持不变,此时继续增加观测距离散斑图样衬比度没有太大变化,这一点与仿真结果一致。

从图 4(b)可见,随着照射光斑直径的增加,散斑衬比度逐渐减小,且其下降率逐渐减小,当光斑直径达到一定值后衬比度没有太大的变化。这是因为随着照射在随机相位片上的光斑直径越大则独立散斑元越多即投影系统自由度 N 越大,则在 M 一定的情况下,根据式(4)复合散斑衬比度越小。但是当光斑面积增大到投影镜头点扩展函数在相位片上等效面积大小时,

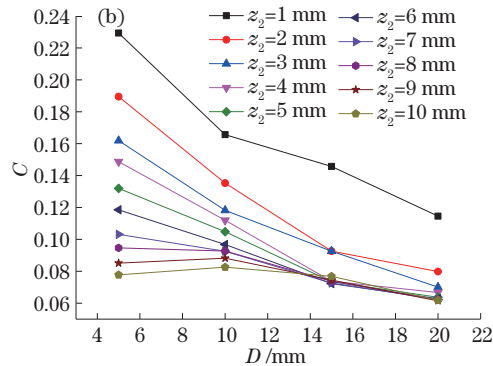
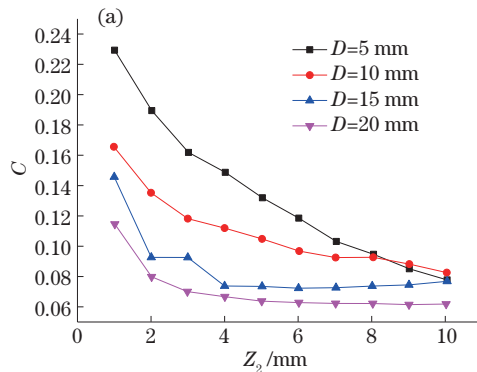


图 5 散斑图样衬比度 C 与观测距离 z_2 和投影物镜孔径直径 D 的函数关系。(a) 对不同投影孔径,散斑衬比度 C 与观测距离 z_2 的函数关系;(b) 对不同观测距离,散斑衬比度 C 与投影孔径 D 的函数关系

Fig. 5 Speckle contrast ratio C as a function of observation distance z_2 and aperture diameter D of projection objective lens.

(a) Dependence of speckle contrast ratio C on observation distance z_2 under different projection apertures; (b) dependence of speckle contrast ratio C on projection aperture D at different observation distances

从图 5(a)的曲线图可看出,随着观测距离增大,散斑衬比度逐渐减小。因为在相位片上照射光斑直径和投影镜头孔径一定的情况下,系统自由度 N 不变,散斑衬比度随观测距离变化规律分析同图 4(a)。从图 5(b)看出,当观测距离 z_2 一定时,随着投影镜头直径 D 的增加,散斑衬比度逐渐减小,该实验结果与式(11)结论吻合。

5 结 论

本文实验结果可为以旋转随机相位片抑制激光投影成像中的散斑提供系统设计指导。随着照射在随机相位片上光斑面积的增加,独立散斑图样数量随之增加即投影系统自由度 N 增加时,散斑衬比度逐渐减小,当光斑面积增大到投影镜头点扩展函数在相位片上等效面积大小后,即 N 增加至投影镜头所限的自由度后,再继续增加旋转随机相位片上照射光斑的面积对减弱散斑现象没有太大的帮助,因此在投影镜头尺寸一定的基础上,适当增加照射在随机相位片上光斑的面积,可有效降低散射屏幕上二次散斑图样的衬比度。此外,投影镜头数值孔径的减小会增加散斑现象,这为激光投影系统的小型化提出了一大挑战。

即 N 增加至投影镜头所限的自由度后,再继续增加旋转随机相位片上照射光斑的面积对减弱散斑现象没有太大的帮助,因此衬比度下降率逐渐减小,这一点也与仿真结果一致。

4.2 散斑图样衬比度与照明系统数值孔径的关系

实验中固定入射到相位片上的光斑直径为 1 mm,调整激光器入射光功率,使得 CCD 自动曝光时间为 1/20 s,逐渐改变投影物镜的数值孔径,即改变投影镜头孔径大小。图 5 为投影镜头孔径直径 D 分别为 5、10、15、20 mm 这 4 种情况下的散射空间不同位置的散斑衬比度。

参 考 文 献

- [1] 孙敏远, 朱建英, 毕勇, 等. 激光显示中颜色配比与实时色温控制研究[J]. 中国激光, 2020, 47(7): 0704001. Sun M Y, Zhu J Y, Bi Y, et al. Color matching and real-time color temperature control in laser display[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(7): 0704001.
- [2] 王飞霞, 金岑岑, 李晓华, 等. 激光投影电视的感知亮度与色度关系[J]. 光学学报, 2020, 40(13): 1333001. Wang F X, Jin C Q, Li X H, et al. Relationship between perceived brightness and chromaticity of laser projection television[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(13): 1333001.
- [3] 孟雪, 宁永强, 张建伟, 等. 面向激光显示的红光半导体激光器的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(18): 180001. Meng X, Ning Y Q, Zhang J W, et al. Research progress of red semiconductor laser diodes for laser display[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(18): 180001.
- [4] 薛亮, 黄茜. 激光技术在电力工程中的应用[J]. 上海电力学院学报, 2014, 30(4): 383-387. Xue L, Huang Q. Applications of laser technology in electric power[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2014, 30(4): 383-387.
- [5] 刘敬伟. 激光投影显示散斑抑制方法研究[D]. 济南: 山

- 东大学, 2015: 1-10.
- Liu J W. Research on speckle suppression in laser projection display[D]. Jinan: Shandong University, 2015: 1-10.
- [6] 赵新亮. 扫描式激光大屏幕显示技术研究[D]. 成都: 四川大学, 2005: 1-14.
- Zhao X L. Study on large screen scanning laser display [D]. Chengdu: Sichuan University, 2005: 1-14.
- [7] Park Y H, Ha K H, Kim J O, et al. Speckle reduction laser and laser display apparatus having the same: US7489714[P]. 2009-02-10.
- [8] 田志辉, 刘伟奇, 冯睿, 等. 基于 DLP 投影方式的激光显示系统[J]. 液晶与显示, 2007, 22(3): 315-319.
- Tian Z H, Liu W Q, Feng R, et al. Laser display system based on DLP projection style[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2007, 22(3): 315-319.
- [9] 刘伟奇, 魏忠伦, 康玉思, 等. 全固态激光彩色视频显示技术[J]. 液晶与显示, 2004, 19(5): 325-328.
- Liu W Q, Wei Z L, Kang Y S, et al. Color video display technique based on diode pump laser[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2004, 19(5): 325-328.
- [10] 李霞, 郝丽, 刘伟奇, 等. 激光显示中散斑减弱的研究[J]. 液晶与显示, 2007, 22(3): 320-324.
- Li X, Hao L, Liu W Q, et al. Speckle reduction in laser display[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2007, 22(3): 320-324.
- [11] Trisnadi J I. Hadamard speckle contrast reduction[J]. Optics Letters, 2004, 29(1): 11-13.
- [12] Wang L, Tschudi T, Halldórsson T, et al. Speckle reduction in laser projection systems by diffractive optical elements[J]. Applied Optics, 1998, 37(10): 1770-1775.
- [13] Ha W S, Lee S J, Oh K H, et al. Speckle reduction in near-field image of multimode fiber with a piezoelectric transducer[J]. Journal of the Optical Society of Korea, 2008, 12(3): 126-130.
- [14] Shin S C, Yoo S S, Lee S Y, et al. Removal of hot spot speckle on rear projection screen using the rotating screen system[J]. Journal of Display Technology, 2006, 2(1): 79-84.
- [15] Völker A C, Zakharov P, Weber B, et al. Laser speckle imaging with an active noise reduction scheme[J]. Optics Express, 2005, 13(24): 9782-9787.
- [16] 唐国先, 石云波, 刘俊, 等. 基于微型光机电系统扫描镜技术的激光散斑抑制方法[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(6): 062301.
- Tang G X, Shi Y B, Liu J, et al. Speckle reduction based on MOEMS-scanning mirror technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(6): 062301.
- [17] Lowenthal S, Joyeux D, Arsenault H. Relation between the finite displacement of a moving diffuser, lit by laser light, and the signal to noise ratio in the observed illuminance at a finite distance or in an image plane[J]. Optics Communications, 1970, 2(4): 184-188.
- [18] Arsenault H, Lowenthal S. Partial coherence in the image of an object illuminated with laser light through a moving diffuser[J]. Optics Communications, 1970, 1(9): 451-453.
- [19] Lowenthal S, Joyeux D. Speckle removal by a slowly moving diffuser associated with a motionless diffuser[J]. Journal of the Optical Society of America, 1971, 61(7): 847-851.
- [20] Rawson E G, Nafarrate A B, Norton R E, et al. Speckle-free rear-projection screen using two close screens in slow relative motion[J]. Journal of the Optical Society of America, 1976, 66(11): 1290-1294.
- [21] Wang L L, Tschudi T, Boeddinghaus M, et al. Speckle reduction in laser projections with ultrasonic waves[J]. Optical Engineering, 2000, 39(6): 062543.
- [22] 黄艳. 激光微投影仪中抑制散斑的研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2010: 20-23.
- Huang Y. Research on speckle suppression in laser micro-projector[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2010: 20-23.
- [23] Goodman J W. Speckle phenomena in optics theory and applications[M]. Cao Q Z, Chen J B, Transl. Beijing: Science Press, 2009.
- Goodman J. W.. 光学中的散斑现象-理论与应用[M]. 曹其智, 陈家壁, 译. 北京: 科学出版社, 2009.
- [24] 徐美芳, 王维彪, 高文宏, 等. 激光投影显示中静态复合散斑的表征与建模[J]. 光学精密工程, 2013, 21(12): 3021-3028.
- Xu M F, Wang W B, Gao W H, et al. Characterization and modeling of static compound speckle in laser projection display[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(12): 3021-3028.