

激光扫描增强现实系统中抑制带斑的波导研究

厉冰川¹, 张杰^{1*}, 向诗文¹, 王畅²¹嘉兴中润光学科技股份有限公司, 浙江 嘉兴 314000;²浙江大学光电科学与工程学院现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027

摘要 为了抑制激光扫描显示的画面在经过二维出瞳扩展后出现的带状亮斑,改善显示效果,分析并讨论了画面中带斑产生的原因,研究了与带斑对比度相关的光学系统参数。接着提出一种使用双层平板光波导叠加进行出瞳扩展以抑制带斑对比度的方法。仿真结果表明:相对厚度为 0.6 mm 的单层波导系统,当两层平板波导厚度分别为 0.64 mm 和 0.6 mm 时,系统显示纯色时的带斑对比度将下降至 23.2%。这种方式在不显著增加系统体积且具有较好工艺可实施性的前提下实现了对带斑现象的抑制,改善了系统成像质量,为激光扫描光机在增强现实系统中的应用提供了一种可行方案。

关键词 几何光学; 激光扫描显示; 带斑; 增强现实

中图分类号 O435 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.2011011

Banding Pattern Suppressed Waveguide in Laser Beam Scanning Augmented Reality System

Li Bingchuan¹, Zhang Jie^{1*}, Xiang Shiwen¹, Wang Chang²¹Jiaying ZMAX Optech Co., Ltd., Jiaying 314000, Zhejiang, China;²State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China

Abstract The causes of the banding pattern in the images and the parameters of an optical system related to the banding contrast were studied to suppress the banding patterns that appeared in images displayed by a laser beam scanning system after a two-dimensional exit pupil expansion and to improve the display quality. Next, a method using dual-layered planar waveguide superposition was used to expand the exit pupil and suppress the banding contrast. According to the simulation, when the thicknesses of the dual-layered planar waveguide are 0.64 mm and 0.6 mm, respectively, the banding contrast of the pure color image displayed by the system decreases to 23.2% compared to single-layered waveguide system with thickness of 0.6 mm. This method can suppress the banding contrast and improve the display quality without significantly increasing the system volume or requiring complicated processing requirements. This method offers a solution by applying a laser beam scanning display to an augmented reality system.

Key words geometric optics; laser beam scanning display; banding pattern; augmented reality

1 引言

增强现实(AR)显示系统的发展给人们带来了将虚拟场景融入现实世界的视觉体验,并催生了在诸如教育、医疗、军事训练、游戏娱乐等众多领域的全新应用^[1-2]。为此研究者们不断地对与之相关的微型显示器、头戴成像系统、传感交互等关键技术进行研究^[3]。其中,基于激光扫描(LBS)的显示系统以出众的轻便性和低功耗特性受到广泛的关注^[4]。

基于LBS的显示系统通常用微机电系统(MEMs)扫描振镜控制激光光束进行二维扫描,并对激光光束进行强度调制,呈现出图案^[5-10]。基于LBS的显示系统应用于AR系统中时,由振镜扫描的激光束通过光学系统后直接在观察者视网膜上形成对图像的感知,因此也被称为视网膜扫描显示器。早期Guillaumée等^[11-13]在眼镜表面制备全息光学元件,将经MEMs扫描的激光束反射入瞳孔中,实现了AR显示。日本兄弟工业、QD激光、英特尔等公司都基于这种系统推出

收稿日期: 2022-05-24; 修回日期: 2022-06-30; 录用日期: 2022-07-14

通信作者: *zhang.jie@zmax-optec.com

过相关的 AR 智能眼镜^[14],但是这种 AR 显示系统的出瞳很小,人眼只有处于某个极小的范围内才能够看到画面,这使此类 AR 智能眼镜的应用受到极大的限制。

近年来,出瞳扩展技术^[15-18]的发展为 LBS 显示光机在 AR 眼镜中的应用提供了新的思路,扩瞳光波导被证实能够有效地扩大 AR 显示的眼动范围。但是 LBS 光机直接与扩瞳光波导组合时会出现带斑现象,这对成像质量有较大影响。为了抑制带斑现象,微软的产品 HoloLens 2 在 LBS 光机中预先扩大出瞳后再与光波导对接^[19],丁意桐等^[20]使用中间像面扩大出瞳后再与光波导对接,然而这两种方法都会同时导致光机尺寸的增大。本文分析了 LBS 光机对接二维扩瞳光波导系统中带斑现象的产生原因,建立模型并仿真分析了带斑对比度的影响因素,然后提出一种通过叠

加波导抑制带斑的方法。所提方法在不显著增加系统尺寸的情况下抑制了画面带斑,为 LBS 光机在 AR 眼镜中的应用提供了可行方案。

2 激光扫描增强现实系统

2.1 系统模型

激光扫描光机搭载扩瞳光波导构成的增强现实系统的模型如图 1 所示。此系统由高速调制的激光束、二维 MEMs 振镜、耦入和耦出光栅、平板波导等部件组成。二维 MEMs 振镜将被其反射的激光束高速扫描到耦入光栅区域,光束经过耦入光栅后,以全内反射的形式在平板波导中向前传播,最终在耦出光栅区域分多次从平板波导出射,进入人眼中。其中激光束入射 MEMs 振镜的角度为 θ_0 ,MEMs 振镜中心到波导表面的距离为 d_0 ,波导的厚度为 t 。

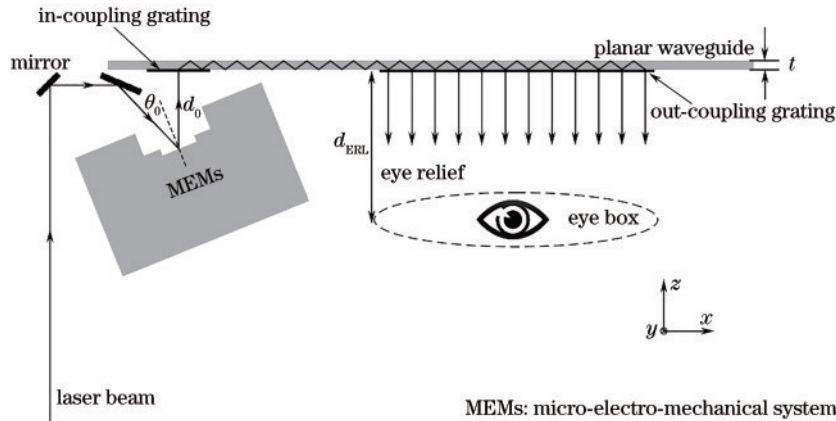


图 1 基于激光扫描的增强现实系统示意图

Fig. 1 Schematic of augmented reality system based on laser beam scanning

在这个系统中,MEMs 振镜处为图像源的出射光瞳,而系统中并没有图像源的实像面。因此,相比于常规的以微显示器为图像源的 AR 显示系统,基于 LBS 的 AR 显示系统不需要额外的目镜镜头,最终显示的视场角(FOV)取决于振镜在两个正交方向的振幅 θ_H 和 θ_V ,分辨率取决于 MEMs 振镜的本振频率、振镜尺寸,即画面出瞳直径和激光调制速度。这些特性使得基于 LBS 的 AR 显示系统的光机尺寸不会随着 FOV 和分辨率的提高而增大,赋予了 LBS 光机在穿戴设备中应用的独特优势。

如图 1 所示,使用的 LBS 显示系统的视场角为 $40^\circ(\text{H}) \times 28^\circ(\text{V})$,振镜快轴的本振频率为 28 kHz,振镜镜面是半径 $r_{\text{MEMs}} = 0.5 \text{ mm}$ 的圆形,显示分辨率为 $1280 \text{ pixel} \times 720 \text{ pixel}$ 。为了使入射 MEMs 振镜的激光束与反射激光束在空间上分离,中心视场对应的入射角 $\theta_0 = 18^\circ$,MEMs 振镜中心到耦入光栅面的距离为 $d_0 = 5.5 \text{ mm}$,耦入光栅面处实际光斑区域的尺寸为 $5.2 \text{ mm} \times 3.8 \text{ mm}$ 。理想情况下,MEMs 振镜应当尽可能贴近耦入光栅,有研究者使用偏振转换棱镜和

1/4 波片,可以有效地缩短偏振镜片到耦入光栅面的距离^[21],但这种方式增加了成本和复杂程度,在光机中较少使用。

波导折射率 $n = 1.77$,以波长 $\lambda = 520 \text{ nm}$ 的绿光为例分析。为了减少杂散光,耦入和耦出光栅能够支持的衍射级次不能超过 ± 1 级,因此在全部视场角范围内(即对于任意的 $\theta \in [-14^\circ, 14^\circ]$, $\phi \in [-20^\circ, 20^\circ]$),耦入光栅的周期 Λ_{in} 需要满足两个条件:

$$\left(\frac{2\pi}{\lambda} \sin \phi + \frac{2\pi}{\Lambda_{\text{in}}}\right)^2 + \left(\frac{2\pi}{\lambda} \cos \phi \sin \theta\right)^2 > \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2, \quad (1)$$

$$\left(\frac{2\pi}{\lambda} \sin \phi + \frac{2\pi}{\Lambda_{\text{in}}}\right)^2 + \left(\frac{2\pi}{\lambda} \cos \phi \sin \theta\right)^2 < \left(n \cdot \frac{2\pi}{\lambda}\right)^2. \quad (2)$$

式(1)为平板波导内的全内反射条件,而式(2)则为 +1 级衍射存在的条件。为了计算方便,式中的角度定义方式如图 2(a) 所示。据此选取的耦入光栅周期 $\Lambda_{\text{in}} = 382 \text{ nm}$ 。

耦出区域光栅的微结构以蜂窝状周期排布,其在水平方向、与水平呈 $+60^\circ$ 和 -60° 夹角方向具有相同的光栅常数 Λ_{out} ,这种光栅能够使光瞳在三个方向上

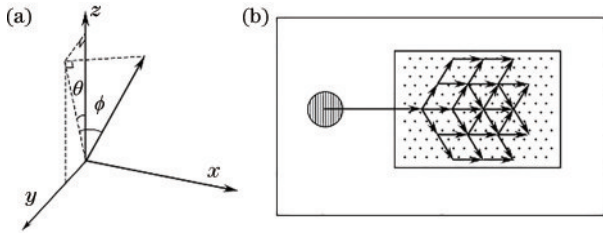


图 2 光线角度定义与扩展出瞳示意图。(a)角度定义;(b)扩展出瞳示意图

Fig. 2 Definition of ray angle and schematic of pupil expansion. (a) Angle definition; (b) schematic of pupil expansion

进行扩展,如图 2(b)所示。类似地,在与水平呈 +60° 和 -60° 夹角的扩瞳方向上,Λ_{out} 也需要满足平板波导内的全内反射条件和衍射存在的条件:

$$\left(\frac{2\pi}{\lambda} \sin \phi + \frac{\pi}{\Lambda_{out}}\right)^2 + \left(\frac{2\pi}{\lambda} \cos \phi \sin \theta \pm \frac{\sqrt{3}\pi}{\Lambda_{out}}\right)^2 > \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2, \quad (3)$$

$$\left(\frac{2\pi}{\lambda} \sin \phi + \frac{\pi}{\Lambda_{out}}\right)^2 + \left(\frac{2\pi}{\lambda} \cos \phi \sin \theta \pm \frac{\sqrt{3}\pi}{\Lambda_{out}}\right)^2 < \left(n \cdot \frac{2\pi}{\lambda}\right)^2. \quad (4)$$

由于耦出光栅与耦入光栅的互补性条件,耦出光栅常数 Λ_{out} = Λ_{in} = 382 nm,经验证其能够满足式(3)和式(4)的条件。光束从平板波导耦出后进入人眼并在视网膜上呈现画面,人眼到平板波导的距离 d_{ERL} = 18 mm。

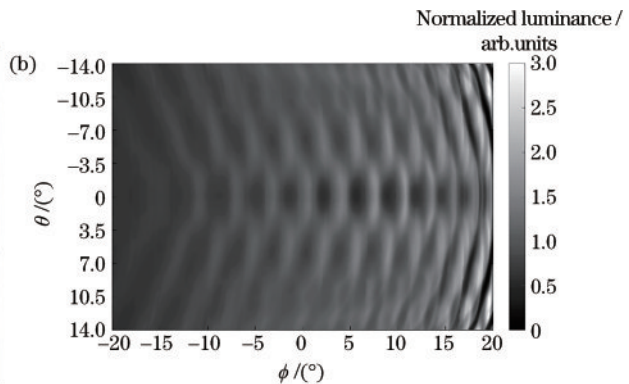
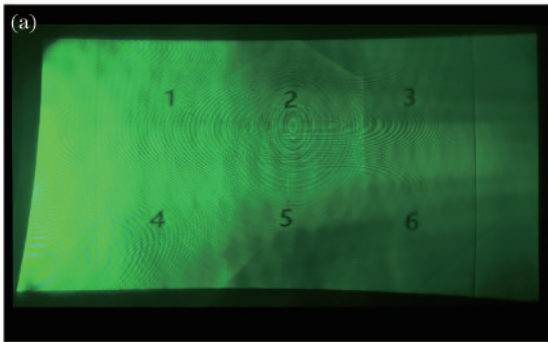


图 3 测试和计算得到的画面光强度分布对照。(a)测试得到的画面光强度分布;(b)计算得到的画面光强度分布

Fig. 3 Comparison between the measured and calculated luminous intensity distributions. (a) Measured luminous intensity distribution; (b) calculated luminous intensity distribution

图 4(a)为左侧视场光线和右侧视场光线传播的路径,可以观察到不同视场光束在平板波导中的全反射角度有很大差异,而光束相邻两次耦出位置之间的距离 Δ 与反射角 Ψ 的正切值成正比,表达式为

$$\Delta = 2 \cdot t \cdot \tan \Psi, \quad (6)$$

这使得不同视场光束经扩瞳后照射在瞳孔平面上的光斑密集程度有巨大的差异。图 4(b)所示是中心视场 (φ = 0°, θ = 0°) 光束经过扩瞳之后在观察者瞳孔平面上的光斑图,中心虚线圆圈为观察者的瞳孔,其直径为

2.2 带斑现象

对于厚度为 0.6 mm 的平板波导,当显示纯色画面时,在距离平板波导耦出光栅区域 18 mm 处观察,可以看到的画面如图 3(a)所示,图中的数字用作辅助对焦。可以观察到画面中有不规则分布亮斑和暗斑,这种现象被称为带斑,其严重影响了画面的显示效果。

带斑对比度 ζ 对显示效果的影响可以用画面的不均匀性评价,其定义为

$$\zeta = \frac{\sigma_{Intensity}}{\bar{I}}, \quad (5)$$

式中:σ_{Intensity} 为显示纯色画面时画面强度的标准差;Ī 为画面强度的平均值。本文使用光线追迹算法建立了模型,以评估不同情况下带斑对比度的变化。需要注意的是,实际观察到的画面的均匀性主要受两种效应影响:其一,是不同视场的光线通过耦入光栅的效率差异和在耦出光栅区域反射次数差异导致的,这种效应有时会导致画面整体呈现左侧比右侧更亮的现象,如图 3(a)所示;其二,是带斑效应导致的,这种效应导致画面局部出现明暗交替的斑纹。为了排除光栅效率对带斑对比度的影响,对所有计算结果向同样参数下光机出瞳直径为 6 mm 情况进行归一化(考虑到大多数基于微显示器的光机出瞳直径约为 6 mm)。此外,在计算中人眼的瞳孔尺寸均按照直径 3 mm 进行评估。最终计算得到的纯色画面光强分布如图 3(b)所示,其中带斑形态与图 3(a)中的测试结果相符合,带斑对比度 ζ 为 29.8%。

3 mm。可以观察到此视场光束在经过扩瞳后并没有形成连续的光斑,而是在瞳孔附近呈现为若干个分离的光斑区域,且相邻光斑区域之间具有毫米尺度的间距,其中落于瞳孔区域的部分光能量被人眼接受并会聚于视网膜上,表现为这个点的亮度。当视场角度发生变化时,这些扩瞳后的光斑位置也会相对瞳孔移动,因此整个画面会在小范围尺度内呈现明暗交替的情况下。图 4(c)和图 4(d)绘制了最右侧视场 (φ = -20°, θ = 0°) 和最左侧视场 (φ = 20°, θ = 0°) 光束经扩瞳后在观察者

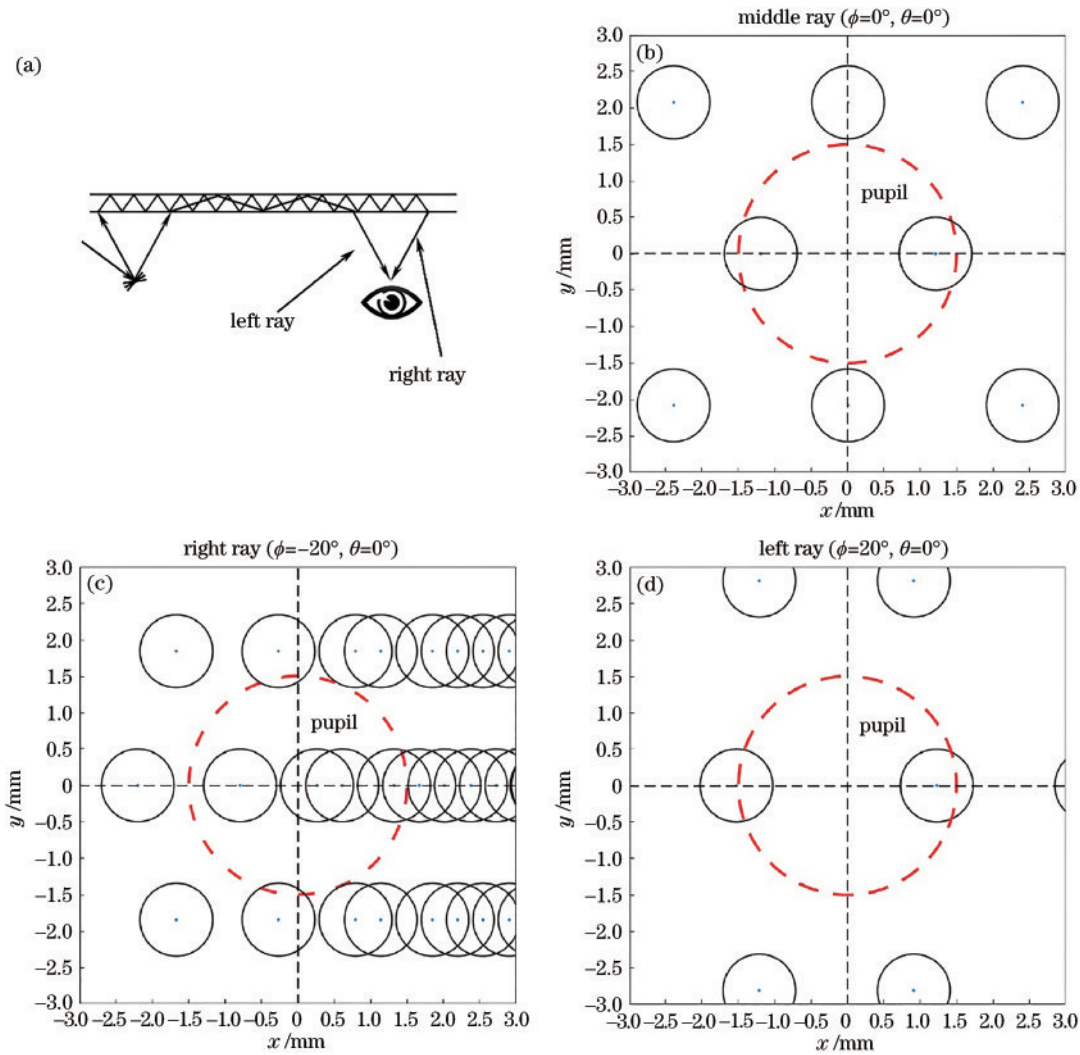


图 4 不同视场光束路径、光斑与人眼瞳孔示意图。(a)不同视场光束路径示意图;(b)~(d)中心、右侧、左侧视场光斑与人眼瞳孔示意图

Fig. 4 Schematic of beam path, beam spots, and human pupil in different field of view. (a) Schematic of beam path from different field of view; (b)-(d) schematic of beam spots and human pupil in middle, right, and left field of view

瞳孔平面上的光斑分布,可见右侧视场光斑密集程度显著高于左侧视场,因此右侧视场的带斑密度也会高于左侧视场,这与图 3(a)和图 3(b)中的结果一致。

3 带斑对比度的影响因素

3.1 MEMs 振镜尺寸对带斑的影响

根据上文的分析,在基于 LBS 的 AR 显示系统中,光机出瞳直径过小是引起带斑的主要原因之一,其中光机出瞳直径取决于 MEMs 振镜的尺寸。对于平板波导厚度分别为 1.0 mm(实线)和 0.8 mm(虚线)的系统,不同尺寸的 MEMs 振镜对应的画面带斑对比度如图 5 所示。由图 5 可知,对于平板波导厚度分别为 1.0 mm 和 0.8 mm 的系统,当 MEMs 振镜半径从 0.1 mm 开始逐渐增大时,显示画面的带斑对比度均出现了一个先增大后减小的过程,大约在 MEMs 振镜半径 $r_{MEMs} = 1.3$ mm 时达到最大值,然后逐渐下降。由于计算得到的光强分布结果均向同样参数下

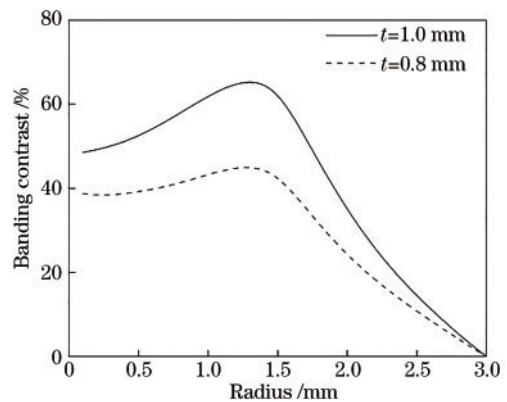


图 5 MEMs 振镜半径与带斑对比度之间的关系
 Fig. 5 Relationship between the radius of MEMs mirror and banding contrast

光机出瞳直径为 6 mm 情况进行了归一化,因此在 MEMs 振镜半径为 3 mm 时,计算得到的带斑对比度均下降到 0%。

图 6 展示了 MEMs 振镜半径 r_{MEMs} 分别为 0.5, 1.3, 2.0 mm 时的画面强度分布。可以观察到, 当 MEMs 振镜半径 $r_{MEMs} = 1.3$ mm 时, 原本画面中的亮斑恰好在纵向上连成带, 这使得画面整体的带斑显得尤为清晰。出于成像分辨率的要求, 通常在基于二维

振镜的 LBS 光机中振镜半径大多在 0.5 mm 左右。如果想要通过增大振镜尺寸缓解显示画面的带斑对比度, 需要将振镜半径增大到大约 2 mm 以上才能有较为显著的效果, 这通常意味着显示分辨率的急剧下降和光机整体尺寸的增大, 实际可实施性不强。

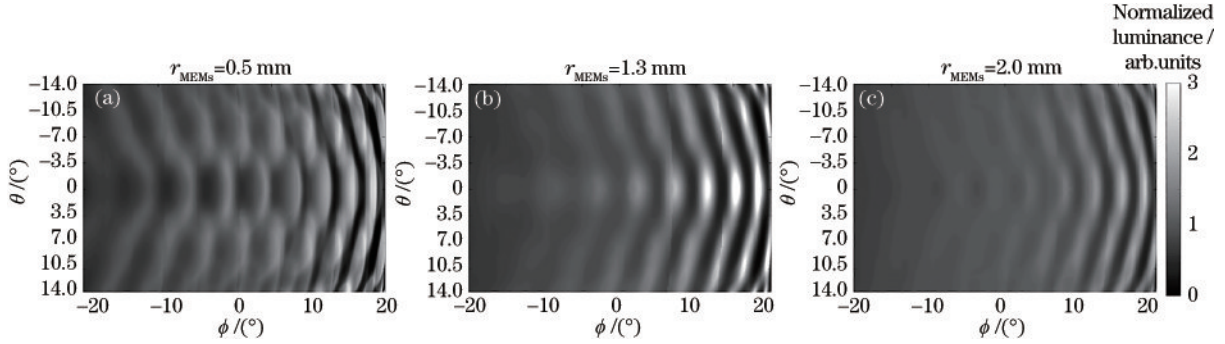


图 6 不同振镜半径下计算得到的光强分布

Fig. 6 Calculated luminous intensity distribution under different radii of MEMs mirror

3.2 平板波导厚度对带斑的影响

由式(6)可知, 平板波导中光束相邻两次耦出位置之间的距离 Δ 正比于波导厚度, 即波导越薄, 则扩瞳后光束分布越密集, 显示纯色画面时的带斑对比度也会越低。如图 7 所示, 纯色画面的带斑对比度和平板波导厚度之间呈现显著的正相关性, 当平板波导厚度从 1.1 mm 降低到 0.6 mm, 纯色画面的带斑对比度从

58.8% 降低到 29.8%。

图 8 展示了当平板波导厚度分别为 1.0, 0.8, 0.6 mm 时计算得到的光强分布, 可见随着平板波导厚度下降, 带斑逐渐变得细密, 同时亮斑与暗斑之间的亮度差异也随之减小。

然而在实际应用中, 平板波导的厚度受到加工工艺和机械强度的限制而很难低于 0.6 mm, 同时, 随着平板波导厚度降低, 出瞳扩展次数增加, 系统整体的能量效率也会快速下降。因此, 减小平板波导厚度以抑制带斑的可实施性不强。

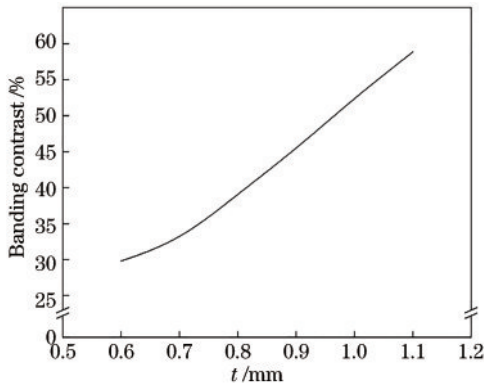


图 7 平板波导厚度与带斑对比度之间的关系

Fig. 7 Relationship between the thickness of planar waveguide and banding contrast

4 波导叠加对带斑的抑制

为了在不明显增加光机尺寸的情况下抑制画面带斑, 本文采用了使用叠加的双层波导进行出瞳扩展的方法。如图 9 所示, 相叠加的双层波导相互平行, 厚度分别为 t_1 和 t_2 。从 MEMs 振镜反射出来的光束依次经两者的耦入光栅进入两片波导中, 两者之间有一层厚度为 0.1 mm 的空气层, 以保证光束在两层波导中各自以全内反射形式传播。为了获得最好的带斑抑制效果, 需要优化耦入光栅与耦出光栅的效率, 使从两片波

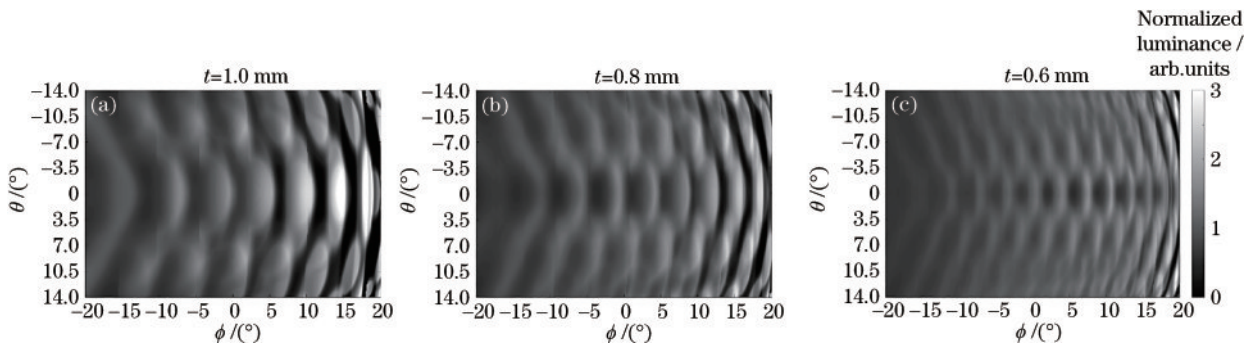


图 8 不同平板波导厚度下计算得到的光强分布

Fig. 8 Calculated luminous intensity distribution under different thicknesses of planar waveguide

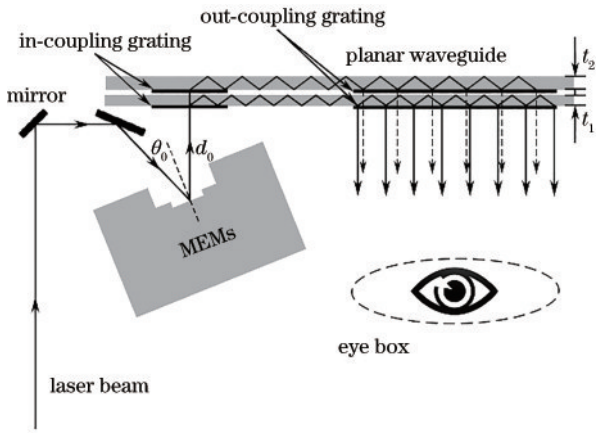


图 9 具有双平板波导的激光扫描的增强现实系统示意图
Fig. 9 Schematic of augmented reality system based on laser beam scanning with dual planar waveguide

导中耦出到眼动范围内的光能量近似相等。

当两片平板波导厚度有一定差异时,由式(6)可知,两片平板波导中光束相邻两次耦出位置之间的距离 Δ 也会不同。因此单一视场的光束从两片平板波导耦出光栅区域出射的位置将出现差异,这使得此视场光束经过扩瞳后的分布更加密集,从而视场角变化导致的人眼观察到的画面亮度变化程度减弱,从而能够抑制画面带斑。

如图 10 所示,随着第一层波导厚度的变化,叠加后的画面带斑对比度呈现周期性的起伏,这是两层波导中亮斑位置差异导致的。但是叠加后的带斑对比度始终低于单独一层较厚的波导片扩瞳后观察到的带斑对比度。考虑两层波导中传输的光时空相干性较弱时,叠加后的带斑对比度为

$$\zeta = \frac{\sigma_{\text{Intensity}}}{\bar{I}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [I_{1i} + I_{2i} - (\bar{I}_1 + \bar{I}_2)]^2}}{\bar{I}_1 + \bar{I}_2} = \frac{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 2(\bar{I}_1 \cdot \bar{I}_2 - \overline{I_1 \cdot I_2})}}{\bar{I}_1 + \bar{I}_2}, \quad (7)$$

式中: I_1 和 I_2 分别为从两层波导耦出画面的亮度; σ_1 和 σ_2 分别为从两层波导耦出画面亮度的标准差。当调控两层波导的耦入效率使从两层波导耦出的光的总亮度相等(即 $\bar{I}_1 = \bar{I}_2$)时,叠加后的带斑对比度满足

$$\zeta \leq \frac{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}}{\bar{I}_1 + \bar{I}_2} \leq \max(\zeta_1, \zeta_2), \quad (8)$$

即叠加后的带斑对比度始终低于分别从两个单层波导片耦出后观察到的画面带斑对比度的较大值。

考虑到加工工艺和结构强度的要求,这里每层平板波导的厚度均大于 0.6 mm。在双平板波导系统中,若将第二层平板波导厚度固定为 $t_2 = 0.6$ mm,改变第一层平板波导的厚度 t_1 ,则可以计算纯色画面的带斑对比度,结果如图 10 中实线所示,虚线为相应厚度的单层波导系统中纯色画面的带斑对比度。可以观察到:双

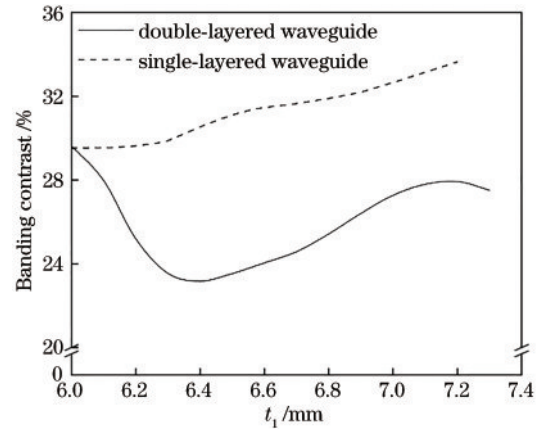


图 10 双层平板波导中第一层波导厚度和单层平板波导系统中波导厚度与带斑对比度之间的关系

Fig. 10 Relationship between banding contrast and the thickness of the first waveguide in double-layered waveguide and the thickness of waveguide in single-layered waveguide

层波导叠加后画面带斑对比度相对于单层波导均有显著的下降;此外随着第一层平板波导厚度 t_1 的变化,画面带斑对比度呈现波动变化,这是两层平板波导中光束耦出位置之间的差异周期性变化导致的。当两层平板波导厚度分别为 $t_1 = 0.64$ mm、 $t_2 = 0.6$ mm时,画面带斑对比度达 23.2%,相对厚度为 0.6 mm 的单层波导系统(带斑对比度为 29.8%)下降了约 22%。此时仿真得到显示纯色画面时的光强分布如图 11 所示,可以观察到其中带斑现象相比图 3(b)得到了显著的改善。

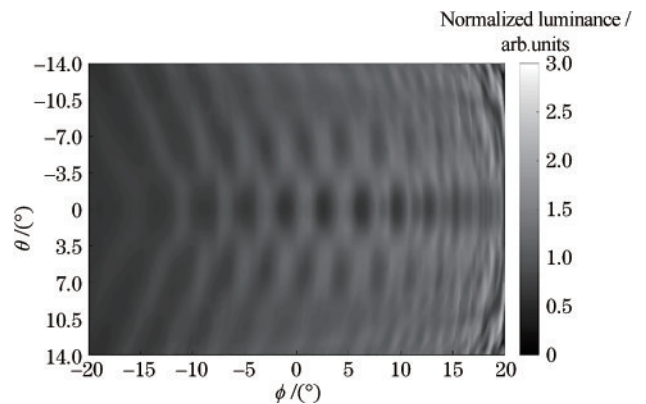


图 11 厚度分别为 0.6 mm 和 0.64 mm 的双层波导叠加系统呈现的光强分布

Fig. 11 Luminous intensity distribution in double-layered waveguide system with thickness of 0.6 mm and 0.64 mm

5 结 论

通过分析 LBS 光机出射光束在平板光波导中进行二维扩瞳的过程,得出经过扩瞳后光束分布的不连续性是导致画面带斑产生的主要原因。单纯增加 LBS 出瞳直径并不一定能够抑制带斑对比度,却常常伴随着系统尺寸的膨胀。减薄平板波导的厚度能够在

一定程度抑制带斑,却受到加工工艺和系统光效限制。而厚度不同的两层平板波导叠加的方式能够有效地抑制带斑现象,经仿真得到相对厚度为 0.6 mm 的单层波导系统,当两层平板波导厚度分别为 0.64 mm 和 0.6 mm 时,带斑对比度将下降到 23.2%。这种方式在不显著增加系统体积且具有较好工艺可实施性的前提下实现了对带斑现象的抑制,改善了系统成像质量。

参 考 文 献

- [1] 高源, 刘越, 程德文, 等. 头盔显示器发展综述[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2016, 28(6): 896-904.
Gao Y, Liu Y, Cheng D W, et al. A review on development of head mounted display[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2016, 28(6): 896-904.
- [2] de Souza Cardoso L F, Mariano F C M Q, Zorzal E R. A survey of industrial augmented reality[J]. Computers & Industrial Engineering, 2020, 139: 106159.
- [3] Xiong J H, Hsiang E L, He Z Q, et al. Augmented reality and virtual reality displays: emerging technologies and future perspectives[J]. Light: Science & Applications, 2021, 10: 216.
- [4] 呼新荣, 刘英, 王健, 等. 基于视网膜扫描的头戴显示器研究现状[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(3): 871-878.
Hu X R, Liu Y, Wang J, et al. Current progress in head-mounted display based on retinal scanning[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(3): 871-878.
- [5] Urey H, Holmstrom S, Baran U, et al. MEMS scanners and emerging 3D and interactive augmented reality display applications[C]//2013 Transducers & Eurosensors XXVII: The 17th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS & EUROSensors XXVII), June 16-20, 2013, Barcelona, Spain. New York: IEEE Press, 2013: 2485-2488.
- [6] Xiong J H, Tan G J, Zhan T, et al. Breaking the field-of-view limit in augmented reality with a scanning waveguide display[J]. OSA Continuum, 2020, 3(10): 2730-2740.
- [7] 林俊国, 丛强, 许晨, 等. MEMS 激光扫描视网膜投影显示系统设计[J]. 光学学报, 2017, 37(12): 1222001.
Lin J G, Cong Q, Xu C, et al. Design of MEMS laser scanning retinal projection display system[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(12): 1222001.
- [8] Tauscher J, Davis W O, Brown D, et al. Evolution of MEMS scanning mirrors for laser projection in compact consumer electronics[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7594: 84-95.
- [9] 李天雄, 侯茂盛, 李丽娟, 等. 基于特征自适应的激光扫描投影图形控制点提取及优化方法[J]. 光学学报, 2021, 41(24): 2411004.
Li T X, Hou M S, Li L J, et al. Control point extraction and optimization method of laser scanning projection graphics based on feature adaptation[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(24): 2411004.
- [10] 程进, 周顺, 徐乃涛, 等. 低成本二维激光扫描投影技术[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(1): 0123001.
Cheng J, Zhou S, Xu N T, et al. Low-cost two-dimensional laser scanning projection technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(1): 0123001.
- [11] Guillaumée M, Vahdati S P, Tremblay E, et al. Curved transmissive holographic screens for head-mounted display [J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8643: 864306.
- [12] Arakawa Y, Sugawara M, Suzuki M. Image projection device and projection device: US10088682[P]. 2018-10-02.
- [13] Takahashi H, Hirooka S. Stereoscopic see-through retinal projection head-mounted display[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6803: 68031N.
- [14] Sugawara M, Suzuki M, Miyauchi N. Retinal imaging laser eyewear with focus-free and augmented reality[C]//Extended Abstracts of the 2016 International Conference on Solid State Devices and Materials, September 26-29, 2016, Tsukuba, Japan. Tokyo: The Japan Society of Applied Physics, 2016.
- [15] Ding W W, Zheng Y. 41.5: head-mounted display based on surface relief grating for augmented reality[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2018, 49(S1): 457-461.
- [16] 胡润, 田方旭, 林旗清, 等. 多层全息平板波导显示系统研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(12): 1209001.
Hu R, Tian F X, Lin Q Q, et al. Research on multi-layer holographic planar waveguide display system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(12): 1209001.
- [17] Amitai Y. P-27: a two-dimensional aperture expander for ultra-compact, high-performance head-worn displays[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2005, 36(1): 360-363.
- [18] Äyräs P, Saarikko P, Levola T. Exit pupil expander with a large field of view based on diffractive optics[J]. Journal of the Society for Information Display, 2009, 17(8): 659-664.
- [19] Chen F, Miller J O. Systems and methods of increasing pupil size in a display system: US20190278076[P]. 2019-09-12.
- [20] 丁意桐, 高震宇, 彭旭, 等. 激光扫描头戴式增强现实系统中带斑抑制与中继光路设计[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(13): 130801.
Ding Y T, Gao Z Y, Peng X, et al. Banding suppression and relay optical path design for laser scanning head-mounted augmented reality system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(13): 130801.
- [21] Freedman B, Hirshberg A. Mems scanning mirror field of view provision methods and apparatus: US20140253992 [P]. 2014-09-11.