

文章编号 1004-924X(2024)09-1273-10

光纤扫描式李萨如轨迹近眼显示系统设计

吴彤^{1,2*}, 杨翔宇¹, 邹谨聪¹, 刘友文^{2*}, 王玲³, 王吉明², 路元刚¹, 赫崇君¹

(1. 南京航空航天大学 航天学院 空间光电探测与感知工业和信息化部重点实验室,

江苏 南京 211106;

2. 南京航空航天大学 物理学院, 江苏 南京 211106;

3. 杭州电子科技大学 自动化学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 为了进一步小型化头戴式显示装置(Head-worn Display, HWD), 提出一种基于非对称光纤悬臂梁(Asymmetrical Fiber Cantilever, AFC)的李萨如轨迹扫描近眼显示系统, 以及李萨如轨迹上的像素划分准则。研究了该系统的扫描轨迹、图像重建能力、显示分辨率和显示帧速率的影响因素。根据高分辨率、高帧速率指标设计了正交谐振频率组成, 确定了非对称光纤悬臂梁的结构参数。研制的显示单元实物直径为 2 mm, 长度为 19 mm。谐振频率下的分辨率为 160×120 pixel, 帧速率为 10 Hz, 图像重建误差率为 0.002%, 最高分辨率能够达到 290×220 pixel, 最高帧速率为 95 Hz。基于显示单元实物搭建了光纤扫描式近眼显示系统, 使用相机模拟人眼观察记录了该显示系统的实验结果, 验证了基于非对称光纤悬臂梁的HWD显示性能及其未来应用潜力。

关键词: 近眼显示; 头戴式显示装置; 李萨如轨迹; 非对称光纤悬臂梁; 像素划分

中图分类号: TN27 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20243209.1273

Design of fiber scanning Lissajous trajectory near-eye display system

WU Tong^{1,2*}, YANG Xiangyu¹, ZOU Jincong¹, LIU Youwen^{2*}, WANG Ling³,

WANG Jiming², LU Yuangang¹, HE Chongjun¹

(1. Key Laboratory of Space Photoelectric Detection and Perception, Ministry of Industry and Information Technology, College of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;

2. College of Physics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,

Nanjing 211106, China;

3. School of Automation, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

* Corresponding author, E-mail: wutong@nuaa.edu.cn; ywliu@nuaa.edu.cn

Abstract: To further reduce the size of head-worn displays (HWDs), a near-eye display system utilizing an asymmetric fiber cantilever has been developed, alongside a specific pixel division rule. This study explores the factors affecting the scanning trajectory, image reconstruction capabilities, display resolution, and frame rate of the system. The resonant frequencies in orthogonal directions are tailored for enhanced

收稿日期: 2023-11-14; 修订日期: 2024-01-11.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 62175106, No. 62105146)

definition and faster frame rates, with calculated structural parameters for the asymmetric fiber cantilever. The display unit measures 2 mm in diameter and 19 mm in length, offering a resolution of 160×120 pixels at a 10 Hz frame rate, with an image reconstruction error rate of 0.002%. It can potentially reach a maximum resolution of 290×220 pixels and a frame rate of 95 Hz. A fiber-scanning near-eye display system has been constructed, employing a camera to document the experimental outcomes. These results confirm the display's efficacy and the promising future applications of asymmetric fiber cantilevers in HWDs.

Key words: near-eye display; head-worn display; Lissajous trajectory; asymmetric fiber cantilever; pixel division

1 引言

头戴式显示装置(Head-Worn Displays, HWDs)是增强现实(Augmented Reality, AR)和虚拟现实(Virtual Reality, VR)应用的核心设备。目前,HWD大多为投影式,其信息载体为微型显示器。考虑到人眼的调焦能力有限,投影系统需要将微型显示器上的图像信息成像在距人眼 25 cm 之外^[1]。因此,基于微型显示器的 HWD 系统具有较多组件,只能做成头盔形式,用途也集中在军事和飞行员抬头显示方面。另外,若环境光较强,微型显示器会因亮度不足而降低视觉显示效果^[2]。随着互联网和多媒体技术的发展,HWD 在商业和日常生活中的需求也越来越多^[3],这就迫切需要开发更加便携且显示效果优异的眼镜式 HWD。

扫描式 HWD 作为投影式的一种替代方案,不需要将信息显示在微型显示器上,直接对光源的出射光进行高速调制,将携带信息通过微扫描器直接成像在空气中,再经过人眼晶状体聚焦成像在视网膜上^[4]。因此,扫描式 HWD 一般具有更小的体积和更轻的质量,有望制成眼镜式 HWD。而且,扫描成像面上每个像素点直接由会聚的激光点组成,能够达到强光背景下的亮度要求。通过设计系统的扫描驱动信号,还可以实现灵活的像素分辨率和图像尺寸设置^[5]。

激光扫描显示的传统驱动方式为微机电系统(Micro-electron-mechanical System, MEMS)扫描。2006年,Yalcinkaya等使用二维 MEMS 振镜进行栅格扫描,分辨率达到 600×800 pixel^[6]。2017年,林俊国等使用 MEMS 扫描投影作为图像源设计了一种视网膜投影显示设备,分辨率为

720×480 pixel^[7]。虽然 MEMS 可以实现较大的视场和分辨率,但是其整体设计有待进一步小型化。光纤扫描显示装置利用光纤的谐振扫描形成显示图像,有望实现更小体积。2002年,Seibel等设计了一种光纤扫描显示系统,可用于低能见度环境下的信息显示^[8]。该系统在扫描面上的像素分辨率为 100×32 pixel,只能显示几个简单的字母。2010年,Schowengerdt等设计了一种圆柱光纤扫描器,其扫描轨迹为螺旋线,每一圈最多可达 2 000 像素,借助 LEEP 全景摄影系统实现了 105° 的视场角^[9]。但是,该扫描器中心视场的亮度过高,严重影响视觉感受。2018年,Matsuda等设计了一种用于近眼显示的光纤扫描装置,该扫描装置直径为 0.85 mm,长度为 10 mm,光纤由 PZT 圆柱管驱动,实现了一种接近正方形的扫描轨迹^[10],但是该轨迹的形状边缘不规则,导致轨迹边缘无法传递有效信息,另外在有效扫描范围内填充率较低,导致信息缺失。2018年,Khayatzadeh等使用光纤扫描装置和自由曲面反射装置设计了一种离轴近眼显示系统,该系统采用的扫描轨迹也为螺旋线,实现了高填充率高分辨率的圆形扫描图样^[11],但是显示的图像在轴向上有比较严重的变形,而且中心亮度较高,影响视觉感受。

光纤扫描显示系统的显示性能以及视觉感受和扫描轨迹的类型密切相关。李萨如轨迹具有矩形轨迹,契合主流信息显示介质的形状,且具有高帧速率、高填充率和轨迹均匀等优点^[11-13],非常适合近眼显示应用场景。目前,基于光纤扫描实现的李萨如扫描轨迹已被提出^[14-16],但主要应用于成像领域,尚未有针对近眼显示应用方面的研究。

本文提出一种基于非对称光纤悬臂梁(Asymmetrical Fiber Cantilever, AFC)的李萨如轨迹光纤扫描显示方法与系统。非对称光纤悬臂梁包括一片微型压电陶瓷双晶片、一根显示光纤和两段附加光纤,在正交频率选择上具有较高的自由度,可以形成多种不同帧速率、分辨率的李萨如轨迹。首先叙述了高质量李萨如轨迹的设计原理,阐述了高填充率、高帧速率、高分辨率李萨如扫描轨迹的设计方法。制作了基于非对称光纤悬臂梁的光纤扫描显示单元,其尺寸与眼镜腿相当。最后,基于该显示单元搭建了近眼显示系统,实验验证了该显示系统的显示性能及其未来应用潜力。

2 适用于近眼显示的李萨如轨迹

2.1 轨迹像素划分

李萨如轨迹可由正交方向上两个频率不同的简谐运动合成。当质点同时在X方向和Y方向上做不同频率的简谐运动时,其合运动会形成一个外形为矩形、封闭且稳定的轨迹,即李萨如轨迹。两个方向上简谐运动的表达式可以表示为:

$$\begin{cases} U_x(t) = A \sin(2\pi f_x t + \varphi_x) \\ U_y(t) = B \sin(2\pi f_y t + \varphi_y) \end{cases} \quad (1)$$

其中: t 为时刻, U_x 和 U_y 分别为 t 时刻运动质点在X方向和Y方向的位置坐标, A 和 B 分别为两简谐运动的振幅, f_x 和 f_y , φ_x 和 φ_y 分别为两简谐运动的频率和初相位。

基于李萨如轨迹的扫描显示,其显示效果主要由两个因素决定,即帧速率和填充率。帧速率描述了每秒内扫描轨迹重复的次数,其数值为 f_x 和 f_y 的最大公约数。填充率可以表征李萨如轨迹对图像信息采集的完整度,它随李萨如轨迹波瓣数的增加而增加。波瓣数定义为李萨如轨迹与其外接矩形边缘的交点个数。

高分辨率、高帧速率的李萨如轨迹可以提高成像与显示系统的性能^[17]。为了获得高分辨率的显示效果,需要考虑李萨如扫描轨迹分布与图像重建像素划分的关系。李萨如轨迹在扫描区域的中心和边缘呈现不同的轨迹密度。中心区

域和边缘区域的像素包含的轨迹线数是不同的。为了说明像素尺寸与对应的轨迹密度的关系,图1显示了3种不同的像素划分,像素尺寸分别如图中a,b和c所示。中心区域的李萨如轨迹的每个封闭网格近似菱形,越靠近扫描边缘区域,菱形网格越小。a组在中心区域显示出良好的轨迹均匀性,因为大部分菱形封闭网格都由一条轨迹线斜穿透,只有在靠近边缘区域时轨迹密度逐渐增高,此时有更多轨迹线穿过菱形网格。b组的像素尺寸设定大于a组,此时中心像素包含多条轨迹线,则此处信息被多次重复获取,造成采样浪费和数据冗余。c组的像素尺寸设定小于a组,导致中心区域部分像素没有被轨迹线穿过,此时显示图像的填充率降低。a组能够实现像素尺寸和显示图像填充率之间的良好平衡,本文基于a组提出最优像素划分准则,即扫描场中心区域的每个像素都有且仅有一条轨迹线通过。

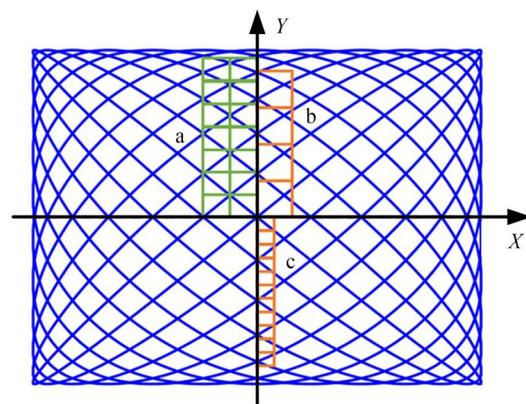


图1 模拟的李萨如轨迹3种像素的划分情况
Fig.1 Three types of pixel division of simulated Lissajous trajectory

设李萨如轨迹的中心位置为坐标原点。当驱动信号初相位设定为零时,李萨如轨迹和Y轴的交点坐标可以表示为:

$$\begin{cases} x = 0 \\ y|_{x=0} = B \sin\left(\frac{f_y}{f_x} \pi i\right), i = 0, 1, 2, 3, \dots \end{cases} \quad (2)$$

其中 i 表示李萨如轨迹和Y轴交点的序数。

根据上述分析,最优像素尺寸被设定为轨迹与Y轴正向的第一交点高度的一半,将像素在Y

轴方向上的尺寸表示为 p_y , 即有:

$$p_y = \frac{1}{2} y|_{x=0}. \quad (3)$$

同样, 将像素在 X 轴方向上的尺寸表示为 p_x , 结合式(1)和式(2), 有:

$$\begin{cases} p_y = \frac{B}{2} \sin\left(\frac{f_r}{f_x} \pi\right) \\ p_x = \frac{A}{2} \sin\left(\frac{f_r}{f_y} \pi\right) \end{cases}, \quad (4)$$

其中 f_r 为 f_x 和 f_y 的最大公约数, 其数值即为李萨如扫描的帧速率。

根据式(3), 并使用 n_x, n_y 分别表示 f_x, f_y 和 f_r 之间的倍数, 分别等于轨迹在 X, Y 轴的波瓣数, 则两个轴上的像素数 D_y 和 D_x 可以表示为:

$$\begin{cases} D_y = \frac{2B}{p_y} = 4 / \sin\left(\frac{\pi}{n_x}\right) \\ D_x = \frac{2A}{p_x} = 4 / \sin\left(\frac{\pi}{n_y}\right) \end{cases}. \quad (5)$$

从式(4)和式(5)可以看出, 像素尺寸由视场大小、帧速率和驱动信号频率共同决定, 而像素数仅由波瓣数决定。

为了实现高帧速率李萨如扫描, 谐振频率通常需要高达 kHz 量级, 此时帧速率与谐振频率的比值接近零。在这种情况下, 像素尺寸可近似表示为:

$$\begin{cases} p_y \approx \frac{B}{2} \cdot \frac{\pi f_r}{f_x} = \frac{B}{2} \cdot \frac{\pi}{n_x} \\ p_x \approx \frac{A}{2} \cdot \frac{\pi f_r}{f_y} = \frac{A}{2} \cdot \frac{\pi}{n_y} \end{cases}. \quad (6)$$

可以看出, 当扫描范围不变时, 像素尺寸随波瓣数的增加而减小, 即显示分辨率提升。

2.2 振动频率的设定

由于扫描帧速率由 f_x 与 f_y 的最大公约数决定, 在一个较窄的频率带宽内可以选取多种频率组合, 进而产生多种扫描帧速率。本文在 2 090 Hz 和 1 400 Hz 的谐振频率及其带宽范围内, 选取 6 组振动频率, 在 1 MS/s 的数据生成率下, 使用前文提出的像素划分准则, 数值计算了轨迹帧速率(Frame Rate, FR)、可承载像素数(Pixel Number, PN)和填充率(Filling Percentage, FP)的典型取值。具体参数如表 1 所示。

表 1 在 1 MS/s 数据生成率下 6 组基于像素划分准则的指标参数

Tab. 1 Six groups of indicator parameters based on pixel division rule at 1 MS/s generating rate

f_x/Hz	f_y/Hz	FR/Hz	PN	FP/%
2 088	1 398	6	290×220	86
2 090	1 400	10	160×120	99
2 075	1 400	25	80×55	100
2 088	1 404	36	56×35	100
2 080	1 404	52	33×26	100
2 090	1 425	95	20×15	100

根据表 1, 最低帧速率为 6 Hz, 对应视场内像素数为 290×220 pixel; 最高帧速率为 95 Hz, 对应视场内像素数为 20×15 pixel。总像素数较大代表能显示分辨率更高的图像, 总像素数较小时则对应更高的扫描帧速率。为了直观地分析扫描频率对轨迹形状、视场范围和填充率的影响, 绘制了 6 组不同 f_x 和 f_y 频率对下的轨迹图, 如图 2 所示。6 个轨迹被设定为具有相同的 FOV。由图 2 可以看出, 帧速率为 6 Hz 的轨迹呈现最为均匀且密集的分布, 并且横向和纵向波瓣数最大, 可承载的像素数也最大, 代表可以用于显示更高分辨率的图像。随着帧速率的提高, 轨迹密度逐渐下降。当帧速率达到 95 Hz 时轨迹线最为稀疏, 可承载的像素数仅为 15×20, 意味着该轨迹只能用于显示分辨率非常低的图像。

在 1 MS/s 的数据生成率下, 为了清晰反映数据生成率对图像填充率的影响, 模拟 6 组频率对的数据生成率-填充率关系曲线, 结果如图 3 所示。当数据生成率较低时, 6 组频率对的轨迹填充率随数据生成率的增加迅速增加。帧速率较高的频率对填充率首先达到 100%, 如 95 Hz 的频率对在约 0.2 MS/s 的情况下填充率就达到 100%, 而帧速率最低的 6 Hz 频率对在接近 2 MS/s 的数据生成率下填充率才能接近 100%。这反映出高帧速率对数据生成率的增益更为敏感。当数据生成率为 1 MS/s 时, 4 组帧速率较高的频率对填充率达到 100%, 10 Hz 帧速率频

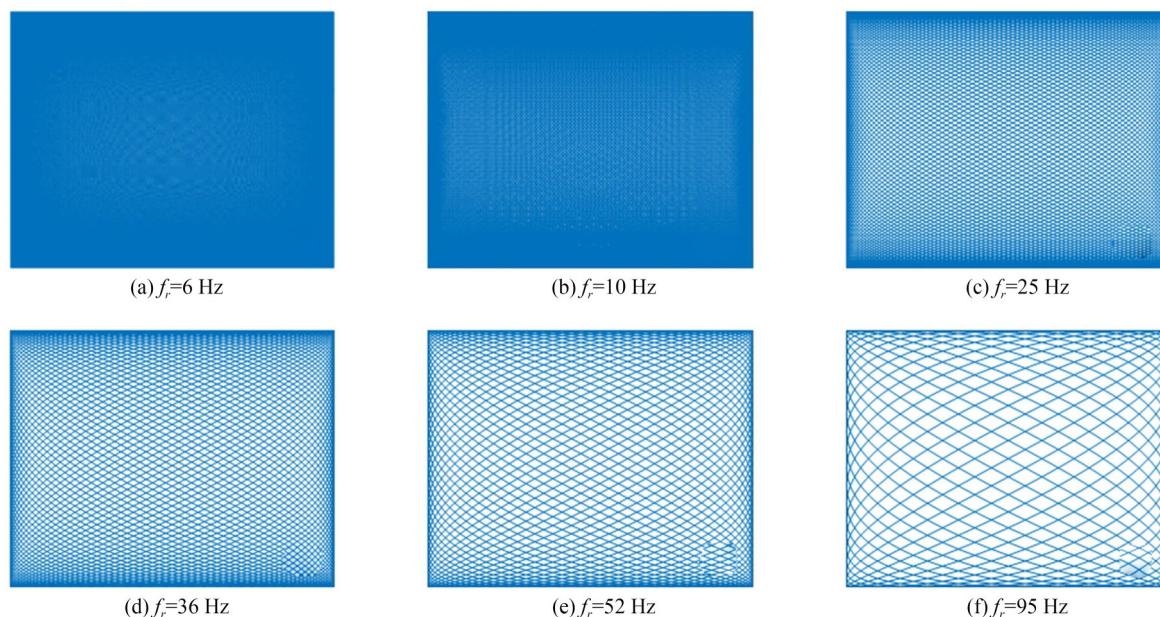


图2 不同帧速率李萨如轨迹的轨迹密度

Fig. 2 Density of Lissajous trajectories with different frame rates

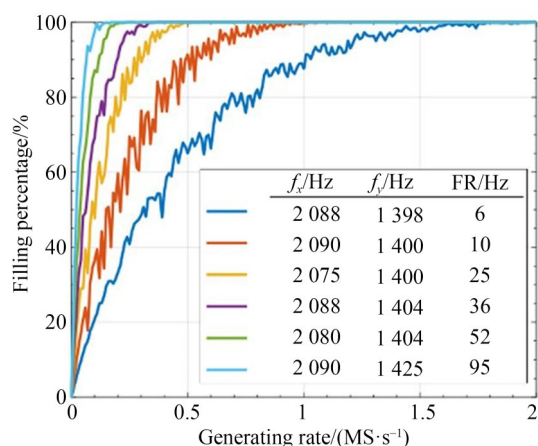


图3 不同帧速率情况下填充率与数据生成率的关系曲线

Fig. 3 Relation curves between filling percentage and generating rate at different frame rates

率对填充率达到99%,6 Hz帧速率频率对填充率达到86%。当数据生成率达到2 MS/s时,6组频率对填充率均达到100%。

2.3 轨迹图像重建

为了将待显示的图像重建至李萨如轨迹上,按照预设的轨迹路径对图像灰度值进行顺序采样,根据采样数据生成调制信号。在扫描过程中,电光调制器根据像素调制信号调节轨迹上每个像素坐标处的光强,完成一个周期的循环后,即完成图像的显示重建。

3 实验

图4为基于非对称光纤悬臂梁的显示单元的结构示意图。其中,非对称光纤悬臂梁(AFC)由压电陶瓷双晶片(Piezoelectric Lead Zirconate Titanate, PZT)、显示光纤、附加光纤、在两根光纤之间传递机械力的连接光纤、固定显示光纤和PZT的支架以及向PZT传递驱动信号的电线组成。各组件之间通过环氧树脂胶粘接固定。整个AFC被封装在直径为2 mm,长度为19 mm的圆柱形金属保护管中。

如图4所示,显示光纤、连接光纤和附加光纤可形成一个附着在压电双晶片上的框架面,由于

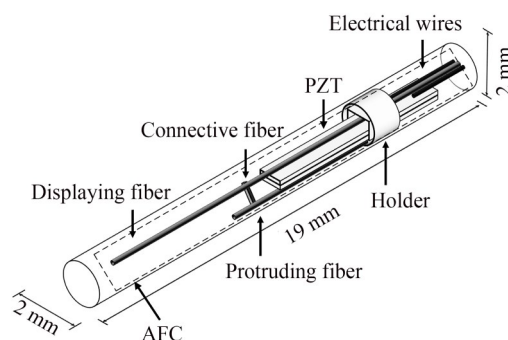


图4 基于非对称光纤悬臂梁的显示单元结构

Fig. 4 Schematic of AFC-based display unit

其非对称结构特点,在垂直于框架面和平行于框架面的两正交方向上具有不同的固有谐振频率。PZT 驱动信号中包含对应于这两种固有谐振频率的信号分量,在驱动信号的作用下,压电双晶片由于压电效应产生竖直方向的驱动力。该驱动力可分解为垂直于框架面和在框架面内的两正交分力^[14]。在两正交分力的驱动下,显示光纤的末端可在两正交方向上分别进行频率不同的谐振运动,根据运动学原理,在两正交方向上频率不同的简谐振动的合运动即可形成李萨如轨迹,如式(1)所示。

本文将连接光纤的粘贴位置设定在距离 PZT 末端 2 mm 处,接着将显示光纤长度和附加光纤长度作为变量,选取表 1 中 2 090 Hz 和 1 400 Hz 作为谐振频率对,将显示光纤长度设置为 9.0~9.5 mm,附加光纤长度为 2.0~2.5 mm,使用 COMSOL 计算得到非对称光纤悬臂梁的结构参数,如表 2 所示。根据表 2 完成基于非对称光纤悬臂梁的显示单元制作。

表 2 非对称光纤悬臂梁实物的结构参数

Tab.2 Structural parameters of asymmetric fiber optic cantilever beam (mm)

Description	Value
Length of imaging fiber	9.206
Length of protruding fiber	2.211
Attach point	2.000

为了验证悬臂梁结构的谐振频率与设计值一致,使用模拟输出设备向其输入电压信号,波形为幅值一定,频率变化的正弦波,使用二次元影像测量仪记录悬臂梁光纤自由端的振幅变化,绘制幅频响应曲线,曲线上的主极大和次极大峰值对应的频率即为悬臂梁的两个谐振频率。

图 5 为李萨如光纤扫描显示系统示意图。激光光源(Light Source: MCLS1-635, Thorlabs)输出波长为 635 nm 的单色光,从 AFC 的显示光纤末端出射。在驱动信号的作用下,显示光纤的末端进行二维扫描,形成李萨如轨迹。为了将待显示的灰度图像重现至该轨迹上,需要预先按照李萨如轨迹经过图像像素的路径顺序提取各个像素的灰度值,并生成像素调制信号。电光调制器

(EOAM: EO-AM-NR-C4, Thorlabs)在像素调制信号的控制下,对光源发出的激光进行强度调制,使显示光纤末端在李萨如轨迹路径的每一处横向点出射的光强刚好与预先提取的图像像素灰度值对应,这样经过一个李萨如扫描周期后,即可在李萨如轨迹扫描面上重现出原始图像。AFC 的驱动信号、EOAM 的像素调制信号由模拟输出板卡(PCI 6711, NI)同步产生。显示光纤末端形成的扫描重现图像经由目镜和波导片组成的光学中继系统成像在无穷远处,由于视觉暂留效应,扫描重现图像可由人眼直接观察,或由相机拍摄记录。

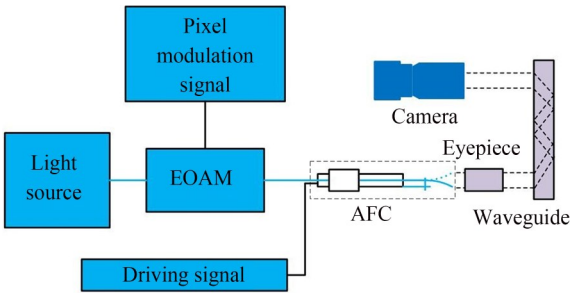


图 5 李萨如轨迹光纤扫描近眼显示系统

Fig.5 Schematic diagram of Lissajous trajectory fiber scanning near-eye display system

为了验证图像重建算法的精度,选取像素数为 160×120 pixel、由灰度值渐变的“NUAA”4 个字母组成的灰度图像,重建至 2 090 Hz 和 1 400 Hz 频率组合的李萨如轨迹上,分析重建的误差率。

为了验证悬臂梁可以进行多帧速率、多分辨率的扫描,在电光调制器不工作的情况下,向显示单元施加驱动电压信号,波形为幅值相同,频率不同的两种正弦波的叠加。依次将频率组合设置为 2 088 Hz 和 1 398 Hz,2 090 Hz 和 1 400 Hz,2 075 Hz 和 1 400 Hz,2 088 Hz 和 1 404 Hz,2 080 Hz 和 1 404 Hz,2 090 Hz 和 1 425 Hz,相机的曝光时间依次设置为 167, 100, 40, 28, 19, 11 ms。

为了验证系统的显示效果,将悬臂梁驱动电压信号的组合频率设定为 2 090 Hz 和 1 400 Hz,幅值为 5 V,选取多幅分辨率为 160×120 pixel 的典型图像分别重建生成像素调制信号,相机的曝

光时间设置为100 ms,记录系统的图像显示结果。

4 结果及分析

非对称光纤悬臂梁的幅频响应实验测量结果如图6(a)所示。图6(b)给出了实验测量的非对称悬臂梁两个正交方向上的电压-振幅响应曲线。可以看出,该悬臂梁的正交谐振频率对约为1 440 Hz和2 090 Hz,频率差约为690 Hz。高频响应曲线和低频响应曲线的非线性度分别为

2.76%和3.57%,说明光纤自由端振动的振幅和驱动电压之间呈现良好的线性关系。

图7是基于李萨如扫描轨迹的图像重建Matlab仿真结果。模拟的正交频率对为2 090 Hz和1 400 Hz。图7(a)为原始灰度图像,由灰度值渐变的“NUAA”4个字母组成,分辨率为 120×160 pixel。图7(b)为图像重建结果,通过统计分析,该图像仅存在4个错误点,集中在横坐标 $x=80$ 处。图7(c)为错误点所在区域的放大图,其中4个高灰度值的点即为重建错误点。

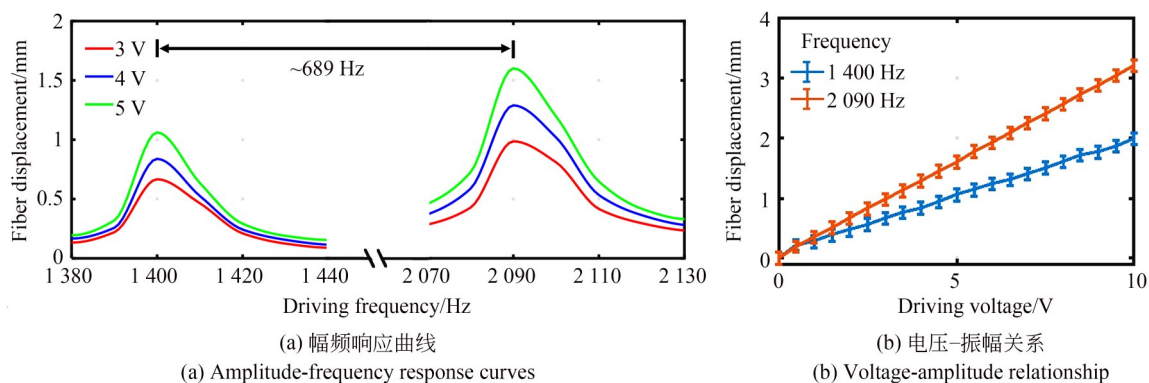


图6 非对称光纤悬臂梁的特性测量

Fig. 6 Characteristic measurement of asymmetric fiber cantilever

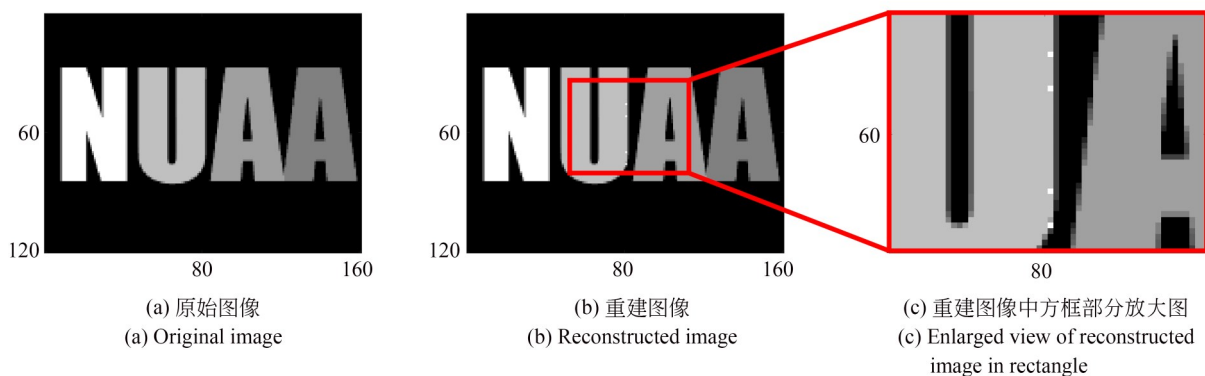


图7 模拟的图像重建结果

Fig. 7 Simulation experiment result of image reconstruction

从结果可以看出,在2 090 Hz和1 400 Hz的频率下,重建误差率等于0.002%,该误差率符合表1给出的99%的填充率。4个重建的错误点对称分布在李萨如轨迹的中央,这与李萨如轨迹的特性有关:轨迹在合适的频率下呈现对称性,中央的轨迹分布相对周边轨迹稍稀疏。这种特性决定当图像重建填充率不满足100%时,错误

点会首先出现在扫描区域中央附近。

图8为光源在不经调制时,相机拍摄到的帧速率不同的李萨如扫描轨迹。其中,图8(b)为5 V驱动电压下,悬臂梁以谐振频率(2 090 Hz和1 400 Hz)振动的结果,振动范围为 $1.254 \text{ mm} \times 0.942 \text{ mm}$ 。考虑到偏离谐振频率时光纤自由端振幅会有所减弱,实验过程中,非谐振频率组驱动

从结果可以看出,系统显示的图像亮度均匀,对比度高,且不存在变形的现象。灰度值反转后,图像信息显示在白色背景板上,更符合人们的阅读习惯,因此视觉感受更好。

5 结 论

本文设计了基于非对称光纤悬臂梁的李萨如轨迹扫描显示系统,介绍了一种近眼显示应用下李萨如轨迹像素划分标准,以及如何在轨

迹上进行图像重建。根据轨迹的性质确定非对称光纤悬臂梁的结构参数,制作了帧速率和像素数可变的显示单元。圆柱形显示单元的直径2 mm,长度19 mm,和常规的眼镜腿的尺寸相当。基于该单元搭建了近眼扫描显示系统,实现的最高分辨率为 290×220 pixel,最高帧速率为95 Hz。对分辨率为 160×120 pixel的图像重建误差率为0.002%,显示帧速率为10 Hz,实现了多幅典型图像的高质量显示,证明了非对称光纤悬臂梁在商业化眼镜式HWD的应用潜力。

参考文献:

- [1] KHAYATZADEH R, CIVITCI F, FERHANOG-
LU O, *et al.* Scanning fiber microdisplay: design,
implementation, and comparison to MEMS mirror-
based scanning displays[J]. *Optics Express*, 2018,
26(5): 5576-5590.
- [2] CHEN J, CRANTON W, FIHN M. *Handbook of
Visual Display Technology* [M]. 2nd ed. Cham:
Springer, 2016.
- [3] XIONG J H, HSIANG E L, HE Z Q, *et al.* Aug-
mented reality and virtual reality displays: emerging
technologies and future perspectives[J]. *Light, Sci-
ence & Applications*, 2021, 10(1): 216.
- [4] 张旭,王梓,屠科锋,等. 视网膜投影显示技术研
究进展[J]. 液晶与显示, 2022, 37(5): 639-646.
ZHANG X, WANG Z, TU K F, *et al.* Research
progress of retinal projection displays [J]. *Chinese
Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2022, 37
(5): 639-646. (in Chinese)
- [5] TUMA T, LYGEROS J, KARTIK V, *et al.* High-
speed multiresolution scanning probe microscop-
y based on Lissajous scan trajectories[J]. *Nano-
technology*, 2012, 23(18): 185501.
- [6] YALCINKAYA A D, UREY H, BROWN D, *et al.* Two-axis electromagnetic microscanner for high
resolution displays [J]. *Journal of Microelectrome-
chanical Systems*, 2006, 15(4): 786-794.
- [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 CH, *et al.* Design of
MEMS laser scanning retinal projection display sys-
tem [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37 (12) :
1222001. (in Chinese)
- [8] SEIBEL E J, FRANK S S, FAUVER M, *et al.* P-
37: optical fiber scanning as a microdisplay source
for a wearable low vision aid [J]. *SID Symposium
Digest of Technical Papers*, 2002, 33(1): 338-341.
- [9] SCHOWENGERDT B T, HOFFMAN H G,
LEE C M, *et al.* 57.1: near-to-eye display using
scanning fiber display engine [J]. *SID Symposium
Digest of Technical Papers*, 2010, 41(1): 848-851.
- [10] MATSUDA T, ONOE S, SEO Y, *et al.* Dis-
play unit using laser scanning device[J]. *Journal of
the Society for Information Display*, 2018, 26
(11): 631-640.
- [11] HWANG K, SEO Y H, AHN J, *et al.* Frequen-
cy selection rule for high definition and high frame
rate Lissajous scanning [J]. *Scientific Reports*,
2017, 7(1): 14075.
- [12] WANG J Y, ZHANG G F, YOU Z. Design rules
for dense and rapid Lissajous scanning[J]. *Micro-
systems & Nanoengineering*, 2020, 6: 101.
- [13] SEO Y H, HWANG K, KIM H, *et al.* Scanning
MEMS mirror for high definition and high frame
rate lissajous patterns [J]. *Micromachines*, 2019,
10(1): 67.
- [14] WU T, DING Z H, WANG K, *et al.* Two-di-
mensional scanning realized by an asymmetry fiber
cantilever driven by single piezo bender actuator for
optical coherence tomography[J]. *Optics Express*,
2009, 17(16): 13819-13829.
- [15] PARK H C, SEO Y H, JEONG K H. Lissajous
fiber scanning for forward viewing optical endomi-
scopy using asymmetric stiffness modulation
[J]. *Optics Express*, 2014, 22(5): 5818-5825.
- [16] KHAYATZADEH R, FERHANOGU O, CIVIT-

CI F. Unwarped lissajous scanning with polarization maintaining fibers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(19): 1623-1626.

[17] WU T, CHEN Z H, LIU Y W, *et al.* Frequency

selection rule for the HDHF Lissajous scanning imaging with a low-voltage one axis actuated PZT scanner based on an asymmetric fiber cantilever [J]. *Optics Express*, 2024, 32(2): 2774-2785.

作者简介:



吴 彤(1984—),男,博士,副教授,硕士生导师,2006年于天津大学获得学士学位,2011年于浙江大学获得博士学位,主要从事光学成像与测量技术等方面的研究。E-mail: wutong@nu-aa.edu.cn

通讯作者:



刘友文(1966—),男,博士,教授,博士生导师,1986年于扬州师范学院获得学士学位,1993年于华中理工大学获得硕士学位,2001年于中国科学院上海光学精密机械研究所获得博士学位,主要从事计算光学成像、非线性光子学技术的研究。E-mail: ywliu@nu-aa.edu.cn