

文章编号:1674-8190(2013)04-469-05

基于二维微扫描镜的平视显示系统研究

乔大勇, 吴蒙, 李昭

(西北工业大学 空天微纳系统教育部重点实验室, 西安 710072)

摘要: 平视显示系统是一种目前普遍运用于航空器上的飞行辅助器, 它能使飞行员不用低头就可以看到仪表上的重要信息。针对传统平视显示系统体积大、生产成本高等不足, 提出一种基于二维微扫描镜的平视显示系统。通过对二维微扫描镜的振动频率与平视显示图像的稳定性、分辨率、刷新率之间关系的分析研究, 初步实现基于二维微扫描镜的平视显示系统的搭建, 并成功完成一个常见标志的成像, 证明基于二维微扫描镜的平视显示系统的可行性。

关键词: 二维微扫描镜; 平视显示系统; 频率选择; 李萨如图形

中图分类号: V243.6

文献标识码: A

HUD System Based on 2D Micro Scanning Mirror

Qiao Dayong, Wu Meng, Li Zhao

(Key Laboratory of Micro/Nano Systems for Aerospace of the Ministry of Education, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Head-up Display(HUD) is a flight support device which has been widely used in aircraft. Important information on the instruments could be observed by pilots without lower their heads. A 2D micro scanning mirror-based HUD is presented in this paper due to the shortcomings of conventional HUD such as great volume and high cost. Through analyzing the relationship among oscillation frequencies of 2D micro scanning mirror, resolution, refresh rate and stability of HUD pattern, a prototype of HUD has been built successfully to project a common symbol. The projected image proves the feasibility of 2D scanning mirror-based HUD.

Key words: 2D micro scanning mirror; HUD; frequency selective; Lissajous figure

0 引言

平视显示器(Head Up Display, 简称 HUD)是目前普遍运用于航空器上的飞行辅助仪器。HUD利用光学反射原理, 将重要的飞行相关资讯投射在一片玻璃上面。这片玻璃位于座舱前端, 高度大致

与飞行员的眼睛成水平, 飞行员透过 HUD 往前方看的时候, 能够轻易地将外界景象与 HUD 显示资料融合在一起, 如图 1 所示。



图1 航空器上的 HUD

Fig. 1 HUD on aircraft

收稿日期:2013-03-09; 修回日期:2013-05-02

基金项目:教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-10-0075)

国家自然科学基金(50805123)

深圳市财政委员会 2012 年第四批市新一代信息技术

产业发展专项资金基础研究计划

(JCYJ20120614154203639)

西北工业大学基础研究基金(JCY20130119)

通信作者:吴蒙, mems_wumeng@163.com

HUD 设计的意图是让飞行员不需要低头查

看仪表的显示资料,始终保持平视姿态,避免低头与抬头之间忽略外界环境的快速变化以及眼睛焦距不断调整产生的延迟与不适^[1]。过去飞行员在空战中,需要交替观察舱外目标和舱内仪表,易产生瞬间视觉中断^[2],导致反应迟缓,操作失误,并有可能因此而贻误战机,采用平视显示器则能很好地改善这一情况^[3]。

第一架使用 HUD 的飞机是美国海军的 A-5 舰载机。1975 年,法国 Dassault 飞机公司在 Mercure 飞机上率先使用了 HUD,开启了 HUD 在民用航空领域使用的先河。自 20 世纪 70 年代中期以来,HUD 的使用开始普遍化,以美国为代表,其他一些国家也陆续开始购买或研发相关系统。随之而来的问题是:HUD 需要占用驾驶舱前方的空间,该空间与座舱罩的设计有很大关联,而对于传统的 HUD 来说,由于其体积较大^[4],往往无法顺利地安装在需要的位置上,这进一步增加了 HUD 的生产设计成本。

本文结合微机电系统(Micro Electro Mechanical System,简称 MEMS)技术,设计一种基于二维微扫描镜的平视显示系统,通过对二维微扫描镜的振动频率与平视显示图像的稳定性、分辨率、刷新率之间关系的研究,初步实现一种微小型平视显示系统的搭建。

1 二维微扫描镜与显示原理

西北工业大学空天微纳系统教育部重点实验室已成功研制出了 MEMS 二维微扫描镜^[5],其结构如图 2 所示。

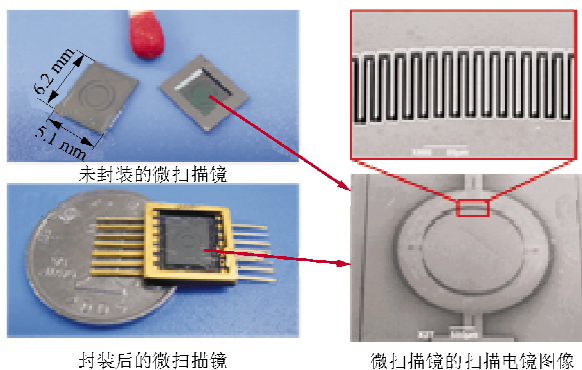


图 2 MEMS 二维微扫描镜

Fig. 2 MEMS 2D micro scanning mirror

该二维微扫描镜是由垂直梳齿所产生的静电力驱动的。在 10 V 的方波信号驱动下,微扫描镜在两个轴上的谐振频率分别可达 1 870 Hz 和 375 Hz,扫描镜的机械扫描角可达到 $\pm 8^\circ$ 。

本文以此器件为基础,搭建基于二维微扫描镜的平视显示系统^[6],其结构如图 3 所示。

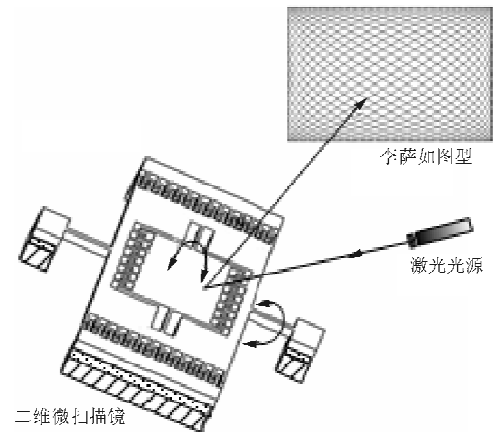


图 3 激光扫描投影系统结构示意图

Fig. 3 Structure diagram of laser scanning projection system

激光光源发出的一束激光经二维微扫描镜面反射,在一片投影区域内进行扫描,扫描出的图形即李萨如(Lissajous)图形。激光光斑在扫描区域内任意时间的位置可由公式(1)描述^[7]

$$\begin{cases} x(t) \approx A_x \sin(2\pi f_x t - \psi_1) \\ y(t) \approx A_y \sin(2\pi f_y t - \psi_2) \end{cases} \quad (1)$$

式中: f_x 、 f_y 分别为扫描镜在 x 轴和 y 轴上的振动频率; A_x 、 A_y 为振动幅值; ψ_1 、 ψ_2 为扫描镜的初始相位。

李萨如图形的形状由三个因素决定:① f_x : f_y ; ② A_x : A_y ; ③ $\psi_1 - \psi_2$ ^[8]。当两轴的振动频率满足一定要求时,李萨如图形就可以变得非常致密,使得激光束可以扫过投影区域内的每一个点^[9],如图 4 所示。

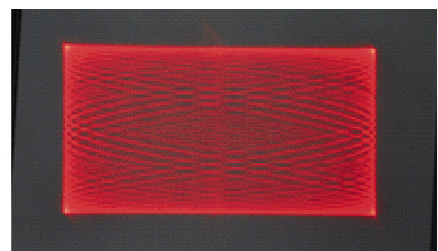


图 4 致密李萨如图形

Fig. 4 Dense Lissajous figure

当投影所需图像时,只需提取其像素的坐标信息与灰度信息,并转化为激光器的调制时间与工作电流的强度,控制激光光束在扫描区域内任意一点上的工作状态,便可以显示出所需的图形,这便是基于二维微扫描镜的平视显示系统的原理。

2 频率选择

2.1 图像稳定性与频率的关系

由基于二维微扫描镜的平视显示系统的原理可知,通过建立稳定的激光响应时间与激光光斑位置坐标的映射关系,就可以得到所需的图像。所以,一个稳定的李萨如图形,即一个形状不会随着时间推移而改变的李萨如图形,对于整个平视显示系统来说是必不可少的。

为了方便讨论,假设二维扫描镜的初始相位为0,李萨如图形关于原点对称。以李萨如图形在 y 轴上的交点为讨论对象,即 $x(t)=0$,则可以得到 $\sin(2\pi f_x \cdot t)=0$,易得 $t=n/2f_x$,其中 $n=1,2,3,\dots$,表示李萨如图形与 y 轴的交点数。这些交点的 y 轴坐标可以表示为

$$\begin{aligned} y(t) &= A_y \sin(2\pi f_y \cdot n/2f_x) \\ &= A_y \sin(\pi \cdot n f_y / f_x) \end{aligned} \quad (2)$$

若图像是稳定的,则李萨如图形与 y 轴的交点个数有限,即随着时间的推移, $y(t)$ 的值呈周期性变化。以原点 $y(0)=0$ 为例,如果存在一个最小非零正整数 p ,使得 $y(p)=0$,就说明该李萨如图形是稳定的,并且图形与 y 轴的交点数等于该非零正整数 p 。结合上式,可以推得 $p \cdot f_y / f_x$ 必须是整数。当 f_y / f_x 可以化为两个整数之比时, $p \cdot f_y / f_x$ 为整数,李萨如图形稳定。令 f_{GCD} 为 f_x 与 f_y 的最大公约数,即 $f_x = f'_x \cdot f_{\text{GCD}}$, $f_y = f'_y \cdot f_{\text{GCD}}$,那么 $p \cdot f_y / f_x$ 可以表示为

$$p \cdot f_y / f_x = p \frac{f'_y}{f'_x \cdot f_{\text{GCD}}} \quad (3)$$

由公式(3)可以得出,最小非零正整数 p 的值为 $f'_x = f_x / f_{\text{GCD}}$ 。说明 f_x 与 f_y 的最大公约数 f_{GCD} 在激光扫描投影系统中是一个十分重要的参数。

如果 f_y / f_x 不能化为两个整数之比的形式,此时李萨如图形便是不稳定的,如图5所示。

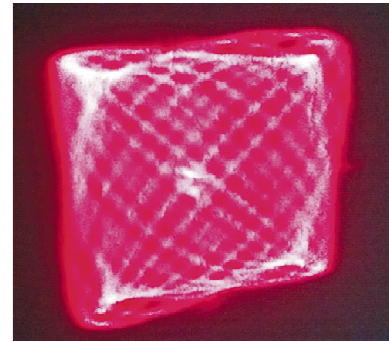


图5 不稳定李萨如图形

Fig. 5 Unstable Lissajous figure

从图5可以看出,不稳定的李萨如图形是不封闭的图形,整个图形的形状会随着时间的推移而改变,无法建立时间与坐标点稳定的映射关系,也就无法利用其进行图像的投影显示。

2.2 刷新率与频率的关系

李萨如图形的扫描轨迹是由两个垂直方向上的简谐振动合成来决定的,所以不能用传统投影显示系统的概念来定义激光扫描投影系统的刷新率与分辨率。同时,李萨如图形的刷新率、分辨率与二维微扫描镜的振动频率有着密不可分的关系。

设二维微扫描镜在两个轴上的振动周期分别为 T_x 和 T_y ,则

$$T_x = \frac{1}{f_x}, T_y = \frac{1}{f_y} \quad (4)$$

整个系统的刷新率为 T_x 和 T_y 的最小公倍数,定义为 T_r 。则激光光束经由二维微扫描镜反射,扫描出一幅完整的李萨如图形所需的时间为

$$T_r = \frac{1}{f_x \text{ 与 } f_y \text{ 的最大公约数}} = \frac{1}{f_{\text{GCD}}} \quad (5)$$

对于人眼来说,为了使观察到的投影图像没有闪烁迟滞感,激光扫描投影系统的刷新率应大于等于24帧/秒,即在一般情况下 $f_{\text{GCD}} \geq 24$ Hz,这也是对二维微扫描镜振动频率选择的一个重要参考。

2.3 分辨率与频率的关系

利用一张典型的李萨如图形(如图6所示)来说明李萨如投影系统的分辨率与二维微扫描镜在两个轴上振动频率的关系。

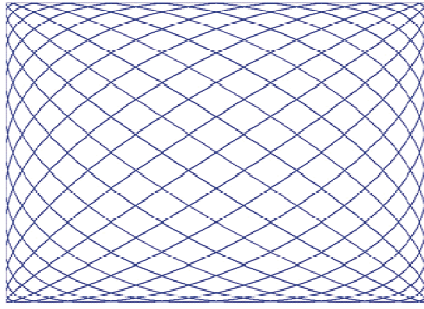


图6 典型李萨如图形

Fig. 6 Typical Lissajous figure

从图6可以看出,整个李萨如图形呈现中间疏周围密的特点。于是,只要在李萨如图形的中心附近规定一个区域,使得至少有一条线穿过这个区域,即代表这个区域可以被激光调制,那么这个区域就是整个激光扫描区域的最小像素点,激光扫描成像系统的最大分辨率就可以通过这个最小像素点的大小求得。图6中心局部放大图如图7所示,由此确定最小像素点的大小。

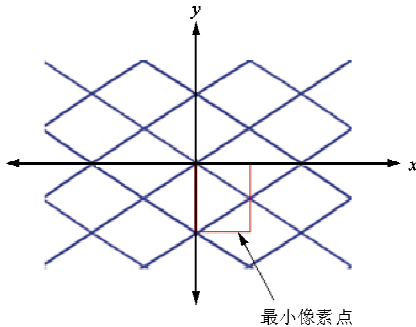


图7 李萨如图形中心局部放大图

Fig. 7 Local enlarged drawing for center part of Lissajous figure

因为李萨如图形中间区域的网格是最大的,所以在y轴方向,取原点与相邻的一个交点的距离为最小像素点的长。在这种情况下,最小像素点宽的长度无论如何取,都总会有一条扫描线经过这个区域。为了使整个投影图像的长宽符合比例,应使最小像素点的长宽相同,即最小像素点为一正方形区域。整个系统的分辨率便可以根据最小像素点的大小求出。上文已给出李萨如图形与y轴交点的坐标(公式(2)),由于稳定李萨如图形与y轴的交点是呈周期性变化的,假设n的值域为 $[0, f_x/f_{GCD}]$,则最小像素点的长宽 d_{pixel} 可以表示为

$$\begin{aligned} d_{\text{pixel}} &= \min[A_y \sin(\pi \cdot n f_y / f_x)] \\ &= A_y \sin(\pi \cdot f_{GCD} / f_x) \end{aligned} \quad (6)$$

整个平视显示投影系统y轴的最大分辨率 R_y 可以表示为

$$\begin{aligned} R_y &= 2 \text{int}(A_y / d_{\text{pixel}}) \\ &= 2 \text{int}[1 / \sin(\pi \cdot f_{GCD} / f_x)] \end{aligned} \quad (7)$$

由于最小像素点为正方形,则x轴与y轴的最小像素点个数之比即为两轴振幅之比,即

$$R_x / R_y = A_x / A_y \quad (8)$$

2.4 二维微扫描镜的振动频率选择

在实际应用中,通常需要根据要求的刷新率、分辨率对二维微扫描镜进行设计,确定振动频率的范围。

由公式(3)~公式(8)可以看出,y轴上的分辨率是由 f_x 与 f_{GCD} 决定的,x轴上的分辨率是由 f_x 、 f_{GCD} 、 A_x 和 A_y 决定的,所以对于分辨率为 $R'_x \times R'_y$,刷新率为 T'_r 的投影要求来说,x轴的振动频率 f_x 必须满足

$$f_x \geq \frac{\pi f_{GCD}}{\arcsin(2/R'_y)} \quad (9)$$

y轴的振动频率 f_y 必须满足

$$T'_r = \frac{1}{f_x \text{ 与 } f_y \text{ 的最大公约数}} = \frac{1}{f_{GCD}} \quad (10)$$

为了使图像稳定, f_y/f_x 必须能化简为两个整数之比的形式。这就是选择二维微扫描镜振动频率的三个主要约束条件。

3 实验与结果

利用二维微扫描镜来进行平视显示实验。根据上述理论,计算后得到的最佳频率组合为 $f_x = 1880 \text{ Hz}$, $f_y = 380 \text{ Hz}$ 。此频率组合下的投影系统分辨率为 168×56 ,刷新率为 20 Hz 。基于二维微扫描镜的平视显示系统的原机如图8所示,其光学投影模块的内部结构如图9所示。

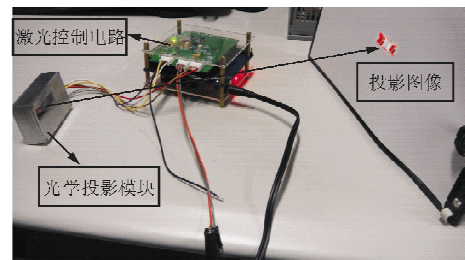


图8 基于二维微扫描镜的平视显示系统投影原机
Fig. 8 Prototype of HUD projection based on 2D micro scanning mirror

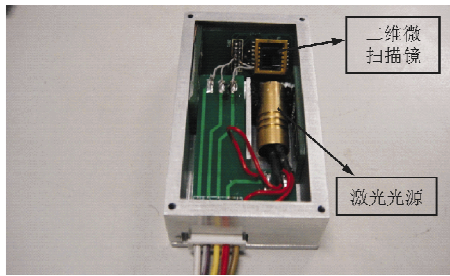
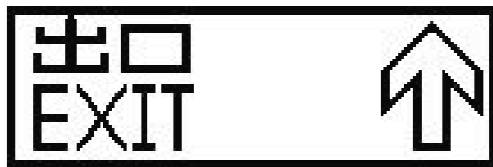


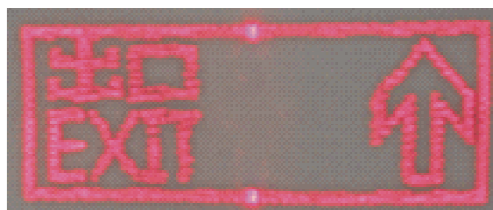
图9 光学投影模块

Fig.9 Laser projection module

以一个常见的出口标志为例,利用坐标提取软件提取其坐标信息,然后将提取到的坐标信息转换为激光响应时间,图像与实际投影效果的对比如图10所示。



(a) 出口标志原图像



(b) 实际投影图像

图10 原图像与实际投影效果对比

Fig.10 Comparison between actual effect of projection and original image

从图10可以看出,频率选择的条件以及基于二维微扫描镜的平视显示系统的理论是切实可行的。

4 结论

(1) 通过对二维微扫描镜的振动频率与平视显示图像的稳定性、分辨率、刷新率之间关系的分析研究,提出了微扫描镜振动频率选择的三个约束条件。

(2) 利用现有的二维微扫描镜,搭建了分辨率为 168×56 ,刷新率为20 Hz的基于二维微扫描镜的平视显示系统,并成功实现了“出口”文字及图形指示标志的投影,证明了频率选择条件的准确性和

基于二维微扫描镜的平视显示系统的可行性。

参考文献

- [1] 李春亮. 对平视显示器光学系统的分析[J]. 应用光学, 1983(1): 35-41.
Li Chunliang. Analysis of head-up display optical system [J]. Journal of Applied Optics, 1983(1): 35-41. (in Chinese)
- [2] Andersen G J, Kramer A F. Limits of focused attention in three-dimensional space[J]. Perception & Psychophysics, 1993, 53(6): 658-667.
- [3] S. Richaradson, 赵静冈. 航天飞机的宇航员光学瞄准器[J]. 国外导弹与航天运载技术, 1990(5): 33-39.
Richaradson S, Zhao Jinggang. Crewmen optical alignment sight of space shuttle[J]. Missiles and Space Vehicles, 1990 (5): 33-39. (in Chinese)
- [4] Patricia May Ververs, Christopher D Wickens. Head-up displays: effect of clutter, display intensity, and display location on pilot performance[J]. The International Journal of Aviation Psychology, 1998, 8(4): 377-402.
- [5] 王松杰. 二维 MEMS 扭转镜设计及制作工艺[D]. 西安: 西北工业大学机电学院, 2012.
Wang Songjie. Design and fabrication of 2D MEMS scanning mirrors[D]. Xi'an: School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, 2012. (in Chinese)
- [6] 李昭, 苑伟政, 吴蒙, 等. 基于微扫描镜的激光投影[J]. 光子学报, 2011, 40(11): 1625-1629.
Li Zhao, Yuan Weizheng, Wu Meng, et al. Micro scanning mirrors with laser diode for pattern generation[J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(11): 1625-1629. (in Chinese)
- [7] Scholles M. Miniaturized optical module for projection of arbitrary images based on two-dimensional resonant micro scanning mirrors[J]. The International Society for Optical Engineering, 2005, 5873: 72-83.
- [8] Roscher K U. Low-cost projection device with a 2D resonant micro scanning mirror[J]. MOEMS Display and Imaging Systems, 2004, 5348: 22-31.
- [9] Hakan Urey, David W Wine, Thor D Osborn. Optical performance requirements for MEMS-scanner-based microdisplays[J]. MOEMS and Miniaturized Systems, 2000, 4178: 176-185.

作者简介:

乔大勇(1977—),男,博士,教授。主要研究方向:微机电系统集成设计技术、微/纳制造技术、微型光学器件和微型能源器件。

吴蒙(1987—),男,硕士研究生。主要研究方向:微型光学器件。

李昭(1987—),男,硕士研究生。主要研究方向:微型光学器件。

(编辑:马文静)