

微型光机电二维扫描镜的 Lissajous 与 Linescan 扫描对比

李靖坤¹, 周拥军², 武静¹

(1. 中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471000;

2. 中国航空研究院北京光电创新中心, 北京 100000)

摘要: 在激光扫描显示系统(LSDs)中,MOEMS对激光束的空间调制主要分为 Lissajous 与 Linescan 两种模式。为了深入分析各模式的扫描特点,比较各模式之间的优缺,针对每种模式提出了扫描显示分辨率和轨迹均匀性这两个指标进行对比研究。按照仿真分析得出的最小像元划分方法,相同分辨率下,Lissajous 模式对 MOEMS 快轴频率的最低要求要比 Linescan 模式大约高 57%。另外,利用 Matlab 对不同 MOEMS 模式进行同一图像的扫描仿真,仿真结果表明,Lissajous 扫描轨迹呈现出上下边缘密、中心疏的不均匀特点,而 Linescan 扫描轨迹则呈现出喇叭状不均匀特点。

关键词: 激光扫描显示系统; 扫描模式; Lissajous; Linescan; MOEMS

中图分类号: TN27 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)01-0101-04

Comparison Between Lissajous and Linescan Based on 2D Micro-Opto-Electro-Mechanical Mirror

LI Qing-kun¹, ZHOU Yong-jun², WU Jing¹

(1. Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471000, China;

2. Institute of Optical-Electro Innovation Center, CAE, Beijing 100000, China)

Abstract: In laser scanning display systems (LSDs), the Micro-Opto-Electro-Mechanical System (MOEMS) has mainly two patterns for laser beam spatial modulation, Lissajous and Linescan. In order to analyze the characteristics of each model, and the advantages and disadvantages of different patterns, we made comparative study on two indicators of display resolution and track uniformity. According to the least pixel division method simulated, the minimum MOEMS fast axis frequency requirements of Lissajous pattern is about 57% higher than that of Linescan pattern. Simulation was made to the same picture under different pattern based on Matlab. The result indicates that the Lissajous scanning track presents an uneven characteristic of dense upper and lower edges and sparse center, whereas the Linescan scanning track presents a trumpet-shaped uneven characteristic.

Key words: laser scanning display system; scanning pattern; Lissajous; Linescan; MOEMS

0 引言

微型光机电系统(Micro-Opto-Electro-Mechanical system, MOEMS)结合了微光学、微电子及微机械技术,主要用于完成光束的汇聚、反射等。基于 MOEMS 的激光扫描显示技术是现代显示面向高亮度、高对比度和宽色域方向发展的重要技术之一,可应用于飞机、汽车的平视显示系统中,也可应用于微型智能穿戴设备

中(如智能眼镜)。一般来说,二维 MOEMS 的运动形式有两种——双轴正弦谐振式和 X 轴正弦 Y 轴锯齿式,分别简称 Lissajous 和 Linescan 模式,它们导致的成像轨迹差异很大。目前,国内外关于 MOEMS 扫描模式已有一些研究,其中,文献[1-2]只阐述了 MOEMS 的原理、物理结构以及不断进步的制作工艺;文献[3]对 Lissajous 扫描模式的 MOEMS 振动特性做了研究,得出扫描频率、扫描角度(幅度)和驱动电压之间的普遍关系;文献[4]对 Linescan 模式的畸变做了研究。目前的研究尚未充分考虑到像元划分方法对扫描显示的影响,缺少不同扫描模式之间的对比研究。

收稿日期:2014-06-11

修回日期:2014-10-07

作者简介:李靖坤(1989—),男,河南洛阳人,硕士生,研究方向为激光扫描显示技术。

1 MOEMS 运动轨迹

图1是 Fraunhofer 研究机构研制的一款 MOEMS 实物图。

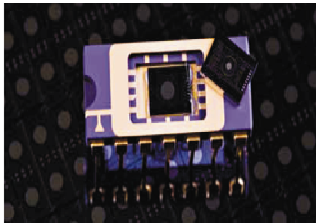


图1 Fraunhofer 研制的 MOEMS

Fig.1 A kind of MOEMS developed by Fraunhofer

1.1 Lissajous 模式

两个相互垂直的简谐振动的正弦方程式描述为

$$\begin{cases} Liss X(t) = X_{max} \sin(2\pi f_x t + \varphi_x) \\ Liss Y(t) = Y_{max} \sin(2\pi f_y t + \varphi_y) \end{cases} \quad (1)$$

合运动服从上述方程的 MOEMS 称为 Lissajous 模式 MOEMS^[5], 其轨迹形状由 $X_{max}, Y_{max}, f_x, f_y$ 和初相位 φ_x, φ_y 共同决定。设 $gcd(f_x, f_y)$ 是 f_x 与 f_y 的最大公约数, $N_x = f_x / gcd(f_x, f_y), N_y = f_y / gcd(f_x, f_y)$, 那么式(1)有如下特性。

1) 当且仅当初相位差满足

$$\phi = \frac{f_x \varphi_y - f_y \varphi_x}{gcd(f_x, f_y)} \neq \begin{cases} (2K+1)\pi/2 & N_x, N_y \text{ 奇偶相反} \\ K\pi & N_x, N_y \text{ 同为奇数, } K \text{ 为整数} \end{cases} \text{ 时,}$$

Lissajous 扫描轨迹才是完整闭合的。

2) 轨迹周期是 $gcd(f_x, f_y)$, 即 Lissajous 模式的轨迹刷新频率等于 f_x 与 f_y 的最大公约数。

上述特性与激光束的扫描轨迹形状紧密相关, 是 MOEMS 图像扫描显示时频率及初相位参数选择的基本约束条件之一。

Lissajous 模式的典型轨迹如图2所示。在图中所示 X-Y 二维平面上, Lissajous 扫描轨迹在 X, Y 方向的扫描幅度 A_x, A_y 均已归一化。

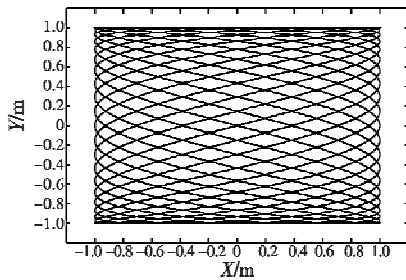


图2 典型 Lissajous 轨迹

Fig.2 Typical Lissajous trajectory

1.2 Linescan 模式

一个方向做简谐振动, 另一垂直方向做锯齿波运动的方程式描述为^[6]

$$\begin{cases} Lin X(t) = X_{max} \sin(2\pi f_x(t - \varphi_x)) \\ Lin Y(t) = Y_{max} \frac{-2(\phi - 2C\pi)}{\pi} + Y_{max} \\ 0 \leq \phi - 2C\pi \leq \pi, C = 0, 1, 2, \dots \\ Lin Y(t) = Y_{max} \frac{2(\phi - 2C\pi - \pi)}{\pi} - Y_{max} \\ \pi \leq \phi - 2C\pi \leq 2\pi, C = 0, 1, 2, \dots \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\phi = 2\pi f_y t$ 。合运动服从上述方程的 MOEMS 称为 Linescan 模式 MOEMS, 其轨迹形状由 X_{max}, Y_{max}, f_x 和 f_y 决定。式(2)有如下基本特性。

1) Linescan 轨迹的重复频率为 f_y , 如果只选择锯齿波的正程用作扫描显示, 那么 Linescan 扫描模式下的刷新频率为 $f_y/2$ 。

2) 行轨迹线的对数由频率比决定, 为 f_x/f_y 。

与 Lissajous 模式类似, 上述特性也是 Linescan 模式 MOEMS 参数选择的基本约束条件之一。其中, 足够的行轨迹线对数 f_x/f_y 是 Linescan 模式 MOEMS 图像扫描显示的前提。

Linescan 模式的典型轨迹如图3所示。在图中所示的 X-Y 二维平面上, Linescan 扫描轨迹在 X, Y 方向的扫描幅度 A_x, A_y 均已归一化。

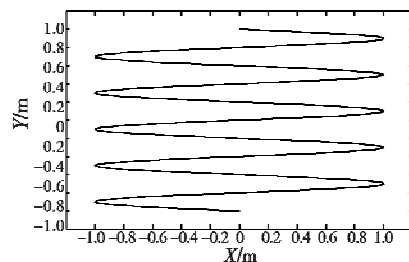


图3 典型 Linescan 轨迹

Fig.3 Typical Linescan trajectory

比较图2与图3可以看出, 不同扫描模式的 MOEMS 运动轨迹具有很大差异性。Lissajous 轨迹呈现出网格状, 而 Linescan 轨迹类似 CRT 扫描方式, 从左至右, 从上到下, 一行一行地完成图像扫描显示。为了实现这两种扫描模式性能的对比研究, 本文提出扫描显示分辨率与扫描轨迹均匀性这两个指标作为参考指标, 并评价这两种模式的优缺点。

2 扫描显示分辨率

基于 MOEMS 的激光扫描显示系统分辨率受激光扫描的轨迹密度影响, 轨迹密度越大, 显示系统分辨率的提升空间也就越大。上文给出的典型轨迹图来自 MOEMS 低频率扫描的情况, 当 MOEMS 扫描频率很高时, 轨迹线间隔变小, 轨迹密度变得很大, 因此, 合理的像元划分方法有助于提升系统分辨率。

此像元划分方法是指对 MOEMS 反射后的整个轨

迹按照一定规律进行划分,这样就能计算出激光束经过每个划分块上激光器的调制时序及调制强度,从而达到一幅图像完整显示的目的。保证所有的像元单位均能被扫描轨迹遍历是像元划分合理性的基本前提,因此,选择合理的像元划分基准点,并在此基准点上,按照一定长宽的基准像元对整个扫描轨迹进行划分很重要。从图 2 可以看出,Lissajous 轨迹的中心网格较边缘网格大,因此基准点和基准像元的选取应当在轨迹中心,这样才能保证所有像元单位均被扫描轨迹遍历。图 4 为对不同像元划分方法的对比仿真。

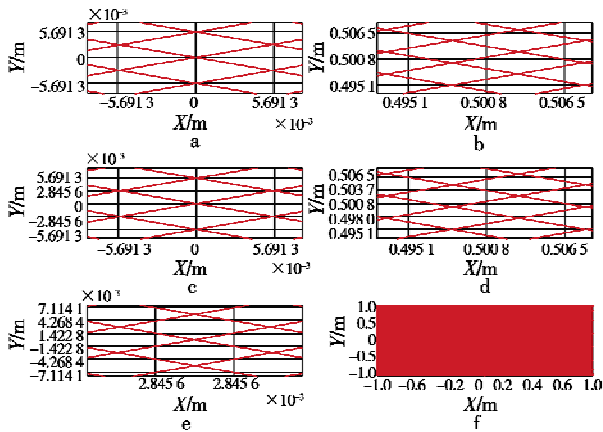


图 4 Lissajous 模式像元划分方法

Fig.4 Different method of Lissajous pattern for pixel division

图 4 的 MOEMS 扫描轨迹幅度均已归一化,红色线条代表激光束扫描轨迹,黑色线条代表每个像元区域。其中,图 4a、图 4c、图 4e 分别代表 3 种不同的像元划分方法,截取的是每种划分方法中心部分的扫描轨迹。图 4a 中像元为正方形,即像元长宽相等,像元基准点坐标为(0,0);图 4b 中像元为长方形,像元长等于两倍宽,且基准点坐标为(0,0);图 4e 与图 4a 方法类似,但基准点的坐标不在(0,0)处,而是分别偏离像元长宽的四分之一和二分之一。图 4b、图 4d 截取的分别是对应方法图 4a、图 4c 二分之一扫描幅度处的部分轨迹示意图;图 4f 是整个扫描轨迹的缩略图。从仿真结果可以看出,图 4a、图 4c、图 4e 所示每个像元中的激光束轨迹形状分别是“>”(或“<”),“/”(或“\”),“X”。另外,图 4a、图 4c 中的扫描轨迹均匀遍历了每个中心像素点,而图 4e 中存在空白像素点,即不是每个中心像素点都能被激光束遍历,所以,图 4e 的像元划分方法不合理;对比图 4b、图 4d 可以发现,图 4c 的像元划分方法虽然在中心能遍历每个像素点,但在轨迹边缘部分会存在空白像素点。因此,图 4a 的像元划分方法最合理。

图 4a 的划分方法^[7]是以扫描轨迹与纵轴的最小正交点作为基准像元的长宽,令 $Liss X(t) = 0$,假设初相位 φ_y 为零,从而 $Liss Y(t) = Y_{max} \sin(2\pi f_y t) = Y_{max} \sin(2\pi f_y \cdot$

$n/2f_x) = Y_{max} \sin(\pi \cdot n f_y / f_x)$,得出

$$\min(Liss Y) = Y_{max} \sin(\pi \cdot f_{gcd} / f_x) \quad (3)$$

即可求得目标像素数 R_y 与最低扫描频率 f_x 的关系,即

$$f_x \geq \frac{\pi f_{gcd}}{\arcsin(2/R_y)} \approx \frac{\pi}{2} \cdot f_{rate} \cdot R_y \quad (4)$$

根据图 4a 中的像元划分方法,得出 Lissajous 扫描模式快轴最小频率 f_x 的计算式(4),从而可以计算出不同显示分辨率下的 Lissajous 模式 MOEMS 的快轴频率最低要求,如表 1 所示。

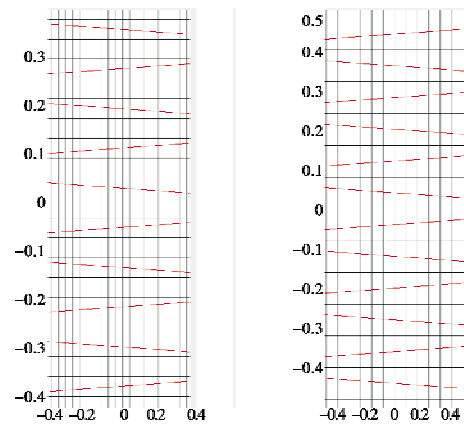
表 1 两种模式 MOEMS 快轴频率要求

Table 1 Frequency requirement of two different scanning patterns

| 显示分辨率 | 刷新频率 24/Hz | | 刷新频率 40/Hz | | 刷新频率 60/Hz | |
|-------------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|
| | Lissajous | Linescan | Lissajous | Linescan | Lissajous | Linescan |
| 320 × 240 | 9 048 | 5 760 | 15 080 | 9 600 | 22 620 | 14 400 |
| 640 × 480 | 18 096 | 11 520 | 30 160 | 19 200 | 45 240 | 28 800 |
| 1 024 × 768 | 28 953 | 18 432 | 48 255 | 30 720 | 72 382 | 46 080 |

同理,对 Linescan 扫描模式像元划分方法及分辨率与扫描频率之间关系的研究类似于 Lissajous 扫描模式。从图 3 可以看出,Linescan 模式下激光束的扫描轨迹类似于 CRT 显示器的轨迹方式。Linescan 扫描模式的轨迹是激光束在水平方向的正弦谐振运动与垂直方向的线性运动的合运动。因此,只有 MOEMS 频率比足够大时,其行扫描轨迹才近似水平。一般来说,Linescan 轨迹需要对左右边缘进行剪裁,只保留中心至边缘距离的轨迹^[8]。与 Lissajous 模式的扫描轨迹不同,Linescan 模式的像元划分不需要取像元基准点,该扫描模式的像元划分受行轨迹间距决定,间距越大,则像元尺寸越大,显示分辨率越小。

图 5 是 Linescan 扫描模式两种不同的像元划分方法的仿真图形,其扫描幅值均已归一化。



a 1/2 倍最大扫描轨迹间距 b 1 倍最大扫描轨迹间距

图 5 Linescan 模式像元划分方法对比

Fig.5 Comparison of the Linescan pattern pixel division

可以看出,图 5a 存在空白像素点,而图 5b 不存在此问题,因此,1 倍最大扫描轨迹间距像元划分法更

合理。

通过对 MOEMS 不同扫描模式下像元划分方法的仿真分析及计算,对 Lissajous 扫描模式选取图 4a 所示的像元划分方法,对 Linescan 扫描模式选取图 5b 所示的像元划分方法,可以得到表 1 所示的不同分辨率下每种扫描模式的 MOEMS 快轴频率 f_x 要求,单位为 Hz。

从表 1 中可以看出,相同分辨率下,Lissajous 模式对 MOEMS 快轴频率的最低要求要比 Linescan 模式大约高 57%。对于 XGA 分辨率、40 Hz 的刷新频率显示来说,快轴扫描频率需要高达 48 kHz。

3 不均匀性

两种模式的扫描轨迹均呈现出不均匀特点,但彼此又有差异。Lissajous 扫描轨迹的不均匀性体现在上下密、中心疏,就各像元扫描轨迹总长度来说,激光轨迹在中心像元单位要比上下像元单位的总长度小,越靠近上下两端,轨迹越密集;而 Linescan 扫描轨迹的不均匀性主要是由于行扫描轨迹的间距不相等而导致的,扫描轨迹向左右两端呈现出喇叭状。MOEMS 扫描轨迹的不均匀性直接影响显示画面效果,从图 6 仿真结果可以明显看出,显示图像并不均匀。

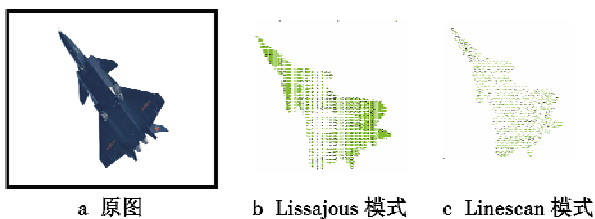


图 6 两种扫描模式下的仿真图像对比

Fig. 6 Simulation figures of two different scanning patterns

4 结论

通过对比研究可以得出如下结论。

1) 在相同显示分辨率条件下,两种模式的 MOEMS 对快轴最低频率的要求相差很大,Linescan 模式 MOEMS 要比 Lissajous 的低,大约低 57%。因此,从理论上说,相同扫描频率下,Linescan 模式的 MOEMS 可以达到更高的分辨率。

2) Lissajous 模式 MOEMS 扫描的轨迹呈现出中心

稀疏、上下边缘密集的特点;而 Linescan 模式 MOEMS 扫描的轨迹则向左右两边呈现出喇叭状特点。前者可以考虑通过有选择的调制激光实现校正,并且不影响显示系统分辨率,而后者只能增加预校正扫描镜或是对原来的 Linescan 模式 MOEMS 的结构进行改进实现校正。

参考文献

- [1] 张弛,张高飞,尤政. 微型二维扫描镜的原理性实验研究[J]. 清华大学学报:自然科学版,2008,48(11):1919-1922. (ZHANG C, ZHANG G F, YOU Z. Experimental investigation on the principle of a two-dimensional scanning micro-mirror[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2008, 48(11):1919-1922.)
- [2] SCHENK H, DUERR P, KUNZE D, et al. A resonantly excited 2D-micro-scanning-mirror with large deflection [J]. Sensors and Actuators A:Physical, 2001, 89:104-111.
- [3] 张弛,张高飞,尤政. MOEMS 微型二维扫描镜的建模与仿真[J]. 传感技术学报,2008,21(2):318-321. (ZHANG C, ZHANG G F, YOU Z. Modeling and simulation of two-dimensional MOEMS scanning mirror[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2008, 21(2):318-321.)
- [4] UREY H, DEWITT F, POWELL K D, et al. High-frequency raster pinch correction scanner for retinal scanning displays[J]. Proceeding of SPIE, 2001, 4561:45-54.
- [5] ROSCHER K U, GRATZ H, SCHENK H, et al. Low cost projection device with a 2-dimensional resonant microscanning mirror [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5348:22-31.
- [6] LI Z, YUAN W Z, WU M, et al. Micro scanning mirrors with laser diode for pattern generation [J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(11):32-39.
- [7] 乔大勇,吴蒙,李昭. 基于二维微扫描镜的平视显示系统研究[J]. 航空工程进展,2013,4(4):469-473. (QIAO D Y, WU M, LI Z. HUD system based on 2D micro scanning mirror[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2013, 4(4):469-473.)
- [8] NIESTEN M, MASOOD T, MILLER J, et al. Scanning laser beam displays based on a 2-D MEMS [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7723:77230U1-77230U10.

欢迎订阅期刊 欢迎刊登广告