

基于李萨如扫描的微型激光投影显示技术

李晓莹¹ 梁晓伟^{1*} 乔大勇¹ 刘耀波¹ 潘春辉¹ 练彬²
(¹西北工业大学空天微纳系统教育部重点实验室, 陕西 西安 710072)
(²西北工业大学深圳研究院, 广东 深圳 518057)

摘要 结合李萨如图像扫描和微机电系统(MEMS)二维谐振式扫描镜,提出一种新颖的投影显示方法。相比于传统的投影显示技术,该技术具有控制简单、能耗低、体积小及重量轻等优点。首先阐述了该投影显示技术中像素的定义与划分,然后从理论上分析了刷新率、分辨率和谐振频率之间的关系,以及选择谐振频率的约束条件,最后通过 Matlab 软件进行仿真验证,并使用研制出的扫描镜样件搭建了投影显示样机,成功投影出分辨率为 260×180 的图像,从而验证谐振频率选择约束的有效性以及该投影显示方法的可行性,为实际工程应用奠定基础。

关键词 成像系统;微机电系统;李萨如;刷新率;分辨率;谐振频率

中图分类号 TH744 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0612005

Miniature Laser Projection Display Technique Based on Lissajous Scanning

Li Xiaoying¹ Liang Xiaowei¹ Qiao Dayong¹ Liu Yaobo¹ Pan Chunhui¹ Lian Bin²

¹Key Laboratory of Micro/Nano Systems for Aerospace, Ministry of Education, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China

²Shenzhen Institute, Northwestern Polytechnical University, Shenzhen, Guangdong 518057, China

Abstract A new projection display technique is put forward combining Lissajous image-scanning with micro electro mechanical system (MEMS) two-dimensional resonant scanning mirror. Comparing with traditional projection display technique, the advantages of it are simple control system, low power consumption, small volume, light weight and so on. Firstly, the definition and division of the pixel are described. Then analyses of the relationship among refresh rate, resolution and resonant frequencies, and the constraints of selecting the resonant frequencies are conducted. Finally, the simulation on Matlab is conducted and the projection display prototype is built, using the scanning mirror sample pieces developed. The success of projecting an image with the resolution of 260×180 testifies the feasibility of this technique of projection and the effectiveness of the constraints of selecting the resonant frequencies, laying the foundation of the practical engineering application of this projecting technique.

Key words imaging systems; micro-electro mechanical system; Lissajous; refresh rate; resolution; resonant frequency

OCIS codes 120.2040; 130.3990

1 引 言

当前基于微机电系统(MEMS)器件的微型投影显示技术已成为国内外研究热点,传统的基于液晶显示器(LCD)的投影显示技术由于采用的是超高压水银灯作为光源,存在着光源体积大和功耗大的

缺点,不利于投影设备的微小型化;而基于 MEMS 数字微镜器件(DMD)的投影显示技术虽然采用了激光作为光源,但是 DMD 芯片器件结构工艺复杂,投影分辨率受到芯片中微反射镜个数的限制,不利于投影分辨率的进一步提高^[1-4];采用光栅式扫描

收稿日期: 2013-11-11; **收到修改稿日期**: 2014-02-19

基金项目: 国家自然科学基金(50805123)、教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-10-0075)、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项目(JCYJ20120614154203639)

作者简介: 李晓莹(1968—),女,博士,副教授,主要从事微机电系统、精密制造、传感器与智能测试等方面的研究。

E-mail: xiaoy@nwpu.edu.cn

* **通信联系人**. E-mail: liangxiaoweisc@163.com

的投影显示技术使用的是电磁驱动的 MEMS 二维扫描镜,不仅扫描镜结构工艺复杂而且外围驱动电路也十分复杂。

本文所采用的 MEMS 二维谐振式扫描镜是一种基于绝缘体上硅(SOI)三层结构的静电梳齿驱动的扫描镜,具有功耗低、结构制作简单、与集成电路(IC)工艺相兼容等优点,将这种高频二维 MEMS 器件与李萨如扫描方式相结合可以实现一种全新的投影显示^[5],在进行单色显示时,投影光源只需要一个单色激光器即可。基于李萨如扫描的投影显示技术的最大优点是投影设备的小型化程度更高,可以与通信设备进行集成。

2 投影原理

当一束激光照射在谐振式 MEMS 二维微型扫描镜上时,反射光斑会随着扫描镜在 X 和 Y 轴两个方向上做正弦谐振运动,进而在投影区域形成李萨如图像^[6],如图 1 所示。

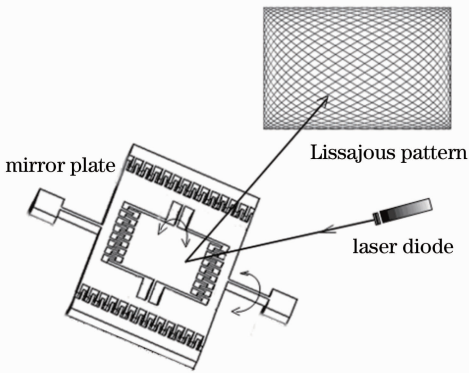


图 1 李萨如扫描成像过程

Fig. 1 Imaging processing of Lissajous scanning
激光光斑在投影区域的谐振运动方程为^[7]

$$\begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l \cdot \tan \theta_x \\ l \cdot \tan \theta_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l \cdot \tan \{ \theta_{x_{\max}} \cdot \sin [2\pi f_x \cdot (t - \phi_x)] \} \\ l \cdot \tan \{ \theta_{y_{\max}} \cdot \sin [2\pi f_y \cdot (t - \phi_y)] \} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 l 为扫描距离, θ_x, θ_y 代表 x, y 方向扫描角度, $\theta_{x_{\max}}, \theta_{y_{\max}}$ 为 x, y 方向最大扫描角度, f_x, f_y 为 x, y 方向的谐振频率, x_{\max}, y_{\max} 为 x, y 方向最大扫描的振幅, ϕ_x, ϕ_y 为 x, y 方向相位。由于扫描镜扫描角度只有 $\pm 5^\circ$, 因此(1)式可简化为^[8]

$$\begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} x_{\max} \cdot \sin [2\pi f_x \cdot (t - \phi_x)] \\ y_{\max} \cdot \sin [2\pi f_y \cdot (t - \phi_y)] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_x \sin (2\pi f_x t + \varphi) \\ A_y \sin (2\pi f_y t) \end{bmatrix}, \quad f_x \in \text{IN}, f_y \in \text{IN}. \quad (2)$$

从运动方程中可以看出,激光光斑的扫描位置和时间一一对应,因此要实现一定分辨率的投影显示,需要在李萨如图像中定义出相应的像素点,得到基于李萨如图像的像素点时间网表,完成空间点到时间点的映射,然后按照得到的时间点精确控制激光器开关利用余晖效应即可实现投影显示^[9-10]。

2.1 像素定义与时间点计算

传统的投影显示像素是构成影像的最小方形染色点,而基于李萨如扫描的投影显示像素是指划分网格中激光光斑的扫描路径,即用扫描线段取代染色点,如图 2 所示。

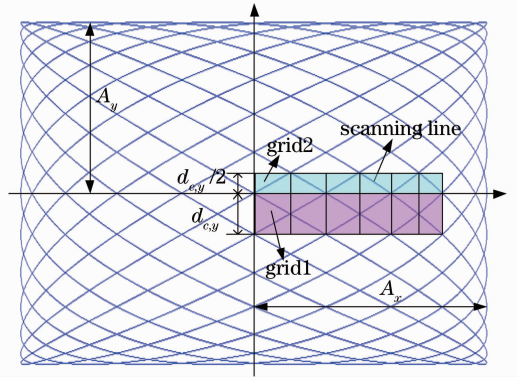


图 2 像素点的划分 ($f_x = 13, f_y = 10, \varphi = 0$)

Fig. 2 Pixels division ($f_x = 13, f_y = 10, \varphi = 0$)

由扫描镜的运动方程(1)式可知,李萨如图形扫描的速度在中心位置时最快,在边沿区域最慢,扫描线段选取过长会导致在投影显示过程中出现重影,选取过短则会导致投影亮度不足,投影图像出现大量噪声^[11]。因此采用以下方法选取合适的线段长度,如图 3 所示, (x_i, y_i) 表示一个像素的中心, (x_{pi}, y_{pi}) 表示李萨如扫描轨迹上距离像素中心点最近的点。通过计算可以得到 (x_{pi}, y_{pi}) 所对应的时间点 t_{pi} , 由于激光光斑的扫描位置和时间一一对应,因此可以采用 t_{pi} 前后的时间段 $[t_{pi} - \Delta t/2, t_{pi} + \Delta t/2]$

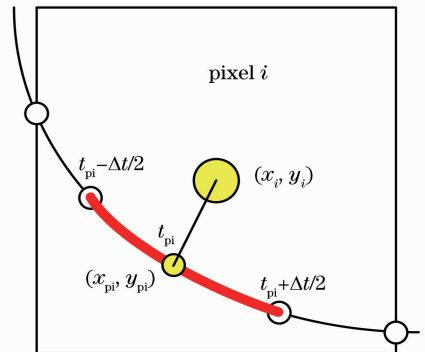


图 3 像素时间段的选取

Fig. 3 Selection of time-period of pixel

代表对应的像素，这样，选取合适扫描线段即就归结为求取合适的 Δt 。

如图 4 所示，定义李萨如图像的中心作为坐标原点，由李萨如扫描的运动公式可知，激光的光斑经过原点时运动速度最快、扫过第一个网格的时间也最短，所以选择这个时间段作为 Δt ，计算公式如下

$$v_o \approx x' \Big|_{x=0} = 2\pi f_x A_x \cos(2\pi f_x t) \Big|_{x=0} = 2\pi A_x f_x, \quad (3)$$

$$\Delta t \approx \frac{d_{px}}{v_o} = \frac{2A_x/R_x}{v_o} = \frac{2A_x/R_x}{2\pi A_x f_x} = \frac{1}{\pi f_x R_x}, \quad (4)$$

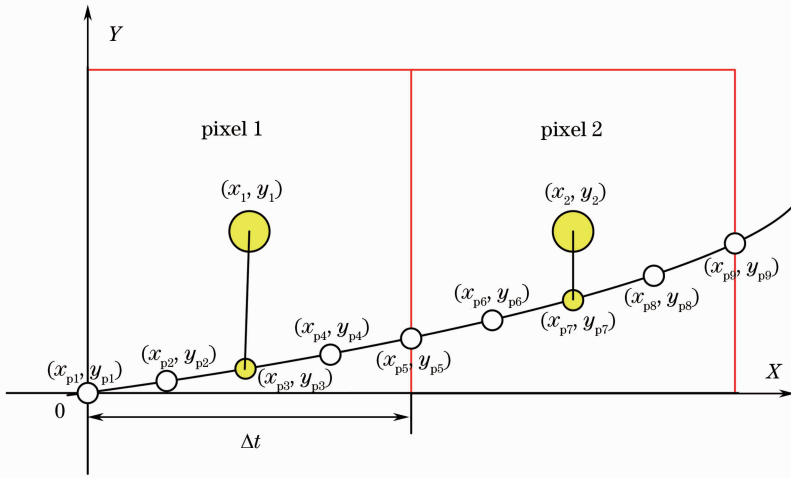


图 4 最短时间段的计算

Fig. 4 Calculation of the minimum time-period

2.2 分辨率与刷新率

如图 2 所示，网格划分只需要在一个方向上的尺寸满足要求即可确保有扫描线经过网格。为方便阐述，这里先确定 Y 方向上的尺寸。任意相邻两个李萨如图像与 Y 轴的交点之间的距离为 d_y ，计算公式如下：

$$d_y = A_y \left| \sin\left(2\pi f_y \cdot \frac{n}{2f_x}\right) \right| = A_y \left| \sin\left(\frac{n\pi f_y}{f_x}\right) \right|, \quad n = 1, 2, \dots, \frac{f_x}{f_r}, \quad (5)$$

式中 A_y 为投影区域 Y 方向振幅， n 为 Y 轴上结点个数， $n/(2f_x)$ 为 Y 轴上原点到每个结点所用时间。

用 Mod 表示取余运算， $d_{c,y}$ 表示 d_y 的最大值可得：

$$d_{c,y} = A_y \left| \sin\left\{\pi \text{Min}\left[\text{Mod}\left(\frac{nf_y}{f_x}\right)\right]/f_x\right\}\right|, \quad n = 1, 2, \dots, \frac{f_x}{f_r}. \quad (6)$$

当 n 等于 1 到 f_x/f_r (其中 f_r 为投影显示的刷新率) 范围内， $\text{Mod}(nf_y/f_x)$ 最小非零值为 f_r ，可得

式中 v_o 扫描线在原点处，沿 X 轴方向上的运动速度，用 v_o 作为扫描线经过第一个网格的平均速度， d_{px} 为网格在 x 方向上的长度，在网格划分的过程中要遵循的原则是确保每个网格中至少有一条扫描线经过，网格过大会导致分辨率过低，过小则部分网格中没有扫描线经过，会导致投影显示过程中出现坏点。网格划分方式确定以后，即可计算出投影显示的分辨率。

$$d_{c,y} = A_y \sin\left(\pi \frac{f_r}{f_x}\right). \quad (7)$$

如图 2 所示，如果选择尺寸为 $d_{c,y}/2$ 的网格 2 对李萨如图像进行划分，则会出现现在划分的网格中有些网格没有扫描线经过的情况，进而导致在投影过程中出现投影显示坏点，大大降低了投影质量。因此，选择网格 1 对李萨如图像进行划分，既能确保投影显示的质量，又能获得较高的分辨率，用 Int 表示取整运算，Y 方向上划分出的网格数为

$$R_y = \text{Int}\left(\frac{2A_y}{d_{c,y}}\right) = \text{Int}\left[\frac{2}{\left|\sin(\pi f_r/f_x)\right|}\right]. \quad (8)$$

同时为了保证整个投影出的图像不发生畸变，要求一个像素的长宽比为 1:1，则 X, Y 方向上的分辨率之比即为幅值比，即

$$\frac{R_x}{R_y} = \frac{A_x}{A_y}. \quad (9)$$

由(8)式可知基于李萨如扫描的投影显示分辨率是由某一方向上的谐振频率和刷新率 f_r 决定的， f_r 等于扫描镜两个方向上谐振频率 f_x 和 f_y 的最大公约数。综合上述分析可以得出，该投影显示的分辨率与刷新率最终都是由扫描镜两个方向上的谐

振频率决定的,在刷新率一定的条件下,谐振频率越高,投影显示的分辨率高,由于扫描镜的谐振频率不是唯一的,而是在一定区域内的多个值,因此,选取谐振频率时一定要满足一定约束条件才能保证投影显示质量。

2.3 谐振频率的选择

为保证投影显示质量,在选择扫描镜谐振频率 f_x 和 f_y 应该满足以下三个条件:

1) f_x 和 f_y 的最大公约数与投影显示的刷新

率 f_r 相等;

2) 由(8)式可知,为保证分辨率则要求

$$f_x \geq \frac{\pi f_r}{\arcsin(2/R_y)}$$

3) f_x/f_r 和 f_y/f_r 的奇偶性会影响到李萨如图像扫描线的疏密,进而会影响到投影显示的分辨率。当 f_x/f_r 和 f_y/f_r 一个是奇数一个是偶数时,李萨如图像与外切水平线及外切垂直线的切点数之比等于对应方向上谐振频率之比,如图 5(a)所示。

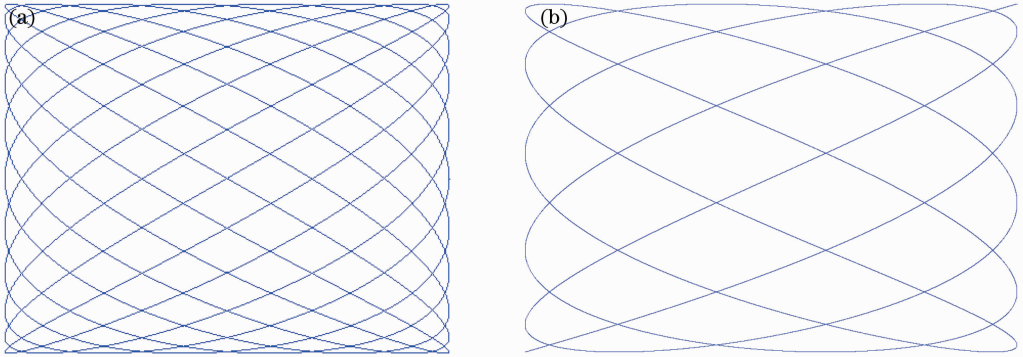


图 5 f_x/f_r 和 f_y/f_r 的奇偶性对李萨如图像扫描线疏密的影响。(a) $f_x/f_r = 11, f_y/f_r = 8, \varphi = 0$;

(b) $f_x/f_r = 11, f_y/f_r = 7, \varphi = 0$

Fig. 5 Influence of parity of f_x/f_r and f_y/f_r on Lissajous scanning line density. (a) $f_x/f_r = 11,$

$f_y/f_r = 8, \varphi = 0$; (b) $f_x/f_r = 11, f_y/f_r = 7, \varphi = 0$

当 f_x/f_r 和 f_y/f_r 都为奇数时,则李萨如图像与外切水平线及外切垂直线的切点数会急剧减少,而且图像还变得不对称,如图 5(b) 所示,因此 f_x/f_r 和 f_y/f_r 必须一个是奇数一个是偶数。

3 仿真与验证

为了验证投影显示理论的正确性,使用 Matlab 软件进行仿真实验。现有的二维扫描镜镜面直径为 $1500 \mu\text{m}$, X 方向上在 6087 Hz 附近、Y 方向上在 1988 Hz 附近处于谐振状态,选取 $f_x = 5940 \text{ Hz}$ 和

$f_y = 1640 \text{ Hz}$ 的频率进行验证,计算投影图像的最大分辨率为 260×180 , 其中, $f_x > 20\pi/\arcsin(2/180)$, 投影显示的刷新率 $f_r = \text{GCD}(5940, 1650) = 20 \text{ Hz}$, GCD 表示取最大公约数, $5940/20 = 297$ (奇), $1640/20 = 82$ (偶), 满足上述三个约束条件,原始图像和投影仿真效果对比如图 6 所示。

通过对比可知,基于李萨如扫描的投影显示方式在理论上是可行的,进而搭建投影样机进行实际验证,该样机主要由核心控制单元和输出执行单元组成的^[12],硬件框图如图 7 所示。

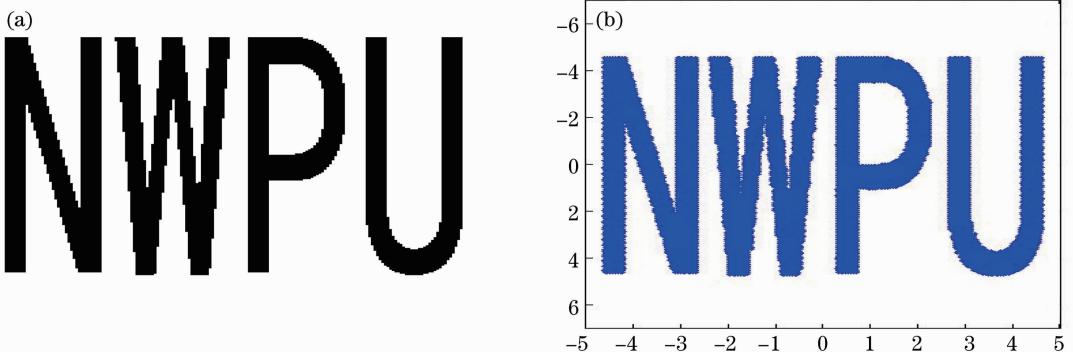


图 6 投影显示对比图。(a)原始图像;(b)仿真结果

Fig. 6 Projection display comparison chart. (a) Original image; (b) result of simulation

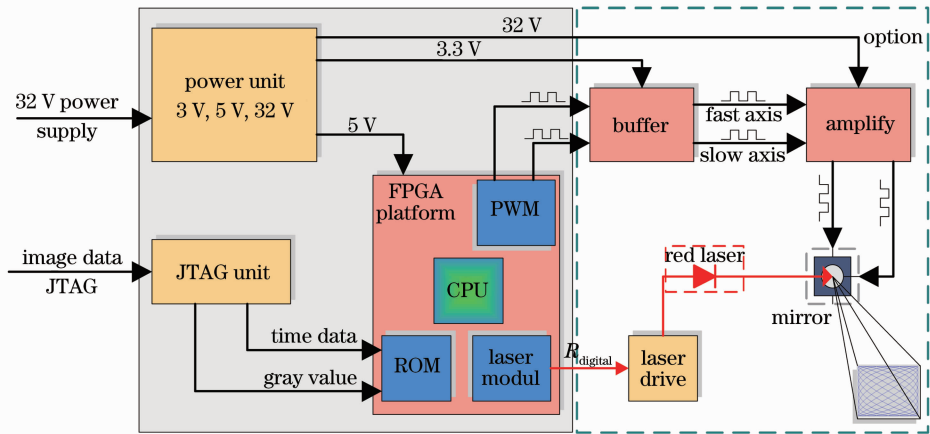


图 7 硬件总体设计框图

Fig. 7 Block diagram of hardware overall design

外接 MEMS 二维谐振式扫描镜与红色半导体激光器,控制单元以 Cyclone III 为核心,充分利用其片上丰富的逻辑资源与 PLL 模块进行软硬件设计。总电源选用 32V 直流适配器供电,电源模块采用开关电源芯片 lm2576 和线性电源芯片 SPX1117,分别为不同模块提供 32、5、3.3 V 的工作电压。缓冲模块是基于集成运放 OP213 搭建的,对前级电路呈高阻态,对后级电路呈低阻态,因而对前后级电路能起到隔离缓冲的作用,防止 FPGA 的

I/O口被烧坏。放大模块也是基于 OP213 搭建的,线性可调进而为扫描镜提供不同的驱动电压。系统启动后开始进行激光器驱动芯片的初始化,通过三线传输协议向芯片中的寄存器写入数据来完成芯片的初始化;控制模块逐次从 FPGA 片内 ROM 中读入图像各像素的时间点数据,控制激光器的亮灭,同时方波调制模块产生驱动扫描镜的方波信号;最终的投影显示系统与投影效果如图 8 所示。

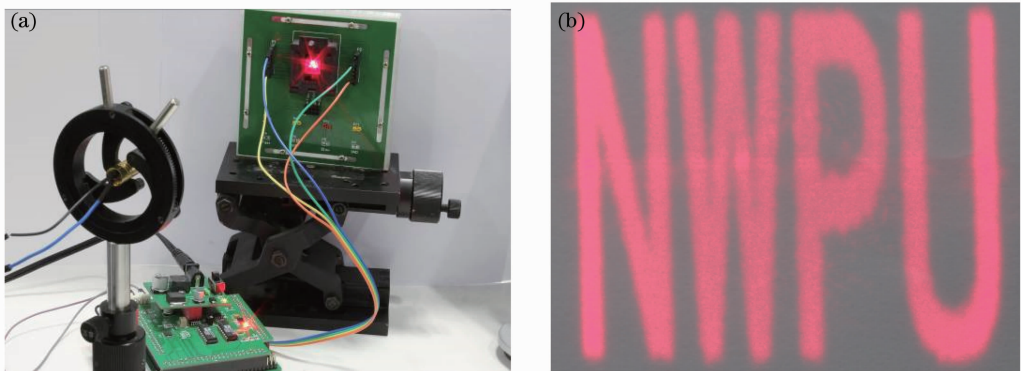


图 8 投影系统与效果。(a)投影系统;(b)投影效果

Fig. 8 Projection system and effect. (a) Projection system; (b) projection effect

投影显示系统的可靠性分为 MEMS 扫描镜的可靠性和样机的可靠性。其中 MEMS 扫描镜按照国家军用标准 GJB150. 4A-2009,通过了温度冲击,高低温存储,高低温性能等相关测试。样机经测试能够连续工作 8 个月无故障,系统功耗约为 1 W,投影显示距离为 1 m,投影图像大小约为 36 cm × 18 cm。由于算法与计算精度的限制(计算精度限制在小数点后六位),在划分像素点的计算中,会存在将相邻并且很短的两条李萨如扫描线段中的一条忽略的情况,因此在进行 260 × 180 的投影中,实际

划分出的像素点只有约 38000 个,因此投影显示精度约为 81%。通过图 6 和图 8 的对比可以看出,基于李萨如扫描的微型激光投影显示理论切实可行,谐振频率选择的约束条件有效,该项投影显示技术可以运用到实际应用中。

4 结 论

提出了一种将李萨如扫描与 MEMS 二维谐振式扫描镜相结合的全新投影显示技术,详细阐述了

该投影显示中像素的定义与划分方式,分析了谐振频率和分辨率、刷新率之间的关系,提出谐振频率选择的三个条件。利用现有的 MEMS 二维谐振式扫描镜搭建了投影显示系统样机,并成功投影出 260×180 的图像,验证了理论计算的正确性以及谐振频率选择约束条件的有效性。受现有扫描镜的谐振频率的限制,投影显示分辨率有限;但是整个样机工作稳定,功耗低,投影图像亮度高,投影图像质量较高,为后续的高分辨率彩色微型投影显示奠定了基础。

参 考 文 献

- 1 J M Younse. Projection display systems based on the digital micromirror device (DMD) [C]. *Microelectronic Structures and Microelectromechanical Devices for Optical Processing and Multimedia Applications*, 1995, 2641: 64–75.
- 2 F Nguyen. Challenges in the design of a RGB LED display for indoor applications [J]. *Synthetic Metals*, 2001, 122(1): 215–219.
- 3 B VanGiel, Y Meuret, L Bogaert. Efficient and compact illumination in LED projection displays [C]. *Playa Del Rey: Soc Information Display*, 2007, 38(1): 947–950.
- 4 Yang Renjie. The development of micro-projection technique based on MEMS [J]. *Compotech China*, 2011, (4): 32–33.
杨仁杰. MEMS 微型投影机技术发展 [J]. *电子与电脑*, 2011, (4): 32–33.
- 5 Liu Yaobo, Yuan Weizheng, Qiao Dayong, *et al.*. Design and research on the modes of a novel two-dimensional microscanner with electrostatic actuation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(6): 0623001.
刘耀波, 苑伟政, 乔大勇, 等. 一种新型静电驱动二维微型扫描镜的设计及模态 [J]. *光学学报*, 2013, 33(6): 0623001.
- 6 M Scholles, A Brauer, K Frommhagen, *et al.*. Ultra compact laser projection systems based on two-dimensional resonant micro scanning mirrors [C]. *SPIE*, 2007, 6466: 64660A.
- 7 K Isamoto, T Makino, A Moroswa, *et al.*. Self-assembly technique for MEMS vertical comb electrostatic actuator [J]. *IEICE Electronics Express*, 2005, 2(9): 311–315.
- 8 M Scholles, A Brauer, K Frommhagen, *et al.*. Miniaturized optical module for projection of arbitrary images based on two-dimensional resonant micro scanning mirrors [C]. *SPIE*, 2005, 5873: 72–83.
- 9 Yan Bin, Yuan Weizheng, Qiao Dayong, *et al.*. Study on resonant frequency for a novel mems micro scanning mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(6): 0623004.
燕 斌, 苑伟政, 乔大勇, 等. 一种新型微机电系统扫描镜的谐振频率研究 [J]. *光学学报*, 2012, 32(6): 0623004.
- 10 Kai-Uwe Roscher, Hagen Grätz, Harald Schenk, *et al.*. Low cost projection device with a 2-dimensional resonant micro scanning mirror [C]. *SPIE*, 2004, 5348: 22–31.
- 11 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.
- 12 Wyatt O Davis, Randy Sprague, Josh Miller. MEMS-based pico projector display [C]. *Optical MEMs and Nanophotonics*, 2008 IEEE/LEOS Internationall Conference on, 2008: 31–32.

栏目编辑: 韩 峰