

文章编号:1007-2780(2015)04-0673-08

基于平滑滤波的虚拟显示模型及控制方法

王彬宇^{1,2}, 王瑞光^{1*}, 邓意成¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:针对新型虚拟 LED 显示屏提出一种基于平滑滤波器的虚拟显示模型和控制方法,该方法与传统方法相比能在降低数据带宽的条件下提高虚拟显示的灰度等级。分析了户外发光二极管显示屏(LED)的显示原理,指出提高 LED 显示器分辨率和灰度是提升其显示效果最直接的方法。介绍了传统虚拟显示的实现及控制原理和存在的问题,然后针对目前的虚拟 LED 显示屏提出一种虚拟显示的建模及控制方法,再用模拟和实验验证该方法的可行性及效果,最后与传统的虚拟显示建模及控制方法做对比。实验结果表明,使用本文提出的建模和控制方法呈现的图像清晰,图像细节不流失,准确地还原了图像原来真实的情况。本文提出的虚拟显示建模和控制方法能够准确还原图像信息,可以用于新型的虚拟 LED 显示屏。

关 键 词:虚拟显示;LED 显示屏;分时复用;亚像素共享

中图分类号:TP751 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/JYXS20153004.0673

Virtual display modeling and control method based on smoothing filter

WANG Bin-yu^{1,2}, WANG Rui-guang^{1*}, DENG Yi-cheng¹

(1. *ChangChun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China*)

Abstract: A new mathematical modeling method based on smoothing filter is proposed for the latest virtual LED display screen and a new control method is proposed for the application of the new modeling method. Compared with traditional virtual display system, system with new mathematical modeling and control method can decrease the need of the data bandwidth and increase the gray scale of the virtual display system. Firstly, the article analyzed the imaging principle of LED screen and explored the nature of virtual display and gave the evaluation criteria of the LED screen which include resolution and gray scale. Secondly, the article introduced the implementation of the traditional virtual display and its problems. Thirdly, the article proposed a new mathematical modeling method for the latest virtual LED display screen and predicted the feasibility of new method. Then, the article used a LCD screen to simulate the feasibility of new method and used the virtual LED screen to verify the

收稿日期:2015-06-06;修订日期:2014-08-22.

基金项目:吉林省重大科技转化项目(No. 09ZDZH006)

* 通信联系人, E-mail: wby111@msn.cn

result of new control and modeling method. At last, the article compared traditional and new method. The experimental results indicated that by using the new control and modeling method, the image displayed on virtual LED screen is vivid and the detail of image is fully displayed. Therefore, the new method of control and modeling can be used in virtual LED screen.

Key words: virtual display; LED screen; time-sharing multiplexing; subpixel-sharing

1 引言

LED 虚拟显示是一种通过特殊的控制手段来控制虚拟 LED 显示屏的技术,使显示屏能显示的分辨率超过自身分辨率。普通 LED 显示屏的像素点是凝聚在一起的,可以用人眼识别,而这种技术所显示的像素点是分散的,在一般情况下人眼识别不出,所以称这种像素为“虚拟像素”^[1],这种技术就叫做虚拟显示技术。此技术旨在解决 LED 显示屏分辨率和价格的矛盾^[2]。

LED 显示屏是通过控制不同颜色的 LED 发光二极管的亮灭来实现图像显示的设备。显示屏的参数有响应时间、最大亮度、分辨率、灰度等级、点距、刷新速度等,其中亮度、分辨率和灰度等级能够直接影响到人的视觉感受,一般最大亮度越高,在环境亮度越高的情况下越能看清显示器内容,而显示屏的分辨率越高,显示的图像就应该越清晰^[3],灰度越大,显示的颜色种类越丰富。由于目前 LED 显示屏的 LED 灯管最大亮度都能达到 SJT 11141-2012《LED 显示屏通用规范》中的标准,并且 LED 亮度的最大值受制于制造工艺。所以厂商提升 LED 显示屏实际显示效果最直接的方法就是提高显示屏的分辨率和灰度等级。虚拟 LED 显示屏是 LED 显示屏的一种,它可在相同的 LED 灯管数量下比普通 LED 显示屏显示更高分辨率的图像,所以在成本,工艺的限制下,想要获得更好的显示效果,虚拟 LED 显示屏不失为一个不错的选择。但是传统的虚拟显示屏在满足分辨率的时候降低了灰度等级,所以传统虚拟 LED 显示屏的灰度等级还有提升空间。

在 LED 虚拟显示提出的时候,由于当时 LED 发光二极管制造水平不高,红色 LED 达不到要求的亮度,所以为了满足红色光的亮度要求,每个像素采用的是两个红色,一个蓝色,一个绿色的组合,所以当时的虚拟 LED 显示屏也继承了这一特点,早期虚拟 LED 显示屏也是采用两红一绿

蓝的像素结构^[4-6],目前 LED 虚拟显示的研究大都是以这种屏幕为基础来讨论的。但是随着 LED 制造技术的不断进步,红色的 LED 已经可以达到和其他颜色 LED 同等的亮度,所以最新的 LED 虚拟显示采用的是红绿蓝三色均匀分布的排列方式。由于之前的 LED 虚拟显示的建模和算法都是建立在“两红一绿蓝”的基础上的,所以之前的算法和建模对于新的虚拟 LED 显示屏,不一定是最优的,甚至是不能用的。针对这一情况,本文基于目前的均匀分布的虚拟 LED 显示屏,提出一种虚拟显示的建模和控制法使得均匀分布的虚拟显示屏发挥出更好的效果。

2 虚拟显示的原理及屏幕组成

2.1 LED 虚拟显示器的原理

LED 显示屏显示的实现主要是利用人眼的视觉暂留,由于图像从人眼传到大脑大概需要 1/24 s,所以 LED 显示屏在 1 s 内刷新 60 次的话,人眼看到的就是一幅或者一系列不闪,连续的画面。每个 LED 灯管在每次的刷新过程中又细分为点亮和熄灭两个阶段,由于一次刷新时间间隔很短,人眼识别不出,所以在人看来只是 LED 灯管的明暗程度不同,而每个灯管在一次显示中明暗程度由视频里面的信息控制,不同明暗程度的颜色组成了最终的色彩,一般每个颜色由 8 bit 的数据控制,可以实现 256 种不同的明暗程度,这个数据称为 8 bit 灰度。8 bit 灰度的红绿蓝颜色的混合就能形成大概 1600 万种颜色,这已经超出了人眼能识别的颜色范围^[7],所以一般显示器采用的是每种颜色 8 bit 的位宽的显示灰度。我们把组成一个像素的 3 种颜色的每一种称为亚像素^[8-9],这样 3 个 RGB 的亚像素就组成了一个像素点^[10-11],大量像素点就组成了一幅可被人识别的图像。

LED 虚拟显示器就是一种特殊的 LED 显示器,其成像原理和 LED 显示器既有相似之处,又

有所区别。虚拟 LED 显示屏的成像原理大体和 LED 显示屏原理一样,都是通过 RGB 亚像素的颜色调和来形成像素最终组成一幅完整的图像,但是与传统的 LED 显示器不同的是虚拟 LED 显示屏的每个颜色的灯管是均匀分布的,见图 1,2。

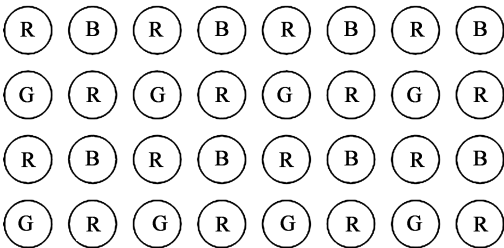


图 1 早期虚拟显示屏的像素排列
Fig. 1 Array of traditional virtual LED display screen

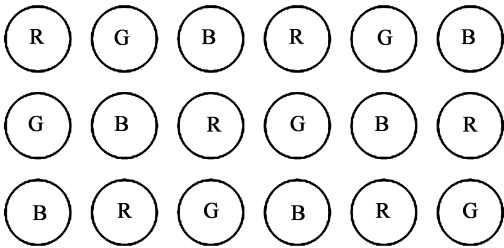


图 2 目前虚拟显示屏的像素排列
Fig. 2 Array of virtual LED display screen at present

这样的排列方法主要是为了亚像素的复用,而虚拟显示的主要内容也是亚像素的复用,亚像素的复用指的就是每个亚像素参与多个像素的成像,也就是说一个亚像素与多个像素的形成都有关联。而普通的 LED 显示屏的亚像素只参与单个像素的形成。在灯管数量一定时,使用亚像素复用技术的虚拟 LED 显示屏能够比传统的 LED 显示屏显示更多的像素点,这样就增大了屏幕的分辨率。

2.2 传统虚拟显示屏的建模及控制方法

传统虚拟显示屏是两红一绿蓝的排列方式,每个虚拟像素包含了 4 个亚像素,其像素点的划分由图 3 表示。

由图可以看到 R_{22} 与参与了 $P_{11}, P_{12}, P_{21}, P_{22}$, 四个点的成像,所以 R_{22} 参与了 4 个像素点的组成,这样的情况我们称 R_{22} 的复用次数为四次,可以看到位于非边缘的亚像素点都是被复用 4 次的,这样在相同灯管数量的条件下,采用这样复用的虚拟显示屏能达到普通 LED 显示屏分辨率的

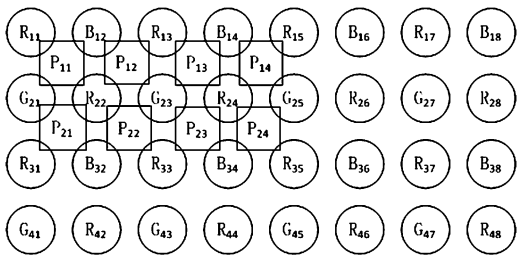


图 3 传统虚拟显示屏的建模
Fig. 3 Mathematical modeling of traditional virtual LED display screen

4 倍,所以这种建模方法被广泛应用在了 LED 虚拟显示上。

采用这样的虚拟 LED 显示屏控制方法也和一般的 LED 显示屏不一样,目前采用的控制方法是分时复用的控制方法,假设一幅图像包含 4 个像素 $P_{11}, P_{12}, P_{21}, P_{22}$,那么在普通 LED 显示器是在 T 内同时显示这 4 个像素点,而虚拟 LED 显示屏如图 3 那样的需要在 $0 \sim 1/4T$ 内显示 P_{11} , $1/4T \sim 2/4T$ 内显示 P_{12} , $2/4T \sim 3/4T$ 内显示 P_{21} , $3/4T \sim T$ 内显示 P_{22} ,当 T 无限小时,由于人眼的视觉暂留,看上去就像显示的是 4 个点,这样就实现了虚拟显示,由于这种控制方法分时段对亚像素进行控制,所以称为分时复用。

这种建模和控制方法是最广泛使用的虚拟显示的建模和控制方法,但是根据其控制方法可以知道在同等带宽条件下,因为每个灯管的灰度固定,在平均之后,这种方法所显示的实际颜色灰度变成了原来的 $1/4$,并且采用分时复用的控制方式加大了对硬件的需求,使得所用器件工作频率更高,加大了硬件成本以及系统的不稳定性。

2.3 本文提出的虚拟 LED 显示屏建模方法

由于技术的进步及制作工艺的提升,红色 LED 灯管的亮度已经达到与蓝绿 LED 同等亮度的水平,所以现在的 LED 显示屏的一个像素点是由一红一绿一蓝 LED 灯管组成,虚拟 LED 显示屏也相应的改变,目前,虚拟 LED 显示屏由红绿蓝 LED 灯管均匀分布组成,见图 2。传统的虚拟 LED 显示屏的建模方法就不再适合现在这种排列方式的虚拟 LED 显示屏了,所以需要提出一种适合目前虚拟 LED 显示屏的建模方法和控制方法。

由于红绿蓝灯管的均匀分布,现在一个像素

点就由 3 个 LED 灯管组成,所以不能再像传统虚拟 LED 显示屏那样采用正方形的划分,所以考虑到 3 个点组成像素点,本文提出了三角形划分像素点的建模方法,具体划分见图 4。

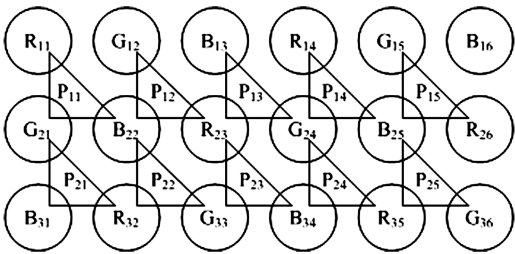


图 4 目前虚拟显示屏的像素排列

Fig. 4 Mathematical modeling of latest virtual LED display screen

可以看到,本文提出的建模方法以每个亚像素为顶点把屏幕划分成无数三角形,虚拟像素点位于每个三角形的外心,由于虚拟点到每个 LED 灯管的距离相等,所以三基色中的每个颜色不会因为距离不同而产生混色上的不均匀。并且显示屏从整体上来看三角形均匀分布,所以能够达到虚拟像素点均匀分布的要求。

目前虚拟显示屏一红一绿一蓝 LED 灯管组成一个虚拟像素还有另外两种排列方式^[1,5],其中文献[1]的排列方式是等边三角形,文献[5]中的排列没有给出明确的虚拟像素的划分方式,两篇文章所以控制方法都是传统的虚拟显示控制方法,并且前一种排列方法某些灯管的最大复用次数达到了 4 次,这样加重了由于使用虚拟显示而导致的最大亮度减小的情况。

2.4 采用单次扫描的控制方法

虽然传统的分时复用的控制方法也可以用在新的虚拟 LED 显示屏上,但是每个亚像素的复用次数为 3,并且屏幕需要的刷新率为一般 LED 显示屏的 3 倍,所以针对本文提出建模方法提出另一种虚拟显示的控制方法。

由前面可知传统虚拟显示的根本原理是利用人眼的视觉暂留,假设屏幕显示一帧图像的时间为 T ,利用传统虚拟显示的原理控制虚拟 LED 显示屏时 B_{22} 在 $0\sim 1/3T$ 内参与显示 P_{11} ; $1/3T\sim 2/3T$ 内参与显示 P_{12} ; $2/3T\sim T$ 内参与显示 P_{22} 。那么在这三段时间内假设亚像素 B_{22} 显示的时间分别为 t_1, t_2, t_3 ,由于 T 的间隔非常小,我们看到

的 B_{22} 的实际亮度就是 t_1, t_2, t_3 时间内 B_{22} 亮度的加权,所以虽然实际上在 T 时间内 B_{22} 是刷新了 3 次,但是人眼看到的 B_{22} 就和 B_{22} 在 T 内亮($t_1+t_2+t_3$)时间的 LED 灯管的亮度是一样的,所以根据这个原理,可以提出一种新的控制方法,这种控制方法能够使虚拟显示和普通 LED 显示屏控制一样一帧图像只需要刷新一次。

根据上面的分析,可以知道传统虚拟显示在显示一帧图像时,每个灯管的亮度对于人眼来说就是三次的刷新的亮度和,所以理论上可以找出一种计算方法根据传统虚拟显示每次刷新的亮度计算出在 T 时间内等效的亮度,然后把所有计算出来的亮度值映射到屏幕,这样的话既实现了虚拟显示,刷新次数又和普通 LED 显示屏的刷新次数相等。

首先是需要明确的是控制需要的是什么样的排列数据。一般的 LED 显示屏每个像素由红绿蓝三色组成,而图像一般是以三维矩阵存储的,三维矩阵中的每个矩阵对应于一种基色。三维矩阵中每个矩阵中相同坐标的 3 个点刚好对应一个像素的三基色的值。传普通的 LED 显示屏和传统的虚拟 LED 显示屏就是这样把三维矩阵并行送入显示屏。但是在虚拟 LED 显示屏中,每个矩阵上的点对应的颜色是单一的,这样就造成了很大一部分数据不产生实际效果,这也是传统虚拟显示控制的一大弊端。虚拟 LED 显示屏每种颜色的灯管是均匀分布的,并不需要在某个点显示不同的颜色,所以说可以只用一个一维矩阵来存储需要显示的图片的信息。这样做的好处是能够减少传输到显示屏的无用数据,使得在同等带宽条件下,本文的控制方法可以实现相比传统虚拟显示控制方法三倍的灰度。

在虚拟 LED 显示屏实际显示时,可以把虚拟 LED 显示屏看成是一个“缺项”的 LED 显示屏,如果用一个数列表示普通 LED 的一个像素点的话,那么每个点可以表示成 (R, G, B) 其中 R, G, B 为 $0\sim 255$ 的某个数。但是由于在虚拟 LED 显示屏中,每个像素点由单色的 LED 灯管组成,所以可以用红色可以用 $(R, 0, 0)$,绿色可以用 $(0, G, 0)$,蓝色可以用 $(0, 0, B)$ 来表示,这为接下来的计算提供了理论基础。

要实现虚拟显示,首先要对一般的视频做相应的处理,从虚拟显示屏的结构上就可以知道,每

个亚像素的亮度需要共享给相邻的 3 个像素,所以这个亚像素的亮度值在源视频里是与相邻的 3 个像素点的亮度相关的,这里由于只是空间域上的关系,所以只需要对普通的视频做空间域上的变换,在数字图像处理中对图像空间域做变换最常用的就是平滑滤波器,在本文中,由于采用的三角形排列方式,所以只需要用到掩膜右上角的三个像素点,并且每个像素点在亚像素计算中权值相等,所以创建如图 5 的掩膜。

0	1	1
0	0	1
0	0	0

图 5 实验用到的掩膜
Fig. 5 Mask used in experiment

此掩膜由数字图像处理中的平滑滤波器演变而来,可以看作一个特殊的平滑滤波器,但是其作用并不是为了滤波,而是为了做空间域上的变换,使得处理后的图像数据成为我们需要的数据。在对图像做处理的时候,图像的边缘填 0 用于解决掩膜在图像边缘时超出图像界限而出现的问题。这样处理过后的图像仍然是一个三维的矩阵。而我们需要的是一个一维矩阵,所以再在这个矩阵的基础上把其中我们需要的数据提取出来,具体操作如下:根据实际屏幕的排序,把对应的点的颜色数值提取出来,假如实际的屏幕排列如图 4 的那样排列,那么在图像的(1,1)点我们提取红色的亚像素的值作为 R_{11} 的值,在(1,2)点处我们提取绿色亚像素的值作为 G_{12} 的值,这样按顺序提取出来的各种亚像素的值就可以重新得到一个新的矩阵,这就是我们需要的用于虚拟 LED 显示屏的图像矩阵。

一般掩膜的前面应该添加一个归一化系数,使图像处理后的亚像素值域和图像处理前的亚像素值域相等,但是由于本文控制方法把图像矩阵从原来的三维矩阵变成了一个一维矩阵,这样在相同数据大小下就能用更多的数据表示一个亚像素,提供更高的灰度等级,所以去掉了归一化系数,这样每个亚像素由 10 bit 的数据组成,这样每个亚像素理论上能有 2^{10} 种不同的亮度,但是由于是亚像素的值直接相加,所以每个颜色的灰度为

3×2^8 ,这样平均后每个虚拟像素的实际灰度和原视频的灰度等级保持一致。但是由于亚像素的最大亮度不变,由亚像素实现的虚拟像素就会变暗,理论上最大亮度为普通 LED 显示屏的 1/3。

3 实验结果

3.1 模拟实验

首先通过普通的 LCD 显示器模拟虚拟显示的显示效果,LCD 是液晶显示器,其显示原理也是利用 RGB 三基色的混色来达到显示各种颜色的目的,并且扫描方式和新型 LED 虚拟显示器相似,所以当 LCD 每个像素点只显示一种颜色时,就可以模拟出虚拟显示屏的显示效果,实验选取一张印度小姐的图片作为显示图像,原图如图 6 所示。



图 6 处理前的图片
Fig. 6 Picture before processed

然后使用 MATLAB 对图像按照图 5 的掩膜对图像做处理(这里由于 LCD 硬件的限制,需要在掩膜前面加上归一化系数 1/3),得到新的图片,然后再把每个像素点按照图 4 的规则去掉相应的亚像素,这样就得到了一幅每个像素点都“缺项”的图片,并且这张图片的实际矩阵是三维的。由于在计算机上一维矩阵所成的图像是黑白的,所以这里保留原图三维矩阵的特征。此时把所得到的图像就可以用于模拟 LED 的虚拟显示,显示的效果如图 7 所示。

对比原图,处理后的图像亮度整体变暗,这也究这印证了在前面 2.3 节归一化处所提到的图像亮度降低的问题。在色彩方面,可以看到模拟显示的图像色彩还原没有原来的绚丽,原

因是在普通 LCD 显示屏上面硬件所支持的最大灰度等级为 8 bit,模拟虚拟显示的一个灯管灰度等级是 256 级,但是当 3 个像素共享时,每个像素得到的灰度理论上为 256/3 级,所以图像的灰度等级实际上是降低了的,一定程度上影响了颜色的表达。

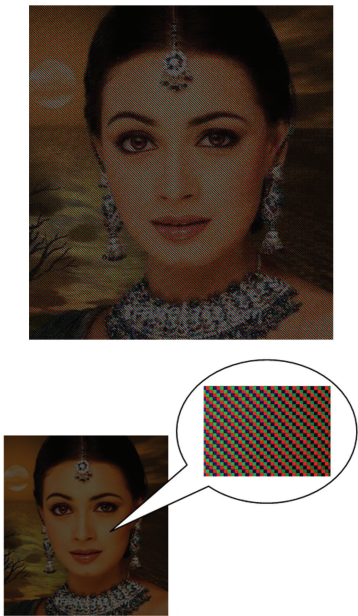


图 7 处理后的图片
Fig. 7 Picture after processed

但是通过模拟的图像可以看到图像轮廓清晰分明,能准确还原原图的信息,所以在 LCD 上的模拟表明本文提出的建模方法是可行的。而具体的效果还需要通过在虚拟显示屏上实验来验证。

3.2 在虚拟 LED 显示屏上的效果

实验所用的显示屏是最新的高密度虚拟 LED 显示屏,其分辨率为 192×192 ,点间距为 P1.25,采用等效 8 bit 灰度等级(亚像素灰度等级为 10 bit)。实验用的实现虚拟显示的视频处理器是 Spartan-6 XC6SLX16,所用的图像处理及控制系统如图 8 所示。

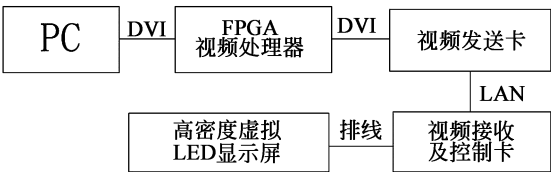


图 8 在 LED 虚拟显示系统
Fig. 8 System of virtual LED display

系统中的实现虚拟显示变换的设备是视频处理器,而视频发送卡和接收卡都可以与普通的 LED 显示屏通用,所以系统具有较强的移植性。系统搭建好之后开始进行实验,大体效果参见图 9。



图 9 在虚拟 LED 显示屏上显示的图片
Fig. 9 Picture on virtual LED screen

由于 LED 显示屏的扫描频率远远高于实验所用的相机的频率,所以不能拍摄到正确的虚拟显示屏的显示效果图。但是在人眼看来在虚拟显示屏上面的显示效果好于在 LCD 上的模拟。在虚拟 LED 显示屏上图像能够正确表达出轮廓及信息,能够达到还原原图的能力。实际实验中,虚拟 LED 显示屏的显示显示效果比模拟显示效果好,总结起来有如下两点原因:(1)虚拟 LED 显示屏的亚像素均匀分布,并且每个亚像素能实现 10bit 灰度等级,比 LCD 模拟显示和传统虚拟 LED 显示的灰度高;(2)LED 显示屏是靠不同颜色的 LED 灯管发光直接显示,并且实验采用的是高密度 LED 显示屏,在一定区域内 LED 灯管数量大,所以能达到很高的亮度,一定程度上弥补了在显示阶段每个 LED 灯管加权平均那部分损失的亮度。

3.3 传统虚拟显示建模及控制方法与基于平滑滤波的虚拟显示建模及控制方法的对比

表 1 比较的是普通 LED 显示屏,传统虚拟显示,本文提出的虚拟显示的各项性能指标,其中在计算相同灯管下分辨率的时候普通 LED 显示屏采用的亚像素的组合方式是一红一绿一蓝的组合,这是目前大部分 LED 显示屏的组合,如果在早期 LED 两红一绿蓝的组合下 LED 屏幕的分辨率是低于 800×600 的。

表 1 各种显示方法的对比
Tab.1 Comparison of three display methods

显示种类	数据位宽及灰度	相同灯管数量下的分辨率
普通 LED 显示	32 bit 位宽实现 8 bit 灰度	800×600
传统虚拟显示	32 bit 位宽实现 6 bit 等效灰度	约 1 200×1 200
本文提出的虚拟显示	10 bit 位宽实现 8 bit 等效灰度	约 1 200×1 200

在实验中,显示效果最好的是普通 LED 显示屏,虽然同样是 8 bit 灰度,普通 LED 显示色彩还原更加真实,这是因为目前 LED 灯管亮度的限制,导致虚拟显示所能够呈现的画面的最大亮度达不到普通 LED 显示的最大亮度,并且由于亚像素分散分布,混色效果不如亚像素集中分布的普通 LED 显示,所以使得图像重现不如普通 LED 显示。但是在相同灯管数量的条件下虚拟显示实现的分辨率高,弥补了这一不足。

参 考 文 献:

[1] 许峰,张俊生. LED 信息屏组合虚拟像素技术及其算法研究 [J]. 中国图象图形学报,2009,9(14):1915-1918.
Xu F, Zhang J S. The combined-virtual pixels technology for LED display and study of algorithm [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2009,9(14):1915-1918. (in Chinese)

[2] 程德诗. LED 显示屏视频图像分解力提升技术综述 [J]. 现代显示,2004,2:11-14.
Cheng S D. Acomprehensive introduction of technologies for improving LED video image resolution [J]. *Advanced Display*, 2004,2:11-14. (in Chinese)

[3] Berbecuel G. *Digital Image Display* [M]. Netherlands: John Wiley & Sons, 2001:47-65.

[4] 王桥立,郝宗潮. LED 虚拟像素原理及应用 [J]. 现代显示,2004,2:33-35.
Wang Q L, Hao Z C. The principle and application of LED panel's virtual pixel technology [J]. *Advanced Display*, 2004,2:33-35. (in Chinese)

[5] 张毅,张保民. 基于像素重组的彩色阵列超分辨率显示技术 [J]. 南京理工大学学报,2004,28(2):145-148.
Zhang Y, Zhang B M. Super-resolutioncolor array display based on pixel reorganization [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2004,28(2):145-148. (in Chinese)

[6] 陈建平,邱力为. 基于像素组合的快速哈夫变换 [J]. 计算机工程与应用,2005,22:43-45.
Chen J P, Qiu L W. A kind of fast hough transform used for line detection [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2005,22:43-45. (in Chinese)

[7] Rafael C G, Richard E W. *Digital Image Processing* [M]. 2nd Ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007.

[8] 赵小明,周筱媛,张建奇,等. LED 显示屏虚拟组合像素的分析 [J]. 西安电子科技大学学报,2012,34(4):178-183.

相比传统虚拟显示,本文提出的虚拟显示能够实现更高的灰度等级,并且占用资源更小,控制简单,所以可以应用在原来使用虚拟显示的场合。

4 总 结

在传统的虚拟显示的基础原理上,结合平滑滤波器的原理提出了一种新的虚拟显示方法,并通过模拟和实验验证理论的可行性,最后实验效果到达了预期目标。本文提出的虚拟显示模型及控制方法能够在相同的 LED 灯管数量下提供比普通 LED 显示更高的分辨率,这样降低了屏幕的成本,并且在相同灯管密度下能够实现更密度的图像显示,在有限空间条件下显示更多内容。相比传统的虚拟显示降低了带宽和硬件需求,降低了系统复杂度。并且提供了比传统虚拟显示更高的灰度等级,使得显示效果接近于普通 LED 显示屏。这符合评定 LED 显示屏灰度和分辨率的双重要求,这样在需要降低成本,提高分辨率的室内场合具有实际的应用价值。

Zhao X M, Zhou X Y, Zhang J Q, *et al.* Analysis of combined-virtual pixel in LED displays [J]. *Journal of Xidian University*, 2012,34(4):178-183. (in Chinese)

[9] 刘德连, 王博, 张建奇. 期望最大化聚类的高光谱亚像素目标检测 [J]. *西安电子科技大学学报*, 2009, 36(3): 512-516.

Liu D L, Wang B, Zhang J Q. Hyperspectralsubpixel target detection approach based on expectation maximization cluster [J]. *Journal of Xidian University*, 2009,36(3):512-516. (in Chinese)

[10] Blinn J F. What is a pixel [J]. *IEEE Computer Graphic & Applications*, 2005,25(5):82-87.

[11] HallR. Comparing spectral color computation methods [J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 1999,19(4):47-53.

作者简介:王彬宇(1990—),男,四川宜宾人,硕士研究生,主要从事 FPGA 数字图像处理与应用研究。