

# 基于韦伯定律的平板显示动态非线性变换算法

常 锋<sup>1,2\*</sup>, 孙志远<sup>1</sup>, 王瑞光<sup>1</sup>, 郑喜凤<sup>1</sup>

(1. 中科院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 中科院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 为了解决当环境亮度较暗时平板显示器(FPD)表现低灰度图像信息不够细腻的问题, 提出了基于韦伯定律的动态非线性变换算法, 构建了基于韦伯定律的动态非线性变换算法模型, 给出了算法的实现步骤。把该算法应用在分辨率为 $640 \times 480$ 的LED显示屏上, 在亮度为30 nit的实验室中设置了一组实验, 用来验证该算法。实验结果表明, 当环境亮度为30 nit时采用动态非线性变换, 人眼能识别的最小灰度比采用查表法非线性变换时的最小灰度低2级。

**关键词:** 韦伯定律; 平板显示器(FPD); 动态; 非线性变换; 查表法

**中图分类号:** TN27 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2011)01-0047-04

## Dynamic nonlinear transformation algorithm in flat panel display based on the Weber-law

CHANG Feng<sup>1,2\*</sup>, SUN Zhi-yuan<sup>1</sup>, WANG Rui-guang<sup>1</sup>, ZHENG Xi-feng<sup>1</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. Graduate School, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that the flat panel display (FPD) can not present the low grayscale of image information finely and smoothly when the ambient brightness is relatively low, a dynamic nonlinear transformation algorithm based on Weber-law was proposed. A corresponding model of dynamic nonlinear transformation was constructed based on Weber-law. The realization steps of the algorithm were illustrated. This algorithm was applied in a LED display panel whose resolution is  $640 \times 480$ , and a group of experiments were carried out in a library whose ambient brightness was 30 nit. Experimental results indicate that when the ambient brightness is 30 nit, the minimum grayscale that human eyes are able to distinguish using dynamic nonlinear transformation is 2 levels lower than that using look-up table nonlinear transformation.

**Key words:** Weber-law; flat panel display(FPD); dynamic; nonlinear transformation; look-up table

## 1 引言

目前, 主流的平板显示器(FPD, flat panel display)有液晶显示器(LCD, liquid crystal display)、等离子显示器(PDP, plasma display panel)、LED(light emitting diode)显示屏、表面传导发射显示器(SED, surface-conduction electron-emitter display)、有机电致发光显示器(OLED, organic light emitting display)等。与传统的阴极射线管(CRT, cathode ray tube)相比, FPD具有薄、轻、功耗小、辐射低和有利于人体健康等优点, 它成为显示器中的主流产品<sup>[1,2]</sup>。尽管FPD与CRT相比有诸多优点, 但是由于FPD的一些显示特性, 在显示的过程中如果不对输入的图像信息做非线性变换, FPD就会产生严重的色彩失真, 导致FPD在显示时不能满足色彩还原的需求<sup>[3-6]</sup>。

当前, 不管是LCD、PDP还是LED显示屏, 采用的非线性变换方法都是查表法<sup>[7-9]</sup>。虽然查表法非线性变换比较容易实现, 但是这种方法存在缺陷。由韦伯定律在视觉领域的数学描述<sup>[10]</sup>, 在不同的环境亮度下, 人眼对同一亮度所产生的相对亮度感觉是不相同的。当环境亮度相对较暗时, 图像信息的低灰度部分要比高灰度部分更细腻一些, 这样才能保证人眼看到的图像不失真<sup>[11-14]</sup>。为此就必须改变非线性变换系数 $\gamma$ 的大小, 而查表法非线性变换用到的 $\gamma$ 是固定的, 它不能随着环境亮度的改变而改变, 往往需要用户根据环境亮度手动调节 $\gamma$ 才能使FPD表现出更佳的显示效果。

针对这个问题, 提出了一种解决方案。它为显示器设置了多种工作模式, 每种工作模式适用于不同的环境亮度范围, 用

\* E-mail: cfckll@126.com

收稿日期: 2010-03-24 修订日期: 2010-09-06

基金项目: 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2008AA7034320B); 吉林省重大科技成果转化资助项目(09ZDZH006)

户可以根据不同的环境亮度设置不同的工作模式<sup>[15]</sup>。这种方法虽然考虑到了根据环境亮度调节  $\gamma$  的大小,但是这种调节是在一定亮度范围内的调节,调节的结果并不能完全符合韦伯定律中所描述的人眼的感知亮度和FPD的亮度之间的非线性关系。

本文提出了基于韦伯定律的 FPD 动态非线性变换算法。一方面,这种算法可以根据环境亮度实时调节  $\gamma$  的大小,实现了  $\gamma$  的动态调节;另一方面,这种算法保证了 FPD 的显示效果和韦伯定律相符。从而保证了不管在何种环境亮度下,人眼看到的都是 FPD 的最佳显示效果。

## 2 算法模型

根据韦伯定律描述的人眼的感知亮度和 FPD 的亮度间的非线性关系,设非线性变换函数  $f(x)$ , 使其对图像信息的非线性变换结果符合韦伯定律,即

$$f(x) = k \cdot x^\gamma \quad (1)$$

其中,  $k$  为非线性变换常数。由于在这里主要是研究数字化的函数处理,用一个线性离散序列  $x = [0, \dots, 2^M - 1]$  表示图像信息可能出现的所有灰度,那么非线性变换函数可以进一步表示为

$$f(x) = k \cdot \left(\frac{x}{2^M - 1}\right)^\gamma \quad (2)$$

不管何种图像信息,都可以根据式(2)得到它的非线性变换结果。

用矩阵  $F$  和  $F'$  分别表示非线性变换前和变换后的一幅图像的图像信息,如

$$F = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & K & F_{1n} \\ F_{21} & F_{22} & K & F_{2n} \\ M & M & O & M \\ F_{m1} & F_{m2} & K & F_{mn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$F' = \begin{bmatrix} F'_{11} & F'_{12} & K & F'_{1n} \\ F'_{21} & F'_{22} & K & F'_{2n} \\ M & M & O & M \\ F'_{m1} & F'_{m2} & K & F'_{mn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

它们由  $m$  行  $n$  列组成,表示这幅图像的分辨率是  $n \times m$ ,  $F'$  中的每一个元素都是由  $F$  中对应的元素根据式(2)计算得到的。由于在不同的环境亮度下,  $\gamma$  的大小是不同的,因而根据式(2)得到  $F'$  的大小也是不同的。

整个动态非线性变换过程可以通过以下 5 步完成:

1) 测量根据预设的  $\gamma$  做非线性变换时 FPD 的色坐标  $(x, y)$  和亮度  $L_v$ , 将测量结果代入

$$\begin{cases} X = \left(\frac{x}{y}\right)L_v \\ Y = L_v \\ Z = \left(\frac{1-x-y}{y}\right)L_v \end{cases} \quad (5)$$

根据式(5)计算得到 FPD 的 CIE-XYZ 光谱三刺激值。当 FPD 的分辨率是  $n \times m$  时,可以得到  $n \times m$  组 CIE-XYZ 光谱三刺激值。

2) 对 FPD 的 CIE-XYZ 光谱三刺激值进行标准化处理,如

$$\begin{cases} X' = \frac{X}{Y_{\max}} \\ Y' = \frac{Y}{Y_{\max}} \\ Z' = \frac{Z}{Y_{\max}} \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $Y_{\max}$  表示最高等级灰度对应的 FPD 亮度,同样可以得到  $n \times m$  组标准化光谱三刺激值。

3) 根据

$$\begin{bmatrix} r \\ g \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.2406 & -1.5372 & -0.4986 \\ -0.9689 & 1.8758 & 0.0415 \\ 0.557 & 0.2040 & 1.0570 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} \quad (7)$$

把标准化光谱三刺激值转化到 RGB 色空间。

4) 对式(7)中的  $r, g, b$  进行如

$$\begin{cases} R = \frac{r}{r_{\max}} \\ G = \frac{g}{g_{\max}} \\ B = \frac{b}{b_{\max}} \end{cases} \quad (8)$$

所示的标准化处理,获取  $R, G, B$  的量测值。

5) 利用  $R, G, B$  的量测值,根据

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \log(F_{ij}) \cdot \log(Y_{ij})}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \log(Y_{ij})^2} \quad (9)$$

计算得到新的  $\gamma$ ,  $F_{ij}$  为  $F$  中第  $i$  行,第  $j$  列的元素,  $Y_{ij}$  为该元素对应的  $R, G$  或者  $B$  的量测值。

## 3 算法实现

根据上述算法模型,基于韦伯定律的动态非线性变换算法通过以下 6 步实现:

- 1) 读取一幅图像的图像信息,根据预设的  $\gamma$  进行非线性变换,并将这种变换结果在 FPD 上显示出来。
- 2) 测量 FPD 的色坐标  $(x, y)$  和亮度  $L_v$ , 根据式(5)~ 式(9)的计算得到新的  $\gamma$ 。
- 3) 程序优化。当图像信息全为 0 时,非线性变换结果仍然是 0,无需做步骤 1 和 2 的工作。
- 4) 根据新的  $\gamma$  得到新的非线性变换结果。
- 5) 输出新的非线性变换结果和用于灰度显示的控制信号。
- 6) 重复上述步骤,通过实时计算得到每一幅图像信息的非线性变换结果。

按照上述 6 步,用硬件描述语言 VHDL (very-high-speed integrated circuit hardware description language) 描述该算法。在用 VHDL 描述的程序中,把该算法命名为 *dynamic\_trans*。它主要由 4 部分组成。以  $pr, pg, pb$  代表 FPD 的一组图像信息,这些信息一般存储在 FPD 视频控制系统中固定的存储单元里,显示图像时,FPD 视频控制系统的主控部分从存储单元中将这组图像信息读出; $clk$  为 FPD 视频控制系统提供的系统时钟,它的作用是给 FPD 视频控制系统的各个模块提供基准时钟,各个模块可以根据需要对该时钟分频或者倍频; $ctrlp$  是 FPD 视频控制系统给出的一组控制信号,用来协调 *dynamic\_trans* 与 FPD 视频控制系统中的其它模块之间的工作顺序;函

数  $f_{un\_weber}$  的作用是根据 2 计算并得到新的  $\gamma$  函数  $gray\_conv$  是根据函数  $f_{un\_weber}$  的运行结果得出图像信息的非线性变换结果,同时还承担着步骤 3 中提到的程序优化的任务,函数  $data\_cmd$  是根据步骤 5 的要求输出非线性变换结果和用于灰度显示的控制信号  $endq$ 。

4 实验结果及讨论

LED 显示屏是 FPD 的代表性产品之一,为了验证这种算法的可行性,把该算法应用到分辨率为  $640 \times 480$  的 LED 显示屏上。图 1 是实验中用到的 LED 视频控制系统的结构框图,其由视频接收系统、视频处理系统和视频发送系统 3 个子系统组成。视频接收系统用来接收由视频处理器、计算机显卡等数据源提供的图像信息,同时将这些图像信息存储到存储单元中;视频处理系统主要是对这些图像信息做诸如灰度控制、非线性变换、均匀化校正以及图像增强等处理,以提高 LED 显示屏的显示质量;视频发送系统则是根据不同型号的 LED 驱动芯片发送不同形式的控制信号和非线性变换后的图像信息,完成显示过程。基于韦伯定律的动态非线性变换算法的执行主程序  $dynamic\_trans$  就嵌入在视频处理系统中的可编程逻辑芯片里。

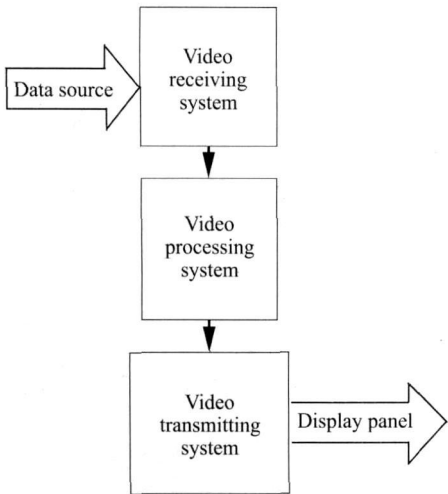


图 1 LED 视频控制系统结构框图  
Fig. 1 LED video control system block diagram

图 2 是构成 LED 显示屏的模块,它的分辨率为  $64 \times 32$ , 本实验用到的分辨率为  $640 \times 480$  的 LED 显示屏是由 150 块这种模块拼接而成的。

由于人眼能识别的 FPD 的最小灰度可以代表 FPD 显示的图像的细腻程度,所以可以采用对比查表法非线性变换和动态非线性变换时人眼能识别的最小灰度的方法评介这两种非线性变换方法的优劣。在一个亮度为 30 nit 的实验室中设置了一组实验。实验中,用到了两套 LED 视频控制系统,其中控制系统 1 采用了查表法非线性变换,控制系统 2 采用了动态非线性变换。图 3 是实验中用到的一组图片,它由 5 幅图组成。每一幅图由 2 幅不同灰度的子图组成,且左侧子图的灰度比右侧子图的灰度低 1 级,即两幅子图的灰度 (a) 分别为 1 级和 2

级, (b) 分别为 2 级和 3 级, (c) 分别为 3 级和 4 级, (d) 分别为 4 级和 5 级, (e) 分别为 5 级和 6 级。观察者观看这一组图片,如果能分辨出某一幅图子图间的灰度差别,而且不能分辨出比其灰度小的一幅图的子图间灰度差别,此时这幅图左侧子图的灰度即为人眼能识别的最小灰度。

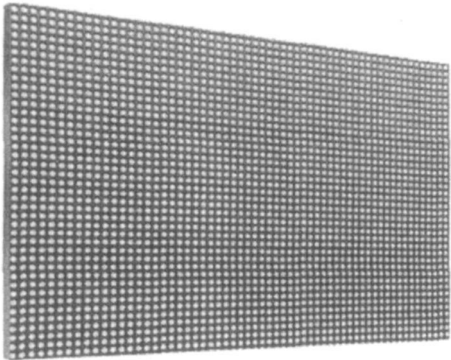


图 2 LED 显示模块  
Fig 2 LED display module

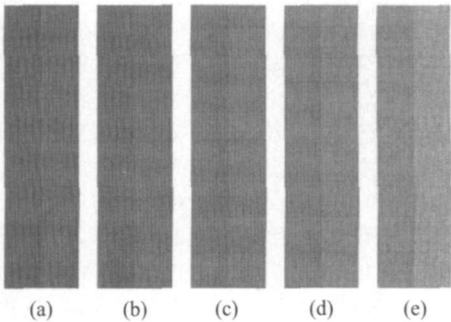


图 3 实验中用到的一组图片  
Fig 3 The group of pictures used in experiment

由于人眼观看 5 幅图像的顺序也可能影响到观察结果,为此,实验时把 5 幅图像的播放顺序都轮换了一遍。根据排列组合的原理,一次实验就需要观看  $5 \times 4 \times 3 \times 2 \times 1 = 120$  次这组图片。记录每次观察的结果,出现频率最高的结果即为人眼能识别的最小灰度。图 4 是各次观察过程中观察者识别的最小

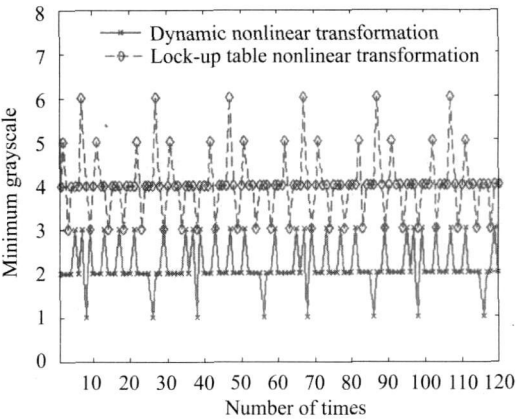


图 4 识别的最小灰度  
Fig. 4 The minimum distinguished grayscale

灰度。

对观察结果的统计见表1。实验结果表明,当采用查表法非线性变换时人眼能识别的最小灰度是4级,当采用动态非线性变换时人眼能识别的最小灰度是2级。

表1 统计的观察结果  
Tab.1 The statistical observations results

| Minimum grayscale | Occurrences (lock up table) | Occurrences (dynamic) |
|-------------------|-----------------------------|-----------------------|
| level 1           | 0                           | 9                     |
| level 2           | 0                           | 83                    |
| level 3           | 23                          | 28                    |
| level 4           | 79                          | 0                     |
| level 5           | 12                          | 0                     |
| level 6           | 6                           | 0                     |

## 5 结论

本文提出的动态非线性变换算法,根据韦伯定律提供的人眼的感知亮度和 FPD 的亮度之间的非线性关系,实现了非线性变换系数  $\gamma$  的动态调整。保证了在环境亮度相对较暗时,FPD 能时刻处于最佳的显示状态。通过在 LED 显示屏上的实验验证了这种算法的有效性和可行性。实验结果表明,采用这种算法后,当环境亮度为 30 nit 时,人眼能识别的 FPD 的最小灰度为 2 级,比采用查表法非线性变换时的最小灰度小了 2 级。因此,这种算法可以保证在相对较暗的环境亮度下,FPD 能更加细腻的表现低灰度的图像信息。此外,这种算法只需对图像信息做少量运算,可以通过硬件描述语言直接将该算法嵌入到 FPD 视频控制系统中,有利于工程实现。

## 参考文献:

- [1] Ortleby B R, Blaxton P W, Eckersley B. Picture quality in large screen projectors using the digital micro mirror[J]. Information Display, 1995, 3(5): 199-202.
- [2] WANG Xiang-hui, ZHANG Ming. A new metric for objectively assessing the quality of enhanced images based on human visual perception[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2008, 19(2): 258-262.  
王湘晖, 曾明. 基于视觉感知的图像增强质量客观评价算法[J]. 光电子·激光, 2008, 19(2): 258-262.
- [3] ZHOU Wang, GUO Wu, Sheikh H R, et al. Quality-aware images[J]. IEEE transactions on image processing, 2006, 15(6): 1680-1689.
- [4] ZHANG She-xiang, ZHANG Zhen-yu, WEN Xian-bin. Multiresolution characteristic information measurement of gray images[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2009, 20(8): 1104-1104.

马社祥, 张振宇, 温显斌. 灰度图像的多分辨特征信息度量[J]. 光电子·激光, 2009, 20(8): 1104-1104.

- [5] YUAN Fei, HUANG Lian-fen, YAO Yan et al. Image quality evaluation based on visual masking effect and singular value decomposition[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(4): 706-713.  
袁飞, 黄联芬, 姚彦等. 基于视觉掩盖效应和奇异值分解的图像质量评测方法[J]. 光学精密工程, 2008, 16(4): 706-713.
- [6] Grinea P, Thomas M. User quality of service in multimedia presentation[J]. IEEE Transactions on multimedia, 2005, 7(4): 786-789.
- [7] ZENG Ming, ZHANG Jian-xun, WANG Xiang-hui, et al. A novel algorithm for image enhancement based on human visual properties and local spatial activity weighted processing[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2005, 16(3): 363-367.  
曾明, 张建勋, 王湘晖, 等. 基于视觉特性和复杂程度加权处理的图像增强新算法[J]. 光电子·激光, 2005, 16(3): 363-367.
- [8] Ro Y M, Huh Y, Kim M. Visual content adaptation according to user perception characteristics[J]. IEEE Transactions on multimedia, 2005, 7(3): 435-445.
- [9] ZENG Xing-quan, ZHU Ying-jun, SUN Rong-hai, et al. Color image information hiding method of large capacity based on the bit plane[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2009, 20(8): 1092-1095.  
张星全, 祝英俊, 孙荣海, 等. 基于平面的彩色图像大容量信息隐藏算法[J]. 光电子·激光, 2009, 20(8): 1092-1095.
- [10] Winkler S. Issues in vision modeling for perceptual video quality assessment[J]. Signal Processing, 1999, 78(2): 231-252.
- [11] Shin H J, Kwack J. A novel driving system for high performance true color FED[J]. IEEE transactions on consumer electronics, 2001, 47(6): 802-808.
- [12] LI Shi, ZHANG Bao, SUN Hui. Real-time restoration of image blurred by rotational motion[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(3): 648-654.  
李仕, 张葆, 孙辉. 旋转运动模糊的实时恢复算法[J]. 光学精密工程, 2009, 17(3): 648-654.
- [13] Hands D S. A basic multimedia quality model[J]. IEEE Transactions on multimedia, 2004, 6(6): 806-816.
- [14] YAO Jian-min, HUANG Bing-le, GUO Tai-liang. Human visual characteristics guided LCD backlight luminance scaling method for power minimization[J]. Optoelectronics Letters, 2009, 5(3): 333-336.
- [15] Pinson M H, Wolf S. A new standardized method for objectively measuring video quality[J]. IEEE transactions on broadcasting, 2004, 50(3): 312-322.

作者简介:

常 锋 (1983-), 女, 陕西西安人, 博士, 主要从事平板显示驱动技术的研究。