

基于 Direct 3D 的 3 维自由立体 显示软件双视点设置

刘文文 吕国强 邓善熙

(合肥工业大学仪器科学与光电工程学院,合肥 230009)

摘要 如何生成具有适当水平位差的左右眼平面图片是自由立体显示软件设计的核心问题。针对该问题,首先以双眼能够舒适地融合显示屏上的最大水平位差为依据,在 Microsoft Direct 3D 构建的 3 维模型空间体系内,寻找模型空间的视点与显示屏上水平位差之间的理论关系;然后,以视者在真实空间浏览 3 维模型真实感强、视觉舒适为原则来确定模型空间视点位置和投射表面平移量;最后,还提出了调整立体视觉效果参数,并阐述了它们对立体视觉效果的影响机制。该研究成果已经投入使用,并获得了理想的立体视觉效果。

关键词 自由立体显示 Microsoft Direct 3D 视差 水平位差

中图分类号: TP391.41 TP311.5 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2006)03-0357-05

Research on the Software for Setting up Bi-viewpoint in Autostereoscopic 3D Display Based on Direct 3D

LIU Wen-wen, LV Guo-qiang, Deng Shan-xi

(The School of Instrument Science & Opto-electronic Engineering Hefei University of Technology, Hefei 230009)

Abstract It is a crucial problem how to produce two pictures for left-eye and right-eye respectively with proper horizontal position disparity in autostereoscopic 3D display. The theoretic interrelation between the left-viewpoint and right-viewpoint in the model space by Direct 3D and the horizontal position disparity in the display screen has been established in this paper. The method for getting proper horizontal position disparity has been put forward aiming to provide proper sensation of depth as in real world and the most comfortable vision, and the theoretic formula is presented as well. Furthermore, two parameters, the position of left-viewpoint and right-viewpoint in model world and the movement of the perspective plane, have been given in this paper, which directly affects the view result. The conclusions from this paper have gone into application and marvelous auto-stereoscopic 3D view has been achieved.

Keywords autostereoscopic 3D display, Microsoft Direct 3D, parallax, horizontal position disparity

1 引言

人观测空间物体时之所以产生立体感是由于空间物体在左右视网膜上各成稍有差别的两幅图像,即物体特征点在双眼视网膜上的像存在位置差异的缘故,这种位置差异称为视差,它是产生立体感(深度感)的重要因素^[1]。自由立体显示器也正是

利用了人的视差因素^[2],采用软件技术在显示屏上生成两幅图片,并使这两幅图片对应点在显示屏上具有位差,即左、右两幅图对应点之间的距离。位差和视差的概念类似,只不过位差是指对应点在显示屏上的位置差异,而视差则是指对应点在双眼视网膜上的位置差异。位差又分为水平位差和垂直位差,其与视差对应,其中水平位差是深度感的主要决定因素。自由立体显示器可通过软件来生成两幅图

基金项目:安徽省“十五”科技攻关重点项目(01022010)

收稿日期:2005-03-14;改回日期:2005-06-24

第一作者简介:刘文文(1961~),女,1982年获上海理工大学学士学位,现为合肥工业大学仪器科学与光电工程学院副教授,在职博士研究生。主要研究方向为测控仪器、自由立体显示软件技术,已发表论文20余篇。E-mail liu_wenw@163.com

片,它们取自左右两视点在同一物体的观察,并通过光学设备把左视点图片送入人的左眼,右视点图片送入人的右眼。由于两幅图片对应点之间存在的水平位差,其在双眼中形成水平视差,因此,正常情况下,双眼融合这两幅图片,在头脑中就重构了一幅具有深度感的空间立体图像。由于以这种原理构造的显示器不仅需要佩戴诸如偏振眼镜、互补色眼镜或液晶眼镜等辅助设备,而且裸眼在显示屏前特定位置上就可以浏览立体图像^[3],故称为自由立体显示器。

在使用自由立体显示器浏览虚拟 3 维场景时,必须由软件将显示内容(3 维模型或场景)分解成具有水平位差的两幅左右眼图片^[4],而 Direct 3D 是微软开发的用于创建和管理 3 维图像的应用程序接口,已广泛应用于广告、游戏等媒体软件开发上,为此可以使用 Direct 3D 所构建 3 维模型空间体系及其视点操控和场景投射机制来创建具有水平位差的左右眼图片。

左右眼图片上的对应点在显示屏上的水平位差必须在双眼能够融合的尺度范围之内,不仅双眼疲劳感应该最小,而且所形成的 3 维模型深度感应具有最小的畸变,还必须真实感强,并需依此作为在 3 维模型空间中设置的视点的基本原则。本文以双眼能够舒适地融合显示屏上的最大位差为依据,借助于 Direct 3D 构建的 3 维模型空间体系,先寻找模型空间的视点位置和投射表面与显示屏上水平位差之间的理论关系,再以真实空间所观察的 3 维模型真实感强、视者浏览舒适为原则来确定模型空间的视点和投射表面位置。

2 双眼能够融合的位差尺度及其深度感

左眼图片和右眼图片的对应点 L 、 R 在显示屏上的位置如图 1 所示:当 R 在 L 的左边时,则 L 、 R 之间的距离为负位差,这样通过双眼融合,看上去空间点 A 就在显示屏之前;当 L 在 R 的左边时,则 L 、 R 之间的距离为正位差,这样看上去空间点 A 就在显示屏之后;当位差值减小时,深度感减小。

理论上而言,在正常条件下,双眼能够融合的显示屏上的最大水平位差等于双眼瞳距^[5],但对于桌面显示器而言,如果采用该位差尺度,则视者会感到不舒服,因为此时所形成的深度过大。由于双眼在浏览时,必须调焦到显示屏上,但在位差的作用下又

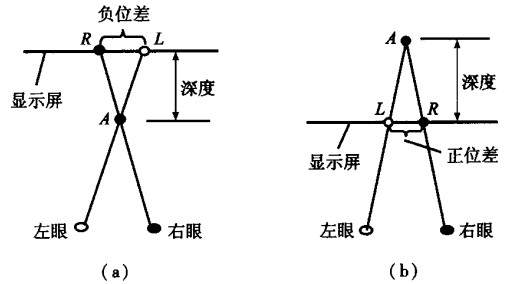


图 1 位差
Fig. 1 The disparity

必须聚焦到不同的深度,这样双眼就必须大范围调节聚焦,从而易产生疲劳感^[2]。为了最大限度减小疲劳感,实际的水平位差应比瞳距小得多。根据前人的研究^[5],在滞留时间大于 2s 时,双眼能够融合的位差是:正位差对双眼的张角 $\theta = 1.57^\circ$;负位差对双眼的张角 $\theta = -4.93^\circ$ (见图 2);但在滞留时间更短的情况下,双眼能够融合的位差大为减小: $\theta = -27' \sim 24'$ 。考虑到动态显示,如果设定 θ 在 $(-30' \sim 30')$ 之间,那么,左右眼图片上的对应点在显示屏上所形成的理想位差尺度 s 应该在 $(-l/115, l/115)$ (l 为双眼到显示屏之间的距离,单位 mm),在这种情况下,视者观察显示屏就可以舒适地将左右眼图片融合成为一幅具有深度感的立体图像,当两幅图片上的对应点在显示屏上的位差为 s 时(见图 2),则深度为

$$T = \frac{sl}{d - s} \tag{1}$$

其中, d 为双眼瞳距。当位差 s 为正值时,空间点 A 在屏内;当位差 s 为负值时,空间点 A 在屏外。由式(1)不难看出,在显示屏上位差尺度相同的条件下,负位差产生的深度小于正位差产生的深度。

3 Direct 3D 3 维模型空间体系

Direct 3D 是用投射变换来将视点空间中的各种 3 维对象映射成 2 维平面图片,而且变换矩阵与视锥参数有确定关系(见图 3)。如在视点坐标系内,设 O 为视点位置; β 为水平面视锥角; z_n, z_f 为最近(下角 n 代表 near)与最远(下角 f 代表 far)切平面的位置, k 为显示表面宽高比。所谓投射变换就是把视锥两切平面之间的空间任意点映射到归一化投射表面上,其变换矩阵为

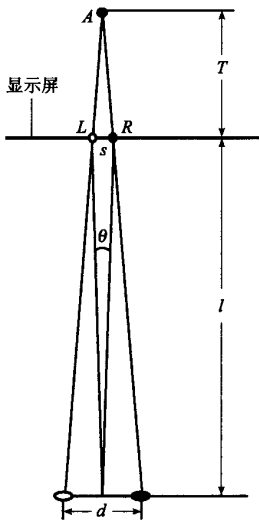


图 2 深度

Fig. 2 The depth

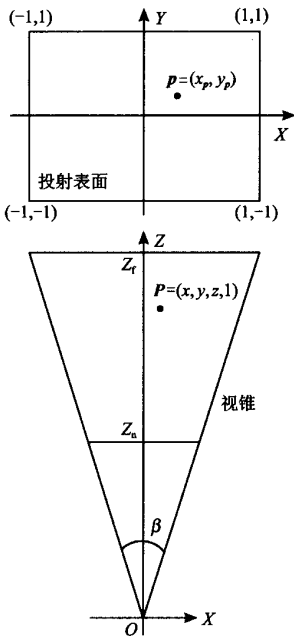


图 3 视锥与投影表面

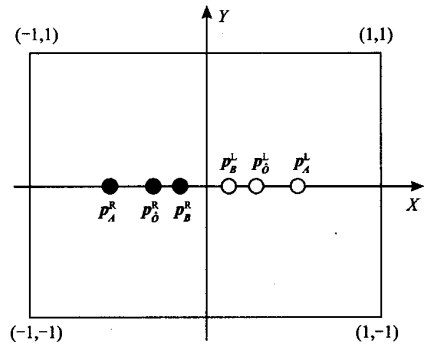
Fig. 3 The viewing frustum and the perspective plane

$$R = \begin{bmatrix} \frac{1}{\text{tg}(\beta/2)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{k}{\text{tg}(\beta/2)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{z_f}{z_f - z_n} & 1 \\ 0 & 0 & \frac{-z_f z_n}{z_f - z_n} & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

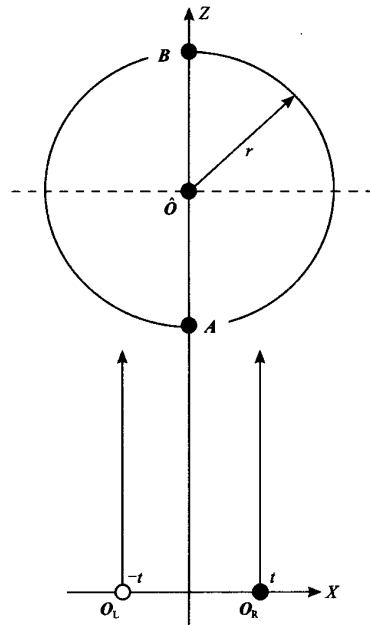
如果两切平面之间有一点 $P = (x, y, z, 1)$, 通过投影变换成为显示表面上的点 $p = (x_p, y_p) = P \cdot R$, 那么

$$x_p = \frac{x}{\text{tg}(\beta/2) \cdot z} \quad y_p = \frac{k \cdot y}{\text{tg}(\beta/2) \cdot z} \quad (3)$$

在 Direct 3D 中, 由于 3 维模型的尺度是由包容模型的透明球的半径来表征的, 而且模型的位置 (包括视点的位置) 由世界坐标系来表征, 因此视点在世界坐标系中的位置就决定了 3 维模型映射到投影表面上的形态。在设计 3 维立体显示软件时, 可通过设置左右视点来构造左右视锥和左右投影表面, 其上对应点之间将会有位差, 由于不希望产生垂直位差, 所以左右视锥视线应相互平行 (见图 4(b))。在世界坐标系 XOZ 内, 模型的位置是:



(a) 叠合的投影表面



(b) 世界坐标系

图 4 世界坐标系下投影变换

Fig. 4 The perspective transform in the world coordinates

包容球中心位置为 $\hat{O} = (0, 0, b)$ 、包容球半径为 r ；左右视点的设置是： O_L 和 O_R 在 XOZ 平面 ($y = 0$) 内，位置为 $O_L = (-t, 0, 0)$ 和 $O_R = (t, 0, 0)$ ，(下角 L 代表 left, R 代表 right)，视线方向与 Z 坐标方向平行。这样，在左视点 O_L 所构成视点坐标系中，包容球上的 3 点 A 、 \hat{O} 和 B 的坐标就分别为 $A = (t, 0, b - r)$ 、 $\hat{O} = (t, 0, b)$ 和 $B = (t, 0, b + r)$ ，由式(3)可得，它们映射到左眼投射表面上的位置为

$$\begin{aligned} x_A^L &= \frac{t}{\text{tg}(\beta/2) \cdot (b - r)} & y_A^L &= 0 \\ x_{\hat{O}}^L &= \frac{t}{\text{tg}(\beta/2) \cdot b} & y_{\hat{O}}^L &= 0 \\ x_B^L &= \frac{t}{\text{tg}(\beta/2) \cdot (b + r)} & y_B^L &= 0 \end{aligned}$$

同样，在右视点 O_R 所构成视点坐标系中， A 、 \hat{O} 和 B 点的坐标分别为 $A = (-t, 0, b - r)$ 、 $\hat{O} = (-t, 0, b)$ 和 $B = (-t, 0, b + r)$ ，它们映射到右眼投射表面上的位置分别为

$$\begin{aligned} x_A^R &= \frac{-t}{\text{tg}(\beta/2) \cdot (b - r)} & y_A^R &= 0 \\ x_{\hat{O}}^R &= \frac{-t}{\text{tg}(\beta/2) \cdot b} & y_{\hat{O}}^R &= 0 \\ x_B^R &= \frac{-t}{\text{tg}(\beta/2) \cdot (b + r)} & y_B^R &= 0 \end{aligned}$$

由图 4 可见，由于左右投射平面叠合(列像素奇偶插^[4])在一个表面上(见图 4(a))，因此世界坐标系中 A 、 \hat{O} 和 B 3 点(图 4(b))在叠合表面上形成的水平位差分别为

$$\begin{aligned} \hat{s}_A &= (x_A^R - x_A^L) \frac{W}{2} = \frac{-W \cdot t}{\text{tg}(\beta/2) \cdot (b - r)} \\ \hat{s}_{\hat{O}} &= (x_{\hat{O}}^R - x_{\hat{O}}^L) \frac{W}{2} = \frac{-W \cdot t}{\text{tg}(\beta/2) \cdot b} \\ \hat{s}_B &= (x_B^R - x_B^L) \frac{W}{2} = \frac{-W \cdot t}{\text{tg}(\beta/2) \cdot (b + r)} \end{aligned} \quad (4)$$

在此， W 为显示表面宽度(mm)。由此可见，由于 3 点全部构成负位差，因此模型将全部悬浮在显示屏之前，其中 A 点的负位差最大。由于此时负位差过大，已超出人眼能够融合的位差尺度范围，而且显示模型将有较大的畸变，因此视者必然会有不舒适感。

4 理想位差的实现

理想的位差应该是 B 点形成正位差， A 点形成负位差， \hat{O} 点有少许的正位差，这样才能实现模型的前部跃出显示屏，而中间以后的部分则位于显示屏

之内，以形成最接近于真实的深度感，显然仅仅通过设置视点是不能实现这一目标的。如果在上述视点设置的基础上，再让右视点投射表面向右平移一个距离 c ，那么， p_A^R 、 $p_{\hat{O}}^R$ 和 p_B^R 3 点同时向右平移一段距离 c ，然后如果再将左右投射表面叠合成一个表面(见图 5)，则显然此时位差为

$$\begin{aligned} s_A &= (x_A^R - x_A^L + c) \frac{W}{2} = \left(\frac{-2t}{\text{tg}(\beta/2) \cdot (b - r)} + c \right) \frac{W}{2} \\ s_{\hat{O}} &= (x_{\hat{O}}^R - x_{\hat{O}}^L + c) \frac{W}{2} = \left(\frac{-2t}{\text{tg}(\beta/2) \cdot b} + c \right) \frac{W}{2} \\ s_B &= (x_B^R - x_B^L + c) \frac{W}{2} = \left(\frac{-2t}{\text{tg}(\beta/2) \cdot (b + r)} + c \right) \frac{W}{2} \end{aligned} \quad (5)$$

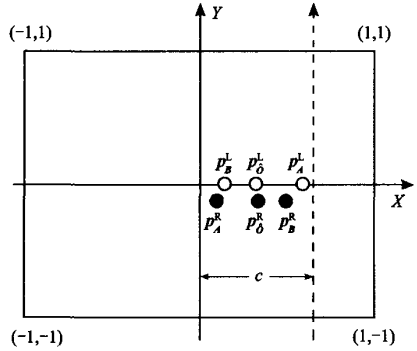


图 5 右眼投射表面平移

Fig. 5 Moving the right perspective plane

如果 $c \geq 2t / [\text{tg}(\beta/2) \cdot b]$ ，即 \hat{O} 点在显示屏上实现正位差(见图 5)，其大约在显示屏稍微向内部位，则 A 和 B 点就有理想的位差，即 A 点有负位差，看上去在显示屏最外； B 点有正位差，看上去在显示屏最内。如果正负位差尺度相近，且位于双眼能够舒适融合的尺度范围之内，那么就实现了理想立体视觉效果。

例如，如果自由立体显示器的显示屏宽度 $W = 302.94\text{mm}$ ，则理想的浏览距离为 $l = 700\text{mm}$ ，为了使不同尺度的模型在显示屏上的尺度相近，可取 $b = 2r$ 。当取 $c = 0.08$ ，则 $t / [\text{tg}(\beta/2) \cdot 2r] = 0.031$ ，即 $t = 0.062r \cdot \text{tg}(\beta/2)$ 时，由式(5)得， \hat{O} 点的位差为 $s_{\hat{O}} = 2.72\text{mm}$ ；同理， A 点的位差为 $s_A = -6.665\text{mm}$ ，那么，位差对双眼的张角为 $\theta_A = s_A / l = -32.7'$ (见图 2)； B 点的位差为 $s_B = 5.85\text{mm}$ ，同样， B 点位差对双眼的张角为 $\theta_B = s_B / l = 28.7'$ 。

如果双眼瞳距 $d = 63.5\text{mm}$ ^[5]，则由式(1)可得， A 、 \hat{O} 和 B 3 点的深度为 $T_A = -0.095l$ ； $T_{\hat{O}} = 0.04l$ ；

$T_b = 0.12l$ 。由此可见,由设置的视点所形成的位差在双眼能够舒适融合的范围之内,不仅不会有太大的疲劳感,而且显示的 3 维模型在深度感上接近真实。

如果考虑到模型沿世界坐标系 Z 方向移动,比如动画显示 3 维模型,那么由于 b 是变化的,因此,此时的视点也必须动态设置: $t = 0.031 \cdot b \cdot \text{tg}(\beta/2)$, 否则,当模型较小时,会有较大的双影。

5 结 论

在自由立体显示软件中,应该设置以下两个参数来调整立体感:模型空间视点位置 t 和右投射表面向右的平移量 c 。其中,加大 t 将增加正负位差的差值,在真实空间其可使显示模型的整体深度感加大和使模型深度方向上变长,同时使整体位差向负方向增加,使显示模型向屏外伸展,这样长时间浏览会有疲劳感; c 的作用是平衡负位差,即加大 c 将使整体负位差减小、正位差增加,使显示模型向屏内移动,反之亦然。由于自由立体显示器硬件已经决定了双眼与显示屏的最佳浏览距离 $l^{[5]}$,因此在正负位差的差值相同的情况下,双眼瞳距 d 小,将会有较大深度感,反之亦然。为了保证视者在浏览显示模型时有相近的深度感,在确定 t 时,应该考虑不同的

瞳距:若瞳距小,则应相应减小 t ,以便通过减小正、负位差的差值来平衡小瞳距,反之亦然。总之, t 决定了显示模型整体深度感; c 决定了显示模型跃出显示屏的深度。

将上述视点调整方法应用到笔者所设计的一款自由立体显示器上,已经获得良好的显示效果。

参考文献 (References)

- 1 Eichenlaub Jesse B. Progress in autostereoscopic display technology at dimension technologies Inc. [J]. Proceedings of SPIE, 1991, 1457: 290 ~ 301.
- 2 Chizuka Tani. Koa-rinjou Display[M]. Translated by Xue Pei-ding, Beijing: Published by Science Press, 2003; 77 ~ 134. [[日]谷千束. 高临场感显示[M]. 薛培鼎译. 北京:科学出版社, 2003: 77 ~ 134.]
- 3 WANG Yuan-qing. Autostereoscopic display based on LCD [J]. Liquid crystal & Display, 2003, 18(2): 116 ~ 120. [王元庆. 基于 LCD 的自由立体显示技术[J]. 液晶与显示, 2003, 18(2): 116 ~ 120.]
- 4 Eichenlaub Jesse B. A lightweight, compact 2D/3D autostereoscopic LCD backlight for games, monitor, and notebook application [J]. Proceedings of SPIE, 1998, 3295: 180 ~ 185.
- 5 Bos Karen J. Reducing the accommodation and convergence difference in stereoscopic three-dimensional displays by using correction lenses [J]. Optical Engineering, 1998, 37(3): 1078 ~ 1080.