

基于双视点重构的3维自由立体 显示前景视觉的优化

刘文文 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 基于双视点重构的立体显示原理建立虚拟3维空间到真实空间的映射关系, 据此诠释前景畸变产生的原因是虚拟空间到真实空间映射关系的非线性, 进而提出以改变视点设置与变形虚拟3维空间相结合的方法改变水平位差分布, 实现前景立体视觉的优化, 并且评估了该方法校正前景畸变的效果以及对前景和远景双影的影响, 最后, 提出基于动态视点更新和动态空间压缩的立体全景视觉优化策略。与美国DTI公司的3维立体显示软件TextureEyes相比, 笔者据此开发的3维立体显示软件的前景畸变和双影减小明显。

关键词 立体显示 视差 水平位差 立体视觉

中图分类号: TP391 TP311.5 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2007)06-1119-05

Optimization of Stereoscopic Foreground Perspective Images in Autostereoscopic 3D Display Based on Bi-viewpoint Restructure

LIU Wen-wen, DENG Shan-xi

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

Abstract The mapping transformations from virtual space to real space are built according as the principle of autostereoscopic display based on bi-viewpoint restructure. And the reason for the foreground stereoscopic distortion is found out as follows: the mapping transformations from the virtual space to the real space are nonlinear. The horizontal position disparity on screen could be redistributed by means of changing the setting of the bi-viewpoint and compressing the virtual space, which is a new method brought forward in order to optimize the foreground stereoscopic vision in 3D autostereoscopic display. The effects to foreground and background bi-images as well as the degree of reducing the foreground stereoscopic distortion have been evaluated with regard to this method. Further, a strategy for optimization full-ground stereoscopic vision is introduced based on the dynamic update of the bi-viewpoint and the dynamic compression of the virtual space. Compared with American Dimension Technologies Inc.'s 3D autostereoscopic display software(TextureEyes), the software developed on the basis of this paper can significantly reduce the foreground stereoscopic distortion and the bi-images.

Keywords autostereoscopic display, parallax, horizontal position disparity, stereoscopic vision

1 引言

在基于双视点立体重构的立体显示软件设计中, 首先在虚拟空间设置双视点摄取左、右眼图片, 再将左、右眼图片奇、偶列插后投射到立体显示屏上。当人眼位于显示屏前特定位置时, 通过立体显

示器的视差照明或其他光学作用, 使左眼只看到左眼图片, 而看不到右眼图片; 右眼只看到右眼图片, 而看不到左眼图片。由于两幅图片上的对应点在显示屏上的水平位差在双眼中形成视差, 当水平位差在一定尺度范围内时, 双眼将融合这两幅图片, 在头脑中重构一幅具有深度感的空间立体图像^[1]。

这种基于双视点重构的立体显示原理在视觉效

基金项目: 安徽省“十五”科技攻关重点项目(01022010)

收稿日期: 2006-01-04; 改回日期: 2006-02-23

第一作者简介: 刘文文(1961~), 女, 副教授, 在职博士生。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

果上存在两方面的问题,一是立体图像的畸变^[2]。立体显示是在虚拟空间通过设置双视点来摄取虚拟空间场景,尽管摄取的左、右两幅图片是无像差的完美的^[3],但在真实空间双眼是依据显示屏上对应点的水平位差转换成的视差来重构深度的,由于此时视差形成的机制与双目在真实空间的视差形成机制不同,因此造成立体图像的畸变,特别是对于前景图像,畸变是相当明显的。对于立体显示而言,最能体现其视觉震撼力的图像就是前景图像,此时的显示对象跃出显示屏,给人一种能够触摸的深度感,如果此时重构的立体图像有畸变,那将对立体显示的视觉效果产生严重的负面影响,所以有必要对前景畸变进行校正。

另一个问题是双影^[2]。从基于双视点重构的立体显示原理看,产生双影的原因是双目无法融合虚拟空间中的场景在左、右视点图片上所成的像,引起这种不能融合的原因是多样而复杂的。例如由于虚拟空间中的特征点在显示屏上所构成的水平位差尺度太大,超出了双眼能够融合的范围,这是产生双影的主要原因;还有一些次要的原因,例如双视点摄取虚拟空间场景中某一对象时,拍摄左、右眼图片的角度不同,在一幅图片上的显示对象边界轮廓在另一幅图片上可能找不到相应的配对轮廓,使双眼无法融合;在前景显示时,由于立体图像的畸变,额外地增加了水平位差,引起明显的双影;而在远景显示时,对象的显示尺度较小,而深度较大,平均水平位差尺度较大,此时,平均水平位差尺度与显示对象尺度比例失衡,双影也相当明显,这种现象在动画显示时尤为突出;再由于显示对象与显示背景在色彩、光学特性等方面匹配关系的不恰当干扰了双目对水平位差的融合能力,也会使双影变得明显。从产生双影的主要原因上看,通过改变虚拟空间双视点的设置来减小水平位差是最“直接”的减小双影的方法,但是,水平位差是形成深度感(立体感)的要素,减小水平位差的同时也减小了深度感,所以双影与深度感是相伴而生的,以减小双视点之间的距离牺牲深度感来减小双影是不可取的。

畸变和双影的严重程度均与水平位差的尺度与分布有关,所以对前景视觉效果的评价应该建立在一定的水平位差尺度基础上,这一水平位差应该是在双眼能够舒适融合的尺度范围之内,而水平位差最终体现在深度感上,故可以用一定的深度感作为参照系来评价前景视觉效果。本文首先建立虚拟空间到真实空间映射关系,据此诠释前景畸变和双影产生的机理;进而提出以改变视点设置和变形虚拟

3 维空间相结合的方法改变水平位差分布来实现优化前景视觉效果的新方法,并就其在前景畸变校正效果以及前景和远景的双影尺度做出评估;最后,提出动态视点设置和虚拟 3 维空间动态变形相结合来改善全景立体视觉效果策略。

2 虚拟空间到真实空间的映射

在 3 维立体显示软件设计中,通常以包容 3 维显示对象的透明球半径 r 表征显示对象的尺度,其位于坐标系 $OXYZ$ 所定义的虚拟空间内,同时在该虚拟空间内设置左、右视点 $O_L(-t, 0, 0)$ 和 $O_R(t, 0, 0)$ (见图 1(a)),经过投射变换将 3 维模型透射到归一化的虚拟投射表面,设该虚拟投射表面与 XOY 平面平行,其与 XOY 平面之间的距离为 b_0 ,经过列插叠合^[1,4],投射到显示屏。由于左、右视点在虚拟空间坐标系中的位置不同,左、右视点的投射变换矩阵也不同,那么虚拟空间中的显示对象在左、右投射表面上所成的像的位置就不同,通过列插叠合,显示对象上的一点 $P(x, y, z)$ 在显示屏上形成了两像点 $p_L(x_L, y_L)$ 和 $p_R(x_R, y_R)$,见图 1(b),由于双视点的视线方向相互平行, p_L 和 p_R 之间只能形成水平方向的距离,称为水平位差,将这一过程定义为虚拟空间到显示屏的映射。空间点 $P(x, y, z)$ 映射到显示屏上的两点 p_L 和 p_R 之间的水平位差为^[5]

$$s = x_R - x_L = \frac{t \cdot w}{t\beta(\beta/2)} \cdot \left(\frac{1}{b_0} - \frac{1}{z} \right) \quad (1)$$

式中, w 为显示屏宽; β 为视锥水平方向视锥角^[5]。水平位差只与空间点的 Z 坐标有关,表明虚拟空间中任一与 XOY 平行的平面上的所有点具有相同的水平位差,而且当虚拟空间点 P 位于虚拟显示表面之前时,其映射到显示屏上,右眼图片上的点 $p_R(x_R, y_R)$ 在左图片上点 $p_L(x_L, y_L)$ 的左边,所形成的水平位差为负值;而当 P 位于虚拟显示表面之后时,其在右眼图片上的点 $p_R(x_R, y_R)$ 在左图片上点 $p_L(x_L, y_L)$ 的右边,在显示屏上所形成的水平位差为正值。欲使双眼能够舒适地将水平位差转换成深度感,则 s 必须在双眼能够融合的位差尺度范围之内。根据前人的研究^[6],在滞留时间大于 2s 时,双眼能够融合的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张角减小为 $\theta = -27' \sim 24'$ 。对于自由立体显示器,其硬件已经

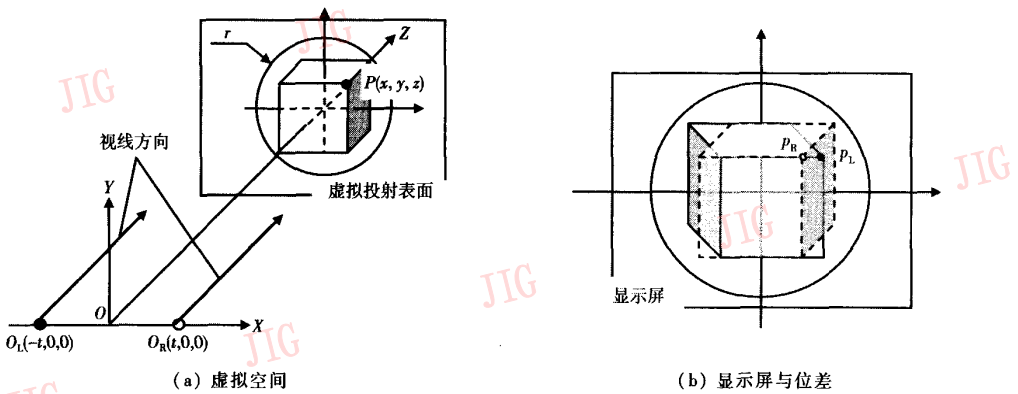


图 1 虚拟空间到显示屏的映射

Fig. 1 Mapping from virtual space to display screen

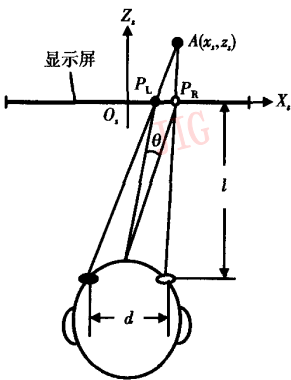


图 2 深度

Fig. 2 The depth

决定了最好的观察距离 l (mm), 据此, 双眼能够融合的位差约为 $s = -l/130 \sim l/150$ (mm)。

针对显示屏上的水平位差 s (见式(1)和图 2), 双眼将虚拟空间中的点 $P(x, y, z)$ 通过显示屏上是位差 s 融合成为真实空间 $O_s X_s Y_s Z_s$ 中的点 $A(x_s, z_s)$ 。

$$\begin{aligned} x_s &= x_R + \frac{(x_R - d/2)}{l} z_s, \\ z_s &= \frac{sl}{d - s} \end{aligned} \quad (2)$$

在此, d 为瞳距 (mm)。见式(2), 深度 z_s 与位差 s 成正比。当 z_s 为负值时称为前景; 为正值时称为内景; 而当其为较大正值时称为远景。通常将式(2)定义为显示屏到真实空间的映射。

3 前景立体视觉效果的优化方法

将式(1)代入式(2), 就实现了虚拟空间到真实

空间的映射。若虚拟空间中包容显示对象球的半径为 r ; 球心在虚拟空间中沿 z 方向移动, 根据映射关系, 该球映射到真实空间的立体图像见图 3, 前景在 z 方向的尺度几乎是内景的两倍, 使视觉效果上前半球表面过大, 后半球表面过小, 显示对象前部过大而后部过小, 畸变明显。根据式(1), 对于虚拟空间显示对象上的点 P , 若其位于最前 $z = b_0 - r$ 时所形成的负位差将是其位于最后 $z = b_0 + r$ 的点所形成的正位差 3 倍 (当 $b_0 = 2r$ 时)。从式(2)不难发现, 在位差尺度相同时, 负位差所产生的深度小于正位差所产生的深度, 这在一定程度上缓解了前景畸变, 但是由于双眼能够融合的位差尺度比瞳距小得多, 所以从图 3 上看, 前景深度依然是内景深度的 2 倍。再者, 由于虚拟空间到显示屏的映射所形成的前景负位差过大, 在畸变的同时伴随较为严重的双影。对于远景的显示内容, 随着 z 值的加大, 畸变将变得不明显。

改善前景立体视觉效果可以从减小前景负位差着手, 最简单可行的方法是以虚拟投射表面为分界线压缩虚拟模型空间的 z 方向的坐标, 使包容 3 维模型的球成为 z 方向的扁球。设压缩因子为 k ($0 < k \leq 1$), 根据式(1), 对于虚拟空间包容球上的点 P , 压缩后其位于最前 $z = b_0 - kr$ 时所形成的负位差与其位于最后 $z = b_0 + kr$ 时所形成的正位差将随着 k 的减小而趋于一致并相应减小 (当 $b_0 = 2r$ 时), 这样可以有效地改善前景负位差与内景正位差的不平衡, 但是此时由于虚拟空间 3 维模型本身的深度减小将使立体深度感同步减小, 弥补这一损失的直接方法就是扩张虚拟空间双视点之间的距离。设扩张因子为 v ($1 \leq v \leq 2$), 那么考虑到虚拟模型空间 z 方向压缩和双视点距离的扩张后, 虚拟空间 $P(x, y, z)$

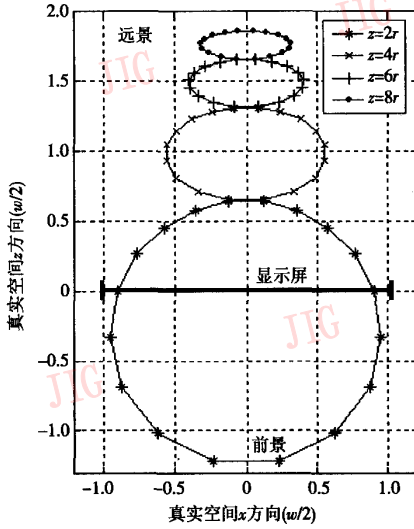


图 3 从虚拟到真实空间的映射

Fig. 3 Mapping from virtual to real space

映射到显示屏的位差改为

$$s = \frac{v \cdot t \cdot w}{\text{tg}(\beta/2)} \cdot \left(\frac{1}{b_0} - \frac{1}{b_0 + k(z - b_0)} \right) \quad (3)$$

图 4 展示了不同压缩和扩张因子的组合所产生的包容球在真实空间的立体视觉效果,显然,随着 k 的减小和 v 的增加,包容球上数据点的不均匀性明显减小,前景畸变得到明显改善。

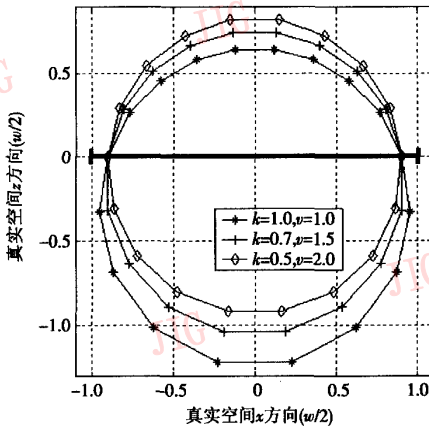


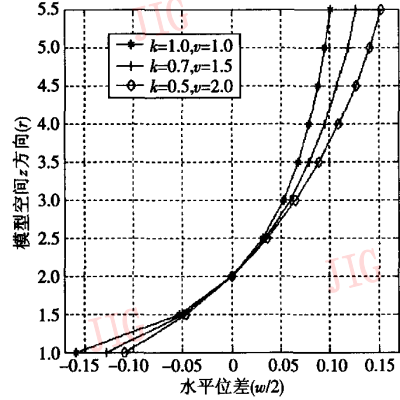
图 4 校正后的前景立体效果

Fig. 4 Corrected stereoscopic view in the foreground

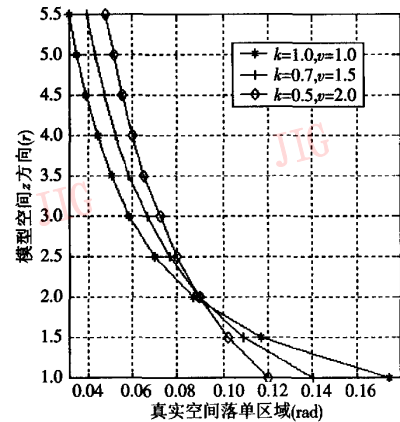
4 全景立体视觉效果的优化

这种改善前景立体视觉效果的方法对远景立体效果是否会产生负面影响还需考证。就图 4 展示的

压缩和扩张因子的组合,应该考证虚拟空间点 P 沿 z 方向移动时水平位差的变动情况(见图 5(a)),与校正前的设置($k=1.0, v=1.0$)相比,校正后($k=0.5, v=2.0$)显然使前景水平位差减小,双影减小了。但远景水平位差增加了 50%,也就增加了远景双影。



(a) 位差比较



(b) 落单区域比较

图 5 双影比较

Fig. 5 Comparison of the bi-images

由于虚拟空间内的投射变换将 3 维模型的背面全部祛除,所以左、右眼图片只包含视线正面的模型表面。由于扩张双视点之间的距离将使摄取左、右眼图片的视角差距加大,造成针对虚拟空间场景中某一对象(例如包容球)在一幅图片上显示的边界轮廓,在另一幅图片上找不到相应的配对轮廓,进而引起无法融合的双影。因此,还必须对无法配对(落单)的区域大小进行考证(见图 5(b))。显然与校正前的设置相比,校正后前景落单区域减小了 30%,但是远景落单区域略有增加。

随着从前景到远景的变化,立体畸变逐渐减弱(见图 3),再者远景对象的显示尺度较小,畸变几乎

难以察觉,鉴此,可以根据包容 3 维显示对象球中心的 z 坐标值更新压缩因子 k 和扩张因子 v ,使得前景实现设置 ($k = 0.5, v = 2.0$);远景实现设置 ($k = 1.0, v = 1.0$);内景实现设置 ($0.5 < k < 1.0, 2.0 > v > 1.0$)。设视点投射视锥^[5]前后剪切平面在虚拟空间 z 方向上的位置为 z_n 和 z_f ;显示场景中包容主要 3 维显示对象的球心在虚拟空间 z 方向上的位置为 z_0 ,据此可以将球心位置归一化表征为 $\hat{z} = (z_0 -$

$z_n)/(z_f - z_n)$,依据球心的位置 \hat{z} 更新压缩因子 $k = 0.5 \cdot (1 + \hat{z}^2)$ 和扩张因子 $u = 2.7 \cdot \exp(-\hat{z})$ 。见图 6(a),更新压缩因子和扩张因子之后,与设置 ($k = 0.5, v = 2.0$) 相比,前景负位差变化不大,而远景正位差明显减小;再见图 6(b),与设置 ($k = 1.0, v = 1.0$) 相比,前景落单区域明显减小,而远景落单区域变化不明显。因此可见,远景立体视觉效果未受到校正方法的影响。

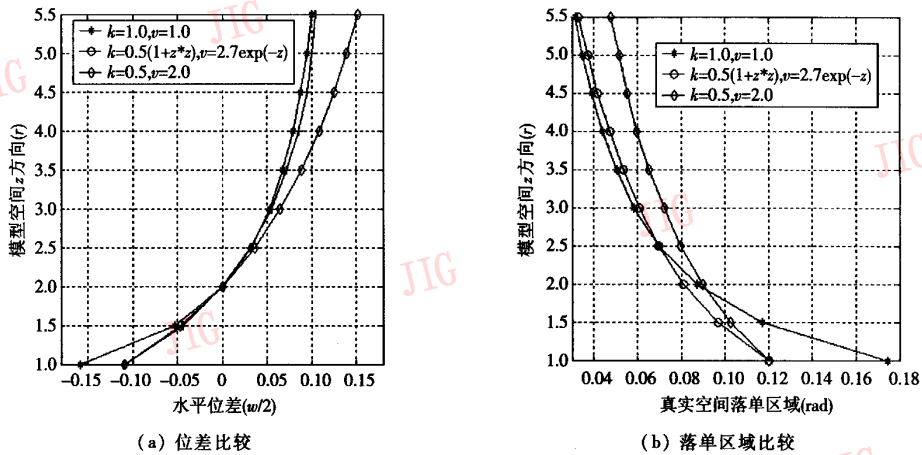


图 6 动态设置 k, v 后双影比较

Fig. 6 Comparison of bi-images during updating k and u

5 结 论

根据以上的分析,产生前景畸变的主要原因是从虚拟空间到真实空间映射关系的非线性,通过压缩虚拟空间 z 坐标并扩张双视点之间的距离,可以有效地减小前景畸变,同时使前景过大的负位差减小,双影得以减小。但由此引发远景双影加大,对远景立体视觉效果产生负面影响。依据虚拟空间中主要显示对象的中心位置动态更新压缩因子和扩张因子既能有效地消除前景畸变,减小前景双影,又不会降低远景立体视觉效果。在立体显示软件设计中,只要在空间变换中增加压缩矩阵,在每一帧的渲染中更新视点和压缩矩阵即实现动态更新。这种优化全景立体视觉效果策略特别适用于显示动画场景。据此,笔者开发了一套 3 维立体显示软件 4D_View_SC,应用于研制的一款自由立体显示器,与美国 DTI 公司开发的立体显示软件 TextureEyes 相比,4D_View_SC 的前景畸变和双影明显较小,立体视觉效果获得了显著改进。

参考文献 (References)

- 1 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.
- 2 Christian N Moller, Adrian R L. Travis. Correcting intersperspective aliasing in autostereoscopic displays [J]. IEEE Transactions on Computer Graphics, 2005, 11(2): 228 ~ 236.
- 3 Emanuele Trucco & Alessandro Verri. Introductory Techniques or 3-D Computer Vision[M]. New Jersey, USA, Published by Prentice-Hall. 1998: 134 ~ 176.
- 4 Jesse B. Eichenlaub, Progress in autostereoscopic display technology at dimension technologies Inc [J]. Proceedings of SPIE, 1991, 1457: 290 ~ 301.
- 5 LIU Wen-wen, LV Guo-qiang, Deng Shan-xi. Research on the software for setting up Bi-viewpoint in autostereoscopic 3D display based on direct 3D [J]. Journal of Image and Graphics, 2006, 11(3): 357 ~ 361. [刘文,吕国强,邓善熙. 基于 Direct 3D 的 3 维自由立体显示软件双视点设置[J]. 中国图象图形学报, 2006, 11(3): 357 ~ 361.]
- 6 Karen J Bos. Reducing the accommodation and convergence difference in stereoscopic three-dimensional displays by using correction lenses [J]. Optical Engineering, 1998, 37(3): 1078 ~ 1080.