

基于人眼视觉原理的虚拟现实显示模型

徐宇杰*, 管会超, 张宗卫, 郭庆, 张青

(中国民航大学航空工程学院, 天津 300300)

(*通信作者电子邮箱 xuyujie1993@163.com)

摘要:针对虚拟现实领域现有的显示模块无法提供满足人眼视觉规律的立体视觉效果这一问题,提出一种基于斜交视锥体立体摄像机模型的虚拟现实(VR)立体视觉解决方案。首先,通过研究人眼视域模型和人眼双目提取深度信息原理,建立双目视差数学模型;其次,使用工业引擎3DVIA Studio作为实验平台,依靠VSL编程语言进行画面分屏处理,通过设立父子关系,设置视觉交互模块,搭建VR交互立体摄像机结构;接着,通过建立点云模型,量化物体立体感观,探讨多种VR立体摄像机模型,从深度信息显示效果和畸变特性出发分析各个模型优缺点,逐步进行优化。分别建立了中心轴平行的正交视锥体摄像机模型、中心轴于观影距离处相交的正交视锥体模型,通过优化摄像机视锥体结构,形成斜交视锥体摄像机模型。最后使用3DVIA Studio进行实验,代入具体数据进行投影变换,结果显示斜交视锥体摄像机模型在保证深度信息显示效果的前提下很好地消除了畸变,能够提供优秀的视觉体验效果。

关键词:立体视觉;视线交汇;斜交视锥体;视平面;视差

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** A

Virtual reality display model based on human vision

XU Yujie*, GUAN Huichao, ZHANG Zongwei, GUO Qing, ZHANG Qing

(College of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: Aiming at the problem that the current display module could not provide a perfect stereo vision on the principle of human visual system, a solution of Virtual Reality (VR) stereo vision was proposed based on the oblique crossing frustum camera. Firstly, by studying the ken model and the theory of accessing to the depth data by eyes, a mathematical model of eyes parallax was built. Secondly, the industrial engine 3DVIA Studio was used as the simulation platform, which relied on the VSL programming language to screen. The relationship of child and parent was set up and the module of visual interaction was designed to construct the stereo camera. Then, the point cloud model was developed to quantize the stereo sense. The advantages and disadvantages of each model were analyzed based on the characteristics of depth display and distortion, and all models were optimized step by step. Center axis parallel normal frustum camera model and normal frustum model whose center axis crossed at the viewing distance were developed, the frustum of camera was optimized to develop a VR camera model of oblique crossing frustum. At last, using 3DVIA Studio as the experiment platform, specific data were substituted on it to do projective transformation. The result shows that the proposed camera model of oblique crossing frustum eliminates the distortion guarantees the depth information display effect, and provides an excellent effect of vision.

Key words: stereo vision; sight interaction; oblique crossing frustum; vision plane; parallax

0 引言

近年来虚拟现实技术获得爆炸性发展,众多硬件厂商纷纷涉足虚拟现实硬件领域,如蚁视头盔、美国Oculus VR的Oculus头盔、三星的Gear VR、HTC公司的HTC Vive。但是与硬件业高速发展所不符的是虚拟现实(Virtual Reality, VR)高质量体验系统的大量稀缺,导致众多硬件制造厂商陷入尴尬境地。

一直以来研究人员在不断探寻人眼3D成像原理,以此来推动3D显示技术的发展。Julesz提出了随机点立体图对(Random-Dot Stereograms, RDS),证明双眼视差才是产生立体视觉的基础^[1],并引发了一系列研究^[2-5],如:索尼日本PCL数字制作项目部村田秀夫介绍了基于人眼的3D电影拍摄原理^[3];天津大学电子信息工程学院也对立体成像原理进

行了相应探究^[4-5]。但是以上研究并没有在VR领域提供完全满足人眼视觉规律的计算机解决方案。因此,本文基于人眼3D成像原理,通过搭建立体摄像机结构,设置视觉交互模块,优化立体摄像机视锥体,提供优秀的VR交互视觉体验。

1 人眼立体成像原理

1.1 人眼视域

人眼视域是指人的肉眼可视范围^[6]。人单眼的水平视角最大可达156°,双眼的水平视角最大可达188°,其中人两眼重合视域为124°,几何示意图如图1所示。人眼垂直视角最大可为140°,分为上65°、下75°。但是人单眼正常视域为60°,只有这60°范围内的物体,人眼才能够聚焦,几何示意图如图2所示。

收稿日期: 2015-04-09; **修回日期:** 2015-05-28。 **基金项目:** 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(3122015D011, 3122014C006)。

作者简介: 徐宇杰(1993-),男,浙江台州人,主要研究方向:航空发动机虚拟仿真; 管会超(1993-),男,河北保定人,主要研究方向:航空发动机虚拟仿真; 张宗卫(1984-),男,山东济宁人,讲师,博士,主要研究方向:航空发动机虚拟仿真; 郭庆(1976-),男,天津人,副教授,主要研究方向:航空发动机虚拟仿真; 张青(1986-),女,天津人,讲师,硕士,主要研究方向:航空发动机虚拟仿真。

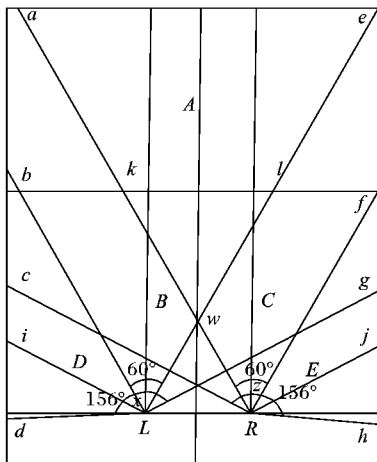


图1 人眼水平视域

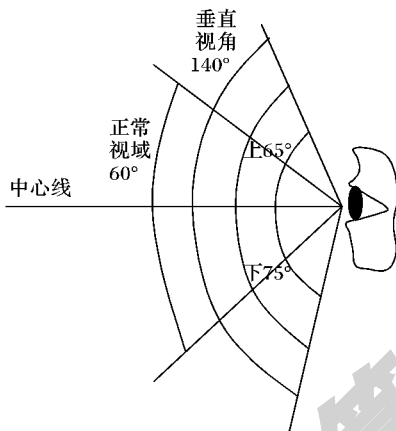


图2 人眼垂直视域

1.2 双目深度信息原理

人双眼球之间有约为 65 mm 的距离,所以看空间一点时左右眼视线能发生交汇,几何示意图如图 3 所示。通过形成交汇空间为大脑提供深度信息。人双目深度信息原理模型如图 4 所示,设以眼球正轴 L_1, L_2 为基准,则对于每一个空间汇聚点,必有一组眼球汇聚矩阵 $[a_1 \ a_2]$ 与其对应, $\theta = a_1 + a_2$ 包含深度信息,其中 a_1, a_2 在基准内侧为正,在基准外侧为负。 ΔR 较小时有如下关系式:

$$\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2 \approx \frac{k}{R} - \frac{k}{R + \Delta R} \approx \frac{k \cdot \Delta R}{R^2} \quad (1)$$

其中: B 和 R 都为参考量,因此可知 $\Delta\theta$ 与 ΔR 成正比。

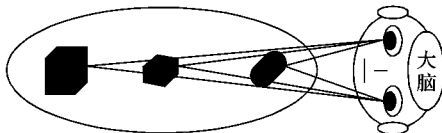


图3 视线交汇示意图

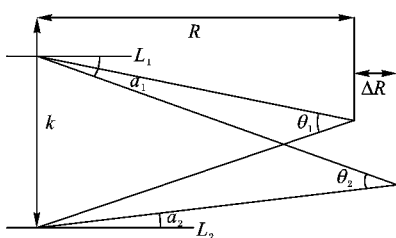


图4 深度信息原理模型

1.3 双目视差数学模型

根据双目深度信息原理,建立双目视差数学模型,如图 5

所示建立笛卡儿坐标系。

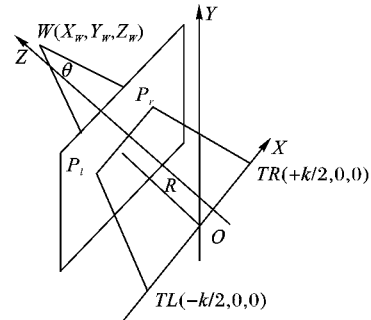


图5 屏幕视差示意图

左右眼坐标为 $L(-k/2, 0, 0), R(k/2, 0, 0)$, 物体点在空间的坐标为 $W(X_w, Y_w, Z_w)$, 分别连接 W 与左右眼形成夹角 θ , 通过与屏幕相交于 $P_l(X_l, Y_l, Z_l), P_r(X_r, Y_r, Z_r)$ 两点, 之间相距一视差值 (Inter Parallax Distance, IPD), 从而将 θ 模型转化为便于应用的视差模型, R 为人眼与屏幕的距离, k 为人两眼之间的距离, 约为 65 mm。由投影关系可得:

$$P_l = \frac{X_w + k/2}{Z_w} * R - \frac{k}{2} \quad (2)$$

$$P_r = \frac{X_w - k/2}{Z_w} * R + \frac{k}{2} \quad (3)$$

$$IPD = P_r - P_l = k - \frac{k}{Z_w} * R \quad (4)$$

所以人眼感受到的深度值为:

$$Z_w = \frac{k * R}{k - IPD} \quad (5)$$

由于 k, R 均为常数, 因此以不同 IPD 值设置显示器上各个物体的在屏幕上位置, 使用偏振片过滤相应左右画面, 通过大脑视线交汇形成不同的交叉角赋予平面物点以深度, 如图 6 所示。

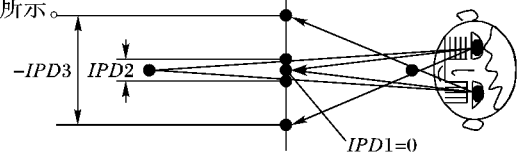


图6 屏幕视差显示

若 $IPD > 0$, 物体在屏幕后; 若 $IPD = 0$, 物体在屏幕上; 若 $IPD < 0$, 物体在屏幕前。

IPD 正负以左右眼视线是否错位决定。

2 双目成像的计算机实现

在 VR 领域, 虚拟世界通过虚拟摄像机投影到屏幕上, 通过虚拟摄像机视锥体对人眼视域进行建模, 将视锥体里的三维物体通过透视投影变化投影在视口上, 最后将视口元素渲染到显示器屏幕^[7-8]。

下面将探讨并实现 3D 显示的 VR 立体摄像机组合模型, 测试平台为 3DVIA Studio, 前两个模型使用普通的正交摄像机虚拟体, 第三个数学模型将虚拟摄像机视锥体修改为斜交视锥体模型。

2.1 3D 交互摄像机结构搭建

在 3DVIA Studio 里设置两个摄像机 O_1, O_2 和一个 Entity3D 属性的标记体 O , 如图 7 所示。 O_1, O_2 位于标记体两侧, 之间相差 65 mm, 并且设置 FOV 为 $\pi/3$ (FOV 设置对应于 1.1 节人眼视域模型)。 O_1, O_2 与标记体关联, 来保证左右摄像机参数同步进行。控制标记体进行前后左右移动和旋转等操作。

作进行漫游,交互流程见图8。关联操作通过将摄像机 O_1 、 O_2 设置为标记体 O 的子物体形成父子关系从而使摄像机 O_1 、 O_2 参考于标记体局部坐标系进行运动,实现立体摄像机的结构搭建。

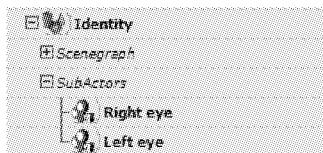


图7 立体摄像机结构组成

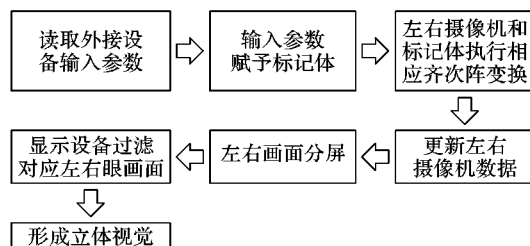


图8 视觉交互模块流程

左右眼分屏核心代码如下：

```
{
    viewport.SetSubViewportCount(2);
    viewport.GetSubViewport(0);
    SetCamera( stereoCam.GetLeftCamera());
    viewport.GetSubViewport(1);
    SetCamera( stereoCam.GetRightCamera());
}
```

以下介绍3个计算机数学模型,它们摄像机关联方式相同,分屏方式相同,改变视锥体模型从而获得最优VR体验效果。

2.2 点云模型构建

为方便阐述下述3个模型和量化立体原理重构原理,在此建立点云模型:

将3D实体抽象为密度无限大的点云,其中包括无穷多个物点,每个物点拥有和原来3D实体上对应点相同的三维坐标,构成点集 $V = \{V_i | i = 1, 2, \dots\}$

以立方体为例,抽象为点云的结果为图9所示。

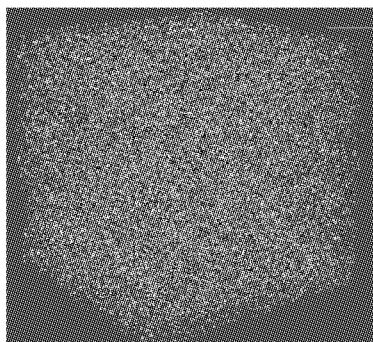


图9 立方体点云模型

2.3 中心轴平行的普通正交摄像机组合模型

2.3.1 模型论述

使用普通正交视锥体摄像机模型进行组合搭建立体摄像机,如图10所示。

图10中: O_1 、 O_2 为虚拟摄像机,AB、CD分别为两个摄像机视平面。 O_1Y_1 、 O_2Y_2 为两摄像机中心轴且相交于无穷远处。

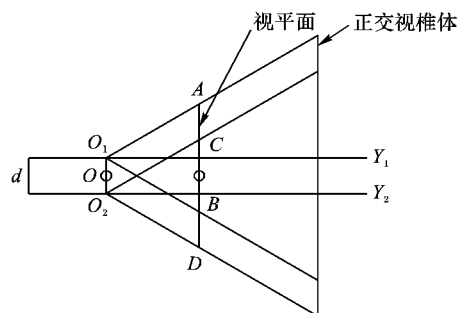


图10 中心轴平行摄像机组合

2.3.2 模型缺陷

两摄像机中心轴相交于无穷远处,将 $Z_w = \infty$ 代入式(2)~(3)中得 $P_l = -k/2$, $P_r = k/2$,因此3D点集 V 在左右视平面上的视差 IPD 恒为眼球距 k 。从而点集 V 中每一元素包含相同的深度信息,无法在人脑中重构3D物体的立体感。

2.4 光轴于有限距离处相交的普通正交摄像机模型

2.4.1 模型结构

对2.3节的模型进行改进,其结构如图11所示, O_1 、 O_2 为两正交视锥体摄像机, P_1 、 P_3 分别为两摄像机视平面。两摄像机中心轴相交于 C 点。 C 点位于聚焦点上,所以 C 点在左右视平面上视差 $IPD = 0$,物点于人感觉在屏幕之上。 A 点位于聚焦点之前,所以 A 点在视平面上的视差 $IPD < 0$,在 C 点之前(屏幕之外)。 B 点位于聚焦点之后,所以 B 点在视平面上的视差 $IPD > 0$,在 C 点之后(屏幕之里)。不同位置的点包含着相应的深度信息,所以点集 V 中每一元素都包含对应于原立方体模型相应点的深度信息,从而能在人脑中重构3D物体的立体感。

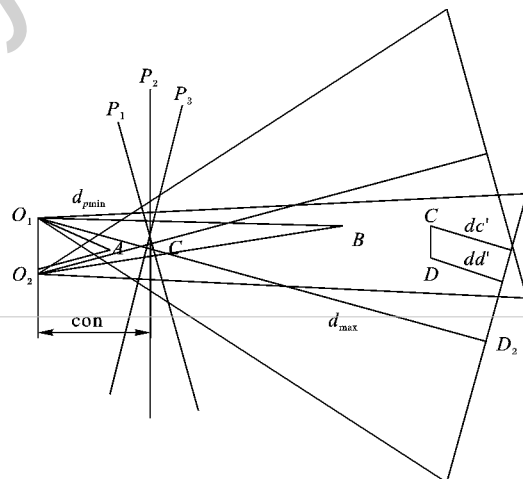


图11 中心轴有限距离处相交的摄像机模型

2.4.2 模型缺陷

使用该模型在模型边缘会有畸变产生,设点空间一点的世界坐标为 $\begin{bmatrix} X_{world} \\ Y_{world} \\ 1 \end{bmatrix}$; $\begin{bmatrix} Y'_{view} \\ W_{view} \end{bmatrix}$ 代表视平面齐次空间的投影坐标;

标; $\begin{bmatrix} Y'_{world} \\ W_{world} \end{bmatrix}$ 代表世界齐次坐标; Y'_{world} 代表世界齐次坐标; Q

为 $[R, U, D]$ 为相机坐标系的正交矩阵; S 为视见向量,与视平面法向量相反,即 $N = -S$;坐标系符合Direct 3D标准即左手坐标系; E 为视点坐标; d_{pmin} 代表视平面与视点的距离; $X_{view} = (r, u, d)$ (视见空间);取 $M = ES^T + d_{pmin}I$, I 为单位矩

阵。则齐次裁剪空间的投影变换矩阵为:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} Y'_{\text{view}} \\ W_{\text{view}} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} Q^T & -Q^T E \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y'_{\text{world}} \\ W_{\text{world}} \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} Q^T & -Q^T E \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M - ME \\ D^T - D^T E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{\text{world}} \\ 1 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} Q^T & -Q^T E \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M - ME \\ D^T - D^T E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q & E \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{\text{view}} \\ 1 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} d_{p\min} X_{\text{view}} \\ d_{p\min} u \\ d_{p\min} d \\ d \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

通过透视除法生成最终投影结果:

$$Y_{\text{proj}} = \frac{Y'_{\text{view}}}{W_{\text{view}}} = \begin{bmatrix} \frac{d_{p\min} r}{d} & \frac{d_{p\min} u}{d} & d_{p\min} & 1 \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

因为 $d_{p\min}$ 代表视点于视口平面的距离,所以式(7)成立。由式(7)可得投影坐标直接受到参数 $d = d_{\max} - d'$ 的影响。由图 11 可见 $dc' > dd'$, 所以 $dc < dd$, 由(7)得 C, D 点的投影坐标点不在同一水平线上,产生畸变,与正常人眼模型不符合。

使用 3DVIA Studio 进行实验,为简化运算,直接将标记点 O 设置为与世界空间坐标系原点重合,设置两摄像机间隔 65 mm,两摄像机中心轴相交点位置为 $(0, 0, 371)$, 汇聚角 α 为 5° 。设置目标正方体位置为 $(0, 0, 1000)$, 边长 l 为 300。先以 O_1 摄像机为研究对象(O_2 摄像机与此相同)。同时以正方体的上边缘两点为研究对象,在世界坐标系下两点坐标分别为 $D(150, 150, 850), C(-150, 150, 850)$ 。则在 O_1 摄像机的视见空间内其视见坐标 (r, u, d) 分别为 $D'(207.289, 5, 150, 833.6846), C'(-91.568, 150, 859.8414)$ 。代入式(7)可得投影坐标为 $D''(92.246, 4, 66.751, 9, 371), C''(-39.509, 3, 64.7212, 371)$ 。比较 C'' 与 D'' 的 y 值可以得出 $y_{D''} > y_{C''}$, 产生了畸变,实验图形如图 12 所示(正方体正面与两摄像机平面平行)。

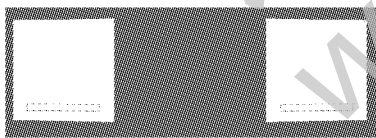


图 12 畸变示意图

进一步研究式(7)可知,图形边缘畸变程度直接取决于两点 d 的比值大小,比值公式为:

$$\frac{dc}{dd} = \frac{-\sin(\alpha)x + \cos(\alpha)z}{-\sin(\alpha)x + \cos(\alpha)z + l * \sin(\alpha)} = \frac{1}{1 + \frac{l}{-x + \cot(\alpha)z}} \quad (8)$$

由式(8)可得畸变量的大小在 3D 摄像机结构一定情况下只与 α 有关,且汇聚角越大畸变越明显。

不同汇聚角下的畸变情况如图 13 ~ 15 所示,由此可知:当汇聚角为 1° 时边缘畸变几乎不可见,当汇聚角为 5° 时已经能明显察觉,而当汇聚角为 10° 时边缘畸变已经十分明显。

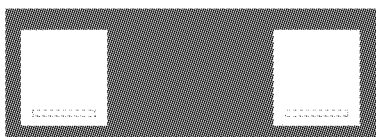


图 13 汇聚角为 1° 的畸变示意图

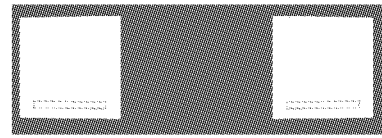


图 14 汇聚角为 5° 的畸变示意图

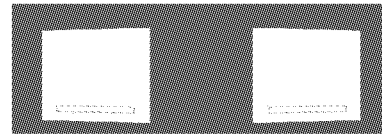


图 15 汇聚角为 10° 的畸变示意图

2.5 光轴于有限距离处相交的斜视锥体模型

如图 16 所示,为解决 2.4 节摄像机模型缺陷,对摄像机视锥体模型进行更改。 O_1 摄像机视锥体模型 $O_1 P_2 P_1$ 改变为 $O_1 P_3 P_1, O_2$ 摄像机视锥体 $O_2 D_1 D_2$ 改变为 $O_2 D_1 D_3$ 。构建斜锥体模型(视中心轴不与视平面垂直),如图 17 ~ 18 所示。视锥体轴可视为包含原点和视口中心点的射线,参数化方程如下:

$$\left\{ \frac{(r_{\min} + r_{\max})d}{2d_{p\min}}, \frac{(u_{\min} + u_{\max})d}{2d_{p\min}}, d \right\}; d_{\min} \leq d \leq d_{\max} \quad (9)$$

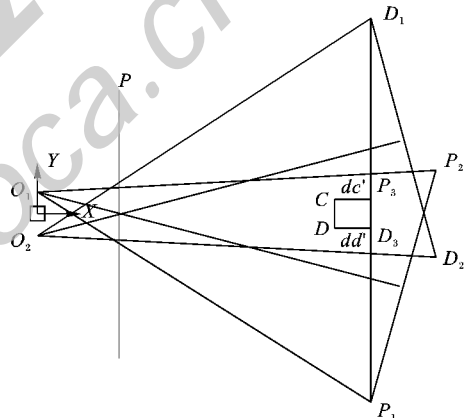


图 16 斜交视锥体摄像机模型组合

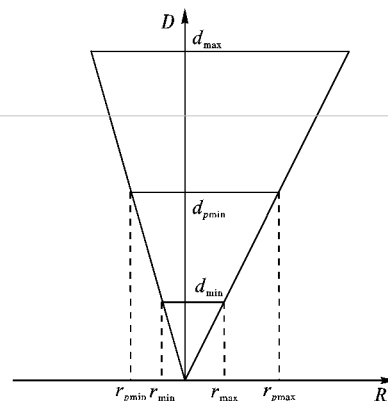


图 17 斜交视锥体俯视图

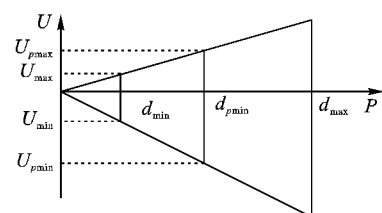


图 18 斜交视锥体右视图

为排除斜交视锥体对窗口投影坐标的影响,并为在 Direct3D 框架下构建斜视锥体计算机应用模型,对式(6)进行以下变换和标准化处理。

$$X_{\text{clip}} = \begin{bmatrix} r' \\ u' \\ d' \\ w' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2d_{p\min}}{r_{p\max} - r_{p\min}} & 0 & \frac{-(r_{p\max} + r_{p\min})}{r_{p\max} - r_{p\min}} & 0 \\ 0 & \frac{2d_{p\min}}{u_{p\max} - u_{p\min}} & \frac{-(u_{p\max} + u_{p\min})}{u_{p\max} - u_{p\min}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{d_{\max}}{d_{\max} - d_{\min}} & \frac{-d_{\max}d_{\min}}{d_{\max} - d_{\min}} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{\text{view}} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2d_{p\min}}{r_{p\max} - r_{p\min}}r + \frac{-(r_{p\max} + r_{p\min})}{r_{p\max} - r_{p\min}}d \\ \frac{2d_{p\min}}{u_{p\max} - u_{p\min}}u + \frac{-(u_{p\max} + u_{p\min})}{u_{p\max} - u_{p\min}}d \\ \frac{d_{\max}}{d_{\max} - d_{\min}}d + \frac{-d_{\max}d_{\min}}{d_{\max} - d_{\min}} \\ d \end{bmatrix} \quad (10)$$

执行透视除法:

$$X_{\text{nor}} = \frac{X_{\text{clip}}}{w'} = \begin{bmatrix} \frac{2d_{p\min}}{r_{p\max} - r_{p\min}}r/d + \frac{-(r_{p\max} + r_{p\min})}{r_{p\max} - r_{p\min}} \\ \frac{2d_{p\min}}{u_{p\max} - u_{p\min}}u/d + \frac{-(u_{p\max} + u_{p\min})}{u_{p\max} - u_{p\min}} \\ \frac{d_{\max}}{d_{\max} - d_{\min}} + \frac{-d_{\max}d_{\min}}{d_{\max} - d_{\min}}/d \\ 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中: X_{nor} 为标准化投影坐标。由式(11)得投影坐标直接受到参数 $d = d_{\max} - d'$ 的影响,而由图 16 可得在斜交视锥体摄像机模型的视见空间下,由于 $dc' = dd'$,所以 $dc = dd$,畸变被消除。

使用 3DVIA Studio 进行实验,同样为简化运算处理,将标记点 O 设置为与世界空间坐标系原点重合,设置两个摄像机其参数为间隔 65 mm,两摄像机中心轴相交点位置为 $(0, 0, 371)$, $r_{p\max} = 259.7962$, $r_{p\min} = 168.5977$, $u_{p\max} = u_{p\min} = 214.1969$ 。设置目标正方体位置为 $(0, 0, 1000)$,以正方体的上边缘两点为研究对象,在世界坐标上两点坐标分别为 $D(150, 150, 850)$, $C(-150, 150, 850)$,则在 O_1 摄像机的视见空间内其坐标 (r, u, d) 分别为 $D'(182.5, 150, 850)$, $C'(-117.5, 150, 850)$,代入式(11)可得 $D''(0.1598, 0.3056, 0.9213)$, $C''(-0.4514, 0.3056, 0.9213)$,可见畸变被消除。

斜交视锥体摄像机模型伪代码如下:

```
//Create the camera model
mycamera -> SetFrustum( U_minf, U_maxf, R_minf, R_maxf, D_minf, D_maxf);
Vector3 Loc(E);
Vector3 Dir(D);
Dir.Normalize();
Vector3 Up(U);
Up.Normalize();
Vector3 Right = Dir.Cross(Up);
mycamera -> SetFrame( Loc, Dir, Up, Right);
```

使用 3DVIA Studio 实验模拟,如图 19 所示可见畸变被消除。



图 19 斜交视锥体模型结果模拟

通过移除斜交系统并对结果进行实施缩放使斜视锥体转换为基于 $[1, -1]^2$ 视口的正交视锥体(标准视锥体),得到独立的齐次转换矩阵并将 $(r, u, d, 1)$ 映射为 (r', u', d', w') :

3 模型总结及实践

2.3 节提供的双平行轴摄像机数学模型虽然在一定程度实现了人眼 3D 成像原理模型的计算机手段,但是由于物点集 IPD 恒定,所以无法有效提供立体视觉。

2.4 节提供光轴于有限距离处相交的普通正交摄像机模型,较大幅度地使用计算机手段还原了人眼 3D 成像原理,提供了较为成熟的 3D 效果,但是模型边缘会有畸变产生。

2.5 节在 2.4 节的基础上提出斜交视锥体模型,在实现 2.2 节中心轴聚焦模型良好的 3D 效果的基础上较好地解决了模型边缘畸变问题。

综上所述 2.5 节光轴于有限距离处相交的斜锥体模型较好地实现了预定目标。

整个模型建立总流程如图 20 所示。

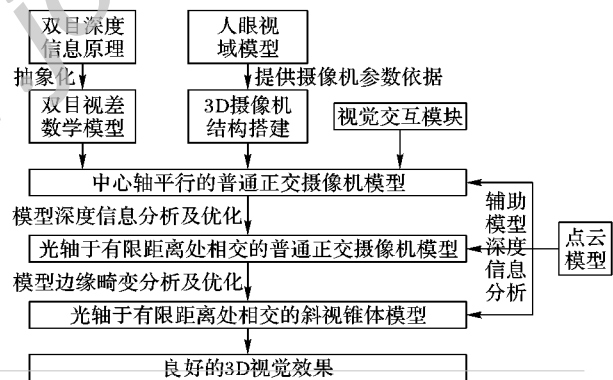


图 20 虚拟现实技术显示模型建立流程

基于 2.5 节的模型使用 3DVIA Studio 进行实验,显示器尺寸为 $600 \text{ mm} \times 330 \text{ mm}$,斜视锥体摄像机设置 FOV 为 $\pi/3$,组合摄像机模型间距为 65 mm, $d_{p\min} = 1003 \text{ mm}$ (也是人眼与显示器的观影距离)。所模拟的融合效果如图 21(a)所示。

由图 21(a)所见 m1、m3、m5 所代表的正方体为进入右眼画面, m2、m4、m6 所代表正方体为进入左眼画面,视线在 3D 摄像机聚焦点前相交。

由图 21(b)可见 m1、m2、m5、m6 几乎重合, m3、m4 仍是位于聚焦点前分别对应于右画面和左画面。

由图 21(c)可见 m1、m3、m5 所代表的正方体进入左眼画面, m2、m4、m6 所代表的正方体进入右眼画面,视线在 3D 摄像机聚焦点后相交。

4 结语

本文依据人眼 3D 成像原理,建立相应数学模型;并且以

此为基础构建了计算机立体摄像机模型,通过不同的摄像机组合方式较好地实现了VR应用时的3D物体空间立体感,随后进一步通过建立斜交视锥体模型,解决了普通正交视锥体摄像机模型边缘畸变的问题,从而获得了较好的体验效果。同时通过设置视觉交互模块,为VR显示领域提供了可行的

解决方案。

随着虚拟现实领域的进一步发展,由于虚拟现实的相对低成本性和高沉浸性特征,VR必将对各行各业产生极其深远的影响,合理的计算机3D显示交互手段必将极大地推动这一领域的发展。

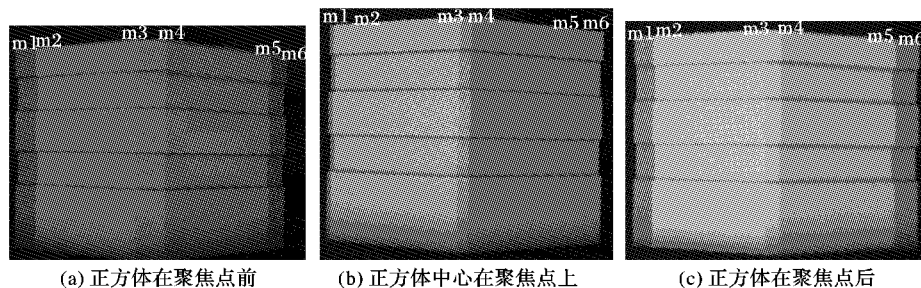


图21 正方体在不同聚焦点

参考文献:

- [1] JULESZ B. Visual pattern discrimination [J]. IRE Transactions on Information Theory, 1962, 8(2): 84-92.
- [2] LIN L, HOU C, WANG K. Research on the prediction model of vision comfortable fusion limits [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(S): 231-237. (林丽媛, 侯春萍, 王凯. 立体视觉舒适融合限预测模型的研究[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(增刊): 231-237.)
- [3] CUNTIAN X. Principle of 3D and 3D shooting practice [J]. Advanced Television Engineering, 2010(8): 66-69.
- [4] LI G, PAN R, XU S. Stereo vision and stereo imaging [J]. Information Terminal and Display, 2012, 36(2): 15-18. (李桂玲, 潘榕, 许树谈. 立体视觉与立体成像[J]. 信息终端与显示, 2012, 36(2): 15-18.)
- [5] LI S, FU B, ZANG Y, et al. Measurement of the range of saturation parameter influencing the comfort of stereoscopic images [J]. Journal of Tianjin University, 2012, 45(8): 669-676. (李素梅, 付贝贝, 臧艳军, 等. 影响立体图像舒适度的饱和度范围测定[J]. 天津大学学报, 2012, 45(8): 669-676.)
- [6] LONG Y, YUAN J, ZHANG Z, et al. Design and realization of virtual simulation system based on stereoscopic sense of vision [J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(S): 273-277. (龙勇, 袁静, 张志利, 等. 基于立体视觉技术的视景仿真系统设计与实现[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(增刊): 273-277.)
- [7] EBERLY D H. 3D game engine design [M]. 2nd ed. XU M, LI Q, XU W, translated. Beijing: Tsinghua University Press, 2013: 11-27. (EBERLY D H. 3D游戏引擎设计: 实时计算机图形学的应用方法[M]. 2版. 徐明亮, 李秋霞, 许威威, 译. 北京: 清华大学出版社, 2013: 11-27.)
- [8] GREGORY J. Game engine architecture [M]. YE J, translated. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014: 35-60. (GREGORY J. 游戏引擎架构[M]. 叶劲峰, 译. 北京: 电子工业出版社, 2014: 35-60.)
- [9] ZENG H, ZHANG J, REN G, et al. Design and implementation of marine engine room three-dimensional visual simulation system [J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(2): 363-368. (曾鸿, 张均东, 任光, 等. 船舶机舱三维视景仿真系统设计与实现[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(2): 363-368.)
- [10] LIU W, WU Y, HU Z. A survey of 2D to 3D conversion technology for film [J]. Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics, 2012, 24(1): 14-28. (刘伟, 吴毅红, 胡占义. 电影2D/3D转换技术概述[J]. 计算机辅助设计和图形学报, 2012, 24(1): 14-28.)
- [11] TANG T. Optimal view distance adjustable 3D display based on a parallax barrier [J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(2): 259-261. (唐婷. 最佳观看距离可调的光栅3D显示[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(2): 259-261.)
- [12] YE L, LIU K, TANG Y. Design of a panoramic stereoscopic camera [J]. Computer Measurement and Control, 2013, 21(2): 512-519. (叶良波, 刘康, 汤一平. 一种全景立体摄像装置的设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(2): 512-519.)
- [13] GUO X, WANG P. Technique of cooperative reverse reasoning in related path static analysis [J]. Journal of Software, 2014, 26(1): 1-13. (郭曦, 王盼. 相关路径静态分析中协同式逆向推理方法[J]. 软件学报, 2014, 26(1): 1-13.)
- [14] LIU C, GUO T, CHI B, et al. Similarity computation for executable objects homology detection based on structural signature [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2012, 35(3): 56-60. (刘春红, 郭涛, 崔宝江, 等. 二进制文件同源性检测的结构化相似度计算[J]. 北京邮电大学学报, 2012, 35(3): 56-60.)
- [15] XIE Y, ZENG Y, SHU H. Improved graph-based comparison algorithm of executable objects [J]. Computer Engineering and Design, 2007, 28(2): 257-260. (谢余强, 曾颖, 舒辉. 改进的基于图的可执行文件比较算法[J]. 计算机工程与设计, 2007, 28(2): 257-260.)
- [16] LUO Q, SHU H, ZENG Y. A parallel algorithm for structural comparison of executable objects [J]. Journal of Computer Applications, 2007, 27(5): 1260-1263. (罗谦, 舒辉, 曾颖. 二进制文件结构化比较的并行算法实现[J]. 计算机应用, 2007, 27(5): 1260-1263.)
- [17] SHE Y, ZHAO R, WANG X, et al. Instruction normalization algorithm in binary patch comparison [J]. Computer Engineering, 2010, 36(15): 46-48. (沈亚楠, 赵荣彩, 王小芹, 等. 二进制补丁比对中的指令归一化算法[J]. 计算机工程, 2010, 36(15): 46-48.)
- [18] CUI B, MA D, HAO Y, et al. Comparison of executable objects based on block signatures and jump relations [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2011, 51(10): 1351-1356. (崔宝江, 马丁, 郝永乐, 等. 基于基本块签名和跳转关系的二进制文件比对技术[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2011, 51(10): 1351-1356.)

(上接第2900页)