

基于分类映射的真三维显示深度抗锯齿算法

方 勇^{1,2} 张应松³ 吴华夏^{1,2} 吕国强^{1,2*} 胡跃辉^{1,2}

¹合肥工业大学光电技术研究院特种显示技术教育部重点实验室, 特种显示技术国家工程实验室, 现代显示技术省部共建国家重点实验室, 安徽 合肥 230009

²合肥工业大学计算机与信息学院, 安徽 合肥 230009

³合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009

摘要 针对现有的多层抗锯齿技术在成像深度方向陡峭的三维(3D)图像时出现深度不连续的问题, 提出了一种基于分类映射的真三维深度抗锯齿算法。鉴于固态体积式真三维成像是三维曲面的特点, 通过分析YOZ(或XOZ)平面截取三维曲面所生成的二维曲线, 提出了符合人类立体视觉特性的、基于相邻多层映射的体素分解方法, 以及体素映射类型的判定算法。通过原始体素的自适应分类映射, 可以在一定程度上扩大深度连续条件下的偏轴观看角度。在搭建的固态体积式真三维立体显示系统上测试三维成像, 在较大的偏轴观看角度(约45°)下多数三维成像在深度方向过渡平滑, 可以获得较好的深度连续性。

关键词 视觉光学; 固态体积式真三维; 深度抗锯齿; 分类映射; 深度不连续; 截交曲线

中图分类号 TN27; TP391 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.0233001

Depth Anti-Aliasing Algorithm Based on Classified Mapping for Volumetric True-3D Display

Fang Yong^{1,2} Zhang Yingsong³ Wu Huaxia^{1,2} Lü Guoqiang^{1,2} Hu Yuehui^{1,2}

¹Key Laboratory of Special Display Technology, Ministry of Education, National Engineering Laboratory of Special Display Technology, National Key Laboratory of Advanced Display Technology, Academy of Photoelectric Technology, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China

²School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China

³School of Instrumentation and Opto-Electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China

Abstract To solve the problem of depth discontinuity of three-dimensional (3D) images having steep surface on imaging depth direction when using current multi-planar anti-aliasing technique, a depth anti-aliasing algorithm based on classified mapping is proposed. As the imaging of solid-state volumetric true-3D display is characteristic of three-dimensional surface, two-dimensional curves generating from interception of YOZ (or XOZ) planar and three-dimensional surface are analyzed. A method of voxel decomposition based on adjacent multi-layers mapping is introduced, which conforms with human stereoscopic vision, as well as a type judgment algorithm of voxel mapping. The off-axis viewing angles under the conditions of depth continuity are expanded to some extent by means of self-adapted classified mapping of raw voxels. A solid-state volumetric true-3D display system is developed, and 3D images are tested on the system. The result shows that most 3D images have completely smooth surfaces out to large off-axis viewing angles (about 45°), and a good depth continuity can be obtained.

Key words visual optics; solid-state volumetric true-three-dimensional; depth anti-aliasing; classified mapping; depth discontinuity; intersection curves

OCIS codes 330.1400; 200.3050; 330.5020

收稿日期: 2014-07-30; 收到修改稿日期: 2014-09-03

基金项目: 国家863计划(2012AA011901)、广东省战略性新兴产业核心技术攻关项目(2011A010801003)

作者简介: 方 勇(1980—), 男, 博士研究生, 主要从事三维显示技术方面的研究。E-mail: fy9903@hfut.edu.cn

导师简介: 吴华夏(1953—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事特种显示技术方面的研究。E-mail: hdgdb@wvei.com.cn

*通信联系人。E-mail: guoqianglv@hfut.edu.cn

1 引 言

再现真实三维(3D)场景是3D显示技术发展的趋势,理想的三维显示应该能满足人眼视觉的全部感知功能,即提供所有视点和距离上的深度感知。根据实现机理,目前三维立体显示技术可分为视差型、全息型和真三维型等^[1-6]。其中,真三维立体显示利用视觉暂留原理,在真实三维成像空间激活体素,因而既有心理景深又有物理景深,具有立体感强、无视觉疲劳、可以多人多视点自由观看等优点,已成为国内外三维显示研究的前沿和热点^[7]。

真三维立体显示有不同的实现机理^[8],目前较为成熟的主要有两种模式:旋转体积式和固态体积式。旋转式利用一个旋转的显示体构造成像空间,固态体积式则利用多层液晶光阀构成显示体,将显示目标深度不同的各点投射到相应深度的光阀上完成空间成像^[9-12]。固态体积式真三维的一个典型代表是由LightSpace公司提出的DepthCube系统。合肥工业大学于2013年成功研制出基于3片数码光处理(DLP)、20片19英寸(48.26 cm)液晶光阀显示体的固态体积式真三维立体显示系统样机。

在固态体积式真三维成像过程中,立体图像如果不经过特殊处理就直接显示,在观看角度稍大时会产生深度不连续现象:犹如一系列二维图像的堆叠,而不是一个平滑的三维图像表面,类似于二维显示时的锯齿现象^[13]。针对这个问题,文献[13]采用了一种多层抗锯齿技术,将深度位于相邻2层液晶光阀之间的体素点的亮度分解,沿深度方向分别映射在2层液晶光阀上。多层抗锯齿技术在处理深度方向变化平缓的三维图像时可以收到较好效果,但对于深度方向变化陡峭的三维图像,偏轴观看角稍大又会出现深度不连续,严重影响立体观感,难以适应各种形状三维成像的需要。因此,本文提出一种基于分类映射的固态体积式真三维深度抗锯齿方法,原始体素根据算法可自适应地选取不同映射类型,从而对于各种不同形状三维物体的成像都能具有较好的深度抗锯齿效果,获得较大的深度连续偏轴观看角度。

2 深度不连续的物理分析

2.1 真三维成像原理与显示空间

如图1所示,真三维系统中的每片液晶光阀按一定时序依次被施加电场使其处于散射态(其余所有光阀处于透射态),同时高速DLP投影电路将某一深度的图像投射到对应深度且处于散射态的液晶光阀上。扫描一遍后可显示所有深度的截面图像,因人眼的视觉暂留效应融合感知为一个完整的空间立体影像。

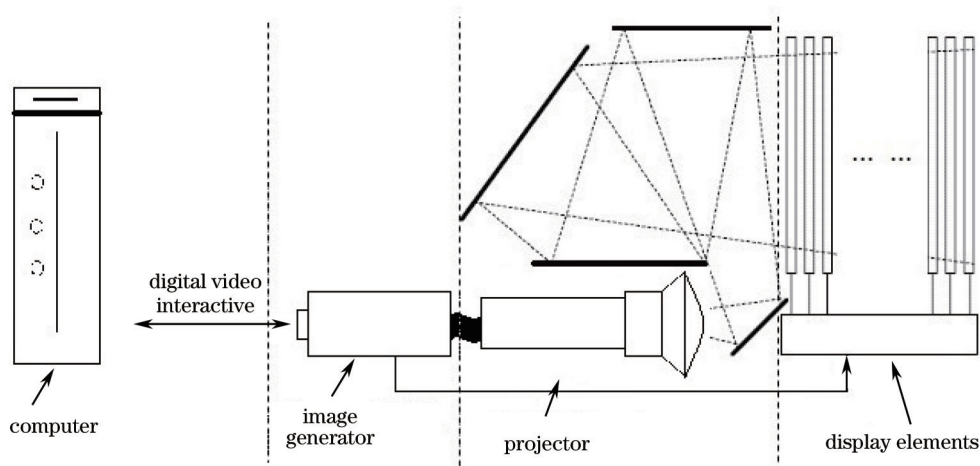


图1 固态体积式真三维系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of solid-state volumetric true-3D system

将固态体积式真三维显示空间映射到三维笛卡儿坐标系中,如图2所示,真三维系统具有20层液晶光阀,显示空间在右手笛卡儿坐标系 (x,y,z) 下的三维分辨率为1024 pixel×768 pixel×608 pixel。为了确保成像的三维物体在显示空间比例不失真,在设计系统时使所有体素在显示空间均匀分布,每个体素与相邻体素的间距相等。特别对于深度Z轴方向,每两层相邻光阀之间具有32 pixel的深度分辨率。

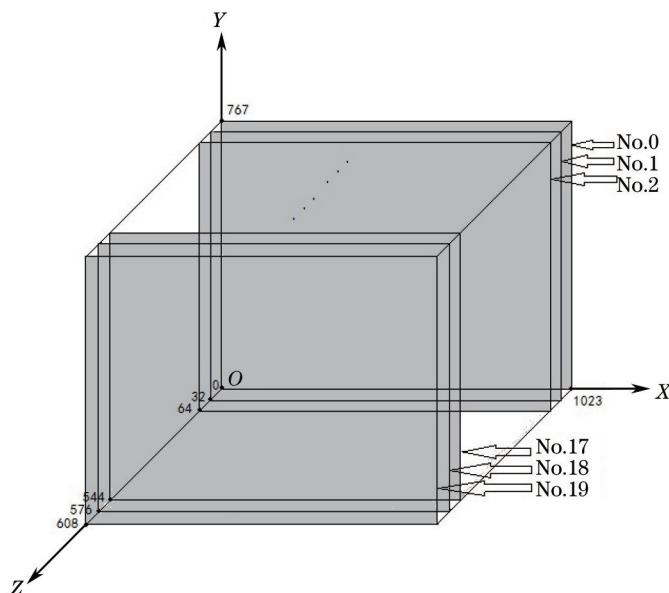


图2 显示空间三维笛卡儿坐标系

Fig.2 Three-dimensional Cartesian coordinates of display space

2.2 原始体素与映射体素

固态体积式真三维图像源采用编码传输,其图像特点为仅显示三维物体的表面轮廓。3D图像模型在计算机内完成体素化过程,生成原始体素[包含红绿蓝(RGB)亮度值和深度值Z],然后采用RGBZ编码模式传输一帧 1024 pixel×768 pixel分辨率的编码图像给真三维系统。原始体素在显示空间构成三维曲面,显示空间的任何(x,y)坐标点上只有一个原始体素点存在,其深度值 $Z \in [0,607]$ 。在实际显示时,体素的激活只能在显示体上完成,光阀的间隙无法成像。所以,原始体素必须以某种方式映射到显示体上,例如在文献[13]中,通过多层抗锯齿技术完成这一映射过程:坐标为 $(x,y,32 \times m + d)$ 、亮度值为 B 的原始体素 P ,其亮度值沿 Z 轴方向在相邻的两层光阀上进行映射分解,用映射体素 P_1, P_2 代替原始体素 P 。原始体素到映射体素的映射关系如图3所示。

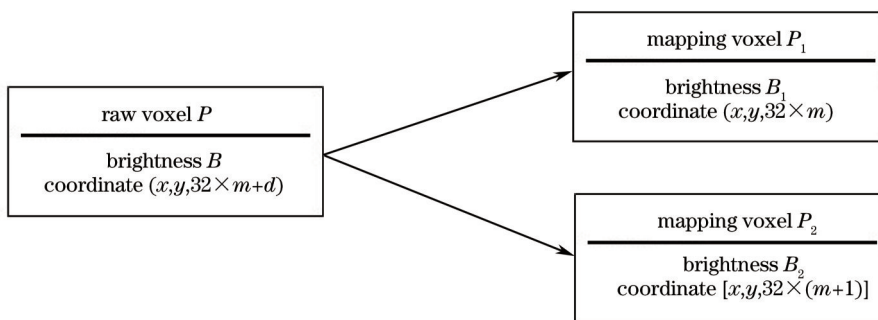


图3 多层抗锯齿技术中的体素映射关系

Fig.3 Voxel mapping relation in multi-planar anti-aliasing technique

其中 $0 \leq m \leq 18, 0 \leq d \leq 31$, 映射体素的亮度值可由亮度分解方程组确定:

令 $B_1 = X$, 则有

$$\begin{cases} B_1 = X \\ B_2 = [d/(32 - d)] \times X. \\ B_1 + B_2 = B \end{cases} \quad (1)$$

可见,映射体素是在真三维显示系统中位于光阀深度上、可激活显示的实际成像体素的集合。显然,经过多层抗锯齿技术处理后,映射体素的数量增加为原始体素的2倍,即 1024 pixel×768 pixel×2 pixel。

2.3 深度不连续的物理分析

固态体积式真三维原始体素所构成三维图像是非封闭的空间自由曲面,如果用 $y=i$ (i 取值范围为 $0\sim 767$) 的 XOZ 平面或者 $x=i$ (i 取值范围为 $0\sim 1023$) 的 YOZ 平面截交空间曲面,获得的将是一系列不同形状的非封闭二维曲线。

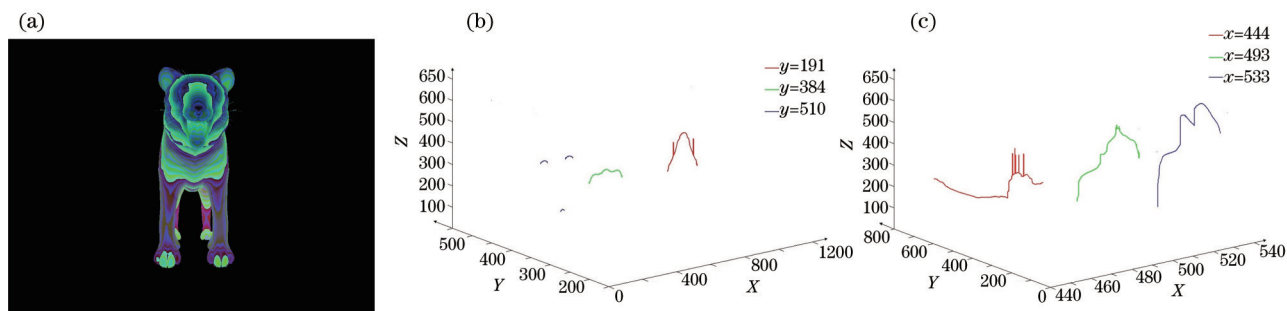


图4 三维图像与 XOZ (YOZ) 平面的截交线

Fig.4 Intersection curves of three-dimensional image and XOZ (YOZ) plane.

图4 (a)为RGBZ编码图像,图4(b)为三维曲面与 $y=191$ 、 $y=384$ 、 $y=510$ 的 XOZ 平面的截交线,图4(c)为三维曲面与 $x=444$ 、 $x=493$ 、 $x=533$ 的 YOZ 平面的截交线。

为方便叙述,下面以 YOZ 平面的截交线为例进行分析 (XOZ 平面的截交线可做类似分析)。某条截交曲线被光阀所在的深度分割为若干曲线段,在分解为映射体素之后,其在光阀上的分布为一条线段。设某两层光阀之间曲线段 S 在光阀上的映射体素分布长度为 L ,与光阀的两个交点为 P_1 、 P_2 , y_{p1} 、 y_{p2} 为 P_1 、 P_2 的 Y 轴坐标,则:

$$L = |y_{p1} - y_{p2}| \quad (2)$$

设线段 P_1P_2 的斜率为 K ,与 Y 轴所成锐角为 α ,则:

$$|K| = \tan \alpha = 32/L \quad (3)$$

如图5所示,若观看者在水平方向的偏轴观看角度为 θ ,则当 $\theta \leq 90^\circ - \alpha$ 时,观看者看到的曲线段 S 在深度方向的过渡平滑,无明显不连续感;而当 $\theta > 90^\circ - \alpha$ 时,观看者看到的曲线段 S 在相邻2层光阀上的映射体素之间出现中断,在深度方向会产生断裂感。

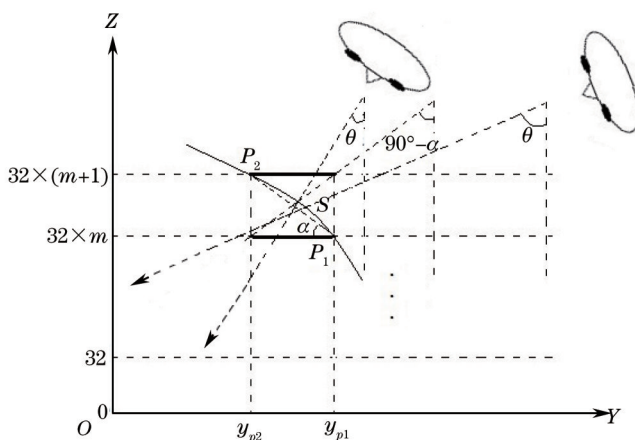


图5 深度不连续示意图

Fig.5 Schematic diagram of depth discontinuity

例如,当 $L=32$ 时,深度连续偏轴观看角度 θ 约为 45° ;而当 $L=8$ 时, θ 仅约为 14° ,理想观看角度很小,严重影响立体观感。

3 基于分类映射的体素分解

3.1 体素映射分解的基本原则

原始体素的映射分解需要满足两个基本条件：

1) 分解后的映射体素的亮度值与原始体素和该映射体素的距离成反比。

原始体素分解为映射体素的原理是基于人眼的立体视觉特性,观察者接收到某物体发射或反射的光线数量与观察者到物体的距离成反比,即人们常认为较亮的物体距离更近^[14-16]。在体素映射分解的处理中,深度位于两层光阀之间的原始体素亮度值被分解为若干部分,分别具有不同深度和亮度值。在实际显示时通过快速扫描融合,观察者可以感受到原始体素原有的深度和亮度信息。

2) 分解后所有的映射体素的亮度值之和等于原始体素亮度值。

根据人眼对亮度的视觉感应特性可知,观察者对光刺激的响应呈指数变化。

人眼的亮度响应满足：

$$L' = L \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] + L_0, \quad (4)$$

式中 L' 为人眼亮度响应, L 为光刺激亮度, L_0 为该段曲线上升时刻已存在人眼的亮度感觉, t 为有效光刺激时间, τ 为人眼的视觉时间常数(约 100 ms)^[17]。

真三维系统扫描频率为 1000 Hz,每层液晶光阀上体素的成像时间为 1 ms,该时间段内指数曲线在起始的近似线性部分,故人眼的亮度响应为

$$L' \approx \frac{t}{\tau} L + L_0 = 0.01L + L_0. \quad (5)$$

因而人眼对于每一个原始体素的亮度值响应等于分解后的所有映射体素的亮度值之和。

3.2 两类体素映射方式

根据原始体素映射分解的基本原则,结合文献[13]多层抗锯齿技术中使用的相邻2层光阀的映射方式,提出以下相邻多层光阀的映射方式,其映射关系如图6所示。

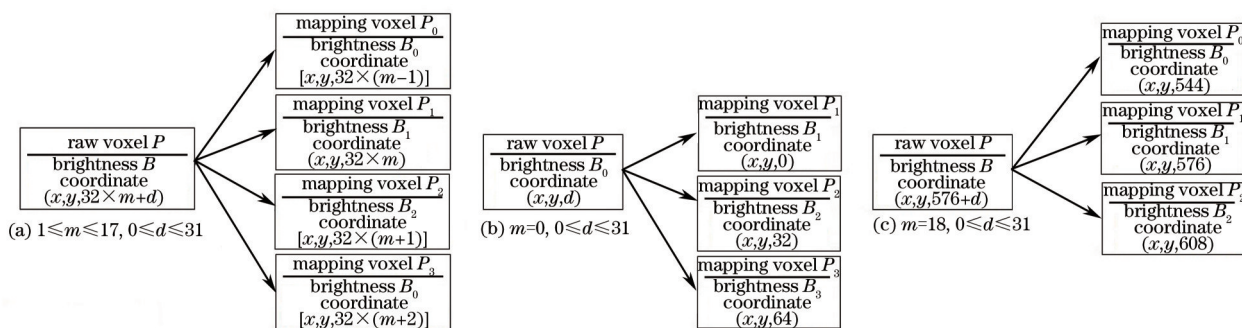


图6 相邻多层映射的体素映射关系

Fig.6 Voxel mapping relation of adjacent multi-planar mapping

图6(a)~(c)分别代表原始体素在不同深度下的三种映射情况：

(a)原始体素的深度值 $32 \leq z \leq 575$, 即 $1 \leq m \leq 17$, $0 \leq d \leq 31$ 。

映射体素的亮度值可由亮度分解方程组确定：

令 $B_1 = X$, 则有

$$\begin{cases} B_0 = [d/(32 + d)] \times X \\ B_1 = X \\ B_2 = [d/(32 - d)] \times X \\ B_3 = [d/(64 - d)] \times X \\ B_0 + B_1 + B_2 + B_3 = B \end{cases} \quad (6)$$

(b)原始体素的深度值 $0 \leq z \leq 31$, 即 $m=0$, $0 \leq d \leq 31$ 。

映射体素的亮度值可由亮度分解方程组确定：

令 $B_1=X$, 则有

$$\begin{cases} B_1 = X \\ B_2 = [d/(32-d)] \times X \\ B_3 = [d/(64-d)] \times X \\ B_1 + B_2 + B_3 = B \end{cases} \quad (7)$$

(c)原始体素的深度值 $576 \leq z \leq 607$, 即 $m=18, 0 \leq d \leq 31$ 。

映射体素的亮度值可由亮度分解方程组确定:

令 $B_1=X$, 则有

$$\begin{cases} B_0 = [d/(32+d)] \times X \\ B_1 = X \\ B_2 = [d/(32-d)] \times X \\ B_0 + B_1 + B_2 = B \end{cases} \quad (8)$$

为方便描述,将多层抗锯齿中使用的基于相邻2层光阀的映射方式记为1类映射,将上述的基于相邻多层光阀的映射方式记为2类映射。两类映射方式如图7所示。

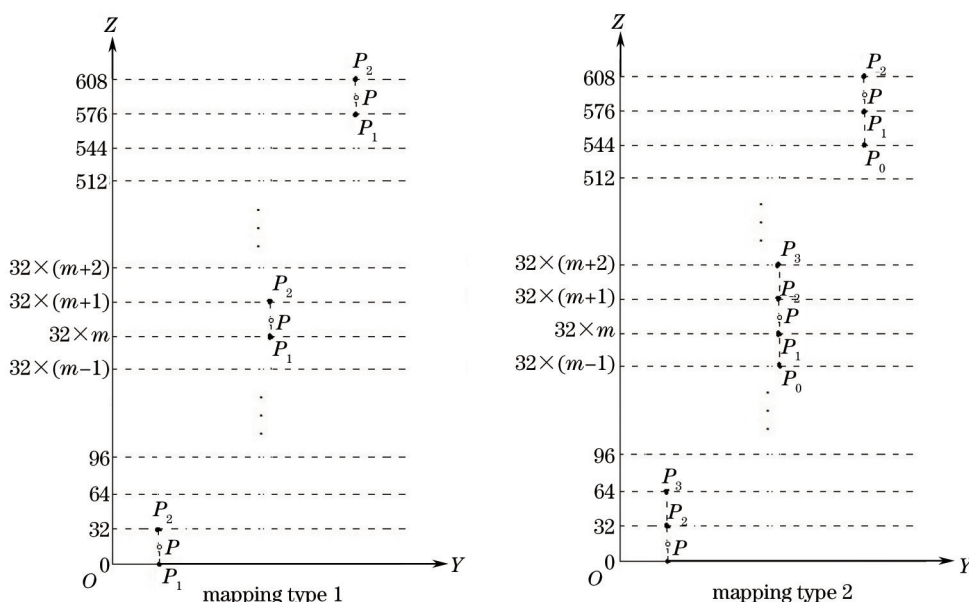


图7 两类映射方式示意图

Fig.7 Schematic diagram of two types mapping mode

4 基于分类映射的算法现实

4.1 两类映射对于深度连续性的影响

如图8所示,设 S_{m-1}, S_m, S_{m+1} 为 YOZ 平面上某条截交曲线被光阀所在深度分割成的3条连续曲线段, L_{m-1}, L_m, L_{m+1} 分别是其在光阀上映射体素的分布长度,其中, $1 \leq m \leq 17$ 。下面讨论 S_{m-1} 和 S_{m+1} 的映射类型对于 S_m 在深度连续条件下的偏轴观看角度的影响。

1) 若 S_{m-1}, S_{m+1} 均采用1类映射,由上文可知对于曲线段 S_m ,深度连续条件下的偏轴观看角度为 $\theta \leq 90^\circ - \alpha$, 其中 $\alpha = \arctan 32/L_m$ 。

2) 若 S_{m-1} 采用1类映射、 S_{m+1} 采用2类映射,设 S_{m-1} 与光阀 $N \cdot (m-1)$ 的交点为 P_{m-1} , S_m 与光阀 $N \cdot m$ 的交点为 P_m , y_{m-1}, y_m 为 P_{m-1}, P_m 的 Y 轴坐标,有:

$$L_{m-1} + L_m = |y_{m-1} - y_m| \quad (9)$$

设线段 $P_{m-1} P_m$ 的斜率为 K , 与 Y 轴所成锐角为 β , 则:

$$|K| = \tan \beta = 32/(L_{m-1} + L_m) \quad (10)$$

对于曲线段 S_m , 深度连续条件下的偏轴观看角度为 $\theta \leq 90^\circ - \beta$, 其中 $\beta = \text{ctan } 32 / (L_{m-1} + L_m)$ 。

3) 若 S_{m-1} 采用 2 类映射、 S_{m+1} 采用 1 类映射, 相似可得到深度连续条件下的偏轴观看角度为 $\theta \leq 90^\circ - \gamma$, 其中 $\gamma = \text{ctan } 32 / (L_m + L_{m+1})$ 。

4) 若 S_{m-1} 采用 2 类映射、 S_{m+1} 采用 2 类映射, 相似可得到深度连续条件下的偏轴观看角度为 $\theta \leq 90^\circ - \delta$, 其中 $\delta = \text{ctan } 32 / (L_{m-1} + L_m + L_{m+1})$ 。

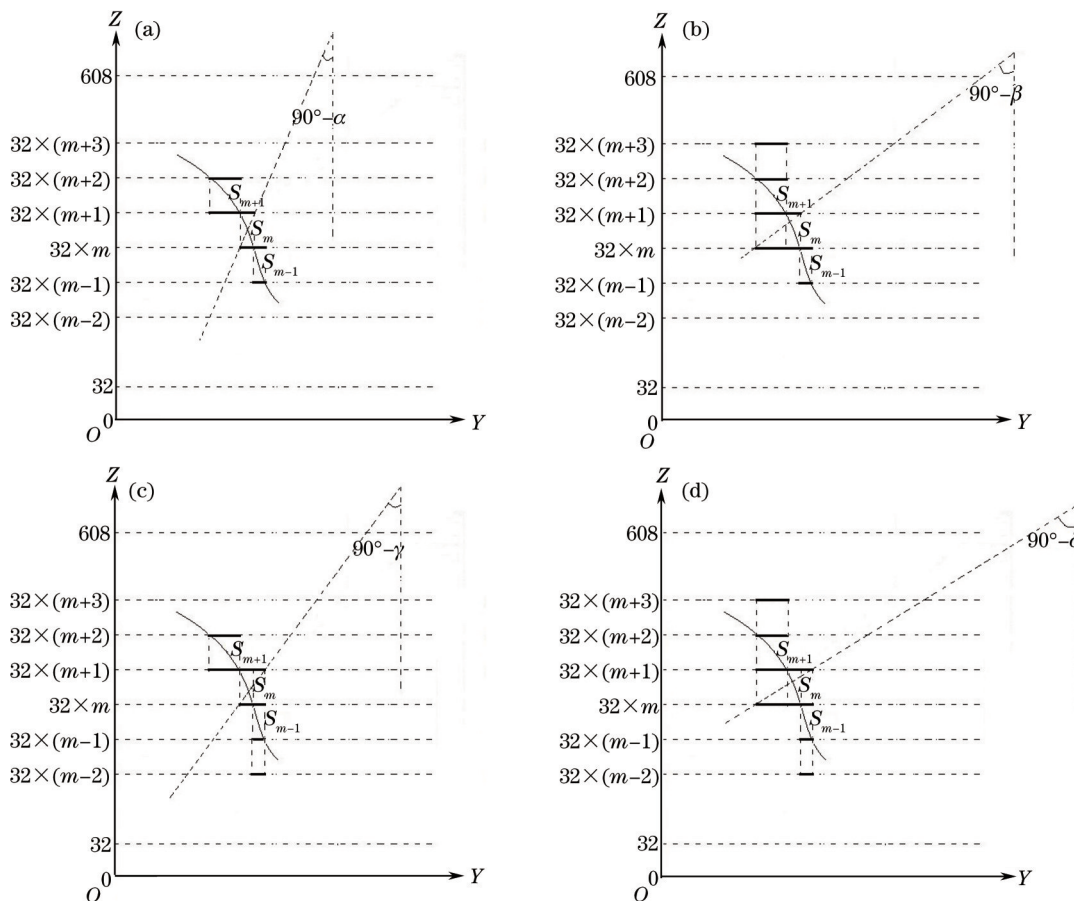


图 8 分类映射对于深度连续性的影响

Fig.8 Influence of classified mapping on depth continuity

显然可知:

$$90^\circ - \delta > 90^\circ - \beta > 90^\circ - \alpha, \tag{11}$$

$$90^\circ - \delta > 90^\circ - \gamma > 90^\circ - \alpha. \tag{12}$$

相比于采用 1 类映射, 对相邻曲线段采用 2 类映射使得曲线段 S_m 在深度连续条件下的偏轴观看角度得到明显扩展, 尤其在 S_{m-1} 和 S_{m+1} 均采用 2 类映射的情况下。但这种观看角度的扩展是以增加映射体素的数量为代价的, 2 类映射与 1 类映射相比, 映射体素数量增加了 1 倍。映射体素越多, 消耗的硬件资源越多, 对于系统硬件处理性能的要求也越高。因此, 在确保一定深度连续偏轴观看角度的基础上, 应优先采用 1 类映射, 尽量减少映射体素的增加。

4.2 算法实现过程

算法实现之前, 先根据预期的深度连续偏轴观看角度确定相应的映射体素的分布长度 L 。在项目设计中, 选取深度连续偏轴观看角度为 45° , 可得 $L=32$ 。设某条截交曲线被光阀所在深度分割为 n 条曲线段 $S_i (i=1, 2, \dots, n)$, 那么, 可以根据 L_i 值的不同, 求取所有 n 条曲线段 S_i 的映射类型。对 S_i 建立变量 M_i , 用来标志 S_i 的映射类型: $M_i=0$ 代表 1 类映射; $M_i=1$ 代表 2 类映射。下面给出了基于分类映射的深度抗锯齿算法的实现过程, 图 9 为算法实现流程图。

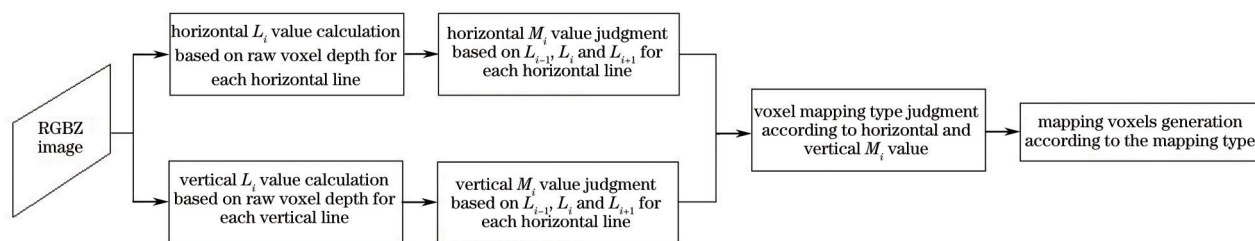


图9 基于分类映射的深度抗锯齿算法流程图

Fig.9 Flow chart of depth anti-aliasing algorithm based on classified mapping

1) L_i 值统计:真三维系统从计算机获取到RGBZ编码图像,然后对编码图像从水平方向(YOZ 截平面)和垂直方向(XOZ 截平面)分别进行 L_i 的计算。水平方向上,对每一行编码图像中的原始体素,根据其深度值判定其所在曲线段,对每一曲线段上原始体素数量进行统计即可得到 L_i 的值。垂直方向上对每一列图像进行相似操作。

2) M_i 值判定:首先将所有 M_i 清零,然后从 $i=0$ 到 $i=n$,逐一判断 $L_i \geq 32$ 是否成立。 $L_i \geq 32$ 成立则表明 S_i 在偏轴观看角度 45° 以内深度连续,不需要相邻曲线段 S_{i-1} 或 S_{i+1} 进行2类映射补偿;否则将 M_{i-1} 和 M_{i+1} 根据以下条件赋值:若 $L_{i-1}+L_i \geq 32$,则将 M_{i-1} 置1;否则,若 $L_i+L_{i+1} \geq 32$,则将 M_{i+1} 置1。如果 $L_{i-1}+L_i \geq 32$ 和 $L_i+L_{i+1} \geq 32$ 均不成立,则将 M_{i-1} 和 M_{i+1} 同时置1。由上述算法过程可知,在 $L_{i-1}+L_i \geq 32$ 和 $L_i+L_{i+1} \geq 32$ 均成立的条件下,若 $M_{i-1}=1$,则优先选择 S_{i-1} 的2类映射;否则优先选择 S_{i+1} 的2类映射。这样处理可以使得最终 n 条曲线段中为2类映射的曲线段数量最少,减少映射体素的增加。

3) 体素映射类型判定:对每一原始体素,算法步骤1)、2)执行完,可得到水平、垂直两个方向的 M_i 值。对每一个原始体素,将其两个方向的 M_i 值进行“或”操作,生成该体素的映射类型,确保水平和垂直两个方向上的深度连续偏轴观看角度。

4) 原始体素按照其对应的映射类型进行体素映射分解,生成映射体素。

算法完成之后,所有原始体素的分解为映射体素。在水平和垂直两个视角方向上,曲线段 S_i 通过 S_{i-1} 或(和) S_{i+1} 的2类映射,可能实现 45° 以内的深度连续偏轴观看角度,或至少可使偏轴观看角度相比于现有技术得到明显扩展。

4.3 算法仿真

下面以两幅老虎模型的RGBZ编码图像为对象验证算法效果。图10(a)为RGBZ编码图像,图10(b)、图10(c)为算法步骤2)执行过后的结果,其中图10(b)为水平方向 $M_i=1$ 的图像区域;图10(c)为垂直方向 $M_i=1$ 的图像区域。图10(d)为算法步骤3)执行过后的结果,即判定为2类映射的原始体素所在的图像区域。仿真结果表明算法可将RGBZ编码图像中的原始体素按照算法原理进行有效的体素映射类型判定。

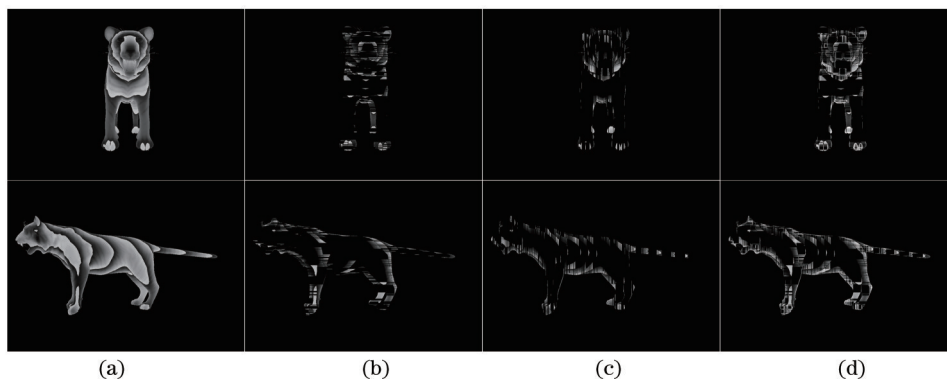


图10 算法处理结果

Fig.10 Results of the proposed algorithm

5 实验与讨论

为验证基于分类映射的深度抗锯齿算法效果,设计搭建了固态体积式真三维立体显示系统样机,如图 11 所示。

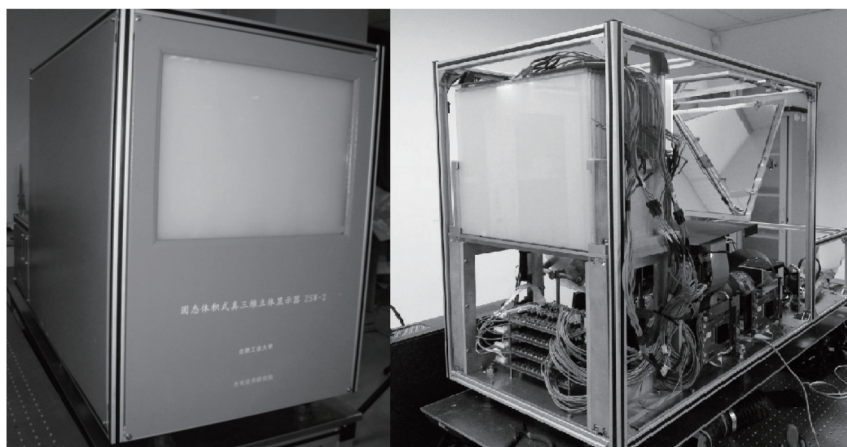


图 11 固态体积式真三维系统样机

Fig.11 Prototype of solid-state volumetric true-3D system

真三维系统具有 20 层液晶光阀组成的显示体,显示空间分辨率 $1024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel} \times 608 \text{ pixel}$,具有 4.782×10^8 有效感知体素。图 12 (a)、(c)、(e)为采用现有多层抗锯齿技术,在偏轴观察角 45° (左)、正视、偏轴观察角 45° (右)时的成像效果;图 12(b)、(d)、(f)为采用所提出的基于分类映射的深度抗锯齿算法,在偏轴观察角 45° (左)、正视、偏轴观察角 45° (右)时的成像效果。可见,在左右偏轴观看角度 45° 情况下,采用现有技术的成像有明显深度不连续现象,采用本文算法可有效改善深度连续性,使立体成像在深度方面过渡更加平滑。

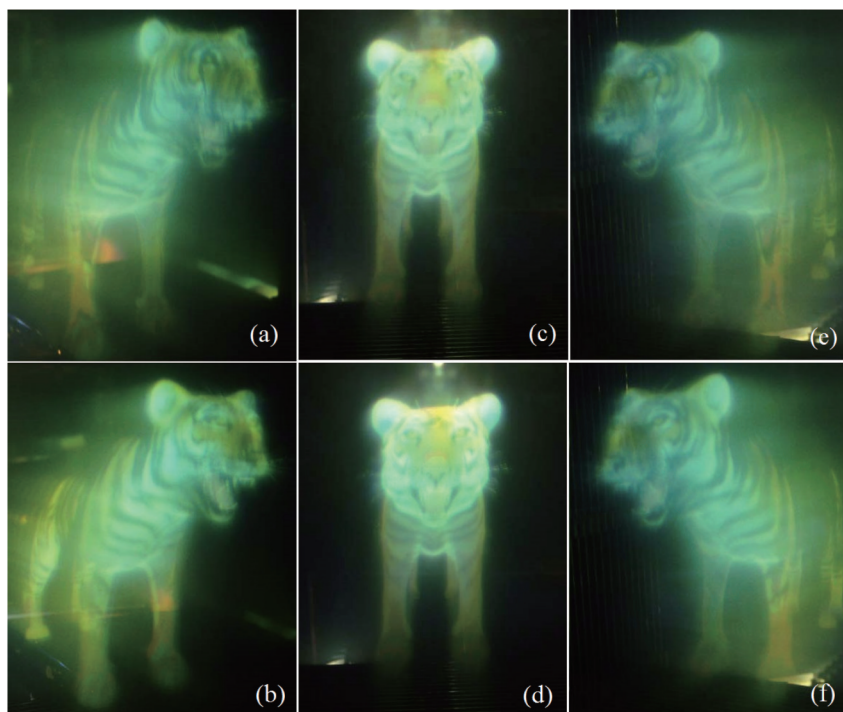


图 12 不同视角下的真三维成像效果

Fig.12 Effect of true-3D imaging under different angles of view

虽然实验成功验证了深度抗锯齿算法的可行性和有效性,但在某些三维成像场景下,2类映射的体素数量占比很高,映射体素的数量较大,会使硬件系统处理速度下降,导致显示图像更新率下降。后期工作考虑继续研究体素映射类型判定的最优化算法,在保证性能的基础上进一步降低映射体素的数量。

6 结 论

针对现有的多层抗锯齿技术在成像深度方向陡峭的三维图像时出现的深度不连续的问题,以YOZ(XOZ)平面与三维成像曲面的截交曲线分析为基础,探讨了深度不连续的成因,提出了基于相邻多层映射的体素分解方法以及体素映射类型的判定算法,使原始体素可根据算法自适应地确定映射类型。在搭建的固态体积式真三维立体显示系统上测试三维成像,图像立体感强,在较大的偏轴观看角度(约45°以内)下对于多数三维成像在深度方向过渡平滑,可以获得较好的深度连续性。

参 考 文 献

- 1 P Yeh, C Gu. 3D displays: Toward holographic video displays of 3D images [J]. *Chin Opt Lett*, 2013, 11(1): 010901.
- 2 Lü Guoqiang, Hu Yuehui, Zhang Tao, *et al.*. Current situation and development opportunities of 3D display [J]. *Vacuum Electronics*, 2012, (5): 22-27.
吕国强, 胡跃辉, 张涛, 等. 立体显示的现状、机遇与建言[J]. *真空电子技术*, 2012, (5): 22-27.
- 3 G Lv, Q Wang, J Wang, *et al.*. Multi-view 3D display with high brightness based on a parallax barrier [J]. *Chin Opt Lett*, 2013, 11(12): 121101.
- 4 Yang Lei, Xia Jun, Zhang Xiaobing, *et al.*. Three-dimensional display by holographic imaging on multiple focal planes [J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(2): 0209017.
杨磊, 夏军, 张晓兵, 等. 基于多平面全息成像的三维显示[J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 0209017.
- 5 Wan Yuhong, Man Tianlong, Tao Shiquan. Imaging characteristics and research progress of incoherent holography [J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(2): 0209004.
万玉红, 满天龙, 陶世荃. 非相干全息术成像特性及研究进展[J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 0209004.
- 6 Qin Kaihuai, Luo Jianli. Techniques for autostereoscopic display and its development [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2009, 14(10): 1934-1941.
秦开怀, 罗建利. 自由立体显示技术及其发展[J]. *中国图象图形学报*, 2009, 14(10): 1934-1941.
- 7 B G Blundell, A J Schwarz. The classification of volumetric display systems: characteristics and predictability of the image space [J]. *IEEE*, 2002, 8(1): 66-75.
- 8 Geng Zheng. High resolution volumetric three-dimensional display—state of the art in information technology [J]. *Science & Technology Review*, 2008, 25(20): 21-26.
耿征. 真三维高清晰度显示技术—信息显示领域的重要发展方向[J]. *科技导报*, 2008, 25(20): 21-26.
- 9 G E Favalora, J Napoli, D M Hall, *et al.*. 100 million-voxel volumetric display [C]. *SPIE*, 2002(4712): 300-312.
- 10 B G Blundell, A J Schwarz. *Volumetric Three-Dimensional Display Systems*[M]. New York: A Wiley-Inter Science Publication, 2000. 191-214.
- 11 Jiang Taiping, Shen Chunlin, Tan Hao. Overview of the true three-dimension volumetric display technologies [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2003, 8(4): 361-366.
姜太平, 沈春林, 谭皓. 真三维立体显示技术[J]. *中国图象图形学报*, 2003, 8(4): 361-366.
- 12 D Miyazaki, K Ohno, T Mukai, *et al.*. Real-time updatable volumetric display system based on inclined-plan scanning [C]. *IEEE Journal of Display Technology*, 2010, 6(10): 548-552.
- 13 A Sullivan. Depthcube solid-state 3D volumetric display [C]. *Electronic Imaging*, 2004, 5291: 279-284
- 14 Zhou Ling, Zhang Xiaobing, Yin Hanchun. Some discussion on visual depth perception in virtual reality [J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2000, 23(2): 117-123
周玲, 张晓兵, 尹涵春. 虚拟现实关于视觉深度感知的讨论[J]. *电子器件*, 2000, 23(2): 117-123.
- 15 Wang Shulu, Ming Hai, Wang Anting, *et al.*. Three-dimensional display based on human visual perception [J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(2): 0209007.
王书路, 明海, 王安廷, 等. 基于人眼视觉特性的三维显示技术[J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 0209007.
- 16 Dongye Shengyun, Wang Shigang, Wei Jian, *et al.*. Stereo image quality evaluation method of human depth perception [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2011, 16(9): 1758-1762.
东野升云, 王世刚, 韦健, 等. 人类深度感知立体图像质量评价方法[J]. *中国图象图形学报*, 2011, 16(9): 1758-1762.
- 17 Chen Gonghua, Jia Jianyuan. Study on the mechano-optical properties of digital micromirror devices [J]. *Journal of Applied Optics*, 2001, 22(2): 14-19.
陈恭华, 贾建援. 数字微反射镜的机械光学特征研究[J]. *应用光学*, 2001, 22(2): 14-19.

栏目编辑: 苏岑