

基于数字微镜的旋转体扫描 3 维显示系统

杨 忠 李 莉 鄂龙慧 龚华军 沈春林

(南京航空航天大学自动化学院, 南京 210016)

摘 要 体 3 维显示是真 3 维显示领域最前沿的一种解决方案, 其优点是可以直接、多人、多角度同时观察。为了在真实空间显示复杂 3 维图像, 研究并实现了一种基于数字微镜的被动式旋转体扫描 3 维显示系统, 即首先利用人眼的视觉暂留特性, 通过数字微镜将序列 2 维图像切片快速投影至旋转屏来完成真实 3 维图像的显示; 同时分析了系统的组成和原理, 并详细讨论了成像空间、体素激活装置和体 3 维引擎的硬件设计思想与软件核心算法。三棱锥和飞机实体模型的 3 维显示实验结果表明, 用户可在 360° 范围内观察到轮廓清晰、立体感强的物体 3 维图像, 说明该系统具备在真实空间显示复杂 3 维立体图像的能力, 也说明方案是有效且实用的。

关键词 数字微镜 体 3 维显示 旋转体扫描 成像空间

中图法分类号: TN 873, TN 27 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2010)01-0149-06

A Rotating Sweep Volumetric 3D Display System Based on DMD

YANG Zhong LI Li E Long-hui GONG Hua-jun SHEN Chun-lin

(College of Automation Control, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

Abstract Volumetric 3D display (V3D) is one of the newest solutions in the true 3D display field. Its primary advantages are direct group and all-point of viewing. In order to display a complex 3D image in real space, a passive rotating sweep V3D system based on digital micromirror device (DMD) is studied and realized, in which a sequence of two-dimensional slices of a 3D image are projected onto a rotating screen by DMD. Due to the vision persistence of human eyes, the image is reconstructed in the cylindrical volume swept out by the screen. The composition and principle of the system are analyzed, while the hardware design and software algorithms of the image space, voxel activation device and V3D engine are discussed in detail. The two V3D experiments with models of tricone and plane indicate that users can observe solid 3D images with clear profiles in the scope of 360 degree, and the result validates the design and shows that the system can display complicated 3D images in real space.

Keywords digital micromirror device (DMD), volumetric 3D display, rotating sweep image space

0 引言

体 3 维显示^[1-13] (volumetric 3D display, V3D) 是 3 维显示领域最前沿的一种解决方案。与传统 3 维显示不同, V3D 是在透明体空间内显示图像, 它包含了景物的高度、宽度及深度, 非常符合人眼的视觉感受。这种显示的优点是无需佩戴眼镜等辅助设备, 而

且可多人、多角度同时观察。因此, V3D 在交通管制、战争指挥、机械制造、医疗诊断、地震预报、科学研究、广告娱乐等众多领域有着非常好的应用前景^[2]。

根据图像空间形成方式的不同, V3D 可分为静态体空间显示和扫描体空间显示两类。后者由于具有数据处理量适中、系统实现相对容易等特点, 已成为当前体 3 维显示领域的研究焦点。特别是被动式旋转体扫描 (rotating sweep V3D, RSV 3D) 技术, 国

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (2005AA 311020); 国家自然科学基金项目 (60674100)

收稿日期: 2007-12-30 改回日期: 2008-12-15

第一作者简介: 杨忠 (1969—), 男, 教授。2005 年于南京航空航天大学控制科学与工程博士后流动站出站。主要研究方向为智能飞行控制、虚拟现实、机器人仿生等。E-mail: YZ_NUAA@163.com

外虽有少数系统已突破实验室研究而进入商品化应用阶段^[3-4],但仍存在着许多技术问题需要进一步解决。国内的研究成果中,基于主动发光的 LED 式旋转屏扫描^[5]和基于振镜的激光寻址 RSV3D^[6-7],是两种比较成功的 V3D 原理验证系统。

目前影响 V3D 效果的关键因素有以下 3 个:

1)空间光调制器。这是限制 V3D 技术发展的主要因素。假设一个场景有 256 个切片,每个切片的刷新率为 10Hz,则其对应的刷新率为 2560 fps (帧/s),而目前的平面显示刷新率最多不过其 1/20。

2)海量数据的传输与处理。V3D 的数据量非常大,必须采用高速数据传输接口。若要实现图像实时生成,海量数据的计算也是一个难题。

3)光和投影面材质。欲清晰成像,光束的方向性不能发散,以激光最理想;并且投影面的材质应具有良好的半反射半透射的光学特性。

在前期工作的基础上^[2,6-7],本文采用数字光学投影技术,建立了基于数字微镜 (digital micromirror device, DMD) 的 RSV3D 系统,成功实现了空间 3 维立体图像的显示^[8]。

1 RSV3D 系统的组成与原理

1.1 系统组成

RSV3D 系统可按功能划分为体 3 维引擎、体素激活装置和成像空间 3 个子系统,分别涉及 3 维图形学、计算机、光学、材料、机械和电子等多个学科领域(如图 1 所示)。3 者的软硬件必须协调同步,才能有效地完成复杂 3 维场景的显示。

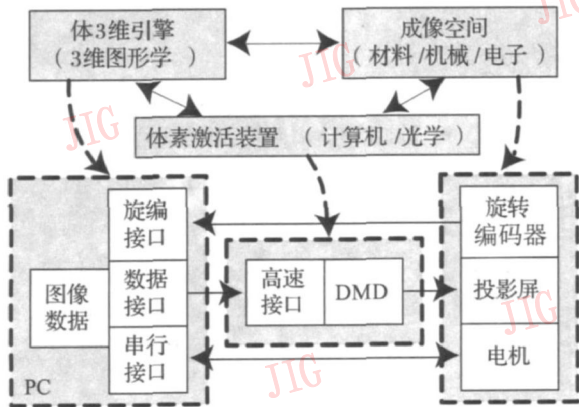


图 1 RSV3D 的系统结构图

Fig 1 System diagram of RSV3D

其中,体 3 维引擎是一个高速的图像发生器,负

责立体切片图像数据的快速生成;体素激活装置用于在投影屏上快速显示切片图像;成像空间是由投影屏高速旋转而构成的一个 3 维显示区域。

1.2 系统的工作原理

RSV3D 的基本原理如图 2 所示。投影屏在电机的驱动下绕对称轴高速旋转,扫描出一个柱形的成像空间。每一个刷新周期内,在投影屏位置反馈信号的触发下,先与该位置对应的切片图像数据通过硬件高速接口传递给 DMD,然后经体素激活后快速投影到旋转屏幕上。通过保持投影屏的旋转运动与切片图像数据的显示时序同步,即可将若干幅 2 维截面图像显示在指定的空间位置上。由于人眼的视觉暂留效应,一系列离散的 2 维切片图像被复合感知为一幅连续而完整的空间 3 维立体图像,由此即完成立体景物在 3 维真实空间中的显示。

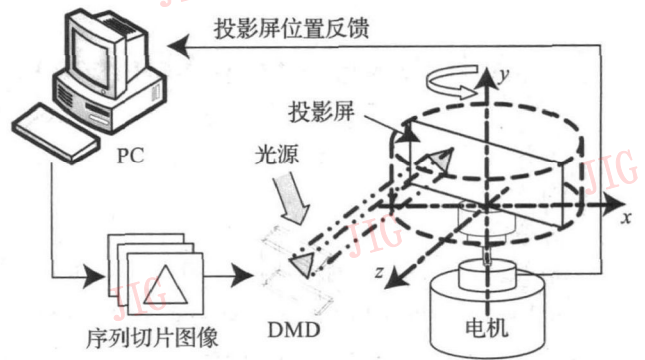


图 2 体扫描显示原理图

Fig 2 Schematic of Volumetric-swept display

2 成像空间的设计

成像空间的设计采用了投影面旋转法,其物理平台由投影屏、交流电机、变频器和旋转编码器等部件构成(见图 3)。设计要求该平台能提供一个稳定、均质,且各向同性的成像空间作为 RSV3D 系统的“显示器”,以接受承载了图像信息的光束。

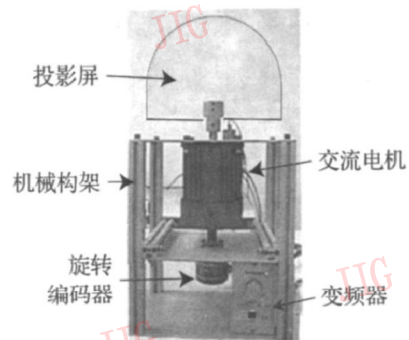


图 3 成像空间实物平台

Fig 3 Physical platform of image space

2.1 投影屏材料

旋转投影屏选用厚约 3mm 的透明有机玻璃材料制作,使其具有良好的机械强度和外形精度,并且能通过表面光学镀膜保证其半反半透的光学特性。实验表明,投影屏旋转时可形成 $\phi 200 \times 100$ 的圆柱形成像空间,内部光线呈弥散型反射,较好地满足了 360° 角可视的设计要求。

2.2 电机转速控制

相邻切片图像的时间间隔越小,显示的图像越连续。但由于 RSV 3D 的数据量大,因此传输速率是提高图像刷新率的瓶颈。本文选用 M9MC60S4Y 小型交流电机,通过 PC 控制变频器来使投影屏转速在 300~600 转/min 之间连续可调。当取半边投影屏为显示区域时,则成像空间的刷新率为 10~20Hz。由于人眼视觉暂留时间为 50~100ms,当光源闪烁频率超过 10Hz 时,给人的感觉就是连续发光体。

2.3 位置反馈

切片图像与投影屏瞬间所处的位置唯一对应,其顺序投影由该位置的反馈信号触发。本文采用了绝对值型旋转编码器与投影屏同轴旋转来实时采集角度信息,并通过数据采集卡反馈给 PC 的体 3 维引擎,以实现投影显示与屏旋转的同步。当编码器分辨率取 8bits 时,将有 256 个同步角度。

3 基于 DMD 的体素激活装置

体素激活装置应具备以下 3 个特性: 1) 刷新率高,能快速完成空间寻址并激发体素; 2) 激发的体素具有足够的亮度,以保证人眼能在短时间内分辨出来; 3) 分辨率高,可显示复杂的 3 维图形。

3.1 数字微镜

美国德州仪器 TI 的 DMD 是一种基于微机电系统 (MEMS) 的电输入的新型反射式空间光调制器^[8]。它由成千上万个可独立寻址和转动的微型光反射镜组成 (见图 4), 每个微镜安装在极小的铰链上,可向光源倾斜或反向倾斜 (对应 1 或 0 状态), 以便在投影面造成或亮或暗的像素 (大小 $16\mu\text{m} \times 16\mu\text{m}$, 间距 $1\mu\text{m}$)。

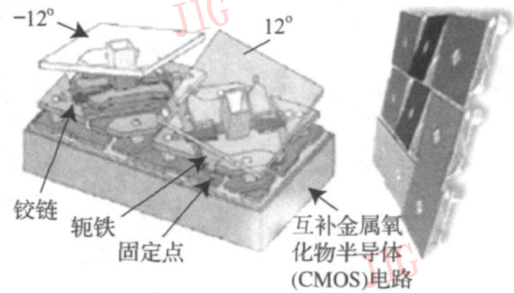


图 4 数字微镜的结构与排列

Fig 4 Structure and arrangement of DMD

DMD 的微镜呈网格状排列 (如 1024×768 点阵), 具有分辨率高、响应快、信噪比和光能利用率高、偏振无关等特点。本文通过 DMD 微镜的偏转调制光源发射的平行光束来将图像数据写入光波后再投影到成像空间, 由此实现立体图像的显示。

3.2 数据高速接口

DMD 的微镜面无论是局部还是整块偏转, 每幅图像的调制时间只与微镜偏转的响应速度有关。由于微镜面的“开关”速度达 $20\mu\text{s}$ 在理论上完全能满足 RSV 3D 系统快速寻址的要求。因此, 体素激活的速度主要取决于 DMD 数据输入接口的帧率大小。DMD 部件提供的 USB2.0 支持 480Mbps 的数据传输率和 900fps 的数据刷新率, 可满足显示要求。

3.3 体素激活装置的实现

体素激活装置是以 DMD 为核心的图像投影子系统。如图 5 所示, 投影机中嵌有 DMD 控制板, 二者配合完成体素的激活工作。其中, DMD 主要起光束反射调制的作用, 而具体成像则需要投影机的光源、均匀棒和镜头等部件完成。

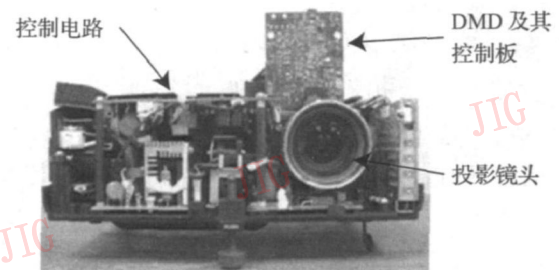


图 5 体素激活装置

Fig 5 Voxel activation device

切片图像的投影光路如图 6 所示。DMD 先根据 3 维引擎生成的切片图像来快速设置每块微镜到相应的状态, 同时将光源发出的光经均匀光路投射到 DMD 上; 然后由 DMD 把相应的图像反射到光学

透镜;最后投射到成像空间来完成一个切片的显示。

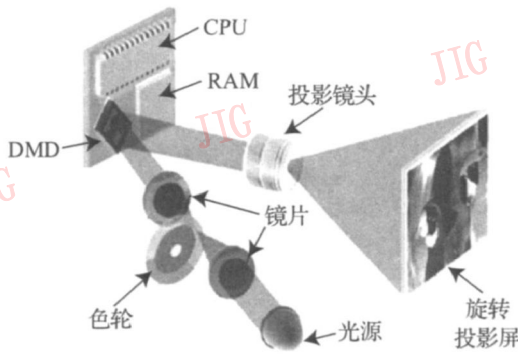


图 6 切片投影示意图

Fig 6 Schematic of slice projection

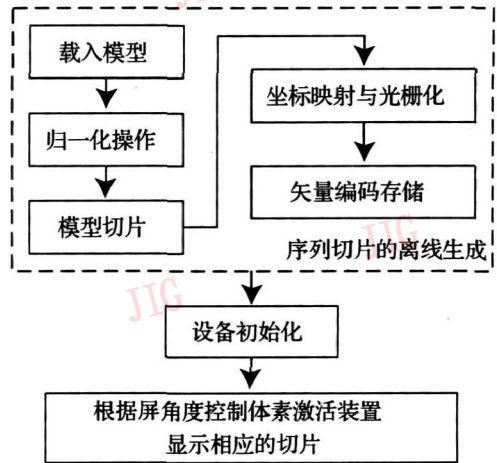


图 7 体 3 维引擎的工作流程

Fig 7 Work flow of V3D engine

3.4 体素绘制算法

1) 点绘制算法

点绘制算法的本质是寻址微镜,并设置其缓存单元为 1 或 0。由于 DMD 两个相邻微镜在图像缓存中的位置不相邻^[8],因此必须分析 DMD 所特有的二进制缓存格式,才能得到点绘制算法。

DMD 的 64 位高速数据接口 (DATA [0 63]) 在同一时刻只能传输 64 bits 数据。其寻址主要通过行寻址寄存器和 64 × 16 bits 列移位寄存器完成,并由数据分路器实现位访问。寻址时,行寻址寄存器先指向要访问的行,数据分路器为 15,每行需要 16 个周期,先寻址 15 31, ..., 1 023 列,然后数据分路器为 14 再寻址 14 30 ..., 1 022 列;当分路器为 0 时,寻址 0 16 ..., 1 008 列,则一行访问结束。可见,两个相邻微镜在缓存里相差 64 bits,即 8 Byte,接着,行寄存器指向下一行,分路器重新置为 15,直到访问完所有微镜。写完全部 DMD 需要 768 × 16 个时钟周期,当时钟频率为 120 MHz 时约合 0.1 ms。

2) 复杂图形和图像的绘制

直线的绘制采用经典的 Bresenham 算法,通过反复调用 SetPixel 画点函数来实现;对于曲线,可通过若干条直线分段拟合来完成绘制;对于图像,则直接调用 SetPixel 画点函数进行逐点绘制。

4 体 3 维引擎的设计

体 3 维引擎负责序列切片图像的离线生成,并在显示屏位置信号的触发下,向 DMD 实时传输对应切片的图像数据。本文通过 VC++ 6.0 编程实现了体 3 维引擎,其工作流程如图 7 所示。

4.1 模型切片算法

给定角度的切片,其内部包含了 3 维形体的轮廓信息。切片算法就是先用给定的空间平面穿过由 3 维网格构成的 3 维形体模型,然后取出所有的网格三角形与平面的交集来构成切片。设第 i 个模型网格为 M_i , $i \leq n$, 第 j 个切片平面为 P_j , 则切片集合为

$$S_i = (M_1 \cap P_j) \cup \dots (M_i \cap P_j)$$

网格三角形与切片平面的关系有不相交、交于一点和交于一条线段 3 种可能 (如图 8 所示)。其中,交于一点的情况又可视为起点与终点相同的特殊线段。因此,对于切片内的数据可以采用简单统一的数据结构进行处理,并建立一个统一的线段列表,用来存储全部的切片信息。

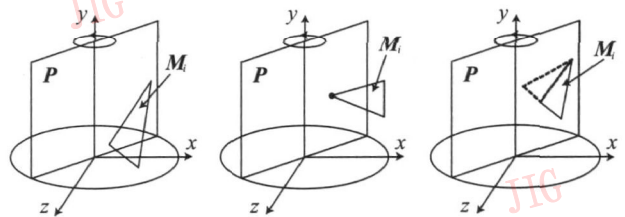


图 8 三角形与切片的几何关系示意图

Fig 8 Geometrical relations of triangle and slice

具体算法如下:针对绕 y 轴旋转的投影平面 (对应于切片),可建立如下切片方程:

$$z + x \cdot \text{tg}\theta = 0 \tag{1}$$

θ 在正投影面时为 0° ,逆时针增大 (俯视)。设 n 表示编码器反馈的二进制码, N 表示旋转一周的模型切片数,则切片的采样角度为

$$\theta = 2\pi \cdot n / N \tag{2}$$

设空间三角形的 3 个顶点 $V_1 = (x_1, y_1, z_1)$, $V_2 = (x_2, y_2, z_2)$, $V_3 = (x_3, y_3, z_3)$, 则 3 条边的直线方程为

$$\begin{cases} x = a_1 t + x_1 \\ y = b_1 t + y_1 \\ z = c_1 t + z_1 \end{cases} \begin{cases} x = a_2 t + x_2 \\ y = b_2 t + y_2 \\ z = c_2 t + z_2 \end{cases} \begin{cases} x = a_3 t + x_3 \\ y = b_3 t + y_3 \\ z = c_3 t + z_3 \end{cases} \quad (3)$$

3 条边对应的方向向量为

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \\ c_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 - x_2 \\ y_1 - y_2 \\ z_1 - z_2 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} a_2 \\ b_2 \\ c_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 - x_3 \\ y_2 - y_3 \\ z_2 - z_3 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} a_3 \\ b_3 \\ c_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_3 - x_1 \\ y_3 - y_1 \\ z_3 - z_1 \end{bmatrix}$$

将式 (3) 代入式 (1) 求 t 。若以边 $V_1 V_2$ 为例, 则有

$$t_1 = -\frac{\text{tg}\theta \cdot x_1 + z_1}{\text{tg}\theta \cdot a_1 + c_1}, \text{代入式 (3) 即可求得交点} \quad (4)$$

$$(x_0, y_0, z_0) = (a_1 t_1 + x_1, b_1 t_1 + y_1, c_1 t_1 + z_1)$$

若满足 $(x_0 - x_1)(x_0 - x_2) < 0$, $(y_0 - y_1)(y_0 - y_2) < 0$, $(z_0 - z_1)(z_0 - z_2) < 0$ 则判定该点位于边 $V_1 V_2$ 的两个顶点间, 并记录该交点的坐标。同理, 可依次求出其他边与面的交点, 即得到三角形与面的交线。

针对每个切片遍历全部三角网格, 先求出所有三角形与该切片的交线, 然后添加到存储切片信息的数据结构中, 即完成了整个模型切片的工作。由此可知, 对三角形网格模型进行切片的实质是求取全部三角形网格与切片所在平面的交集, 而该切片内就包含了 3 维形体的轮廓信息。

4.2 坐标映射算法

下面讨论内存切片投影到 DMD 的坐标映射算法。若一个 DMD 微镜片占 1 bit 则 1024×768 个微镜对应 98 304 Byte 的存储空间, 每行微镜片对应 128 Byte。物理空间中位于 i 行 j 列的微镜片, 其所对应的缓存单元地址是 m Byte 的 n bits (图 9), 并有

$$m = i \times 128 + 8 \times (15 - (j \% 16)) + j / 128$$

$$n = (j \% 128) / 16$$

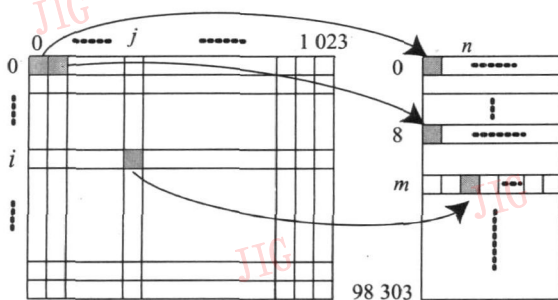


图 9 DMD 物理空间和存储空间的映射关系示意图
Fig 9 Mapping of DMD physical and storage space

以切片图像数据作为成像掩膜, 与该字节进行

或操作, 即可得到二进制信号 1 或 0 再写入 DMD 控制器的 SDRAM 单元, 即完成了对微镜片的开或关设置, 进而实现了基于体素的切片图像投影。

1) 正投影面的情况 ($\theta = 0$)

将切片 (归一化坐标 x, y) 映射到 DMD 区域, 设定 DMD 投影中心坐标 (511, 383) 对应成像空间原点, 即有

$$\begin{cases} DMD_x = 1024x + 511 \\ DMD_y = 768y + 383 \\ DMD_0 = 0 \end{cases} \quad (5)$$

2) 非正投影面的情况 ($\theta \neq 0$)

非正投影面上点的映射关系可按正投影面的比例关系进行计算。设透镜至投影面的距离为 L , 先用误差整形算法将坐标 (x, y) 转换成像素, 得

$$\begin{cases} X = 1024x \\ Y = 768y \\ Z = (X - 511) \cdot R \cdot \text{tg}\theta \end{cases} \quad (6)$$

式中, R 为像素在正投影面的放大率。根据相似三角形对应边成比例关系, 有

$$\frac{(DMD_x - 511) / L}{L - Z} = \frac{X}{L - Z}$$

$$\frac{(DMD_y - 383) / L}{L - Z} = \frac{Y}{L - Z}$$

因此, 所求的 DMD 映射坐标为

$$\begin{cases} DMD_x = 1024x \cdot L / (L - Z) + 511 \\ DMD_y = 768y \cdot L / (L - Z) + 383 \\ DMD_0 = \theta \end{cases} \quad (7)$$

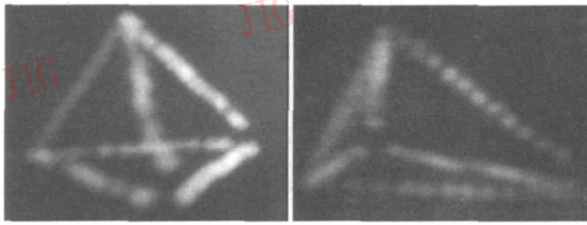
基于上述算法, 当所有切片数据中的直线顶点均映射到 DMD 投影区域, 即可由此获得对应投影屏角度的 DMD 图像缓存。其中将一个场景的切片数据全部转换成 DMD 图像缓存是体 3 维引擎运行中最重要的一步。

5 实验

为测试完整的 RSV 3D 系统的性能, 本文设计了若干项实验。实验在暗室中进行, 以 250W 白炽灯为成像光源, 电机转速取 600 转 / min, 对应的图像刷新率为 10Hz 并由 Sony DSC T10 数码相机记录显示结果, 电子快门为高速, 曝光补偿值 -1EV。

图 10 是分别从俯视角 30° 和仰视角 30° 看到的同一个三棱锥。该实验主要采用点和直线的绘制算法, 在旋转的成像空间内完成了具有真实 3 维深度感的物体成像。图像的大部分区域质量清晰稳定, 观察者从不同侧面可以观察到图像的不同部分,

真正做到了裸眼全景直接观察。仰视图的右下顶点之所以亮度不足是由于投影包含该顶点的切片图像时, 屏幕正好转到与投影光线平行的位置, 而无法聚焦于屏幕成像, 从而造成视觉死区。

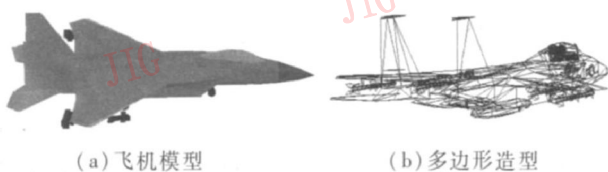


(a) 俯视 (b) 仰视

图 10 三棱锥的 V3D 效果

Fig 10 V3D effects of triangular pyramid

图 11 为普通计算机 LCD 屏幕上显示的飞机模型 3 维实体造型和多边形线条造型, 其较之三棱锥复杂了很多。图 12 为此 3 维飞机模型在 RSV 3D 系统中以 0° 视角和 -90° 视角的显示效果, 实际上观察者可以从 360° 的角度辨识出飞机的轮廓形状, 并清楚地感知到飞机的 3 维立体显示效果。导致图像边缘模糊的原因有两个: 1) 离焦问题, 由于 DMD 位置固定, 当投影屏转到不与投影光线垂直的位置时, 会出现成像光斑因离焦而产生图像边缘轮廓模糊的现象; 2) 由于受 USB 接口带宽的限制, 致使因切片数量有限而导致图像显示的局部细节度失真。

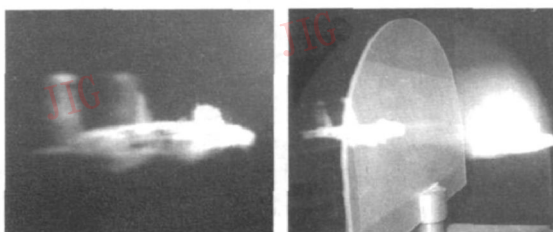


(a) 飞机模型

(b) 多边形造型

图 11 飞机模型实体与多边形造型

Fig. 11 Plane model entity and its polygon modeling



(a) 0° 视角

(b) -90° 视角

图 12 飞机模型的 V3D 效果

Fig. 12 V3D effects of plane model

6 结 论

本文利用被动发光旋转体来实现 RSV 3D 的思想, 设计并初步实现了一套基于 DMD 的 RSV 3D 系

统。与原有的矢量扫描振镜方式相比^[6], DMD 的应用有效改善了系统的显示性能, 使得复杂 3 维图像的快速显示成为可能。实验表明, 本文设计的基于 DMD 的 RSV 3D 系统方案切实可行, 值得开展进一步的深入研究和系统完善工作。

参考文献 (References)

- [1] Blundell B G, Schwarz A J. Volumetric Three Dimensional Display Systems [M]. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2000: 4-5.
- [2] Jiang Taiping, Shen Chun-lin, 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].
- [3] Favalora G E, Napoli J, Hall D M, et al. 100 million-voxel volumetric display [J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4712: 300-312.
- [4] Knut L, Detlef B, Bezecky D, et al. FELIX 3D display: An interactive tool for volumetric imaging [J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4712: 176-190.
- [5] Yao Yi. Studies and Optimization on LED Based Volumetric 3D Display System [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006 [姚奕. LED 体三维显示系统的研究和优化 [D]. 杭州: 浙江大学, 2006].
- [6] Tan Hao. Research on Key Technologies of Volumetric Display System [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2006 [谭皓. 真三维显示系统关键技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006].
- [7] Jiang Taiping. Research of the True-3D Volumetric Display Technology [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2006 [姜太平. 真三维立体显示技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007].
- [8] Shi Lian-jun. Research and Implementation of Volumetric 3D Display System Based on DMD [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007 [施连军. 基于数字微镜的体三维显示系统研究及实现 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007].
- [9] Tan Hao, Yang Zhong, Li Yu-feng. Hardware-based voxelization for true 3-D display [J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2006, 23(1): 59-64.
- [10] Favalora Gregg E. Volumetric 3D displays and application infrastructure [J]. IEEE Computer, 2005, 38(8): 37-44.
- [11] Knut Langhans, Klaus Olmann, Sebastian Reil, et al. FELIX 3D display: human-machine interface for interactive real three-dimensional imaging [C] // Proceedings of International Conference on Virtual Storytelling, Strasbourg, France, 2005: 22-31.
- [12] Gong Xing, Kirk Michae C, Chu James C H, et al. Evaluation of a volumetric display for radiation therapy treatment planning [J]. Medical Physics, 2006, 33(6): 2209-2211.
- [13] Bundell Barry G. Enhanced Visualization: Making Space for 3-D Images [M]. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2007.