

中图分类号: TN27; TP273.2

论文编号: 1028703 08-0006

学科分类号: 081105

博士学位论文

体三维显示系统关键技术 研究与实现

研究生姓名 李 莉

学科、专业 导航、制导与控制

研究 方 向 真三维显示技术

指 导 教 师 沈春林 教授

南京航空航天大学

研究生院 自动化学院

二〇〇八年四月

中图分类号: TN27; TP273.2

论文编号: 1028703 08-0006

学科分类号: 081105

博士学位论文

体三维显示系统关键技术研究实现

研究生姓名 李 莉

学科、专业 导航、制导与控制

研究方向 真三维显示技术

指导教师 沈 春 林 教授

南京航空航天大学

研究生院 自动化学院

二〇〇八年四月

课题资助项目: “863”项目(编号 2006AA01Z327)、国防预研基金(编号 K1601060109)、教育部博士点基金(编号 20030287008)、航空基金(编号 02F15001, 01C15001)、校创新基金(编号 Y0602-031)

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics

The Graduate School

College of Automation Engineering

Research and Implementation on Key Technologies of Volumetric Display System

A Thesis in

Navigation Guidance and Control

by

LI Li

Advised by

Professor **Shen Chun-Lin**

Submitted in Partial Fulfillment

of the Requirements

for the Degree of

Doctor of Philosophy

April, 2008

承 诺 书

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人享有著作权的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

本人授权南京航空航天大学可以有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅，可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

(保密的学位论文在解密后适用本承诺书)

作者签名： 李莉
日 期： 2008.6.16

摘 要

本文的主要研究是在国家 863 高技术项目——支持人机交互的真三维体元式显示技术(2006AA01Z327)、国防预研基金项目——真三维立体显示技术(K1601060109)支持下完成的。

体三维显示是近阶段实现真三维显示主要的可行技术途径。本文介绍了体三维的视觉显示机理,研究了系统构建,图像引擎、死区分析等关键技术,提出了一种快速数据生成算法,并给出了系统实现结果。本文的研究内容主要包括如下几个方面:

体三维显示技术的视觉机理。视觉现象是形成体三维显示的基础。本文着重讨论了基于体三维显示的视觉机制,提出基于视觉暂留和似动现象的双重成因。前者用于静态显示,后者用于动态显示。它们共同构成体三维显示原理。相关视觉理论的研究,提供了体三维显示成像计算与分析的理论依据。

系统构建和图像引擎是实现体三维显示系统的关键技术,其中要解决的技术问题有:成像空间构建、发光体素激活、以及图像引擎设计等。在成像空间构建方面,本文着重讨论了两种主要的成像介质,发光平面介质与漫射螺旋介质。由转动螺旋介质提供的成像空间,克服了平面介质中体素空间分布不均导致图像畸变的问题。在发光体素激活方面,通过线性和并行两种体素激活模式的研究,利用空间光调制技术的并行投影方法,极大程度上提高了空间可见体素光点的个数。结合两者的优势求解,给出利用快速转动螺旋屏幕,配合以高速的投影显示技术,实现空间体三维显示的优化技术方案。并提出与之匹配的三维图像引擎设计和成像死区改善方案,取得了较为成功的理论研究结果。

体三维显示的数据生成是本文研究的另外一个重点。海量数据是体三维数据快速生成所面临的关键问题,本文提出将三维重建领域的体心立方栅格理论运用到体三维显示中,以解决海量数据问题。详细论述了运用体素化进行体心立方采样和体心立方体素转换的实现方法。实验证明,该方法能够有效地降低海量数据,减少存储空间,加速体素生成,用于体三维显示还可提高三维图像的局部显示精度。

本文最后给出体三维显示系统的实现。介绍了体三维显示系统的软硬件平台设计方案,详细论述了基于数字微镜设备的空间光调制技术和旋转投影技术的实现方法,设计了三维数据表示方法,提出了一种与螺旋介质硬件特点相匹配的映射算法,从而完成了空间三维图像投影显示。结果表明,本文研制的体三维显示系统,在表述复杂图像信息和图像清晰度方面取得了实质性突破,部分性能指标已接近国际先进水平。

本文的核心成果是具有自主知识产权的 Helix-3D 体三维显示系统样机，各项性能指标均达到了预期的设计要求，是体三维显示技术的理论研究与工程实践的重要验证平台。

关键词：真三维显示；体三维显示；视觉暂留；似动现象；旋转投影技术；空间光调制技术；体心立方栅格；体素化；螺旋介质；数字微镜设备

Abstract

Under the support of National Hi-tech Programme — Interactive Volumetric 3D Display (2006AA01Z327), and Project of National Defense Pre-Research Foundation of China — True 3-D Volumetric Display (K1601060109), the key technologies of the volumetric display are researched and a volumetric prototype based on such technologies is implemented.

The volumetric display technology is the major method to realize the true 3D display. In this dissertation, the vision theory of the volumetric display is introduced. The construction of the system, the image engine, the image dead-zone, the generation of data and other key techniques are researched, together with the results of relative experiments being presented in the paper. The contributions of the dissertation are mainly listed as following:

This dissertation firstly investigates the basic function of vision and the essential display principle is given. It's the vision persistence and apparent movement that make the volumetric display system works. The former gives the static display effect, while the latter focuses on the dynamic display. The three dimensional image is provided by both of them. Additonally, the interrelated researches provide the theoretical ground for system simulation and analysis.

The key technologies in the volumetric display system are system-construction and image engine. The critical issues that need to be resolved include: the creation of the image space, the activation of the lightening voxels, the design of image engine and the dead zone analysis. In the aspect of creating image space, the emphasis of this paper lies in the analysis of two major media for imaging: the lightening plane medium and the diffusing helix medium. The latter features high quality imagery, which makes helix screen the ideal medium for the volumetric system. In terms of activating the voxels, two modes of addressing methods are mentioned: the linear and parallel addressing menthods. Based on the high-speed SLM, the parallel addressing method enhances the amount of voxels to a great extent. According to the discussion above, the SLM&helix screen solution is established, which reduces the huge amounts of voxel data and preserves the equally excellent image quality. The following part elaborates the design of image engine and the various dead-zone solutions.

The dissertation also proposes the fast voxelization algorithm. The details of

this algorithm are discussed in the paper. The introduction of the BCC lattice sampling space in this algorithm presents a well-around solution to deal with the huge amounts of voxel data. Therefore, the sampling and transforming methods are performed under the BCC lattice sampling space. Proved by corresponding experiments, an efficient reduction of the storage is realized by means of BCC lattice, which accelerates the process of the voxelization. Besides, the local precision of the three dimensional image is also increased.

Finally, the volumetric display platform is implemented. This dissertation mainly emphasizes the design of the hardware and software of this platform. Meantime, a discussion of the SLM based on DMD, the projection technique, data format, and a mapping algorithm matching to the helix screen is performed to accomplish the final three dimensional images. The results demonstrate that the prototype has made ground-breaking works in terms of the description of the complex image and its clarity. Part of the performance parameters approaches the international level.

The core achievement of this dissertation is a prototype of Helix-3D volumetric display system, with its performance fulfilling our design requirement. This prototype can act as a basic platform for future research work of high performance volumetric display system.

Key Words: true 3d display; volumetric 3d display; vision persistence; apparent movement; rotating projection technique; spatial light modulate technique; BCC(Body Centre Cubic); voxelization; helix screen; DMD(Digital Micromirror Device)

注 释 表

符号

V_l	显示成像空间大小
V_p	显示扫描空间体积
$\xi(\%)$	成像空间的扫描率
N_a	系统体素激活量
P	同步激活的体素数量
T	显示图像刷新周期
T_{act}	单个体素的激活时间
f	显示图像刷新率
f_v	旋转面的运动频率
ω_r	旋转面的旋转速度
T_{move}	激光束在屏幕上移动扫描的时间
T_{on}	开通激活信号的时间
T_{off}	切断激活信号的时间
T_{dwell}	单个体素持续发光的时间
V_{bcc}	体心立方栅格采样矩阵
B	体心立方栅格点集
D_6	6-邻接体心立方栅格点集
D_8	8-邻接体心立方栅格点集
D_{14}	14-邻接体心立方栅格点集
q_i	邻接向量
d	邻接距离
n_L	直线的单位法向量
n_P	平面的法向量
m_nR	体素分辨率
τ	圆轴扭转剪应力
J	负载转动惯量
T_p	电机加速转矩
T_s	电机制动转矩
T_{RMS}	电机转矩均方根
α	光路反射镜倾斜角度
k	光通量损耗因子

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 研究背景	1
1.1.1 人机“自然交互”对显示技术的需求	1
1.1.2 三维显示技术	2
1.1.3 体三维显示技术	3
1.2 体三维显示的研究动态	4
1.2.1 国外研究现状与发展趋势	4
1.2.2 国内研究现状与发展趋势	10
1.2.3 小结	11
1.3 论文主要研究内容及章节安排	11
第二章 体三维显示的视觉机理和成因分析	14
2.1 引言	14
2.2 体三维显示的视觉机理	14
2.2.1 视觉暂留现象	14
2.2.2 似动现象	15
2.2.3 小结	16
2.3 体三维显示的成因分析	16
2.3.1 视觉暂留的生理成因	16
2.3.2 似动现象的心理成因	19
2.3.3 小结	20
2.4 视觉成因的相关理论	20
2.4.1 闪光临界融合频率	20
2.4.2 人眼视觉的分辨力	22
2.5 本章小结	23
第三章 体三维显示系统的关键技术研究	24
3.1 引言	24
3.2 系统构建	24
3.2.1 成像空间的构建 (Image Space Creation)	25
3.2.2 发光体素的构造 (Voxel Generation)	29
3.2.3 发光体素的激活 (Voxel Activation)	29
3.2.4 小结	34
3.3 三维图像引擎	34
3.3.1 三维图像引擎的概述	34
3.3.2 三维图像引擎的输入和输出	35
3.3.3 三维图像数据的预处理	38
3.3.4 三维图像数据的激活方式	39
3.3.5 小结	40
3.4 死区分析	40
3.4.1 体素重叠死区	40

3.4.2 体素变形死区	41
3.4.3 视觉死区	42
3.4.4 阴影死区	43
3.5 本章小结.....	44
第四章 体三维显示数据生成算法研究	45
4.1 引言	45
4.2 体素化研究现状.....	45
4.3 BCC 体素化思想.....	46
4.3.1 BCC 空间采样	47
4.3.2 BCC 体素转换	52
4.3.3 小结	63
4.4 实验与分析	64
4.4.1 实验设计	64
4.4.2 结果分析	65
4.4.3 算法验证实例	67
4.5 本章小结.....	68
第五章 体三维显示原型样机的研制与实现	70
5.1 引言	70
5.2 系统总体设计.....	70
5.2.1 Helix-3D 系统	70
5.2.2 实用化的 Helix-3D 系统	72
5.3 螺旋成像空间子系统的研制.....	74
5.3.1 螺旋扫描屏的模型研究	74
5.3.2 约束机构的研究	82
5.3.3 运动驱动机构的研究	84
5.3.4 小结	89
5.4 DMD 体素激活子系统的研制	89
5.4.1 DMD 体素激活引擎研究.....	89
5.4.2 嵌入式光机平台开发	94
5.4.3 投影光路的设计与实现	95
5.4.4 小结	99
5.5 体三维引擎开发.....	100
5.5.1 体三维引擎功能模块	100
5.5.2 体三维数据表示方法	102
5.5.3 体三维数据的螺旋切片算法	102
5.5.4 螺旋切片的优化算法	104
5.6 系统测试与性能评估.....	107
5.6.1 系统测试的性能评估	107
5.6.2 三维图像质量的评估参数	107
5.6.3 实验结果与分析	108
5.7 本章小结.....	110
第六章 总结与展望	111

6.1 研究内容的总结.....	111
6.2 研究内容的创新.....	112
6.3 下一步的工作展望.....	112
参考文献	114
致 谢	123
在学期间的研究成果及发表的学术论文	124

图清单

图 1.1 自然交互概念的示意图.....2

图 1.2 伪三维显示造成的空间错觉.....2

图 1.3 自动立体镜技术的局限性.....3

图 1.4 体三维显示技术的分类.....4

图 1.5 基于固体介质能量跃迁的体三维显示技术.....5

图 1.6 气体介质能量跃迁的体三维显示装置.....6

图 1.7 CRS 射线球的体三维显示方法.....6

图 1.8 旋转发光二极管体三维显示技术.....7

图 1.9 Felix 体三维显示系统的原理示意图.....8

图 1.10 Perspecta™ 3D System 原理示意图.....9

图 1.11 基于体三维显示技术的人机交互最新进展.....9

图 1.12 南京航空航天大学第 I 代和第 II 代的体三维显示系统.....10

图 1.13 第 III 代的体三维显示样机概念示意图.....11

图 2.1 保罗·罗盖特的留影盘.....15

图 2.2 小鹿奔跑的四个瞬间.....15

图 2.3 视觉暂留效果.....16

图 2.4 视网膜的基本构造和视觉形成过程.....17

图 2.5 视觉暂留的迟滞效应.....18

图 2.6 体三维显示的“切片投影”原理.....18

图 2.7 视敏角示意图.....22

图 3.1 平移扫描和旋转扫描.....25

图 3.2 平面旋转扫描.....26

图 3.3 体素空间均匀性的比较.....27

图 3.4 “螺旋叶片”样机.....28

图 3.5 单个体素激活时间.....32

图 3.6 体三维显示系统的研制路线.....33

图 3.7 三维图像引擎的基本组成框架.....35

图 3.8 体素属性表.....36

图 3.9 体素属性表在图像切片中的分配.....37

图 3.10 三维图像数据处理的流程.....38

图 3.11 水平方向上的体素重叠情况图.....41

图 3.12 与光轴成夹角的体素重叠情况.....41

图 3.13 体素变形死区.....42

图 3.14 显示屏影响的视觉死区.....43

图 3.15 LED 系统的配光曲线.....43

图 3.16 单螺旋面的视觉死区.....43

图 4.1 体素化与三维重建的互逆关系.....47

图 4.2 BCC 栅格和 BCC 体素.....47

图 4.3 BCC 的三种邻接方式.....48

图 4.4 BCC 采样栅格示意图.....49

图 4.5 归一化的采样空间.....50

图 4.6 BCC 栅格采样点溢出修正	51
图 4.7 BCC 体素阵列	52
图 4.8 体素化原理示意图	53
图 4.9 含有空洞的体素化表面	55
图 4.10 单个六边形像素示意图	55
图 4.11 定理 1 证明示意图	57
图 4.12 三角形的最小包围盒	58
图 4.13 体素空间的逻辑坐标	59
图 4.14 量化器设计	60
图 4.15 体素与三角形的位置关系	62
图 4.16 3DS 模型 cow 的体素化二维显示结果	66
图 4.17 3DS 模型 bunny 的体素化二维显示结果	66
图 4.18 两种体素化算法体三维显示结果的比较	68
图 5.1 Helix-3D 物理系统模型	71
图 5.2 Helix-3D 系统基本结构	71
图 5.3 两种 Helix-3D 显示实现方案的比较	73
图 5.4 Helix-3D 概念样机	73
图 5.5 螺旋扫描子系统的构成	74
图 5.6 螺旋结构的显示空间	75
图 5.7 螺旋面三维模型和螺旋面材料属性	76
图 5.8 螺旋面的载荷和制约分析模型	76
图 5.9 螺旋面旋转运动的模拟结果（由上至下分别为 a,b,c）	77
图 5.10 支撑墙结构	78
图 5.11 加入支撑的运动模拟结果（由上至下分别为 a,b,c）	79
图 5.12 螺旋面边界的包覆圈	80
图 5.13 边界包覆的运动模拟结果（由上至下分别为 a,b）	80
图 5.14 圆角结构、镂空和加强筋设计	81
图 5.15 模型和实物的比较	81
图 5.16 阶梯轴模型与实物	83
图 5.17 转轴模态仿真结果	83
图 5.18 轴向连接（轴身和两轴端）	84
图 5.19 “内外嵌套”闭环系统	85
图 5.20 运动驱动物理系统	88
图 5.21 DMD 数字微镜的结构与排列	90
图 5.22 Helix-3D 系统中 DMD 显示引擎的作用	90
图 5.23 DMD 芯片与参数	91
图 5.24 高速并口的开发方案	91
图 5.25 ALP-3 高速模组工作原理	92
图 5.26 高速模组的开发	92
图 5.27 DMD 二进制数据格式	93
图 5.28 DMD 物理空间和存储空间的映射	94
图 5.29 光机平台的设计	94
图 5.30 嵌入式光机平台	95
图 5.31 投影光路的设计	96

图 5.32 成像空间的计算模型.....96

图 5.33 简化反射光路的计算模型.....97

图 5.34 投影光路的计算.....97

图 5.35 光路长度的计算模型.....98

图 5.36 反射镜角度的计算模型.....99

图 5.37 实际简化光路.....99

图 5.38 Helix-3D 体三维显示系统100

图 5.39 三维引擎的组成模块.....101

图 5.40 三维数据处理方法流程图.....101

图 5.41 对 $L \times M \times N$ 个三维体素进行切片操作的示意图103

图 5.42 三维数据切割示意图.....103

图 5.43 将 n 个体素数据依次分配给 N 层切片的“逆向分配”示意图105

图 5.44 Hand.3ds 模型的螺旋切片示意106

图 5.45 由切片图像构成的三维立体图106

图 5.46 简单几何模型的三维显示效果.....109

图 5.47 复杂造型模型的三维显示效果.....109

图 5.48 体三维显示技术的代表样机.....109

图 6.1 基于 Helix-3D 显示的人机交互技术示意图.....113

第一章 绪 论

1.1 研究背景

人机交互^[1-6](Human Computer Interaction, 简称 HCI)是计算机科学中新兴的研究领域,也是目前国际上计算机科学技术研究的一个重要方向。它研究人与机器的对话,并通过计算机输入、输出设备,实现高级生命人类和非生命机器之间的交互式对话。

作为“人机对话窗口”,显示终端在交互系统中占据着极其重要的地位。它一方面接受由输入设备给机器输入的有关信息和问题;另一方面,以文字或图形图像的形式给人提供大量反馈信息及提示请示,以一种双向交流形式实现人机交互。它是连接人机的主要工具,也是建立对话的关键设备,因此,人机交互技术研究的重要内容之一是与显示终端相关的显示技术。

支持人机交互的显示技术研究已有 60 年历史。早期系统使用的模拟显示终端已变成今日的数字显示终端,所支持的交互界面也逐渐由最初的“文字符号”界面演变成如今的“图形用户”界面。在人机交互从第一代“文字符号”交互技术^[7],第二代“图形”交互技术^[8],到第三代“自然交互”技术^[9-12]的进化历程中,显示技术总是在不断地适应着人机交互所提出的新任务要求。

1.1.1 人机“自然交互”对显示技术的需求

经历了多年来对交互技术本身过于关注,以“计算机为中心”的纯理性人机交互阶段,近年来随着认知学、人机工程学、心理学等学科的发展,用户的感受与体验不断受到重视,形成了一种“以人为本”的新一代人机交互技术。这是一种基于人的本位需求^[12],使机器适应人的思维特性和行动特性的自然交互方式。

这里的“自然交互”,有两层含义:首先人生活在三维世界,习惯于三维的客观对象,与之交互的应该也是与自然世界特征一致的“真三维环境”,这决定了交互只能发生在三维场所^[13];其次是指交互者使用与生俱来的自然技能或行为习惯,不需增加认知负荷或后天的学习,就能使人机交互像人与人交互那样自然、准确和快捷,实现“完全自由”,这表明人机交互时不应有任何束缚,应允许裸眼观看和自由移动^[14,15]。如图 1.1 给出的自然交互概念示意图,交互者在图中显示器提供的真三维场所内,多人、多角度、同时、无需任何助视仪器,以一种完

全符合人类在视觉观察及深度感知方面的自然生理习惯，进行对象的自由操作。

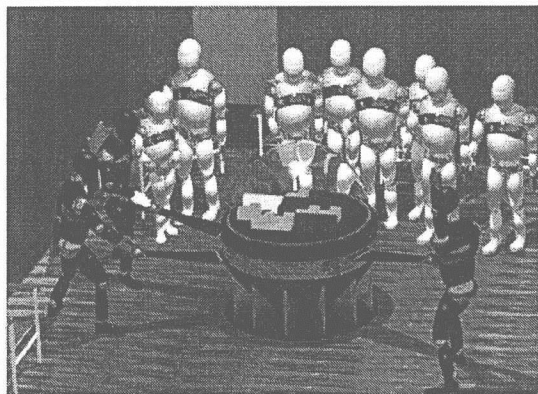


图 1.1 自然交互概念的示意图

由此可知，自然交互是一种基于三维空间显示的无约束交互行为。要实现这种交互，相应地显示技术必须满足两点要求：提供一个三维交互环境，和支持交互者自由裸眼观察。而目前人们习惯以电子渲染功能代替画笔，利用传统绘画技巧如透视、阴影和遮挡，经过光照、纹理和材质等计算，模拟出逼真的三维场景，通过平面显示器表现三维图像形状和空间关系的显示技术，这是一种“伪三维”的显示技术^[16,17,66]。严格意义上来说，基于该技术与计算机进行交互，不是真正的三维交互。因为它提供的交互场所是局限的二维平面框架，违背了自然交互的“真三维环境”要求，这将使人机交互面临因缺乏真实深度信息导致空间关系混乱，易造成空间错觉（图 1.2），从而引发位置判断失误、操作行为偏差、交互任务失败等一系列问题，因此有必要发展支持真正人机三维交互的三维显示技术。

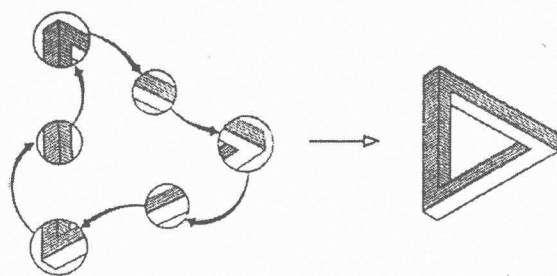


图 1.2 伪三维显示造成的空间错觉

1.1.2 三维显示技术

三维显示技术发展至今，已有四种基本类型^[66]：立体镜技术、自动立体镜技术、全息技术和体三维显示技术。实际上，若以成像空间的真实或虚拟来重新分