

南京航空航天大学
论文集

(二〇〇八年) 第15册

自动化学院

(第1分册)

南京航空航天大学科技部编

二〇〇九年五月

Z427/1033(2008)-(15)



NUAA2009044463

Z427
1033(2008)-(15)

自动化学院

031 系



2009044463

(15)

南京航空航天大学自动化学院2008年度发表论文 (1)

序号	作者姓名	职称	单位	论文题目	刊物名称	年卷期
1	李莉 李玉峰 沈春林 龚华军 杨忠	博士 副高 正高 正高 正高	031 031 031 031 031	基于数字微镜的旋转体三维显示装置研究	仪器仪表学报	2008, 1 (1)
2	LI Li GONG Hua-jun SHEN Chun-lin	博士 正高 正高	031 031 031 031	Novel Volumetric Three-Dimensional Display System	Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics	2008, 25 (1)
3	李莉 杨忠 耿征 沈春林	博士 正高 正高 正高	031 031 031 031	面向真三维立体显示的数字微镜器件应用研究	传感器与微系统	2008, 27 (9)
4	李莉 杨忠 沈春林 刑建芳	博士 正高 正高 硕士	031 031 031 031	面向立体显示的点采样栅格优化策略及其性能分析	山东大学学报 (工学版)	2008, 38 (3)
5	樊琼剑 杨忠 冯茂岩 沈春林	讲师 教授 教授 教授	031 031 031 031	一种基于双环控制的多无人机紧密编队飞行	航空宇航科学与技术全国博士生学术论坛	2008, 10.
6	Qiongji an Fan Zhong Yang Fan Ting Chunlin Shen.	讲师 教授 讲师 教授	031 031 031 031	Hardware-in-the-Loop Simulation Testbed Design of FCS-VP Based on Statemate	Proceeding of the 1st International Symposium on Chinese Control and Decision Conference (CCDC), Yantai, China	2008, 7: 4633-4636.
7	Qiongji an Fan Zhong Yang Fan Ting Chunlin Shen.	讲师 教授 讲师 教授	031 031 031 031	A Virtual Prototype Design Approach of the Embedded Hybrid System	Proceeding of the 3rd International Conference on Innovative Computing, Information and Control (ICICIC), Dalian, China	2008, 6: 65
8	樊琼剑 杨忠 方挺 沈春林	讲师 教授 讲师 教授	031 031 031 031	基于无人机飞行控制器的地面检测系统研究	仪器仪表学报	2008, 29 (4) 增
9	方挺 沈春林	博士 教授	031 031	一种主动轮廓模型的运动跟踪方法	信息与控制	2008, 37 (1)
10	方挺 杨忠 沈春林	博士 教授 教授	031 031 031	无人机编队视频序列中的多目标精确跟踪	山东大学学报	2008, 38 (4)

南京航空航天大学自动化学院2008年度发表论文 (1)

11	FangTing YangZhong ShenChunLin	博士 教授 教授	031 031 031	A fast way for moving tracking based on ballon Snake with region information	Transactions of Nanjing University of Aeronautics & astronautics	2008, 25(1)
12	FangTing YangZhong ShenChunLin	博士 教授 教授	031 031 031	Fuzzy Logical Guidance baased on Pariticle Swarm Optimized Parameters	The 27th Chinese Control Conference (CCC08)	2008-7-1 昆明
13	刑建芳 龚华军 沈春林 史连军	博士 教授 教授 硕士	031 031 031 031	基于数字微镜和旋转扫描技术的体三	光电子与激光	2008-8-1
14	杨 忠 方 挺 樊琼剑	正高 博士 博士	031 031 031	基于视觉传感器的UAV编队飞行	Proceeding of the 27th Chinese Control conference	2008. 7
15	辛 亭 杨 忠 樊琼剑 刘成功	硕士 教授 博士 硕士	031 031 031 031	一种改进的快速扩展随机树航迹规划算法	中国航空无线电电子研究所	2008, 39 (4)
16	吴 涛 杨 忠 陈 卫 樊琼剑	硕士 教授 硕士 博士	031 031 031 031	运动型无线传感器网络节点设计	中国信息技术应用学术研讨会	2008. 12
17	陈复扬 姜斌 张柯	中级 正高 博士	031 031 031	The Integrated Application on Adaptive Control of Unmanned Combat Aerial Vehicles	The 2nd International Symposium on Systems and Control in Aeronautics and Astronautics	ISSCAA 2008. 11
18	何真 陆宇平	博士 正高	031 031	低能耗临近空间飞行器的力学分析与配平	兵工学报	2008, 29 (8)
19	何真 陆宇平	博士 正高	031 031	无人机编队队形保持控制器的分散设计方法	航空学报	2008, 29 (sup.)
20	陆宇平 何真	正高 博士	031 031	变体飞行器技术	航空制造技术	2008, 20 (22)
21	王仕鹏 陆宇平	硕士 正高	031 031	一种网络控制系统的组建及模糊PID算法仿真	仪表技术与传感器	2008, 29 (7)
22	鲁波 陆宇平	硕士 正高	031 031	高超声速飞行器的神经网络动态逆控制研究	计算机测量与控制	2008, 16 (7)
23	林万波 陆宇平	硕士 正高	031 031	基于MEMS技术的三角翼飞行器涡流控制系统研究	计算机测量与控制	2008, 16 (7)
24	宋秀毅 陆宇平	硕士 正高	031 031	嵌入式大气数据传感系统及其校正	应用科学学报	2008, 26 (3)
25	宋秀毅 陆宇平	硕士 正高	031 031	飞翼飞行器嵌入式大气数据传感系统算法研究	传感器与微系统	2008, 27 (4)
26	方习高 陆宇平	硕士 正高	031 031	一种安装在飞行器机翼前缘的FADS系统方案研究	传感器与微系统	2008, 27 (3)
27	方习高 陆宇平	硕士 正高	031 031	一种飞翼布局飞行平台FADS系统应用方案研究	计算机测量与控制	2008, 16 (4)
28	方习高 陆宇平	硕士 正高	031 031	FADS系统在飞翼布局飞行器上的应用研究	飞机设计	2008, 28 (1)

南京航空航天大学自动化学院2008年度发表论文(1)

29	方习高 陆宇平	硕士 正高	031 031	嵌入式大气数据传感系统的求解算法研究	计算机测量与控制	2008, 16 (3)
30	吉顺平 陆宇平	博士 正高	031 031	基于复用与跨层技术的智能传感器的设计	传感器与微系统	2008, 27 (6)
31	吉顺平 陆宇平	博士 正高	031 031	网络控制系统的分析与硬件在线仿真	系统仿真学报	2008, 20 (17)
32	吉顺平 陆宇平	博士 正高	031 031	基于UDP/IP的工业以太网网络协议的设计	信息与控制	2008, 37 (5)
33	吉顺平 陆宇平	博士 正高	031 031	一类工业以太网网络通信协议的设计与性能分析	小型微型计算机系统	2008, 29 (12)
34	吉顺平 陆宇平	博士 正高	031 031	Equivalent Sample Theory of Networked Control Systems and its Application	Journal of systems engineering and electronics	2008, 19 (6)
35	郭玲 陆宇平	硕士 正高	031 031	大气紊流的蒙特卡罗仿真	第二届中国导航、制导与控制学术会议	2008
36	王文涛 陆宇平	硕士 正高	031 031	飞翼式飞机着陆段纵向控制律设计研究	第二届中国导航、制导与控制学术会议	2008
37	孔琳玲 陆宇平	硕士 正高	031 031	飞翼飞行平台强扰动下的飞行边界控制技术	第二届中国导航、制导与控制学术会议	2008
38	刘春生 张绍杰 胡寿松	正高 讲师 正高	031 031 031	Neural Network Based Robust Nonlinear Control for a Magnetic Levitation System	International Journal of Innovative Computing, Information and Control	2008, 9 (4)
39	刘春生 张绍杰 胡寿松	正高 讲师 正高	031 031 031	Adaptive Neural Networks-Based Fault Detection and Diagnosis with Unmeasured States	IET Control Theory & Applications	2008, 2 (12)
40	刘春生 胡寿松	正高 正高	031 031	一类执行器卡死的非线性系统T-S模糊自适应容错控制	系统工程与电子技术	2008, 30 (06)
41	彭浩 刘春生	硕士 正高	031 031	H. 264中基于多宏块分割模式的时域误码掩盖算法	计算机仿真	2008, (10)
42	罗亮 刘春生	硕士 正高	031 031	H. 264/AVC快速帧内预测模式选择算法	计算机应用	2008, 28 (4)
43	石海燕 刘春生	硕士 正高	031 031	模糊滑模控制在磁悬浮球系统中的应用	航空兵器	2008, (5)
44	杨蒲	讲师	031	陀螺稳定平台自适应分层滑模速度控制	兵工学报	2008, 29(7)
45	杨蒲	讲师	031	陀螺稳定平台非线性摩擦的灰色滑模控制	系统工程与电子技术	2008, 30(7)
46	杨蒲	讲师	031	陀螺稳定平台模糊自调整滑模解耦控制	电机与控制学报	2008, 12(5)
47	杨欣 费树岷	中级 中级	031 外	基于类矩阵和特征融合的加权自适应人脸识别	中国图象图形学报	2008, 13 (5)
48	杨欣 费树岷	中级 中级	031 外	小样本条件下基于全局和局部特征融合的人脸识别	信号处理	2008, 24 (1)
49	刘素京 杨琳 王从庆	硕士 副高 正高	031 031 031	基于核主成分分析和支持向量机的飞机舱音信号识别	《东南大学学报》	2008, 38(增刊II)
50	王从庆 杜红伟	正高 硕士	031 031	一种基于皮层柱侧抑制的神经网络群	《信息与控制》	2008, 37 (4)
51	朱雷 王从庆	硕士 正高	031 031	自由浮动冗余度机器人的姿态稳定控制	《机械科学与技术》	2008, 27 (5)
52	史大军 王从庆	硕士 正高	031 031	基于滤波器滑模控制的空间柔性冗余机器人系统的控制仿真研究	《东南大学学报》	2008, 38(增刊II)

南京航空航天大学自动化学院2008年度发表论文 (1)

53	罗战武 王从庆	硕士 正高	031 031	Singular Perturbation composite control of a free-floating flexible dual-arm space robot	Academic Journal of Xi' an Jiaotong University	2008, 20 (1)
54	刘建业 华 冰 赖际舟 王 松	正高 博士 副高 硕士	031 031 031 031	基于安装方式激励的捷联惯导在线标定算法研究及仿真分析	仪器仪表学报	2008, 29 (12)
55	李荣冰 刘建业 赖际舟 温佰仟	讲师 正高 副高 硕士	031 031 031 031	微小型飞行器惯性组合姿态确定与航路导航研究	航空学报	2008, 29 (S1)
56	钱伟行 刘建业 赵 伟 赵文芳	博士 正高 副高 硕士	031 031 031 031	基于转动基座的SINS初始对准方法研究	宇航学报	2008, 29 (3)
57	熊 剑 刘建业 赖际舟 谢 征	博士 正高 副高 博士	031 031 031 031	基于二阶插值滤波的粒子滤波改进算法研究	控制与决策	2008, 23 (10)
58	郁 丰 刘建业 熊 智	博士 正高 副高	031 031 031	预测滤波算法在微小卫星姿态确定中的应用	宇航学报	2008, 29 (1)
59	郁 丰 刘建业 熊 智 李 丹	博士 正高 副高 博士	031 031 031 031	基于CMOS相机的微卫星姿态确定算法研究	仪器仪表学报	2008, 29 (1)
60	熊 剑 刘建业 赖际舟 钱伟行	博士 正高 副高 博士	031 031 031 031	一种陀螺量测信息辅助的快速初始对准方法	宇航学报	2008, 29 (12)
61	李 丹 刘建业 熊 智 张丽敏	博士 正高 副高 硕士	031 031 031 031	基于多传感器的卫星自主导航信息融合算法	中国空间科学技术	2008, 4 (4)
62	李 丹 刘建业 熊 智 张丽敏	博士 正高 副高 硕士	031 031 031 031	基于多传感器的卫星容错自主导航系统	上海交通大学学报	2008, 42 (5)
63	乔 黎 刘建业 郑广楼 贺 亮	博士 正高 硕士 博士	031 031 031 812	基于x射线脉冲星导航系统探测器研究	传感器与微系统	2008, 27 (1)
64	周海波 刘建业 赖际舟 熊 智	博士 正高 副高 副高	031 031 031 031	光纤陀螺的离散动态温度模型	应用科学学报	2008, 26 (4)
65	张 玲 刘建业 赖际舟	硕士 正高 副高	031 031 031	Rotating fiber optic gyro strap-down inertial navigation system with three rotating axes	南航学报英文版	2008, 25 (4)

南京航空航天大学自动化学院2008年度发表论文 (1)

66	王 融 刘建业 熊 智 乔 黎	硕士 正高 副高 博士	031 031 031 031	地形对雷达高度计卫星自主导航精度影响分析	传感器与微系统	2008, 27 (3)
67	乔 黎 刘建业 郑广楼 熊 智	博士 正高 硕士 副高	031 031 031 031	A Novel Celestial Navigation for Satellite Using X-ray pulsars	南航学报英文版	2008, 25 (2)
68	宋桂华 赵 伟 刘建业 祝燕华	硕士 副高 正高 博士	031 031 031 031	光纤陀螺捷联惯导系统改进航姿算法应用研究	应用科学学报	2008, 26 (6)
69	郑广楼 刘建业 乔 黎 熊 智	硕士 正高 博士 副高	031 031 031 031	单脉冲星自主导航系统可观测性分析	应用科学学报	2008, 26 (5)
70	张丽敏 熊 智 乔 黎 刘建业	硕士 副高 博士 正高	031 031 031 031	基于雷达高度计-星敏感器的卫星自主导航精度分析	传感器与微系统技术	2008, 27 (4)
71	张丽敏 熊 智 郁 丰 贺 亮 刘建业	硕士 副高 博士 博士 正高	031 031 031 812 所	基于GPS伪距的微小卫星定轨技术研究	中国空间科学技术	2008, 4 (2)
72	祝燕华 刘建业 赖际舟 周海波	博士 正高 副高 博士	031 031 031 031	FOG信号的变步长符号LMS自适应消噪方法	光电工程	2008, 35 (11)
73	祝燕华 刘建业 曾庆化 华 冰	博士 正高 副高 博士	031 031 031 031	双频圆锥运动及旋转矢量的改进算法	南京航空航天大学学报	2008, 40 (5)
74	郁 丰 刘建业 熊 智 李 丹	博士 正高 副高 博士	031 031 031 031	微小卫星姿态确定系统多信息融合滤波技术	上海交通大学学报	2008, 42 (5)
75	祝燕华 刘建业 钱伟行 赖际舟	博士 正高 博士 副高	031 031 031 031	低成本捷联惯导系统的静基座快速精对准方法	上海交通大学学报	2008, 42 (5)
76	陈海明 熊 智 乔 黎 韩 龄	硕士 副高 博士 硕士	031 031 031 031	天文/惯性组合导航技术在高空飞行器中的应用	传感器与微系统	2008, 27 (9)
77	王春霞 赵 伟 刘瑞华 刘建业	硕士 副高 正高 正高	031 031 外校 031	动态捷联惯导/多卫星组合导航自适应联邦滤波算法研究	信息与控制	2008, 37 (4)
78	王春霞 赵 伟 刘瑞华 刘建业	硕士 副高 正高 正高	031 031 外校 031	两级故障检测在SINS-Galileo-北斗组合中的应用研究	传感器与微系统	2008, 27 (6)

南京航空航天大学自动化学院2008年度发表论文 (1)

79	王春霞 赵 伟 刘瑞华	硕士 副高 正高	031 031 外校	双重自适应联邦滤波在SINS-卫星组合中的应用研究	传感器与微系统	2008, 27 (3)
80	曹 华 刘建业 祝燕华 赖际舟	硕士 正高 博士 副高	031 031 031 031	光纤陀螺组件误差标定ARLS算法	光电工程	2008, 35 (6)
81	许 睿 孙永荣 刘建业 沈雪松	硕士 正高 正高 博士	031 031 031 031	TDOA-DR组合车辆导航定位系统研究	传感器与为系统	2008, 27 (4)
82	乔 黎 刘建业 贺 亮 郑广楼	博士 正高 博士 硕士	031 031 812 所 031	基于X射线脉冲星的自主天文导航技术	航天控制	2008. 26 (6)
83	祝燕华 刘建业 曾庆化 赵伟	博士 正高 副高 副高	031 031 031 031	等效旋转矢量系数优化的参数解析法	中国惯性技术学报	2008, 16 (1)
84	李雪涛 范胜林	硕士 副高	031 031	H _∞ 滤波在GP/SINS组合导航系统中的应用研究	陕西理工学院学报(自然科学版)	2008, 24 (1)
85	李方宝 范胜林 赖际舟 华 冰	硕士 副高 副高 博士	031 031 031 031	惯性测量系统误差模型的机载验证仿真平台实现研究	计算机测量与控制	2008, 16 (8)
86	吴廷元 刘建业 郁 丰 熊 智	博士 正高 博士 博士	031 031 031 031	基于陀螺/星敏感器的微小卫星姿态确定方法研究	计算机测量与控制	2008, 16 (5)
87	赵文芳 赵 伟 钱伟行 刘建业	硕士 副高 博士 正高	031 031 031 031	SUKF滤波在SINS大失准角初始对准中的应用研究	电光与控制	2008, 15 (9)
88	凌 冬 刘建业 赖际舟	硕士 正高 副高	031 031 031	基于LabVIEW的光纤陀螺测试分析平台实现研究	测控技术	2008, 27 (5)
89	孙 炼 赵 伟 刘建业	硕士 副高 正高	031 031 031	浮点协处理器在嵌入式组合导航计算机中的应用研究	计算机测量与控制	2008, 16 (4)
90	邓振华 孙永荣	硕士 正高	031 031	ITS车辆监控系统内的远程数据通信研究与实现	仪器仪表用户	2008, 15 (3)
91	于捷杰 孙永荣 沈雪松	硕士 正高 博士	031 031 031	高层建筑物变形监测的GPS多天线技术	陕西理工学院学报(自然科学版)	2008, 24 (1)
92	王君龙 孙永荣 肖纪立 丁左权	硕士 正高 正高 硕士	031 031 031 031	基于轴角检测的力矩电机转矩控制系统	机械与电子	2008, (2)
93	侯书朋 孙永荣 项文炳	硕士 正高 硕士	031 031 031	基于CAN总线的智能汽车行驶记录仪	中国仪器仪表	2008, (6)

基于数字微镜的旋转体三维显示装置研究^{*}

李莉, 李玉峰, 沈春林, 龚华军, 杨忠

(南京航空航天大学自动化学院 南京 210016)

摘要: 体三维显示是实现真正三维立体图像显示的新技术。首次提出了一种基于数字微镜的旋转体三维显示方案, 利用人眼视觉暂留的特性, 设计完成了一套空间三维显示装置, 通过数字微镜设备快速投影一系列连续的二维图像序列, 由旋转运动的成像靶屏截获图像流信息, 形成了具有空间真实体积的三维立体图像。简要介绍了系统的显示原理及组成, 重点阐述显示装置的设计, 详细研究了数字微镜的接口能力以及对系统显示性能的影响, 实验证明与基于矢量扫描振镜方式相比, 基于数字微镜的三维显示装置已完全具备了在真实空间实现复杂三维图像显示的能力, 并通过对成像结果的分析给出了进一步提高改进的相应措施。

关键词: 体三维显示; 数字微镜设备; 视觉暂留; 显示装置

中图分类号: TN141 TP334.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Volumetric 3D display device based on DMD utilizing a rotating screen

Li Li, Li Yufeng, Shen Chunlin, Gong Huajun, Yang Zhong

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

Abstract: A novel volumetric 3D display is presented in this paper. A sequence of two-dimensional slice information of a three-dimensional image is projected by a digital micro-mirror device onto a rotating plane, due to persistence of vision the image is reconstructed within the cylindrical volume swept out by the display plane. The structure and principle of the display method are introduced, the design of the display device is described in detail; and the DMD data interface and its influence on system performance are examined totally. Experiment results show that the implementation of a volumetric 3D display based on DMD can display more complicated real 3D image than the mirror-laser system, which proves the effectiveness of the proposed method. At last, some measures for improving the quality of 3D image are derived from imaging analysis results.

Key words: volumetric 3D display; digital micro-mirror device; eye persistence; display device

1 引言

体三维显示^[1] (volumetric 3D display, V3D) 不同于三维图像在二维平面显示上伪深度的表达方式, 它提供一个真实三维物理空间来再现具有真实深度信息的三维立体图像, 是描述空间数据和解释空间相互位置关系的重要工具。同时, 它允许许多人自由选择多视点, 裸眼观察的特点, 有助于实现科学可视化数据分享和群体协作。因此, 体三维显示技术可

以广泛应用在医学图像处理、CAD 设计、立体广告传媒等领域^[2], 具有很高的实际应用价值。

体三维显示技术发展至今, 其种类繁多, 主要可分为相互关联的 2 大类别^[1]: 基于静态体空间显示和扫描体空间显示。以全息三维^[3]为代表的基于静态体空间显示技术, 其制备复杂、信息存储容量大、系统整体尺寸大, 不易实现; 而扫描体空间技术数据处理量适中、系统实现相对容易, 是当前体三维显示领域内的关注焦点。若以运动形式来划分, 扫描体空间显示技术又可分支为平移体

扫描技术^[4]和旋转体扫描技术(rotating sweep V3D, RSV3D)。从高速旋转运动易实现的角度考虑,本文选择了旋转体扫描技术作为主要研究对象。目前,国外RSV3D技术发展得相对比较成熟,有主动发光和被动发光2种成像方式。近年来研究者的工作主要集中在构建基于光束寻址器的被动发光式RSV3D系统,其中,已有少数系统研究突破了实验室阶段,进展到商品化应用阶段,如美国 Actuality 公司的 Perspecta^[5]和德国的 Felix^[6]。但仍存在着许多关键技术问题需进一步解决和完善。国内研究中,文献[7-8]仅对主动发光LED式旋转屏扫描系统展开了相关研究,而被动发光式RSV3D的研究由南京航空航天大学三维课题组首次提出并成功试制了基于振镜的激光V3D系统^[8],完成了被动发光式RSV3D的原理验证。

为进一步提高V3D系统的性能,实现高质量三维图像的显示,在课题组前期工作的基础上,本文提出了采用先进的数字光投影技术(digital light projection, DLP)建立基于数字微镜(digital micro-mirror device, DMD)的RSV3D系统,成功再现了空间三维立体图像。本文论述了系统的显示原理和组成,重点阐述了显示装置的设计,通过不同对象的显示实验证实了利用DMD实现RSV3D系统的解决方案切实可行,分析了成像结果并给出了相应改进措施。

2 系统的显示原理和组成

2.1 显示原理

利用被动发光旋转体实现三维显示的想法,最初是由美国ITT实验室提出的^[5],在当时的技术条件下,采用的是CRT投影技术来扫描位图到旋转屏。

结合当前现代光电技术的最新进展,本文利用先进的DLP技术^[10],构建了位图映射的RSV3D系统,其基本原理为:投影屏在电机的驱动下,以转轴为中心轴高速旋转,周期性地扫描出一个柱体空间作为成像显示空间。每一个刷新周期内,在旋转屏位置反馈信号的触发下,DMD将对应位置的切片图像序列连续地投影至特殊的旋转屏幕。基于人眼的视觉滞留效应,一系列离散的切片图像被复合感知为一幅连续完整的三维立体图像。系统显示原理如图1所示。

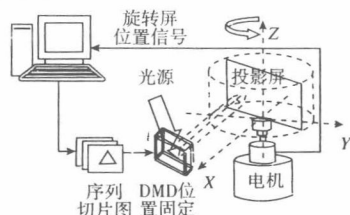


图1 系统显示原理示意图

Fig. 1 Schematic illustration of 3D display principle

2.2 系统组成

基于DMD的RSV3D系统由显示装置和图像引擎组成。图2为系统组成框图。

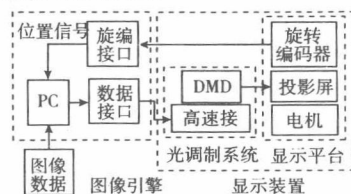


图2 系统组成结构简图

Fig. 2 Block diagram of the system structure

图像引擎的作用是完成图像数据的预处理,在反馈信号的触发下,通过硬件接口将数据传送给显示装置,主要由PC主机、数据传输接口和旋转编码器接口组成。基于PC平台,图像引擎的设计可通过Microsoft Visual C++6.0编程完成实现,主要的体三维图像渲染工作有投影矩阵变换、切片光栅化、矢量数据格式、切片编码存储等。同时,利用DirectX编程实现了API接口。

本文中显示装置是替代平面显示器,实现三维图形空间成像的重要部件。主要通过DMD调制光源发射的平行光束,将图像引擎提供的图像信息写入光波后再投影到显示空间,以实现立体图像的显示。作为显示装置的核心元件,DMD是本文研究的重点。因此,以DMD为中心展开了系统的设计:DMD数据输入高速接口、空间光调制系统及物理空间显示平台。

3 显示装置的设计

课题组先行试制成功的“基于振镜的激光寻址RSV3D系统”,实现了 $\phi 200\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 的柱体空间内,图像刷新频率达到 10 Hz/s ,连续、清晰、简单图形的立体显示效果。

但是,存在的关键问题之一是振镜以矢量线段的方式进行低速扫描,依次激活切片内的所有体素需要一定的调制时间,图像越复杂,所需时间越长;在图像刷新率为 10 Hz 时,图像调制时间超过 1 ms ,这时切片数量少于100片,严重影响了复杂三维图像的再现精度。因此,振镜系统只能实现相对简单的三维图形显示,无法满足较为复杂的三维图形的显示要求。

为进一步提高V3D的显示性能,实现复杂三维图像的显示,本文设计采用高速空间光调制器作为光束扫描器。与目前其他的空间光调制器如硅基上液晶(Lcos)、薄膜晶体管液晶TFT-LCD等相比,TI公司研制的DMD是一种新型反射式空间光调制器,它由成千上万个微镜片组成,细小镜面按网格状排列(如图3所示),具有更高的分辨率、更宽的响应范围和更快的响应速度、信噪比

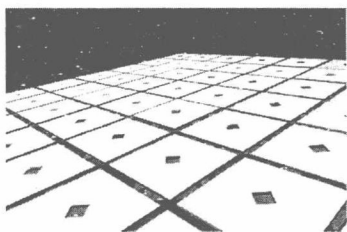


图3 DMD 微观结构图

Fig. 3 Close-up of the DMD

和光能利用率高、工作温度范围大、偏振无关等特点,因此把 DMD 应用到 V3D 系统比使用其他空间光调制器具有更多的优点。本文在显示装置的设计中注意到了这一点,开展了以下的相关研究。

3.1 DMD 数据输入高速接口

DMD 通过微镜面的偏转来实现光束的调制。微镜面以 $1\,024 \times 768$ 点阵方式排列,“开关”速度非常快,可以达到 $20\ \mu\text{s}$ 左右,在理论上完全可以满足系统快速调制的要求。但实际上,光束调制时间的长短还与 DMD 数据输入接口的帧率大小有关。

DMD 提供 2 个数据输入接口:USB2.0 接口和并行接口,如图 4 所示。

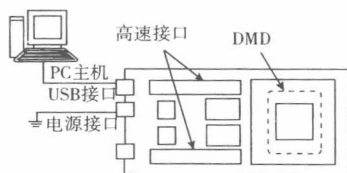


图4 DMD 数据输入接口示意图

Fig. 4 The sketch diagram of DMD data input interface

USB2.0 接口能够支持 $480\ \text{Mb/s}$ 的数据传输率和 $900\ \text{帧/s}$ 的数据刷新率,基本上满足了显示复杂图像的设计要求。

为了缩短系统开发周期,快速验证 DMD 体三维显示系统解决方案的可行性,本文以 USB2.0 接口作为显示装置初步研究的对象。

3.1.1 对系统显示精度的影响

体三维系统的显示精度可以通过激活体素数来衡量。一般来说,显示空间所包含的体素越多,系统显示结果的精度越高。根据文献[1],体显示系统激活体素数可以由下面的公式计算得出:

$$N_a = \frac{P}{Tf_r} \quad (1)$$

式中: P 指一次性可同时激活的体素数, T 为切片的调制时间, f_r 为图像刷新频率。

若使用 USB2.0, DMD 单元的 $1\,024 \times 768$ 网格阵列将被分为 $1\,024 \times 48$ 分辨率的 16 个微镜块,由 16 通道分

别进行控制。为减少数据传输量, $f_r = 10\ \text{Hz}$ 时,若只单独对微镜段 0 进行操作,即 $P = 1\,024 \times 48$,经实验测得 $T = 1.11\ \text{ms}$,根据式(1)计算结果,系统激活体素个数为 $2\,457\,600$ 个,超过百万体素。由此得出,相比激光振镜寻址的方式^[8],DMD 具有并行快速寻址的特点,大大增加了可寻址的体素数目,使得 RSV3D 系统精度得到了明显地提高。

3.1.2 对系统显示复杂图像能力的影响

根据 RSV3D 系统的显示原理,三维图像由一系列二维切片构成。假定三维图像的复杂程度与二维切片内包含的三角形个数成正比,则判断一个 RSV3D 系统在显示复杂图像方面的能力是否有所提升,可依据于二维切片内三角形个数相同的情况下,系统可显示的最多可切片数。而最多可切片数与切片调制时间是紧密相关的。

不同的系统组成,对应不同的调制时间。为了说明使用 DMD 对 RSV3D 系统显示复杂图像的能力有明显提高,本文首先给出了 DMD 系统与振镜系统在调制不同三角形数目时的测试结果,进行的对比分析如下。

表1 不同三角形数时,系统调制时间 T 的比较Table 1 Comparison of modulation time T for different number of triangles ms

	1 个三角形	2 个三角形	3 个三角形
振镜	0.75	1.62	2.48
DMD	1.11	1.11	1.11

由表 1 可以看出, DMD 系统的调制时间始终为 $1.11\ \text{ms}$,这是由于 DMD 采取位图映射方式调制图像,系统调制时间与三角形个数无关。而振镜系统采用的是矢量扫描方式,所用调制时间基本上与三角形数目成正比例递增关系。

根据表 1 的调制时间,由公式 $1/(10 \times T)$ 分别求出图像刷新率为 $10\ \text{Hz}$ 时,2 个系统在不同三角形数的情况下对应的最多可切片数,如表 2 所示。

表2 三角形数目不同时系统最多可切片数的比较

Table 2 Comparison of maximal slice number for different number of triangles 片

	1 个三角形	2 个三角形	3 个三角形
振镜	133	62	40
DMD	90	90	90

从表 2 可以看出,在显示简单图像的情况下,如切片内仅包含一个三角形,振镜系统的切片数明显多于 DMD 系统。此时就显示精度而言, DMD 系统略逊于振镜。但随着图像复杂程度的增加,如切片内包含 2、3 个三角形时,振镜系统最多可切片数越来越少,甚至只有 40 片,已不足以真实再现三维图像。而 DMD 还是稳定地保持着最大可切片数 90 片不变。因而,相比于振镜系统而言,

DMD 系统更能胜任复杂图像的显示任务。

3.2 空间光调制系统

美国 TI 公司自 1990 年首次研制出第一代 DMD 产品以来至今已发展到第五代,在技术上已相当成熟。本文采用了 TI 0.7 XGA DMD Discovery™ 1100。

配合 DMD 使用的光路系统结构比较复杂,在研究的最初阶段,本文通过改装明基 PB6245 投影装置的方法,来搭建以 DMD 作为核心元件模块化的空间光调制系统,目的是在现有的投影光路基础上,验证利用 DMD 实现载荷图像信息的光束可控可调,发现所有可能出现的问题,为下一阶段光路的自行设计奠定基础。经过拆除整合之后得到了投影装置改装的 DMD 空间光调制系统如图 5 所示。

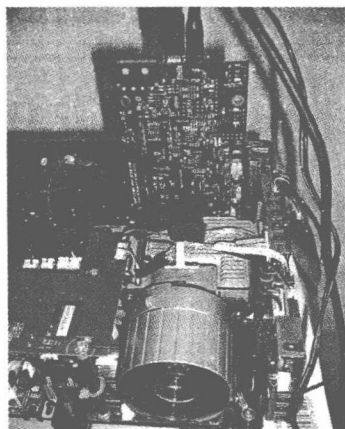


图 5 空间光调制系统

Fig. 5 Photograph of spatial light modulation

3.3 物理空间显示平台

物理空间显示平台主要由电机、投影屏和旋转编码器共同作用搭建。设计要求平台必须提供一个稳定、均质、各项同性的显示空间作为体显示系统的“显示器”,来接受荷载了图像信息的光束。

考虑到人眼视觉暂留时间约为 50 ~ 100 ms,当实际光源闪烁频率超过 10 Hz 时,给人的感觉是连续发光体。本文采用三相交流变频器和交流电机来实现旋转面的调频调速。一般情况下,将电机转速控制在 $600 \text{ r/min} \pm 10\%$ 来保证图像刷新率为 10 Hz。

切片图像的顺序投影由反馈信号触发来完成,故每次投影的图像应对应于唯一的旋转屏瞬间所处位置的角度,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作为反馈信号,其精度可达到 8 位分辨率。

为了产生均质的各向同性空间,投影屏必须在保证刚性的条件下具有 50% 反射 50% 透射的光学性质。本文采用了透明有机玻璃材质的 3 mm 厚度的投影屏表面

镀一层光学透反膜的设计方法。实验证明,投影屏上光线呈弥散型反射,且屏本身具有一定的刚性,较好地满足了 360°可视和高速旋转的设计要求。如图 6 所示。

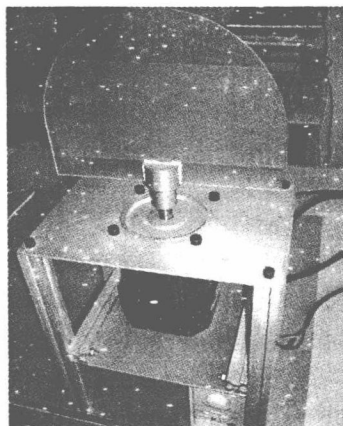


图 6 显示空间物理平台

Fig. 6 Physical experimental platform of the display system

4 实验和分析

根据上述设计思想,建立了如图 6 所示的 RSV3D 系统,并基于该平台开展了验证体三维显示效果的实验研究。实验参数选择如下:暗室环境下,以 250 W UHP 白炽灯为成像光源,取屏幕中心 $200 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 矩形为成像区域,电机转速恒定为 600 r/s。实验过程设计如下:完成 2 组不同模型的显示实验,先以三棱锥 3DS 模型为例,进行简单几何模型测试;再测试 F15 飞机代表的复杂 3DS 模型,并由 Sony DSC T10 数码相机拍摄记录显示结果,参数设定为高速电子快门模式,VGA 分辨率大小,曝光补偿值 -1EV。图 7 是 RSV3D 系统工作照片图,图中,左边是 LCD 显示的平面三棱锥,右边是 RSV3D 系统显示的空间三棱锥。

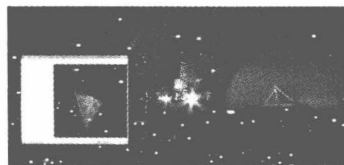


图 7 系统工作时的照片

Fig. 7 Photograph of the working system

图 8 是三棱锥的显示效果,给出了 30°角位置的俯、仰 2 个视线方向以示意 RSV3D 系统独有的 360°可视的特点。可以看出,不管是仰视还是俯视,三棱锥的三条棱边均十分清晰可视,其相对空间位置也十分清楚。而仰视图(a)中图像亮度不均匀,右下顶点不明显的原因是,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时,因此该点无法聚焦于屏幕成像。这是不可避免的视觉死区

问题,可以通过多个 DMD 分别控制一部分显示空间来加以解决,如由 3 个 DMD 投影系统分别控制 360° 显示空间的均分 3 部分。这样做的结果,虽然改善了视觉死区,但同时也带来了多个 DMD 同步协调控制的问题。

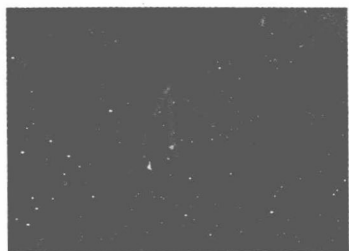
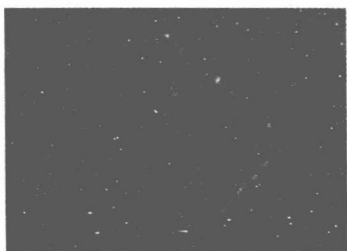
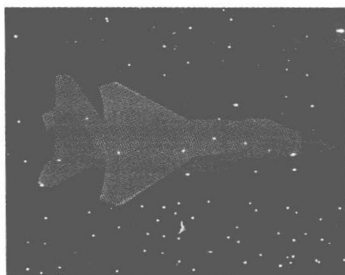
(a) 30° 角仰视(a) From 30° looking up(b) 30° 角俯视(b) From 30° looking down

图8 三棱锥模型三维显示效果的拍摄照片

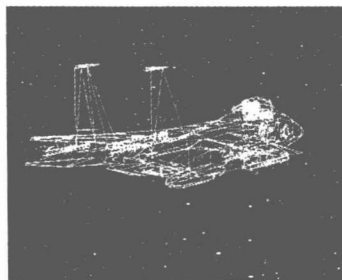
Fig. 8 Photos of a pyramid model displayed in RSV3D

在复杂图像 3D 飞机模型的显示实验中,图 10 给出了 F15 在 RSV3D 系统中位于 0° 角和逆时针转过 90° 角时拍摄的显示照片,用以示意 360° 可视。与图 9 的 LCD 显示结果进行比较,可以看出从各个角度都能明显地辨识出 F15 的轮廓形状,并清楚地感知三维飞机的立体效果。图 10(a)中的图像有些模糊。这里有 2 个原因:一是离焦问题。由于 DMD 位置固定,当屏旋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问题。考虑到激光粒子具有定向精确的特性,可以使用激光器替换白炽灯作为投影光束的光源来解决该问题;另外一个因素是受 USB 接口带宽的限制,切片数量有限从而导致图像显示局部细节失真,如侧翼。



(a) 实体造型

(a) Solid model



(b) 多边形造型

(b) Polygon model

图9 飞机模型 LCD 显示效果的屏幕截图

Fig. 9 Screen shot of an airplane model displayed in LCD

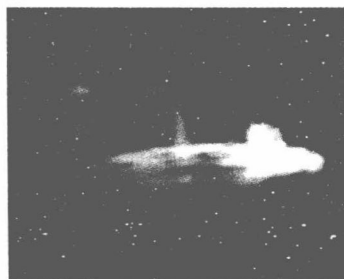
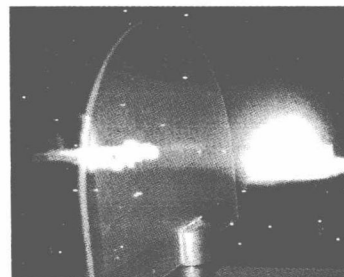
(a) 0° 角平视(a) From the viewpoint of 0° (b) 逆时针转过 90° 角平视(b) From the viewpoint of turning around 90° in anti-clockwise

图10 飞机模型体三维显示效果的拍摄照片

Fig. 10 Photos of an airplane model displayed in RSV3D

上述显示实验表明,不管是简单的几何造型,还是复杂的三维图像,RSV3D 系统都能够完全显示,这不仅证实了基于 DMD 实现 V3D 系统的方法是行之有效的,同时也说明了该系统已具备显示复杂图像的能力。

5 结 论

本文开展了利用被动发光旋转体实现空间三维显示的研究,在基于振镜的激光扫描系统的基础上:(1)通过显示装置的设计,初步实现了一套基于 DMD 的 RSV3D 系统;(2)与原有的矢量扫描振镜方式相比,DMD 采用位图映射方式激活体素,有利于提升系统的显示性能和实

现复杂图像的显示;(3)经过系统的整体调试,本文设计的显示装置上完全可以实现三维图像在空间内的显示。因此,证明了基于DMD的RSV3D系统的解决方案切实可行,且该系统可以显示复杂图像。

目前正在进行高速接口的开发工作,以取代初步研究阶段使用的USB接口,预期系统的性能优势将提高到千万体素数,则空间复杂三维图形的显示质量也将更为理想。

参考文献

- [1] BLUNDELL B, SCHWARZ A. Volumetric three dimensional display systems[M]. New York: John Wiley & Sons, 2000: 4-5.
- [2] 姜太平, 沈春林, 谭皓. 真三维立体显示技术[J]. 中国图像图形学报, 2003, 8(4): 361-366.
JIANG T P, SHEN CH L, TAN H. Overview of the true three-Dimension volumetric display technologies[J]. Journal of Image and Graphics, 2003, 8(4): 361-366.
- [3] HILATRE P S, LUCENTE M. Electronic display system for computational holography[J]. Proc. of SPIE, 1990, 1212(20): 174-182.
- [4] 姜盈, 王惠南. 真三维立体显示系统中平移体扫描技术研究[J]. 计算机应用, 2006, 26(1): 135-137.
JIANG Y, WANG H N. Study of translation swept-volume techniques in true 3D volumetric display systems[J]. Computer Applications, 2006, 26(1): 135-137.
- [5] FAVALORA G E, NAPOLI J. 100 Million-voxel volumetric display[C]. Proc. of SPIE, 2002, 4712: 300-312.
- [6] KNUT L, DETLEF B, DANIEL, et al. FELIX 3D display: An interactive tool for volumetric imaging[C]. Proc. of SPIE, 2002, 4660: 230-245.
- [7] 张晓洁, 林远芳, 刘旭, 等. 基于时序效应的空间三维显示系统[J]. 仪器仪表学报, 2003, 24(4增刊): 217-219.
ZHANG X J, LIN Y F, LIU X, et al. The special 3D display system based on sequential effect[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument. 2003, 24(4 Suppl.): 217-219.
- [8] 林远芳, 刘旭, 刘向东, 等. 基于旋转二维LED阵列的体三维显示系统[J]. 光学学报, 2003, 23(10): 1158-1162.
LIN Y F, LIU X, LIU X D, et al. Three-dimensional volumetric display system utilizing a rotating two-dimensional LED array[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(10): 1158-1162.
- [9] 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.
TAN H. Research on key technologies of volumetric display system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aero-

nautics and Astronautics, 2006.

- [10] YODER L, DUNCAN W, KOONTZ E M, et al. DLP technology: Applications in optical networking[C]. Proc. of SPIE, 2001, 4457: 54-61.

作者简介



李莉, 2001年于南京航空航天大学获得学士学位, 现为南京航空航天大学博士研究生, 主要研究方向为体三维显示技术。
地址: 南京航空航天大学智能楼603室, 210016
电话: 025-84892301-6030; E-mail: eprimrose@sohu.com

Li Li received BSc in 2001 from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. Now she is a PhD candidate in Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. Her research interest is volumetric 3D display technology.

Address: Room 603, Zhineng building, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, Jiangsu, China
Tel: +86-25-84892301-6030; E-mail: eprimrose@sohu.com



李玉峰, 1997年于空军工程学院获得学士学位, 2000年于空军工程大学获得硕士学位, 2004年于空军工程大学获博士学位, 现为94810部队高级工程师, 主要研究方向为图像处理。

地址: 南京市中和桥142-9, 210009

电话: +86-25-84892305; E-mail: lyf_1030@hotmail.com

Li Yufeng received BSc in 1997, MSc in 2000 and PhD in 2004 all from Air Force College of Engineering. Now he is a senior engineer in 94810 PLA Troop. His research interest is image processing.

Address: 142-9, Zhonghe Bridge, Nanjing 210009, Jiangsu, China
Tel: +86-25-84892305; E-mail: lyf_1030@hotmail.com



沈春林, 1958年毕业于南京航空学院, 1981年至1984年于美国新墨西哥大学访问学者, 现为南京航空航天大学导航、制导与控制专业教授与博士生导师, 主要研究方向为低空飞行与突防。

地址: 南京航空航天大学智能楼601室, 210016

电话: 025-84893327; E-mail: clshenac@nuaa.edu.cn

Shen Chunlin graduated from Nanjing College of Aeronautics and Astronautics in 1958. He, as a visiting scholar, worked in University of New Mexico, USA from 1981 to 1984. He is a professor & PhD supervisor in navigation, guide and control from 1985 till now. His research interest is low altitude flight and penetration.

Address: Room 601, Zhineng Building, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, Jiangsu, China
Tel: +86-25-84893327; E-mail: clshenac@nuaa.edu.cn

面向立体显示的点采样栅格优化策略及其性能分析

李莉, 杨忠, 邢建芳, 沈春林

(南京航空航天大学自动化学院, 江苏 南京 210016)

摘要:针对一般笛卡尔采样数据量大的局限性,提出了基于体心立方(body-center cubic, BCC)栅格的点采样方法,给出了采样矩阵的定义,分析了BCC格型的空间排布优势,设计了基于体心立方的优化采样策略,包括栅格的划分、物理空间和采样空间的坐标映射,采样密度和采样矩阵计算.将该方法与一般笛卡尔栅格进行了性能分析和比较.实验结果表明,BCC栅格采样比一般笛卡尔栅格减少30%的体数据量,加快了立体数据的预处理速度,并在立体显示中取得了较好的视觉效果.

关键词:真三维;体视化;采样策略;体心立方栅格

中图分类号:TP391.4

文献标志码:A

Points sampling optimization strategy and performance analysis for a true 3D display system

LI Li, YANG Zhong, XING Jian-fang, SHEN Chun-lin

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

Abstract: Point Sampling is an important process in true volumetric 3D display. A new method based on body-centre cubic (BCC) lattice were developed, to solve huge voxel data by using a Cartesian lattice. A sampling matrix was defined, and the closed packed of BCC lattice in volume was discussed in detail, so the sampling strategy based on BCC was given, including division of the lattice, coordinate mapping, sampling density's computing and implement of the sampling matrix. We have chosen the Cartesian lattice as a benchmark for our comparisons. The results of experiments showed that a 30% reduced volume dataset was obtained by BCC lattice, and faster volume data preprocessing and better visual experience was apparent.

Key words: true 3D; volume visualization; sampling strategy; BCC lattice

0 引言

在当前显示技术领域的一个研究前沿——立体显示^[1]的研究中,快速有效的点采样技术是其中的一个重要环节.因为不同于平面显示,立体显示以体素模型作为显示对象,而点采样的作用正是将传统多边形模型离散成体素模型,恰好满足为立体显示

后续操作提供体数据的要求.目前利用笛卡尔栅格^[2]进行点采样最为常见,如加权体积采样算法^[3],欧式距离测度算法^[4]、增量体素算法^[5]及改进的欧式距离测度算法^[6]等.然而这些方法关注的焦点是如何快速量化采样后的体素点,而不是采样方式.

随着观测对象的增多,成像要求的提高,立体数据量日益庞大,仅提高采样点的量化速度是无法解决立体显示由于海量数据造成的存储传输困难和运

收稿日期:2007-11-30

基金项目:国家高科技研究发展计划(863计划)资助项目(2006AA01Z327)

作者简介:李莉(1979-),女,博士研究生,主要研究方向为真三维显示技术、三维数据可视化等.

E-mail: eprimrose@sohu.com

算效率下降的问题.如中科院自动化所和南京航空航天大学合作进行的真三维立体显示研究,以自主设计开发的 Helix3D 显示器作为显示平台(见图1).若使用一般笛卡尔方式进行采样的思路,以栅格分辨率 64^3 采样包含 69 451 个三角面片模型的结果为 12 981 个体素;当分辨率提高 2 倍,体素量增加了近 20 倍,这将给后续操作处理带来海量数据的计算压力和造成存储传输的瓶颈.因此,有必要对点采样方式进行研究,尽可能用更少的体素来近似立体形体,在不影响成像精度的同时降低体数据量,以加快立体数据的预处理速度.显然,对新的采样栅格展开研究将可以产生一种新的点采样方式.



图1 Helix 3D 显示器

Fig.1 Helix 3D display

因此,本文从采样栅格着手,根据多维信号采样定理,提出利用非笛卡尔的规则栅格进行点采样的优化方案,并借助几何结晶学中的格子理论,对晶体结构中常用的几种空间格型进行比较和分析,发现 BCC 栅格能不影响体数据质量的前提下,将采样数据密度变为笛卡尔栅格的 70%.因而,结合 BCC 单元的特点设计了新颖的 BCC 采样策略,并改进基于欧式距离的体素测度算法;在基于 OpenGL 的三维可视化平台上与笛卡尔栅格进行了性能比较,结果表明,利用 BCC 栅格采样可以达到保持成像精度并改善体素信息量的目的,最后给出 Helix 立体显示器的观测效果,证实了该方法的有效性.

1 多维信号采样和格子理论

多维信号采样理论中,若假定 M 维信号满足以下两个条件:一是频率响应不可分,即各项同性;二是限带信号,也就是有限区域之外,傅立叶变换恒等于零^[7].则采样信号的频域响应为 M 维超球体,经傅立叶变换后的采样结果是频域内周期性重复的各模本.于是,类似 1 维的 Nyquist 定理,可以推出广义 M 维采样定理:为避免混叠现象的发生,尽可能使得频域内的各周期性重复的频率响应(超球体)紧密排列.所谓的最优采样,是指单位体积内的采样密度

最小,即以最少的采样点填充整个空域空间,等价于超球体以最紧凑方式堆积频域空间.多维超球体的紧密排列,数学上称之为空间球堆积问题^[8].类似于构造晶体结构,若将球心抽象为质点,则空间球最密堆积转化为求解空间点阵的最优布局.显然,笛卡尔栅格的空间点阵布局并不是最优解^[9],因此,下面将借助几何晶体学中的格子理论^[10]对非笛卡尔系的规则采样栅格展开研究.

格子理论认为,格子直观上是空间中的采样点集合.一个格子点阵,可以找出一个单位晶格 V 来表示.以欧式 R^3 空间为例,若任意向量可由一组基向量 n_1, n_2, n_3 线性表示,则以整数为系数的所有基向量线性组合的集合,称为格子.而由线性无关的向量组组成的矩阵则构成采样矩阵 V ,同时将原格的对偶格定义为 $U = (V^T)^{-1}$.由定义可知,对偶格为原格的一个倒逆空间,其密度也互为倒数.若把原格看成采样空间,则对偶格就相当于频域空间.两者之间通过傅立叶变换和反变换进行相互转化:

$$\Psi(f) = \sum \Psi(n) \exp(-j2\pi f^T [V]n).$$

其中, $V[n]$ 为格子中的点向量.在采样的频域空间中,频谱分布具有周期性, $\Psi(f) = \Psi(f + U[m])$, 其中 $U[m]$ 为对偶格.

以一维时间信号为例(一维点阵格),若周期 T 脉冲采样,频率域会产生间隔 $1/T$ 的原信号频谱的镜像.原格相当于时间域采样脉冲,对偶格相当于频域各镜像中心之间的频率间隔,格子密度相当于采样频率.于是,原格的密度越小,对偶格的密度就越大.因此,可以通过比较不同原格的对偶格在空间的采样密度大小,选出最密堆积的空间点阵格型作为最优采样栅格.

2 空间点阵格型分析

晶体结构中常见密堆积方式有 4 种:面心立方(face centered cubic, FCC)堆积、六方堆积、体心立方堆积和简单立方堆积.这些堆积方式可以从划出对应的格子单元,如面心立方格子、六方格子、体心立方格子、正立方格子,见图 2.

文献[8]已证明,4 种密堆积方式中,面心立方和六方堆积为最密堆积,均具有 74% 的空间利用率,其余 2 种则分别为 68% 和 52%.根据空间利用率的定义,百分比越高,意味着堆积密度越大.因此,根据原格和对偶格密度互为反比的关系,面心立方和六方格子的对偶格正是所求的最优采样栅格.

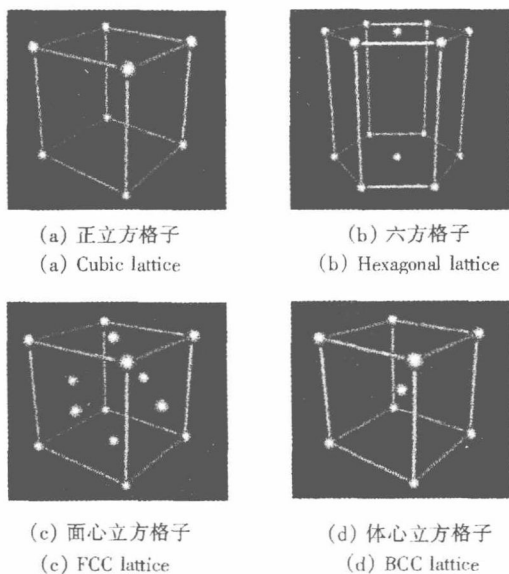


图2 密堆积格子
Fig.2 Close-packed lattice

由对偶格的定义可知,六方格子的对偶格仍是六方格子,而面心立方的对偶格为体心立方格子.如果考虑在 Z^3 域内用笛卡尔坐标来数学描述这些格型的空间位置,与六方格子相比而言,由于 BCC 格子是 Z^3 域的子集, BCC 格子内采样点的空间位置更容易通过笛卡尔坐标索引获得,因此,点采样的优化策略将结合 BCC 单元格的特点来设计.

3 BCC 采样策略

3.1 栅格的划分

为满足广义多维采样定理,选择以采样点为对称中心点的 Voronoi 单元作为体素,如图 3(a)所示,对点阵空间进行统一的划分. BCC 格子对应的 Voronoi 单元是一个截角八面体,若干个 Voronoi 单元的堆积结果见 3(b),构成了 BCC 采样模式.

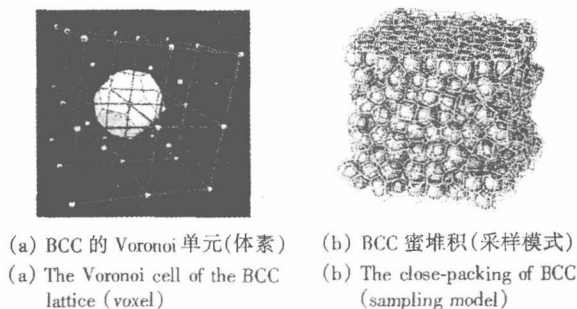


图3 BCC 采样
Fig.3 BCC sampling

3.2 BCC 坐标映射

对于有规则的采样栅格,任一个采样点都可以

用它所在的行、列、层的序号加以标识,但逻辑坐标不一定等于采样点的实际物理位置.

设采样栅格分辨率为 $R_x \times R_y \times R_z$, 采样点物理坐标为 (x, y, z) , 逻辑坐标为 (i, j, k) , 表示采样点所在栅格中列、行、层的索引值, $i \in [0, R_x - 1]$, $j \in [0, R_y - 1]$, $k \in [0, R_z - 1]$. 若定义三个线性无关的方向向量 $\mathbf{v}_1 = (v_{11}, v_{21}, v_{31})'$, $\mathbf{v}_2 = (v_{12}, v_{22}, v_{32})'$ 和 $\mathbf{v}_3 = (v_{13}, v_{23}, v_{33})'$, 并取任意行(列、层)的采样间隔均为 $T (T > 0)$, 则在物理坐标空间中可得到沿三向量方向以 T 周期采样集合的各位置为

$$x = v_{11}i + v_{12}j + v_{13}k,$$

$$y = v_{21}i + v_{22}j + v_{23}k,$$

$$z = v_{31}i + v_{32}j + v_{33}k.$$

用矩阵来表示这些映射关系为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \mathbf{V} \cdot \begin{bmatrix} i \\ j \\ k \end{bmatrix}. \quad (1)$$

3.3 采样密度计算

根据广义多维信号处理理论,周期矩阵和采样矩阵之间满足^[7]:

$$\mathbf{U}^T \cdot \mathbf{V} = 2\pi \cdot \mathbf{I}, \quad (2)$$

其中 $\mathbf{I}$ 为 3×3 的单位矩阵. $\mathbf{V}$ 是由方向向量 $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2$ 和 $\mathbf{v}_3$ 组成的矩阵: $\mathbf{V} = [\mathbf{v}_1 \quad \mathbf{v}_2 \quad \mathbf{v}_3]$. 由于 $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2$ 和 $\mathbf{v}_3$ 选择为线性无关的, 因而 $\mathbf{V}$ 的行列式不为零. 称 $\mathbf{V}$ 为采样矩阵, $1/|\det \mathbf{V}|$ 为单位体积内的采样密度.

若将采样矩阵看成原格, 则由对偶格定义可知, 周期矩阵是原格的对偶格. 由于周期矩阵 $\mathbf{U}$ 表示了傅立叶变换后的空间采样点集合在频域内周期性重复的三个线性无关方向, 故 $|\det \mathbf{U}|$ 不等于零, 且正比于采样密度 $1/|\det \mathbf{V}|$. 因此, 可以通过选择周期矩阵 $\mathbf{U}$ 来确定采样密度. 而求取栅格采样密度的绝对值并无实际意义, 故下面给出了 BCC 与笛卡尔栅格采样密度之比值, 以证明利用 BCC 栅格进行点采样的优越性.

BCC 的对偶格是 FCC 格, 笛卡儿为自对偶格, 由图 4 求得, BCC 和笛卡儿的周期矩阵分别为

$$\mathbf{U}_{\text{FCC}} = [\mathbf{u}_1 \quad \mathbf{u}_2 \quad \mathbf{u}_3] = \begin{bmatrix} u & 0 & u \\ 0 & u & u \\ u & u & 0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{U}_{\text{Cub}} = [\mathbf{u}_1 \quad \mathbf{u}_2 \quad \mathbf{u}_3] = \begin{bmatrix} 0 & u_c & 0 \\ 0 & 0 & u_c \\ u_c & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (4)$$