

文章编号 1004-924X(2010)01-0183-07

体三维成像的螺旋扫描系统设计

樊琼剑^{1,2}, 李 莉³, 沈春林¹, 龚华军¹

(1. 南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 210016;

2. 空军航空大学 航空控制工程系, 吉林 长春 130022;

3. 北京宇航系统工程研究所 数字化设计与仿真中心, 北京 100076)

摘要:提出了一种可产生稳定、均匀的投影空间,并由伺服电机驱动阶梯轴,带动屏旋转的双螺旋屏扫描系统,以实现体三维实时、高清晰成像。对比分析了扫描屏结构的成像特点,设计了屏结构的加工方案。采用半透明高强度的光敏树脂材料和缕空支撑墙体快速成型直接制造。通过 Solidworks 软件进行螺旋扫描屏的三维建模,并利用 COSMOSWorks 模块进行稳定运行的可行性分析。仿真结果显示,屏在 600 r/min 恒速旋转时产生的最大位移数据为 0.013 mm,远小于人眼视觉可分辨的范围,可以满足成像空间设计需求。最后,结合现有的工程技术与工艺水平,建立了双螺旋屏扫描系统的物理平台。实验结果表明,该螺旋屏扫描系统形成的 25 cm×Φ50 cm 的柱型成像空间,可以呈现出清晰的体三维图像。

关键词:投影屏;成像系统;螺旋扫描系统;图像质量;三维模型;屏偏移

中图分类号: TN27; TP391 **文献标识码:** A

Design of helical sweep system for volumetric three dimensional imaging

FAN Qiong-jian^{1,2}, LI Li³, SHEN Chun-lin¹, GONG Hua-jun¹

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Department of Aviation Control, Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China; 3. Digital Design and Simulation Center, Beijing Institute of Astronautics System Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: A sweep system with a double-helical screen whose rotation is driven by a motor is established to produce a steady and unique imaging space to realize real-time and high-resolution volumetric three-dimensional imaging. The imaging characteristics of projection spaces created by swept volume and static volume techniques are compared and analyzed, and the processing schemes of screen structure are designed. Using high strength photosensitive translucent resin materials and a supporting wall structure, the system is manufactured by rapid prototyping and directly digital manufacturing. Furthermore, the three dimensional model of helical sweep screen is established by Solidworks software and the dynamic testing is analyzed by the COSMOSWorks module. The simulation results show that the maximum displacement of screen rotating is 0.013 mm at 600 r/min, which is far less than the

收稿日期: 2009-03-10; **修订日期:** 2009-04-01.

基金项目: 国家 863 高科技研究发展计划资助项目 (No. 2007AA01Z338); 中国博士后科学基金资助项目 (No. 20080441051); 江苏省博士后科研计划资助项目 (No. 0802014C); 南京航空航天大学创新基金资助项目 (No. Y0602-031)

visual resolution range of realistic image synthesis, so the projection space based on the helical sweep screen can match imaging requirements. Finally, a system platform is built on the basis of the existing engineering and technological level. Experimental results indicate that the platform can produce a steady projection space ($25\text{ cm} \times \Phi 50\text{ cm}$), and can supply excellent volumetric three-dimensional images.

Key words: projection screen; imaging system; helical sweep system; image quality; three dimensional model; screen displacement

1 引言

在经济全球化日益加强的背景下,信息电子产业将成为新材料领域的发展热点。近两年来涌现出一大批重大的科技成果,其中体三维显示技术始终处于信息电子产业中电子显示领域的科技前沿。体三维显示技术完全改变了传统二维信息显示的概念,能够真实地反映出被显示图像的每一个三维像素点位于三维物理空间的位置,体素之间的相对空间位置关系以及每个体素的亮度和色彩^[1],可在 360° 给多个观看者呈现出一个真实生动的三维立体图像,使参观者具备完备的心理和生理的三维感知信息,为理解三维图像和其中物体之间的空间关系,提供了独特的手段,因而很有科学、社会和商业价值。

由于体三维显示技术交叉融合了光电子技术、信息技术、计算机技术、图形图像技术、控制与自动化技术等多门学科的特点,对数据处理、数据传输、光学成像都有着较高的要求,涉及诸如稳定的成像空间构建问题,高质量的投影光路结构设计问题,海量数据存储、传输问题等多个难题,其中每一环节的性能优良都将影响三维成像的质量。因此,尽管许多国家,如美国、德国、日本、韩国和中国,从 20 世纪 90 年代开始一直活跃在三维立体显示技术的相关研究工作中,并获得了相当大的进展,却还没有能够研制出可以取代现有传统的平面显示器的三维立体显示器。为此,本文从形成稳定成像空间的角度,重点针对投影成像空间设计以及构建过程这两个环节展开深入研究,力求为所研制的三维立体成像系统提供获得一个稳定、均一的投影空间,以促进三维立体显示器的进一步发展。

2 基于旋转螺旋屏的成像空间设计

目前,用来显示体三维图像的成像空间,一般采用两种技术获得:动态体技术(Swept-Volume)和静态体技术(Static-Volume)^[2],前者通过显示屏的周期性机械运动来创建三维图像空间,后者不依赖于机械运动,而采用特殊介质的图像空间创建方式。不论采用何种方式,构建一个均匀、高利用率的成像空间,是对图像的高保真质量和工程的低成本代价的基本保障。鉴于前者相对后者较易获得,因此文中采用了动态体技术来产生投影空间。

同样是投影屏运动创建成像空间,但相对投影屏平移扫描方式,旋转扫描运动过程中,因为不用改变方向,便于保持匀速运动,使得该方式下获得的投影空间均匀性更好^[3],同时这种方式还可以有助于减少运动中遇到的空气阻力。

而相对于平面投影屏来说,不管屏本身是主动式或被动式发光,其运动轨迹都将沿径向由内向外呈放射状排列的多圈同心圆,若体素大小保持不变,则沿径向由外向内,位于同一圆周上相邻体素间将发生重叠,越接近中心轴的位置,情况越严重^[4-6],从而导致图像轮廓失真(见图 1(a))。使用螺旋面则可以较好地弱化这一问题^[7-8]。因为螺旋面是空间曲面片,当它绕中心轴旋转时,相邻的片与片之间不重合,相差 $360^\circ/N$ 空间旋转角。螺旋面片上的像素运动情况即等价于像素沿轴向在两个相距 $360^\circ/N$ 的水平面间作竖直移动,因此体素大小可以近似均等(图 1(b)),这说明螺旋面旋转可以构建出一个体素大小一致的均匀成像空间,符合设计要求。另外在成像尺寸一定的情况下,采用双螺旋面构建成像空间的方式,不仅可以获得这种近似的均匀空间,还可以增加图像的稳定性,同时降低电机一半转速,节省整个系统的运行功率。

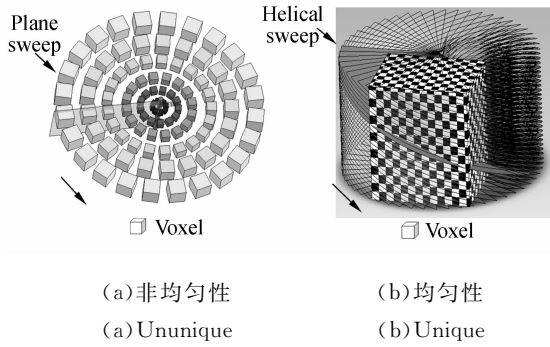


图 1 不同体素空间的对比

Fig. 1 Comparison of different voxel spaces

3 螺旋扫描系统的研制

通过对体三维成像机理的研究可以知道,投影显示的一个关键技术就是要创建一个均匀、稳定的高保真成像空间,而这需要扫描屏、约束机构和运动驱动三方面的紧密配合才能获得。因此,螺旋扫描系统的研制必须从以下三个方面展开:螺旋扫描屏的模型建立、约束机构和运动驱动机构的研究。

3.1 螺旋扫描屏的模型建立

3.1.1 扫描屏建模的影响因素

扫描屏是接收图像数据流信息,形成三维图像的关键部件,其材料和制作方法都将影响成像质量,如材料翘曲变形造成成像畸变等现象,因此扫描屏的研制需要首先考虑这两个方面的影响因素:

材料:对于所有体三维显示技术而言,扫描屏薄壁是首要条件,这样可以降低因壁厚造成的图像死区问题,同时还要求具有一定的机械强度,以确保在设计转速下能够持续的稳定工作。另外,由于体三维成像系统采用了“背面投影”的实现方案,投影光线需要穿透投影屏进入人眼,因此对材料的透明度也提出了高要求。

制作方法:主要是针对加工时可能会影响到屏幕的表面精度和强度分布状况,而导致局部应力集中,引起材料断裂。因此,对于这种薄壳类零件的制作方法也提出了较高要求。

3.1.2 双螺旋屏结构设计

基于以上影响因素的综合考虑,扫描屏选择

了半透明高强度光敏树脂、RP(Rapid Prototype,快速成型)直接制造、双螺旋屏结构的设计方案。光敏树脂件具有高透明度,其透射反射率可以通过表面打磨进行调控,并且其机械性能指标高于现阶段其它塑件性能,符合对材料的要求。由于螺旋面的空间不可延展性造成加工困难,因而采用一体化 RP 成型方案能够较好地满足制作要求。另外,双螺旋屏的结构设计思想是单导程螺旋面(螺线沿轴心旋转 360°)沿垂直的中轴平均划分成两个部分,其中一半逆向旋转 180° 后与另一半拼合,这样结构对称,质量对称,需要的转速下降,刷新率变高,动平衡性能优于单螺旋屏幕,唯一的不足是比单螺旋屏的整体强度下降 $1/2$,但这不足以影响双螺旋屏的工作性能。

为了能够进一步减少理论结果和实际结果之间的差距,还需要对螺旋扫描屏进行建模及结构优化研究。

3.1.3 双螺旋屏三维建模及结构优化

利用 Solidworks 软件对双螺旋屏进行三维建模及其优化。

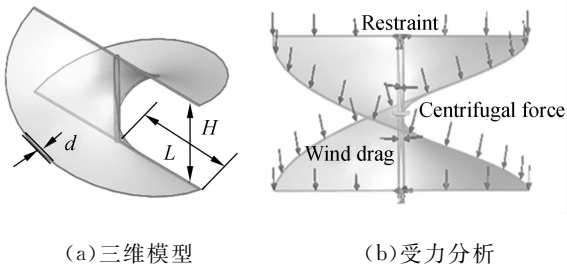
双屏螺旋面可以用下面基于 $O-xyz$ 坐标体系的数学方程来描述:

$$y = x \tan \gamma, z = \frac{H\gamma}{180} = p\gamma, \gamma \in [0, 180], x \in [0, R], \quad (1)$$

式中, R 为圆柱半径; H 为螺旋面导程; p 为螺距; γ 为 $O-yz$ 和 $O-xz$ 面的夹角。

针对大型显示空间的设计要求,取上式 $R = 250 \text{ mm}$, 则 $H = 250 \text{ mm}$, $L = 250 \text{ mm}$, $d = 3 \text{ mm}$, 以垂直中线 H 为路径,水平矩形 $L \times d$ 为轮廓,由“扫描特征”建立了双屏螺旋面的三维几何模型,见图 2(a)所示,双螺旋屏的中轴处开有通孔:直径 8 mm ,壁厚 4 mm ,以便安置支撑轴。

螺旋面是一大型薄壁结构,转速为 600 r/min 。在整个旋转过程中:由于离心力和重力的方向始终不变,视为恒定载荷,见图 2(b);而风阻随时间变化,视为交变载荷,其大小只能依靠 CFD 仿真(Computational Fluid Dynamics,计算流体力学)和风洞实验获得。因此,采取加大安全系数的方法,来忽略风阻受力,这样整个结构就可简化为仅受离心力载荷影响的运动模型。螺旋屏材料如表 1 所示。



(a) 三维模型 (b) 受力分析
(a) Three dimensional model (b) Force analysis

图 2 双螺旋面三维模型和受力分析

Fig. 2 Three dimensional model of two-helical curve screen and its force analysis

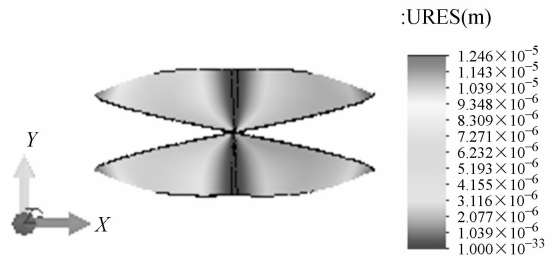
表 1 螺旋屏材料

Tab. 1 Helical screen materials

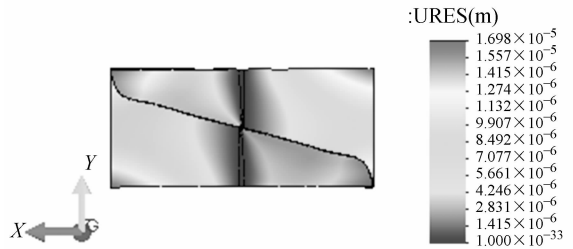
材料名称	光敏树脂 Somos11120
密度/(kg/m ³)	1 120
抗拉强度/MPa	47.1~53.6
弹性模量/MPa	2 650~2 880
弯曲强度/MPa	63.1~74.16
弯曲模量/MPa	2 040~2 370

由于屏的离心力作用,导致屏在旋转时产生的最大位移变形约为 0.013 mm。如图 3(a)所示,一般来说,人眼视觉在距目标 30 cm 左右时,只能分辨尺寸大于 0.1 mm 的物体,因此,根据运动模拟的结果,最大位移数据 0.013 mm 远小于人眼视觉可分辨的范围,完全满足设计要求。但由于旋转屏的材料光敏树脂与空气长时间接触会因吸收水气而逐渐软化,会造成屏幕中央成像区域的凹陷或坍塌,因此需要考虑在双屏间插入一薄壁“墙体”作为支撑,并将螺旋面直接固连于支撑墙,同时还不能因支撑结构的介入,改变现有整体设计安排和阻挡投影光路。其次墙面采用镂空的设计,以改善风阻情况。支撑墙的存在,不仅降低了树脂软化对显示效果的影响,还可大幅度增强了屏幕的使用寿命,但对旋转屏位移有所影响,如图 3(b)所示,运动屏的最大位移有所上升,但所有上升的数值还远不足以超过设计要求的下限标准,说明只要螺旋屏固定得当,支撑墙加入的设计完全可行,同时还能降低树脂软化对显示效果的影响,增强屏幕的使用寿命。

以上屏三维模型的运行分析是借助 Solid-



(a) 无支撑墙体
(a) Without supporting wall

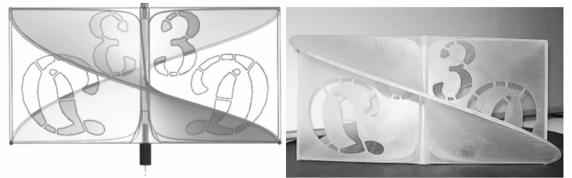


(b) 带支撑墙体
(b) With supporting wall

图 3 屏三维模型的运动结果分析

Fig. 3 Operation result analysis of 3D models of screen

works 软件中 COSMOSWorks 的模块完成。将图 4(b)实际加工的螺旋屏,与图 4(a)构建的三维模型进行比对,其相似程度高达 98%。工作一段时间后,屏位移形变的情况与仿真结果完全吻合。



(a) 三维模型 (b) 实物照片
(a) Three dimensional model (b) Actual picture

图 4 螺旋屏的三维模型与实物照片

Fig. 4 Three dimensional model of helical screen and its actual picture

3.2 约束机构的研究

约束机构的作用是对螺旋扫描屏沿中轴径向和轴向的位移进行制约,通过机械传动轴来实现。因此要求该轴具有足够的强度、刚度,以及最大负载时变形 ≤ 0.05 mm 的特性。文中采用了长约 250 mm 的细长杆件,轴一端固定,一端自由。由

受力分析可知,截面为圆的轴变形以扭转为主。轴的设计公式由下式表示^[9]:

$$d = C \sqrt[3]{\frac{P}{n}}, \quad (2)$$

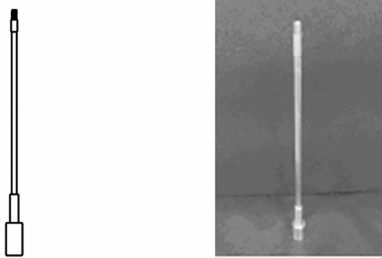
式中, d 为轴直径; P 为轴所传递的功率; n 为轴转速; C 为常数,值由轴的材料和承载情况确定。采用45钢作为设计轴的材料,根据表2,可分别取轴的扭转剪应力 $\tau = 30$ MPa, $C = 110$,且要求轴所传递的功率 $P = 8.17 \times 10^{-3}$ kW,转速 $n = 600$ r/min。

表2 常用材料的 τ 值和 C 值

Tab.2 τ and C values of common materials

轴的材料	Q235,20	35	45
τ /MPa	12~20	20~30	30~40
C	160~135	135~118	118~107

由式(2),得 $d = 2.6268$ mm,即只需轴径 >3 mm,就可满足设计要求。同时考虑装配工艺要求,设计加工了图5所示的阶梯轴。



(a)模型

(b)实物照片

(a)Model

(b)Actual picture

图5 阶梯轴模型与实物照片

Fig.5 Model and actual picture of step-shaft

3.3 运行驱动机构研究

旋转屏扫描系统中各种不同功能器件首尾相连、环环相扣,因此投影空间的形成,除了屏和轴之外,还需要构造一个运行驱动机构带动屏旋转。运行驱动机构的核心是一套伺服系统,一般由电机驱动器和反馈元件组成,完成对速度输入、位置输出的准确控制,以便提供一个稳定的成像空间。显然,伺服系统不是孤立存在,其运动参数的设置还需要考虑与之相关联器件的运行要求,如螺旋屏的转动惯量作为旋转系统的负载转子,其转动惯量是计算电机启动时间和转子临界转速不可缺

少的重要数据^[10],而数据采集设备的最小时间分辨率则是选择反馈元件的主要参考依据。另外,为了确保图像显示正常,不发生畸变,则必须借助该运行驱动机构实现屏与投影图像的同步控制,如螺旋面转动一周,反馈元件将发出一个脉冲信号,驱动电机实现速度偏差修正,或被数据采集装置捕获后送给控制主机,实施切片图像投影序列号和投影时间的调整。

这里螺旋屏和轴被视为负载。先分别计算出螺旋屏和轴的转动惯量 J_H 和 J_S ,然后求出驱动电机选型必须的三个基本参数:负载转动惯量、负载扭矩和电机功率。

负载转动惯量:利用Solidworks系统提供的“质量特性”查询功能,选择所创建的螺旋屏和轴的三维模型,即可精确求出螺旋屏和轴的转动惯量,见表3,继而可根据公式(3),求出电机输出轴上的负载转动惯量。

$$J = (J_L + M \times L^2) \times GL^2, \quad (3)$$

式中, J 为电机输出轴上的负载转动惯量; J_L 为负载转动惯量; L 为物体与旋转轴的距离; GL 为减速比。由于本文采用的是直联传动结构,故 $L = 0, GL = 1$,即 $J = 0.018$ kg·m²。

表3 螺旋屏和轴的物理属性

Tab.3 Physical properties of helical screen and shaft

	螺旋屏	轴
材质名称	光敏树脂	45钢
体积/m ³	0.647×10^{-3}	0.020×10^{-3}
质量/kg	0.725	0.159
转动惯量/(kg·m ²)	0.018	5.308×10^{-6}
密度/(kg/m ³)	1.12×10^3	7.91×10^3

负载扭矩:系统运行时的角速度为600 r/min,即 20π rad/s,另外考虑到风阻不容易计算,一般通过加大安全系数的方法来忽略其影响。假设在 $\Delta t = 5$ s内达到稳定的设计转速,则需选SA值为1.8,这样电机总的负载扭矩可由下式获得:

$$T_p = J \times \epsilon = 0.018 \times 20\pi / \Delta t = 0.36 / \Delta t \text{ N} \cdot \text{m}, \quad (4)$$

$$T_L = T_p \times SA = 0.36 \times 1.8 / 5 = 0.13 \text{ N} \cdot \text{m}, \quad (5)$$

式中, T_p 为电机起动力矩; J 为轴所传递的功率;

ϵ 为轴转速; T_L 为电机总的负载扭矩; SA 为安全系数。

电机功率:由电机学中电机功率和转矩的关系公式: $P = T_L \times N_M / 9\ 550$ 。式中, P 为电机功率; N_M 为电机稳定转速。故 $P = 0.13 \times 600 / 9\ 550 = 8.17\ \text{kW}$ 。

由以上参数初步确定伺服系统的选型条件: $T_L \leq$ 电机额定转矩; $P \leq$ 电机额定输出; $N_M \leq$ 电机额定速度; $J_L \leq$ 伺服系统的允许负载惯量, 故选安川 SGMAH 01A 型 AC 伺服电机及伺服驱动系统, 其额定数据如表 4 所示。

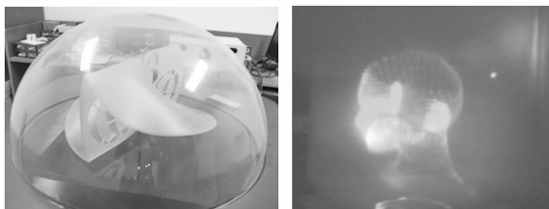
表 4 电机额定参数

Tab. 4 Nominal parameters of motor

参数名	参数值
额定输出功率/W	100
额定转矩/(N·m)	0.318
瞬间最大转矩/(N·m)	0.955
额定转速/(r/min)	稳定 3 000, 最高 5 000
电机转子惯量/(kg·m ²)	$0.036\ 4 \times 10^{-4}$
允许负载惯量	\leq 转子惯量的 30 倍
脉冲数/(P/r)	2 500

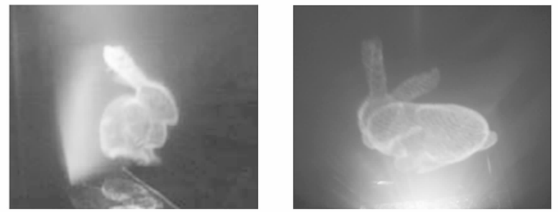
4 实验结果

根据上述分析,建立了如图 6(a)所示的基于螺旋屏的投影成像物理系统。图 6(b)、(c)、(d)分别显示了人头部和兔子两个侧面,均为实验过



(a)螺旋扫描系统 (b)人头部

(a)Helical sweep system (b)Head of people



(c)兔子侧视图

(d)兔子后视图

(c)Side view of a rabbit

(d)Rear view of a rabbit

图 6 螺旋扫描系统及成像结果

Fig. 6 Helical sweep system and imaging results

程中在投影空间呈现出三维图像的摄影截图。

5 结论

建立了基于螺旋结构的空间曲面显示屏,其透射率为 50%,反射率为 50%,属于稳定结构又充分利用了显示空间,不仅可以获得一个高保真的图像质量,还可克服平面显示屏系统视觉死区的缺点。螺旋结构虽不能保证完全各向同性,但与已研制的基于平面屏构建的成像空间相比,其均匀性在一个水平上,基本上各个体素在螺旋曲面上的排布位置和每个数字显微镜设备的小反射面之间的物象关系保持均一性,是一种高保真的成像空间构建方式。实验结果表明,基于螺旋屏的投影显示系统可以产生一个大小为 $25\ \text{cm} \times \Phi 50\ \text{cm}$ 的柱型成像空间,并且能够显示出清晰的体三维图像。同时也表示优化双屏螺旋结构与预期值基本一致,相似程度高达 98%,屏在 600 r/min 恒速运行下产生的最大位移仅为 0.013 mm,不影响成像效果,较好地解决了体三维显示对成像质量提出的稳定性设计要求。

参考文献:

- [1] BLUNDELL B G. *Enhanced Visualization: Making Space for 3-D Images*[M]. New York: John Wiley & Sons, 2007: 46-55.
- [2] FAVALORA G E. Volumetric 3D displays and

application infrastructure[J]. *IEEE Computer Society*, 2005, 32(8): 37-44.

- [3] 邢建芳, 龚华军, 沈春林, 等. 基于数字显微镜和旋转扫描技术的体三维显示器[J]. *光电子·激光*, 2008(8): 1011-1015.

XING J F, GONG H J, SHEN CH L, et al.. A

- volumetric display system based on DMD and swept volume technique[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2008(8):1011-1015. (in Chinese)
- [4] 林远芳,刘旭,刘向东,等. 利用旋转发光屏再现三维图像原理及偏差分析[J]. *光电工程*, 2004, 31(5): 64-67.
LIN Y F, LIU X, LIU X D, *et al.*. Principle and distortion analysis for reconstructing 3-D image with a rotating display panel[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, 31(5):64-67. (in Chinese)
- [5] FAVALORA G E, NAPOLI J, HALL D M, *et al.*. 100 Million-voxel volumetric display [J]. *SPIE*, 2002, 4712(1):300-312.
- [6] SCHWARZ A J, BLUNDELL B G. Considerations for accurate voxel positioning on a rotating-screen volumetric display system [C]. *Optoelectronics, IEE Proceedings*, 1994, 141(5):336-344.
- [7] 李艳丽,王惠南,陶玲,等. 真三维立体显示系统的旋转体扫描技术研究[J]. *计算机应用与软件*, 2008, 25(5):221-273.
LI Y L, WANG H N, TAO L, *et al.*. Study on rotary motion swept-volume technology of true 3D volumetric display system[J]. *Computer Applications and Software*, 2008, 25(5):221-273. (in Chinese)
- [8] 李莉,李玉峰,沈春林,等. 基于数字微镜的旋转体三维显示装置研究[J]. *仪器仪表学报*, 2008, 29(1):67-72.
LI L, LI Y F, SHEN CH L, *et al.*. Volumetric 3D display device based on DMD utilizing a rotating screen[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2008, 29(1):67-72. (in Chinese)
- [9] 成大先. 机械设计手册(第3卷)[M]. 北京:机械工业出版社, 2004:1-48.
CHENG D X. *Machine Design Handbook (Vol. 3)* [M]. Beijing:China Machine Press, 2004:1-48. (in Chinese)
- [10] 鲁恩慧. 设计坚固、容错的运动控制反馈系统[J]. *电子质量*, 2003(11):12-13.
LU E H. Design hard & tolerance feedback system of moter control [J]. *Electronics Quality*, 2003(11):12-13. (in Chinese)

作者简介:



樊琼剑(1973—),女,湖南邵阳人,博士后,讲师,2004年、2008年于南京航空航天大学分别获硕士和博士学位,主要从事控制工程,三维显示技术研究。E-mail: fanqiongjian@yahoo.com.cn



李莉(1979—),女,湖南衡阳人,博士,助理研究员,2008年于南京航空航天大学获博士学位,主要从事图像算法的研究。E-mail: eprimrose@sohu.com



沈春林(1935—),男,浙江绍兴人,教授,博士生导师,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作访问学者,主要从事数字控制系统,精确制导,低空飞行与突防技术,真三维立体显示技术的研究。E-mail: clshenac@nuaa.edu.cn



龚华军(1965—),男,浙江慈溪人,教授,博士生导师,1990年、2000年于南京航空航天大学分别获硕士和博士学位,主要从事先进飞行控制技术,光传飞控系统,系统建模和仿真,三维立体显示技术的研究。E-mail: Ghj_301@nuaa.edu.cn