

三维摄像与显示综合实验

王嘉辉^a, 李佼洋^a, 周延桂^b, 梁浩文^b, 黄梓钊^b, 蔡志岗^{a,b}

(中山大学 物理学院 a. 实验教学中心; b. 光电材料与技术国家重点实验室, 广东 广州 510275)

摘 要:以双目视觉为基础设计了三维摄像与显示的综合实验, 包括演示型和研究型的两层次实验内容, 涵盖低年级演示物理和高年级专业物理的实验教学. 学生通过自行搭建双摄像头的拍摄平台进行实验, 了解立体视觉生理与心理原理, 学会不同场景对应的最佳拍摄参量组合.

关键词:立体视觉; 双摄像头; 三维显示; 评价量表

中图分类号: O436; TN141.9

文献标识码: A

文章编号: 1005-4642(2017)09-0006-06

立体(又称三维, 即 3D)显示是能让观众产生强烈沉浸感的目标与场景再现技术, 近年来随着电影《阿凡达》热映和虚拟现实(VR)技术的普及, 立体显示已经在影视娱乐、医疗卫生、军事训练等场合获得应用与推广^[1-4]. 与立体显示和 VR 技术的蓬勃发展带来的专业技术人员缺口相比, 相应的教学严重滞后, 特别是实验教学内容更是处于空白状态. 鉴于现状, 本文提出了以双目视觉为基础的三维摄像实验, 并制作了相应的实验设备. 该设备可以完成多种三维摄像、立体图像记录与再现等功能, 能让学生掌握立体显示与 VR 技术的基本视觉原理, 研究优化的拍摄条件.

1 实验原理

1.1 双目视差

双目视差是立体显示与 VR 技术成像的生理基础^[5]. 所谓双目视差, 指的是双眼在看同一物体时, 因为左右两眼视线方位不同, 而导致两眼的成像略有差异, 这种差异称为双眼视差. 根据双眼视差的方向, 可以分为水平和垂直 2 类, 其中水平视差是形成立体视觉的生理因素. 人眼观看物体时, 左右眼能看到该物体的不同侧面, 但是有一定的差异, 通过大脑融像, 所感知的物体如同在正前方所见的一样. 而物体在视觉中的感知距离则直接与视线夹角相关, 夹角越大则物体的像越靠近观众; 反之, 则远离观众.

根据双视差原理, 当屏幕上面同时展示某个物体对应左、右视角的 2 个侧面图像, 并且通过辅助眼镜(即 3D 眼镜)的选择特性将这 2 幅图像分别分离和过滤, 然后传送到观众的左、右眼进行融像. 这 2 幅侧面图像称为立体图像对. 根据立体图像对的相互位置的差异(如图 1 所示), 即可以再现目标物平面(2D)、出屏(3D)和入屏(3D)3 种状态.

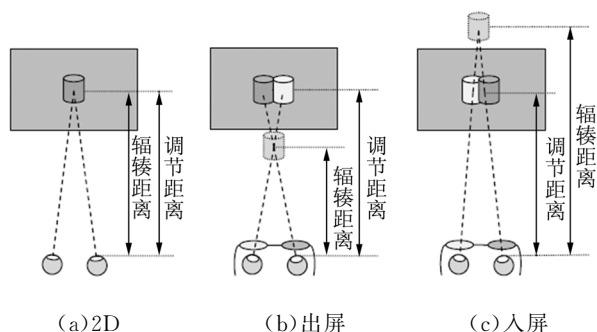


图 1 双目视差原理

1.2 三维摄像

三维摄像(即立体摄像)是对人眼双目视差的模拟过程^[6-7]. 利用 2 台摄像机替代人眼进行立体图像对的捕获. 根据 2 台摄像机放置方式的差异, 可以将三维摄像分为平行光轴、会聚光轴和共光轴 3 种情况. 共光轴系统常用于形貌获取, 不易产生直观的视差图像对. 平行光轴是目前市面上的商用 3D 摄像机和相机采用的方案, 虽然结

收稿日期: 2017-04-03; 修改日期: 2017-04-27

作者简介: 王嘉辉(1979—), 男, 广东广州人, 中山大学物理学院实验师, 博士, 研究方向为显示光学、图像处理及光电子技术.



构简单,但是拍摄的视差较大,对于近距离(长焦)的场景容易产生视差过大导致难以融像的问题. 鉴于以上情况,在设计实验时,采用了兼顾平行光轴和会聚光轴2种结构的方案,让学生了解不同拍摄方式之间的差异及其适用场景.

1.2.1 平行光轴三维拍摄系统

在光轴平行的立体视觉系统中(如图2所示),左右摄像机焦距及内部参量均相等,平行放置,摄像机的水平方向重合,垂直方向相互平行,左摄像机沿着其x轴方向平移一段距离(称为摄影基线)后与右摄像机重合,这样的摄像系统称为平行光轴三维拍摄系统.

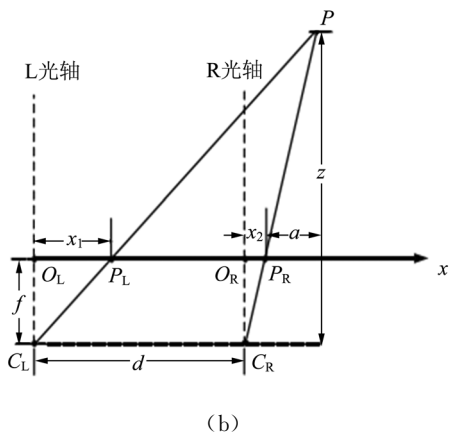
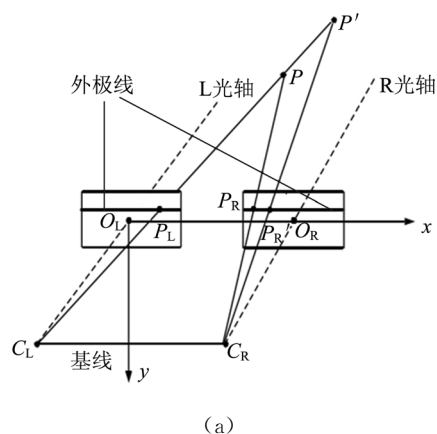


图2 双目立体视觉几何模型

图2所示为用左、右(即L,R)两摄像机观测同一景物时的情形. 物体上的点P在左摄像机中的成像点为P_L(P点与透镜中心C_L的连线与图像平面的交点);对应应在右摄像机中的成像点为P_R. 由光路可逆,若已知图像平面上的一点P_L和透镜中心C_L可唯一地确定1条射线C_LP_L,使得所有可成像在P_L点的物体点必定在这条

C_LP_L射线上. 对于右摄像机若能找到成像点P_R,那么根据射线C_RP_R与C_LP_L的交点就是物体点P的位置. 因此,若已知2台摄像机的几何位置,且摄像机是线性的,那么利用三角原理就可以计算物体在空间的位置. 射线C_LP_L上各点在右摄像机图像平面中的成像是1条直线P_RP_R',即外极线. 同理,C_RP_R上各点在左摄像机图像平面中的成像也形成外极线. 因此,如果已知空间点在一个图像平面中的成像点要寻找在另一图像平面中的对应点时,只需沿此图像平面中的外极线搜索即可. 设P点在左、右图像平面中成像点相对于坐标原点O_L和O_R(即左、右摄像机透镜光轴与图像平面的交点)的距离分别为x₁和x₂,而这2个成像点位置差x₁-x₂被称为视差. 由图中几何关系得:

$$\frac{z-f}{z} = \frac{a}{a+x_2}, \tag{1}$$

$$\frac{z-f}{z} = \frac{d-x_1+x_2+a}{d+a+x_2}, \tag{2}$$

由式(1)和式(2)得

$$a = \frac{dx_2}{x_1-x_2} - x_2, \tag{3}$$

将式(3)代入式(2)得到物点P离透镜中心的距离z为

$$z = \frac{fd}{x_1-x_2}, \tag{4}$$

式(4)中f为透镜焦距,d为两透镜光轴之间的距离,称为摄影基线. 当摄像机几何位置固定时,视差只与距离z有关,而与P点离相机光轴的距离无关. 视差越大说明物点离相机近,反之越远.

1.2.2 会聚光轴三维拍摄系统

图3是相交光轴的双目视觉系统结构. 左右两摄像机的光轴成一定的角度布置,采用这种结

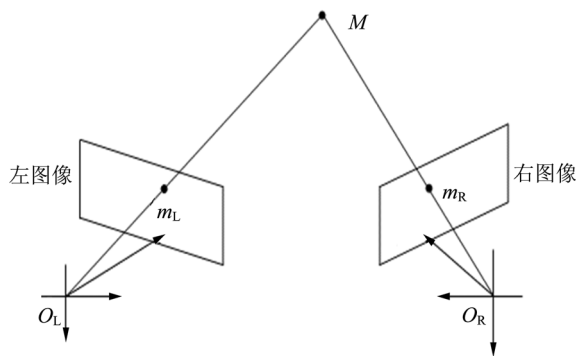


图3 会聚光轴双目立体系统

构形式的摄像机安装方便,可以根据被测对象的特点和系统的要求灵活调节 2 台摄像机之间的距离及摄像机的倾斜方向,不过该结构不利于左右图像匹配.

1.3 偏振式三维显示

三维显示是还原双目视差效果实现立体影像输出的过程. 实现三维显示的方法有多种,而偏振式(图 4)是目前最常用的三维显示方式,又名光分法. 它可分为投影和平面显示 2 种格式,但都是利用光的偏振性,通过偏光滤镜滤除特定角度偏振光外的所有光,实现立体图像对的分离. 实验中使用的平面显示光分法是在液晶平面显示的基础上,将原有液晶面板前端的单向偏振滤光片改为隔行排布的双向偏振滤光片. 其奇偶数行的偏振滤色片的方向相反,恰好与辅助眼镜的双目镜片的方向一致,所以立体图像对可以通过眼镜进行分离,并在观众的大脑融像^[8].

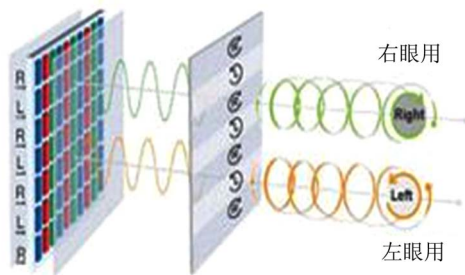


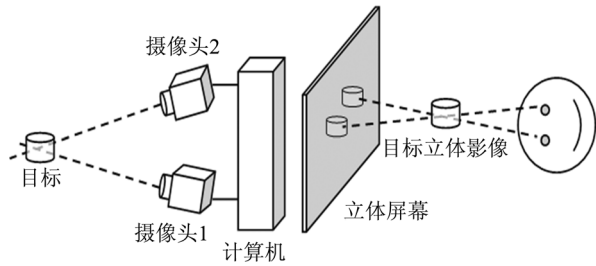
图 4 偏振式 3D 平面显示原理

2 系统搭建与程序设计

根据前述拍摄立体图像对的需求,本文采用 2 台大恒图像水星 MER-040-60UC 工业摄像机作为图像记录器件,配合旋转台、平移轨道等光学调节架和三脚架建立可调度高的拍摄平台. 摄像机拍摄的立体图像对实时传输到计算机,经过图像处理与合成后将在 LG D2342P 偏振式 3D 显示器进行再现,如图 5 所示.

从 2 台摄像机拍到的立体图像对需要经过处理才能在偏振式 3D 显示器上再现. 处理包括相机匹配校正和图像融合 2 部分. 由于 2 台摄像机之间的镜头和感光芯片存在差异,例如镜头的畸变、感光芯片的偏色及其对亮度的灵敏度都不一致,所以导致拍摄出来的立体图像对之间的亮度和颜色存在一定差异. 当上述差异过大时,将导致实验者出现视觉不适甚至融像困难. 因此,需

要将立体图像对的亮度和白平衡进行匹配. 此外,由于偏振式三维显示器是需要 1 台显示设备上利用隔行方式立体图像对的 2 幅图像,因此,也需要利用图像处理的方法,将上述 2 幅图像进行合并.



(a) 结构原理图



(b) 拍摄平台实物图

图 5 三维拍摄实验系统结构原理与实物图

利用 OpenCV 与 Microsoft VC++ 联合编程(图 6),实现了对 2 台工业摄像机的控制及立体图像对拍摄,并调整相机的快门、白平衡配置和电子增益等参量(表 1),使得立体图像对的亮度与颜色初步协调. 立体图像对经过 USB 接口送入计算机后,经过程序进一步校正它们的亮度和颜色差异,提高实验者的视觉舒适度.

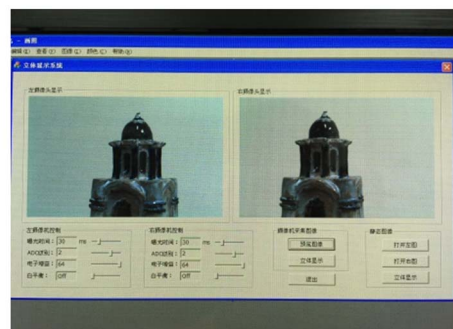


图 6 图像处理与显示程序的前台界面

表1 三维拍摄实验系统硬件参量

参量	数值
相机分辨率	752(H)×480(V)
相机帧率	60 s ⁻¹
显示器分辨率	1 920×1 080
立体图像对分辨率	1 920×960
显示器显示帧率	60 s ⁻¹
运行环境要求	32位 Win XP 或 Win7 系统, OpenCV2.2 或以上,2G 内存

经过校正后的立体图像对首先将调整图像分辨率,使之与偏振式3D显示屏幕的分辨率匹配,再通过隔行抽样和插值,将原有的立体图像对生成1张包含2个侧面视角图像的立体照片,最后实时显示在屏幕上.图7为学生实验场景,学生调节相机之间的视差,可以从屏幕监控实时生成的3D影像(即重影的部分).

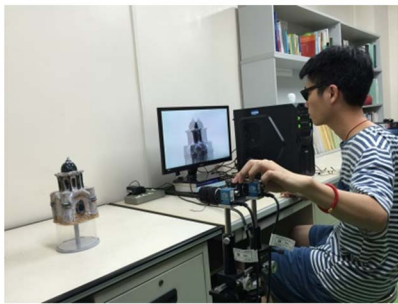


图7 学生实验现场

3 实验设计

三维摄像与显示实验不仅要让学生通过学习了解视差产生立体(3D视觉)的生理机理,掌握立体图像对拍摄与融合的方法,还要学生通过对不同立体拍摄方式的横向实验对比,寻找不同场景和拍摄条件下匹配的三维摄影方式.针对实验设计目标,三维摄像与显示实验将分为2部分内容:视差原理演示和三维拍摄对比与评价.

如前述,视差是产生立体(3D)视觉的起源.所以本实验的第一部分作为演示型的内容,计划安排学生通过使用平移轨道、旋转台、杆座及接杆等光学元件和工业相机组合,自行搭建可以改变基线距离、调整摄像头间视角夹角的拍摄平台,并开展初步的立体图像对纪录实验.在初步实验中,注重让学生通过改变目标物的远近和相互位置,掌握视差产生立体的生理立体原理,同时了解

远近、遮蔽、阴影、几何透视等的心理立体原理;指导学生调整摄像头之间的相对高度,消除垂直视差,了解垂直视差对立体视角的减弱作用.图8是学生实验时纪录的立体图像,为了便于印刷已转为红蓝3D格式,该图片选择长伞作为目标,在约1.5 m远的距离拍摄.从图8可见,伞的前后部分视差存在差异,让学生了解视差的形成以及视差与物体远近的关系,同时伞和背景之间的遮蔽效应、几何透视(近大远小)等心理立体因素也能在本照片中清晰展示,供学生学习掌握.



图8 实验所拍三维图像

三维拍摄的目的是将目标物或者场景进行模拟人眼视觉的纪录和再现,因此拍摄的图片需满足既能提供明显的出屏感^[9-10],又能让观看者视觉舒适.所以针对实践应用中的技术要求,本实验的第二部份是研究型的内容,让学生在不同的拍摄环境(即距离和目标尺寸)下,尝试不同的基线距离及其对应的夹角,并对该拍摄条件所获的三维图像进行视觉立体感(即出屏感)和舒适感的评分.此外,本实验还安排学生在各个拍摄环境中更换不同焦距的镜头,进行立体感和舒适感的评价.这样就可以通过基线和焦距2个变量的分离研究,通过双方面评分找出不同环境下合适的拍摄条件(焦距与基线)的组合.

图9是实验中采用相同基线距离(6 cm)对距离基线1 m的食物模型使用不同夹角所拍摄的立体图像,它们的视角夹角 θ 分别为0.9°,1.2°,1.5°,1.9°,2.4°,3°.在常规观看距离(0.6 m)下,图9(a)~(f)中模型的出屏距离分别为3.6,6.3,8.1,9.2,11.7,13.5 cm.

为了实现拍摄条件对立体视觉感知和舒适度影响的定性半定量研究,实验采用了测评量表(如表2)让学生在观看拍摄的立体影像后,进行评价.测评量表是心理学的主要研究工具,它可以

通过科学、客观、标准的测量手段对人的特定素质进行测量、分析、评价。由于立体视觉属于心理学中逻辑与认知这一重要分支,因此采用心理学的常用工具进行交叉研究具有可行性和可信度。

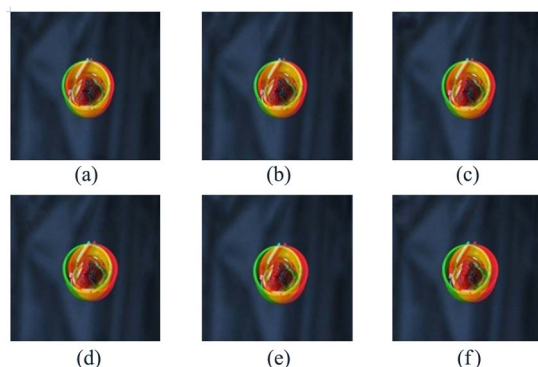


图 9 不同基线和夹角下所拍摄三维图像

表 2 拍摄距离 1 m,基线距离 6 cm,不同视角夹角下拍摄方式评价量表示例 ($f=8\text{ mm}$)

$\theta/(\text{°})$	评分	
	立体感	舒适度
0.5	1	5
1.2	3	4
3.0	4	2

结合图 9 和表 2 的结果分析可知,立体图像对视差(即模型的红、蓝两色影像的间距)随着视角夹角增大而逐渐增大。根据学生的实验结果分析,当视角夹角小时[9(a)],出屏感不显著,但是视觉舒适;当视差增大后,如 9(b)~(d),出屏感逐步增强,伴随着视觉舒适度稍有减退,是这个场景下可取的拍摄条件组合;当视差较大时,如 9(e)和(f),出屏感极为强烈,人眼却出现难以融像、甚至头晕等视觉不适,表明此时视差已经超过人眼布鲁姆融像区,不适合作为三维显示。而表 2 的数据也体现了拍摄条件出屏感和舒适度存在相同的变化规律。

通过两步骤的实验内容设置,不仅让学生由浅入深地掌握立体视觉产生的生理和心理机理,学会拍摄立体图像对的方法,更能半定量地通过评分表的方式对比研究,探索对应不用场景的优化三维拍摄参量(基线、视角夹角和焦距)的组合,并能很好地与以后的实践接轨。此外,本实验的第一部分还适合单独拆分作为演示物理实验,向低年级本科生讲授立体视觉的内容。

4 结束语

针对一方面 3D 显示应用和虚拟现实技术蓬勃发展,而另一方面与之对应的教学内容严重缺失,特别是实验教学处于空白的现状,设计了三维拍摄与显示实验,并制作了相应的实验仪器。实践证明,该实验可以让学生完成演示型和研究型的实验内容,掌握立体视觉生理与心理原理,学会不同场景对应的最佳拍摄参量组合,能与工业和商业、文化实践良好接轨。

本自制仪器获得全国高等学校物理实验教学自制仪器二等奖和高等学校国家级实验教学示范中心十年建设成果展示一等奖。

参考文献:

- [1] Bernardo A, Preul M C, Zabramski J M, et al. A three-dimensional interactive virtual dissection model to simulate transpetrous surgical avenues [J]. *Neurosurgery*, 2003, 52(3):499-505.
- [2] Henn J S, Lemole G M Jr, Ferreira M A, et al. Interactive stereoscopic virtual reality: a new tool for neurosurgical education [J]. *J. Neurosurg.*, 2002, 96(1):144-149.
- [3] Smith R, Day A, Rockall T, et al. Advanced stereoscopic projection technology significantly improves novice performance of minimally invasive surgical skills [J]. *Surg. Endosc.*, 2012, 26(6):1522-1527.
- [4] 腹腔镜手术即将进入 3D 时代[EB/OL]. <http://www.syshospital.com/Item/3567.aspx>.
- [5] Wang J, Liang H, Fan H, et al. High-quality autostereoscopic display with spatial and sequential hybrid control [J]. *Appl. Opt.*, 2013, 52: 8549-8553.
- [6] Elliott S D, Phillip L. Inside 3D Studio Release 4 [M]. 汪亚文译. 北京:学苑出版社,1995:328.
- [7] 王式孟. 立体摄影的关键技术[J]. *影视技术*, 1998(2):8-11.
- [8] 王琼华. 3D 显示技术与器件[M]. 北京:科学出版社,2011:210-214.
- [9] Emoto M, Nojiri Y, Okano F. Changes in fusion-vergence limit and its hysteresis after viewing stereoscopic TV [J]. *Displays*, 2004, 25(2):67-76.
- [10] Emoto M, Niida T, Okano F. Repeated vergence adaptation causes the decline of visual functions in watching stereoscopic television [J]. *Journal of Display Technology*, 2005, 1(2):328-340.

Experiment of stereoscopic image capture and display

WANG Jia-hui^a, LI Jiao-yang^a, ZHOU Yan-gui^b,
LIANG Hao-wen^b, HUANG Zi-zhao^b, CAI Zhi-gang^{a,b}

(a. Physics Experimental Education Center; b. State Key Laboratory of Optoelectronics Materials and Technologies, School of Physics, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: A stereoscopic imaging and display experimental system was designed, which was suitable to physics demonstration and specialty experiment. It could let students to set up an image recording system based on binocular cameras and capture stereoscopy images by themselves. Through this experiment, students could comprehend the physical and psychological causes of stereoscopic vision, acquire the experience on optimization condition of stereoscopic image capture in different scenes.

Key words: stereoscopic vision; binocular cameras; stereoscopy display; mark sheet

[责任编辑:任德香]

(上接第5页)

Generation characteristic analysis of spherical triboelectric nanogenerator based on COMSOL Multiphysics

QIU Yu¹, PEI Jun-le¹, YANG De-chao², LI Bing¹, WANG Xiao-na¹

(1. School of Physics and Optoelectronic Engineering,

Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Department of Electronic Engineering, Dalian Neusoft University of Information, Dalian 116024, China)

Abstract: The generation process and generation characteristics of spherical triboelectric nanogenerator with aluminum plates and PTFE pellets were studied based on COMSOL Multiphysics. By properly setting the parameters, the process of space potential changes was simulated, the details of energy transfer from mechanical to electrical were revealed. Based on the control variable method, the dependence of open-circuit voltage on the number and size of PTFE pellets and the number of aluminum plates was studied. The results showed that the three-dimensional spherical triboelectric nanogenerator could collect a full range of mechanical energy. The movement of pellets in the spherical shell led to transfer among the circuits connected with the aluminum plates, caused the change of space potential and produced AC electrical signal. The open-circuit voltage between different aluminum plates increased and then decreased with the increase of the pellet radius, the number of pellets and the number of aluminum plates.

Key words: triboelectric nanogenerator; mechanical energy; space potential; COMSOL

[责任编辑:任德香]