

自由立体显示技术及其发展

秦开怀 罗建利

(清华大学计算机系, 北京 100084)

摘要 自由立体显示技术是指不需佩戴立体眼镜等附属设备的3维立体显示技术。它可分为全息立体技术、3维集成成像技术、体3维显示技术和基于视差的自由立体显示技术。其中体3维显示技术和基于水平视差的自由立体技术发展很快。本文首先论述了静态体3维显示技术和扫描体3维显示技术两类不同的体3维显示技术近年来的研究进展;然后从所使用的光学光栅类型及复用方法上综述了基于视差的自由立体显示技术的现状和特点;最后对比了体3维显示技术和基于水平视差的自由立体技术优缺点。

关键词 体3维显示技术 基于水平视差自由立体显示技术 全息技术 3维集成成像显示技术

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2009)10-1934-08

Techniques for Autostereoscopic Display and Its Development

QIN Kai-huai, LUO Jian-li

(Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract Autostereoscopic display is a kind of three-dimensional technique which need not wear 3D goggles or other equipments. It can be classified into four groups: holography display techniques, integral photography display techniques, volumetric display techniques and horizontal parallax-based autostereoscopic display techniques. In these years, volumetric display techniques and horizontal parallax-based autostereoscopic display techniques develop rapidly. In this paper, we first overview developments in two kinds of volumetric display techniques, which are static volumetric display technique and volumetric display technique based on swept screen, during recent years. Then, make a survey of horizontal parallax-based autostereoscopic display on two ways, the optical sheets used and the multiplex methods. Last, summarize the advantages and disadvantages of volumetric display and autostereoscopic display based on parallax.

Keywords volumetric display techniques, horizontal parallax-based autostereoscopic display techniques, holography techniques, integral photography techniques

1 引言

自由立体 (autostereoscopic) 显示技术是指不需佩戴诸如立体眼镜等附属设备的3维立体显示技术。它解决了佩戴附属设备所带来的恶心、头晕等不适感。根据立体图像生成技术,自由立体显示技术可划分为全息 (holography) 技术、3维集成成像 (integral photography) 显示技术、体 (volumetric) 3维

显示技术和基于水平视差的自由立体 (parallax autostereoscopic) 显示技术等4类。

1948年,英国科学家 Dennis Gabor 发明了全息技术^[1]。全息技术是一种利用光的干涉方法摄像和衍射方法显像的技术。全息技术可用于制作商标、印刷。其成像和显像系统复杂,成本相对高。此外全息图的色差较大,应用场合受到限制。

1908年, Lippmann 发明了3维集成成像技术^[2]。他使用复眼透镜光栅 (fly's-eye lens sheet) 对

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2006AA01Z326)

收稿日期: 2008-05-30; **改回日期:** 2008-09-17

第一作者简介: 秦开怀(1958~),男,教授,博导,1990年于华中科技大学获工学博士学位。主要研究方向为计算机图形学、计算机辅助几何造型学、数字图像处理、虚拟现实、组合投影显示,自由立体显示技术等。E-mail: qkh-dcs@tsinghua.edu.cn

物体摄像和显像。首先,将摄像胶片放置于复眼透镜光栅焦平面处对物体摄像,此时胶片上记录了场景的多视点图像。然后,将成像后的胶片放在复眼透镜光栅焦平面处。此时灯光照射胶片显示图像,位于复眼透镜光栅另一侧的用户可观察到具有深度感的立体图像。随着数字化的发展,目前科研人员采用数码摄像机阵列摄像和与投影机阵列显像^[3-4]。3 维集成成像技术能提供全方位视差,但受复眼透镜光栅尺寸影响,系统分辨率较低,显示空间较小。

体 3 维显示技术是指使 3 维显示空间中体素点显示对应场景中 3 维点的颜色和亮度的技术。它能生成浮在显示空间的 3 维立体,因此也被称为真 3 维显示技术。体 3 维显示技术能提供全方位视差(parallax)、汇聚角(convergence)与调节(accommodation)视差等深度信息。是目前自由立体技术中立体感最强的技术。

相比较上面 3 种自由立体显示技术,基于水平视差的自由立体显示技术只提供水平视差。但实验证明人眼对垂直方向视差不敏感,基于水平视差的自由立体显示技术能提供充分的立体视觉效果。它同时在水平方向上的不同位置处采集场景的多个不同视点图像,然后对多视点图像进行显像。系统中的光学设备将每个视点的图像分离并显示在不同的空间即形成视区。当用户的左右眼同时处于不同视区时,用户左右眼观察到的图像的视差经过大脑融合产生立体感。当前 2 维显示设备主要有液晶显示器和投影机。而投影式多视点视差自由立体显示技术是当前研究热点。

随着制造技术和计算机图形学的发展,自由立体技术得到了迅速发展,目前国内外每年有大量关于自由立体技术的论文发表。其中体 3 维显示技术和基于水平视差的自由立体技术是研究热点,它们适用于影院、电视、广告和军事,有着广泛的应用场所。下面将重点介绍体 3 维显示技术和基于水平视差的自由立体显示技术。

2 体 3 维显示技术

体 3 维显示技术能控制 3 维显示空间中体素点发出、吸收或散射光线。根据体 3 维显示空间构造方法可分为静态体 3 维显示技术和扫描体 3 维显示技术两大类。

2.1 静态体 3 维显示技术

静态体 3 维显示技术的显示空间由静态物质构成。系统控制显示空间中的静态物质发出、吸收或散射光线。根据体 3 维显示空间中光线产生的方法,静态体 3 维显示技术可分为基于主动发光的静态体 3 维显示系统、基于吸收光线的静态体 3 维显示技术和基于散射光线的静态体 3 维显示技术 3 类。

2.1.1 基于主动发光的静态体 3 维显示系统

这种显示系统中构造显示空间的静态物质可受控主动发出光线。目前主要采用双激光激励介质两能量级跃迁然后衰减发光的技术。它使用一束激光激励介质(静态物质)从低能量级跃迁到中间能量级,用另一束激光再激励介质从中间能量级跃迁到高能级。当介质从高能级衰减到低能量级时发出光。因此控制两束激光的相交位置,可以使相交点处介质发出光线。目前使用的介质有气体、液体和固体 3 种。如 Kim 等人使用 780 nm 波长激光激励铷气体从 $5S_{1/2}$ 级跃迁到 $5P_{3/2}$ 中间能量级,使用 630 nm 波长的激光激励铷气体从 $5P_{3/2}$ 中间能量级再跃迁 $6d_{5/2}$ 高能级^[5]。此外 Lewis 等人使用涂有重金属氟化物的介质^[6]。图 1 为 Kim 等人研发的系统显示的立方体效果图。双激光激励能量级跃迁法制造成本高,系统维护难度大,色彩单调,目前不能实现消隐。

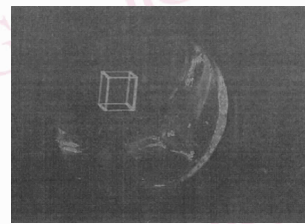


图 1 Kim 等研发的体 3 维系统显示立方体

Fig. 1 The static volumetric system designed by Kim displays the perspective view of cube

2.1.2 基于吸收光线的静态体 3 维显示技术

这种显示系统中构造显示空间的静态物质具有可控光线吸收特性。系统控制静态物质吸收或透射外部光源的光线。目前主要有基于液晶分子的静态体 3 维显示系统。液晶分子在加电后排列发生改变,使液晶层失去旋光性,从而吸收入射偏振光,而不加电的液晶分子则透射入射光线。如 Leung 等人使用多层液晶显示器构成 3 维显示阵列^[7]。每层液

晶显示器显示 3 维体空间的一个 2 维切面轮廓, 多层融合成一个体 3 维场景。

2.1.3 基于散射光线的静态体 3 维显示技术

基于散射光线的静态体 3 维显示技术使用光纤或离子交换波导器引导光线并散射。如 Penciu 利用离子交换波导折射率改变特性, 使用玻璃基底离子交换器引导光波到物质为 TiO_2 体素点处对光线全方位散射^[8] (见图 2)。MacFarlane 使用光纤引导光线到体素点位置散射^[9]。

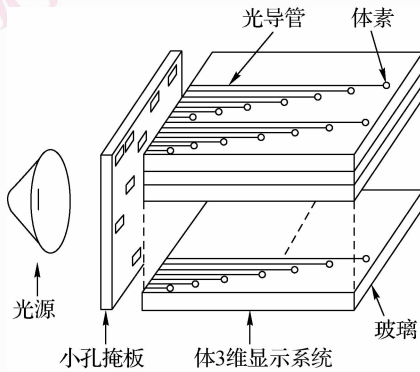


图 2 基于散射光线的体 3 维显示系统示意图

Fig. 2 Schematic illustration of the volumetric 3D display system based on diffusion

2.2 扫射体 3 维显示技术

扫射体 3 维显示技术的 3 维显示空间是由高频率周期运动物体扫射所构成的。根据扫射物体的运动方式可划分为平移和旋转扫射体 3 维显示技术两种。

2.2.1 平移扫射体 3 维显示技术

其显示空间是通过前后高速平移屏幕或反射镜^[10]构成。系统控制高速平移的屏幕快速显示空间位置处物体的剖面图, 高速刷新率使在空间位置上分布的剖面图融合成一个 3 维物体整体图像; 而反射镜一般为镀有反射面的塑料薄膜, 它被安装于扩音器喇叭上。系统控制喇叭的凸和凹使反射镜高速平移并反射显示空间处图像。

2.2.2 旋转扫射体 3 维显示技术

其显示空间是通过高速旋转物体屏幕构成。Jones 等人使用表面贴有各向异性的反射薄膜的镜子旋转扫射形成显示空间^[11] (见图 3)。Favalora 使用高速旋转的投影屏幕^[12]。该系统控制安装于屏幕下的高速时分投影仪投射图像, 通过固定在转轴

下的静止反射镜和固定在转轴上的旋转反射镜二次反射投影到高速转动的屏幕。

此外, 扫射体 3 维显示系统可划分为有源扫射体 3 维显示系统和无源扫射体 3 维显示系统。有源扫射体 3 维显示系统的屏幕上由可自发光的显示单元构成。如林远芳等人使用 2 维发光二极管阵列的旋转表面构成体 3 维显示空间^[13]; 而无源扫射体 3 维显示系统的屏幕显示单元不能主动发光。如 Blundell 等人使用荧光屏做屏幕^[14]。

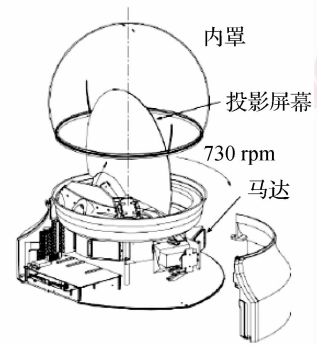


图 3 旋转扫射体 3 维显示系统示意图

Fig. 3 Schematic illustration of the volumetric 3D display system based on swept screen

3 基于水平视差的自由立体显示技术

当前基于水平视差的自由立体显示技术主要有液晶自由立体显示系统与投影式自由立体显示系统两种。经过多年的发展, 液晶自由立体显示系统得到长足的发展^[15]。21 世纪以来, 中国南京大学、合肥工业大学等大学及科研机构对液晶自由立体显示系统开展了研究^[16-17]。液晶自由立体显示的显示屏幕的大小目前还受到限制。

投影式自由立体显示系统具有分辨率高、视场大、沉浸效果好、适合多用户同时使用等优点^[7]。根据提供的视点图像数目, 当前投影式自由立体显示系统可划分为投影式双视点自由立体显示系统、带有人体跟踪器的投影式自由立体显示系统和投影式多视点自由立体显示系统^[18]。

投影式双视点自由立体显示系统和带有人体跟踪器的投影式自由立体显示系统由于只提供两个视点区域, 因此受限于单用户, 与液晶自由立体显示系统相比, 其性价比低, 应用受限。

投影式多视点自由立体显示系统是指在单位时间内投射多个视点图像, 并通过光学装置分离出多

个视区 (view zone) 的自由立体显示系统。投影式多视点自由立体显示系统能提供运动视差^[18-19], 用户在视区范围随意移动或转动头部依然能够感受到好的立体效果; 实现了环视 (look around) 功能; 同时支持多用户观看; 不需复杂、昂贵的头部或人眼跟踪系统。

3.1 基于光栅的自由立体显示技术

根据采用的成像光学硬件不同, 水平视差自由立体显示技术可划分为柱透镜光栅板^[20]、狭缝立体光栅与微位相差板 3 种技术。

3.1.1 柱透镜光栅板水平视差自由立体显示技术

从 1931 年 Ives 使用柱透镜光栅板以来, 柱透镜光栅板凭借其低成本、良好的光学性能被大量应用到投影式自由立体系统中。其中, 柱透镜光栅板立体显示装置可分为柱透镜光栅板前投影系统^[21]、柱透镜光栅板与非涅尔透镜组合的背投系统^[22]、双柱透镜光栅板背投系统^[23] 3 种。

图 4 为柱透镜光栅板前投系统示意图。柱透镜光栅板由很多大小和光学参数一致的小柱透镜垂直方向排列而成, 透镜的焦平面位于柱透镜光栅板的底面上。它能将水平方向入射光线聚焦于焦平面上然后再通过反射将光线从原路返回, 在垂直方向上柱透镜光栅板起发散作用。当多个在水平方向排列且间距为人眼瞳距的投影机投射同一场景多视点图像时, 通过柱透镜光栅板折射及反射后将在与投影机所在同一垂直平面上产生视区。

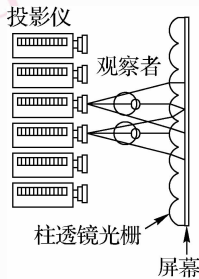


图 4 柱透镜光栅板前投系统示意图

Fig. 4 Schematic illustration of the front-projection lenticular autostereoscopic display system

柱透镜光栅板与非涅尔透镜组合的背投系统屏幕由柱透镜光栅板与非涅尔透镜构成。柱透镜光栅板与非涅尔透镜光学示意图如图 5 所示。其中, 图 5(a) 为散射屏的光线追迹图。光线经过散射屏散射后产生的观察区广, 因此散射屏常被制作位 2D 投影屏幕。图 5(b) 为非涅尔透镜光学功能示意图。

菲涅尔透镜的表面刻录了一圈圈由小到大、向外由浅至深的同心圆, 将入射的光线聚焦到成像平面上, 因此用户只能在一点观察到清晰的像。图 5(c) 的光学屏幕由菲涅尔透镜及安装在用户一侧的柱透镜光栅板组成。从菲涅尔透镜上一点透射的光的主瓣 (main lobe) 通过柱透镜单元形成主视区, 旁瓣 (side lobe) 从两侧的柱透镜单元射出形成多个弱视区。因此柱面直径垂直安装的柱透镜光栅板, 在通过多个透镜单元将光线在水平方向多个位置成像, 形成多个同一视点的观察视区, 从而使用户在多个位置能观察到清晰图像。图 5(d) 为多投影机多视点自由立体的光线追迹图。菲涅尔透镜与柱透镜光栅板在投影机的另一侧聚焦形成多个视点的观察区, 使用户在不同的位置看到不同的视点图像。Gordon 等人使用柱透镜光栅板与非涅尔透镜组合的背投屏幕构造了投影式自由立体显示系统^[24-25]。

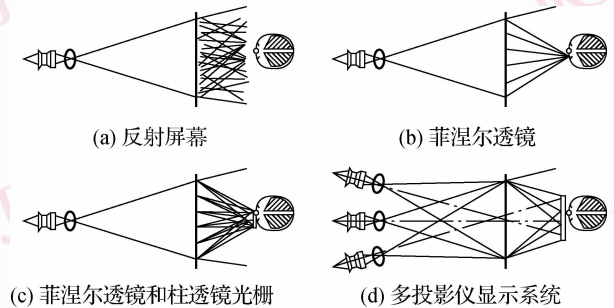


图 5 柱透镜光栅板、菲涅尔透镜光学功能图

Fig. 5 Light trace of lenticular sheet and fresnel lens

图 6 为一个双柱透镜光栅板背投系统的示意图。背投光学屏幕由双柱透镜光栅板、基底及中间的散射屏组成。柱透镜光栅板前投影系统的光线的聚焦及反射是由一块柱透镜光栅板承担的。与此不同的是, 双柱透镜光栅板背投系统由投影机侧柱透镜把入射光线聚集于焦平面上, 然后通过另一侧的柱透镜把光线发射到投影机的另一侧形成视区。

柱透镜光栅板的优点有: 工艺成熟, 市场上有各种规格的柱透镜光栅板销售且价格低廉; 与多投影机配合可以实现多视点, 视点数理论上不受限制。但是与狭缝立体光栅相比, 柱透镜光栅板难以实现 2D 显示与 3D 显示的兼容^[25]。

实验发现柱透镜光栅板前投系统由于投影机与用户在同一侧, 空间位置受限。此外系统中光栅板表面对光线的反射会导致图像模糊; 双柱透镜光栅板背投系统解决了空间位置限制的问题, 但由于要

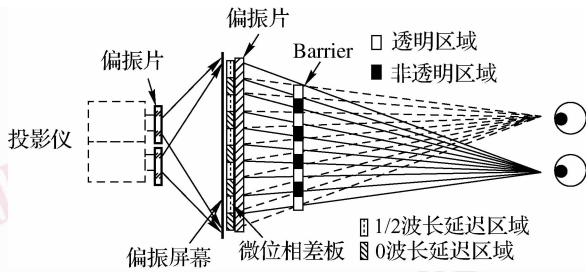


图 9 微位相差板系统示意图

Fig. 9 Schematic illustration of Microretarder-encoded barrier screen

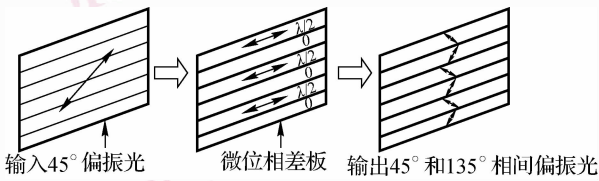


图 10 微位相差板功能示意图

Fig. 10 Properties of Microretarder

3.2 基于视点通道的自由立体显示技术

根据视点通道复用技术,投影式多视点自由立体显示技术又可分为如下 3 种:时分多路复用 (time sequential) 技术、空分多路复用 (spatially multiplexed) 技术和多投影 (multi-projector) 技术^[18]。

3.2.1 时分多路复用技术

时分多路复用技术是在一个时间周期内,将场景的多个视点的图像时分输出到显示屏幕上,通过光路控制设备分离视区。Dodgson 等人高速使用 CRT、光学成像透镜系统和菲涅尔透镜构造时分多路复用自由立体显示系统^[18] (见图 11)。光路控制设备为一组透镜和由铁电液晶材料制作的狭缝立体光栅 (铁电液晶快门)。系统控制高速 CRT 时分显示多个视点图像,光路控制设备同步控制快门位置从而在屏幕的右侧不同位置形成视区。该系统在 320 × 240 的分辨率下提供 16 个视点或 640 × 480 分辨率下投射 8 个视点图像。每个视点图像的刷新率为 50 ~ 60 Hz, CRT 的水平垂直方向的刷新率范围为 400 ~ 1 000 Hz。

此外,Eichenlaub 等人采用 ICFLCD (一种微型高分辨率快速显示设备) 和光束转向系统光路控制设备^[26]。

时分多路复用技术需要一个高速光路控制设备分离图像视区,如铁电液晶快门或光束转向系统,和一个高速显示系统。但系统机械惯性或光电延迟特性影响视点个数和系统的可扩展性。

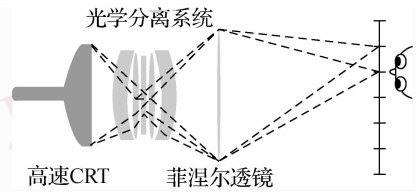


图 11 时分多路复用系统示意图

Fig. 11 Schematic illustration of time sequential 3D system

3.2.2 空分多路复用技术

空分多路复用技术首先将多个视点的图像通过交织方法复用为一幅图像,然后投射到光学屏幕上。屏幕上的光路控制设备如视差狭缝光栅板或柱透镜光栅板,将显示屏幕上的图像解复用分离出多视点图像并形成视区。显然,这会降低自由立体显示的分辨率。

Isono 等人实现的自有立体系统采用了空分多路复用技术^[33]。该系统由 4 台彩色摄像机、一台高分辨率液晶投影仪 (450 万像素) 和柱透镜光栅板与菲涅尔透镜组合的背投屏幕构成 (见图 12)。其中,摄像机组采集多视点的图像,控制系统生成交织复用图像,狭缝光栅板分离视区。

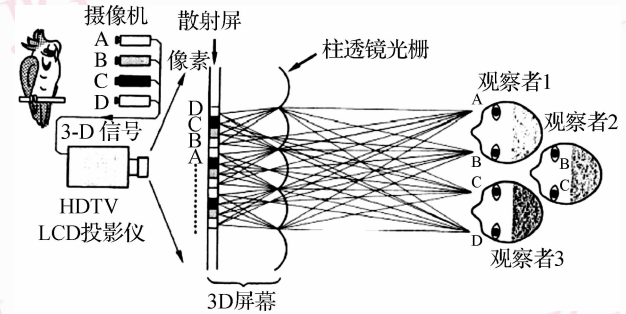


图 12 空分多路复用系统示意图

Fig. 12 An example of spatially multiplexed 3D system diagram

Shestak 等人采用两个投影仪分别投射由左、中、右 3 视点交织复用的图像,并由四面镜子组成的方形管道和倾斜安装的散射体和菲涅尔透镜分离构成视区^[34],解决了使用三菱镜或透镜等光学分离设备存在的图像变形的缺陷问题。空分多路复用技术的分辨率相对时分多路复用低,但对投影仪的刷新率要求不高;系统实现成本低,能够使用组合多投影仪扩展显示的空间方法提高分辨率及显示空间,这是目前研究及发展的方向。

3.2.3 多投影仪显示技术

多投影仪技术是指多个投影仪同时投射多个视

点图像,其中每个投影仪投射一个视点图像。它通常采用双柱透镜光栅板分离多视点图像。Matusik^[21],Annen 使用 16 台投影仪同时投射 16 个视点的图像^[35](见图 13),采用 16 台分辨率为 1 300 × 1 030 的摄像机阵列、8 台视频采集计算机集群、互连网络、8 台视频播放计算机集群分别进行图像采集、传输及播放。摄像机采集的视频流通过网络传送到另一端的对等位置的投影仪上。使用柱透镜光栅板分离视区,目前已经实现了背投与前投

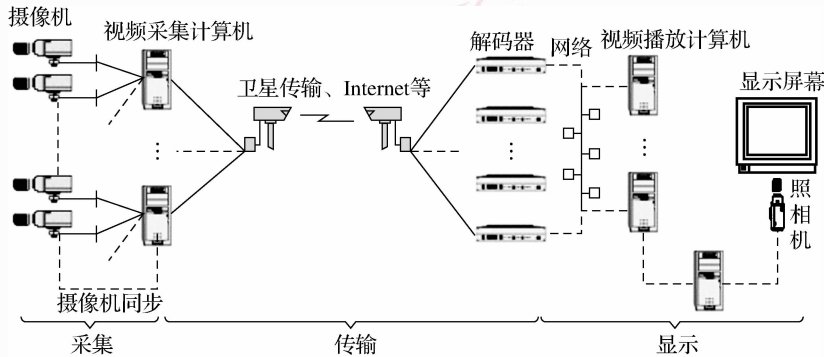


图 13 多投影仪自由立体系统示意图

Fig. 13 Schematic illustration of multi-projectors autostereoscopic system

4 结 语

与基于水平视差的自由立体相比,体 3 维显示技术能同时提高全方位视差及运动视差,给人以震撼的立体感,但存在消隐困难、色彩不丰富、体显示空间小等问题。此外由于系统复杂,成本较高。其中,旋转扫射体 3 维显示技术系统结构相对简单,是目前研究的热点。

基于水平视差的自由立体技术能够提供水平视差和运动视差,给用户带来充分的立体视觉。但是由于光学硬件的限制,存在串扰、图像模糊等问题。它最大的优点是系统构造相对简单,所用光学硬件已批量生产,制造成本低;此外它容易实现高分辨率、大场景的显示。与液晶自由立体显示技术相比,投影自由立体显示技术具有显示空间大等优点。其中,空分多路复用技术和基于柱透镜光栅板的自由立体显示技术具有可扩展性好、构造成本低等优点,是基于水平视差的自由立体显示技术的研究重点和热点。当前液晶自由立体技术的 2D/3D 兼容问题已经逐步解决^[36-39],但是大屏幕的投影式自由立体显示系统的 2D/3D 兼容问题依然有待解决。随着当前数据复杂度的增加,用户对显示的分辨率要求越来越高,同时要求显示的范围越大越好。如何利

两种方案。该系统屏幕尺寸为 72" × 48",提供 6 个连续视区,每个视区视角为 30°。

多投影仪显示技术要求多投影仪在屏幕上的投影区一致,因此投影仪位置校正相对困难,容易产生错排问题,需进行软件几何校正。此外,大部分投影仪光轴无法垂直光学屏幕,由此带来的图像变形比较难解决。多投影仪显示技术成本高,进一步增大显示区域比较困难,这是还需要进一步解决的问题。

用当前的光学硬件实现高分辨率自由立体组合显示是目前重要的研究方向之一。

参考文献 (References)

- 1 Xie Jing-hui, Sun Ping. New advances in holography[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2003, 23(2): 133-140. [谢敬辉, 孙萍. 全息术的新进展[J]. 北京理工大学学报, 2003, 23(2): 133-140.]
- 2 Onural L, Ozaktas H M. An overview of the holographic display related tasks within the European 3DTV project[A]. In: Proceedings of SPIE [C], Strasbourg, France, 2006: 61870T1-10.
- 3 Liao H, Iwahara M. High-resolution integral videography autostereoscopic display using multi-projector[A]. In: Proceedings of the Ninth International Display Workshop [C], Hiroshima, Japan, 2002: 1229-1232.
- 4 Liao H, Matsui K, Dohi T. Design and evaluation of surgical navigation for anterior cruciate ligament reconstruction using autostereoscopic image overlay of integral videography[A]. In: Proceedings of the 2005 IEEE Engineering in Medicine and Biology [C], Shanghai, China, 2005: 1-4.
- 5 Korevaar E, Hakakha H. Three-dimensional volumetric display in rubidium vapor[A]. In: Proceedings of SPIE [C], San Jose, CA, USA, 1996: 274-284.
- 6 Lewis J D, Verber C M, McGhee R B. A true three-dimensional display [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1971, 18(9): 724-732.

- 7 Leung M S, Beach R. Three-dimensional real-image volumetric display system and method[P]. US Patent:US005745197,1998.
- 8 Penciu C, MacFarlane D L. Fabrication and characterization of a volumetric three-dimensional display using ion-exchanged integrated waveguides[J]. *Optical Engineering*, 2000; **39**(2): 565-571.
- 9 MacFarlane D L. Volumetric three dimensional display[J]. *Applied Optics*,1994,**33**(31), 7453-7457.
- 10 Traub C. Stereoscopic display using rapid varifocal mirror oscillations [J]. *Applied Optics*, 1967; **6**(6): 1085-1087.
- 11 Jones A, McDowall I, YaMada H, *et al.* Rendering for an interactive 360° light field display [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2007, **26**(3): 40-1-40-9.
- 12 Favalora G E, Napoli J, Hall D M, *et al.* 100 Million-voxel volumetric display[A]. In: *Proceedings of SPIE [C]*, Orlando, FL, USA, 2002: 300-311.
- 13 Lin Yuan-fang, Liu Xu, Liu Xiang-dong, *et al.* Three-dimensional volumetric display system utilizing a rotating two-dimensional LED array[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10):1158-1162. [林远芳, 刘旭, 刘向东等. 基于旋转二维发光二极管阵列的体三维显示系统[J]. *光学学报*, 2003, **23**(10): 1158-1162.]
- 14 Blundell B G, Schwarz A J, Horrell D K. Cathode ray sphere: A prototype system to display volumetric three-dimensional images [J]. *Optical Engineering*,1994, **33**(1):180-186.
- 15 Wang Yuan-qing. Auto-stereoscopic display based on LCD[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2003, **18**(2): 116-120. [王元庆. 基于LCD的自由立体显示技术[J]. *液晶与显示*, 2003, **18**(2):116-120.]
- 16 Wang Yuan-qing. High brightness auto-stereoscopic LCD with parallax backlight[A]. In: *Proceedings of SPIE [C]*, Beijing, China, 2005: **5632**, 155-161.
- 17 Liang Fa-yun, Deng Shan-xi, Yang Yong-yue. Research on system structure of nakedness-eye stereoscopic display[J]. *Microelectronics & Computer*, 2005, **22**(10):43-46. [梁发云, 邓善熙, 杨永跃. 裸眼立体显示器系统结构研究[J]. *微电子学与计算机*, 2005, **22**(10): 43-46.]
- 18 Dodgson N A, Moore J R, Lang S R, *et al.* A time sequential multi-projector autostereoscopic display [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2000, **8**(2):1-12.
- 19 Schwerdtner A. Autostereoscopic 3D display[A]. In: *Proceedings of SPIE [C]*, San Jose, CA, USA, 2006, **6055**: 1-10.
- 20 Lipton L, Feldman M. A new autostereoscopic display technology: The SynthaGram™ [A]. In: *Proceedings of SPIE [C]*, San Jose, CA, USA, 2002: 229-235.
- 21 Matusik W, Pfister H. 3D TV: A scalable system for real-time acquisition, transmission and autostereoscopic display of dynamic scenes[J]. *ACM Transactions on Graphic*, 2004, **23**(3):814-824.
- 22 Eichenlaub Jesse, Hutchins Jamie. Autostereoscopic projection displays [A]. In: *Proceedings of SPIE [C]*, San Jose, CA, USA, 1995: 48-55.
- 23 Okoshi T. *Three-Dimension Imaging Techniques [M]*. New York: Academic Press, 1976.
- 24 Park Y G, Kim S C, Lee S T, *et al.* Implementation of projection-type autostereoscopic multiview 3D display system for real-time applications[A]. In: *Proceedings of SPIE [C]*, San Jose, CA, USA, 2004: 245-254.
- 25 Little G R, Gustafson S C, Nikolaou Vasiliki E. Multiperspective autostereoscopic display [A]. In: *Proceedings of SPIE [C]*, Orlando, FL, USA, 1994: 388-394.
- 26 Eichenlaub J B. A multi-perspective look around autostereoscopic projection display using an ICFLCD [A]. In: *Proceedings of SPIE [C]*, San Jose, CA, USA, 1999: 110-121.
- 27 Tanaka K, Hayashi J, Inami M, *et al.* TWISTER: An Immersive autostereoscopic display [A]. In: *Proceedings of VR'04 IEEE Computer Society [C]*, Chicago, IL, USA, 2004: 59-66.
- 28 Chen Jin, Ma Jin-ji, Ye Wei-quan. Manufacture of multi-view-point auto-stereoscopic LCD panel[J]. *Journal of Applied Optics*, 2007, **28**(1):47-50. [陈瑾, 麻金继, 叶为全. 多视点自动立体液晶屏的研制[J]. *应用光学*, 2007, **28**(1): 47-50.]
- 29 Lee B, Hong H. Multi view autostereoscopic display of 36view using an ultra-high resolution LCD[A]. In: *Proceedings of SPIE [C]*, San Jose, CA, USA, 2007: 64900S-1-64900S-8.
- 30 Liu Rong-zheng. *Three-Dimensional Image of Flat Screen Design [D]*. Taipei: National Central University, 2001. [刘荣政. 平面荧幕之立体影像设计[D]. 台北: 国立中央大学, 2001.]
- 31 Woodgate G J, Harrold J. Flat panel autostereoscopic displays characterisation and enhancement[A]. In: *Proceedings of SPIE [C]*, San Jose, CA, USA, 2000: 153-164.
- 32 Huang W J, Tsai C H, Wang N H, *et al.* The fabrication of a novel projection screen for autostereoscopic display systems [A]. In: *Proceedings of SPIE [C]*, San Jose, CA, USA, 2004: 285-292.
- 33 Isono H, Yasuda M, Takemori D, *et al.* 50-inch autostereoscopic full-color 3D TV display system[A]. In: *Proceedings of SPIE [C]*, San Jose, CA, USA, 1992: 176-185.
- 34 Shestak S A, Kim S S, Cha K H. Distortion-free technique for parallel autostereoscopic projection with a single projection lens[J]. *Optical Engineering*, 2005, **44**(1): 013002-1-013002-6.
- 35 Annen T, Matusik W. Distributed rendering for multiview parallax displays[A]. In: *Proceedings of SPIE [C]*, San Jose, CA, USA, 2006: 60550P-1-60550P-10.
- 36 Flack J, Harrold J, Woodgate G J, *et al.* A prototype 3D mobile phone equipped with a next generation autostereoscopic display [A]. In: *Proceedings of SPIE [C]*, San Jose, CA, USA, 2007: 64900M-1-64900M-12.
- 37 Eichenlaub J B. A Novel low cost 2D/3D switchable autostereoscopic system for notebook computers and other portable devices [A]. In: *Proceedings of SPIE [C]*, San Jose, CA, USA, 1995:113-117.
- 38 Perlin K, Paxia S, Kollin J S. An autostereoscopic display[A]. In: *Proceedings of the 27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques [C]*, New Orleans, LA USA, 2000: 319-326.
- 39 Perlin K, Poultney C. Recent advances in the NYU autostereoscopic display[A]. In: *Proceedings of SPIE [C]*, San Jose, CA, USA, 2001: 196-203.