

## 集成成像三维显示系统显示性能的研究进展

赵星\*, 王芳, 杨勇, 方志良, 袁小聪

(南开大学现代光学研究所 光学信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071)

**摘要:**集成成像三维显示技术是利用透镜阵列获取和显示立体图像的一种三维显示技术。本文首先综述了集成成像三维显示系统的特点,考虑其系统性能主要受分辨率、景深和观看视场角的限制,对近年来集成成像三维显示系统在增大分辨率、景深和观看视场角方面的研究进展做了综合论述,比较分析了各种改进方法的优劣。最后,对我国集成成像三维显示技术的研究现状进行了总结,并简述了本研究小组在该领域取得的若干研究成果。

**关键词:**三维显示系统;集成成像;分辨率;景深;观看视场角

**中图分类号:**TN27; O439 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/CO.20120503.0209

## Research progress of display performance of integral imaging three-dimensional display system

ZHAO Xing\*, WANG Fang, YANG Yong, FANG Zhi-liang, YUAN Xiao-cong

(Key Laboratory of Optical Information Science and Technology of the Ministry of Education,  
Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

\* Corresponding author, E-mail: zhaoxingtjnk@nankai.edu.cn

**Abstract:** Integral imaging technology is a three-dimensional display technology of picking up and displaying stereo images by using a lens array. For its wider applications, this paper overviews the characteristics of integral imaging three dimensional display systems. As the performance of integral imaging three-dimensional display system is limited by the resolution, depth and the viewing angle, the research progresses of enhancing the resolution, depth and the viewing angle in recent years are comprehensively discussed and the relative merits of various methods are compared and analyzed. At the same time, it gives the research present situation of the integral imaging three-dimensional display technology and describes the work by the author's research group in this field.

**Key words:** three-dimensional display system; integral imaging; resolution; depth; viewing angle

## 1 引言

与传统二维显示图像技术相比,三维立体显示技术能在一定程度上真实地再现客观世界的景象,给人以身临其境的感觉,因此,在娱乐、医疗科学、机器人学、制造业等领域有着重要应用,已成为当前世界上显示技术领域的研究热点之一<sup>[1-3]</sup>。根据基本原理的不同,三维立体显示技术可分为两大类<sup>[4]</sup>。其一为基于双目视差的三维显示技术,该技术原理较为简单,但是需要配戴相应的偏光眼镜,存在的单用户性、图像分辨率低、视觉疲劳等问题,使其发展受到了限制。其二为非双目视差的三维显示技术,包括全息立体显示、体显示和集成成像立体显示。由于全息立体显示需要相干光照明,其应用受到限制<sup>[5]</sup>。体显示需要高速旋转显示屏,装置较为复杂。因此,具有连续观察点、全视差彩色图像、裸眼观看、装置结构简单等优点的集成成像三维显示技术吸引了诸多研究者的关注<sup>[6]</sup>。

本文综述了集成成像三维显示技术的特点,从分辨率、景深、观看视场角三个特性参数出发,对集成成像三维显示系统的性能改善做了论述。通过不同方法的归类总结,对提高分辨率、景深、视场角的研究工作做了系统分析。

## 2 集成成像三维显示系统简介

传统集成成像系统由获取阶段和显示阶段两部分组成,如图1所示<sup>[7]</sup>。在获取阶段,通过透镜阵列将物体的三维信息以元素图像阵列的形式记录在CCD相机上。再现时,使用显示设备(如液晶显示器)显示元素图像阵列,人们便可通过再现透镜阵列观看到物体的三维立体图像。大量研究表明:三维显示的分辨率、景深和观看视场角这三个特性参数决定了集成成像三维显示系统的性能,而这些特性参数又与系统结构及器件特性有着密切的关系。透镜阵列的特性,如子透镜的孔径,阵列的间距和个数,以及获取和显示设备的分辨率特性都对集成成像再现图像的分辨率有直接影响。对于景深,由透镜的成像原理可知,只有在

满足物像关系的中心深度平面(Central Depth Plane, CDP)附近的再现图像具有较高的分辨率,图像较清晰,随着偏离CDP程度的增大,图像质量会明显下降,所以三维立体图像的再现深度受到了限制。集成成像技术的显著特点之一是观察点不固定,观看者在一定的连续区域内都可以看到三维图像,但是系统子透镜的孔径和焦距及元素图像之间的串扰限制了观看视场角的大小,进而限制了观看区域的范围。可见,要提高再现图像的分辨率,增大三维显示的景深,提高可观看视场角,以提升集成成像三维显示系统的性能,克服各个参数的限制因素是关键。

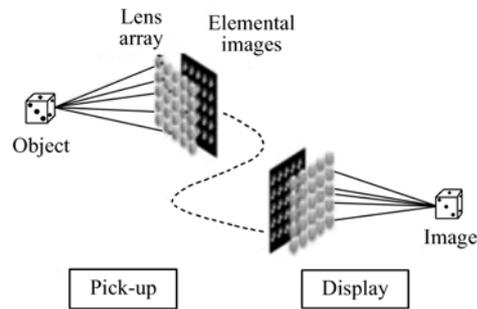


图1 传统集成成像技术原理

Fig. 1 Principle diagram of the conventional integral imaging technology

## 3 集成成像三维显示系统分辨率的提高

集成成像三维显示系统的分辨率主要受透镜阵列中子透镜个数、子透镜孔径及显示设备分辨率的影响。因此,通过时空复用或利用光学器件等效增加子透镜的个数,用附加器件增加作用于再现像的光线数量,即等效增大子透镜的孔径,以及采用基于几何光学数字仿真的计算集成成像再现(Computational Integral Imaging Reconstruction, CIIR)技术突破显示设备分辨率的限制,均可提高系统的分辨率。

Lars Erdmann等人较早地提出了使用时间复用的方法来提高系统的分辨率<sup>[8]</sup>。他们将透镜阵列固定在二维扫描导轨上,通过导轨移动得到一系列元素图像,经过针孔阵列记录下光强信息

后,再经过中继透镜记录在 CCD 上。再现时,计算机控制元素图像及透镜阵列同步变换,实现了分辨率的提高。但是使用针孔阵列降低了再现像的亮度,影响了显示观看的质量。

随后, Bahram Javidi 团队的研究人员为了克服尼奎斯特定理对分辨率的限制,提出了使用非静态的光学系统,即 (Moving Array Lenslet Technique, MALT) 技术在获取和显示阶段沿水平和垂直方向同步移动获取透镜阵列和显示透镜阵列,如图 2 所示<sup>[9-11]</sup>。利用人眼的视觉暂留效应,在其响应时间内快速移动透镜阵列,记录和显示尽可能多的元素图像,从而提高再现图像的分辨率。在早期的研究中,他们在移动过程中将获取透镜阵列和显示透镜阵列倾斜放置,以在水平方向和垂直方向同时提高分辨率。该方法对实验装置及条件有较高的要求,不仅需要透镜阵列移动的速度足够快,还需要获取和显示阶段两组透镜阵列完全同步移动,否则不能再现出正确的三维图像。为此,该研究组在后续的研究中对以上装置进行了改进,采用计算集成成像技术来显示三维立体图像<sup>[12]</sup>。与先前方法的不同之处在于,该方法只在获取阶段移动透镜阵列,获得较多的元素图像后通过计算机再现三维图像,从而避免了获取和显示阶段透镜阵列异步移动造成的三维图像质量的下降。

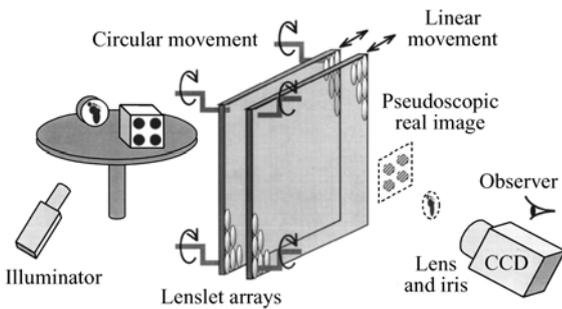


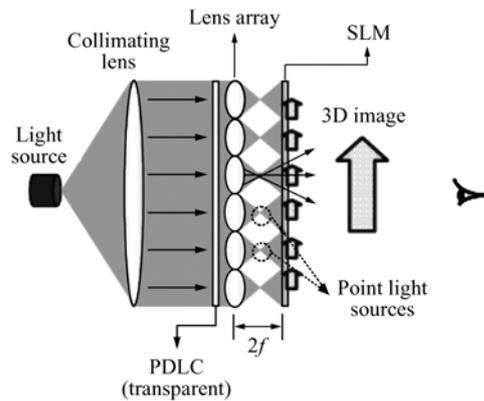
图 2 移动透镜阵列效应光学装置

Fig. 2 Optical setup for the effect of moving lenslet arrays

移动透镜阵列快速的机械运动将伴随着震动、阻力、噪音等不良现象的发生,从而降低了系统的稳定性。为此,可以使用两套传统的集成成像显示设备各自显示相应的元素图像并得到两个

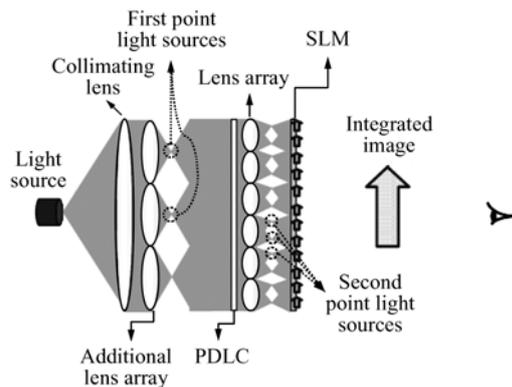
再现像,通过分束器将两个再现图像合成为一个高分辨率的三维再现图像<sup>[13]</sup>。而 Yunhee Kim 等人还提出用两个液晶显示器分别显示针孔阵列和相应的元素图像,通过计算机同时控制两个液晶显示器的像素点开关状态,实现透镜阵列等效平移的方法<sup>[14]</sup>。该方法不仅避免了机械运动带来的不利影响,而且可以方便地控制透镜阵列和元素图像之间的切换,使之完全同步。此外,时空复用提高分辨率的方法也可在三维显微成像和视差障栅三维显示等其他应用上发挥作用<sup>[15-16]</sup>。

Jae-Hyeung Park 等人通过研究集成成像显示原理发现,一个子透镜及其相应的一个点光源和显示设备上的对应区域共同作用于再现图像的一个像素点,如图 3(a) 所示。因此增加点光源的个



(a) 传统结构

(a) Conventional structure



(b) 附加透镜结构

(b) Additional lens array structure

图 3 附加透镜阵列增加点光源示意图

Fig. 3 Schematic diagram of generating an excess of point light sources by additional lens array

数,即等效增加子透镜的个数,也可增大再现图像的分辨率。为此,采用如图3(b)所示的光学系统<sup>[17]</sup>,在传统的透镜阵列和准直透镜之间附加一个透镜阵列,将光源发出的光线重新汇聚分配,从而增加了点光源的个数,提高了分辨率。该方法容易实现,且减少了透镜阵列的加工难度以及小孔径透镜引起的衍射效应。

从集成成像显示原理可知,增大子透镜孔径,可增加作用于再现像的光线,提高信噪比和显示分辨率。但子透镜孔径的增大对大面积透镜阵列的加工提出了更高的要求。为此,Hongen Liao 等人在传统的集成成像显示系统前端放置棱镜片,使从透镜阵列出射的光线经过棱镜作用后发生偏折。棱镜片以光轴为中心旋转时,从棱镜出射的偏折光线会以不加棱镜片时出射的中心光线为中心旋转。在棱镜片高速旋转过程中,从同一子透镜出射的光线增多,从而提高了系统的分辨率<sup>[18]</sup>。

光学集成成像再现技术(Optical Integral Imaging Reconstruction, OIIR)因显示设备物理特性的限制导致了再现图像质量的明显下降,因此基于几何光学数字仿真的 CIIR 技术得到了广泛应用。Eun-Soo Kim 研究组提出了一些基于 CIIR 技术提高集成成像系统分辨率的方法,例如采用中间视点再现技术(Intermediate-view Reconstruction Technique, IVRT),根据已有的相邻元素图像计算生成尽可能多的元素图像,在一定程度上降低了分辨率对透镜阵列个数的依赖性<sup>[19]</sup>;通过对元素图像进行相关运算,使构成元素图像的全部像素点都参与再现图像的合成,从而提高了分辨率<sup>[20]</sup>;采用曲面计算集成成像再现技术(Curved Computational Integral Imaging Reconstruction, C-CIIR),即在光学获取阶段,将一个大孔径透镜置于传统透镜阵列前面以提高采样率,再运用 CIIR 技术再现,得到高分辨率的再现图像<sup>[21]</sup>;通过模糊度量检测及处理 CIIR 技术得到高质量的再现图像<sup>[22]</sup>;使用精确像素映射(Smart Pixel Mapping, SPM)算法处理元素图像,提高 CIIR 技术对远距离物体的清晰再现能力<sup>[23-24]</sup>。

## 4 集成成像三维显示系统景深的增大

集成成像显示系统遵循透镜成像原理,物距和透镜焦距决定了像距的大小,即集成成像中心深度平面 CDP 的位置。由于 CDP 都有其相应的景深范围,因此,可以通过改变物距,即显示设备与再现透镜阵列之间的距离,改变 CDP 的位置,并产生多个 CDP,从而增大系统的立体显示深度。

Byoungho Lee 等人较早地提出了动态改变显示器和透镜阵列间距增大景深的方法<sup>[25]</sup>。通过计算机控制透镜阵列沿轴向动态移动,实现其与显示器间距的动态变化,伴随元素图像的同步变换,产生实像和虚像的交替再现。当透镜移动速度足够快时,利用人眼的视觉暂留效应可以看到实虚像同时再现,从而增大系统的景深。为了避免透镜阵列移动造成的干扰,Ju-Seog Jang 等人通过理论推导分析了显示器和透镜阵列间距与透镜焦距  $f$  间的相对关系对系统景深的影响<sup>[26]</sup>。二者相等时,从透镜出射的光线平行,发散角小,且可同时实现实虚像的再现,因此景深较大。

采用上述方法的集成成像系统,透镜阵列的高速移动不仅难度大,而且会造成系统稳定性下降,为此可从改变透镜阵列结构入手来缓解这一问题。比较典型的两种透镜阵列结构分别是阶梯透镜阵列(Stepped Lens Array, SLA)和合成透镜阵列(Composite Lens Array, CLA)。前者如图4

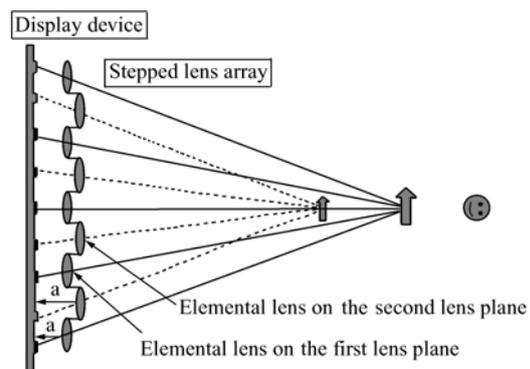


图4 SLA 结构图

Fig. 4 Structure of the SLA

所示,将子透镜交替排列在与显示设备间距不同的两个平面内,此时系统具有两个不同的 CDP,可以同时产生实像和虚像,增大了系统的景深<sup>[27]</sup>。但是由于仅有整个透镜阵列的一半参与每个 CDP 的成像过程,因此需要在两个子透镜平面内快速切换以产生完整的再现图像。CLA 是采用不同焦距和孔径的子透镜组成的阵列<sup>[28]</sup>。透镜阵列中有  $M$  个不同焦距和孔径的子透镜,就会产生  $M$  个不同景深范围的 CDP,将其连接起来就可以产生较大的系统景深,如图 5 所示。

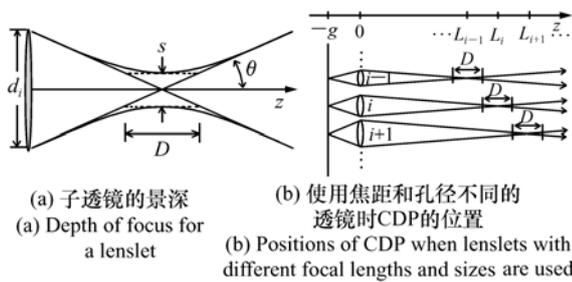


图5 CLA 增大景深原理

Fig. 5 Principle diagram of enlarging depth of focus in the CLA

尽管改变透镜阵列结构可以有效提高系统的景深,但是不同焦距、孔径及排列方式的透镜阵列加工难度大,且成本比较高,所以除了改变透镜结构以外,还可以通过改变系统结构来增大景深。Byoung-ho Lee 等人较早从光线光学和波动光学两方面证明了双设备集成成像系统可以获取和显示两个 CDP,从而增大了系统的景深<sup>[29]</sup>。他们提出

了如图 6<sup>[30-31]</sup>所示的偏振选择反射镜或者反射镜障栅阵列系统,使经过偏振片或不同角度倾斜的障栅阵列的光线光程差不同,从而产生不同的 CDP,增大景深。

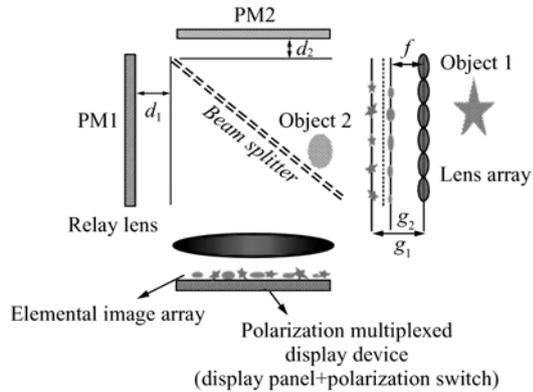


图6 偏振选择反射镜系统结构

Fig. 6 Structure of polarization-selective mirror pair system

之后,Byoung-ho Lee 团队对系统结构进行了改进。采用 3 个平行放置的液晶显示平板,分别显示 3 组不同的元素图像<sup>[32]</sup>,如图 7 所示。由于每个液晶显示平板与透镜阵列的距离不同,因此可以产生 3 个不同的 CDP。通过控制每个液晶显示平板的光透过率就可以选择相应的图像再现。为了克服液晶显示平板增多,显示偏振器件降低图像亮度的问题,他们还提出使用聚合物分散液晶薄膜 (Polymer Dispersed Liquid Crystal, PDLC) 来代替液晶显示平板<sup>[33-35]</sup>。

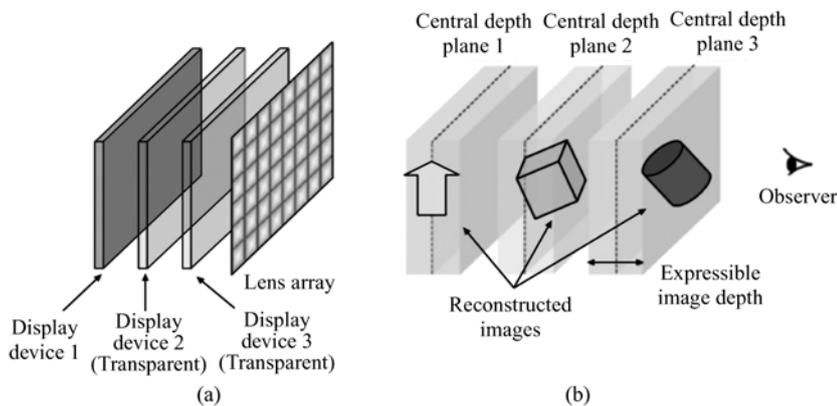


图7 多层显示集成成像系统

Fig. 7 Multilayered display integral imaging system

除了上述通过增加显示设备个数产生多个 CDP 增大景深的方法以外,还可应用偏振片和双折射晶体对光线的偏折和分光特性形成多个 CDP<sup>[36-37]</sup>;在透镜前面放置特殊模板进行振幅或相位调制来改变透镜成像特性<sup>[38-40]</sup>;在远心中继系统的光阑处添加折射率可变的液体透镜改变 CDP<sup>[41-42]</sup>;利用透镜阵列对传统集成再现像进行二次成像等方法增大景深<sup>[43]</sup>。

此外,从几何光线追迹的角度对集成成像显示原理进行研究后,Raúl Martínez-Cuenca 等人提出降低透镜阵列的填充因子,可在不降低分辨率的前提下增大系统的景深<sup>[44]</sup>。而 Jae-Hyeung Park 等人则对系统装置进行了改进,利用透镜阵列形成的多个点光源照射元素图像阵列,同时形成实像和虚像,从而增大了系统的景深<sup>[43]</sup>。

## 5 集成成像三维显示系统观看视场角的增大

集成成像系统的观看视场角主要受透镜阵列的视场角和元素图像尺寸的限制。通过遮挡元素图像实现奇偶列元素图像交替显示,或者改变透镜及系统结构,增大元素图像的有效面积,同时避免相邻元素图像间的串扰都可以增大系统的观看视场角。

Byoung-ho Lee 及其团队首先提出了使用挡板遮挡相邻子透镜减小串扰的方法,如图 8(a)所示<sup>[46-49]</sup>。在传统集成成像系统再现透镜阵列前面放置奇偶列交替遮挡的挡板,使奇数列和偶数列的透镜阵列轮流显示与之相对应的元素图像,可以分别再现得到不完整的立体像,利用人眼的视觉暂留效应,将挡板的快速移动和元素图像的切换完全同步,即可得到观看视场角增大一倍的完整再现图像。在此基础上,采用滑动挡板使任一时刻仅有一列透镜参与图像的再现,其余部分均被遮挡,还可以进一步增大视场角,如图 8(b)所示。为了避免移动挡板造成的阻力和噪声干扰,人们提出采用偏振快门屏和正交偏振片组成的正交偏振开关代替移动的挡板<sup>[50-52]</sup>。其中正交偏振片对光线偏振的选择透过效应可以使透镜奇偶列交替显示偏振快门屏上同步变换的元素图

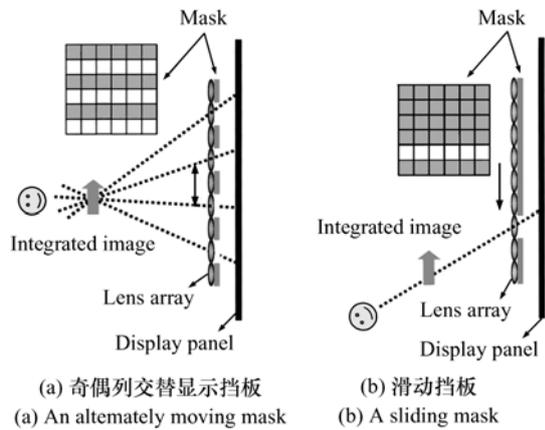


图 8 透镜遮挡增大视场角原理

Fig. 8 Schematic diagram of viewing-angle-enhanced integral imaging by lens mask

像。

除了上述通过挡板遮挡增大元素图像有效面积的方法外,沿垂轴方向同步移动获取透镜阵列和获取设备、显示设备和再现透镜阵列也可以有效增大元素图像的尺寸<sup>[53-54]</sup>。而 Ju-Seog Jang 等人提出的降低透镜阵列填充因子,同时使用 MALT 技术提高系统的分辨率<sup>[55]</sup>的方法,在分辨率损失较少的情况下,等效增大了元素图像的有效面积,实现了观看视场角的增大。

传统集成成像系统均采用平面显示设备和平面透镜阵列,使得离光轴中心较远的元素图像因尺寸较小无法记录大视角时物体的三维有效信息,导致看不到完整的再现像而限制了系统的观看视场角范围。但是若使用两个甚至更多显示设备分别显示不同视角的物体信息,再经过分束器合成,就可以看到不同视角的完整再现图像,实现系统观看视场角的增大<sup>[56]</sup>。此外, Yunhee Kim 等人改变传统的器件结构,利用曲面透镜阵列进行显示,同时随观看视角的增大,逐步增大与之对应的元素图像尺寸,令所有元素图像都含有完整的物体信息,如图 9 所示<sup>[57]</sup>,从而增大了可观看视场角。但由于该系统中元素图像仍然由平面显示设备显示,致使大视场角观看时曲面透镜与平面显示设备之间的距离易于偏离集成再现条件,限制了视场角的增大程度。因此研究组利用投影集成成像显示系统,采用曲面显示设备和曲面透镜阵列来大幅度增大系统的观看视场角,并实现

水平和垂直方向观看视场角的同时增大<sup>[58]</sup>。基于同样的原理,在投影集成成像显示系统中设置一个如图10所示的圆弧形散射屏阵列<sup>[59]</sup>,也可

使系统的观看视场角增大 $2\theta$ 。而 Joo-Bong Hyun 等人用一个孔径大的透镜置于透镜阵列前端,产

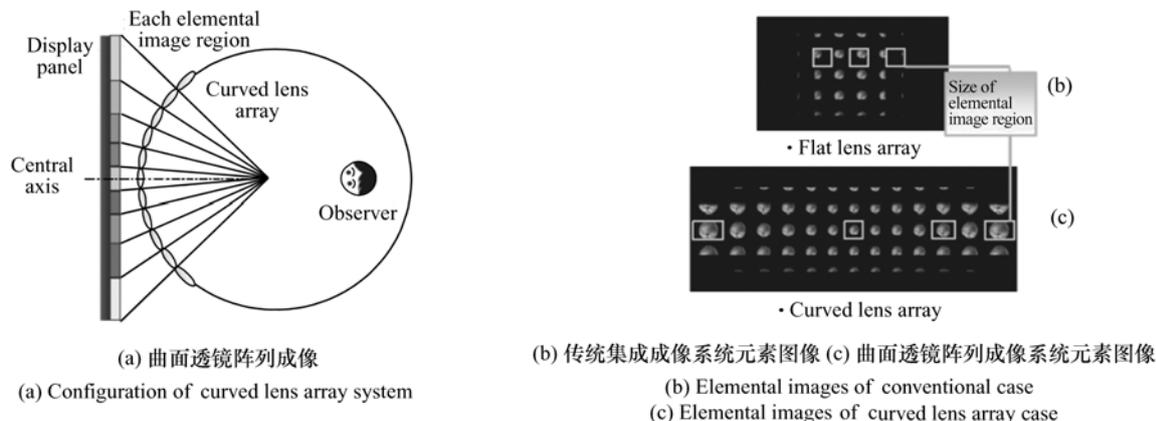


图9 曲面透镜阵列成像系统

Fig.9 System of curved lens array integral imaging

生相同的曲面效应,达到增大观看视场角的目的<sup>[60-61]</sup>,避免了曲面显示屏和曲面透镜阵列等特殊器件在制作技术和成本上所面临的困难。

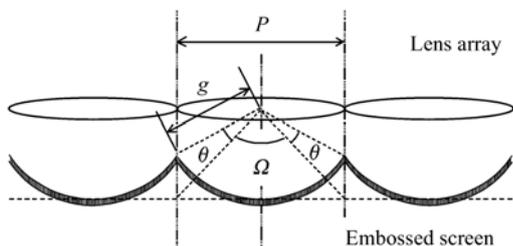


图10 散射屏结构

Fig.10 Structure of an embossed screen

增大观看视场角,需要避免相邻元素图像间在集成再现过程中的串扰。早期曾有人提出将全息技术与集成成像技术结合起来,利用体全息术记录和再现物体的三维信息。此时即使元素图像有重叠,但是由于相位共轭光沿不同方向传播,因此不会产生串扰图像<sup>[62]</sup>。另外,也可以在显示设备与透镜阵列之间添加两个空间光调制器,如图11所示<sup>[63-64]</sup>,利用空间光调制器对光线的调节作用,改变从元素图像出射的光线方向,使需要的光线通过相应的子透镜,并阻挡串扰的光线,同时又增加了形成再现图像的光线数,从而增大了系统

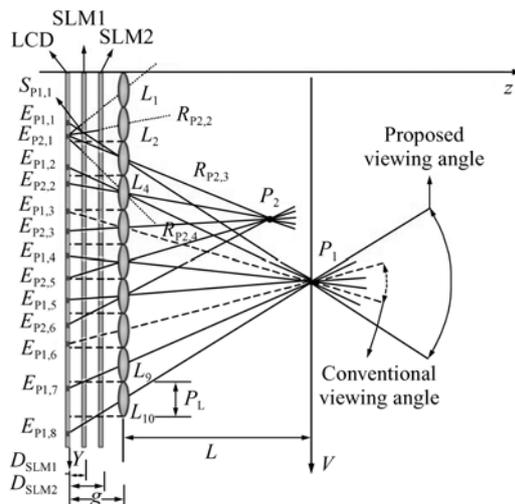


图11 空间光调制器增大集成成像视场角结构

Fig.11 Structure of viewing-angle-enhanced integral imaging by spatial light modulator

的视场角。

增大系统观看视场角的另一类有效方法是增大透镜阵列的视场角。显然,在孔径一定的情况下,焦距较小的透镜阵列能够产生较大的视场角,因此具有较短焦距的负折射率平面凹透镜成为提高系统观看视场角的选择之一<sup>[65]</sup>。一种相对简单的增大透镜阵列等效视场角的方法是在显示设备与透镜阵列之间填充大折射率的介质,如图12

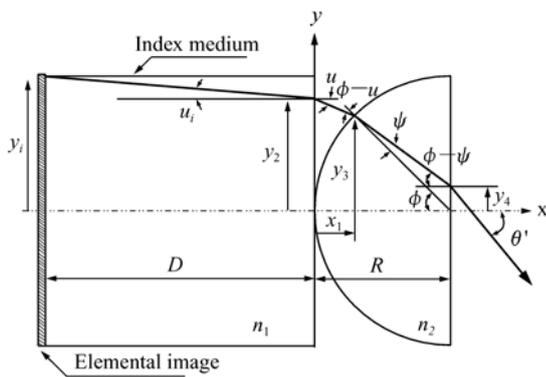


图 12 使用折射率介质增大视场角原理图

Fig. 12 Schematic diagram of using refractive index medium to enhance viewing angle

所示<sup>[66]</sup>。不同于传统系统的空气介质,大折射率的介质可以改变光线的偏折方向,使系统的观看视场角增大一倍。

以上都是从改进集成成像系统本身这个角度提出的增大观看视场角的方法,而从观察者的角度出发,不同的观察位置对应不同的元素图像信息,根据观察者的观察位置信息逆向计算出相应的元素图像,即可在不同的位置观看到不同的完整再现图像,实现具有大观看视场角的多人观看系统<sup>[67-68]</sup>。同理,利用不同方向偏折的障栅阵列也可实现在不同位置的多人观看效果<sup>[69]</sup>。

## 6 我国集成成像三维显示技术的研究现状

关于体三维、双目视差、全息三维技术方面的研究,国内诸如北京理工大学、浙江大学、四川大学等单位已取得较多成果,部分已经可以满足实用要求<sup>[70-75]</sup>。近两年来,集成成像三维显示技术也逐渐引起了国内相关研究单位的关注,并开始了较为系统的研究,如四川大学王琼华课题组已开展了计算集成成像技术和显示系统的研究<sup>[6-76]</sup>,本文作者所在的南开大学袁小聪课题组在集成成像的基础理论以及显示系统性能改善方面也开展了深入的研究。

本课题组在国家 973 计划项目的资助下,采用柱镜光栅正交相叠的方式构建了微透镜阵列<sup>[5]</sup>,利用此大面积透镜阵列实现了基于投影和

平板显示器件的三维显示。在关于系统光学性能的研究中,提出了基于人眼视觉的集成成像三维显示分辨率的比较方法,通过定义相对分辨率参数,对系统实际应用条件下的视觉效果进行了表征。在景深方面,利用元素图像中的同名点间距对系统再现景深的能力进行了表征<sup>[77]</sup>。另外,提出并采用波前编码技术以及小发散角的投影技术使系统的景深增大了 6 倍。在观看视场角方面,采用填充介质的方法使系统的观看视场角比传统方法增大了 50%。此外,课题组对于集成成像系统中三维信息获取和显示的一些问题也进行了研究和探索,例如,针对集成成像显示系统中出现的串扰和信息丢失现象,可以根据人眼及系统的相关特性,在单个元素图像周围设置舒适度预留区域<sup>[78]</sup>;针对获取和显示阶段不匹配的集成成像系统,通过获取阶段最佳纪录距离的确定<sup>[79]</sup>、元素图像的校正<sup>[80]</sup>以及再现像串扰的消除<sup>[81]</sup>,使系统的再现效果得到了改善。

近年来,随着三维显示技术的飞速发展,三维显示系统的性能评价已受到国内外包括显示技术、3D 媒体制作、眼科学、心理学等相关领域的普遍关注,“绿色 3D”已成为未来的发展趋势。对此,在国内 TCL、长虹、海信等企业已开展针对现有 3D 显示技术的相关研究和标准制定工作的同时,西安电子科技大学、东南大学、南开大学等科研院所也围绕集成成像技术这一具有潜力的三维显示技术,积极开展了三维显示系统性能评价方面的研究,并取得了初步成果<sup>[77-82]</sup>。

## 7 结束语

集成成像三维显示技术由于其独特的优点成为当今三维显示研究领域的一个热点话题,其在娱乐、医疗、制造等领域均有着潜在的应用前景。不过,受硬件设备及集成成像系统本身的限制,其性能也受到了制约。近年来,许多研究者通过对集成成像三维显示技术理论的探索和研究,提出了多种提高系统性能的方法,使得再现三维立体图像的质量有了明显的改善。同时,随着科学技术的不断进步,一些硬件限制问题也会逐步得到解决,集成成像三维显示技术将进一步走向实

用化。

### 参考文献:

- [1] CHO M, DANESH PANAH M, JAVIDI B. Three-dimensional optical sensing and visualization using integral imaging[J]. *Proc. IEEE*, 2011, 99(4): 556-575.
- [2] QI L, WANG Q H, LUO J Y, *et al.*. Autostereoscopic 3D projection display based on two lenticular sheets[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2012, 10(1): 011101.
- [3] 孔令胜, 南敬实, 荀显超. 平面三维显示技术的研究现状[J]. *中国光学与应用光学*, 2009, 2(2): 112-118.  
KONG L S, NAN J S, XUN X C. Research status quo of flat 3D display technology[J]. *Chinese J. Opt. Appl. Opt.*, 2009, 2(2): 112-118. (in Chinese)
- [4] 王琼华, 王爱红. 三维立体显示综述[J]. *计算机应用*, 2010, 30(3): 579-588.  
WANG Q H, WANG A H. Survey on stereoscopic three-dimensional display[J]. *J. Computer Application*, 2010, 30(3): 579-588. (in Chinese)
- [5] 谢宏斌, 杨勇, 赵星, 等. 狭缝光栅、柱面透镜光栅及其新构型在三维显示中的应用[J]. *中国光学*, 2011, 4(6): 562-570.  
XIE H B, YANG Y, ZHAO X, *et al.*. Applications of parallax barrier, lenticular lens array and their modified structures to three-dimensional display[J]. *Chinese Opt.*, 2011, 4(6): 562-570. (in Chinese)
- [6] WANG Q H, DENG H, JIAO T T. Imitating micro-lens array for integral imaging[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, 8(5): 512-514.
- [7] KIM S C, KIM C K, KIM E S. Depth-of-focus and resolution-enhanced three-dimensional integral imaging with non-uniform lenslets and intermediate-view reconstruction technique[J]. *3D Research*, 2011, 2(2): 1-9.
- [8] ERDMANN L, GABRIEL K J. High-resolution digital integral photography by use of a scanning microlens array[J]. *Appl. Opt.*, 2011, 40(31): 5592-5599.
- [9] JANG J S, JAVIDI B. Improved viewing resolution of three-dimensional integral imaging by use of nonstationary micro-optics[J]. *Opt. Lett.*, 2002, 27(5): 324-326.
- [10] KISHK S, JAVIDI B. Improved resolution 3D object sensing and recognition using time multiplexed computational integral imaging[J]. *Opt. Express*, 2003, 11(26): 3528-3541.
- [11] JANG J S, OH Y S, JAVIDI B. Spatiotemporally multiplexed integral imaging projector for large-scale high-resolution three-dimensional display[J]. *Opt. Express*, 2004, 12(4): 557-563.
- [12] HONG S H, JAVIDI B. Improved resolution 3D object reconstruction using computational integral imaging with time multiplexing[J]. *Opt. Express*, 2004, 12(19): 4579-4588.
- [13] KIM Y, JUNG J H, KANG J M, *et al.*. Resolution-enhanced three-dimensional integral imaging using double display devices[C]//Lasers and Electro-Optics Society, 2007. LEOS 2007. The 20th Annual Meeting of the IEEE, Oct. 21-25, 2007: 356-357.
- [14] KIM Y, KIM J, KANG J, *et al.*. Point light source integral imaging with improved resolution and viewing angle by the use of electrically movable pinhole array[J]. *Opt. Express*, 2007, 15(26): 18253-18267.
- [15] LIM Y T, PARK J H, KWON K C, *et al.*. Resolution-enhanced integral imaging microscopy that uses lens array shifting[J]. *Opt. Express*, 2009, 17(21): 19253-19263.
- [16] WANG Q H, TAO Y H, ZHAO W X, *et al.*. A full resolution autostereoscopic 3D display based on polarizer parallax barrier[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, 8(1): 22-23.
- [17] PARK J H, KIM J, KIM Y, *et al.*. Resolution-enhanced three-dimension/two-dimension convertible display based on integral imaging[J]. *Opt. Express*, 2005, 13(6): 1875-1884.
- [18] LIAO H, DOHI T, IWAHARA M. Improved viewing resolution of integral videography by use of rotated prism sheets[J]. *Opt. Express*, 2007, 15(8): 4814-4822.
- [19] PARK J S, HWANG D C, SHIN D H, *et al.*. Enhanced-resolution computational integral imaging reconstruction using an

- intermediate-view reconstruction technique[J]. *Opt. Eng.*, 2006, 45(11):117004.
- [20] PARK J S, HWANG D C, SHIN D H, *et al.*. Resolution-enhanced 3D image correlator using computationally reconstructed integral images[J]. *Opt. Commun.*, 2007, 276(1):72-79.
- [21] HYUN J B, HWANG D C, SHIN D H, *et al.*. Curved computational integral imaging reconstruction technique for resolution-enhanced display of three-dimensional object images[J]. *Appl. Opt.*, 2007, 46(31):7697-7708.
- [22] LEE K J, HWANG D C, KIM S C, *et al.*. Blur-metric-based resolution enhancement of computationally reconstructed integral images[J]. *Appl. Opt.*, 2008, 47(15):2859-2869.
- [23] SHIN D H, TAN C W, LEE B G, *et al.*. Resolution-enhanced three-dimensional image reconstruction by use of smart pixel mapping in computational integral imaging[J]. *Appl. Opt.*, 2008, 47(35):6656-6665.
- [24] PIAO Y, KIM E S. Resolution-enhanced reconstruction of far 3-D objects by using a direct pixel mapping method in computational curving-effective integral imaging[J]. *Appl. Opt.*, 2009, 48(34):H222-H230.
- [25] LEE B, JUNG S, MIN S W, *et al.*. Three-dimensional display by use of integral photography with dynamically variable image planes[J]. *Opt. Lett.*, 2001, 26(19):1481-1482.
- [26] JANG J S, JIN F, JAVIDI B. Three-dimensional integral imaging with large depth of focus by use of real and virtual image fields[J]. *Opt. Lett.*, 2003, 28(16):1421-1423.
- [27] CHOI H, PARK J H, HONG J, *et al.*. Depth-enhanced integral imaging with a stepped lens array or a composite lens array for three-dimensional display[C]//Lasers & Electro-Optics Society, 2003. LEOS 2003. The 16th Annual Meeting of the IEEE, Oct. 27-28, 2003, 2:730-731.
- [28] JANG J S, JAVIDI B. Large depth-of-focus time-multiplexed three-dimensional integral imaging by use of lenslets with nonuniform focal lengths and aperturesizes[J]. *Opt. Lett.*, 2003, 28(20):1924-1926.
- [29] LEE B, MIN S W, JAVIDI B. Theoretical analysis for three-dimensional integral imaging systems with double devices[J]. *Appl. Opt.*, 2002, 41(23):4856-4865.
- [30] JUNG S, HONG J, PARK J H, *et al.*. Depth-enhanced integral-imaging 3D display using different optical path lengths by polarization devices or mirror barrier array[J]. *J. SID*, 2004, 12(4):461-467.
- [31] HONG J, PARK J H, JUNG S, *et al.*. Depth-enhanced integral imaging by use of optical path control[J]. *Opt. Lett.*, 2004, 29(15):1790-1792.
- [32] KIM Y, PARK J H, CHOI H, *et al.*. Depth-enhanced three-dimensional integral imaging by use of multilayered display devices[J]. *Appl. Opt.*, 2006, 45(18):4334-4343.
- [33] KIM Y, CHOI H, KIM J, *et al.*. Depth-enhanced integral imaging display system with electrically variable image planes using polymer-dispersed liquid-crystal layers[J]. *Appl. Opt.*, 2007, 46(18):3766-3773.
- [34] 王晓蕊, 卜庆凤, 张冬阳, 等. 三维集成成像景深提高方法的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2009, 46(8):26-30.  
WANG X R, BU Q F, ZHANG D Y, *et al.*. Research on enhancement methods for depth of field of three-dimensional integral imaging[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, 46(8):26-30. (in Chinese)
- [35] PHAM D Q, KIM N, KWON K C, *et al.*. Depth enhancement of integral imaging by using polymer-dispersed liquid-crystal films and a dual-depth configuration[J]. *Opt. Lett.*, 2010, 35(18):3135-3137.
- [36] PARK J H, JUNG S, CHOI H, *et al.*. Integral imaging with multiple image planes using a uniaxial crystal plate[J]. *Opt. Express*, 2003, 11(16):1862-1875.
- [37] PARK C K, LEE S S, HWANG Y S. Depth-extended integral imaging system based on a birefringence lens array providing polarization switchable focal lengths[J]. *Opt. Express*, 2009, 17(21):19047-19054.
- [38] MANUEL M C, JAVIDI B, RAÛL M C, *et al.*. Integral imaging with improved depth of field by use of amplitude-modulated microlens arrays[J]. *Appl. Opt.*, 2004, 43(31):5806-5813.
- [39] CASTRO A, FRAUEL Y, JAVIDI B. Integral imaging with large depth of field using an asymmetric phase mask[J]. *Opt. Express*, 2007, 15(16):10266-10273.
- [40] BAGHERI S, JAVIDI B. Extension of depth of field using amplitude and phase modulation of the pupil function[J]. *Opt. Lett.*, 2008, 33(7):757-759.

- [41] RAUL M C, AMPARO P, GENARO S, *et al.*. Optically-corrected elemental images for undistorted Integral image display [J]. *Opt. Express*, 2006, 14(21):9657-9663.
- [42] TOLOSA A, MARTÍNEZ-CUENCA R, PONS A, *et al.*. Optical implementation of micro-zoom arrays for parallel focusing in integral imaging[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2010, 27(3):495-500.
- [43] ARAI J, KAWAI H, KAWAKITA M, *et al.*. Depth-control method for integral imaging[J]. *Opt. Lett.*, 2008, 33(3):279-281.
- [44] RAUL M C, GENARO S, MANUEL M C, *et al.*. Enhanced depth of field integral imaging with sensor resolution constraints[J]. *Opt. Express*, 2004, 12(21):5237-5242.
- [45] PARK J H, KIM H R, KIM Y, *et al.*. Depth-enhanced three-dimensional-two-dimensional convertible display based on modified integral imaging[J]. *Opt. Lett.*, 2004, 29(23):2734-2736.
- [46] LEE B, JUNG S, PARK J H. Viewing-angle-enhanced integral imaging by lens switching[J]. *Opt. Lett.*, 2002, 27(10):818-820.
- [47] PARK J H, JUNG S, CHOI H, *et al.*. Viewing-angle-enhanced Integral Imaging by elemental image resizing and elemental lens switching[J]. *Appl. Opt.*, 2002, 41(32):6875-6883.
- [48] CHOI H, PARK J H, KIM J, *et al.*. Wide-viewing-angle 3D/2D convertible display system using two display devices and a lens array[J]. *Opt. Express*, 2005, 13(21):8424-8432.
- [49] KIM Y, KIM J, KANG J M, *et al.*. Point light source integral imaging with improved resolution and viewing angle by the use of electrically movable pinhole array[J]. *Opt. Express*, 2007, 15(26):18253-18267.
- [50] JUNG S, PARK J H, CHOI H, *et al.*. Wide-viewing integral three-dimensional imaging by use of orthogonal polarization switching[J]. *Appl. Opt.*, 2003, 42(14):2513-2520.
- [51] JUNG S, PARK J H, CHOI H, *et al.*. Viewing-angle-enhanced integral three-dimensional imaging along all directions without mechanical movement[J]. *Opt. Express*, 2003, 11(12):1346-1356.
- [52] LEE B, JUNG S, PARK J H. 基于液晶偏振开关与液晶屏的三维集成成像[J]. *现代显示*, 2004(3):25-28, 47.  
LEE B, JUNG S, PARK J H. Three-dimensional integral imaging using LCD and LC polarization switcher[J]. *Advanced Display*, 2004(3):25-28, 47. (in Chinese)
- [53] JANG J S, JAVIDI B. Three-dimensional synthetic aperture integral imaging[J]. *Opt. Lett.*, 2002, 27(13):1144-1146.
- [54] 王红霞, 伍春洪, 杨扬, 等. 计算机生成三维全景图像研究现状与发展[J]. *计算机科学*, 2008, 35(6):11-14.  
WANG H X, WU CH H, YANG Y, *et al.*. Research and development of computer generated integral image[J]. *Computer Science*, 2008, 35(6):11-14.
- [55] JANG J S, JAVIDI B. Improvement of viewing angle in integral imaging by use of moving lenslet arrays with low fill factor [J]. *Appl. Opt.*, 2003, 42(11):1996-2002.
- [56] MIN S W, JAVIDI B, LEE B. Enhanced three-dimensional integral imaging system by use of double display devices[J]. *Appl. Opt.*, 2003, 42(20):4186-4195.
- [57] KIM Y, PARK J H, CHOI H, *et al.*. Viewing-angle-enhanced integral imaging system using a curved lens array[J]. *Opt. Express*, 2004, 12(3):421-429.
- [58] KIM Y, PARK J H, MIN S W, *et al.*. Wide-viewing-angle integral three-dimensional imaging system by curving a screen and a lens array[J]. *Appl. Opt.*, 2005, 44(4):546-552.
- [59] MIN S W, KIM J, LEE B. Wide-viewing projection-type integral imaging system with an embossed screen[J]. *Opt. Lett.*, 2004, 29(20):2420-2422.
- [60] HYUN J B, SHIN D H, KIM E S. Viewing-angle-enhanced display of large-depth 3D images in curved projection integral imaging[C]//Proceedings of Asia Display 2007, Shanghai, China, Mar. 12-15, 2007.
- [61] HYUN J, HWANG D C, SHIN D H, *et al.*. Curved projection integral imaging using an additional large-aperture convex lens for viewing angle improvement[J]. *ETRI J.*, 2009, 31(2):105-110.
- [62] SHIN S H, JAVIDI B. Viewing-angle enhancement of speckle-reduced volume holographic three-dimensional display by use of integral imaging[J]. *Appl. Opt.*, 2002, 41(26):5562-5567.

- [63] BAASANTSEREN G, PARK J H, KWON K C, *et al.*. Viewing angle enhanced integral imaging display using two elemental image masks[J]. *Opt. Express*, 2009, 17(16):14405-14417.
- [64] BAASANTSEREN G, PARK J-H, KIM N, *et al.*. Wide-viewing angle multi-layer integral imaging display[J]. *Digital Holography and Three-Dimensional Imaging*, Vancouver, Canada, Apr 30, 2009.
- [65] KIM H, HAHN J, LEE B. The use of a negative index planoconcave lens array for wide-viewing angle integral imaging[J]. *Opt. Express*, 2008, 16(26):21865-21880.
- [66] JANG J Y, LEE H S, CHA S, *et al.*. Viewing angle enhanced integral imaging display by using a high refractive index medium[J]. *Appl. Opt.*, 2011, 50(7):B71-B76.
- [67] PARK G, HONG J, KIM Y, *et al.*. Enhancement of viewing angle and viewing distance in integral imaging by head tracking[J]. *Digital Holography and Three-Dimensional Imaging*, Vancouver, Canada, Apr. 30, 2009.
- [68] PARK G, JUNG J H, HONG K, *et al.*. Multi-viewer tracking integral imaging system and its viewing zone analysis[J]. *Opt. Express*, 2009, 17(20):17895-17908.
- [69] CHOI H, MIN S W, JUNG S, *et al.*. Multiple-viewing-zone integral imaging using a dynamic barrier array for three-dimensional displays[J]. *Opt. Express*, 2003, 11(8):927-932.
- [70] 贾甲, 王涌天, 刘娟, 等. 计算全息三维实时显示的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(5):050002.  
JIA J, WANG Y T, LIU J, *et al.*. Progress of dynamic 3D display of the computer-generated hologram[J]. *Laser Optoelectronics Progress*, 2012, 49(5):050002. (in Chinese)
- [71] ZHANG H, XIE J H, LIU J, *et al.*. Optical reconstruction of 3D images by use of pure-phase computer-generated holograms[J]. *Chinese Opt. Lett.*, 2009, 7(12):1101-1103.
- [72] 谢小燕, 刘旭, 林远芳. 体三维显示系统中基于几何近似法的灰度偏差研究[J]. *光学学报*, 2009, 29(6):1508-1513.  
XIE X Y, LIU X, LIN Y F. Study on gray scale deviations in three-dimensional volumetric display system based on geometric approximation[J]. *Acta Opt. Sinica*, 2009, 29(6):1508-1513. (in Chinese)
- [73] 彭祎帆, 李海峰, 刘旭, 等. 基于视场拼接的全视差三维显示系统[J]. *光子学报*, 2011, 40(9):1405-1408.  
PENG Y F, LI H F, LIU X, *et al.*. A full-parallax compact three dimensional display system based on spliced view-field[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(9):1405-1408. (in Chinese)
- [74] 周磊, 陶宇虹, 王琼华, 等. 立体显示用柱面透镜光栅的设计[J]. *光子学报*, 2009, 38(1):30-33.  
ZHOU L, TAO Y H, WANG Q H, *et al.*. Design of lenticular lens in autostereoscopic display[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(1):30-33. (in Chinese)
- [75] 王爱红, 王琼华, 李大海, 等. 立体显示中立体深度与视差图获取的关系[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(2):433-438.  
WANG A H, WANG Q H, LI D H, *et al.*. Relationship between stereo depth and parallax image captured in stereoscopic display[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(2):433-438. (in Chinese)
- [76] DENG H, WANG Q H, LI D H. The realization of computer generated integral imaging based on two step pickup method[J]. *Photonics and Optoelectronic*, 2010, 1:1-1.
- [77] 王芳, 黎达, 赵星, 等. 集成成像三维显示系统立体深度的研究[J]. *中国激光*, 2011, 38(s1):s109002.  
WANG F, LI D, ZHAO X, *et al.*. Study on the stereo depth of integral imaging three-dimensional display system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, 38(s1):s109002. (in Chinese)
- [78] LI D, ZHAO X, YANG Y, *et al.*. Tunable viewing scope of three-dimensional integral imaging[J]. *Appl. Opt.*, 2011, 50(34):H230-H236.
- [79] 焦小雪, 赵星, 杨勇, 等. 基于最佳纪录距离的三维集成成像光学获取技术[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(11):2805-2811.  
JIAO X X, ZHAO X, YANG Y, *et al.*. Optical acquiring technique of three-dimensional integral imaging based on optimal pick-up distance[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(11):2805-2811. (in Chinese)
- [80] 焦小雪, 赵星, 杨勇, 等. 基于三维集成成像相机阵列获取的元素图像校正[J]. *中国激光*, 2012, 39(3):0309001.

JIAO X X, ZHAO X, YANG Y, *et al.*. Elemental images correction of camera array pick-up for three-dimensional integral imaging[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, 39(3):0309001. (in Chinese)

- [81] 袁小聪,徐于萍,杨勇,等. 基于相机阵列获取元素图像的集成成像抗串扰参数设计[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(9):2050-2056.

YUAN X C, XU Y P, YANG Y, *et al.*. Design parameters of elemental images formed by camera array for crosstalk reduction in integral imaging[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(9):2050-2056. (in Chinese)

- [82] WANG X R, HE L Y, BU Q F. Performance characterization of integral imaging systems based on human vision[J]. *Appl. Opt.*, 2009, 48(2):183-188.

**作者简介:**赵 星(1980—),男,北京人,博士,副教授,主要从事新型三维成像与显示技术等方面的研究。

E-mail:zhaoxingtjnk@nankai.edu.cn

王 芳(1986—),女,山西阳泉人,硕士研究生,主要从事集成成像三维显示系统方面的研究。

E-mail:kokoguodong@163.com