

# 基于人眼视觉的集成成像三维显示分辨率的比较\*

王芳 赵星<sup>†</sup> 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)

(2011年7月11日收到; 2011年11月1日收到修改稿)

为了对不同集成成像系统三维显示应用中的视觉分辨效果进行表征, 提出了一种基于人眼视觉的集成成像三维显示分辨率的分析比较方法. 通过分析集成成像三维显示系统的分辨率与人眼在最佳显示观看距离下分辨本领的关系, 定义了相对分辨率参数, 分析了其与集成成像三维显示实际观看时视觉分辨效果的关系. 研究表明, 透镜阵列的大小对集成成像三维显示的视觉分辨效果有重要的影响. 针对两个系统实例的理论计算结果表明, 系统间的相对分辨率参数差异是传统分辨率差异的 1.75 倍, 实验结果与理论分析一致. 该研究方法对三维显示分辨率的评价有一定的指导意义.

**关键词:** 三维显示, 集成成像, 分辨率, 人眼视觉

**PACS:** 42.79.Kr

## 1 引言

随着光学、数字信息处理能力的飞速发展以及人们对视觉要求的不断提高, 三维立体显示<sup>[1]</sup>作为一种全新模式的视觉革命成为许多人的期待<sup>[2]</sup>. 目前, 实现立体显示的方法有多种, 例如体视法、全息术法和集成成像法 (integral imaging). 体视法可以应用在三维游戏、军事训练和仿真模拟等领域, 但是由于双眼聚焦点和视线汇聚点不在同一个平面上, 而且有些技术需要佩戴特殊设备才能观看, 容易产生视觉混乱和疲劳<sup>[3]</sup>. 全息术的方法虽然不需要佩戴任何辅助设备就可以看到高质量的图像, 但是相干光的苛刻条件及大量的数据处理<sup>[4]</sup>使其应用受到限制. 集成成像法因不需要相干光、具有全视差及连续观察点、观看时不需要佩戴任何辅助设备<sup>[5]</sup>而受到重视.

提高集成成像三维显示分辨率的方法一直是研究者们关注的热点之一. 近年来, 人们提出各种方法来提高集成成像三维显示系统的分辨率. 例如: Piao 等<sup>[6]</sup>使用直接像素映射的方法, 把由较远距离的三维物体获取得到的元素图像阵列转换为像

近距离物体得到的元素图像, 从而得到分辨率提高的再现图像; 文献 [7] 采用透镜阵列移动的方式, 通过在水平和垂直方向移动透镜阵列获得多组元素图像, 将其组合再现得到了分辨率提高的图像; 朴燕<sup>[8]</sup>提出了一种基于三维场景立体像素光线映射的全景图像计算机重构技术, 经全景成像系统的编码从立体像素映射到的体元素图像区域中提取对应立体像素的多个二维像素点来重构全景图像, 使其分辨率增大. 但是现有研究都集中在通过改进显示器件或者光学系统本身来优化系统, 都是对独立的集成成像技术进行探索和研究, 对于不同系统间各自优势的比较以及系统的评价方法没有深入研究, 使得改善了的集成成像效果没有统一的标准衡量, 且现有研究并没有从实际显示观看应用的角度对集成成像的视觉分辨效果进行比较分析. 事实上, 作为显示系统, 人眼是最终的观察系统, 经过人眼视网膜再次成像后的效果才是系统最终的显示观看结果. 所以, 单纯从器件参数得到的系统分辨率并不能完全表征集成成像三维显示系统实际应用条件下的视觉效果, 由此引发了以下一类典型问题: 根据传统方法判断分辨率相同或相近的系统, 由于

\* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2010CB327702)、高等学校博士学科点专项科研基金 (批准号: 20100031120033) 和中央高等学校基本科研基金 (批准号: 65010301) 资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: zhaoxingtjnk@nankai.edu.cn

系统参数不同造成显示应用的观看条件不同,从而产生完全不同的立体图像显示观看效果.现有对集成成像技术的研究不能解决上述问题,没有统一标准或者方法对存在上述问题的系统进行评价和比较.该问题涉及到未来技术发展和应用阶段的评价标准,已经引起了研究人员及相关国际标准化组织的注意,但是目前均处于探索研究阶段,国内外尚未有较为深入的研究报道.因此,基于人眼视觉研究集成成像三维显示的分辨率、比较具有相同或相似集成成像系统分辨率的系统在实际应用条件下的视觉效果,将对集成成像三维显示分辨率的客观评价以及集成成像三维显示技术的发展具有重要意义.

本文提出了一种基于人眼视觉的集成成像三维显示分辨率的比较方法.在分析计算集成成像显

示系统分辨率和最佳显示观看距离下人眼分辨特性参数的基础上,通过定义相对分辨率参数来表征系统显示观看的视觉分辨效果,从而实现对有相似分辨率的集成成像系统进行对比和区分,并利用实验结果证明了该方法的正确性.

## 2 集成成像三维显示系统的分辨率

集成成像系统实现三维立体显示可分为信息记录和立体显示两部分.记录时利用透镜阵列或相机阵列从不同视角记录物空间的信息,得到一个包含物体三维信息的元素图像阵列;再现时通过显示器器件显示元素图像阵列并前置透镜阵列,根据光的可逆性原理,光线顺着原路返回,在原来空间位置处再现出原物形貌<sup>[9]</sup>,如图1所示.

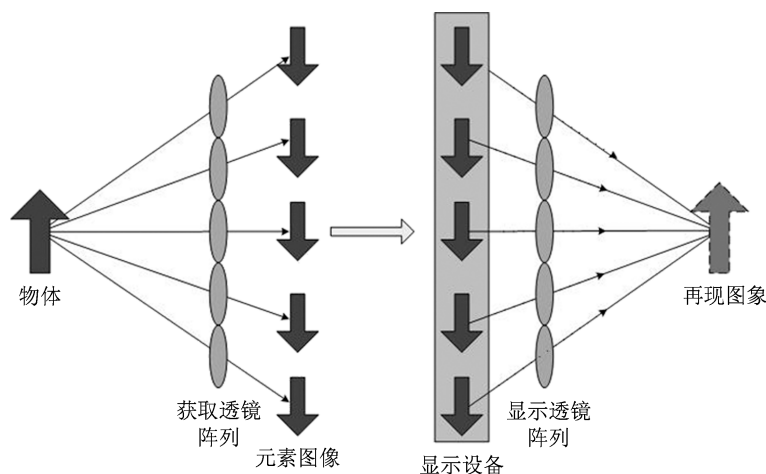


图1 集成成像原理示意图

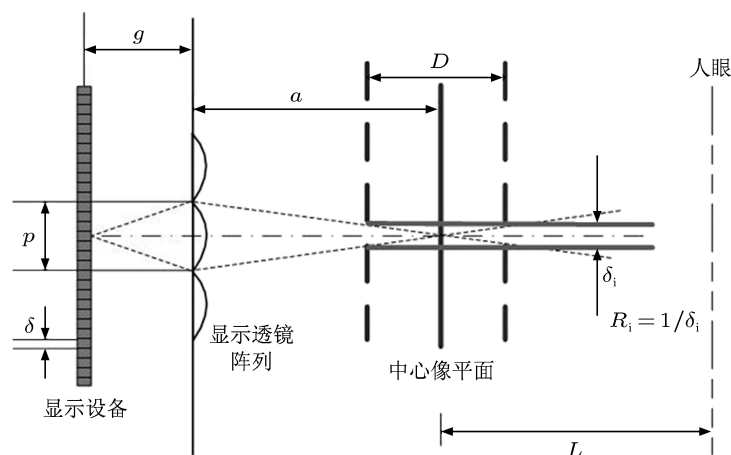


图2 集成成像三维显示系统分辨率原理图

集成成像三维显示系统的分辨率由显示端参数决定,其原理如图 2 所示,其中  $p$  是子透镜孔径,  $\delta$  是显示设备的像元直径,  $g$  和  $a$  分别是显示设备到透镜阵列和透镜阵列到再现立体图像之间的距离,  $D$  是再现立体图像的深度,  $L$  是观看距离. 在集成成像中,系统的分辨率主要由显示端的装置特性决定,显示器件的性能、透镜阵列的质量以及两者的相对位置变化都影响着系统的分辨率.

根据传统的分辨率计算方法<sup>[10]</sup>,理想情况下,由几何关系可以得到系统的理想线分辨率

$$R_{i1} = \frac{g}{a\delta} = \frac{g}{a}R_D, \quad (1)$$

其中  $R_D$  为显示设备的线分辨率. 此时系统的理想线分辨率主要由显示设备的性能决定. 然而由于透镜阵列中子透镜孔径的衍射效应及透镜阵列和显示设备的工艺限制<sup>[11]</sup>,系统的衍射线分辨率  $R_{i2}$  由爱里斑和瑞利判据决定<sup>[12]</sup>,

$$R_{i2} = \frac{p}{2\lambda a}, \quad (2)$$

其中  $\lambda$  是照明光波长. 在实际情况下,再现的理想图像因为衍射的存在使其每个像点都变成一个弥散斑,所以系统实际的线分辨率  $R_i$  由  $R_{i1}$  和  $R_{i2}$  共同决定,即

$$R_i = \frac{1}{\frac{1}{R_{i1}} + \frac{1}{R_{i2}}}. \quad (3)$$

当显示设备物理分辨率比较高时,  $R_{i1}$  与  $R_{i2}$  可比拟,此时  $R_i$  如 (3) 式所表示;当显示设备物理分辨率较低时,  $R_{i1} \ll R_{i2}$ ,此时  $R_i \approx R_{i1}$ .

以上描述的系统分辨率在一定程度上可以反映系统的性能,但是在实际显示应用过程中,观看三维图像的视觉分辨效果不仅与系统的分辨率有关,与观看条件和人眼视觉特性也有密切的关系. 因此,只有将系统本身的分辨率因素与相应的观察条件和该条件下人眼的视觉分辨特性相结合才能完全真实地反映图像的视觉分辨效果.

### 3 集成成像三维显示系统的视觉分辨效果

集成成像三维显示系统的视觉分辨效果是指由集成成像系统再现的立体图像经视网膜再次成像识别后观察者的实际视觉分辨感受,与集成成像系统本身的分辨率及实际应用条件下人眼视觉特性有关. 由于实际应用中集成成像系统因参数不同

对显示观看距离有不同的要求,而观看距离对人眼所能分辨的最小尺寸有很大的决定作用,因此不同的集成成像三维显示系统的视觉分辨效果将有所不同. 用系统的分辨率与实际应用所需的特定观看距离下人眼分辨本领的相对关系可以表示出观察者看到的图像视觉效果,即

$$R_R = \frac{R_i}{R_e} \times 100\%, \quad (4)$$

其中,  $R_R$  定义为相对分辨率,表示集成成像系统分辨率能够满足人眼可分辨需求的程度,即系统分辨率与满足人眼在特定距离观看时图像所需分辨率之间的匹配程度;  $R_i$  为根据传统方法计算所得的集成成像系统线分辨率;  $R_e$  为观察者在特定观察距离观看再现图像时的人眼线分辨率. 由 (4) 式可以看出,对于相同大小的区域,分子代表在该区域内系统再现立体图像的点数,分母代表该区域内人眼可识别的点数. 当  $R_i$  与  $R_e$  的比值小于 100% 且越接近于 100%,表示一定区域内人眼可识别的再现立体图像的点数越多,宏观上表现为观察者观看到的图像轮廓越细锐,细节越丰富,视觉效果越好;当  $R_i$  与  $R_e$  的比值大于 100%,表示系统再现的立体图像中存在一些人眼无法识别的点,可能会造成系统分辨率浪费,增加不必要的成本.

根据衍射理论,人眼的角分辨率  $\omega$  可表示为

$$\omega = \frac{1.22\lambda}{d}, \quad (5)$$

其中  $d$  表示瞳孔直径. 在良好的照明条件下,人眼的角分辨率为  $1'$ <sup>[13]</sup>. 人眼具有很大的视场,但是受着中心窝和黄斑范围的限制,为了清晰地识别,可以利用的仅仅是其中的一部分,大概为  $6^\circ$ — $8^\circ$  左右 (本文取  $7^\circ$ )<sup>[14]</sup>,若显示图像充满此区域时进行观看,将能在分辨力和舒适度等方面得到最佳的观看效果. 据此,当画面一定时,可确定相应的最佳观看距离,而人眼此时的线分辨率  $R_e$  可表示为

$$R_e = \frac{1}{L\omega}, \quad (6)$$

这里  $L$  为最佳观看距离,即

$$L = \frac{H}{2 \tan(3.5^\circ)}, \quad (7)$$

其中  $H$  为图像的对角线长度. 考虑到常规集成成像三维显示系统的特点,图像尺寸与透镜阵列尺寸相等,所以 (7) 式中的  $H$  可以表示为  $H = p\sqrt{m^2 + n^2} = pN$ , 其中  $N = \sqrt{m^2 + n^2}$ ,  $m$  和  $n$  分别为水平方向和竖直方向的子透镜维数.

由 (3) 和 (6) 式可得

$$R_R = \frac{L\omega gp R_D}{ap + 2\lambda ag R_D} = \frac{c_1 N p^2}{c_2 g + p} \left( \frac{g}{f} - 1 \right), \quad (8)$$

$$c_1 = \frac{\omega R_D}{2 \tan(3.5^\circ)}, \quad (9)$$

$$c_2 = 2\lambda R_D, \quad (10)$$

其中,  $f$  为子透镜焦距,  $a$  和  $g$  满足透镜的成像关系. 在显示设备固定的情况下,  $c_1$  和  $c_2$  是常数.

至此, 由 (8) 式所确定的相对分辨率即可用于表征集成成像三维显示系统的视觉分辨效果, 有效区分和比较具有相同系统分辨率的集成成像系统.

## 4 实验结果与分析

### 4.1 实验验证

对于具有相似系统分辨率的集成成像可以通过相对分辨率进行比较. 为了验证上述方法, 我们进行了理论计算和光学实验对比. 所选取的两个集成成像三维显示系统参数如表 1 所列.

表 1 集成成像三维显示系统的参数

	系统 A	系统 B
$p/\text{mm}$	5	5
$m \times n$	$7 \times 7$	$4 \times 4$
$F/\text{mm}$	14	9.6
$g/\text{mm}$	11	7.5
$L/\text{mm}$	405	231
$R_i/\text{mm}^{-1}$	2.524	2.5774
$R_R/\%$	29.735	17.319

利用上述方法对系统 A 和系统 B 进行相应的分辨率计算, 显示设备的像元直径均为 0.09 mm. 从表 1 中的分辨率计算结果可以看到, 虽然两个系统的线分辨率非常接近, 但考虑显示观看条件下人眼的视觉特性后, 两者相对分辨率的差异 ( $R_{RA}$  与  $R_{RB}$  之比) 比系统分辨率的差异 ( $R_{iA}$  与  $R_{iB}$  之比) 增大了 75%. 说明两系统再现立体图像的视觉分辨效果具有明显的不同, 两个系统相对分辨率与理想值 100% 相差比较远, 这是显示设备和透镜阵列性能限制的缘故, 但从计算结果上预测, 系统 A 比系统 B 有更好的视觉分辨效果.

为更加形象地对比以上两系统的视觉分辨效果, 我们进行了光学实验的验证. 利用计算集成成

像技术产生分辨率板的元素图像阵列 (为了表示立体效果, 在分辨率板后 20 mm 处有一标记, 从两者相对位置的变化可以看出物空间场景的三维信息), 并采用表 1 中的两个透镜阵列分别进行三维场景的光学再现. 实验装置如图 3 所示, 其中使用像元直径为 0.09 mm, 像素数为  $640 \times 360$  的 71.12 mm (对角线长度) 液晶显示屏显示元素图像, 并使照相机的焦距保持不变以保证记录系统的角分辨率一定. 实验所分析比较的对象是两个不同集成成像系统实际显示图像分辨率的差异以及相对分辨率理论计算结果的差异, 以此证明相对分辨率确实可用于系统视觉分辨效果的表征, 并可区分具有相似系统分辨率的集成成像系统. 并且由 (4) 和 (6) 式可知, 人眼的角分辨率和观看距离是影响相对分辨率的重要因素. 因此, 实验中在由人眼特性决定的最佳观看距离处, 虽然使用与人眼角分辨率不同的照相机记录显示结果, 但是对于两系统间的比较而言, 不同记录系统对结果的影响将被抵消. 所以使用照相机进行观看效果的记录, 仍保持了实验结果的可比性和可靠性. 在表 1 列出的观察距离处记录不同视角的三维再现像的结果如图 4 所示, 图中左、中、右三个图像所显示的分辨率板遮挡标记位置不同, 对应着从左、中、右三个不同视角得到的再现像. 通过灰度差分法<sup>[15]</sup>来比较两系统再现像的质量, 得到系统 A 再现像的灰度差分值为 0.01735, 系统 B 再现像的灰度差分值为 0.010811, 两者之比为 1.6, 与理论计算值 1.72 ( $R_{RA}$  与  $R_{RB}$  之比) 较为接近. 这直观地反映出在最佳观看距离处观看两个系统的三维图像显示时系统 A 的视觉分辨效果更好, 与上述理论预测结果一致.



图 3 实验装置

上述理论和实验结果充分说明相对分辨率确实能够表征集成成像三维显示系统的视觉

分辨效果,从而验证了本文所提出分析方法的正确性.

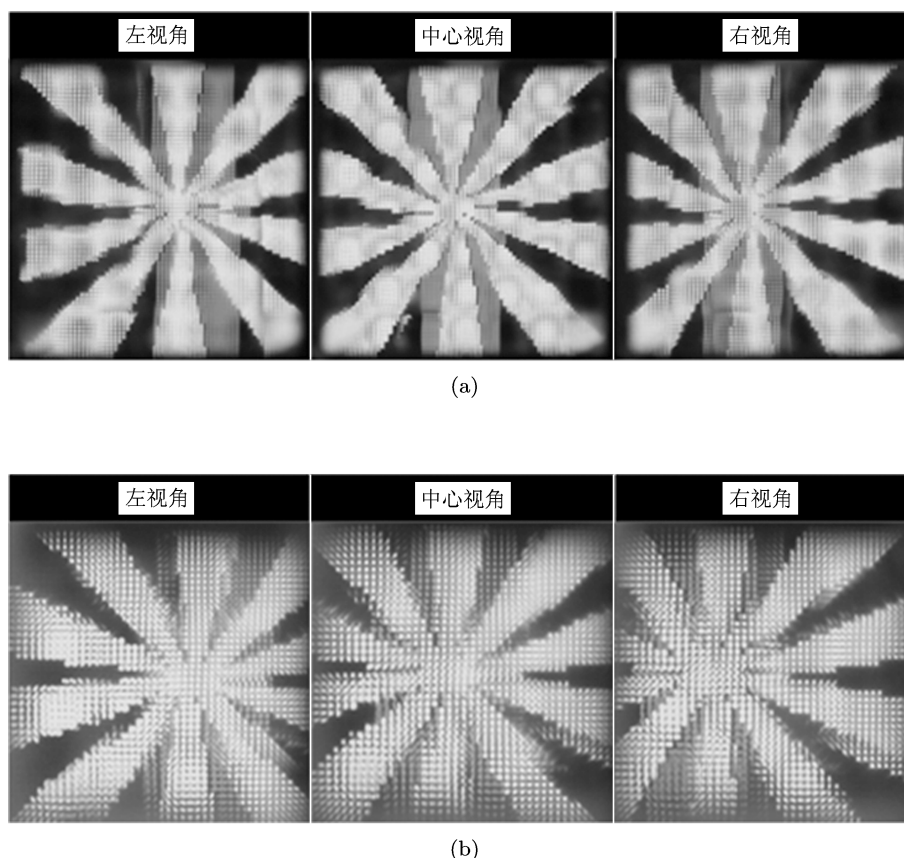


图4 不同视角的集成成像三维显示再现结果对比 (a) 系统 A; (b) 系统 B

## 4.2 分析及讨论

通过以上所述可以发现,虽然不同性能的显示设备和透镜阵列搭配组合的集成成像系统可以获得具有相近甚至相同分辨率的立体图像,但对于实际显示应用而言,人们通过不同集成成像显示系统看到立体图像的视觉分辨效果是不同的.仅根据传统方法计算系统分辨率是无法准确区分和比较实际显示观看时两个集成成像三维显示系统的视觉分辨效果的,甚至有可能产生错误的判断,使得实际具有较好视觉分辨效果的集成成像系统的优势不能完全发挥和利用.因此,本文所提出的分辨率分析方法对集成成像三维显示系统的设计和评价将具有很好的指导意义.

由(1)—(3)式可知,集成成像三维显示系统的分辨率仅决定于子透镜和显示设备的参数及显示设备与透镜阵列间的相对位置,与透镜阵列的大小

没有关系.由(8)式可知,相对分辨率  $R_R$  不仅与子透镜的性能有关系,与整个透镜阵列的面形尺寸也有很大的关系,阵列的大小决定了最佳观看距离,从而影响着再现立体图像的视觉分辨效果.为此,以方形阵列 ( $m = n$ ) 为例,计算得到透镜阵列尺寸不同时相对分辨率  $R_R$  随子透镜孔径  $p$  的变化趋势如图 5 所示(对于非方形的透镜阵列原理相同),计算时所采用的基本参数与表 1 中系统 A 的参数相同.从图 5 可以看出,  $R_R$  随  $p$  的增大基本呈线性增长,且大孔径阵列的  $R_R$  对透镜维数变化的敏感度高于小孔径阵列,这说明增加具有较大子透镜口径的透镜阵列维数,将能更有效地提高集成三维显示的视觉分辨效果.而  $R_R$  与  $N$  呈递增关系,因此相对分辨率  $R_R$  将随透镜阵列尺寸的增大而增大.所以,为了提高三维集成成的视觉分辨效果,有效的方法是增大透镜阵列的尺寸.在不考虑成本等实际因素的情况下,选择增大子透镜的口径,还

是增加子透镜的维数,需视方形透镜阵列尺寸的增幅(即  $\Delta(mp)$ )而定.这对集成成像系统的改进及选择有一定的参考意义.

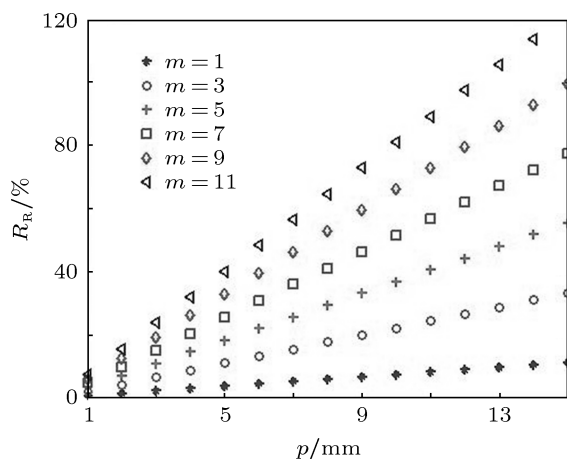


图5 透镜阵列尺寸对相对分辨率的影响

综上所述可知,透镜阵列是区分具有相似系统分辨率的集成成像系统的关键因素.因此在集成成像三维显示应用中,透镜阵列必将对分辨率、视场

角等系统参数产生重要的影响,应对这一器件的特殊性引起充分的重视.

## 5 结论

本文提出了一种基于人眼视觉的集成成像三维显示分辨率的比较方法.在分析计算集成成像显示系统分辨率和最佳显示观看距离处人眼分辨特性参数的基础上,定义了相对分辨率这一表征再现立体图像实际显示观看时视觉分辨效果的参数,用来比较和分析集成成像系统再现立体图像的分辨效果.通过对两个系统实例进行理论计算和比较,结果表明系统间的相对分辨率差异比传统分辨率差异增大了75%.实验结果与理论分析的一致性证明了该方法的正确性.同时,对集成成像三维显示系统中透镜阵列的重要影响进行了初步的分析和阐述.本文所提出的方法对集成成像三维显示系统分辨率的客观评价以及集成成像三维显示技术的发展具有一定指导意义.

- [1] Fan Q J, Li L, Shen C L, Gong H J 2010 *Opt. Precis. Eng.* **18** 183 (in Chinese) [樊琼剑, 李莉, 沈春林, 龚华军 2010 光学精密工程 **18** 183]
- [2] Feng M Y, Shen C L 2008 *Inform. Term. Disp.* **32** 42 (in Chinese) [冯茂岩, 沈春林 2008 信息终端与显示 **32** 42]
- [3] Zheng H D, Yu Y J, Dai C X 2009 *Opt. Int. J. Light Electron. Opt.* **120** 431
- [4] Park J H, Hong K, Lee B 2009 *Appl. Opt.* **48** H77
- [5] Kim Y, Choi H, Cho S W, Kim Y, Kim J, Park G, Lee B 2007 *Appl. Opt.* **46** 7149
- [6] Piao Y, Kim E S 2009 *Appl. Opt.* **48** 222
- [7] Lim Y T, Park J H, Kwon K C, Kim N 2009 *Opt. Express* **17** 19253
- [8] Piao Y 2008 *Acta Photon. Sin.* **37** 2560 (in Chinese) [朴燕 2008 光子学报 **37** 2560]
- [9] Cho M, Daneshpanah M, Moon I, Javidi B 2011 *Proc. IEEE* **99** 556
- [10] Lee B, Park J H, Min S W 2006 *Digital Holography and Three-Dimensional Display Principles and Applications* (New York: Springer) p333
- [11] Stern A, Javidi B 2006 *Proc. IEEE* **94** 591
- [12] Jang J S, Jin F, Javidi B 2003 *Opt. Lett.* **28** 421
- [13] Zhang Y M 2008 *Applied Optics* (Beijing: Electronic Industry Press) p372 (in Chinese) [张以谟 2008 应用光学 (北京: 电子工业出版社) 第 372 页]
- [14] Yu T 1966 *Applied Optics* (Beijing: Science Press) p392 (in Chinese) [喻焘 1966 应用光学 (北京: 科学出版社) 第 392 页]
- [15] Ren S G, Li J W, Xie L L 2003 *Opto-Electron Eng.* **30** 53 (in Chinese) [任四刚, 李见为, 谢利利 2003 光电工程 **30** 53]

# Comparison of the resolutions of integral imaging three-dimensional display based on human vision\*

Wang Fang Zhao Xing<sup>†</sup> Yang Yong Fang Zhi-Liang Yuan Xiao-Cong

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

(Received 11 July 2011; revised manuscript received 1 November 2011)

## Abstract

In order to present the visual resolution effects of different integral imaging systems in three-dimensional (3D) display applications, a method of comparing the resolutions of integral imaging 3D display based on human vision is proposed. The relative resolution parameter is defined by analyzing the relation between the integral imaging 3D system and resolving power of human eyes on the best viewing condition, and its relationship with the visual resolution effect viewed in the integral imaging 3D display system is analyzed. The results indicate that the size of lens array has an important influence on the visual resolution effect in the integral imaging 3D display system. According to the theoretical results of two examples show that the difference in relative resolution parameter between the systems is 1.75 times of that of traditional one. The experimental results are consistent with the theoretical analyses. The method proposed in this paper could have a certain directive significance for 3D display resolution evaluation.

**Keywords:** three-dimensional display, integral imaging, resolution, human vision

**PACS:** 42.79.Kr

---

\* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2010CB327702), the Specialized Research Foundation for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20100031120033), and the Fundamental Scientific Research Foundation for Central Universities of China (Grant No. 65010301).

<sup>†</sup> E-mail: zhaoxingtjnk@nankai.edu.cn