

文章编号:1007-2780(2014)05-0830-09

自由立体显示效果测试综述

程雪岷^{1*}, 谈梦泽¹, 郝 群², 马建设¹

(1. 清华大学 深圳研究生院 深圳市 LED 封装技术重点实验室, 广东 深圳 518055;

2. 北京理工大学 光电学院, 北京 100084)

摘要:近年来,多种自由立体显示技术的实现手段如视差屏障、柱状透镜、多层投影技术等被提出。虽然其市场产品众多,然而,对于自由立体显示的效果测试方法和评价指标方面的研究现仍处于起步阶段,如何有效地判断自由立体显示技术的效果优劣,评价显示设备的质量,是自由立体显示技术发展的关键问题之一。本文首先论述了自由立体显示的常规测试方法,包括主观测试、客观测试、统计测试 3 类,进而对几种最新的基于亮度分析的典型自由立体显示效果测试法和指标进行了技术分析;最后总结了自由立体显示测试的发展方向,指出其会向主观与客观测试结合,仿生人类视觉的信息采集、信息处理方向发展,以使对其显示效果的测试更全面,结果更接近人的真实感受。

关键词:自由立体显示;测试系统;双目视差;仿生测试;主观评价

中图分类号: TN873 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20142905.0830

Survey on auto-stereoscopic display measuring system

CHENG Xue-min^{1*}, TAN Meng-ze¹, HAO Qun², MA Jian-she¹

(1. Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China;

2. School of Opto-electronic, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In recent years, many techniques have been proposed to achieve stereoscopic display, such as parallax barrier, lenticular lens and multi-projector technology. There are many products of AS3D, but the method of testing and evaluating the AS3D equipments is still in initial stage. How to effectively determine the effect of AS3D equipments becomes one of the important issues of AS3D development. This paper firstly elaborated the conventional testing methods, including the subjective testing, objective testing and the statistical testing. Secondly, several latest measuring methods and index of AS3D based on brightness information have been analyzed. Finally, we discussed the development tendency of the AS3D measuring system and noted that the methods of the subjective and objective testing might be combined, while bionic information collection and processing will replace conventional tests. So the test results will be much closer to the people's true feelings.

Key words: stereoscopic display; testing system; binocular disparity; bionic test; subjective evaluation

收稿日期:2014-03-06;修订日期:2014-03-27.

基金项目:国家自然科学基金(No. 61275003);教育部博士点基金(No. 20101101110016);广东省部产学研(No. 2012B091100014);深圳市创新委项目资助项目(No. ZDSY20120619141243215)

* 通信联系人, E-mail: chengxm@sz. tsinghua. edu. cn

1 引言

自由立体显示(Auto-stereo three-dimensional display, AS3D)技术是非佩戴式立体显示技术,借由人体机能使观察者对图像形成立体视觉,具有广泛的市场且有望成为下一代主流平面显示技术。AS3D是国内外科研机构、公司的研究热点^[1-7],现在多种AS3D实现技术层出不穷,但是,其成像效果却参差不齐。目前国内外AS3D显示的测试及标准还不成熟,缺乏有效的测试手段成为AS3D产业的瓶颈,制约着AS3D的发展^[8-14]。

AS3D显示效果的测试方法不断发展,现阶段的主要的测试方法可以分为主观评价法、客观评价法^[15-17]。主观评价是由一定数量的受试者对显示效果进行主观判断得出结果,如图像质量、深度感、立体感等。主观评价不可避免地受到受试者的个人影响^[15-19]。客观评价法一般采用摄像设备采集AS3D显示设备的光息进行分析,然而由于实现AS3D的技术多种多样,早期的客观评价法没有依据其技术原理去进行分析,而是单纯以普通平面显示设备的常规指标如亮度、分辨率等进行评价^[21]。其后,在客观测试的基础上,发展了以亮度分布统计分析的测试法。综上,如何设计更接近人本身观测感受的测试法和标准,更好地利用AS3D显示设备的光学信息,是AS3D检测的研究重点,本文论述了AS3D主观测试法、客观测试法、统计测试法3类测试法,并对典型的AS3D测试方法和指标进行了分析。

2 AS3D常规测试

人眼视野对应整个视网膜对外界的有效感光范围,当双眼注视于一点,所看到的全部范围称为双目视野^[22-23]。在观看空间某个对象时,人的双眼从左右两边稍有差别的角度进行观察,因此被观察的物体在人的左右眼视网膜上所形成的像有存在略微的差异,即视差^[23]。视差的存在,以及人脑对视觉信息的综合处理是产生立体视觉的主要原因(原理如图1)。双眼视觉通道传递双眼接收到的视差视觉信息后,经过大脑视皮层加工即得到立体视觉,成像的最终结果既不是左眼像,也

不是右眼像而是一个心理像^[24-26]。基于这样的生理基础,AS3D的常规主观、客观测试法相应被提出。

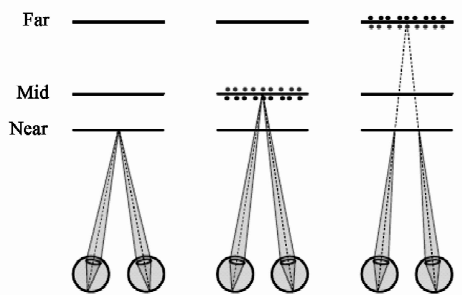


图1 双目视差产生立体感

Fig. 1 Dimensional sense comes from binocular parallax

2.1 AS3D主观测试

AS3D主观测试,由受试者对AS3D设备进行体验并打分,不同的方法在打分过程中有所不同,同时在测试时,其测试结果伴随受试者的心理因素、测试条件、个人知识水平等会有相应的影响。其中,部分测试法从平面图像的主观测试法发展而来。不同是AS3D主观测试相应引入了深度信息、双目视觉感受等3D显示拥有的测试内容。目前其主要测试方法可以分为双激励法、单激励法、成对比较法等^[27-28]。

2.1.1 单激励测试法

单激励测试法中,不需要给受试者提供参考图像,受试者直接根据自己的主观感受,对AS3D显示的材料效果好坏给出评价。在具体的测试中,根据评判结果是数值还是语言描述,可以分为数值分类判断法、形容性分类判断法、性能指标判断法,受试者一边观看AS3D显示的图像一边评分,其优点是受试者可以及时地给出相对准确的评价^[29]。

2.1.2 双激励测试法

AS3D双激励测试法,可分为双激励失真测试法和双激励连续质量测试法,前者是受试者知晓观看的是原始图像材料、以及AS3D设备显示的原始图像材料,然后再对AS3D设备显示的图像质量进行自己的主观评测,并给出对应的分值。而双激励连续质量测试中,对受试者混合播放原始图像材料与AS3D设备显示图像外,受试者不知道哪些图像对应哪种设备或者对应原始图像还是AS3D图像,并要同时对所有测试进行打分^[30]。这两种方法中,双激励连续质量测试法可以减轻受

试者的主观因素的影响。

2.1.3 成对测试

成对测试是将参与测试的多种 AS3D 显示设备两两组合,对相同的测试图像源,经过对应技术处理后,同一图像两两分对,依次对受试者进行测试。受试者每次从两者中选出认为立体感更强的一个,获得相应的分数。在测试结束后,将各个设备的总分或者图像序列的分数求和,依据所得分数的高低即可定义 AS3D 设备的显示水平,以及对应指标的高低。

2.2 AS3D 客观测试

AS3D 客观测试法对 AS3D 设备显示的图像进行采集,并试图建立起图像信息与人眼观影感受相关的指标。部分学者提出用平面显示的测试法调整后,对采集的信息进行处理,最终得出对应指标可用于 AS3D 测试的客观评价。从常规图像测试改进而来主要有均方误差法、峰值信噪比法、均方根误差法等^[31-32]。因为显示设备最终对人眼的输入信息仍是光学图像,衡量 AS3D 设备输出的图像特点,可以对应评价显示效果好坏。典型的,比如在双目视差类 AS3D 设备中,因为左右眼观察到的图像不同,左右眼视域中图像存在串扰,那么衡量双目同时接受的图像串扰程度,可以反应 AS3D 设备的优劣。图 2 给出了视差型 AS3D 设备常规测试的结构示意。

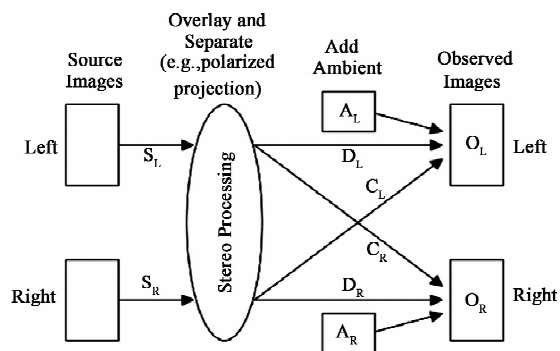


图 2 视差型 AS3D 设备测试系统结构

Fig. 2 Testing system of AS3D device architecture in parallax type

对 AS3D 设备的常规客观评价指标除锐度、亮度、对比度、色相、饱和度等以外,以对采集到像质信息进行统计处理的方式进行分析为主,它们基于图像每个像素的情况进行统计分析^[30-31]。

2.2.1 均方误差法

不同的 AS3D 设备,其图像源需要对应进行处理,假设设计的图像在显示过程中像质没有恶化,最终显示设备输出的图像失真程度,与原始图像之间的误差越小,图像质量越高。该方法衡量的是 AS3D 显示图像与原始参考图像间的差异^[31]。例如给定大小为 $A \times B$ 的数字图像 $I(x, y)$ 和原始图像 $I_0(x, y)$,计算公式为:

$$MSE = \frac{\sum_{x=0}^{A-1} \sum_{y=0}^{B-1} [I(x, y) - I_0(x, y)]^2}{A \times B}. \quad (1)$$

该方法其数值越小认为像质越好,算法上易于实现,但实际上源图像的质量如何,其立体感的强弱,并不能很好地体现出来。

2.2.2 峰值信噪比法

不同于均方误差,峰值信噪比法的计算方式与显示质量的好坏正相关。AS3D 设备显示图像的峰值信噪比值越高,被认为与原始图像越接近,因此质量也就越好,该方法能反映图像质量的大致情况,其计算公式如下^[32], $I_{\max}$ 为对应图像的灰度最大值:

$$PSNR = 10 \lg \frac{I_{\max}^2}{\frac{1}{A \times B} \sum_{x=0}^{A-1} \sum_{y=0}^{B-1} [I(x, y) - I_0(x, y)]^2}. \quad (2)$$

峰值信噪比法与均方误差法同样只考虑了图像和像源各个像素点之间的差异,而没有考虑人眼的视觉特性,这种评价方法虽然从整体上估算了原始图像和 AS3D 显示图像之间的差异,但也无法反映图像局部区域差异不同的情况,并存在对立体感考察不足的问题。

2.2.3 结构相似度测法

Zhou Wang 和 Bovik 等人提出了结构信息的概念^[33]:人眼视觉的主要功能是提取背景中的结构信息,而且人眼视觉系统能高度自适应地实现这一目标,因此对图像的结构失真的度量可以衡量人的观察感觉。该测试方法基于对亮度信息的统计,但对亮度、对比度和图像的结构相似度进行了加权统计^[33-37],如图 3 所示。

结构相似度法需要对 AS3D 显示图像的采样点间逐点计算亮度、对比度、结构间的差异并统计分析。若设参考图像为 X ,待评价 AS3D 显示图像为 Y ,统计量 $\mu_x, \mu_y, \sigma_x, \sigma_y, \sigma_{xy}$,分别是采样下的

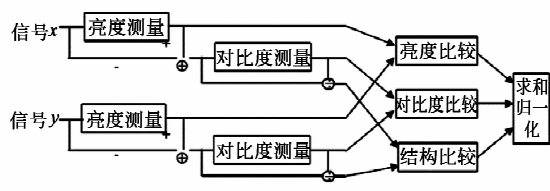


图3 结构相似度测法流程

Fig. 3 Method of structural similarity measurement

总值、方差、协方差。对应计算出亮度、对比度、结构的统计比较值后,可得到一组测试图像结构相似度 SSIM 参数,其中 MSSIM 是对多组测试取平均,并以之作为最终对 AS3D 显示设备的度量,对应公式如下^[38]:

$$\begin{cases} I(x, y) = \frac{a + 2\mu_x\mu_y}{a + \mu_x^2 + \mu_y^2} \\ c(x, y) = \frac{b + 2\sigma_x\sigma_y}{b + \sigma_x^2 + \sigma_y^2} \\ s(x, y) = \frac{c + \sigma_{xy}}{c + \sigma_x\sigma_y} \end{cases} \quad (3)$$

$$SSIM(x, y) = [I(x, y)]^\alpha [c(x, y)]^\beta [s(x, y)]^\gamma. \quad (4)$$

$$MSSIM = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M SSIM(x_i, y_i). \quad (5)$$

综上所述,常规的 AS3D 客观测试避免了主观测试法的不确定因素,但各类客观测法获得的结果对 AS3D 的立体感的评价相对存在不足。

3 亮度分布分析的 AS3D 测试法

在主观、客观测试的基础上,部分学者结合人类的视觉系统(HVS)特征、立体视觉原理、立体感等新的指标提出了一系列基于亮度分布分析测试法。目前市场主流的 AS3D 显示设备都以视差型 AS3D 设备为主^[39-41],因为 AS3D 测试需要结合具体的实现技术,对此现阶段典型的测试方法与指标如下。

3.1 “立体度”测试

Shin-ichi Uehara, Hiroyasu Ujike 以及 Liang Fayun 等认为,立体显示的效果决定于左、右眼视图的分离程度。如果不存在明显的左、右眼视区,或左、右眼视区间的图像相互串扰,则达不到视图的分离效果,大脑无法进行立体感融合^[42],如图4所示。

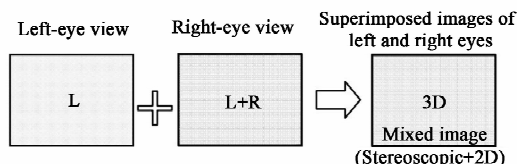
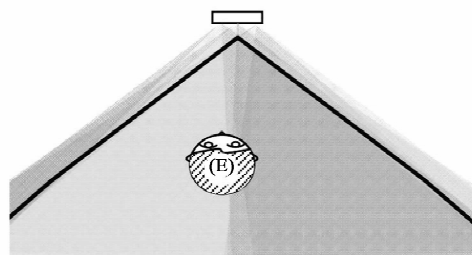


图4 视域重叠带来像质影响

Fig. 4 Overlapping of horizon brings impact to image quality

为此建立一种“立体度”标准,将每个独立的立体观察区域分离开进行测试。观察区域的参数为观察距离 D ,左、右视区间距 W ,它们是距离 h 和列像素间距 p 的函数,可以表示为:

$$D = f(h, p). \quad (6)$$

$$w = g(h, p). \quad (7)$$

进一步将屏幕视区划分为左右 L/R 亚屏幕,分别采用特殊设计的仅能在 L 或 R 区显示的测试图片,如图5。在测试 L 区时,播放仅 R 区可显示的测试图,此时理想状态下 L 区亮度值应为 0。测得此时实际的 L/R 视区亮度值大小后作比值,求得立体度 S_t ,测试 R 区时图像源取反即可。多组测试后作统计平均即得到立体度值 S_t :

$$S_t = \frac{I(L)}{I(R)}. \quad (8)$$

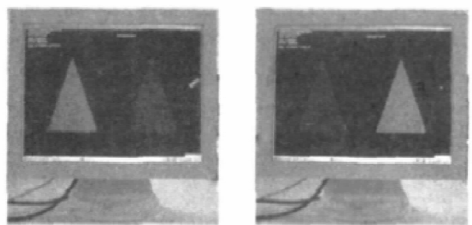


图5 用于分离视域显示的图像

Fig. 5 Image for the separation display

3.2 可视自由度(VF)与最佳距离(OVD)测试

Nokia Research Center 提出,AS3D 显示设备在空间中分隔成多个不同的左右眼视域,这种

不同视域的间隔和大小显著影响着立体感效果^[43-44]。根据 AS3D 显示设备的像素大小,观察者的双目瞳距,以及分离视域的设备特性、图像源的特点不同,视域大小也不相同。通常观察者的入瞳大小从 45 mm 到 80 mm 不等,对应有不同的最佳距离(OVD),是随着最佳位置开始角度偏离时,左、右眼分别达到串扰阈值时的角度,两者满足如下关系:

$$OVD = \frac{IPD}{2 \times \tan \frac{\theta_2 - \theta_1}{2}} \quad (9)$$

可视自由度是人眼可以观察到较好 AS3D 像质的圆锥空间范围。它表征观察者可以 AS3D 显示设备前多大的空间范围内自由移动而不显著降低观影体验,其既受到 AS3D 设备大小的限制,也受具体的实现技术的影响。图 6、图 7^[43]呈现了这种影响关系。计算出最佳观影距离后,从最佳位置开始做水平位置、孔径角的逐渐变换,分析像质恶化的情况即可得到可视范围并作为 AS3D 显示设备的特性指标。

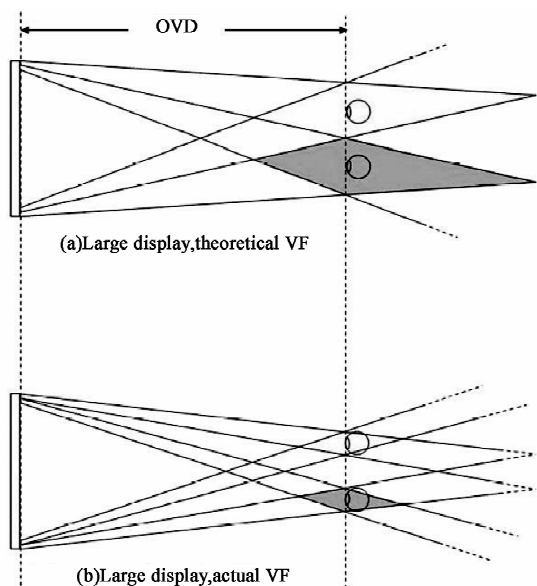


图 6 可视自由度与最佳距离测试关联

Fig. 6 Relationship of OVD and VF

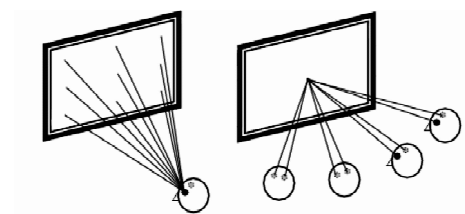


图 7 可视自由度与最佳距离测试示意

Fig. 7 Schematic view of OVD and VF testing

3.3 “光学测试站”测试法

3M 公司 Michael Sykora、John Schultz 等人提出一种系统测试方案“光学测试站”(Optical Inspection Station),涉及 AS3D 设备的 4 个指标,包括观影距离、截止带、截止角、“立体度”^[44]。

OIS 测试法实体系统结构如图 8 所示,包括包括一个摄影设备,漫反射板,以及被测装置。摄影设备的镜头距离散射板约 200 mm,资料中使用的设备此时的空间分辨率大约为 0.2 mm。散射板放在设定好的观察距离上,因为观察距离存在一定的范围,所以要利用锥光计测定好测量的范围。然后让 AS3D 设备显示黑白线对,改变摄影设备的角度、水平位置,测出亮度变化曲线。设定阈值以后,通过记录亮度低于阈值的角度范围和移动距离,就可以得到各个指标的变化曲线。

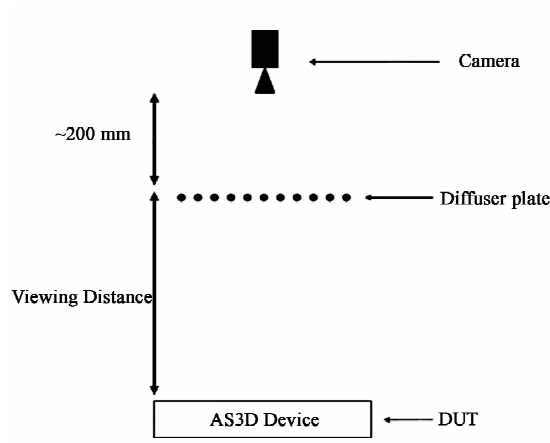


图 8 OIS 系统结构

Fig. 8 System architecture of OIS

OIS 测试法首先要确定 AS3D 设备的最佳观影位置,为此以栅格法对观影区域做 7×5 的点列划分,对每一个点采集到的图像信息做比较,以立体度为参考,寻找最佳观影点,如图 9。

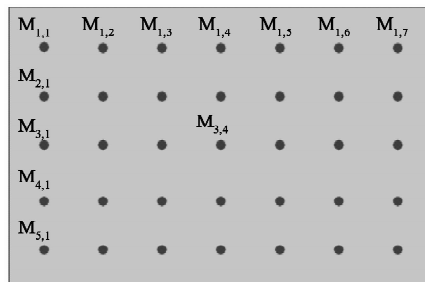


图 9 OIS 测试栅格点列

Fig. 9 Test grid of OIS

观察者在水平位置上做固定点上视角变化,其允许范围是截止带(角度范围)。在固定测试范围以后,会有多个双目视野交叠范围,其中测得最小值即为该测试位置的截止带。对应的截止角通过统计测试栅格5列的位置测得数据得出,如式(10)所示,其中 $\tan(\theta_{BOi})$ 表示第*i*个位置测得的截止带数据, VD 是观影距离, φ_{BA} 则是获得的截止角数据。最后立体度指标通过网格点的测试值做统计平均即得。

$$\varphi_{BA} = \frac{1}{n} \sum_i^n a \tan \left[\frac{VD(\tan(\theta_{BOi}) - \tan(\theta_{BOi+1}))}{y} \right]. \quad (10)$$

4 AS3D 测试发展趋势

分析可知,主观测法得到的结果更接近人的真实感受,但容易受到测试者的影响。客观测试法尽管成本低、结果稳定,但与人眼实际观察感受有一定差距。为此,各类测法目前朝着克服自身不足的方向发展,对主观测法,学者对测法的整个过程进行了统计设计^[45],包括设立AS3D图像源信息库,建立测试者随机筛选机制、培训机制,界定测试环境、条件等,并对实验结果的同样进行统计处理。例如,Foley J. M.在改进测试的同时,进行大量样本进行实验,并从结果中总结AS3D测试的主要测试维度:左右图像质量、立体效果、层次感、舒适感等^[46]。

对于客观测法,由于人类视觉系统是光学系统和神经中枢组成的综合系统。其中光学系统采

集光信息,神经中枢处理光信息,综合产生立体视觉。随着学者对人类视觉特性研究的深入,对AS3D客观测试法的研究现朝着仿生信息处理和仿生采集的方向发展。仿生信息处理指结合人眼的特点设计数据处理方法,侧重于对后端的数据分析,例如Weber Fenchel、Michelson等多位学者关于人类视觉系统的研究,将人类在视觉信息处理过程总结成多通道效应、对比度敏感效应、幅度非线性效应,和掩盖效应4种特点,并编写对应算法用于处理测试数据^[47-53]。而仿生采集则是在AS3D效果测试时,直接在设备后端光信息采集处,引入仿生调制,也是目前AS3D效果测试的发展趋势之一。

5 结 论

自由立体显示作为近年来活跃的领域,其测试方法已成为规范产业,引领技术发展的重要部分。研究先进的测试方法,能够制定行业标准的先行者将能引导市场,也将掌握技术创新主动性。未来,伴随对人类视觉的生理特性,仿生学及统计分析的研究,自由立体显示测试方法将朝向全面利用光学信息,更为客观的统计手段,更接近人的观测感受的方向发展。优秀的主观测法和客观测法将相辅相成,互为补充。一旦技术成熟,自由立体显示技术在新测法和指标的规划下赢得更广泛的市场,在工业生产,生活娱乐,航空、医疗等领域得到更广泛的应用。

参 考 文 献:

- [1] 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]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(2): 433-438. (in Chinese)
- [2] 王琼华,王爱红. 三维立体显示综述[J]. 计算机应用, 2010, 30(3): 581-588.
Wang Q H, Wang A H. Survey on stereoscopic three-dimensional display [J]. *Journal of Computer Application*, 2010, 30(3): 581-588. (in Chinese)
- [3] 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, 2012, 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 Optics*, 2012, 4(6): 562-570. (in Chinese)
- [4] 秦开怀,罗建利. 自由立体显示技术及其发展[J]. 中国图像图形学报, 2009, 14(10): 1934-1941.

- Qin K H, Luo J L. Techniques for autostereoscopic display and its development [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2009, 14(10): 1934-1941. (in Chinese)
- [5] 张晓媛. 裸眼立体显示技术的研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2006.
Zhang X Y. Research on the technology of naked-eye stereoscopic display [D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2006. (in Chinese)
- [6] Troscianko T, Montagnon R, Clerc J L, *et al.* The role of colour as a monocular depth cue [J]. *Vision Research*, 1991, 31(11): 1923-1929.
- [7] Hua H, Liu S. Depth-fused multi-focal plane displays enable accurate depth perception [C]//*Photonics Asia 2010. International Society for Optics and Photonics*, Beijing, China, 2010: 78490P-78490P-9.
- [8] Born M, Wolf E. *Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light* [M]. CUP Archive, 1999.
- [9] Seuntjens P, Meesters L, Ijsselstein W. Perceived quality of compressed stereoscopic images: Effects of symmetric and asymmetric JPEG coding and camera separation [J]. *ACM Transactions on Applied Perception (TAP)*, 2006, 3(2): 95-109.
- [10] Bowman D A, Chen J, Wingrave C A, *et al.* New directions in 3D user interfaces [J]. *IJVR*, 2006, 5(2): 3-14.
- [11] Faris S M. Novel 3D stereoscopic imaging technology [C]//*Proceedings of the IS&T/SPIE 1994 International Symposium on Electronic Imaging: Science and Technology, International Society for Optics and Photonics*, San Jose, CA, 1994: 180-195.
- [12] 梁发云, 邓善熙, 杨永跃. 自由立体显示器的视觉特性测量与研究[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(10): 1350-1353.
Liang F Y, Deng S X, Yang Y Y. Measure and research for auto-stereoscopic display vision characteristic [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, 27(10): 1350-1353. (in Chinese)
- [13] 郑华东, 于瀛洁, 程维明. 三维立体显示技术研究新进展[J]. 光学技术, 2008, 34(3): 426-434.
Zheng H D, Yu Y J, Cheng W M. A review on three-dimensional display techniques [J]. *Optical Technique*, 2008, 34(3): 426-434. (in Chinese)
- [14] Meesters L M J, Ijsselstein W A, Seuntjens P J H. A survey of perceptual evaluations and requirements of three-dimensional TV [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2004, 14(3): 381-391.
- [15] Patterson R. Human factors of 3 - D displays [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2007, 15(11): 861-871.
- [16] Benoit A, Le Callet P, Campisi P, *et al.* Using disparity for quality assessment of stereoscopic images [C]//*Proceedings of the Proceedings of the 15th IEEE International Conference on Image Processing*, San Diego, USA, 2008, 1: hal-00324052.
- [17] Campisi P, Le Callet P, Marini E. Stereoscopic images quality assessment [C]//*Proceedings of 15th European Signal Processing Conference (EUSIPCO'07)*, Poznan, Poland, 2007: 2110-2114.
- [18] Wang X, Yu M, Yang Y, *et al.* Research on subjective stereoscopic image quality assessment [C]//*Proceedings of the IS&T/SPIE Electronic Imaging, International Society for Optics and Photonics*, San Jose, CA, 2009: 725509-725510.
- [19] 叶海加, 陈昱, 邢渊. 双目 CCD 结构光三维测量系统中的立体匹配[J]. 光学精密工程, 2004, 12(1): 71-75.
Ye H j, Chen G, Xing Y. Stereo matching in 3D measurement system using double CCD structured light [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, 12(1): 71-75. (in Chinese)
- [20] 毕家瑜, 张之江, 董志华. 多视点立体显示系统建模及分析[J]. 光学技术, 2009, 35(4): 575-578.
Bi J Y, Zhang Z J, Dong Z H. System modeling and analysis for automultiscopic 3D displays [J]. *Optical Technique*, 2009, 35(4): 575-578. (in Chinese)
- [21] 杨嘉琛. 立体图像客观质量评价与压缩技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.
Yang J C. Research on objective quality evaluation and coding algorithm of stereo image [D]. Tianjin: Tianjin University, 2008. (in Chinese)
- [22] Neil A. Autostereoscopic 3D displays [J]. *Computer*, 2005(8): 32-36.

- [23] Sexton I, Surman P. Stereoscopic and autostereoscopic display systems [J]. *Signal Processing Magazine, IEEE*, 1999, 16(3): 85-99.
- [24] Okoshi T. Optimum design and depth resolution of lens-sheet and projection-type three-dimensional displays [J]. *Applied Optics*, 1971, 10(10): 2284-2291.
- [25] Sang X, Fan F C, Jiang C C, et al. Demonstration of a large-size real-time full-color three-dimensional display [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(24): 3803-3805.
- [26] 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.
Wang Y Q. Auto-stereoscopic display based on LCD [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2003, 18(2): 116-120. (in Chinese)
- [27] 张英静. 立体图像主观评价及基于 SVM 质量的客观评价[D]. 天津: 天津大学, 2012.
Zhang Y J. Subjective quality evaluation method and objective quality evaluation method based on support vector machines of stereo image [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [28] Tan K, Ghanbari M, Pearson D E. An objective measurement tool for MPEG video quality [J]. *Signal Processing*, 1998, 70(3): 279-294.
- [29] Kozamernik F, Steinmann V, Sunna P, et al. SAMVIQ—a new EBU methodology for video quality evaluations in multimedia [J]. *SMPTE Motion Imaging Journal*, 2005, 114(4): 152-160.
- [30] 沈丽丽. 立体视觉信息客观质量评价算法研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
Shen L L. Research on objective quality assessment of stereoscopic vision information [D]. Tianjin: Tianjin University, 2010. (in Chinese)
- [31] Arslan G, Valliappan M, Evans B L. Quality assessment of compression techniques for synthetic aperture radar images [C]//*Proceedings of the Image Processing, 1999 ICIP 99 Proceedings 1999 International Conference on, IEEE, Kobe*, 1999: 857-861.
- [32] Wang Z, Alan C B. Mean squared error: love it or leave it A new look at signal fidelity measures [J]. *Signal Processing Magazine*, 2009, 26(1): 98-117.
- [33] Huynh T, Quan, Mohammed G. Scope of validity of PSNR in image/video quality assessment [J]. *Electronics letters*, 2008, 44(13): 800-801.
- [34] Zhou W, Alan C B, Li G L. Why is image quality assessment so difficult [C]//*Proceedings of the Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP), 2002 IEEE International Conference on, IEEE, Orlando, USA*, 2002: IV-3313-IV-3316.
- [35] Zhou W, Li G L, Alan C B. Video quality assessment based on structural distortion measurement [J]. *Signal Processing: Image Communication*, 2004, 19(2): 121-132.
- [36] Hore A, Ziou D. Image quality metrics: PSNR vs. SSIM [C]//*Proceedings of the Pattern Recognition (ICPR), 2010 20th International Conference on, IEEE, Istanbul*, 2010: 2366-2369.
- [37] Wang Z, Bovik A C, Sheikh H R, et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(4): 600-612.
- [38] Poirson A B, Wandell B A. Appearance of colored patterns: pattern—color separability [J]. *JOSA A*, 1993, 10(12): 2458-2470.
- [39] Lee B, Choi H, Cho S W. 3-D to 2-D Convertible Displays Using Liquid Crystal Devices [M]//*Three-dimensional Imaging, Visualization, and Display*. Springer US, 2009: 55-77.
- [40] Hung J, Lang R, Flachskampf F, et al. 3D echocardiography: a review of the current status and future directions [J]. *Journal of the American Society of Echocardiography*, 2007, 20(3): 213-233.
- [41] Muranaka T, Hosoda S, Kim J H, et al. Development of multi-utility spacecraft charging analysis tool (MUS-CAT) [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2008, 36(5): 2336-2349.
- [42] Uehara S, Ujike H, Hamagishi G, et al. Standardization based on human factors for 3D display: performance characteristics and measurement methods [C]//*Proceedings of the IS&T/SPIE Electronic Imaging, International Society for Optics and Photonics, San Jose, California*, 2010: 752407-752412.

- [43] Salmimaa M, Järvenpää T. Optical characterization and measurements of autostereoscopic 3D displays [C]//*Proceedings of the Photonics Europe, International Society for Optics and Photonics*, Strasbourg, France, 2008: 700102-700109.
- [44] Sykora M, Schultz J, Brott R. Optical characterization of autostereoscopic 3D displays [C]//*Proceedings of the IS&T/SPIE Electronic Imaging, International Society for Optics and Photonics*, California, USA, 2011: 78630V 1-8.
- [45] Foley J M. Human luminance pattern-vision mechanisms: masking experiments require a new model [J]. *JOSA A*, 1994, 11(6): 1710-1719.
- [46] Lin W. *Gauging Image and Video Quality in Industrial Applications* [M]//*Advances of Computational Intelligence in Industrial Systems*, Springer Berlin Heidelberg, 2008: 117-137.
- [47] Malamas E N, Petrakis E G M, Zervakis M, et al. A survey on industrial vision systems, applications and tools [J]. *Image and Vision Computing*, 2003, 21(2): 171-188.
- [48] Lukas F, Budrikis Z L. Picture quality prediction based on a visual model [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1982, 30(7): 1679-1692.
- [49] Daly S J. Visible differences predictor: an algorithm for the assessment of image fidelity [C]//*Proceedings of the SPIE/IS&T 1992 Symposium on Electronic Imaging: Science and Technology, International Society for Optics and Photonics*, San Jose, CA, 1992: 2-15.
- [50] Huynh-Thu Q, Le Callet P, Barkowsky M. Video quality assessment: from 2D to 3D—challenges and future trends [C]//*Proceedings of the Image Processing (ICIP), 2010 17th IEEE International Conference on, IEEE*, Hong Kong, China, 2010: 4025-4028.
- [51] Teo P C, Heeger D J. Perceptual image distortion [C]//*Proceedings of the IS&T/SPIE 1994 International Symposium on Electronic Imaging: Science and Technology, International Society for Optics and Photonics*, San Jose, CA, 1994: 127-141.
- [52] Winkler S. Perceptual distortion metric for digital color video [C]//*Proceedings of the Electronic Imaging'99, International Society for Optics and Photonics*, San Jose, CA, 1999: 175-184.
- [53] Jzerman W L, Zwart S T, Dekker T. 7.4: Design of 2D/3D Switchable Displays [C]//*SID Symposium Digest of Technical Papers*, Blackwell Publishing Ltd, 2005: 98-101.

作者简介:程雪岷(1976—),河北邯郸人,博士,副研究员,主要从事光存储技术、非球面设计及应用、光学系统的智能化设计、交互式影像的研究。E-mail:chengxm@sz. tnhua. edu. cn