

## 使用 EEG 分析水平视差对 3D 图像舒适性的影响

高强, 金杰, 沈丽丽, 侯春萍

(天津大学 电子信息工程学院, 天津 300072)

**摘要:** 水平视差是影响 3D 图像舒适性的重要因素之一。采用不同等级水平视差的 3D 图像作为刺激信号, 通过记录被试者的 EEG 反应信号, 提取出被试者观看不同等级水平视差 3D 图像的 ERP 波形; 同时记录被试观看这一系列 3D 图像舒适性体验的行为数据, 并计算其舒适性检测率。通过 EEG 信号分析可见, 无论在交叉或者非交叉水平视差情况下, 3D 图像水平视差舒适范围在 45' 以内; 水平视差在 45'~75' 时, 交叉视差 3D 图像 ERP 波形 280 ms 附近的幅值与不舒适的程度相关, 非交叉视差 3D 图像 ERP 波形 250 ms 附近的幅值与不舒适程度相关; 检测率曲线结果和主观评价结果显示: 3D 图像水平视差的舒适性范围在 45' 以内, 水平视差在 45'~75' 时, 3D 图像不舒适程度随着视差的增加而增大。结果表明: EEG 分析、检测率曲线和主观评价结论一致, 因此, 可以使用 EEG 分析水平视差对 3D 图像舒适性的影响。

**关键词:** 舒适性; 随机点立体图; 水平视差; 脑电图; 事件相关电位

**中图分类号:** TN949.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)12-4140-06

## Effect analysis of horizontal parallax on 3D images comfortableness using EEG

Gao Qiang, Jin Jie, Shen Lili, Hou Chunping

(School of Electronic and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** Horizontal parallax is one of important factors that affect 3D images comfortableness. 3D images of different horizontal parallax were used as stimulate signals, by recording the EEG signals, the ERP waveforms of 3D images were extracted. At the same time, behavioral data of comfort experience of the 3D images was recorded and their comfort detection rate was calculated. EEG analysis result shows that no matter in the case of crossed or uncrossed horizontal parallax, comfort range of 3D images horizontal parallax is within 45'. When horizontal parallax is from 45' to 75', the ERP amplitude of around 280 ms is associated with the discomfort level of crossed parallax 3D images and the amplitude of around 250 ms is related to the discomfort level of uncrossed parallax 3D images; Detection rate curve and subjective evaluation results show that comfort range of 3D images horizontal parallax is within 45'.

收稿日期: 2014-04-11; 修订日期: 2014-05-10

基金项目: 国家“863”高科技计划(2012AA011505); 国家自然科学基金(61302123, 60932007); 教育部博士点基金(20110032110029)

作者简介: 高强(1988-), 男, 硕士生, 主要从事 3D 图像方面的研究。Email: gq522836305@126.com

通信作者: 沈丽丽(1978-), 女, 讲师, 博士, 主要从事 3D 图像/视频舒适度方向的研究。Email: sll@tju.edu.cn

When horizontal parallax is from 45' to 75', the discomfort degree of 3D images is increased. Results show that EEG analysis, detection rate curve and subjective evaluation conclusion is consistent, so EEG can be used to analyze the effect of 3D images comfortableness on horizontal parallax.

Key words: comfortableness; random dot stereogram; horizontal parallax; EEG; ERP

## 0 引言

目前,3D技术在工业、医疗卫生、建筑、军事、娱乐等诸多领域均有许多应用<sup>[1-2]</sup>。3D图像在给人们带来诸多方便的同时,它的舒适性也越来越引起人们的注意。针对3D电视,参考文献[3]描述了视觉不舒适是健康的头号问题。其中3D图像水平视差的大小是影响立体图像舒适性的主要因素之一<sup>[4]</sup>。人们之所以会看到一个立体的事物,是因为人的双眼之间有一定的距离,当人眼观察一个物体时,左右眼视网膜中会呈现不同的像,左右眼视网膜上的微小的相位差称为双眼视差。人类的双眼在观察某单个物体的过程中,由于视差的存在,左右两只眼睛看到的像并不同,大脑分析、调整、处理这两幅图像之后进行三维图像的重建过程,获取深度感知,以及该物体的位置,从而获得立体感<sup>[5]</sup>。但是能够舒适地融合为单一的、清晰图像的水平视差大小有一个界限。

现在,3D图像水平视差舒适范围还没有统一的结论。对于3D图像水平视差舒适性区域的研究,Percival曾经提出过3D图像舒适性观看区域,但是该区域是通过棱镜感知获得的,且该区域的范围取决于观看距离的变化<sup>[6]</sup>,所以它不适用于现在的立体显示器。现在人们通常采用的3D图像水平视差舒适性范围的值为1度,它只是一个经验的大致数值。参考文献[7-8]曾将更小的水平视差作为舒适范围<sup>[9]</sup>。由于人眼视觉特性的复杂性,还没得出合理的视觉模型,所以客观评估和主观评估的一致性有待提高。

直接测量人们观看不同等级水平视差3D图像生理反应,可以最真实地反应人类视觉模型,大脑EEG分析方法是其中的一种。对于EEG技术,Li等人通过实验研究发现人们对于大视差3D图像的P700反应幅值较大,但是其划分的等级较少,只有两个视差等级<sup>[10]</sup>。H. Hayashi等人对不同清晰度图像的

EEG信号进行快速傅里叶变换分析发现,人们观看较清晰图像时,EEG成分中 $\alpha$ 波的功率比较高<sup>[11]</sup>。Lea Lindemann等人使用EEG对不同等级压缩图像进行分析发现<sup>[12]</sup>,人们对于压缩等级不同的图像,大脑枕区脑电反应是不同的。北京师范大学张丹丹等人使用ERP的P1和N1幅度差评估了高对比度图像和低对比度图像的差异<sup>[13]</sup>。Kasai采用ERP技术发现,视差加工诱发了两侧枕叶280ms左右的负波,非交叉视差波幅大于交叉视差<sup>[14]</sup>,表明枕区ERP可用于分析具有视差的3D图像,但其没有对交叉视差和非交叉视差等级进行具体划分。这些都为作者使用EEG评估3D图像指明了方向,以前文献均没有使用EEG技术对水平视差的舒适范围进行研究,文中基于EEG技术,提出一种新的不同等级水平视差3D图像的舒适性研究方法。该方法首先记录被试对不同等级水平视差3D图像的EEG信号,然后从EEG信号中提取不同等级水平视差3D图像的ERP波形,最终根据ERP波形来评估水平视差对3D图像舒适性的影响。实验结果表明:所提方法实时性很强,消除了主观评价时由于个人倾向或者是判断失误对结果的影响,同时以人的生理指标作为直接的评估对象,确保了评估结果的准确性。

## 1 实验

### 1.1 实验原理

ERP即事件相关电位,定义为当外加一种特定的刺激,作用于感觉系统或脑的某一部位,在给予或撤销刺激时,或当某种心理因素出现时,在脑区所产生的电位变化<sup>[15]</sup>。事件相关脑电有两个重要的特征:潜伏期恒定和波形恒定。与此相对,自发脑电则是随机变化的。所以,可以将同一事件多次引起的多段脑电记录下来,进行多次叠加,由于自发脑电或噪声是随机的,有高有低,相互叠加就会出现正负抵消的情况,而ERP信号则有两个恒定,所以不会抵消,反而

幅度会不断增加,当叠加到一定次数时,ERP 信号就显现出来了,叠加  $n$  次后的 ERP 波幅就增加了  $n$  倍,从而需要再除以  $n$ ,使得 ERP 恢复原形,即还原为一次 ERP 的值,这样就获得了所希望的事件相关电位波形图。文中就是从 EEG 信号中提取 ERP 波形对 3D 图像舒适性进行评价。

### 1.2 刺激材料

在实验中,为了消除其他非相关因素的影响,采用不同等级水平视差随机点立体图来呈现立体图片,因为随机点立体图只含有水平视差线索。随机点立体图的尺寸大小为  $708\text{ mm}\times 398\text{ mm}$ ,显示的内容为在随机点立体图的中央呈现出大小为  $124\text{ mm}\times 124\text{ mm}$  的凸出或者凹陷的矩形方块。随机点立体图水平视差大小分别为  $0'$ 、 $15'$ 、 $30'$ 、 $45'$ 、 $60'$ 、 $75'$ 、共 6 个等级,其中视差为  $0'$  的图像实际为左右眼呈现的 2D 图像。不同等级水平视差随机点立体图以伪随机等概率方式呈现,每个等级水平视差图像均呈现 90 次,每组实验呈现 540 幅随机点立体图。观看距离为 3 倍显示器的高度,图像在像素为  $1366\times 768$  的显示器上呈现。通过左右格式呈现方式显示随机点立体图,被试佩戴具有偏光特性的 3D 眼镜以获得清晰的 3D 图像,如图 1 所示。



图 1 被试佩戴偏振眼镜面对显示器

Fig.1 Subject is facing screen with polarized glasses

### 1.3 被试信息

被试为 10 名男生 2 名女生,均为右利手,年龄为 21~27 岁,都具有正常的立体视觉,矫正视力为 1.0,3 名被试具有 3D 图像评估的经验,其余被试没有 3D 图像评估的经验。被试知道实验的相关内容但不知道实验的目的。

### 1.4 实验步骤

该实验分两组实验,第一组为评估交叉视差随机点立体图舒适性实验,第二组为评估非交叉视差

随机点立体图舒适性实验。实验过程为,首先在屏幕的中央显示一个灰白色的圆形注视点,呈现时间为  $500\text{ ms}$ ,以使被试的双眼汇聚于中央位置,如图 2(a)所示。随后显示一个随机点立体图,呈现时间为  $1000\text{ ms}$ ,如图 2(b)所示。每次随机点立体图显示之后,会呈现一个灰白色的圆形图像,此时要求被试者对该随机点立体图的观看舒适性进行判断,若判断为舒适,则点击鼠标的左键,否则点击鼠标的右键,点击之后将进入下一个试次。实验中,记录下被试观看不同等级水平视差随机点立体图的脑电信号。

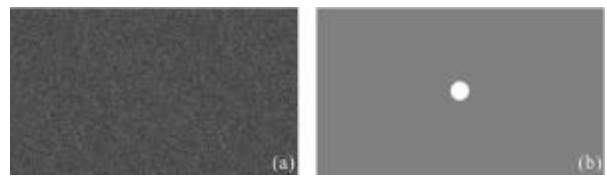


图 2 注视点和随机点立体图

Fig.2 Fixation point and random dot stereogram

脑电信号记录完毕,为了进一步得到被试主观评估不同等级水平视差 3D 图像的结果,让被试对随机出现的不同等级水平视差的随机点立体图进行打分,不同等级水平视差的随机点立体图的呈现是伪随机等概率的呈现 9 次,此次没有呈现视差为  $0'$  图像,交叉视差与非交叉视差立体图像分别呈现 45 次。记录被试对不同等级水平视差随机点立体图的主观评价得分,评价标准采用国际评价标准<sup>[16]</sup>,被试主要对 3D 图像的舒适性方面进行评价。

### 1.5 数据的获取和处理

实验过程中,EEG 数据由 32 导联,国际 10-20 系统的电极帽记录。数据采集选择  $1000\text{ Hz}$  的采样频率,数据滤波采用高通截止频率为  $0.05\text{ Hz}$  和低通截止频率  $100\text{ Hz}$  的滤波器以消除漂移和 DC 的影响。选择右侧乳突作为参考电极,获取数据时确保各个电极电阻值小于  $5\text{ k}\Omega$ 。并将人们判断图像舒适性的行为数据记录下来,点击左键代表呈现随机点立体图为舒适的,行为数据记录一次 1,点击右键表示呈现的随机点立体图为不舒适的,行为数据记录一次 2。记录脑电数据之后,使用 SCAN 软件对记录的脑电数据进行离线分析。首先进行脑电预览,去除漂移特别严重的脑电数据;其次是去除眼电,去除眨眼对脑电数据的影响;第三步是脑电分段,实验中分段时间选取相对于随机点立体图开始呈现时间

的 -100~1 200 ms 时间段;第四步是基线矫正,消除脑电相对于基线的偏离;第五步是去除伪迹,把一些不符合脑电范围的伪迹自动滤除;第六步是叠加平均,把相同水平视差的随机点立体图的脑电叠加在一起;第七步是进行人工滤波,滤出脑电信号频带范围以外的噪声成分;最后是进行总平均,把不同被试对于同一等级水平视差随机点立体图刺激的 ERP 信号进行分组平均。

## 2 数据分析

### 2.1 行为数据分析

分别计算被试观看不同等级交叉和非交叉水平视差随机点立体图的舒适性检测率。每一等级水平视差随机点立体图的舒适性检测率计算方法为:对每一等级水平视差随机点立体图,用判定舒适的次数除以总的呈现次数。

### 2.2 ERP 分析

提取出人们对于不同等级交叉和非交叉视差随机点立体图的 ERP 波形,首先对 ERP 波形进行波形匹配性分析。观察出波形匹配性较高的 ERP,然后对波形匹配性较高的 ERP 波形进行峰值分析。

### 2.3 主观评价结果分析

使用记录下来的不同等级交叉与非交叉水平视差随机点立体图的主观评价得分求得平均意见得分(MOS)。

$$MOS_j = \frac{\sum_{i=1}^N m_{ij}}{N}$$

式中: $N$  为被试的数目; $m_{ij}$  为被试  $i$  对  $j$  等级水平视差 3D 图像的评价得分。

## 3 结果

### 3.1 检测率曲线

图 3 是不同视差类型随机点立体图舒适性检测率的变化曲线。从图中可以看出 0' 视差的图像舒适性检测率最大。交叉视差随机点立体图舒适性检测率随视差的增大而逐渐减小,30' 以下时,舒适性的检测率在 85% 以上,45' 的时候在 50% 以下,约处于舒适性检测率的中间水平。且 3D 图像从 0'~75' 以 15' 等视差变化时,从 30'~45' 之间的舒适性检测率变化最大,所以认为在接近 45' 时有舒适性检测率的突变。因此认

为对于交叉视差,3D 图像水平视差舒适性范围应该在 45' 以内。

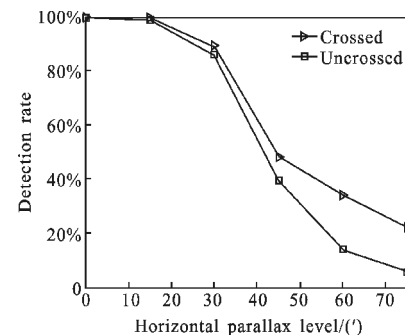


图 3 不同等级水平视差 3D 图像的检测率曲线

Fig.3 Detection rate curves of 3D images of different horizontal parallaxes

在非交叉视差情况下,随机点立体图舒适性检测率也随着视差的增加而逐渐减少,在 30' 以下时,舒适性的检测率是在 85% 以上,45' 时在 45% 以下,约处于舒适性检测率的中等水平。且 3D 图像视差从 0'~15' 等视差变化到 75' 时,视差在 30'~45' 之间,舒适程度变化最大,认为在接近 45' 时有舒适性检测率的突变。所以对于非交叉视差,3D 图像水平视差舒适性范围应该在 45' 以内。

### 3.2 ERP 分析

大脑枕区以视觉功能为主,选择枕区的  $O_2$  电极进行分析。如图 4(a) 所示,对前 500 ms ERP 进行分析,对于交叉视差来说,黑色实线为 2D 图像的 ERP 波形,它与其他 3D 图像的 ERP 有明显的不同,2D 随机点立体图的 ERP 波形在约 150 ms 之后总是位于 3D 随机点立体图像 ERP 波形的下方。可以看出,视差为 15' 和 30' 的 ERP 波形匹配性较高,在约 280 ms 附近,视差为 15' 和 30' 的随机点立体图的 ERP 波形出现的是向下的波峰,而对于 45'、60'、75' 的随机点立体图的 ERP 出现的是向上的波峰,记为 N280。这说明人们对于视差小于和大于 45' 的随机点立体图的反应很大程度上是不同的。认为人们对于交叉视差 3D 图像,水平视差舒适性的范围应该在 45' 以内。

如图 4(b) 所示,对于交叉视差 45'、60'、75' 的随机点立体图的 ERP 波形匹配性很高,且随着水平视差的增大,N280 幅度排布依次从下到上,说明 N280 幅值的大小与 3D 图像不舒适性的程度是相关的。



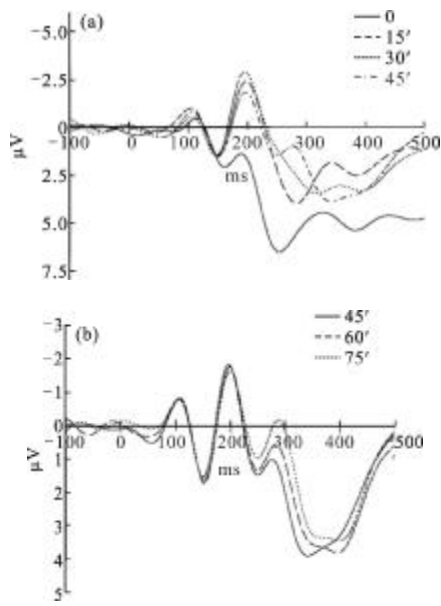


图 4 不同交叉视差 3D 图像的 ERP 波形

Fig.4 ERP waveforms of different crossed parallaxes

对于非交叉视差 ERP 波形,选择枕区  $O_2$  电极进行分析,如图 5(a)黑色实线是 2D 图像的 ERP 波形,和其他 3D 图像的 ERP 波形有明显的不同,2D 图像的 ERP 波形在约 150 ms 以后始终位于 3D 图像 ERP 波形的下方。15' 和 30' 图像的 ERP 波形匹配性较高,对于视差为 45'、60'、75' 的随机点立体图 ERP 波形匹配性也很高。45'、60'、75' 随机点立体图的 ERP 波形在约 250 ms 处首先出现了一个弯曲的走势,而 15' 和 30' 的图像的 ERP 波形没有此变化。所以认为人们对于 15' 和 30' 非交叉视差的图像的感知是相似的,对 45'、60'、75' 非交叉视差的图像反应是相似的。所以对于非交叉视差,3D 图像水平视差舒适性范围也应该在 45' 以内。

如图 5(b)所示,对于非交叉视差 45'、60'、75' 的随机点立体图的 ERP 波形匹配性很高,且对于非交叉视差来说,随着水平视差的增大,在 250 ms 附近幅值排布依次从下到上,说明此 250 ms 幅值与非交叉图像不舒适程度是相关的。

从图 5(b)中也可以看出:对于不舒适 3D 图像的 ERP 波形匹配性比舒适图像 ERP 波形匹配性高。可能是由于人们对于舒适的 3D 图像大脑反应不是特别强烈,对于不舒适的 3D 图像,大脑反应较剧烈,而且具有相同的不舒适反应,所以其波形具有较高的匹配性。以前该实验组成功试用 ERP 评价垂直视

差引起 3D 图像的不舒适性,也说明了大脑对于不舒适 3D 图像引起的 ERP 波形匹配性较高。因此,认为 45' 以上的 3D 图像为不舒适的图像。

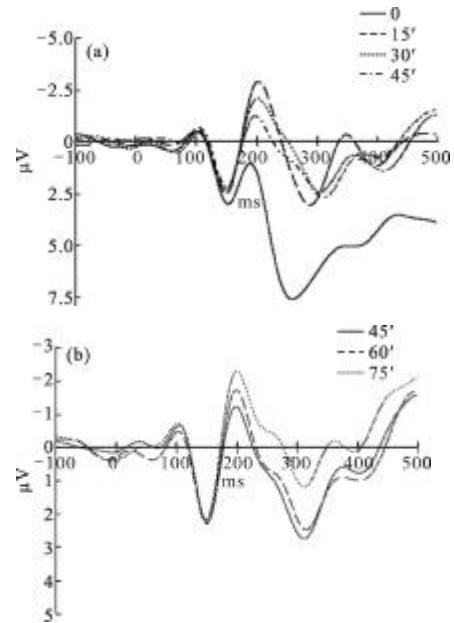


图 5 不同非交叉视差 3D 图像的 ERP 波形

Fig.5 ERP waveforms of different uncrossed parallaxes

### 3.3 主观评价结果分析

表 1 中列出了不同等级水平视差随机点立体图的主观评价 MOS 值。由图 6 可以直接看出:无论对

表 1 不同水平视差 3D 图像的主观评价得分

Tab.1 Subjective evaluation scores of 3D images of different horizontal parallaxes

Horizontal parallax / (°)	Crossed parallax images scores	Uncrossed parallax images scores
15	4.5	4.4
30	4.0	4.2
45	3.1	3.2
60	2.6	2.8
75	2.1	2.2

于交叉还是非交叉视差的随机点立体图,随着水平视差的增大,主观评价 MOS 值逐渐减小,在 45' 水平视差图像的主观评价 MOS 值是中间值,为舒适与否的分界点。且从 0' 以 15' 等视差变化到 75' 时,被试对于 30'~45' 之间的主观评价 MOS 值的差值最大;图 6 表明,在主观评价中,水平视差大于 45' 的 3D 图像具有较低的舒适性,而水平视差小于 45' 的 3D 图像具有较高的舒适性,且在 3D 图像视差接近 45'

时,有舒适性的突变。由此可知,人们观看 3D 图像的舒适水平视差的范围应该在 45' 以内;当水平视差在 45'~75' 时,随着水平视差的增大,3D 图像的不舒适程度逐渐增加。

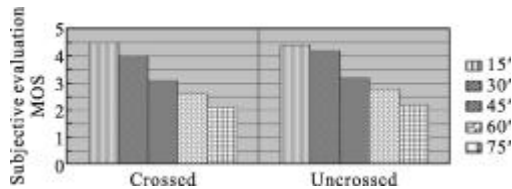


图 6 不同等级水平视差 3D 图像的主观评价 MOS 值  
Fig.6 Subjective evaluation MOS of 3D images of different horizontal parallaxes

## 4 结 论

由分析结果可以看出,对于只具有水平视差线条的 3D 图像,舒适的视差范围应该在 45' 以内;且对于水平视差大于 45' 时,交叉视差 3D 图像 ERP 波形 280 ms 附近的幅值与不舒适的程度相关,非交叉视差 3D 图像 ERP 波形 250 ms 附近的幅值与不舒适程度相关。检测率曲线分析和主观评价结果显示,3D 图像水平视差的舒适性范围在 45' 以内;水平视差在 45'~75' 时,3D 图像不舒适程度随着视差的增加而增大。EEG 分析、检测率曲线分析以及主观评价结果是一致的,因此,可以使用 EEG 分析水平视差对 3D 图像舒适性的影响。

## 参考文献:

- [1] DeKort Y, Ijsselstein W A. Reality check: the role of realism in stress reduction using media technology[J]. *Cyber Psychology & Behavior*, 2006, 9(2): 230-233.
- [2] William A M, Bailey D L. Stereoscopic visualization of scientific and medical content [C]//IEEE International Conference on Science, 2008: 319-320.
- [3] Lydia M J, Wijnand A I, Pieter J H, et al. 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.
- [4] Tam W J, Speranza F, Yano S, et al. Stereoscopic 3D-TV: visual comfort[J]. *IEEE Transaction on Broadcasting*, 2011, 57(2): 335-346.
- [5] Parker A J. Binocular depth perception and the cerebral cortex [J]. *Nature Reviews Neuroscience*, 2007, 8(5): 379-391.
- [6] Yano S, Emoto M, Mitsuhashi T. Two factors in visual fatigue caused by stereoscopic HDTV images [J]. *Displays*, 2004, 25(4): 141-150.
- [7] Speranza F, Tam W J, Renaud R, et al. Effect of disparity and motion on visual comfort of stereoscopic images [C]//SPIE, 2006, 6055: 94-103.
- [8] Wopking M. Viewing comfort with stereoscopic pictures: an experimental study on the subjective effects of disparity magnitude and depth of focus[C]//*Soc Inf Disp*, 1995, 3(3): 101-103.
- [9] Lambooi M, Ijsselstein W, Fortuin M, et al. Visual discomfort and visual fatigue of stereoscopic displays: a review[J]. *Journal of Imaging Science and Technology*, 2009, 53(3): 1-14.
- [10] Li H C, Seo J, Kham K, et al. Measurement of 3D visual fatigue using event-related potential (ERP): 3D oddball paradigm [C]//*The True Vision-Capture, Transmission and Display of 3D Video*, 2008: 213-216.
- [11] Haysshi H, Shirai H, Kameda M, et al. Assessment of extra high quality images using both EEG and assessment words on high order sensations [C]//*IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, 2000: 1289-1294.
- [12] Lindemann L, Magnor M. Assessing the quality of compressed images using EEG [C]//*IEEE International Conference on Image Processing*, 2011: 3109-3112.
- [13] Zhang D D. Single-trial ERPs elicited by visual stimuli at two contrast levels: analysis of ongoing EEG and latency/amplitude jitters [C]//*IEEE Symposium on Robotics and Applications(ISRA)*, 2012: 85-88.
- [14] Kasai T, Morotomi T. Event-related brain potentials during selective attention to depth and form in global stereopsis[J]. *Vision Reserch*, 2001, 41(10-11): 1379-1388.
- [15] Wei Jinghan, Luo Jiayue. *Event-related Potentials Principle and Technology* [M]. Beijing: Science Press, 2010: 68-73. (in Chinese)
- [16] Recommendation. ITU-R BT.500-12-2009. Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures [S]. 2002.