

RESEARCH

Open Access

基于景深图和视频运动的立体3D视频质量评估

Juan Pedro López*, Juan Antonio Rodrigo, David Jiménez and José Manuel Menéndez

摘要

本文提出一些方式来评判立体视频画面在运动和景深图等特征上的客观质量。我们进行了一些分析以定位导致观众在观看立体视频时产生视觉不适感的根源。运动是使立体视频具有立体感的要素，但同时也经常是产生不适感的根源。一些常见的引起视觉不适的场景有高运动帧、视差突变的转场，以及一些非立体画面。在应用算法对这些因素的影响进行量化后，我们得到了一些指南。

1 引言

用户体验质量的提升使得新立体应用的成功变为现实。尽管在立体视频质量方面已明确一些影响因素，还有了一些可用的原型设备，但还不存在一个普适的用于衡量立体视频及一些集成解决方案的质量的标准化程序。

参考质量网路白皮书，体验质量(QoE)是指用户对于某个应用或服务的愉悦或不适程度[1]。它取决于用户在当前状态下对某应用或服务的效用和/或愉悦感的期望被满足的程度。质量由多种因素影响，例如内容、网络状况、设备、应用、用户的期望值，以及相关背景环境。而在考虑到3D视频的质量时，涉及的因素更多。

在基于2D画面对立体视频质量进行分析时，通常会考虑到的因素有画面锐度、封闭效应和视频模糊。而由于对平面视频和立体视频的感知上的差异，就应该将更多影响视觉的因素纳入考虑范围。因此，要提供一个完备的立体视频质量评估方案，就有必要研究这些额外的影响因素。

立体视频感知的基础是摄像机采集两路不同的视频信号并显示在观看者眼前。一路信号针对左眼显示，另一路信号针对右眼显示。这个系统模拟了人眼视物的真实场景，左右眼所感受到的画面略有不同，而这种不同取决于物体相对于观测者的位置。这也就意味着这套系统为用户提供了画面各处的景深信息。

但是观看立体视频的体验和实际视物体验之间还是存在一定的差异。观看者的观测点取决于摄像机镜头拍摄时的观测点。观看者的视觉焦点也取决于摄像机拍摄时的焦距。更进一步讲，在实际视物时，眼球聚焦（调节）的点正好落在两眼球的视轴交点，但当观看屏幕上的立体视频时，观看者的焦点必须在屏幕上，而同时，两眼视轴汇聚的交点却可能在屏幕的后方、屏幕上，甚至在屏幕之前。这种冲突称为“汇聚-调节冲突”。这种冲突限制了观看者在避免不适感的同时能容忍的视差范围，这个范围也称为“舒适区”（后面章节会详细讨论）。

本文旨在通过分析视频帧的景深图和帧间变化来研究立体视频的左右差异对视频质量的影响。我们试着客观的量化视差、景深、运动因素对视频质量的影响，推导出在观看者的主观评价测试中被认为不适感较为明显的场景的特征。

* Correspondence: jlv@gatv.ssr.upm.es

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Madrid, Madrid 28040, Spain

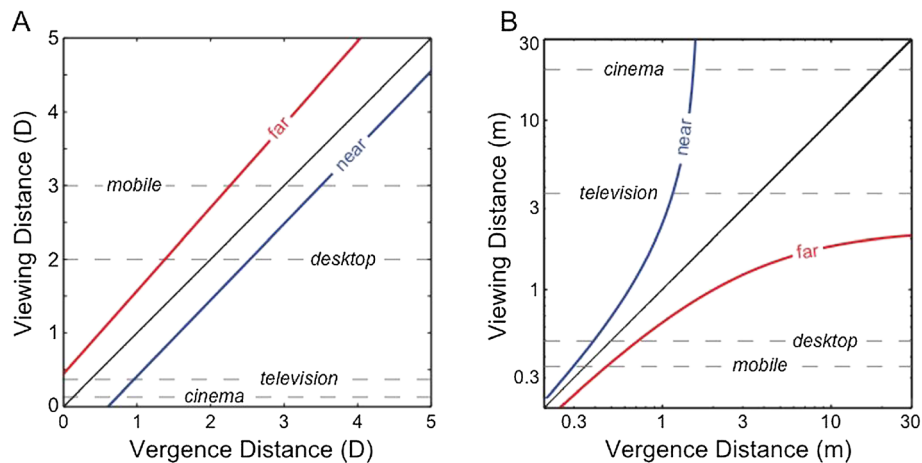


Figure 1 Shibata's zone of comfort with distance in (A) diopters and (B) meters.

以下内容中，第二节概述了立体视频质量的相关研究情况，第三节描述了主观评价方案的编制，第四节确定测试目的以及测试问题，第五节给出了测试结果，第六节得出测试的相关结论。

2 相关研究

图像质量评估是个复杂的过程，它在各种处理应用中占重要地位[2]。在这一领域已有很多进展，定义了预测视频帧质量的量度和算法，避免了在评估此客观量度的可靠性时不得不进行新的主观研究。参考文献部分的[3-5]概述了众多有趣的质量评估研究工作。但是客观的视频质量又免不了对其的主观评价，因为最终的结论本身就是观看者对视频本身的主观看法。为使不同学者的不同研究手段得出的结论之间更具有可比性，大多数已发表的主观研究都依赖于ITU-R BT.500 [6]和ITU-T P.910 [7]中描述的推荐步骤。

在3D视频的质量评估中，不仅包含了影响2D视频质量的因素和一些新的因素，还包含了一些新的关于立体视觉的光学效应的主题，比如视觉不适感，景深感知不一致，这些在参考文献[8]中有涉及。关于景深和运动的很多研究在参考文献[9]中有涉及，应用了滤镜来减轻视觉不适感。这些研究也出现在参考文献[10,11]中。此外，参考文献[12]中提出了一个有趣的3D立体电视的体验质量模型。

在参考文献[13]中，在进行关于汇聚-调节冲突、视差分布、双目不匹配、景深、认知不一致的主观测试后，提出并分析了一个描述立体电视观影舒适度的概论。在参考文献[14]中，报道了景深和运动在视觉不适度计算中的高相关性。另外，参考文献[15]的作者提出了一种用于检测主要物体在景深范围内时的运动特征视觉舒适度的模型。



Figure 2 Examples of left frames in sequence Modernism.



Figure 3 Effect with anaglyph examples of parallax variation in sequence Palco HD.

另外还有Richard et al.[16]开发的观看舒适度模型,以及Barkowsky et al.开展的有关立体视频帧的视觉不适感研究[17,18]。

参考文献[19]中开展的一项关于视觉不适的主观评价研究认为视差极限、舒适区、屏幕尺寸影响、差异程度以及观看时间都有影响。

参考文献[20]中研究了其他诸如立体窗口侵入 (SWV) 和差异暂时连续 (TCD) 等因素,并基于深度图和3D摄影原则以及Chen et al. [21]的研究得出了创建舒适且流畅的立体视频的指南。

舒适区 (ZoC) 的概念由Percival [22]在做眼镜相关实验时首次提出,彼时他认为汇聚-调节冲突的限制可以被突破而不导致不适感。近期如Shibata et al. [23]等人的研究认为,在基于镜片的实验和基于立体视觉的实验中,立体视频中的舒适区与Percival的舒适区不一样。在立体视觉中,汇聚-调节冲突是变化的,而在光学镜片系统中,它是固定的[24]。图1 分别以屈光度和米制长度的形式,给出了不同的调节距离下的Shibata舒适区。汇聚-调节的米制长度形式有助于理解在实际确定场景下观看者距屏幕一定距离时双眼实际成像情况。根据上述图表,具有正视差的画面很少或不会产生不适感,而具有负视差的画面若不加以控制很容易产生视觉不适。

为使立体视频落在视差的舒适区,有必要考虑到运动和观看时间。当这些因素出现时,舒适区范围会更小。此时汇聚视轴和调节焦点的时间是相关的。因此,引入舒适区的概念是很有必要的。参考文献[17]研究了观看时间的变化以判断它对视觉不适的影响,进而将其关联到舒适区上。

一个图像的视差范围取决于其景深图。立体图像的景深图有多种计算方式,计算复杂度和准确率不尽相同。经验上认为复杂度和精确度成正比,因此,SAD(总绝对差值法)之类的低复杂度的算法只在某些场景下表现较好[25,26]。Scharstein和Szeliski [27]描述了Middlebury Database [28]的定义步骤,其提供了当时最完备的立体视觉评估算法,以及评估新算法的软件。基于SAD的算法是复杂度最低且应用最广泛的。基于统计学的算法[29-32]在参考文献[33]中首次提出,其较常用于基于硬件的实时系统[34-38],且可能在图像的相似区域取得较好效果。

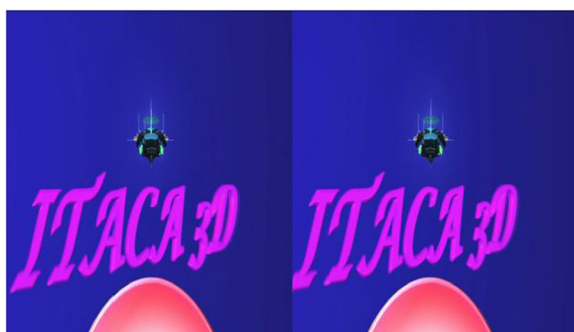


Figure 4 Sequence 'Itaca 3D' with window violation (WV) on the left side of image.

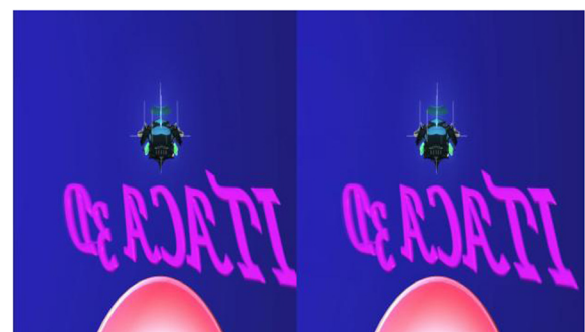
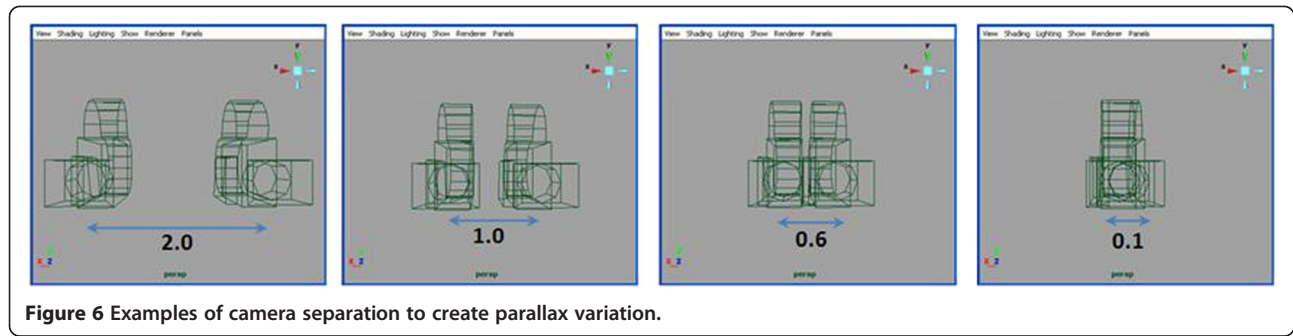


Figure 5 Sequence Itaca 3D with WV on the right side of the image.



但基于统计学的算法因其本质是针对比特的，因此在用于基于软件的系统中时，复杂度会增加。某些算法综合二者不同的长处，将这两种算法结合，例如参考文献[39]，效果在Scharstein and Szeliski排名中位列第二，以及参考文献[40]中基于密度的双通道匹配。

最后，Nojiri et al. [41]的工作着眼于立体视频的舒适度和现场感，将视频帧的运动和视差分布关联了起来。实验结果基于主观评价，采用了单一因素的连续质量评估方法。

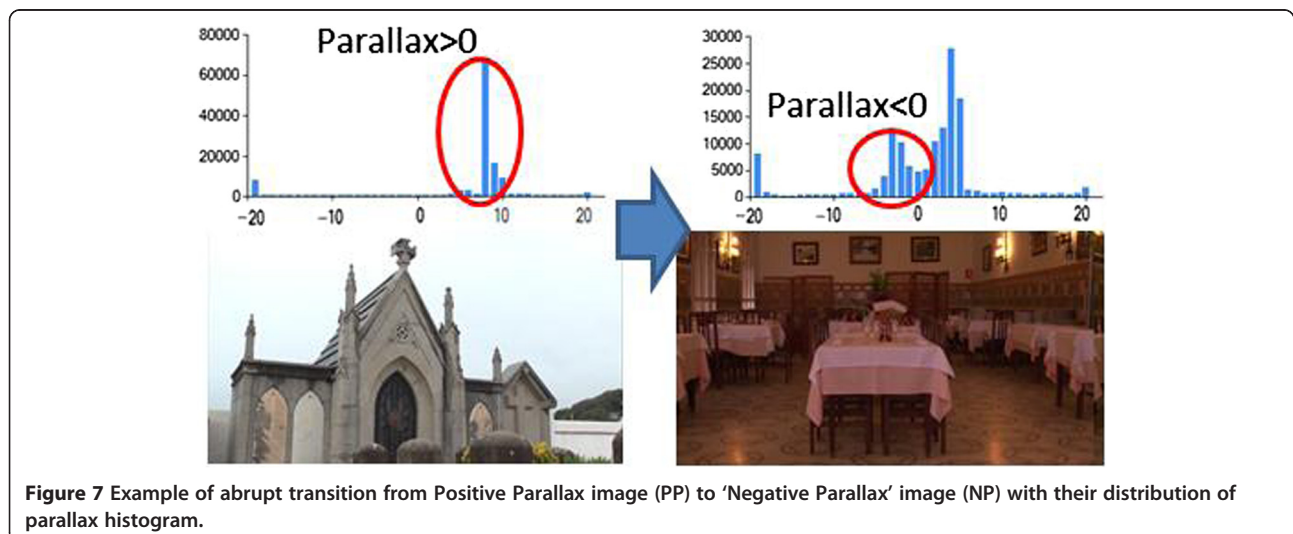
3 视觉不适源的定位

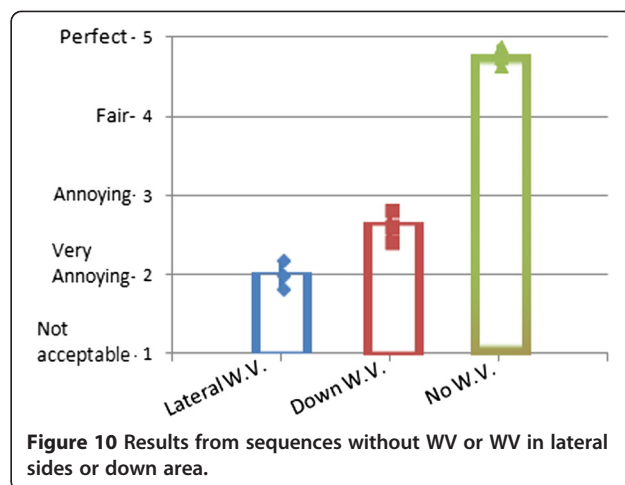
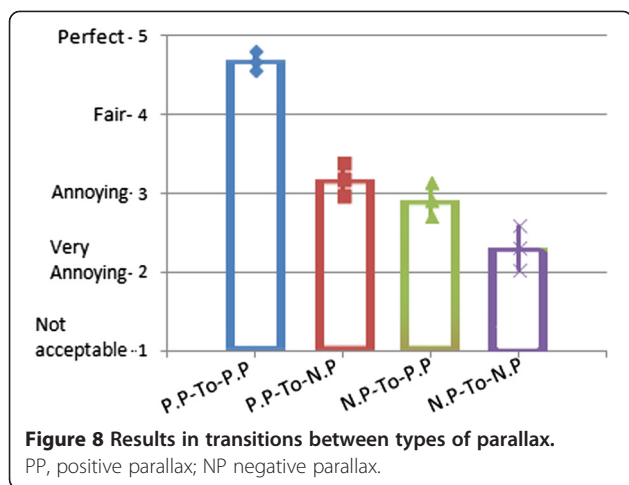
为定位引起视觉不适和质量下降的源头，已对很多立体视频做了多种实验以理解和分析不同的特征。10名观看者被要求对立体视频的质量进行排序。实验结果与通过工具获取的客观数据进行比较以找出潜在的引起视觉不适和质量下降的特征，并尝试进行修正以获得更好的3D体验。所有测试视频均通过一个46英寸的3D液晶显示屏播放，型号为JVC GD-463D10 (JVC, Wayne, NJ, USA) [42]，3D眼镜为无源眼镜。

参考Winkler的研究认为15个受试者足以进行主观评估实验[43]，本实验共16个受试者对视频质量进行平均意见得分(MOS)统计。实验包括让受试者观看一段视频并进行打分，分值为5(完美)，4(较好)，3(较不适)，2(很不适)，1(无法忍受)。实验按照绝对分类级别(ACR)进行，具体见推荐阅读 P.910 [7]。

实验采用的视频片段有一个名为“Modernism”(图2)的3分钟的小视频，由Mediapro公司制作，视频中包含不同运动级别和不同景深的场景。另外还有名为“Rain Fruits”和“Fountain”的视频，由EBU制作[44]。

实验还包括人工创建的一段名为“Palco HD”(图3，以红蓝3D格式显示)和一段名为“Itaca”(图4和5，展示旋转的Logo和在左右两侧产生立体窗口侵入的飞船)的视频，两视频涉及到视差和物距的变化。这两个视频是用Autodesk Maya软件专为实验制作的，目的是制造一对虚拟摄像头，以便于改变镜头间距离，制造高度负视差图像(图6)。





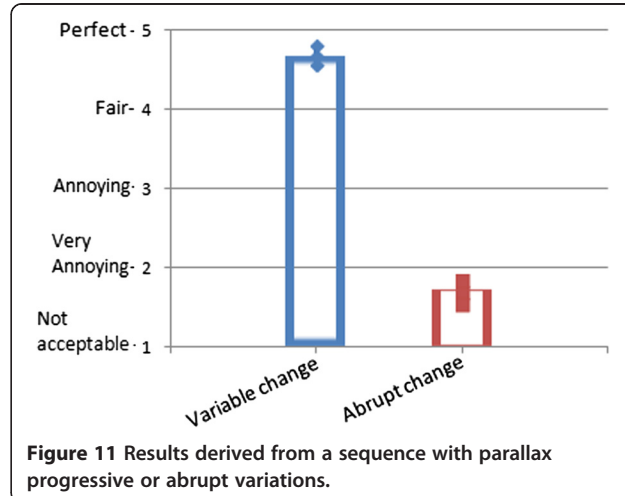
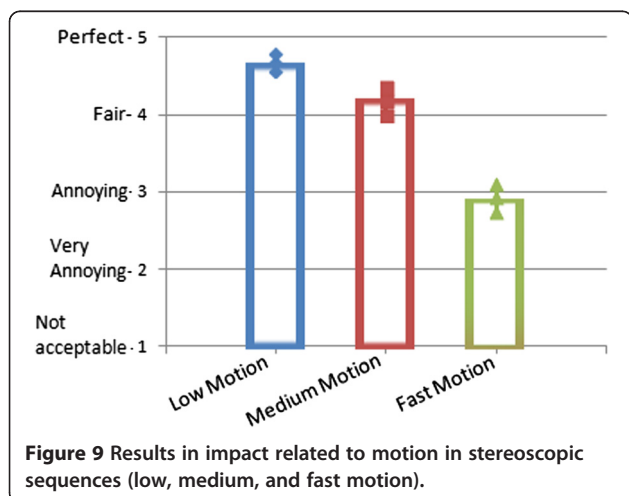
所有上述视频序列都是1,920*1,080的高分辨率，无压缩，3D格式为左右3D，左右画幅各占一半。

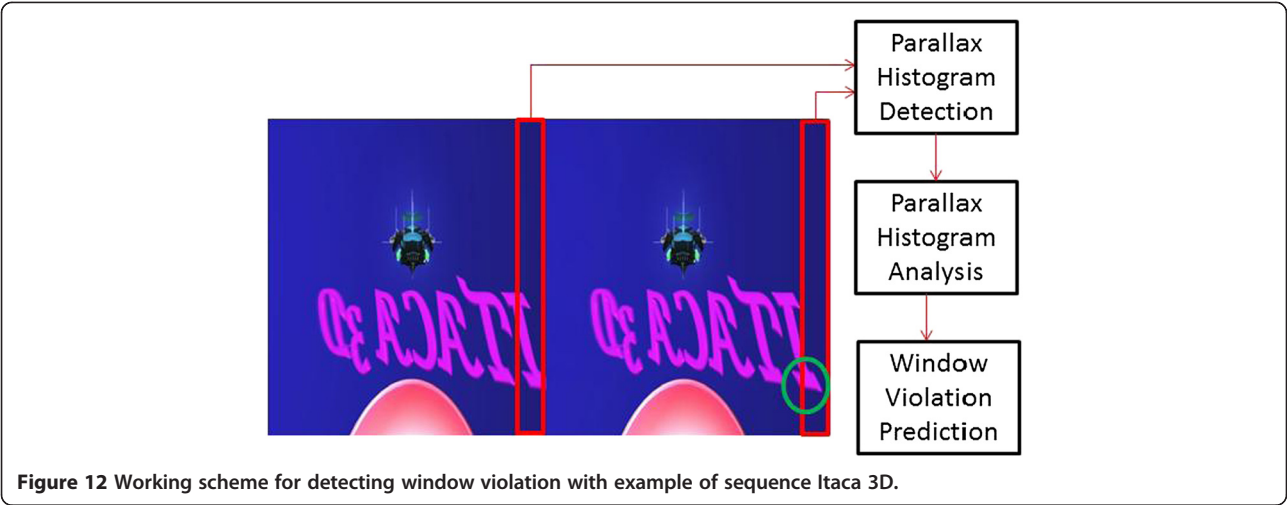
EBU创建的视频序列也左右3D，但左右画幅均为全高清，以便研究更高分辨率的必要性。

所有视频帧被分为以下6组，每组对应一个实验进行分析。受试者对每个视频(或视频组)单独打分，并给出一般意见，以便从其观点得出结论。

- 视差突变的转场视频(如图7)，负视差到正视差的变化，以便研究立体突变的影响。正视差(PP)定义为图像中无明显负视差像素点，正视差占图像25%以上。相对的，负视差(NP)定义为包含超过15%负视差像素点(假定环境视差为正，如图8)。

- 具有涵盖视差为0、正、负，舒适区内和舒适区外的相同静态图像和视频序列。
- 具有不同运动速度的负视差视频序列：低速，中速，高速。实验结果见图9。
- 在不同边界引起窗口侵入的视频帧：侧边侵入，上/下边侵入。示例见图4和5。主观评测结果见图10。
- 舒适区内和舒适区外的负视差对比视频。
- 伴随视差逐渐缓慢变化的长视频帧，在转场处出现视差的突变。实验结果见图11。





这一阶段约为20分钟，每个受试者独立完成测试。按照参考文献[45]的建议，在测试之前让受试者观看一些视频以验证其立体感正常。

相比Nojiri et al. [41]的实验，这个主观评估更繁杂，更专注于分析视觉不适的具体场景，因为各个实验都相对独立地探讨了窗口侵入检测、视差突变等不同场景，基于视差分布和运动矢量来形成一个通用的视觉不适检测算法。

3.1 主观评价的结论

基于测试中图像和观测者的意见，可以得出如下结论：

1. 视差变化的静态图像研究结论:

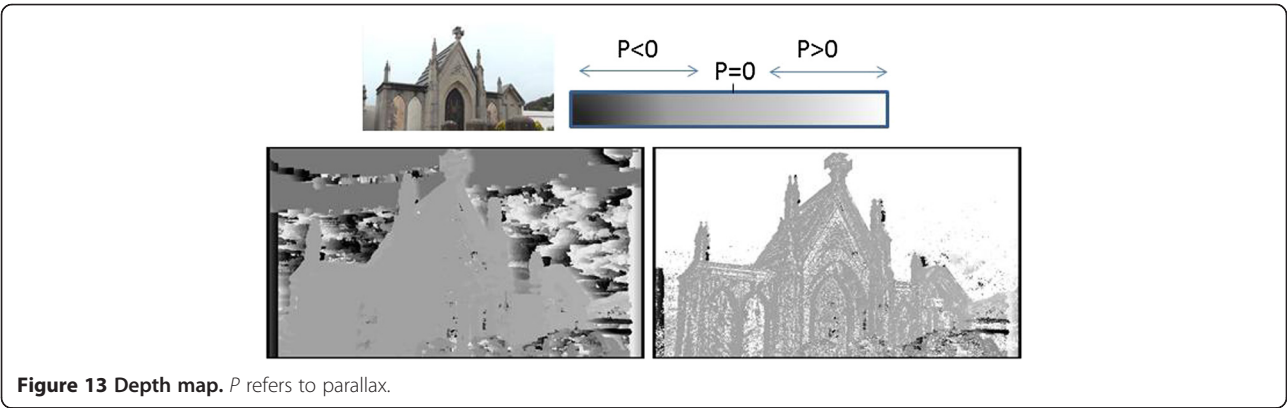
- (a) 具有负视差且物体在画面边缘的画面会导致视觉差距，使得物体在视觉上比实际上离观察者更近，这是窗口侵入所导致的。

- (b) 物体在舒适区外的画面会导致观察者视觉不适和疲劳。

- (c) 视差直方图的变化幅度，特别是负视差直方图的变化幅度（正视差亦然），对3D视频的立体感有很大影响，因此也对整体上的质量有影响。

2. 视差变化的视频帧研究结论:

- (a) 当发生转场时，从正视差为主导的画面突然转到负视差物体的画面时，若人眼没有足够的时间来适应并聚焦，就会产生强烈的不适。视差突变研究结果见图11。
- (b) 在高速运动的视频帧中，不管正负视差都会产生视觉不适（见图8），但实验结果表明负视差使人眼产生不适的效应更为显著。



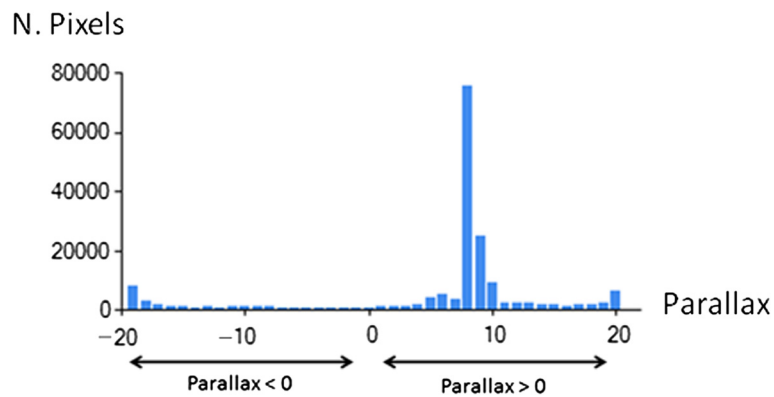


Figure 14 Example of parallax histogram corresponding to positive parallax image.

- (c) 在低速运动帧中，即使考虑到高变化度的影响，人眼的汇聚和适应的次数也显得更高。
- (d) 伴随不同负视差物体的不同运动的画面很难同时聚焦（见图8），例如图4所示，在名为‘Itaca’的视频帧中，一个标志在旋转，同时一个飞船正飞向观察者。观察者对此视频帧的评价表示他们很难同时聚焦这两个物体，因为二者具有不同的负视差。

第二小节(Section 4.2)将静态图的研究推广到视频序列，分析视频运动，以及通过景深图推导出视差的存在时，景深对视频质量的影响。同时，一些兼具景深和运动特性的场景也有涉及到。

4.1 基于景深直方图的静态图像质量分析

在解析立体画面的真实性时，需要判断其是否会产生视觉不适。开发出的工具通过计算景深图来获取视差信息。

首先，将景深图与舒适区进行比较以判断其是否在舒适区范围之外。汇聚-调节冲突需要被限制在舒适区以内，以免产生视觉不适。

为评价差异程度的影响，有必要了解左右像素差异程度和实际视觉深度的关系。汇聚距离由几个不同的因素决定，例如图像分辨率、屏幕大小、屏幕到人眼的距离等。

4 工作实施

在这一节，工作进展分两小节叙述。

第一小节(Section 4.1)详细介绍了一些工具，这些工具专为获取景深直方图、计算每个独立帧的质量损耗而开发。基于上一节总结的研究成果，我们制定了一些用于量化某些因素对人眼舒适的影响的方法。

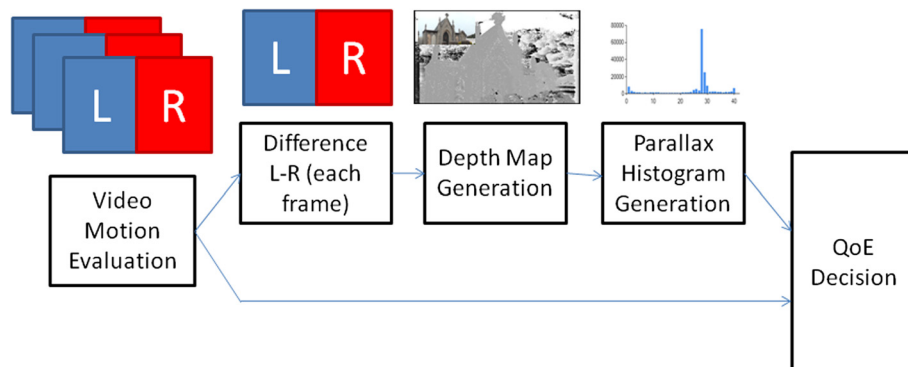
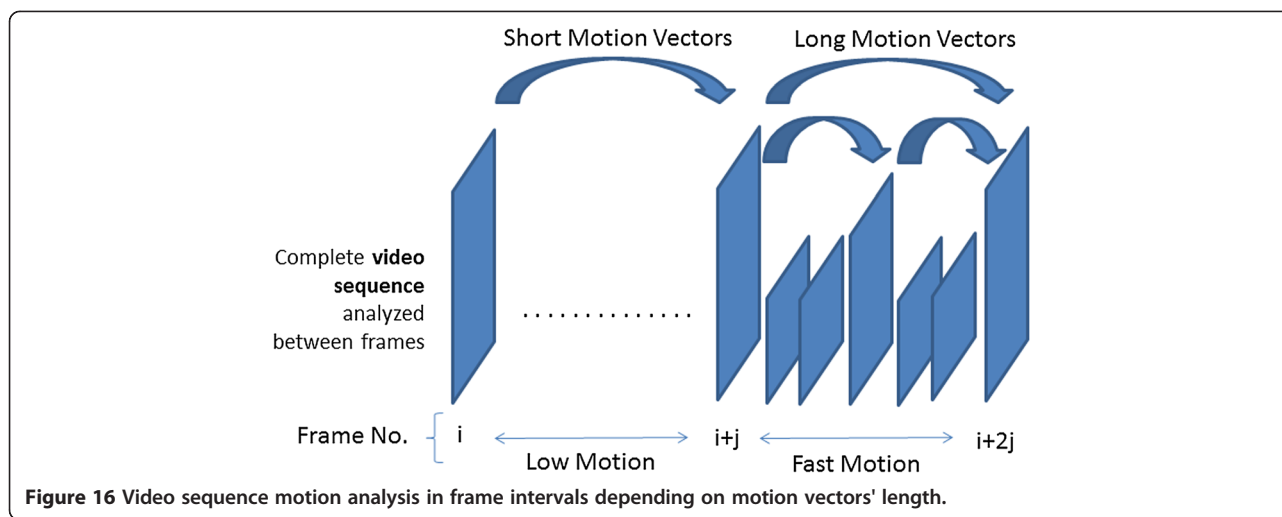


Figure 15 Scheme of QoE decision algorithm.



观测者到屏幕的距离大约为2.4米。按照ITU P.910 的建议[7], 这个距离在高画质情况下被认为是舒适的。在这些参数下, Shibata舒适区的范围为 $[-125, 107]$, 单位为像素。算法找到的任何在此范围之外的物体都应该被认为是产生不适感的原因。注意当上述参数有所变化时, 算法也应稍作调整。

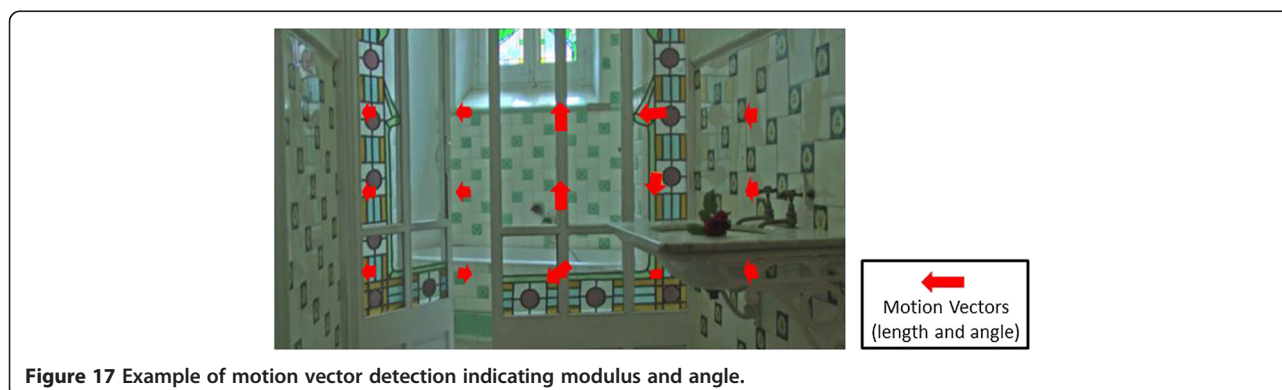
另一个要测量的特征, 也是经常被认为是导致视觉不适的原因, 是窗口侵入。当一个物体具有负视差, 且不完全在画面内, 因而在画面边缘被切断时, 就产生了窗口侵入。物体具有负的视差, 就应该在画面之外, 也就是说画面边缘不应该被遮挡, 否则就会产生景深信息不连续的情况。

为测量这个特征, 算法会计算深度图的极限以寻找负视差, 然后将其作为视觉不适的因素进行计算。由于画面边缘的像素差异难以计算, 选择最边缘的10行 (或列) 像素作为一组进行分析, 以判断是否产生窗口侵入。图像12演示了算法的计算过程。

4.2 景深图计算

为了从立体图像计算出景深图, 系统执行了一个基于SAD的算法。如前所述, 其他算法可能更强大, 但需要耗费太多计算量。我们需要知道一个场景大致上的景深信息以及其演化过程, 但我们并不需要知道精确到像素的景深信息。基于SAD的算法能够满足我们的要求而且也不需要耗费额外的计算量。

基于SAD的算法的最大缺点是在计算同质区域时, 它区分左右图像的相似区域的能力太差。为减轻这种可能的错误, 本系统在左右眼之间执行一次差异计算, 以便只对画面中内容不同的区域进行景深计算, 减少画面上的同质区域, 进而减少计算景深图时的噪声数据。被丢弃的像素点不参与计算。这样景深直方图会包含更少的数据, 但同时也更精确。



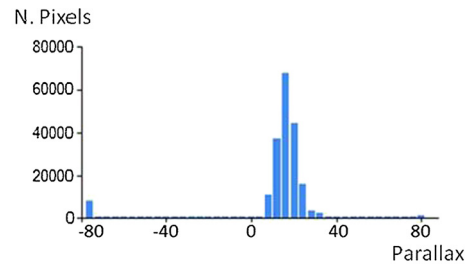
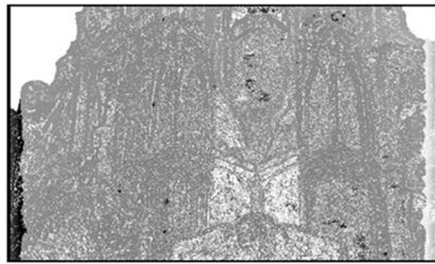


Figure 18 Church depth map and histogram.

图13展示了原始景深图（左）和过滤掉同质区域后的景深图（右）。在原始图像中，在背景区域里面存在一些错误信息，因为天空是同质区域。在右图中，这片区域未被计算在内，因此不会影响整体的景深分布。

图14展示了上述景深图的直方分布图，所有的元素都具有正视差，计算结果中存在一小部分负视差，这是由于算法本身导致的计算结果存在噪音。

4.3 基于景深-运动的体验质量决策算法

在3D立体视频中，涉及高视差范围，视频画面中同时存在正视差和负视差时，运动是评价其视觉质量的一个关键因素。

计算体验质量的步骤如下所述：首先，对整个视频序列进行处理，获取运动矢量，以找出场景转变。找到场景转变位置后，独立出每个场景进行处理，对每段连续视频帧计算运动矢量，由此得出此段场景的运动级别。

根据运动级别的不同，每个独立场景分类为低、中、高运动场景。将场景按运动级别分类有助于避免不必要的计算，比如计算高速变化帧的景深变化，或者计算低速变化帧中相似连续视频帧的差异。这样做有助于缩减计算时间。

在找出关键帧（一帧或多帧）之后，为简化计算，对关键帧取左右画面的差异图作为蒙版进行景深图的计算。景深图的计算方法见上一节静态图像所述。对比关键帧的视差直方图，可以得出关键帧中物体的景深变化数据，进而量化观看视频时产生视觉不适的可能性。

最终的体验质量决策算法对立体视频的几种视觉不适源头分别进行分析，计算每一种视觉不适诱因产生的可能，并给出相应的预测和指南(图15)。

涉及到的视觉不适诱因有如下几种：检测到窗口侵入的概率、检测到帧间突变的概率、检测到高度负视差画面的概率、对视觉不适的影响程度。体验质量可以由如下公式计算：

$$QoE = \alpha_1 p \text{ (WV)} + \alpha_2 p \text{ (Abrupt transition)} + \alpha_3 p \text{ (High NP)}. \quad (1)$$

公式(1)中的 ' p ' 表示事件发生的概率， α_i 是与运动和视差分布相关的常量。

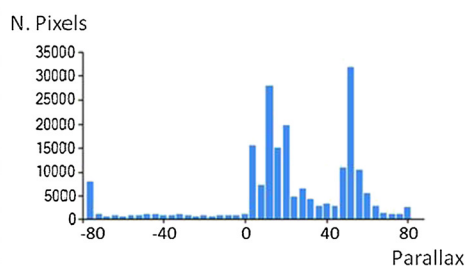
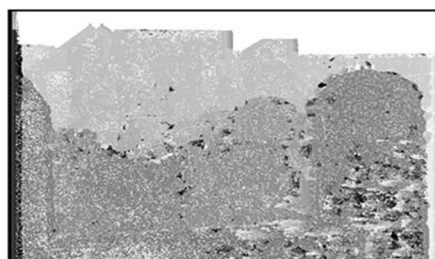


Figure 19 Cemetery depth map and histogram.



Figure 20 Library depth map and histogram.

4.3.1 运动矢量和运动评估

从静态图的处理数据推导出的结论是与运动相关的。为确定这种运动对视频的第三个维度的影响程度，有必要对视频进行运动程度的分级。为此就要计算视频的运动矢量。

整个视频帧被分段分析以检测视频运动和关键帧。在低运动级别的视频帧中，连续的视频画面被认为具有相同的景深图。另一方面，在中水平和高运动级别的视频帧中，需要计算更多的景深图以比对结果。

如图16所示，取间隔指定帧(图中间隔的帧数为‘ j ’)的两个视频帧，计算运动矢量的变化幅度和平均长度。如果矢量长度的变化在运动矢量中相对较小，则认为其是低运动级别或是静态的视频帧。因此，对此段视频帧的处理按照4.1节所述进行。运动矢量取有效运动矢量的平均值（不包括被丢弃的不连续帧），其总是与运动长度的变化范围相关：

$$\text{Motion}_{\text{frame}i} = |\text{Average}(|\text{MV}|_{\text{frame}i})| \quad (2)$$

对于运动矢量的计算，只有左半边画面被考虑在内。在画面上创建一个网格以检测块间的运动。在图17的例子中，一个三横五竖的网格被用来获取15个不同的运动矢量。尝试在下一帧的左半边画面搜索大小在 9×9 和 15×15 像素的相同像素块；同质区域被丢弃以避免噪声。运动必须在距离上合理，因此矢量模在两倍平均值以上的矢量同样被丢弃。公式(2)的目的在于将视频帧间变化依据运动水平归为四类：静态、低速、中速、高速。

最后一类是指发生转场的情况，转场的前一帧、后一帧都应该进行处理。这是一个运动矢量突变的具体情形，此时的运动矢量的模甚至比高速运动的视频帧更大。

从观测者的反馈来看，在正/负视差环境中，负视差的突变会导致观测者的眼睛产生很大的视觉不适感：

$$\text{Discomfort} = \left| \text{Average}(|P < 0|_{\text{frame}i}) - \text{Average}(|P < 0|_{\text{frame}(i+n)}) \right| > 10\% \quad (3)$$

公式(3)定义了负视差突变时的视觉不适，其中 $P < 0$ 对应实际视频帧‘ i ’的负视差，‘ n ’是两个视频帧的距离。

不适只发生于正视差的大幅变化，甚至在低速和中速运动视频帧中也是如此，而在高速运动视频帧中更甚。



Figure 21 Table depth map and histogram.

Table 1 Histogram variances

Image	Positive variance (pixels)	Negative variance (pixels)
Church	10	-
Cemetery	19.6	-
Library	12.8	23.2
Table	15.6	16.4

5 测试结果

基于主观评价的结果，我们发展了静态立体图像和立体视频的客观度量 and 研究。

5.1 基于景深直方图的静态立体图像质量

实验分为两组。首先，不考虑运动的影响，对静态图进行研究以得出其它立体特征。这些实验专注于研究舒适区测量、窗口侵入、景深分布。

为评价舒适区之外的视差影响，我们生成了如图3之类的虚拟立体图。当强制让差异落在Shibata舒适区附近时，即使考虑到多达70%的差异都落在舒适区以内，观测者的视觉感受都是消极的。为保险起见，阈值设定为2/3的舒适区。此外，汇聚-调节冲突似乎是不可解决的，或者说至少是需要花费相当长的时间去解决。这个与时间相关的影响将在后面子章节提到。在舒适区外，算法很容易通过合成的视差直方图判断出异常。

其他一些静态图像用于量化窗口侵入的影响。在图像序列中，图中文字在旋转，偶尔有文字超出画面边界。由于文字具有负视差，它不应该触碰到边缘。从测试结果可以看出，当20%以上的边界被负视差的像素填充时，窗口侵入的影响就难以被克服。再次，我们可以通过景深图计算画面边缘的负视差像素，由此检测到窗口侵入。

最后一个静态图实验是关于体验感的而不是关于不适感的。在这个实验中，一组图片被按照立体感强弱进行排序，排序结果与它们的景深直方图进行比较。图18, 19, 20, 21展示了测试图片的景深图和直方图。表1是所有图片中的变量的数据。注意直方图中坐标-80处总是出现一个峰值，这是算法导致的数据噪声，不被考虑在内。

当问及教堂和公墓两张图片的立体感受时，观测者倾向于认为后者更佳，因为其景深分布更广。它们在数据上有着更加大的正视差变化范围。图书馆和桌子是观测者普遍喜欢的图片，桌子尤甚。因为它们都有广泛的景深覆盖，正视差到负视差都有覆盖。

主观评价测试的结论表明，视差的分布，尤其是负视差的分布，是不适感的一个主要源头，但同时也是产生立体感受的一个要素，因此在这二者之间必须要找到一个折衷。我们开发的工具在景深数据分析上确定了这些特征，同时也使我们确信这个系统适用于基于客观静态图像分析的立体体验质量检测。

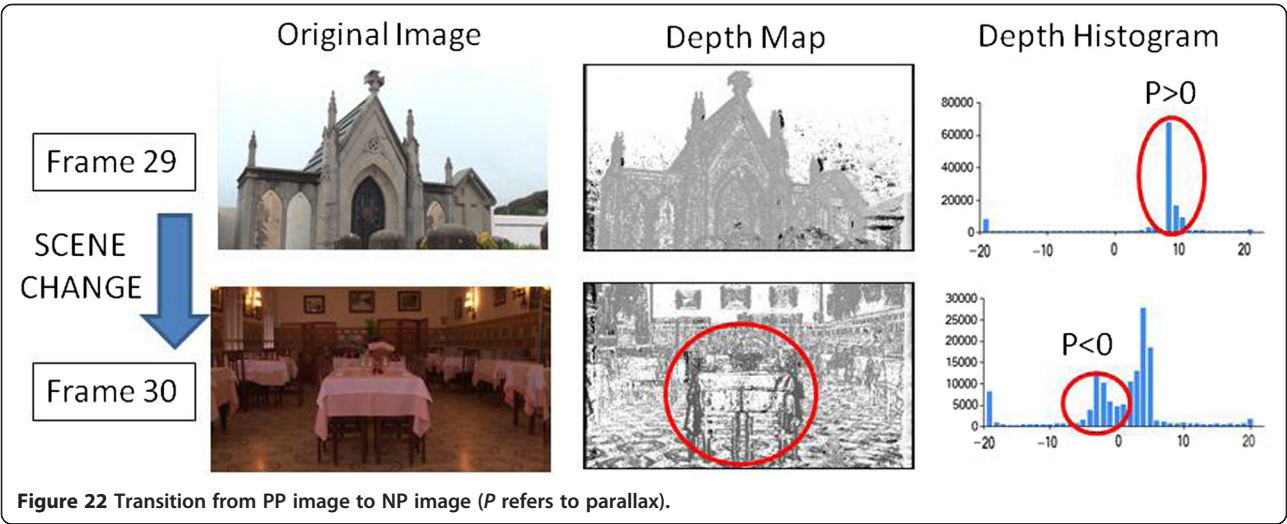


Table 2 Positive and negative parallax from histogram analysis from sequence Modernism

Frame	Positive parallax (% pixels)	Negative parallax (% pixels)
29	44.26	2.60–
30	31.58	18.15

5.2 景深和运动对视频质量的影响

首先，我们分析了在高正视差变化的环境下，负视差场景变化的影响。如图22，景深图和直方图以及其他数据被计算以检测场景转换。关于景深直方图的数据见表2。

第29帧到下一帧的负视差变化超过15%，考虑到第29帧负视差比例几乎为0，正视差占比达到25%之多，因此这意味着此处很可能检测到视觉不适。这符合受试者在主观测试中的体验，认为需要花费时间去聚焦到负视差区域。在其他负视差变化达到10%的场景变化处，能得到同样的结论。关于高视差变化的运动研究也能得到类似结论。

在运动矢量显示出物体移动速度超过2像素每帧时，就能检测到高速运动。在图23对运动的描述中，正视差和负视差占比被并列展示。值得注意的是，负视差的突然升高没有导致视觉不适的可能性增大，因为环境视差变化和运动也是必要的。当运动速度较快时，不适感出现的概率才会更大。

6 结论

景深和运动是影响观影体验的主要因素。在观看立体视频时，关于景深图和运动矢量的信息有助于避免观看者产生视觉不适和疲劳。

主观评价有助于我们独立出需要检测的主要特征，进而将观看者的主观感受作为依据，设计出良好的算法作为客观评价系统。

从景深图和景深分布直方图以及视差分布得出的信息是我们最终决定用于质量评价算法的主要自变量。

在静态图上出现负视差物体时，以及高速运动的视频帧包含此图像时，就应该量化其对观看者造成不适的概率。在比较视差和运动的图形中，决定用户的最终体验的两个参数之间的关系是显著变化的。

关于舒适区的早期研究发现了运动和观看时常对舒适区的较大影响，导致舒适区显著缩小。

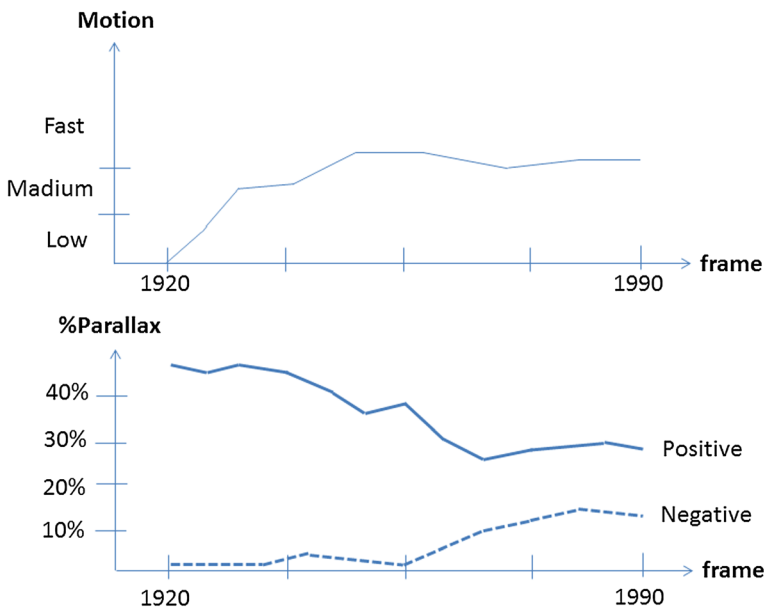


Figure 23 Evolution of motion and parallax percentage between frames 1920 and 1990 from the sequence Modernism.

已被证明的是, 在快速运动或高视差范围画面中, 视差落在舒适区边缘 (尤其是负视差) 是难以忍受的。

在将上述技术应用于检测视频帧所包含的可能引起人眼不适的内容时, 前述实验得出了良好的结果。对几组不同的视频序列应用算法时都得到良好的结果, 因而证明算法是有效的。

实验结果可以为立体视频的创建提供指导性意见, 提取出产生视觉不适和疲劳的概率, 并能与观看者实际立体感受和舒适感一致。然而, 在本文中, 内容提供者和使用者的同意某些特定内容的最终决定权。

Competing interests

The authors declare that they have no competing interests.

Acknowledgements

This paper is based on work performed in the framework of the project 3D-Contournet with research in techniques to assess the quality of stereoscopic video. The work is also related to Immersive TV public funding project, headed by Indra Company and in collaboration with Mediapro, with the objective of developing an immersive environment with the use of CAVE and stereoscopic screens, and by the project TEC2012-38402-C04-01 HORFI, as well. We would like to acknowledge Jordi Alonso and people from Mediapro for lending 3D stereoscopic video contents with variations of parallax, which are available for the test development.

Received: 31 March 2013 Accepted: 15 November 2013
Published: 1 December 2013

References

- P Le Callet, S Moller, A Perkins, Qualinet white paper on definitions of quality of experience (2012). European Network on Quality of Experience in Multimedia Systems and Services (COST Action IC 1003), version 1.2, (Qualinet, Lausanne, 2013)
- Z Wang, AC Bovik, L Lu, Why is image quality assessment so difficult? *IEEE Int. Conf. Acoust., Speech, Signal Process.* **4**, 3313–3316 (2002)
- S Winkler, *Digital video quality: vision models and metrics* (Wiley, Hoboken, New Jersey, USA, 2005)
- HR Wu, KR Rao, *Digital Video Image Quality and Perceptual Coding (Signal Processing and Communications)* (CRC, Taylor and Francis Group, London, 2005)
- Z Wang, A Bovik, *Modern Image Quality Assessment (Synthesis Lectures on Image, Video, & Multimedia Processing)* (Morgan & Claypool, San Rafael, CA, USA, 2006)
- ITU-R. Recommendation ITU-R BT.500-11, standardization sector of ITU, 2002. *Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures*, 2002
- ITU-T P.910. Recommendation Telecom. Standardization Sector OF ITU *Subjective video quality assessment methods for multimedia applications*, 2008
- JA Rodrigo, D Jiménez, JM Menéndez, *Real-Time 3-D HDTV Depth Cue Conflict Optimization*, in *2011 IEEE International Conference on Consumer Electronics ICCE, Berlin*, 2011
- YJ Jung, H Sohn, S-I Lee, F Speranza, YM Ro, Visual importance- and discomfort region-selective low-pass filtering for reducing visual discomfort in stereoscopic displays. *IEEE Trans Circ Syst Video Tech* **23**(8), 1408–1421
- P Hanhart, F De Simone, T Ebrahimi, *Quality assessment of asymmetric stereo pair formed from decoded and synthesized views*, in *2012 Fourth International Workshop on Quality of Multimedia Experience (QoMEX)* (Yarra Valley, 2012), pp. 236–241
- E Bosc, R Pepion, P Le Callet, M Koppel, P Ndjiki-Nya, M Pressigout, L Morin, Towards a new quality metric for 3-D synthesized view assessment. *IEEE J. Sel. Top. Signal Process.* **5**(7), 1332–1343 (2011)
- W Chen, J Fournier, M Barkowsky, P Le Callet, *Quality of experience model for 3DTV*, in *Proceedings of the SPIE 8288, Stereoscopic Displays and Applications XXIII* (Burlingame, 2012)
- T Wa James, F Speranza, S Yano, K Shimono, H Ono, Stereoscopic 3D-TV: visual comfort, broadcasting. *IEEE Trans.* **57**(2), 335–346 (2011)
- F Speranza, WJ Tam, R Renaud, N Hur, Effect of disparity and motion on visual comfort of stereoscopic images. *Proc. of SPIE* **6055**, 94–103 (2006)
- YJ Jung, S Lee, H Sohn, HW Park, YM Ro, Visual comfort assessment metric based on salient object motion information in stereoscopic video. *J. Electron Imaging* **21**(1) (2012)
- C Richardt, L Swirski, IP Davies, NA Dodgson, Predicting stereoscopic viewing comfort using a coherence-based computational model, in *Proceedings of the International Symposium on Computational Aesthetics in Graphics, Visualization, and Imaging* (ACM, New York, 2011), pp. 97–104
- J Li, M Barkowsky, P Le Callet, *The influence of relative disparity and planar motion velocity on visual discomfort of stereoscopic videos*, in *Proceedings of the International Workshop on Quality of Multimedia Experience QoMEX* (Mechelen, Belgique, 2011), pp. 1–6
- J Li, M Barkowsky, P Le Callet, *Visual discomfort is not always proportional to eye blinking rate: exploring some effects of planar and in-depth motion on 3DTV QoE*, in *Proceedings of VPQM 2013* (États-Unis, Scottsdale, 2013), pp. 1–6
- C Sang-Hyun, K Hang-Bong, *Subjective evaluation of visual discomfort caused from stereoscopic 3D video using perceptual importance map*, in *IEEE Region 10 Conference, TENCN 2012* (Cebu, 2012), pp. 1–6
- T Kun-Lung, H Wei-Jia, L An-Chun, H Wei-Hao, Y Yin-Chun, C Wen-Chao, *Automatically optimizing stereo camera system based on 3D cinematography principles*, in *3DTV-Conference: The True Vision - Capture, Transmission and Display of 3D Video (3DTV-CON)* (Zurich, 2012), pp. 1–4
- W Chen, J Fournier, M Barkowsky, P Le Callet, *New stereoscopic video shooting rule based on stereoscopic distortion parameters and comfortable viewing zone. Paper presented at the stereoscopic displays and applications XXII* (San Francisco, California, 2011), pp. 786310–786313
- AS Percival, The relation of convergence to accommodation and its practical bearing. *Opthalmol. Rev.* **11**, 313–328 (1892)
- T Shibata, J Kim, DM Hoffman, MS Banks, The zone of comfort: predicting visual discomfort with stereo displays. *J. Vision* **11**, 1–28 (2011)
- MS Banks, JCA Read, RS Allison, SJ Watt, Stereoscopic and the human visual system. *SMPTE Motion Imaging J.* **121**, 24–43 (2012)
- P Leclercq, J Morris, *Assessing stereo algorithm accuracy*, in *Proceedings of Image and Vision Computing, IVCNZ '02* (, Auckland, 2002)
- P Leclercq, J Morris, *Robustness to Noise of Stereo Matching*, in *Proceedings of 12th International Conference on Image Analysis and Processing* (Mantova, Italy, 2003)
- D Scharstein, R Szeliski, A Taxonomy and Evaluation of Dense Two-Frame Stereo Correspondence Algorithms. *Int. J. Comput. Vis.* **47** (2002)
- The Middlebury Database - Stereo Evaluation (version 2)*. <http://vision.middlebury.edu/stereo/eval/>
- Y Miyajima, T Maruyama, *A real-time stereo vision system with FPGA*, in *Proceedings of the 30th Conference of IEEE Industrial Electronics Society* (Lisbon, 2003)
- J Yi, J Kim, L Li, J Morris, G Lee, P Leclercq, Real-time three dimensional vision. *Lect. Notes Comput. Sci* **3189**, 309–320 (2004)
- S Lee, J Yi, J Kim, Real-time stereo vision on a reconfigurable system. *Lect. Notes Comput. Sci* **3553**, 299–307 (2005)
- K Ambrosch, M Humenberger, W Kubinger, A Steiner, *SAD-based stereo matching using FPGAs, embedded computer vision, part II* (Springer, Dordrecht, 2009)
- R Zabih, J Woodfill, *Non-parametric local transforms for computing visual correspondence*, in *Proceedings of 3rd European Conference on Computer Vision* (Stockholm, 1994), pp. 150–158
- A Wilson, Census transform brings stereo to embedded systems, *OptolQ. Walling, Fran, Vision Systems Design* **11**(9), 14 (2006)
- B Cynagsek, *Adaptive window growing technique for efficient image matching* (Technical Report (AGH-University of Science and Technology, Krakow, 2004)
- J Woodfill, B Von Herzen, *Real-time stereo vision on the PARTS reconfigurable computer*, in *Proceedings of the 5th IEEE Symposium on FPGAs for Custom Computing Machines* (Napa Valley, 1997)
- S Jin, J Cho, X Pham, K Lee, S-K Park, M Kim, J Jeon, FPGA Design and Implementation of a Real-Time Stereo Vision System. *IEEE Trans. Circ. Syst. Video Tech.* **20**(1), 15–26 (2010)

38. NY-C Chang, T-H Tsai, B-H Hsu, Y-C Chen, T-S Chang, Algorithm and architecture of disparity estimation with mini-census adaptative support weight. *IEEE Trans. Circ. Syst. Video Tech.* **20**(6), 792–805 (2010)
39. X Mei, X Sun, M Zhou, S Jiao, H Wang, X Zhang, On building an accurate stereo matching system on graphics hardware, *Computer Vision Workshops (ICCV Workshops), 2011 IEEE International Conference on*, vol., no., pp.467,474, 6–13 Nov. 2011, Barcelona, Spain
40. S Chambon, A Crouzil, Combination of correlation measures for dense stereo matching, in *International Joint Conference on Computer Vision Theory and Applications, VISAPP* (France, 2011)
41. Y Nojiri, H Yamanoue, S Ide, S Yano, F Okana, Parallax distribution and visual comfort on stereoscopic HDTV, in *Proceedings of IBC* (, Lisbon, 2006), pp. 373–380
42. Professional 46-inch 3D display monitor GD-463D10U. http://pro.jvc.com/prof/attributes/features.jsp?model_id=MDL101867 Accessed April 2009
43. E Winkler, On the properties of subjective ratings in video quality experiments, in *Proceedings of the International Workshop on Quality of Multimedia Experience (QoMEX)* (San Diego, 2009)
44. EBU, EBU Test Sequences. <http://tech.ebu.ch/testsequences>. Accessed 20 May 2006
45. ITU-R, Recommendation BT.1428. Subjective assessment of stereoscopic television pictures (question ITU-R 234/11), 2001

doi:10.1186/1687-5281-2013-62

Cite this article as: López et al.: Stereoscopic 3D video quality assessment based on depth maps and video motion. *EURASIP Journal on Image and Video Processing* 2013 **2013**:62.

Submit your manuscript to a SpringerOpen[®] journal and benefit from:

- Convenient online submission
- Rigorous peer review
- Immediate publication on acceptance
- Open access: articles freely available online
- High visibility within the field
- Retaining the copyright to your article

Submit your next manuscript at ► springeropen.com
