**文献综述**

## 摘要

立体图像质量是评价立体图像处理系统的重要指标，因此立体图像质量评价（QA）方法是该领域的重要研究内容。立体图像质量评价方法包括主观评价方法和客观评价方法，其中主观评价方法虽然可靠，但是无法实时操作，因而需要建立客观评价模型，主观评价方法为客观评价模型的建立奠定了基础。文中介绍了当前立体图像质量客观评价模型的特性，发现目前更多的客观评价模型将重点转移到视觉感知和自然场景统计的模型建立上。最后展望了立体图像质量评价的发展趋势。

关键词：立体图像质量评价；主观质量评价；客观评价模型；视觉感知；自然场景

## 1 引言

近年来，人类使用的3D图像和视频的数量急剧增加，越来越多的3D播放设备出现在我们的生活中。为了应对3D内容的快速增长和广泛应用，保持和提高3D视觉内容的用户体验质量成为了新的挑战[1]。虽然在有关2D图像质量评价的研究领域已经有了很多发现，但是立体图像质量评价要比2D图像质量评价复杂得多。3D内容的附加维度（深度或差异）的出现带来了一些重要的问题[1]。首先，观察者可能在观看3D内容时产生双目竞争，这可能会影响对3D内容的感知质量[2]-[5]。此外，深度感觉的感知质量可能涉及到深度质量，2D质量和3D质量的相互作用[6]，[7]。最后，不正确的立体摄影技术引起的视觉不适和疲劳等[8]，[9]也可能对立体图像的观看体验造成负面影响。以上以及其他成为了立体图像质量评价（QA）进展缓慢的重要原因。

立体图像质量评价方法主要包括主观评价方法和客观评价方法。主观评价方法通过观察者直接观察并对图像进行评定，其结果也最符合人眼对图像质量的感知特性因而较为可靠。但是主观评价方法耗时、枯燥且无法实时操作，因而需要合理的客观评价方法。客观评价方法利用主观实验得到的视觉感知特性，设计数学模型得到待测试图像的质量分数。客观评价方法摆脱了主观评价方法的缺陷，具有速度快、易实现、可嵌入等优点，但是和主观评价结果存在一定误差。由于种种因素，立体图像质量评价工作在主观感知评价领域取得了一定的进展，但是客观评价模型的发展较为缓慢，且一般采取从平面图像质量评价模型扩展到立体图像客观评价模型的方法。如何利用这些方法，并结合立体图像本身的感知特性，是立体图像质量评价方法研究的关键。

本文首先简单讨论了立体图像的主观评价方法。接下来，重点介绍目前常见的立体图像客观评价模型。最后，对立体图像质量评价的未来发展趋势进行展望。

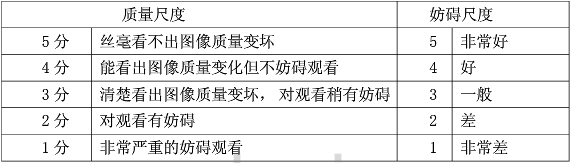
## 2 立体图像质量的主观评价方法

随着对立体图像质量评价研究的逐渐深入，国际电信联盟（ITU）制订了3DTV（Three-Dimensional Television）的主观实验测试方法[10]。加拿大CRC实验室的Tam和Stelmach首先对左右视点质量与立体图像质量之间的相关性进行了初步探索性实验[11]。结果表明：当左右视点质量存在一定差异时，立体图像总质量大概为左右视点质量的均值；当左右视点质量都很好时，立体图像质量低于左右视点质量的均值，这主要是由于人的双目竞争造成的。

在进行主观评价时，要注意以下4个方面：（1）实验素材的选择：带评测内容选择是否恰当直接关乎实验数据的准确性。主观质量评价还需要考虑图像处理的底层技术，诸如失真等其他因素也应该被考虑到实验中。（2）观察者的选择：根据评估目标的不同，观察者可以分为专家或非专家。专家具有图像相关领域知识，非专家则不具备图像领域的知识。在进行正式测试之前，还要对观察者进行测试培训，以便让他们清楚测试流程。（3）显像技术：显像技术的选择从根本上影响着空间/时间分辨率、串扰级别、舒适观看位置等因素，这些因素都应被考虑到主观评价实验中。（4）观测环境：观测环境的布置、待测图像的内容、显示器的选择三者之间有着密切联系。

与平面图像的主观质量评价相比，立体图像主观质量评价需要考虑更多的因素，如深度感知、视觉舒适度等。虽然立体图像与平面图像之间存在很大的差异，但由于对以上因素的度量尚无公认标准化的方法，所以现阶段立体图形质量的主观评价方法与平面图像的主观评价方法大致相同。表1给出了国际上规定的主观质量评价的5级绝对尺度，包括质量尺度和妨碍尺度。对于一般人来说，多采用质量尺度；而对于专业人员，则多采用妨碍尺度。

##### 表1 主观质量评价的绝对评价尺度



## 3 立体图像质量的客观评价方法

立体图像的质量评价不但要考虑单视点失真、左右视图失真，还要考虑图像的纹理和分辨率、立体显示装置、外界亮度变化、深度或视差信息等诸多因素。所以立体图像质量的客观评价模型研究是较为复杂的难题。结合2D图像的相关工作或许能给我们带来启发。

2D图像质量客观评价模型通常分为全参考（FR）质量评价、部分参考（RR）质量评价和无参考（NR）质量评价。相似的，我们将立体图像客观质量评价模型分为两类[1]。第一类[12]-[14]是基于2D图像的质量评价模型的3D质量评价模型，它不考虑对深度/视差信息的测量和计算。[12]，[13]中的方法是利用2D评价方法独立计算左右视图的质量分数，在通过其他方式将两个分数组合成预测的3D质量得分。Gorley等人[14]则通过计算两个视图上的SIFT[15]和RANSAC[16]提供的匹配特征点上的质量来得到相应的质量分数。实验结果表明对称编码质量较高。上述客观评价方法仍然被看作是2D评价方法的直接迁移，对于影响立体视觉感知质量的因素考虑较少，评价结果也不能完全符合人眼的主观感受，在一定程度上存在缺陷。但是研究2D评价方法和3D评价方法之间的相关性，也促进了立体图像质量客观评价方法的发展。

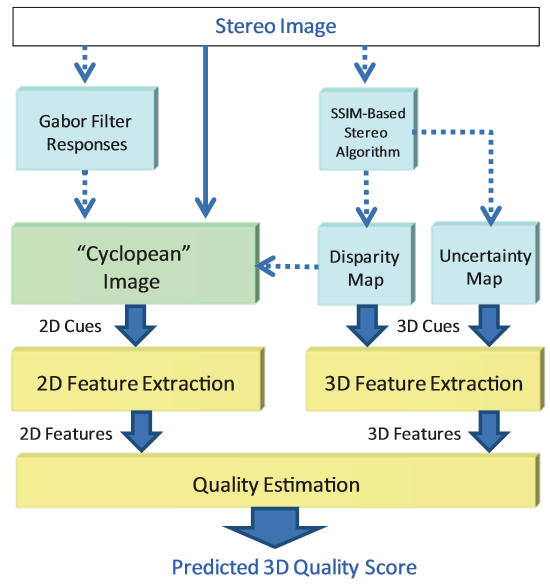
第二类模型则包含了某些视差信息，这也更加接近人类真实的立体视觉感知模型。Beniot等人[17]提出了一种3D全参考质量评价方法，它利用2D全参考质量评价的C4[18]，SSIM[19]方法来计算左参考和左失真图像、右参考和右失真图像、参考和失真视察图的质量分数，然后组合成3D质量评价分数。这个实验表明当使用SSIM算法时，视差信息对于改进3D质量评价方法有积极作用。这表明视差估计算法可能会影响到质量评价模型的性能。You等[20]进一步扩展了在立体图像和其视差图上应用2D质量评价方法来预测3D质量的想法。通过在立体图像和视差图上应用大量的2D全参考质量评价方法，发现在立体图像上应用SSIM方法并且在估计的视差图上应用平均绝对差（MAD）的方法使得模型具有较好的性能。与Beniot等人的工作不同，它们的基于SSIM的3D质量评价方法在其数据集上显著优于所有2D全参考质量评价模型。类似地，Yang等[21]提出了基于立体图像中两个视图的平均PSNR和左右视图之间的绝对差评价的模型，这种方法没有通过立体匹配计算左右视图的视差和深度信息。然而，以上研究没有一项能与针对人类观点的质量评价结果相比较。在[22]中，32名观察者观看了受到5种失真影响的200幅立体图像，结果表明，在这一过程中以上的3D质量评价算法的预测性能表现均不是很好，甚至与单独应用于立体图像的2D质量算法性能相当。

Maalouf等[23]提出了在单眼合成图像上执行质量评价的方法，单眼合成图像是由亮度和颜色图案在3D图像上叠加形成的3D感知[24]，[25]。Bensalma等[26]提出了一种3D质量评价算法，用于测量参考和测试立体图像对之间的双目能量差异，从而考虑了双眼视觉对3D质量感知的潜在影响。Chen等[27]提出了模拟双目效应的影响的3D全参考质量评价模型，并且表示对双目效应的影响进行建模表示可以在预测立体图像的主观质量时产生更好的效果。这个模型也是目前最基础的3D全参考质量评价模型，它通过正式对双目效应建模计算，并利用提取到的特征进行测试，使得双目竞争、双目抑制等与人类视觉感知模型相结合的因素融入到了3D图像的质量评价中。

目前对于有效的部分参考和无参考质量评价模型的建立仍然处于探索阶段。Hewage等[28]人提出了一种部分参考3D质量评价算法。在该方法中，我们从深度图中计算得到图像边缘，然后分析参考图像和测试图像的边缘图之间的PSNR来预测3D质量。另外，还有研究人员提出了3DTV中虚拟视点图像质量、立体图像中右视图图像质量的部分参考客观评价方法。而无参考3D质量评价方法起步较晚，但目前也已经有了一定进展。Akhter等[29]提出了一种无参考3D质量评价算法，它从立体图像中提取特征并生成估计的视差图，然后利用逻辑回归模型预测这些特征的3D质量分数。该模型采用了两个局部特征和8个参数，同时使用了两个数据库（I’RCCyN/IVC 数据库[30]和日本富士大学（MICT）实验室的立体图像库[31]）来验证该模型的有效性，但这些参数都是基于统计的，还有待进一步研究。Chen等[1]提出了一种基于SSIM算法的无参考3D质量评价模型（如图1所示），该模型利用基于SSIM算法的立体图像算法从左右视图中得到视差图和不确定图，并利用视差图得到单眼合成图像，最后在单眼合成图像上提取2D特征，在视差图和不确定图上提取3D特征，最后利用SVM得到待测图像的质量分数。

上述各种客观评价方法仍存在一些问题需要解决：有的方法易受图像内容的影响，没有充分结合人眼感知特性；有的没有充分考虑立体深度感知对立体图像质量的影响；有的方法只考虑了一些失真类型，通用性较差；有的方法中利用的视差图存在准确性问题等。因此，如何获得有效的立体图像质量客观评价模型仍是一个需要深入研究探讨的课题。

##### 图1 无参考3D质量评价模型



## 4 发展趋势展望

立体图像质量评价已经成为当前的一个研究热点，立体图像质量主观和客观评价方法的研究虽然取得了一定进展，但是还未形成较完整的方法体系。根据前文的叙述，以下几个问题仍是我们需要深入研究的：

1. 客观评价方法的目的是代替人眼给出图像质量的评价结果，所以在今后的评价算法中应该更多地考虑到人眼视觉感知系统的诸多特性。由于对于人眼立体图像感知特性的未知性，还需要通过大量的主观感觉实验进行人眼视觉生理学和心理学的研究。这些研究结果结合立体图像质量包含的深度感知、视差等信息，通过数学建模，最后可以形成较完善的客观质量评价模型。
2. 从人眼特性出发，采用自上而下或自下而上的评价方法，通过模拟人眼感知，将左右视图融合为一幅单眼图像，该图像与立体图像具有很强的相关性，从而有助于评价立体图像质量。
3. 立体图像的数据量很大，降低立体图像质量评价模型对参考图像的依赖程度，根据左右视图的特性，建立部分参考或无参考图像质量评价模型，将是一个重要的发展方向。

总之，在立体图像质量评价中，主观评价方法是客观评价模型的设计依据，最终目的是建立符合人眼视觉立体感知的客观评价模型，从而为立体图像、视频等内容的编码压缩、码率分配、错误隐藏、无线网络传输和虚拟视图绘制等提供实验依据。因此，建立一套高效简洁的立体图像质量客观评价体系具有十分重要的现实意义。

## 参考文献

[1] M.-J. Chen, L. K. Cormack, and A. C. Bovik, “No-Reference Quality Assessment of Natural Stereopairs”, IEEE Trans. Image. Process, vol. 22, no. 9, Sep. 2013.

[2] P. Seuntiens, L. Meesters, and W. Ijsselsteijn, “Perceived quality of compressed stereoscopic images: Effects of symmetric and asymmetric JPEG coding and camera separation,” ACM Trans. Appl. Percept., vol. 3, no. 2, pp. 95–109, Apr. 2006.

[3] D. V. Meegan, L. B. Stelmach, and W. J. Tam, “Unequal weighting of monocular inputs in binocular combination: Implications for the compression of stereoscopic imagery,” J. Experim. Psychol., Appl., vol. 7, no. 2, pp. 143–53, Nov. 2001.

[4] W. J. Tam, L. B. Stelmach, and P. J. Corriveau, “Psychovisual aspects of viewing stereoscopic video sequences,” Proc. SPIE, vol. 3295, pp. 226–235, Jan. 1998.

[5] M.-J. Chen, A. C. Bovik, and L. K. Cormack, “Study on distortion conspicuity in stereoscopically viewed 3D images,” in Proc. IEEE 10th IVMSP Workshop, Jun. 2011, pp. 24–29.

[6] M.-J. Chen, D.-K. Kwon, and A. C. Bovik, “Study of subject agreement on stereoscopic video quality,” in Proc. IEEE Southwest Symp. Image Anal. Intervent., Apr. 2012, pp. 173–176. [7] W. Chen, J. Fournier, M. Barkowsky, and P. Le Callet, “Quality of experience model for 3DTV,” Proc. SPIE, vol. 8288, pp. 1–9, Mar. 2012.

[8] M. T. M. Lambooij, W. A. Ijsselsteijn, and I. Heynderickx, “Visual discomfort in stereoscopic displays: A review,” Proc. SPIE, vol. 6490, p. 17, Apr. 2007.

[9] W. J. Tam, F. Speranza, S. Yano, K. Shimono, and H. Ono, “Stereoscopic 3D-TV: Visual comfort,” IEEE Trans. Broadcast., vol. 57, no. 2, pp. 335–346, Apr. 2011.

[10] ITU, Recommendation BT1438. Subjective assessment of stereoscopic television pictures [S], 2000.

[11] W. J. Tam, L. B. Stelmach, “Stereoscopic image coding: Effect of disparate image-quality in left- and right-eye views[J],” Proc. SPIC, vol. 14(1-2):111-117, 1998.

[12] S. L. P. Yasakethu, C. T. E. R. Hewage, W. A. C. Fernando, and A. M. Kondoz, “Quality analysis for 3D video using 2D video quality models,” IEEE Trans. Consum. Electron., vol. 54, no. 4, pp. 1969–1976, Nov. 2008.

[13] C. T. E. R. Hewage, S. T. Worrall, S. Dogan, and A. M. Kondoz, “Prediction of stereoscopic video quality using objective quality models of 2-D video,” Electron. Lett., vol. 44, no. 16, pp. 963–965, Jul. 2008.

[14] P. Gorley and N. Holliman, “Stereoscopic image quality metrics and compression,” Proc. SPIE, vol. 6803, p. 5, Feb. 2008.

[15] D. Lowe, “Object recognition from local scale-invariant features,” in Proc. 7th IEEE Int. Conf. Comput. Vis., vol. 2. Sep. 1999, pp. 1150–1157.

[16] M. A. Fischler and R. C. Bolles, “Random sample consensus: A paradigm for model ﬁtting with applications to image analysis and automated cartography,” ACM Commun., vol. 24, no. 6, pp. 381–395, Jun. 1981.

[17] A. Benoit, P. Le Callet, P. Campisi, and R. Cousseau, “Quality assessment of stereoscopic images,” EURASIP J. Image Video Process., vol. 2008, pp. 1–13, Jan. 2009.

[18] M. Carnec, P. Le Callet, and D. Barba, “An image quality assessment method based on perception of structural information,” in Proc. IEEE Int. Conf. Image Process., vol. 3. Sep. 2003, pp. 185–193.

[19] Z. Wang, E. P. Simoncelli, and A. C. Bovik, “Multiscale structural similarity for image quality assessment,” in Proc. Conf. Rec. 37th Asilomar Conf. Signals, Syst. Comput., vol. 2. Nov. 2003, pp. 1398–1402.

[20] J. You, L. Xing, A. Perkis, and X. Wang, “Perceptual quality assessment for stereoscopic images based on 2D image quality metrics and disparity analysis,” in Proc. Int. Workshop Video Process. Qaulity Metrics Consum. Elect., 2010, pp. 1–6.

[21] J. Yang, C. Hou, Y. Zhou, Z. Zhang, and J. Guo, “Objective quality assessment method of stereo images,” in Proc. Transmiss. Display 3D Video 3DTV Conf., True Vis., Capture, May 2009, pp. 1–4.

[22] A. K. Moorthy, C.-C. Su, A. Mittal, and A. C. Bovik, “Subjective evaluation of stereoscopic image quality,” Signal Process., Image Commun., 2012.

[23] A. Maalouf and M.-C. Larabi, “CYCLOP: A stereo color image quality assessment metric,” in Proc. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech Signal Process., May 2011, pp. 1161–1164.

[24] B. Julesz, Foundations of Cyclopean Perception.. Chicago, IL, USA: Univ. Chicago Press, 1971.

[25] W. J. M. Levelt, On Binocular Rivalry. The Hague, The Netherlands: Mouton, 1968.

[26] R. Bensalma and M.-C. Larabi, “A perceptual metric for stereoscopic image quality assessment based on the binocular energy,” Multidimensional Syst. Signal Process., vol. 24, no. 2, pp. 281–316, Feb. 2012.

[27] M.-J. Chen, D.-K. Su, C.-C. Kwon, L. K. Cormack, and A. C. Bovik, “Full-reference quality assessment of stereopairs accounting for rivalry,” in Proc. Asilomar Conf. Signals, Syst. Comput., Nov. 2012, pp. 1–5.

[28] C. Hewage and M. Martini, “Reduced-reference quality metric for 3D depth map transmission,” in Proc. Transmiss. Display 3D Video 3DTV Conf., True Vis., Capture, Jun. 2010, pp. 1–4.

[29] R. Akhter, J. Baltes, Z. M. Parvez Sazzad, and Y. Horita, “Noreference stereoscopic image quality assessment,” Proc. SPIE, vol. 7524, p. 75240T, Feb. 2010.

[30] P. Campisi, P. L. Callet, E. Marini, “Stereocopic images quality assessment,” in 15th.Eruopean signal processing Conf., Sep. 2007, pp. 2109-2114.

[31] Z. M. Parvez, S. Yamanaka, Y. Kawayoke, Y. Horita, “Stereocopic image quality prediction,” Proc. IEEE QoMEX, Jul. 2009, pp. 180-185.