

基于仿视觉细胞模型的立体图像质量评价方法

薛小波 郁 梅 何美伶

宁波大学信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211

摘要 在观看立体图像时,人类视觉系统(HVS)以人眼视网膜细胞为媒介接收、传输和理解双目信息,基于此提出了一种仿视觉细胞模型的立体图像质量评价(SIQA)方法。以视网膜细胞特性为基础,模仿 HVS 对简单细胞和复杂细胞进行建模;双目信息经简单-复杂细胞模型处理得到双目融合视点图(BFVM)和双目细胞差异图(BCDM),采用多尺度结构相似度(MSSIM)算法分别对原始、失真立体图像的 BFVM 和 BCDM 进行双目融合评价(BFQA)和双目立体感评价(BSPA);对 BFQA 和 BSPA 的评价值进行加权融合得到最终评价值。实验结果表明,该方法的 Pearson 线性相关系数在 0.94 以上, Spearman 秩相关系数在 0.93 以上,该模型符合人眼视觉特性,能够较好地预测立体图像质量。

关键词 图像处理; 立体图像质量评价; 人类视觉系统; 视觉细胞模型; 双目融合; 简单-复杂细胞

中图分类号 TP391

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.041004

Stereoscopic Image-Quality-Assessment Method Based on Visual Cell Model

Xue Xiaobo Yu Mei He Meiling

Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China

Abstract Retinal cells of human visual system (HVS) are used as a medium to receive, transmit and understand binocular information when stereo images are viewed. A new stereo image-quality-assessment (SIQA) algorithm aiming to imitate retinal cells is proposed. HVS is mimicked by modeling simple cells and complex cells on the basis of the retinal cell characteristics. Binocular fusion view map (BFVM) and binocular cell-based disparity map (BCDM) are obtained via the binocular information processing of the simple-complex cell models. Based on the multiscale structural similarity (MSSIM) method, the binocular fusion quality assessment (BFQA) and binocular stereo perception assessment (BSPA) are respectively implemented to the original or distorted stereo images. The results of BFQA and BSPA are combined to describe the final quality of stereo images. The experimental results demonstrate that the overall Pearson linear correlation indicator reaches 0.94, Spearman rank order correlation coefficient reaches 0.93, which indicate that the proposed model is well consistent with human perception, and also well predict the stereo image quality.

Key words image processing; stereo image quality assessment; human visual system; visual cell model; binocular fusion; simple-complex cells

OCIS codes 100.2000; 100.2960; 100.6890

1 引言

随着图像编码技术和立体显示技术的发展,立体图像技术受到了广泛关注^[1-2]。该技术利用人眼的双目视差原理,使接收到的左、右视点图像在大脑作用下产生深度感,还原出更加真实的场景体验。立体图像和视频在采集、处理、编码和传输过程中会因失真而造成质量下降^[3],所以对其进行质量评价是立体图像和视频系统的必要环节。客观图像质量评价方法从原始图像信息可用程度上可分为全参考型(FR)、部分参考型(RR)和无参考型(NR)三种^[4]。客观评价方法旨在通过模拟人类视觉系统(HVS),设计出能精准、自动评判图

收稿日期: 2015-08-04; 收到修改稿日期: 2015-10-20; 网络出版日期: 2016-03-04

基金项目: 浙江省自然科学基金(LY15F010005)

作者简介: 薛小波(1989—),男,硕士研究生,主要从事多媒体信息处理方面的研究。E-mail: xiaobo_xue@126.com

导师简介: 郁 梅(1968—),女,博士,教授,博士生导师,主要从事多媒体信号处理与通信方面的研究。

E-mail: yumei@nbu.edu.cn(通信联系人)

像质量好坏的计算模型。Chandler等^[5]提出基于物理量度和视觉角度的小波域视觉信噪比(VSNR)评价方法。Wang等^[6]提出结构相似度(SSIM)的质量评价方法,随后又提出多尺度结构相似性(MSSIM)^[7]评价方法。Sheikh等^[8]从信息通信和共享的角度提出基于视觉信息保真度(VIF)的方法。Bensalma等^[2]针对立体图像质量评价(SIQA)提出一种基于双目能量的评价方法(BEQM),该方法通过度量原始、失真图像的双目能量差异得到立体图像客观质量。Chen等^[9]通过模拟人眼感知过程,将原始、失真立体图像左、右视点融合成一幅独眼图,使用经典平面评价方法对两幅独眼图进行评价。Hewage等^[10]提出一种彩色加深度的立体视频质量评价方法。You等^[11]采用传统平面图像质量评价方法,将左、右视点单独评价后得到的结果取平均值作为立体图像的质量,但此种方法没有考虑立体图像特有的立体感信息。Benoit等^[12]以平面图像和对应视差图的结构相似性为基础,提出一种融合平面质量评价和深度信息评价的度量模型。刘珊珊等^[13]根据小波变换的高频分量包含边缘及纹理等人眼比较关注的细节信息,基于立体图像小波分析与重构理论提出了一种基于小波变换的高频重构 SIQA 方法。

本文通过研究HVS视皮层细胞特性和细胞建模行为,结合双目细胞信息差异和图像多尺度结构相似性理论,综合考虑立体图像自身质量和立体感质量,提出了一种与人眼主观感知一致性较高的立体图像质量评价方法。

2 仿视觉细胞模型的 SIQA 方法

双目视觉过程是HVS的一个重要特性^[14],用于实现将同一场景相同区域的左、右信号融合。从双目信息传输、理解以及立体感知特性的角度,提出一种仿视觉细胞模型的立体图像质量评价方法。模拟HVS,对负责空间频率分析的简单细胞和负责双目融合的复杂细胞进行建模,对得到的原始和失真图像对的双目融合视点图采用MSSIM方法得到感知失真评价价值;利用简单-复杂细胞模型接收到的双目信息差异求取差异空间图,仍采用结构相似度理论得到立体感评价价值;将两个评价价值进行加权融合得到最终评价质量。图1是仿视觉细胞模型立体图像质量评价方法的系统框架,其中 Q_F 为双目融合质量, Q_S 为双目立体感质量, Q 为最终评价质量。

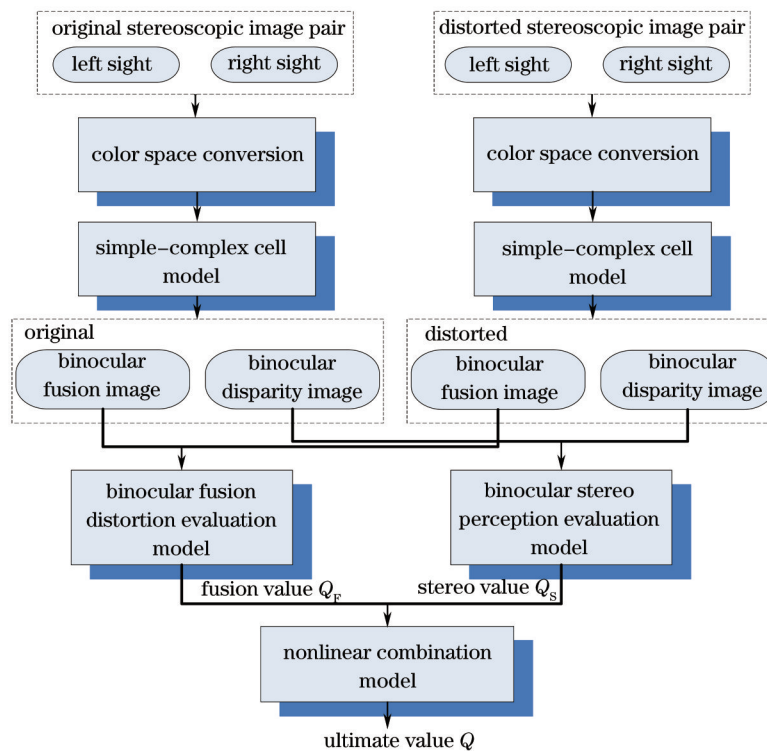


图1 本文算法的系统框架

Fig.1 Framework of the proposed algorithm

2.1 视皮层细胞及其模型

对于彩色图像,由于图像亮度分量保留了自然图像大部分信息^[6],为了降低计算复杂度,提取了自然图像亮度分量进行评价。图2是视觉信息处理过程示意图。首先,外界的光线通过角膜经瞳孔进入眼球,在眼底视网膜上形成物像。然后,由视网膜感光细胞接收,将光能转变成神经激励,经外侧膝状体(LGB)传入视皮层;最后,由视皮层完成物体的识别、感知和理解^[15]。视皮层又分为初级视皮层和纹区外视皮层,其中初级视皮层包括简单细胞和复杂细胞等,几乎负责所有视觉信息的高级处理过程。

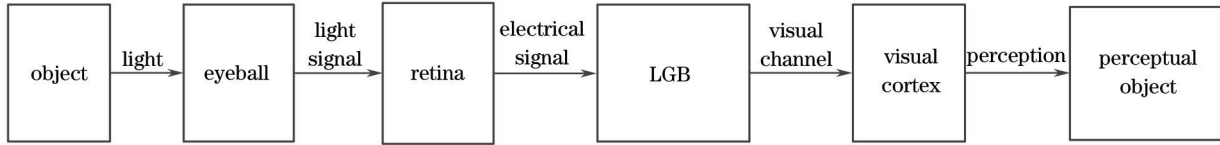


图2 视觉信息处理过程示意图

Fig.2 Diagram of visual information processing

简单细胞即感受野是由若干个兴奋和抑制交错排列的条状子域组成的线性神经元,它们是第一个接受视网膜信息的细胞。简单细胞成对运作,感受野较小,呈狭长形,具有兴奋和抑制两种状态。在视皮层细胞对光刺激的反应中,简单细胞感受野对视觉刺激的频谱位置、频率和方向具有明显的选择性^[16-17]。复杂细胞主要分布在初级视皮层内,在纹外皮层也会少量出现。复杂细胞具有简单细胞所具有的基本反应特性,其感受野比简单细胞大,没有兴奋和抑制的对立状态,它们仅对垂直于刺激的运动方向敏感^[16]。

复小波变换不仅具有良好的时-频局部特性、多尺度特性、调节特性和局部特性,而且弥补了小波变换的平移敏感性和方向性均较差及缺乏相位等基本信息的缺点。通过以上研究、分析,采用复小波变换来建立具有大小、振幅和相位的空频响应模型,模拟简单-复杂细胞的功能特性。

假设左、右图像光信号强度为 $I_L(x)$ 、 $I_R(x)$,经过复小波变换处理后,可以计算出对应的实部、虚部分量分别为 $\text{Re}_L(x)$ 、 $\text{Re}_R(x)$ 、 $\text{Im}_L(x)$ 、 $\text{Im}_R(x)$,所以左、右复杂细胞感知信号为 $C_L(x)$ 、 $C_R(x)$ 表示为

$$\begin{cases} C_L(x) = p_L(x) \exp[\theta_L(x)] \\ C_R(x) = p_R(x) \exp[\theta_R(x)] \end{cases}, \quad (1)$$

式中 $p_L(x)$ 和 $p_R(x)$ 为左、右复杂细胞感知信号的振幅值, $\theta_L(x)$ 和 $\theta_R(x)$ 表示对应的相位,即

$$\begin{cases} p_L(x) = |C_L(x)| = \sqrt{\text{Re}_L(x)^2 + \text{Im}_L(x)^2} \\ p_R(x) = |C_R(x)| = \sqrt{\text{Re}_R(x)^2 + \text{Im}_R(x)^2} \end{cases}, \quad (2)$$

$$\begin{cases} \theta_L(x) = \arg|C_L(x)| = \arctan \left[\frac{\text{Im}_L(x)}{\text{Re}_L(x)} \right] \\ \theta_R(x) = \arg|C_R(x)| = \arctan \left[\frac{\text{Im}_R(x)}{\text{Re}_R(x)} \right] \end{cases}. \quad (3)$$

复杂细胞是负责双眼信号的融合处理,可得到双目融合视点图(BFVM), X 为细胞的位置坐标,则

$$X_{\text{BFVM}}(x) = |C_L(x) + C_R(x)| = \sqrt{\{\text{Re}[C_L(x)] + \text{Re}[C_R(x)]\}^2 + \{\text{Im}[C_L(x)] + \text{Im}[C_R(x)]\}^2} = \sqrt{p_L^2(x) + p_R^2(x) + p_L(x)p_R(x)\cos[\Delta\theta(x)]}, \quad (4)$$

$$\Delta\theta(x) = \theta_L(x) - \theta_R(x). \quad (5)$$

2.2 基于视觉细胞的立体图像质量评价模型

构建基于视觉细胞的SIQA模型包括两部分:双目融合质量评价和双目立体感评价。得到两部分的评价结果后,将其进行加权融合得到最终图像质量。

2.2.1 双目融合质量评价模型

只有将左、右视点图像在视皮层中融合,才能反映实际空间^[17-18]。利用双目融合视点图构建双目感知失真评价模型。立体图像对产生双目信号的过程如图3所示,图中圆圈代表具有兴奋和抑制状态的感受野神经节细胞,黑白条状子域代表感受野较小、具有兴奋和抑制对立状态的简单细胞,灰度条状子域代表感受野相对较大的复杂细胞。过程描述如下:首先神经节细胞感受野捕获到左、右视网膜图像并将其被转移到两

侧的LGB上,然后再传到视皮层。这些简单细胞的运作表示左、右眼的信息及每一对感受野,它们连接着一个复杂细胞,最终由复杂细胞产生双目融合信号^[15]。

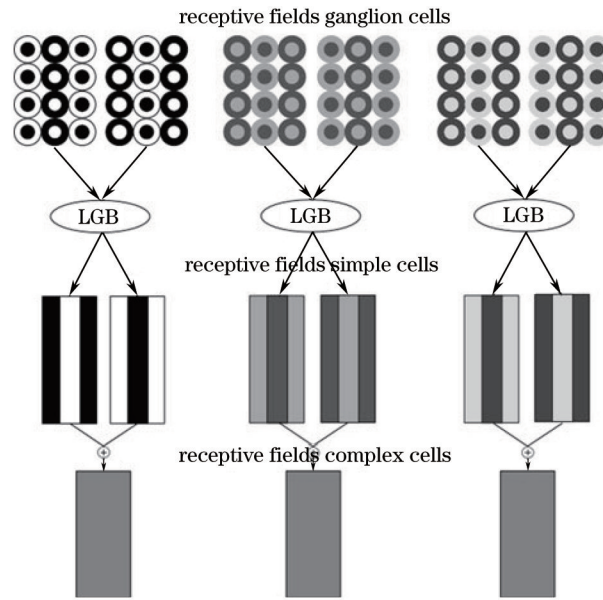


图3 由立体图像对产生双目信号

Fig.3 Binocular signal generated from stereoscopic images pair

由上述推导可得到原始和失真图像对的中心视点图 $X_{BFVM_org}(x)$ 和 $X_{BFVM_dis}(x)$ 。然后,以度量这两幅图的相似度为目标,对它们的中心视点图使用MSSIM算法^[7],得到双目融合质量 Q_F ,即

$$Q_F = \text{MSSIM}[X_{BFVM_org}(x), X_{BFVM_dis}(x)]. \quad (6)$$

2.2.2 双目立体感评价模型

立体视觉的功能是通过视差感知三维信息,包括对物体空间位置和三维形状的判断与理解^[19]。人的两眼间距给人带来立体视觉,当间距为60~65 mm的两眼注视某物体时,物体在两眼视网膜上的成像会出现微小的水平方向像位差,双目视差经过各类细胞及视神经的传输和大脑的接受处理后会产生立体视觉^[1]。基于以上理论,利用双目差异图构建立体感评价模型。

根据神经学和心理学研究,存在轻微差异的区域在进行双融合时会产生立体视觉^[9],而复杂细胞完成最终的融合过程,因而利用简单-复杂细胞模型接收到的双目信息差异得到双目细胞差异图(BCDM),BCDM计算如下

$$X_{BCDM}(x) = |C_L(x) - C_R(x)| = \sqrt{p_L^2(x) + p_R^2(x) - p_L(x)p_R(x)\cos[\Delta\theta(x)]}, \quad (7)$$

由(7)式可获得原始、失真立体图像的双目差异图 $X_{BFVM_org}(x)$ 、 $X_{BFVM_dis}(x)$ 。最后对两幅差异图用MSSIM算法评价,得到双目立体感质量

$$Q_S = \text{MSSIM}[X_{BFVM_org}(x), X_{BFVM_dis}(x)]. \quad (8)$$

2.2.3 最终立体图像质量

立体图像的质量与双目融合质量和双目立体感质量都有关系,将双目融合质量 Q_F 与双目立体感质量 Q_S 进行线性加权,得到SIQA评价模型,计算最终立体图像质量评价结果

$$Q = w_1 \times Q_F + w_2 \times Q_S, \quad (9)$$

式中 w_1 、 w_2 分别表示 Q_F 、 Q_S 对立体图像感知质量的影响权重, $w_1 + w_2 = 1$ 。

3 实验结果与讨论

为验证本文方法的有效性,在LIVE实验室提供的对称失真立体图像测试库(LIVE-3D Phase I^[20])上进行评价实验。该库共有385对立体图像,包含20对原始RGB图像对和365对失真图像对,其中有5种失真类型,失真类型和对应数量分别为JPEG2000压缩80对、JPEG压缩80对、高斯白噪声(WN)80对、高斯模糊

(Gblur)45对、快衰落(FF)80对。

DMOS代表主观评分值,DMOSP代表主观拟合评分值, Q 代表算法的客观评价结果。为降低实际主观过程中引入的非线性因素,采用五参数Logistic函数对 Q 进行非线性回归得到DMOSP。使用4个性能指标对相应模型进行评价,分别是:Pearson线性相关性系数(PLCC)、Spearman秩相关系数(SROCC)、Kendall秩相关系数(KROCC)以及均方根误差(RMSE)。由DMOS与DMOSP计算得到的PLCC用于反映客观评价模型的准确性。SROCC用于描述 Q 与DMOS两者之间变化趋势的一致性,可反映客观评价模型的单调性。KROCC也用于反映客观评价模型的单调性。RMSE用于表现客观算法以最小平均错误率预测DMOS的能力。PLCC、SROCC和KROCC的取值范围均为[0,1],这三个值越大、RMSE越小,说明客观评价方法越好。

3.1 参数确定

在本文方法中,立体图像质量由双目融合质量 Q_f 和双目立体感质量 Q_s 组合而成。由于双目融合模型和双目差异模型表征图像的不同特征,因此 Q_f 、 Q_s 的组合关系会影响立体图像质量与主观质量之间的相关性。由于PLCC能较好地度量两组数据之间的相关性,因此用PLCC作为权重 w_1 和 w_2 的选取标准,并将使PLCC达到最大值的权值作为最优模型组合。

图4(a)反映了随着 w_1 的不同,PLCC的变化情况。可以看出, w_1 从0到1变化时,PLCC值先变大后变小,大致在 $w_1=0.8$ 处取得最大值。因此,选择 $w_1=0.8$ 和 $w_2=0.2$ 作为评价模型最优组合权重。

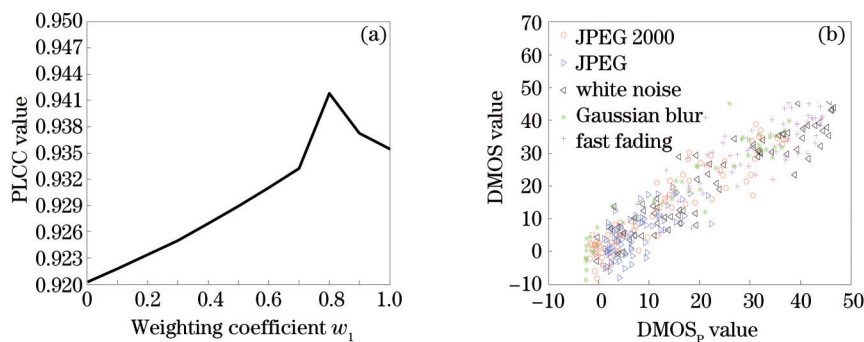


图4 最优参数测试和不同失真类型散点图。(a)模型组合系数 w_1 和PLCC的关系;(b)DMOSP与DMOS值的散点图

Fig.4 Optimal parameter test and scatter diagram of different distortion types. (a) Performance curve of PLCC with different w_1 values; (b) scatter plot of DMOSP and DMOS value

3.2 客观评价准确性指标

图4(b)是在最优组合权重下,DMOSP与DMOS的散点图,坐标单位均为分值。散点越集中,说明客观方法与主观感知的一致性越好。表1是本文方法针对不同失真类型图像的性能指标。

表1 本文方法在不同失真类型下的性能指标

Table 1 Performance index of proposed method under different distortion types

Criteria	PLCC	SROCC	KROCC	RMSE
Distortion type				
JP2K	0.9375	0.9085	0.7323	4.5051
JPEG	0.7147	0.6758	0.4839	4.5740
WN	0.9370	0.9402	0.7861	5.8127
Gblur	0.9517	0.9291	0.7758	4.4432
FF	0.8114	0.7906	0.5966	7.5492
All	0.9418	0.9343	0.7693	5.5139

从表1中的数据可以明显地看出各性能数据的大小。在PLCC性能指标下,除了JPEG失真外,其他各种失真类型的评价准确性都较高, RMSE性能指标下,除了FF失真,各种失真类型的RMSE性能值都在5.9000之下。为了更形象、更直观的了解本文方法的优势,绘制客观评价与主观评价之间的散点图,如图5所示,图5(a)~(e)分别是各种类型的失真图像对应的散点图,图5(f)是所有失真图像对应的总的散点图。横坐标 Q 表示算法的客观评价结果,纵坐标DMOS表示人眼主观评价值,坐标单位均为分值,实线为 Q 与DMOS的拟合曲线。

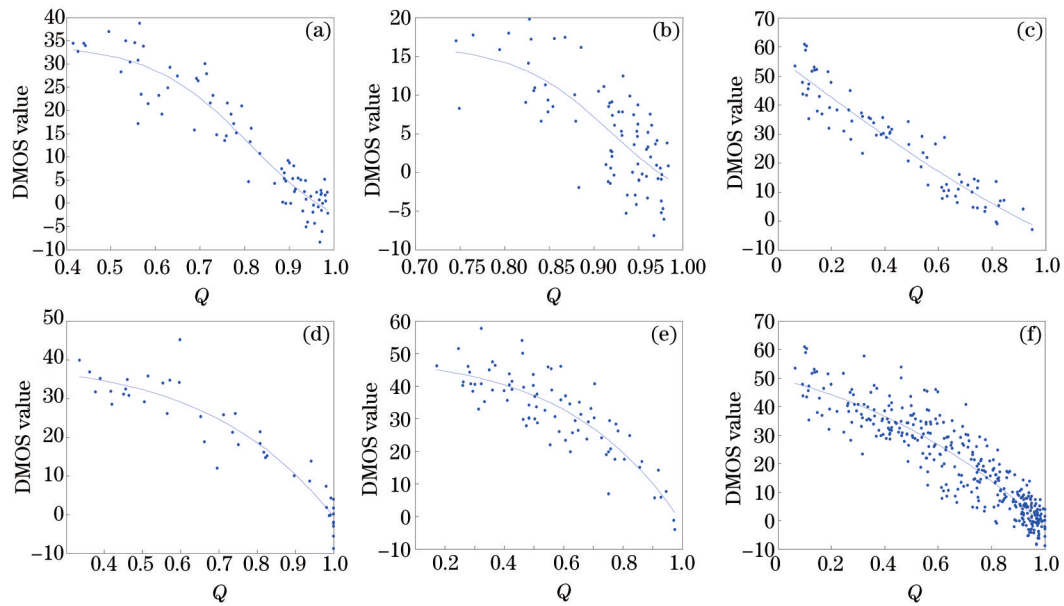


图5 本文方法的客观评价值与主观评价值的散点图。(a) JP2K; (b) JPEG; (c) WN; (d) Gblur; (e) FF; (f) All

Fig.5 Scatter diagrams of objective and subjective evaluation values using the proposed method.

(a) JP2K; (b) JPEG; (c) WN; (d) Gblur; (e) FF; (f) All

从图5(a)~(e)可以看出,在宏观上,各散点均匀地分布在主观拟合曲线附近,分布较为集中且与主观拟合曲线的距离较短,但在微观上, JPEG失真下的各散点的排布密集度比其他各类失真的差,其次是FF失真。从图5(f)可以看出,所有点的排布形状与主观拟合曲线很相似,分布也较为紧凑,因此与主观感知有较高的一致性。

为了进一步验证本文算法的性能,将本文方法与其他评价方法进行比较,包括4种平面图像左右视点加权平均方法(VSNR^[5]、SSIM^[6]、MS-SSIM^[7]、VIF^[8])和6种立体评价方法(BEQM^[2]、与文献[9]~[13]中的方法),结果如表2所示。

表2 各评价方法的实验结果比较

Table 2 Comparison of experimental results using different assessment methods

Criteria	PLCC	SROCC	KROCC	RMSE
Methods				
VSNR ^[5]	0.8665	0.8817	0.6973	8.1868
SSIM ^[6]	0.8727	0.8772	0.6925	8.0059
MS-SSIM ^[7]	0.9302	0.9237	0.7466	6.0187
VIF ^[8]	0.8464	0.8982	0.7103	8.6735
BEQM ^[2]	0.9283	0.9246	0.7456	6.2647
Ref.[9]	0.8954	0.8917	0.7138	7.2475
Ref.[10]	0.8303	0.8140	0.5668	9.1393
Ref.[11]	0.8814	0.8789	0.6329	7.7463
Ref.[12]	0.9025	0.8992	0.6565	7.0617
Ref.[13]	0.9406	0.9328	0.7661	5.5862
Proposed	0.9418	0.9343	0.7693	5.5139

4 结 论

从双目信息的传输、理解以及立体感知特性的角度,提出一种仿视觉细胞模型的立体图像质量评价方法,该方法包含双目融合评价和双目立体感评价两部分。对负责局部空间频率分析的简单细胞和负责生成融合视点图的复杂细胞进行建模。利用细胞模型处理双目信息得到双目融合视点图,由SSIM算法得到双目融合评价结果;利用细胞模型接收到的双目信息差异计算出基于细胞的差异空间图,仍采用结构相似度算法得到双目立体感评价结果。将双目融合评价模型与双目立体感评价模型进行线性结合,得到最终立体

图像评价模型。实验结果表明,该模型与主观评价结果有较高的一致性,能够较好地预测人眼对立体图像的主观感知。在此基础上,如何改进评价算法在非对称立体图像失真评价上的应用以及如何进一步考虑双目融合和双目竞争等多种视觉特性将是下一步的工作内容。

参考文献

- 1 Lee K, Lee S. 3D perception based quality pooling: stereopsis, binocular rivalry and binocular suppression[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2015, 9(3): 533–545.
- 2 Bensalma R, Larabi C. A perceptual metric for stereoscopic image quality assessment based on the binocular energy[J]. *Multidimensional Systems and Signal Processing*, 2013, 24(2): 281–316.
- 3 Shao F, Li K, Lin W, *et al.*. Using binocular feature combination for blind quality assessment of stereoscopic images[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2015, 22(10): 1548–1551.
- 4 Jiang Gangyi, Huang Dajiang, Wang Xu, *et al.*. Overview on image quality assessment methods[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(1): 219–226.
蒋刚毅, 黄大江, 王旭, 等. 图像质量评价方法研究进展[J]. *电子与信息学报*, 2010, 32(1): 219–226.
- 5 Chandler D M, Hemami S S. VSNR: A wavelet-based visual signal-to-noise ratio for natural images[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, 16(9): 2284–2298.
- 6 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.
- 7 Wang Z, Simoncelli E P, Bovik A C. Multiscale structural similarity for image quality assessment[C]. *Thirty-Seventh Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, 2003, 2: 1398–1402.
- 8 Sheikh H R, Bovik A C. Image information and visual quality[C]. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 2004, 3: III709–III712.
- 9 Chen M J, Su C C, Kwon D K, *et al.*. Full-reference quality assessment of stereopairs accounting for rivalry[J]. *Signal Processing: Image Communication*, 2013, 28(9): 1143–1155.
- 10 Hewage C T E R, Martini M G. Edge-based reduced-reference quality metric for 3D video compression and transmission [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2012, 6(5): 471–482.
- 11 You J, Xing L, Perkis A, *et al.*. Perceptual quality assessment for stereoscopic images based on 2D image quality metrics and disparity analysis[C]. *Fifth International Workshop on Video Processing and Quality Metrics for Consumer Electronics*, 2010.
- 12 Benoit A, Le Callet P, Campisi P, *et al.*. Quality Assessment of stereoscopic images[J]. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, 2008, 2008(4): 1–13.
- 13 Liu Shanshan, Yu Mei, Wang Ying. Stereo image quality assessment based on wavelet transform[J]. *Optical Technique*, 2015, 41(5): 445–450.
刘珊珊, 郁梅, 王颖. 基于小波高频的立体图像质量评价[J]. *光学技术*, 2015, 41(5): 445–450.
- 14 Li Qingzhong, Liu Qing. Adaptive enhancement algorithm for low illumination images based on wavelet transform[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(2): 0209001.
李庆忠, 刘清. 基于小波变换的低照度图像自适应增强算法[J]. *中国激光*, 2015, 42(2): 0209001.
- 15 Wang Shulu, Ming Hai, Wang Anting, *et al.*. Three-dimensional display based on human visual perception[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(2): 0209007.
王书路, 明海, 王安廷, 等. 基于人眼视觉特性的三维显示技术[J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 0209007.
- 16 Skottun B C, De Valois R L, Gros of D H, *et al.*. Classifying simple and complex cells on the basis of response modulation [J]. *Vision Research*, 1991, 31(7–8): 1078–1086.
- 17 Cai Zhishan, Chen Musheng. Study on multi-focus image fusion method based on wavelet transform[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(9): 091003.
蔡植善, 陈木生. 基于小波变换的多聚焦图像融合方法研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(9): 091003.
- 18 Xuri Yao, Xuefeng Liu, Wenkai Yu, *et al.*. Correspondence imaging based on correlation coefficients[J]. *Chin Opt Lett*, 2015, 13(1): 0103001.
- 19 Ding Weili, Ma Pengcheng, Lu Ming, *et al.*. High resolution light field depth reconstruction algorithm based on priori likelihood [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(7): 0715002.

- 丁伟利, 马鹏程, 陆 鸣, 等. 基于先验似然的高分辨光场图像深度重建算法研究[J]. 光学学报, 2015, 35(7): 0715002.
- 20 Moorthy A K, Su C C, Mittal A, *et al.*. Subjective evaluation of stereoscopic image quality[J]. Signal Processing: Image Communication, 2013, 28(8): 870-883.

栏目编辑: 苏 岑