

文章编号:1007-2780(2015)04-0666-07

基于边缘及特征点匹配的立体图像质量评价

田浩南*, 张 叶

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:为了实现对立体图像质量的精确预测,提出了一种基于边缘和特征点匹配的立体图像客观质量评价方法。首先,对图像的质量进行评价,在基于结构相似度的质量评价方法的基础上,考虑了边缘信息对人眼视觉特性的重要性,加入了边缘结构相似度指标;然后,对图像的立体感进行评价,采用特征点匹配的方法提取立体感指标。最后,根据总体视差失真法将图像质量和立体感指标拟合为一个综合指标。实验结果表明,采用本文提出的方法对立体图像测试库进行评价,总体评价的 PLCC(Pearson Linear Correlation Coefficient)均在 0.94 以上;与其他方法相比,本方法具有较高的预测精确性。

关 键 词:立体图像处理;质量评价;边缘;立体感

中图分类号:TP391.41 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20153004.0666

Quality evaluation of stereo image based on edge and characteristic point matching

TIAN Hao-nan*, ZHANG Ye

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China)

Abstract: In order to predict the quality of stereoscopic images accurately, an objective stereoscopic image quality assessment method based on edge and characteristic point matching is proposed. Firstly, for the quality assessment, a method that takes the edge information into account is presented, which is based on the plane image quality assessment method; secondly, for the stereo sense assessment, a stereo matching method is used for extracting stereo sense index. Finally, according to quality and stereo sense, a total evaluation index is proposed based on an appropriate weighted method. The experimental results indicate that compared with other methods, the overall Pearson linear correlation coefficient indicators are all above 0.94, which indicates that the proposed method can achieve higher prediction accuracy.

Key words: stereo image processing; quality assessment; edge; stereo sense

收稿日期:2014-08-26;修订日期:2014-09-30.

基金项目:吉林省重大科技攻关项目(No. 11ZDGG001);国家自然科学基金(No. 60902067)

* 通信联系人, E-mail: tju_thn@163.com

1 引 言

近些年来,图像编码技术和立体显示技术飞速发展,立体图像处理技术受到越来越多的关注,逐渐成为国内外相关领域的研究热点。相对于平面图像带给人的视觉体验,立体图像更胜一筹,带给人们更加真实的视听感受和临场体验。立体视频从采集端到显示端,经过采集、存储、压缩及传输等流程,原始图像的质量难以保持不变,采用一种方法来准确地衡量这一系列失真对立体图像质量的影响十分重要。但是主观评价方法易受多种因素的干扰:如实验环境、实验设备及测试者自身因素等,且费时费力,评价结果也不够稳定;客观评价则是由软件进行估计,操作简单且重复性强,但结果可能与人的主观感受有一定偏差,因此研究一种能够准确评价立体图像客观质量的方法意义重大。

目前,研究学者已提出的立体图像客观质量评价模型大多建立在较成熟的平面模型研究基础上,将立体图像的左右视图看作平面图像,通常采用文献[1-4]中 Wang 等人提出的基于结构相似度的平面图像质量评价方法 (Structural Similarity Index Metric, SSIM),或者传统的统计学方法——峰值信噪比 (Peak Signal - Noise Ratio, PSNR) 进行评价,最后用左右视图质量值的加权平均值来衡量立体图像客观质量的好坏。文献[5]提出利用差值图进行评价,并没有考虑左右视图间的相关性,这也使得评价结果与人眼感知出现一定的偏差。文献[6]从左右视点图像质量和视差图像质量两个角度出发,并线性组合两方面的评价结果来综合评价立体图像的质量。文献[7]将左右视图质量和视差图像质量分开评价,最后将评价结果以非线性组合的形式作为评价立体图像质量的总指标。但是,上述文献提出的评价方法仍存在着一些问题:有的评价方法的准确性与图像场景有关,忽略了人眼视觉的一些重要特性;有的方法忽视了立体信息对整幅立体图像质量好坏的影响;有的方法鲁棒性不强,仅适用于少数失真类型。因此,研究出一种能够准确评价立体图像客观质量的模型意义深远。

由于人眼才是图像的最终接收对象,充分理解立体视觉原理并分析人眼视觉特性有助于提高

算法的准确性^[8-11]。本文主要从图像质量和立体感两个方面对立体图像客观质量进行评价。图像质量评价方面,在 SSIM 评价方法的基础上,考虑了边缘信息对人眼视觉特性的重要性,加入了边缘结构相似度指标;图像立体感评价方面,采用特征点匹配的方法提取立体感指标。最后,根据总体视差失真法将所有指标拟合为一个综合指标。实验结果表明该方法能够较准确地预测立体图像质量,符合人眼的主观感受。

2 立体图像质量客观评价模型

2.1 立体图像左右视点图像质量评价方法

图像边缘是图像中最基本的特征,是分析理解图像的根本,图像边缘的好坏对人眼的主观感受有着很大的影响,图像边缘的改变意味着图像基本内容或结构的改变。同时,人眼视觉的掩盖效应使人眼对边缘失真很敏感。立体图像的左右视图可以看作两幅平面图像,如果左右视图的边缘结构发生变化,势必会影响整幅立体图像的质量。因此,图像的边缘无论在人眼对平面图像还是立体图像的理解中都有重要的作用。

本文将边缘结构失真度与 SSIM 相结合,形成一种优于 SSIM 的评价指标 E-SSIM (Edge-SSIM)。算法结构如图 1 所示。

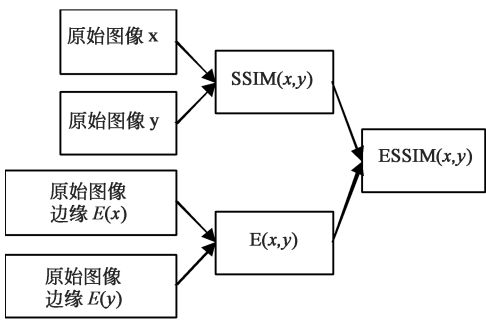


图 1 E-SSIM 评价算法框图

Fig. 1 Flow chart of E-SSIM evaluation

设 X 为原始图像, Y 为降质图像, $E(X)$ 和 $E(Y)$ 分别为原始图像和降质图像的边缘图像。本文在 SSIM 的基础上提取了边缘比较函数,结合 SSIM 算法中的亮度比较函数、对比度比较函数和结构比较函数,形成改进的图像质量评价方法 E-SSIM。原始图像和降质图像的边缘采用小波变换模极大值的方法^[12]提取,该方法具有克服一

般边缘提取算法所带来的边缘敏感问题从而使误判率降低的优点。将上述 4 个比较函数综合在一起就得到左右视点图像质量评价的综合指标,如式(2)所示。

$$e(x, y) = \frac{\theta_{xy} + C}{\theta_x \theta_y + C}, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{ESSIM}(x, y) &= l(x, y)^{\alpha} \cdot c(x, y)^{\beta} \cdot \\ &s(x, y)^{\gamma} \cdot e(x, y)^{\kappa} = \\ &\frac{4\mu_x \mu_y \sigma_{xy} \theta_{xy}}{(\mu_x^2 + \mu_y^2)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)\theta_x \theta_y}, \end{aligned} \quad (2)$$

其中: θ_x 和 θ_y 分别表示图像 X、Y 的边缘图像的灰度方差, θ_{xy} 表示图像 X、Y 的边缘图像的灰度协方差, μ_x 和 μ_y 表示图像 X、Y 的灰度均值, σ_x 和 σ_y 表示图像 X、Y 的灰度方差, σ_{xy} 表示图像 X、Y 的灰度协方差。 $l(x, y)$ 、 $c(x, y)$ 、 $s(x, y)$ 是 SSIM 算法中的亮度比较函数、对比度比较函数和结构相似性比较函数, $e(x, y)$ 是本文所提取的边缘比较函数, $\alpha, \beta, \gamma, \kappa > 0$ 4 个参数用来调整

$$\text{Score}(I_1, I_2) = \frac{\sum_{m=-k}^k \sum_{n=-l}^l [I_1(i+m, j+n) - \overline{I_1(i, j)}] \times [I_2(i+m, j+n) - \overline{I_2(i, j)}]}{(2k+1)(2l+1) \sqrt{\sigma^2(I_1) \times \sigma^2(I_2)}}. \quad (3)$$

定义检测窗尺寸:

$$W = (2k+1)(2l+1), \quad (4)$$

其中, $2k+1, 2l+1$ 为高度和宽度。

左视点待匹配特征点所在检测窗的灰度方差计算公式如式(5)所示:

$$\sigma(I_1) = \frac{1}{W} \sum_{m=-k}^k \sum_{n=-l}^l [I_1(i+m, j+n) - \overline{I_1(i, j)}]^2. \quad (5)$$

右视点待匹配特征点所在检测窗的灰度方差计算公式如式(6)所示:

$$\sigma(I_2) = \frac{1}{W} \sum_{m=-k}^k \sum_{n=-l}^l [I_2(i+m, j+n) - \overline{I_2(i, j)}]^2, \quad (6)$$

$\overline{I_1(i, j)}$ 和 $\overline{I_2(i, j)}$ 代表两个检测窗的灰度平均值:

$$\overline{I_1(i, j)} = \frac{1}{W} \sum_{m=-k}^k \sum_{n=-l}^l I_1(i+m, j+n), \quad (7)$$

$$\overline{I_2(i, j)} = \frac{1}{W} \sum_{m=-k}^k \sum_{n=-l}^l I_2(i+m, j+n). \quad (8)$$

经过计算得到配对特征点对中,可能存在着误配对的情况,所以需要进一步的计算进行验证。

亮度、对比度、结构失真度和边缘失真度四个指标的相对权重; C 为常数,是为了避免式(1)分母十分接近零时出现的不稳定性。

2.2 立体图像立体感评价

立体图像经过采集、存储、压缩及传输过程后,图像质量很难保持。作为图像的一个重要的局部特征,角点特征会直接受到图像失真的影响,立体图像左右视图相匹配的角点个数就会发生变化,所以匹配角点的个数可以反映立体图像的质量。首先,采用 Harris 角点检测算法分别对原始图像和失真图像的左右视图提取特征点;然后,采用归一化协方差的方法进行角点的匹配;最后,将失真图像左右视图的匹配点个数和标准图像左右视图的匹配点个数的比值作为立体感评价指标。

经过计算得到特征点后,采用计算互协方差的方法来对特征点进行配对,任意两个特征点间的互协方差可定义为如式(3)所示。

取任意一对配对点 (m_{1i}, m_{2j}) , m_{1i} 为左视点图像中的点, m_{2j} 为右视点图像中的与其配对的点, $N(m_{1i})$ 代表 m_{1i} 点的 R 邻域点集合, $N(m_{2j})$ 代表 m_{2j} 点的 R 邻域点集合,如果 (m_{1i}, m_{2j}) 为准确的配对,就存在准确的配对 (n_{1k}, n_{2l}) 在其附近, n_{1k} 为 m_{1i} 邻域点, n_{2l} 为 m_{2j} 邻域点,定义配对强度 S_m 如式(9)所示^[13]:

$$\begin{aligned} S_m(m_{1i}, m_{2j}) &= \\ C_{ij} \sum_{n_{1k} \in N(m_{1i})} \left[\max_{n_{2l} \in N(m_{2j})} \frac{C_{kl} \delta(m_{1i}, m_{2j}; n_{1k}, n_{2l})}{1 + \text{dist}(m_{1i}, m_{2j}; n_{1k}, n_{2l})} \right], \end{aligned} \quad (9)$$

其中 C_{ij} 和 C_{kl} 是配对点 (m_{1i}, m_{2j}) 和 (m_{1k}, m_{2l}) 的互协方差, $\text{dist}(m_{1i}, m_{2j}; n_{1k}, n_{2l})$ 为两对配对点的平均距离,定义如式(10)所示。

$$\text{dist}(m_{1i}, m_{2j}; n_{1k}, n_{2l}) = \frac{[\text{dist}(m_{1i}, n_{1k}) + \text{dist}(m_{2j}, n_{2l})]}{2}. \quad (10)$$

$\delta(m_{1i}, m_{2j}; n_{1k}, n_{2l})$ 的定义如式(11)所示:

$$\delta(m_{1i}, m_{2j}; n_{1k}, n_{2l}) = \begin{cases} e^{-\frac{r}{\epsilon_r}} & r < \epsilon_r \\ 0 & \end{cases}, \quad (11)$$

r 是距离差比例,定义如式(12)所示:

$$r = \frac{|\text{dist}(m_{1i}, n_{1k}) - \text{dist}(m_{2j}, n_{2l})|}{\text{dist}(m_{1i}, m_{2j}; n_{1k}, n_{2l})}, \quad (12)$$

其中 ϵ_r 为距离差阈值,本文中取 0.3。

针对误配对的情况,如计算得到左视图中两个点 m_{2j} 和 m_{2k} 都是右视图中 m_{1i} 点的配对点,那么就需要分别计算 $S_m(m_{1i}, m_{2j})$ 和 $S_m(m_{1i}, m_{2k})$, 两者中值小的就是错误的配对。得出正确的匹配点对后,就可以得到立体感评价指标 Q_s , 定义如式(13)所示。

$$Q_s = \frac{MP_{\text{DEG}}}{MP_{\text{ORG}}}, \quad (13)$$

其中, MP_{DEG} 代表降质图像匹配点个数, MP_{ORG} 代表标准图像匹配点个数,且 $P \in [0, 1]$ 。

2.3 立体图像整体质量客观评价

本文将立体图像左右视点的评价质量值 Q_m 和立体感评价质量值 Q_s 拟合在一起,将左右视点质量和立体感好坏视为相互影响又独立的两个部分,参照文献[6]的加权方法,得到本文立体图像质量评价的综合评价指标,综合评价指标如式(14)所示。

$$Q = Q_m \times (1 + \sqrt{Q_s}). \quad (14)$$

3 实验结果与分析

实验采用天津大学宽带无线通信与立体成像研究所建立的标准立体图像测试库。该测试库的原始立体图像由专门从事立体视频显示的公司提供,其选取考虑了相机参数、图像场景、亮暗度及立体感等多种因素,如图 2 所示,图像均为左右格式。主观实验对这 4 幅源图像进行 28 种降质处理共得到 112 幅待测立体图像,具体处理方法如表 1 所示。为保证主观实验结果的准确性,主观实验的所有被试者均为在天津眼科医院进行了双目视觉功能测试的合格者,年龄在 22~28 岁之间,男性 12 人,女性 14 人,其中 12 人具有立体技术研究背景,被试者主眼均为右眼。



(a)Girl. bmp



(b)Family. bmp



(c)River. bmp



(d)Door. bmp

图 2 四幅源立体图像

Fig. 2 Four original stereoscopic images

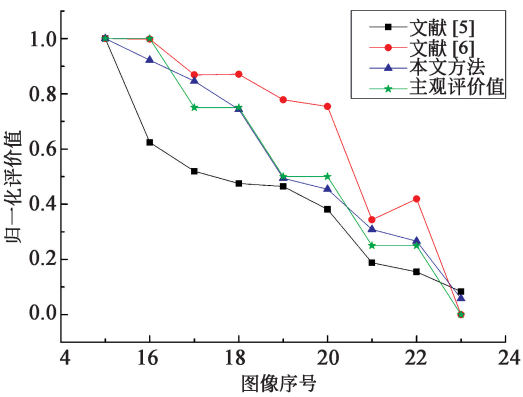
表 1 预处理方法表

Tab. 1 Processed methods

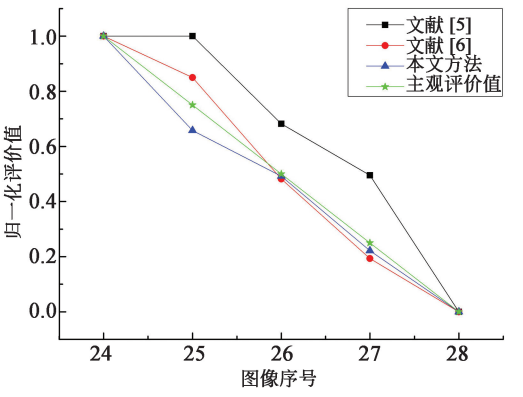
序号	图像预处理	序号	图像预处理
1	压缩到 80%	15	右视图左移 5 像素
2	压缩到 50%	16	右视图左移 10 像素
3	压缩到 30%	17	右视图左移 15 像素
4	压缩到 20%	18	右视图左移 20 像素
5	压缩到 10%	19	右视图左移 50 像素
6	压缩到 5%	20	右视图左移 65 像素
7	压缩到 1%	21	右视图左移 70 像素
8	模糊半径为 0.5	22	右视图左移 75 像素
9	模糊半径为 1.5	23	右视图左移 80 像素
10	模糊半径为 2	24	高斯噪声方差 0.01
11	模糊半径为 3	25	高斯噪声方差 0.02
12	模糊半径为 3.5	26	高斯噪声方差 0.04
13	模糊半径为 4	27	高斯噪声方差 0.06
14	模糊半径为 5.5	28	高斯噪声方差 0.08

为了验证本方法的有效性,将本文方法与文献[5]和文献[6]提出的评价方法相比较。实验数据以 Girl 图像为例,图 3 给出了本文方法与其他二种方法得到的客观评价价值与主观评价价值的对比。从图 3 所示曲线可以看出,本文提出的立体图像质量评价方法在上述的 4 种失真条件下,所得的客观评价价值与主观评价价值吻合度较高,而另外两种评价方法的客观评价价值并没有很好地体现人的主观感受。通过曲线图的对比可以看出,本文所提的方法在评价压缩失真及平移失真的立体图像时,与主观评价价值吻合度较高,较其他两种算法优势明显;在评价模糊失真及噪声失真时,其他方法也体现了一定的吻合度,但就整体的相关度而言,本文算法与主观评价价值的相关度还是优于其他算法的。

为了更直观地比较 3 种评价方法的性能,本文采用 Pearson 线性相关系数 PLCC 来反映客观



(c) 平移失真
(c) Displacement distortion



(d) 噪声失真
(d) Noise distortion

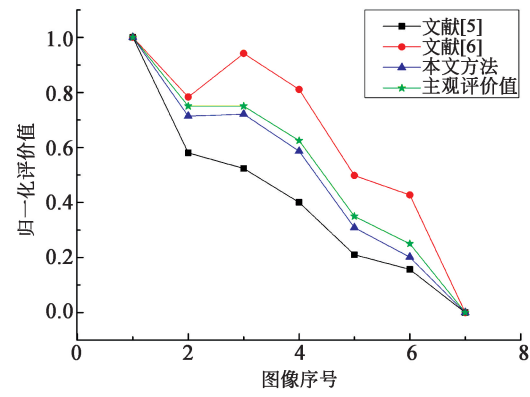
图 3 不同失真类型下的主客观评价对比

Fig. 3 Contrast of subjective and objective value, for different distortions

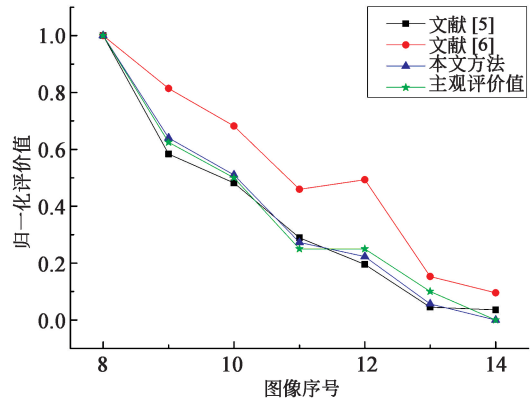
评价模型预测的准确性,计算公式如式(15)所示。

$$CC = \frac{\sum_{j=0}^{N-1} (X_j - \bar{X})(Y_j - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{j=0}^{N-1} (X_j - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{j=0}^{N-1} (Y_j - \bar{Y})^2}}, \quad (15)$$

其中, N 表示所测试降质立体图像对的数目; $\bar{X}$ 和 $\bar{Y}$ 分别代表被测立体图像对的客观评价价值和主观评价值的平均值。Pearson 相关系数的取值范围为 $[-1, 1]$, 其绝对值越接近 1, 表明客观模型预测值与主观评价价值之间的相关性越好, 客观评价模型预测更准确。



(a) 压缩失真
(a) Compression distortion



(b) 模糊失真
(b) Blur distortion

表 2 不同失真类型的相关度对比

Tab. 2 Correlation coefficient for different distortions

方法	失真类型			
	压缩	模糊	平移	加噪
本文方法	0.988 0	0.958 4	0.957 7	0.941 1
文献[5]	0.893 0	0.956 2	0.702 6	0.687 6
文献[6]	0.880 5	0.691 4	0.713 5	0.941 5

表 2 列出了用 3 种方法所得客观评价值与主观评价值的相关系数。可以看出,本文方法在 4 种不同的失真类型下所得客观评价值都与主观评价值有着较高的相关度,能够较为准确地反映立体图像质量等级,然而文献[5]所提出的方法在评价平移和加噪的降质立体图像时,

所得结果与主观评价值相关性较低,相关系数分别为 0.702 6 和 0.687 6;文献[6]所提方法在评价模糊降质的立体图像时与主观评价值差距较大,相关系数为 0.691 4,不能较准确地反映主观感受。

4 结 论

通过分析人眼的立体视觉特性,根据人眼对图像边缘的敏感特性及双目匹配在形成立体感知过程中的重要作用,提出了基于边缘和特征点匹配的客观质量评价模型,分别从图像质量和立体感两个方面对立体图像进行评价,最后综合图像质量和立体感指标作为本模型的评价指标。实验结果表明,提出的评价方法对压缩、模糊、平移及噪声失真类型的图像评价与人眼感知具有较好的一致性,总体评价的 PLCC 值均在 0.94 以上,具有较高的预测精确性。

参 考 文 献:

[1] Wang Z, Bovik A C. A universal image quality index [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2002, 9(3): 81-84.

[2] Wang Z, Bovik A C, Sheikh H R, et al. Image quality assessment: From error measurement to structural similarity [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(1): 1-4.

[3] Wang Z, Bovik A C, Lu L. Why is image quality assessment so difficult [C]. *Proc. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech, and Signal Processing*, 2002:3313-3316.

[4] Wang Z, Lu L, Bovik A C. Video quality assessment based on structural distortion measurement [J]. *Signal Processing: Image Communication, special issue on "Objective video quality metrics"*, 2004, 19(2): 121-132.

[5] Yang J C, Hou C P, Zhou Y, et al. Objective quality assessment method of stereo images [C]. *3DTV Conference: The True Vision-Capture, Transmission and Display of 3D Video*, Potsdam, 2009: 1-4.

[6] Benoit A, Le Callet P, Campisi P, et al. Using disparity for quality assessment of stereoscopic images[C]. *15th IEEE International Conference on Image Processing*, San Diego, CA, 2008: 389-392.

[7] Shen Y H, Lv C H, Xu P, et al. Objective quality assessment of noised stereoscopic images [C]. *2011 third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, Shanghai, 2011: 745-747.

[8] 范媛媛,沈湘衡,桑英军. 基于对比度敏感度的无参考图像清晰度评价[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(10): 2485-2493.

Fan Y Y, Shen X H, Sang Y J. No reference image sharpness assessment based on contrastsensitivity [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(10):2485-2493. (in Chinese)

[9] 袁飞,黄联芬,姚彦. 基于视觉掩盖效应和奇异值分解的图像质量评测方法[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(4): 706-713.

Yuan F, Huang L F, Yao Y. Study on auto focusing algorithm for automatic microscope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(4): 706-713. (in Chinese)

[10] 唐艳秋,张兴祥,李新城,等. 基于人眼视觉灰度识别特性的图像动态范围小波变换处理方法[J]. *液晶与显示*, 2012, 27(3):385-390.

Tang Y Q, Zhang X X, Li X E, et al. Image processing method of dynamic range with wavelet transform based on

human visual gray recognition characteristics [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012, 27 (3):385-390. (in Chinese)

[11] 姚军财. 基于人眼对比度敏感度视觉特性的图像质量评价方法[J]. 液晶与显示, 2011, 26(3):390-396.
Yao J C. Image quality assessment method based on contrast sensitivity characteristics of human vision system [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2011, 26(3):390-396. (in Chinese)

[12] 高国荣, 刘冉, 奕旭明. 一种改进的基于小波变换的图像边缘提取算法[J]. 武汉大学学报:理学版, 2005, 15(5): 615-619.
Gao G R, Liu R, Yi X M. A revised image edge detection method based on wavelet [J]. *Journal of Wuhan University: Natural Science Edition*, 2005, 15(5):615-619. (in Chinese)

[13] 赵瑞超. 立体图像质量客观评价方法的研究与实现[D]. 天津: 天津大学, 2010.
Zhao R C. Research and Implementation of Quality Assessment for Stereoscopic Images [D]. Tianjin: Tianjin University, 2010. (in Chinese)

作者简介:田浩南(1987—),男,吉林长春人,硕士,研究实习员,主要从事立体图像处理、超分辨率重构等方面的研究。
E-mail: tju_thn@163.com

张叶(1981—),女,吉林长春人,博士,副研究员,主要从事计算机视觉与模式识别等方面的研究。E-mail: zhangye@ciomp.ac.cn