

基于视觉感知和零水印的部分参考立体图像质量评价模型

周武杰^{①②} 郁梅^{①③} 蒋刚毅^{*①③} 彭宗举^① 邵枫^①

^①(宁波大学信息科学与工程学院 宁波 315211)

^②(浙江科技学院信息与电子工程学院 杭州 310023)

^③(计算机软件新技术国家重点实验室(南京大学) 南京 210093)

摘要:通过分析人类视觉系统的纹理方向特性和立体感知特性,并结合数字水印的半脆弱性和支持向量回归(Support Vector Regression, SVR)的泛化学习能力,该文提出一种基于视觉感知和零水印的部分参考立体图像质量客观评价模型。该模型利用立体图像左右视点经小波分解后在同一空间频率的水平 and 垂直方向子带系数关系构造反映图像纹理方向特征的视点零水印,同时,利用左右视点视差值与自适应阈值的大小关系构造反映立体感质量的视差零水印,然后利用 SVR 来学习两类零水印恢复率(视觉加权视点零水印恢复率和视差零水印恢复率)与主观评价价值的关系,最后用训练好的 SVR 完成立体图像质量预测。实验结果表明该模型符合人眼视觉特性,所得到的客观评价与主观评价具有较好的一致性。

关键词: 立体图像质量评价; 零水印; 人眼视觉特性; 视差

中图分类号: TN911.73

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)08-1786-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.01135

Reduced-reference Quality Assessment Model of Stereoscopic Image Based on Visual Perception and Zero-watermark

Zhou Wu-jie^{①②} Yu Mei^{①③} Jiang Gang-yi^{①③} Peng Zong-ju^① Shao Feng^①

^①(Faculty of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

^②(School of Information and Electronic Engineering, Zhejiang University of Science & Technology, Hangzhou 310023, China)

^③(National Key Lab of Software New Technology, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: Through analyzing the image structure direction characteristics and the stereoscopic perception of human visual system, and combining semi-fragile digital watermarking and Support Vector Regression (SVR), a reduced-reference stereoscopic image quality assessment model based on visual perception and zero-watermark is proposed. In this model, the view zero-watermark is constructed by judging the relation of the horizontal and vertical wavelet coefficients, which can reflect the image structure information. Meanwhile, the disparity zero-watermark that reflects the stereoscopic perception quality is constructed by using the disparity between the left and right views. And then the relativity of two watermark-recovering rates (watermark-recovering rates of the view and disparity zero-watermarks) and subjective quality scores can be learned by the training procedure of SVR. Finally, stereoscopic image quality is predicted by trained SVR. Experimental results show that the proposed reduced-reference model is in accordance with human visual characteristics, and consistent with the result of subjective evaluation value preferably.

Key words: Stereoscopic image quality assessment; Zero-watermark; Human visual characteristics; Disparity

1 引言

随着数字媒体及计算机网络技术的不断发展和

日益普及,平面图像处理技术趋于成熟,并得到了广泛的应用。随着生活品质的提高,平面图像已经不能满足人们的视觉享受,而立体图像提供了深度信息用来增强图像的真实感,给人们以身临其境的感受,增加了人们对事物的认知度和兴趣度^[1]。因此,市场对立体图像处理系统开发与应用的需求也越来越迫切,在诸多领域有着广泛的应用前景^[2]。在各种立体图像处理算法中,往往需要根据算法处理之后

2011-11-03 收到, 2012-04-18 改回

国家自然科学基金(60832003, 60902096, 61071120, 61171163), 浙江省自然科学基金(Y1100219, Y1101240), 浙江省科技厅项目(2010R50009-1), 浙江省研究生创新科研项目(YK2009044, YK2011045)和宁波大学优秀学位论文培育基金(PY20110002)资助课题

*通信作者: 蒋刚毅 jianggangyi@126.com

的立体图像感知质量状况来评价该算法性能的优劣或调整相关的指标参数以达到更好的处理效果。现有立体图像质量评价方法可分为主观评价方法和客观评价方法。主观评价方法就是让测试人员根据事先约定好的评价尺度对待测试立体图像按视觉感知效果进行打分，最后得到待测立体图像的质量分数，它是一种较为可靠的评价方法，但其耗时、费力又无法用数学模型对其进行描述。因而多年来学者们对立体图像客观评价方法进行了一些探索性的研究^[3-8]，根据其对于原始立体图像依赖程度的差异，可分为 3 种类型：全参考型(Full Reference, FR)^[3-5]、部分参考型(Reduced Reference, RR)^[6,7]及无参考型(No Reference, NR)^[8]。FR 需要完整的参考立体图像，使其在实际应用中受到了制约。NR 无需参考立体图像，相比 FR 更加灵活，但现有的模型主要针对特定的失真模型，如分块效应、模糊和振铃效应等，因此其使用范围相对较窄。RR 是一种介于 FR 和 NR 之间的立体图像质量评价方法，该方法利用了参考立体图像的部分特征信息来评价失真立体图像的感知质量，所需存储或传输的数据量少，且可靠性较高，尤其在实时通信系统中，RR 可用来监控立体图像感知质量并调整其码率以达到较好的视觉效果，因此，RR 模型的研究成为该领域的一个热点课题。

目前，国内外在 FR^[3-5]和 NR^[8]立体图像质量评价模型的研究取得了一定的进展。FR 立体图像的质量评价模型不仅要考虑左右视点质量^[9]，还要考虑立体图像深度/视差信息^[3]、视觉体验^[4]、观察者视觉疲劳^[5]、双目融合及立体掩蔽等因素对立体图像质量的影响。文献[8]采用评价失真后立体图像特征和视差特性，提出了一种 NR 立体图像质量客观评价模型。在研究部分参考评价模型中，Hewage 等人^[6,7]提出了用于立体视频压缩与传输的部分参考立体视频质量评价模型。而部分参考立体图像质量评价模型的研究相对较为罕见^[6,7]，然而部分参考平面图像质量客观评价模型的研究取得了较好的进展^[10-12]。文献[10]提出了一种基于图像自然特性统计的部分参考平面图像质量评价模型(RR-WISM)。此外，根据数字水印的半脆弱性，通过水印的恢复率来估计平面图像质量，该方案的研究已经成为部分参考平面图像质量评价一个重要的研究方向。文献[11]利用了超频谱的嵌入方法在原始平面图像离散余弦变换域中嵌入水印，而文献[12]利用量化的方法在原始平面图像离散小波变换(Discrete Wavelet Transform, DWT)域内嵌入水印，最后，通过水印的恢复率来估计平面图像的感知质量，上述方法在水印的嵌入

的过程中改变了平面图像的质量。而近年来，文献[13]提出一种零水印技术，对原始图像信息不做任何修改，而只是提取平面图像的重要特征构造鲁棒水印来实施图像的版权保护，从而缓解了水印的透明性和鲁棒性的矛盾。数字水印有鲁棒水印、半脆弱水印和脆弱水印之分，零水印属于数字水印的一种，因此零水印的半脆弱性也可以应用于部分参考评价模型。

本文在研究立体图像质量客观评价模型、基于半脆弱数字水印的平面图像质量评价方案以及零水印技术的基础上，利用视觉感知特性、水印的半脆弱性和支持向量回归(Support Vector Regression, SVR)学习泛化能力，提出一种基于视觉感知和零水印的部分参考立体图像质量客观评价模型。在选择构造零水印方法时，根据图像纹理结构方向及立体感知特性构造两种零水印，通过 SVR 学习两种零水印恢复率与主观评价价值的关系，再利用训练好的 SVR 对立体图像质量进行预测。

2 基于视觉感知和零水印的部分参考立体图像质量评价模型

图像纹理结构信息和立体感的变化都会影响立体图像质量。图像纹理结构信息是图像的重要特征之一，由那些带有方向特性的像素、边缘及形状组成，可以通过统计失真图像在方向特性上的改变量来计算立体图像左右视点的客观质量，本文通过对离散小波变换(DWT)域中的图像结构特性的研究，根据 DWT 域中同一空间频率的水平和垂直子带系数绝对值大小关系构造视点零水印，对各级子带的零水印恢复率按对比敏感函数进行视觉加权平均，得到视点图像的客观评价价值。立体感是指人眼感受场景深度的能力，即一种判断场景中物体之间或者物体与观察者之间的相对距离的能力，视差信息是其最重要的信息线索，是人眼最为强烈的生理立体感知因素，视差信息的改变可以反映立体感知质量的变化，本文通过块搜索方法得到立体图像的最佳匹配块，根据视差值与自适应阈值大小关系构造视差零水印，通过统计视差零水印的恢复率得到立体感知质量分数。最后，立体图像最终客观评价价值是通过训练好的 SVR 预测得到。图 1 为本文提出的基于视觉感知和立体图像零水印的部分参考立体图像质量客观评价模型总体框图。

2.1 立体图像零水印的构造

2.1.1 立体图像左右视点零水印构造 DWT 具有良好的多分辨率特性及方向性，与人眼视觉特性吻合。采用五级小波变换来说明视点零水印构造过程，以

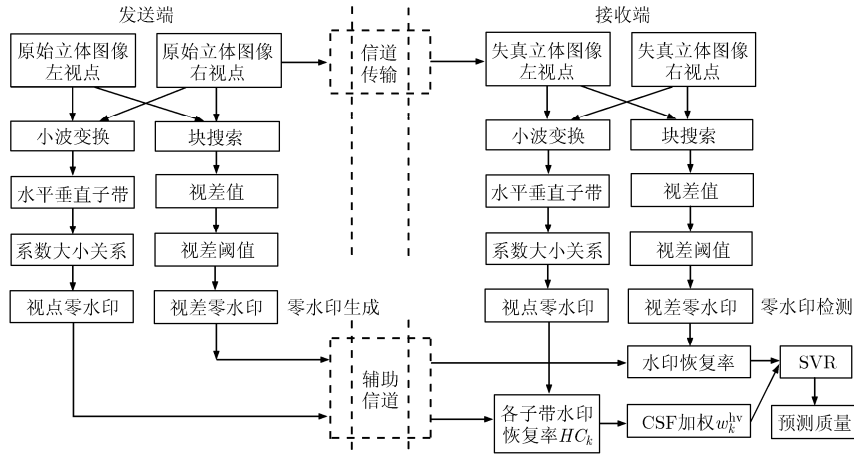


图 1 基于视觉感知和零水印的部分参考立体图像质量客观评价模型框图

右视点为例，进行 DWT 运算，构造视点零水印，步骤如下：

(1)原始立体图像右视点灰度图 $I = \{I(i, j) | i \in [1, M], j \in [1, N]\}$ ，对其进行五级小波分解，得到 5 个水平子带 V_k 和 5 个垂直子带 H_k ，其中 $k = 1, 2, 3, 4, 5$ 。

(2)根据同一级分解后的水平和垂直子带系数的绝对值大小关系，构造零水印 W_k ，当水平子带系数绝对值大于所对应的垂直子带系数绝对值，则 $W_k = 1$ ；否则， $W_k = 0$ ，其中 $k = 1, 2, 3, 4, 5$ 表示分解后的所对应的不同子带，公式如下：

$$W_k = \begin{cases} 1, & |V_k| > |H_k| \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (1)$$

2.1.2 立体图像视差零水印的构造 在立体图像视差计算方法中，其最为常用的是固定尺寸方块匹配算法。首先将目标视点图像分割成不重叠小方块，大小为 $n \times n$ ，假设当前待计算块的位置记为 (x, y) ，为了求取相邻视点块的最佳视差矢量 \mathbf{d}_v ，从 $[0, d_{\max}]$ 中求得使该能量函数 $E(x, y, \mathbf{d}_v)$ 最小的视差矢量 \mathbf{d}_v 作为待计算块的视差值，其能量函数的表达式如下：

$$E(x, y, \mathbf{d}_v) = E_d(x, y, \mathbf{d}_v) + \lambda \cdot E_s(x, y, \mathbf{d}_v) \quad (2)$$

其中 $E_d(x, y, \mathbf{d}_v)$ 为数据项， $E_s(x, y, \mathbf{d}_v)$ 为视差平滑约束项，其数学表达式分别为

$$E_d(x, y, \mathbf{d}_v) = \sum_{s=0}^{n-1} \sum_{t=0}^{n-1} |I_L(x+s, y+t) - I_R(x+\mathbf{d}_v+s, y+t)| \quad (3)$$

$$E_s(x, y, \mathbf{d}_v) = |d_v - d_{v0}| + |d_v - d_{v1}| + |d_v - d_{v2}| + |d_v - d_{v3}| \quad (4)$$

其中 $d_{v0} \sim d_{v3}$ 为 \mathbf{d}_v 的邻域视差，数据项为相邻视点匹配方块像素误差绝对值的总和。为了使求取的视差矢量图更为平滑，在求取立体图像视差时采用了

平滑约束的视差邻域滤波法，该方法利用了立体图像视差域的空间相关性，使得当前视差值与已求取的邻域视差值尽可能变化不大。

以块大小 $n \times n$ 为例来说明视差零水印构造过程，步骤如下：

(1)在左右视点找到最佳匹配块记为 $B_l(x, y)$ 和 $B_r(x, y)$ ，求得最佳匹配块视差矢量为 $\mathbf{d}_v(x, y)$ 。

(2)求出自适应视差阈值 S ，公式如下：

$$S = \left\{ n^2 \sum_{x=1}^{M/n} \sum_{y=1}^{N/n} \mathbf{d}_v(x, y) \right\} / M \cdot N \quad (5)$$

通过这种方法得到的阈值是自适应的，该阈值将作为密钥传输，不同的立体图像具有不同的阈值，这样可以使得立体匹配水印中的“0”和“1”的个数比较接近。

(3)当最佳匹配块视差矢量 $\mathbf{d}_v(x, y)$ 大于阈值 S ，则 $W_d = 1$ ，否则， $W_d = 0$ ；视差零水印构造如下：

$$W_d = \begin{cases} 1, & \mathbf{d}_v(x, y) > S \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (6)$$

2.2 立体图像零水印检测

2.2.1 左右视点零水印检测 视点零水印检测过程与构造过程类似。将原始立体图像进行不同类型及等级的失真得到失真立体图像。以右视点图像 $I' = \{I'(i, j) | i \in [1, M], j \in [1, N]\}$ 为例，来说明视点零水印检测过程，步骤如下：

(1)失真右视点灰度图像 $I' = \{I'(i, j) | i \in [1, M], j \in [1, N]\}$ ，对其进行五级小波分解。得到 5 个水平子带 V'_k 和 5 个垂直子带 H'_k ，其中 $k = 1, 2, 3, 4, 5$ 。

(2)根据同一级分解后的水平子带和垂直子带系数的绝对值大小关系，检测零水印 W'_k ，当水平子带系数大于垂直子带系数，则 $W'_k = 1$ ；否则， $W'_k = 0$ ，其中 $k = 1, 2, 3, 4, 5$ 表示分解后的所对应的

不同子带，公式如下：

$$W'_k(i, j) = \begin{cases} 1, & |V'_k| > |H'_k| \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (7)$$

2.2.2 视差零水印检测 立体视差零水印检测过程与构造过程类似。具体过程如下：

(1)在失真左右视点找到最佳匹配块记为 $B'_l(x, y)$ 和 $B'_r(x, y)$ ，求得最佳匹配块视差矢量 $\mathbf{d}'_v(x, y)$ ，在结合水印生成的过程中得到的阈值 S (将 S 作为检测水印的密钥)。

(2)当最佳匹配块像视差矢量 $\mathbf{d}'_v(x, y)$ 大于阈值 S (密钥)，则 $W'_d = 1$ ，否则， $W'_d = 0$ ；零水印检测公式如下：

$$W'_d = \begin{cases} 1, & \mathbf{d}'_v(x, y) > S \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (8)$$

2.3 基于零水印的立体图像质量评价

设构造和检测的零水印分别为 W 和 W' 。评价检测零水印 W' 破坏程度最为直接方式就是求取正确恢复的水印位数与总水印位数的比值，即水印恢复率，其值越高，相似程度越好，说明质量破坏越少。令 L 表示水印的长度，则水印的恢复率 HC 可用如下公式表示：

$$HC = 1 - (\sum W \oplus W') / L \quad (9)$$

2.3.1 左右视点的质量评价 大量主观实验研究结果表明，人类视觉系统(Human Visual System, HVS)对不同频率的敏感程度是有差异的，通常用对比度敏感函数(Contrast Sensitivity Function, CSF)来描述 HVS 的敏感程度与频率之间的关系，可以得到 CSF 具有带通特性。利用 CSF 的带通特性，对不同级 DWT 子带的视点零水印恢复率进行 CSF 视觉加权，视觉权重值可由相应频带内 CSF 的积分求取。由于只考虑了小波分解后垂直和水平子带的系数变换关系，所以本文只采用了垂直和水平方向上 CSF 响应值作为权值求取函数，即虚线 CSF，其表达式为

$$A_{\text{HV}}(f) = 2.6(0.0192 + 0.114f) \exp[-(0.114f)^{1.1}] \quad (10)$$

本文采用了五级小波分解，各级垂直/水平方向的每个小波子带的积分后权值如表1所示， w_k^{HV} 表示垂直和水平方向的权值。

垂直和水平子带系数绝对值大小关系的改变体

现了立体图像左右视点图像的结构发生了变化，从而导致了视点图像质量的下降。对各子带水印恢复率按其在所在尺度进行 CSF 加权，得到加权视点图像质量为

$$HC_v = (\sum w_k^{\text{HV}} \cdot HC_k) / \sum_k w_k^{\text{HV}} \quad (11)$$

其中 $HC_k = 1 - (\sum W_k \oplus W'_k) / L_k$ ， k 表示小波分解后的第 k 个子带 ($k = 1, 2, 3, 4, 5$)， L_k 表示第 k 子带的零水印长度， \oplus 表示异或运算。

2.3.2 基于立体感知的立体图像质量评价 立体感的好坏将会影响立体图像整体质量。HVS 根据双目看到的两幅具有细微不同的场景图进行生理及心理综合处理，产生物体在场景中较为准确的定位，其最为重要的定位信息线索就是双目视差。当相邻视点匹配位置发生改变，那么所对应的视差值也就发生了变化，从而影响了立体图像的立体感知质量。因此可以通过求取反映匹配位置变化的视差零水印恢复率来体现立体感知质量的变化程度。令 L_d 表示视差零水印的长度得到水印的恢复为

$$HC_d = 1 - (\sum W_d \oplus W'_d) / L_d \quad (12)$$

2.4 立体图像质量的预测

SVR 是基于结构风险最小化准则的统计学理论和新型机器学习方法，可有效地抑制过拟合问题。SVR 对立体图像质量的预测分为两个过程。(1)训练过程：已知训练样本集为 $HC_i = \{(HC_{v,i}, HC_{d,i}) \mid i = 1, 2, \dots, l\}$ 和 $D_i = \{DMOS_i \mid i = 1, 2, \dots, l\}$ ， l 表示为训练的图像数， HC_i 表示第 i 幅测试立体图像的两种零水印恢复率， $DMOS_i$ 为第 i 幅测试立体图像的主观评价价值。由于图像的两种零水印恢复率是非线性的，可通过核映射将样本低维空间映射到高维特征空间，然后在高维特征空间实现回归。设回归函数形式如下： $f(HC_i) = \langle w, HC_i \rangle + b$ ，式中 b 为偏置量， w 为权重。使用 SVR 寻求最佳 w ， b 使训练的误差最小。(2)测试过程：输入测试立体图像的两种零水印恢复率 $HC_t = \{HC_{v,t}, HC_{d,t}\}$ ，根据训练得到 f ，预测该图像的质量分数 D_t 。将该 SVR 运用于立体图像质量评价，避免了两种水印恢复率的权重讨论问题。

3 实验结果分析

为测试本文提出的部分参考立体图像质量评价

表1 各方向每个小波子带的权值

f	(0.250000,0.50000]	(0.125000,0.25000]	(0.062500,0.12500]	(0.031250,0.06250]	(0.015625,0.03125]
w_k^{HV}	0.1077	0.5691	0.9455	0.8581	0.5844

模型的性能,分别设计了以下两组实验验证该方法的可行性、有效性和合理性。

3.1 模型的可行性及有效性实验

本实验采用宁波大学所提供的立体图像测试库^[4],该库的原始立体图像来自在立体图像处理领域权威地位的实验室^[15],选取了其中10对作为原始立体图像,包括了 Art, Bowling1, Computer, Dolls, Drumsticks, Dwarves, Laundry, Mobius, Reindeer 和 Rocks1,如图2所示给出了立体图像的右视点图像。接着,对原始立体图像进行4种类型的失真处理,得到一系列不同失真类型及不同失真等级的立体图像,包括 JPEG 2000 压缩 100 对、JPEG 压缩 70 对、白噪声失真 (White Noise, WN) 100 对、高斯模糊失真 (Gaussian Blur, GBlur) 100 对,同时还给出了每对失真立体图像的主观评价 (Difference Mean Opinion Score, DMOS), DMOS 值由观测者给出的分值得到, DMOS 值越小,表示立体图像主观感知质量越好。

为了更好地说明部分参考立体图像客观质量评价模型的性能,选用3个性能评价指标来衡量客观评价价值和 DMOS 的相关性、一致性及误差:其一为模型的客观评价价值经非线性回归分析后得到的预测值与 DMOS 的相关系数 (Correlation Coefficient, CC),该指标反映模型的精确度;其二为预测值与 DMOS 的 Spearman 相关系数 (Rank-Order Correlation Coefficient, ROCC),该指标反映模型的单调性能(一致性);其三为预测值与 DMOS 的均方根误差 (Root Mean Squared Error, RMSE),该指标反映了模型的误差程度。其中 CC 值及 ROCC 值的绝对值越接近于 1,说明该模型的评价值与 DMOS 相关性越好;而 RMSE 值越小,说明该模型的评价误差越小。根据视点质量和立体感质量对立体图像质量的影响程度不同,通过实验,

选取 $n = 8$, $d_{\max} = 38$ 。在 SVR 训练和预测实验中选取 Art, Bowling1, Computer 和 Dolls 的各类失真立体图像作为训练立体图像,剩下失真立体图像作为测试立体图像。

为了说明模型的可行性及有效性,用来比较的客观评价算法包括常用的全参考立体图像质量评价算法 PSNR 和经典的部分参考平面图像质量评价算法 RR-WISM。两种失真类型不同失真等级的立体图像各类评价算法的客观评价价值与 DMOS 的散点如图3所示,其中曲线用5参数 logistic 逻辑函数非线性拟合得到,横坐标为客观评价模型的评价值,纵坐标表示 DMOS,每个散点代表了测试库中每幅失真立体图像,从图中可得其散点集中并贴近曲线,说明客观评价模型与 DMOS 的相关性和一致性好、误差小,从而表明该模型能够很好地预测立体图像质量的变化情况。接着,用 CC, ROCC 和 RMSE 3 个指标进一步说明本文算法的性能,各类性能指标如表2所列,从表中可以得到本文所提出的部分参考模型3个参数性能指标都较优:较高的预测精确度及较好的相关性(CC值接近1)、较好的预测单调性及一致性(ROCC值接近1)和较低的预测误差(RMSE值较小)。所以,本文提出的模型是一种新的并且有效的部分参考立体图像质量评价模型。

3.2 模型的合理性实验

为了测试所提出的部分参考评价模型输出值的合理性,采用数据库“Art”立体图像构造了4组退化立体图像,分别为 JPEG2000 压缩立体图像、JPEG 压缩立体图像、白噪声失真立体图像、高斯模糊失真立体图像。图4给出了本模型视点质量 HC_v 、立体感质量 HC_d 的客观输出值随着视点感知质量的下降(失真程度增强)而递减,这充分表明了本文提出模型的合理性。

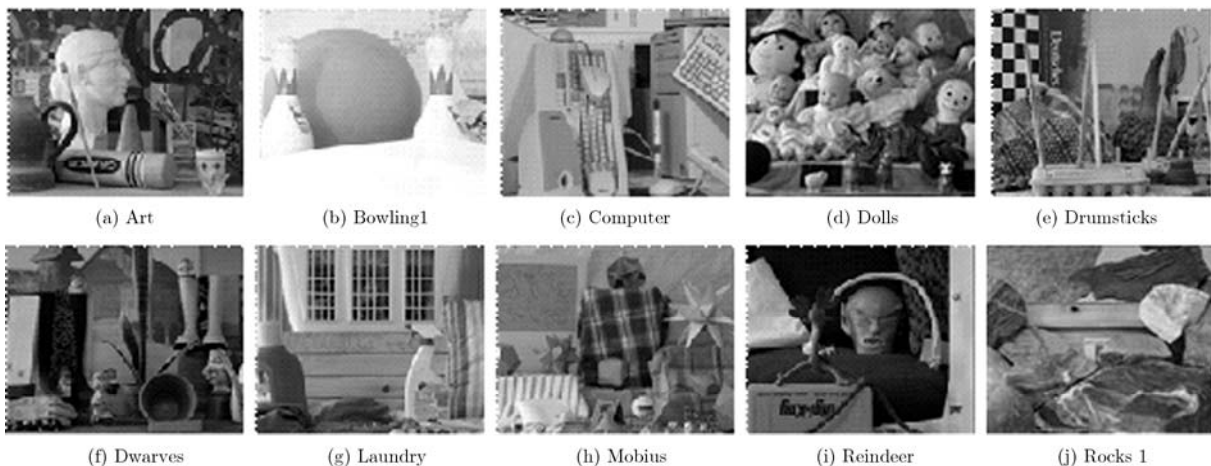


图2 立体图像的右视点图像

表 2 客观模型的 3 个性能指标的比较

模型	JPEG2000			JPEG		
	CC	ROCC	RMSE	CC	ROCC	RMSE
PSNR	0.956 6	0.760 9	4.013 3	0.914 6	0.848 1	5.103 3
RR-WISM	0.870 3	0.706 1	7.708 5	0.893 0	0.854 8	5.561 6
本文模型	0.980 4	0.765 0	2.971 9	0.963 8	0.914 7	3.006 3

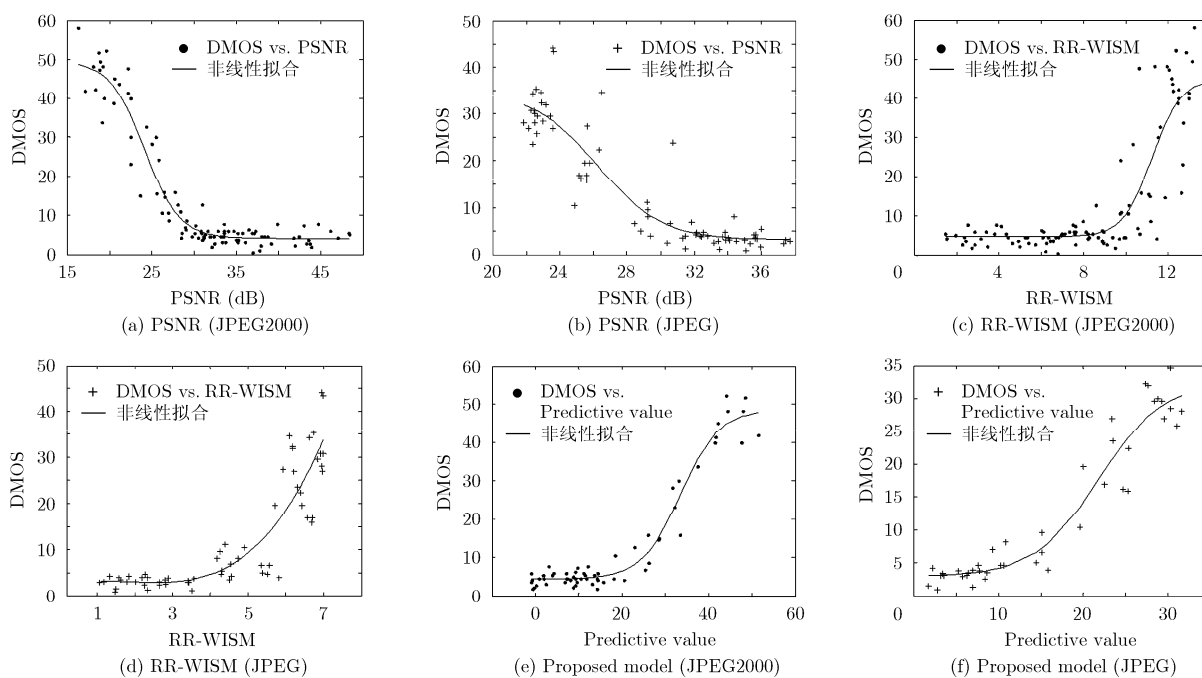


图 3 评价结果与 DMOS 散点图

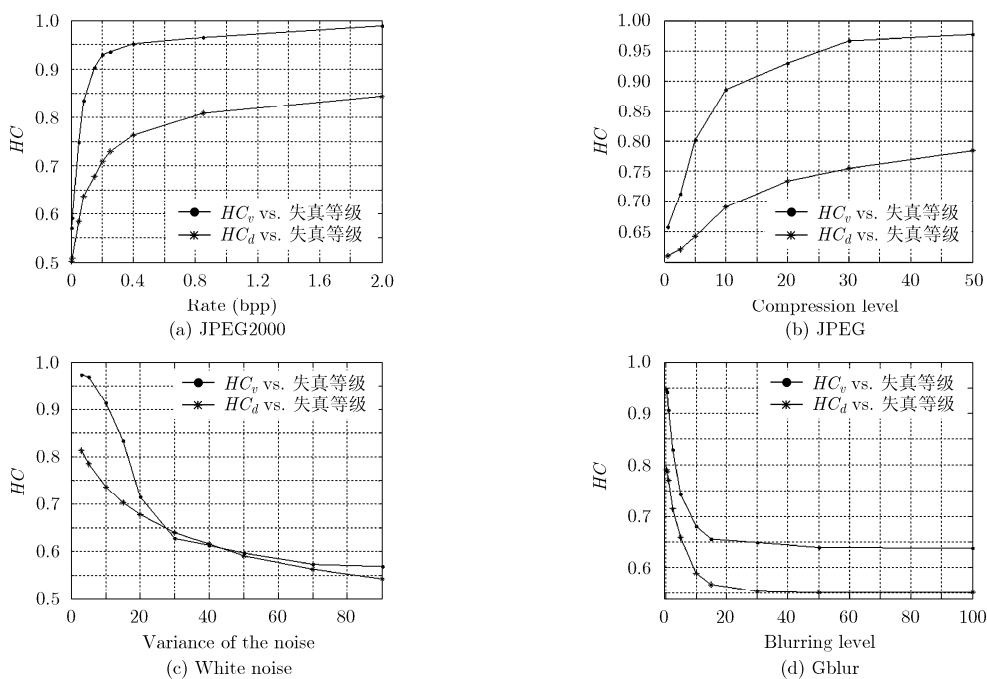


图 4 水印的恢复率随不同失真等级的示意图

4 结论

本文提出了基于视觉感知和零水印的部分参考立体图像质量客观评价模型, 实验结果表明, 该方法是一种有效的部分参考立体图像质量评价模型。该模型不仅拓展了数字水印技术的应用领域, 同时为立体图像质量提供一种新的评价模型。相比全参考和无参考立体图像评价模型, 该模型更适合监控网络传输的立体图像监控及其实时动态的网络立体图像/视频服务, 具有广阔的应用前景, 是立体图像质量评价的进一步扩展和延伸, 同时也是数字水印技术的应用拓展。

参考文献

- [1] Tanimoto M, Tehrani M P, Fujii T, *et al.* Free-viewpoint TV [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2011, 28(1): 67-76.
 - [2] Onural L. Signal processing and 3DTV[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2010, 27(5): 144-152.
 - [3] Benoit A, Callet P L, Campisi P, *et al.* Quality assessment of stereoscopic images[J]. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, 2008, 2008(1): 1-13.
 - [4] Lambooi M, Ijsselsteijn W, Bouwhuis D G, *et al.* Evaluation of stereoscopic images: beyond 2D quality[J]. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2011, 57(2): 432-444.
 - [5] Kim D and Sohn K. Visual fatigue prediction for stereoscopic image[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2011, 21(2): 231-236.
 - [6] Hewage C T E R and Martini M G. Reduced-reference quality assessment for 3D video compression and transmission[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2011, 57(3): 1185-1193.
 - [7] Hewage C T E R and Martini M G. Reduced-reference quality metric for 3D depth map transmission[C]. 3DTV-Conference: The True Vision-Capture, Transmission and Display of 3D Video (3DTV-CON), Tampere, June 7-9, 2010: 1-4.
 - [8] Akhter R, Parvez S, Horita Y, *et al.* No-reference stereoscopic image quality assessment[C]. Proc. of SPIE, San Jose, California, USA, January 2010, 7524: 75240T.1-75240T.12.
 - [9] 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.
 - Jiang G Y, Huang D J, Wang X, *et al.* Overview on image quality assessment methods [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(1): 219-226.
 - [10] Wang Z and Simoncelli E P. Reduced-reference image quality assessment using a wavelet-domain natural image statistic model[C]. Proc. of SPIE, San Jose, California, January 2005, 5666: 149-159.
 - [11] Farias M C Q, Carli M, and Mitra S K. Objective video quality metric based on data hiding [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2005, 51(3): 983-992.
 - [12] Wang S, Zheng D, Zhao J Y, *et al.* An image quality evaluation method based on digital watermarking [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2007, 17(1): 98-105.
 - [13] 温泉, 孙铁锋, 王树勋. 零水印的概念与应用[J]. 电子学报, 2003, 31(2): 214-216.
 - Wen Q, Sun T F, and Wang S X. Concept and application of zero-watermark[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2003, 31(2): 214-216.
 - [14] Wang X, Yu M, Yang Y, *et al.* Research on subjective stereoscopic image quality assessment [C]. Proceedings of SPIE-IS&T Electronic Imaging, 2009, 7255: 1-10.
 - [15] Scharstein D and Szeliski R. Middlebury stereo datasets [EB/OL]. <http://vision.middlebury.edu/stereo/data>, 2006.
- 周武杰: 男, 1983年生, 博士生, 讲师, 研究方向为多媒体信号处理与通信。
- 郁梅: 女, 1968年生, 教授, 主要研究方向为多媒体信号处理、视频压缩与通信。
- 蒋刚毅: 男, 1964年生, 教授, 主要研究方向为多媒体信息通信、图像处理与视频编码。
- 彭宗举: 男, 1973年生, 副教授, 研究方向为多媒体技术。
- 邵枫: 男, 1980年生, 副教授, 研究方向为多媒体信息处理。