

一种基于视觉特性加权的图像质量评价方法

谢立志,李玉惠,李 勃

(昆明理工大学 信息工程与自动化学院,云南 昆明 650000)

摘要:图像质量评价在视频图像的各种应用中起着重要的作用。由于结构相似度图像质量评价方法在利用视觉特性方面的不足,因此文中在结构相似度图像质量评价方法的基础上,引入包含重要视觉信息的梯度幅值和对不同频率感知差异的对比敏感度特性对其进行改进,提出了一种基于视觉特性加权的图像质量评价方法。首先采用 Sobel 算子计算图像的梯度幅值,对结构相似度评价方法进行改进;再利用对比敏感度函数计算图像块的感知因子,给图像块赋予相应的权重;最后通过图像块评价值的加权得到整体评价值。实验结果表明,该算法优于结构相似度和峰值信噪比图像质量评价方法,更好地反映了人眼的主观感受。

关键词:图像处理;图像质量评价;人眼视觉特性;梯度幅值;结构相似度;峰值信噪比

中图分类号:TP301

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2016)08-0177-05

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2016.08.038

An Image Quality Assessment Method Based on Visual Features Weighting

XIE Li-zhi, LI Yu-hui, LI Bo

(College of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650000, China)

Abstract: Image quality assessment plays an important role in a variety of applications for video images. Because of the deficiency of the image quality assessment method based on structural similarity in visual characteristics, on the basis of image quality assessment method of structure similarity, the gradient magnitude which contains the important visual information is introduced and the contrast sensitivity characteristics which is the differences in the perception of different frequency to improve, presentation of a method of image quality assessment based on visual features weighting. Firstly, the method of structural similarity evaluation is improved by gradient magnitude which is calculated with Sobel operator. Then, the perception factors of image block is calculated with the contrast sensitivity function, and the weight is given to the image block. Finally, the whole evaluation value is obtained by adding the image block evaluation value by weight of the image block. Experimental results show that the proposed algorithm is superior to structural similarity and peak signal to noise ratio of image quality assessment method, and better to reflect the subjective feelings of the human eye.

Key words: image processing; image quality evaluation; human visual characteristics; gradient magnitude; structural similarity; peak signal to noise ratio

1 概述

随着数字图像技术的发展,图像质量评价在图像压缩、传输、水印处理及模式识别等图像处理领域中发挥着重要作用,因此对图像质量的有效评价具有重要意义。图像质量的评价方法大致可分为主观评价方法和客观评价方法^[1]。主观评价方法虽然能准确地评价

图像质量,但其费时、成本高、易受环境因素的影响,很难应用到实际当中。而客观评价方法计算简便、稳定、能够实时处理,因此有较多的研究人员对客观评价方法进行的研究,并产生了一系列的图像质量评价方法。

在客观评价方法中,比较经典的图像质量评价方法有均方根误差(Mean Squared Error, MSE)、峰值信

收稿日期:2015-10-22

修回日期:2016-01-27

网络出版时间:2016-06-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61363043)

作者简介:谢立志(1989-),男,硕士研究生,研究方向为图像处理、模式识别、嵌入式系统开发;李玉惠,博士,教授,通信作者,研究方向为嵌入式系统的研究与开发、图像处理系统的研究与开发、RFID 射频识别系统的研究与开发;李 勃,教授,研究方向为智能计算、图像处理系统的研究与开发、物联网技术与应用。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20160622.0842.016.html>

噪比(Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR)等。这些方法从单个像素的角度对图像质量进行分析,没有充分考虑人眼视觉特性以及像素之间的相关性,因此,与主观评价的相关性较差。在此基础上,文献[2-5]根据人眼视觉的某些特性进行了一系列的改进。其中文献[2]在充分分析人类视觉系统(HVS)的亮度、纹理、边缘等特性的基础上,提出一种结合 HVS 特性的加权峰值信噪比计算方法。文献[3]通过主观眼动跟踪实验和客观 Itti 模型提取的感兴趣权重矩阵对 PSNR 进行改善。文献[4]根据人眼视觉阈值特性,提出了基于小波的视觉信号信噪比的图像质量评价方法。文献[5]根据人眼图像色差对比敏感的感知特性,提出了一种基于人眼视觉特性的色差均方误差和色差峰值信噪比统计参数的评价彩色图像质量的方法。

随着人们对人眼视觉系统研究的不断深入,Wang 等^[6]根据人眼视觉系统对图像结构信息的高度感知性,提出了基于结构相似度(Structural SIMilarity, SSIM)的图像质量评价方法。该方法比 MSE 和 PSNR 更加符合人眼特性。后来的研究者在此基础上又进行了不同程度的改进。例如,文献[7-8]考虑了边缘信息对人眼感知结构的重要性,加入边缘信息特性对结构相似度评价方法进行改进。文献[9]考虑了感兴趣区域(Region Of Interest, ROI)对图像质量的影响,提出了一种基于 SSIM 与 ROI 的视频质量评价方法。文献[10]考虑了人眼对比敏感度(CSF)特性在图像感知中的重要作用,提出了小波模拟对比敏感度(CSF)特性的加权结构相似度(W-MSSIM)评价方法。文献[11]根据视觉特征显著和失真严重引起的注意转移对视觉感知图像的影响,提出了一种基于注意转移机制的结构相似度图像质量客观评价方法。文献[12]提出了一种结合 HVS 和 SSIM 的无参考模糊图像评价方法。

这些改进方法均取得了较好的效果,体现了视觉特性在图像质量评估中的重要作用,也反映了 Wang 等提出的结构相似度评价方法考虑的视觉特性不够充分。

由于结构相似度评价方法在视觉特性方面运用的不足,故考虑到了包含理解场景重要信息的梯度幅值,但单独利用梯度幅值改进结构相似度评价方法也存在一些问题,故又考虑了对不同频率感知差异的人眼对比敏感度特性进行进一步改进。在此,文中提出一种基于视觉特性加权的图像质量评价方法。

2 结构相似度图像质量评价方法

Wang 等提出的结构相似度 SSIM 图像质量评价方法,主要考虑了人类视觉系统最为关注的图像结构

信息。假设 X 和 Y 为两个图像信号, X 为原始图像, Y 为失真图像。SSIM 评价方法分为三个部分:亮度度量函数 $l(x, y)$, 对比度度量函数 $c(x, y)$, 结构度量函数 $s(x, y)$ 。SSIM 的计算公式如下:

$$\text{SSIM}(x, y) = [l(x, y)]^\alpha \cdot [c(x, y)]^\beta \cdot [s(x, y)]^\gamma = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)} \quad (1)$$

其中, $l(x, y) = \frac{2\mu_x\mu_y + C_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1}$, $c(x, y) = \frac{2\sigma_x\sigma_y + C_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2}$, $s(x, y) = \frac{\sigma_{xy} + C_3}{\sigma_x\sigma_y + C_3}$; $\mu_x, \mu_y, \sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_{xy}$ 分别表示图像 x, y 的均值、方差、协方差; $C_1, C_2, C_3 = C_2/2$ 为小的常量,以消除式(1)中分母为 0 而引起的不稳定。

MSSIM 算法是将图像划分成总数为 M , 大小为 $N \times N$ 的图像块,记图像块为 $\{x_i, y_i, i = 1, 2, \dots, M\}$ 。分别求出 M 个图像块的 SSIM 值,再求平均得到整幅图像的质量评分,即平均结构相似度(MSSIM):

$$\text{MSSIM}(x, y) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \text{SSIM}(x_j, y_j) \quad (2)$$

根据 SSIM 的定义,可知 MSSIM 的分值越高,两幅图像越相似,失真图像的质量越好。

3 基于视觉特性的图像质量评价方法

人是图像的最终感受者,图像质量评判的好坏主要看是否更好地符合人眼感知。因此一个符合人眼感知特性的图像质量评价算法,就应当充分利用人眼视觉特性。文中结合梯度幅值和对比敏感度特性对结构相似度评价方法进行有效改进。

3.1 梯度幅值特性

由于梯度幅值包含理解场景至关重要的视觉信息,且人眼对比度敏感特性对梯度幅值特性较为敏感,故提取梯度幅值作为图像特征。文献[13]提取图像的梯度幅值作为其中一个特征,并对图像进行质量评价,取得了较好的评价效果。

图像梯度幅值的计算是求取图像边缘、图像分析等图像处理领域的基本步骤,求取梯度幅值常见的掩盖算子有 Sobel 算子^[14]、Prewitt 算子^[14]和 Scharr 算子^[15]。表 1 分别列出了 3 种算子的偏导算子,图像的梯度幅值(Gradient Magnitude, GM)为:

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (3)$$

文中实验分别通过 3 种算子提取梯度幅值改进 SSIM 算法对图像的质量进行评价,发现 Sobel 算子的效果最好,故采用 Sobel 算子提取图像的梯度幅值。

对梯度幅值的相似性度定义如下:

$$g(x,y) = \frac{\sigma_{xy} + C_4}{\sigma_x \sigma_y + C_4} \quad (4)$$

其中, σ_x, σ_y 分别为梯度幅值图像块 x, y 的标准方差; σ_{xy} 为梯度幅值图像块 x 和 y 之间的协方差; C_4 为较小的常数。

表 1 使用不同的梯度算子得到 $f(x)$ 的偏导数

梯度算子	$G_x(x)$	$G_y(x)$
Sobel	$\frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} * f(x)$	$\frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} * f(x)$
Prewitt	$\frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} * f(x)$	$\frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} * f(x)$
Scharr	$\frac{1}{16} \begin{bmatrix} 3 & 0 & -3 \\ 10 & 0 & -10 \\ 3 & 0 & -3 \end{bmatrix} * f(x)$	$\frac{1}{16} \begin{bmatrix} 3 & 10 & 3 \\ 0 & 0 & 0 \\ -3 & -10 & -3 \end{bmatrix} * f(x)$

3.2 对比敏感度特性

对比敏感视觉特性主要体现了人眼视觉的带通特性,可由对比敏感度函数(Contrast Sensitivity Function, CSF)表示。虽然,不同实验所得的 CSF 函数表达式有所不同,但基本上都认为人眼对比敏感特性是空间频率的函数,具有一定的带通滤波器的性质,且各方向也不同。采用 Mannos 和 Sakrison 等^[16]提出的 CSF 模型,其数学表达式为:

$$CSF(f) = 2.6(0.192 + 0.114f) e^{-(0.114f)^{1.1}} \quad (5)$$

式中,空间频率 $f = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}$,单位为周期/度; f_x, f_y 分别为水平和垂直方向上的空间频率,单位为周期/度。

采用文献[17]的方法计算图像的空间频率 f ,对于选定的 $N \times N$ 图像块,水平和垂直方向上的空间频率的计算公式如下所示:

$$\begin{cases} f_x = \sqrt{\frac{1}{N \times N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=2}^N [I(i,j) - I(i,j-1)]^2} \\ f_y = \sqrt{\frac{1}{N \times N} \sum_{i=2}^N \sum_{j=1}^N [I(i,j) - I(i-1,j)]^2} \end{cases} \quad (6)$$

式中, $I(i,j)$ 为所对应图像块的像素值。

因此,可以计算得到空间频率 f 的值,对 f 进行归一化,将其映射到 0 到 0.5 之间,如下式所示:

$$f^* = \frac{f - f_{\min}}{2(f_{\max} - f_{\min})} \quad (7)$$

式中, f^* 为归一化的空间频率值; f_{\max} 和 f_{\min} 分别为空间频率的最大、最小值。

将 f^* 代入到式(5),就可以得到最终的对比敏感度函数量化值 CSF,并且 CSF 是在 0~1 之间变化的。

对比敏感度特性其在水平和垂直方向对人眼的刺

激最敏感,而在对角线方向上的敏感度是最弱的,故只采用了水平和垂直方向上的对比敏感度特性。实验中由水平和垂直方向上的空间频率计算得到的空间频率 f 的对比敏感度特性曲线如图 1 所示。

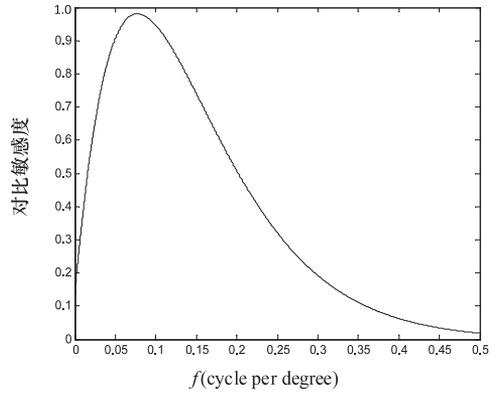


图 1 空间频率 f 的 CSF 特性曲线

图 2 中给出的是利用 3×3 图像块计算敏感度因子,并对原始图像进行因子调节得到的图像。图像中亮度越大的地方则对比敏感因子越大,越暗的地方则对比敏感因子越小。图 2 中图像的边缘有较大的对比敏感度因子,而平滑区域对比敏感因子较小,突出体现了图像的纹理和边缘部分。



(a)原始图像lena

(b)图(a)的感知图像

图 2 CSF 特性的感知图像

3.3 文中评价方法

(1)利用梯度幅值对结构相似度评价方法进行改进。利用 $g(x,y)$ 代替式(1)中的 $s(x,y)$,得到改进的 SSIM 评价方法,即梯度结构相似度方法。

$$GSSIM(x,y) = [l(x,y)]^\alpha \cdot [c(x,y)]^\beta \cdot [g(x,y)]^\gamma \quad (8)$$

为了计算简便,文中在计算过程中取 $\alpha = \beta = \gamma = 1$ 。因此有

$$GSSIM(x,y) = l(x,y) \cdot c(x,y) \cdot g(x,y) \quad (9)$$

(2)计算图像块的加权因子。根据对比敏感度特性给图像中的每个图像块都赋予相应的权值,为保证加权后图像的评价结果范围为 $[0,1]$,则对感知因子进行归一化处理得到相应图像块的权值。归一化的图像块的加权因子为:

$$\lambda(i) = \frac{CSF_i(f)}{\sum_{i=1}^M CSF_i(f)} \quad (10)$$

(3) 加权输出。由于每个图像块在人眼视觉中的感知不同,故将求得的 M 个图像块的 GSSIM 评价价值进行加权求和,得到整幅图像的评价价值。利用加权因子加权的 GSSIM 图像质量评价方法计算式如下所示:

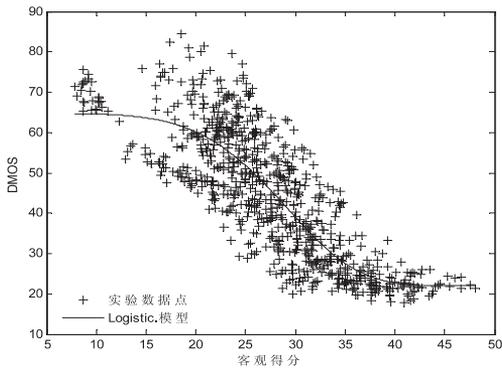
$$HGSSIM(x, y) = \sum_{i=1}^M \lambda(i) GSSIM(x_i, y_i) \quad (11)$$

4 实验结果与分析

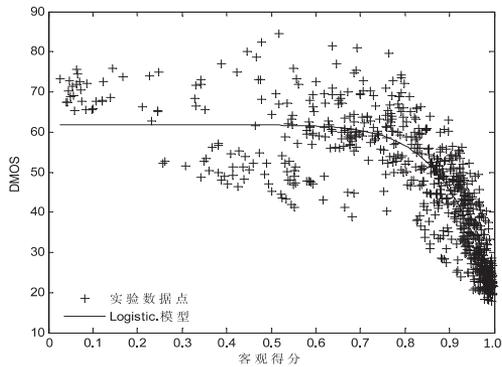
文中采用美国 TEXAS 大学 LIVE (Lab of Image and Video Engineer) 图像质量评价数据库^[18]进行仿真实验。该数据库含有 29 张原始图像,失真图像 779 张,共有 5 种失真类型。数据库给出了相应失真图像的主观评分差值 (Difference Mean Opinion Score, DMOS),它是满分值与主观评分 (Mean Opinion Score, MOS) 的差值,DMOS 的值越小则图像质量越好,反之越差。

首先利用文中算法计算出所有图像的客观评分,再与 DMOS 进行非线性拟合。最后按照 VQEG 对客观质量评价算法的检验标准^[19],选取皮尔逊相关系数 (CC)、斯皮尔曼相关系数 (SROCC) 和肯德尔相关系数 (KROCC) 作为这些算法的评价指标,对算法评价结果进行比较。这里 CC、SROCC 和 KROCC 的值越大,则算法客观分值与主观分值的相关性就越好。

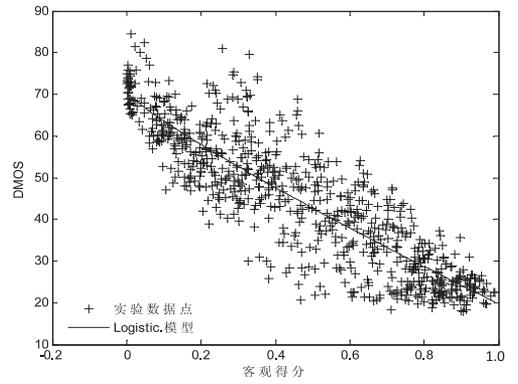
图 3 分别给出了 PSNR、SSIM、GSSIM 和 HGSSIM 算法评分相对于主观评分的散点图。散点越集中,表明客观算法评价效果越好,与主观评价的相关性越好。



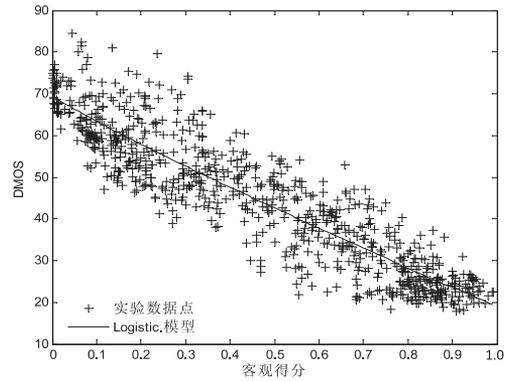
(a) PSNR



(b) SSIM



(c) GSSIM



(d) HGSSIM

图 3 各种算法散点图

从图 3 中可以看出,GSSIM 散点图相比 SSIM 散点图的聚合度有了一定改善,而且散点图的分布更加均匀、集中,说明利用梯度幅值改进的 SSIM 算法取得了一定的效果。但是改进后的结果中存在一个结果为负的评价价值,这个值不符合实际评价结果。在此基础上再利用对比敏感度特性对 GSSIM 算法进行改进,得到 HGSSIM 评价方法。通过 HGSSIM 散点图可以看出,通过对比敏感度特性改进后的算法解决了不符合实际的负值评价结果的现象,且比 GSSIM 散点图的聚合度有了较好的提高,散点的分布更加接近拟合曲线。

根据理论分析,如果客观评价完全与主观评价相符合,则散点会呈一条直线分布。同时也可以看出, HGSSIM 散点分布比 PSNR 和 SSIM 算法散点分布更加接近理想的线性关系。

通过表 2 数据的计算可知, HGSSIM 算法在 CC、SROCC 和 KROCC 指标方面比 PSNR 算法分别提高了 13.6%、11.1% 和 17.9%;比 SSIM 算法分别提高了 27.8%、4.6% 和 7.3%,比单独对 SSIM 算法改进的 GSSIM 算法分别提高了 3.9%、4.2% 和 6.9%。

表 2 图像质量评价算法在 LIVE 库上的测试结果

客观指标	PSNR	SSIM	GSSIM	HGSSIM
CC	0.799 8	0.711 1	0.874 3	0.908 8
SROCC	0.819 4	0.870 4	0.874 2	0.910 5
KROCC	0.616 7	0.677 1	0.680 1	0.726 8

分析可知,文中算法 HGSSIM 优于 PSNR 和 SSIM 算法,其评价值与主观分值的相关性较高,更加接近主观评价。

5 结束语

文中算法在结构相似度图像质量评价方法上,考虑了视觉特性在图像评估中的重要作用,引入包含重要视觉信息的梯度幅值特性和对不同频率图像产生感知差异的对比敏感度特性,并利用 Sobel 算子计算梯度幅值,利用对比敏感度函数计算感知因子。实验结果表明,文中算法利用的有效人眼视觉特性,使图像质量评估取得了较好的评价结果,更好地反映了人的主观感受。

参考文献:

- [1] Wang Z, Bovik A C, Lu L. Why is image quality assessment so difficult [C]//JCASSP. Florida: IEEE, 2002: 3313-3316.
 - [2] 潘春华,朱同林,刘浩. 图像质量的 HVS 评价方法[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(4): 149-151.
 - [3] 凌云,夏军,屠彦,等. 视觉感兴趣区的提取及其在视频图像质量评估中的应用[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2009, 39(4): 753-757.
 - [4] Chandler D M, Hemami S S. VSNR: a wavelet-based visual signal-to-noise ratio for natural images [J]. IEEE Transactions on Image Process, 2007, 16(9): 2284-2298.
 - [5] 姚军财. 基于人眼对比度敏感视觉特性的图像质量评价方法[J]. 液晶与显示, 2011, 26(3): 390-396.
 - [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 Process, 2004, 13(4): 600-612.
 - [7] 田浩南,李素梅. 基于边缘的 SSIM 图像质量客观评价方法[J]. 光子学报, 2013, 42(1): 110-114.
 - [8] 廖斌,陈岩. 双尺度边缘结构相似度的图像质量评估[J]. 计算机工程, 2007, 33(19): 199-200.
 - [9] 王正友,胡国胜,明建华,等. 基于 SSIM 与 ROI 的视频质量评价方法[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(9): 1906-1911.
 - [10] 朱爱红,张玉叶,李连. 小波模拟 CSF 加权的失真图像质量评价[J]. 北京理工大学学报, 2010, 30(6): 713-717.
 - [11] 张桦,夏一行,周文晖. 基于注意转移机制的图像质量评价方法[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(9): 2056-2061.
 - [12] 袁万立,李朝锋. 结合 HVS 及 SSIM 的无参考模糊图像评价方法[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(1): 210-212.
 - [13] Zhang L, Zhang L, Mou X Q, et al. FSIM: a feature similarity index for image quality assessment [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2011, 20(8): 2378-2386.
 - [14] Jain R, Kasturi R, Schunck B G. Machine vision [M]. [s. l.]: McGraw-Hill, Inc., 1995.
 - [15] Jahne B, Haubecke H R, Geible P R. Handbook of computer vision and applications [M]. [s. l.]: Academic Press, 1999.
 - [16] Mannos J L, Sakrison D H. The effects of a visual fidelity criterion on the encoding of images [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1974, 20(4): 525-536.
 - [17] 胡许明,张登福,南栋,等. 基于人眼视觉特性的图像视觉质量评价方法[J]. 计算机应用, 2012, 32(7): 1882-1884.
 - [18] Sheikh H R, Wang Z, Cormack L, et al. Live image quality assess database release 2 [EB/OL]. 2015. <http://live.ece.utexas.edu/research/quality>.
 - [19] Brunnstrom K, Hands D, Speranza F, et al. VQEG validation and ITU standardization of objective perceptual video quality metrics [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2009, 26(3): 96-101.
- (上接第 176 页)
- [1] 242-248.
 - [2] Vrindts E, Reyniers M, Darius P, et al. Analysis of soil and crop properties for precision agriculture for winter wheat [J]. Biosystems Engineering, 2003, 85(2): 141-152.
 - [3] Trooien T P, Heermann D F. Measurement and simulation of potato leaf area using image processing measurement [J]. Transaction of the ASAE, 1992, 35(5): 1719-1721.
 - [4] 陈晓光,于海业,周云山,等. 应用图象处理技术进行蔬菜苗特征量识别[J]. 农业工程学报, 1995, 11(4): 23-26.
 - [5] 武聪玲,滕光辉,李长纓. 黄瓜幼苗生长信息的无损监测系统的应用与验证[J]. 农业工程学报, 2005, 21(4): 109-112.
 - [6] 李少昆,张弦,赵明,等. 作物株型信息多媒体图像处理技术的研究[J]. 作物学报, 1998, 24(3): 265-271.
 - [7] 张伟,毛罕平,李萍萍,等. 基于计算机图像处理技术的作物缺素判别的研究[J]. 计算机应用与软件, 2004, 21(2): 50-51.
 - [8] 王勇智. 数字图象的二值化处理技术探究[J]. 湖南理工学院学报:自然科学版, 2005, 18(1): 31-33.
 - [9] 李鸿林,张忠民,羿宗琪. 中值滤波技术在图像处理中的应用[J]. 信息技术, 2004, 28(7): 26-27.
 - [10] 李银华,路新惠. 改进型自适应中值滤波算法在图像处理中的应用[J]. 郑州轻工业学院学报:自然科学版, 2009, 24(1): 83-86.
 - [11] Abdel-Aziz Y I, Karara H M. Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry [C]//Proceedings of symposium on close-range photogrammetry. [s. l.]: [s. n.], 1971.
 - [12] Zhang Z Y. Flexilbe camera calibration by viewing a plane from unknown orientation [C]//Proc of ICCV99. [s. l.]: [s. n.], 1999: 51-52.