

基于对象的多级图像增强法

许蓓蕾¹, 庄奕琪¹, 汤华莲¹, 张丽¹, 田进寿²

(1. 西安电子科技大学 微电子学院, 西安 710071; 2. 中国科学院 西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(beileixu@sohu.com)

摘要:针对图像局域增强时出现的噪声过增强和环块状伪轮廓问题,提出了基于对象的多级对比度拉伸图像增强法。首先采用形态学分水岭及区域合并法对图像进行分割,得到图像的构成对象;然后在对象之间采用相邻极点间拉伸法增大对象间灰度动态范围,在对象内部采用线性拉伸法增强对象纹理并保持对象形态。实验结果表明,该方法在增强图像结构的同时,能够有效避免环块状伪轮廓,抑制平滑区域噪声过增强,保持图像原始整体亮度,使增强后的图像具有自然的外观。

关键词:图像增强;图像分割;形态学分水岭;区域合并;对比度拉伸

中图分类号: TP391.41 **文献标志码:** A

Object-based multilevel image enhancement method

XU Bei-lei¹, ZHUANG Yi-qi¹, TANG Hua-lian¹, ZHANG Li¹, TIAN Jin-shou²

(1. School of Microelectronics, Xidian University, Xi'an Shaanxi 710071, China;

2. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an Shaanxi 710119, China)

Abstract: To solve the problems of the ringing, blocking artifacts and the excessive noise amplification in local image enhancement, an object-based multilevel contrast stretching method was proposed. First, segment the image into its constituent objects by using morphological watersheds and regional merging; then, separately stretch the image contrast at inter-object level and intra-object level in different ways. At inter-object level, an approach of stretching between adjacent extrema was adopted to adequately enlarge the local dynamic range of gray levels between objects; at intra-object level, the linear stretching approach was adopted to enhance the textural features of the object and keep its appearance. Experimental results show, besides enhancing the image structure, the proposed method can effectively avoid ringing, blocking artifacts, restrict excessive noise amplification in smooth areas and preserve the overall brightness of the image, thus can provide the enhanced image with natural appearance.

Key words: image enhancement; image segmentation; morphological watershed; region merging; contrast stretching

0 引言

图像局域增强法通常先对图像进行某种方式的分割,再分别对分割区域实施增强变换。最简单的局域增强方式是将图像分割成交叠或者不交叠的矩形块,分别对矩形块实施增强变换(如局域直方图均衡、空域锐化滤波等)。这种基于块的方式因为无法区分块中的噪声和图形边缘,容易导致平滑区域的噪声被过度放大,产生不自然的增强效果。改进的途径是采用多尺度方式,以获得与图形相关的分割和增强。如, Mukhopadhyay 和 Chanda 提出的多尺度形态学方法^[1]。先用多尺度 tophat 变换提取特定尺度的图像特征,再分别对其进行放大,最后合并重构增强图像。由于这些特定尺度的图像特征不只取决于图像中图形结构的形状和尺寸,还取决于 tophat 变换中使用的结构元素的形状和尺寸,因此常导致增强图像出现伪轮廓。其他多尺度方式如各向异性扩散法^[2]、非线性金字塔重构^[3]等也有类似的伪轮廓问题。

针对上述问题,本文提出了一种基于对象的局域增强方式。与基于块的方式或多尺度方式不同,图像被直接分割成其构成对象。然后根据对象之间、对象内部的不同特点,采用

不同的方法进行增强。这种基于对象的多级增强方式能够从根本避免环块状伪轮廓,而且有助于在增强图像结构的同时抑制平滑区域的噪声被过度放大。

1 基于对象的多级对比度拉伸

Wang 等人指出人眼视觉系统的主要功能是提取场景中的结构信息^[4]。图像的结构信息可以理解为由构成图像的对象以及对象的纹理。通常视觉感知效果好的图像在对象之间有清晰的边界,在对象内部有和谐的纹理。因此在增强图像结构时,在对象之间和对象内部两个不同的层级应满足不同的要求:在对象之间,增强对比度的同时应保持边界锐利无畸变;在对象内部,增强纹理特征的同时须抑制噪声以保持纹理和谐。为此本文提出的基于对象的多级对比度增强法先利用形态学分水岭和区域合并法分割图像,得到其构成对象;然后在对象之间和对象内部分别采用相邻极点间拉伸法和线性拉伸法增强对比度。其处理过程如图1所示。

1.1 基于形态学分水岭和区域合并的图像分割

采用形态学分水岭分割图像的优点是能够获得稳定的、具有封闭轮廓的图形对象。其基本思想是将图像看做立体地

收稿日期:2010-12-20;修回日期:2011-03-04。

作者简介:许蓓蕾(1971-),女,新疆乌鲁木齐人,讲师,博士,主要研究方向:图像和视频处理;庄奕琪(1957-),男,陕西西安人,教授,博士生导师,主要研究方向:无线通信芯片和系统;汤华莲(1977-),女,安徽马鞍山人,讲师,博士研究生,主要研究方向:无线视频传输;张丽(1978-),女,山东阳阳人,讲师,博士研究生,主要研究方向:无线通信芯片;田进寿(1971-),男,甘肃兰州人,研究员,博士,主要研究方向:成像系统。

图,以灰度级代表高度。在立体地图的区域最低点处钻孔,从底部给立体地图注水,水从孔内涌上,当水面上升到位于不同汇水盆地的水即将聚合时,筑坝阻止聚合。当水面完全淹没立体地图时,所得堤坝即分水岭线,亦即分割结果。详细的分水岭分割算法参见文献[5]。

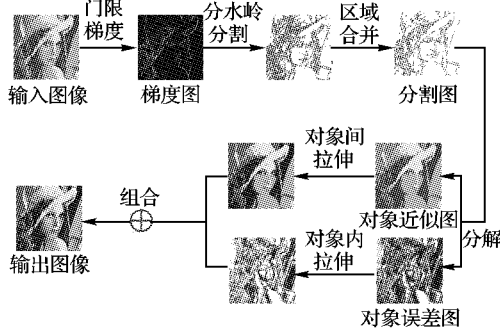


图1 基于对象的多级对比度拉伸流程

用分水岭分割法提取图像的构成对象时,应使用图像的梯度图而非图像本身。因为对象内部的灰度变化缓慢,梯度小,与汇水盆地吻合;而对象边界的灰度变化显著,梯度大,与分水岭一致。图像 $I(x,y)$ 的梯度图 $G(x,y)$ 通常采用绝对值近似式:

$$G(x,y) = |G_x(x,y)| + |G_y(x,y)| \quad (1)$$

其中梯度分量 $G_x(x,y)$ 和 $G_y(x,y)$ 可由 Sobel 算子计算得到。

直接对梯度图 $G(x,y)$ 进行分水岭分割容易出现过分割现象,因为梯度图的每个区域最小值都会生成一个分割对象。简单有效的解决方法是采用门限梯度 $G_{th}(x,y)$:

$$G_{th}(x,y) = \begin{cases} G_T, & G(x,y) < G_T \\ G(x,y), & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

通过施加门限 G_T , $G(x,y)$ 中大量位于平滑区域的琐碎的区域最小值被合并。 G_T 的取值可以根据图像的噪声标准差 $\hat{\sigma}$ 来确定。考虑到用 Sobel 算子计算的梯度值是 8 对像素的差值之和, G_T 取为 $8\hat{\sigma}$ 。对于图像噪声标准差的估计,根据 Olsen^[6] 的总结分析,最可靠的方法是用中值滤波器滤除图像噪声,然后计算滤噪后图像与原始图像的标准差,即噪声标准差。

对门限梯度图进行分水岭分割的结果仍然存在一定程度的过分割,为此常采用区域合并法进一步合并分割结果^[7]。区域合并是一种步进式合并过程。它从分水岭分割的区域开始,根据一定的合并标准,每一步合并一对最相似的相邻区域,直至达到规定的终止条件。合并标准通常建立在图像的各种区域特性之上。例如:基于区域相似性的 Ward 标准、均值标准、JND(Just Noticeable Difference)标准^[8]等;基于区域边界特性的边缘完整性标准^[9]、边缘光滑性标准^[10]等;以及基于纹理、颜色等高级区域特性的标准。本文采用基于区域相似性的均值标准,即合并使下述不相似函数取得最小值的相邻区域:

$$\delta(R_i, R_j) = |\mu(R_i) - \mu(R_j)| \quad (3)$$

其中, $\mu(R)$ 表示区域 R 的均值。合并终止条件设置为 $\delta(:,:)$ 的上限 δ_T, δ_r 的取值设为 $\alpha\hat{\sigma}$, 比例因子 α 可从 0 到 $\text{MAX}\{\delta(:,:)\}$ 取值。本文采用由 Haris 等人提出的基于

RAG(Region Adjacency Graph) 的高效区域合并算法^[7]。

1.2 多级对比度拉伸

图像分割的结果,在分割区域内部具有相近的灰度,而相邻分割区域之间具有一定的对比度。将这些分割区域视为构

成图像的对象。为了方便在对象之间和对象内部采用不同的方法拉伸对比度,利用分割结果将图像分为两个子图:对象近似图和对象误差图。前者记为 $I_\mu(x,y)$, 其像素值为像素所在区域的均值;后者记为 $I_e(x,y)$, 其像素值为原图像像素值与像素所在区域均值之差。即:

$$I_\mu(x,y) = \mu(R_{(x,y)}) \quad (4)$$

$$I_e(x,y) = I(x,y) - \mu(R_{(x,y)}) \quad (5)$$

其中 $R_{(x,y)}$ 表示包含像素 (x,y) 的区域。显然,图像 $I(x,y)$ 可由两幅子图像相加得到。

在开始对比度拉伸之前,先定义两幅子图像的对比度。复杂图像的对比度定义大体分为两类:全局对比度和局域对比度。全局对比度使用单一值表示整幅图像的对比度,如方均根误差、对比度熵^[11]、相邻像素的平均灰度级距离^[12]等。局域对比度则在图像的每一点计算对比度,能更好地反映图像各处对比度的变化,如:Peli 定义的局域带限对比度^[13]、Winkler 定义的各向同性局域带限对比度^[14]、Majumder 定义的对比度为每点的亮度梯度^[15]。本文考虑到感知对比度总是与局域亮度差异相关,因此粗略地定义两幅子图像的局域对比度如下:对象近似图 $I_\mu(x,y)$ 在相邻区域 R_i 和 R_j 之间定义对象间对比度 $C_\mu(R_i, R_j)$, 令其值正比于两区域均值之差,即:

$$C_\mu(R_i, R_j) \propto |\mu(R_i) - \mu(R_j)| \quad (6)$$

对象误差图 $I_e(x,y)$ 在每一点定义对象内对比度 $C_e(x,y)$, 令其值正比于每一点的像素值与其所在区域均值之差,即:

$$C_e(x,y) \propto |I(x,y) - \mu(R_{(x,y)})| \quad (7)$$

根据 Majumder 等人的总结^[15], 人眼视觉系统对对比度变化的感知分为两个层面:阈值和超阈值。阈值对比度研究人眼能够检测到的图案所要具备的最小对比度。而超阈对比度研究在阈值对比度以上,人眼感知到的对比度变化。研究显示,阈值对比度的大小依赖于背景亮度以及图案的空间频率,其与前者的关系由 Weber ratio 给出,与后者的关系用对比度敏感度函数描述。而超阈对比度则遵循 Weber 定律,即对于一定的超阈对比度 C , 对比度辨别阈值满足:

$$\frac{\Delta C}{C} = \lambda \quad (8)$$

其中 λ 是近似为 1 的常数。该式表明,要使人眼感知到同等程度的对比度增强,高对比度图案需要更多的对比度增强。研究还显示,超阈对比度辨别特性几乎不随空间频率变化。

由于日常视力所及大多是在超阈值层面,因此本文只关注超阈对比度增强。将式(6)、(7)分别代入式(8)可以得到两个子图像的超阈对比度辨别公式:

$$\frac{C'_\mu(R_i, R_j)}{C_\mu(R_i, R_j)} = \frac{\mu'(R_i) - \mu'(R_j)}{\mu(R_i) - \mu(R_j)} = 1 + \lambda \quad (9)$$

$$\frac{C'_e(x,y)}{C_e(x,y)} = \frac{I'(x,y) - \mu'(R_{(x,y)})}{I(x,y) - \mu(R_{(x,y)})} = 1 + \lambda \quad (10)$$

其中上标'表示相应的增强结果。式(9)、(10)显示,无论图像各处最初的对比度是多少,要想感知到同等程度的增强,那么对象近似图中均值差异大的相邻区域以及对象误差图中偏离区域均值大的点需要获得更多的对比度拉伸。简言之,对比度拉伸与局域亮度差异成比例。最直接的实现方法是全局线性拉伸,但因受灰度级总体动态范围的限制,全局线性拉伸通常无法获得充分的增强效果。其他采用对数、幂函数或分段线性变换的全局拉伸法虽然可以灵活地选择需要拉伸的灰度级区间以及拉伸程度,但要以压缩其他区间为代价。空域锐化滤波法也可以视做局域对比度拉伸,它通过拉伸像素与邻域均

值的差异来增强像素对比度。但因空域锐化滤波可能改变相邻像素的灰度级顺序,常导致增强图像显得不自然。

针对上述问题,Peli的观点可以提供一条解决途径,他认为人眼视觉系统对对比度的检测是一个准局域处理过程^[13]。为此,在进行对比度拉伸时,只要保证对象近似图的相邻区域之间以及对象误差图的相邻像素之间的灰度级顺序不变、对比度不下降即可。如果采用提升局域最大值、降低局域最小值的方法来拉伸图像中相邻的局域最大值点和局域最小值点之间的灰度区间,则可以在总体灰度级动态范围一定的情况下,充分扩大局域灰度动态范围,与此同时保持相邻区域或像素之间的灰度级顺序不变。注意,这种相邻极点间拉伸的方法仍有可能改变非相邻区域或像素的灰度级顺序。通常,对象近似图的区域之间尤其是非相邻区域之间的联系较为松散,而对对象误差图中同一区域内的像素之间联系密切。因此,对于对象近似图,采用相邻极点间拉伸法来充分提高对象间对比度;而对于对象误差图,则希望同一区域内的像素获得均匀的对比度拉伸以避免对象畸变或噪声的过度放大,为此选择一般线性拉伸法。对象间以及对象内对比度拉伸程度由以下约束条件控制:

$$1 \leq \frac{\mu'(R_i) - \mu'(R_j)}{\mu(R_i) - \mu(R_j)} \leq \tau \quad (11)$$

$$1 \leq \frac{I'(x,y) - \mu'(R_{(x,y)})}{I(x,y) - \mu(R_{(x,y)})} \leq \tau_{R_{(x,y)}} \quad (12)$$

$$L \leq I'(x,y) \leq U \quad (13)$$

式(11)和式(12)分别用于控制对象近似图和对象误差图的超阈对比度拉伸范围。下限1保证对比度不下降,上限 $\tau > 1$ 控制对象间对比度拉伸的最大程度。上限 $\tau_{R_{(x,y)}}$ 是区域 $R_{(x,y)}$ 在对象间拉伸时获得的实际拉伸量,用于保证区域的对象内拉伸不超过对象间拉伸,从而避免相邻区域的像素之间对比度下降。式(13)是灰度级饱和约束, L 和 U 分别表示图像允许的灰度级下限和上限。

对象近似图的相邻极点间拉伸采用Majumder提出的贪婪迭代算法^[15]实现。将图像视做立体地图,灰度级代表高度。从底向上(从灰度级 L 到灰度级 U)扫描立体地图,扫描到每一个局域最低点或者鞍点位置时设置一个与该位置等高的阈值平面,在阈值平面之上立体地图被分成一些独立的小丘,分别向上提升小丘,提升的比例因子由式(11)的超阈对比度拉伸范围及式(13)的灰度级饱和约束控制。扫描完毕,图像的局域最高点得到提升。然后将立体地图上下翻转,重复上述过程,使图像的局域最低点得到下降。最后将立体地图翻转回去,至此就可实现图像对比度的双向拉伸。

关于对象误差图的线性拉伸,每一个区域内的线性拉伸量可根据式(12)的超阈对比度拉伸范围自由设置,本文设置为上限 $\tau_{R_{(x,y)}} \circ \tau_{R_{(x,y)}}$ 的值等于区域 $R_{(x,y)}$ 在贪婪迭代算法中被施加的所有拉伸比例因子的乘积。

对象间拉伸和对象内拉伸完成后,将两幅子图像合并就可以重构增强图像。图2给出了Lena图像的增强结果。由于增强操作直接作用在构成图像的对象上,增强后的图像没有环状、块状或其他结构伪轮廓。此外由于对象内采用均匀线性拉伸,不会引起平滑区域的噪声过度放大。增强后的图像具有自然的外观。

2 实验结果

为检验本文所提方法的增强效果,利用Matlab进行了算

法设计,并对大量图像分别采用本文方法、HE(Histogram Equalization)方法和CLAHE(Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization)方法的增强结果进行了实验对比。实验中,本文方法参数设置为 $\delta_r = \hat{\sigma}, \tau = 4$,该设置适合于绝大多数被测图像。HE和CLAHE均采用Matlab图像处理工具箱中提供的函数。CLAHE的参数设置中,除将块尺寸设置为 8×8 像素外,其余均采用缺省设置。图3、4给出了clock图像和pout图像的实验结果。

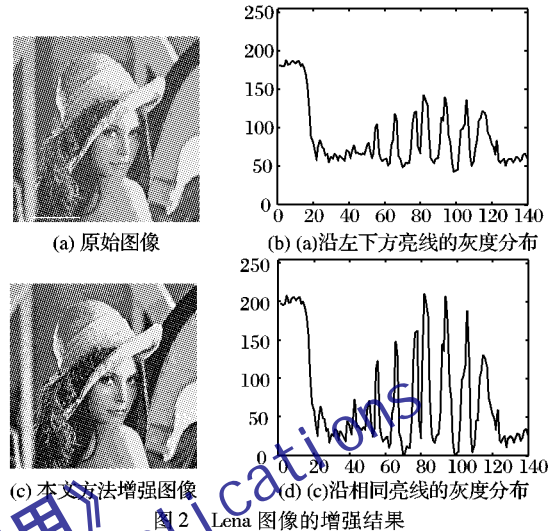


图2 Lena图像的增强结果

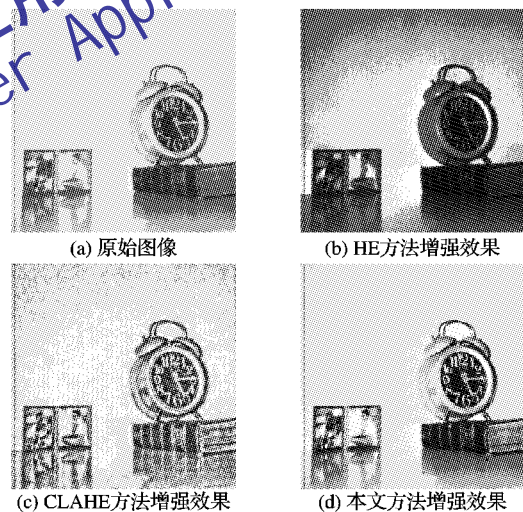


图3 clock图像增强结果对比

从图3、4中可以看出,采用HE方法增强的图像出现washed-out现象,且整体亮度发生偏移;采用CLAHE方法增强的图像因为平滑区域噪声的过度放大而显得不自然。采用本文方法则可以有效避免上述缺陷,增强图像基本维持原始图像整体亮度,具有自然的外观。

3 结语

本文提出了一种基于对象的多级对比度增强方法。其基于对象的特性可以保证增强后的图像结构不出现环状伪轮廓现象。其多级增强方式可以在图像的不同层级满足不同的要求。在对象间层级,采用的相邻极点间拉伸法能够充分扩展局域灰度动态范围,锐化对象边界,同时保持图像原始整体亮度。在对象内层级,采用的均匀线性拉伸法能够维持对象原有形态,避免平滑区域的噪声过度放大。通过与传统方法HE、CLAHE的增强结果对比显示本文所提方法可以提供更

加自然的增强效果。



图4 pout 图像增强结果对比

参考文献:

- [1] MUKHOPADHYAY S, CHANDA B. Multiscale morphological approach to local contrast enhancement [J]. *Signal Processing*, 2000, 80(4): 685–696.
- [2] PERONA P, MALIK J. Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1990, 12(7): 629–639.
- [3] TOET A. Adaptive multi-scale contrast enhancement through non-linear pyramid recombination [J]. *Pattern Recognition Letters*, 1990, 11(11): 735–742.
- [4] WANG Z, SHEIKH H R, BOVIK A C, *et al.* Image quality assessment: From error visibility to structural similarity [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(4): 600–612.
- [5] GONZALEZ R C, WOODS R E. *Digital image processing* [M]. 2nd ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002.
- [6] OLSEN S. Estimation of noise in images: An evaluation [J]. *CV-GIP: Graphic Models Image Processing*, 1993, 55(7): 319–323.
- [7] HARIS K, EFSTRATIADIS S N, MAGLAVERAS N, *et al.* Hybrid image segmentation using watersheds and fast region merging [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1998, 7(12): 1684–1699.
- [8] SHEN D, HUANG M. A watershed-based image segmentation using JND property [C]// *Proceedings of IEEE International Conference on Acoustic Speech Signal Processing*. [S. l.]: IEEE, 2003, 3: 377–380.
- [9] HERNANDEZ S E, BARNER K E, YUAN Y. Region merging using homogeneity and edge integrity for watershed-based image segmentation [J]. *Optical Engineering*, 2004, 44(1): 017004.
- [10] HE X C, CHUNG R H Y, YUNG N H C. Watershed segmentation with boundary curvature ratio based merging criterion [C]// *Proceedings of IASTED International Conference on Signal and Image Processing*. Anaheim: ACTA Press, 2007: 7–12.
- [11] KHELLAF A, BEGHDADI A, DUPOISOT H. Entropic contrast enhancement [J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 1991, 10(4): 589–592.
- [12] CHEN Z, ABIDI B, PAGE D, *et al.* Gray Level Grouping (GLG): An automatic method for optimized image contrast enhancement—Part I: the basic method [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, 15(8): 2290–2302.
- [13] FEN E. Contrast in complex images [J]. *Journal of Optical Society of America A*, 1990, 7(10): 2032–2040.
- [14] WINKLER S, VANDERGHEYNST P. Computing isotropic local contrast from oriented pyramid decompositions [C]// *Proceedings on ICIP*. [S. l.]: IEEE, 1999, 4: 420–424.
- [15] MAJUMDER A, IRANI S. Perception based contrast enhancement of images [J]. *ACM Transactions on Applied Perception*, 2007, 4(3): 17.

(上接第 1555 页)

表4 图像清晰度比较

图像	原图	MSR 算法	Meylan 算法	本文算法
street	0.025 1	0.031 7	0.041 2	0.040 1
books	0.014 0	0.025 1	0.028 5	0.031 2
waxgourd	0.031 1	0.047 6	0.054 7	0.058 9
town	0.042 7	0.057 2	0.061 9	0.065 7

4 结语

本文提出了一种基于 ABEMD 的自适应彩色图像增强算法,其具有完全的自驱动性,不论是对图像的照度进行估计,还是对照度分量、反射分量进行优化选通,更或者是对最终图像进行自适应性色域空间校正,它都表现出了广泛的适用性和运算的简洁性。最后通过对增强后图像的主观和客观评价,充分反映了本文算法在图像动态范围压缩、细节凸显以及恢复色彩信息上的能力,进一步说明了算法的可行性。

参考文献:

- [1] EDWIN H L. The retinex theory of color vision [J]. *Scientific American*, 1977, 237(6): 108–129.
- [2] RAHMAN Z U, JOBSON D J, WOODDELL G A. Retinex processing for automatic image enhancement [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2004, 13(1): 100–110.
- [3] NUNES J C, NIANG O, BOUAOUNE Y, *et al.* Bidimensional empirical mode decomposition modified for texture analysis [C]// *Proceedings of the 13th Scandinavian Conference on Image Analysis*. Berlin: Springer-Verlag, 2003: 171–177.
- [4] NUNES J C, BOUAOUNE Y, DELECHELLE E, *et al.* Image analysis by bidimensional empirical mode decomposition [J]. *Image and Vision Computing*, 2003, 21(12): 1019–1026.
- [5] VINCENT L. Morphological grayscale reconstruction in image analysis: Applications and efficient algorithms [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1993, 2(2): 176–201.
- [6] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, *et al.* The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis [J]. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1998, 454(1971): 903–995.
- [7] 陈文熙. Weber 比的拟合公式 [J]. *心理学报*, 1996, 29(4): 419–424.
- [8] RAHMAN Z U, JOBSON D J, WOODDELL G A. Multi-scale Retinex for color image enhancement [EB/OL]. [2010-10-15]. ftp://vipsun.larc.nasa.gov/pub/papers/icip96_multir.
- [9] MEYLAN L, SUSTRUNK S. High dynamic range image rendering with a Retinex-based adaptive filter [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, 15(9): 2820–2830.
- [10] JOBSON D J, RAHMAN Z, WOODDELL G A. The statistics of visual representation [C]// *Visual Information Processing XI SPIE 4736*. Washington, DC: SPIE, 2002: 25–35.