

# 基于小波变换的低照度图像自适应增强算法

李庆忠 刘 清\*

中国海洋大学工程学院山东省海洋工程重点实验室, 山东 青岛 266100

**摘要** 提出了一种基于小波变换的低照度图像快速、自适应增强算法。将RGB图像转到HSV空间,并对亮度V图像利用离散小波变换(DWT)将图像的高、低频子带分离。在小波变换的低频子带上利用双边滤波对图像的照射光分量进行快速估计与去除,而在高频子带上利用模糊变换实现边缘、纹理信息的增强与去噪处理。对处理后的V图像,基于提出的直方图目标函数,利用鲍威尔与模拟退火相结合的优化算法,实现了对比度的快速、自适应增强处理。将增强后的V图像与H、S颜色分量合成为清晰化的彩色图像。实验结果表明,该算法能快速、有效实现低照度图像的清晰化处理。

**关键词** 图像处理;低照度图像;小波变换;双边滤波;模糊增强;Retinex理论

**中图分类号** TP391.41 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201542.0209001

## Adaptive Enhancement Algorithm for Low Illumination Images Based on Wavelet Transform

Li Qingzhong Liu Qing

*Shandong Provincial Key Laboratory of Ocean Engineering, College of Engineering, Ocean University of China,  
Qingdao, Shandong 266100, China*

**Abstract** A fast and adaptive enhancement algorithm for low illumination images based on wavelet transform is presented. RGB color image is converted to HSV color space, and the luminance component V is decomposed to low frequency sub-band and high frequency sub-bands by discrete wavelet transform (DWT). The illumination component is estimated and removed using bilateral filtering from the low frequency sub-band quickly, and the high frequency sub-bands corresponding to the image edges and texture are enhanced and de-noised using transform of fuzzy set. Based on the proposed histogram objective function, the contrast of the resulted V image is enhanced adaptively and quickly by employing the optimization method combining the Powell with the simulated annealing algorithm. The visibility improved color image is generated by combining the enhanced V image with H and S chrominance components. The experimental results show that the proposed algorithm can improve the visibility of low illumination images quickly and effectively.

**Key words** image processing; low illumination images; wavelet transform; bilateral filtering; fuzzy enhancement; Retinex theory

**OCIS codes** 100.2000; 100.2980; 100.3008

## 1 引 言

目前数字视频技术已经广泛应用到各个领域,如重要场所的安全监测、交通管理、辅助驾驶、近海视频监控等。在白天光照条件良好的情况下,图像质量可满足应用要求。而夜间是犯罪活动频发的时段,低照

收稿日期: 2014-06-25; 收到修改稿日期: 2014-08-27

基金项目: 国家自然科学基金(61132005)

作者简介: 李庆忠(1963—),男,博士,教授,主要从事图像处理,机器人视觉技术等方面的研究。

E-mail: liqingzhong@ouc.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: 947298665@qq.com

度下的图像质量却严重恶化,给夜间视频监控带来了严重挑战。其主要表现:1) 图像呈现大量暗区,暗区内容模糊不清、细节丢失;2) 在人工光源下,图像又出现部分高光区,使图像整体亮度严重不均,给后续图像增强带来困难。因此,低照度图像增强算法的研究已经成为目前研究的热点之一<sup>[1]</sup>。

低照度图像增强的目的是增强暗区,抑制高亮区,实现图像清晰化。目前常用的方法主要有基于直方图的增强方法<sup>[2-5]</sup>、基于同态滤波的增强方法<sup>[6-8]</sup>、基于 Retinex 理论的增强方法<sup>[9-12]</sup>等。

基于直方图的增强算法包括全局直方图均衡化和局部直方图均衡化,前者对图像光照不均匀,效果不好,由于是全局图像增强,效果不可控,不能突出图像中的目标信息。后者仅考虑局部窗口内的灰度分布,没有考虑图像整体特点,易减弱图像的层次感。总之,没有考虑图像的频率以及细节信息,容易造成过增强。

基于同态滤波的增强方法是基于照明-反射模型,在对数域,将乘性的照明与反射分量变成加性,然后在傅里叶变换域,由高通滤波器增强高频的反射分量,而抑制低频的照明分量。该方法主要存在的两个问题:1) 若高通滤波器的截止频率过高,会导致动态范围严重压缩以及细节严重丢失;反之,则动态范围压缩下降,即缺乏自适应性。2) 因为该方法的前提条件是假设光照均匀,所以对于存在高光区和暗区的夜间图像,增强效果较差。

基于 Retinex 理论的增强方法也是基于照明-反射模型,其基本思想是在对数域,设法估计照明分量并去除得到反映图像内容的反射分量,再对其进行一定的对比度拉伸处理。算法的关键是如何估计照射光成分,一般使用高斯滤波器估计照射分量。单尺度 Retinex(SSR)只对原始图像进行滤波估计,若采用多尺度 Retinex(MSR),则要在图像的多个尺度下用高斯函数卷积求照射分量,然后加权求和。该类算法存在的主要问题包括:1) MSR 耗时严重,且在图像边缘区,存在光晕问题;2) 照射分量难以准确估计,故对于存在高光区和暗区的低照度图像,增强效果不佳。

针对以上 Retinex 问题,本文利用小波变换可以有效分离图像低频和高频成分的特点,在图像小波变换的低频子带上,采用双边滤波方法快速、准确实现图像照射分量的估计与去除;而在各个高频子带上,对反映图像内容的反射分量进行模糊增强与去噪;然后对经过以上处理后的图像利用优化策略自适应提高图像的对比度,得到最后的增强图像。并通过实验验证了所提出算法的可行性。

## 2 低照度图像增强算法

如何将低频的照射分量和高频的反射分量正确、快速分离,是低照度图像增强的关键。为此,根据小波变换可以有效分离图像的高、低频信息的特点,提出了基于小波变换的低照度图像增强算法,其算法流程图 1 所示。总体流程为:

- 1) 将图像从 RGB 空间转换到 HSV 空间;
- 2) 对亮度 V 图像进行离散小波变换(DWT);
- 3) 在小波变换的低频子带上利用双边滤波估计与去除照射分量;
- 4) 对小波变换的各个高频系数进行模糊增强与去噪,以增强图像的纹理细节信息;
- 5) 利用反 DWT 重建步骤 3)、4)处理后的 V 图像。
- 6) 利用优化方法对得到的 V 图像进行自适应对比度增强处理;
- 7) 将最终得到的 V 图像增强结果与颜色成分 H、S 合成,得到最终增强后的彩色图像。

下面对算法中重要模块的具体实现进行介绍。

### 2.1 亮度 V 图像小波变换分解

考虑到计算的实时性,采用 Daub 5/3 小波对亮度 V 图像进行 3 级提升小波变换即可。其中正变换公式为

$$\begin{cases} d_1[2n] = s_0[2n+1] - \left\{ \frac{1}{2} \{ s_0[2n] + s_0[2n+2] \} + \frac{1}{2} \right\} \\ s_1[2n] = s_0[2n] + \left\{ \frac{1}{4} \{ d_1[2n-2] + d_1[2n] \} + \frac{1}{2} \right\} \end{cases} \quad (1)$$

反变换公式为

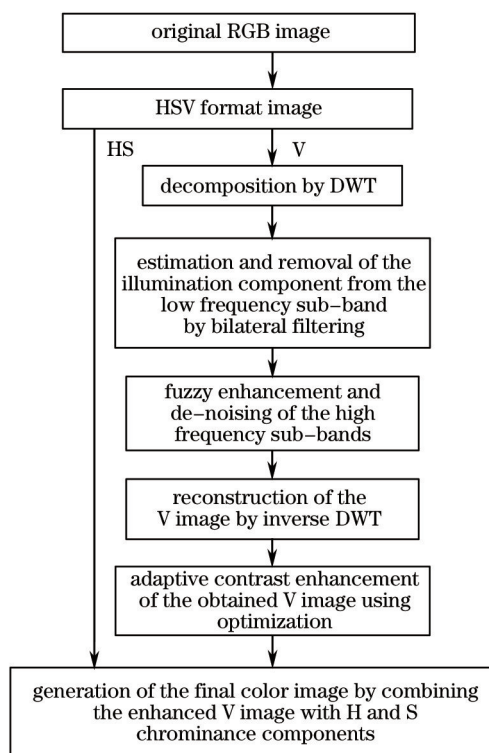


图 1 图像增强算法流程图

Fig.1 Flow chart of image enhancement algorithm

$$\begin{cases} d_0[2n] = s_i[2n] - \left\{ \frac{1}{4} \{d_i[2n-2] + d_i[2n]\} + \frac{1}{2} \right\} \\ s_0[2n+1] = d_i[2n] + \left\{ \frac{1}{2} \{d_0[2n] + s_0[2n+2]\} + \frac{1}{2} \right\} \end{cases}, \quad (2)$$

式中  $s_0[n]$  是原始一维信号,  $s_i[2n], d_i[2n]$  分别是原始信号经过低通、高通滤波并降采样后的信息。由此可以得到一个低频子带  $S_{LL_3}$  和三个方向的高频子带  $S_{HL_1}, S_{LH_1}, S_{HH_1}, i=1,2,3$ 。得到的低频子带  $S_{LL_3}$  的面积仅为原始图像的  $1/64$ , 故在  $S_{LL_3}$  上进行照射分量的估计会大大提高处理速度。

## 2.2 照射光的估计与去除

亮度  $V$  图像进行 3 级小波分解后得到的低频子带  $S_{LL_3}$  中必然包含低频的照射分量, 但仍然含有某些尺度的高频信息, 利用双边滤波器对低频子带  $S_{LL_3}$  进行滤波处理, 滤波后的结果  $S_{LL_{3M}}$  作为照射分量的估计值。采用的双边滤波器<sup>[3]</sup>定义为

$$B_F(I_p) = \frac{1}{W} \sum_{p, q \in S} G_{\sigma_s}(\|p - q\|) G_{\sigma_r}(I_p - I_q) I_q, \quad (3)$$

式中  $I_p, I_q$  分别表示图像  $I$  中坐标为  $p$  和  $q$  像素点的颜色值,  $W_p$  为滤波器归一化系数,  $G_{\sigma_s}, G_{\sigma_r}$  分别是图像  $I$  值域  $R$  和窗口  $S$  上以  $\sigma_s, \sigma_r$  为参考的高斯核, 符号  $|\xi|$  表示  $\xi$  的绝对值,  $\|p - q\|$  表示两像素点的欧式距离。

得到  $S_{LL_{3M}}$  后, 通过下式可求去除照射分量的低频子带  $S_{LL_{3r}}$  为

$$S_{LL_{3r}} = S_{LL_3} - kS_{LL_{3M}}, \quad (4)$$

式中  $k$  为  $(0,1)$  之间的系数。

由此可见, 双边滤波处理相邻像素值的灰度时, 不仅考虑空间邻近关系, 也考虑灰度的相似关系, 可在滤波同时保持图像边缘, 使估计的入射光图像更准确。

## 2.3 小波高频模糊增强

亮度  $V$  图像经过 3 级 DWT 后, 得到的高频子带为  $S_{HL_i}, S_{LH_i}, S_{HH_i}, i=1,2,3$ 。这些高频子带中绝对值较大的

系数代表图像的纹理和细节信息,而绝对值小的系数有可能为图像噪声。为了增强有用的纹理信息而抑制噪声信息,用改进的PAL模糊增强算法<sup>[14]</sup>进行图像边缘、纹理信息的增强,同时也可达到去除噪声的目的。具体步骤如下:

1) 通过隶属度函数:

$$P_{mn} = \sin\left[\frac{\pi}{2}\left(1 - \frac{x_{\max} - x_{mn}}{D}\right)\right], \quad (5)$$

将小波高频图像转化到模糊集中,式中  $x_{\max}$  为高频子图像的绝对值最大值,  $x_{mn}$  为  $(m,n)$  点高频系数的绝对值,  $D$  取值范围为  $(x_{\max} - x_{\min}) \leq D < 2(x_{\max} - x_{\min})$ 。则得到  $P_{mn} \in [0,1]$ 。

2) 利用下面增强函数,将模糊集进行转换。

$$P'_{mn} = \begin{cases} 2^{j-1} P_{mn}^j, & 0 \leq P_{mn}^{j-1} < 0.5 \\ 1 - 2^{j-1} (1 - P_{mn})^j, & 0.5 \leq P_{mn}^{j-1} < 1 \end{cases}, \quad (6)$$

式中  $j$  为控制收敛速度的一个参数,  $j$  越大,收敛速度越快,其增强曲线如图 2 所示。

3) 再将模糊集转变到图像集:

$$Y_{mn} = X_{\max}(1 - 2 \sin^{-1} P'_{mn} / \pi), \quad (7)$$

式中  $Y_{mn}$  为模糊变化后小波的高频系数的绝对值,经变换后需恢复到原来的符号。以上模糊增强的目的是抑制绝对值小的高频系数,而增强绝对值大的高频系数。

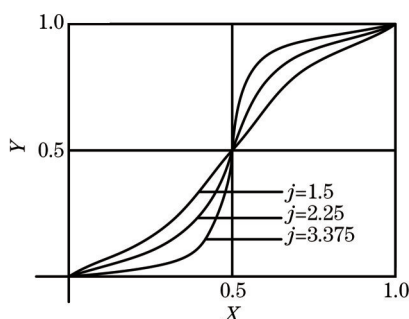


图 2 模糊变换曲线

Fig.2 Curves of fuzzy transform

## 2.4 基于优化的图像对比度自适应增强

经过 2.2、2.3 节的措施分别对低频子带和各高频子带处理后,再经过小波反变换可得到去除照射分量和边缘纹理细节增强后的 V 图像。该图像光照已经比较均匀,但整体偏暗,对比度需要进一步提高。为此,采用基于归一化非完全 Beta 曲线<sup>[15]</sup>的优化方法对该图像进行自适应拉伸处理,以增强 V 图像的对比度。

归一化非完全 Beta 变换曲线为

$$f(x, \alpha, \beta) = B^{-1}(\alpha, \beta) \times \int_0^x t^{\alpha-1} (1-t)^{\beta-1} dt, \quad (8)$$

式中  $x$  为归一化后像素值,  $0 < \alpha, \beta < 10$ , 函数  $B(\alpha, \beta)$  为

$$B(\alpha, \beta) = \int_0^1 t^{\alpha-1} (1-t)^{\beta-1} dt. \quad (9)$$

不同的参数  $(\alpha, \beta)$  得到的图像增强效果不同,图 3 是一个典型示例。因此必须通过优化方法找出最优参数  $\alpha$  和  $\beta$ , 以自适应实现图像的对比度增强。

要实现参数  $\alpha$  和  $\beta$  的优化确定,必须首先确定反映图像对比度高低的目標函数。由图 3 可以看出,图像对比度越高,其直方图分布越均匀,且覆盖的面积越大。为此,本文提出的图像对比度衡量目标函数为

$$F = H/v, \quad (10)$$

式中

$$v = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h^2(i) - \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h(i) \right]^2. \quad (11)$$

显然,目标函数值越大,直方图分布越均匀。 $h(i)$ 为像素级为 $i$ 的像素数, $N$ 为总的灰度级。 $H$ 为直方图的覆盖面积,以图3(c)为例,将直方图的覆盖面积定义为由直方图拟合的连续分布曲线和横轴围成的面积。可见 $H$ 与图像熵的定义稍有不同,后者仅是所有 $h(i)$ 的累加,而 $H$ 考虑了整体的覆盖情况,能更准确衡量图像对比度的变化。

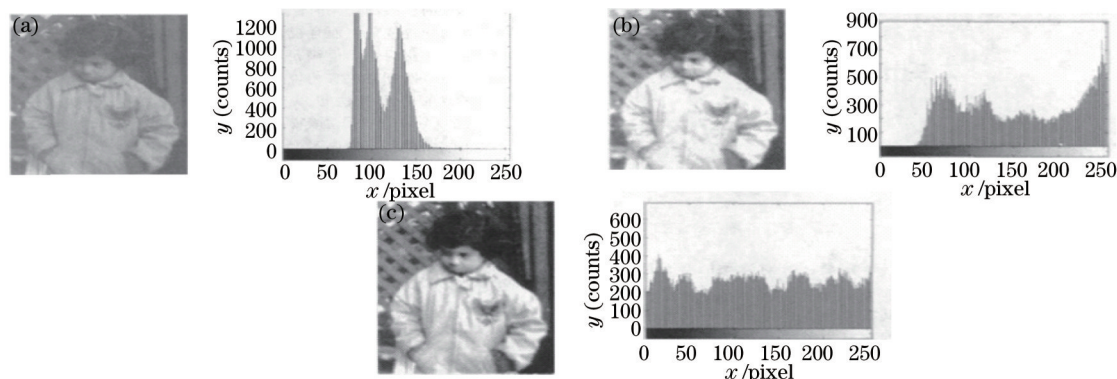


图3 不同参数值拉伸结果及其直方图。(a) 原图像;(b)  $\alpha=2, \beta=3.5$ ; (c)  $\alpha=3, \beta=4.5$

Fig.3 Enhancement results and their histograms with different parameters. (a) Original image; (b)  $\alpha=2, \beta=3.5$ ; (c)  $\alpha=3, \beta=4.5$

优化目标函数确定后,考虑到优化算法的实时性,基于鲍威尔方法<sup>[16]</sup>和模拟退火方法<sup>[17]</sup>相结合的优化算法对两个参数 $(\alpha, \beta)$ 进行快速、优化确定。鲍威尔方法不需要计算目标函数的梯度,通过一组共轭方向可快速找到最优参数,但缺点是易于收敛至局部极值。模拟退火算法通过模拟金属退火的过程,其随机搜寻策略可避免陷入局部极值点,但缺点是太费时。因此采用将这两种方法结合的策略,以达到取长补短的目的。

即首先利用鲍威尔方法快速找到局部极值点,再利用模拟退火方法在找到的局部极值点附近寻找,若找到比局部极值点目标函数值大的点,则重新调用鲍威尔方法进行下一轮加速优化,以此类推,直到目标函数值不再增加为止;若找不到比局部极值点目标函数值大的点,则优化过程终止。

找到最优参数值 $\alpha$ 和 $\beta$ 后,利用(8)式对 $V$ 图像进行对比度增强处理,即得清晰化的 $V$ 图像,再与颜色分量 $H, S$ 合成,最终得到清晰化的彩色图像。图4是利用以上算法对两幅亮度图像自适应增强处理的实验结果,可见效果良好。

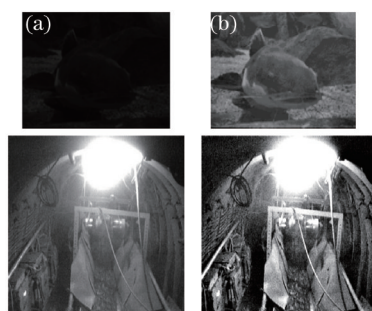


图4 灰度图像增强结果。(a) 原图像;(b) 增强结果

Fig.4 Enhancement results of gray images. (a) Original images; (b) enhancement results

### 3 实验结果与分析

对低照度图像做了以下三组实验,对提出算法的性能进行测试,并与传统的SSR、MSR算法进行了对比。其中SSR、MSR算法是对彩色图像的 $R, G, B$ 三个颜色分量分别进行处理后再合成。

第一组实验是对低照度、光照不均匀图像的处理,实验结果如图5所示。图5(a)是两幅原始图像,图5(b)、(c)分别是用SSR、MSR算法处理后的结果,图5(d)是用本文算法处理后的结果。由图5(b)、(c)可知,传统的SSR、MSR算法处理后的结果是在明暗对比明显处存在光晕问题,而且部分区域失真严重,清晰化效果欠佳。而本文算法在提高图像清晰度的同时,在明暗对比强烈处的光晕问题也得以去除,增强效果自然。



图5 三种算法在光照不均条件下处理结果比较。(a) 原始图像; (b) SSR算法; (c) MSR算法; (d) 本文算法  
 Fig.5 Comparison of processing results of the three algorithms under non-uniform illumination condition. (a) Original images; (b) SSR algorithm; (c) MSR algorithm; (d) the proposed algorithm

第二组实验是对低照度、光照基本均匀图像的增强处理,实验结果如图6所示。由图6(b)、(c)可知,SSR、MSR算法的处理结果在房间内立柱、白塔的边缘处,因为明暗对比强烈,所以光晕现象十分明显。此外,由于SSR、MSR算法是对R、G、B三个分量分别做滤波处理再合成,故失真较严重。由图6(d)可知,本文算法处理的结果中保留了原图像的颜色信息,只对亮度图像进行了处理,使得图像看起来更加清晰、自然。

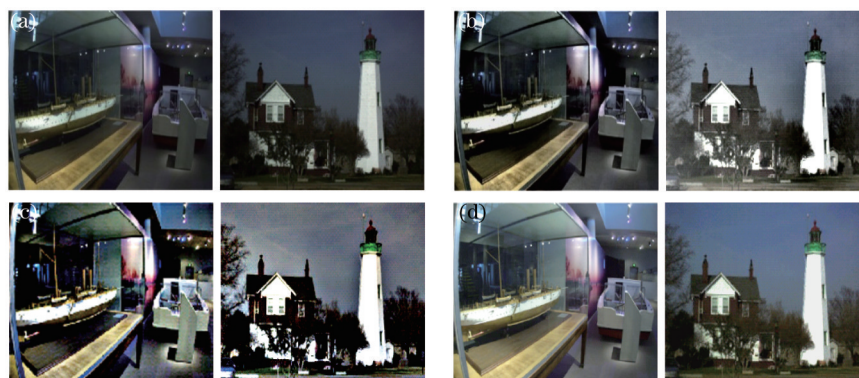


图6 三种算法在光照均匀条件下处理结果比较。(a) 原始图像; (b) SSR算法; (c) MSR算法; (d) 本文算法  
 Fig.6 Comparison of processing results of the three algorithms under uniform illumination condition. (a) Original images; (b) SSR algorithm; (c) MSR algorithm; (d) the proposed algorithm

第三组实验是测试算法的处理时间,以比较三种算法的实时性高低。测试用的个人计算机中央处理器(CPU)为 Intel Core(TM)2 Duo T6600,主频 2.20 GHz,内存 2.0 GB,编程平台为 Microsoft Visual C++ 6.0。测试图像分辨率有三种,分别为 256 pixel×256 pixel、512 pixel×512 pixel、720 pixel×576 pixel 的彩色图像。测试结果如表1所示,可见本文算法具有良好的实时性。其原因为:本文算法在估计照射光成分时,是在亮度图像3级小波变换后的低频子带上进行,该低频子带的面积仅为原图像面积的1/64,故处理时间可大大降低;而Retinex算法需要在原始图像R、G、B三个分量的对数域,分别进行高斯滤波来估计照射分量,且MSR还要多个尺度下进行,故实时性很差。此外,本文算法虽然利用了优化算法进行对比度自适应增强,但由于采用的直方图目标函数计算简单,而优化算法又采用快速有效的鲍威尔算法与模拟退化算法相结合的策略,故时间开销不会明显增加,保证了较好的实时性。

表1 三种算法处理时间比较

Table 1 Comparison of processing time with three algorithms

Image size	SSR /ms	MSR /ms	Proposed algorithm /ms
256 pixel×256 pixel	368	1013	168
512 pixel×512 pixel	1070	2800	300
720 pixel×576 pixel	1554	4047	649

## 4 结 论

提出了低照度图像自适应增强算法,利用小波变换可以将图像的高、低频分量进行有效分离。在低频子带上利用双边滤波可以快速有效估计与去除图像的照射分量。利用模糊变换可以实现图像边缘、纹理信息的增强与噪声去除。利用提出的基于直方图目标函数和鲍威尔与模拟退火相结合的优化算法,可以快速、自适应实现低照度图像对比度的增强处理。实验结果表明该算法不仅能有效提高图像的清晰度,去除图像增强中的光晕问题,而且实时性较好。

## 参 考 文 献

- 1 Liang Lin, He Weiping, Lei Lei, *et al.*. Survey on enhancement methods for nonuniform illumination image[J]. *Application Research of Computers*, 2010, 27(5): 1625-1628.  
梁琳,何卫平,雷蕾,等.光照不均图像增强方法综述[J].*计算机应用与研究*, 2010, 27(5): 1625-1628.
- 2 T Arici, S Dikbas, Y Altunbasak. A histogram modification framework and its application for image contrast enhancement[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2009, 18(9): 1921-1935.
- 3 Y Chang, C Chang. A simple histogram modification scheme for contrast enhancement[J]. *IEEE Transactions Consumer Electronics*, 2010, 56(2): 737-742.
- 4 Hu Zhengping, Liu Bo. Dynamic partition image enhancement algorithm induced by optimal adaptive histogram specification function[J]. *Journal of Yanshan University*, 2009, 33(6): 471-477.  
胡正平,刘博.基于自适应直方图规定化函数引导的动态分层图像增强算法[J].*燕山大学学报*, 2009, 33(6): 471-477.
- 5 Y Chen, P Feng, J Yang, *et al.*. An adaptive enhancement algorithm of low illumine color video image[J]. *Int J Sensing, Computing & Control*, 2012, 2(2): 79-86.
- 6 Xiao Jun, Song Shoupeng, Ding Lijuan. Research on the fast algorithm of spatial homomorphic filtering [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2008, 13(12): 2302-2306.  
肖俊,宋寿鹏,丁丽娟.空域同态滤波算法研究[J].*中国图象图形学报*, 2008, 13(12): 2302-2306.
- 7 Zhi Chen, Guozhi Wang, Shan Feng, *et al.*. Application of homeostasis filtering in image processing of particles field holography[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(2): 167-170.
- 8 Lü Xuliang, Wen Liuqiang, Rong Xianhui, *et al.*. Fuzzy and homomorphic enhancement of infrared image based on wavelet transform[J]. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2013, 14(2): 158-162.  
吕绪良,文刘强,荣先辉,等.基于小波变换的红外图像模糊与同态增强[J].*解放军理工大学学报(自然科学版)*, 2013, 14(2): 158-162.
- 9 Junxuan Yan, Ke Zhang. Adaptive color restoration and luminance MSR based scheme for image enhancement[C]. *2nd International Conference on Advance Computer Control (ICACC)*, 2010, 3: 185-188.
- 10 Xu Xin, Chen Qiang, Wang Ping'an, *et al.*. A fast halo-free image enhancement method based on retinex[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2008, 20(10): 1325-1331.  
徐欣,陈强,王平安,等.消除光晕现象的快速Retinex图像增强[J].*计算机辅助设计与图形学学报*, 2008, 20(10): 1325-1331.
- 11 R S Pallavi. A novel algorithm for nighttime context enhancement[J]. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2013, 7(3): 444-447.
- 12 X Jin. Image enhancement based on selective-retinex fusion algorithm[J]. *Journal of Software*, 2012, 7(6): 1187-1194.
- 13 Sun Kang, Wang Bo, Zhou Zhiqiang, *et al.*. Real time image haze removal using bilateral filter[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2011, 31(7): 811-813.  
孙抗,汪渤,周志强,等.基于双边滤波的实时图像去雾技术研究[J].*北京理工大学学报*, 2011, 31(7): 811-813.
- 14 Jiang Tao, Zhao Chunjiang, Chen Ming, *et al.*. Fast adaptive image fuzzy enhancement algorithm[J]. *Computer Engineering*, 2011, 37(19): 213-223.  
姜桃,赵春江,陈明,等.自适应图像模糊增强快速算法[J].*计算机工程*, 2011, 37(19): 213-223.
- 15 Sun Yongqiang, Xu Wenbo, Sun Jun, *et al.*. Image enhancement based on quantum-behaved particle swarm optimization[J]. *Computer Applications*, 2008, 28(1): 202-204.  
孙勇强,须文波,孙俊,等.基于量子行为微粒群优化算法的图像增强方法[J].*计算机应用*, 2008, 28(1): 202-204.
- 16 M J Powell. An efficient method for finding the minimum of a function of several variables without calculating derivatives [J]. *Comput J*, 1964, 7(2): 155-162.
- 17 L Ingber. Very fast simulated re-annealing[J]. *Math Comput Model*, 1989, 12(8): 967-973.

栏目编辑: 苏岑