

文章编号:1007-2780(2017)10-0828-07

海域图像增强方法综述

张 锐*, 贾 娜

(91550 部队, 辽宁 大连 116000)

摘要: 由于在海域条件下, 受到雾气、光线等多种气象因素影响, 光电装备获取的图像出现不同程度的退化现象, 导致图像的显示质量下降。为了提高图像增强方法在海域环境下应用的有效性, 本文针对海域图像海雾及照度不均的特点, 分析了 4 种常用的图像增强算法, 包括基于直方图均衡化的图像增强算法、基于暗原色原理的去雾算法、基于 Retinex 的图像增强算法、基于同态滤波的图像增强算法, 并总结了这些算法的特点及其使用场景。上述 4 种图像增强算法应用于海域环境下图像增强, 选择合适的增强算法可以有效提升图像对比度, 克服海域图像海雾及照度不均问题。

关 键 词: 海域图像; 图像增强; 去雾算法; 照度不均

中图分类号: TP394.1; TH691.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20173210.0828

Sea image enhancement review

ZHANG RUI*, JIA Na

(91550 Units, Dalian 116000, China)

Abstract: Due to the influence of various meteorological factors such as fog and light in the sea area, the image obtained by the photoelectric equipment has different degree of degradation, which leads to the decrease of the display quality of the image. In order to improve the effectiveness of image enhancement method in marine environment, this paper analyzes four commonly used image enhancement algorithms, including image enhancement algorithm based on histogram equalization, the Fourier algorithm of the original color principle, the image enhancement algorithm based on Retinex, the image enhancement algorithm based on homomorphic filtering, and summarizes the characteristics and the use of these algorithms. The above four kinds of image enhancement algorithms are applied to the image enhancement in the sea area environment. Choosing the appropriate enhancement algorithm can effectively improve the image contrast and overcome the problem of sea fog and illumination unevenness.

Key words: sea image; image enhancement; dehazing; uneven illumination

收稿日期: 2016-11-14; 修订日期: 2017-06-13.

* 通信联系人, E-mail: zhr886@163.com

1 引言

由于在海域条件下,受到雾气、光线等多种气象因素影响,光电装备获取的图像出现不同程度的退化现象,导致图像的显示质量下降。受海雾与背景影响造成的图像对比度低及背景复杂是海域图像的典型特点,针对这些问题,应用图像增强技术,可以改善图像的视觉效果,增强图像的细节和目标信息,有效提高目标的辨识度。本文在分析海域图像的典型特点基础上,介绍4种常用的图像增强算法的基本原理和适用场景,最后对这些算法进行总结。

2 海域图像降质特点分析

光在海雾的传播过程中受大气粒子的影响,发生散射现象,削弱了光学成像设备获取的总光通量,加上海雾环境中的杂散大气光进入探测器,这两种因素直接造成了海雾图像质量下降。对比同一场景有雾图像和清晰图像,可以发现,有雾图像在空间域和频率域上都呈现明显的特点规律。从空间域上看,雾天图像相对于清晰图像,灰度均值明显要高一些,直方图分布比较集中,对比度较低;从频率域上看,雾天图像的高频分量较少,细节信息较少,灰度变化较慢,边缘模糊不够清晰。

由大气衰减模型^[1]可知,目标表面反射的光通量与景深的平方成反比,雾天图像的清晰度随着景深的增加呈现指数型衰减;随着入射路径的增加,进入探测器的大气光能量也在增加,获取的图像亮度变高,导致海雾图像的直方图向高灰度等级偏移。

在能见度较好的情况下,按照背景不同海域图像一般可分为3类:海面背景、天空背景及海天背景。由于光学成像设备、海域大气环境、光学系统、CDD响应特性及海域图像本身等因素,使得海域光电设备获取的背景很复杂,会出现海面杂散光亮斑、图像照度不均匀等现象。对于图像中所关注的目标,复杂背景可以看作图像中的有害信息,它降低了图像的信噪比,模糊了目标的边缘信息,影响图像的检测精度及分析结果。

海面背景图像由于海面反射太阳光的影响,局部区域出现海面亮带,造成图像的局部高

亮现象,会淹没目标的细节特征,甚至整个目标;天空背景图像由于阳光影响会出现照度不均匀的现象,在探测器的太阳夹角较小的情况下,也会出现图像的局部高亮现象;海天背景图像由于海面和天空景深不同,图像直方图分布范围会充满整个灰度范围,图像海面背景部分较亮,天空背景较暗。所以,照度不均也是海域图像的典型特点。

3 海域图像增强算法

随着光学成像技术和计算机处理技术的不断进步,图像增强技术一直是在图像处理领域十分重要的技术,是世界技术前沿的研究热点,下面将讨论几种常用的图像增强算法。

3.1 基于直方图均衡的对比度拉伸算法

直方图均衡化又称为灰度均衡化,是指通过某种灰度映射关系使得原始图像的直方图能够均匀的分布在处理图像的整个灰度区间上。原始图像经过直方图均衡化处理后,像素点灰度值将均匀地分布在每个灰度等级上。直方图均衡化的思路是对原始图像进行某种非线性映射处理,重新计算每个像素的灰度值,增强图像的对比度,从而达到图像增强的目的。

直方图均衡化是以原始图像的概率密度函数来计算每个像素的灰度值。传统直方图均衡化过程可以使增强图像在保持原始图像的直方图形状的基础上,平均化直方图分布,改善图像细节。对海雾图像进行直方图均衡化可以扩展其直方图灰度分布范围,使得集中分布在高灰度等级的原始图像均匀分布在整个灰度范围上,提高了图像的对比度,达到海雾图像清晰化。直方图均衡化适用于直方图分布比较集中或低对比度的图像,对于直方图分布范围较大的图像,由于灰度拉伸范围有限,图像增强效果并不理想,甚至可能产生灰度合并的现象,比如增强后图像背景噪声增大,前景与背景边缘模糊,目标细节信息丢失^[2]。

基于传统直方图均衡化的缺点,许多学者提出了改进算法。Kim提出的基于图像均值分割的亮度均值稳定性的直方图均衡化算法(BBHE)^[3]在提高图像对比度的同时,保持原始图像的灰度均值,具体思路是:根据原始图像的灰

度均值将图像直方图分为两个子图像,分别对这两个子图像进行直方图均衡化处理。Wang 等提出的等面积双子图像直方图均衡化算法(DSIHE)^[4]与 BBHE 算法类似,具体思路是:根据原始图像中值作为分割阈值,将原始图像分割为两幅子图像,对两幅子图像分别直方图均衡化,得到增强图像。在 BBHE 和 DSIHE 算法的基础上,Chen 等提出的最小平均亮度误差直方图均衡化算法^[5](Minimum Mean Brightness Error BHE, MMBEBHE)是以最小化原始图像和增强图像亮度差异为约束条件,分别对分割图像进行直方图均衡化。上述直方图均衡化改进算法没有考虑目标的灰度值,对图像中所有灰度范围的像素点进行处理,增强图像的同时也引入了噪声。基于小波的多分辨率重叠子块直方图均衡化算法^[6]可以有效克服这一影响,它是利用小波变换将图像分解为高频、低频两部分,在降低噪声的同时增强了图像,具体思路是:对原始图像进行小波分解并对每个子带图像进行直方图均衡化,最后进行小波逆变换重构图像。

从图 1 可以看出直方图均衡化算法在处理雾天图像上有一定的增强效果,经过全局直方图均衡化的图像细节信息明显要优于原始图像,同时对对比度有显著改善。对于薄雾图像,直方图均衡化算法的增强效果比较显著,细节信息较为突出,但是对于浓雾图像,图像大部分灰度值较高,使得有用信号的对比较低,还可能造成增强图像的饱和和失真。

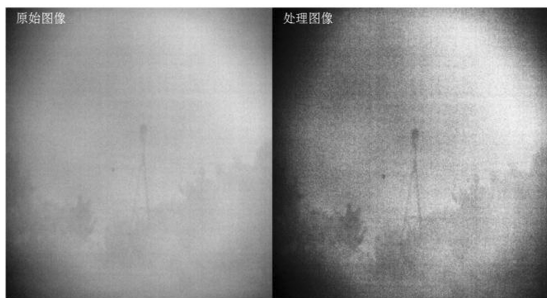


图 1 直方图均衡化算法效果对比图

Fig.1 Histogram equalization algorithm effect chart

3.2 基于暗原色原理的去雾算法

2009 年,何凯明等人提出了暗原色先验去雾算法^[7],该算法是基于大气物理散射模型^[8]建立的。大气物理散射模型中雾化过程可以由式(1)描述:

$$J(x) = I(x)t(x) + A(1 - t(x)), \quad (1)$$

式中: $J(x)$ 表示雾化图像, $I(x)$ 为场景的反射光,即为无雾图像, A 为环境光, $t(x)$ 为透射率。式(1)的第一部分是衰减模型,第二部分是环境光模型。去雾算法就是通过估计环境光 A 和透射率 $t(x)$,求解无雾图像 $I(x)$ 。

何凯明通过大量的观察对比实验得出:大多数无雾彩色图像在其 3 个颜色通道中至少存在一个具有像素值很低区域的颜色通道,这些像素值很低的像素就是暗原色。一般来自于场景中的暗目标、阴影及某一通道值较小的像素都会形成暗原色。

通常情况下,图像中某一邻域的透射率可以认为是常数,对于单幅有雾图像,可以利用大气散射模型及暗原色信息估计出目标场景中的透射率,可用式(2)表示:

$$\tilde{t}(x) = 1 - \min_c \left(\min_{y \in \Omega(x)} \left(\frac{J_c(y)}{A} \right) \right), \quad (2)$$

式中: $\tilde{t}(x)$ 是透射率的估计值, $\Omega(x)$ 是以 x 为中心的领域。

另一方面,有雾图像中高亮部分的灰度值与环境光的灰度值非常接近,将其作为环境光的估计值 $\tilde{A}$,便可以计算得到无雾图像,由式(3)表示:

$$\tilde{I}(x) = \tilde{A} - \frac{\tilde{A} - J(x)}{\tilde{t}(x)}, \quad (3)$$

式中: $\tilde{I}(x)$ 即为无雾图像的估算值。

在实际图像中,不可能所有区域、所有像素点都存在灰度值极小的通道,所以暗原色算法是以某一邻域中所有通道灰度值最小像素值为此领域的暗原色,然后以此最小值代替领域内其他的像素值。但是由于目标景深的突变,极易产生光晕效应。针对这一问题,许多学者提出了各种改进算法,以实现在保持图像细节信息的同时,抑制光晕效应。另外,暗原色去雾算法对单通道灰度图的增强效果较差。

图 2 是基于暗原色先验去雾算法的效果对比图,可以看出经过处理的图像细节信息明显要优于原始图像,同时对对比度有显著改善,暗原色去雾算法应用于有雾图像时有一定的去雾能力,尤其是在 RGB 图像上去雾效果很好。

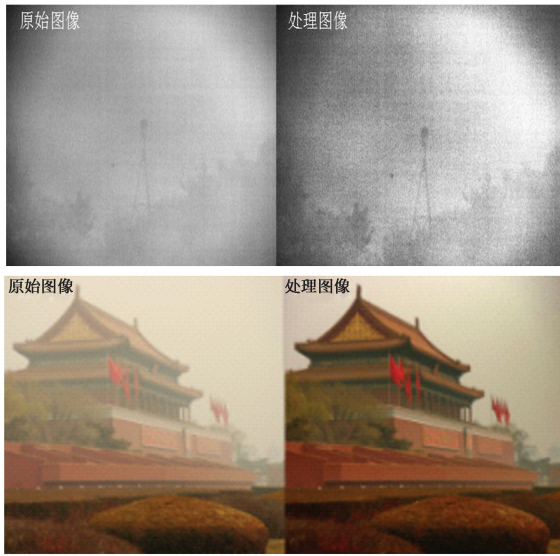


图 2 暗原色去雾算法效果对比图

Fig.2 Effect chart of dark channel defogging algorithm

3.3 基于 Retinex 理论的增强算法

1963 年 Land 等提出的 Retinex 算法^[9]是基于人类视觉系统色彩恒常性模型建立的图像增强算法,是通过大量实验和研究得到的理论模型。Retinex 算法本质上就是一种基于光照补偿的图像增强算法,能够对高动态范围图像进行增强。Retinex 算法的基本原理是原始图像 $I(x, y)$ 是由亮度图像 $L(x, y)$ 和反射图像 $R(x, y)$ 组成,可由式(4)表示:

$$I(x, y) = L(x, y) \times R(x, y), \quad (4)$$

Retinex 算法的基本思路就是通过输入图像 $I(x, y)$ 中估计照度分量 $L(x, y)$, 进而得到反射分量 $R(x, y)$ 。算法流程如图 3 所示。

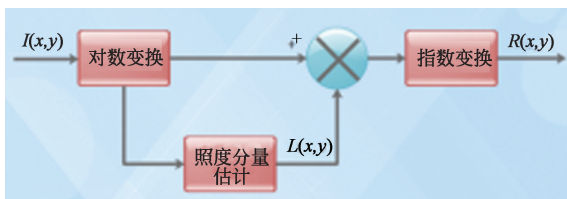


图 3 Retinex 算法基本流程图

Fig.3 Retinex algorithm flow chart

从算法基本流程图可以看出 Retinex 算法的关键就是合理准确地估计反射分量 R 。目前许多学者也是围绕这一关键进行研究的,如单尺度 Retinex 算法^[10]、多尺度 Retinex 算法等^[11]。

单尺度 Retinex 算法主要思路如下:假设照度分量 $L(x, y)$ 是平滑的, $G(x, y)$ 为高斯卷积

函数,如式(5)所示:

$$\begin{cases} I(x, y) = L(x, y) \times R(x, y) \\ L(x, y) = I(x, y) \times G(x, y) \end{cases}, \quad (5)$$

对式(5)进行对数变换可得:

$$\begin{aligned} \log R &= \log\left(\frac{1}{L}\right) = \log I - \log L = \\ &= \log I - \log(I \times G). \end{aligned} \quad (6)$$

单尺度 Retinex 算法不仅计算简单,且增强效果较好,在保持原始图像亮度的同时能够压缩图像对比度,能够突出图像暗处的细节信息。缺点是在增强图像中灰度相似的区域时,会产生晕环,改变原始图像的细节信息。

在单尺度 Retinex 算法基础上,有学者提出了多尺度 Retinex 算法,具体思路是:将图像灰度级分成几个范围,分别对每一灰度范围进行单尺度 Retinex 图像增强,按不同加权系数对结果加权,得到反射分量 R ,由式(7)表示:

$$\log R = \sum_{k=1}^m W_k (\log I - \log(I \times G)), \quad (7)$$

式中: W_k 是权重系数。

单尺度和多尺度 Retinex 算法本质上都是通过对原始图像进行某种高斯滤波来提取照度分量的,想要提取较为准确的照度分量需要付出高昂的计算代价。文献[9]得出了 Retinex 算法需要注意的 4 点:中心函数、连续环绕空间的大小、图像进行对数变换的位置及输出结果的处理。针对上述 4 点,国内外学者提出了各种 Retinex 改进算法。为了得到更好的视觉效果,文献[10]在单尺度 Retinex 算法的基础上使用卷积函数估计照度分量,然后对原始图像进行非线性增强,提升原始图像对比度,在对增强图像进行 Gamma 校正,最后利用估计的反射分量与照度分量,综合得到最后的增强图像^[12],达到了较好的视觉效果。Retinex 算法对高动态范围图像进行增强时会在对比度较高区域产生光晕现象,针对这一问题,文献[13]提出了一种估计照度分量的方法,有效克服了光晕现象。利用原有变分 Retinex 算法增强后的图像会出现伪影、噪声放大及边缘模糊的现象,针对这些问题文献[14]提出了一种基于小波变换的变分 Retinex 算法,对原始图像进行小波变换,利用改进的变分 Retinex 算法对各子带系数进行处理,可以保持图像的细节信息,同时能够降低图像噪声。

Retinex 算法的关键是如何准确估计图像的反射分量,各种改进算法也是在对比度增强效果、抑制噪声、计算效率等方面各有侧重进行平衡,以符合不同的应用场景。

图 4 是 Retinex 算法的效果对比图,可以看出经过处理的图像细节信息明显要优于原始图像,对比度有显著提升,但是图像噪声也被放大,失真明显。Retinex 算法增强局部灰度值低的图像具有较大优势,能有效增强图中暗处的细节信息,在保持图像原始亮度的同时可以压缩图像对比度。

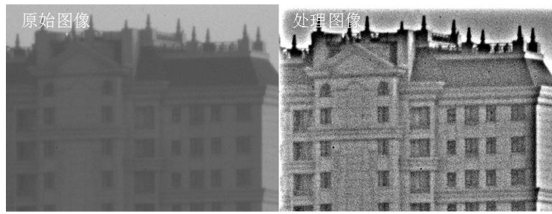


图 4 Retinex 算法效果对比图

Fig.4 Effect chart of Retinex algorithm

3.4 同态滤波算法

同态滤波算法是数字图像增强技术中一种非常重要的算法^[15],尤其对低照度成像条件下的图像增强效果较好。

在照明-反射模型中,任意图像可以表示为照度分量与反射分量的乘积形式,如式(8)所示:

$$f(x, y) = i(x, y) \times r(x, y), \quad (8)$$

其中: $f(x, y)$ 是原始图像, $i(x, y)$ 表示照度分量,通常是图像的低频分量, $r(x, y)$ 表示反射分量,通常是图像的高频分量。同态滤波算法的主要思路是:将原始图像即两个分量的乘积经过对数运算后转换为加法运算,然后经过傅里叶变换转换到频率域,经过设计好的滤波器,在弱化低频成分的同时增加高频分量,再经过傅里叶逆变换,进行指数运算,最后得到增强图像,提升图像的对比度,压缩图像的动态范围。同态滤波算法的过程如图 5 所示。

图中的滤波器函数就是同态滤波函数,一般图像中的照度分量在空间与呈现缓慢平滑的



图 5 同态滤波算法流程图

Fig.5 Flow chart of homomorphic filtering algorithm

变化特征,反射分量则会引起像素灰度值的突变,比如图像的细节信息或边缘信息,所以我们可以认为图像的照度分量对应于图像的低频成分,反射分量对应于图像的低频成分。由此可知,设计一个合适的滤波器函数是同态滤波算法的关键,常用的滤波器函数有高斯滤波器、巴德沃斯滤波器等。

海域图像由于太阳光的影响可能产生照度不均匀的现象,各区域平均灰度会有差异,在平均灰度较低或较高的区域内,图像细节信息不够清晰,较难分辨。图像经过同态滤波算法处理后,在增加高频成分的同时弱化了低频成分,突出了图像的细节信息,提升了图像的对比度,并且压缩了灰度的动态范围。同态滤波算法在处理照度不良和细节模糊的图像可以达到较强的增强效果。但是,同态滤波算法需要进行两次傅里叶变换,运算开销加大,不适合实时处理。针对这一缺陷,有学者提出了基于空域滤波器的同态滤波算法^[16-17]。其主要思路与同态滤波算法类似:首先把原始图像变换到对数域,再经过设计好的低通滤波器,利用低通滤波器的输出数据来估计照度分量,再增加反射分量,到达图像增强的目的。

图 6 是同态滤波算法的效果对比图,可以看出经过处理的图像细节信息更加丰富,对比度有一定改善,去雾效果有一定的提升。同态滤波算法将原始图像转换至对数域,提高了算法的计算效率,在增强图像对比度的同时实现了图像动态范围的压缩,对局部灰度值较低的图像有较好的增强效果。目前还没有一个统一的方法可以准确的估计不同场景图像的照度分量和反射分量,对于特定场景的图像则需要选取适当的滤波函数及其参数才能达到最好的增强效果。

Retinex 增强算法和同态滤波算法都是利用

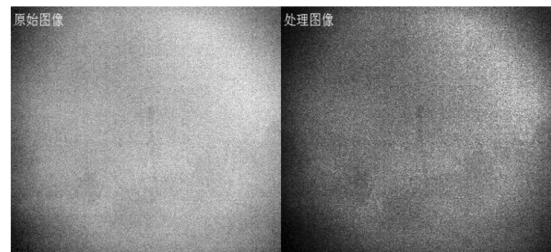


图 6 同态滤波算法的效果对比图

Fig.6 Effect of homomorphic filtering algorithm

图像的频率信息进行图像增强的,忽视了图像的梯度信息,造成边缘信息弱化,梯度域增强算法是利用图像梯度信息对图像进行增强的。

4 结 论

本文研究了海域图像的主要特点,分析了海域图像降质原因,介绍了常用的4种图像增强算法。由上述分析可以得出,基于直方图均衡化的对比度拉伸算法增强图像的对比度,对于直方图分布范围较小的图像有较强的增强效果,在薄雾

图像的增强中效果较好,可以有效地克服照度不均,计算开销较小,但是往往会带来过度增强效应;基于暗原色的去雾算法去雾效果较好,但是会引入光晕效应,且对于灰度图的去雾效果不太理想;Retinex算法在频域对图像进行处理,计算效率较高,在保持图像灰度均值的同时增强了图像的对比度,但是容易带来过度增强的效果,在梯度突变的区域容易产生光晕效应;同态滤波算法也是在频域对图像进行处理,计算效率较高,适用于动态范围高、局部灰度值低的图像增强,不过容易出现过度增强的效果。

参 考 文 献:

- [1] 曹雷,陈洪斌,邱琪,等.盲图像复原研究现状[J].中国光学,2014,7(1):68-78.
CAO L, CHEN H B, QIU Q, *et al.* Research status of blind image restoration [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(1): 68-78. (in Chinese)
- [2] 姚若河,黄继武,吴湘洪.改进的直方图均衡化图像增强算法[J].铁道学报,1997,19(6):78-81.
YAO R H, HUANG J W, WU X Q. An improved histogram equalization image enhancement algorithm [J]. *Journal of the China Railway Society*, 1997, 19(6): 78-81. (in Chinese)
- [3] 刘松涛,王维,殷福亮.基于动态广义直方图均衡的红外图像增强方法[J].系统工程与电子技术,2010,32(7):1411-1414,1451.
LIU S T, WANG W, YIN F L. Infrared image enhancement method based on dynamic generalized histogram equalization [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2010, 32(7): 1411-1414, 1451. (in Chinese)
- [4] 刘锦辉.图像增强方法的研究以及应用[D].长沙:湖南师范大学,2009.
LIU J H. Research and application of image enhancement methods [D]. Changsha: Hunan Normal University, 2009. (in Chinese)
- [5] CHEN S D, RAMLI A R. Minimum mean brightness error bi-histogram equalization in contrast enhancement [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2003, 49(4): 1310-1319.
- [6] JIN Y P, FAYAD L M, LAINE A F. Contrast enhancement by multiscale adaptive histogram equalization [C]//*Proceedings of SPIE 4478, Wavelets: Applications in Signal and Image Processing IX*. San Diego, CA, USA: SPIE, 2001: 206-213.
- [7] HE K M, SUN J, TANG X O. Single image haze removal using dark channel prior [C]//*Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. Miami, FL, USA: IEEE, 2009: 1956-1963.
- [8] MCCARTNEY E J. *Optics of the Atmosphere: Scattering by Molecules and Particles* [M]. New York: John Wiley and Sons, 1976: 23-32.
- [9] LAND E H. Recent advances in Retinex theory and some implications for cortical computations: color vision and the natural images [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1983, 80(16): 5163-5169.
- [10] JOBSON D J, RAHMAN Z, WOODILL G A. Properties and performance of a center/surround Retinex [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1997, 6(3): 451-462.
- [11] 刘家朋,赵宇明,胡福乔.基于单尺度 Retinex 算法的非线性图像增强算法[J].上海交通大学学报,2007,41(5): 685-688.
LIU J P, ZHAO Y M, HU F Q. A nonlinear image enhancement algorithm based on single-scale Retinex algorithm [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2007, 41(5): 685-688. (in Chinese)
- [12] 刘瑞剑,陈树越,张甲杰.多尺度 Retinex 算法在红外图像增强中的应用[J].弹箭与制导学报,2008,28(4):

- 193-195.
- LIU R J, CHEN S Y, ZHANG J J. The application of enhanced technology of infrared image based on Retinex [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2008, 28(4): 193-195. (in Chinese)
- [13] 许欣, 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.
- XU X, CHEN Q, WANG P A, *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. (in Chinese)
- [14] 詹洁, 严非. 一种新的变分 Retinex 图像增强方法[C]//第十四届全国图象图形学学术会议论文集. 福州: 中国图象图形学学会, 2008: 55-58.
- ZHAN J, YAN F. A new variational Retinex image enhancement method [C]//*Proceedings of the 14th National Conference on Image and Graphics*. Fuzhou: China Society of Image and Graphics, 2008: 55-58. (in Chinese)
- [15] 焦竹青, 徐保国. 基于同态滤波的彩色图像光照补偿方法[J]. *光电子·激光*, 2010, 21(4): 602-605.
- JIAO Z Q, XU B G. Color image illumination compensation based on homomorphic filtering [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2010, 21(4): 602-605. (in Chinese)
- [16] 闻莎, 游志胜. 性能优化的同态滤波空域算法[J]. *计算机应用研究*, 2000, 17(3): 62-65.
- WEN S, YOU Z S. A performance optimized algorithm of spatial domain homomorphic filtering [J]. *Application Research of Computers*, 2000, 17(3): 62-65. (in Chinese)
- [17] 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.
- XIAO J, SONG S P, DING L J. Research on the fast algorithm of spatial homomorphic filtering [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2008, 13(12): 2302-2306. (in Chinese)

作者简介: 张锐(1983—), 男, 内蒙古巴彦淖尔人, 硕士, 助理工程师, 2006 年于国防科学技术大学获得学士学位, 2013 年于大连理工大学获得硕士学位, 主要从事光学软件总体。E-mail: zhr886@163.com