

# 光照不均图像增强方法综述\*

梁琳, 何卫平, 雷蕾, 张维, 王红霄

(西北工业大学 现代设计与集成制造重点实验室, 西安 710072)

**摘要:** 针对图像采集过程中因环境光照不佳或物体表面采光不均等原因造成的图像光照不均问题, 分析了了几类常用的增强方法, 包括以直方图均衡化方法为代表的灰度变换法、基于照明—反射的同态滤波法、Retinex 增强方法以及梯度域增强方法, 对比了这几种方法的处理效果, 指出了这些方法各自的适用范围。最后给出了光照不均问题解决方法的改进方向。

**关键词:** 光照不均; 图像增强; 直方图均衡; 同态滤波; Retinex 方法; 梯度域

**中图分类号:** TP391.41      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-3695(2010)05-1625-04

**doi:**10.3969/j.issn.1001-3695.2010.05.006

## Survey on enhancement methods for non-uniform illumination image

LIANG Lin, HE Wei-ping, LEI Lei, ZHANG Wei, WANG Hong-xiao

(Key Laboratory of Contemporary Design & Integrated Manufacturing Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** In order to solve the non-uniform illumination problem of digital images, which was caused by poor light environment or lighting disproportionation on object's surface, this paper provided some common enhancement methods. They included gray transformation represented by histogram equalization, homomorphic filtering based on illumination-reflectance model, Retinex enhancement theory and gradient field method. Compared these methods' effect, analysed their application scopes and gave the solution direction of the non-uniform illumination problem.

**Key words:** non-uniform illumination; image enhancement; histogram equalization; homomorphic filtering; Retinex method; gradient field

在图像采集过程中, 由于光照环境或物体表面反光等原因造成的图像整体光照不均, 导致信息识读出现困难。图像光照不均具体表现如下: 图像整体灰度值偏低, 常见于夜间图像和红外图像<sup>[1]</sup>等; 图像局部灰度值偏低, 图像光照不均匀致使图像中局部灰度值低, 局部信息无法辨认<sup>[2]</sup>; 图像出现高光现象或部分图像位于高光区内<sup>[3]</sup>。光照不均在一定程度上改变了图像的原始面貌, 增加了进一步处理的困难程度。因此, 应针对光照不均问题对图像进行前期处理。常见的处理方法包括以直方图均衡化法为代表的灰度变换法、基于照明—反射模型的同态滤波法、Retinex 增强方法以及梯度域增强方法等。以直方图均衡化法为代表的灰度变换法能使图像灰度分布更均匀, 并增强图像对比度; 但它没有考虑图像的频率信息以及细节信息, 容易过增强图像。频域方法则针对图像频带宽的特点, 充分利用频率信息将图像的高频部分与低频部分分开。基于照明—反射模型的同态滤波法将图像分为高、低频两部分, 再进行滤波达到增强图像对比度同时压缩图像动态范围的目的。Retinex 增强方法使用高斯平滑函数估计原图像的亮度分量, 应用光照补偿方法逼近反射图像。梯度域增强方法则对原图像的梯度进行处理, 通过减小图像梯度值压缩图像动态范

围, 增大局部梯度值来增强图像边缘。

本文将介绍这些方法的原理、应用范围以及它们的优缺点和局限性, 并提出光照不均图像增强方法的进一步研究方向。

### 1 图像光照不均问题描述

按照图像光照不均匀的表现可以分为: 图像整体灰度值低, 无法辨认; 图像部分灰度值低, 图像动态范围大, 信息无法提取; 物体表面为金属等光滑表面使得采集到的图像出现高光现象。

#### 1) 图像整体灰度值低

由于采集图像时周围环境光照条件不佳或采集图像设备本身的问题, 使得到的图像整体灰度值偏低、图像对比度低, 感兴趣区域难以识别, 如红外图<sup>[1]</sup>、夜晚时获取的图像<sup>[4]</sup>。

#### 2) 图像局部灰度值低

图像中一部分由于获取光照不足或位于阴影区域导致灰度值较低, 与背景融合在一起, 虽然与其他部分对比度高, 但图像动态范围大, 使提取出原始图像中这部分的信息出现困难<sup>[2]</sup>。

#### 3) 图像出现反光现象

**收稿日期:** 2009-10-15; **修回日期:** 2009-11-29      **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(50505039); 国防基础科研基金资助项目(B2720060292)

**作者简介:** 梁琳(1987-), 女, 江西景德镇人, 硕士研究生, 主要研究方向为条码自动标志技术、数字图像处理(lianglin1215@yahoo.cn); 何卫平(1965-), 男, 甘肃天水人, 教授, 博导, 主要研究方向为 CIMS、人工智能等; 雷蕾(1971-), 女, 陕西西安人, 博士研究生, 主要研究方向为图像编码解码、工业自动标志等; 张维(1970-), 男, 陕西西县人, 副教授, 硕导, 主要研究方向为制造业自动化、CIMS 等; 王红霄(1986-), 男, 河南濮阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为 CIMS、制造业自动化。

图像位于金属光滑表面或有弧度的物体表面,使得采集到的图像出现高光现象,如图 1 所示。高光现象不仅使图像信息难以提取而且改变了图像的原始面貌,导致进一步处理更加困难。



图 1 金属表面高光现象示意图

## 2 图像光照不均常用解决方法

为了解决如上所述的图像光照不均问题,国内外文献提出了许多的解决方法,代表性的有以直方图均衡化法为代表的灰度变换法、基于照明—反射的同态滤波法、Retinex 增强方法以及梯度域图像增强方法等。

### 2.1 以直方图均衡化法为代表的灰度变换法

灰度变换法指的是对图像使用某一灰度变换函数以达到压缩/拉伸图像灰度范围的目的。直方图均衡化法是灰度变换法中使用频率高、具有代表性的方法。它分为全局直方图均衡化法和局部直方图均衡化法。

全局直方图均衡化法以图像灰度直方图为变量,利用图像本身信息对其进行变换<sup>[5]</sup>。全局直方图均衡化法有如下缺点:a)全局直方图均衡化法仅仅使灰度级分布平均化而不是扩大灰度范围;b)对于灰度级分布范围较大的图像灰度拉伸效果不明显;c)会产生灰度级合并的现象,这将改变图像的原始面貌并丢失图像细节<sup>[6]</sup>。

针对全局直方图方法的缺点,各种局部直方图均衡化方法被提出<sup>[7]</sup>。按照所均衡子块的重叠程度,局部直方图均衡算法可分为子块不重叠、子块重叠和子块部分重叠三种。子块不重叠的均衡算法其优点是图像局部细节对比度得到充分的增强;缺点是各子块的直方图均衡函数差异较大,输出图像中容易出现块效应,实际中并不常使用。子块重叠的均衡算法充分增强了图像局部细节,同时消除了块效应,但由于子块均衡总次数等于输入图像的像素总数,算法效率较低。子块部分重叠均衡算法对原图像取窗口子块,对窗口中的每个元素使用转移函数,将窗口按照某一尺寸在原图像中移动至最后一个像素。该算法的优点是在一定程度上减弱了块效应,采用子块按照一定尺寸移动而不是逐像素计算,计算效率大幅提高,同时与子块重叠算法增强效果相近,是局部直方图方法中常用的一种;缺点是在计算完成之后需要对图像进行块效应检查,这个过程需要检查子块图像的边界,并对其进行块效应滤波处理<sup>[8]</sup>。

局部方法仅仅考虑了在某一窗口中的灰度分布而没有考虑图像的整体特点,因此容易减弱图像层次感<sup>[9]</sup>。近些年来,基于直方图均衡化法的改进方法被不断提出,如在子块部分重叠的均衡算法基础上提出将图像根据亮度均值对子块图像进行递归分解,得到一系列不同灰度范围的子图像,然后对每一个子图像在其相应的灰度范围内应用子块部分重叠算法进行直方图均衡,最后合并这些子图像的均衡结果。该方法能较好

地保持图像亮度但计算时间有所增加<sup>[8]</sup>。由于自适应均衡化法对图像中任意灰度范围的像素进行处理,对兴趣区域进行增强的同时也增强了噪声。针对这个缺点,提出了一种基于小波的多分辨率重叠子块均衡化法,对每个子带图像进行分解并分别使用均衡化法,然后使用小波逆变换重构图像<sup>[10]</sup>,利用小波将图像分解为高频、低频两部分的特点,有效地降低了图像中的噪声,并增强了图像。有些图像层次丰富但灰度失衡,此时可以在全局直方图均衡化法基础上,检查原图中含像素点少的灰度级,增强这部分灰度级对应像素的梯度,以此来增强图像的细节<sup>[11]</sup>,但该方法对直方图分布集中的图像效果不大。

全局直方图均衡化法一般作为图像预处理,能有效地增强图像对比度,对于整体灰度值低图像增强效果显著。局部均衡化法其细节增强能力较全局直方图均衡化法更强,适用于增强需要保持原始亮度的图像<sup>[8]</sup>,但会出现块效应、计算速率、增强细节与增强噪声等问题。同时直方图均衡化法作为一类空域方法忽略了图像的频率信息。

### 2.2 基于照明—反射模型的同态滤波方法

在照明—反射模型中,图像可以表示为照明分量与反射分量的乘积形式: $f(x, y) = i(x, y) \times r(x, y)$ 。其中,照明分量  $i(x, y)$  频谱集中在低频段,反射分量  $r(x, y)$  频谱集中在高频段。同态滤波法的原理是通过滤波函数估算图像的低频或高频成分,增强图像局部对比度。同态滤波的过程如下:

$$f(x, y) \rightarrow \ln f \rightarrow \text{DFT} \rightarrow H(u, v) \rightarrow (\text{DFT})^{-1} \rightarrow \exp \rightarrow g(x, y)$$

其中: $f(x, y)$  为图像密度函数; $\ln f$  表示对  $f$  取对数;DFT 指对数据作傅里叶变换; $H(u, v)$  指对数据进行滤波; $(\text{DFT})^{-1}$  对数据作反傅里叶变换; $\exp$  对数据作指数变换; $g(x, y)$  指处理后的图像数据。

实际效果证明同态滤波法能同时进行动态范围的压缩和图像局部对比度的增强,在对图像细节方面增强能力颇佳,有时也被用于图像预处理<sup>[12]</sup>。滤波器在该方法中扮演着重要的角色。常用的滤波器有巴特沃斯滤波器、高斯滤波器等。

传统同态滤波法使用的空域—频域转换工具是傅里叶变换,它对图像的局部特点描述力差。传统同态增晰是从图像的整体角度对光照不均匀进行修正,虽然可以很好地保持图像的原始面貌,但它没有充分考虑图像的空域局部特性,在增强图像某部分像素时,易导致另一部分像素过增强。小波作为另一种域变换工具,在时域与空域都具有局部性。基于小波的同态滤波法具体步骤如下:

$$f(x, y) \rightarrow \ln f \rightarrow \text{WT} \rightarrow H(u, v) \rightarrow \text{IWT} \rightarrow \exp \rightarrow g(x, y)$$

其中:WT 指小波变换,IWT 指逆小波变换。

一幅图像经过  $n$  级小波分解,得到的低频带图像反映了图像各主要空域范围的亮度分布和基本面貌,高频信号反映的是图像的边缘信息。之后对  $\text{HH}_k$ 、 $\text{LH}_k$ 、 $\text{HL}_k$  ( $k = 1, 2, \dots, n$ ) 中的小波系数进行滤波并增强高频信息来提高原图像对比度,对  $\text{LL}_k$  使用线性滤波器,修正图像的亮度不均匀问题<sup>[13]</sup>;或者对各分辨率小波系数进行高通滤波之后,再针对每个分辨率下图像小波系数分别处理,得到最终的小波系数<sup>[14]</sup>。使用基于小波的同态方法,应该注意小波分解级数与计算效率之间的平衡,一般而言,三层小波分解能获得较好的增强效果<sup>[15]</sup>。

基于傅里叶与基于小波的同态滤波法都是频域的同态滤波法。针对频域方法需要在转换处理域花费时间的缺点,基于空域的同态滤波法被提出。其基本思想是:首先对图像数据进

行对数变换;再对图像使用低通滤波器;然后使用某一模型利用低通滤波得到的数据来估计照明分量,继而分别对照明分量与反射分量进行处理,增强图像<sup>[16,17]</sup>。

基于照明—反射模型的同态方法将图像转换至对数域,使得计算效率更高,能在压缩图像整体动态范围,同时增强灰度值低区域的对比度,适用于增强局部灰度值低的图像。目前对照射分量和反射分量的估计并没有一个很好的方法,对特定的图像需要选取适当的滤波器并调节滤波器的系数以达到最好效果。

### 2.3 基于 Retinex 理论的增强方法

Retinex 算法由 Land<sup>[18]</sup> 提出,它实质上是一种基于光照补偿的图像增强算法<sup>[19]</sup>。Retinex 算法的基本内容是:图像由亮度图像和反射图像构成,分别用  $L(x,y)$  和  $R(x,y)$  表示,三者关系可由式(1)来表示:

$$I(x,y) = L(x,y) \times R(x,y) \quad (1)$$

其中: $L$  是亮度分量,被观察者或图像捕捉设备收到的构成图像;反射分量  $R$  决定了图像的内在性质。Retinex 方法对图像处理的目的就是从图像  $I$  中获得物体的反射性质分量  $R$ 。Retinex 算法流程<sup>[19]</sup>,如图 2 所示。几乎所有应用 Retinex 算法对图像进行处理的算法,都是围绕如何更准确、合理地将亮度分量  $L$  从原始图像  $I$  中提取出来。现有文献中有很多算法来解决这个问题,如单尺度 Retinex 算法<sup>[20]</sup>、多尺度 Retinex 算法等<sup>[21]</sup>。



图 2 Retinex 算法一般流程

单尺度 Retinex 算法方法如下:设亮度图像  $L(x,y)$  为平滑的,反射图像为  $R(x,y)$ ,原图像为  $I(x,y)$ ,并记  $G(x,y)$  代表高斯卷积函数,则有

$$\begin{cases} I(x,y) = L(x,y) * R(x,y) \\ L(x,y) = I(x,y) * G(x,y) \end{cases} \quad (2)$$

将式(2)转换至对数域中可得:

$$\log R = \log(I/L) = \log I - \log L = \log I - \log(I * G) \quad (3)$$

实验表明,单尺度 Retinex 算法可以较好地增强图像,能在保持原始图像亮度的同时压缩图像对比度,并增强图像暗处信息。但是当图像中有大块灰度相似的区域时,增强后的图像会产生晕环现象(halo artifacts)。

多尺度 Retinex 算法是对单尺度 Retinex 算法的改进。将图像依照灰度值分为若干级,分别使用单尺度 Retinex 方法,最后使用系数加权得到处理结果。可由式(4)表示:

$$\log R = \sum_{k=1}^m W_k (\log I - \log(I * G_k)) \quad (4)$$

其中: $W_k$  表示与  $G_k$  相关的权重系数, $m$  表示环境函数的个数<sup>[22]</sup>。

上述经典的 Retinex 算法实质上都是通过对原图像进行某种高斯平滑来提取亮度图像,且都需要复杂的计算使得提取的亮度图像尽量准确。文献[20]提出了几点 Retinex 方法需要考虑的地方:对图像进行对数函数的位置、中心函数、连续环绕空间的大小以及输出结果之前的处理。针对这些问题,国内外文献提出了各种改进方法。为了得到更好的视觉效果,文献[21]在原有单尺度 Retinex 算法中使用卷积函数对亮度粗估计之后再使用非线性函数增强原图像对比度,通过对此时图像数据进行 Gamma 校正,并将调整后的反射图像与粗估计的亮

度图像进行合成,得到最终的增强图像<sup>[22]</sup>。针对传统中心/环绕 Retinex 图像增强方法在处理高动态范围图像时易在明暗对比强烈处产生光晕现象,文献[23]提出了一种使用 mean shift 滤波进行估计光照的方法,并在处理之后对图像直方图中的孤立点作进一步处理,有效地消除了光晕现象。针对原有变分 Retinex 方法处理后的图像易出现伪影、边界易模糊以及噪声加强的问题,文献[24]提出了一种基于小波框架的变分 Retinex 方法,将图像变换至小波域,通过对各尺度系数应用各向异性改进的变分 Retinex 方法来保持图像边界,同时通过对小波系数处理降低图像噪声<sup>[24]</sup>。

Retinex 方法的关键在于对反射分量的估计,提出的各种方法力求在对对比度增强效果、抑制噪声、计算效率等方面进行平衡,以达到最佳视觉效果。该方法适合处理局部灰度值低的图像,能有效增强其中暗处的细节部分,并且在压缩图像对比度同时能在一定程度上保持图像原始亮度。基于照明—反射模型的同态滤波法和 Retinex 增强方法都充分利用了图像的频率信息,但没有重视图像梯度信息,易在增强图像的同时模糊边缘信息。梯度域图像增强方法则充分利用了图像梯度信息。

### 2.4 梯度域图像增强方法

图像光照不均梯度场中的具体表现为梯度分布不均。图像对比度高表现为梯度强度大、结构清晰,扩大图像梯度范围可扩大图像动态范围,减小梯度范围则压缩图像动态范围,因此可通过处理图像梯度场来实现图像增强。Subr 等人<sup>[25]</sup>提出了依赖于图像局部差分总和的目标函数来度量图像的对比度,并通过贪婪迭代优化方法实现目标函数最大值来增强图像。Fattal 等人<sup>[3]</sup>提出了一种直接对图像梯度图进行修改的方法,该方法的主要思想是:将图像转换至对数域中,在对数域中求得图像的梯度;将某一因子作用于每一个梯度图像像素中,减弱图像梯度值;最后,使用数值方法在梯度域中重建图像数据,并将重建后的图像指数化并输出。该方法处理过程如下:设图像  $I(x,y)$  对数化后为  $H(x,y)$ ,记  $\Delta H(x,y)$  为图像梯度,对梯度使用平滑函数得到式(5):

$$G(x,y) = \Delta H(x,y) \cdot \Phi(x,y) \quad (5)$$

其中: $G(x,y)$  与  $\Delta H$  方向相同,大小由  $\|\Delta H\|$  与系数因子  $\Phi(x,y)$  共同决定。该方法的核心是对梯度场中的每个像素点使用  $\Phi(x,y)$  作卷积运算来压缩图像动态范围<sup>[3]</sup>。该方法需要使用数值方法在修改后的梯度域中重建图像<sup>[26]</sup>,也可以直接在图像梯度域中对梯度函数使用直方图均衡方法取代因子  $\Phi(x,y)$ ,这样可以在增强图像局部对比度的同时使图像整体梯度均匀化,避免了使用 Retinex 方法产生的晕环现象。

大部分局部增强方法能够在压缩图像动态范围的同时增强暗处信息,但是对原图较亮部分以及阴影部分增强不够。原图中光照均匀部分表现为梯度分布均匀,而较亮部分与阴影部分梯度范围小,可以通过压缩其他部分梯度的同时扩大较亮部分或阴影部分图像的梯度,压缩图像动态范围同时增强局部对比度,使得这部分信息更易识别。梯度域增强方法能够较好地保持原图中的细节信息和层次感,适合分析图像高光区与阴影区的的信息;其缺点是会使图像在一定程度上锐化,并且在梯度域中重建图像需要一定的数值算法,不适合实时使用。梯度域方法作为一种较新的图像增强算法,可用于增强医学图像、声纳图像等。

### 3 结束语

本文给出了图像光照不均的表现形式,综述了四类现有的光照不均图像增强方法。由上述分析可以看出,全局直方图均衡化法能增强图像整体对比度,适用于增强整体灰度值低、动态范围低的图像;局部直方图均衡化法能增强图像细节信息,拉伸图像局部灰度级范围,但出现块效应、计算速率等问题;同态滤波法与 Retinex 方法均为频域处理方法,计算效率高。同态滤波法可用于增强动态范围高、局部灰度值低的图像,会出现过增强现象,对高光区、阴影增强效果差;Retinex 方法主要在于对亮度图像的估计,能在保持图像亮度的同时增强图像暗处的信息,但需要针对每幅图像调整参数,并且对原图像中较亮的部分处理能力不足,在梯度突变部分易出现光晕现象。梯度域方法能够在压缩图像动态范围的同时扩大局部梯度范围,相比其他方法,它在增强图像阴影、高光部分表现良好。但在梯度域中重建图像,需要一定的数值算法。

近年来,上述四类方法在不断改进。直方图均衡化法趋向于与人体视觉结合,增强图像的同时保持图像原始面貌<sup>[27]</sup>。频域方法、Retinex 方法则倾向于与其他方法的结合,其降低噪声的功能可以弥补其他方法的不足<sup>[28]</sup>。梯度域方法着重在计算效率上的改进<sup>[29]</sup>。笔者认为如下两个方面仍需进一步研究:a)计算效率。局部直方图均衡化法、梯度域方法虽然处理效果好,但缺乏快速算法,使得这些方法仅适用于图像分析,不能实时使用,局限了其应用范围。b)处理问题的范围。上述图像处理方法都是基于图像灰度值是连续、缓慢变化这个假设,而当图像灰度值出现突变时,如当图像出现部分反光时,由于图像具有高动态范围,直方图均衡化法失效;图像灰度变化一部分是连续缓慢的,但另一部分出现了突变,同态滤波法与 Retinex 方法也将失效;梯度域方法虽然能提取出图像突变位置,但难以避免光照急剧变化对图像带来的影响。

#### 参考文献:

- [1] 康志亮. 基于小波的红外图像增强算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2005.
- [2] VOICU L I, MYLER H R, WEEKS A R. Practical consideration on color image enhancement using homomorphic filtering[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 1997, 6(1): 108-113.
- [3] FATTAL R, LISCHINSKI D, WERMAN M. Gradient domain high dynamic range compression[C]//Proc of the 29th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York: ACM Press, 2002: 249-256.
- [4] 黄华, 蒋永馨, 王孝通, 等. 一种基于 Ardely 分割算法的夜晚图像增强方法[C]//第十四届全国图像图形学学术会议论文集. 北京: 中国图像图形学学会, 2008: 86-90.
- [5] GONZALEZ R C, WOODS R E. Digital image processing[M]. 2 版. 阮秋琦, 阮宇智, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2003: 152-154.
- [6] 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.
- [7] YU Z, BAJAJ C. A fast and adaptive method for image contrast enhancement[C]//Proc of International Conference on Image Processing. Chicago: Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society, 2004: 1001-1004.
- [8] 江巨浪, 张佑生, 薛峰, 等. 保持图像亮度的局部直方图均衡算法[J]. *电子学报*, 2006, 34(5): 861-866.
- [9] KIM J Y, KIM L S, HWANG S H. An advanced contrast enhancement using partially overlapped subblock histogram equalization[J]. *IEEE Trans on Circuits and Systems for Video Technology*, 2001, 11(4): 475-484.
- [10] JIN Yin-peng, LAURA F, ANDREW L. Contrast enhancement by multi-scale adaptive histogram equalization[C]//Proc of International Conference on Wavelets: Applications in Signal and Image Processing. 2001: 206-213.
- [11] 曹聚亮, 吕宝海, 李冠章. 基于自适应局部灰度修正的直方图均衡算法[J]. *红外与激光工程*, 2004, 33(5): 513-515.
- [12] 陈智, 王国志, 丰善, 等. 同态滤波预处理在微粒场全息图像处理中的应用[J]. *光子学报*, 2004, 33(2): 168-170.
- [13] 张新明, 沈兰荪. 基于小波的同态滤波器用于图像对比度增强[J]. *电子学报*, 2001, 29(4): 531-533.
- [14] 孙慧贤, 罗飞路, 张玉华. 基于小波变换和同态滤波的内窥图像增强算法[J]. *探测与控制学报*, 2008, 30(5): 69-72.
- [15] 张纪铃, 冯晓毅, 夏超. AOI 检测系统光照不均的校正方法研究[J]. *电子测量技术*, 2007, 30(7): 20-23.
- [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.
- [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): 2302-2305.
- [18] LAND E. Recent advances in Retinex theory and some implications for cortical computations: color vision and the natural images[J]. *Proceedings of National Academy of Sciences*, 1983, 80(16): 5163-5169.
- [19] 蒋永馨, 王孝通, 徐晓刚, 等. 一种基于光照补偿的图像增强算法[J]. *电子学报*, 2009, 37(4A): 151-155.
- [20] JOHNSON D J, RAHMAN Z, WOODDELL G A. Properties and performance of a center/surround Retinex[J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 1997, 6(3): 451-462.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 詹洁, 严非. 一种新的变分 Retinex 图像增强方法[C]//第十四届全国图像图形学学术会议论文集. 北京: 中国图像图形学学会, 2008: 55-58.
- [25] SUBR K, MAJUMDER A, IRANI S. Greedy algorithm for local contrast enhancement of images[C]//Proc of the 13th International Conference on Image Analysis and Processing. Berlin: Springer, 2005: 171-179.
- [26] 朱立新, 王平安, 夏德深. 基于梯度场均衡化的图像对比度增强[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2007, 19(12): 1546-1552.
- [27] ARICI T, DIKBAS S, ALTUNBASAK Y. A histogram modification framework and its application for image contrast enhancement[J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 2009, 18(9): 1921-1935.
- [28] WONG A, CLAUSI D A, FIEGUTH P. Adaptive Monte Carlo Retinex method for illumination and reflectance separation and color image enhancement[C]//Proc of Canadian Conference on Computer and Robot Vision. Washington DC: IEEE Computer Society, 2009: 108-115.
- [29] WANG T H, KE Wei-ming, ZWAO D C, et al. Block-based gradient domain high dynamic range compression design for real-time applications[C]//Proc of the 14th IEEE International Conference on Image Processing. 2007: 561-564.