

# 基于光照分量提取的光照不均匀图像校正

陶 胜<sup>1</sup>, 胡 越<sup>2</sup>

(1. 集美大学理学院, 福建 厦门 361021; 2. 集美大学诚毅学院, 福建 厦门 361021)

**[摘要]** 针对光照不均匀的灰度图像, 在频域采用多尺度高斯函数提取出光照分量, 并对光照分量进行对数变换, 再根据提取出的光照分量和变换后的光照分量对原始图像的灰度值进行幂次变换, 从而实现光照不均匀灰度图像的校正。对于真彩色 *RGB* 图像, 先将该图像从 *RGB* 空间转换到 *Lab* 空间, 然后对 *L* 分量的灰度值进行幂次变换校正, 最后将校正后的图像从 *Lab* 空间转换回 *RGB* 空间。Matlab 仿真结果表明, 频域提取光照分量比空域处理速度更快, 幂次变换校正后的图像质量得到明显改善, 与伽马函数校正相比, 在客观评价标准和主观视觉效果两方面均能够取得更好的结果。

**[关键词]** 光照不均匀图像; 光照分量; 幂次变换; 校正; *Lab* 空间

**[中图分类号]** TP 391.4

## Illumination Nonuniform Image Correction Based on Illumination Component Extraction

TAO Sheng<sup>1</sup>, HU Yue<sup>2</sup>

(1. School of Science, Jimei University, Xiamen 361021, China; 2. Chengyi University College, Jimei University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** For the gray image with uneven illumination, the multi-scale Gaussian function is used to extract the illumination component in the frequency domain, and the logarithmic transformation is carried out on the illumination component. According to the extracted illumination component and the transformed illumination component, the power transformation is carried out on the gray value of the original image, so as to realize the correction of uneven illumination gray image. For a true color image, the image is converted from *RGB* space to *Lab* space first, then the gray value of the *L* component is corrected by power transformation, and finally the corrected image is converted from *Lab* space to *RGB* space. Matlab simulation results show that the processing speed of light component extracted in frequency domain is faster than that in spatial domain, and the image quality after power transform correction is improved significantly. Compared with gamma function correction, it can achieve better results in both objective evaluation standard and subjective visual effect.

**Keywords:** illumination nonuniform image; illumination component; power transformation; correction; *Lab* space

## 0 引言

由于光照过强或不足、物体之间相互遮挡、拍摄仪器不同, 以及拍摄位置等因素的影响, 致使所采集的图像出现光照不均匀问题。光照不均匀的图像会直接影响到图像的视觉效果和之后的图像分析

[收稿日期] 2020-10-30

[作者简介] 陶胜 (1968—), 男, 副教授, 从事计算机图形图像处理方向研究。

<http://xuebaobangong.jmu.edu.cn/zkb>

处理。为了提高图像的质量,有必要对光照不均匀的图像进行增强处理。

目前,光照不均匀图像的校正方法主要有同态滤波方法、直方图均衡化方法、Retinex 方法、形态学滤波方法、基于模糊理论的方法、伽马校正方法等。同态滤波可以使图像过暗区域的光照得到增强,同时又可以保护图像的细节<sup>[1-2]</sup>,但是采用同态滤波方法需要确定滤波器中的相关参数,而且无法对图像中的亮度过强区域进行处理。直方图均衡化方法具有简单、快速的优点,但是会出现过增强、色彩失真现象<sup>[3]</sup>。Retinex 方法具有色彩恒常性,在图像亮度突变的区域会产生光晕现象<sup>[4-5]</sup>。形态学滤波方法可以改善图像的视觉效果,但是会改变图像的自然特征<sup>[6]</sup>。基于模糊理论的方法能判定并分别处理高亮度和低亮度区域,但是具有计算复杂、参数选取比较困难等缺点<sup>[7]</sup>。通过估计并调整光照分量同时结合相应的反射分量得到最终增强图像的方法<sup>[8-9]</sup>和一些利用深度学习改进的方法<sup>[10]</sup>,能有效增强暗处的对比度和细节部分,但同时可能造成边缘模糊或颜色失真。伽马校正方法可以改善图像的对比度,但存在过饱和、欠饱和问题<sup>[11]</sup>。改进的伽马校正方法<sup>[12]</sup>运用高斯函数提取出图像的光照分量,并利用光照分量的分布特性自适应地调整二维伽马函数的参数,进行自适应的校正处理,但在空间域提取光照分量,速度较慢,而且自适应伽马校正的效果不是特别理想。

本文针对伽马校正方法的不足,采用多尺度高斯函数在频域提取图像的光照分量,并对提取的光照分量进行对数变换,然后根据变换后的光照分量和原始光照分量对原始图像采用幂次变换进行校正,期望光照过暗区域图像的亮度值能得到增加并且光照过亮区域图像的亮度值能有所降低,从而有效地提高了图像的质量,改善视觉效果。

## 1 频域提取光照分量

图像的照射分量可以采用高斯函数估计出来<sup>[13]</sup>,二维高斯函数的表达式为:

$$g(x, y) = \lambda \exp(-(x^2 + y^2)/\sigma^2)。 \quad (1)$$

其中: $\lambda$  为归一化常数,即满足  $\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} g(x, y) dx dy = 1$ ;  $\sigma$  为尺度因子。

将高斯函数和原图像做卷积,便可得到光照分量的估计值,其表达式为:

$$I(x, y) = \sum_{i=1}^n \omega_i [f(x, y) * g_i(x, y)]。 \quad (2)$$

其中: $*$  表示卷积; $f(x, y)$  为原灰度图像或真彩色图像的亮度分量; $\omega_i$  为权重; $g_i(x, y)$  为高斯函数,由式(1)给出; $i = 1, 2, \dots, n$ 。当  $n = 1$  时表示为单尺度,当  $n > 1$  时表示为多尺度。例如,选取  $n = 3$ , 权重  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  均为  $1/3$ , 3 个尺度因子  $\sigma_1 = 20$ ,  $\sigma_2 = 75$ ,  $\sigma_3 = 250$ 。

按照式(2)直接计算光照分量,运算量较大,耗时较长。在频域中计算光照分量可以大大加快运算速度。卷积定理表明,空间域中的卷积相当于频域中的乘积<sup>[1]</sup>。因此,实际计算时,先对式(2)两边进行傅里叶变换,将空间域中的卷积运算转换为频域中的乘积运算:

$$F(I) = \sum_{i=1}^n (\omega_i \cdot F(f * g_i)) = \sum_{i=1}^n (\omega_i \cdot F(f) \cdot F(g_i))。 \quad (3)$$

加权求和后得到  $F(I)$ , 再对  $F(I)$  进行逆傅里叶变换得到光照分量。

## 2 光照不均匀灰度图像校正

### 2.1 光照分量对数变换

灰度图像的对数变换可以扩张数值较小的灰度范围,压缩数值较大的灰度范围,符合人的视觉特性<sup>[1]</sup>。对于光照不均匀的灰度图像  $f(x, y)$ , 采用多尺度高斯函数提取出的光照分量为  $I(x, y)$ , 表现出局部的数值偏小或偏大,分布不均匀,再对  $I(x, y)$  作非线性变换,得到  $I'(x, y)$ :

$$I'(x, y) = k_1 + k_2 \cdot \log_2 [I(x, y) + 1] / \log_2 (k_3 + 1)。 \quad (4)$$

其中  $k_1$ 、 $k_2$  取  $I(x, y)$  的均值,  $k_3$  取  $I(x, y)$  的最大值, 且  $k_1, k_2, k_3$  均大于 0。

图 1 为光照分量对数变换曲线图。图 1 表明, 对数变换将窄带低灰度值映射为宽带输出值, 将高灰度值部分压缩。

## 2.2 校正

幂次变换通过幂次曲线中的  $\gamma$  值将输入的窄带值映射到宽带输出值。当  $\gamma < 1$  时, 将输入的窄带暗值映射到宽带输出亮值; 当  $\gamma > 1$  时, 将输入高值映射为宽带<sup>[1]</sup>。因此, 对光照不均匀图像的校正可以通过幂次变换来实现。

对于灰度图像  $f(x, y)$ , 令  $I(x, y)$  为从  $f(x, y)$  中提取的光照分量, 对  $I(x, y)$  按式 (4) 作对数变换后的结果为  $I'(x, y)$ , 对  $f(x, y)$  作如下变换:

### 1) 幂次变换

$$f'(x, y) = 255[f(x, y)/255]^{\exp(-r(I'(x, y) - I(x, y))/k)}, \quad (5)$$

其中参数  $k$  为  $I(x, y)$  的最大值;  $r$  为调节系数, 且  $r > 0$ ;  $f(x, y)$  除以 255 指进行归一化处理。

### 2) 分段幂次变换

$$f'(x, y) = \begin{cases} 255[f(x, y)/255]^{\exp(-r_1(I'(x, y) - I(x, y))/k)}, & I(x, y) \leq \alpha \cdot k, \\ 255[f(x, y)/255]^{\exp(-r_2(I'(x, y) - I(x, y))/k)}, & I(x, y) > \alpha \cdot k, \end{cases} \quad (6)$$

其中参数  $k$  为  $I(x, y)$  的最大值;  $r_1, r_2$  为调节系数, 且  $r_1 > 0, r_2 > 0$ ;  $\alpha > 0$  为比例系数。

由式 (5) 可知: 对应于光照暗的区域中的各点  $(x, y)$ , 相对应的  $I'(x, y)$  值比  $I(x, y)$  值增大较多,  $\exp(-r(I'(x, y) - I(x, y))/k) < 1$ , 此时将降低较亮点的对比度, 加强较暗点的对比度; 而对应于光照亮的区域中的各点  $(x, y)$ ,  $I'(x, y)$  与  $I(x, y)$  相差不大。所以  $f'(x, y)$  对应于光照暗的区域中的各点能得到进一步增强, 相对地, 对应光照亮的区域中的各点得到减弱。而式 (6) 通过设置比例系数 (例如取  $\alpha = 0.9$ ) 对亮度过强的区域和其他区域分别采用不同的调节系数进行校正, 可以取得更好的效果。

## 3 光照不均匀真彩色图像校正

### 3.1 Lab 色彩空间

Lab 色彩空间是一种基于生理特征的颜色系统, 由三个要素  $L$ 、 $a$ 、 $b$  组成<sup>[14]</sup>。 $L$  分量代表亮度, 其变化范围从纯黑到纯白,  $L$  的取值范围为  $[0, 100]$ ;  $a$ 、 $b$  分量代表色度,  $a$  的变化范围从红色到绿色,  $b$  的变化范围从黄色到蓝色, 色彩分量  $a$ 、 $b$  的取值范围均为  $[-127, 128]$ 。

RGB 空间与 Lab 空间之间的转换需要借助 XYZ 空间来实现。RGB 空间要转换到 Lab 空间, 先从 RGB 空间转换到 XYZ 空间, 再从 XYZ 空间转换到 Lab 空间; 同样, Lab 空间要转换到 RGB 空间, 先从 Lab 空间转换到 XYZ 空间, 再从 XYZ 空间转换到 RGB 空间。

#### 1) RGB 与 XYZ 空间之间的转换公式如下:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.412453 & 0.357580 & 0.180423 \\ 0.212671 & 0.715160 & 0.072169 \\ 0.019334 & 0.119193 & 0.950227 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.240479 & -1.537150 & -0.498535 \\ -0.969256 & 1.875992 & 0.041556 \\ 0.055648 & -0.204043 & 1.057311 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (8)$$

#### 2) Lab 与 XYZ 空间之间的转换公式如下:

$$\begin{cases} L = 116f(Y/Y_n) - 16, \\ a = 500[f(X/X_n) - f(Y/Y_n)], \\ b = 200[f(Y/Y_n) - f(Z/Z_n)], \end{cases} \quad f(t) = \begin{cases} t^{1/3}, & t > (6/29)^3, \\ 1/3(29/6)^2 t + 4/29, & t \leq (6/29)^3. \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} Y = Y_n f^{-1}(1/116(L + 16)), \\ X = X_n f^{-1}(1/116(L + 16) + 1/500a), \\ Z = Z_n f^{-1}(1/116(L + 16) - 1/200b), \end{cases} \quad f^{-1}(t) = \begin{cases} t^3, & t > 6/29, \\ 3(6/29)^2(t - 4/29), & t \leq 6/29. \end{cases} \quad (10)$$

其中  $X_n = 0.950456$ ,  $Y_n = 1.0$ ,  $Z_n = 1.088754$ 。

### 3.2 校正

$Lab$  色彩空间中的色彩分量  $a$ 、 $b$  与亮度分量  $L$  是相互独立的,也就是说对亮度分量  $L$  进行处理不会改变图像的色彩<sup>[14]</sup>。对于光照不均匀的真彩色图像,光照不均匀表现在亮度分量  $L$  上,所以在校正之前先将真彩色图像由  $RGB$  空间转换到  $Lab$  空间,然后对亮度分量  $L$  进行校正处理,最后将校正后的图像由  $Lab$  空间转换回  $RGB$  空间,得到校正后的真彩色图像。

真彩色图像的校正过程如图2所示。

对于真彩色  $RGB$  图像,首先,将  $R$ 、 $G$ 、 $B$  三个通道灰度值的平均值作为灰度图像  $f(x,y)$ ,并将该图像由  $RGB$  空间转换到  $Lab$  空间,亮度分量为  $L(x,y)$ ,色度分量分别为  $a(x,y)$ 、 $b(x,y)$ 。然后,提取灰度图像  $f(x,y)$  的光照分量,并对提取的光照分量按式(4)作对数变换,得到变换后的光照分量,再按照式(5)或式(6)进行校正。需要注意的是,由于亮度分量  $L$  的取值范围为  $[0,100]$ ,所以式(5)和式(6)中的255应变为100。最后将校正后的亮度分量  $L'$  和色度分量  $a$ 、 $b$  由  $Lab$  空间转换回  $RGB$  空间,便得到校正后的真彩色图像。

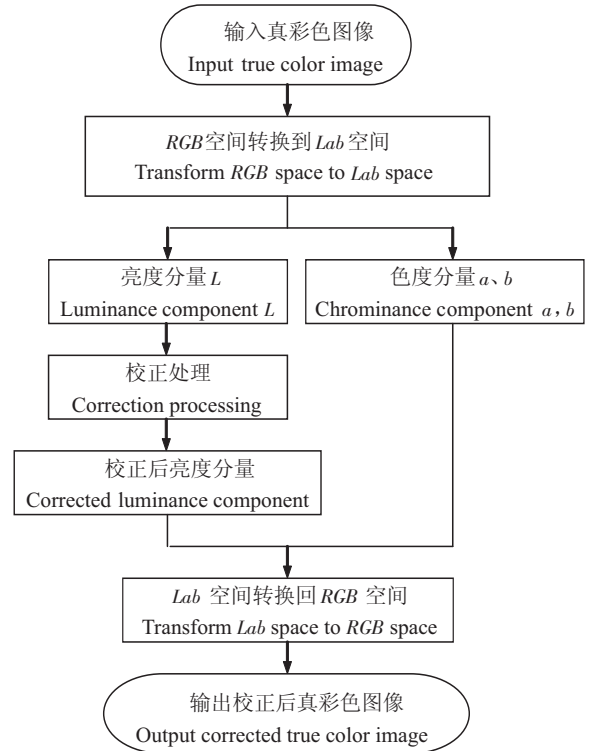


图2 真彩色图像的校正流程图

Fig. 2 Correction flow chart of true color image

## 4 Matlab 仿真

仿真实验采用一幅光照不均匀灰度图像和6幅光照不均匀真彩色图像。光照不均匀灰度图像分别采用伽马函数校正和幂次变换方法(调节系数  $r = 2.5$ )进行校正,结果如图3所示。



图3 光照不均匀灰度图像的处理结果

Fig.3 Processing results of gray image with uneven illumination



6 幅光照不均匀真彩色图像分别采用伽马函数校正和幂次变换方法进行校正, 实验结果如图 4 ~ 图 9 所示。



图 4 光照不均匀真彩色图像 A 的处理结果

Fig.4 Processing results of true color image A with uneven illumination



图 5 光照不均匀真彩色图像 B 的处理结果

Fig.5 Processing results of true color image B with uneven illumination



图 6 光照不均匀真彩色图像 C 的处理结果

Fig.6 Processing results of true color image C with uneven illumination



图 7 光照不均匀真彩色图像 D 的处理结果

Fig.7 Processing results of true color image D with uneven illumination

图8 光照不均匀真彩色图像  $E$  的处理结果Fig.8 Processing results of true color image  $E$  with uneven illumination图9 光照不均匀真彩色图像  $F$  的处理结果Fig.9 Processing results of true color image  $F$  with uneven illumination

对图4中的真彩色图像  $A$ , 采用多尺度高斯函数 ( $n = 3$ , 权重均为  $1/3$ , 3个尺度因子分别为20、75、250) 在空间域提取光照分量, 耗时约为  $3.8\text{ s}$ ; 在频域提取光照分量, 耗时约为  $0.9\text{ s}$ 。两者结果一样, 如图10所示。对提取的光照分量进行对数变换, 结果如图11所示。



图10 真彩色图像的光照分量

Fig.10 Illumination component of true color image



图11 光照分量的对数变换

Fig.11 Logarithmic transformation of illumination component

为了进一步对比伽马函数校正方法和幂次变换校正方法的处理效果, 采用光照分量均值和信息熵两个客观指标进行衡量。

假设提取出的光照分量为  $I_c(x, y)$ , 光照分量均值计算公式为:

$$\bar{I}_c = \sum_{y=1}^N \sum_{x=1}^M I_c(x, y) / M/N, \quad (11)$$

其中  $M, N$  分别为图像  $I_c(x, y)$  的宽度和高度。

熵是衡量图像中所包含的信息量的大小,熵越大说明包含的信息越多。对于灰度图像,计算 0 ~ 255 共 256 个灰度级的频率,作为相应的概率  $p_{\delta}, \delta = 1, 2, \dots, 256$ , 熵计算公式为:

$$H(X) = - \sum_{\delta=1}^{256} p_{\delta} \log_2 p_{\delta} \quad (12)$$

对于真彩色图像,计算  $R, G, B$  三个通道的数据中 0 ~ 255 的频率,作为相应的概率,按式 (12) 计算熵。

采用伽马函数校正和幂次变换校正的评价指标计算结果如表 1 所示。

表 1 伽马函数校正和幂次变换校正的评价指标对比

Tab. 1 Comparison of evaluation indexes between Gamma function correction and power transformation correction

图像 Image	指标 Index	原始图像 Original image	伽马函数校正 Gamma function correction	幂次变换校正 Power transformation correction		
				$r = 1.5$	$r = 2.0$	$r = 2.5$
灰度图像 Gray image	熵 Entropy	6.9	6.8	7.1	7.1	7.2
	光照分量均值 Mean value of illumination component	52.6	51.5	68.6	75.4	82.6
真彩色图像 A True color image A	熵 Entropy	7.4	7.5	7.8	7.8	7.8
	光照分量均值 Mean value of illumination component	53.2	52.6	81.4	91.4	100.8
真彩色图像 B True color image B	熵 Entropy	7.1	6.8	7.4	7.4	7.3
	光照分量均值 Mean value of illumination component	46.1	40.9	72.2	82.6	93.2
真彩色图像 C True color image C	熵 Entropy	6.6	6.9	7.3	7.5	7.6
	光照分量均值 Mean value of illumination component	58.5	47.3	71.8	78.7	86.7
真彩色图像 D True color image D	熵 Entropy	7.3	7.2	7.7	7.7	7.6
	光照分量均值 Mean value of illumination component	52.5	48.9	75.9	85.3	95.0
真彩色图像 E True color image E	熵 Entropy	7.1	7.1	7.6	7.7	7.6
	光照分量均值 Mean value of illumination component	48.1	41.9	73.5	84.2	95.3
真彩色图像 F True color image F	熵 Entropy	6.5	6.7	7.1	7.2	7.4
	光照分量均值 Mean value of illumination component	37.3	36.1	48.8	53.8	59.3

仿真实验表明,幂次变换校正的熵和光照分量均值两个评价指标数据比伽马函数校正的要好,因而能够取得更好的校正效果。分析其原因,伽马函数校正可以对图像的过亮区域进行有效地校正,但是对图像的过暗区域的校正效果不显著,以致校正后图像的熵和光照分量均值增加不多,甚至会有所减少。而幂次变换校正能够使图像过暗区域的亮度值得到显著增加,并且使过亮区域图像的亮度值有所降低,使得校正后的图像熵值和光照分量均值明显增大,所携带的信息量更多。

## 5 结束语

本文对于光照不均匀的灰度图像,采用多尺度高斯函数在频域提取光照分量,大大加快了运算速度。先对提取的光照分量进行对数变换,然后根据变换后的光照分量和原始光照分量对原始图像采用幂次变换进行校正。对于真彩色图像,先将图像由  $RGB$  空间转换到  $Lab$  空间,再对  $L$  分量进行校正,最后将校正后的图像由  $Lab$  空间转换回  $RGB$  空间。Matlab 仿真表明,本文提出的方法能有效地保持图像的细节信息,提升图像的质量。与伽马函数校正方法相比,本文方法处理速度更快,能够取得更满意的视觉效果。

## [ 参考文献 ]

- [1] 杨杰, 黄朝兵. 数字图像处理及 MATLAB 实现 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.
- [2] 胡槭. 基于空域的光照不均匀图像的增强和校正 [J]. 集美大学学报 (自然科学版), 2019, 24(6): 476-480.
- [3] TAN T L, SIM K S, TSO C P. Image enhancement using background brightness preserving histogram equalization [J]. Electronics Letters, 2012, 48(3): 1-2.
- [4] JUNG C, SUN T, JIAO L. Eye detection under varying illumination using the Retinex theory [J]. Neurocomputing, 2013, 113(596): 130-137.
- [5] LI JIA. Application of image enhancement method for digital image based on Retinex theory [J]. Optik, 2013, 124: 5986-5988.
- [6] LUAN X, HOU G J, SUN Z Y, et al. Underwater color image enhancement using combing schemes [J]. Marine Technology Society Journal, 2014, 48(3): 57-62.
- [7] HASIKIN K, MATISAN A. Adaptive fuzzy intensity measure enhancement technique for non-uniform illumination and low-contrast images [J]. Signal, Image and Video Processing, 2015, 9(6): 1419-1442.
- [8] FU X Y, LIAO Y H, ZENG D L, et al. A probabilistic method for image enhancement with simultaneous illumination and reflectance estimation [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2015, 24(12): 4965-4977.
- [9] LI M D, LIU J Y, YANG W H, et al. Structure-revealing low-light image enhancement via robust retinex model [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2018, 27(6): 2828-2841.
- [10] WANG W J, WEI C, YANG W H, et al. GLADNet: low-light enhancement network with global awareness [C] // Proc of 2018 13th IEEE International Conference on Automatic Face & Gesture Recognition. Xi'an: IEEE, 2018: 751-755.
- [11] HUANG S, CHENG F, CHIU Y. Efficient contrast enhancement using adaptive gamma correction with weighting distribution [J]. IEEE Trans on Image processing, 2013, 22(3): 1032-1041.
- [12] 刘志成, 王殿伟, 刘颖, 等. 基于二维伽马函数的光照不均匀图像自适应校正算法 [J]. 北京理工大学学报, 2016, 36(2): 191-196.
- [13] BANIC N, LONCARIC S. Light random sprays Retinex: exploiting the noisy illumination estimation [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2013, 20(12): 1240-1243.
- [14] 王永胜, 宋子彬, 校美玲, 等. Lab 色彩空间的 Retinex 轮对踏面图像增强算法 [J]. 石家庄铁道大学学报 (自然科学版), 2019, 32(1): 48-55.

(责任编辑 朱雪莲 英文审校 黄振坤)