

文章编号:1000-582X(2011)01-042-05

# 驾驶员疲劳状态监测中的彩色图像光照补偿技术

朱淑亮,王增才,王保平

(山东大学机械工程学院,山东 济南 250061)

**摘要:**为增强图像质量,提出了一种具有鲁棒性的图像光照补偿算法。首先基于空间梯度的方法将原始图像分解为高频、低频图像,光照信息完全包含在低频图像中;然后对低频图像应用Retinex算法进行光照补偿,使得较暗区域变亮;接着将补偿后的低频图像和高频图像合成;最后将合成后的图像进行光照均衡得到新图像。实验证明,与传统算法相比,该算法具有较好效果,新图像受光照影响小。

**关键词:**空间梯度;光照补偿;Retinex算法;S曲线;光照;图像增强;彩色图像处理

**中图分类号:**TP391.4

**文献标志码:**A

## Illumination compensation of color video for driver fatigue monitor

ZHU Shu-liang, WANG Zeng-cai, WANG Bao-ping

(School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan, Shangdong 250061, P. R. China)

**Abstract:** A robust method to compensation illumination of driver video color image to enhance image quality has been proposed. Firstly, the original image is decomposed into high-frequency image and low-frequency image based on spatial image decomposition. The illumination information is completely contained in the low-frequency image. Next, low-frequency image is compensated by using Retinex approach which can brighten the darker area. Then, the compensated low-frequency image and high-frequency image are synthesized. Finally, new image is obtained by illumination balance of synthesized image. Results show that the algorithm has better results compared with the traditional algorithm.

**Key words:** spatial gradient; illumination compensation; Retinex algorithm; S curve; lighting; image enhancement; color image processing

驾驶员视频图像,在对驾驶员进行疲劳监测时起着非常重要的作用,然而,由于驾驶室内外环境的不断变化,车内车外光照强度不同,经常会引起视频图像出现高光、阴影等现象,影响图像的处理结果。光照变化对识别系统性能的影响非常大,同一个人在不同光照条件下,图像差距会非常大<sup>[1]</sup>。目前,在人脸识别中解决光照问题的方法主要有三大类:

第一类方法是建立不同条件下的人脸模型或光

照模型,例如光照锥<sup>[2-3]</sup>方法和基于光照样本的方法<sup>[4]</sup>。此类方法理论性强,试图通过数学理论结合光度学理论,给光照变化建立统一的模型,其假设过多、过强,有很大的局限性,在实际场景中往往难以满足其条件,且要采集大量的不同光照条件下的人脸图像样本,计算耗时,因此限制了其在实时人脸识别系统中的应用。

第二类方法是提取光照不变特征。如基于边缘

收稿日期:2010-08-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30870652C100401);山东省中青年科学家科研奖励基金资助项目(2007BS03010)

作者简介:朱淑亮(1982-),男,山东大学博士研究生,主要从事汽车安全与人机工程方面的研究。

王增才(联系人),男,山东大学教授,博士生导师,(E-mail)sdu.mec@gmail.com。

的图像特征<sup>[5]</sup>: 图像边缘、轮廓、Gabor 特征和角点等; 基于图像的方法<sup>[6]</sup>: Eigenface、Fisher-face 方法。尽管这些方法的思想很直接, 但实践表明这种方法对光照的校正都有一定的局限性。

第三类方法是光照补偿法, 即对人脸图像进行预处理, 消除光照对人脸图像的影响。对于均匀光照变化常用的方法有: 直方图均衡、Gamma 校正、对数变换等<sup>[7]</sup>; 对于非均匀光照变化, 常用的方法是自适应直方图均衡、分块直方图均衡<sup>[8]</sup>及非线性自适应法<sup>[9]</sup>和方差滤波器法<sup>[10]</sup>, 此类算法简单, 但这种方法对图像的校正并不理想, 在性能上往往难以达到理想效果。

笔者在空间域中提出一种新的光照均衡算法, 算法共分 4 个部分: 图像分解、光照补偿、图像合成和光照均衡。基于空间梯度方法的图像分解将原始图像分解为高频、低频图像, 光照信息完全包含在低频图像中, 然后对低频图像应用 Retinex 算法进行光照补偿, 将较暗区域增亮。将补偿后的低频图像和低频图像合成, 进行光照均衡得到新图像。

## 1 图像分解

本节中, 笔者将图像分解为高频和低频两部分, 高频图像主要包含图像的边缘部分, 低频图像包含光照成分, 这样在对图像进行光照均衡时, 只需均衡低频图像, 高频图像不需要调整, 因此, 可以最大限度地保留图像的边缘细节, 从而可以提高图像的质量。

### 1.1 图像梯度

图像梯度在图像处理中是一个常用的局部不连续度测量方法。不连续度反映了图像在每个像素上与邻域像素点的不连续水平, 此方法是将当前像素与局部邻域像素值作差分运算。因此, 通过差分运算可以获得图像的细节成分。图像差分定义如下:

$$\nabla I = |I(x, y) - I(i, j)|. \quad (1)$$

$I(i, j)$  是当前像素  $I(x, y)$  邻域的像素值。对于彩色图像, 分别计算每个通道的差分。当差分值满足  $\nabla I > k$  时, 笔者认为图像颜色变化明显。通过实验得  $k = 15$ 。

定义局部空间有效平均梯度:

$$\overline{\nabla I(x, y)} = \frac{1}{N_{(x, y)}} \times$$

$$\sqrt{\sum \sum_{(i, j) \in \Omega} k_{(i, j)} [I(x, y) - I(i, j)]^2}. \quad (2)$$

$\Omega$  是像素点  $(x, y)$  的邻域,  $(i, j)$  指示了像素在邻域中的位置。在此, 选用  $3 \times 3$  邻域。  $k_{i, j}$  是决定差分有效性的参数, 其取值如下:

$$k_{i, j} = \begin{cases} 1, & \text{if } \nabla I_{i, j} > 15; \\ 0, & \text{else.} \end{cases} \quad (3)$$

$N_{(x, y)}$  是归一化系数, 计算公式如下:

$$N_{(x, y)} = \begin{cases} \sum_{(i, j) \in \Omega} k_{(i, j)}, & \text{if } \sum_{(i, j) \in \Omega} k_{(i, j)} > 0; \\ 1, & \text{if } \sum_{(i, j) \in \Omega} k_{(i, j)} = 0. \end{cases} \quad (4)$$

如果  $k_{(i, j)} > 15$ , 笔者认为是一次有效差分。有效差分的平均值称为局部空间有效平均梯度, 这种梯度处理接近各项异性扩散, 可以有效地保持图像细节。

梯度图像只包含图像的细节, 并不包含变化缓慢的光照部分, 笔者称为高频图像, 因此, 对原图像进行光照均衡可以先滤掉该部分光照无关图像, 为此, 对原图像进行分解。

### 1.2 图像分解

图像分解是在空间域上做的像素级分解, 把原始输入图像分解为梯度图像和光照图像两部分, 梯度图像包含细节部分, 光照图像包含光照信息, 定义为

$$I'(x, y) = I(x, y) - \overline{\nabla I(x, y)}, \quad (5)$$

式中:  $I'(x, y)$  为光照图像;  $I(x, y)$  为原始输入图像。

## 2 光照补偿

光照因素在人脸图像中更多地表现成一种乘性因素, 是人脸识别领域中对光照问题的共识, 人们感知物体的亮度取决于环境的光照和物体表面对反射光的反射, 与这两部分成比例<sup>[11]</sup>。单通道图像的数学模型为

$$I(x, y) = L(x, y) \times R(x, y), \quad (6)$$

式中:  $I(x, y)$  为图像像素值;  $R(x, y)$  为反射图像;  $L(x, y)$  为照度图像。

### 2.1 Retinex 理论

Retinex 理论主要用于对光照不均匀的图像进行光照补偿。在 Retinex 模型中, 通常将图像  $I$  分解成 2 个独立的部分: 由场景内物体表面反射率决定的反射图像  $R$ , 对应于图像的高频部分; 由环境光照决定的照度图像  $L$ , 对应于图像的低频部分。实际上, 照度图像  $L$  直接决定了一幅图像中像素所能达到的动态范围, 而反射图像  $R$  则决定了一幅图像的内在性质。Retinex 理论的实质就是从图像  $I$  中获得物体的反射性质。大多数 Retinex 算法的首要步骤, 都是将图像像素转化到对数域<sup>[12]</sup>。对式(6)做对数运算, 得到:

$$\log I(x, y) = \log L(x, y) + \log R(x, y). \quad (7)$$

这样由乘法简化为加法运算,无疑大大提高了运算能力。Land 创造性地提出了输出函数为

$$R'(x, y) = \log I(x, y) - \log(F(x, y) \times I(x, y)), \quad (8)$$

式中  $R'(x, y) = \log R(x, y)$ , 为避免发散, Jobson 等<sup>[13]</sup>将  $F(x, y) = e^{-|r^2|/c_3^2}$  命名为中心/包围函数, 并且表示为

$$F(x, y) = F(x, y, \sigma) = Ke^{-(x^2+y^2)/\sigma^2}, \quad (9)$$

式中  $K$  由归一化条件  $\iint F(x, y, \sigma) dx dy = 1$  来确定。

## 2.2 多尺度 Retinex(MSR)

多尺度 Retinex(multi-scal Retinex, MSR)算法不仅可以很好地将图像进行动态压缩,还可保持图像的细节信息<sup>[14]</sup>,其数学模型为

$$R(x, y) = \sum_{i=1}^n \omega_i [\log(I(x, y)) - \log(F_i(x, y) * I(x, y))], \quad (10)$$

式中:  $\omega_i$  为对应尺度权重系数;  $F_i(x, y)$  为对应尺度中心函数;  $n$  为尺度数目。实验表明,一般取大、中、小 3 个尺度,每个尺度的权重根据侧重动态范围还是侧重色感一致性的需要来选取<sup>[15]</sup>。

## 2.3 光照强度图像

本节中,笔者采用 Retinex 方法处理彩色图像。对彩色图像的处理方法有:一是在 RGB 每个通道上分别采用 Retinex 方法进行光照均衡。二是从 RGB 3 个通道上得到出光照信息—亮度,只对亮度运用 Retinex 方法进行均衡。在此,取 RGB 3 个通道上的最大值,计算亮度  $H(x, y)$ , 即

$$H(x, y) = \max(I_R(x, y), I_G(x, y), I_B(x, y)). \quad (11)$$

通过计算 3 个通道的最大值求出光照信息,只对光照信息进行 MSR 运算,这样可节省大量计算时间。

## 3 图像恢复

### 3.1 低频图像恢复

通过用多尺度 Retinex 方法对光照成分进行光照补偿后,获得了增强后的亮度图像。利用原始图像中的色彩信息,通过简单的线性操作即可恢复增强后图像的色彩信息,由于是线性操作,恢复后的图像各像素点的  $R, G, B$  三分量的比例关系保持不变,因而能够较好地保留原始图像中的颜色信息。增强后彩色图像单通道恢复方法如下<sup>[16]</sup>:

$$I'(x, y) = r(x, y) \times I(x, y). \quad (12)$$

比例因子

$$r(x, y) = \frac{H'(x, y)}{H(x, y)}, \quad (13)$$

式中:  $H(x, y)$  通过公式(11)可求得;  $H'(x, y)$  为经 MSR 处理后的亮度。

### 3.2 原始图像恢复

用多尺度 Retinex 方法对低频图像进行光照补偿后,去除了光照信息的影响,解决了偏光问题,但缺少图像细节,即高频图像,需将高、低频图像重构,方法如下:

$$I''(x, y) = I'(x, y) + \overline{\nabla I(x, y)}. \quad (14)$$

重构后的图像超出了显示设备的动态范围,利用式(15)进行归一化。

$$\overline{I''(x, y)} = 255 \times \frac{I''(x, y) - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}}, \quad (15)$$

式中:  $I_{\min}$  为重构图像  $I''(x, y)$  像素最小值;  $I_{\max}$  为重构图像  $I''(x, y)$  像素最大值。

## 4 S 曲线均衡

基于图像统计特性的 S 曲线函数(图 1),它可以增强图像中较暗区域或降低图像中较亮区域。S 曲线的定义为

$$I_s(x, y) = 255 \left( \frac{k_1}{k_2 + e^{-k_3 I(x, y)/k_4}} - k_5 \right), \quad (16)$$

式中:  $I_s(x, y)$  为均衡后图像;  $I(x, y)$  为原始彩色 RGB 图像,  $0 \leq I(x, y) \leq 255$ 。  $k_1, k_2, k_5$  为归一化系数,  $k_3$  决定曲线倾斜度的参数,  $k_4$  为像素特性参数,决定曲线水平方向位移的参数。在此  $k_1 = 2, k_2 = 1, k_5 = 1$ 。

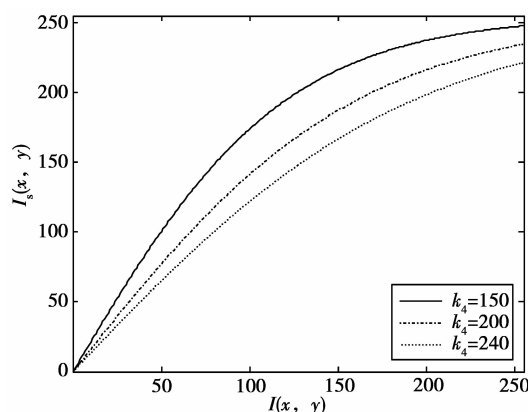


图 1 S 曲线

从图 1 中可以看出:  $k_4$  值越小,曲线越陡峭,对应输出像素值变大;  $k_4$  值越大,曲线越平缓,对应输出像素值变小。反方向调节像素值,当处理暗区域时,  $k_4$  应该取较小值,使图像变亮;处理亮区域时,  $k_4$  应该取较大值,使图像变暗。  $k_4$  取局部图像的平均值,具体计算公式为

$$k_4(x, y) = ce^{-(x^2+y^2)/\sigma^2} \times I(x, y), \quad (17)$$

式中:  $\sigma$  是高斯分布的标准偏差;  $c$  由归一化条件  $\iint k_1(x, y) dx dy = 1$  确定。

## 5 光照补偿算法实现

1) 依据公式(2), 分别计算输入图像(RGB)三通道的 8 邻域有效空间梯度, 得到梯度图像(高频图像)  $\nabla I(x, y)$ 。根据公式(5)将原始图像做线性空间梯度分解, 得出低频图像  $I'(x, y)$ 。

2) 取  $I'(x, y)$  三通道的最大值作为图像光照分量  $L$ , 对光照分量  $L$  应用多尺度 Retinex 滤波, 得到  $L'$ 。

3) 计算低频图像恢复的比例因子  $r$ , 然后根据公式(12)重构低频图像。

4) 将高频图像与低频图像进行线性重构, 得到新图像  $I''(x, y)$ 。将新图像归一化得到  $\overline{I''(x, y)}$ 。

5)  $\overline{I''(x, y)}$  进行  $S$  校正, 输出最终处理图像。

本文算法流程如图 2 所示。

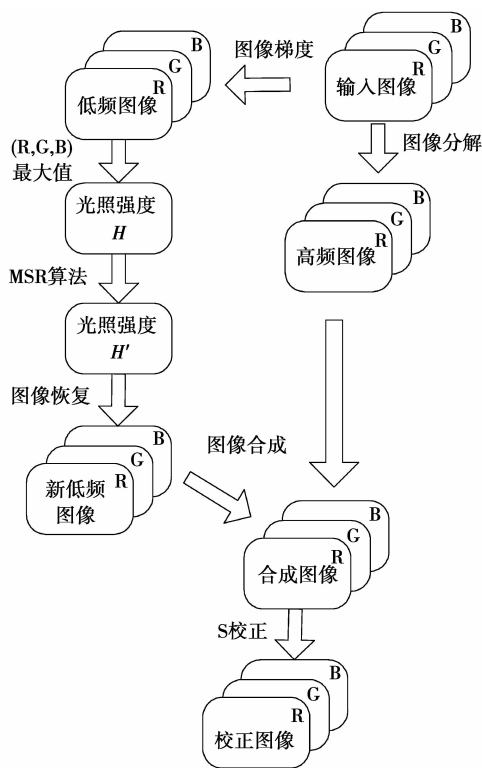


图 2 算法流程

## 6 实验分析

实验中, 本文算法主要和 McCann's Retinex、DCT、小波和直方图算法进行比较。效果如图 3-5 所示。

图 3(a) 和图 5(a) 为不同的原始输入图像; 图 3(b) 为图 3(a) 的梯度图像, 该图像中不包含光照

信息, 只是显示出图像的细节信息; 图 3(c) 为图 3(a) 的光照图像, 其只包含光照信息; 图 4(a) 和图 5(b) 为直方图均衡算法结果, 发现图像阴暗处的细节依然较暗, 不能很好地显示出细节; 图 4(b) 和图 5(c) 为离散余弦变换结果, 结果显示图像整体依然较暗, 细节不清楚, 甚至不如直方图处理的结果; 图 4(c) 和图 5(d) 为小波算法, 图像整体变亮, 但丢失部分细节, 图像对比度变小; 图 4(d) 和图 5(e) 为 McCann's Retinex 算法处理结果, 图像整体变亮, 但丢失更多色度。图 3(f) 和图 5(f) 为本文算法处理结果, 与前面 4 种算法相比, 图像亮度和对比度都得到了很好的增强, 表现出了更多的图像细节信息。

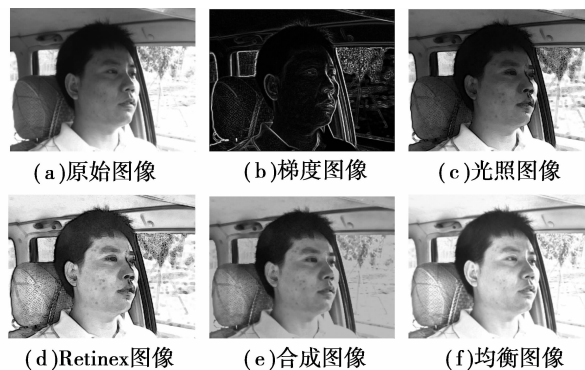


图 3 本文算法中涉及的图像



图 4 其他方法效果图



图 5 本文方法与其他方法效果比较图

## 7 结 语

笔者提出了一种新的彩色图像光照补偿方法,首先对图像在像素级进行高、低频分解,分离出与光照无关的高频图像,对包含光照信息的低频图像应用 MSR 算法进行光照补偿,然后将补偿后的图像与高频图像合成,得到新图像。实验表明,该方法在消除光照影响的同时能更好地保持图像细节,有利于图像的后续处理。

### 参考文献:

- [1] WANG Y H, NING X J, YANG C X, et al. A method of illumination compensation for human face image based on quotient image [J]. *Information Sciences*, 2008, 178(12): 2705-2721.
- [2] ISHIYAMA R, SAKAMOTO S. Geodesic illumination basis: compensating for illumination variations in any pose for face recognition [C/OL] // 16th International Conference on Pattern Recognition, Quebec City, Candan, August 11-15, 2002: 297-301. <http://www.computer.org/portal/web/csdl/doi/10.1109/ICPR.2002.1047455>.
- [3] 曾礼强, 王晓静, 张瑞. 基于光通传递函数矩阵的照度比例模型 [J]. *重庆大学学报*, 2008, 31(10): 1161-1163.
- ZENG LI-QIANG, WANG XIAO-JING, ZHANG RUI. An illuminance ratio model based on a luminance transfer function matrix [J]. *Journal of Chongqing University*, 2008, 31(10): 1161-1163.
- [4] LEE S W, MOON S H, LEE S W. Face recognition under arbitrary illumination using illuminated exemplars [J]. *Pattern Recognition*, 2007, 40(5): 1605-1620.
- [5] 林坤杰, 万晓冬. 基于边缘信息及光照方向的阴影检测算法 [J]. *计算机工程*, 2009, 35(20): 192-196.
- LIN KUN-JIE, WAN XIAO-DONG. Shadow detection algorithm based on edge information and illumination direction [J]. *Computer Engineering*, 2009, 35(20): 192-196.
- [6] SHIN D, LEE H S, KIM D. Illumination robust face recognition using ridge regressive bilinear models [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2008, 29(1): 49-58.
- [7] FINLAYSON G, HORDLEY S, SCHAEFER G, et al. Illuminant and device invariant color using histogram equalization [J]. *Pattern Recognition*, 2005, 38(2): 179-190.
- [8] XIE X D, LAM K M. Face recognition under varying illumination based on a 2D face shape model [J]. *Pattern Recognition*, 2005, 38(2): 221-230.
- [9] TIE Y, GUAN L. Automatic face detection in video sequences using local normalization and optimal adaptive correlation techniques [J]. *Pattern Recognition*, 2009, 42(9): 1859-1868.
- [10] KAPLAN L M, NASRABADI N M. Block wiener-based image registration for moving target indication original research article [J]. *Image and Vision Computing*, 2009, 27(6): 694-703.
- [11] HORN B K P. *Robot Vision* [M]. Cambridge, MA: MIT Press, 1986.
- [12] LAND E, MCCANN J J. Lightness and retinex theory [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1971, 61(1): 1-11.
- [13] JOHNSON D J, RAHMAN Z, WOODSELL G A. Properties and performance of a center/surround Retinex [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1997, 6(3): 451-462.
- [14] SHEN F, ZHAO Y M, JIANG X Z. Recovering high dynamic range by multi-exposure retinex original research article [J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2009, 20(8): 521-531.
- [15] KAKUMANU P, MAKROGIANNIS S. A survey of skin-color modeling and detection methods original research article [J]. *Pattern Recognition*, 2007, 40(3): 1106-1122.
- [16] 王守觉, 丁兴号, 廖英豪, 等. 一种新的仿生彩色图像增强方法 [J]. *电子学报*, 2008, 36(10): 1970-1973.
- WANG SHOU-JUE, DING XING-HAO, LIAO YING-HAO, et al. A novel bio-inspired algorithm for color image enhancement [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2008, 36(10): 1970-1973.

(编辑 张 苹)