

中图法分类号: TP751.1 TP301.6 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2011)07-1153-06

论文索引信息: 赵京东. 非均匀照度图像增强的变阻 RC 积分模型 [J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(7): 1153-1158

非均匀照度图像增强的变阻 RC 积分模型

赵京东

(曲阜师范大学 数学科学学院, 曲阜 273165)

摘要: 将 CCD(电荷耦合器件)单元等效成一个变阻 RC 积分电路,使图像中的光照效应分解为对光电势的影响和对光敏电阻的影响。当 $t \gg \tau$ 时认为光照强度只影响光电势。而对于不满足这一条件的光照强度进行调整,使非均匀照度图像中的低照度部分得以恢复,而正常照度部分和高光部分基本保持不变。将该模型应用于增强非均匀照度图像的常规算法之前,可收到较好的效果。

关键词: 非均匀照度;直方图均衡化;电荷耦合器件;RC 积分

Model of variable resistor RC integrator for uneven illumination image enhancement

Zhao Jingdong

(School of Mathematical Sciences, Qufu Normal University, Qufu 273165 China)

Abstract: The CCD cell is equalized as a variable resistance RC integral circuit, the lighting effect on the image is decomposed into pair impact of photoelectric potential and photosensitive resistance. When $t \gg \tau$, the illumination affects only the photoelectric potential, otherwise to be adjusted, so that, the parts of low illumination can be restored, the normal and high-light parts can be maintained almost. It can achieve good results, this model is applied to the conventional method of uneven illumination enhancement before.

Keywords: uneven illumination; histogram equalization; charged coupled device; RC integrator

0 引言

图像增强是一个传统的话题,可以对其进行各种变换,以达到预期的要求。在非均匀的照度下,用 CCD(charge couple device)设备或 CMOS 设备拍摄的图像中,高照度区域一般正常,而在低照度区域往往产生背景噪声,它和真实的图像信号混合在一起,造成图像的对比度下降和灰度分布不均,这种失真往往影响图像的质量。消除或减轻这种失真可以改善图像的外观,满足人眼的视觉效果,也有利于图像的检测和分析。首先对现有的增强算法进行简单分

析,指出它们的特点和使用范围;然后结合 CCD 单元的工作原理,构造变阻 RC 积分模型,并对模型的参数进行合理分析和设定;最后给出采用本模型对非均匀照度图像进行增强的实验结果及本模型的使用范围。

1 对现有方法的简单分析

现有的灰度修正方法主要包括:

1)直方图均衡化方法和局部直方图均衡化方法^[1-3]直方图均衡化是使变换后的图像灰度分布趋于均匀而对各像素点灰度级进行的一种均衡调

收稿日期:2010-04-06;修回日期:2010-07-14

基金项目:国家自然科学基金项目(10871116)。

第一作者简介:赵京东(1962—),男,教授。主要研究方向为 CAD、CAM、CAE、嵌入式系统开发与应用。

E-mail: zhaojd@mail. qfnu. edu. cn。

整,该方法对于一些灰度分布比较密集或者对比度比较低的图像能取得比较满意的增强结果。它只考虑了灰度统计信息而未考虑像素空间位置信息。与全局直方图均衡化相比,局部直方图均衡化算法仅考虑像素点邻域的亮度条件对该像素点进行灰度值变换,从而使输入图像的局部信息因对比度的增强而突现出来。

2) 小波方法^[4] 小波与多尺度分析在对比度增强上的应用取得了很大进展。文献[4]在多个尺度上对图像进行均衡化,对细节起到了很好的锐化作用。

3) Retinex 理论^[5-6] 与 CSR (center/surround retinex) 算法^[7-9] Retinex 是一种描述颜色不变性的模型,目前被广泛应用于图像的增强、恢复等方面,其中一个很重要的应用就是光照补偿^[6]。该理论认为一幅图像 I 可表示为

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

L 表示入射到物体上的光源能量总和 ($0 < L(x, y) < \infty$), R 表示物体的反射系数 ($0 < R(x, y) < 1$)。两边取对数得

$$\log R = \log I - \log L \quad (2)$$

算法的主要思想就是将一幅给定的图像 I 分解为反射图像 R 和照度图像 L ,并以 R 作为输出,以此来消除光照不均的影响。

CSR 是 Retinex 理论的实现形式,它计算简单,而且关键参数容易设置,目前得到越来越广泛地应用。算法表示式为

$$\begin{cases} R(x, y) = \log I(x, y) - \log I_L(x, y) & (3) \\ I_L = s \cdot [F(x, y) * I(x, y)] & (4) \end{cases}$$

该算法以在 \log 域中的反射图像 R (相当于式(2)中的 $\log R$) 作为输出, $F(x, y)$ 是环绕高斯函数,其解析式为

$$F(x, y) = e^{-r^2/c^2} \quad r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (5)$$

c 为常数,表示环绕高斯函数的尺度。

归一化常数

$$s = \frac{1}{\iint F(x, y) dx dy} \quad (6)$$

CSR 算法的实质是在 \log 域内将原始图像减去图像的(通过高斯低通滤波器获得的)低频分量,得到原图像在 \log 域中的反射系数。CSR 的一些改进算法^[8-9] 只是设计出一些更加合适的滤波器,使得低频分量削弱,高频分量适当增强,从而达到克服非均匀光场,压缩动态范围与增强对比度的目的。

4) 校正模型 该类模型可分为标样校正模型和近距离光照模型^[10]。标样校正是对具有均匀分布的(比如干净均匀的白纸)标样成像,以此标样来对实际图像进行灰度调整。主要用于光线不均或感光元件差异而造成的图像灰度与实际景物亮度不匹配的场所。对于一些灰度或者对比度发生变化的图像,效果不是很好。近距离光照模型采用的是几何光学和灰度统计方法,校正光源发光的不稳定以及光源距离物体的变动,它只适合于校正近距离下物体的成像。

2 变阻 RC 积分模型

电荷耦合器件(CCD)是一种金属氧化物半导体(MOS)集成电路器件,是获得高质量数字图像的主要部件。它与 CMOS 成像传感器相比,具有灵敏度高、读出噪声小的优点,但功耗较大。它以电荷作为信号,基本功能是进行电荷的存储和电荷的转移。构成 CCD 的基本单元是 MOS 电容器^[11],如图 1 所示。与其他电容器一样,MOS 电容器能够存储电荷。当光信号照射到 CCD 硅片表面时,在栅极附近的半导体体内产生电子-空穴对,其多数载流子(空穴)被排斥进入衬底,而少数载流子(电子)则被收集在势阱中,形成信号电荷,并存储起来。存储电荷的多少正比于照射的光强。

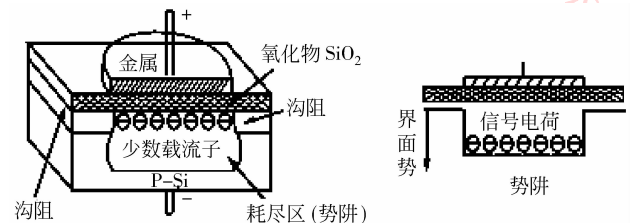


图 1 构成 CCD 的基本单元

Fig. 1 The cell of CCD

在此,我们将 MOS 电容器和光照情况等效成如图 2 所示的变阻 RC 电路。其中 U 相当于内阻为零的光电池,它与光照强度成正比; R 是影响载流子运动的光敏电阻(光电池的等效内阻及其他原因引起的阻碍电荷转移的电阻),光照强度越强, R 越小; u 是 CCD 输出的图像信号。实际上,图 2 所示的电路也是 CMOS 成像传感器的无源像素单元 PPS(passive pixel schematic) 的等效电路,而对于有源像素单元 APS(active pixel schematic) 来说,充电电路则变成了放电电路,这并不影响我们构造的模型。

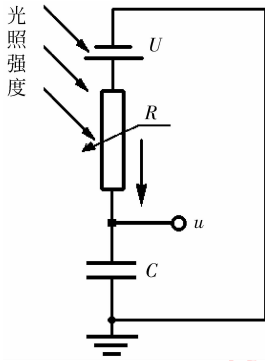


图 2 MOS 电容器和光照情况等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit diagram of MOS capacitance with emblaze

设某时刻电容器极板上的电荷量为 q , 极板间的电压为 u , 电阻两端的电压为 u_R 。根据回路电压方程可得

$$U - u_R - u = 0 \quad (7)$$

又因为电容上的电压为

$$u = q/C \quad (8)$$

流过 R 的电流为

$$i = dq/dt \quad (9)$$

代入式(7)后得

$$RC \frac{dq}{dt} + q = CU \quad (10)$$

利用初始条件 $t = 0, q = 0$, 解这个一阶线性齐次方程得

$$q = CU(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (11)$$

代入式(8)得电容器极板上的电荷随时间的变化关系函数:

$$u = U(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (12)$$

通常称 $\tau = RC$ 为 RC 电路的时间常数。若将 U 设定为由光照强度所产生的光电势, 当 $t \gg \tau$ 时, 有 $u \approx U$, 即光照强度与图像上对应的灰度级相等。

由于在正常照度下 CCD 可以获得景物的真实图像, 如果设 T 是正常照度下变阻 RC 电路的时间常数, 当曝光时间(或快门时间) $t \geq 3T$ 时, 由式(12)可得: $0.95U < u < U$ 。如果 $0 < \tau < T$, 可以认为已满足 $t \gg \tau$ 的条件, 此时, 有 $u \approx U$, 这是正常照度下的理想情况, 不需要调整或补偿。然而, 当照度较弱时, R 较大, 特别是当照度 $\rightarrow 0$ 时, $R \rightarrow \infty$ 或趋近为某个很大的正数, 必有 $\tau \geq T$, 不能满足 $0 < \tau < T$ 的条件, u 小于 U 也是不争的事实。如果我们能够找到一个 $\tau \in [T, +\infty)$ 随着 U 变化的函数, 即可弥补照

度下降对 u 的影响。但是, U 永远是未知的, 我们无法得到这样的函数。然而, 我们知道 u 是由 U 间接得到的, 考虑到 u 的 S 领域内的平均亮度 $\delta_s(x, y)$ 和方差 $\sigma_s(x, y)$ 在一定程度上反映了在该临域内照度 U 的情况。如果图像的纹理是均匀的, 则 $\delta_s(x, y)$ 小的区域对应的 U 小, $\sigma_s(x, y)$ 小的区域对应的 U 也小; 反之, U 大。

令

$$c = \alpha \delta_s + (1 - \alpha) \sigma_s \quad (13)$$

式中 c 在一定程度上反映了照度 U 的变化情况, $\alpha \in (0, 1)$ 表示照度对临域均值相对于临域方差的影响程度。正常情况下, 照度对图像的亮度影响占主要部分。若取值 $\alpha = 0.7$, 表示照度对亮度的影响占 70%, 而对方差的影响只占 30%。当照度进一步减少时, α 将减小, 若取值 $\alpha \leq 0.5$ 时, 表示照度严重影响了图像的对对比度。

如果将临域均值 $\delta_s(x, y)$ 规格化到 $0 \sim 1/T$; 将临域方差 $\sigma_s(x, y)$ 也规格化到 $0 \sim 1/T$, 则有 $T \leq 1/c < +\infty$ 。

如果令

$$\tau = 1/c, \quad T \leq \tau < +\infty \quad (14)$$

则式(14)正好符合 $\tau \in [T, +\infty)$, 且一定程度上反映了 $\tau \in [T, +\infty)$ 随着 U 变化的关系。

如果将式(14)代入式(12)即可得到原始照度为

$$U = u/(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), t \geq 3T \quad (15)$$

式中 T 是正常照度下 RC 电路的时间常数。

3 非均匀照度图像的 RC 矫正

为了保持变量的物理意义, 采用前述的变量名称。为了方便利用 S 临域均值和方差的归一化处理, 将正常照度下 RC 电路的时间常数 T 设置为 1。设 $u(x, y) \in [0, 1]$ 是一幅非均匀照度的灰度图像; (x, y) 是图像矩阵的坐标, 图像的大小为 $M \times N$; $U(x, y)$ 为校正后的图像。为了突出 S 临域中心像素点的地位, $\delta_s(x, y)$ 采用高斯低通滤波器获得, 即应用式(4)中的 I_L 代替 $\delta_s(x, y)$ 。具体的增强过程如下:

1) 以 $u(x, y) \in [0, 1]$ 为输入图像, 求出各个像素的 S 临域的 $\delta_s(x, y)$ 和 $\sigma_s(x, y)$ 。其中的 $\delta_s(x, y) = I_L$, 而 I_L 由式(4)~(6)计算。

2) 由式(13)加上一个极小正数(防止 $c = 0$, 如 0.00001)得到 $c \in (0, 1]$ 。其中 a 的取值可根据被处理图像的均匀度来选择, 一般在 0.5 左右取值。

3) 由式(15), 得到校正后的 U 。

4 实验结果与分析

局部直方图均衡化算法^[2-3] 不仅避开了物理模型方法对景物信息的依赖, 而且与其他图像处理算法相比能消除块状效应, 有效地突出图像细节信息, 特别适合于深度信息多变且对比度较低的图像, 对非均匀照度图像的增强有较好的效果。为此我们选用了局部直方图均衡化算法作为实验的依据。

4.1 实验与实验结果

选择 3 幅具有代表性的非均匀照度的灰度图像, 取 $a = 0.5$, 邻域 S 的尺寸为 3×3 , $\delta_s(x, y)$ 由高低通滤波器获得, 对应的空间卷积算子为

$$\begin{bmatrix} 0.0113 & 0.0838 & 0.0113 \\ 0.0838 & 0.6193 & 0.0838 \\ 0.0113 & 0.0838 & 0.0113 \end{bmatrix}$$

按第 3 节的校正过程对图像进行处理, 其结果如图 3—5 所示。同时也给出了采用局部直方图均衡化算法的处理结果。

4.2 实验结果分析

1) 对比图 3—5 的 (a) (b), 从视觉效果上可以

看出, 无论原始照度变化大还是小, 经过本文模型校正后, 图像的均匀度均有大的改善, 低照度区域的亮度和对比度明显提高, 其他区域基本不变, 图像的纹理变化对处理结果并无大碍。

2) 从图 3—5 的直方图 (c) (d) 的对比中也可以明显看到: 经过 RC 校正后的图像, 低亮度成分被压缩, 而高亮度部分几乎没有改变, 但图像的亮度分布向高亮度区产生了一定的平移, 使图像的整体亮度增大了。对于数字图像处理来说, 这种整体亮度增大不会影响图像的后续处理。

3) 从图 5 的处理结果来看, 本文算法对图像中的高光区域没有处理, 直方图图 5 (c) (d) 靠近最高亮度 1 处的高光部分几乎没有变动, 这是因为高光区域对应 $R \rightarrow 0$, 相当于 $t \gg \tau$, 此时有 $U = u$ 。要消除图像中的高光部分, 必须采用其他方法, 使用本文模型是无能为力的。

4) 对比图 3—5 的 (e) (f) 可以看到, 经过 RC 校正后再进行局部直方图均衡化处理的图像 (f), 其低亮度区域的细节部分明显优于非校正的图像 (e)。对于纹理复杂的织物图像尤为明显, 如图 4 (e) (f), 而高亮度部分几乎没有改变。

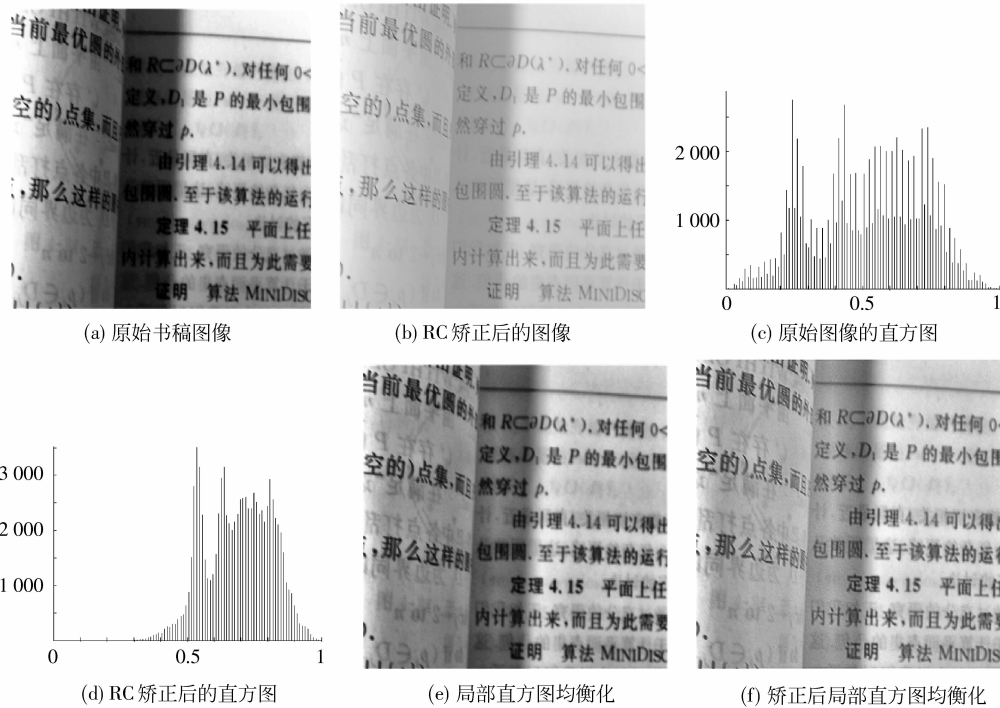


图 3 照度变化较弱的书稿
Fig. 3 Paper of illumination changed weakly

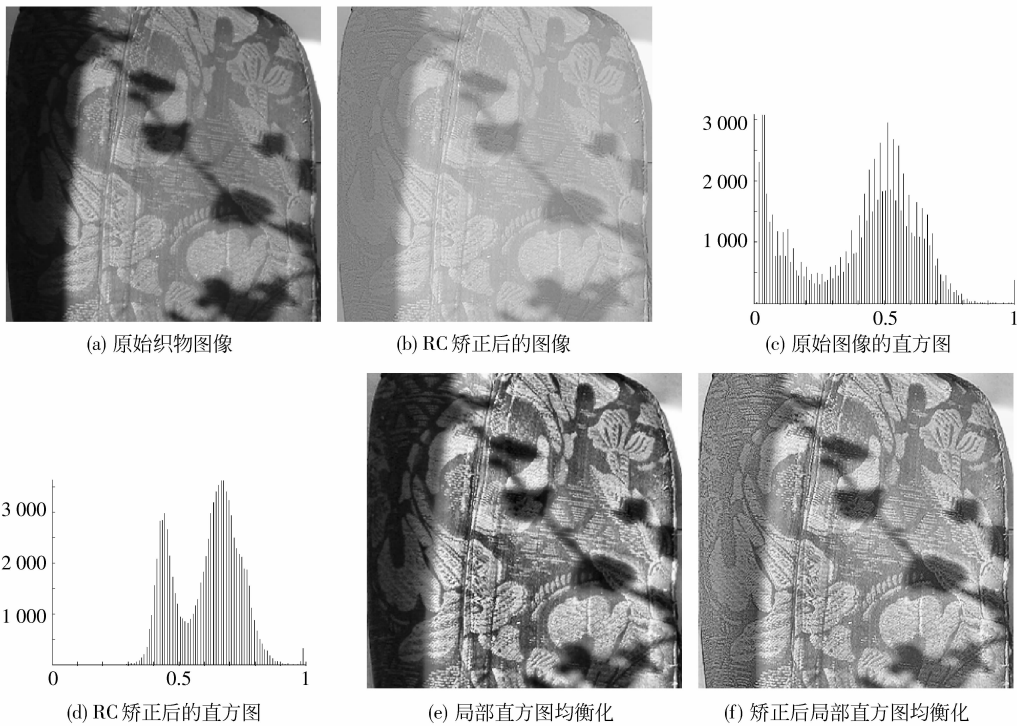


图 4 照度变化强烈的织物
Fig. 4 Drapery of illumination changed intensity

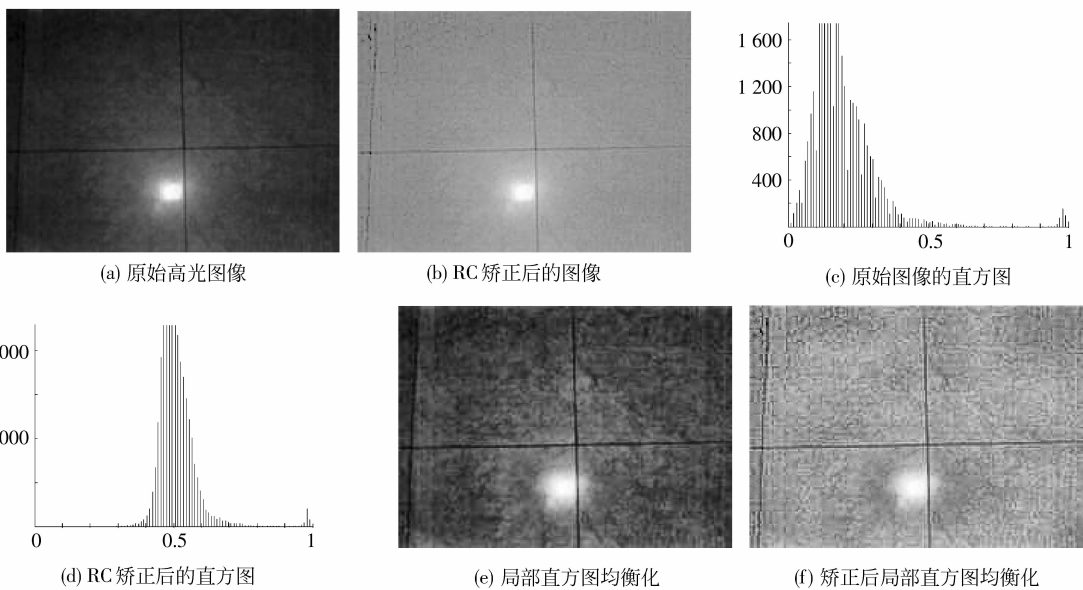


图 5 含有高光的地板
Fig. 5 Floor with high lighting

5)对比图 3—5 的 (b) (f) 可以看到,只经过 RC 矫正后的图像,均匀度均有好转,低照度区域的亮度和对比度明显提高,视觉效果也有所改善。但图像的细节部分并无凸显,还需要再经过局部直方图均

衡化处理方可得到明显改观。这说明,对于非均匀照度的图像,单独使用本文的 RC 矫正还是不够的,还必须再采用其他常规增强算法方可得到较好的效果。

5 结 论

通过构造 CCD 元件的等效电路建立变阻 RC 积分模型,将光照强度对图像的影响分解为对光电势的影响和对光敏电阻的影响。当曝光时间(或称快门时间) $t \gg \tau$ 时,认为光照强度只影响光电势,而对于不满足这一条件的光照强度进行调整,使非均匀照度图像中的低照度部分得以恢复,而正常照度部分和高光部分基本保持。由于当前获得数字图像的传感器不外乎是 CCD 和 CMOS 两类。本文模型完全适合此类设备所获得的图像。但是在数据处理过程中,本文是依据图像本身所包含的信息作增强处理的,不可能复原出由于照度降低而被模糊掉的细节信息。因此本文方法只适合于那些照度变化较小,没有高光,且低照度区域需要增强的图像,对图像中的纹理复杂度并无要求。对于非均匀照度的图像,单独使用本文的 RC 矫正还是不够的,还必须再采用其他常规增强算法方可得到较好地效果。该模型应用于增强非均匀照度图像的常规算法之前,作为前期处理,可收到较好效果。

参考文献 (References)

- [1] Stark J A. Adaptive image contrast enhancement using generalizations of histogram equalization [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9 (5): 889-896.
- [2] Peng Bo, Wang Yiming. Research and implementation of enhancement algorithm for low-illumination image [J]. Computer Applications, 2007, 27(8): 2001-2003. [彭波,王一鸣.低照度图像增强算法的研究与实现[J].计算机应用, 2007, 27(8): 2001-2003.]
- [3] Wang Ping, Zhang Chun, Luo Yingxin. Fast algorithm to enhance contrast of fog-degraded images [J]. Computer Applications, 2006, 26(1): 153-165. [王萍,张春,罗颖昕.一种雾天图像低对比度增强的快速算法[J].计算机应用, 2006, 26(1): 153-165.]
- [4] Russo F. An image enhancement technique combining sharpening and noise reduction [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2002, 51(4): 824-828.
- [5] Land E H. The retinex theory of color vision [J]. Scientific American, 1977, 237(6): 108-129.
- [6] Jobson D J, Rahman Z. A multiscale retinex for bridging the gap between color images and the human observation of scenes [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(7): 965-976.
- [7] Tang Lei, Zhao Chunxia, Wang Hongnan, et al. Shadow removal for road surface images based on an isotropic diffusion retinex [J]. Journal of Image and Graphics, 2008, (13)2: 264-268. [唐磊,赵春霞,王鸿南,等.基于各向异性 Retinex 的路面图像阴影消除[J].中国图象图形学报, 2008, (13)2: 264-268.]
- [8] Wang Yi, Zhang Liangpei. An improved algorithm of an isotropic diffusion smoothing filter [J]. Journal of Image and Graphics, 2006, 11(2): 210-216. [王毅,张良培.各向异性扩散平滑滤波的改进算法[J].中国图象图形学报, 2006, 11(2): 210-216.]
- [9] Qian Weixin, Liu Ruigen. The anisotropic diffusion methods based on the directions of the image feature [J]. Journal of Image and Graphics, 2006, 11(6): 818-822. [钱伟新,刘瑞根.基于图像特征方向各向异性扩散滤波方法[J].中国图象图形学报, 2006, 11(6): 818-822.]
- [10] Yang Jie, Fu Zhongliang, Ruan Bo. Fast and adaptive gray-level correction of uneven illumination image [J]. Computer Applications, 2005, (25)3: 598-602. [杨杰,付忠良,阮波.照度不均匀图像的快速自适应灰度修正[J].计算机应用, 2005, (25)3: 598-602.]
- [11] Bai Tingzhu, Jin Weiqi. Electro-Optical Imaging Theory and Technology [M]. Beijing: Beijing institute of Technology Press, 2006. [白廷柱,金伟其.光电成像原理与技术[M].北京:北京理工大学出版社, 2006.]