

基于各向异性 Retinex 的路面图像阴影消除

唐磊 赵春霞 王鸿南 邵文泽

(南京理工大学计算机科学与技术学院, 南京 210094)

摘要 路面图像中常常存在车辆、树木、建筑物等的阴影, 给图像的特征抽取和识别带来极大的干扰。通过分析中心/环绕 Retinex 算法 (center/surround Retinex, CSR) 以及现有的基于 Retinex 的阴影消除算法处理阴影图像的不足, 提出了一种各向异性中心/环绕 Retinex 算法 (anisotropic diffusion center/surround Retinex, ADCSR), 该算法融入了基于偏微分方程 (PDE) 的各向异性扩散, 并根据算法特点提出了基于“边界性” (edge degree, ED) 的各向异性扩散方案, 避免了梯度门限等参数选择的困难, 在消除阴影的效果上和运算效率上都取得了令人满意的结果。

关键词 路面图像 阴影消除 各向异性 Retinex 偏微分方程

中图分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2008)02-0264-05

Shadow Removal for Road Surface Images Based on Anisotropic Diffusion Retinex

TANG Lei ZHAO Chun-xia WANG Hong-nan SHAO Wen-ze

(Department of Computer Science, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094)

Abstract There are sometimes shadows, such as cars, trees and buildings, on road surface images, which make it difficult to abstract and recognize the features. After analyzing the shortages of Center/Surround Retinex (CSR) algorithm and shadow removal approaches based on Retinex in existence, an Anisotropic Diffusion Center/Surround Retinex (ADCSR) is presented to solve the problem. First anisotropic diffusion based on PDE is introduced to ADCSR, further a new anisotropic diffusion scheme based on “Edge Degree” (ED) is presented, which avoids the embarrassment to select different parameters such as gradient threshold. Theoretic analysis and experimental results show that the effectiveness of the approach.

Keywords road surface image, shadow removal, anisotropic diffusion, Retinex, PDE

1 引言

路面病害的自动检测是道路养护事业中的一个重要课题。目前的自动检测主要是通过图像采集系统采集路面图像并对图像进行特征抽取和识别来实现。但路面图像中往往会存在车辆、树木、建筑物等的阴影, 这些阴影对病害检测和分割带来极大的干扰。因此, 设计有效的算法消除图像中的阴影是很

有必要的。

Retinex 理论是由 Land 于 20 世纪 70 年代提出的一种基于颜色恒常知觉的计算理论^[1], 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^[2]。通过对图像进行光照补偿, 可以平衡图像的整体灰度, 获取图像中较暗区域的细节, 同时也能保持原有较亮区域的细节。但 Retinex 理论假设空间的照度变化是缓慢的, 当图像中出现阴影时, 由于在阴影边界处照度急剧变化,

基金项目: 江苏省自然科学基金项目 (BK2004130)

收稿日期: 2006-03-23 改回日期: 2006-09-29

第一作者简介: 唐磊 (1981~), 男, 现为南京理工大学计算机系模式识别与人工智能专业博士研究生。主要研究方向为数字图像处理、智能机器人、组合导航与控制等。E-mail: tang_lei2008@163.com

Retinex 算法将导致阴影边界附近模糊, 算法失效。通过对图像的遍历并对不同亮度区域设定不同权值, Retinex 算法可以对阴影的消除取得一定效果^[3,4]。但该方法复杂度过高, 不适合数据量庞大的路面图像的处理。

中心环绕 Retinex 算法 (center/surround Retinex, CSR) 是 Retinex 理论的最新实现形式, 它计算简单, 而且关键参数容易设置, 目前得到越来越广泛的应用。本文通过深入分析 CSR 算法, 指出了其无法消除阴影的问题所在, 并针对阴影的消除设计了各向异性中心环绕 Retinex 算法 (anisotropic diffusion center/surround Retinex, ADCSR)。ADCSR 将基于偏微分方程 (PDE) 的各向异性扩散融入 Retinex 算法中, 并提出了适合算法特点的基于“边界性” (edge degree, ED) 的各向异性扩散方案, 避免了梯度门限等参数选择的困难。ADCSR 算法拓展了 Retinex 理论的适用范围, 在消除阴影的效果和运算效率上都取得了令人满意的结果。

2 Retinex 算法

2.1 中心环绕 Retinex 算法及其局限性

Retinex 理论认为, 人眼视觉系统在光照条件变化下仍然能够对场景中每一点的亮度有稳定的感知能力, 是因为人眼对物体亮度的感知不仅由物体所受到的光照强度决定, 还取决于物体本身的反射系数。根据该理论, 一幅图像 I 可以用下式表示:

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

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,

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

Retinex 算法的主要目的就是 1 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 算法表示式为 (以单通道图像为例):

$$R(x, y) = \log I(x, y) - \log \{k \cdot [F(x, y) * I(x, y)]\} \quad (3)$$

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, 其中, $*$ 表示卷积运算, $F(x, y)$ 是环绕高斯函数, 其解析式为

$$F(x, y) = e^{-r^2/c^2}, r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (4)$$

c 为常数, 表示环绕高斯函数的尺度。 s 为归一化常数

$$s = \frac{1}{\iint (x, y) dx dy} \quad (5)$$

从式 (3) 可以看出, CSR 算法大致可分为以下 3 步:

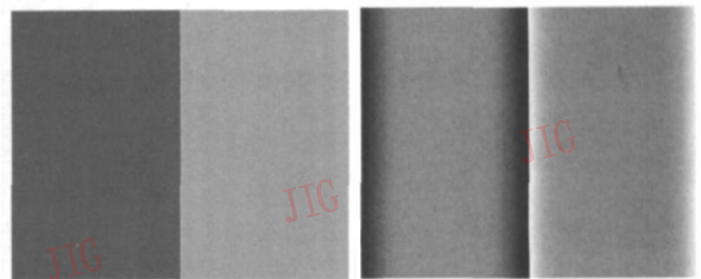
(1) 以 $s \cdot F(x, y) * I(x, y)$ 项模拟计算图像的全局照度分布。

(2) 将原图像与全局照度分布变换到 \log 域, 将乘除法运算转换为加减运算。

(3) 在 \log 域中将原图像减去全局照度分布, 输出原图像在 \log 域中的反射系数, 图像的光照效果被去除。

其中第 1 步为算法的关键步骤, 它假设全局照度是缓慢变化的, 因此全局照度是图像中的低频部分, 并可以通过对原图像进行高低通滤波来模拟。

CSR 算法可以实现图像动态范围的压缩, 有效地消除图像中不均匀光照效果的影响, 但该算法在图像中包含阴影时失效。其原因在于阴影的存在使得“空间照度是缓慢变化”的假设不成立。体现在算法上的缺陷则是 CSR 算法在模拟计算图像的全局照度分布时, 所采用的高斯卷积核是一种各向同性的, 而且为防止结果图像颜色的失真, 要求采用的卷积核尺度较大。当尺度较大的卷积核通过明暗变化剧烈的阴影边界时, 将会严重模糊阴影的边界, 导致模拟全局照度分布失败, 最后将导致输出图像的阴影边界附近出现“光晕”现象, 阴影边界附近的细节也被丢失。



(a) 原图像 (b) 处理后含光晕的图像

图 1 CSR 算法的不足

Fig 1 The drawback of CSR

2.2 各向异性中心环绕 Retinex 算法

Koenderink 和 Hummel 指出, 求图像 I_0 和高斯核 G 的卷积相当于求解如下的标准热传导方程^[5,6]:

$$\begin{cases} \frac{\partial I}{\partial t} = \Delta I \\ I|_{t=0} = I_0 \end{cases} \quad (6)$$

因此通过迭代求解方程式 (6) 可以获得图像的低频部分, 可以用来模拟图像的全局照度分布 (等价于式 (3) 中 $s \cdot F(x, y) * I(x, y)$ 项)。

方程式 (6) 是一种各向同性算法, 没有考虑图像的特征区域 (如边界、角点等), 因而采用该方程直接计算图像的全局照度分布同样会模糊阴影的边界, 无法准确地模拟出全局照度。因此需要设计一种各向异性中心环绕 Retinex 算法, 在计算图像的全局照度分布时对边界采取不同的控制策略, 完好地保留图像中的边界, 这样才能真实地获取含有阴影的图像的照度分布。在计算得到准确的照度分布后, 通过从原图像中减去照度分布, 消除光照对图像的影响, 就能获得图像的本来面貌, 阴影得到了消除。

3 基于热传导方程的各向异性扩散

1990年, Perona 和 Malik 提出了标准的非线性热传导方程^[7]:

$$\begin{cases} \frac{\partial I}{\partial t} = \nabla \cdot [g(|\nabla I|) \nabla I] \\ I|_{t=0} = I_0 \end{cases} \quad (7)$$

式中, I_0 表示原始图像, $g(x)$ 表示扩散函数, 常用的形式有 $g(x) = \exp(-(x/f)^2)$ 和 $g(x) = 1/(1+(x/f)^2)$ 两种, 其中 f 是梯度门限。由于 $g(x)$ 为 x 的减函数, 因此方程式 (7) 在梯度较大的边缘处扩散较慢, 可以较好地保持图像的边缘。

由于在噪声环境下梯度函数对噪声的敏感性容易导致方程是病态的, 因此 Perona-Malik 方程的适定性不强。1992年, Catta 等人把方程修改为^[8]

$$\begin{cases} \frac{\partial I}{\partial t} = \nabla \cdot [g(|\nabla G_0 * I|) \nabla I] \\ I|_{t=0} = I_0 \end{cases} \quad (8)$$

与方程式 (7) 相比, 方程式 (8) 首先通过对图像进行卷积平滑, 在空域实现了对方程的正则化, 在一定程度上解决了方程解的适定性问题和方程的病态问题。

针对以上基本方程, 此后又有许多学者致力于对扩散模型、扩散函数等进行不同程度的改进^[9-10], 但这些方法均面临着梯度门限等关键参

数选取困难的问题。本文将提出新的基于非线性热传导方程的各向异性扩散方案, 该方案充分利用了算法特点, 定义了新的扩散函数, 避免了梯度门限等参数选择的困难, 而且在边界保持上取得了良好的效果。

4 基于各向异性 Retinex 的阴影消除

4.1 阴影检测

由于路面灰度比较均匀, 因此含有阴影的路面图像大致可分为阴影和非阴影两大块, 而且两块之间的明暗对比很明显, 因此可以采用基于阈值分割的方法来检测阴影。设

$$\begin{aligned} n_1 &= \sum_{i=0}^T H(i) \\ n_2 &= \sum_{i=T+1}^{255} H(i) \end{aligned} \quad (9)$$

式中, T 为采用 Otsu 方法计算的图像阈值^[11], $H(i)$ 表示第 i 级灰度的像素个数, 则 n_1 可以近似代表较暗区域的面积。假设阴影区域的面积不太小, 设定阴影面积的阈值 T_{shadow} (一般取为图像面积的 1/4), 当 $n_1 \geq T_{\text{shadow}}$ 时认为图像中含有阴影。在不同的环境和不同的光照条件下, 阴影的强度也不完全一致。设

$$\begin{aligned} G_{\text{dark}} &= \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^T i \cdot H(i) \\ G_{\text{bright}} &= \frac{1}{n_2} \sum_{i=T+1}^{255} i \cdot H(i) \end{aligned} \quad (10)$$

则 G_{dark} 和 G_{bright} 分别代表阴影区域和非阴影区域的平均明暗程度。令

$$k = G_{\text{bright}} - G_{\text{dark}} \quad (11)$$

则 k 可以表示图像中阴影区域和非阴影区域的明暗对比强度。

4.2 边界性测度

传统的基于非线性热传导方程的各向异性扩散算子目的在于保持图像中的边界以及细节, 而全局照度的目的只在于反映图像整体明暗的变化趋势, 不关心图像的细节。从而用来模拟图像全局照度的扩散算子注重保持图像陡峭的边界, 而对于图像中的一些纹理细节则不需保持。基于此, 需要定义一个合适的算子来度量图像中各点的边界性 (edge degree, ED), 并设计一个以边界性测度作为影响扩散速率重要因素的各向异性扩散方案。

结合路面图像分块均匀的特点, 用 P 表示图像中各点的边界性, 定义 (x, y) 的 ED 为

$$P(x, y) = \left| \frac{1}{(2d + 1)^2} \sum_{n=y-d}^{n=y+d} \sum_{m=x-d}^{m=x+d} (I(m, n) - M(x, y))^2 \right|^{1/2} \quad (12)$$

式中, d 表示分析窗口尺度, $M(x, y)$ 表示局部均值, 其计算公式为

$$M(x, y) = \frac{1}{(2d + 1)^2} \sum_{n=y-d}^{n=y+d} \sum_{m=x-d}^{m=x+d} I(m, n) \quad (13)$$

由于过大的 d 导致运算量增大, 而过小的 d 不能准确反映图像的局部特性, 一般取 $d = 4$ 。 P 实质上反映了图像局部方差大小。在区域的内部, 灰度变化平缓, $P(x, y)$ 值较小; 当分析窗口跨越边界时, 灰度变化强烈, $P(x, y)$ 取得较大值, 从而 P 的表达式合理。但在图像噪声较强的区域, P 也可能取得较大值。因此在计算 P 之前, 对图像进行一次小尺度的高斯平滑, 以消除噪声带来的不良影响, 同时也能增强方程解的适定性^[9]。

4.3 基于 ED 的各向异性扩散

用 I, L 分别表示原图像和照度图像, 定义求 L 的各向异性扩散方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial t} = \nabla \cdot [g(p, |\nabla L|) \nabla L] \\ L|_{t=0} = I \end{cases} \quad (14)$$

式中,

$$g(p, |\nabla L|) = \exp \left\{ - \left| \frac{\beta \cdot |\nabla L|}{k^2} \right| \right\} \quad (15)$$

k 为式 (11) 定义明暗对比强度。从扩散函数 g 的表达式可以看出, g 关于 P 和 $|\nabla L|$ 均单调递减, 且 P 成为影响扩散速率的主要因素。在区域内部, 灰度变化平缓, P 较小, g 较大, 扩散速率较快; 在图像的边界附近, P 较大, g 较小, 扩散速率较慢, 有利于保持图像的边界。同时与 Perona-Malik 方程定义的扩散函数相比, 梯度对扩散速率的影响被大大削弱 (由平方项变为一次项), 图像中的一些细节可以很好地被平滑, 符合全局照度的特点。同时考虑到当对比强度较大, 即使分析窗口只有一小部分跨越边界, P 也有可能取得较大值, 导致扩散减速过早, k^{-2} 项可以对这种情况起到自适应调整的作用, 使扩散速率保持一个理想速率。同时该扩散函数不需再进行梯度门限等参数的选择, 具有很好的通用性。

综上所述, 本文设计的各向异性 Retinex 算法框

图如图 2 所示。

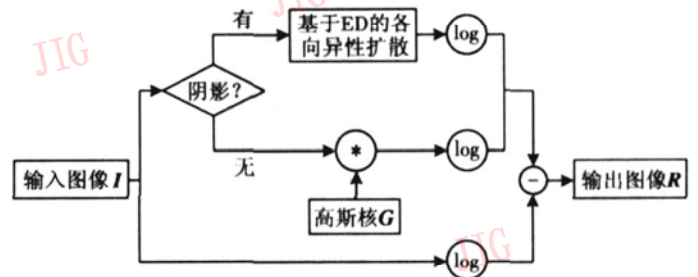


图 2 ADCSR 算法结构框图

Fig 2 The framework of ADCSR

5 实验结果及分析

为验证 ADCSR 算法的有效性, 采用 N-1 型智能路面检测车实际采集的路面图像, 在 Pentium IV 2.8GHZ 微机, Windows 2000 操作系统及 Matlab6.5 软件平台下进行了仿真实验, 并与 CSR 的实验结果进行对比。ADCSR 算法中采用 Perona-Malik 离散迭代格式^[7], 迭代 50 次; CSR 算法中采用高斯核尺度为 60。

两组实验的实验结果如图 3 所示。原始图像大小为 380×370 (图 3(a)), 且含有一块较大的阴影。CSR 算法所得的照度图像在阴影边界处被模糊 (图 3(b)), 导致输出图像中阴影边界处存在明显的光晕, 细节被模糊 (图 3(c)), 采用 ADCSR 算法所得照度图像中边界保持良好 (图 3(d)) 结果图像中光晕现象消除, 边界处的细节保留完好 (图 3(e))。

在算法效率上, ADCSR 算法在计算照度图像时需要进行方程的离散迭代求解, 而且为防止图像失真, 迭代次数不能太少 (≥ 50), 因此在时间耗费上要略多于 CSR 算法, 但优于模糊 Retinex 算法^[5]。其中, CSR 算法中的卷积运算采用快速傅里叶变换 (FFT) 进行了优化。采用模糊 Retinex 算法、CSR 算法和 ADCSR 算法处理图像 1 (第 1 组实验原始图像)、图像 2 (第 2 组实验原始图像) 的平均时间如表 1 所示。

表 1 不同算法的效率对比

Tab 1 Efficiency comparison for different algorithms 单位: s

	图像 1	图像 2
模糊 Retinex	97.73	95.56
CSR	11.14	12.07
ADCSR	17.89	17.47

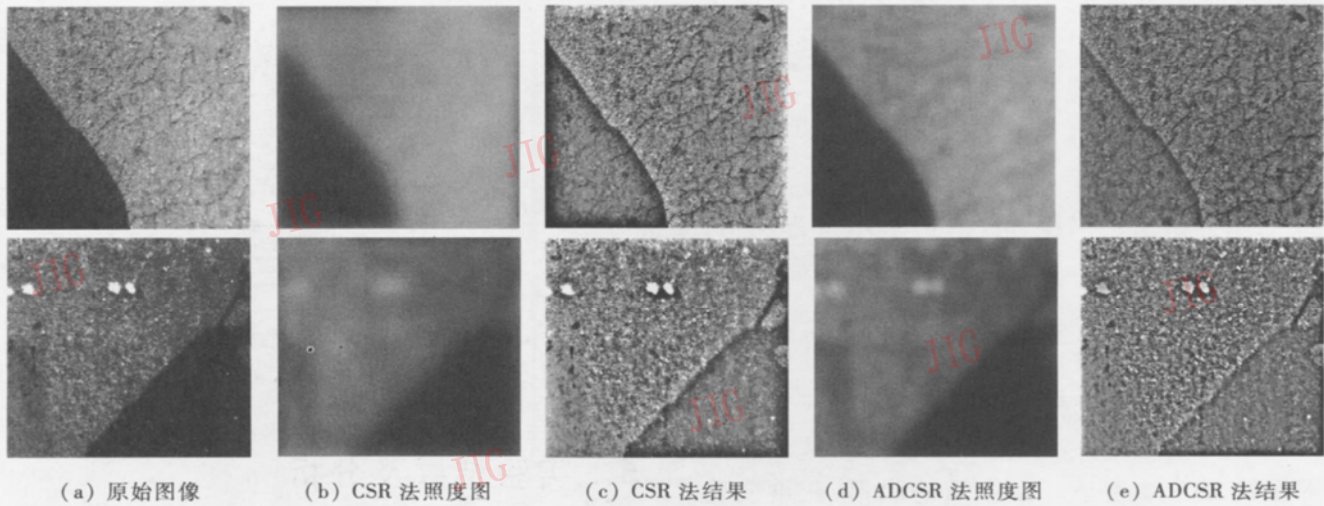


图 3 ADCSR 算法和 CSR 算法的结果对比

Fig. 3 Comparison of the results between ADCSR and CSR

6 结 论

从以上实验结果中可以看出, ADCSR 算法在保持图像边界细节、平衡图像的整体灰度等方面都优于 CSR 算法。在运算速度上, 由于 ADCSR 算法需要进行迭代运算, 在效率上略有下降, 但由于路面图像的处理往往是离线进行, ADCSR 算法的效率仍然令人满意。与传统的灰度校正算法相比, ADCSR 算法不需对阴影区域进行定位, 不需过多进行人为干预, 需要设置的参数少, 因而具有很好的通用性。

采用 ADCSR 算法消除阴影后, 阴影区域和非阴影区域并不协调, 这是由于阴影使得图像细节信息退化严重, 导致阴影区域的纹理细节不如非阴影区域的丰富。如何根据正常路面的纹理特征, 采用合适的图像修补算法, 修补阴影区域丢失的纹理细节, 使图像整体更加协调、一致, 是下一阶段需要研究的一个课题。

ADCSR 算法中原图像和照度图像均被变换到 \log 域, 有效地增强了图像中低灰度区域的细节, 如图 3(e) 所示, 原图像中模糊的裂缝能清晰地体现出来。但是, \log 变换使得图像中的噪声也得到了增强, 而且由于参数选择不恰当, 可能导致整体图像的过增强, 导致图像失真。对输出图像进行合适的非线性变换, 以抑制噪声的增强以及过增强现象的发生, 也将是下阶段的一个研究课题。

参考文献 (References)

1 Edw in H. The Retinex theory of color vision [J]. Scientific American, 1977, 237(6): 108~ 129

- 2 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
- 3 Finlayson G D, Hordley S D, Drew M S. Removing shadows from images using retinex [A]. In: Proceedings of IS&T / SID Tenth Color Imaging Conference: Color Science, Systems and Applications [C], Scottsdale, Arizona, 2002, 73~ 79
- 4 Tang Liang, Xie Weixin. Removing shadows from urban aerial images based on fuzzy Retinex [J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(3): 500~ 503 [唐亮, 谢维信. 城市航空影像中基于模糊 Retinex 的阴影消除 [J]. 电子学报, 2005, 33(3): 500~ 503]
- 5 Koenderink J. The structure of images [J]. Biological Cybernetics, 1984, 50(3): 363~ 370
- 6 Hummel A. Representations based on zero-crossings in scale-space [A]. In: Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C], Miami Beach, FL, USA, 1986, 204~ 209
- 7 Perona P, Malik J. Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1990, 12(7): 629~ 639
- 8 Catte F, Lioss P L, Morel J M, et al. Image selective smoothing and edge detection by nonlinear diffusion [J]. SIAM Journal of Numerical Analysis, 1992, 29(2): 182~ 193
- 9 Wang Y J, Zhang Liang-pei. 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]
- 10 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. 基于图像特征方向的各向异性扩散滤波方法 [J]. 中国图象图形学报, 2006, 11(6): 818~ 822]
- 11 Otsu N. A threshold selection method from a gray level histogram [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979, 9(1): 62~ 66