

文章编号:1001-9081(2006)07-1611-03

基于鲁棒估计的 Retinex 图像增强方法

王晓莉¹, 文 华², 罗予频¹

(1. 清华大学 自动化系, 北京 100084; 2. 长沙理工大学 设计艺术学院, 湖南 长沙 510015)

(wangxiaoli00@mails.tsinghua.edu.cn)

摘 要:针对原变分 Retinex 方法的人工伪影问题,指出理想重建光照应该具有分区域恒常的特性,提出一种以阴影边界作为出格点、基于鲁棒估计的变分 Retinex 图像增强方法。用合成图像与实际图像进行实验表明,本改进方法不仅可以有效压缩图像动态范围,显示淹没在阴影区域的细节,而且解决了原 Retinex 方法的伪影和扭曲等问题。

关键词:Retinex 方法;鲁棒估计;变分方法;动态范围压缩

中图分类号:TP391.41 **文献标识码:**A

Retinex image enhancement method based on robust estimation

WANG Xiao-li¹, WEN Hua², LUO Yu-pin¹

(1. Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Institute of Design Art, Changsha University of Science and Technology, Changsha Hunan 510015, China)

Abstract: Because of failing to reconstruct piecewise constant illumination, variation Retinex method suffers from artificial halos and color distortion. A Retinex method based on robust estimation was proposed, which took shadow edges as outliers and smoothed range by range. Application of method to synthetic image and natural image proves that the improved method preserves high dynamic range compression and avoids halo effect and color distortion.

Key words: Retinex; robust estimation; variation method; dynamic range compression

0 引言

Retinex 理论^[1,2]是 Land 于 20 世纪 60 年代末提出的基于人类视觉感知的图像处理方法。Retinex 增强处理可以改善图像颜色恒常性,压缩图像动态范围,提高对比度,有效显示淹没在阴影区域中的细节,因而在医学图像,航拍图像等图像增强处理中有着广泛的应用^[3,4]。

Retinex 理论的基本假设是原始图像 S 是光照图像 L 和反射率图像 R 的乘积。在 Retinex 处理中,通常会利用对数变换将乘积关系转换为求和关系,即 $s = \log(L) + \log(R) = l + r$ 。实验表明,视觉具有颜色和亮度的恒常性,就是说人眼最终观察的图像几乎不受环境光照的影响,反射率图像 r 才反映物体的本质属性。具体进行图像分解时,由于环境光照具有在一定范围内保持恒定的性质,所以可以借助平均或平滑等方式求解。因而,要得到反射图像 r ,一般需要先估计光照图像 l ,然后利用原始图像 s 与光照图像 l 的差获得。所以怎样从原始图像中分离光照图像是 Retinex 方法的根本问题。

文献[2,5]提出用一条或多条路径上像素的平均值作为光照图像的路径 Retinex 方法,文献[6~8]提出使用同态滤波器、高斯滤波器等求原始图像的低频成分作为光照图像的滤波器 Retinex 方法。通过路径估计光照的 Retinex 方法的结果对于路径的选择依赖性强,效率低;使用滤波器估计光照的 Retinex 方法提高了处理速度,但往往存在光晕伪影。Kimmel^[9]提出在变分框架下的 Retinex 方法,在保证良好的动态范围压缩前提下将以前的各种 Retinex 方法规范成统一

的变分形式。

但是,Kimmel 变分 Retinex 方法对很多高动态范围图像的处理结果存在缺陷。当原始图像同时存在对比强烈的阴影和非阴影区域时,虽然在阴影区域和非阴影区域的内部,光照强度缓慢变化,可是在阴影边界附近,光照强度存在明显差异。对于这类图像,光照图像是分片恒常的^[10]。但是,Kimmel 变分 Retinex 方法重建的光照图像是通过全局平滑得到的,所以,原变分 Retinex 方法处理后,阴影边界附近被严重模糊,产生光晕伪影。另外,反射率图像重建也依赖于光照图像,光照图像伪影区域对应的反射率图像的细节或颜色也往往发生扭曲,从而最终影响 Retinex 方法处理效果。

由于鲁棒估计可以得到不受“出格点”影响的估计结果,所以本文使用鲁棒估计的方法把阴影边界的像素作为出格点进行分区域平滑,从而得到分片光滑的光照图像,解决了以上存在的问题。

1 变分 Retinex 方法

1.1 变分模型

Kimmel^[7]提出变分 Retinex 方法的数学表达为:

$$\min_l F[l] = \int_{\Omega} |\nabla l|^2 + \alpha |l - s|^2 + \beta |\nabla(l - s)|^2, \quad \text{s. t. } l \geq s \quad (1)$$

其中, s 表示原始图像, l 表示光照图像, Ω 表示图像空间, α, β 是惩罚因子。限制条件 $l \geq s$ 使光照图像是原始图像的紧密上包络,包络与原始图像的差异是反射率图像。 $|l - s|^2$ 被

收稿日期:2006-01-19;修订日期:2006-03-06

作者简介:王晓莉(1981-),女,陕西靖边人,硕士研究生,主要研究方向:图像处理; 文华(1960-),男,湖南醴陵人,讲师,硕士,主要研究方向:图像处理、工艺美术设计; 罗予频(1959-),男,湖南湘潭人,教授、博士生导师,博士,主要研究方向:图像处理、模式识别。

称作保真项,防止平滑结果 l 收敛为常数。 $|\nabla(l-s)|^2$ 是保证反射图像连续的正则项。由于一般 α 和 β 都很小, l 的估计值主要依赖于最小化 $|\nabla l|^2$ 的结果。

1.2 鲁棒估计

Huber 于 1981 年提出鲁棒估计的思想,用于参数统计模型估计^[11]。传统的参数统计模型都有一定的统计假设。但是实际上,测量数据不可能完全满足统计假设。那些不满足假设的数据被称为“出格点”。鲁棒估计通过设计一个误差准则函数 $\rho(x)$ 来减小或排除“出格点”造成的统计误差。

如果测量数据表示的是连续曲线或曲面,当用其梯度作为误差准则函数的自变量时,利用鲁棒估计方法可以进行图像平滑,其数学表达的形式为:

$$\min_l F[l] = \int_{\Omega} \rho(|\nabla l|) d\Omega \quad (2)$$

使用梯度下降法得:

$$\frac{\partial l}{\partial t} = \text{div} \left[\phi(|\nabla l|) \frac{\nabla l}{|\nabla l|} \right] \quad (3)$$

其中 $\phi(\cdot) = \rho'(\cdot)$, Hample 等人定义其为影响函数,大小反应了相应测量数据对估计结果的影响。

变分 Retinex 方法((1)式)中, $\rho(l) = |\nabla l|^2$,称为最小二乘算子,主要决定 Retinex 光照估计结果。则最小二乘算子的影响函数是 $\phi(l) = 2|\nabla l|$,该影响函数是线性、无界的(图1)。

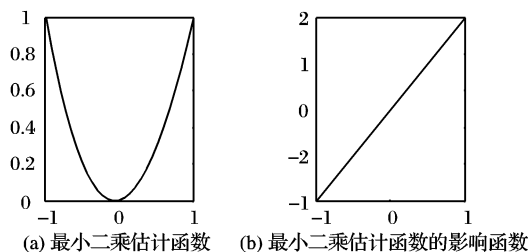


图1 最小二乘估计函数及其影响函数

在图像空间 Ω 中,阴影和非阴影区域交界处 $|\nabla l|^2$ 很大,这些像素的亮度远远偏离了局部区域的平滑量,是平滑操作中的“出格点”,应当排除其对平滑结果的影响。但是对于最小二乘算子,“出格点”对应的影响函数的值却非常大,导致边界区域的平滑作用反而更强烈,从而使亮度阶跃的光照图像变成亮度渐变的光照图像(图2)。

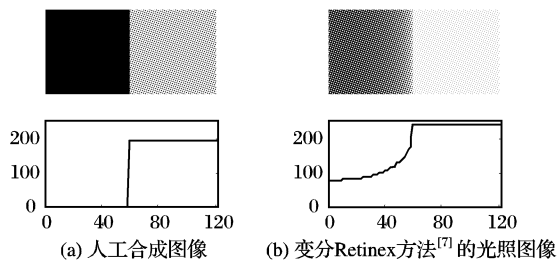


图2 原变分 Retinex 方法产生光晕伪影

所以,当图像同时存在阴影和非阴影区域时,在不同亮度区域的内部进行平滑才能得到实际的分片光滑的光照图像。本文以阴影边界为出格点、以分区域平滑的鲁棒估计函数 $\rho(x)$ 来进行 Retinex 光照估计。

2 鲁棒 Retinex 方法

我们利用各向异性扩散的边界终止函数得到以边界为出格点的鲁棒估计准则函数。

Perona 和 Malik^[12]提出的各向异性扩散方法对于图像边界具有很好的识别保留能力,作为图像处理工具已经成功运用于图像分割、边缘检测等方面。各向异性扩散表达式为:

$$\frac{\partial l}{\partial t} = \text{div} [g(|\nabla l|) \nabla l] \quad (4)$$

其中 $g(\cdot)$ 是边界终止函数,具有分片平滑的性质。

比较(3),(4)式,鲁棒估计的准则函数 ρ 和各向异性扩散的边界终止函数 g 之间存在关系:

$$\rho(|\nabla l|) = \int g(|\nabla l|) \cdot |\nabla l| \quad (5)$$

利用(5)式关系,采用 Perona 和 Malik^[10]各向异性扩散边界终止函数:

$$g(|\nabla l|) = \frac{1}{1 + \frac{|\nabla l|^2}{K^2}} \quad (6)$$

得到以阴影边界作为出格点的鲁棒估计表达:

$$\rho(|\nabla l|) = \frac{1}{2} K^2 \log \left(1 + \frac{|\nabla l|^2}{K^2} \right) \quad (7)$$

其影响函数为:

$$\phi(|\nabla l|) = \frac{2|\nabla l|}{2 + \frac{|\nabla l|^2}{K^2}} \quad (8)$$

图3中,鲁棒估计算子 ρ 在梯度很大时,增大程度小于最小二乘算子;影响函数 ϕ 有界;当估计像素处于阴影边界时,梯度很大,对应鲁棒算子的影响函数 ϕ 衰减趋近于零。因而,在鲁棒算子作用下,阴影边界区域的像素作为鲁棒估计的“出格点”不会影响平滑结果。从而,利用各项异性扩散函数得到的鲁棒估计准则函数重建的光照图像是分片光滑的。

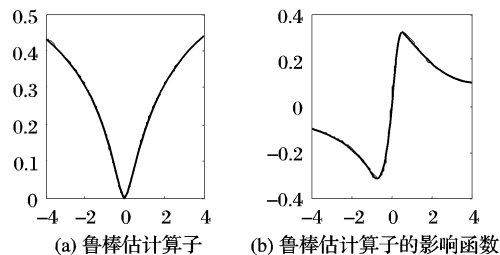


图3 鲁棒估计算子及其影响函数

所以,最终的对阴影边界具有抵抗性的鲁棒各向异性扩散的光照估计表达式为:

$$\begin{cases} \min_l F[l] = \int_{\Omega} \rho(|\nabla l|) + \alpha |l-s|^2 + \beta |\nabla(l-s)|^2 d\Omega, \\ \text{s.t. } l \geq s \\ \rho(|\nabla l|) = \frac{1}{2} K^2 \log \left(1 + \frac{|\nabla l|^2}{K^2} \right) \end{cases} \quad (9)$$

对于医学图像处理,Retinex 输出结果是反射率图像。但是,对自然图片进行 Retinex 增强处理时,为了视觉感受的舒适,一般把光照图像进行 Gamma 校正后再引回到处理结果中,最终 Retinex 输出图像是:

$$S' = R' \cdot L^{1/\gamma} \quad (10)$$

其中, S' 是最终 Retinex 增强输出的结果; L 是从对数域变换回空间域的估计光照图像; R 是从对数域变换回空间域的反射图像, 可以进一步对其进行抑制噪声等处理得到 R' 。

3 实验结果与比较

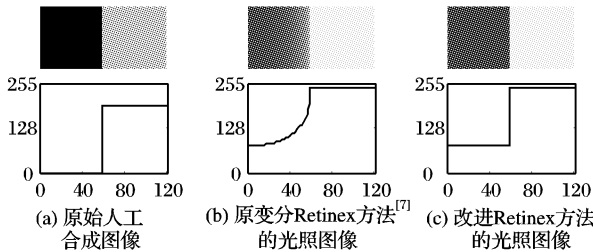
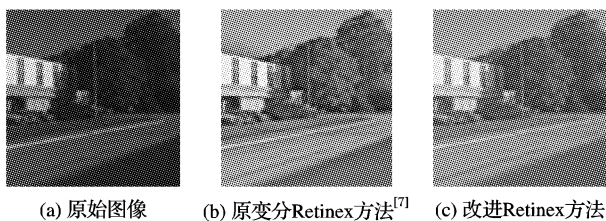
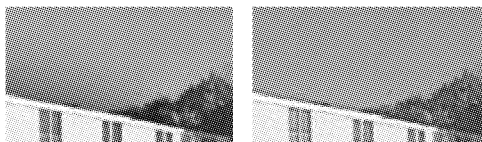


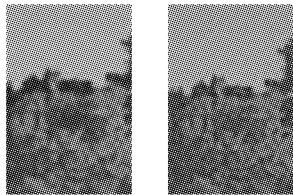
图4 改进方法消除光晕伪影 (Gamma 校正值 γ 均为 5)



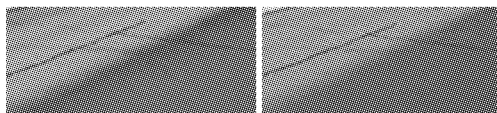
(a) 原始图像 (b) 原变分 Retinex 方法^[7] (c) 改进 Retinex 方法



(d) 屋顶光晕伪影消除



(e) 树木颜色扭曲消除



(f) 阴影区域边界光晕伪影消除

图5 原变分 Retinex 方法与改进 Retinex 方法比较 (Gamma 校正值 γ 均为 3)

我们分别使用合成图像和实际图像进行实验, 比较原变分 Retinex 方法和鲁棒的 Retinex 方法重建的光照图像以及增强处理的效果。实验中, 鲁棒估计 Retinex 的参数 K 均取 2 (在梯度为 250 附近影响函数趋近于 0)。

图4 是人工合成图像, 该图像包含黑色和灰色两个亮度区域, 原变分 Retinex 重建的光照图像边界模糊, 出现亮度渐变区域; 改进方法的光照图像仍然是阶跃光照, 消除了边界问题。图5 是一幅曝光不足的大动态范围图像, 有尖锐的阴影边界。利用 Retinex 增强处理可以压缩图像动态范围, 显示淹

没在黑暗中的细节, 解决曝光不足的问题。但是, 原变分 Retinex 增强处理后屋顶出现光晕, 树顶颜色发生扭曲, 阴影边界突兀 (图 5(b), (d) ~ (f))。而我们的改进 Retinex 方法的边界区域没有出现光晕和扭曲, 效果明显优于原变分 Retinex 增强算法 (图 5(c) ~ (f))。

4 结语

本文提出了一种基于鲁棒估计的变分 Retinex 方法, 用分区域平滑方法代替全局平滑方法, 能够解决同时存在阴影和非阴影区域的大动态范围图像在 Retinex 增强处理后产生的光晕伪影和颜色扭曲等问题。在我们的改进方法中, 利用各项异性扩散的边界终止函数得到对不同光照区域边界具有鲁棒性的鲁棒估计准则函数, 从而使重建的光照图像具备分片光滑的性质, 在保证 Retinex 方法压缩动态范围显示细节的特点的同时, 避免出现亮度伪影和颜色扭曲现象。

参考文献:

- [1] LAND EH. The retinex theory of color vision[J]. Scientific American, 1977, 237(6): 108 - 128.
- [2] LAND EH. An alternative technique for the computation of the designator in the retinex theory of color vision[A]. Proceeding of the National Academy of Science[C]. USA, 1986, 83: 3078 - 3080.
- [3] 唐亮, 谢维信, 黄建军, 等. 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).
- [4] 周旋, 周树道, 黄峰, 等. 基于小波变换的图像增强新算法[J]. 计算机应用, 2005, 25(3).
- [5] FUNT B, CIUREA F, MCCANN J. Retinex in MATLAB[J]. Journal of Electronic Imaging, 2004, 13(1): 48 - 57.
- [6] JOBSON DJ, RAHMAN Z, WOODDELL GA. Properties and performance of a center/surround retinex[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(3): 451 - 462.
- [7] JOBSON DJ, RAHMAN Z, WOODDELL GA. 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.
- [8] KIMMEL R, SOCHEN N, WEICKERT J. Retinex by Two Bilateral Filters[A]. Scale Space and PDE Methods in Computer Vision: 5th International Conference Scale-Space[C], 2005, 3459.
- [9] KIMMEL R, ELAD M, SHAKED D, et al. A variational framework for Retinex[J]. International Journal of Computer Vision, 2003, 52(1): 7 - 23.
- [10] DICARLO JM, WANDELL BA. Rendering high dynamic range images[A]. Proceeding of SPIE[C], 2000, 3965: 392 - 401.
- [11] MEER P, MINTZ D, ROSENFELD A. Robust Regression Methods for Computer Vision: A Review[J]. International Journal of Computer Vision, 1991, 6(1): 59 - 70.
- [12] 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.

(上接第 1604 页)

- [10] KEGL B, KRZYSAK A. Piecewise linear skeletonization using principal curves[J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(1): 59 - 74.
- [11] LIN H, ANIL KJ, PANKANTI S, et al. Fingerprint enhancement[A]. Proceedings of the 3rd IEEE Workshop on Applications of Computer Vision[C]. Sarasota, Florida, USA, 1996. 202 - 207.
- [12] LIN H, WAN Y-F, ANIL KJ. Fingerprint image enhancement: algorithm and performance evaluation[J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(8): 777 - 789.
- [13] 廖振伟, 史天元, 张崑宗. 细化演算法比较[J]. 地籍测量, 2001, 20(3): 1 - 18.