

基于 Retinex 的图像阴影恢复技术的研究与实现^{*}

王潇潇, 孙永荣, 张 翼, 刘晓俊

(南京航空航天大学 自动化学院 导航研究中心, 南京 210016)

摘 要: 针对阴影部分细节恢复的 Retinex 模型, 提出了一种将多尺度 Retinex 算法与泰勒拉伸相结合的新型算法。算法中采用高斯滤波无限脉冲响应实现多尺度 Retinex, 并且通过一元二次泰勒展开函数对图像进行拉伸, 同时利用高斯分布对拉伸区域进行自适应设定。实际结果表明, 提出的算法能够有效地增强图像信息, 在恢复和改善阴影区域细节的同时提高了图像的对比度, 并保持了图像的色彩空间。同时, 本算法具有较快的运算速率, 在一定程度上实现了算法的实时性要求。

关键词: 阴影恢复技术; 多尺度 Retinex; 泰勒拉伸; 高斯滤波无限脉冲响应

中图分类号: TP391.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2013)12-3833-03

doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2013.12.083

Research on image technology of shadowed region recovery based on multi-scale Retinex

WANG Xiao-xiao, SUN Yong-rong, ZHANG Yi, LIU Xiao-jun

(Navigation Research Center, College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Based on the Retinex model for shadowed region recovery, this paper proposed a new algorithm combined multi-scale Retinex algorithm and Taylor-stretching. The algorithm adopted the infinite impulse response (IIR) of Gaussian filter to actualizes the multi-scale Retinex model, extended the image by monic function with second power Taylor series and set the stretching interval adaptively based on Gaussian distribution. Experimental results show that the algorithm can enhance the image effectively, and recover the details of the shadowed region while increasing the image contrast and keeping the color space perfectly. Also, it has high operating rates which realize the real-time demand.

Key words: shadowed region recovery technology; multi-scale Retinex; Taylor-stretching; IIR of Gaussian filter

0 引言

目前, 图像技术在智能交通系统、智能监控系统、军事目标检测及医学导航手术中的器械定位等方面具有广泛的应用价值。但在实际应用中, 由于光照环境或物体表面反光等原因造成的图像整体光照不均, 导致在图像信息的识读上遇到障碍^[1]。图像光照不均具体表现如下: 图像整体灰度值偏低, 常见于夜间图像和红外图像等; 图像局部灰度值偏低, 图像光照不均匀致使图像中局部灰度值低, 局部信息无法辨认; 图像出现高光现象或部分图像位于高光区内^[2]。光照不均在一定程度上改变了图像的原始面貌, 增加了进一步处理的难度。因此, 应针对光照不均问题对图像进行前期处理。

Retinex 理论被广泛用于图像对比度增强、去除云雾以及消除不均匀光照等问题^[3], 取得了较好的效果。文献[4]对 Retinex 方法中需要考虑的方面进行了分析, 针对 Retinex 增强后的图像容易产生灰度化的现象, 文献[5]提出了一种改进的去极值直方图裁剪法, 改善了增强图像存在的灰度化现象。针对传统中心/环绕 Retinex 图像增强方法在处理高动态范围图像时易在明暗对比强烈处产生光晕现象, 文献[6]提出了一种

使用 Mean-Shift 滤波技术估计光照的方法, 有效地消除了光晕现象。文献[7]提出了一种基于小波框架的变分 Retinex 方法, 解决了变分 Retinex 方法处理后图像易出现伪影、边界易模糊的问题。本文拟采用多尺度 Retinex 算法, 联合多个尺度的高斯滤波结果, 引入泰勒函数改进拉伸公式, 突出原始图像阴影部分的细节, 改善图像对比度, 保持图像动态范围和色彩空间; 同时, 利用高斯核的可分离特性实现递归无限脉冲响应高斯滤波, 避免了复杂的卷积运算。

1 传统多尺度 Retinex 图像增强算法

1971 年, Edwin Land 提出了 Retinex 理论, 随后 Jobson 等人^[8]将单尺度 Retinex (SSR) 算法用于图像增强, 通过将像素点的灰度值与以它为中心进行高斯平滑后得到的灰度值作差值, 以该差值作为相对明暗关系, 对原像素点进行灰度值校正^[9]。设 $G(x, y)$ 为初始输入图像像素点灰度值, $F(x, y)$ 为卷积高斯核, 并且假定增强后图像像素点灰度值均为 R_0 , 则 SSR 算法可表示为

$$\begin{cases} \delta(x, y) = \log G(x, y) - \log [F(x, y)] * G(x, y) \\ R_{SSR}(x, y) = R_0 + \delta(x, y) \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期: 2013-03-28; 修回日期: 2013-04-30 基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (NP2011049)

作者简介: 王潇潇 (1990-), 女, 辽宁义县人, 硕士研究生, 主要研究方向为图像预处理技术 (wangxiaoxiao@nuaa.edu.cn); 孙永荣 (1969-), 男, 江苏海安人, 教授, 博导, 主要研究方向为惯性技术与组合导航、视觉导航技术、航空电子系统显示与控制技术等; 张翼 (1985-), 男, 浙江诸暨人, 硕士研究生, 主要研究方向为图像导航与定位技术; 刘晓俊 (1987-), 男, 山西平遥人, 硕士研究生, 主要研究方向为图像导航与定位技术。

其中: $\delta(x,y)$ 为像素点 (x,y) 的相对明暗关系; $R_{SSR}(x,y)$ 表示经 SSR 算法增强后的图像像素点灰度值。单尺度 Retinex 算法可以较好地增强图像,能在保持原始图像亮度的同时压缩图像对比度,并增强图像暗处信息;但是当图像中有大块灰度相似的区域时,增强后的图像会产生光晕现象,不能同时实现对比度增强和色彩恒常性。

Jobson 等人^[10]后来在单尺度 Retinex 的基础上,提出了多尺度 Retinex (MSR) 算法,将高斯卷积按照模板大小划分为若干级,分别使用 SSR 方法求解每一级上的灰度校正值,再将多个 SSR 的输出结果进行加权求和得到 MSR 的增强结果。设 $G_i(x,y)$ 为输入图像第 i 个彩色通道的像素点值, $F_n(x,y)$ 为第 n 个尺度上的卷积高斯核,并且同样假定增强后图像的各彩色通道像素点值均为 R_0 ,用数学表达式表示为

$$\begin{cases} R_{MSR_i}(x,y) = \sum_{n=1}^N w_n (R_0 + \log G_i(x,y) - \log [F_n(x,y)] * G_i(x,y)) \\ \sum_{n=1}^N w_n = 1 \end{cases} \quad (2)$$

其中: N 为 MSR 算法所使用的尺度级数; w_n 为各尺度的权重, $R_{MSR_i}(x,y)$ 表示为第 i 个彩色通道经 MSR 算法增强后的图像像素点值。在实际应用中的尺度选择方面,一般选择一个小尺度、一个中间尺度和一个大尺度。MSR 同时包括了多个尺度的特征,综合了小尺度的动态范围压缩和细节增强、大中尺度的色彩重现的优势,能够同时实现图像的锐化、动态范围的压缩、对比度改善、颜色恒常性和颜色的重现,使图像的处理效果更加理想^[3]。

2 改进的多尺度 Retinex 图像增强算法

2.1 MSR 算法中的泰勒拉伸

在传统 MSR 算法^[9]中,由于 $\delta_n(x,y)$ 是对像素值取对数后作差,导致 $\delta_n(x,y)$ 的取值范围很小,增强后的像素点取值都集中在 R_0 周围,致使增强后的图像对比度不高,图像的细节信息难以观察。为此,可通过对图像进行对比度的拉伸变换来改善这种情况,常用的方法是对像素点值进行线性拉伸^[11,12],即

$$L(x,y) = \frac{R_{MSR}(x,y) - R_{MSR}(x,y)_{\min}}{R_{MSR}(x,y)_{\max} - R_{MSR}(x,y)_{\min}} \times 255 \quad (3)$$

通过式(3)对结果图像的直方图进行修正,将增强图像的灰度范围扩展为 $[0,255]$,但是直接选用传统的线性拉伸则会忽略灰度值的分布密度等问题,从而导致一定程度的颜色失真,并且容易产生光晕。由于常用的线性拉伸算法不考虑原图像本身的灰度值分布情况,对阴影部分的修复效果不好。

本文基于泰勒级数展开的思想,用分段多项式来代替复杂函数,用多项式近似函数在各点邻域中的值,将图像像素值灰度分布集中段用一元二次函数近似,灰度分布的低值和高值两端则采用线性拟合的方式,则拉伸函数可表示为

$$L(x,y) = \begin{cases} \frac{a}{a_0 - R_{MSR}(x,y)_{\min}} (R_{MSR}(x,y) - R_{MSR}(x,y)_{\min}) & R_{MSR}(x,y)_{\min} \leq R_{MSR}(x,y) < a_0 \\ \frac{a-b}{(a_0-b_0)^2} (R_{MSR}(x,y) - b_0)^2 + b & a_0 \leq R_{MSR}(x,y) < b_0 \\ \frac{255-b}{R_{MSR}(x,y)_{\max} - b_0} (R_{MSR}(x,y) - b_0) + b & b_0 \leq R_{MSR}(x,y) < R_{MSR}(x,y)_{\max} \end{cases} \quad (4)$$

其中: a_0 和 b_0 分别表示二元函数模拟拉伸像素值区间的上下限。可以看出,泰勒拉伸方式与正弦函数、余弦函数、指数函数等拉伸方式相比,中间值部分用一元二次函数近似拉伸,极大

减少了计算量;同时,采用分段函数拉伸的方式,考虑了图像灰度值的分布关系,与传统直接线性拉伸方式相比,具有更好的效果。

在泰勒拉伸方法中, a_0 与 b_0 的选取对图像的拉伸效果至关重要。对于直方图分布各异的图像,若手动设置 a_0 与 b_0 则需要不断调整,不仅较为繁琐,也不利于实际应用。因此,较好的参数适应性也是算法研究中需解决的问题。图像直方图分布类似于高斯分布,可以看做是一种正态分布,当像素点值与灰度值均值的距离大于三倍灰度值标准差时,可将这些像素点忽略不计^[13],即取 $a_0 = \mu - 3\sigma$ 和 $b_0 = \mu + 3\sigma$, μ 和 σ 分别为灰度值均值和标准差。

2.2 基于递归高斯滤波快速提取图像亮度分量

根据 Retinex 理论,图像是由亮度分量和反射分量构成的,亮度分量即为实际的构成图像,而反射分量则决定了图像的内在性质。Retinex 算法的实质,就是通过对原图像进行某种高斯平滑来提取亮度分量,并使得提取的亮度图像尽可能地准确。

对于亮度图像的提取,一般采用将图像与二维高斯函数进行卷积得到。由于高斯函数是线性可分的,因此二维高斯卷积可以等价于在二维图像上对两个独立的一维空间分别进行卷积计算,即二维高斯卷积可以分两步来进行:首先将图像与一维高斯函数进行卷积,然后将卷积结果与方向垂直的相同一维高斯函数进行二次卷积。本文利用无限脉冲响应产生一个递归 IIR 高斯滤波器^[14],通过高斯核的 Z 变换,将高斯卷积分解为前向 $w[n]$ 和后向 $out[n]$ 两个独立的差分表达式,记为

$$w[n] = B \times in[n] + \frac{b_1 \times w[n-1] + b_2 \times w[n-2] + b_3 \times w[n-3]}{b_0} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} out[n] &= B \times w[n] + \\ &\frac{b_1 \times out[n+1] + b_2 \times out[n+2] + b_3 \times out[n+3]}{b_0} \end{aligned} \quad (6)$$

式(5)(6)中:

$$\begin{aligned} b_0 &= 1.57825 + 2.44413q + 1.4281q^2 + 0.422205q^3 \\ b_1 &= 2.44413q + 2.85619q^2 + 1.26661q^3 \\ b_2 &= -1.4281q^2 + 1.26661q^3, b_3 = 0.422205q^3, B = 1 - \frac{b_1 + b_2 + b_3}{b_0} \\ q &= \begin{cases} 0.98711\sigma_0 - 0.96330 & \sigma_0 \geq 2.5 \\ 3.97156 - 4.14554\sqrt{1 - 0.26891\sigma_0} & 0.5 \leq \sigma_0 < 2.5 \\ 0.11477 & \sigma_0 < 0.5 \end{cases} \end{aligned}$$

其中: $in[n]$ 表示输入图像数据; $w[n]$ 表示前向卷积的中间值; $out[n]$ 表示输出滤波图像数据。本文中先对图像逐行进行处理,再将处理结果作为中间变量对图像逐列进行处理,最终实现二维高斯滤波,提高了算法的运算速度。递归 IIR 高斯滤波器的框图如图 1 所示。对于不同尺寸的图像,表 1 给出了传统高斯滤波器和递归无限脉冲响应高斯滤波器的处理时间,由表中处理时间可以看出,递归无限脉冲响应高斯滤波器大大提高了运算速度。

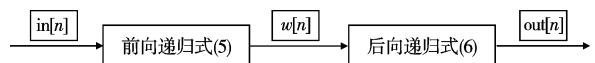


图 1 递归无限脉冲响应高斯滤波器示意框图

表 1 两种高斯滤波器实现速率对比

图像尺寸/像素	传统高斯滤波器/ms	无限脉冲响应高斯滤波器/ms
768 × 576	106.1	31.1
1600 × 1200	461.6	135.4
3072 × 2304	2 529.5	1 088.4

基于本文改进方法实现的改进 MSR 算法流程如图 2 所示。各个尺度的光照估计,即相对明暗关系计算采用了递归无限脉冲响应高斯滤波器实现,随后 R、G、B 各通道进行泰勒拉伸变换,最终得到了 MSR 增强图像的输出。

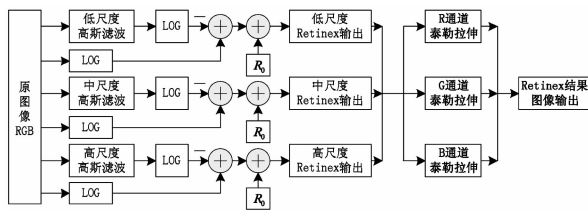


图2 本文方法实现的改进多尺度 Retinex 算法流程图

3 实验结果及分析

基于 MSR 的图像增强算法是以不同尺度计算高斯核 $F_n(x, y)$, 从而得到相应的 SSR 结果, 再进行加权求和得到的。本文中设置了小、中、大三个尺度, 将小尺度参数设置为图像像素宽的 5%, 用以获得较好的图像边缘信息; 将中尺度参数设置为图像像素宽的 15%, 同时保证较好的图像边缘细节和色彩; 将大尺度参数设置为图像像素宽的 40%, 用以获得平衡的色彩效果。实验结果表明, 高斯核尺度的设定使本文的算法具有较好的增强效果和操作性。

为了比较传统 MSR 算法与本文改进的 MSR 算法在图像增强处理上的效果, 文中对这两种方法进行了实验测试与分析。图 3(a) 为原始输入图像, (b) 为传统 MSR 算法处理后的输出图像, (c) 为本文算法处理后的输出图像, (d) ~ (f) 分别为 (a) ~ (c) 所对应的灰度直方图。

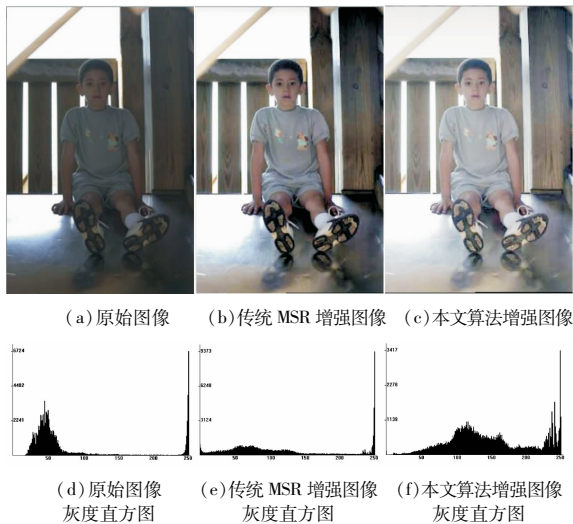


图3 图像增强效果对比

从图 3 中可以看出, 传统 MSR 算法虽然增强了图像的对比度, 但是在恢复细节方面仍然有缺陷, 具体表现为增强后图像在色彩上相对灰暗、阴影部分的细节还原度不高、图像亮度较低、亮度分布不均匀、有光晕产生等问题。而利用本文研究的算法处理后, 图像的色彩空间对处理结果的亮度和色彩统一考虑, 增强效果明显优于传统 MSR 算法, 色彩显得更为自然, 细节也更加丰富。可以明显地看出, 经过本文算法处理后的图像, 人物身体和背面木板的细节得到了很好的增强, 木板纹路更加清晰可见, 并且不仅对比度没有过增强的现象, 也没有产生光晕现象。

综上所述, 采用本文提出的改进算法对图像进行处理, 不

仅压缩了图像的动态范围, 使图像阴影处信息得到有效增强, 同时图像的色彩保持良好, 对比度也有所提高, 亮度分布更为均匀, 图像达到了更好的视觉效果。

4 结束语

本文针对多尺度 Retinex 图像增强算法进行了深入的探讨和研究, 基于 MSR 算法的缺陷提出了两点改进: a) 提出了泰勒拉伸变换的思想, 通过二次模拟函数对原图像中灰度值集中的部分进行拉伸, 不仅满足了图像增强的需求, 而且算法复杂度较小, 运算方便; b) 通过递归无限脉冲响应高斯滤波的实现, 提升了原有算法的处理速度。

实验结果表明, 通过对图像的增强处理, 被阴影覆盖部分可以清晰地显示, 色彩空间保持得更好, 图像亮度更高, 没有光晕现象, 具有明显的增强效果和很高的处理速度。

参考文献:

- [1] 梁琳, 何卫平, 雷蕾, 等. 光照不均图像增强方法综述[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(5): 1625-1628.
- [2] 王超群, 朱方文. 一种去除单张图片中高光的方法[J]. 上海大学学报: 自然科学版, 2007, 13(2): 151-154.
- [3] 刘茜, 卢心红, 李象霖, 等. 基于多尺度 Retinex 的自适应图像增强方法[J]. 计算机应用, 2009, 29(8): 2077-2079.
- [4] RAHMAN Z, JOBSON D J, WOODELL G A. Investigating the relationship between image enhancement and image compression in the context of the multi-scale Retinex[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2011, 22(3): 237-250.
- [5] 王小明, 黄昶, 李全彬, 等. 改进的多尺度 Retinex 图像增强算法[J]. 计算机应用, 2010, 30(8): 2091-2093.
- [6] 许欣, 陈强, 王平安, 等. 消除光晕现象的快速 Retinex 图像增强[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2008, 20(10): 1325-1331.
- [7] 毛本清, 金小梅. 自适应直方图均衡化算法在图像增强处理的应用[J]. 河北北方学院学报: 自然科学版, 2010, 26(5): 64-68.
- [8] JOBSON D J, RAHMAN Z, WOODELL G A. Properties and performance of a center/surround Retinex[J]. IEEE Trans on Image Processing, 1997, 6(3): 451-462.
- [9] 乔小燕, 姬光荣, 陈露. 一种改进的全局 Retinex 图像增强算法及其仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(4): 1195-1197, 1201.
- [10] JOBSON D J, RAHMAN Z, WOODELL G A. A multiscale Retinex for bridging the gap between color images and the human observation of scenes[J]. IEEE Trans on Image Processing, 1997, 6(7): 965-976.
- [11] RIZZI A, GATTA C, MARINI D. From Retinex to automatic color equalization issues in developing a new algorithm for unsupervised color equalization[J]. Journal of Electronic Imaging, 2004, 13(1): 75-84.
- [12] 卢志茂, 刘钦堂, 范冬梅, 等. 基于亮度划分 MSR 的视觉图像增强[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2011, 39(S2): 99-102.
- [13] 江兴方, 陶纯堪. Retinex 彩色图像增强理论的物理思考及其截断区间对图像质量的影响[J]. 光学技术, 2007, 33(1): 127-129.
- [14] 詹永鑫, 郑学仁, 陈建宾. 基于亮度分量的快速图像增强方法[J]. 液晶与显示, 2010, 25(2): 273-277.