

一种基于视觉适应性的图像增强算法

张 泽, 毕笃彦, 许悦雷, 李权合

(空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

摘 要:模拟真实场景反应在人眼中形成图像的过程,考虑到邻域间干扰、光照不均匀、媒介传递率下降引起的图像退化,提出了一种新的图像增强算法。依据对视觉现象中对比灵敏度、亮度适应能力和侧抑制现象的研究,建立了一种图像退化模型的视觉适应性模型,该模型求解方案包含 3 个过程:用于消除邻近像素相互影响,给人眼提供更多细节的去卷积过程;据锥细胞亮度适应能力提出的,为其工作提供最佳工作光照条件的亮度调整过程;模拟侧抑制机理提出的对比度拉伸过程。对比现有图像增强算法的增强结果,实验结果表明该方法的视觉适应性解,在增强图像细节、提升对比度、增强结果的视觉愉悦性方面取得了较大进步。

关键词:图像增强;视觉适应性;视觉现象;图像退化模型

DOI:10.3969/j.issn.1009-3516.2010.06.014

中图分类号: TN911.73 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2010)06-0065-05

近来,图像增强领域出现了一些非常不错的图像增强方案,其中包括基于偏微分方程的 Retinex 模型求解方法,它将原来由估计光照图像带来的病态方程转换为适定问题求解,在求解精度和速度上都较先前算法有了较大改进;R. Fattal 的单图像去雾^[1],他的方法是在假设媒介的传递效率和表面阴影局部无关的情况下,估计物体的反射率和媒介的传递效率;R. Tan 的基于恶劣天气下视觉特性的单图像去雾^[2],他认为没雾的图像总比有雾的图像对比度要大,从而采用最大化图像的局部对比度的方法来获取好的图像;还有 J. Kopf 等人的基于高景深图像模型的图像增强^[3]以及 Kaiming He 等人的利用图像中暗通道进行去雾^[4]等增强方案。由于受模型本身的限制,以上文献中提出的算法往往带有一定局限性,为了克服模型给图像增强带来的影响,本文模拟真实场景反应在人眼中形成图像的过程,考虑到邻域间干扰、光照不均匀、媒介传递率下降引起的图像退化,提出了一种新的图像退化模型,并依据对视觉现象中对比灵敏度、亮度适应能力和侧抑制现象的研究,提出了一种图像退化模型的视觉适应性解。

1 新的图像退化模型

图像形成过程中存在多种退化因素,其中包括相邻像素之间的相互干扰,由于遮挡或照射角度不一致造成的光照不均,由于烟尘、云雾等恶劣天气造成的媒介传递效率的下降。邻域干扰会造成图像边缘模糊和细节的丢失;虽然人眼能够适应较暗和较亮的环境,具有暗光适应和亮光适应能力,但是,人眼不能同时适应很宽的光强范围,而且能够辨识图像颜色和细节的锥细胞只工作在光线强的情况下,因此光照不均会导致图像颜色和细节的丢失;统计获取的关于退化图像的先验知识以及许多合理的假设对这些新进展的取得起到至关重要的作用。Retinex 模型是一种简化的视觉模型,具有一定的普适性,见式(1):

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

式中: S 是观察到的图像; R 是目标的反射率; L 是光照分量。图像增强的途径是从 S 中估计光照图像 L , 进

* 收稿日期:2010-07-12

基金项目:国防重点实验室基金资助项目(9140C610301080C6106)

作者简介:张 泽(1986-),男,河北磁县人,硕士生,主要从事图像处理研究;E-mail:zhangze1013@163.com

毕笃彦(1962-),男,陕西扶风人,教授,博士生导师,主要从事图像处理与计算机视觉研究。

而得到目标反射率 R 。

式(2)是计算机视觉和计算机图形领域广泛采用的一种云雾图像形成模型,上述去雾方法大都致力于求解此公式。

$$I(x) = J(x) \times t(x) + A(1 - t(x)) \quad (2)$$

式中: I 是观察到的图像; J 是目标的反射率; t 是媒介的传递效率; A 是全局大气光照。图像去雾的目的就是从观察到的图像中估计出 J 、 A 和 t 。

从式(2)可以看出,当媒介传递效率下降时,全局大气光照在观察到的图像中占据绝大部分比例,场景中目标的反射图像被压制,从而造成严重的图像退化。

Retinex 的模型求解是得到估计的光照图像,进而再得到反射图像,然而反射图像自身不存在视觉适应性,它必须在吸收一定的光照之后才能被观察到。区别于 Retinex 模型的是,本文提出的模型假设场景中的目标图像在吸收了足够的光照(和人眼亮度适应能力相适应)后形成视觉适应性图像,多余的光照就会造成图像退化。综合几种退化因素,本文提出的图像退化模型可以用式(3)来描述:

$$S(x, y) = [V(x, y) + E(x, y)] / L(x, y) * N(x, y) \quad (3)$$

式中: S 为观察到的退化图像; V 是视觉适应性图像; E 为多余光照图像; L 用来衡量像素间接收到的光照不均匀的程度; N 表示像素点 (x, y) 的邻域内像素;符号“*”代表卷积。

2 图像退化模型的视觉适应性解

视网膜由杆状细胞和锥状细胞、水平细胞、双极细胞、无长突细胞、神经节细胞和视神经 6 层细胞组成。杆状细胞和锥细胞统称为视细胞,是视网膜的感光器件。锥状细胞在光线强的情况下工作,主要是感受颜色和分辨细节,通常称为明视觉。杆状细胞在光线弱的情况下工作,主要是感受亮度和运动,无颜色,对细节不敏感,通常称为暗视觉。所以在低照度下,人们只能看到物体的轮廓和深深浅浅的灰度,而无法分辨其真实颜色和细节。目前针对视觉现象的研究比较成熟的领域包括对比灵敏度、同时对比度、亮度适应能力和侧抑制现象。

本文认为由于在弱光线情况下工作的杆状细胞不能提供物体的真实颜色和细节,因此作为视觉适应性图像应该是由锥状细胞获取的,所以本文提出的视觉适应性解,主要是考虑到锥细胞的工作特性,依据其亮度适应能力设计了亮度调整函数,将图像亮度调整到唤醒其最佳工作状态的域值内。

2.1 去卷积函数

真实场景反应在人眼形成图像时,入射光线会相互影响,导致相邻像素之间发生相互干扰,这种干扰由先验知识可知是符合高斯分布的,干扰形式可以用式(4)表示:

$$S(x_0, y_0) = \sum_{(x, y) \in N(x_0, y_0)} \left\{ I(x, y) \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(x-x_0)^2 - (y-y_0)^2}{2\sigma^2}} \right\} \quad (4)$$

式中: S 是观察到的图像; I 是没有邻域间相互干扰的图像; N 为中心像素的邻域。

对人眼对比灵敏度的研究发现,当中心像素与周围背景像素之间的亮度差异,和背景亮度的比值大于某个域值时,该中心像素的特征容易被察觉,该现象可以用式(5)来描述。

$$\frac{dI}{I} \geq c \quad (5)$$

将此现象和领域像素干扰形式结合考虑,提出了如下去卷积过程:

$$I'(x_0, y_0) = \sum_{(x, y) \in N_0(x_0, y_0)} \left\{ S(x, y) \cdot \frac{-1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(x-x_0)^2 - (y-y_0)^2}{2\sigma^2}} \right\} + \frac{k \times S(x_0, y_0)}{\sqrt{2\pi\sigma}}, k \geq 2 \quad (6)$$

式中: I' 是去卷积后恢复的图像; k 是恢复强度因子, k 值越大图像细节越突出。

2.2 亮度调整函数

亮度调整函数主要完成对图像亮度的调整,调整目的是使得调整后的图像亮度可以让视网膜上锥细胞工作在最佳状态,从而观察到更多的图像细节和鲜活的颜色。函数设计过程中考虑进了如下因素:

1) 人眼能够适应较暗和较亮的环境,具有暗光适应和亮光适应能力。但是,人眼不能同时适应很宽的光强范围,当人眼适应某一平均亮度时,能够同时鉴别出的光强变化范围相对于人眼所能适应的亮度范围要窄

的多。此外,在很多范围内,主观亮度与光强的对数成线性关系。因此亮度调整函数应该使得图像动态范围得到压缩。

2) 获取的真实图像亮度往往具有偏低或偏高的现象,因此以平均亮度为中心进行亮度调整时应该做适当的均值漂移。

3) 图像方差可以大体反应图像的退化程度,在不考虑噪声干扰的情况下,图像方差越大图像的退化越小,图像中各像素点的亮度比例越适中,图像方差越小图像退化越严重,图像中各像素点的亮度比例越混乱,调整强度与退化较小的图像相比要更强。

考虑上述因素,本文提出的亮度调整函数可以表达成式(7):

$$L(x,y) = \frac{1}{\text{mean}^a} + b \cdot \frac{\text{mean}}{\text{var}} \cdot \ln \left(1 + \frac{\left| \frac{\max}{\text{var}} \times (i(x,y) - \text{mean}^c) \right|}{\max} \right) \quad (7)$$

式中: $L(x,y)$ 是函数对像素 (x,y) 的亮度调整强度; var 是输入图像的方差; mean 是输入图像的均值; \max 为图像的最大值; $i(x,y)$ 是输入图像在 (x,y) 处的像素值; a,b 为强度调整因子; c 为均值漂移量的控制因子。

2.3 对比度拉伸函数

侧抑制现象通常是指视网膜上相邻的感光细胞之间的相互作用的现象。刺激某一感光细胞使其产生兴奋,再刺激另一相邻感光细胞,后者的反应对前者的反应有抑制作用。侧抑制作用的强弱与光照的强度、照射面积,以及感光细胞之间的距离有关。在相邻感光细胞的相互作用中同时还存在着脱抑制现象,细胞之间的相互干扰,平滑了距离的影响,继而在考虑到侧抑制现象和脱抑制现象同时存在的情况,本文模拟该现象提出了简化的对比度提升函数,如式(8)所示:

$$R_p = I_p - \frac{\alpha}{mn - 1_{j \in N_p, j \neq p}} \sum I_j, \alpha < 1 \quad (8)$$

式中 R_p 是对比度调整后的输出图像在 p 点的像素值; I_p 是原始图像在 p 点的像素值; I_j 是像素点 p 的邻域内像素; p 点邻域的大小为 $m \times n$; α 为侧抑制强度因子。

3 算法描述

依据上文所描述的新的图像退化模型和相应的视觉适应性解法,本文提出了一种新的图像增强算法,该算法可用于实现彩色图像的光照补偿和去云雾,可以有效提升图像对比度,旨在提高各种退化因素导致的问题图像的视觉效果。较现有算法,新方法可以增强多种退化因素引起的退化图像,并且求解过程贴近人类视觉系统对图像的加工处理过程,求解结果可视性好。算法实现是一个迭代过程,具体步骤如下:

步骤1 将图像归一化,利用式(6)对彩色图像R、G、B通道分别进行去卷积处理,设置循环次数 N 。

步骤2 依据式(7)分别计算R、G、B通道的亮度调整函数值。

步骤3 依据式(8)分别对R、G、B通道进行对比度调整,循环次数加1。

步骤4 判断循环次数是否小于 N ,是,跳到步骤2;否,则执行步骤5。

步骤5 按式(9)对图像进行动态范围压缩,输出结果。

$$Y = c \ln [1 + \text{double}(X)] \quad (9)$$

4 实验结果和分析

算法采用MATLAB编程实现,经大量实验验证,本文提出的增强算法具有较强鲁棒性时的参数设置为:去卷积函数中的恢复强度因子 k 设为2.1;亮度调整函数中的强度调整因子 a,b 分别设为0.126和0.038,均值漂移量的控制因子 c 设为1.6;对比度拉伸函数中的侧抑制强度因子 α 设为0.08, P 点邻域大小设为 9×9 ;循环次数 N 设为9次,式(9)中 c 设为1.72。

为验证本文提出算法的有效性,实验将本文算法和Retinex算法以及He的算法做了主观定性对比和客观定量对比,图1和图2是实验得到的增强图像。主观上看本文提出的算法增强结果,在实现去雾的同时获得了更好的全局光照效果,而且在颜色保持上优于另外两种算法。图1和图2中用实线框框住的部分,本文

算法增强结果较其它算法增强结果在亮度上得到了明显提升;用点划线框框住的部分,本文算法增强结果在细节上远优于其它算法增强结果;图1中用虚线框框住的部分,不但细节得到了增强,而且让人看了不会有晃眼的感觉。

在主观质量评价相当时,采用图像均值来衡量整体亮度,邻域标准差平均值和清晰度来表征局部特征是不错的客观质量评价标准。这里采用以非重叠块为基础的邻域标准差平均值而非图像的整体标准差,是因为后者与视觉可视的对比度相关性较小,不能体现局部对比度^[13]。此处清晰度是指图像的平均梯度。表1和表2分别列出了图像“建筑”和“街道”几种增强算法增强结果的客观评价数据。从客观评价数据来看,3种算法

增强结果在亮度上大体相当,在提高图像邻域标准差平均值和清晰度方面本文算法明显优于另外2种算法。

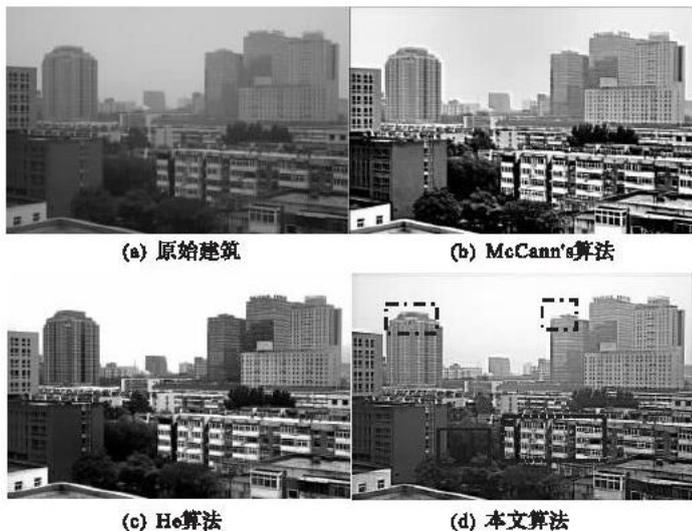


图1 不同算法得到的图像“建筑”增强图像结果

Fig. 1 Enhancement results of image 'building' from the different algorithms



图2 不同算法得到的图像“街道”增强图像

Fig. 2 Enhancement results of image 'street' from the different algorithms

表1 图像“建筑”增强效果的客观数据评价

Tab. 1 The objective data evaluation of different algorithms' enhancement results of image 'building'

测试指标	原始图像	本文算法	McCann's	He's
均值	108.798 6	136.954 3	136.179 3	137.154 7
方差	8.624 7	29.972 5	27.116 7	27.952 6
清晰度	0.185 6	0.512 6	0.450 6	0.477 2

表2 图像“街道”增强效果的客观数据评价

Tab. 2 The objective data evaluation of different algorithms' enhancement results of image 'street'

测试指标	原始图像	本文算法	McCann's	He's
均值	125.191 1	142.559 4	137.634 2	138.575 2
方差	8.532 5	29.168 2	28.294 3	27.995 3
清晰度	0.157 4	0.456 7	0.451 0	0.453 3

5 结束语

本文模拟图像退化过程提出了一种新的图像退化模型,该模型在一定程度上克服了 Retinex 模型和计算机视觉领域应用较多的图像退化模型本身的不足,为获取视觉适应性较好的增强结果奠定了基础。文中还依据人类视觉系统中的一些现象,提出了一组该模型的视觉适应性解,模拟对比灵敏度、亮度适应能力和侧

抑制机理分别提出了去卷积函数、亮度调整函数和对比度拉伸函数。从实验结果看,本文算法较现有算法在增强图像细节、提升对比度、增强结果的视觉愉悦性方面取得了较大进步。但本文算法的鲁棒性还不能满足处理所有类型退化图像的要求,尤其是对景深较大的退化图像,增强结果会导致视觉适应性的下降,因此接下来的研究重点是将光线传播距离的影响考虑进模型,以及充分挖掘人眼的适亮能力,进一步提高算法的鲁棒性。

参考文献:

- [1] Raanan Fattal. Single Image Dehazing[J]. Proceedings of ACM SIGGRAPH 2008, 2008, 27(3): 1-9.
- [2] Tan R. Visibility in Bad Weather from A Single Image[C]//2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Anchorage, AK: IEEE Press, 2008: 1-8.
- [3] Kopf J, Neubert B, Chen B, et al. Deep Photo: Model-Based Photograph Enhancement and Viewing[C]//ACM SIGGRAPH Asia 2008. [S. l.]: ACM, 2008: 1-10.
- [4] Kaiming He, Jian Sun, Xiaoou Tang. Single Image Haze Removal Using Dark Channel Prior[C]//2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. [S. l.]: IEEE Press, 2009: 1956-1963.
- [5] Lei Ling, Zhou Yinqing, Li Jingwen. An Investigation of Retinex Algorithms for Image Enhancement [J]. Journal of Electronics, 2007, 24(5): 696-700.
- [6] McCann J J, Sobel I. Experiments with Retinex[M]. [S. l.]: HPL Color Summit, 1998.
- [7] Kimmel R, Elad M, Sobel I. A Variational Frame Work for Retinex[J]. International Journal of Computer vision, 2003, 52(1): 7-23.
- [8] 肖燕峰. 基于 Retinex 理论的图像增强恢复算法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
XIAO Yanfeng. Image Enhancement and Restoration Algorithm Based on Retinex Theory[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2007. (in Chinese)
- [9] Faugeras O D. Digital Image Color Processing within the Framework of A Human Visual System[J]. IEEE Trans on ASSP, 1979, 27: 380-393.
- [10] 章毓晋. 图像工程(上册)图像处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
ZHANG Yujin. Image Engineering(1) Image Processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006. (in Chinese)
- [11] Jobson D J, Rahman Z, Woodell G A. Statistics of Visual Representation [C]//Visual Information Processing XI. [S. l.]: SPIE, 2002: 25-35.

(编辑: 徐楠楠)

Acquisition of Vision Adaptability Image

ZHANG Ze, BI Du-yan, XU Yue-lei, LI Quan-he

(Engineering Institute, Air force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: Through simulating the process of image construction we propose a new image degradation model in this paper, and mutual effect from adjacent pixels, not well-proportioned illumination, as well as the decline of medium transfer ratio are taken into account in the new model. Based on the research on human visual system, including contrast sensitivity, brightness adapting ability and side restraint, a vision adaptability solution for the model is proposed. There three processes are included in the solution: a de-convolution process to eliminate the adjacent pixels' mutual effect and provide people with more details; an intensity adjustment process to provide the cone cells with a suitable working condition (the intensity adjustment function is proposed according to cone cells brightness adapting ability) and the contrast upgrade process proposed through simulating the side constraint thesis. Compared with some existing image enhancement algorithms, it can be found in the experimental results that the applications of the proposed algorithm yield some promising results in getting more details, upgrading the contrast, and increasing the visual pleasing characters.

Key words: image enhancement; vision adaptability; vision phenomenon; image degradation model