

基于暗原色先验的 APEX 图像复原算法

张 勇¹, 王好贤¹, 李 方¹, 毛兴鹏¹, 潘为民², 梁 卫²

(1. 哈尔滨工业大学(威海)信息科学与工程学院, 山东 威海 264209; 2. 青岛市公安局 科技处, 山东 青岛 266000)

(zhangyong_hit@hotmail.com)

摘 要:为满足有效性和处理速度的要求,结合暗原色先验的参数估计,将用于模糊处理的近似点扩展函数估计(APEX)用于天气退化图像复原。考虑到不同天气条件下、不同大小的图像其 APEX 参数不一致,算法能够针对不同浓度的沙尘、雾动态调整估计参数;而且与大多数多幅图像输入的复原方法不同,算法针对单幅图像进行处理。仿真结果表明算法具有很好的实用性。为进一步改善视觉效果,基于颜色恒常性能够均衡图像中光源颜色分量不均匀造成的影响,对复原图像进行了颜色恒常性处理。

关键词:图像复原; APEX 算法; 暗原色先验; 动态参数估计; 颜色恒常性

中图分类号: TP391.41 **文献标志码:** A

Image restoration algorithm using APEX method based on dark channel prior

ZHANG Yong¹, WANG Hao-xian¹, LI Fang¹, MAO Xing-peng¹, PAN Wei-min², LIANG Wei²

(1. School of Information Science and Engineering, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai Shandong 264209, China;

2. Department of Science and Technology, Qingdao Police Bureau, Qingdao Shandong 266000, China)

Abstract: In order to meet the demands for both availability and processing speed, in reference to dark channel prior estimation, an image restoration algorithm based on Approximate Point Spread Function Examining (APEX) algorithm commonly used in image deblurring was proposed. Meanwhile, because different-sized images under different weather conditions have different APEX parameters, the APEX parameter value was adjusted dynamically according to sandstorm and fog degree. Furthermore, unlike other multiple images methods, the proposed algorithm needs only one image to be the input. The experimental results show that the proposed algorithm is effective in restoring images. By using color constancy algorithm, the source color components were balanced; furthermore, the visual effect of images was enhanced.

Key words: image restoration; APEX algorithm; dark channel prior; dynamic parameter estimation; color constancy

0 引言

在有烟、雾和沙尘等天气条件下,由于目标景物的反射光受到这些悬浮颗粒的反射、散射、折射等因素影响,照相机获得的目标景物能见度与对比度有一定程度的降低,导致户外监控系统、天文观测等视觉应用系统无法正常工作,如何有效地对天气降质图像进行复原成为人们研究的重点。

受恶劣天气影响的图像,其低频分量得到加强,对比度降低,多数复原方法都是基于提高高频分量、提高对比度方面考虑的。从处理对象考虑主要分为三类:1)基于多幅图像输入的图像复原。此类方法需要输入不同天气条件下的多幅图像或者多种不同极化滤光片下的图像用于估计雾的深度信息^[1-2],利用估计出的深度信息去雾。由于需要输入同一个场景的不同状态下的多幅图像,其应用场合受到限制。2)基于物理实现的图像恢复。这类方法需要改变图像获取装置或者需要人机交互操作^[3],设备成本和复杂度高。3)基于单幅图像处理的方法。这类方法又可以分为三类:①基于滤波的复原方法。主要原理是采用一个高通滤波器对图像进行滤波,从而达到抑制低频、提高高频的目的,目前研究较多的是同态滤波方法去雾^[4-5],这类方法受滤波器频率响应的影响很大,适合对薄雾的处理。②基于直方图均衡化^[6]思想。包

括局部直方图和全局直方图均衡,直方图均衡具有计算量小、速度快的特点,但是容易造成颜色失真,天空部分过亮,并且可能出现块效应,对于像墨绿色景物比重大的自然景物图片失真尤其严重。③基于物理成像模型的复原方法。首先建立基于大气散射建立图像的退化模型,然后利用先验知识对目标景物进行复原,这类方法复原的效果较好,但计算量很大,耗时长^[7-11]。

本文基于近似点扩展函数估计(Approximate Point Spread Function Examining, APEX)算法^[12-14],结合暗原色先验^[9]估计以及颜色恒常性^[15-16]处理,对天气降质图像进行复原,取得了良好的清晰化效果。

1 APEX 算法

APEX 是一种基于快速傅里叶变换的直接盲解卷积算法,盲解卷积是在无法确定点扩展函数(Point Spread Function, PSF)的情况下,对退化的图像进行模糊处理的一种卷积运算^[12]。由于采用快速傅里叶变换,使得其处理速度很快。

照相机得到的模糊图像 $g(x, y)$ 可以看成原始目标景物图像 $f(x, y)$ 同 G 类点扩展函数 $h(x, y)$ 进行卷积得到的:

$$g(x, y) = f(x, y) * h(x, y) + n(x, y) \quad (1)$$

其中: $n(x, y)$ 表示噪声;函数 $h(x, y)$ 的 Fourier 变换定义为

收稿日期:2011-03-29;修回日期:2011-05-24。

基金项目:国家 973 计划项目(2007CB310606);青岛市公共领域科技支撑计划资助项目(09-1-1-63-NSH)。

作者简介:张勇(1987-),男,湖北赤壁人,硕士研究生,主要研究方向:数字图像处理;王好贤(1968-),男,山东招远人,副教授,博士,主要研究方向:图像处理、模式识别;李方(1986-),男,山东菏泽人,硕士研究生,主要研究方向:数字图像处理;毛兴鹏(1972-),男,辽宁盘锦人,教授,博士,主要研究方向:通信和雷达信号处理、电子侦察与对抗;潘为民(1957-),山东烟台人,工程师,主要研究方向:公安科技;梁卫(1959-),山东青岛人,工程师,主要研究方向:工业电器自动化。

$$H(\varepsilon, \eta) = \int_{R^2} h(x, y) \exp(-2\pi i(\varepsilon x + \eta y)) dx dy = \exp(-\alpha(\varepsilon^2 + \eta^2)^\beta) \quad (2)$$

当 β 满足 $0 < \beta \leq 1$ 时, $H(\varepsilon, \eta)$ 符合许多电子光学设备的特征, 又称为光学传递函数 (Optical Transfer Function, OTF); 傅里叶变换满足式(2)且满足 $\alpha > 0, 0 < \beta \leq 1$ 的函数被定义为 G 类函数^[12]。确定出 α 和 β 参数的值就可以得到 OTF, 由于 α 和 β 的估计与噪声水平有很大的关系, 很难得到准确的值。

2 暗原色先验

雾天图像成像模型可用下式^[7-9]表示:

$$I(x) = J(x)t(x) + A(1 - t(x)) \quad (3)$$

其中: $I(x)$ 代表照相机获得的图像; $J(x)$ 是反映景物反射的无雾图像; $t(x)$ 是在像素点 x (为了表示方便, 用 x 代替二维坐标 (x, y)) 处的透射率, 反映透雾能力; A 代表大气光。只要估计出大气光 A 和透射率 $t(x)$, 就可以得到实际的景物图像 $J(x)$ 。

设 $\tilde{t}(x)$ 为透射率的估计值, 固定大气光参数为 A^C , 对式(3)在一个小窗口 $\Omega(x)$ 里分别取 R, G, B 三个颜色通道的最小值, 则

$$\min_{y \in \Omega(x)} (I^C(y)) = \tilde{t}(x) \min_{y \in \Omega(x)} (J^C(y)) + (1 - \tilde{t}(x))A^C \quad (4)$$

其中 $C \in \{R, G, B\}$ 。暗原色定义为在一个小窗口内, 三个颜色通道中颜色分量最小的那个值^[9]。对于自然景物图像 $J(x)$, 其暗原色通道的值应该很小, 接近于零, 即

$$J^{\text{dark}}(x) = \min_C \left(\min_{y \in \Omega(x)} (J^C(y)) \right) = 0 \quad (5)$$

由于大气光参数 A^C 的值是正数, 将式(4)两边除分别除以 A^C , 并对三个颜色通道取最小值得:

$$\tilde{t}(x) = 1 - \min_C \left(\min_{y \in \Omega(x)} \left(\frac{I^C(y)}{A^C} \right) \right) \quad (6)$$

只要估计出大气光参数 A^C , 就可以得到透射率的大概估计。文献[9]得到透射率的大概估计后, 采用软抠图^[9]的方法对其进行精确估计, 去雾效果较好, 但计算量很大, 处理时间长, 难以满足对处理速度的要求。

3 基于 APEX 和暗原色先验的动态参数估计

APEX 能够抑制图片中的低频成分, 突出高频部分^[12]。对整幅图像采用 APEX, 参数过大, 则会导致图像过度处理, 景物变暗; 参数过小, 则欠处理。参数的设定应该反映雾、沙尘等的浓度, 也就是景物深度的信息, 暗原色先验方法能够很好地估计景物的深度。将两者结合不仅可以提高处理速度, 还能够达到较好的处理效果, 处理时间也大幅度缩短。

本文将 APEX 方法用来复原雾、沙尘等天气退化图像。通过大量实验发现, 式(2)中 α 和 β 的值对去雾、沙尘的影响相同, 固定其中的一个值不变, 改变另一个的大小, 其效果都是一致的。本文采用固定 α 的值, 只改变 β 的值的方法, 如果 β 的值增大, 对雾、沙尘浓度较大的部分处理效果较好, 可以用来处理远景; 减小 β 的值, 对雾、沙尘浓度较小的部分处理效果较好, 适合处理近景。

由于不同大小的图像对参数的要求不一样, 如果对所有大小的图像采用同一个参数, 会导致较大的图像前景的颜色变暗, 尤其是对绿色; 同时, 天空的部分会变得更亮, 使得原来比较远的景物丢失, 特别是景物和天空相交的地方, 景物容易丢失; 另一方面, 还会导致尺寸较小的图像去雾、沙尘程度不够。为了解决这些问题, 固定一个一定大小的窗口, 从图像

的最左上端开始, 只对窗口范围内的像素点进行处理; 然后以一定的步长移动窗口, 直到遍历整幅图像的所有像素点。移动窗口时, 必须和前一个窗口的位置有重叠, 对于重叠部分的像素点的值取平均, 目的是去除块效应。

图像中不同位置所对应的雾、沙尘的浓度是不同的, 要想取得好的复原效果, 就要取不同的 β 值。因此, 需要一个能够反映雾、沙尘浓度的变量。暗原色先验模型中的透射率能很好地符合这一要求。因此本文的 β 值可以表示如下:

$$\beta = \begin{cases} \beta_{\text{下}}, & \beta < \beta_{\text{下}} \\ (\text{avwin} - \text{avg})/k_1 + \beta_{\text{com}}, & \text{avwin} < \text{avg} \\ (\text{avwin} - \text{avg})/k_2 + \beta_{\text{com}}, & \text{avwin} \geq \text{avg} \\ \beta_{\text{上}}, & \beta > \beta_{\text{上}} \end{cases} \quad (7)$$

其中: $\beta_{\text{下}}$ 和 $\beta_{\text{上}}$ 是为了防止 β 值过大过小而设的下限、上限值; β_{com} 只跟窗口的尺寸和 α 的值有关, 只要窗口的尺寸和 α 的值固定, 则 β_{com} 的值也就固定了; k_1 一般取 $[4, 5.5]$, k_2 一般取 $[2, 4]$ 。 avwin 表示当前窗口范围里 $t(x)$ 的平均值, avg 表示整幅图像的 $t(x)$ 的均值, 它们的表达式如下:

$$\text{avwin} = \text{sum}(t(x))/\text{win_size} \quad (8)$$

$$\text{avg} = \text{sum}(t(x))/\text{fig_size} \quad (9)$$

其中: $\text{sum}()$ 表示求和运算, win_size 和 fig_size 分别是窗口大小和图像的大小, win 表示当前窗口所在位置。

由于暗原色先验估计出的 $\tilde{t}(x)$ 和雾、沙尘的浓度成反比, 即浓度大时 $\tilde{t}(x)$ 小, 浓度小时 $\tilde{t}(x)$ 大, 所以这里将估计出的 $\tilde{t}(x)$ 与1相减, 得到最终反映雾、沙尘的浓度的 $t'(x)$:

$$t'(x) = 1 - \tilde{t}(x) \quad (10)$$

将 $t'(x)$ 代入到式(8)和(9), 并将得到的结果代入式(7), 得到 β 后, 将 α 和 β 代入式(2), 即可得到每一个窗口的点扩展函数。得到每一个窗口的扩展函数 $H(\varepsilon, \eta)$ 后, 只需将窗口中的所有像素的三个通道的值分别作 Fourier 变换, 得到 $G^C(\varepsilon, \eta)$, 则

$$F^C(\varepsilon, \eta) = G^C(\varepsilon, \eta)/H(\varepsilon, \eta) \quad (11)$$

最后对 $F^C(\varepsilon, \eta)$ 作 Fourier 反变换, 使得窗口内的复原图像 $f^C(x, y)$ 。移动窗口, 遍历图像的所有像素点, 得到每个窗口下的 $f^C(x, y)$, 然后就可以得到复原的图像。

4 颜色恒常性

颜色恒常性是将图像中未知的光源矫正为适合人们视觉的光源 (通常是白光), 以改善图像的视觉效果。颜色恒常性分为两个步骤: 首先估计图像拍摄的光源; 其次, 按照已知的转化模式对图像处理, 就能得到近似在白光光源下的图像。

图像中对光源的估计^[15-16]可以表示如下:

$$L_C(p) = \left(\int f_C^p(x) dx \right)^{\frac{1}{p}} = k e_C \quad (12)$$

其中: $C \in \{R, G, B\}$; k 是一个常数因子; $f_C(x)$ 表示二维图像; $e_C = (e_R, e_G, e_B)^T$ 为源图像中的估计的光源, 是个单位向量。式(12)还可进一步扩展为

$$\left(\int \left| \frac{\partial^n f_C^\sigma(x)}{\partial x^n} \right|^p dx \right)^{\frac{1}{p}} = k e_C^{n, p, \sigma} \quad (13)$$

其中: n 是偏导的阶数; $f_C^\sigma = f_C * G^\sigma$, G^σ 是方差为 σ 的高斯滤波器, $*$ 表示卷积。式(13)可以表示多种颜色恒常性方法: $e^{0, 1, 0}$, 即 $n = 0, p = 1, \sigma = 0$ 时是 Grey-World 方法; $e^{0, \infty, 0}$ 是 White-Patch 方法; $e^{0, p, \sigma}$ 是一般意义的 Grey-World 方法等^[15]。

当图像中的未知光源估计出来后, 采用式(14)将图像进

行转化,则得到的图像就是近似在白光下的图像:

$$f_t = D_{u,t} f_u \quad (14)$$

其中 $D_{u,t}$ 是一个对角阵且满足:

$$(e_{R,t}, e_{G,t}, e_{B,t})^T = \text{diag}(d_1, d_2, d_3) (e_{R,u}, e_{G,u}, e_{B,u})^T \quad (15)$$

其中: $(e_{R,t}, e_{G,t}, e_{B,t})^T$, $(e_{R,u}, e_{G,u}, e_{B,u})^T$ 分别是需要转化成的目标光源和图像估计出来的光源, f_t 和 f_u 分别是处理得到的目标图像和原始图像。目标光源一般是白光,即每个元素的值都是 0.5773。

本文只对非白光的图像进行颜色恒常性处理,即对沙尘影响的图片进行颜色恒常性处理。本文所采用的方法是 Grey-World 方法。

5 仿真实验和分析

为了验证算法的有效性,选择雾天和沙尘图像分别进行处理。实验过程发现,窗口的尺寸不能过小,因为会使去雾、沙尘效果不好;也不能过大,因为会使计算量较大;同时由于大窗口内各处的沙尘和雾的浓度相差很大,固定 β 值得到的处理效果不好。

图1给出了窗口取 100×100 大小,步长取 10, α 取 0.005 11, β_{con} 取 0.57 时本文算法对沙尘(可以看做光源分布不均匀)引起的退化图像处理结果。用文献[9]的方法处理后,图像的亮度值整体变小,即图像变暗,沙尘明显欠处理,大部分被保留。本文的方法则能在保持亮度的基础上较好地去除沙尘。说明本文算法不受图片中光源的影响,能够处理各种不均匀分布光源的退化图像,一般的去雾方法则不适合处理沙尘。由于光源三个颜色通道分布不均衡,降低了图片的视觉效果,为了提高图片的视觉效果,采用颜色恒常性处理,处理结果如图1(d)所示,可以看出颜色恒常性处理得到了较好的视觉效果。

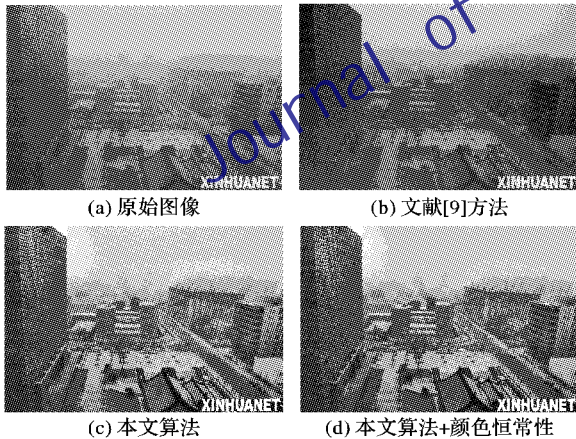


图1 沙尘图像处理结果

为了进一步验证本文算法对雾图像的处理效果,图2给出了雾图像的处理结果,可以看出处理后图像的细节部分得到了很好的还原,图像没有失真,颜色保真度较好。文献[9]的算法在天空部分出现了色偏,颜色失真,而且亮度分布发生改变。本文的算法在天空部分没有出现颜色失真,但同文献[9]一样,天空部分出现随机噪声。文献[9]去雾同沙尘处理一样出现图像亮度总体降低的情况;由于本文算法是基于APEX,采用快速傅里叶变换,处理速度明显高于文献[9]。对图2(a)(图像大小为 1024×768)的去雾处理时间:文献[9]方法用时 478.566 s,本文算法用时 13.587 s。仿真用计算机 CPU 为 Intel T6670,主频 2.2 GHz,仿真平台为 Matlab 7.0,未对程序进行优化。

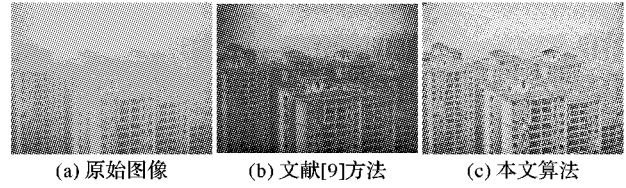


图2 雾图像的处理结果

6 结语

本文深入研究了雾、沙尘等恶劣天气条件下的降质图像的复原方法。为了能够对降质图像有好的复原效果,又能满足处理速度快的要求,将用于图像增强的APEX算法与暗原色先验估计相结合,通过动态估计 β 参数,对不同浓度的沙尘、雾图像,能达到满意的复原效果,而且算法速度快。

参考文献:

- [1] NAMER E, SCHECHNER Y Y. Advanced visibility improvement based on polarization filtered images [C]// Proceedings of SPIE 5888. [S. l.]: SPIE, 2005: 36-45.
- [2] NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Contrast restoration of weather degraded images [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(6): 713-724.
- [3] 芮义斌,李鹏,孙锦涛,等.一种交互式图像去雾方法[J].计算机应用,2006,26(11):2733-2735.
- [4] 沈水文,周志新.基于同态滤波的遥感薄云去除算法[J].强激光与粒子束,2010,22(4):45-48.
- [5] SIOU M-J, ASARI V K. Ratio rule and homomorphic filter for enhancement of digital colour image [J]. Neurocomputing, 2006, 69(7/8/9): 951-958.
- [6] 詹翔,周焰.一种基于局部方差的雾天图像增强算法[J].计算机应用,2007,27(2):510-512.
- [7] TAN R T. Visibility in bad weather from a single image [C]// CVPR 2008: IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2008: 1-8.
- [8] FATTAL R. Single image dehazing [J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): 1-9.
- [9] HE KAIMING, SUN JIAN, TANG XIAOOU. Single image haze removal using dark channel prior [C]// CVPR 2009: IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2009: 1956-1963.
- [10] WANG YAN, WU BO. Improved single image dehazing using dark channel prior [C]// ICIS: 2010 IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems. Piscataway, NJ: IEEE, 2010: 789-792.
- [11] CARR P, HARTLEY R. Improved single image dehazing using geometry [C]// DICTA 09: Digital Image Computing: Techniques and Applications. Piscataway, NJ: IEEE, 2009: 103-110.
- [12] CARASSO A S. The APEX method in image sharpening and the use of low exponent levy stable laws [J]. SIAM Journal on Applied Mathematics, 2002, 63(2): 593-618.
- [13] 孙雷,张艳,徐青,等.改进APEX算法在图像增强中的应用[J].测绘科学技术学报,2007,24(1):51-53.
- [14] ZHANG JIANLIN, ZHANG QIHENG. Blind image restoration using improved APEX method with pre-denoising [C]// ICIG 2007: Fourth International Conference on Image and Graphics. Piscataway, NJ: IEEE, 2007: 164-168.
- [15] GIJSENIJ A, GEVERS T. Color constancy using natural image statistics and scene semantics [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(4): 687-698.
- [16] GIJSENIJ A, GEVERS T. Color constancy using natural image statistics [C]// CVPR 2007: IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2007: 1-8.