

一种暗通道先验结合小波变换的图像去雾优化算法

丁奇安, 徐晓光, 王 珍

(安徽工程大学电气工程学院, 安徽 芜湖 241000)

摘 要:基于暗通道先验的去雾算法是最具有代表性的图像复原算法之一,但仅仅利用暗通道去雾的图像会产生一定程度的颜色失真。针对单幅图像暗通道先验算法造成的图像色彩失真问题,提出了一种基于小波变换的色阶补偿方法。将待去雾图像的低频通道和粗暗通道去雾后图像的高频通道添加合适的权重,之后通过小波变换将待去雾图像与粗暗通道处理过后得到的图像进行多次融合,从而基于原有图像的色阶对暗通道处理造成的颜色失真进行一定程度的补偿。采用信息熵为依据的客观计算机评价,将该算法与其他去雾算法进行比较。仿真结果表明,补偿过后的图像具有较好的观测效果,优于仅采用暗通道先验去雾算法的图像。

关键词:暗通道;去雾算法;小波变换;色阶;图像融合;信息熵

中图分类号:TP391

文献标志码:A

引 言

随着工业化的加快,各个领域的机械化程度也越来越高,比如智能交通系统,卫星遥感和户外监控系统^[1]等。但大部分户外的智能机械操作容易受到环境的影响,如雾霾、阴雨天气等,使得系统所获得的图像存在一定的雾化现象,从而降低机器系统的识别精度,影响系统功能发挥。因此,去除图像的雾化现象,对增强图像的可识别性具有实际意义^[2]。

图像去雾算法大致可以分为基于图像处理的增强方法和基于物理模型的复原方法^[3]。图像增强方法有:全局(局部)直方图均衡化、同态滤波、小波(曲波)变换、Retinex 算法、大气调制传递函数法、局部对比度增强法、

局部方差法等^[4-6]。基于物理模型的复原方法有:建立能量最优化模型、信息消除不确定性法、假设景深已知法、Tan 方法、Fattal 方法^[7]以及基于暗通道补偿的方法^[8]等。

何凯明等人^[9]在2009年的CVPR(Conference on Computer Vision and Pattern Recognition)上提出的暗通道先验算法(He方法),对图像去雾算法具有重要影响,后来的去雾算法大多是从该算法上延伸出来的。然而对于暗通道算法,处理过后的图像有着一些明显的问题,例如边缘块化效应和颜色失真等。针对这些问题,何凯明博士在其文章中提出了一种软抠图(Soft matting)算法^[9],该算法的去雾效果明显优于粗暗通道去雾算法,但是,软抠图算法步骤繁琐,计算时间过长,不具有实际

收稿日期:2018-06-28

基金项目:安徽高校省级自然科学研究重点项目(KJ2014A024)

作者简介:丁奇安(1994-),男,安徽芜湖人,硕士生,主要从事智能信息处理及应用方面的研究,(E-mail)1581765504@qq.com;

徐晓光(1972-),男,安徽明光人,副教授,硕士,主要从事机器人和信息融合方面研究,(E-mail)xuxg@ahpu.edu.cn

意义^[10]。

之后,何凯明博士等人又提出了导向滤波(Guide filter)^[11]来代替软抠图法,大大提高了运算速率。但去雾后的图像仍然存在一定程度上的色彩失真等问题。

针对色彩失真的问题,小波变换可以对图像进行多尺度分解,并将目标分解至不同的频率域,然后对感兴趣的目标域进行提取或修改^[12],通过低频部分与高频部分的组合,可以很好地修正颜色失真现象。

本文提出一种与小波变换结合的像素色阶补偿暗通道去雾算法。由于去雾过后的图像色阶明显低于源图像的色阶,因此采用小波变换,将源图像 I 与去雾后的图像 J 进行图像融合,得到新的图像 $X1$,接着利用图像 $X1$ 与原去雾后的图像 J 进行再次融合得到图像 $X2$,由于源图像 I 的色阶与初次去雾后的图像 J 之间必然存在着一个最佳色阶,因此,通过不断对图像 J 进行融合补偿,将会得到最佳色阶的图像,即最适宜观测的图像,而每次补偿的程度可以通过调节相应的权重设置来实现。

1 暗通道先验算法

一般天气下,空气中都会存在一定程度的大气微粒,成像物体表面上的光被成像设备接收的过程中,由于存在的大气微粒造成光的散射,使得这一过程中传播的光束会不断衰减。Narasimhan 借此提出了大气散射模型^[13]:

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

式中: $I(x)$ 是现有的图像,即待去雾图像; $J(x)$ 是要恢复的无雾图像;参数 A 是全球大气光成分; $t(x)$ 为透射率。现在已知条件为 $I(x)$, 要求目标值 $J(x)$ 。假定全球大气光 A 为已知条件,根据基本代数知识可知,该方程有无数多个解,因此需要添加先验条件才可求解,即需要得到透射率 $t(x)$ 才可以得到目标值 $J(x)$ 。将式(1)变形得到:

$$\frac{I(x)}{A^c} = t(x) \frac{J(x)}{A^c} + 1 - t(x) \quad (2)$$

式中: c 代表 R、G、B 三个通道。

首先假设在每一个成像区域内的 $t(x)$ 为常数,将其定义为 $\tilde{t}(x)$, 并且 A 的值已经在初始情况下给定,然后对式(2)两边求两次最小运算:

$$\min_{y \in \Omega(x)} \left[\min_c \frac{I(y)}{A^c} \right] = \quad (3)$$

$$\tilde{t}(x) \min_{y \in \Omega(x)} \left[\min_c \frac{J(y)}{A^c} \right] + 1 - \tilde{t}(x)$$

式中: J 为要得到的无雾图像,根据暗原色先验原理,有:

$$J^{dark}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} \left[\min_c J^c(y) \right] = 0 \quad (4)$$

由此可以推导出:

$$\min_{y \in \Omega(x)} \left[\min_c \frac{J(y)}{A^c} \right] = 0 \quad (5)$$

把式(5)代入式(1),得到:

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

这就是透视率 $\tilde{t}(x)$ 的预估值。

在现实生活中,即使是天气状况良好,空气中也必然存在着一些颗粒,因此当人们看向远处时还是能感觉到雾的影响。除此之外,由于雾的存在可以让人们感受到景深的存在,所以在去雾的时候有必要保留一定程度的“雾”,可以通过在式(6)中引入一个在 $[0, 1]$ 之间的系数来实现:

$$\tilde{t}(x) = 1 - \omega \min_{y \in \Omega(x)} \left[\min_c \frac{I(y)}{A^c} \right] \quad (7)$$

对于式中系数 ω , 何凯明博士在其算法中经过多次对比实验,取 $\omega = 0.95$ 。

上述推导都是在假设全球大气光 A 是已知的条件下进行的。实际应用中,可以借助暗通道图从有雾图像中来求取当前图片对应的 A 值。其过程为:(1)由于图像中大气光的亮度值一般较高,但是图像中亮度值最高的点也可能为白色汽车或白色建筑等物体,所以从暗通道中的图像提取最亮的前 0.1% 的像素;(2)在待去雾图像 I 中找出对应位置上的最高亮点的值,并将它作为 A 的值。至此,就可以进行无雾图像的恢复了。考虑到当透射率 t 很小时,会使得 J 偏大,这会让图像整体向白场过渡,因此可以设置一个合理的阈值 t_0 , 当 t 小于 t_0 时,令 $t = t_0$, 因此,图像的最终恢复公式为:

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max[t(x), t_0]} + A \quad (8)$$

本文取 $t_0 = 0.1$ 。

为了使 $\tilde{t}(x)$ 的值更加细腻,可以采用导向滤波对

该值进行优化^[14]。

2 小波变换的图像融合

对于小波变换的图像融合,此处采用哈尔(Haar)小波做快速变换。首先对图像先“逐行”作一维小波变换,分解为 LL 、 LH 、 HL 、 HH 四个分量。 L 和 H 分别表示低通和高通滤波输出。相应地,二维尺度函数为 $\varphi(x,y) = \varphi(x)\varphi(y)$ 。二维小波函数有3个,对应不同方向上的高通和低通滤波特性:

$$\begin{cases} \varphi^1(x,y) = \varphi(x)\varphi(y), LH \\ \varphi^2(x,y) = \varphi(x)\varphi(y), HL \\ \varphi^3(x,y) = \varphi(x)\varphi(y), HH \end{cases} \quad (9)$$

分解的结果在 2^k 层次有 $A_k f$ (逼近)以及3个细节信号: $D_k^1 f$ 、 $D_k^2 f$ 、 $D_k^3 f$,所以每“上”一层,近似图像分解为4个分量。若原图像为 A_0 ,分解总层数为 k ,则共有 $3k+1$ 幅子图像。分解过程可以表示为:

$$A_{k+1} f \rightarrow (A_k f, (D_k^1 f, D_k^2 f, D_k^3 f)) \quad (10)$$

合成过程可以表示为:

$$A_{k+1} f = A_k f + D_k^1 f + D_k^2 f + D_k^3 f \quad (11)$$

图像信号的快速小波分解图与合成图如图1和图2所示。

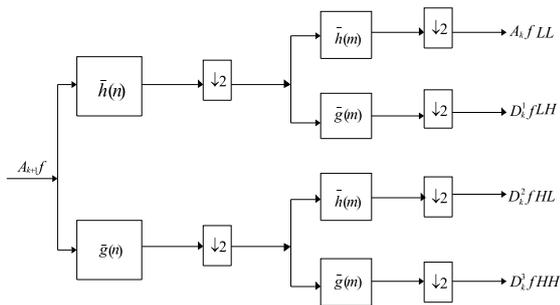


图1 图像信号快速小波分解图

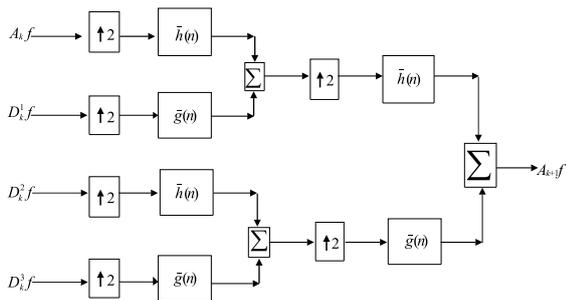


图2 图像信号快速小波合成图

3 图像去雾处理优化

3.1 导向滤波暗通道先验去雾方法

对源图像进行暗通道去雾的基本流程为:

(1) 首先找出待去雾图像(图3(a))中每个像素的RGB三通道的最小值,根据最小值形成暗通道图像。形成的暗通道图如图3(b)所示。

(2) 从所求得的暗通道图中按照亮度的大小,提取图像像素中最亮的前0.1%。然后,在原始有雾图像 I 中寻找具有最高亮点的对应位置上值,并以此作为 A 的值。

(3) 在得到 $I(x)$ 和 A 后,利用式(7)求取透视率 $\tilde{t}(x)$ 的预估值。

(4) 用导向滤波对求得的透视率 $\tilde{t}(x)$ 进行优化,如图3(c)所示。

(5) 利用公式(8)求取 $J(x)$,求得去雾图像,如图3(d)所示。



图3 基本去雾图像组图

对比图3(a)与图3(d)可以很明显发现,图3(d)的清晰度高于图3(a),但是图3(d)存在一定的颜色失真。因此仅仅通过导向滤波暗通道去雾方法并不能得到理想的图像信息。

假设源图像的像素色阶为 PL ,导向滤波去雾后的图像像素色阶为 PLx ,两幅图像的像素色阶差为 $\Delta = PL - PLx$,而在 Δ 中必然存在最佳的色阶差,因此可以通过不断对去雾后的图像像素进行色阶补偿来对图像进行优化。但是,简单的像素色阶加强并不能使图像像素色阶达到最优。因此,可以基于源图像对去雾图像进

行色阶补偿,使去雾后的图像像素色阶变得更加适应观测。像素色阶补偿流程如图4所示。

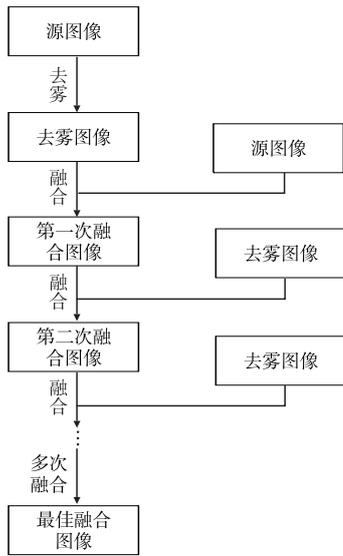


图4 像素色阶补偿流程

3.2 小波变换图像融合

在小波变换的图像融合过程中,图像的低频部表现的是图像的概貌和平均特性,高频部分反应的是图像的细节特性^[15],如图像的边缘、区域边界等。初次图像融合的流程如图5所示。

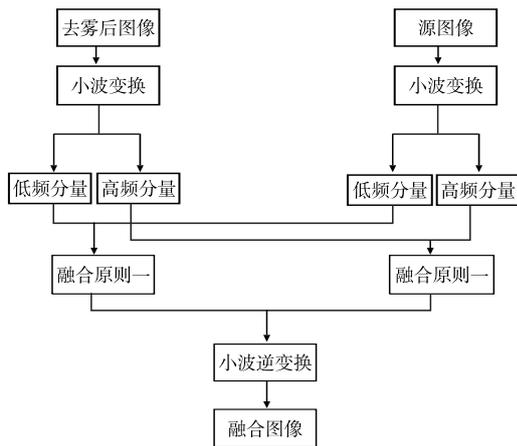


图5 小波变换的图像融合示意图

由于通过一次融合并不一定能立即得到最优的像素色阶,因此可以进行多次融合来进行不断优化。假设源图像的像素色阶 PL , 导向滤波去雾后的图像像素色阶为 PLx , 两幅图像的像素色阶差为 $\Delta = PL - PLx$, 而在 Δ 中必然存在最佳的色阶差。在第一次融合后,利用融合得到的图像 $X1$ 与去雾图像 J 进行再次融合得到二次融合图像 $X2$, 再利用二次融合图像 $X2$ 与去雾图像

J 进行三次融合得到三次融合图像 $X3$, 依此类推,经过多次融合,直至获取满意的像素色阶。

当进行第一次融合时,融合后得到图像 $X1$ 的像素色阶 $PLx_1 = PLx + \Delta_1$, 二次融合时,二次融合后得到图像 $X2$ 的像素色阶 $PLx_2 = PLx + \Delta_2$ 。由于每次的像素色阶补偿为 $\Delta_n (n = 1, 2, 3 \dots)$, 那么补偿后的去雾图像像素色阶为:

$$PLx_n = PLx + \Delta_n, n = 1, 2, 3 \dots \quad (12)$$

由于在融合过程中对源图像进行加权大于1, 因此,在进行多次融合后, $\lim_{n \rightarrow \infty} \Delta_n = 0$, 则对式(12)取极限可以得到 $\lim_{n \rightarrow \infty} PLx_n = PLx$ 。因而理论上可以取到足够小的色阶来对去雾图像进行像素色阶补偿。针对3幅雾化程度不同的图像进行仿真,均取得了良好的效果,结果如图6所示。

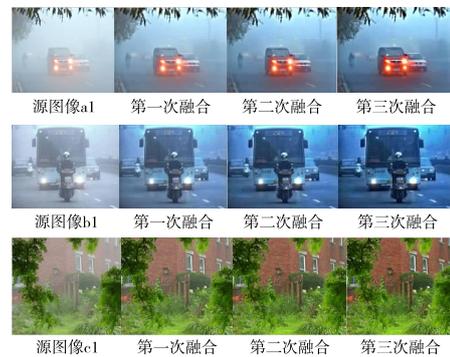


图6 三组处理图像

3.3 图像质量的客观评价

通过对多幅图像的融合可以发现,融合过后的图像清晰度高于源图像,且颜色失真度小于基本去雾后的图像。由于仅仅依据人的主观判断会产生一定的误差,因此,需要通过对实验过程中的多幅图像进行客观的评价。客观评价方法是由计算机根据一定算法计算得到图像的质量指标^[16], 根据评价时是否需要参考图像又可以分为全参考(Full Reference, FR)、半参考(部分参考)(Reduced Reference, RR)和无参考(No Reference, NR)等三类评价方法。全参考方法(FR)在评价失真图像时,需要提供一个无失真的原始图像,经过对二者的对比,得到一个对失真图像的评价结果,如信噪比(Signal Noise Ratio, SNR)、峰值信噪比(Peak Signal Noise Ratio, PSNR)、均方误差(Mean Square Error, MSE)、平均结构相似度(Mean Structure Similarity, MSSIM)视觉信息保真

度(Visual Information Fidelity, VIF)、视觉信噪比 (Visual Signal-to-Noise Ratio, VSPR)、最显著失真(Most Apparent Distortion, MAD)、图像差异预测 (Image Difference Prediction, IDP)等^[17]。全参考方法与半参考方法均需要提供全部或部分原图像特征作为评价依据,而本文选取的源图像样本大部分无法提供原图样本,因此选取无参考方法对图像进行评价。由于信息熵评价方法与人的主观感受具有较好的一致性,在某些条件下甚至比一些全参考评价算法更好^[18],因此本文选取无参考的信息熵方法作为客观评价标准^[19]。

图像的熵值是图像信息量的表示方法之一,其定义为:

$$E = - \sum_{i=0}^{L-1} p_i \log p_i \quad (13)$$

式中: p_i 表示图像中灰度值为 i 的像素数与总像素数之比; L 为图像的总灰度级。熵值越大,说明图像灰度越均匀,信息量越丰富。对于图 6 给出的图像处理中各环节的熵值计算结果见表 1。从表 1 可知,随着融合的深入,图像灰度越来越均匀。

表 1 本文方法图像熵值变化情况

	源图	第一次融合	第二次融合	第三次融合
图像 a1	6. 7460	7. 2700	7. 4514	7. 5449
图像 b1	6. 9299	7. 1539	7. 2598	7. 3039
图像 c1	6. 6852	6. 7026	7. 0936	7. 0945

为了更加准确地说明,将本文算法所用图像进行融合至理想状态,与 He 方法、Fattal 方法和边界约束法^[20]进行比较,仿真结果如图 7 所示,对应熵值计算结果见表 2。

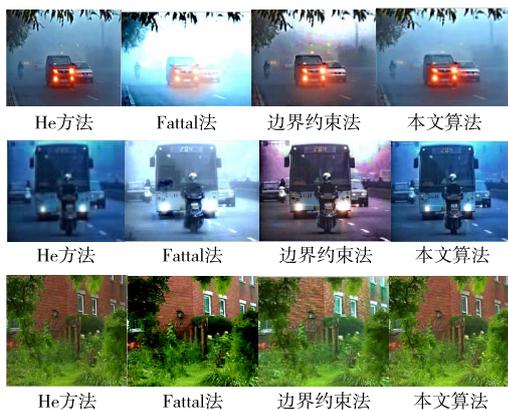


图 7 不同算法对比图

表 2 不同方法图像熵值对比

	源图	He 方法	Fattal 方法	边界约束法	本文算法
图像 a1	6. 7460	7. 4336	6. 9866	7. 3612	7. 5737
图像 b1	6. 9299	7. 1040	5. 7969	7. 4465	7. 3227
图像 c1	6. 6852	6. 8622	7. 1282	7. 0152	7. 1042

从图 7 可以看出,本文去雾算法所优化的图片在去雾效果和颜色修正上具有较好的效果。从表 2 可知,本文算法所得到的图像在大部分情况下其信息熵要大于 He 方法、Fattal 方法和边界约束法,整体上来说,具有更好的观测效果。

4 结 论

本文提出了基于暗通道先验与小波变换结合的去雾方法。首先通过暗通道先验去雾法对源图像进行去雾,然后利用小波变换对源图像与去雾后的图像进行加权融合,之后再利用去雾后的图像与一次融合后的图像进行小波变换加权融合得到新的二次融合图像,通过反复融合,调整权重,可以得到最优的像素色阶。仿真结果表明,改进去雾方法所得到的图像质量优于 He 等算法的效果,具有更好地观测效果。

参 考 文 献:

- [1] 陆健强,王卫星,胡子昂,等.基于改进暗通道先验算法的农田视频实时去雾清晰化系统[J].农业工程学报,2016,32(10):143-148.
- [2] 李云峰,张彭悦.基于高亮区域自适应处理的监控图像去雾算法[J].计算机应用与软件,2018,35(3):209-214.
- [3] 王超.基于图像增强的几种雾天图像去雾算法[J].自动化应用,2018(2):70,80.
- [4] 张宝山,杨燕,陈高科,等.结合直方图均衡化和暗通道先验的去雾算法[J].传感器与微系统,2018,37(3):148-152.
- [5] 刘万军,赵庆国,曲海成.变差函数和形态学滤波的图像去雾算法[J].中国图象图形学报,2016,21(12):1610-1622.
- [6] 杨爱萍,白煌煌.基于 Retinex 理论和暗通道先验的夜间图像去雾算法[J].激光与光电子学进展,2017,

- 54(4):141-147.
- [7] FATTAL R. Single image dehazing [C]//Proceeding of SIGGRAPH '08 ACM SIGGRAPH, California, August 11-15,2008.doi > 10.1145/1360612.1360671.ACM,2008.
- [8] 孙红光,房超,张慧杰,等.一种自适应基于暗通道先验的去雾方法[J].吉林大学学报:理学版,2012,50(5): 987-992.
- [9] HE K, SUN J, TANG X. Single image haze removal using Dark Channel Prior[J].IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2011, 33 (12): 2341-2353.
- [10] 方雯,刘秉瀚.多尺度暗通道先验去雾算法[J].中国体视学与图像分析,2013,18(3):230-237.
- [11] HE K, SUN J, TANG X. Guided image filtering [C]// Proceedings of the 11th European conference on Computer vision, Heraklion, Crete, Greece, September 5-11, 2010:1-14.
- [12] 叶明,唐敦兵.区域清晰度的小波变换图像融合算法研究[J].电子测量与仪器学报,2015,29(9):1328-1333.
- [13] NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Vision and the atmosphere [J]. International Journal of Computer Vision, 2002,48(3):233-254.
- [14] 王浩然.采用快速导向滤波的暗通道先验去雾算法的研究与实现[J].数字技术与应用,2015(11): 122-123.
- [15] JIAN M, DONG J, ZHANG Y. Image fusion based on wavelet transform [C]//Proceedings of Eighth Acis International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking, and Parallel/distributed Computing (SNPD 2007), Qingdao, July 30-August 1, 2007:713-718.
- [16] 王志明.无参考图像质量评价综述[J].自动化学报, 2015,41(6):1062-1079.
- [17] 郭璠,蔡自兴.图像去雾算法清晰化效果客观评价方法[J].自动化学报,2012,38(9):1410-1419.
- [18] 郑加苏.基于图像信息熵的无参考图像质量评估算法的研究[D].北京:北京交通大学,2015.
- [19] 李佳童,章毓晋.图像去雾算法的改进和主客观性能评价[J].光学精密工程,2017,25(3):735-741.
- [20] MENG G, WANG Y, DUAN J, et al. Efficient image dehazing with boundary constraint and contextual regularization [C]//Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Computer Vision, Washington, DC, USA, December 1-8, 2014:617-624.

The Image Optimization Algorithm Based on Dark Channel Prior and Wavelet Transform

DING Qi'an, XU Xiaoguang, WANG Zhen

(College of Electrical Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China)

Abstract: The algorithm based on dark channel priori is one of the most representative image restoration algorithms, but only using the dark channel to defogging the image will produce a certain degree of color distortion. In order to solve the problem of image color distortion caused by the prior algorithm of single image dark channel, a color order compensation method based on wavelet transform is proposed. After making the low-frequency passage of the fog image about the dark passage to the fog and the high-frequency channels of the image to with the right weight, and through the little wave transformation to the image of the fog image have a lot of fusion with the thick-dark-path image. Based on the color order of the original image, a certain amount of compensate to the color distortion of the dark channel is done. What's more, comparison is carried out with other defogging algorithms based on the objective computer evaluation of comentropy. The simulation results show that the image effect after compensation has good observation effect, which is better than the image using only the dark channel prior defogging algorithm.

Key words: dark channel; defog algorithm; wavelet transform; color level; image fusion; comentropy