

暗原先验算法在天空区域的处理与改进^{*}

顾浩 王敬东 孙震 茅天诒

(南京航空航天大学 自动化学院 南京 211106)

摘 要: 暗原先验算法在天空区域去雾过程中会造成噪声过度放大和晕环现象,针对这个问题提出了依据天空隶属系数调整天空区域透射率的方法。求得有雾图像相应位置天空隶属度系数,自适应改变透射率调整幅度,并利用二次函数特性,对隶属度小值区域进行压缩,减弱近景透射率有效区域的调整,最后通过大气散射模型得到复原图像。大量实验结果表明,该方法得到的复原图像清晰自然,特别是在天空区域,保留部分浓雾区域去雾程度的同时抑制了天空区域的噪声和晕环现象,取得了很好的去雾效果。相对暗原先验算法,改进算法在天空区域得到更加准确的透射率估计,复原图像效果更佳。

关键词: 暗原先验;隶属系数;自适应;天空区域;晕环

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

Processing and improvement of the dark channel prior in the sky region

Gu Hao Wang Jingdong Sun Zhen Mao Tianyi

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: The method based on dark channel prior will cause excessive noise and halo phenomenon in the region of sky. To solve this problem, a method of adjusting the transmission rate of the sky region is proposed based on the credibility of the sky. To obtain the credibility coefficient of the corresponding position of the fog image, Changing the adjustment range of transmissivity adaptively, and using characteristic of the quadratic function to change the map of the credibility coefficient, then the haze-free image can be recovered by the atmosphere scattering model. A lot of experimental results show that the recovered image by the proposed method is clear and natural, especially in the sky region. Retaining the degree of haze remove in dense fog area and suppressing the noise and halo phenomenon in the region of sky. The improved method proposed in this paper can obtain better effect than the method based on dark channel prior in the processing of haze removal.

Keywords: dark channel prior; membership coefficient; adaptive; sky region; halo

1 引 言

雾是由接近地面的大气中的微小水滴或冰晶构成,其形成时,由于降温或增湿使空气达到饱和或接近饱和状态而形成的水滴或冰晶悬浮在空气中,会导致照射在其上的电磁波被吸收、散射或折射而造成衰减。

雾天图像的清晰化在计算机视觉领域一直是个热点问题。近年来,单幅图像去雾研究^[1-4]也有很大进展。何凯明等人^[1]提出了“暗通道”概念,即在无雾户外图像的非天空区域的任一局部窗口内,所有像素点 RGB 通道中的最小值接近于 0。该方法去雾效果较为理想,在单幅图像去雾领域得到了广泛应用,然而天空区域却不满足暗原先验规律。彭文竹^[5]利用边缘检测和最佳正太分布分割天空区域,并

估计大气光值和透射率,达到了很好的去雾效果,但是此方法过于依赖天空分割的准确性,适用性较差。王一帆等人^[6]在暗原先验的基础上对天空区域的透射率进行弱化去雾,能抑制天空区域的噪声放大,但是单一的灰度值划分天空与非天空区域很容易出现错误。雷琴等人^[7]利用改进的均值漂移算法分割天空区域,并对天空区域进行限制对比度直方图均衡化去雾,对非天空区域进行暗原先验算法复原。此方法很好地抑制天空区域噪声,同时增强对比度,但是由于依赖分割算法的准确性,分割错误会导致明显的图像断层现象。

本文提出了利用天空隶属度系数进行天空区域的透射率调整,提高天空区域透射率的同时抑制远景浓雾区域透射率的增加,使得复原图像抑制天空区域噪声放大和晕环

收稿日期:2015-12

^{*} 基金项目:中央高校基本科研业务专项资金(NZ2015202)资助项目

产生的同时保持了远景浓雾区域的去雾强度。

2 暗原先验算法对天空区域的处理

2.1 天空区域噪声与晕环现象分析

影响透射率的主要因素是大气中的粒子对光线的散射^[2]。文献[1]中给出了透射率与景深关系的公式:

$$t = e^{-\beta(\lambda)d} \quad (1)$$

式中:忽略波长 λ 的影响, β 为常数,透射率与景深 d 成指数关系。那么,理想情况下,透射率值的大小应该随着景深增加而减少,远景处的天空区域是透射率最小的区域,但是实验发现,远景天空区域的透射率过小会导致噪声被过度放大,导致复原的无雾图像容易出现噪点和晕环现象,如图1所示。



图1 晕环与噪点现象

暗原先验算法中用于求取景物辐照度的公式如下:

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max(t(x), t_0)} + A \quad (2)$$

式中: t_0 为阈值(文献[1]中取0.1),防止透射率 $\tilde{t}(x)$ 太小造成噪声过度放大,影响去雾效果。如式(2)所示,透射率 t 的估值直接影响到复原过程中映射关系的斜率大小。 t 值估计错误会导致复原图像灰度值超出 $(0, 255)$ 范围,产生截断误差^[8],如果复原图像低于0的截断误差较大,图像整体偏暗,需要后期灰度调整;如果高于255的截断误差较大,导致高灰度区域过亮,但由于这部分区域大多属于天空或者白色物体,对于人眼并不会会有太大影响。

噪声和晕环现象出现在透射率 t 很小的地方(天空区域)。图1中,天空区域噪声被过度放大,假设 $t = 0.1$ 时,噪声将放大10倍,如果由于噪声影响灰度值有10的偏差,那么复原图像就会变化100,这样的灰度变化范围还是很大,视觉上也很容易看出来,所以复原图像在透射率过小的区域噪点明显。晕环现象如图1红(右)、蓝(左)矩形框所示,红色矩形框处产生晕环由于原图在此处灰度值有一个小的变化过渡,由于透射率过小,导致这种过渡被过度放大,视觉上产生明显的环状突变;蓝色矩形框处产生晕环是由于透

射率很小,由式(2)可知, $I < A$ 时,复原图像灰度值为 A 减去一个偏移量,复原图像灰度值减小。 $I > A$ 时,复原图像灰度值为 A 加上一个偏移量,复原图像灰度值增大,因为 A 值很大,复原图像灰度值很有可能大于255并且大于255会被截断,实际灰度变化范围小($A < J \leq 255$),所以人眼看就是一片高亮区域。图中蓝色矩形框处的晕环就是 $I < A$ 与 $I > A$ 两个区域复原过程不同造成的。

2.2 暗原先验算法对天空区域的处理

均值滤波时比较常用的随机噪声去除方法,可以将文献[8]方法作为图像预处理过程。文献[1]中,为了防止噪声过度放大,将透射率估计设置阈值 t_0 (一般取0.1),以此限定噪声的放大。但是实际处理时发现,很多网络上的有雾图像并不能达到很好的清晰度,天空区域存在噪声,但是图像的预处理去噪过程一方面增加去雾过程的计算量,另一方面去噪的过程也会减弱景物本身的边缘和细节特征。

图2中列出了不同阈值 t_0 对天空区域去雾所带来的影响,图2(a)~(d)依次对应 $t_0 = 0$ 、 $t_0 = 0.1$ 、 $t_0 = 0.2$ 、 $t_0 = 0.3$ 时,图像去雾的效果。其中图(b)是文献[1]中推荐的值,但是实际应用中发现,天空区域的噪声还是被过度放大了并伴有晕环产生;图(c)和图(d)选择了稍大的阈值,在图像复原过程中限定了天空区域的最小透射率分别为0.2和0.3,这样的透射率很好的抑制了噪声的放大,但是阈值 t_0 越大,意味着远景浓雾区域的透射率也被限制最小透射率,反而减小了去雾力度。而希望浓雾区域要增大去雾力度,所以在阈值的选取上,暗原先验算法还需要改进。

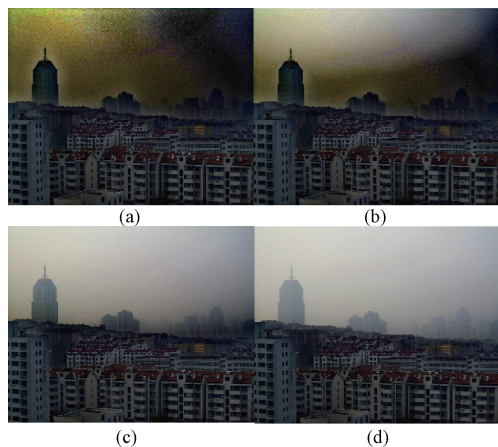


图2 不同阈值下的去雾效果对比

3 改进算法

上一节中分析了暗原先验算法中对天空区域透射率的处理采用固定阈值,限定透射率最小值防止噪声过度放大和抑制晕环产生。但是阈值过小,很有可能会在图像去雾中产生明显噪点;阈值过大,虽然可以保证噪点不被过度放大,但是却削弱了部分浓雾区域的去雾强度,影响最终去雾效果。

利于天空隶属度系数标识天空区域,自适应调整天空

区域透射率大小,保证远景浓雾区域去雾程度的同时尽可能地抑制噪声放大和晕环现象的产生。

3.1 天空隶属度

天空区域不符合暗原先验规律,通过暗原先验算法求得的透射率实际上偏小,导致噪声过度放大等情况产生。本文通过检测检测天空区域,给定图像各位置天空隶属系数,依据系数大小对天空透射率进行调整,从而避免对原暗原先验算法对远景浓雾区域的去雾效果的影响。

图像中的天空区域具有一般亮度高、灰度值变化缓慢等特点,所以利用这两个特点可以计算图像某个位置处的天空隶属系数得到天空隶属度图。具体过程如下:

1)对图像 I 计算邻域方差,得到邻域方差 $D(x)$,如式(3)所示。

$$D(x) = E([I(x) - E(x)]^2) = E(x^2) - E^2(x) \quad (3)$$

邻域方差可以反应图像中局部像素变化程度,邻域方差越小是天空区域的可能性越大。

2)对邻域方差进行归一化;

3)计算图像三通道乘积:

$$I_{rgb} = I_r \cdot I_g \cdot I_b \quad (4)$$

4)将归一化的邻域方差与三通道乘积做乘,再乘上一个高度信息,得到天空隶属系数:

$$H_{sky} = 1 - row/height \quad (5)$$

$$C_s = H_{sky} \cdot I_{rgb} \cdot [1 - D(x)]/M \quad (6)$$

式中: row 为像素位置所在的行数, $height$ 为图像的高度, H_{sky} 为像素位置处的高度信息, M 为调整系数,使得 $0 \leq C_s \leq 1$,由此得到天空隶属度图。通过隶属系数调整对应像素位置处的透射率,以此抑制噪点和晕环。

如图3矩形框所示,当图像中存在大面积白色物体时,也同时具备本文中用于检测天空的特性,所以也会错误的标识成天空区域。但是,文献[1]中算法在去雾时,大面积白色区域依然会由于暗通道估计不准确导致透射率估计偏低,而由于高度信息的存在,天空区域的隶属度系数要稍大于近景白色物体隶属度系数,所以,利用天空隶属度系数进行透射率调整时,白色物体处的透射率调整幅度会小于天空区域,这点也是符合实际情况的,并不会对大面积白色物体产生负面影响。



原图

天空隶属度图

图3 天空隶属度

3.2 自适应透射率调整

希望天空区域的透射率得到大的提升,以此弥补由于暗通道求取错误导致的透射率过小(接近0),同时,也能更好地抑制噪声放大与晕环现象,天空隶属系数越大,调整的幅度越大。但是,如图3所示,部分前景处的隶属系数只是一个小值(大于0),那么整体调整时,原来暗通道值准确的位置就会被加上一个值,使得误差增大,导致前景区域去雾程度降低。所以通过二次函数的特性,将小值区域进行压缩,暗原有效区域(近景区域)减少调整量;大值区域进行拉伸,暗原失效区域(天空区域)增大天空与远景浓雾区域的区分度,保证天空区域透射率增大的同时抑制浓雾区域透射率的调整。

所以定义调整系数 D 满足以下规则:

$$D = C_s \cdot C_s \cdot 0.3 \quad (7)$$

式(7)可以保证隶属系数较小的区域透射率只有很小的增加,而在隶属系数大的区域透射率能够有足够大的增加,常数0.3是直接限制天空区域透射率时用到的常数值。

与文献[1]直接限制透射率对比如图4所示。



(a)

(b)

图4 透射率调整对比

图4(a)为直接限制透射率 $t \geq 0.3$,图(b)为本文方法调整的传输图。通过对比发现,远景处的景物由于透射率较小,很容易被直接限制透射率的方法限制,导致远景去雾不够彻底或者没有去雾,而通过天空隶属系数的自适应调整,可以很好的保留远景深处的景物透射率,达到很好的去雾效果。

4 实验结果分析

为验证算法的有效性和可靠性,进行了大量对比实验。

如图5所示,图5(a)、(d)和(g)为原图,(b)、(e)和(h)为暗原先验^[1,8]去雾效果图,(c)、(f)和(i)为本文透射率调整后的去雾效果图。矩形框标识出了部分去雾细节,如图6所示,图6(a)、(c)和(e)为暗原先验^[1,8]去雾细节,(b)、(d)和(f)为本文方法去雾细节。实验发现,暗原先验算法与本文算法都能很好地实现雾天降质图像的清晰化,天空区域的噪声和晕环得到了很好的抑制,去雾后的图像对比度有明显提升。本文算法对比暗原先验算法,暗原先验去雾会减小远景区域去雾程度来抑制噪声放大和晕环现象,而本文中提到的方法可以很好的兼顾浓雾区域去雾效果和抑制天空处的噪声和晕环现象。

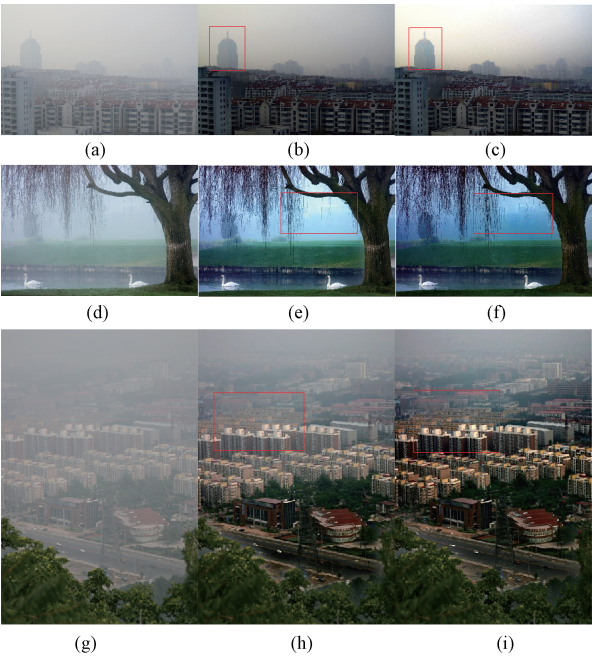


图5 去雾效果对比

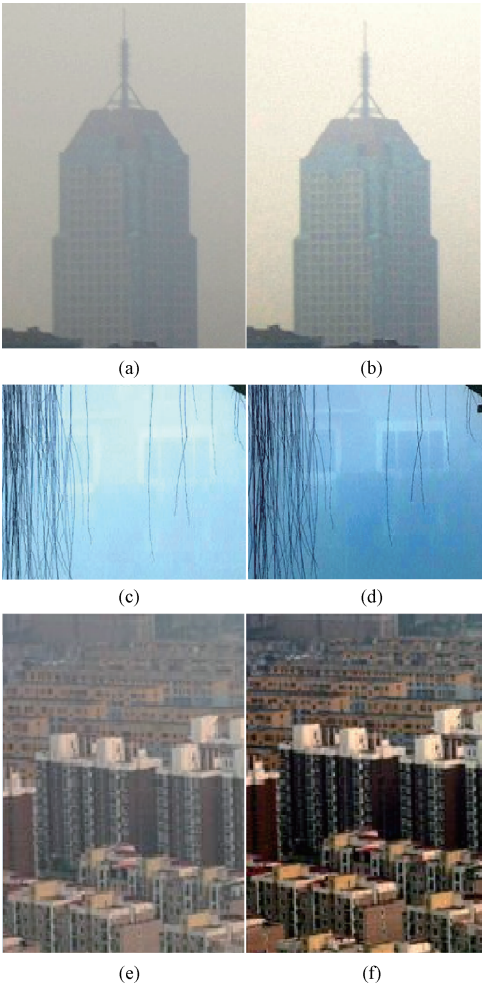


图6 部分细节对比

同时,客观上本文采用空间频率^[9-10]和可见边缘比^[11-12]两个指标评价来说明去雾效果。空间频率描述了图像在空域内的总体活跃度,可见边缘比为去雾后图像可见边缘数与去雾前图像可见边缘数的比值。

如表1所示,本文算法在空间频率指标与新增可见边缘比上较暗原先验算法都有所增加,说明本文算法针对天空区域的算法改进较暗原先验算法效果更好,不仅可以抑制天空噪声放大和晕环产生,还保留浓雾区域的去雾强度,此客观指标分析也验证了图6的视觉效果比对,说明了本文算法在远景浓雾区域以及天空区域的处理上要优于原始的暗原先验去雾算法。

表1 各去雾方法客观评价

	图像	空间频率	可见边缘	新增可见边缘比/(%)
原图	图5(a)	5.41	49 318	—
	图5(d)	16.6	155 800	—
	图5(g)	8.84	50 062	—
暗原法	图5(b)	8.07	84 493	71.32
	图5(e)	30.09	221 377	42.10
	图5(h)	18.18	79 916	59.63
本文算法	图5(c)	10.9	86 553	75.70
	图5(f)	30.55	225 556	44.77
	图5(i)	24.52	86 222	72.23

5 结 论

暗原先验算法一经提出就得到了广泛应用,但是其在暗原失效区域的去雾效果一直不够理想。本文提出利用天空隶属度系数指导天空区域的透射率调整避免直接分割将会带来的断层效应,使得调整后的透射率平滑过渡,保留浓雾区域去雾效果的同时,将天空区域的透射率增大,避免了噪声被过度放大,再加上更准确大气光值估计,使得最终去雾图像的不会出现晕环效应。

针对天空区域的特点,对暗原先验算法天空区域的处理做了改进,效果明显,但是也存在一定局限性,天空隶属度的估计中加入了高度信息,默认了有雾图像天空在图像的上半部分,同时由于景深突变边缘的影响,隶属度系数并不是接近于0,调整过程中有可能会增大近景处的透射率,同时也就降低了去雾程度,本文虽然利用二次函数特性,压缩近景处透射率增加量,但还是因为全局的透射率调整而使原来近景处较为准确的透射率加上了一个偏移量,降低了去雾程度。

参考文献

[1] HE K, SUN J, TANG X. Single image haze removal usingdark channel prior [C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Miami: IEEE Press, 2009:1956-1963. (下转第119页)