

基于雾气深度的快速单幅图像去雾算法

范风兵^{1a,2}, 张红英^{1a,2}, 吴斌^{1a,2}, 吴亚东^{1b}

(1. 西南科技大学 a. 信息工程学院, b. 计算机科学与技术学院, 四川 绵阳 621010; 2. 特殊环境机器人技术四川省重点实验室(西南科技大学), 四川 绵阳 621010)

摘要:针对目前去雾算法复杂度高以及复原的图像视觉效果差等问题,提出了一种新颖的去雾方法。首先,对图像的三通道进行高斯低通滤波获取图像的低频信息(亮度分量)后求平均,结合场景深度,估计出雾气深度图,获得的大气光值 A 比暗通道图中的最大值作为大气光值 A 具有更强的鲁棒性;其次,经过中值滤波,去噪的同时也维持了图像的边缘,取得较为理想的透射率;最后,通过大气散射模型反演逆过程,获得无雾图像。分析表明:所设计算法的时间复杂度较低、速度快,具有较高的鲁棒性,大大提高了图像的对比度,并取得了较好的清晰化效果。

关键词:图像去雾;大气散射模型;鲁棒性;雾气深度

中图分类号:P391.41

文献标志码:A

引言

由于雾天环境中悬浮颗粒的散射作用,使得雾天拍摄的图像质量严重下降,给人们的生活、交通安全、室外监控、卫星导航等领域带来了极大地影响。对于降质图像如何清晰化处理的问题目前已成为研究领域的热点,在实际应用中有着重要的意义。

目前的雾天图像复原方法有很多,大致可以分为两大类:基于图像增强方法和基于物理模型的方法。基于图像增强的方法是传统的图像增强方法,主要从图像视觉上去增强对比度,未从根本上彻底去雾,如 Retinex^[1],局部方差对比度增强^[2],直方图均衡化^[3]等;基于物理模型的方法主要是建立了雾天图像的退化模型,反演逆过程,获得无雾图像,从而改善雾天图像的质量。Tan^[4]等统计出无雾图像比雾天图像有较高的对比度,通过局部区域最大复原对比度,但结果颜色显得过饱和而失真。Fattal^[5]等假设在媒介的传播和场景表面阴影是局

部不相关性,估计出场景的反照率,再得出透射率,但在浓雾条件下该假设不成立,还原的图像容易失真。He^[6]等提出了暗原色先验理论,通过求取暗通道,估计透射率还原无雾图像,其容易产生块效应,虽然通过软抠图解决了该问题,但其算法复杂度较高,耗时太多,之后又提出导向滤波加速^[7]去雾,但效率仍不理想。孙小明等^[8]采用了分块方法估计透射率,降低了算法复杂度,同时根据大气光值和暗通道差值绝对值判断雾图中是否含有明亮区域,有效地避免了白色物体的干扰。禹晶等^[9]通过对大气光照进行白平衡,从而简化大气散射模型,利用快速双边滤波方法估计大气耗散函数,进而恢复场景反照率(无雾图像),降低了算法复杂度,加速了处理。Kim 等^[10]发现图像对比度过增强导致像素值范围会溢出,损失一部分有效信息,因此提出了一种成本代价函数,联合了对比度和信息缺失度,得到更精准的透射率图,有效地保持了图像细节。刘言等^[13]通过改进的半逆法获得大气光值 A , 用图像的边缘信息和景深获取了大气光

收稿日期:2016-01-20

基金项目:四川省科技厅科技支撑计划(2015GZ0212);中国科学院西部之光人才培养计划项目(科发人教字(2012)179号);特殊环境机器人技术四川省重点实验室开放基金资助项目(13zxtk05)

作者简介:范风兵(1990-),男,江苏淮安人,硕士生,主要从事图像处理、模式识别等方面的研究,(E-mail)f498030160@163.com;

张红英(1976-),女,四川德阳人,教授,博士,主要从事图像分析与处理、运动目标检测与跟踪方面的研究,(E-mail)zhy0838@163.com

雾,取得了一定的去雾效果。梁增龔等^[14]利用三个颜色通道的主分量选取最小值构成最小重构映射,估计出大气光值 A 及透射率,获得最后的无雾图像。

本文通过大气散射模型,提出了一种较为新颖的方法:从获取雾天图像的亮度分量,再结合场景深度,估计出雾气深度图,在此基础上求得的大气光值 A 更为准确,并进行中值滤波,取得较为理想的透射率 $\tilde{t}(x)$,图像边缘得到一定的维持,最终获得去雾结果。本文算法保持了较低的时间复杂度,同时也取得了一定的去雾清晰效果。

1 大气物理模型和暗原色先验原理

由 Narasimhan^[11]提出的大气散射模型在计算机视觉和图像领域中得到广泛的应用,该物理模型表示为:

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

式中, $I(x)$ 为相机拍摄到的有雾图像, $J(x)$ 为自然的无雾图像, $t(x)$ 为场景透射率,即场景的反射光到相机设备成像过程中没有被雾气颗粒所散射的部分, A 为大气光照值。雾天图像的衰减形成主要有两部分组成: $J(x)t(x)$ 为直接衰减项,即场景光经过雾天颗粒所衰弱后被捕获的部分; $A(1 - t(x))$ 为环境散射项,即大气光照对成像过程的影响。透射率 $t(x)$ 可以表示为:

$$t(x) = e^{-\beta d(x)} \quad (2)$$

式中, β 是大气散射系数, $d(x)$ 是场景深度。显然,场景辐射度随着场景深度呈指数性衰减。图像去雾的目的就是由已知的有雾图像 $I(x)$ 准确地估计出 $t(x)$ 和 A 值,正确地复原出自然光彩的无雾图像 $J(x)$ 。

文献[6]通过对户外无雾图片统计观察发现:在绝大多数非天空的局部区域里,都存在一些至少有一个颜色通道的强度值很低的暗像素(dark pixels)。一幅图像的暗通道定义为:

$$J^{dark}(x) = \min_{C \in \{R, G, B\}} \{ \min_{y \in \Omega(x)} [J^C(y)] \} \rightarrow 0 \quad (3)$$

式中, J^{dark} 是无雾图像 J 的暗通道, $\Omega(x)$ 是以像素点 x 为中心的局部邻域, J^C 是无雾图像 J 的 R、G、B 中的一个颜色通道。对于无雾图像 J 的非天空区域, J^{dark} 的值趋近于 0。

2 本文算法

2.1 初步估计透射率 $t(x)$

假设大气光值 A 已知,且为常数,对式(1)两边求最小值,可得:

$$\min_{y \in \Omega(x)} \{ \min_{C \in \{R, G, B\}} [I^C(y)] \} = \min_{y \in \Omega(x)} \{ \min_{C \in \{R, G, B\}} [J^C(y)] \} \cdot t(x) + (1 - t(x))A \quad (4)$$

将式(3)代入式(4)中,发现式(4)中的第二项为 0,可得式(5):

$$t(x) = 1 - \frac{\min_{C \in \{R, G, B\}} \{ \min_{y \in \Omega(x)} [I^C(y)] \}}{A} \quad (5)$$

去雾后图像远端保持一点雾气,可使图像显得更加真实,因此在式(5)中引入常量系数 μ ($0 < \mu < 1$),得式(6)。本文经过大量的雾天场景测试,选取 $\mu = 0.95$ 为最佳。

$$t(x) = 1 - \mu \frac{\min_{C \in \{R, G, B\}} \{ \min_{y \in \Omega(x)} [I^C(y)] \}}{A} \quad (6)$$

2.2 基于雾气深度估计透射率 $\tilde{t}(x)$

文献[6]通过初步求得的透射率,获得的无雾图像带有明显的块效应,没有很好地保持图像边缘,景深突变的地方容易产生伪影效应,虽然最后采用软抠图的方法,取得了一定的去雾效果,但是算法复杂度太高、耗时太多。虽然后来采用导向滤波^[7]的方法精细估计透射率,降低了复杂度,但是相比那些快速去雾处理算法,效率仍较低。本文提出一种较为新颖的方法,通过雾气深度合理地结合场景深度,估计雾气深度图,经过中值滤波,取得较为理想的透射率 $\tilde{t}(x)$,在得到平滑的同时,边缘细节也得到了保持,最后通过反演逆过程,获得无雾图像的最优估计值。实验结果表明去雾情况理想,并取得了不错的清晰效果。

算法具体过程如下:

(1)在估计雾气深度图之前,对有雾图像进行高低通滤波,获取原图像的低频有效信息,即图像的亮度分量信息。将输入图与高低通平滑函数进行卷积获得图像的亮度分量图:

$$\tilde{L}(x, y) = I^r(x, y) \cdot F(x, y) \quad (7)$$

$$F(x, y) = Ke^{-(x^2+y^2)/\sigma^2} \quad (8)$$

其中, (x, y) 为像素点坐标, $F(x, y)$ 为高低通平滑函数, σ 为标准差, K 为归一化常数。本文采取的是 7×7 的窗口大小。

(2)对求得 R、G、B 三个通道的低频亮度信息 $\tilde{L}(x, y)$ 求平均,得 $\bar{L}(x, y)$ 。

(3)从平均亮度来看,无雾的场景亮度值较低,被雾气附着着的场景的像素值普遍被升高,它的亮度值也较高。图像的平均亮度信息可以粗略地反映出雾气深度的大小。如果雾天图像的雾气分布不均匀时,仅凭平均亮度就会错误估计,因此需要结合场景的深度信息来估计雾气深度 $I^r(x, y)$ 。由何凯明^[6]的暗原色先验知识知道,雾天图像的最小值图像包含了丰富的景深信息,并且可以粗略地估计雾气的浓度。在此基础上,将平均亮

度图归一化后与最小值图像相乘,从而估计出雾气深度图。从一幅雾气图像来看,有雾气的地方,周围像素点的强度值都很高,相机接收到的场景辐射照度的亮度也会变大,平均亮度图不会很暗,此时最小值图像的值也很大,那么雾气最浓的点,最后的亮度会更亮;同时从场景深度角度思考,离拍摄点距离越远(景深越远),最小值图像的值也会越大,若最后的亮度大,说明图像远端

的雾气越浓。为了使得去雾后的视觉更加真实,符合人眼规律,加入调节参数 K ,如式(9)和式(10)所示。

$$I'(x,y) = I_{\min}(x,y) \cdot \bar{L}(x,y) \cdot K \quad (9)$$

$$I_{\min}(x,y) = \min_{C \in \{R,G,B\}} [I^C(x,y)] \quad (10)$$

式(9)的 K 作为调节系数,经过大量的实验测试,选取 $K = 1.35$ 。本文的雾气深度图如图1所示。

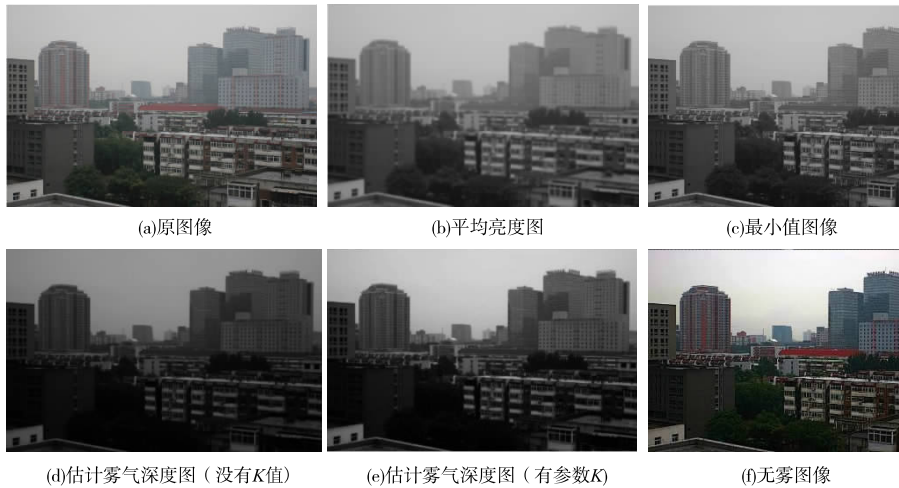


图1 估计雾气深度示意图

将估计得到的雾气深度图 $I'(x,y)$ 进行中值滤波得到 $I_{med}(x,y)$, 将其代入式(6), 求得透射率 $\tilde{i}(x)$ 。

$$I_{med}(x,y) = \underset{(x,y) \in \Omega}{med} [I'(x,y)] \quad (11)$$

$$\tilde{i}(x) = 1 - \mu \frac{I_{med}(x)}{A} \quad (12)$$

其中, $I_{med}(x,y)$ 是经过中值滤波后的图像,包含了原图像的丰富的纹理和边缘,在平滑的过程中,对随机噪声进行了去除,同时还保持了一定的图像边缘特征,避免了用暗通道最小值滤波所带来的 halo 效应。求得的透射率,大部分得到了平滑,场景深度渐变较大的地方也得到一定的保持,得到一定处理效果的同时,处理消耗时间也较短。

2.3 估计大气光值 A

大气光值 A 的估计同样很重要。大气光值 A 的估计应该是雾气最浓的点,相对在图像的远端或者天空部分。通过对公式(6)的分析,若 A 值估计偏大,那么估计出来的透射率 $\tilde{i}(x)$ 偏大,导致图像去雾不干净,远端依然保持大量的雾气;若 A 值估计过小,那么恢复近景的时候会发生颜色失真,亮度偏暗。很多文献^[6]选用在暗通道图上选取最亮的像素点或者取最大值的 95%。本文的 A 值估计方法是在粗略估计出的雾气深度图基础上,为了避免白色物体等的干扰,选取图像的前 1/5 行部分提取亮度最亮的点的坐标,在原雾图像中对应坐标

的像素点(选取三个通道中的最大值)作为大气光值 A ,如图2所示。该方法简单有效,能快速寻找到大气光值 A ,同时能避免白色建筑物或者明亮物体的干扰,从而恢复无雾图像。



图2 估计大气光值 A

图2为一幅 600×525 的雾天图像,图像中分别用红色和黄色圈出了大气光值 A 的位置。图2中包含了白色建筑物,黄色的中心位置坐标为(390,264),是利用暗通道选取最大值所获得的,值为230,估计的 A 值偏大;红色圈出的位置坐标为(0,0),是利用本文的估计大气光值 A 的方法,值为192。本文的估计 A 值方法能有效地避免白色物体的干扰,在雾气最浓的区域估计出 A

值,最后还原无雾图像。

2.4 恢复无雾图像

在前面估计出透射率 $\tilde{t}(x)$ 和大气光值 A 基础上,通过式(1)反解出无雾清晰图像。过程为:

$$J(x) = \frac{I(x) - A(1 - \tilde{t}(x))}{\max\{\tilde{t}(x), t_0\}} \quad (13)$$

为了保证分母不为 0,设置透射率下限 $t_0 = 0.2$ 。如果当透射率 $\tilde{t}(x)$ 趋近于 0,那么就会发生过去雾、恢复出的无雾图像将产生颜色失真的不利情况。

3 实验结果分析和客观评价

在配置为 Intel Core i5 - 3470 CPU 3.6 GHz、4 GB 内存的计算机上使用 VS2010 + Opencv2.4.3 版本软件对本文算法进行了验证。Tarel 算法^[12]以及 He 算法^[7]都是目前图像复原中被引用较多的算法,MSRCR (Multi-Scale Retinex With Color Restoration)去雾算法^[1]是目前流行的图像增强算法。所以,本文同以上三种算法进行了比较,得出实验结果并给出客观性的分析。

3.1 主观评价

图 3 给出了不同算法的去雾结果。从 Tarel^[12]算法结果来看,有些去雾不干净,在图像的边缘部分,景深变化较大的区域存在很严重的伪影效应,如图 3(c)所示,近景中绿叶的边缘存在很严重的伪影效应;对于 MSRCR 算法^[1]结果来说,相对比较偏白,容易造成去雾过增强,引入一些图像噪声,对于近景处理得不好,颜色明显存在失真,发生较为严重的色偏(图 3(b)中的房子过于偏白),同时对于远景的雾区去的不是很干净,导致恢复出来的图像效果欠佳(图 3(d)远端的雾气没有处理干净)。对于 He 算法^[7]结果,参数的调整不当,可能会使得处理后的图像偏暗一点(图 3(a)恢复的草堆亮度较暗,图 3(b)天空处理的不自然,存在灰白色),对于远端的雾气处理的过少(图 3(c)的红房子没有凸显出来)。本文算法还原的图像清晰度较高,在图像边缘得到了一定的保持,没有发现过多的颜色失真,同时保留了一点雾气,看上去真实,更具有层次感。

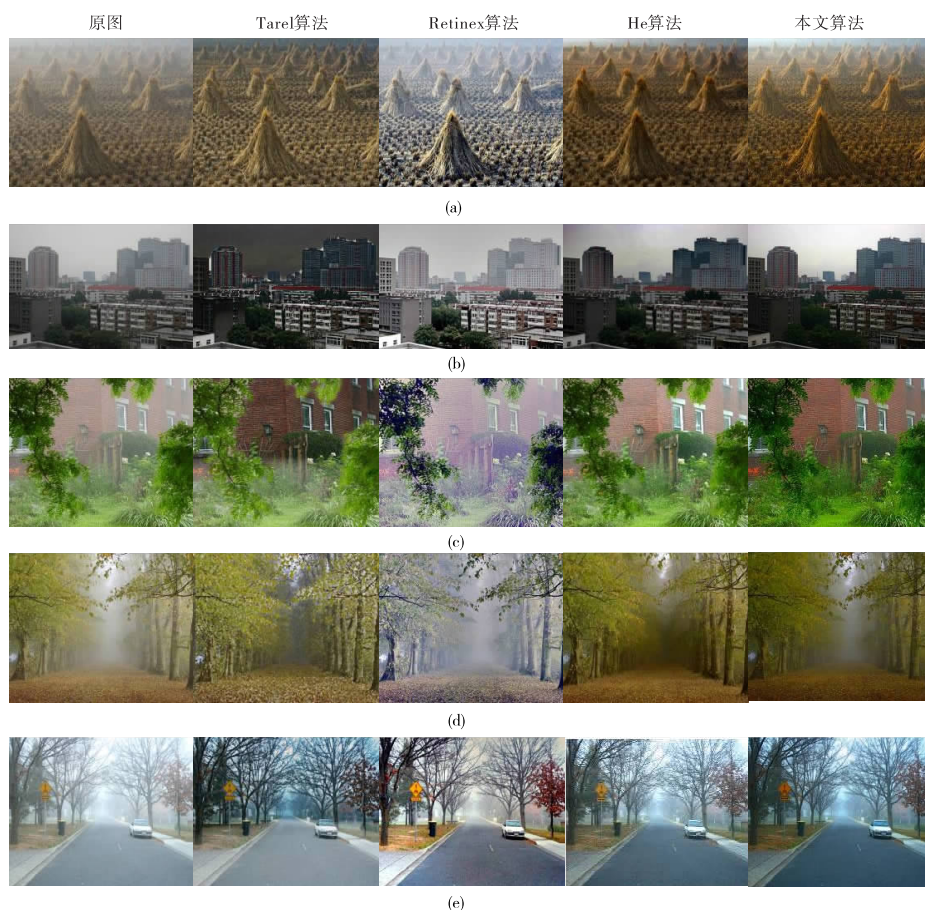


图 3 几种去雾算法结果比较

3.2 客观评价

本文使用了平均梯度、信息熵以及峰值信噪比指标

对上面提到的去雾算法进行了计算,得到较为详细的数据评价,见表 1。平均梯度表示了图像的相对清晰度以

及细节纹理反差特点,平均梯度越大,图像的层次感越强,图像也会越清晰;信息熵反映的是图像信息丰富的程度,信息熵越大,说明图像的信息量越大,图像的质感越好;峰值信噪比是使用最广泛的评价指标,反映图像之间的关联性,用来衡量图像的结构失真程度,其值越高说明两幅图像结构越相似,劣化的程度低且引入的噪声较少。从表1看出,Tarel算法^[12]、He算法^[7]、以及本文算法一定程度的改善了雾天的图像对比度及清晰度;

Tarel^[12]算法在处理雾气较浓的图像时信息熵偏低,导致图像处理边缘区域不自然,效果不好;MSRCR^[1]的平均梯度和信息熵普遍较高,但是它的峰值信噪比是较低的,这是由于这种图像增强算法会过增强,带来冗余噪声,有时还会引起色偏。本文算法和He^[7]算法相比,平均梯度较高,信息熵与He^[7]算法相接近,峰值信噪比较高,最大化的减少了结构的破坏,减少噪声的引入,提高了图像的对比度,符合人眼视觉需求。

表1 几种去雾算法客观评价

指标	算法	图 像				
		图 3(a)	图 3(b)	图 3(c)	图 3(d)	图 3(e)
平均梯度	原图	0.0214	0.0181	0.0323	0.0226	0.0218
	Tarel 算法	0.0369	0.0266	0.0372	0.0372	
	MSRCR 算法	0.0596	0.0362	0.0538	0.0594	0.0477
	He 算法	0.0281	0.0214	0.0365	0.0344	0.0340
	本文算法	0.0395	0.0297	0.0449	0.0397	0.0411
峰值信噪比	原图	7.2157	7.1935	7.4824	7.4182	7.3420
	Tarel 算法	6.9172	6.7703	7.4470	7.3440	7.5430
	MSRCR 算法	7.6558	7.4817	7.4218	7.4315	7.7815
	He 算法	7.2419	7.4692	7.6120	7.5486	7.6327
	本文算法	7.6073	7.5052	7.1079	7.1466	7.6247
峰值信噪比	原图	--	--	--	--	--
	Tarel 算法	63.4932	58.3179	61.4807	62.5955	59.7844
	MSRCR 算法	63.3204	63.0118	62.7839	62.7487	60.8030
	He 算法	62.3150	63.9751	66.5870	63.7954	57.5046
	本文算法	63.5477	65.8028	62.6151	61.7101	60.0065

3.3 算法运行时间

去雾过程中,算法的运行时间是必须考虑的,在实际应用中能否快速处理是一项重要衡量指标。Tarel^[12]算法采用复杂度为 $O(N)$ 的中值滤波方法;MSRCR^[1]使用了3个尺度的高斯核,通过快速傅里叶变换在频域中进行卷积计算以快速实现;He算法^[6]采用了较为耗时软抠图的方法,复杂度较高,后来使用了导向滤波方法^[7],运行效率仍较低。对于 600×400 的图片,本文测试了以上算法的运行时间,He^[6]算法软抠图所用平均时间为20.23 s以及导向滤波^[7]所用时间为2 s、Tarel^[12]算法为2 s、MSRCR^[1]为1.6 s、本文算法只需0.43 s。测试结果表明本文算法在处理速度上具有一定的优越性和快速性。

4 结束语

本文提出了一种较为新颖的方法,通过高斯低通滤波获得亮度分量取平均,合理地结合场景深度,估计出雾气深度,最后经过中值滤波,取得较为理想的透射率 $\tilde{i}(x)$,在平滑的同时,图像边缘细节得到了一定的保持,最后通过反演逆过程获得无雾图像的最优估计值。实验结果表明该算法去雾理想,并取得了较好的清晰效

果,且在处理速度上也优于同类算法。

虽然本文算法取得了一定的去雾效果,但由于雾天环境的复杂性及特殊性,本文算法也存在一定的局限性,如雾天图像的弱边缘保持得不是很好,去雾效果还不是特别理想,对于实时视频去雾的应用也需进一步研究。

参 考 文 献:

- [1] 刘茜,卢心红,李象霖.基于多尺度Retinex的自适应图像增强法[J].计算机应用,2009,29(8):2077-2079.
- [2] 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.
- [3] STARK J A. Adaptive image contrast enhancement using generalizations of histogram equalization[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000,9(5):889-896.
- [4] TAN K, OAKLEY J P. Physics based approach to color image enhancement in poor visibility conditions[J]. Journal of the Optical Society of America A Optics Image Science & Vision, 2001,18(10):2460-2467.
- [5] FATTAL R. Single image dehazing[J]. ACM Transactions on Graphics, 2008,27(3):1-9.
- [6] HE K M, SUN J, TANG X O. Single image haze removal

- using dark channel prior[C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Miami, FL, USA: IEEE Computer Society, 2009: 1956-1963.
- [7] HE K M, SUN J, TANG X O. Guide image filtering[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 35(6): 1-13.
- [8] 孙小明, 孙俊喜, 赵立荣, 等. 暗原色先验单幅图像去雾改进算法[J]. 中国图像图形学报, 2014, 19(3): 381-385.
- [9] 禹晶, 李大鹏, 廖庆敏. 基于物理模型的快速单幅图像去雾方法[J]. 自动化学报, 2011, 37(2): 143-149.
- [10] KIM J H, JANG W D, SIM J Y, et al. Optimized contrast enhancement for real-time image and video dehazing[J]. Visual Communication and Image Representation, 2013, 24(3): 410-425.
- [11] NARASIMHAN S G, S, NAYAR K. Contrast restoration of weather degraded images[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2003, 25(6): 713-724.
- [12] TAREL J P, HAUTI N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image[C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision. Kyoto, Japan: IEEE Computer Society, 2009: 2201-2208.
- [13] 刘言, 张红英, 吴亚东, 等. 基于半逆法的一种快速单幅图像去雾算法[J]. 图学学报, 2015, 36(1): 68-76.
- [14] 梁增龔, 刘本永. 基于主分量分析和大气散射模型的彩色图像雾霾快速去除算法[J]. 计算机应用, 2015, 35(2): 531-534.

Fast Single Image Dehazing Based on the Fog Depth

FAN Fengbing^{1a,2}, ZHANG Hongying^{1a,2}, WU Bin^{1a,2}, WU Yadong^{1b}

(1a. School of Information Engineering; 1b. School of Computer Science and Technology, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China; 2. Robot Technology Used for Special Environment Key Laboratory of Sichuan Province (Southwest University of Science and Technology), Mianyang 621010, China)

Abstract: In order to overcome the defects of current dehazing algorithm, such as the high complexity and poor visual effects about dehaze images, a novel method to dehaze is presented. Firstly, Gaussian low-pass filtering function is used to three channels of the image to get the low-frequency averaged image information (luminance component), then the scene depth is combined to obtain the global atmospheric illumination value A , the value obtained by the proposed method is more robust than the value obtained by dark channel maximum; secondly, the ideal transmission map which is denoising and also maintain the edge of the image is obtained through median filtering; finally, the images without fog is obtained by reversing the atmospheric scattering model. A plenty of experiment results show that the proposed method greatly improves the image contrast, achieves good dehazing results, and has a lower time complexity as well as higher robustness.

Key words: image dehazing; atmospheric scattering model; robustness; fog depth