

基于 DCP 和 OCE 的无人机航拍图像混合去雾算法

岳学军^{1,2} 王林惠^{1,2} 兰玉彬^{2,3} 刘永鑫^{1,2} 凌康杰^{1,2} 甘海明^{1,2}

(1. 华南农业大学电子工程学院, 广州 510642; 2. 国际农业航空施药技术联合实验室, 广州 510642;
3. 华南农业大学工程学院, 广州 510642)

摘要: 针对无人机在雨雾天气下的农田航拍图像退化问题,考虑无人机自身特性,提出了一种基于 DCP 和 OCE 的无人机航拍图像混合去雾算法。首先判断原始图像天空区域的存在,利用 Canny 边缘检测算法对带天空区域的原始图像进行分割并做高斯羽化处理,再采用膨胀和腐蚀等形态学操作进行二值化区域填充,去除非天空区域中对应亮度低的区域,提取天空区域和非天空区域。非天空区域图像采用基于导向滤波的暗通道先验算法去雾。天空区域图像采用基于代价函数的优化对比度算法去雾。本试验分别从主观视觉性和无参考量化评测两方面对 100 幅航拍图像去雾结果作出评价,试验结果表明,所提算法在对带雾图像去雾后,出现 Halo 现象的概率相较于 DCP 算法降低了 95%,其综合评测均值指数提高了 26%,去雾效果明显,色彩还原度高,没有明显的过渡区域和偏色现象,处理速度可达 33 帧/s,平均速度相较于 DCP 算法提高了 32%,能满足实时性要求。

关键词: 图像去雾; 无人机; 暗通道先验; 优化对比度增强; 图像分割

中图分类号: TP391; S126 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)S0-0419-07

Algorithm of Defogging UAV's Aerial Images Based on DCP and OCE

Yue Xuejun^{1,2} Wang Linhui^{1,2} Lan Yubin^{2,3} Liu Yongxin^{1,2} Ling Kangjie^{1,2} Gan Haiming^{1,2}

(1. College of Electronic Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

2. International Joint Laboratory of Agricultural Aviation Application Techniques, Guangzhou 510642, China

3. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Aiming at degeneration of UAV's farmland aerial images in rainy or foggy weather, this article proposed an integrated method based on dark channel prior (DCP) and optimized contrast enhancement (OCE). Firstly, this method identified the existence of sky from the original image, and then segmented and feathered the original images in Gauss method with Canny edge detection algorithm. Secondly, the non-sky regions, where luminance value was low, were filled with binarized dilation and morphological erosion removed. Finally, both non-sky and sky regions within a frame were processed by dark channel and optimized contrast enhancement algorithm respectively. In this research, the effect of the proposed algorithm was evaluated by no-reference quantitative assessment using 100 aerial photographing images. The experimental results showed that the possibility of Halo effect, compared to DCP, was reduced by 95% while its comprehensive evaluation average index was raised by 26%. Consequently, without obvious transition region and color cast, the proposed method filtered the fog of the aerial images well and the color reproduction was high. Meanwhile, the average processing efficiency in the proposed algorithm was up to 32% (33 frame per second) higher than classical DCP. Hence, the method could met the real-time requirements.

Key words: image defogging; unmanned aerial vehicle; dark channel prior; optimized contrast enhancement; image segmentation

收稿日期: 2016-07-20 修回日期: 2016-08-16

基金项目: 广东省科技计划项目(2015A020224036、2014A020208109)、国家重点研发计划项目(2016YFD0200700)和广东省水利科技创新项目(2016-18)

作者简介: 岳学军(1971—),女,教授,博士生导师,主要从事精准农业、农业信息化研究,E-mail: yuexuejun@scau.edu.cn

通信作者: 兰玉彬(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事精准农业航空及航空应用与遥感技术研究,E-mail: ylan@scau.edu.cn

引言

近年来,利用无人机(Unmanned aerial vehicle, UAV)进行目标识别、测绘、地质灾害防治等已经成为 UAV 研究领域中的热点^[1]。UAV 在中低空进行监测任务时,雾、霾等天气下大气中气溶胶的散射作用降低了空气透明度,严重影响图像的质量和清晰度。去雾后的图像不仅可以带来更好的直观视觉效果,并且更有利于目标识别等算法的实现。

雾天图像清晰化处理方法主要分为两类:一类是基于图像增强。通过增强降质图像的对比度来突出图像细节,以达到使图像清晰化的视觉效果^[2]。这类方法的经典算法包括 STARK^[3] 和 KIM 等^[4] 提出的 CLAHE 法, LAND^[5] 提出的 RETINEX(视网膜皮层)法以及 JOBSON 等^[6] 和 RAHMAN 等^[7] 在 LAND 提出的中心环绕 RETINEX 基础上,分别提出了 SSRCR 和 MSRCR 算法。但这类方法普遍会造成图像部分信息的损失,使图像失真;另一类是基于物理模型。通过建立大气散射模型,结合图像退化物理机理,反演复原出未降质前的图像^[8-9]。HE 等^[10] 首次提出了基于暗通道先验(Dark channel prior, DCP)的规律假设。禹晶等^[11]、雷琴等^[12] 提出了多种基于 DCP 模型的去雾算法,在实际处理过程中都能得到较好的效果。KIM 等^[13] 在大气散射模型的基础上提出了集中于获取粗透射率优化对比度增强(Optimized contrast enhancement, OCE)算法。何杰等^[14] 在 OCE 的基础上提出了一种基于混合进化算法的图像优化对比度增强方法,该方法结合遗传算法搜索全局最优点,去雾效果明显。

针对无人机雨雾天气下的农田航拍图像的退化问题,考虑无人机自身特性,本文提出一种基于 DCP 和 OCE 的 UAV 航拍图像混合去雾算法。结合图像分割及分块映射思想,实现对无人机航拍图像的去雾处理。

1 去雾算法流程

DCP 去雾算法是当前单幅图像去雾领域效果较好,也是近年来影响最大的一种算法。虽然该算法在大部分户外场景的单幅图像去雾方面取得了很好的效果,然而在实际应用中仍然存在一些问题。首先,DCP 去雾算法有一定局限性,不适用于某些特定场景下的图像去雾,如农田图像的去雾。农田图像一般具有景深较广、天空区域较大、颜色整体灰白等特点^[15]。通过试验发现使用 DCP 去雾算法对此类农田图像尤其是天空区域的处理效果一般都不

理想,会出现明显的过渡区域、偏色及 Halo 现象,如图 1 所示。

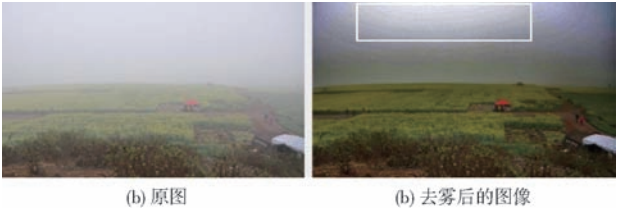


图 1 农田图像的去雾效果

Fig. 1 Farmland image before and after defogging

图 1a 为一幅有雾的油菜田航拍图像,图 1b 为对该图像使用 DCP 去雾后的结果,从图 1b 中白色区域可以看出,天空区域具有明显的过渡区域和偏色现象。其次,该方法计算量大,使得整个处理过程比较耗时,导致实际应用受限。

无人机拍摄时,成像设备和成像目标距离很远,图像景深相对于成像距离变化较小^[16]。针对这一特点,从图像处理的角度出发,提出一种基于暗通道先验与优化对比度增强的混合去雾算法应用于农田航拍图像去雾。方法流程图如图 2 所示。

本文去雾算法的实施主要体现在以下 3 方面: ①天空区域存在与否的判断,并分割提取。②分割后的二值化图像白色高亮区域映射到原始图像非天空区域,并采用基于导向滤波的 DCP 算法去雾。③分割后的二值化图像黑色区域映射到 DCP 算法处理过后的图像天空区域,并采用基于代价函数的 OCE 算法去雾。

2 去雾算法原理

2.1 天空区域存在判断及分割

天空区域一般具有亮度较高、灰度平坦及位置偏上等特性。鉴于此,提出一种简单的天空区域存在判断方法,首先选取有雾图像的前 N_{top} 行,求该区域亮度的平均值 V_{avg} 和最大亮度值 V_{max} ,若 $V_{avg} > u_1 V_{max}$,则认为存在天空区域。经过多次试验,表明 u_1 为 0.9 时,检测结果较好。

对于存在大范围天空区域的农田带雾图像,采用 Canny 边缘检测算法对其进行分割并做高斯羽化处理,再采用膨胀和腐蚀等形态学操作进行二值化区域填充,使非天空区域联通。由于非天空区域对应亮度较高,因此将联通后的二值化图像对应区域亮度值小于 $0.8I_{max}$ 的区域去除,最终得到分割后的结果,如图 3 所示。

2.2 基于导向滤波的暗通道先验去雾算法

在绝大多数非天空的局部区域里,某一些像素总会有至少 1 个颜色通道具有很低的值^[17]。对于任意的输入图像 J ,其暗通道先验可表示为

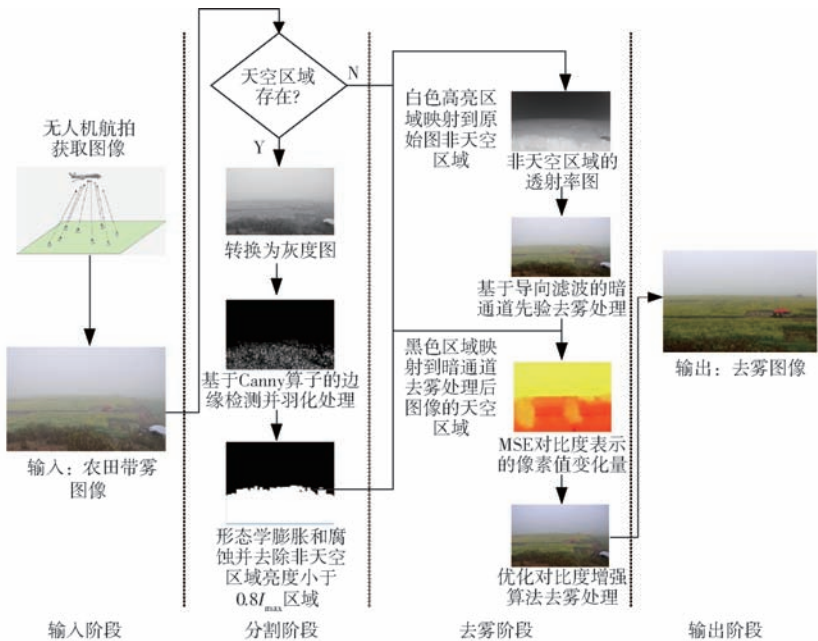


图2 去雾算法流程图
Fig. 2 Algorithm flow chart

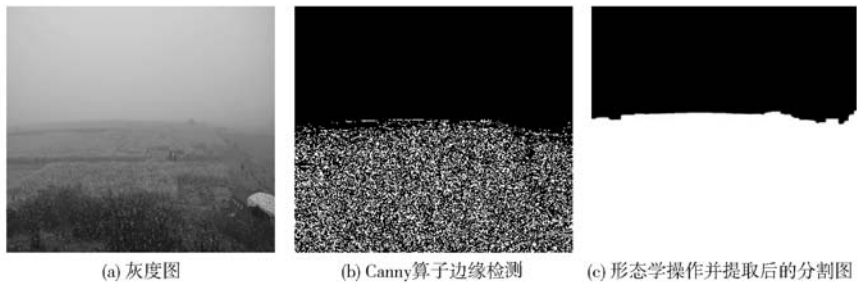


图3 天空区域分割
Fig. 3 Sky region segmentation

$$J^{\text{dark}}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} (\min_{c \in \{r, g, b\}} J^c(y)) \approx 0 \quad (1)$$

式中 $\Omega(x)$ —— x 的邻域 c —— $\{r, g, b\}$ 通道值
 J^c ——图像 $J(x)$ 的 c 通道值
 J^{dark} ——图像的暗原色图

结合雾霾天气下大气散射模型,成像设备所拍摄的图像可表示为

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

式中 $I(x)$ ——待去雾的图像
 $J(x)$ ——要恢复的无雾图像
 A ——已知的全球大气光成分,具体指有雾图像中具有最高亮度点的值
 $t(x)$ ——透射率

运用大气散射模型,结合先验公式,并参考林亚忠等^[18]提出的导向滤波法,可得到的精细化透射率为

$$\hat{t}(x) = 1 - \omega \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_c \frac{I^c(y)}{A^c} \right) \quad (3)$$

式中 ω 为去雾程度,用此方法测试了 100 多幅带雾图像,结果证明当 $\omega \geq 0.85$ 且 $\omega \leq 0.95$ 时,复原图

像看起来更加真实而不丢失深度感引入的参数,保留了较远处的部分雾气,效果较好,因此本文中所有的测试结果均基于 $\omega = 0.90$ 。

至此, $I(x)$ 、 A 、 $t(x)$ 已经求得。本文设置一个阈值 t_0 ,防止当投射图 $t(x)$ 的值很小时,图像整体向白场过渡。本文所有效果图均以 $t_0 = 0.1$ 为标准计算。

因此,最终的恢复公式为

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max(t(x), t_0)} + A \quad (4)$$

2.3 基于代价函数的优化对比度去雾算法

该算法是基于式(2)所示的大气散射模型。通过递归将输入图像分成 4 个矩形区域,并选择像素值最大的区域继续分块,重复上述过程直到被选定区域的面积小于一个预定的阈值。在被选定的区域内,选择原图 R 、 G 、 B 通道最小的颜色向量作为大气光。

均方误差 (MSE) 对比度可以用来表示某一图像块像素值的变化量,计算式为

$$C_{MES} = \sum_{p=1}^M \frac{(J_c(p) - \bar{J}_c)^2}{M}$$

(5)

式中 $J_c(p)$ ——复原图像
 $\bar{J}_c$ —— $J_c(p)$ 的平均值
 M ——图像块像素数目

设分块后得某一图像块为 B , 则每个图像块 B 的 3 个颜色通道的均方误差对比度和的负数即为对比度代价 E_c , 计算式为

$$E_c = - \sum_{c \in \{r,g,b\}} \sum_{p \in B} \frac{(J_c(p) - \bar{J}_c)^2}{N_B} =$$
$$- \sum_{c \in \{r,g,b\}} \sum_{p \in B} \frac{(I_c(p) - \bar{I}_c)^2}{t^2 N}$$

(6)

式中 N_B ——图像块 B 像素数目 t ——透射率

因此,通过最小化 E_c 可以最大化均方误差对比度。

3 试验结果与分析

现有的图像去雾评价方法主要分为主观评价方法和客观评价方法。为验证本文方法的有效性,从主观和客观两个方面对去雾图像作出评价。无人机航拍试验场地是山东省莱州市刘家村和新疆生产建设兵团阿克苏地区,如图 4 所示。

3.1 去雾效果的视觉评价分析

在 Microsoft Visual Studio 2010 编程环境下,通过 opencv 2.4.9 工具包编程实现对目标图像的去雾试验,并使用 Matlab 实现对去雾前后图像的 $R、G、B$ 通道的像素直方图分析,如图 5、6 所示。



图 4 无人机航拍试验地点
Fig. 4 UAV aerial test site

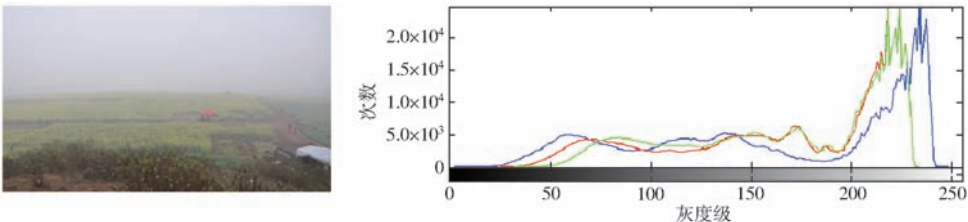


图 5 原始图像(1 220 像素×800 像素)及 $R、G、B$ 通道直方图
Fig. 5 Original image (1 220 pixel×800 pixel) and its $R、G、B$ histograms

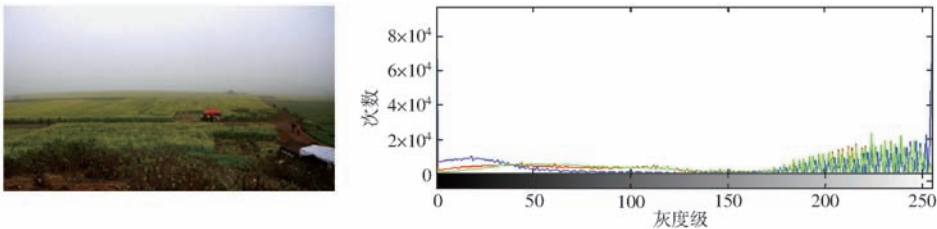


图 6 本文方法去雾后图像及 $R、G、B$ 通道直方图
Fig. 6 Image after defogging and its $R、G、B$ histograms

通过分析图 5 的 $R、G、B$ 通道直方图可以看出其原始图像高亮度像素分布频率高且集中,因此图像整体亮度较高,其对比度和清晰度较低。图 6 中使用本文算法去雾后,图像的对比度有明显提升,颜色的退化得到一定程度的修正,且其 $R、G、B$ 通道直方图像素分布较均衡、分散。

为体现本文去雾算法的先进性,分别采用多种

去雾算法对 100 幅图像做去雾处理,并统计 DCP 算法和本文算法出现 Halo 现象的次数。试验结果显示,DCP 算法出现 88 次,本文算法出现 4 次,同比降低了 95%。图 7 为从原图像集中选取的 5 幅图像分别经限制对比度自适应直方图均衡 (CLAHE) 算法、多尺度 Retinex (MSRCR) 算法、暗通道先验 (DCP) 算法及本文算法的处理结果。



图 7 不同方法去雾效果

Fig. 7 Defogging results of different methods

从图 7 可以看出,其他算法的色彩有一定程度的失真,颜色较重,显得过于饱和,其中 DCP 算法的天空区域出现了明显的 Halo 现象。在图 7a 中第 2、5 行原始图像中不存在天空区域,因此从图 7d、7e 去雾效果可以看出本文方法和暗通道先验去雾算法一致,印证了本文算法的有效性。试验结果表明,其他几种算法并不能很好地应用于无人机航拍图像,仅从原大气散射模型或图像处理的角度出发对无人机航拍图像进行去雾,不能得到良好的效果。而本文的算法针对无人机航拍图像的去雾效果更优,有效降低了 Halo 现象,而且更好地再现了场景的真实度。

3.2 去雾效果的量化评价分析

在对去雾图像做量化评价分析时,从评价方法对参考信息的需求程度角度来说可以分为全参考、半参考和无参考,前 2 种需要借助参考图像,而无人机在航拍时获取同一地点不同时间清晰的参考图像难度较大,因此本文将采用无参考的评价方法。采用 Canny 算子和亮通道检测去雾图像的有效边缘强度,使用直方图相似性度量去雾图像的色彩还原能力;使用反射图像的结构信息评价去雾图像的结构保持能力。最后综合有效边缘强度、色彩还原能力和结构信息 3 个方面构建一套无参考的去雾效果综合评价体系^[19-20]。本文参考该评价体系,从去雾图像的有效细节强度、色彩还原度和场景结构信息方面对去雾图像的质量进行客观评价。去雾图像质量综合评测准则为

$$Q = L^\alpha D^\beta S^\gamma \tag{7}$$

式中 L ——去雾图像的有效细节强度
 D ——色彩还原度

S ——场景结构信息,如图像中的点、线、面等
 α, β, γ ——有效细节强度比重、色彩还原程度比重、结构信息比重

其中, L 越小表明算法保留有效细节强度的能力越强。 D 越大,匹配度越高,完全匹配时, D 为 1,而完全不匹配时, D 为 0。 S 越大,结构信息保存的越好,反之则不匹配。根据经验为了简单起见,这里取 $\alpha = \beta = \gamma = 1$ 。综合评测值 Q 越大,说明该方法的去雾效果越好。

本文选取 100 幅原始带雾航拍图像分别采用不同去雾方法处理,并对每一种方法的处理结果进行有效细节强度、色彩还原程度和结构信息的评测,评测均值计算式为

$$\begin{cases} \bar{L} = \sum_{i=1}^N L_i / N \\ \bar{D} = \sum_{i=1}^N D_i / N \\ \bar{S} = \sum_{i=1}^N S_i / N \end{cases} \tag{8}$$

式中 $\bar{L}, \bar{D}, \bar{S}$ —— L, D, S 的平均值
 L_i, D_i, S_i ——第 i 幅图的 L, D, S 评价值
 N ——图的总数

评测结果如表 1 所示。
从表 1 中数据可知,本文方法相较于其他 3 种

表 1 去雾图像质量客观评价

Tab. 1 Objective assessment of defogged image quality

算法	$\bar{L}$	$\bar{D}$	$\bar{S}$	$\bar{Q}$
CLAHE	0.182 0	0.381 0	0.581 9	0.040 3
MSRCR	0.227 1	0.433 3	0.680 1	0.066 9
DCP	0.315 2	0.774 9	0.926 4	0.226 3
本文方法	0.152 7	0.951 1	1.961 8	0.284 9

算法的综合评测值更大,去雾效果最好,在有效细节强度、色彩还原程度和结构信息等方面均表现良好。

评估算法计算开销。算法执行速度的快慢对于嵌入式系统的实时性应用具有重要意义^[21]。采用32位Win7操作系统、Intel(R)Core(TM)i3-2310M、主频2.10GHz、内存2GB计算机进行仿真。利用3种不同分辨率的原始带雾图像各100幅,分别采用CLAHE算法、MSRCR算法、DCP算法及本文算法进行处理,得到平均时间,如表2所示。

表2 不同分辨率图像多种去雾算法的处理时间

Tab.2 Defogging processing time of different algorithms system for different sized images ms			
算法	分辨率/像素		
	1 220 × 800	780 × 450	580 × 320
CLAHE	49.619 0	25.554 5	15.894 7
MSRCR	202.467 9	97.496 8	84.187 7
DCP	41.206 3	15.420 9	12.947 0
本文方法	30.244 8	11.951 0	7.472 5

由表2可知,本文方法在3种不同分辨率的图像去雾处理时间均最短。在处理分辨率为1 220像素×800像素的图像时,每秒处理的帧数为33,能满足视频流实时传输时每秒处理帧数不小于25的要求。

4 结论

(1)保留了DCP算法较好的去雾效果,同时避免了DCP算法在天空区域可能存在明显过渡区域和偏色现象的不足。其综合评测均值指数相较于DCP算法提高了26%。

(2)由于只对原图像的非天空区域进行DCP去雾,天空区域采用快速且实时性强的OCE算法去雾,因此整体去雾速度快,相较于DCP算法提高了32%,能满足实时性要求。

(3)经本文算法处理后的图像,色彩还原度逼真,对比度良好,结构信息保留完整,针对高亮区域有效避免了Halo现象的产生。通过试验分析可知,本文算法去雾效果良好,实时性强,可提高无人机航拍图像的清晰度,准确获取监测图像的有效信息。

参 考 文 献

1 孔庆红. 基于暗原色先验的无人机航拍图像去雾算法研究与实现[D]. 青岛:中国海洋大学,2014.

2 吴迪,朱青松. 图像去雾的最新研究进展[J]. 自动化学报,2015,41(2):221-239.
WU Di,ZHU Qingsong. The latest research progress of image dehazing[J]. ACTA Automatica Sinica, 2015, 41(2): 221-239. (in Chinese)

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 KIM T K, PAIK J K, KANG B S. Contrast enhancement system using spatially adaptive histogram equalization with temporal filtering[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics,1998,44(1):82-87.

5 LAND E H. Recent advances in retinex theory and some implications for cortical computations: color vision and the natural image [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1983, 80(16): 5163-5169.

6 JOBSON D J, RAHMAN Z, WOODDELL G A. Properties and performance of a center/surround retinex[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(3): 451-462.

7 RAHMAN Z, JOBSON D J, WOODDELL G A. Multi-scale retinex for color image enhancement[C]//Proceedings of the 1996 International Conference on Image Processing, 1996, 3: 1003-1006.

8 苑尚博,高铁琛,宋笑影,等. 暗通道结合小波变换的雾天图像复原[J]. 计算机应用与软件,2015,32(10):137-162.
YUAN Shangbo, GAO Yichen, SONG Xiaoying, et al. Foggy image restoration using wavelet transform and dark channel prior[J]. Computer Applications and Software, 2015,32(10):137-162. (in Chinese)

9 许杰,杨会成. 基于暗原色先验与小波变换的图像去雾方法[J]. 计算机技术与发展,2016,26(2):113-128.
XU Jie, YANG Huicheng. A defogging method for image based on binding priori dark colors and wavelet transform[J]. Computer Technology and Development, 2016,26(2): 113-128. (in Chinese)

10 HE Kaiming,SUN Jian,TANG Xiaou. Single image hazeremoval using dark channel prior[C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition,2009:1956-1963.

11 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):143-148.
YU Jing, LI Dapeng, LIAO Qingmin. Physics-based fast single image fog removal[J]. ACTA Automatica Sinica, 2011,37(2): 143-148. (in Chinese)

12 雷琴,施朝健,陈婷婷,等. 基于天空区域分割的单幅海面图像去雾方法[J]. 计算机工程,2015,41(5):237-242.
LEI Qin, SHI Chaojian, CHEN Tingting, et al. Single sea image haze removal method based on segmentation of sky area[J]. Computer Engineering,2015,41(5):237-242. (in Chinese)

13 KIM J H, JANG W D, SIM J Y, et al. Optimized contrast enhancement for real-time image and video dehazing[J]. Journal of Visual Communication & Image Representation, 2013,24(3):410-425.

14 何杰,宋洪军,胡军国,等. 基于混合进化算法优化模糊对比度的图像去雾[J]. 计算机时代,2016(1):12-18.
HE Jie, SONG Hongjun, HU Junguo, et al. Fog removal method based on fuzzy contrast optimization using hybrid evolutionary

- algorithm[J]. Computer Age,2016(1):12–18. (in Chinese)
- 15 李小敏,臧英,罗锡文,等. 基于发射功率自适应的稻田无线传感器网络节点设计[J]. 农业工程学报,2014,30(7):140–146.
LI Xiaomin, ZANG Ying, LUO Xiwen, et al. Design of WSN node with adaptive transmitting power for rice field[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(7):140–146. (in Chinese)
- 16 王健,王林惠,岳学军,等. 基于 WiFi 的无人机视频传输系统设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(2):47–51.
WANG Jian, WANG Linhui, YUE Xuejun, et al. Design and test of unmanned aerial vehicle video transfer system based on WiFi[J]. Transactions of the CSAE,2015,31(2):47–51. (in Chinese)
- 17 HE Kaiming, SUN Jian, TANG Xiaoou. Guided image filtering[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2013, 35(6):1397–1409.
- 18 林亚忠,李新,张会奇,等. 基于局部特性的分割校正模型改进[J]. 计算机工程,2014,40(8):229–232.
LIN Yazhong, LI Xin, ZHANG Huiqi, et al. Improvement of segmentation correction model based on local features [J]. Computer Engineering, 2014,40(8):229–232. (in Chinese)
- 19 GUO Fan, CAI Zixing. Objective assessment method for the clearness effect of image defogging algorithm[J]. Acta Automatica Sinica,2012, 38(9):1410–1419.
- 20 李大鹏,禹晶,肖创柏,等. 图像去雾的无参考客观质量评测方法[J]. 中国图象图形学报,2011,16(9):1753–1757.
LI Dapeng, YU Jing, XIAO Chuangbai, et al. No-reference quality assessment method for defogged image [J]. Journal of Image and Graphics, 2011,16(9):1753–1757. (in Chinese)
- 21 WAN Jiafu, LI Di, TU Yuqing, et al. Performance analysis model for real-time Ethernet-based computer numerical control system [J]. Journal of Central South University, 2011(18):1545–1553.