doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.12.028

基于超像素暗通道和改进导向滤波的农业图像去雾方法

樊湘鹏[1]　周建平[1,2]　许　燕[1,2]

(1.新疆大学机械工程学院,乌鲁木齐 830047;
2.新疆维吾尔自治区农牧机器人及智能装备工程研究中心,乌鲁木齐 830047)

摘要:针对传统暗通道先验算法运算速度慢以及适用性差的问题,提出了一种基于超像素级暗通道先验和自适应容差机制改进导向滤波算法的农业图像去雾方法。首先利用超像素分割获得具有一致颜色和亮度属性的超像素块并估计不规则区域块的透射率,引入导向滤波算法并利用自适应平滑参数细化透射率得到更为细致的边缘信息,加入自适应容差机制,使其能够根据图像明亮区域的变化和雾霾的浓度对透射率进行自适应补偿修正,得到最优透射率。最后对局部大气光估计和适应性调整,根据大气散射模型得到质量更高的复原图像。试验以6幅农业场景图像为例进行去雾研究,采用主观和客观评价指标评价去雾结果,与传统去雾算法相比,本文方法恢复的图像色彩更真实,细节更丰富,并且在一定像素范围内具有较高的实时性,可为农情信息解析提供研究基础。

关键词:农业图像;去雾;超像素分割;暗通道先验;导向滤波;自适应容差

中图分类号:TP391.41;S24　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2021)12-0264-09　　**OSID**:

Agricultural Image Dehazing Method Based on Super-pixel Dark Channel and Improved Guided Filtering

FAN Xiangpeng[1]　ZHOU Jianping[1,2]　XU Yan[1,2]

(1. *School of Mechanical Engineering*, *Xinjiang University*, *Urumqi* 830047, *China*
2. *Agriculture and Animal Husbandry Robot and Intelligent Equipment Engineering Research Center of Xinjiang Uygur Autonomous Region*, *Urumqi* 830047, *China*)

Abstract: UAV low-altitude remote sensing platform has become an important means to obtain high-throughput phenotypic information in agricultural field. The haze removal and quality restoration of agricultural field images are the premise and basis for analyzing remote sensing information. Aiming at the disadvantages of traditional dark channel prior algorithm, such as large amount of computation, slow operation speed and poor applicability in remote sensing image, a method based on super-pixel level dark channel prior and adaptive tolerance mechanism to improve the guided filtering algorithm was proposed. Firstly, super-pixel segmentation method was utilized to obtain super-pixel blocks with consistent color and luminance properties, and transmittance of each irregular super-pixels block was estimated. The guided filtering algorithm was introduced and improved by using adaptive smoothing parameters to refine the transmittance for the detailed edge information. Then the adaptive tolerance mechanism was added to enable the algorithm to make adaptive compensation and correction for the transmittance according to the change of the bright region of the image and the concentration of fog, after which, the optimal transmittance was acquired. Finally, the local atmospheric light estimation and adaptive adjustment mechanism were used to obtain higher quality images based on the atmospheric scattering model. The experimental results showed that the proposed algorithm can effectively recover images affected by different concentrations of fog. Six different fog concentrations of remote sensing images were taken as examples. Compared with the traditional haze removal algorithms based on dark channel prior using subjective and objective evaluation index evaluation, the proposed method had more real color and more

收稿日期:2020-12-08　修回日期:2021-03-12
基金项目:新疆维吾尔自治区研究生科研创新项目(XJ2019G033)
作者简介:樊湘鹏(1993—),男,博士生,主要从事机电控制与农业信息化研究,E-mail:1509324673@163.com
通信作者:周建平(1974—),男,教授,博士生导师,主要从事机电控制与农业信息化研究,E-mail:linkzhou@163.com

abundant information details. Within the scope of a certain pixel, the method had high real-time performance, which can provide research foundation for the field of remote sensing image splicing and agricultural information parsing.

Key words: agricultural image; dehazing; super-pixel segmentation; dark channel prior; guided filtering; adaptive tolerance

0　引言

随着传感器和通信技术的发展,农业机器人装备能够快速获取高通量的大田作物生长信息[1]并对作物长势和生理胁迫响应进行有效动态监测,已成为精准农业中的研究热点[2]和重要手段。在天气晴朗、能见度高、天顶角小的情况下,农业机器人视觉系统可以获得最佳效果的图像,然而在实际环境中,受空气污染加剧、自然雾霾和农田非正常活动(如焚烧)等的影响,理想天气次数减少,大气介质对地面反射光线的散射和吸收导致空气能见度降低,使得农田图像中的地物信息模糊不清,甚至出现颜色的偏移和失真,直接影响图像信息的真实性[3],给图像的解译和后续使用带来了极大困难。研究农田图像除雾技术并进行复原处理是图像信息解析的重要前提,对提升图像数据精确度、促进农业机器人的推广和农业信息化进程有着重要的作用[4]。

图像去雾主要有两类方法,一类是基于图像增强的方法,通过调整图像的对比度和亮度等指标来突出图像的细节,可在一定程度上增强视觉效果,但容易丢失信息、引入噪声,造成图像颜色失真,如基于直方图均衡化[5]和 Retinex 理论的算法[6]等;另一类是基于雾天退化模型的方法[7],该类方法通过对环境光和透射率进行分析,并根据一定的先验假设来逼近模型参数的真实值来实现去雾。HE 等[8]基于统计规律提出了暗原色通道先验去雾模型,据此估计图像的透射率和大气光来去雾。该类方法直观地表示了含雾图像的成因,可通过反演得到未降质前的图像,效果良好。近年来,不同学者围绕暗通道先验理论,利用大气与光线相互作用的物理模型,开展了一系列图像去雾研究。王泽胜等[9]在暗通道基础上对原始图像映射处理,结合多维导向滤波方法优化透射率后自适应调整色阶得到清晰化的交通场景图像;张晨等[10]将形态学梯度和暗通道图像线性融合,引入自适应高斯权重参数对融合后暗通道图像逐像素处理得到粗透射率,并用正则化抑制光晕现象。向文鼎等[11]、韩昊男等[12]利用四叉树分解方法估计大气光值,分别采用自适应阈值分割和引导滤波算法减少色彩失真和光晕现象。辛娇娇等[13]采用改进的自适应局部阈值分割和自适应参数优化相结合算法对透射率进行细化,提高了大气光强的鲁棒性,得到清晰自然的恢复图像。杨燕等[14]建立无雾图像暗通道图的平面扇形模型,引入均值不等关系式来逼近扇形模型的边界,去雾后视觉效果好,但对于远景图像来说容易失真。李雅梅等[15]利用 Canny 算子对不同天空区域分割得到不同景深的亮度透射率,利用快速引导滤波对透射率进行优化,有效抑制光晕现象,但容易出现过饱和现象。安冬等[16]提出了一种自适应超像素区分不同景深物体的暗通道先验去雾算法,有效提高了去雾精度。

上述研究虽然取得了较好的结果,但是将上述算法直接用于农田图像去雾效果并不理想。目前去雾效果较为理想的算法往往存在计算量大、运算速度偏慢的缺点,难以适合对实时性要求较高的精准农业航空领域;另外,农业机器人视觉获取的农田遥感图像是向下成像,包含不同作物、杂草、裸地等色彩丰富的目标,有丰富的边缘和纹理细节而不涉及到天空区域。对精准农业而言,去雾的目的不仅是要提高图像的清晰度,更重要的是能够还原植被的真实色彩,避免信息偏差。因此,本文从农业机器人视觉图像的特点出发,在超像素级别应用暗通道先验原理,改进导向滤波算法并优化透射率,加入自适应容差机制来得到精细的透射率,最后结合局部大气光估计方法得到高质量的农业场景图像。

1　去雾原理

1.1　大气散射模型

非成像物点光线中因大气介质发生散射进入成像设备的光线成为大气光。大气光通常随成像物点与成像设备间距离的增加而增加,假设成像设备与成像物点之间的距离为 d,距离成像设备 x 处的单位体积内,大气光参与成像的过程如图 1 所示。

由图 1 可知,在户外成像过程中,入射光经成像点反射后,在传输过程中与大气介质相互作用会发生衰减,根据 Mie 散射理论[17],最终到达设备的入射光可以分为经大气衰减的入射光和来自周围环境的大气光,此时大气光散射模型可表示为

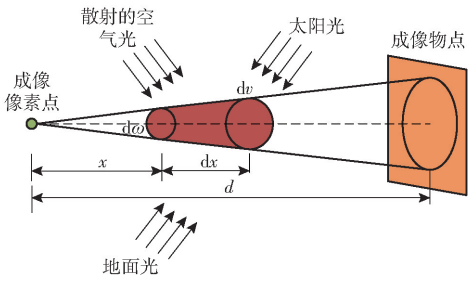


图 1 大气光参与成像过程示意图

Fig. 1 Schematic of atmospheric light involved in imaging process

$$I(x)=J(x)t(x)+A(1-t(x)) \tag{1}$$

式中 $I(x)$——大气散射后含雾图像

$J(x)$——原始图像 A——大气光值

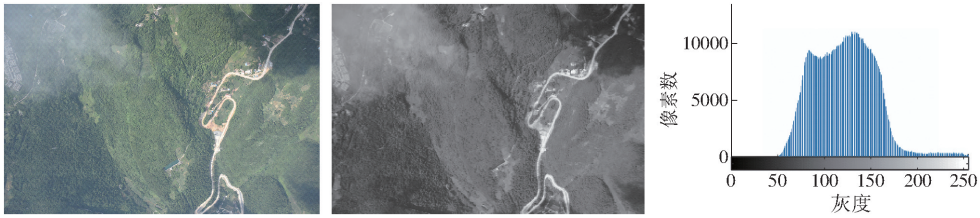
$t(x)$——图像透射率

基于大气散射物理模型的图像去雾,实际上是根据已知的含雾图像 $I(x)$ 及强力的先验条件计算出相应的透射率 $t(x)$ 及大气光值 A,得到原始图像 $J(x)$,即

$$J(x)=\frac{I(x)-A}{t(x)}+A \tag{2}$$

1.2 暗原色通道先验理论

HE 等[8]借助自然场景下 5 000 多幅无雾图像进行统计分析,发现其暗通道图的像素值中有 86% 分布在[0,16]的灰度范围,基于此概率统计值,提出了暗原色通道先验理论模型。无雾和含雾图像的暗通道之间存在显著区别,因而暗通道的区别可以反映含雾图像中雾的分布状况。图 2 中分别展示了含雾图像、暗通道图和直方图的情况。含雾图像的像素值大多集中在 75 ~ 175 之间,极大地影响了图像中有效信息的获取和解析。



(a) 含雾图像原图 (b) 含雾图像暗通道图 (c) 含雾图像直方图

图 2 含雾图像原图、暗通道和直方图分布效果

Fig. 2 Effects of original image, dark channel image and histogram of foggy image

对于任意一幅图像,原始图像为 $J(x)$,其暗原色图像 J^{dark} 可表示为

$$J^{\text{dark}}(x)=\min_{C\in\{R,G,B\}}\left(\min_{y\in\Omega(x)}(J^C(y))\right) \tag{3}$$

式中 $J^C(y)$——原始图像的某个像素值通道

$\Omega(x)$——以 x 为中心的局部图像块,对原始图像做等尺寸划分得到

由式(3)可知,暗原色图像 J^{dark} 通过 2 个极小值操作子对图像进行运算得到,首先由 $\min_{C\in(R,G,B)}$ 对每一个像素点求取其在 R、G、B 通道中的最小颜色值;计算每个局部图像块内的最小值,$\min_{y\in\Omega(x)}$ 可视为一个最小值滤波操作。结合暗原色通道先验理论和式(1)可得透射率的粗略值 t' 为

$$t'=1-\min_{C}\left(\min_{y\in\Omega(x)}\left(\frac{I^C(y)}{A^C}\right)\right) \tag{4}$$

式中 $I^C(y)$——含雾图像的某个像素值通道

A^C——大气光通道

当透射率 t 接近于 0 时,J 将会对噪声非常敏感,此时常用做法是给 t 的取值限定下限 $t_{\min}$,结合式(2)可得最终的去雾图像模型为

$$J(x)=\frac{I(x)-A}{\max(t(x),t_{\min})}+A \tag{5}$$

1.3 先验暗通道算法存在的问题分析

暗通道先验理论基于“在以 x 为中心的方形区域 $\Omega(x)$ 内的透射率 $t(x)$ 保持不变”这一假设[8],但是 $t(x)$ 是关于场景深度的函数,与景物深度信息相关,景物越近,暗通道的值越低,景物越远,暗通道的值越高[18]。由于农田图像含有丰富的色彩和纹理信息,且图像中的景深信息变化强烈,当滤波器滑窗遍历到景深变化区域时,会导致复原出的无雾图像光强增大,引起 Halo 效应[19],如果选取的邻域窗口过小,则会因为较多区域不存在暗通道使复原图像出现色彩偏移。当在暗通道算法中引入软抠图对透射率进行细化,虽然去雾图像 Halo 效应得到了较好的解决,但是因为软抠图涉及大型矩阵的计算,算法效率低下,而在农田中获取的图像预处理往往具有大批量、实时性要求高的特点,难以满足实际应用。因此,本文提高农业场景图像去雾效果和性能的重点在于如何保证以 x 为中心的区域内只包含同一个景深物体,得到精细的透射率传播图,同时提升去雾的速度以满足实时性要求。

2 暗通道先验去雾算法改进

由于暗通道先验去雾算法是在假定局部区域内透射率相同这一条件,使用传统的方形窗口在景深突变区域时该假设不再成立,导致对局部透射率错误估计,因而需要对透射率进行优化和细化,以获得

精确度高的复原图像。本文利用超像素分割对遥感图像进行分块细化估计透射率，同时采用改进的引导滤波优化透射率，并加入自适应容差机制对透射率进行补偿，选择带有自适应调整的局部大气光估计方法得到良好的大气光，最终复原得到清晰图像，本文图像去雾算法流程如图 3 所示。

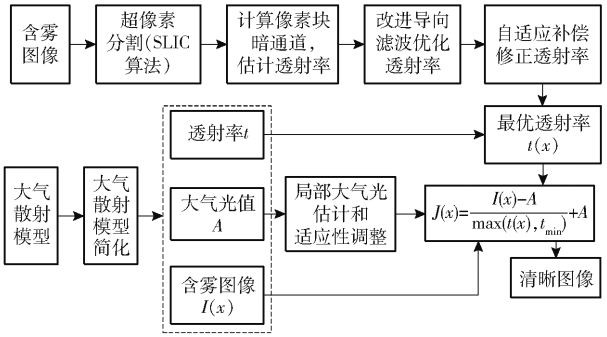
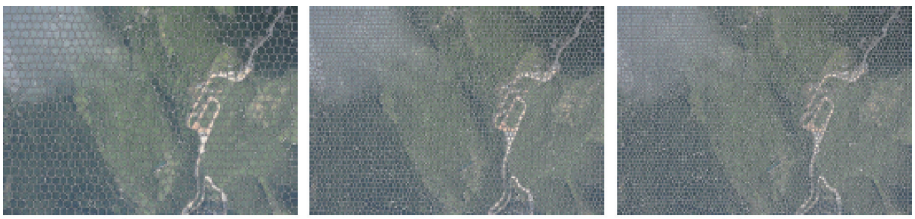


图 3　图像去雾算法流程图

Fig. 3　Flowchart of image dehazing algorithm

2.1　超像素分割细化透射率

在暗通道去雾算法中，计算暗通道图时邻域窗口尺寸的选取对图像去雾的效果有重要影响。由于超像素分割的超像素块区域色相、饱和度和亮度等属性上具有极强的一致性，各个像素块在景深以及透射率上也具有很高的一致性，因此可将超像素块区域 $F(x)$ 替换原来暗通道算法中的固定方形窗口，并利用暗通道先验理论在超像素级尺度来估计透射率。在超像素分割算法中，简单线性迭代聚类分割(Simple linear iterative clustering，SLIC)是对颜色相似度和空间距离关系进行聚类的超像素分割算法，便于控制超像素分割紧密度，且运行效率高[20]，因此选择 SLIC 算法对输入图像进行超像素分割，分割效果如图 4 所示(图像分辨率为 1 200 像素 ×800 像素)，K 代表分割超像素块数量。经多次试验，当 $K=4\,000$ 时，可兼顾去雾效果和运算速度。



(a) K=1000　(b) K=3000　(c) K=4000

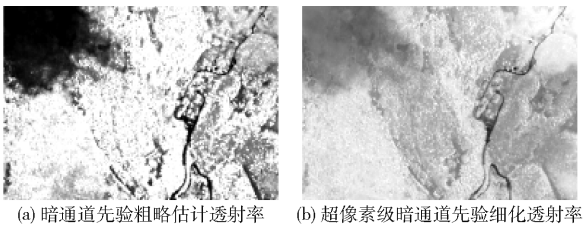
图 4　超像素分割效果示例

Fig. 4　Examples of super pixel segmentation

当对超像素块区域 $F(x)$ 提取暗通道时，可以得到鲁棒性和精确性更好的透射率估计值，避免由于景深变化导致的错误估计，也能有效降低噪声干扰。此时式(4)可变为

$$t'=1-\min_{C\in(R,G,B)}\left(\min_{y\in F(x)}\left(\frac{I^C(y)}{A^C}\right)\right) \tag{6}$$

直接利用暗通道先验算法得到的粗略估计透射率效果和利用超像素分割得到的细化透射率图像效果如图 5 所示，可以发现超像素级暗通道先验算法得到的透射率效果明显优于暗通道先验算法粗略估计得到的透射率。在实际环境下，即便处于晴朗天气，大气中依然存在一定数量的颗粒。因此，在航拍距离较远的地面目标时，图像中依然存在一定的“轻微雾化”现象。如果对这些区域进行彻底去雾，



(a) 暗通道先验粗略估计透射率　(b) 超像素级暗通道先验细化透射率

图 5　暗通道先验算法粗略估计透射率效果

Fig. 5　Effects of rough transmittance image using dark channel prior

不仅会导致图像失真，还会使图像的深度信息弱化。通常的选择是对远处成像物体维持微弱的雾化效果。具体做法是在式(6)中引入一个常参数 ω ($0<\omega<1$)，依据应用场景的不同 ω 可适应性地进行选择，此时透射率估计值为

$$t'=1-\omega\min_{C\in(R,G,B)}\left(\min_{y\in F(x)}\left(\frac{I^C(y)}{A^C}\right)\right) \tag{7}$$

2.2　改进导向滤波优化透射率

超像素分割得到的区域与传统的方形区域相比，其稳健性和细致性都有所提高，在边缘细节和平滑性上仍然略显不足。为了弥补这一方面的不足，将导向滤波算法引入并利用自适应平滑参数进行改进，以获得更细致的透射率。引导滤波算法计算速度快、运行效率高[21]，有助于快速提高图像的品质[22]，导向滤波过程示意图如图 6 所示，p 为滤波输入图像；在导向滤波操作时需要一幅引导图像 I，q 为滤波输出图像。q 则是 p 和 I 共同作用的产物，可以使输出图像与引导图像的边缘保持一致并且减少运算时间。

在图 6 中，滤波输入图像 p_i 和滤波输出图像 q_i 之间的约束条件关系为 $q_i=p_i-n_i$，p_i 为 q_i 受到雾气 n_i 影响的退化图像。假设引导图像 I_i 和滤波输出图

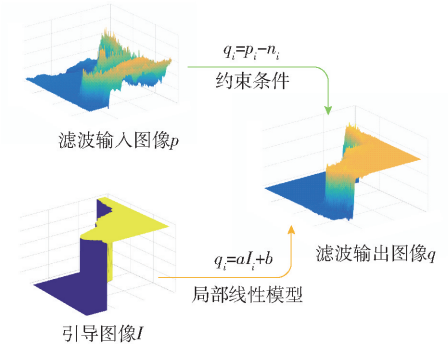


图 6 导向滤波过程示意图

Fig. 6 Schematic of guided filtering process

像 q_i 在超像素块区域 $F(x)$ 内存在局部线性关系，即

$$q_i = aI_i + b \quad (\forall i \in F(x)) \tag{8}$$

式中，a 和 b 是在超像素块区域 $F(x)$ 中的线性不变系数，根据图像复原的方法可以转换为求 a 和 b 的最优化问题。为了求取 a 和 b 的最优解，且最小化滤波输入图像 p 和滤波输出图像 q 之间的差异性，构建超像素块区域 $F(x)$ 中的代价函数

$$E(a,b) = \sum_{i \in F(x)} [(aI_i + b - p_i)^2 + \varepsilon a^2] \tag{9}$$

式中 ε 为正则化参数，其作用是将 a 控制在合理范围内。此时利用线性回归求解代价函数可得

$$a = \frac{\frac{1}{|F|}\sum_{i \in F(x)} I_i p_i - \mu \bar{p}}{\sigma^2 + \varepsilon} \tag{10}$$

$$b = \bar{p} - a\mu \tag{11}$$

式中 $|F|$——超像素块区域 $F(x)$ 内的像素总数

μ——I 在 $F(x)$ 内的平均值

σ^2——I 在 $F(x)$ 内的方差

$\bar{p}$——$F(x)$ 区域内输入滤波图像 p 的均值

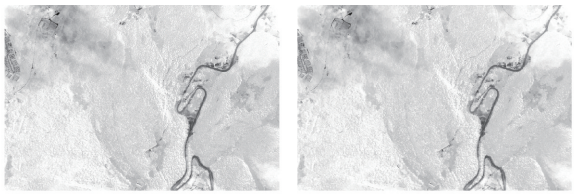
计算每个超像素区域的线性系数时，由于像素 i 包含在不同区域内，超像素区域中对应的 a 与 b 也不一样。引导图像 I 和滤波输出图像 q 在超像素块区域 $F(x)$ 内存在局部线性关系，因此，需要对所有包含该像素 i 的窗口 $F(x)$ 邻域的输出结果求取均值，此时导向滤波的最终表达式为

$$q_i = \frac{1}{|F|}\sum_{i \in F(x)} (aI_i + b) = \bar{a}I_i + \bar{b}_i \tag{12}$$

文中滤波输入图像 p 选择 2.1 节中超像素分割细化得到的透射率，引导图像 I 选择含雾图像的灰度图，通过引导滤波所得到的滤波输出图像 q 为优化后的透射率图像，如图 7a 所示。

2.3 自适应容差补偿透射率

为了解决俯拍场景中的雾气浓度变化问题并有效改善图像去雾后地面白亮区域出现失真的现象，在处理地面明亮区域时加入自适应容差补偿算法，使其能够根据明亮区域的尺寸对透射率进行自适应



(a) 改进导向滤波优化透射率 (b) 自适应容差机制补偿透射率

图 7 采用 2 种优化处理算法得到的透射率图像效果

Fig. 7 Effects of transmittance image using two different optimization algorithms

补偿修正，从而得到质量更高的复原图像[23]。自适应容差对透射率的补偿过程中首先对容差调节图 Map_0 进行定义[24]

$$Map_0(x) = I(x) - \alpha A \tag{13}$$

式中 α——大气光调节参数，取 0.95

在容差调节图中计算像素大于 0 的元素集合 S_0 为

$$S_0 = \{Map_0(x) \mid Map_0(x) > 0\} \tag{14}$$

此时容差参数 T 可表示为

$$T = \min\left(\frac{S_{\text{sum}}}{I(x)_{\text{num}}}, 0.28\right) \tag{15}$$

式中 S_{num}——集合 S_0 中元素的总数

$I(x)_{\text{num}}$——输入图像中所有元素的个数

为避免容差参数过大对明亮区域的误判，对容差参数取上限值 0.28。将容差机制引入透射率的计算表达式为

$$t_{\text{last}}(x) = \begin{cases} t(x) & (|I-A| \geqslant T) \\ \min\left(\max\left(\frac{T}{|I(x)-A|}, 1\right)\right) & (|I-A| < T) \end{cases} \tag{16}$$

由式(16)可知，对于 $|I-A| < T$ 的区域判定为明亮区域，对该区域像素点的透射率修正值为 $\frac{T}{|I(x)-A|}$；对于 $|I-A| \geqslant T$ 的区域判定为非明亮区域，该区域透射率保持原值不改变。图 7 展示了在超像素级暗通道先验基础上利用导向滤波算法优化和连续使用改进导向滤波与自适应容差补偿方法的透射率图像效果，与图 5 相比，图像更为精细、平滑。

2.4 局部大气光估计与适应性调整

去雾的另一个关键过程是对大气光值 A 的估计，若选取的大气光值大于真实值，最终复原出的图像会偏暗，细节显示不完整，反之则导致图像亮度过大。文献[8]采用暗通道中亮度前 0.1% 的像素值对应的原图像素作为大气光值，但是容易出现高估 A 的情况。另外，由于俯拍图像具有取景位置高、作业天气变化大等特点，需要使大气中的粒子干扰具有更强的鲁棒性。文献[25]提出的局部大气光估

计方法可以消除因全局大气光估计不准确导致的过亮或过暗现象，因此选择局部大气光估计方法得到良好的大气光值 A。利用式(5)，将得到的大气光值结合前文中得到的精细透射率图 $t(x)$，代入已知的含雾遥感图像 $I(x)$，即可得高质量的复原图像 $J(x)$。

3　试验与结果分析

为了验证所提方法的有效性，选取 6 幅含不同程度雾霾的农业场景图像进行一系列的对比试验，引导滤波半径设为 65 像素，透射率调节参数 ω 设为 0.95，正则化参数 ε 为 0.000 5。试验环境为 Matlab 2016a，运行系统为 Windows 10，处理器型号为 Inter Core i7 - 7700@ 3.6 GHz，计算机内存为 8 GB。分别与全局平衡直方图算法(Global histogram equalization algorithm，GHEA)、文献[8]暗原色通道先验算法和文献[22]基于引导滤波的暗原色通道先验算法进行复原结果对比。为了建立更全面系统的分析过程，分别利用主观视觉效果和客观指标依次进行评价。

3.1　主观评价方法

分别选取不同含雾程度的不同场景下植被图像进行试验，各算法的去雾效果和含雾原图如图 8 所示。通过图 8 可以看出，利用全局平衡直方图算法得到的去雾图像颜色偏差大，失真严重，而基于暗通道先验理论的 3 种方法去雾效果均优于采用全局平衡直方图算法的去雾效果，表明暗通道先验理论在图像去雾中具有一定的普适性。在利用文献[8]中的暗通道先验算法时，图像整体偏暗，而加入引导滤波算法后的暗通道方法，虽然去雾后的图像整体亮度有所提升，但是白色区域过亮失真，且出现蓝色现象。这 2 种方法在面对低浓度的雾气时，可实现去雾，但是当雾浓度较高时，去雾效果不明显。本文提出的基于超像素级分割和暗通道先验理论及滤波优化后的算法，图像明亮清晰，恢复效果好，有助于后续的图像分析研究。本文方法在面对浓度较大雾时，也可去除绝大部分的雾气，对于远处成像的物体维持微弱的雾化效果，既可保持图像的真实性，又保留遥感图像的深度信息。

3.2　客观评价指标

为了更加全面、客观地评价上述不同方法对遥感图像的去雾效果，本文选取平均值(Mean)、标准差(Standard deviation，SD)、信息熵(Information

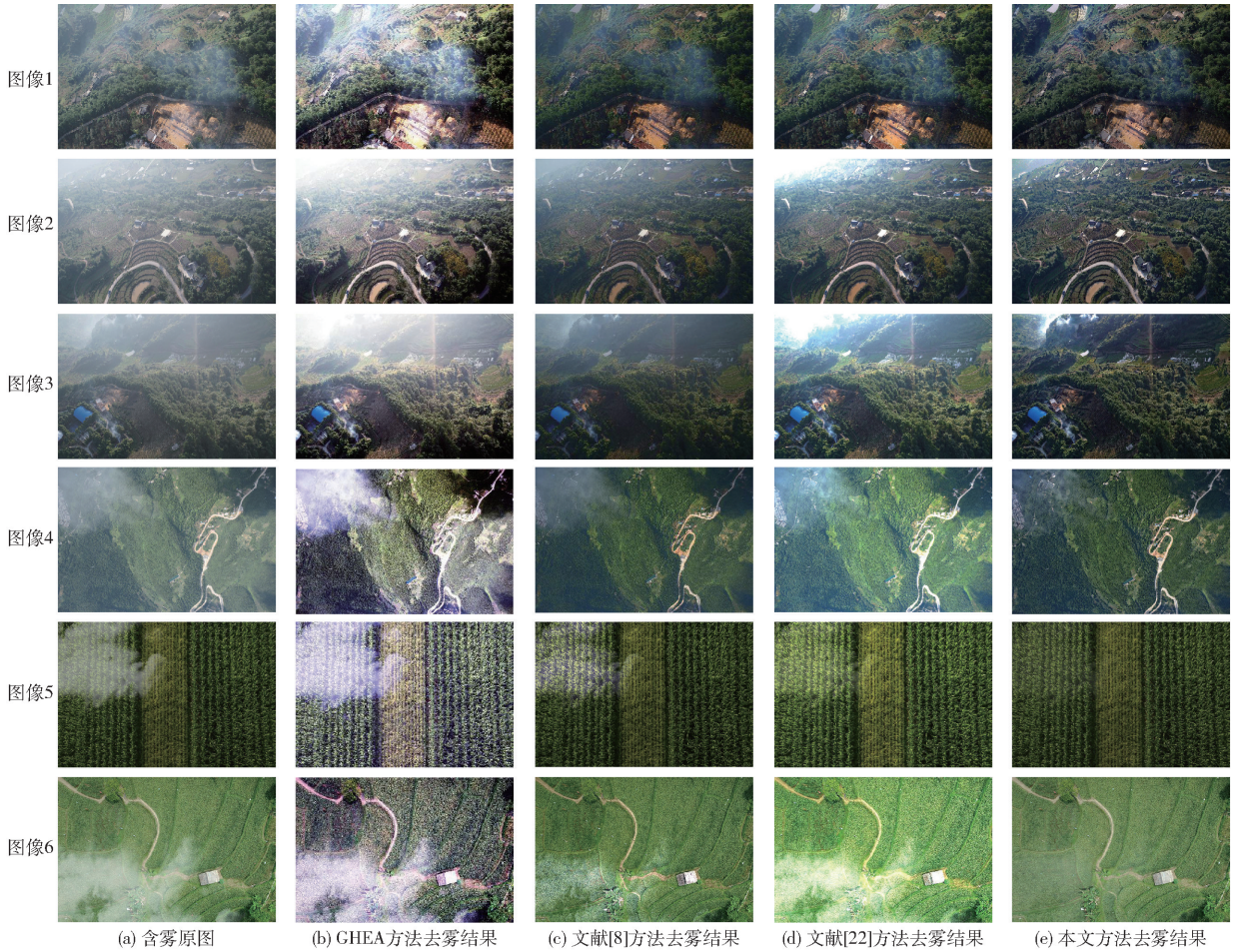


图 8　不同去雾方法的结果比较

Fig. 8　Comparisons of results of different dehazing methods

entropy,IENT)和平均梯度(Average gradient,AG)这4个指标对图像质量进行定量评价。均值反映了图像的亮度,均值越大说明图像亮度越大,反之越小。标准差反映了图像像素值与均值的离散程度或像素值的波动范围,标准差在特定范围内可以反映图像的质量,标准差过小,图像对比不明显,不能凸显有效信息;标准差过大时,图像对比强烈,影响视觉效果。客观评价对试验选取的6幅含雾原图及不同算法去雾后的图像均值、标准差统计情况如表1、2所示。信息熵是指图像中排除了冗余信息后的平均信息量,反映图像的信息量,信息熵越大,图像中包含的信息越丰富,则表明图像的去雾效果越好。客观评价试验中得到的信息熵统计情况如表3所示。平均梯度可敏感地反映图像对微小细节反差表达的能力,用于评价图像的模糊程度时,平均梯度越大,图像层次越多,图像轮廓清晰度也越高。客观评价得到的平均梯度统计情况如表4所示。

表1 原图及不同方法去雾后的图像均值统计

Tab.1 Mean statistics of original image and different algorithms after haze removal

类别	含雾原图	GHEA方法	文献[8]方法	文献[22]方法	本文方法
图像1	108.51	127.74	61.18	73.76	63.55
图像2	132.28	127.77	71.86	99.63	82.66
图像3	114.54	128.73	57.67	109.75	67.33
图像4	115.10	127.51	64.32	116.98	69.43
图像5	119.53	128.04	68.06	122.67	71.16
图像6	133.98	127.61	49.78	115.32	75.05

表2 原图及不同方法去雾后的图像标准差统计

Tab.2 Standard deviation statistics of original image and different algorithms after haze removal

类别	含雾原图	GHEA方法	文献[8]方法	文献[22]方法	本文方法
图像1	40.98	74.60	33.45	42.46	39.47
图像2	47.71	74.74	43.37	61.88	46.11
图像3	45.09	74.87	36.94	64.41	41.75
图像4	36.81	74.79	32.35	56.10	36.95
图像5	32.77	74.94	29.44	48.20	35.92
图像6	13.38	74.78	13.06	28.55	30.35

由表1可知,原图由于雾霾因素的存在,图像均值均大于108,利用全局平衡直方图GHEA方法增强后均值增大至127以上,因此图像亮度过强。采用文献[8]方法对图像去雾后,均值大大降低,因此在图8c中,图像整体偏暗;采用文献[22]方法对图像去雾后,图像出现白亮区域,整体均值增加;本文方法由于去除了大量雾气,与采用文献[22]方法去雾图像相比均值有所下降,但高于文献[8]方法对图像去雾后的均值,这也是在图8中采用

表3 原图及不同方法去雾后的图像信息熵统计

Tab.3 Information entropy statistics of original image and different algorithms after haze removal

类别	含雾原图	GHEA方法	文献[8]方法	文献[22]方法	本文方法
图像1	15.67	16.16	15.35	15.92	16.46
图像2	14.87	15.38	15.23	15.96	16.28
图像3	13.71	14.77	13.90	15.34	15.66
图像4	13.52	15.43	13.54	14.61	15.66
图像5	13.92	15.70	14.08	15.17	16.33
图像6	10.48	14.19	11.35	13.96	14.29

表4 原图及不同方法去雾后的图像平均梯度统计

Tab.4 Average gradient statistics of original image and different algorithms after haze removal

类别	含雾原图	GHEA方法	文献[8]方法	文献[22]方法	本文方法
图像1	15.67	16.16	15.35	15.92	16.46
图像2	14.87	15.38	15.23	15.96	16.28
图像3	13.71	14.77	13.90	15.34	15.66
图像4	13.52	15.43	13.54	14.61	15.66
图像5	13.92	15.70	14.08	15.17	16.33
图像6	10.48	14.19	11.35	13.96	14.29

GHEA方法和采用文献[22]方法去雾后图像亮度过强的原因。在表2中,6幅含雾原图标准差大多集中在32.77~47.71范围内;利用全局平衡直方图GHEA方法处理后,标准差稳定在74.60~74.94之间,但过大的标准差使得图像在视觉上对比强烈;采用本文方法得到的标准差较为稳定,因此从视觉上观察到的图像视觉效果良好。由表3可知,本文方法去雾得到的图像信息熵值最大,表明得到的图像信息量最丰富,可以满足后续的研究工作。由表4可知,本文方法平均梯度最高,更多地描述了图像的细节信息,尤其是含有浓雾的图像,经本文方法处理后,平均梯度值增加效果最明显,进一步表明本文方法的有效性。总体而言,本文去雾方法对含雾图像处理后质量更佳。

3.3 去雾方法实时性

去雾方法的运行耗时直接影响着去雾的实时性,耗时越低,表明算法的效率越高。不同方法在去雾过程中的运算耗时如表5所示。由表5可知,本文方法耗时与文献[22]方法耗时相差不大,但远远低于文献[8]方法耗时,高于CHEA方法的耗时。原因在于,文献[8]在计算透射率时采用软抠图思路,利用大型拉普拉斯矩阵进行运算,数据量大,导致计算效率低,随着图像像素的增加,计算耗时急剧增加;加入引导滤波算法后,可大大降低图像运算量,本文在超像素分割基础上采用引导滤波和自适应容差机制细化透射率,因此运行时间略高于文献[22]

表 5　不同去雾算法的运算耗时对比

Tab. 5　Comparison of operation time of different defogging algorithms　　s

图像分辨率/（像素 ×像素）	GHEA 方法	文献[8]方法	文献[22]方法	本文方法
300 ×200	0.221 7	0.514 6	0.478 8	0.498 7
600 ×400	0.293 6	0.974 2	0.674 7	0.691 9
1 200 ×800	0.497 2	2.897 3	1.650 3	1.787 6
2 400 ×1 600	1.285 2	7.476 9	3.578 9	3.794 1

方法的运行耗时。在田间遥感监测研究中，图像分辨率过大时并不能保证最优的解析效果，将图像分辨率控制在 1 200 像素 ×800 像素左右时，对信息解析的结果影响不大，此时的去雾过程也具有一定的实时性，可以满足机器人视觉监测的应用要求。

4　结束语

高质量的农田图像对于信息获取和解析至关重要。本文针对农田雾霾图像清晰化处理过程的不足，提出了一种基于超像素级暗通道先验和自适应导向滤波算法的农业场景图像去雾方法。超像素分割算法可细化透射率，获得稳健细致的图像，导向滤波算法可对图像透射率进一步优化，在获得更细致的透射率同时能够加快图像处理速度，加入自适应容差机制后，可有效应对俯视航拍场景中的雾气浓度随时间和位置发生变化的情况，实现自适应精细去雾。试验结果表明，本文方法与 GHEA 方法、文献[8]和文献[22]中方法相比，对农田图像去雾有着更好的适用性，复原后的图像质量较好，保留了原图的色彩信息和丰富的细节信息。当图像分辨率为 300 像素 ×200 像素时，本文方法耗时仅为 0.498 7 s，当图像分辨率为 600 像素 ×400 像素时，耗时为 0.691 9 s，具有良好的实时性，可为精准农业作物表型信息解析提供研究基础。

参　考　文　献

[1] 田军仓，杨振峰，冯克鹏，等. 基于无人机多光谱影像的番茄冠层 SPAD 预测研究[J/OL]. 农业机械学报，2020，51(8)：178 - 188.
TIAN Juncang, YANG Zhenfeng, FENG Kepeng, et al. Prediction of tomato canopy SPAD based on UAV multispectral image [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8): 178 - 188. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20200820&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.s0.026. (inChinese)

[2] 刘建刚，赵春江，杨贵军，等. 无人机遥感解析田间作物表型信息研究进展[J]. 农业工程学报，2016，32(24)：98 - 106.
LIU Jian'gang, ZHAO Chunjiang, YANG Guijun, et al. Review of field-based phenotyping by unmanned aerial vehicle remote sensing platform[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(24): 98 - 106. (in Chinese)

[3] 高若婉，梅树立，李丽，等. 基于小波精细积分与暗通道的农田图像去雾算法[J/OL]. 农业机械学报，2019，50(增刊)：167 - 174.
GAO Ruowan, MEI Shuli, LI Li, et al. Farmland image dehazing nethod based on wavelet precise integration and dark channel prior[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(Supp.): 167 - 174. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 2019s026&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.S0.026. (in Chinese)

[4] 鲍一丹，李艺健，何勇，等. 基于波段权重的多尺度 Retinex 遥感图像渐晕校正方法[J]. 农业工程学报，2019，35(17)：186 - 193.
BAO Yidan, LI Yijian, HE Yong, et al. Vignetting correction for remote sensing image using multi-scale Retinex based on band weight[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(17): 186 - 193. (in Chinese)

[5] 董丽丽，丁畅，许文海. 基于直方图均衡化图像增强的两种改进方法[J]. 电子学报，2018，46(10)：2367 - 2375.
DONG Lili, DING Chang, XU Wenhai. Two improved methods based on histogram equalization for image enhancement[J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(10): 2367 - 2375. (in Chinese)

[6] 蔡道清，周洪宇，覃程锦，等. 基于小波变换的农田图像光照不变特征提取算法[J/OL]. 农业机械学报，2020，51(2)：15 - 20.
CAI Daoqing, ZHOU Hongyu, QIN Chengjin, et al. Extraction algorithm of illumination invariant feature for farmland image based on wavelet transform[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 15 - 20. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 2002002&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.02.002. (in Chinese)

[7] 姜德晶，王树臣，曾勇，等. 基于图像分割映射的农业机器人视觉去雾方法[J/OL]. 农业机械学报，2016，47(11)：25 - 31.
JIANG Dejing, WANG Shuchen, ZENG Yong, et al. Agricultural robot visual dehazing method based on image segmentation map[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 25 - 31. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20161104&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.004. (in Chinese)

[8] HE K, SUN J, TANG X. Single image haze removal using dark channel prior[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2010, 33(12): 2341 - 2353.

[9] 王泽胜，董宝田，赵芳璨，等. 基于改进暗通道先验的交通图像去雾新方法[J]. 控制与决策，2018，33(3)：486 - 490.
WANG Zesheng, DONG Baotian, ZHAO Fangcan, et al. Improved dehazing method for traffic images based on dark channel

prior[J]. Control and Decision,2018,33(3):486 - 490. (in Chinese)
[10] 张晨,杨燕. 基于融合与高斯加权暗通道的单幅图像去雾算法[J]. 光子学报,2019, 48(1): 110002.
ZHANG Chen, YANG Yan. Single image dehazing algorithm based on fusion and Gaussian weighted dark channel[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(1): 110002. (in Chinese)
[11] 向文鼎,杨平,许冰. 基于自适应阈值分割与透射率融合的图像去雾算法[J]. 计算机工程,2019,45(10):239 - 245.
XIANG Wending, YANG Ping, XU Bing. Image dehazing algorithm based on adaptive threshold segmentation and transmittance fusion[J]. Computer Engineering,2019,45(10): 239 - 245. (in Chinese)
[12] 韩昊男,钱锋,吕建威,等. 改进暗通道先验的航空图像去雾[J]. 光学精密工程,2020,28(6):1387 - 1394.
HAN Haonan, QIAN Feng, LÜ Jianwei, et al. Aerial image dehazing using improved dark channel prior[J]. Optics and Precision Engineering,2020,28(6):1387 - 1394. (in Chinese)
[13] 辛娇娇,陈本豪,郭元术,等. 基于改进暗通道先验的图像去雾算法[J]. 郑州大学学报(理学版),2020,52(1):72 - 78.
XIN Jiaojiao, CHEN Benhao, GUO Yuanshu, et al. Image defogging algorithm based on improved dark channel prior[J]. Journal of Zhengzhou University(Science Edition),2020,52(1):72 - 78. (in Chinese)
[14] 杨燕,王志伟. 基于均值不等关系优化的自适应图像去雾算法[J]. 电子与信息学报,2020,42(3):755 - 763.
YANG Yan, WANG Zhiwei. Adaptive image dehazing algorithm based on mean unequal relation optimization[J]. Journal of Electronics & Information Technology,2020,42(3):755 - 763. (in Chinese)
[15] 李雅梅,张旭佳,谢秉旺. 基于亮度模型融合的改进暗通道先验图像去雾算法[J]. 激光与光电子学进展,2020,57(22): 67 - 73.
LI Yamei, ZHANG Xujia, XIE Bingwang. An improved dark channel prior image dehazing algorithm based on fusion luminance model[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020,57(22):67 - 73. (in Chinese)
[16] 安冬,国凌明,邵萌,等. 基于暗通道先验的自适应超像素去雾算法[J]. 控制与决策,2020,35(8):1929 - 1934.
AN Dong, GUO Lingming, SHAO Meng, et al. An adaptive superpixel defogging algorithm based on dark channel prior[J]. Control and Decision,2020,35(8):1929 - 1934. (in Chinese)
[17] 王睿,李蕊,廉小亲. 基于大气多散射模型和超像素分割的图像去雾[J]. 光子学报,2016,45(4): 410002.
WANG Rui, LI Rui, LIAN Xiaoqin. Multiple scattering model based image dehazing with superpixel[J]. Acta Photonica Sinica,2016,45(4): 410002. (in Chinese)
[18] 陈书贞,任占广,练秋生. 基于改进暗通道和导向滤波的单幅图像去雾算法[J]. 自动化学报,2016,42(3):455 - 465.
CHEN Shuzhen, REN Zhanguang, LIAN Qiusheng. Single image dehazing algorithm based on improved dark channel prior and guided filter[J]. Acta Automation Sinica, 2016, 42(3):455 - 465. (in Chinese)
[19] 刘国, 吕群波, 刘扬阳. 基于自适应暗原色的单幅图像去雾算法[J]. 光子学报, 2018, 47(2):210001.
LIU Guo, LÜ Qunbo, LIU Yangyang. Single image dehazing algorithm based on adaptive dark channel prior[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(2): 210001. (in Chinese)
[20] 徐浩,谭一博,刘博文,等. 基于超像素和暗通道先验的图像去雾复原方法[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版),2020, 50(10):118 - 124.
XU Hao, TAN Yibo, LIU Bowen, et al. Image dehazing method based on super pixels and dark channel prior[J]. Periodical of Ocean University of China, 2020,50(10):118 - 124. (in Chinese)
[21] HE K, SUN J, TANG X. Guided image filtering[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 35(6):1397 - 1409.
[22] USMAN A, IK H L, MUHAMMAD T M. Guided image filtering in shape-from-focus: a comparative analysis[J]. Pattern Recognition,2021,111(8):107670.
[23] YANG Fan, TANG Shoulian. Adaptive tolerance dehazing algorithm based on dark channel prior[J]. Algorithms, 2020, 13(2):45.
[24] 金仙力,张威,刘林峰. 基于引导滤波和自适应容差的图像去雾算法[J]. 通信学报,2020,41(5):27 - 36.
JIN Xianli, ZHANG Wei, LIU Linfeng. Image defogging algorithm based on guided filtering and adaptive tolerance[J]. Journal of Communications, 2020,41(5):27 - 36. (in Chinese)
[25] SUN Wei, WANG Hao, SUN Changhao, et al. Fast single image haze removal via local atmospheric light veil estimation[J]. Computers and Electrical Engineering,2015,46(4):371 - 383.