doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.S0.026

基于小波精细积分与暗通道的农田图像去雾算法

高若婉　梅树立　李　丽　王爱萍
(中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

摘要: 基于暗通道先验原理,提出一种 Shannon - Cosine 小波结合精细积分法的农田图像去雾算法。针对现有透射率估计方法中存在的块效应以及复原后图像纹理丢失的问题,该算法对透射率图进行了细化,利用非线性偏微分方程保边特性,运用小波数值方法对其离散,降低方程组规模。并采用精细积分法求解,提高计算精度。达到了对透射率图局部平滑、边缘突出的目的。同时,对大气值 A 的计算方法进行改进,提高了运算速度。实验结果表明:本文算法得到的透射率图恢复的图像具有更好的清晰度,纹理更加丰富,相比于原暗通道算法,本文算法新增可见边之比提高了 30.36%,对比度提高了 40.72%,标准差提高了 28.21%,该算法可实现更好的去雾效果。

关键词: 农田图像; 去雾; Shannon - Cosine 小波; 精细积分; 暗通道先验
中图分类号: TP391.41　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2019)S0-0167-08

Farmland Image Dehazing Method Based on Wavelet Precise Integration and Dark Channel Prior

GAO Ruowan　MEI Shuli　LI Li　WANG Aiping
(*College of Information and Electrical Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Images collection of farmland is one of the important components of modern agricultural informatization. From the images, information such as the growth and distribution of crops and pests in the field can be monitored. Foggy weather is a special natural weather phenomenon. When the image of farmland is collected, fog is often caused, resulting in blurred and faded images. Aiming at this problem, based on the dark channel prior, a Shannon - Cosine wavelet precise integration method for farmland images dehazing was proposed. Aiming at the problems of the block effects in the transmission image and the loss of image texture after restoration, the transmission image was refined by the proposed algorithm. According to the characteristics of the transmission image, the nonlinear partial differential equation model was used to smooth and preserve the edge of images. The multi-scale Shannon - Cosine wavelet was used to discretize the equations. In this process, Shannon - Cosine wavelet can adaptively select feature points and identify the image texture to highlight the image texture features. This process reduced the size of the equations and the amount of computation. Then the precise integration method was used to solve the equations, and this method also effectively improved the calculation accuracy. The proposed algorithm also improved the atmospheric value A and improved the operation speed. The experimental results showed that the transmission image obtained by the algorithm had clear boundaries and was locally smooth. The recovered image had better definition and richer texture than the original algorithm. Compared with the original dark channel prior algorithm, the proposed algorithm increased the ratio of newly visible edges by 30.36%, the contrast by 40.72%, and the standard deviation by 28.21%. The proposed algorithm had better dehazing results.

Key words: farmland image; dehazing; Shannon - Cosine wavelet; precise integration; dark channel prior

收稿日期: 2019-04-25　修回日期: 2019-05-20
基金项目: 国家自然科学基金项目(61871380)和北京市自然科学基金项目(4172034)
作者简介: 高若婉(1994—),女,硕士生,主要从事计算机图像处理研究,E-mail: gao.rw@foxmail.com
通信作者: 李丽(1963—),女,教授,博士,主要从事计算机图形图像处理技术研究,E-mail: lili.li@cau.edu.cn

0 引言

农田原野间常常有雾出现,这种天气对农业生产中图像信息采集产生极大的影响,采集到的图像会出现模糊、褪色问题,不利于后续对图像信息的分析与处理[1]。因此,研究图像去雾处理对现代农业信息化有着非常重要的现实意义。

目前已有的图像去雾研究通常可以分为两类[2]:基于传统的图像增强方法和基于物理模型的图像复原方法。基于图像增强的去雾方法不考虑雾对图像造成退化的原因,重点突出图像中某些重要部分,削弱不重要的信息,实现去雾。但该方法会使图像部分信息丢失,使图像失真[3-4]。而基于物理模型的去雾方法是通过构建物理模型,研究图像退化的物理机理,从而恢复清晰图像。物理模型方法由于具有较好的去雾效果,目前已成为图像去雾领域的研究热点。

TAN[5]假设局部区域的可见光为常数,利用马尔可夫随机场理论将复原图像局部对比度最大化,实现去雾效果。该方法操作简单,可实现较明显的去雾效果,但是复原图像颜色过饱和,在景深突变处产生 Halo 效应。FATTAL[6]通过假设物体表面色度与透射率具有局部统计不相关性,利用独立成分分析估计场景反照率。该算法在一般的雾天图像下可取得较为理想的去雾效果,但对浓雾图像和含天空部分图像其统计效果不理想。TAREL 等[7]将中值滤波概念用于对大气耗散函数的处理中,用含雾图像内最小通道估计大气耗散函数,算法基于线性操作,认为除景深突变处其他连续区域平滑。但该方法参数设置较多,不便于操作,且耗时较多。HE 等[8]提出了一种基于暗通道先验(Dark channel prior,DCP)的去雾算法,取得了较好的效果,是目前公认的经典算法。针对该算法出现的图像“块效应”,HE 等采用 LEVIN 等[9]提出的软抠图算法进行优化,有效消除了块效应。但该算法计算量巨大,图像处理效率很低。

魏颖慧等[10]针对 DCP 软抠图算法去雾后色彩较暗、景物不突出的问题,运用了区间插值小波变换对去雾结果图进行了优化,获得的图像更加清晰明亮。但由于软抠图算法本身运算量很大,再用区间插值小波变换对其结果进行处理,更加耗时,因此该方法在实际应用中十分受限。

HE 等[11]在 DCP 算法之后又提出用导向滤波代替软抠图法对透射率图进行优化,大大提升了运算速度,但是导向滤波是将观测到的雾天图像 3 通道图作为导向图,这使得滤波后的透射率图含有丰富的纹理,存在去雾后细节丢失、去雾不彻底及色彩较暗等问题[12]。PARK 等[13]利用加权最小二乘法滤波器对透射率进行了优化,但去雾后图像边缘存在“晕轮”效应。MENG 等[14]通过边界约束估计透射率,并构建了目标函数对透射率进行优化,但是去雾后图像易出现色彩失真现象。

透射率图作为暗通道算法中的中间过程图,用于求解最终去雾图像,其不同于自然图像,并不是纹理越丰富越好[12]。若透射率图纹理过于丰富,会包含噪声和雾的成分,将最终导致去雾不彻底、细节丢失等问题。应当对其进行保边滤波,突出其边界纹理,使其边界清晰、局部光滑。偏微分方程的解本身具有分片光滑的特性,因此适用于对透射率图的优化处理。

基于此,本文提出一种新的结合暗通道和 Shannon-Cosine 小波精细积分法的图像去雾方法。通过非线性偏微分方程模型对透射率图进行平滑保边处理,并利用多尺度 Shannon-Cosine 小波插值算子将非线性偏微分方程离散为常微分方程组。多尺度小波变换理论能自适应选取图像特征点,进而有效识别图像边缘,并且可降低运算规模,提高处理速度。使去雾后的图像更加清晰,更符合视觉效果。

1 暗通道先验去雾

1.1 雾天图像退化模型

在计算机视觉领域,含雾图像通常被描述成方程

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

式中 x——图像点的位置坐标值

$J(x)$——待恢复的无雾图像

$t(x)$——场景透射率函数

A——大气值,反映观测者视线方向无穷远处的光强

$I(x)$——观察到的含雾图像

已知 $I(x)$,需求解 $J(x)$,显然需要一些先验知识和约束条件来求解。

1.2 暗通道先验原理

HE 等[8]通过对大量无雾清晰图像的统计观察,发现了一条广泛适用的规律:暗通道先验,即在任意一幅无雾清晰图像的局部区域内,总是存在一些像素点的某一通道的灰度近乎为零。可表示为

$$J^{dark}(x)=\min_{c\in\{r,g,b\}}\left(\min_{y\in\omega(x)}J^c(y)\right)\to 0 \tag{2}$$

式中 J^c——图像 J 的一个颜色通道

$\omega(x)$——以 x 为中心的局部区域

J^{dark}——图像 J 的暗通道

c——三通道中的某一通道

r、g、b——图像通道

1.3　暗通道先验去雾

(1)求解透射率

首先假设大气值 A 已知,并假设每个局部窗口内的透射率 $t(x)$ 为定值,定义为 $\tilde{t}(x)$。对式(1)变形并对两边求两次最小值运算,得

$$\min_{y\in\omega(x)}\left(\min_{c}\frac{I^c(y)}{A^c}\right)=\tilde{t}(x)\min_{y\in\omega(x)}\left(\min_{c}\frac{J^c(y)}{A^c}\right)+1-\tilde{t}(x) \tag{3}$$

结合式(2)对式(3)求解得

$$\tilde{t}(x)=1-\min_{y\in\omega(x)}\left(\min_{c}\frac{I^c(y)}{A^c}\right) \tag{4}$$

此时可得到透射率的估计值。通常根据实际情况,会加上一个[0,1]区间的修正因子 β,用于保留少许雾气。此时透射率为

$$\tilde{t}(x)=1-\beta\min_{y\in\omega(x)}\left(\min_{c}\frac{I^c(y)}{A^c}\right) \tag{5}$$

(2)求取大气值 A

首先需要获得暗通道图,按照亮度的大小取前0.1%的像素点,记录其坐标。然后在原始图像中对应的位置点取其最高亮度点的值,作为 A。

(3)复原图像

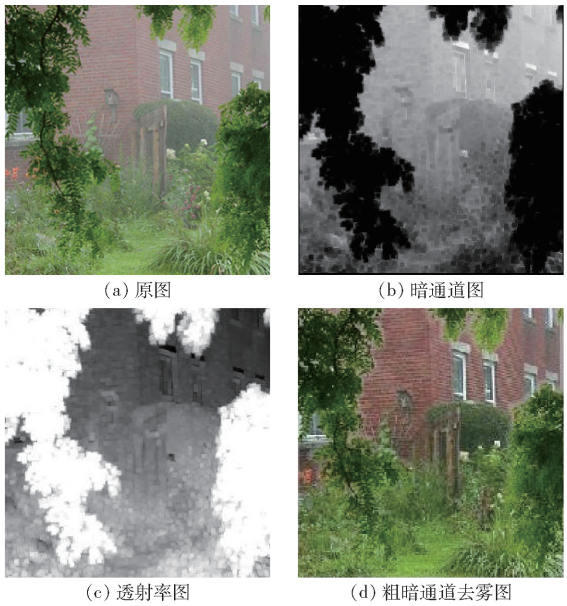
以上步骤已求得透射率 $t(x)$ 与大气值 A,可获得去雾后图像 $J(x)$。当透射率 $t(x)$ 很小时导致 $J(x)$ 过大而图像整体偏白,故一般设置阈值 t_0,当透射率小于 t_0,令 $t=t_0$。$J(x)$ 可表示为

$$J(x)=\frac{I(x)-A}{\max(t(x),t_0)}+A \tag{6}$$

2　基于 Shannon－Cosine 小波精细积分与暗通道的去雾算法

利用暗通道先验的方法对图像进行去雾处理,常常会在景深突变处出现“块效应”,如图 1 所示。从图中可以看出,植物边缘过渡不自然,可以明显看出像素块分布。

“块效应”的产生是因为在求取暗通道图时假设了局部窗口内的透射率为定值,而在实际中并非定值,所以处理后得到的暗通道图会观察到“块效应”。要解决这个问题,需要将透射率图进行细化。其本质是将透射率图在保持纹理特征的同时,进行平滑处理。偏微分方程法适用于处理卡通类图像,即分片光滑图像,因此适用于透射率图的优化问题。P－M 模型是非线性偏微分方程,因其具有保边功能,在图像处理方面应用广泛[15-18]。本文对偏微分方程进行 Shannon－Cosine 小波[19]离散并进行公式



(a) 原图　(b) 暗通道图　(c) 透射率图　(d) 粗暗通道去雾图

图 1　“块效应”示意图

Fig. 1　“Block effect” diagrams

推导,采用精细积分法[20]求解。精细积分法是一种求解线性常微分方程组的半解析数值方法,无须迭代便可直接得到微分方程组几乎精确的数值解。用于非线性常微分方程组求解,也可极大减少迭代次数,增大迭代步长,从而提高算法效率。

2.1　P－M 模型

P－M 模型是一个扩散偏微分方程[21],是将目标边界和用于追踪的封闭轮廓的曲率以及边界和轮廓之间的图像灰度值、梯度值定义为一种能量值,从而建立能量泛函模型。公式为

$$\begin{cases}\dfrac{\partial u(x,y,t)}{\partial t}=\operatorname{div}(g(\|\nabla u\|)\nabla u)\\ u(x,y,0)=u_0(x,y)\end{cases} \tag{7}$$

式中　(x,y)——像素点坐标

t——时间参数

$u(x,y,t)$——处理后的图像,简称为 u

$u(x,y,0)$——初始值

div——散度算子

∇——梯度算子

$g(\|\nabla u\|)$——扩散系数

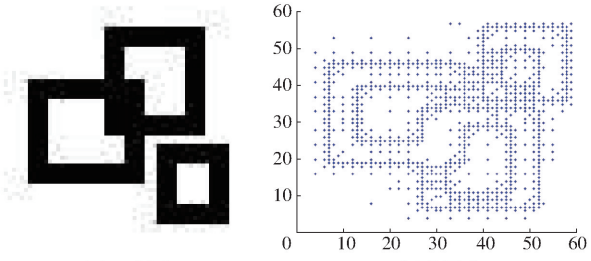
P－M 模型具有各向异性,在图像内部和边缘位置扩散速度不同,在图像平坦区域,$g(\|\nabla u\|)>0$,图像扩散,图像趋于平滑;在边缘处,$g(\|\nabla u\|)=0$,图像停止扩散,图像不再被平滑,进而保护了边缘。其扩散系数函数为

$$g(\|\nabla u\|)=\frac{1}{1+\left(\dfrac{\|\nabla u\|}{K}\right)^2} \tag{8}$$

式中　K——梯度阈值

2.2 多尺度 Shannon - Cosine 小波

本文采用 Shannon - Cosine 小波对透射率图进行处理,小波多尺度插值算子可实现图像纹理的自动捕捉。根据图像灰度值的变化特点自动调整尺度,可以自适应选取图像的特征点,在纹理细节丰富处密集选点,在图像平滑处稀疏选点。因此该方法用于图像处理,可以很好保留图像纹理细节,突出图像景物特征。同时这种自适应的多尺度小波方法不需要对图像中所有的像素点进行计算,只需要处理图像的特征点即可。可以大大提升运算速度。图 2 为 Shannon - Cosine 小波自适应选取配置点示意图。图 2a 为一幅二值图,尺寸为 60 像素 ×60 像素,共有 3 600 个像素点。图 2b 为 Shannon - Cosine 小波自适应选取配置点图,图中配置点个数为 1 005。从图 2b 可以看出,小波插值算子在纹理处密集选点,平滑处稀疏选点,有效识别出图像的纹理特征。



(a) 二值图 (b) 配置点

图 2 多尺度插值算子对图像轮廓的捕捉

Fig. 2 Image contour identification with multi-scale wavelet interpolative operator

Shannon - Cosine 小波是在 Shannon 小波基础上进行的改进,经过 Cosine 函数的调制,使其同时满足正交性、插值性、紧支撑性和连续性等优点,且具有具体的解析表达式,是一种性能良好的小波函数。相比于拟 Shannon 小波[22],改善了其不具有紧支撑性的缺点,在处理效率上得到明显提升。其表达式为

$$S_C(x)=\frac{\sin(\pi x)}{\pi x}T_N^m(x)R_N(x) \tag{9}$$

其中

$$T_N^m(x)=\sum_{n=0}^{m}a_n\cos\frac{2n\pi x}{N} \tag{10}$$

$$R_N(x)=\chi\left(x+\frac{N}{2}\right)-\chi\left(x-\frac{N}{2}\right) \tag{11}$$

式中 $R_N(x)$——区间 $\left[-\frac{N}{2},\frac{N}{2}\right]$ 上的矩形脉冲函数

N——与支撑区间相关的常数

$\chi(x)$——Heaviside 函数

$S_C(x)$——Shannon - Cosine 函数

$T_N^m(x)$——Cosine 函数的线性组合

a_n——线性组合系数,即控制函数光滑程度

$$\chi(x)=\begin{cases}0 & (x<0)\\ 1/2 & (x=0)\\ 1 & (x>0)\end{cases} \tag{12}$$

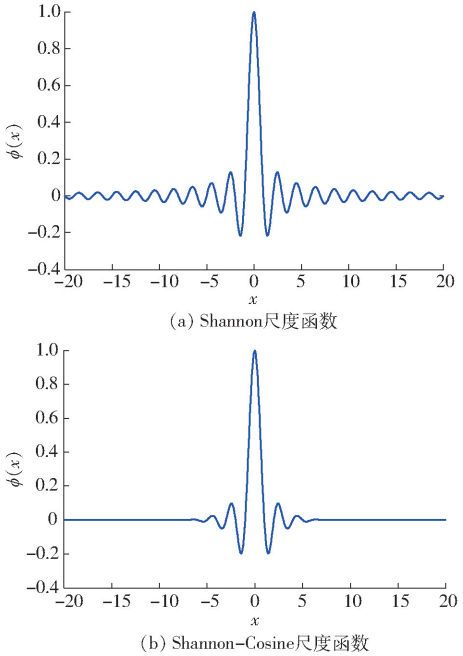
插值基函数为

$$\phi(x)=\frac{\sin\frac{\pi}{\Delta}(x-x_n)}{\frac{\pi}{\Delta}(x-x_n)}\sum_{n=0}^{m}\left(a_n\cos\left(\frac{2n\pi}{N}(x-x_n)\right)\right)\cdot\left(\chi\left(x-x_n+\frac{N}{2}\right)-\chi\left(x-x_n-\frac{N}{2}\right)\right) \tag{13}$$

其中 $\Delta=\frac{x_{\max}-x_{\min}}{2^j}$ $(x\in[x_{\min},x_{\max}])$

$$x_n=x_o+n\Delta$$

$R_N(x)$ 函数强制使新的 Shannon 尺度函数满足紧支撑性,但同时破坏了在端点处 $x=\pm N/2$ 的连续性,且 $S_C(x)$ 不满足归一化特性。可通过选择参数 $a_i(i=0,1,\cdots,m)$ 和 N,来使其达到归一化特性[19]。图 3 为 Shannon 尺度函数和 Shannon - Cosine 尺度函数对比图,从图中可以看出,Shannon - Cosine 尺度函数支撑区间较小,满足紧支撑性,可以有效减少在图像处理中产生的边界效应。



(a) Shannon尺度函数

(b) Shannon-Cosine尺度函数

图 3 Shannon 尺度函数和 Shannon - Cosine 尺度函数的比较

Fig. 3 Comparison of Shannon scaling functions and Shannon - Cosine scaling functions

小波系数计算公式

$$\alpha_{j,k}=\sum_{n=0}^{2^J}\left(R_{2k+1,n}^{j+1,J}-\sum_{k_0=0}^{2^{j_0}}R_{k_0,n}^{j_0,J}\phi_{j_0,k_0}(x_{j+1,2k+1})\right)f(x_{J,n})-\sum_{n=0}^{2^J}\sum_{j_1=j_0}^{j-1}\sum_{k_1=0}^{2^{j_1}-1}\alpha_{j_1,k_1}\psi_{j_1,k_1}(x_{j+1,2k+1}) \tag{14}$$

其中
$$R_{k,n}^{j,J}=\begin{cases}1 & (x_{j,k}=x_{J,n})\\ 0 & (x_{j,k}\neq x_{J,n})\end{cases} \tag{15}$$

多尺度插值小波算子表达式为

$$Q_J=\sum_{k=0}^{2^{j0}}R_{k,n}^{j_0,J}\phi_{j_0,k}(x)+\sum_{j=j_0}^{J-1}\sum_{k=0}^{2^j-1}C_{k,n}^{j,J}\psi_{j,k}(x) \tag{16}$$

2.3　二维偏微分方程的小波配置法

设二维偏微分方程为

$$\begin{cases}\dfrac{\partial u(x,y,t)}{\partial t}=\dfrac{\partial^2 u(x,y,t)}{\partial x^2}+\dfrac{\partial^2 u(x,y,t)}{\partial y^2} & ((x,y)\in\Omega)\\ u(x,y,t)=0 & ((x,y)\in\partial\Omega)\end{cases} \tag{17}$$

根据配置法思想，将偏微分方程的解近似表示为

$$\tilde{u}_j(x,y)=\sum_{n_1=0}^{2^j}\sum_{n_2=0}^{2^j}\tilde{u}_j(x_{n_1},y_{n_2})\phi_{j;n_1,n_2}(x,y) \tag{18}$$

将式(18)代入式(17)可得其小波离散格式为

$$\sum_{n_1=0}^{2^j}\sum_{n_2=0}^{2^j}\tilde{u}(x_{n_1},y_{n_1})\cdot\left(\frac{\partial^2\phi_{j;n_1,n_2}(x_{k_1},y_{k_2})}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\phi_{j;n_1,n_2}(x_{k_1},y_{k_2})}{\partial y^2}\right)=\frac{\mathrm{d}u_j(x_{k_1},y_{k_2})}{\mathrm{d}t} \tag{19}$$

$k_1=0,1,\cdots,2^j$；$k_2=0,1,\cdots,2^j$。$j\in\mathbf{Z}$。记

$$\begin{aligned}\boldsymbol{V}_j=[&u_j(x_0,y_0,t)\ u_j(x_1,y_0,t)\ \cdots\ u_j(x_{2^j},y_0,t)\\&u_j(x_0,y_1,t)\ u_j(x_1,y_1,t)\ \cdots\ u_j(x_{2^j},y_1,t)\ \cdots\\&u_j(x_0,y_{2^j},t)\ u_j(x_1,y_{2^j},t)\ \cdots\ u_j(x_{2^j},y_{2^j},t)]^{\mathrm{T}}\end{aligned} \tag{20}$$

$$\boldsymbol{W}=\begin{bmatrix}w_{0,0} & w_{0,1} & \cdots & w_{0,2^j}\\ w_{1,0} & w_{1,1} & \cdots & w_{1,2^j}\\ \vdots & \vdots & & \vdots\\ w_{2^j,0} & w_{2^j,1} & \cdots & w_{2^j,2^j}\end{bmatrix} \tag{21}$$

$$\boldsymbol{w}_{n_1,n_2}=\begin{bmatrix}m_{n_1,n_2}^{0,0} & m_{n_1,n_2}^{0,1} & \cdots & m_{n_1,n_2}^{0,2^j}\\ m_{n_1,n_2}^{1,0} & m_{n_1,n_2}^{1,1} & \cdots & m_{n_1,n_2}^{1,2^j}\\ \vdots & \vdots & & \vdots\\ m_{n_1,n_2}^{2^j,0} & m_{n_1,n_2}^{2^j,1} & \cdots & m_{n_1,n_2}^{2^j,2^j}\end{bmatrix} \tag{22}$$

$$m_{n_1,n_2}^{k_1,k_2}=\frac{\partial^2\phi_{j;n_1,n_2}(x_{k_1},y_{k_2})}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\phi_{j;n_1,n_2}(x_{k_1},y_{k_2})}{\partial y^2} \tag{23}$$

式(21)可以表示为

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{V}_j=\boldsymbol{W}\boldsymbol{V}_j \tag{24}$$

矩阵的解可表示为

$$\boldsymbol{V}_j^{k+1}=\boldsymbol{T}\boldsymbol{V}_j^k \tag{25}$$

其中
$$\boldsymbol{T}=\exp(\boldsymbol{M}_0\tau) \tag{26}$$

式中　τ——时间步长

$\boldsymbol{M}_0$——常数矩阵

这样，问题就归结为矩阵 $\boldsymbol{T}$ 的计算。采用具有高精度解的精细积分法计算矩阵 $\boldsymbol{T}$[20]。

用本文构造的 Shannon－Cosine 小波精细积分法对粗透射率进行细化实验，实验中设置不同的迭代次数。经过多次实验，迭代次数 n 为 15 时，优化后的透射率图可以很好地消除粗透射率图中的“块效应”，在平滑图像细小纹理的同时对图像边界进行了突出，这样可以避免因细节过多而导致的去雾不彻底，其复原后图像有较好的视觉效果，结果如图 4 所示。随着迭代次数增大，透射率图趋于过渡平滑，复原效果会有所下降。



(a) 粗透射率图　(b) n=15　(c) n=20

图 4　不同迭代次数的透射率优化结果

Fig. 4　Transmission optimization results with different iterations

2.4　大气值 A 方法改进

HE 等[8]提出的算法中，对暗通道图按照亮度的大小取前 0.1% 的像素点，记录其坐标。然后在原始图像中对应的位置点取其最高亮度点的值，作为 A。这种方法需要对暗通道图中所有像素值的亮度进行排序，当图像尺寸较大时，会消耗较多的运算时间。同时，大气值的求取很容易受到个别像素点的干扰，出现偏色问题。

通过对多幅图进行实验，本文在暗通道图像中取像素灰度在区间[225，255]的像素点记录其坐标，分别计算其在 R、G、B 三通道的均值作为图像 3 个通道的大气值。这样改进后，不需要在程序中进行排序寻找前 0.1% 的像素点，算法计算复杂度得到降低，同时可以避免图像颜色偏暗的问题。

2.5　算法流程

本文对暗通道先验去雾算法进行改进，对透射率图采用多尺度 Shannon－Cosine 小波进行处理，尽可能使其在图像平滑的同时保持图像边缘细节，以此恢复出清晰且细节突出的无雾农田图像。具体流程为：

(1)读入彩色含雾的农田图像，求出其暗通道图像。

(2)根据暗通道图像计算粗透射率。采用 P－M

模型对粗透射率图像进行处理，并用 Shannon – Cosine 小波配置法将偏微分方程组离散为常微分方程组。该过程可以运用小波多尺度特性，有效进行纹理特征点的选取，大大降低方程组规模，同时起到保持图像边缘的作用。最后用精细积分法进行求解。

(3)求取大气值 A。在暗通道图像中取像素灰度在区间[225,255]的像素点记录其坐标，分别计算其在 R、G、B 三通道的均值作为图像 3 个通道的大气值 A。

(4)利用透射率 t 恢复无雾图像 $J(x)$。

3 实验与结果分析

为了全面评价本文算法的有效性，分别从主观和客观两方面对算法进行分析，并与 FATTAL 算法[6]和 HE 算法[11]进行对比。客观评价指标有新增可见边之比、对比度和标准差。

新增可见边之比[23]公式为

$$e = \frac{n_r - n_0}{n_0} \tag{27}$$

式中 n_r——去雾后图像的可见边数

n_0——原图像的可见边数

一般 e 越大，图像细节越清晰，去雾效果越好。

图像的对比度[24] C 用来测量灰度反差程度，对比度越高，反映的色彩越丰富，色彩饱和度越高，计算式为

$$C = \sum_{\delta} \delta(i,j)^2 P_\delta(i,j) \tag{28}$$

式中 $\delta(i,j)$——相邻像素灰度的差值

$P_\delta(i,j)$——相邻像素灰度差值为 δ 的像素分布概率

标准差可以反映图像各像素点灰度的离散程度。标准差越大，图像表现出的细节越丰富，效果越好，计算式为

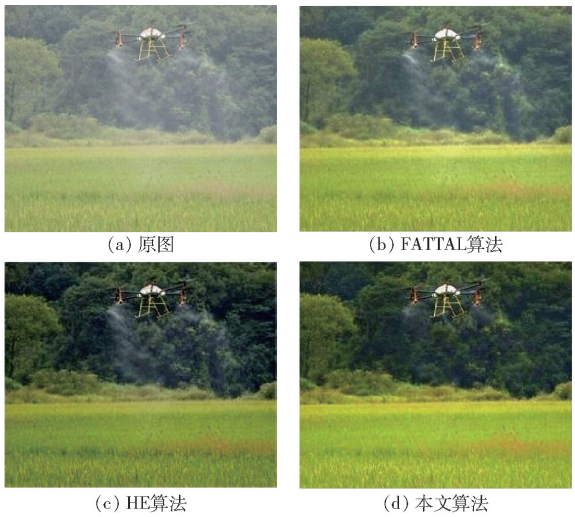
$$S = \sqrt{\frac{1}{MN}\sum_{x=1}^{M}\sum_{y=1}^{N}(f(x,y) - Z)^2} \tag{29}$$

其中

$$Z = \frac{1}{MN}\sum_{x=1}^{M}\sum_{y=1}^{N} f(x,y) \tag{30}$$

式中 $f(x,y)$——像素灰度

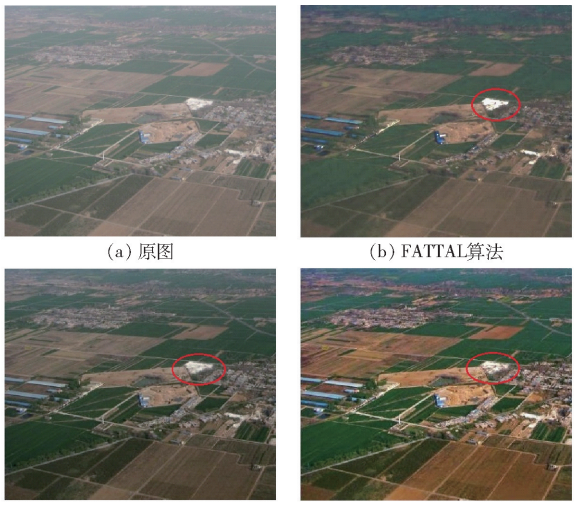
选取一组农田图像进行实验对比，其中包含浓雾图像、薄雾图像、近地图像和航拍图像。实验结果如图 5～8 所示。



(a) 原图 (b) FATTAL算法 (c) HE算法 (d) 本文算法

图 5 近地农田图像对比结果

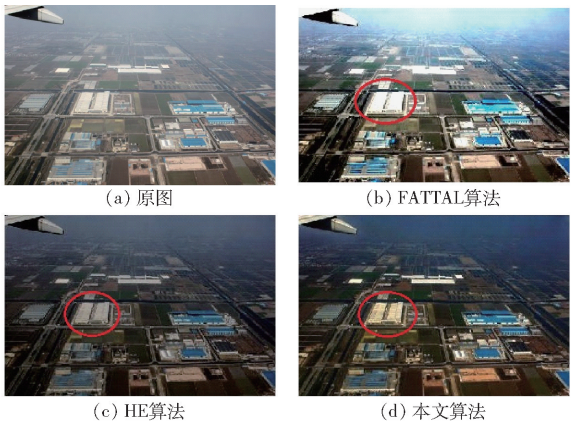
Fig. 5 Comparison results



(a) 原图 (b) FATTAL算法 (c) HE算法 (d) 本文算法

图 6 遥感航拍图像对比结果

Fig. 6 Comparison results



(a) 原图 (b) FATTAL算法 (c) HE算法 (d) 本文算法

图 7 航拍村庄图像对比结果

Fig. 7 Comparison results

图 5 中包含浓雾和薄雾特征，FATTAL 算法去雾不彻底，未能将浓雾去除，并且去雾图像整体较模糊，视觉较差。HE 算法去雾效果较好，但同样未对浓雾进行有效去除，这是因为导向滤波使透射率图保留了大量的细节，导致去雾不彻底，同时还有色彩偏暗的问题。相比之下，本文算法在透射率优化过程中保留了较多的边缘信息，对浓雾进行了有效去除，同时复原图像在色彩上更加自然，符合视觉效



(a) 原图　(b) FATTAL算法　(c) HE算法　(d) 本文算法

图 8　近地花圃图像对比结果

Fig. 8　Comparison results

果。

图 6 为遥感航拍图像，FATTAL 算法去雾后色彩较暗，且农田纹理模糊，视觉效果不好。HE 算法对农田薄雾实现了较好的去除，但同时图像细节纹理丢失，如图 6 中红圈部分所示。本文算法去雾后对细节纹理进行了较好的保留，并且避免了白色物体对大气光值估计的影响，图像颜色明亮清晰。

图 7 中包含天空部分，FATTAL 算法去雾后色彩过亮，颜色失真严重。这是因为该算法是基于场景色度和介质传播率不相关的假设，当某些情况下该假设无法满足时，去雾图像色彩会极大失真。本文处理效果图在细节纹理处保留较好，相比 HE 算法更加清晰，细节如红圈所示，但是和 HE 算法都存在天空部分色彩较深的问题。

图 8 为近地花圃图像，FATTAL 算法同样存在去雾后色彩过亮的问题。本文算法与 HE 算法相比，颜色更加自然，同时纹理边界更为清晰，较好地恢复了景物的色彩及结构信息。

表 1 为图像去雾客观评价指标。从表中可以看出，FATTAL 算法除了图 7 和图 8 中对比度很高以外，其他指标均为最低。这是因为在图 7 和图 8 中该方法失真严重，色彩过饱和，所以对比度过高。这也从数值上验证了基于独立成分分析来估计场景反照率的 FATTAL 算法在对图像去雾时应用受限，容易出现色彩过饱和现象。本文算法在 HE 算法基础上进行了透射率和大气值方法的改进，在 3 个评价指标上基本都优于 HE 算法，本文算法在新增可见边之比上提高了 30.36%，在对比度上提高了 40.72%，在标准差上提高了 28.21%。

表 1　不同去雾算法的评价指标对比

Tab. 1　Comparison of evaluation indexes of different dehazing algorithms

图像	算法	e	对比度	标准差
图 5	FATTAL 算法	−0.069 3	76.762 3	40.054 0
	HE 算法	0.126 7	134.741 7	50.225 5
	本文算法	0.243 1	121.627 9	59.623 7
图 6	FATTAL 算法	0.120 6	116.436 7	25.722 0
	HE 算法	0.491 2	188.340 0	29.389 4
	本文算法	0.541 1	247.505 5	43.419 2
图 7	FATTAL 算法	−0.554 8	927.851 6	74.106 3
	HE 算法	−0.011 3	243.455 4	33.784 7
	本文算法	0.027 6	408.633 6	39.616 5
图 8	FATTAL 算法	−0.578 9	1 358.964 7	79.398 9
	HE 算法	0.199 6	267.843 1	40.736 1
	本文算法	0.239 2	396.437 9	54.523 5

4　结束语

基于暗通道先验规律，针对目前图像去雾算法存在的缺陷，提出了基于多尺度 Shannon－Cosine 小波精细积分法的农田图像去雾算法。针对透射率图具有的分片光滑的特性，用非线性偏微分方程模型对其处理，并用 Shannon－Cosine 小波精细积分法求解，实现对原始图像纹理特征的保持与增强。同时，对大气值计算方法进行了改进，以改善色彩偏暗的问题。将实验结果与 FATTAL 算法、HE 算法进行对比，结果表明，本文方法能较好地去除图中的含雾信息，使图像原有的颜色和纹理细节得到有效保留，较好地解决了去雾过程中细节模糊的问题。

参　考　文　献

[1] 岳学军，王林惠，兰玉彬，等. 基于 DCP 和 OCE 的无人机航拍图像混合去雾算法[J]. 农业机械学报，2016，47(增刊)：419－425.
YUE Xuejun，WANG Linhui，LAN Yubin，et al. Algorithm of defogging UAV's aerial images based on DCP and OCE[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2016，47(Supp.)：419－425. (in Chinese)

[2] TANG Z X. Image dehazing based on haziness analysis[J]. International Journal of Automation and Computing，2014，11(1)：78－86.

[3] 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)

[4] 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]. 农业机械学报，2016，47(11)：25－31.

JIANG Dejing, WANG Shuchen, ZENG Yong, et al. Agricultural robot visual de-hazing method based on image segmentation map[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 25 - 31. (in Chinese)

[5] TAN R T. Visibility in bad weather from a single image[C]// Proceedings of IEEE CVPR, 2008: 1 - 8.

[6] FATTAL R. Single image dehazing[J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): 1 - 9.

[7] TAREL J P, HAUTIÈRE N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image[C]// Proceedings of IEEE the 12th International Conference on Computer Vision, Kyoto: IEEE, 2009: 2201 - 2208.

[8] 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, 2009: 1956 - 1963.

[9] LEVIN A, LISCHINSKI D, WEISS Y. A closed-form solution to natural image matting [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2008, 30(2): 228 - 242.

[10] 魏颖慧, 张彦娥, 梅树立, 等. 基于暗通道先验和区间插值小波变换的图像去雾霾方法[J]. 农业工程学报, 2017, 33(增刊 1): 281 - 287.
WEI Yinghui, ZHANG Yan'e, MEI Shuli, et al. Image dehazing method based on dark channel prior and interval interpolation wavelet transform[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(Supp. 1): 281 - 287. (in Chinese)

[11] HE K M, SUN J, TANG X O. Guided image filtering[J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 2013, 35(6): 1397 - 1409.

[12] 杨爱萍, 王海新, 王金斌, 等. 基于透射率融合与多重导向滤波的单幅图像去雾[J]. 光学学报, 2018, 38(12): 112 - 122.
YANG Aiping, WANG Haixin, WANG Jinbin, et al. Image dehazing based on transmission fusion and multi-guided filtering [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(12): 112 - 122. (in Chinese)

[13] PARK H, PARK D, HAN D K, et al. Single image haze removal using novel estimation of atmospheric light and transmission [C]// IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), 2014: 4502 - 4506.

[14] MENG G F, WANG Y, DUAN J Y, et al. Efficient image dehazing with boundary constraint and contextual regularization[C]// IEEE International Conference on Computer Vision, 2013: 617 - 624.

[15] 李丽, 张楠楠, 梅树立, 等. 基于自适应小波偏微分方程的蝗虫切片图像去噪[J]. 农业工程学报, 2015, 31(20): 172 - 177.
LI Li, ZHANG Nannan, MEI Shuli, et al. Image de-noising of locust sections based on adaptive wavelet and partial differential equation method[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(20): 172 - 177. (in Chinese)

[16] MOHAMADI N, SOHEILI A R, TOUTOUNIAN F. A new hybrid denoising model based on PDEs[J]. Multimedia Tools & Applications, 2018, 77(10): 12057 - 12072.

[17] LI B, XIE W. Adaptive fractional differential approach and its application to medical image enhancement[J]. Computers & Electrical Engineering, 2015, 45: 324 - 335.

[18] WEI T, MA T, XIN W, et al. Weighted curvature-preserving PDE image filtering method[J]. Computers & Mathematics with Applications, 2015, 70(6): 1336 - 1344.

[19] MEI S L, GAO W L. Shannon - Cosine wavelet spectral method for solving fractional Fokker - Planck equations [J]. International Journal of Wavelets Multiresolution & Information Processing, 2018, 16(3): 1850021.

[20] 钟万勰. 暂态历程的精细计算方法[J]. 计算结构力学及其应用, 1995, 12(1): 1 - 6.
ZHONG Wanxie. Precise computation for transient analysis[J]. Computational Structural Mechanics and Applications, 1995, 12(1): 1 - 6. (in Chinese)

[21] PERONA P, MALIK J. Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 1990, 12(7): 629 - 639.

[22] HOFFMAN D K, WEI G W, ZHANG D S, et al. Shannon - Gabor wavelet distributed approximating functional[J]. Chemical Physics Letters, 1998, 287(1 - 2): 119 - 124.

[23] HAUTIERE N, TAREL J P, AUBERT D, et al. Blind contrast enhancement assessment by gradient ratioing at visible edges [J]. Image Analysis & Stereology Journal, 2008, 27(2): 87 - 95.

[24] 周雨薇, 陈强, 孙权森, 等. 结合暗通道原理和双边滤波的遥感图像增强[J]. 中国图象图形学报, 2018, 19(2): 313 - 321.
ZHOU Yuwei, CHEN Qiang, SUN Quansen, et al. Remote sensing image enhancement based on dark channel prior and bilateral filtering[J]. Journal of Image and Graphics, 2018, 19(2): 313 - 321. (in Chinese)