

文章编号 1004-924X(2016)04-0892-10

## 针对明亮区域的自适应全局暗原色先验去雾

邓 莉

(桂林航天工业学院 广西高校无人机遥测重点实验室, 广西 桂林 541004)

**摘要:**针对暗原色先验去雾算法对明亮区域失效,以及分块求取暗原色存在的块状效应、Halo 现象和运算复杂度较高等问题,提出了一种基于自适应参数的全局暗原色先验去雾算法。该算法采用全局暗原色操作取代分块处理,并通过模糊逻辑控制器自适应估计明亮区域的容差参数和透射率调整因子;在非明亮区域求取大气光强度后,根据自适应容差纠正明亮区域被错误估计的透射率。与常用的 3 种图像复原去雾算法进行了比较,结果表明:该算法去雾图像的主观视觉效果较好,且图像对比度、信息熵和平均梯度 3 方面的客观评价结果也明显优于其它 3 种对比算法。该算法可有效解决明亮区域失真和分块处理带来的上述问题,在不增加曝光处理情况下也能获得较好的去雾效果,运算效率也有较大提升。

**关键词:**图像去雾;全局暗原色先验;模糊逻辑控制;明亮区域;自适应容差

**中图分类号:**TP751;TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162404.0892

### Adaptive image dehazing for bright areas based on global dark channel prior

DENG Li

(Guangxi Colleges and Universities Key Laboratory of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Telemetry,  
Guilin University of Aerospace Technology, Guilin 541004, China)

\* Corresponding author, E-mail: dengli@guat.edu.cn

**Abstract:** An adaptive image dehazing algorithm based on global dark channel prior was proposed to solve the invalidation of original dark channel prior algorithm in bright areas and problems of block effect, Halo effect and higher computational complexity. In this method, the blocking operation was substituted by a global dark channel operation, and the fuzzy logic controller was used to estimate adaptively the threshold of bright areas and the adjustment factor of transmission. After the atmospheric light was estimated in non-bright areas, the miscalculated transmission in bright areas was corrected according to the adaptive tolerance. The algorithm was compared with three kinds of image restoration dehazing algorithms. Experiment results show that the algorithm shows a good subjective visual effect for dehazing images, and the objective evaluation criteria, image contrast, information entropy and average gradient are also superior in performance to those of the other algorithms compared. It concludes that the presented method effectively eliminates the distortion in bright areas and solve the above problems caused by blocking, and the visibility of dehazing image and the operating efficien-

收稿日期:2015-11-03;修订日期:2016-02-02.

基金项目:广西教育厅高校科研项目(No. YB2014435, No. YB2014437, No. 2013LX169, No. ZD2014146, No. YB2014434, No. LX2014471);广西高校无人机遥测重点实验室科研基金资助项目(No. WRJ2015ZR01, No. WRJ2015ZR04);桂林航天工业学院科研基金资助项目(No. Y12Z034, No. Y12Z033, No. Y12Z032)

cy have been enhanced significantly.

**Key words:** image dehazing; global dark channel prior; fuzzy logic control; bright area; adaptive tolerance

## 1 引言

基于模型的图像复原去雾算法种类很多,按照处理对象的不同可将其分为基于多幅图像的去雾方法和基于单幅图像的去雾方法两类。前一类方法通过对比分析同一景象在不同天气下的多幅图像来估计传播介质的性质,因此对成像系统要求较高且不适合实时处理;而基于单幅图像的去雾算法因能够适应各种应用场合而成为当前研究的热点。Tan等通过最大化复原图像的局部对比度来达到去雾的目的<sup>[1]</sup>,但由于该算法忽视了透射率的求解,因此复原图像的色彩常出现过度饱和。Fattal等提出基于统计学的去雾方法<sup>[2]</sup>,由于该方法需要足够的颜色信息,对于差异性较小的浓雾环境,其估计的透射率不够准确。Tarel等利用中值滤波的变形快速估计大气耗散函数<sup>[3]</sup>,该算法参数较多且不易调整,而且不恰当的设置容易产生Halo效应。

近年来,He等<sup>[4]</sup>根据户外无雾图像的统计规律,提出了一种简单有效的暗原色先验去雾算法,对一般户外图像取得了较好的去雾效果,但由于该算法采用分块处理及最小值滤波操作,当图像存在大面积白色或明亮区域时暗原色先验失效,故大气光取值趋近这些区域的亮度值,继而使该部分透射率偏小,造成去雾后相应区域色彩失真和亮度下降<sup>[5]</sup>;分块处理还容易产生块状效应和Halo现象,影响去雾效果;此外,分块操作本身以及因其采取的细化透射率措施使得算法的运算复杂度较高<sup>[6]</sup>,针对这一问题,有学者采用双边滤波或引导滤波方式<sup>[7-10]</sup>代替原软抠图细化方法,尽管运算时间有较大幅度降低,但实时性能仍有待进一步提高。

本文针对文献<sup>[4]</sup>算法因分块处理引起的上述问题提出了改进方法,采用全局暗原色操作取代分块处理,利用模糊逻辑控制器自动检测图像明亮区域及其覆盖范围,并根据检测结果自适应调整去雾参数。

## 2 背景

### 2.1 雾天图像退化模型

1975年,McCartney提出了著名的大气散射模型,揭示了雾天图像的退化机理,其简化模型描述如下:

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

式中: $x$ 表示像素点位置, $I(x)$ 表示经衰减后到达成像设备的光线强度,即观测到的有雾图像; $t(x)$ 表示透射率,反映光线穿透雾的能力,其值越大表示透雾能力越强; $J(x)$ 表示场景目标直接反射光强,即待复原图像; $A$ 表示在沿观测者视线无穷远处的光照强度,通常假设为全局常量,与局部位置无关。去雾的实质就是依据上述模型,从有雾图像 $I(x)$ 中复原清晰图像 $J(x)$ ,这需要先估计透射率 $t(x)$ 和大气光强度 $A$ 。

### 2.2 暗原色先验去雾算法

暗原色先验理论是对户外无雾图像的一种统计规律,该理论认为在多数无雾图像非天空区域的任意局部小块中,存在某一些像素至少有一个颜色通道的强度值很低,称之为暗原色。求取暗原色的表达式如下:

$$J^{\text{dark}}(x) = \min_{c \in \{r, g, b\}} \left( \min_{y \in \Omega(x)} (J^c(y)) \right) = 0, \quad (2)$$

其中 $J^c$ 是图像 $J$ 的第 $c$ 个颜色通道, $\Omega(x)$ 是以像素 $x$ 为中心的局部块区域, $J^{\text{dark}}$ 称为 $J$ 的暗原色,其强度总是很低并且趋近于零。

假设大气光强度 $A$ 已知,且局部区域的透射率恒定不变,则对公式(1)取最小运算得到:

$$\min_c \left[ \min_{y \in \Omega(x)} \left( \frac{I^c(y)}{A^c} \right) \right] = t(x) \min_c \left[ \min_{y \in \Omega(x)} \left( \frac{J^c(y)}{A^c} \right) \right] + (1-t(x)), \quad (3)$$

由公式(2)可知,上式右边第一项为零,通过变换可得透射率表达式:

$$t(x) = 1 - \omega \min_c \left[ \min_{y \in \Omega(x)} \left( \frac{I^c(y)}{A^c} \right) \right], \quad (4)$$

式中 $\omega$ 是引入的调整因子( $0 < \omega \leq 1$ ),用于针对性地保留部分覆盖遥远景物的雾。 $\omega$ 的取值根据雾气浓度和光照强度等具体情况而定。一般雾浓

度越大,  $\omega$  的值相对越大, 越接近 1; 反之, 在薄雾情况下  $\omega$  的取值则偏小。为提高透射率精度, He 还采用软抠图算法细化透射率, 具体方法参见文献[4]。

大气光强度  $A$  的估计方法为: 先取暗原色中 0.1% 亮度最大的像素, 然后取这些像素对应于原图中像素的最大值作为  $A$ 。

将估计的  $t(x)$  和  $A$  值代入下式可得去雾图像  $J(x)$ :

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max(t(x), t_0)} + A, \quad (5)$$

其中  $t_0$  是透射率的下限值, 可避免因过小的透射率造成复原图像失真。

### 2.3 基于暗原色先验去雾的相关改进算法

暗原色先验理论通过研究无雾图像的统计特征, 发现了全新的图像本质特性, 它是视觉领域的一次重大突破。以暗原色先验理论为基础, 许多学者提出了相关的去雾改进算法。

针对暗原色先验理论对于大面积明亮区域失效的问题, 文献[5]引入了容差参数  $K$ , 将原图像亮度与大气光强的差值  $|I - A|$  小于  $K$  的区域定义为明亮区域, 重新计算透射率。考虑到明亮区域像素的  $R$ 、 $G$ 、 $B$  各通道值非常接近, 文献[11]将每个像素通道间的接近度以及暗原色亮度与大气光强的接近度共同作为明亮区域的判定机制。上述两种方式都可修正暗原色先验在明亮区域错误估计的透射率, 但存在的共同问题是容差参数  $K$  的取值不能自适应调整, 若  $K$  值太小则无法完全消除明亮区域的失真,  $K$  值过大又会导致非明亮区域复原错误, 降低算法的去雾能力。

对大气光强度  $A$  的估计, 大部分文献采用 2.2 节描述的方法<sup>[4-6]</sup>, 文献[7]和文献[12]则在天空区域求取大气光值  $A$ , 而文献[13]通过分析大气散射模型的约束条件指出, 天空的成像过程不满足该模型, 在天空干扰下估计的大气光强度将偏大, 使去雾图像亮度整体偏暗, 天空区域恢复效果欠佳, 因此先采用快速腐蚀膨胀和联合均值漂移滤波算法分割出天空区域后再估计大气光强度。然而, 除天空区域外, 其它的明亮区域也可能影响大气光强度的估计, 且上述分割算法耗时较多。

针对分块求取暗原色存在的弊端, 文献[6]采用全局暗原色方法对图像执行全局操作, 不再分

块处理。该方法建立在整幅图像的雾浓度是均匀分布的假设的基础上, 因此得到的透射率分布比较单一, 且未综合考虑本节前述的其它问题, 去雾后局部效果不理想, 细节信息不明显, 需进行局部对比度增强。

此外, 用于估计透射率的调整因子  $\omega$  和透射率下限  $t_0$  在大部分暗原色先验去雾算法中都采用固定值<sup>[4-11]</sup>, 较少根据目标图像作自适应调整。

## 3 本文改进算法

本文结合文献[6]的全局暗原色先验以及文献[5]针对明亮区域透射率的容差纠错机制提出了改进算法, 其结构框图如图 1 所示(具体描述见本章 3.5 节)。算法对于文献[6]算法的改进之处是不再进行复原后的对比度拉伸, 而通过参数自适应估计等方式改善去雾图像的对比度。对文献[5]的改进之处为将原固定容差参数值  $K$  采用模糊逻辑控制器进行自适应调整, 以适应不同条件的雾天图像。另外, 本文还对透射率调整因子  $\omega$  也进行了自适应控制, 对大气光强度  $A$  和透射率的下限  $t_0$  有新的估计方式。本章 3.1 节是对文献[6]全局暗原色先验算法的简述, 3.2~3.5 节则具体阐述本文改进算法。

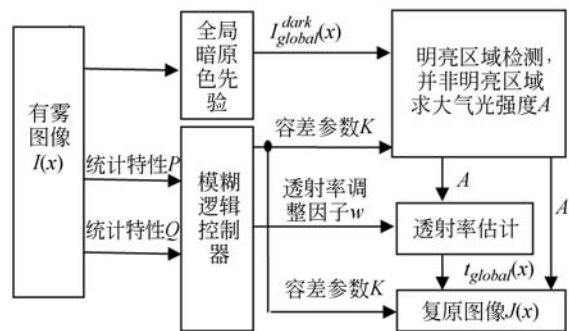


图 1 本文算法结构框图

Fig. 1 Structural diagram of proposed method

### 3.1 全局暗原色先验

全局暗原色先验是文献[4]基于分块的局部暗原色先验的延伸, 其依据是 Chazev 于 1988 年提出的 DOS(Dark Object Subtraction)理论<sup>[14]</sup>。全局暗原色先验认为: 在整幅图像中至少存在一个可信的暗原色点, 其值能近似反映光照在该区域的作用, 可利用该暗原色点(即全图中最暗的点)去除空间各向同性的雾。求取全局暗原色的

表达式如下,其强度接近于零。

$$J_{\text{global}}^{\text{dark}}(x) = \min_{c \in \{r, g, b\}} (\min_{y \in I} (J^c(y))) = 0, \quad (6)$$

对散射模型两边取全局最小值运算,求得 R、G、B 三通道最小分量:

$$\min_c \left[ \min_{y \in I} \left\{ \frac{I^c(y)}{A^c} \right\} \right] = t_{\text{global}}(x) \min_c \left[ \min_{y \in I} \left\{ \frac{J^c(y)}{A^c} \right\} \right] + (1 - t_{\text{global}}(x)), \quad (7)$$

与公式(3)相比,公式(7)并未进行局部最小滤波操作。由于公式右边第一项为零,变换后得到全局透射率表达式:

$$t_{\text{global}}(x) = 1 - \omega \cdot \left[ \frac{J_{\text{global}}^{\text{dark}}(x)}{A} \right], \quad (8)$$

为描述方便,将带雾图像  $I(x)$  的全局暗原色值记为  $I_{\text{global}}^{\text{dark}}(x)$ ,  $\omega$  为引入的调整因子,作用与 2.2 节描述相同。

### 3.2 模糊逻辑控制器的设计

由图 1 所示的算法结构框图可知,模糊逻辑控制器在算法中的作用至关重要,其输出参数将影响后续各模块的运算结果。本文模糊控制系统的实现通过 Matlab 模糊控制工具箱完成,主要由输入模糊化、模糊逻辑推理以及输出反模糊化 3 部分构成,具体设计方法如下。

#### 3.2.1 输入、输出变量的设置

本文模糊逻辑控制器是一个两输入-两输出系统,两个输出变量分别为容差参数  $K$  和透射率调整因子  $\omega$ ,其大小根据不同的输入图像作相应调整,因此将带雾图像的相关统计特性作为控制器的输入变量。其中,输入变量  $Q$  表征灰度值较大的天空、水面或白色物体等明亮区域在图像中所占比例,并认为像素值大于 0.7 的点属于明亮区域,则  $Q$  的定义式表示如下:

$$Q = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} (I(i, j) > 0.7), \quad (9)$$

其中  $M \times N$  表示图像总的像素数,  $I(i, j)$  为带雾图像的灰度值。

输入变量  $P$  定义为带雾图像直方图分布的集中程度,用于表征带雾图像的对比度,其定义式如下:

$$P = \frac{1}{256} \sum_{i=0}^{255} (H(i) > 10). \quad (10)$$

式中  $H(i)$  表示灰度级为  $i$  的像素点数目,变量  $P$  表示像素点数目大于 10 的灰度级的总数与最大灰度级数的比值。

#### 3.2.2 模糊化过程

##### 3.2.2.1 输入、输出变量的论域设置

根据各输入、输出变量的分布特征定义相应的模糊论域。由公式(9)和公式(10)可知,两个输入变量的值已归一化至  $[0, 1]$  范围,因此论域也定义为  $[0, 1]$  区间。输出变量  $K$  为图像亮度与大气光强度之间差值  $|I - A|$  的阈值,差值越大表明该像素点的亮度越暗,反之则越接近大气光强度,因此该值的取值不宜过大,本文将其论域设为  $[0.2, 0.6]$ 。输出变量  $\omega$  用于有针对性地保留部分覆盖远景的雾气,由公式(4)和公式(5)可知,  $\omega$  越小则保留的雾气越大,去雾效果也相应变差;因此  $\omega$  的取值不宜过小,本文将其论域设定为  $[0.6, 1]$ 。图 2 中各隶属度函数曲线的横坐标即为各变量的模糊论域,它们是归一化的区间,无量纲。

##### 3.2.2.2 输入、输出变量的语言值设置

鉴于该模糊逻辑控制器是一个多输入-多输出结构,为避免因变量的语言值设置较多造成的模糊逻辑规则过于复杂而难以实现的问题,控制器各输入、输出变量的语言值都设定为 3 个,分别是“大”、“中”、“小”,在图表中用“B”、“M”和“S”代替。

##### 3.2.2.3 输入、输出变量的隶属度函数选择

确定隶属度函数的方法有很多,当论域离散时,可根据主观认识或个人经验直接或间接给出元素隶属度的具体值,由此确定隶属度函数。当论域连续时,可根据问题的性质,应用一定的分析推理,选用某些典型函数作为隶属度函数,本文中的论域属于第二种情况。

对于刻画“S”这一类偏向小一方的模糊现象,常选用降半梯形分布来描述,表达式如下<sup>[15]</sup>:

$$u(x) = \begin{cases} 1 & x \leq a \\ \frac{b-x}{b-a} & a < x \leq b \\ 0 & x > b \end{cases}, \quad (11)$$

其中参数  $a$ 、 $b$  分别对应梯形的右上和右下顶点;如图 2(a)、(c)、(d) 中输入变量  $Q$  及两个输出变量“S”语言值的隶属度函数曲线。

对于刻画“B”这一类偏向大的一方的模糊现象,适合用升半梯形分布来描述,表达式如下<sup>[15]</sup>:

$$u(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & a < x \leq b \\ 1 & x > b \end{cases}, \quad (12)$$

其中参数  $a, b$  分别对应梯形的左下和左上顶点; 如图 2(a)、(c)、(d) 中输入变量  $Q$  及两个输出变量“ $B$ ”语言值的隶属度函数曲线。

而对于“ $M$ ”这一类处于中间状态的模糊现象, 常选用三角形分布来描述, 表达式如下<sup>[15]</sup>:

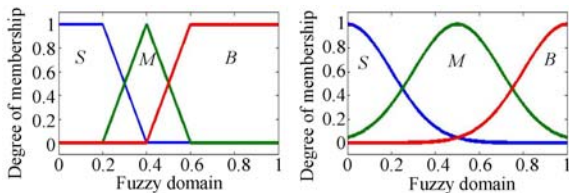
$$u(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & a < x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & b < x \leq c \\ 0 & x \geq c \end{cases}, \quad (13)$$

式中参数  $a, c$  分别对应三角形下部左右顶点, 参数  $b$  对应三角形上部顶点; 如图 2(a)、(c)、(d) 中输入变量  $Q$  及两个输出变量“ $M$ ”语言值的隶属度函数曲线。

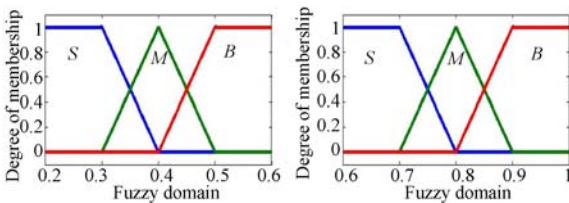
与上述 3 个变量的隶属度函数不同, 由于输入变量  $P$  描述的是图像的直方图统计分布规律, 而这一规律在一般情况下满足正态分布特征, 因此将输入变量  $P$  的 3 个语言值的隶属度函数都选用正态分布来描述, 如图 2(b) 所示, 其定义式如下<sup>[15]</sup>:

$$u(x) = e^{-k(x-a)^2}, \quad (14)$$

其中  $a$  决定函数中心点位置,  $k$  是大于 0 的常数。



(a) 输入变量  $Q$  (b) 输入变量  $P$   
(a) Input variable  $Q$  (b) Input variable  $P$



(c) 输出变量  $K$  (d) 输出变量  $\omega$   
(c) Output variable  $K$  (d) Output variable  $\omega$

图 2 输入输出变量的模糊论域及隶属度函数曲线

Fig. 2 Fuzzy domain and membership function curves of FLC input and output variables

### 3.2.3 模糊逻辑推理

根据系统在受控过程中对应不同条件的输入

变量, 将输出变量的调整原则归纳如下:

(1) 输入变量  $Q$  值越大, 表示图像中明亮区域所占的比例越大, 则需将代表  $|I-A|$  阈值的输出变量  $K$  调小, 反之则调大; 而  $Q$  值越大也可能是由于雾气浓度较大所引起的, 因此透射率调整因子  $\omega$  的值应调大, 反之则调小。

(2) 输入变量  $P$  值越小, 表明带雾图像的直方图分布越集中, 图像对比度越差, 即雾气浓度越大, 因此透射率调整因子  $\omega$  值应调大, 反之则调小; 同时浓雾条件下像素点的亮度值较正常值偏高, 更接近于大气光强度, 因此输出变量  $K$  应调小, 反之则调大。

由于两个输入变量各有 3 个语言值, 因此控制器共有 9 条模糊规则, 如表 1 所示, 这些规则写成条件语句的形式为:

*if P is  $A_i$ , and Q is  $B_i$ , then K is  $C_i$ , and  $\omega$  is  $D_i$ .*

其中  $i=1, 2, \dots, 9$ ,  $A_i, B_i, C_i$  和  $D_i$  是分别定义在变量  $P, Q, K$  和  $\omega$  论域上的模糊集。

依据上述输出变量的调整原则结合专家经验, 可列出如表 1 所示的模糊逻辑控制规则。其中规则 1~3 表示当  $P$  值为“ $S$ ”, 即雾气浓度很大时, 不管明亮区域覆盖范围多大, 输出的容差  $K$  都为小, 而调整因子  $\omega$  都为大; 规则 7~9 表示  $P$  值为“ $B$ ”, 代表雾气稀薄, 图像对比度较好,  $K$  和  $\omega$  的取值主要由输入变量  $Q$  决定,  $Q$  越大表示明亮区域的覆盖范围越大, 则  $K$  值越小,  $\omega$  值越大; 规则 4~6 表示当  $P$  值为“ $M$ ”, 雾气浓度适中,  $K$  和  $\omega$  的取值需同时考虑  $P$  和  $Q$  值, 取值也较适中。

表 1 模糊逻辑控制规则  
Tab. 1 Fuzzy logic control rules

变 量	模糊规则								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
输入变量 $P$	S	S	S	M	M	M	B	B	B
输入变量 $Q$	S	M	B	S	M	B	S	M	B
输出变量 $K$	S	S	S	M	M	S	B	M	S
输出变量 $\omega$	B	B	B	M	M	B	S	M	B

### 3.2.4 反模糊化过程

通过模糊推理后得到的输出结果是一个模糊集合, 在其中选取最能代表该模糊推理结果的精确值的过程称为反模糊化过程。实现反模糊化也有许多不同的方法, 本文采用重心法进行模糊判

决,即取输出变量的模糊隶属度函数曲线与横坐标围成面积的重心作为模糊推理的最终输出值,表达式如下<sup>[15]</sup>:

$$u = \frac{\int_V x u_v(x) dx}{\int_V u_v(x) dx}, \quad (15)$$

式中  $V$  表示输出变量的论域,  $u_v(x)$  表示论域  $V$  中的输出变量的隶属度函数。

### 3.3 明亮区域自适应检测与大气光强度估计

为避免天空、水面和白色物体等明亮区域对估计大气光强度所造成的误差,本文先划分出原带雾图像的明亮区域,然后在图像的非明亮区域估计大气光强度。

#### 3.3.1 明亮区域的判定机制

明亮区域的判定机制选用文献[11]方法,明亮区域满足如下关系:

$$\phi = \{x \mid |1 - I_{\text{global}}^{\text{dark}}(x)| < K, \max(|I^c - I^c|) < 0.078\}, \quad (16)$$

其中:  $I^c$  和  $I^c$  代表像素点 R、G、B 三通道中任意两个通道的强度值,图像的像素值归一化到  $[0, 1]$ 。由于算法中的大气光强度  $A$  需在明亮区域检测后求取,因此将原文献关系式中的大气光强度  $A$  用归一化最大强度值“1”代替,其与  $I_{\text{global}}^{\text{dark}}(x)$  之间的容差  $K$  由模糊逻辑控制器推理得到。利用该判定机制对原带雾图像进行自适应划分只是对像素点的一种分类,并不会产生文献[7,13]等对天空区域进行形态学分割所造成的边界失真问题。

#### 3.3.2 大气光强度估计

将利用上述判定机制划分出的明亮区域记为  $L\_region$ ,非明亮区域记为  $B\_region$ ,并将非明亮区域中亮度值较大的  $S\%$  个像素点的平均值作为大气光强度  $A$ 。不同文献对于大气光强度的估计方法各异,但通常都将该比例值设为常数,例如文献[4-6]中将其设为  $0.1\%$  或文献[12]中将其设为  $1\%$ 。实验观察发现,大气光强度值与明亮区域在图像中所占的比例存在一定关系,明亮区域比例较高的图像,其大气光强度值通常偏高,在复原过程中容易产生 Halo 现象,因此大气光强度值的估计也应当随输入图像作自适应调整。鉴于本文的模糊逻辑控制器输入、输出变量较多,为避免控制器过于复杂,未对  $S$  值进行模糊推理,而定义一个简单的分段函数用于微调,定义式如下:

$$S = \begin{cases} 8 & num > 1 \\ 7 & 0.6 < num < 1 \\ 6 & 0.3 < num < 0.6 \\ 5 & num < 0.3 \end{cases}, \quad (17)$$

式中分段区间的划分及  $S$  的取值来源于实验得到的经验值;  $num$  表示明亮区域和非明亮区域的像素点数目之比,  $num$  越大表示明亮区域在图像中覆盖范围越大,则  $S$  的取值相应也越大,从而使求得的亮度平均值下降,以降低大气光强度值,避免出现 Halo 现象。

### 3.4 基于容差机制的图像复原

将求得的带雾图像全局暗原色值  $I_{\text{global}}^{\text{dark}}(x)$ 、大气光强度  $A$  和调整因子  $\omega$  代入公式(8)求取透射率  $t_{\text{global}}(x)$  后,利用文献[5]的容差机制即可得到估计复原图像  $J(x)$ ,表达式如下:

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\min\left[\max\left\{\frac{A \cdot K}{|I(x) - A|}, 1\right\} \cdot \max(t_{\text{global}}(x), t_0), 1\right]} + A, \quad (18)$$

其中  $K$  为模糊逻辑控制器输出的自适应容差,透射率下限  $t_0$  定义为将非明亮区域最大亮度值代入公式(8)求得的极限值,其典型值为  $0.1$ 。

$$t_0 = \max\left[1 - \omega \cdot \left\{\frac{\max(B\_region)}{A}\right\}, 0.1\right]. \quad (19)$$

### 3.5 算法总体描述

根据以上描述,结合图1所示的算法结构框图,将本文算法的总体思路和具体步骤归纳如下:

步骤1:求取有雾图像的全局暗原色值  $I_{\text{global}}^{\text{dark}}(x)$ 。在计算图像的暗原色时不再进行分块处理,也可理解为最小值滤波操作的模板尺寸为  $1 \times 1$ ,由此得到有雾图像的全局暗原色值;

步骤2:建立模糊逻辑控制器,求取相关的自适应估计参数。将高亮度像素点(灰度值大于  $0.7$ )的比例  $Q$  和带雾图像的直方图集中程度  $P$  共同作为模糊逻辑控制器的输入变量,得到明亮区域的容差参数  $K$  和透射率调整因子  $\omega$ ;

步骤3:利用容差参数将有雾图像分为明亮区域  $L\_region$  和非明亮区域  $B\_region$  两部分,判定机制由全局暗原色值与图像最大亮度值间的接近度和像素点各通道间的接近度共同决定;

步骤4:求取大气光强度  $A$ 。将非明亮区域中一定比例的高亮度像素值的平均值作为大气光强度  $A$ ,比例大小根据图像明亮区域的面积自适应调整;

步骤 5: 利用已求得的有雾图像暗原色值  $I_{\text{global}}^{\text{dark}}(x)$ 、大气光强度  $A$  和透射率调整因子  $\omega$  求取透射率  $t_{\text{global}}(x)$ , 其中透射率的下限值  $t_0$  与非明亮区域最大亮度值以及大气光强度  $A$  有关;

步骤 6: 将容差参数  $K$ 、透射率  $t_{\text{global}}(x)$  和大气光强度  $A$  代入容差公式得到复原图像  $J(x)$ 。

#### 4 实验结果分析

为验证算法的有效性, 将本文算法与采用局部暗原色先验的文献[4]算法、在文献[4]的基础上加入容差机制的文献[5]算法, 以及采用全局暗原色先验的文献[6]算法进行分析比较。4 种算法都不增加复原图像的曝光量, 也不进行对比度拉伸处理; 各算法的参数设置尽量与原文一致, 由于文献[5]的  $K$  值因输入图像的不同而各异, 本文实验中统一将其设为文献[5]表 1 中各值的平均值, 归一化后约为 0.27; 文献[4]和文献[5]的卷积核统一设为  $15 \times 15$ 。3 种对比算法的代码均由笔者编写, 非作者源代码, 因此运行结果可能与原文存在偏差。算法运行平台的软硬件配置为 64 位 Windows7 系统、Inter i5 3.30GHz CPU、8G 内存, 软件平台为 MATLAB2012b。实验图片分别选用薄雾场景、浓雾场景和含大面积天空区域场景的 3 种带雾图像, 图像大小分别为  $1024 \times 768$ 、 $300 \times 200$  以及  $600 \times 400$ 。

本文采用图像对比度、信息熵和平均梯度作为客观评价指标, 对去雾结果进行定量分析<sup>[6]</sup>。其中, 图像对比度(即均方差)  $\sigma$  可反映图像的整体灰度分布, 其值越大, 图像的黑白反差越明显, 对比度  $\sigma$  的定义如下:

$$\sigma^2 = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N [g(i, j) - \mu]^2, \quad (20)$$

式中:  $M \times N$  为图像尺寸,  $g(i, j)$  为图像某像素的灰度值,  $\mu$  为图像灰度均值。

信息熵  $H$  反映图像像素位置的灰度信息, 以及像素邻域内灰度分布的综合特征, 是对图像信息量的度量, 其值越大, 表示信息量越多, 定义式如下:

$$H = - \sum_{r=0}^{L-1} \frac{H_r}{M \times N} \log \frac{H_r}{M \times N}, \quad (21)$$

其中:  $L$  为图像的最大灰度级,  $H_r$  为图像中灰度值为  $r$  的像素个数。平均梯度(Gray Mean Gra-

dient, GMG) 用于反应图像对比度、细节反差和纹理变化特征, 常用来评价图像的模糊程度。其值越大, 表明图像细节越丰富, 纹理越清楚, 图像质量越好。平均梯度函数定义为:

$$\text{GMG} = \frac{1}{(M-1) \times (N-1)} \cdot \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{N-1} \sqrt{\frac{[g(i, j+1) - g(i, j)]^2 + [g(i+1, j) - g(i, j)]^2}{2}}. \quad (22)$$

运用各算法恢复 3 种场景的实验结果见图 2。从去雾后的主观视觉效果来看, 对于图 2(a) 左的薄雾场景, 由于文献[4]和文献[5]都采用基于分块的暗原色操作, 因此去雾后在树叶边缘处都存在一定的白边, 但后者采用了容差机制, 因此对树林尽头的明亮区域的处理效果更好; 文献[6]和本文算法采用全局暗原色估计, 因此不存在上述的 Halo 效应, 而文献[6]去雾后结果的对比度偏暗, 本文算法则对树林尽头的雾气去除不够彻底。对于图 2(a) 中的浓雾场景, 文献[4]和文献[5]算法由于采用分块操作, 故去雾图像都存在一定的块状效应; 文献[6]因采用固定的  $K$  值而无法适应低能见度的浓雾天气, 在不进行后续对比度拉伸时复原结果不理想; 而本文算法能自适应估计低能见度环境下偏低的大气光强度值, 因此在未增加曝光处理的情况下, 对比度也能基本满足视觉要求, 去雾图像目标清晰, 色彩恢复自然, 能见度得到改善。对于图 2(a) 右含大面积天空区域的场景, 文献[4]算法对天空区域的恢复效果不明显, 出现了一定的色彩失真; 加入容差机制后, 文献[5]算法的天空区域复原效果得到改善, 但在天空与地平线交界处仍存在一定的边界失真现象; 文献[6]算法的图像对比度仍较差, 复原效果不明显; 而本文算法可有效处理天空区域, 但存在一定的过度去雾, 使结果看起来不太自然, 深色建筑物去雾后颜色偏暗。

各算法去雾效果的客观评价结果参见表 2~4。从各表的客观评价参数值可知, 本文算法的去雾结果在图像对比度、信息熵和平均梯度 3 方面都明显优于其它 3 种算法; 值得注意的是表 4 的信息熵结果, 由于是对含大面积天空区域的场景进行去雾, 而明亮区域基本上没有信息, 故信息熵趋近于 0<sup>[16]</sup>, 因此去雾后图像的信息熵反而会降低。其值越小, 表明对明亮区域去雾越彻底。从

各算法的运行时间来看,文献[4]和文献[5]算法的运算复杂度相当,由于它们采用了分块处理,耗时较长,处理  $600 \times 400$  中等尺寸的图片需要约 90 s,不适合实时处理;而文献[6]算法处理相同尺寸的图片仅需 0.5 s,实时性较好;本文算法在文献[6]算法的基础上增加了参数的自适应估计,故算法复杂度有所提高,运行时间也相应增加,平均约为文献[6]算法运行时间的 2.43 倍。

表2 图3(a)左薄雾场景去雾结果(1024×768)

Tab. 2 Dehazing results of Fig. 3(a) left with mist scene (1024×768)

算法	对比度	信息熵	平均梯度	运行时间/s
文献[4]算法	0.021 3	4.985 1	0.048 1	308.9 0
文献[5]算法	0.022 7	5.003 7	0.048 7	317.6 2
文献[6]算法	0.009 4	4.545 9	0.033 2	1.96
本文算法	0.028 8	5.072 1	0.051 5	5.12

表3 图3(a)中浓雾场景去雾结果(300×200)

Tab. 3 Dehazing results of Fig. 3(a) middle with dense fog scene (300×200)

算法	对比度	信息熵	平均梯度	运行时间/s
文献[4]算法	0.003 9	3.764 0	0.013 2	20.08
文献[5]算法	0.004 0	3.765 4	0.013 5	20.19
文献[6]算法	0.000 9	2.828 8	0.005 3	0.12
本文算法	0.009 1	4.165 1	0.020 2	0.26

表4 图3(a)右大面积天空区域场景去雾结果(600×400)

Tab. 4 Dehazing results of Fig. 3(a) right with large area of sky (600×400)

算法	对比度	信息熵	平均梯度	运行时间/s
文献[4]算法	0.104 5	4.520 6	0.027 4	90.86
文献[5]算法	0.108 6	4.554 7	0.027 7	91.67
文献[6]算法	0.048 6	4.618 5	0.015 0	0.50
本文算法	0.132 4	4.125 4	0.029 9	1.25



(a) 原带雾图像:左为薄雾场景,中为浓雾场景,右为含大面积天空区域场景

(a) Original fogging images: the left one is mist scene, the middle one is dense fog scene, the right one is scene with large area of sky



(b) 文献[4]算法的去雾结果

(b) Dehazing results of algorithm in reference[4]



(c) 文献[5]算法去雾结果

(c) Dehazing results of algorithm in reference[5]



(d) 文献[6]算法去雾结果

(d) Dehazing results of algorithm in reference[6]



(e) 本文算法去雾结果

(e) Dehazing results of proposed algorithm

图 3 文献[4-6]与本文算法的去雾结果

Fig. 3 Dehazing results by algorithms in reference[4-6] and proposed method on three kinds of fog scenes

## 5 结 论

本文针对暗原色先验去雾算法对明亮区域失效的问题,以及分块求取暗原色存在的块状效应、Halo 现象和大气光强度估计不准确等问题,提出了基于自适应参数的全局暗原色先验去雾算法。该算法通过模糊逻辑控制器估计明亮区域的容差参数和透射率调整因子,在非明亮区域求取大气光强度,在明亮区域采用自适应容差法调整透射

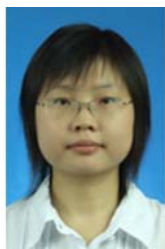
率。对浓雾图像、薄雾图像以及含大面积天空区域场景的图像进行去雾实验,结果表明,本文算法在不增加曝光处理的情况下能获得较好的去雾效果,运行速度较快,可有效抑制明亮区域失真、块状效应、Halo 现象和颜色失真等问题。存在的不足以及改进措施有:(1)下一阶段希望引入合适的优化算法,以指导并改善模糊逻辑控制器对参数的自适应调整效果;(2)进一步优化算法,以提高算法的实时性能;(3)进一步改善算法对明亮区域的处理效果。

### 参考文献:

- [1] TAN R T. Visibility in bad weather from a single image [C]. 2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Anchorage: IEEE, 2008: 1-8.
- [2] FATTAL R. Single image dehazing [C]. ACM Transactions on Graphics Los Angeles: ACM, 2008, 27(3): 72.
- [3] TAREL J P, HAUTIERE N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image [C]. 2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision, Kyoto: IEEE, 2009: 2201-2208.
- [4] HE K, SUN J, TANG X. Single image haze removal using dark channel prior [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(12): 2341-2353.
- [5] 蒋建国, 侯天峰, 齐美彬. 改进的基于暗原色先验的图像去雾算法 [J]. 电路与系统学报, 2011, 16(2): 8-12.
- JIANG J G, HOU T F, QI M B. Improved algo-

- rithm on image haze removal using dark channel prior[J]. *Journal of Circuits and Systems*, 2011, 16(2):8-12. (in Chinese)
- [6] 嵇晓强,戴明,尹传历,等. 航拍降质图像的去雾处理[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(7):1659-1668.  
JI X Q, DAI M, YIN CH L, *et al.*. Haze removal for aerial degraded images [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(7): 1659-1668, (in Chinese)
- [7] 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 J, LI D P, LIAO Q M. Physics-based fast single image fog removal [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2011, 37(2):143-148. (in Chinese)
- [8] 孙伟,李大健,刘宏娟,等. 基于大气散射模型的单幅图像快速去雾[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(4): 1040-1046.  
SUN W, LI D J, LIU H J, *et al.*. Fast single image fog removal based on atmospheric scattering mode [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(4): 1040-1046, (in Chinese)
- [9] HE K, SUN J, TANG X. Guided image filtering [C]. *Computer Vision—ECCV 2010, Berlin: Springer*, 2010:1-14.
- [10] 王卫星,肖翔,陈良琴. 结合最小滤波和引导滤波的暗原色去雾[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(7): 2100-2108.  
WANG W X, XIAO X, CHEN L Q. Image dark channel prior haze removal based on minimum filtering and guided filtering [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(7):2100-2108. (in Chinese)
- [11] 崔宝侠,贾冬雪,段勇. 明亮区域的暗原色先验算法[J]. *沈阳工业大学学报*, 2015, 37(1):75-79.  
CUI B X, JIA D X, DUAN Y. Dark channel prior algorithm for bright regions[J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2015, 37(1):75-79. (in Chinese)
- [12] 李坤,兰时勇,张建伟,等. 改进的基于暗原色先验的图像去雾算法 [J]. *计算机技术与发展*, 2015, 25(2):8-11.  
LI K, LAN SH Y, ZHANG J W, *et al.*. An improved method of haze removal based on dark channel prior[J]. *Computer Technology and Development*, 2015, 25(2):8-11. (in Chinese)
- [13] 郑勇. 基于联合均值漂移的单幅图像去雾算法研究及硬件实现[D]. 西安电子科技大学, 2014, 3:28-32.  
ZHENG Y. *Research on single image defog based on joint mean shift and its hardware implementation* [D]. Xian: Xidian Electronic University, 2014, 3:28-32. (in Chinese)
- [14] CHAVEZ P S. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1988, 24(3):450-479.
- [15] 闻新,周露,李东江,等. MATLAB 模糊逻辑工具箱的分析及应用[M]. 北京:科学出版, 2001:14-15.  
WEN X, ZHOU L, LI D J, *et al.*. *The Analysis and Application of the MATLAB Fuzzy Logic Toolbox* [M]. Beijing: Science Press, 2001:14-15 (in Chinese)
- [16] 侯典柯,吴晓红,何小海,等. 改进的基于边界限制的图像去雾算法[J]. *四川大学学报:工程科学版*, 2015, 47(增2):136-141.  
HOU D K, WU X H, HE X H, *et al.*. An improved image dehazing algorithm based on boundary constraint[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2015, 47(Supp. 2):136-141. (in Chinese)

#### 作者简介:



邓莉(1983—),女,四川乐山人,硕士,讲师,2005年、2008年于西南大学分别获得学士、硕士学位,主要从事数字图像处理的研究。E-mail: dengli@guat.edu.cn