

文章编号 1004-924X(2011)07-1659-10

## 航拍降质图像的去雾处理

嵇晓强<sup>1,2</sup>, 戴明<sup>1\*</sup>, 尹传历<sup>1</sup>, 冯宇平<sup>3</sup>, 柏旭光<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;  
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 3. 青岛科技大学, 山东 青岛 266042)

**摘要:**针对有雾天气下无人机航拍视觉系统的能见度低, 航拍图像对比度和色彩保真度差等问题, 基于暗原色先验规律以及雾图的物理模型提出了一种雾天降质图像去雾处理技术。从图像复原和增强两个角度出发, 分别建立了户外图像全局去雾和对对比度自适应调整的最优化模型, 从而能够直接复原得到高质量的去除雾干扰的图像并且估算出雾的浓度。对一系列户外带雾图像的分组实验表明, 该方法可以快速有效地提高带雾图像的对比度和色彩清晰度, 获得满意的视觉效果。另外, 该方法克服了 Kaiming He 方法处理时间过长的缺陷, 平均处理时间仅为原方法的 10% 左右, 显著缩短了运算时间, 为在工程项目中实现图像的实时去雾处理提供了理论依据。

**关键词:** 航拍图像; 图像复原; 图像增强; 去雾; 暗原色先验

**中图分类号:** TP751.1; TP391.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111907.1659

## Haze removal for aerial degraded images

JI Xiao-qiang<sup>1,2</sup>, DAI Ming<sup>1\*</sup>, YIN Chuan-li<sup>1</sup>, FENG Yu-ping<sup>3</sup>, BAI Xu-guang<sup>1</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*  
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;*  
3. *Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China*)

\* *Corresponding author, E-mail: daim@vip.sina.com*

**Abstract:** For aerial images with poor contrast and color fidelity due to foggy and hazy weathers, this paper proposes a technique of haze removal for aerial degraded images based on the dark-channel prior and the physical model to improve the visibility of vision system in an Unmanned Aerial Vehicle. From the viewpoints of image restoration and image enhancement, the optimized models of global haze removal and self-adapting contract extending are established, respectively. Using the method, a high quality haze-free image can be recovered and the thickness of the haze can be also established. The experimental results on a variety of outdoor haze images demonstrate that it can enhance the contrast and color definition of hazy degraded images fast and efficiently and can achieve satisfactory visual effects. Moreover, the method overcomes the Kaiming He's drawback of more time consuming, and the aver-

收稿日期: 2010-10-12; 修订日期: 2010-11-17.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2008AA121803); 国家 973 重点基础研究发展规划资助项目 (No. 2009CB72400603B)

age processing time is 10% that of the traditional method. It provides a theoretical reference for the real-time haze removal processing in engineering projects.

**Key words:** aerial image, image restoration; image enhancement; haze removal; dark-channel prior

## 1 引言

在雾、霭等天气条件下,大气散射对户外图像的对比度和颜色保真度影响严重,致使图像的许多特征被覆盖,景物的可辨识度大大降低。无人机机载航拍视觉系统受大气散射的影响更为另人关注,这是因为某些情况下侦察监视工作不可能重复进行,依据有限的图像资料获得更多更准确的目标信息至关重要。因此,对雾天图像进行有效的去雾处理是十分必要的。

目前,图像去雾处理的方法有两类。其一是增强图像对比度。这种处理不考虑退化原因,按照特定需要突出图像中某些信息,同时削弱或去除某些不需要的信息,但这样做有可能造成一些信息的损失<sup>[1]</sup>;其二是基于图像退化原因和大气散射规律建立图像退化模型,实现场景复原。这类方法充分利用了退化的先验知识,具有内在的优越性。但是由于需要景深和精确的大气条件,研究时要使用多幅图像或更多辅助信息<sup>[2-5]</sup>,给只有一幅图像可分析的场合带来诸多不便。目前,国内外在单幅图像去雾处理领域取得了很大的突破。Tan 等<sup>[6]</sup>通过最大化局部对比度来达到去雾的目的;Fatal 等<sup>[7]</sup>依赖独立成分分析来推断景物光在空气中传播时的透射率;Jean-Philippe tarel<sup>[8]</sup>以最小滤波为基础辅以中值滤波进行全局去雾。由于雾所依赖的深度信息未知,单幅图像去雾处理往往依赖于一个强有力的先验或假设。Kaiming He 等<sup>[9]</sup>提出一种新的先验规律——暗原色先验,利用这个先验规律能够直接评估雾光的透射信息,进而对单幅图像进行去雾处理。

本文对该先验规律进行了深入分析,对基于暗原色先验的图像去雾处理方法进行了优化,大量户外有雾图像的实验结果表明,该处理方法可快速、显著地提高雾天景象的清晰度,均匀地调整图像整体色彩亮度并且保持色彩本身不变,同时大大减少了原方法的繁重运算量,大幅度提高了运行效率和速率。

## 2 雾图形成的物理模型

要对雾天降质图像进行清晰化处理,必须考查图像退化原因,建立物理模型。本文依据的物理模型是在计算机视觉和图形领域广泛使用的 McCaerney 大气散射模型<sup>[1,9-11]</sup>,该模型将一个像素点的色彩和强度看作由雾或阴霾的大气光产生的色彩、强度和晴天被观察的场景点的色彩、强度的线性组合。公式(1)给出了对该模型描述:

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

其中: $x$ 表示像素点的坐标; $I(x)$ 为已知量,指观测到的图像的强度,即带雾图像; $t(x) = e^{-\beta t(x)}$ 表示透射率,描述光线通过媒介透射到视觉系统没有被散射的部分; $A$ 表示全球大气光成分,是未知量; $J$ 表示景物光线的强度即要恢复的真实图像。 $t(x)J(x)$ 称作做衰减项,描述景物光线及其在媒介中的衰减情况; $(1-t(x))A$ 表示由前方散射引起的大气光成分,其会导致景物颜色的偏移<sup>[9]</sup>。

由公式(1)可知,去雾的途径就是从雾化图像 $I(x)$ 中复原 $J(x)$ , $A$ 和 $t(x)$ ;而依据单幅图像求取这3个参数的关键是一个强有力的先验或假设。前文中提到的 Tan<sup>[6]</sup>和 Fatal<sup>[7]</sup>等人都是应用各自的先验或假设来达到去雾的目的。本文基于 Kaiming He 等人提出的暗原色先验求取参数和,进而得到待恢复的真实图像。

## 3 基于暗原色先验的图像复原

### 3.1 暗原色先验理论

暗原色先验理论是一种对无雾图像的统计规律。以前的去雾方法,重心都是放在提高图像对比度上,而 Kaiming He 等人着眼于研究无雾图像的统计特征,他们通过大量的实验发现了这个客观存在的统计规律,即在一幅户外无雾图像的任意小块中,总有至少一个像素点,它的一个颜色通道具有很低的强度值,称之为暗原色,数学表达如公式(2)所示:

$$J_{\text{dark}}(x) = \min_{c \in \{r, g, b\}} (\min_{y \in \Omega(x)} (J_c(y))) \quad (2)$$

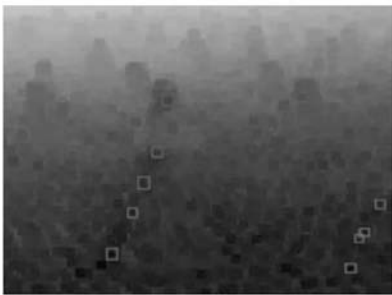
其中,  $J_{\text{dark}}$  称为图像  $J$  的暗原色, 其强度值总是很低并且趋近于 0,  $J_c$  为  $J$  的  $r, g, b$  三通道中一个颜色通道,  $\Omega_x$  是以  $x$  为中心的一块区域。

在被雾干扰的图像中, 由于雾是灰白色的, 导致原本应该很暗的暗原色会被大气中的白光成分充斥而变得灰白, 强度变得较高。这是由空气中的漫反射分量引起的, 而其强度和透射率有关, 因此可以通过暗原色估计透射率。通过减去场景中暗原色点所对应的一个值以去除空间各向同性的雾, 继而还原出清晰且色彩逼真的无雾图像。同时还可根据暗原色点的灰白程度来判断雾的浓度。图 1 给出了了一幅带雾图像及其暗原色图。其中暗原色图的求取是按照文献[9]的方法, 首先将图像分成  $15 \text{ pixel} \times 15 \text{ pixel}$  的块后再求得。图中小方块标注的即是强度值很低, 接近于零的暗原色点, 它们分布在相对较亮的草堆表面以及阴影或投影中。



(a) 原始带雾图像

(a) Original hazy image



(b) 暗原色图

(b) Dark-channel image of (a)

图 1 雾化图像及其暗原色图

Fig. 1 Original hazy image and its dark-channel image

### 3.2 暗原色去雾方法

由雾图的物理模型可知, 去雾的目标就是从

带雾图像  $I(x)$  中复原  $J(x), A$  和  $t(x)$ 。首先, 利用暗原色先验估测出雾的透过率图(反映了图像中雾的浓度变化), 再利用透过率图恢复场景的辐射度  $J(x)$ (去雾的图像)。文献[9]给出了基于暗原色去雾的方法, 其原理图如图 2 所示。具体实现步骤为:

- (1) 将输入的带雾图像分成大小为  $15 \text{ pixel} \times 15 \text{ pixel}$  的块, 求得局部暗原色图;
- (2) 假设全球大气光成分已知, 利用暗原色图粗略估测透过率图;
- (3) 利用软件抠图方法细化透过率图;
- (4) 利用暗原色先验估计大气光成分;
- (5) 由雾图物理模型以及  $I, A$  和  $t(x)$  恢复无雾图像  $J$ 。

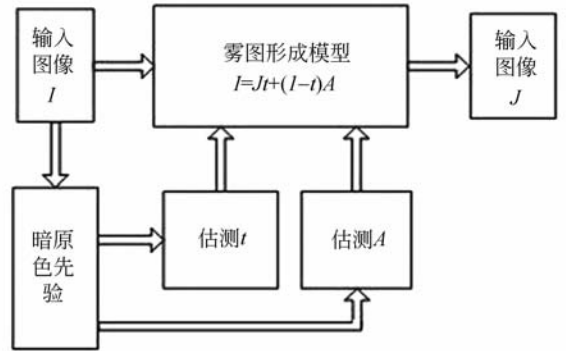


图 2 方法实现的原理图

Fig. 2 Block diagram of algorithm

文献[9]利用暗原色先验得到了一种简单而有效的去雾方法, 能够明显提高雾天户外图像清晰度, 均匀地调整图像整体的色彩亮度, 从而达到良好的视觉效果。本文作者在对该方法进行大量实验和分析的基础上, 发现其存在如下不足: 由于是分块求取暗原色, 继而估测透过率  $t$ , 造成了  $t$  的估测图存在一些块状效应, 从而影响最终的效果。为此, 文献[9]通过软件抠图的方法修复和细化透过率  $t$ , 但此方法使运算量巨大。文献[9]作者在一台 4 核、3.0 GHz、Intel Pentium 处理器的 PC 机上处理一幅  $600 \text{ pixel} \times 400 \text{ pixel}$  的图像, 用了 10~20 s。由于运算量太大, 使得其工程应用受到很大限制。针对这一不足, 考虑到机载视频系统实时性的要求, 本文在算法上对暗原色先验进行了优化和改进, 使得处理时间大大降低。

## 4 全局暗原色图像去雾方法

### 4.1 暗原色的求取

暗原色先验理论的第一步是将图像分块,在局部区域中寻找暗原色,分块的大小会直接影响透过率的估计和最终的去雾效果。理论上,块的面积越小,求取的暗原色值越精确,对透过率  $t$  的估计越有力。但实际上,过小的分块会导致求取的暗原色错误太多,而且会造成对大气光  $A$  的估计不准。文献[9]首先将全局图像分成  $15 \times 15$  的块,每块求取暗原色图,然后再利用此暗原色图估测透过率  $t$ 。由于  $t$  的取值在一个块内并不总是恒定的,并且相邻子块之间的  $t$  存在差异,这就造成  $t$  的估测图存在一定的块状效应,从而影响最终的去雾效果。为此,文献[9]通过软件抠图的方法优化透过率  $t$ ,即采用一个高精度的插值算法,利用像素间的关联性和已知的精确值,通过计算、求解、插值、扩散得到其他未知的值。由于使用预处理共轭梯度(PCG)算法求解大型稀疏矩阵,给整个处理过程带来了巨大的运算量,占用了大量的内存空间。另一方面,如果块太大会导致暗原色值稀疏,使暗原色的分布过于单一。依据文献[9]的理论,块选的太大对估测  $t$  不利,但对估测大气光  $A$  有利。最终得到的去雾结果图像对于薄雾情况不会有太大影响,但在浓雾情况下,去雾

效果会有所下降。

由于航拍影像中雾的分布相对均匀,且景深变化不大<sup>[10]</sup>,为了最大限度的提高算法的运算效率,在保证去雾效果不会降低的基础上,本文提出一种全局暗原色先验方法。即不再对图像分块,直接对整幅图像求取暗原色。很显然,全局暗原色是文献[9]理论的延伸,其依据是暗原色理论以及一种称作 dark-object subtraction 的去雾技术<sup>[12]</sup>,该技术利用全图最暗的点去除空间各向同性的雾。根据以上理论依据总结出:在整幅图像中至少存在一个可信的暗原色像素,其值能逼近地反映光照在这个区域的作用。如果雾的分布是均匀的,或者在薄雾的户外场景中,这种方法会很有效。但是,当户外是浓雾时,如果直接将此暗原色值填满整幅图像,会使  $t$  的估测不精确,造成局部区域去雾不明显。为此,文中从图像增强的角度出发,辅以对比度调节的方法来解决此问题。所以,本文方法是先进行去雾处理,恢复无雾图像,再利用图像增强方法,突出局部信息。这种全局暗原色方法既可避免由于分块造成对  $A$  估计不精确的问题,也避免了因细化  $t$  而带来的繁重运算量,节约了大量的运算时间,同时很好地处理了浓雾或者雾分布不均匀的情况,有效地避免了文献[9]和 [12]的弊端。



(a) 原始雾化图像 (b) Kaiming He 的透过率  $t$  估测图 (c) 本文的透过率  $t$  估测图  
 (a) Original hazy image (b) Estimated transmission map for (a) by Kaiming He (c) Estimated transmission map of for (a) by proposed method

图 3 雾化图像及其透过率  $t$  估测图

Fig. 3 Hazed image and its estimated transmission maps

### 4.2 透过率的全局估计

首先假定图像中大气光成分  $A$  是已知的,由

雾图的物理模型以及暗原色定义可求得带雾图像中  $R, G, B$  三通道的暗原色为:

$$\min(\min_{y \in \Omega(x)} (\frac{I_c(y)}{A_c})) = t(x) \min(\min_c (\min_{y \in \Omega(x)} (\frac{J_c(y)}{A_c})) + (1-t(x)), \quad (3)$$

其中,  $c$  为图像中  $R, G, B$  三通道一个颜色通道,  $\Omega_x$  表示以像素  $x$  为中心的块, 在这里其大小和整幅图像一致。又已知无雾图像的暗原色值很小, 接近零, 且  $A \neq 0$ , 则由方程(3)可变换求得  $t(x)$  的表达式为:

$$t(x) = 1 - \min(\min_c (\min_{y \in \Omega(x)} (\frac{I_c(y)}{A_c}))), \quad (4)$$

而  $\min(\min_c (\min_{y \in \Omega(x)} (\frac{I_c(y)}{A_c})))$  恰好是用  $A$  归一化后

的带雾图像的暗原色, 从而可以通过求取暗原色值得到  $t$  的分布。考虑到存在空间透视现象<sup>[13-14]</sup>, 所以在方程(4)中引进一个常数  $\omega$  ( $0 < \omega \leq 1$ ), 有针对性地保留一部分覆盖遥远景物的雾<sup>[9]</sup>。 $\omega$  的取值根据雾气浓度、光照强度等具体情况而定。实验结果表明: 一般雾浓度越大,  $\omega$  的值相对越大, 其值接近 1; 反之, 薄雾情况下  $\omega$  的取值应该偏小, 在 0.7 左右。文中选取  $\omega = 0.8$ , 用以平衡薄雾和浓雾两种情况。

$$t(x) = 1 - \omega \min(\min_c (\min_{y \in \Omega(x)} (\frac{I_c(y)}{A_c}))), \quad (5)$$

这样即可求得最终的全局透过率图。图 3 是针对一幅带雾图像, 应用文献[9]中 Kaiming He 的方法以及本文方法求得的透过率估测图。可以看出 Kaiming He 求得的透过率图存在一定的方块效应。相比之下, 本文采用全局方法求得的  $t$  分布图相对平滑, 不存在方块效应, 这也正是本文方法的优越性之一。

### 4.3 全球大气光成分的求取

前文对暗原色和透过率  $t$  的求取是在假定  $A$  已知的条件下进行的, 实际上  $A$  的值是需要求取的。由于根据雾图的暗原色能够得到雾浓度的粗略值, 所以可以通过暗原色来估测大气光  $A$ 。首先找到暗原色图中亮度最高的一些像素, 再找到其所对应的原图像  $I$  中的像素, 把原图像  $I$  中这些像素最大的亮度值作为  $A$  的估计值<sup>[9]</sup>。

在估计  $A$  的结果统计过程中发现: 大多数情况  $A$  的估计是图中偏白部分。考虑到雾化情况在接近纯白场景里是不明显的, 从而可以弱化一些计算区域, 对接近  $A$  的区域把调整力度弱化一些。基于此, 加入一个调整参数  $|J - A|$  用来弱化

$t$  带来的影响, 从而能自动估测图像的大气光成分, 具有较强的自适应性。

### 4.4 恢复无雾图像

得到透过率  $t$  以及大气光  $A$  后便可求解无雾图像  $J$ 。考虑到有的像素点估计出的  $t$  可能接近 0, 容易使复原得到的结果图包含噪声, 因此将透射率设定了一个下限  $t_0$  ( $t_0$  取 0.2), 使得在某些浓雾处仍保留一定数量的雾<sup>[9]</sup>。

于是:

$$J(x) = \frac{I(x) - (1 - t_{\max}(x))A}{t_{\max}(x)}, \quad (6)$$

其中,  $t_{\max}(x) = \max(t(x), t_0)$ 。图 4~6(b) 给出了户外场景带雾图像经本文方法恢复的无雾图, 可以看出基本能恢复出实际场景图像。但由于雾浓度分布不均, 局部去雾效果一般而且亮度降低。

### 4.5 复原后的图像亮度和对比度调节

由于物体光线的亮度通常不及大气光线, 所以经去雾处理后的图像亮度会降低, 颜色较实际场景图像偏暗。另外雾是不均匀分布的, 而由全局暗原色得到的  $t$  分布过于单一, 不可避免造成局部浓雾区域去雾效果不明显, 图像不够清晰, 所以需要调整图像亮度, 增强对比度, 以提高图像质量。图像对比度增强的方法诸多, 例如直方图均衡、retinex 算法<sup>[15-17]</sup>等。本文采用自适应拉伸的方法。其原理是对原始图像像素区间进行分段拉伸。首先求出一幅图像像素值的平均值, 然后分别在平均值的两边, 每隔一个均匀分布的小区间乘以一个系数  $r$ 。 $r$  的选取遵循的规律是: 在小于平均值的区间, 像素值越小,  $r$  值越小; 反之, 在大于平均值的区间, 像素值越大,  $r$  值越大, 从而可加大亮暗区域的对比度, 突出图像的边缘和细节信息。而在平均值附近, 也就是像素分布最密集处, 令  $r$  值接近 1, 能够很好地保留图像的信息, 从而可以对图像进行自适应拉伸, 增强对比度和亮度。也就是说, 对一幅雾浓度分布不均的图像, 可首先经暗原色去雾处理去除一部分雾, 大致还原出无雾图像, 然后再经对比度调节, 对局部由于雾浓度过高而造成不清晰的问题进行很好地修正和调节。

图 4~6(c) 是经亮度和对比度调节后获得的复原图像, 可以看到复原后的图像在细节上更清晰, 颜色更逼真, 更接近晴天下的实际场景图像。



(a) 带雾图像  
(a) Hazed image



(b) Haze removal result for (a) by using dark-channel prior



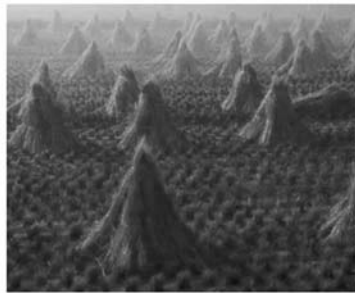
(c) Result after adjusting image (b)

图 4 去雾结果图

Fig. 4 Haze removal results



(a) 户外带雾图像  
(a) Input hazy image



(b) Haze removal result of (a) using dark-channel prior



(c) Result after adjusting image (b)

图 5 去雾结果图

Fig. 5 Haze removal results



(a) 户外带雾图像  
(a) Input hazy image



(b) Haze removal result of (a) using dark-channel prior



(c) Result after adjusting image (b)

图 6 去雾结果图

Fig. 6 Haze removal results

## 5 实验结果与分析

为了验证方法的有效性,对一系列雾天降质图像进行处理。图4~6(c)是本文方法获得的最终复原图像,可以看到复原后的图像在细节上更清晰,颜色更接近晴天下的实际场景图像。图7给出了本文方法和文献[9]方法在处理效果上的比较。其中,图7(b)结果是按照 Kaiming He 求取的。块大小选取  $15 \text{ pixel} \times 15 \text{ pixel}$ ,并且对  $t$  进行了软件抠图优化处理。

从去雾效果上看,原始的普通户外图像以及航拍图像由于受雾的影响,对比度较低,场景比较模糊,细节信息不足,颜色偏暗,经本文方法和文献[9]方法处理后,图像景物比较清晰,色彩、对比度和细节得到明显提高,获得了较好的视觉效果。即使在浓雾的地方,也能较好地得到细节信息并且还还原出生动的彩色图像。针对雾天下的航拍图像(见图7)清晰化处理效果非常明显。

从统计特征着手进行对比分析,选取一系列

雾化图像以及处理后的结果图像求取直方图,以图7(下)一组图像为例,其直方图如图8所示。可以看出,原图像的灰度值集中分布在  $50 \sim 150$  之间,而经过 Kaiming He 的算法以及本文算法处理后的图像的灰度值被拉伸到  $0 \sim 255$ ,分布相对比较均匀,说明图像的对比度有了一定程度的提升。

处理时间的对比可以在一定程度上衡量运算复杂度的差别。在一台处理器为  $2.0 \text{ GHz Intel Pentium Dual Processor}$  的 PC 机上处理一系列大小不同、雾化程度各异的图像,如图3~图7所示,时间的对比如表1所示。可以看出,本文方法在运算时间上仅为文献[9]方法的  $10\%$  左右。

为了验证方法的可靠性,通过收集雾天下现场采集的普通户外场景图像以及无人机航拍的数百幅样本图像,组成了一个户外带雾图像的数据库,进行分组对比性实验。结果表明,本文方法能很好地还原图像细节并恢复真实的色彩,视觉效果良好;处理一幅  $1\text{k pixel} \times 1\text{k pixel}$  大小的图像仅需  $1 \text{ s}$  即可完成。正是由于本文算法采用了全



(a) 输入的带雾图像

(a) Input hazy images

(b) Kaiming He 的结果图

(b) Results by Kaiming He

(c) 本文方法的结果图

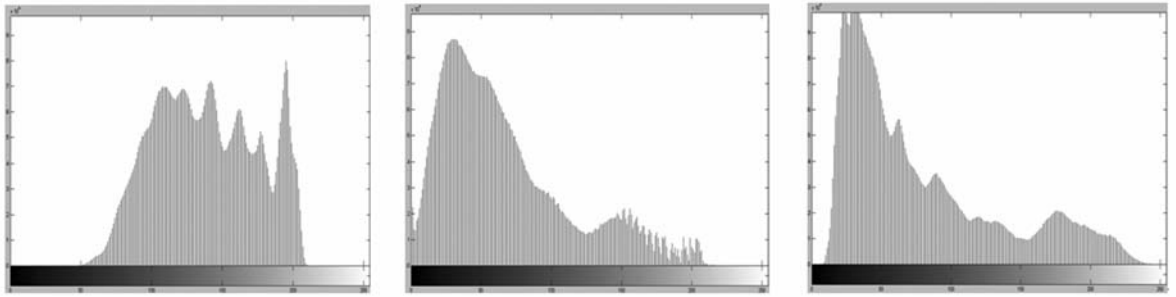
(c) Results by proposed method

图7 本文方法和 Kaiming He 方法的比较

Fig. 7 Comparison of Kaiming He with proposed methods

局暗原色先验,避免了原方法为抠图而分解大型稀疏阵带来的巨大运算量,因此大大降低了处理时间。实验表明,采用本文方法的平均处理时间

仅为文献[9]方法的 10%,一定程度上反映了本文方法的快速和有效。



(a) 输入的带雾图像的直方图

(b) Kaiming He 的结果的直方图

(c) 本文方法的结果的直方图

(a) Histogram of input hazy image (b) Histogram of results by Kaiming He (c) Histogram of result by proposed method

图 8 直方图分布比较

Fig. 8 Comparison of histograms

表 1 运行时间的比较

Tab. 1 Comparison of processing time

图片	大小 /pixel×pixel	文献[9] 时间/s	本文方法 时间/s	时间比值
图 4	800×600	26.23	2.45	9.34%
图 5	420×340	17.36	1.42	8.18%
图 6	3 072×2 304	428.38	31.04	5.87%
图 7(上)	540×360	21.36	1.82	8.52%
图 7(中)	430×280	18.07	1.34	7.41%
图 7(下)	3 072×2 304	530.32	30.12	5.68%

## 6 结 论

基于全局暗原色先验和雾图的物理模型,本文提出了一种快速有效的雾天航拍降质图像去雾

处理技术。首先,介绍了雾图形成的物理模型,然后,重点研究了利用全局暗原色先验去雾的方法,再利用自适应对比度拉伸方法增强图像色彩和细节,最后,针对大量户外带雾图像进行分组实验,给出了处理效果及时间统计值,并对本文方法和文献[9]方法在处理效果和时间上进行对比。实验结果表明:本文方法能够快速明显地提高雾天户外图像的对比度和清晰度,均匀调整图像整体的色彩亮度并且保持色彩本身不变,使图像达到良好的视觉效果;同时能够大幅度提高雾天机载航拍系统的能见度,且具有较好的普适性和稳定性;平均处理时间仅为文献[9]方法的 10%左右,大大缩短了运算时间,降低了运算的复杂度,为实现机载航拍视频图像的实时去雾处理提供了理论依据。

## 参考文献:

[1] 刘瑞剑. 低能见度条件下图像清晰化处理研究[D]. 太原: 中北大学, 2008.

LIU R J. *Research on image clear processing under low visibility condition* [D]. Taiyuan: North University of China, 2008. (in Chinese)

[2] KOPF J, NEUBERT B, CHEN B, et al.. Deep photo: Model-based photograph enhancement and viewing [J]. *ACM Transactions on Graphics, SIGGRAPH, California, USA*, 2008, 5:1-10.

[3] NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Chromatic framework for vision in bad weather [C]. *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, New York, USA*, 2000, 1:598-605.

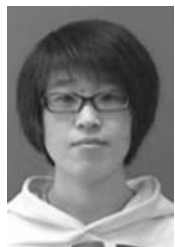
[4] NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Contrast restoration of weather degraded images [J]. *Proceedings of IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Berlin, Germany*, 2003, 7: 713-724.

[5] SHWARTZ S, NAMER E, SCHECHNER Y Y. Blind haze sep-araion [C]. *Proceedings of IEEE Conference*

on *Computer Vision and Pattern Recognition, Beijing China*, 1:1984-1991.

- [6] TAN R. Visibility in bad weather from a single image[C]. *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Alaska, USA*, 2008:1-8.
- [7] FATAL R. Single image dehazing[J]. *ACM Transactions on Graphics, SIGGRAPH*, 2008,27(3):1-9.
- [8] TAREL J P. Fast visibility restoration from a single color or gray level image[C]. *Proceedings of IEEE Conference on International Conference on Computer Vision, Kyoto, Japan*, 2009:20-28.
- [9] HE K, 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*, 2009:1956-1963.
- [10] 杨靖宇,张永生,邹晓亮,等.利用暗原色先验知识实现航空影像快速去雾[J].*武汉大学学报*,2010,11:1292-1295.  
YANG J Y, ZHANG Y SH, ZOU X L, *et al.*. Using dark channel prior to quickly remove haze from a single image [J]. *Geomatic and Information Science of Wuhan University*, 2010, 11: 1292-1295.
- [11] 赵莹.基于单幅图像的去雾方法研究[D].天津:天津大学,2009.  
ZHAO Y. *Research on single image-based Dehazing Algorithm* [D]. Tianjin: Tianjin University, 2009. (in Chinese)
- [12] CHAVEZ P. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1988, 24:450-479.
- [13] PREETHAM A J, SHIRLEY P, SMITS B. A practical analytic model for daylight [J]. *Special Interest Group for Computer GRAPHICS, SIGGRAPH*, 1999,4:91-100.
- [14] NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Interactive (de) weathering of an image using physical model [C]. *Proceedings of IEEE Conference on International Conference on Computer Vision, Nice, France*, 2003:65-71.
- [15] 吴家伟,武春风,庾文波.红外图像实时显示增强系统设计[J].*光学精密工程*,2009,17(10):2612-2619.  
WU J W, WU CH F, TUO W B. Design of real-time infrared image enhancing system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(10): 2612-2619. (in Chinese)
- [16] 葛微,李桂菊,程宇奇,等.利用改进的Retinex进行人脸图像光照处理[J].*光学精密工程*,2010,18(4):1011-1020.  
GE W, LI G J, CHENG Y Q. Face image illumination processing based on improved Retinex [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(4): 1011-1020. (in Chinese)
- [17] JI X Q, FENG Y P, DAI M, *et al.*. Real-time defogging processing of aerial images [C]. *Proceedings of IEEE International Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing, Chengdu, China*, 2010:1556-1600.

#### 作者简介:



嵇晓强(1982—),女,吉林德惠人,博士研究生,2007年于长春理工大学获得学士学位,主要从事航空机载视频图像实时增强技术的研究。E-mail: zuoanmulan@163.com



尹传历(1979—),男,吉林白山人,工学博士,助理研究员,2007年于中科院院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事机载图像处理及图像跟踪方面的研究。E-mail: yinchuanli-1979@163.com



冯宇平(1982—),女,吉林伊通人,博士,讲师,2005年于长春理工大学获得学士学位,2010年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事图像信号处理及图像配准、拼接融合方面的研究。E-mail: gjs-fengyuping@163.com



柏旭光(1983—),男,吉林长春人,博士,助理研究员,2010年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事嵌入式系统的开发及研究。E-mail: bxg1983@163.com

#### 导师简介:



戴明(1965—),男,湖北潜江人,博士生导师,研究员,1993年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事光电平台稳定技术、图像稳定技术及航空光电成像技术方面的研究。E-mail: daim@vip.sina.com

#### ●下期预告

## 轻型空间相机调焦机构优化设计与精度试验

贾学志<sup>1,2</sup>,王 栋<sup>1</sup>,张 雷<sup>1</sup>,安 源<sup>1</sup>,金 光<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院,北京 100039)

为了保证轻型空间相机具有更强的适应性,能够获得清晰的图像,根据相机光学系统的特点以及相机的焦深,优化设计了一种适用于该相机的调焦机构。首先,为了满足相机总体提出的低质量和小型化要求,综合考虑重量、外型尺寸、刚度、误差等各方面的因素,选择丝杠和连杆配合使用的双滑块机构,将丝杠的转动通过连杆机构转换成调焦镜沿光轴方向的直线运动。然后,对该调焦机构在调焦范围内的调焦精度进行了分析,介绍了该调焦机构的误差来源和计算方法。最后,对该调焦机构进行了振动试验和精度试验,给出了该调焦机构定位精度和重复定位精度的计算方法。经优化设计后的调焦机构总重量为 2.5 kg,外型尺寸为 186 mm×144 mm×60 mm。振动试验和精度试验的结果表明:该调焦机构的基频为 505 Hz,单向定位精度为 0.008 mm,重复定位精度为 0.002 5 mm,满足相机总体提出的刚度要求和精度要求。