

# 基于景深约束的单幅雾天图像去雾算法

南 栋,毕笃彦,马时平,何林远,娄小龙

(空军工程大学航空航天工程学院,陕西西安 710038)

**摘 要:** 本文提出一种基于景深约束的单幅雾天图像去雾算法,该算法首先对退化模型进行变换以满足 Kimmel 变分框架的要求;其次,考虑到人眼视网膜锥细胞对绿光的敏感性,将绿光分量作为大气传输图变分求解模型的输入;最后,利用景深图像特性,在 8 邻域快速求解中对能量函数进行约束,从而有效提升去雾图像的视觉效果.实验结果表明本文算法在获得最佳去雾效果的同时,具有较好的实用性和较少的计算资源消耗.

**关键词:** 图像去雾;退化模型;景深;变分模型

**中图分类号:** TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2015)03-0500-05

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.03.013

## Single Image Dehazing Method Based on Scene Depth Constraint

NAN Dong, BI Du-yan, MA Shi-ping, HE Lin-yuan, LOU Xiao-long

(Institute of Aeronautics and Astronautics, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710038, China)

**Abstract:** We propose a single image dehazing method based on scene depth constraint. Firstly, the initial degradation model is transformed to meet the Kimmel's variational model. Then, considering the sensitivity of the cone in human's retina to the green light, we use it as an input of the variational model of the atmospheric transmission map. Finally, in the 8-neighborhood fast solving we constrain the energy function by scene depth, so as to improve the visual effect of the result efficiently. Experiments demonstrate that the proposed method can effectively remove fog, provide good practicability and take less memory consumption.

**Key words:** image dehazing; degradation model; scene depth; variational model

## 1 引言

可见光成像系统受雾霾天气影响,成像质量严重下降,如何改善雾霾退化图像的质量,尤其是针对单幅图像的质量提升成为当前研究的热点.目前,对于此类问题的解决方案可概括为两类.

第一类是非模型去雾方法,其主要目标是提升雾天图像的视觉效果,如伽马校正<sup>[1]</sup>、直方图均衡<sup>[2]</sup>和基于颜色恒常性的 Retinex 算法<sup>[3]</sup>等;这类方法简单、快速,但不足之处是针对性较强,难以使图像对比度、颜色和亮度等视觉指标同时调整到人眼视觉愉悦区.

另一类解决方法是基于物理模型的去雾,其依赖于图像退化模型的建立,通过对大气传输和环境光照进行建模,并依据强有力的假设和先验信息将模型求解的非适定性转换为适定性;根据求解方式不同,这类方法可分为基于统计先验求解和基于几何先验求解.基于统计

先验求解的方法从 CVPR2008 开始至今一直是国内外研究热点,尤其以 CVPR2009 best paper 何恺明等人所提出的暗原色(Dark Channel Prior, DCP)为代表<sup>[4]</sup>,该算法从统计学角度证明自然场景条件下成像目标的存在近似为黑体,并利用黑体的吸光特性提出 DCP 理论,从而估计大气传输图,然而,当场景目标内的大片区域与大气光在本质上相近时,DCP 理论就会无效,从而导致去雾效果不显著;2010 年, Codruta 等人提出一种基于半求反的检测去雾算法(Semi-Inverse, SI)<sup>[5]</sup>,该算法认为清晰户外图像局部内的 RGB 通道中至少有一个通道存在很低的强度值,而在天空或者有雾图像则相反,且图像随着雾浓度增大而平滑,该算法利用求反算子将图像转化到 CIE  $L^*c^*h^*$  空间,进而检测出有雾区域,实现分层对比度拉伸,虽然检测出的有雾区域较为精准,但因其缺乏物理有效性,导致去雾结果中容易出现对比度过度增强的区域;2011 年, Gibson 等人<sup>[6]</sup>利用局部区域

内三个颜色通道的分布呈椭圆分布的先验去雾,然而这种先验在景深大时不具有良好的区分度,当景深超过某一数值时雾霾度呈现均匀分布的形势,因此导致远景去雾效果不好.基于几何先验求解的方法一般根据场景成像特点,利用3维到2维透射模型计算景深信息,从而结合模型进行去雾;2009年,Carr等人在图像分割多标签分配准则基础上提出一种去雾提升算法<sup>[7]</sup>,该算法认为图像中目标方位和其景深具有必然的几何约束关系,从而利用这一准则校正大气传输图像,使其具有层次感,取得了较好去雾效果,但该算法未考虑人眼视觉的动态范围,不能将图像的局域对比度拉伸到人眼视觉愉悦区;2012年,郭珈等人<sup>[8]</sup>根据海上开阔海域的特点,推导了海上图像任意像素点景深的几何计算公式,结合DCP理论对单幅雾天图像进行清晰化处理,有效解决了基准景深点的选取和分布,但该算法针对性强、难以推广应用.

通过对现有基于物理模型的去雾算法分析不难发现,现有算法只针对统计、几何先验进行研究,以实现模型的近似求解,而对于模型求解的本质问题并未给出明确的解决方案,然而,模型求解的精准性对算法处理结果有着重大影响.此外,现有算法并未将人眼视觉因素融入到去雾过程中,这会导致处理结果的对比度容易过度增强.为此,本文提出一种基于景深约束的单幅雾天图像去雾算法,在利用变分框架有效解决模型求解的同时,结合人眼视觉的对比敏感度和图像先验特性来进一步约束求解过程,取得了较好的效果.

## 2 雾天图像退化模型及其特性分析

### 2.1 退化模型

本文算法中所用到的物理模型是McCartney的雾天退化模型,该模型广泛应用于图像去雾领域,根据大气光在雾天退化过程中传输的物理特性,可采用如下公式描述<sup>[9]</sup>:

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

其中, $I(x, y)$ 为产生的退化图像, $J(x, y)$ 为场景的反射光图像,代表图像的本来面貌, $A$ 为大气光强度,一般被认为是图像中最亮点的亮度值, $t(x, y)$ 为大气传输图,代表图像的衰减程度,也可表示为 $e^{-\beta d(x, y)}$ , $\beta$ 被称为大气散射系数,并假定在某个场景中是恒定不变的, $d(x, y)$ 为场景的景深图像.各类基于模型去雾算法的目的就是利用上述公式,联合已知的参数或假设来求解得到 $J(x, y)$ ,但该式求解的未知数个数大于列出的方程数,属于一个病态方程.

### 2.2 景深图像特性分析

景深效果能够加强计算机生成图像的真实感,有助于理解场景的几何结构和目标的相对位置,直接决

定着场景反射光图像,因此,景深图像的生成已成为图像去雾中关键的研究方向.对其特性认知,可分为两个方面.

#### (1) 视觉特性

考虑到图像的景深与图像的原始面貌的一致性,且二者均有分片光滑以及梯度信息的相关性(在景深跳变的边缘梯度相一致),引入人眼视觉的对比敏感度特性来拉伸图像边缘梯度.该特性认为在特定的背景亮度适应级 $I_b$ 上出现的增量 $\Delta I$ 大于一个阈值时,图像的亮度的差异才能被人眼视觉所感知,文中认为需取得这一差异的图像梯度等级应为0.2.

#### (2) 先验特性

通过对大量户外图像的统计分析可知<sup>[7]</sup>:在没有明显凹陷的场景中得到的图像,由于场景中物体表面的景深应一致,跳变只发生在边缘,场景的几何对应关系如图1所示.图中,从点 $B$ 到点 $C$ 由于距离变大,其景深随之缓慢增大;而景深的跳变只发生在图像边缘,如点 $C$ 到点 $D$ 所示.

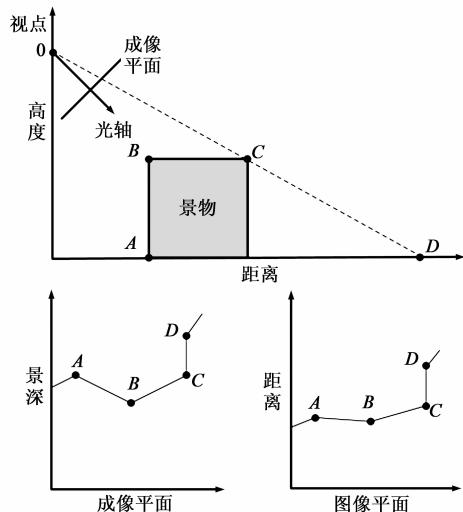


图1 场景景深几何对应关系

## 3 本文算法

### 3.1 大气传输图变分模型构建

对式(1)进行变换,得到下式:

$$I(x, y) - A = (J(x, y) - A)t(x, y) \quad (2)$$

由文献[10]可知, $A$ 一般被认为是图像亮度排序在前0.6%的像素点,为了保证上式的非负性,对式(2)取反得:

$$I_A(x, y) = J_A(x, y)t(x, y) \quad (3)$$

其中, $I_A(x, y) = A - I(x, y)$ , $J_A(x, y) = A - J(x, y)$ ;为了简化运算,提高算法效率,将上式转换到对数域得:

$$i_A = j_A + t' = j_A - \beta d(x, y) \quad (4)$$

其中,  $\mathbf{i}_A = \ln(\mathbf{I}_A(x, y))$ ,  $\mathbf{j}_A = \ln(\mathbf{J}_A(x, y))$ ,  $\mathbf{t}' = \ln(\mathbf{t}(x, y))$  与图像的景深为线性关系; 借鉴 Retinex 思想, 将  $\mathbf{j}_A$  看作是被大气衰减淹没的反射光分量, 利用 Kimmel 变分框架<sup>[11]</sup>求得大气传输图像能量泛函表达式为:

$$\begin{aligned} \min F[\mathbf{t}'] &= \int_{\Omega} (\mu |\nabla \mathbf{t}'|^2 + \alpha |\mathbf{t}' - \mathbf{i}_A|^2 \\ &\quad + \gamma |\nabla(\mathbf{t}' - \mathbf{i}_A)|^2) dx dy \\ \text{s.t. } \mathbf{t}' &\geq \mathbf{i}_A \quad \text{and} \quad \langle \nabla \mathbf{t}', \mathbf{n} \rangle = 0 \quad \text{on } \partial\Omega \end{aligned} \quad (5)$$

其中,  $\Omega$  表示图像空间,  $\partial\Omega$  是图像的边缘,  $\mathbf{n}$  是边缘法向量,  $\alpha, \gamma$  为惩罚因子. 假定大气传输图像  $\mathbf{t}(x, y)$  在 0 和 1 之间, 则  $\mathbf{t}(x, y) \geq \mathbf{I}_A(x, y)$ , 由对数运算的单调性可知  $\mathbf{t} \geq \mathbf{i}_A$ , 被限制了动态范围的逆反射光图像即被作为约束条件. 三个罚函数分别保证了大气传输图的空间平滑、大气传输图与原始图像的相关性以及逆反射光图像的平滑性.

大气传输图通过全局平滑得到, 但式(5)中第三项在保证反射光图像平滑性的同时, 在一定程度上损失了图像的边缘信息. 这是由于  $|\nabla \mathbf{t}'|^2$  作为平滑性的度量, 强调了对大的梯度的惩罚, 而同样将此应用到  $\mathbf{j}_A$ , 会使图像输出边界模糊, 所以应该修正罚函数来反映逆反射光图像的边缘跳变信息, 同时图像景深信息和其距离信息存在几何一致性, 能量泛函设计不仅需要考虑图像的先验信息, 还要兼顾图像的视觉特性. 综上, 为了保证逆反射光图像的边缘信息得到增强的同时能够达到良好的视觉效果, 本文结合景深图像的视觉特性, 将  $-\gamma |\nabla(\mathbf{t}' - \mathbf{i}_A)|^2$  作为第三项罚函数; 根据景深图像的几何跳变关系, 将  $\mu |\nabla \mathbf{t}'|^2$  作为第一项罚函数. 改进的变分模型见下式:

$$\begin{aligned} \min F[\mathbf{t}'] &= \int_{\Omega} (\mu |\nabla \mathbf{t}'|^2 + \alpha |\mathbf{t}' - \mathbf{i}_A|^2 \\ &\quad - \gamma |\nabla(\mathbf{t}' - \mathbf{i}_A)|^2) dx dy \\ \text{s.t. } \mathbf{t}' &\geq \mathbf{i}_A \quad \text{and} \quad \langle \nabla \mathbf{t}', \mathbf{n} \rangle = 0 \quad \text{on } \partial\Omega \end{aligned} \quad (6)$$

其中,  $\mu$  为调节图像平滑性和保证其景深边缘跳变的系数, 调节规则为:

$$\mu = \begin{cases} 1, & |\nabla \mathbf{i}_A| < 0.2 \\ 0, & |\nabla \mathbf{i}_A| \geq 0.2 \end{cases} \quad (7)$$

### 3.2 变分模型快速求解

为了提高模型的求解速度, 本文不从原始能量泛函的梯度下降流出发求解, 而是利用中心像素的 8 邻域进行图像梯度的快速数值求取. 由于待求像素点的邻域像素值均已知, 故求式(6)的最小就是使所有邻域像素点的代价总和最小, 可利用中心像素值的 8 个一阶差分的均方和构成 8 邻域梯度值. 因为一阶微分最简单

的近似就是横纵两个方向相邻像素的差值, 故对于每个像素及其 8 邻域, 将式(6)改写为:

$$\begin{aligned} E[\mathbf{t}'] &= \mu \sum_{j=1}^8 (\mathbf{t}' - \mathbf{t}'_j)^2 + \alpha (\mathbf{t}' - \mathbf{i}_A)^2 \\ &\quad - \gamma \sum_{j=1}^8 ((\mathbf{t}' - \mathbf{i}_A) - (\mathbf{t}'_j - \mathbf{i}_{A_j}))^2 \end{aligned} \quad (8)$$

其中,  $\mathbf{t}'_j$  为已知的 8 邻域像素,  $\mathbf{i}_{A_j}$  为对应的原始图像求反后的 8 邻域, 当式(7)的导数为 0 时,  $\mathbf{t}'$  取得最优结果, 如下所示:

$$\mathbf{t}' = \frac{(\mu + \gamma) \sum_{j=1}^8 \mathbf{t}'_j + \alpha \mathbf{i}_A - \gamma \sum_{j=1}^8 (\mathbf{i}_A - \mathbf{i}_{A_j})}{8\mu + \alpha - 8\gamma} \quad (9)$$

其中, 分子的第二、三项仅依赖于原始图像, 只需计算一次; 后续的计算中仅需迭代求解分子的第一项, 有效降低了运算的复杂度,  $\mathbf{t}'$  的初始输入为  $\mathbf{i}_A$  的高斯低通滤波结果.

### 3.3 去雾图像生成

为避免去雾图像的色彩失真, 对图像三个通道的大气传输函数进行统一估计, 考虑到在白天工作的人眼视网膜锥细胞对绿光的敏感性<sup>[12]</sup>, 将原始图像的绿光分量分离, 作为式(9)的原始退化图像(灰度图像则直接将原始图像作为输入), 令参数  $\alpha = 0.8, \gamma = 0.3$ , 经过 5 次迭代运算, 可得到图像的大气传输图, 结合估计出的大气光, 联合两者对式(1)进行反解, 即可求得去雾图像, 如图 2 所示. 其中, 图 2(a)为原始输入图像, 图 2(b)为大气光对原始图像求反后的图像, 图 2(c)为估计出的大气传输图, 图 2(d)为逆反射光图像, 图 2(e)为反射光图像, 图 2(f)为将图 2(b)中对应暗区域看作大气光区域对图 2(e)中相应位置像素点进行替代得到的校正图像.

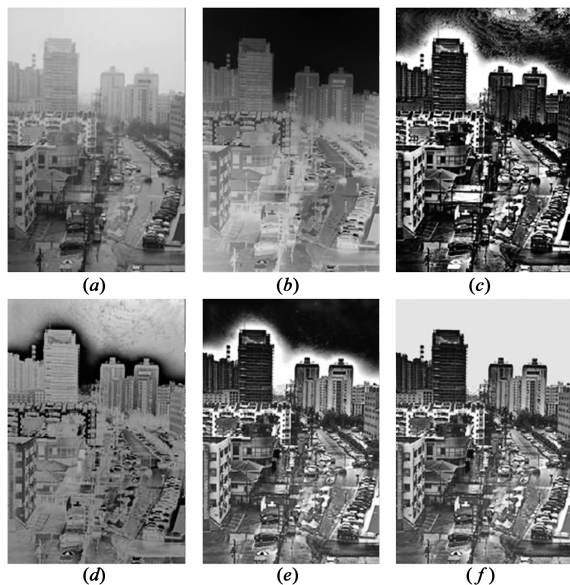
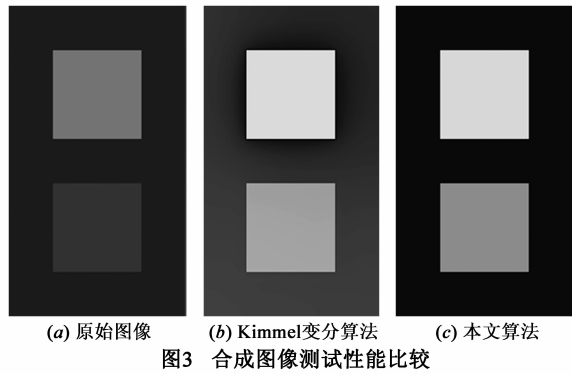


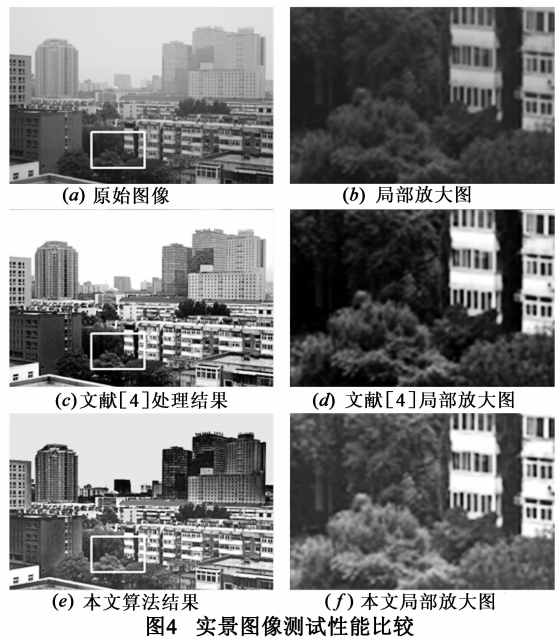
图2 去雾图像生成过程

4 实验结果及其分析

为了验证算法效能,本文首先对合成图像进行测试,如图 3.可以看出对于测试图像的边缘,本文方法考虑到场景去雾的实际情况,引入了视觉特性和几何跳变关系,获得了比原始变分算法有更加锐利但未超出人眼视觉愉悦区的边缘信息,同时利用了景深跳变调节函数,从而避免了图像边缘的伪轮廓效应.



本文的实景对比实验主要针对被公认为当前最有效的去雾算法之一的文献[4]进行,实验结果如图 4、图 5 所示.



处理的 2 幅图片大小均为  $600 \times 400$ ,实验环境为配置 Pentium E5300 双核 2.6GHz 的 CPU,内存为 2G,利用 Matlab2010a 运行程序,文献[4]算法需要 30s ~ 35s 的时间,而本文仅需 3s ~ 4s,具有较大优势.在这两组实验结果的对比中,本文算法在图像局部对比度拉伸、色调恢复以及场景层次感再现等方面均好于文献[4]算法;值得注意的是,对于雾天图像中同时具有低亮度低对比

度区域,场景成像更为复杂,文献[4]算法的表现往往不能同时兼顾,在远景雾去除较好时,对于近景则失去了动态范围调整和细节复原的效果,而本文算法由于引入图像景深约束,较好的解决了这一难题,如图中的放大区域所示.主观评价能够在一定程度上评价算法性能,而客观标准可以发挥自动评价的作用,结果见表 1.

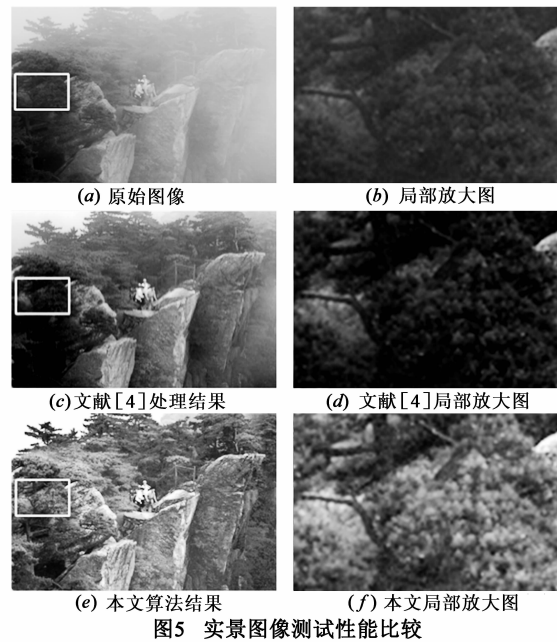


表 1 客观评价结果			
图 4	原始图像	文献[4]结果	本文结果
平均亮度	108.7986	112.8225	128.9879
图像方差	57.4729	76.6044	91.4149
暗通道比重(%)	25.2379	66.3129	67.1671
图 5	原始图像	文献[4]结果	本文结果
平均亮度	88.7834	59.9928	136.0753
图像方差	34.6412	42.0180	98.6931
暗通道比重(%)	9.8283	52.3658	64.5601

表中,平均亮度代表图像的亮度水平,人眼视觉认为亮度水平适中(等级在 125 左右)最便于观测;图像方差代表图像的对比度水平,其值越大说明对图像细节及边缘信息的恢复越彻底;暗通道比重是图像暗通道亮度值小于 25 的像素点所占像素总数的比重,其值越大说明对雾去除越彻底.综上,表 1 表明了本文算法效果的主客观一致性.

5 总结

本文提出一种基于景深约束的单幅雾天图像去雾算法,该算法在引入变分求解大气传输图像的基础上,对景深进行约束;在实现远景去雾的同时,保证了对于近景动态范围调整和细节复原的效果.尤为重要是,

本文算法的计算效率较现有去雾算法有了极大地提升,这使得本算法应用于实际的嵌入式图像处理设备中成为可能;但算法在求解时尚未考虑图像中的噪声可能带来的潜在危害,这将是本文下一步研究重点.

## 参考文献

- [1] 南栋,毕笃彦,许悦雷,等.基于自适应 BEMD 的 Retinex 彩色图像增强[J].计算机应用,2011,31(6):1552-1555.  
NAN Dong, BI Du-yan, XU Yue-lei, et al. Retinex color image enhancement based on adaptive bidimensional empirical mode decomposition[J]. Journal of Computer Applications, 2011, 31(6):1552-1555. (in Chinese)
- [2] S M Pizer, E P Amburn. Adaptive histogram equalization and its variations[J]. Computer Vision & Graphics and Image Processing, 1987, 39(9):355-368.
- [3] 郭番,蔡自兴,谢斌.基于雾气理论的视频去雾算法[J].电子学报,2011,39(9):2019-2025.  
GUO Fan, CAI Zi-xing, XIE Bin. Video defogging algorithm based on fog theory[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(9):2019-2025. (in Chinese)
- [4] K He, J Sun, X Tang. Single image haze removal using dark channel prior[A]. Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) [C]. New York, USA: IEEE Computer Society, 2009. 1956-1963.
- [5] O Codruta, A Cosmin, H Chris, et al. A fast semi-inverse approach to detect and remove the haze from a single image[A]. The 10th Asian Conference on Computer Vision (ACCV) [C]. New Zealand, USA: Asian Federation of Computer Vision Societies, 2010. 501-514.
- [6] K B Gibson, Q Truong. On the effectiveness of the dark channel prior for single image dehazing by approximating with minimum volume ellipsoids[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP) [C]. Prague, Czech Republic: IEEE, 2011. 1253-1256.
- [7] P Carr, R Hartley. Improved single image dehazing using geometry[J]. Digital Image Computing: Techniques and Applications, 2009, 12(1):103-110.

- [8] 郭珈,王孝通,胡程鹏,等.基于单幅图像景深和大气散射模型的去雾方法[J].中国图象图形学报,2012,17(1):27-32.

GUO Jia, WANG Xiao-tong, Hu Cheng-peng, et al. Single image dehazing based on scene depth and physical model[J]. Journal of Image and Graphics, 2012, 17(1):27-32. (in Chinese)

- [9] E J McCartney. Optics of Atmosphere: Scattering by Molecules and Particles[M]. New York: John Wiley and Sons, 1976. 23-32.

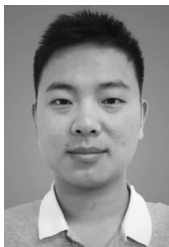
- [10] 方帅,王峰,吉占清,等.单幅雾天图像的同步去噪与复原[J].模式识别与人工智能,2012,25(1):136-142.

FANG Shuai, WANG Feng, JI Zhan-qing, et al. Simultaneous dehazing and denoising of single hazing image[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2012, 25(1):136-142. (in Chinese)

- [11] R Kimmel, M Elad, D Shaked, et al. A variational framework for Retinex[J]. International Journal of Computer Vision, 2003, 52(1):7-23.

- [12] C T Thurow. Real-time Image Dehazing[D]. Berlin: Technical University, 2011.

## 作者简介



南 栋 男,1987 年 10 月出生,陕西西安人,博士生,研究方向为图像处理与计算机视觉.  
E-mail: nd.tian\_53@163.com



毕笃彦 男,1962 年 5 月出生,陕西扶风人,教授,博士生导师,研究方向为图像处理与模式识别.  
E-mail: biduyan@163.com