



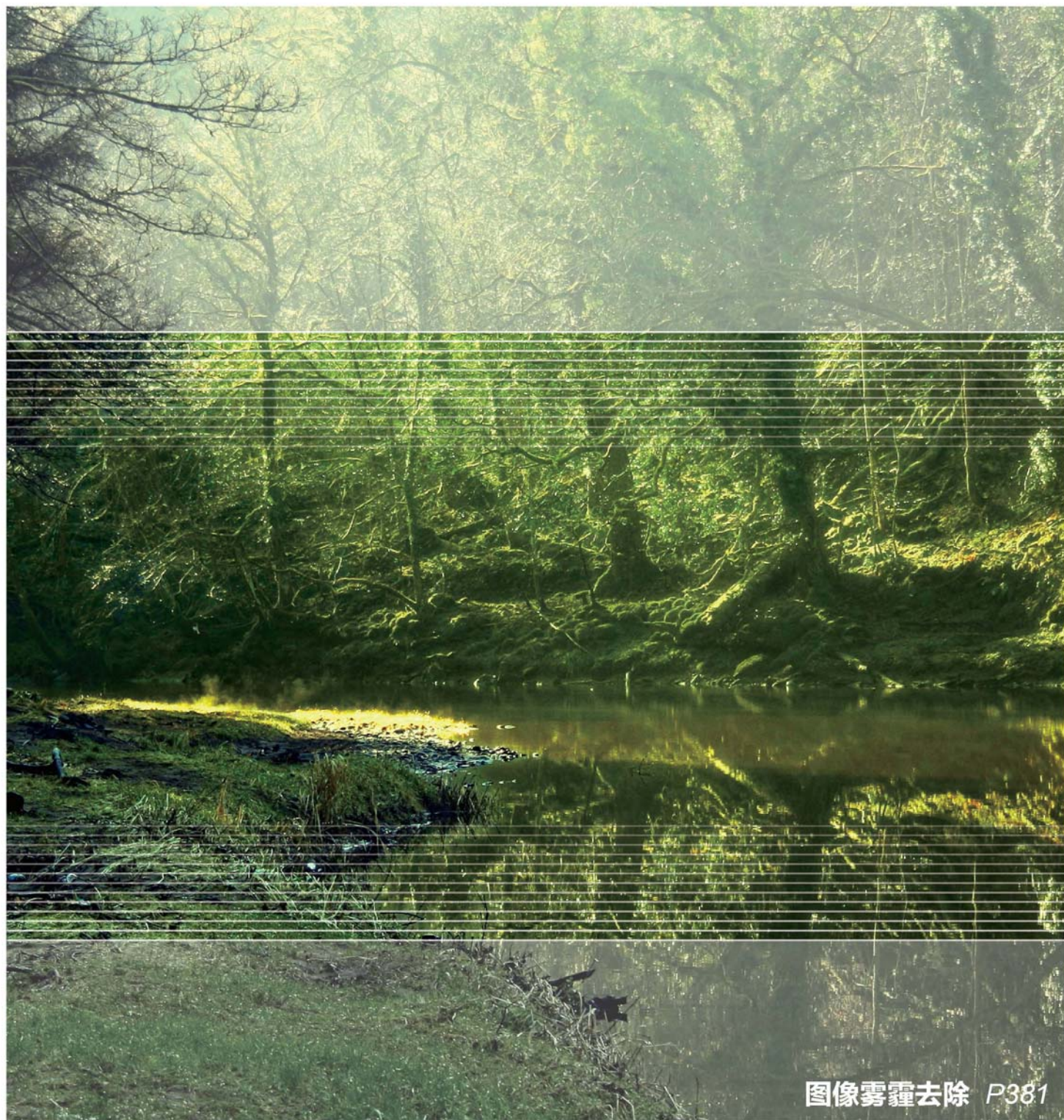
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

2014
03
VOL.19

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB



图像雾霾去除 P381



第19卷第3期（总第215期）

2014年3月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用，所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。

Copyright

All rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院

主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文

编辑出版《中国图象图形学报》编辑出版委员会

邮政信箱 北京9718信箱

邮 编 100101

电子信箱 jig@irsa.ac.cn

电 话 010-64807995

网 址 www.cjig.cn

广告经营许可证 京朝工商广字第0361号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司
(邮政信箱：北京399信箱 邮编：100048)

印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian

Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS
China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of
Image and Graphics

P.O.Box 9718, Beijing, P.R.China

Zip code 100101

E-mail jig@irsa.ac.cn

Telephone 010-64807995

Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Overseas China International Book Trading Corporation
(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China))

Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB

ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

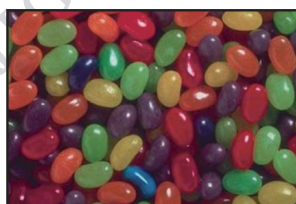
国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

国内定价 50.00元



控制关键帧选择的H.264熵编码加密算法(第358页)



显著性检测指导的高光区域修复(第393页)



由灭点进行径向畸变的自动校正(第407页)

综述

图像场景分类中视觉词包模型方法综述

赵理君, 唐娉, 霍连志, 郑柯

0333

面向对象的高分辨率SAR图像处理及应用

张红, 叶曦, 王超, 张波, 吴樊, 汤益先

0344

图像处理和编码

控制关键帧选择的H.264熵编码加密算法

张小红, 袁春经

0358

小波域视觉密码零水印算法

曲长波, 杨晓陶, 袁铎宁

0365

双重轮廓演化曲线的图像分割水平集模型

王相海, 李明

0373

暗原色先验单幅图像去雾改进算法

孙小明, 孙俊喜, 赵立荣, 曹永刚

0381

基于双边滤波的图像去雾

王一帆, 尹传历, 黄义明, 王洪玉

0386

显著性检测指导的高光区域修复

王祎璠, 姜志国, 史骏, 张浩鹏

0393

应用DCT块标准差的自适应隐写算法

凌轶华, 蔡晓霞, 陈红

0401

由灭点进行径向畸变的自动校正

刘丹, 刘学军, 王美珍

0407

图像分析和识别

黎曼流形上的保局投影在图像集匹配中的应用

曾青松

0414

结合全局和局部信息的“两阶段”活动轮廓模型

戚世乐, 王美清

0421

图像理解和计算机视觉

基于超像素的点追踪方法

罗会兰, 钟睿, 孔繁胜

0428

遥感图像处理

结合相位一致与全变差模型的高分辨率遥感图像边缘检测

黄秋燕, 肖鹏峰, 冯学智, 王珂

0439

第9届和谐人机环境联合学术会议专栏

人眼视觉感知特性的非下采样Contourlet变换域多聚焦图像融合

杨勇, 郑文娟, 黄淑英, 方志军, 袁非牛

0447

面向手绘军标图形的旋转自由识别方法

吴玲达, 张友根, 邓维, 宋汉辰

0456

基于深度相机的手腕识别与掌心估测

姚争为, 潘志庚, 滕国栋

0463

多信息融合的快速车牌定位

王永杰, 裴明涛, 贾云得

0471

H.264/AVC中基于决策树的P帧快速模式选择

王萍, 张晓丹, 张磊

0476

互信息域中的无参考图像质量评价

董宏平, 刘利雄

0484

CONTENTS

JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



H.264 video entropy coding encryption by controlling key frames(P358)



Algorithm for highlight area inpainting guided by saliency detection(P393)



Automatic approach of lens radial distortion correction based on vanishing points(P407)

Review

- Review of the bag-of-visual-words models in image scene classification
Zhao Lijun, Tang Ping, Huo Lianzhi, Zheng Ke 0333
- The processing and applications of high resolution SAR images with object-based image analysis
Zhang Hong, Ye Xi, Wang Chao, Zhang Bo, Wu Fan, Tang Yixian 0344

Image Processing and Coding

- H.264 video entropy coding encryption by controlling key frames
Zhang Xiaohong, Yuan Chunjing 0358
- Zero-watermarking visual cryptography algorithm in the wavelet domain
Qu Changbo, Yang Xiaotao, Yuan Duoning 0365
- Level set model for image segmentation based on dual contour evolutionary curve
Wang Xianghai, Li Ming 0373
- Improved algorithm for single image haze removing using dark channel prior
Sun Xiaoming, Sun Junxi, Zhao Lirong, Cao Yonggang 0381
- Image haze removal using a bilateral filter
Wang Yifan, Yin Chuanli, Huang Yiming, Wang Hongyu 0386
- Highlight area inpainting guided by saliency detection
Wang Yifan, Jiang Zhiguo, Shi Jun, Zhang Haopeng 0393
- Adaptive steganographic algorithm utilizing block standard deviation of DCT coefficients
Ling Yihua, Cai Xiaoxia, Chen Hong 0401
- Automatic approach of lens radial distortion correction based on vanishing points
Liu Dan, Liu Xuejun, Wang Meizhen 0407

Image Analysis and Recognition

- Locality preserving projection on Riemannian manifold for image set matching
Zeng Qingsong 0414
- "Two-stage" active contour model driven by local and global information
Qi Shile, Wang Meiqing 0421

Image Understanding and Computer Vision

- Method of point tracking based on superpixel
Luo Huilan, Zhong Rui, Kong Fansheng 0428

Remote Sensing Image Processing

- Edge detection from high resolution remote sensing image combining phase congruency with total variation model
Huang Qiuyan, Xiao Pengfeng, Feng Xuezhong, Wang Ke 0439

Special Issue on HHME 2013

- Multi-focus image fusion based on human visual perception characteristic in non-subsampled Contourlet transform domain
Yang Yong, Zheng Wenjuan, Huang Shuying, Fang Zhijun, Yuan Feiniu 0447
- Rotation free recognition of hand-drawn military marking symbols
Wu Lingda, Zhang Yougen, Deng Wei, Song Hanchen 0456
- The wrist recognition and the center of palm estimation based on depth camera
Yao Zhengwei, Pan Zhigeng, Teng Guodong 0463
- License plate detection based on multiple features
Wang Yongjie, Pei Mingtao, Jia Yunde 0471
- Fast intermode decision based on the decision tree for H.264/AVC P-frame encoding
Wang Ping, Zhang Xiaodan, Zhang Lei 0476
- No-reference image quality assessment in mutual information domain
Dong Hongping, Liu Lixiong 0484

中图法分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2014)03-0381-05

论文引用格式: 孙小明, 孙俊喜, 赵立荣, 曹永刚. 暗原色先验单幅图像去雾改进算法[J]. 中国图象图形学报, 2014, 19(3): 381-385. [DOI: 10.11834/jig.20140306]

暗原色先验单幅图像去雾改进算法

孙小明¹, 孙俊喜², 赵立荣^{1,3}, 曹永刚^{1,3}

1. 长春理工大学电子信息工程学院, 长春 130022;

2. 东北师范大学计算机科学与技术学院, 长春 130117;

3. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130000

摘要: 目的 为解决传统基于暗原色先验的单幅图像去雾算法实现效率低以及恢复雾化图像在天空、白云等明亮区域颜色失真的不足, 提出一种改进算法。方法 通过分块思想, 完成透射率的空间自适应估计; 通过判断大气光强度和暗通道差值绝对值大小来判断雾图中是否含有明亮区域。结果 该算法不仅降低了传统算法的时间复杂度, 而且弥补了传统算法在明亮区域透射率估计的不足。结论 实验结果表明该改进算法可行、有效。

关键词: 暗原色先验; 去雾; 颜色失真

Improved algorithm for single image haze removing using dark channel prior

Sun Xiaoming¹, Sun Junxi², Zhao Lirong^{1,3}, Cao Yonggang^{1,3}

1. School of Electronic Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. School of Computer Science and Information Technology, Northeast Normal University, Changchun 130117, China;

3. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130000, China

Abstract: **Objective** An improved algorithm is proposed for single image haze removal using dark channel prior to avoid the low efficiency of the classical algorithm and color distortion of haze removing in bright area. **Method** The proposed algorithm is reflected in the following two aspects. One is the spatial adaptability of the atmospheric transmittance estimation by the introduction of a blocking idea. The other is that the bright areas can be contained by the absolute value of the difference of atmospheric light and dark channel. **Result** Compared with the classic algorithm, the time complexity of the algorithm is decreased and the weakness of transmission in the bright area is remedied. **Conclusion** Experimental results show that the improved algorithm is efficient and feasible.

Key words: dark channel prior; haze removal; color distortion

0 引言

雾霭天气条件下获得的图像, 存在对比度低、颜色失真、模糊不清等严重的退化现象, 给后期图像处理工作带来困难, 直接影响户外视觉系统效用的发

挥。因此, 围绕如何有效去雾, 人们提出了各种方法, 这些去雾方法可以分为两类: 图像增强方法和图像复原方法。图像增强是早期人们采用的去雾方法, 该类方法以 Retinex 算法^[14]为代表, 通过改善图像对比度以达到改善雾图视觉效果, 但并不能从根本上达到去雾的目的。图像复原通过分析雾图降质

收稿日期: 2013-03-26; 修回日期: 2013-09-10

基金项目: 吉林省科技厅基金项目 (20090512, 20100312)

第一作者简介: 孙小明 (1984—), 男, 长春理工大学电子信息工程学院信息与通信工程专业在读硕士研究生, 主要研究方向为数字视频与图像处理。E-mail: 339432@qq.com

通信作者: 孙俊喜, E-mail: junxi_sun@126.com

机理,建立雾图退化模型,求解去雾后图像。相比而言,此类方法具有内在优越性,更加可靠,因此是图像去雾领域关注的热点技术。

Narasimhan 等人^[5-6]在场景深度和大气条件信息未知的情况下,结合大气散射模型,通过用户交互来获得必要的附加信息,实现雾天图像的复原。该算法缺点是只能全局地恢复图像,不能进行局部修正。

Fattal^[7]假设介质透过率和表面投影在局部不相关,从而估算出景物反射率,以此推断场景光在空气中传播时的透过率,最终达到去雾目的。但该方法的性能很大程度上取决于输入图像的统计特性,在独立成分变化不显著的区域去雾效果不佳。

2009年,何恺明^[8]提出暗原色先验理论和基于暗原色先验的图像去雾算法,在自然图像已被研究了几十年的今天,发现全新的图像本质特性,这是视觉领域的重大突破。该算法首先利用暗原色先验粗估计介质透过率,然后借助图像软件抠图(或引导滤波^[9])算法对介质透过率进行细化,最后基于大气散射模型复原得到无雾图像。这是目前最有效的单幅图像去雾方法之一。但是,由于该算法建立在暗原色先验基础之上,因而对诸如天空、白云等不存在暗原色的明亮区域,恢复结果会出现明显的颜色失真,影响了图像的视觉效果;此外,基于暗原色先验去雾即使采用引导滤波算法估计透射率,效率仍较低。

基于此,在深入分析暗原色先验去雾模型基础之上,提出一种改进算法,该算法基于分块思想提高算法实现效率,通过判断大气光强度和暗通道的差值绝对值来判断雾图中是否含有明亮区域,进而有效弥补明亮区域透射率估计的不足,获得更佳去雾效果。

1 改进算法

1.1 大气散射模型

大气散射模型认为户外景物图像通常因受大气中混浊介质影响而降质。物体反射光线在到达相机之前,都会或多或少的被空气散射,这主要是由于介质(如尘埃,小水滴等)改变了光原本传播的路线。尤其在雾天场景条件下,这种影响不可忽视,式(1)模型被广泛用于描述雾图形成过程。

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

式中, I 是雾图强度(可观测), J 是景物反射光强度, A 是全球大气光强度, t 是透射率,去雾目的就是从 I 中恢复 J ,关键是估计透射率 $t(x)$ 。

1.2 暗原色先验去雾

绝大多数自然图像的局部区域都会有至少一个颜色通道具有很低的值,这样在每个局部区域可以得到

$$J^{\text{dark}}(x) = \min_{c \in \{R, G, B\}} (\min_{x \in b_n} (J^c(x))) \quad (2)$$

式中, J^c 代表 J 的 c 颜色通道强度,而 b_n 代表图像的第 n 个局部区域, J^{dark} 称为 J 的暗原色。

为估计透射率 $t(x)$,假设大气光强度 A 已知, A^c 是 A 的 c 颜色通道,式(1)取最小值,可得

$$\min_{x \in b_n} (J^c(x)) = t(x) \min_{x \in b_n} (J^c(x)) + (1-t(x))A^c \quad (3)$$

根据暗原色先验理论,无雾自然图像暗原色值趋于零,即

$$J^{\text{dark}}(x) = \min_{c \in \{R, G, B\}} \left(\min_{x \in b_n} \left(\frac{J^c(x)}{A^c} \right) \right) = 0 \quad (4)$$

带入式(3),得到

$$t(x) = 1 - \min_{c \in \{R, G, B\}} \left(\min_{x \in b_n} \left(\frac{J^c(x)}{A^c} \right) \right) \quad (5)$$

实际应用中,考虑到远处景物的视觉朦胧感,式(5)引入系数 $w(0 < w < 1)$,重新表述为

$$t(x) = 1 - w \min_{c \in \{R, G, B\}} \left(\min_{x \in b_n} \left(\frac{J^c(x)}{A^c} \right) \right) \quad (6)$$

最终得到去雾后的图像强度

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max(t(x), t_0)} + A \quad (7)$$

式中,大气光强度 A 估计方法为:先取 J^{dark} 中亮度最大的0.1%像素,然后取这些像素对应应在雾原图强度 I 中的最大值作为 A 的值。当 $t(x)$ 接近于0时,式(1)中 $J(x)t(x)$ 也会接近于0,因此把透射率 $t(x)$ 设定一个下限 t_0 , t_0 取0.1。

目前,暗原色先验去雾是最有效的去雾算法之一。根据式(6)得到的透射率较为粗略,而文献[8]采用软抠图获得更为精细的透射率插值。但是,软抠图算法非常耗时,影响去雾算法实时性。为此,何恺明又提出引导滤波方法^[9]估计透射率,以提高透射率估计的精度和效率。

1.3 算法改进

分析基于暗原色先验的图像去雾算法^[8-9],存在如下两个问题:一是算法时间复杂度高,由于无论采用软抠图算法,还是引导滤波算法,其透射率计算都是逐像素为中心在空间分辨率为 $p \times q$ 的范围内估计而得,每个像素都要参与比较 $p \times q$ 次,算法时

间复杂度为 $O(p \times q \times M \times N)$, 虽然此透射率估计有很好的空间自适应性, 但过于耗时; 二是式(5)是近似表达式, 根据式(3), 最终透射率应该表示为

$$t(x) = \frac{1 - \min_{c \in \{R, G, B\}} \left(\min_{x \in b_n} \left(\frac{I^c(x)}{A^c} \right) \right)}{1 - \min_{c \in \{R, G, B\}} \left(\min_{x \in b_n} \left(\frac{J^c(x)}{A^c} \right) \right)} \quad (8)$$

在无雾条件下, 有些自然图像(如包含天空白云等明亮区域)各通道值很大, 不存在暗通道, 或者说这些区域暗通道值很高, 接近于大气光强度值, 这样导致式(8)的分母不为1, 从而式(5)估计的透射率偏小, 会出现明显的颜色失真。

基于上述分析, 拟作如下改进:

1) 采用图像分块方法估计透射率以降低算法时间复杂度。和文献[8]每个像素都对应一个透射率不同, 该方法同样把图像分块, 但每个块对应同一个透射率。实际上, 文献[8]对透射率估计的自适应性要求过于苛刻, 我们认为: 空间相邻像素的属性应该近似, 雾化图像透射率的空间不均匀性, 并不是每个像素的透射率都不同, 而是图像的局部不同区域存在不同的透射率, 基于此我们逐块估计透射率, 每个块有各自的透射率, 这是一种空间自适应属性, 而非逐像素估计。本文逐块求取透射率, 每个像素仅参与

比较一次, 因而求取透射率时间复杂度为 $O(M \times N)$ 。

2) 通过判断大气光强度和暗通道差值绝对值大小来判断雾图中是否含有明亮区域。假定明亮区域存在暗通道, 只是此处的暗通道值很大。与文献[10]算法在R、G、B 3个通道分别估计透射率不同, 本文引进一个参数 K , 通过判断每个块的暗通道值和大气光强度 A 的差值绝对值, 来人为改变透射率函数。若差值绝对值大于 K , 则代表非明亮区域; 若差值的绝对值小于 K , 则代表明亮区域。最终得到

$$t(x) = \begin{cases} 1 - w \min_{c \in \{R, G, B\}} \left(\min_{x \in b_n} \left(\frac{I^c(x)}{A^c} \right) \right) & |A - I^{\text{dark}}(x)| > K \\ \frac{K}{|A - I^{\text{dark}}(x)|} \left(1 - w \min_{c \in \{R, G, B\}} \left(\min_{x \in b_n} \left(\frac{I^c(x)}{A^c} \right) \right) \right) & |A - I^{\text{dark}}(x)| < K \end{cases} \quad (9)$$

2 实验结果及分析

图1为本文算法和文献[8]算法去雾效果图, 可以看出, 两种算法对于不包含天空、白云等明亮区域的场景都得到了很好的去雾效果。

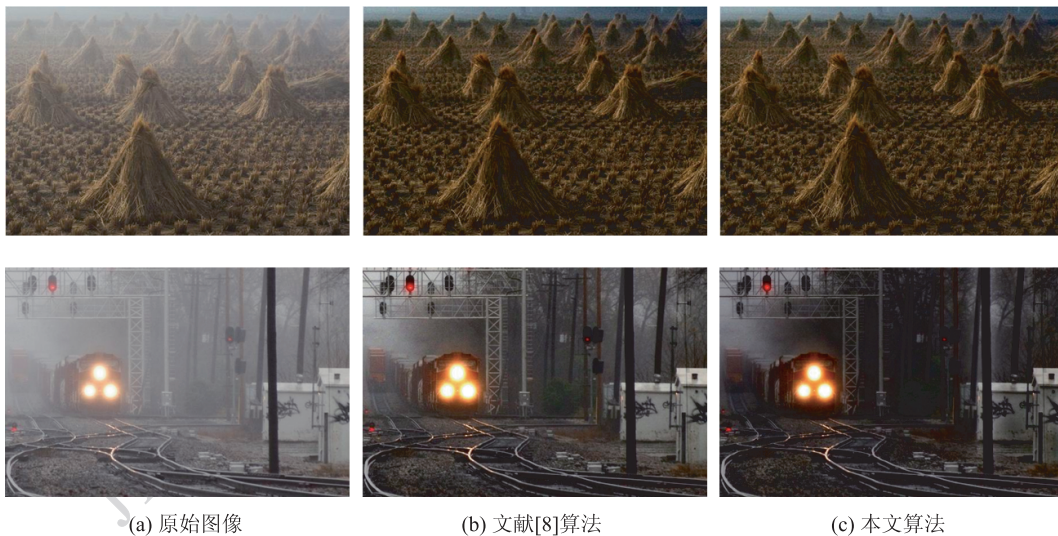


图1 本文算法和文献[8]算法性能比较

Fig. 1 Comparison with the algorithm proposed in the reference [8]

图2(a)为被雾霭笼罩下的市区天空图像, 从图2(c)和图2(e)中红色矩形框标记的区域可以看出, 文献[8]算法恢复的天空图像存在较大颜色失真, 而本文算法得到的去雾后天空图像颜色则更为

真实。这主要由于文献[8]算法估计的透射率偏小(黑色代表低亮度)缘故。图2(b)和图2(d)中红色矩形框标记的区域真实反应了这一差别。

为进一步比较本文算法和文献[8]算法性能, 选

取包含天空、白云等明亮区域的雾化图像(图3(a))进行处理,从图3(b)(c)中红色矩形框和椭圆标注区域不难发现,本文算法没有文献[8]算法在天空、白云等明亮区域产生的失真。文献[8]算法之所以产生

颜色失真,是由于天空、白云等明亮区域在无雾条件下,不存在暗通道,或者说这些区域暗通道值很高,几乎接近大气光强度值,这样导致文献[8]算法估计的透射率偏小,从而出现明显的颜色失真现象。

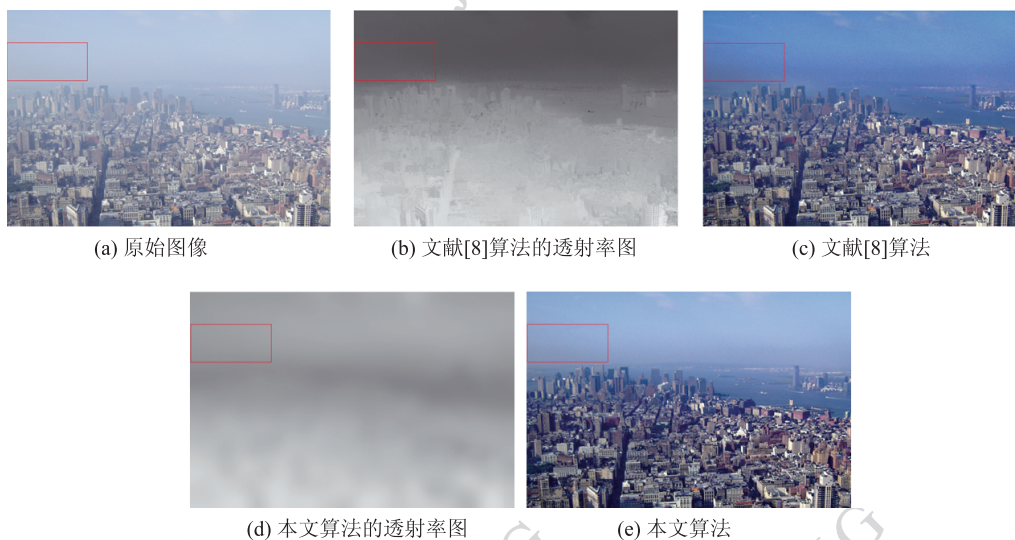


图2 本文算法和文献[8]算法性能比较

Fig. 2 Comparison with the algorithm proposed in the reference [8]

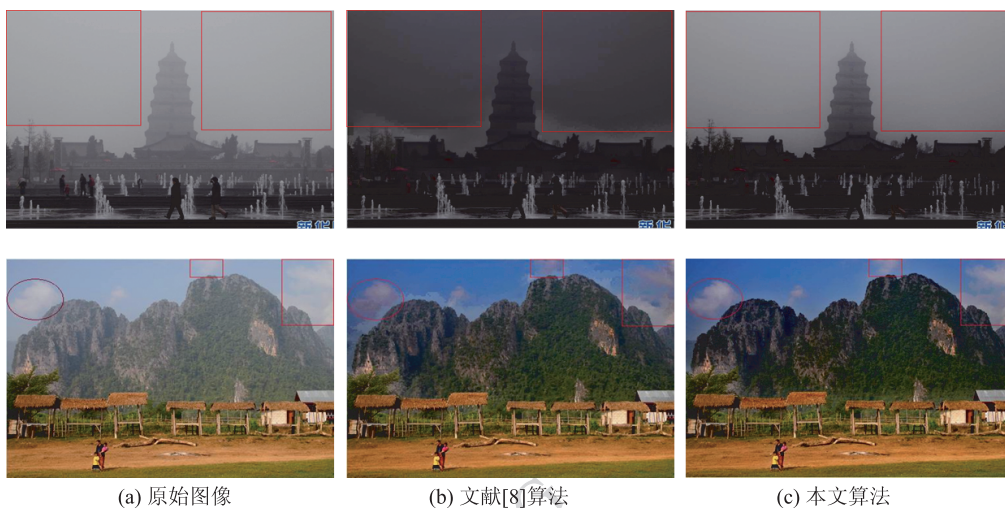


图3 本文算法和文献[8]算法性能比较

Fig. 3 Comparisons with the algorithm proposed in the reference [8]

作为文献[8]算法的改进算法,本文算法和文献[10]算法性能比较示于图4,从图4可以看出,本文算法相对文献[10]算法取得了更为有效的去雾效果。由于文献[10]中针对R、G、B 3个通道对天空部分的透射率进行改进,因子 $|A - I(x)|$ 是3个方向矢量之和的模,当 $|A - I(x)|$ 大于 $|A - I^{\text{dark}}(x)|$ 时,透射率偏小,导致天空、白云等明亮区域仍旧会产生失真(如图4(b)中红色矩形框标注区

域)。而当 $|A - I(x)|$ 小于 $|A - I^{\text{dark}}(x)|$ 时,透射率偏大,这样导致树枝缝隙显现出的天空图像仍有较重的朦胧感(如图4(e)中红色椭圆标注区域)。一种极限情况是导致此时透射率接近1,相当于没有去雾。

需要指出,文献[10]算法针对不同图像需选取不同参数 K 值,而本文算法只针对暗通道处理,参数 K 值选取固定。大量实验结果表明, $K=80$ 块的

空间分辨率取 10×10 像素时, 本文算法针对不同图像, 都能取得较好的去雾效果。实验中, 使用的图像空间分辨率为 600×400 像素, 图像块的空间分辨率均设为 10×10 像素。由于去雾后图像整体亮度偏暗, 文献[8]和文献[10]中都对去雾后

图像作曝光处理。考虑到曝光参数直接影响视觉效果且软抠图算法估计透射率过于耗时, 为公平比较, 本文算法、文献[8]算法、文献[10]算法的实验结果都未进行曝光处理, 并且透射率估计都采用引导滤波器实现。



图4 本文算法和文献[10]算法性能比较

Fig. 4 Comparisons with our algorithm and the algorithm proposed in the reference [10]

3 结论

针对暗原色先验去雾算法, 分析了经典算法恢复的雾化后图像在天空、白云等明亮区域产生颜色失真的原因, 改进了透射率计算公式使之适合图像明亮区域的透射率计算; 通过采用图像分块方法完成透射率的空间自适应估计, 同时降低算法的时间复杂度。实验结果表明: 改进算法可行、有效。该算法可以应用于视频监控、智能交通等户外视觉系统。

参考文献 (References)

- [1] Land E H. An alternative technique for the computation of the designator in the Retinex theory of color vision [J]. National Academy Sciences, 1986, 83(10): 3078-3080.
- [2] Rizzi A, Marini D, Rovati L L, et al. Unsupervised corrections of unknown chromatic dominants using a Brownian-path-based Retinex algorithm [J]. Journal of Electronic Imaging, 2003, 12(3): 431-441.
- [3] Kimmel R, Elad M, Shaked D, et al. A variation framework for Retinex [J]. Computer Vision, 2003, 52(1): 7-23.
- [4] Rahman Z, Jobson D J, Woodell G A. Retinex processing for automatic image enhancement [J]. Journal of Electronic Imaging, 2004, 13(1): 100-110.
- [5] Narasimhan S G, Nayar S K. Vision and atmosphere [J]. International Journal of Computer Vision, 2002, 48(3): 233-254.
- [6] Narasimhan S G, Nayar S K. Contrast restoration of weather degraded images [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(6): 713-724.
- [7] Fattal R. Single image dehazing [J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): 1-9.
- [8] He K, Sun J, Tang X. Single image haze removal using dark channel prior [C]//Proceeding of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Miami, FL, USA: IEEE Computer Society, 2009: 1956-1963.
- [9] He K, Sun J, Tang X. Guided Image Filtering [C]//Proceeding of the 11th European Conference on Computer Vision. Heraklion, Crete, Greece: Springer, 2010: 1-14.
- [10] Jiang J G, Hou T F, Qi M B. Improved algorithm on single image haze removal using dark channel prior [J]. Journal of Circuits and Systems, 2011, 16(2): 7-12. [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): 7-12.]