

基于加权近红外图像融合的单幅图像除雾方法



朱珍¹ 黄锐² 臧铁钢³ 卢世军⁴

1 广东工程职业技术学院信息工程学院 广州 510520

2 北京理工大学计算机学院 北京 100081

3 南京航空航天大学机电学院 南京 210016

4 中山大学地理科学与规划学院 广州 510275

摘要 传统图像除雾方法存在无雾区域中图像对比度过高的问题,导致在某些情况下生成的图像视觉效果不够自然。为了得到自然清晰的除雾图像,提出了一种基于加权近红外(Near-Infrared, NIR)图像融合的新型单幅图像除雾方法,通过将 NIR 图像的细节成分融合到同一场景的可见光图像中来恢复图像对比度,并使用透射图对 NIR 图像进行加权,从而防止无雾区域出现过度增强。实验结果表明,相比传统的单幅图像除雾方法,所提方法可以有效地恢复图像对比度,并且不会过分强化无雾区域,具有更高的 PSNR 值和 SSIM 值。

关键词: 图像去雾; 近红外图像; 加权; 图像融合; PSNR; SSIM

中图分类号 TP391

Single Image Defogging Method Based on Weighted Near-Infrared Image Fusion

ZHU Zhen¹, HUANG Rui², ZANG Tie-gang³ and LU Shi-jun⁴

1 School of Information Technology, Guangdong Engineering Polytechnic College, Guangzhou 510520, China

2 School of Computer Science & Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

3 School of Mechatronics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

4 School of Geography and Planning, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China

Abstract The traditional image defogging method has the problem that the image contrast in the fog-free area is too high, which causes the generated image visual effect is unnatural in some cases. In order to obtain natural and clear defogging images, a new single image defogging method based on weighted near-infrared(NIR) image fusion is proposed. Image contrast is restored by fusing the detail components of NIR images into visible images of the same scene. The NIR image is weighted using the transmission map to prevent excessive enhancement in the fog-free region. The experimental results show that compared with the traditional single image defogging methods, the proposed method can effectively restore the image contrast, does not excessively strengthen the fog-free area, and has higher PSNR and SSIM values.

Keywords Image defogging, Near-infrared image, Weighting, Image fusion, PSNR, SSIM

1 引言

雾气会导致图像的质量下降,而质量下降后的图像对比度较低,这会严重影响实际工作和生活环境中的计算机视觉应用程序,例如视频监控系统和车辆视觉系统等^[1-3]。然而,在现实情况中,室外场景采集到的图像受雾气干扰的概率很大。因此,近年来,有效的除雾方法引起了广大研究人员的极大关注。

通常,要防止雾的反射是比较困难的。为了恢复图像对

比度^[4],需要采用除雾方法。现阶段的除雾方法主要分为两大类^[5]:基于物理模型的方法和基于非模型的图像增强算法。基于物理模型的方法中,HE等^[6]基于雾气图像对比度模型,提出了一种采用暗通道的单图像除雾方法,该方法可以有效地消除雾;Cheng等^[7]在前者基础上针对暗通道先验方法进行改进,并结合图像融合策略来增强可视化区域的视觉效果。但是,对于低对比度的图像,上述两种方法难以将图像对比度恢复到较好状态。基于非模型的图像增强算法中,包含利用多个图像进行对比度增强的方法。例如,近红外(NIR)光由

到稿日期:2020-03-10 返修日期:2020-05-02 本文已加入开放科学计划(OSID),请扫描上方二维码获取补充信息。

基金项目:国家自然科学基金项目(61274085);广东省科学技术厅项目(2014A010103008,2016B090918021);广东省教育厅重点科研平台和科研项目(2018GKQNCX009);广东省教育厅项目品牌专业项目(2016gzpp031)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(61274085),Guangdong Provincial Science and Technology Department Project(2014A010103008,2016B090918021),Guangdong Provincial Education Department Project(2018GKQNCX009) and Guangdong Provincial Education Department Project(2016gzpp031).

通信作者:朱珍(44511245@qq.com)

于波长较长,其散射度比可见光的散射度小,导致 NIR 图像具有足够的对比度。Stephan 等^[8]提出了一种使用 WLS 滤波器来融合可见光图像和近红外(NIR)图像的除雾方法。即使可见光图像丢失,该方法也可以恢复图像对比度。这种方法的问题在于无雾区域中的图像对比度过高,因此在某些情况下,生成的图像在视觉上不够自然,例如图像背景颜色偏暗或存在高浓度雾区域等。Ashish 等^[9]利用权重图引导的拉普拉斯-高斯金字塔进行可见光与近红外图像的融合。

对上述基于非模型的图像增强算法进行分析后发现,上述除雾方法均存在过分强化无雾区域中的图像对比度的问题^[10-12],导致视觉改善的效果仍有较大的提升空间。因此,本文提出了一种基于加权近红外图像融合的除雾方法。与常规方法不同,所提方法将 NIR 图像与透射图进行加权,以防止过分强化无雾区域中的图像对比度。

2 NIR 除雾原理分析

2.1 NIR 图像

雾会降低室外图像的对比度,这是因为大气粒子散射了场景中的光线。当粒子直径小于波长 $\lambda/10$ 时,这种现象被称为瑞利散射^[13]:

$$E_s \propto \frac{E_0}{\lambda^4} \quad (1)$$

其中, E_s 表示散射光的强度, E_0 表示入射光的强度。由于 NIR 波段(700~1100 nm)比可见波段(400~700 nm)长,因此从式(1)可以看出, NIR 图像的散射度比可见光图像的散射度小。图 1 表明了 NIR 图像具有较高对比度。



图 1 可见光图像和 NIR 图像示例

Fig. 1 Examples of visible light image and NIR image

2.2 透射图

透射图显示未散射并投射到照相机的光量,本文用它来加权近红外图像。我们还利用 HE 等^[6]的方法来获得透射图,然后利用透射图构造权值因子,从而控制 NIR 图像与可见光图像的融合程度,以防止无雾区域出现过度增强。

通常,在计算机视觉中广泛使用的雾度图像模型为^[14-15]:

$$I(x) = J(x)t(x) + A(1-t(x)) \quad (2)$$

其中, I 是观察到的图像, J 是除雾图像, t 是透射图, A 是大气光, x 是像素坐标。为了获得透射图 t ,我们将暗通道先验应用于式(2):

$$t(x) = 1 - \omega \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_{c \in \{r, b, g\}} \frac{I^c(y)}{A^c} \right) \quad (3)$$

其中, Ω 是局域斑块, c 是颜色通道指数。我们设置一个常数参数 ω 来保持较少的雾。由于雾的存在,人们可以感觉到深度。如果完全消除雾,图像可能看起来不太自然。

本文中, ω 的值为 0.95^[16]。

本文所获得的透射图可能会出现块伪影,这是因为我们设置了局域斑块来计算暗通道。为了完善透射图,我们选用了引导滤波器。

3 权近红外图像融合方法

本文方法首先根据采集到的可见光图像计算亮度图像和透射图,然后使用拉普拉斯金字塔将亮度图像和 NIR 图像分解为近似图像和细节图像,最后使用透射图对 NIR 细节图像进行加权,以防止过分强化无雾区域中的对比度。需要注意的是,所提方法采用了局部不变特征方法中经典的 SIFT 算法对可见光图像和 NIR 图像进行配准^[9,17],其中特征点提取和配对过程分别使用了约束规则和最邻近方法,本文在此不做过多表述。

细节 NIR 图像 N^d 的加权形式为:

$$\tilde{N}_k^d(x) = \begin{cases} N_k^d(x) \times \frac{\alpha}{t_k^d(x)}, & \alpha < t_k^d(x) \\ N_k^d(x), & t_k^d(x) \leq \alpha \end{cases} \quad (4)$$

其中, t^d 是透射图的近似图像, k 是金字塔层数, α 是加权参数。通过式(5)可以确定参数 α :

$$f(\alpha) = \sum_x \{V_k^d(x) - \alpha N_k^d(x)t(x)\}^2 \quad (5)$$

其中, V^d 是可见的细节图像^[17]。过多或过少的层数会丢失高频或低频信息,因此本文设置金字塔分解的层数 k 为 3,这主要由硬件传感器参数(佳能 Rebel T1i 相机)决定。

比较并融合亮度细节图像和 NIR 图像,以重建亮度图像的新细节图像。本文考虑了以每个像素为中心存在的局域斑块,并计算该局域斑块中像素值的平方。通过式(6)可以获得融合的细节图像 L_k :

$$\tilde{L}_k(x) = \begin{cases} V_k^d(x), & V_s(x) > N_s(x) \\ \tilde{N}_k^d(x), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

其中, $V_s(x)$ 是局域斑块中 $(V_k^d)^2$ 的和,而 N_s 是局域斑块中 $(\tilde{N}_k^d)^2$ 的和。本文选用的斑块大小为 3×3 。

最后,将这些获得的细节图像合成为单个亮度图像,并与可见光图像的色彩信息组合为除雾后的彩色图像。所提算法的流程如图 2 所示。

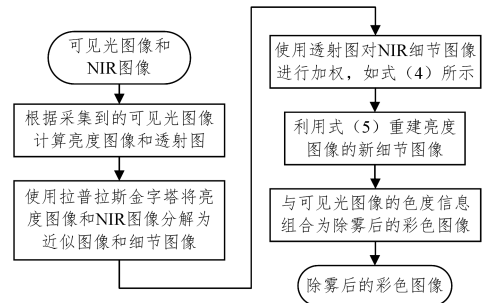


图 2 所提算法的流程

Fig. 2 Flow of proposed algorithm

4 实验与结果分析

为了验证所提方法的效果,本文使用了 100 幅图像作为测试集合,数据集来自佳能 Rebel T1i 相机拍摄的图像^[18-19],

图像大小从 425×274 到 1024×768 不等,部分示例如图 3 所示。实验仿真在 64 位 Windows7 的个人计算机上进行,硬件配置为 16GB RAM 和 Intel Core i7-4940MX 3.3GHz CPU。为了评估所提算法的性能,将其与 Stephan 等^[8]和 Ashish 等^[9]提出的方法进行比较。



图 3 测试图像示例

Fig. 3 Sample test image

4.1 图像质量主观评价

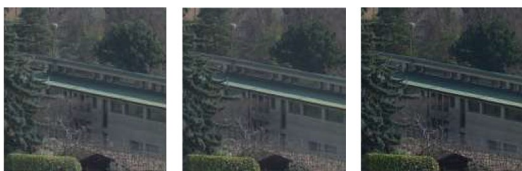
本文对所提方法和其他两种方法的除雾图像进行了比较,结果如图 4 所示。图 4(a)中的两个矩形分别表示有雾区域(上)和无雾区域(下)。



(a)Original color foggy image

(b)Stephan's^[8](c)Ashish's^[9]

(d)Ours

(e)Stephan's^[8](f)Ashish's^[9]

(g)Ours

图 4 输入彩色图像除雾结果的比较

Fig. 4 Comparison of input color image defogging results

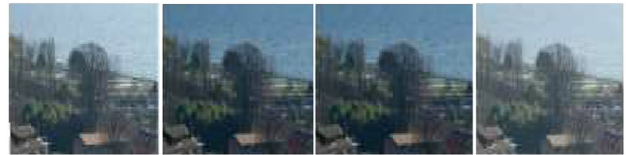
从图 4(b)和图 4(e)可以看出,Stephan 等^[8]的方法无法恢复图像对比度。由于图像对比度过高,Ashish 等^[9]的结果在无雾区域(见图 4(f))比较模糊。而本文方法可以有效地恢复图像对比度,而不会过分强化无雾区域,如图 4(g)所示。

随机抽取两个测试样本 F5 和 F20。图 5 为测试数据集中图像样本(F5)的原始图(左)和本文方法的除雾结果(右),图 6 为几种除雾方法在处理 F5 后得到的结果(局部方框放大)。图 7 为测试数据集中图像样本(F20)的原始图(左)和本文方法的除雾结果(右),图 8 为几种除雾方法在处理 F20 后得到的结果(局部方框放大)。结合图 6 和图 8,再次验证了本文方法在主观视觉效果上的有效性。



图 5 原始的彩色有雾 F5(左)和本文方法除雾图像(右)

Fig. 5 Original color foggy F5(left) and defogging image of proposed method(right)



(a)原始局部放大

(b)Stephan's^[8](c)Ashish's^[9]

(d)本文算法

图 6 F5 的除雾结果比较

Fig. 6 Comparison of defogging results in F5



图 7 原始的彩色有雾图像 F20(左)和本文方法除雾图像(右)

Fig. 7 Original color foggy image F20(left) and defogging image of proposed method(right)



(a)原始局部放大

(b)Stephan's^[8](c)Ashish's^[9]

(d)本文算法

图 8 F20 的除雾结果比较

Fig. 8 Comparison of defogging results in F20

4.2 图像质量客观评价

本文采用的客观评估指标^[20-21]为:峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio, PSNR)和结构相似性指标(Structural SIMilarity, SSIM)。

峰值信噪比(PSNR)的计算方式如下:

$$PSNR = 20 \log_{10} \left(\frac{255}{RMSE} \right) \quad (7)$$

其中, $RMSE = \sqrt{MSE}$, 255 表示图像的最大灰度值。PSNR 的值越大表明图像除雾效果越好。

$$MSE = \frac{1}{M \times N} \sum_{0 \leq i \leq N} \sum_{0 \leq j \leq M} (f_{ij} - f'_{ij})^2 \quad (8)$$

其中, M 和 N 分别表示图像的高和宽, f_{ij} 表示在输入图像坐标 (i, j) 上的像素值, f'_{ij} 表示在除雾后图像坐标 (i, j) 上的像素值。

结构相似性指标(SSIM)的计算方式如下:

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x \mu_y + 1)(2\sigma_{xy} + c_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + c_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2)} \quad (9)$$

其中, σ_{xy} 表示图像 x 和 y 的协方差, σ_x 表示 x 的标准差, σ_y 表示 y 的标准差, μ_x 表示图像 x 的像素均值, μ_y 表示图像 y 的像素均值, c_1 和 c_2 均为常数。SSIM 值越大表明图像除雾效果越好。

各实验的客观指标对比分别如表 1 和表 2 所列。从表 1 和表 2 可以看出, 相比其他两种方法, 本文方法的 PSNR 值和 SSIM 值均更高, 也就是说图像失真较少, 保留了更多的原图像的结构化信息。

表 1 不同方法除雾实验的 PSNR 对比

Table 1 Comparison of PSNR of different methods for defogging experiments

图像	Stephan's ^[8]	Ashish's ^[9]	本文方法
F1	55.3	58.6	59.3
F2	56.4	58.0	60.8
⋮	⋮	⋮	⋮
F100	56.2	58.2	60.0
平均值	56.6	59.2	61.3

表 2 不同方法除雾实验的 SSIM 对比

Table 2 comparison of SSIM of different methods for defogging experiments

图像	Stephan's ^[8]	Ashish's ^[9]	本文方法
F1	0.565	0.662	0.725
F2	0.555	0.651	0.697
⋮	⋮	⋮	⋮
F100	0.569	0.707	0.734
平均值	0.614	0.662	0.711

结束语 本文提出了一种基于融合可见光图像和近红外图像的新型除雾方法。使用透射图对 NIR 图像进行加权后, 该方法可以用来创建自然清晰的除雾图像, PSNR 值和 SSIM 值均更高。但是实验结果表明, 所提方法不能完全消除雾度, 这是因为其只对亮度信息进行了处理。在以后的工作中, 将考虑增强色度分量。

参考文献

- [1] JIANG H Z, YOON S C, ZHUANG H. Predicting Color Traits of Intact Broiler Breast Fillets Using Visible and Near-Infrared Spectroscopy[J]. Food Analytical Methods, 2017, 10(10): 1-9.
- [2] GU Y, YANG X, GAO Y. A Novel Total Generalized Variation Model for Image Dehazing[J]. Journal of Mathematical Imaging and Vision, 2019, 61(6): 1-13.
- [3] XU L, HAN J, WANG T, et al. Global Image Dehazing via Frequency Perception Filtering[J]. Journal of Circuits Systems & Computers, 2019, 28(9): 1-11.
- [4] NI W P, GAO X B, WANG Y. Single satellite image dehazing via linear intensity transformation and local property analysis[J]. Neurocomputing, 2015, 175(6): 25-39.
- [5] HOU J, NING L, LING Y. Single image dehazing for visible remote sensing based on tagged haze thickness maps[J]. Remote Sensing Letters, 2018, 9(7): 156-165.
- [6] HE K M, SUN J, FELLO W. Single Image Haze Removal Using Dark Channel Prior[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2011, 33(12): 2341-2353.
- [7] CHENG D S, LIU H, ZHANG Y Q, et al. Single image defogging method combining adaptive dark channel prior and image fusion strategy [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(11): 35-40.
- [8] STEPHAN J, NANKO V, WLADIMIR T. Near-infrared cut-off filters based on CMOS nanostructures for ambient light sensors and image sensors[J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2014, 8994(9): 2212-2212.
- [9] ASHISH V V, VIKRAM M G. Visible and NIR image fusion using weight-map-guided Laplacian-Gaussian pyramid for improving scene visibility[J]. Sadhana, 2017, 42(7): 1-20.
- [10] MIAO Q G, LI Y N. Research Status and Prospect of Image Dehazing Algorithm [J]. Journal of Frontiers of Computer Science, 2017(11): 7-14.
- [11] LEX S, CL'EMENT F, SABINE S. Color image dehazing using the near-infrared[C]//2009 16th IEEE International Conference on Image Processing(ICIP). Cairo, 2009: 1629-1632.
- [12] ZHAO S N, WEI W B, PAN Z K, et al. Dehazing of a single color image based on dark primary color prior and MTV model [J]. Computer Science, 2018, 45(3): 274-276, 282.
- [13] WEI Z L, XU G Y, ZHANG S X, et al. Dehazing Image Quality Evaluation System Based on MATLAB [J]. Journal of Heilongjiang Institute of Technology (Comprehensive Edition), 2019, 19(8): 36-39.
- [14] LV X N, LIU Y Y, TAN Z, et al. A polarizing universal multi-scale real-time image dehazing algorithm [J]. Acta Photonica Sinica, 2019(8): 111-121.
- [15] WU D, ZHU Q S. The latest research progress of image defogging [J]. Acta Automatica Sinica, 2015(2): 221-239.
- [16] ZHANG D Y, JU M Y, WANG X M. A Fast Image Dehazing Algorithm Based on Dark Channel Prior [J]. Chinese Journal of Electronics, 2015, 43(7): 1437-1443.
- [17] LIANG J X, WAN X X, LIU Q. Research on the registration method of visible light broadband spectral image based on SIFT algorithm [J]. Journal of Hunan University of Technology, 2015(2): 57-63.
- [18] JIANG Y T, SUN C M, ZHAO Y. Fog Density Estimation and Image Defogging Based on Surrogate Modeling for Optical Depth [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2017, 26(7): 3397-3409.
- [19] LONG J, SHI Z, TANG W, et al. Single Remote Sensing Image Dehazing[J]. IEEE Geoenvironment & Remote Sensing Letters, 2013, 11(1): 59-63.
- [20] CHENG D S, LIU H, ZHANG Y Q, et al. Single image defogging method combining adaptive dark channel prior and image fusion strategy [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(11): 36-40.
- [21] SINGH D, KUMAR V, KAUR M. Single image dehazing using gradient channel prior[J]. Applied Intelligence, 2019, 49(8): 4276-4293.



ZHU Zhen, born in 1980, master, associate professor. Her main research interests include algorithm design and analysis, image processing, database application, and software engineering.