

doi:10.16104/j.issn.1673-1891.2021.03.013

多尺度 Retinex 在图像去雾算法中的应用研究

张晓东¹, 秦娟娟^{1*}, 贾仲仲²

(1.亳州学院电子与信息工程系,安徽 亳州 236800; 2.皖西学院电子与信息工程学院,安徽 六安 237012)

摘要:针对单尺度 Retinex(SSR)图像去雾的算法效果不佳,探讨在图像去雾处理中多尺度 Retinex(MSR)算法去除浓雾、厚雾的问题,并在 MSR 基础上进一步对图像进行带颜色复原的 MSR(MSRCR)的处理。首先采用二维傅立叶变换得到高斯滤波函数,同时由逆傅立叶变换、卷积积分计算出图像的入射分量,再通过算法计算出图像的反射分量,最后通过低通滤波器得到图像的高频分量后还原图像。实验结果显示:与 SSR 和 MSR 算法相比,MSRCR 算法能更好地去除图片中的浓雾、厚雾的影响,提高带雾图片处理后的清晰度且效果明显。

关键词:Retinex 算法;MSR;图像去雾;MSRCR

中图分类号:TP751.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-1891(2021)03-0060-06

Study on the Application of Multi-scale Retinex to Image Defogging Algorithm

ZHANG Xiaodong¹, QIN Juanjuan^{1*}, JIA Zhongzhong²

(1. School of Electronic and Information Engineering, Bozhou University, Bozhou, Anhui 236800, China;
2. School of Electronic and Information Engineering, West Anhui University, Lu'an, Anhui 237012, China)

Abstract: Due to the poor effect of single-scale Retinex (SSR) image defogging algorithm, this paper mainly discusses an algorithm based on multi-scale Retinex image defogging. Aiming at the defect that the dense and thick fog cannot be removed in the defogging algorithm based on the multi-scale Retinex (MSR) image, we further perform MSRCR (MSR with color restoration) on the image based on the MSR. We first use a two-dimensional Fourier transform to obtain a Gaussian filter function. At the same time, the incident component of the image is calculated by inverse Fourier transform and convolution integral, and then the reflection component of the image is calculated by the algorithm, and finally the high frequency component of the image is obtained by low-pass filtering. Compared with the SSR and MSR algorithms, experimental results show that the method can better remove the effects of dense and thick fog in the picture, improve the clarity of the treated picture effectively.

Keywords: Retinex algorithm; MSR; image defogging; MSRCR

0 引言

随着人类社会经济文化的高度发展与进步,越来越多的微小颗粒有害物质被人类的工业文明释放到我们所生活的环境中,进而使整个生态系统受到危害,使得在平常天气中雾霾出现概率大大增加。在这种现象下,由于空气中存在许多颗粒,如雾、霾、沙尘等,使得许多光学器材在进行图像采集时产生严重失真,各种监控设备等功能受到限制,很大程度上影响了对图片内重要信息的提取。在实际应用中,需要成像系统能有效地反馈出重要的

信息,因此图像去雾处理的研究有着重要的意义。

Schechner 等^[1]在成像设备前放置偏振片估计景深信息,利用大气光的偏振特性进行去雾。Athanasiadis 等^[2]的研究结果表明,无雾图像的对比度高于有雾图像,并利用 MRF(Markov Random Field)建立模型进行去雾,该方法能够取得较好的结果,但是比较容易失真。Nadi 等^[3]使用独立成分分析法(ICA)来进行去雾处理,但是由于所需处理时间较长,会影响使用效果,同时还有另外一个缺点,就是不能对非彩色图像进行处理。Zhu 等^[4]应用基于中值滤波算法,去雾效果虽然有所改进,且运行速度

收稿日期:2020-08-18

基金项目:亳州学院教学质量工程项目精品开放课程:模拟电子技术(2019gxxk05)。

作者简介:张晓东(1962—),男,安徽六安人,教授,硕士,研究方向:信号信息处理。*通信作者:秦娟娟(1981—),女,安徽蚌埠人,高级实验师,硕士,研究方向:人工智能、智能控制。

较快,但是算法参数多而不易调整。Zhu 等^[5]基于大量的统计信息,首次提出了暗通道先验理论(DCP),该算法取得了突破性的成果,但是引入软抠图算法耗时长,不适于实时处理。Williams 等^[6]通过机器学习方法提出了颜色衰减先验(CAP),指出了图像景深信息与其亮度和饱和度之间的关系,但是去雾程度不彻底。Wang 等^[7]提出以边界约束来限制透射率的范围,并用正则法优化的去雾方法,但复原结果过饱和且存在偏色问题。最近,也有很多基于机器学习或者深度学习的去雾算法被提出来。Ramon 等^[8]提出了一种基于端对端的神经网络架构来训练透射率,并采用窗口过度方法来优化,进而恢复出无雾图像。Zhdanov 等^[9]使用多尺度卷积神经网络处理雾图以获得复原结果。虽然机器学习和深度学习具有很强的技术前沿性,但是由于没有专门针对雾天图像的超大量训练库以及更深层次的网络结构,并不总能取得最佳和稳定的效果,导致其在图像去雾领域的发展受到了限制。Sun 等^[10]提出的多尺度去雾算法,是在不同天气情况下对同一场景进行多次拍摄,通过比较分析得到处理结果。这些方法虽然能有效去除雾气,但是实施条件或者流程都太过复杂而难以业务化,因此图像的去雾算法近年来得到了较快的发展。

针对目前存在各种处理方法的不同适用情况,本文提出了一种经典且高效的图像去雾处理算法,即 MSRCR,同时根据交管部门所提出的实际需求,将进行基于一种多尺度 Retinex 的图像去雾算法研究。

1 相关理论

1.1 Retinex 的基础理论

Retinex 的算法理论基础是:在大自然中的物体其本身并不带有颜色,我们之所以能够观察到各种色彩,是由于物体本身对太阳光的反射形成的现象,而且物体的颜色不受光线不均匀的影响,并且保持恒定。换句话说,Retinex 仅依赖于色彩感知一致性,即颜色一致性原理。和其他算法不一样的地方在于,Retinex 可以在颜色恒常、边缘增强和动态领域压缩等方面达到平衡,而不是只通过线性和非线性来进行图像处理,因而可以对各种不同类型的图像进行自适应的增强。

近半个世纪以来,随着计算机与科学技术的发展,Retinex 算法被用于多种图像处理方法之中。本文是将 Retinex 用于图像去雾处理之中。并且在图像去雾处理的发展过程中,Retinex 图像处理算法也

发展出许多分支,有单尺度 Retinex,多尺度 Retinex 和带颜色恢复的多尺度 Retinex。

1.2 大气物理模型

在大雾天气拍摄照片的过程中,由于空气中的水雾及灰尘等微小颗粒的影响,拍得的图片会出现退化现象,其主要原因是成像过程中发生了高于正常天气所产生的散射。散射是大气与光发生的三种相互作用的其中一种,其产生就是受到了空气中漂浮的细小颗粒的影响^[11]。

由于空气中存在着许多微小颗粒,它们有着不同的形态,或在不同区域的浓度、状态也不相同,因此造成的散射情况也十分复杂多变。著名物理学家麦卡特尼于 18 世纪 70 年代提出了大气散射模型,其中大气模型的重点在于光照衰减模型和环境光模型。麦卡特尼还认为,在有雾出现的情况下这 2 种模型在大气散射模型中占很大的比重,大部分物体的成像照片其光照强度是可计算的,大体可以看作光线经过衰减后物体受到的辐射光和其四周环境中各种微小颗粒的散射的加权和^[12]。后来经过一段时间的发展和许多科学家的共同努力得出了一个经典的大气物理模型公式:

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

与 Retinex 的原理模型不同,大气物理模型中加入了大气光线 A 。在式(1)中, A 构成的直接衰减模型和环境模型。

其中 $t(x)$ 可以用指数形式表现出来:

$$t(x) = e^{-\beta d(x)} \quad (2)$$

式中: d 表示为图片成像过程中光学器材与物体的距离, m ; β 是非常重要的大气散射系数,与光波成一定的比例关系。

$$\beta = \frac{1}{\lambda^\gamma} \quad (0 \leq \gamma \leq 4) \quad (3)$$

式中: γ 的大小与空气中的微小颗粒的半径成反比; β 可视为常数。以上就是雾天成像模糊的原因。

在寻得物体雾天成像原因之后,既可以展开图像去雾研究算法的编写,实验证明在经由以上述方法为基础理论进行的试验处理,去雾之后的图片可以得到预期的效果^[13]。

2 本文算法

2.1 单尺度 SSR (Single Scale Retinex)^[14]

一幅图像可以看作是由 2 种不同类型的图片组合而成,假设有一张图片,可分反射图像和亮度图像(常被人称之为入射图像)组合而成,原理如图 1 所示。

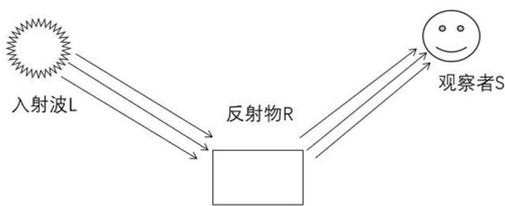


图 1 Retinex 原理

如图 1 所示,人眼之所以能看到物体是由于光源照射到反射物上,光线会在反射物体上形成反射光线被观察者接收到,因而形成了人们所观察到的图片和信息,其过程可以用公式表示为:

$$S(x,y) = L(x,y) \times R(x,y) \quad (4)$$

式中: $L(x,y)$ 表示为入射图像, $L(x,y)$ 动态值即是图像中所有像素的动态值; $R(x,y)$ 为反射图像,是图像的内在属性; $S(x,y)$ 为观察者接收到的反射光图像。

根据人类视网膜的成像基础,Retinex 最基本的理论就是,在处理入射图像的过程中,使用一种特殊的方法来消除或减少对入射图像的影响,以便尽可能保留对象本质的反射图像。从数学计算方面考虑,通过计算出 $R(x,y)$ 得到反射物体的本质信息是一个奇异问题,所以要先对图像像素值进行预估。依据图像亮度估计方法的差异,就产生了很多不同的处理方法,这些处理方法在处理的过程中运用到不同的函数和变换方法,但核心思想没有改变,其一般流程表示如图 2 所示。

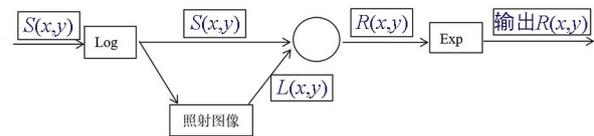


图 2 Retinex 算法流程

图 2 包含的 Retinex 核心思想可以用公式(5)~(8)表现出来:

$$r(x,y) = \log R(x,y) = \log \frac{S(x,y)}{L(x,y)} \quad (5)$$

$$r(x,y) = \log S(x,y) - \log [F(x,y) * S(x,y)] \quad (6)$$

式中: $r(x,y)$ 是输出图像; $*$ 是卷积符号; $F(x,y)$ 是中心环绕函数,能够表示为:

$$F(x,y) = \lambda e^{-\frac{(x^2+y^2)}{c^2}} \quad (7)$$

式中: C 是高斯环绕尺度; λ 为一个尺度,它的取值应该满足以下条件:

$$\iint F(x,y) dx dy = 1 \quad (8)$$

从式(6)可以看出,SSR 中应用到了卷积公式,主要是用来对图片的像素值进行计算,它的物理意

义表现为通过计算图片中每点的像素值与周围区域在加权平均估计后的变化,并将为视觉效果提供干扰的信息消除,只保留含重要信息的反射部分,从而达到增强的目的。单尺度 Retinex 算法的具体运算流程主要分为如下几个步骤:

读取原始图像,如果原始图像是一张黑白照片,首先算法会将黑白图片的每个像素的灰度值由整数值转换为浮点数(即先通过 Retinex 算法对图片进行预估算),并转换到对数域;如果原始图片是彩色照片,则需要先将图片中的颜色信息进行提取并分类,对每类颜色进行与第一步相同的处理,经过上面几步处理后,会简化后面数据计算。

1) 先取一个高斯常量;在离散条件下,进行积分求和的计算,进一步确定参数的值。

2) 根据式(5)~(8),计算得到 $r(x,y)$;如果是彩图,则可 3 个通道的 $r(x,y)$ 。

3) 将 $r(x,y)$ 从对数域变换到实数域得到输出图像 $R(x,y)$ 。

4) 对 $R(x,y)$ 线性拉长并以一定的格式显示输出。

在式(6)~(8)中, $F(x,y)$ 中心环绕函数是低通函数,它的作用是在应用程序中处理原始图像使其够参与算法。在获得原始图像的信息后,首先将其低频部分估算出来,然后运用 $F(x,y)$ 中心环绕函数滤除低频部分,这样算法程序就会将只对剩余下来的高频信息进行处理。

而根据人的眼球对外界获取信息途径可以得出结论,人接受外界信息只会选择高频部分分量,所以,SSR 算法在增强图像边缘信息的能力上有突出的表现。在对 C 进行取值时一般会选取 80~100,因为对于动态范围大,高斯常量在运算过程中起到非常大的作用,可以平衡高斯函数产生的幅度压缩和对比度增强 2 种效果。

2.2 多尺度 MSR (Multi Scale Retinex)^[15]

多尺度 Retinex 是根据单尺度 Retinex 的基本原理并以其为基础演化得出,它的最大特点是既可以对图像的动态范围进行压缩,又可以保持较高的保真度。尤其有特殊要求时,多尺度 Retinex 可以根据要求实现一些特定功能(如图像色彩增强、全局动态压缩),也可用于医学方面的图像增强,如 X 光等。

MSR 计算公式为:

$$r(x,y) = \sum_k^K w_k \{ \log S(x,y) - \log [F(x,y) * S(x,y)] \} \quad (9)$$

通常 K 值就是高斯中心环绕函数的个数, 当 $K = 1$ 时, MSR 就成为 SSR。为了保障算法中能够有 3 个以上的尺度, 即高、中、低, 同时这 3 个尺度还要有其特点。经此考虑, 式中 K 的取值一般为 3。

通常计算机在运行算法对图片进行处理时都会有一个预估, 根据 Retinex 算法的原理来看, 当算法运行在开始处理图像之前, 首先会假设初始图像中相邻区域的像素值是缓慢变化的, 即图像各个像素值之间能够平滑过渡。但根据实际情况得知, 日常的成像中, 大多数普通的照片中会出现相邻的像素值呈两极大小, 图像的光照变化并不平滑。在这种情况下, Retinex 图像增强算法在处理 2 个亮度差异较大的相邻区域时会产生光晕, 因此, 未能达到预期的图像增强效果。此外, 由于边缘锐化不足和阴影边界突兀, 使部分颜色发生扭曲, 纹理不清晰, 高光区域细节信息丢失等问题, 并没有得到改善。还存在高光区域的敏感度小等缺点。

2.3 具有颜色恢复的 MSR 方法 (Multi-Scale Retinex with Color Restoration/MSRCR)

在 MSR 的图像处理过程, 由于图像局部区域对比度增强使得某一部分的图片产生色彩失真, 从而令图片某一部分不能呈现出其本来的颜色, 导致处理后的图片视觉效果达不到预期的估计。为了增强算法的可行性, 在 MSR 的基础上, 乘上一个色彩恢复因子 C 来调节颜色失真的缺陷。

改进算法如下所示:

$$R_{MSRCR_i}(x, y) = C_i(x, y) R_{MSR_i}(x, y) \quad (10)$$

$$C_i(x, y) = f \left[\frac{I_i(x, y)}{\sum_{j=1}^N I_j(x, y)} \right] \quad (11)$$

$$C_i(x, y) = f[I_i(x, y)] = f[I_i(x, y)] \quad (12)$$

$$\sum N_j = I_j(x, y) \quad (13)$$

$$f[I_i(x, y)] = \beta \log[\alpha I_i(x, y)] = \beta \{ \log[\alpha I_i(x, y)] - \log[\sum N_j = I_j(x, y)] \} \quad (14)$$

式中: $I_i(x, y)$ 表示第 i 个通道的图像; C_i 表示第 i 个通道的彩色恢复因子, 它在运算过程中有着重要作用, 可以改变每个通道颜色的比例关系, 从而能够把相对的暗区域的信息凸显出来, 以消除图像色彩失真问题; $f(\cdot)$ 表示颜色空间的映射函数; β 是增益常数; α 是受控制的非线性强度。

MSRCR 算法利用彩色恢复因子 C , 调节原始图像中每个颜色通道之间的比例关系, 从而把相对较暗区域的信息凸显出来, 达到了消除图像色彩失真的缺陷。

经过 MSRCR 算法处理后的图片对比度会增

强, 处理后的成像效果会十分接近真实场景, 所以经过处理后的图片会给观察者更好的视觉效果。

但是经过 MSRCR 算法处理后的图像, 由于算法的缺陷, 像素值可能会出现负数。这里增加一种增益函数, 在利用高斯函数对图片中的像素值进行数域转换后, 通过改变增益及偏差来对图像进行修正。公式为:

$$R_{MSRCR_i}(x, y) = G \times R_{MSRCR_i}(x, y) + O_{MSRCR_i}(x, y) \quad (15)$$

式中: G 表示增益; O 表示偏差。它们的值取决于软件中的算法实现。

3 MSRCR 算法实现

3.1 算法原理

图像去雾处理算法的代码主要是根据 MSRCR 的基本原理来编译的, 在了解了 Retinex 的基本原理后, 结合 SSR, MSR, MSRCR 的算法实现过程中的优缺点和对图像处理后的图像的失真率, 得出结论。MSRCR 是目前基于多尺度 Retinex 的图像去雾算法中的最优算法, 它可以大大提高图像的保真率, 并且不会失去图像的原本色彩, 可以为众多的光学监控设备提供最基础的图像处理, 以达到图像去雾方面的需求。

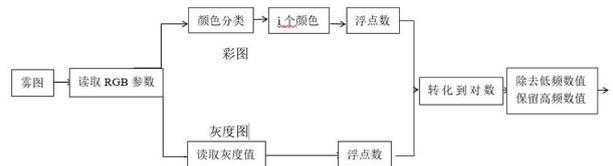


图3 本文算法原理框

3.2 算法运行流程

为了验证 MSRCR 算法的有效性, 本文选择了大量雾天情况下的图像并进行去雾处理, 雾天图像如图 4 所示。



图4 实验原图

MSRCR 算法代码主要实现平台是 Matlab 软件^[16]。首先读取需要进行去雾处理的图片。如果读入的图片 $S(x, y)$ 为黑白图, 算法程序就会将灰度值转换; 若是彩图, 会将每个颜色分别处理, 将数值转换到对数域中, 后面的计算就会很方便^[17-18]。接下来利用高斯函数对从图片中获得的像素值进行

加权平均,这样有用信息周围干扰物的像素值就会减小,甚至可以消除^[19],之后会只保留图片中物体的反射像素 $R(x,y)$ 。具体处理过程如图 5 所示。

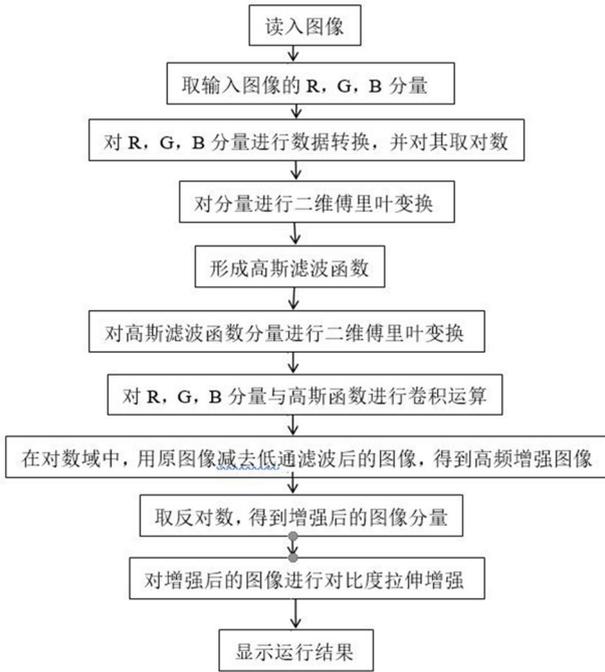


图 5 MSRCR 算法流程

4 实验结果与分析

代码的核心重点是对高斯函数的应用和傅立叶变换, MATLAB 软件是实用性非常强的工程软件,在对图像进行去雾处理的代码设计时 MATLAB 里许多函数功能能够有效地帮助实现程序。

图片经过 SSR 算法和 MSRCR 算法编写的程序进行去雾处理后呈现出不同的处理结果,为了解图片处理前后的各种图片参数发生的变化,利用 Matlab 编写的代码对其中 2 组图片的色调、信息熵、均值、平均梯度、细节强度、结构进行前后对比,对比结果显示能够清楚地观察到处理前后发生的变化,结果如图 6~9 所示。



图 6 原始图像



图 7 经过 SSR 处理后的图像



图 8 经过 MSR 处理后的图像



图 9 经过 MSRCR 处理后的图像

由图 6~9 可以清楚地看到,原始图片在经过单尺度 Retinex 去雾算法、多尺度 Retinex 去雾算法和具有颜色恢复的多尺度 Retinex 去雾算法的处理后,会得到不同的去雾处理效果。由此可知:(1) SSR 和 MSR 的处理图片效果为灰度图,不能较好地还原原始图片的颜色信息,其色彩保持度偏低,对比度较低。(2)MSRSCR 可以明显观察到图片原本的颜色信息,可以较为明显的保存信息度,算法动态范围广,其综合性能要优于 SSR 和 MSR。

表 1 中运行时间为本机最佳状态下运行时间。表 2 选自图 6~9 中前 2 组图片的参数对比统计。从表 2 可以得出:(1)从色调方面看,MSRCR 算法中加入的彩色恢复因子在很大程度上减少了色彩失真的问题,在图片处理后有效地恢复了原本照片的色彩。(2)在细节强度方面,MSRCR 算法是在去雾的基础上部分平衡了照片原本的暗处过暗、亮处过亮、曝光不足等缺陷,既有去雾处理效果,又有部分图像增强功能,没有造成图片的细节缺失。(3)信息熵有明显的变化,因为在去除雾气之后,图片内的信息量明显发生变化,显示出的物体和颜色也增多了。(4)图片处理前后的平均梯度明显降低,即由于灰度变化率变小,体现出图片细节之处反差速率在变小。

表 1 两种去雾算法运行时间

图像增强算法	运行时间/s
SSR	1.985
MSR	2.003
MSRCR	2.003

表 2 图片参数

	色调	细节强度	信息熵	平均梯度
原图	1.000 0	0.734 0	0.356 9	0.480 0
SSR	0.947 7	0.686 9	0.364 8	0.470 7
MSR	0.985 4	0.666 6	0.412 3	0.536 3
MSRCR	1.000 0	0.724 2	0.387 5	0.514 3

大量实验已经验证了上述特点普遍成立。针对带颜色恢复的多尺度 Retinex 的图像去雾算法,首先是引用高斯函数,这样能够方便对不同格式、尺度、颜色的图片进行处理,然后引入色彩恢复因子 C,用来调节图像局部区域对比度增强而导致的颜色失真。对图片高频信息提取的方法采用了最为

直接的高通滤波法, 能够有效地提取高频信息。

几种去雾算法的运行时间如表 1 所示, 由表 1 得, 通过比较 3 种算法的运算时间相差非常小。又考虑到 SSR 与 MSRCR 在处理同一张图片得出的处理效果, 色彩、信息的保真度等方面的差别, MSRCR 运算处理流程要多于 SSR。

5 结语

综上所述, 针对 SSR 和 MSR 对雾天图片进行去

除雾处理时丢失颜色等信息, 且色彩保持度偏低, 对比度较低等不足, 本文提出一种改进的多尺度去雾图像处理算法 (MSRCR)。与上述 2 种业内常用算法对比, 本文算法可以去除图片中的雾气, 同时保持雾天图片的颜色、对比度等细节信息。虽然在此过程中增加了微量计算量与时间, 但综合考虑, MSRCR 更适用于图片去雾算法的业务化发展需求。

参考文献:

- [1] SHIBAYAMA M. Polarization characteristics of a mixed seeding pasture and its application for predicting the ratio of legumes [C]//IGARSS 2003. 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings (IEEE Cat. No. 03CH37477). Toulouse, France:IEEE, 2003.
- [2] ATHANASIADIS EI, CAVOURAS D A, GLOTSOS D A, et al. Segmentation of complementary DNA microarray images by wavelet-based markov random field model[J]. IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, 2009, 13(6):1068-1074.
- [3] NADI D A, MANSOUR A M. Independent Component Analysis (ICA) for texture classification[C]//2008 5th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices. Amman, Jordan:IEEE, 2008.
- [4] ZHU Y L, HUANG C, XU Z. Image denoising algorithm based on the median morphological filter[C]//2008 7th World Congress on Intelligent Control and Automation. Chongqing, China:IEEE, 2008.
- [5] ZHU Q, SHAO L, SONG Z, et al. SUPER-CUT: an accurate and effective interactive image segmentation algorithm[C]//2013 IEEE International Conference on Image Processing. Melbourne, VIC, Australia:IEEE, 2013.
- [6] Williams j e f. Boundary-layer pressures and the Corcos model: a development to incorporate low-wavenumber constraints[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1982;125:9-25.
- [7] 王龙飞. 基于边界约束和上下文正则化的图像去雾方法研究[D]. 武汉:华中科技大学.
- [8] RIVERO R. Developing a neural network to act as a noise filter[R]. Army Armament Munitions and Chemical Command Rock Island II, 1992.
- [9] ZHDANOV A, ZHDANOV D, POTEMIN I S, et al. Analysis of the visual perception conflicts in the mixed reality systems with the real-world illumination parameters restoration[C]//Digital Optical Technologies 2019. International Society for Optics and Photonics. Munich, Germany:2019.
- [10] SUN J, HAN Q, KOU L, et al. Multi-focus image fusion algorithm based on Laplacian pyramids[J]. JOSA A, 2018, 35(3): 480-490.
- [11] 王文成. 基于物理模型的单幅图像去雾方法[M]. 北京:科学出版社, 2019:6-15.
- [12] 付辉, 吴斌, 韩东轩, 等. 基于大气物理模型的快速视觉优化去雾算法[J]. 计算机应用, 2015, 35(11):3316-3320.
- [13] 洪明坚. 图像增强的自适应直方图修正算法研究及其应用[D]. 重庆:重庆大学, 2002.
- [14] 孙玲媛. 一种基于单尺度 Retinex 的图像增强算法[J]. 物联网技术, 2014, 4(11):29-31.
- [15] 何艳, 方帅. 一种局部多尺度 retinex 算法在雾天图像中的应用[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2015, 38(10): 1333-1338.
- [16] 张志涌, 杨祖樱. MATLAB 教程(R2018a)[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2019:161-163.
- [17] 包子阳, 余继周, 杨杉. 智能优化算法及其 MATLAB 实例[M]. 2 版. 北京:电子工业出版社, 2018.
- [18] 阮秋琦. 数字图像处理[M]. 北京:电子工业出版社, 2007:66-74.
- [19] 李鹏. 薄尘雾退化图像的处理研究[D]. 南京:南京理工大学, 2005.