光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021060702

基于双重暗通道结合与高斯加权的去雾改进算法

何柯辰[1]，刘　奇[2*]，邓小波[1]，陈　曦[1]，全美霖[2]，陈奕涵[1]

（四川大学 1. 电气工程学院；2. 生物医学工程学院，成都 610065）

摘　要： 针对暗通道先验算法去雾后图像存在伪影和景深突变处留有残雾的问题，提出一种基于双重暗通道结合与高斯加权的去雾方法。分别利用超像素块滤波和中值方块滤波求取两层暗通道，对两层暗通道进行像素级结合并构造高斯加权函数进行加强，然后采用引导滤波优化透射率图。把雾图转化到 HSV 空间并提取包含天空等的白色区域，引入概率函数取白色区域前 10％像素点的明度分量平均值作为大气光估计值。实验结果表明，所提算法能较好地保留图像细节并去除景深突变处的残雾，同时能改善伪影现象。

关键词： 图像去雾；透射率；暗通道；高斯加权；颜色空间

中图分类号： TP391.41　**文章编号：** 1001－5868(2021)05－0754－06

Improved Image Dehazing Based on Combination of Double Dark Channels and Gaussian Weighting

HE Kechen[1], LIU Qi[2], DENG Xiaobo[1], CHEN Xi[1], QUAN Meilin[2], CHEN Yihan[1]

(1. College of Electrical Engineering; 2. College of Bilmedical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, CHN)

Abstract: To address the problem that the dark channel prior algorithm will produce artifacts and residual fog, a dehazing method was proposed based on double dark channel and Gaussian weighting, which use superpixel block filtering and median block filtering to obtain two layers of dark channels, respectively. Then a pixel-level fusion was performed on the two-layer dark channels and a Gaussian weighting function was constructed for enhancement. The white area that contains the sky was extracted based on the HSV color space and the average value of the brightness component of the top 10% of the pixels in the white area was taken as the atmospheric light. Experimental results demonstrate that the proposed algorithm can preserve details and remove residual fog while improving artifacts.

Key words: image dehazing; transmission map; dark channel prior; Gaussian weighting; color space

0　引言

在雾霾天气下，空气中悬浮着大量的水汽、尘埃等颗粒物，会对光线进行散射和吸收，导致成像设备采集的图像降质。降质后的图像对比度下降，纹理模糊不清以及场景颜色偏移，不利于人眼的观察，也不利于智能化系统对图像进行进一步处理与识别。因此，研究图像去雾技术对提升图像质量，以及设备整体工作性能有着重要的研究意义与应用价值。

近年来，基于单幅图像去雾的相关研究取得很大进展。Tan 等[1]观察发现无雾图像的对比度高于雾天降质图像的对比度，且大气光在局部不会产生突变，于是提出通过增强雾天图像局部对比度的方法来去雾。但此方法容易造成失真和过度饱和，且易产生光晕效应。Fattal 等[2]假定介质透射率和景物表面阴影局部不相关，独立分析图像颜色和局部信息，以此推断介质透射率并完成去雾。但此方法去雾效果受输入图像影响严重，且无法应用于浓雾和低信噪比情况。He 等[3]通过分析大量户外自然图像，提出暗通道先验(Dark Channel Prior，DCP)去雾模型，该方法具有简单、实用及去雾效果好等优点，但是仍具有一定的局限性，如采用软抠图(Soft

收稿日期：2021－06－07.

*通信作者：刘　奇

Matting)方法优化透射率图,导致计算复杂度增加。

有很多学者对暗通道先验算法进行改进。Gibson 等[4-5]在文献[3]的基础上,提出采用中值滤波替换暗通道求取过程中的最小值滤波,此方法可以改善物体交界处的光晕效应,但是会减弱图像去雾强度,并留有残雾。杨爱萍等[6]把图像分为结构层与纹理层,在结构层对暗通道先验得到的透射率进行频域滤波并融合,去雾后图像纹理丰富,但易造成色彩失真。Wang 等[7-8]提出用超像素算法分割图像,并用超像素块代替最小值滤波,同一超像素块具有相同的景深,可以改善景深交界处的伪影现象,降低噪声干扰,但仍会导致透射率估计偏差大。

针对上述问题,本文对全局大气光和透射率图的估计进行了改进,提出一种基于双重暗通道结合与高斯加权的透射率估计方法。分别利用超像素滤波窗口和中值滤波窗口求取两层暗通道,对两层暗通道进行像素级结合,再构造高斯函数进行优化。并基于 HSV 颜色空间提取包含图片白色区域,引入天空概率函数从白色区域提取明度分量前 10% 的平均值作为大气光估计值。实验结果表明,本文算法复原图像细节保留较多,色调自然,能有效去除景深突变处的残雾并改善伪影效应。

1　雾图模型与暗通道先验

1.1　大气散射模型

McCartney 等[9]最早提出用于描述雾图形成过程的大气散射物理模型,但该模型过于复杂,Narasimhan 等[10]假设环境光的波长与大气散射系数无关,对模型进行简化,简化后的大气散射物理模型用公式表示如下:

$$I(x)=J(x)t(x)+A[1-t(x)] \tag{1}$$

式中,x 表示图像中每个像素点的坐标,$J(x)$表示需要恢复的无雾图像,$I(x)$表示雾天条件下光学设备所采集的有雾图像,A 表示大气光,一般为无穷远处或雾最浓处的值,$t(x)$为介质透射率,代表在坐标 x 位置处所有光线穿过雾的比例,用公式可表示为 $t(x)=\mathrm{e}^{-\beta d(x)}$,$\beta$ 表示大气散射系数,可看作常数,$d(x)$表示景深,在单幅图像中为未知参数。易知,式(1)是不定方程,需要有效的先验知识或假设才能求出无雾图像 $J(x)$。

1.2　暗通道先验理论

暗通道先验[3]指出在户外无雾图像中,除天空与白色区域外的局部窗口中的像素点,其 RGB 三个通道中至少有一个通道值趋于 0,用公式表示如下:

$$J^{\mathrm{dark}}(x)=\min_{y\in\Omega(x)}\left(\min_{c\in\{\mathrm{r,g,b}\}}J^{c}(y)\right) \tag{2}$$

式中,J^{dark} 为 RGB 三个通道中最小的暗元素,c 表示 RGB 三个通道之一,$\Omega(x)$表示以坐标 x 为中心的滤波窗口,在文献[3]算法中 $\Omega(x)$为 15×15 的方形滤波窗口。根据暗通道先验规律,暗元素近似如下:

$$J^{\mathrm{dark}}\approx 0 \tag{3}$$

进一步可导出透射率计算公式如下:

$$t(x)=1-\omega\min_{y\in\Omega(x)}\left(\min_{c\in\{\mathrm{r,g,b}\}}\frac{I^{c}(y)}{A^{c}}\right) \tag{4}$$

式中,ω 为引入的雾保留指数,引入的目的是保留一定的浓雾区域,取值范围为 $0<\omega\leqslant 1$,一般取 0.95。

利用暗通道先验知识可以求出透射率 $t(x)$与大气光值 A,最后,即可利用大气散射模型恢复无雾图像,公式如下:

$$J(x)=\frac{I(x)-A}{\max(t(x),t_0)}+A \tag{5}$$

式中,t_0 为避免透射率过低而引入的常数,一般取 0.1。

2　本文图像去雾算法

2.1　基于双重暗通道结合与高斯加权的透射率图估计

He 等[3]提出了一种基于暗通道的透射率估计方法,该方法依赖于暗通道求取的准确性。计算步骤分为两步:第一步计算全图每个像素点 RGB 三个通道的最小值;第二步对求取的最小值图进行最小值滤波,滤波窗口大小为 15×15。He 采用最小值方块滤波的前提是假设每一个滤波窗口内的透射率一致,即景深相同。但是真实场景中,一个滤波窗口内往往包含多个物体,窗口越大包含的物体类别越多,具有多个景深。所以,He 采用最小值滤波计算出的暗通道具有明显的方块效应,从而会造成去雾后图像在景深突变处留有残雾,并且存在伪影效应。

针对上述问题,本文在暗通道先验算法与文献[11]算法的基础上进行改进,提出一种基于双重暗通道结合与高斯加权的透射率估计方法,分别利用超像素滤波窗口和中值滤波窗口求取两层暗通道,对两层暗通道进行像素级结合,再构造高斯函数优化暗通道的远景区域,最后利用式(4)计算出透射率图并采用引导滤波进行细化。

本文首先基于超像素分割算法[12]把图片划分为多个超像素块，划分的块在亮度、色调和饱和度属性上具有一致性[12]，满足滤波窗口内景深不变与透射率一致的前提，用公式表示如下：

$$I_1^{\text{dark}}(x)=\min_{y\in\Phi(x)}\left(\min_{c\in\{r,g,b\}}I^c(y)\right) \tag{6}$$

式中，$\Phi(x)$为采用超像素算法分割的具有相同景深的块，块的分割数量过多，会提高计算复杂度，增加计算时间，过少则同一块内元素相似性弱。为保证滤波窗口大小的一致性以及与后续第二层暗通道结合的准确性，取分割的超像素块大小近似为 15×15，则分割的超像素块数量 m 可表示如下：

$$m=\frac{w\times h}{225} \tag{7}$$

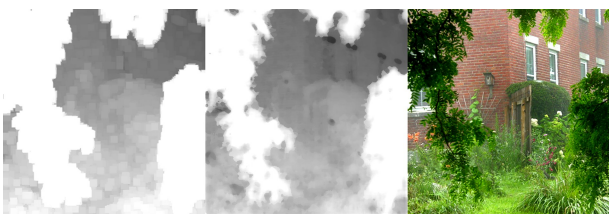
式中，w 表示图像的宽度，h 表示图像的高度。利用超像素算法把图像分割为多个块，然后用划分的块代替原暗通道求取过程中的最小值滤波窗口，结果如图 1(b)所示。第二层暗通道采用 15×15 窗口对最小值图进行中值滤波，用公式表示如下：

$$I_2^{\text{dark}}(x)=\text{med}\left(\min_{y\in\Omega(x)}\left(\min_{c\in\{r,g,b\}}I^c(y)\right)\right) \tag{8}$$

式中，$\Omega(x)$表示 15×15 的方形滤波窗口，中值滤波提高图像细节利用率，改善对远景暗原色值的估计偏差，并且不需要进行透射率细化，降低了计算复杂度[5]，滤波结果如图 1(c)所示。



(a) 原图 (b) 超像素块滤波 (c) 中值滤波



(d) 未优化透射率 (e) 优化透射率 (f) 去雾后图像

图 1 各算法处理与去雾后的图像

求出两层暗通道后，需要对其进行结合以达到增强的目的，由于两层暗通道分辨率相同，纹理相似，因此直接进行像素级结合，公式如下：

$$I_f^{\text{dark}}(x)=\beta I_1^{\text{dark}}(x)+(1-\beta)I_2^{\text{dark}}(x) \tag{9}$$

式中，$I_f^{\text{dark}}(x)$为结合后的暗通道图，β 是调节因子，取值范围为(0,1)，由实验分析可知，当 $\beta=0.3$ 时，暗通道图结合效果较好。但是结合后的暗通道远景区域的暗通道值仍偏小，会导致复原图像留有残雾，为此构造高斯加权函数进行优化，用公式表示如下：

$$I_g^{\text{dark}}(x)=\frac{1}{\Gamma(x)}\left[\lambda_1 I_f^{\text{dark}}(x)+G(x)\times I_3^{\text{dark}}(x)\right] \tag{10}$$

$$\Gamma(x)=\lambda_1+G(x) \tag{11}$$

式中，$I_g^{\text{dark}}(x)$为采用高斯加权函数优化后的暗通道，$I_3^{\text{dark}}(x)$为采用最小值方块滤波求取的暗通道图，$G(x)$为高斯权重，$\Gamma(x)$为总权值，$G(x)$与 $I_3^{\text{dark}}(x)$可用公式表示如下：

$$G(x)=\lambda_2\times e^{-\frac{(1.5-I_f^{\text{dark}}(x))^2}{Z}} \tag{12}$$

$$I_3^{\text{dark}}(x)=\min_{y\in\Omega(x)}\left(\min_{c\in\{r,g,b\}}I^c(y)\right) \tag{13}$$

式中，$\Omega(x)$表示 15×15 的方形滤波窗口，λ_2 与 Z 为调整高斯函数形状的参数，λ_2 越大高斯曲线越高，Z 越大高斯曲线越平缓。由实验分析知，取$\lambda_2=2$，$Z=0.6$ 时，近景色调自然，远景细节保留完好，整体效果最好。

最后结合式(4)与式(10)计算出透射率，用公式表示如下：

$$t(x)=1-\omega\min_{y\in\Omega(x)}\left(\min_{c\in\{r,g,b\}}\frac{I_g^{\text{dark}}}{A^c}\right) \tag{14}$$

式中，ω 为引入的雾保留指数，取为 0.95。本文算法初步求出透射率如图 1(e)所示，图 1(d)为暗通道先验算法所计算出的透射率，为公平起见，两者都未进行透射率细化。从图中可知，本文算法求出的透射率细节丰富、边缘更清晰，改善了原算法的方块效应。

上述方法求取的透射率纹理效应仍比较明显，为了进一步消除纹理效应，采用导向滤波[13]对透射率图进行细化，引导图选择原始图像的灰度图。最后，把细化后的透射率图带入式(5)即可恢复无雾图像，复原结果如图 1(f)所示。

2.2 基于 HSV 颜色空间的大气光估计

全局大气光的值一般取自雾最浓或天空区域[14]，然而现有方法一般取全图最亮的像素值作为全局大气光，如 He 算法[3]取暗通道图像中亮度排名前 0.1%的像素值对应的点作为全局大气光的估计值。当前景物体较暗时，天空区域的亮度为全局最大，按照上述方法求得的大气光值能有效去雾，但是当前景中具有白色墙面或雪地等亮度高于天空区域的物体时，大气光的估计值偏差大。

针对上述问题，本文给出一种基于 HSV(Hue-Saturation-Value)颜色空间的大气光估计方法。假定图像中具有天空区域、白色墙面和雪地等高亮白色区域，首先将有雾图像从 RGB 空间转化为 HSV 空间，在 HSV 空间中，亮度大于 75%且饱和度小于 20%的被定义为白色区域[15]，根据此规律，可将图像分为白色区域与非白色区域，用公式表示如下：

$$f(x)=\begin{cases}1 & V(x)\geqslant 75\% \text{ and } S(x)\leqslant 20\% \\ 0 & \text{others}\end{cases} \tag{15}$$

式中，$f(x)$表示提取出的白色区域，$V(x)$表示明度值，$S(x)$表示饱和度。上式能将图片划分为白色区域与非白色区域，定义集合$\{x_i\}_1$为使得 $f(x)=1$ 的像素点集合，即集和$\{x_i\}_1$为白色区域像素点坐标，包括天空、白色墙面或雪地等。为从集合$\{x_i\}_1$中区分出天空区域，引入天空区域概率函数，假设天空区域位于图片上方，概率函数定义为

$$P_s(x)=1-\frac{h(x)}{H} \tag{16}$$

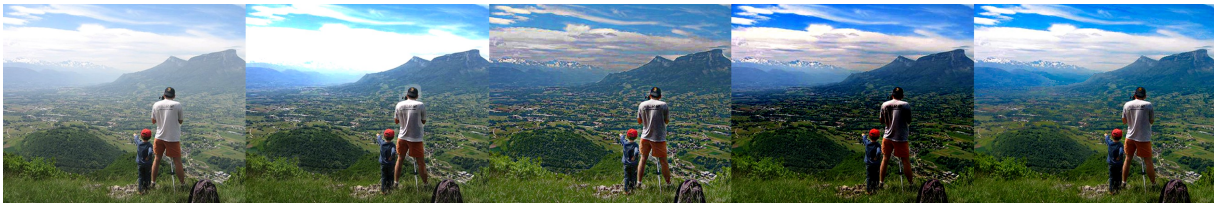
式中，$P_s(x)$表示坐标 x 为天空的概率，$h(x)$表示坐标 x 的高度，H 表示图片的总高度。易知，$P_s(x)$趋于 1 时，坐标 x 位于天空区域的概率最大。将集合$\{x_i\}_1$内所有元素代入式(15)，按照$P_s(x)$的值对集合$\{x_i\}_1$中的元素进行降序排序，求得集合$\{x_i\}_2$，集合$\{x_i\}_2$中坐标元素位置越靠前，坐标位于天空区域的概率越大。取集合$\{x_i\}_2$前 10%像素点对应的明度分量值的平均值作为全局大气光的估计值。

3　实验结果

为验证本文算法的有效性，取多张自然有雾图像，与常见的去雾算法进行比较实验。对比算法选取了 Tarel 提出的基于均值滤波器的快速去雾算法[16]、Berman 提出的非局部先验去雾算法[17]，以及 He 提出的暗通道先验算法[13]。实验结果由两部分组成，第一部分分析比较各算法的去雾效果，第二部分对比各个算法去雾的客观评价标准。

3.1　主观评价

图 2 为各算法对三幅测试图去雾后的结果。从图 2(b1)可以看出 He 方法前景物体处理较好，但当具有高亮物体时，去雾后颜色会失真，这是暗通道在天空区域失效所致；并且近景与远景交界处会留有残雾，如图 2(b3)中的森林与天空的交界处。图 2(c)为 Tarel 方法去雾后结果，整体视觉效果较差，去雾图片具有明显噪点，如图 2(c1)所示，并且边缘易产生白边，色差较大。图 2(d)为 Berman 算法采



(a1)　原始图像　(b1)　He 方法　(c1)　Tarel 方法　(d1)　Berman 方法　(e1)　本文改进方法



(a2)　原始图像　(b2)　He 方法　(c2)　Tarel 方法　(d2)　Berman 方法　(e2)　本文改进方法



(a3)　原始图像　(b3)　He 方法　(c3)　Tarel 方法　(d3)　Berman 方法　(e3)　本文改进方法

图 2　各算法去雾结果对比图

用颜色信息来获得非局部先验，可以在含少量天空背景时去雾效果较好，如图 2(d1)，但是前景颜色偏暗；但当含有大量天空背景时，天空区域会出现颜色过饱和现象，产生颜色失真，并且出现光晕现象，如图 2(d3)所示天空出现较为明显的光晕。图 2(e)为本文算法去雾结果，相比于 He 方法采用最小值滤波，本文采用双重暗通道结合的方法，去雾结果在物体边缘的伪影得到了有效减弱，景物颜色接近真实图像，如图 2(e1)所示，天空区域色调正常，人物头部的伪影得到改善；从图 2(e3)中森林与天空交界处可以看出，景深突变处的残雾得到改善，去雾效果较好。但去雾后图像总体色调偏暗。

3.2 客观评价

为了更好地分析对比各种算法得到的去雾图形质量，选取峰值信噪比(Peak Signal-to-Noise Ratio，PSNR)、结构相似性(Structural Similarity，SSIM)和平均梯度(Average Gradient，AG)三个评价指标[18]。PSNR 反映图像的差异，值越大，失真程度越低；SSIM 反映两幅图像相似性，值越大，图像相似性越高；AG 反映图像的细节和清晰度，值越大，图像清晰度越高。数据如表 1 所示，从表中数据可以看出，除图 2(b1)中暗通道先验在天空区域失效导致过曝，引起 PSNR 异常偏高，其余场景本文算法的指标皆为最高。上述客观指标的对比结果表明，本算法的量化评价结果整体上优于对比算法。

表 1 各算法客观评价指标结果

原始图像	算法	PSNR/dB	SSIM	AG
a1	He 方法	21.903 6	0.818 1	5.987 2
	Tarel 方法	14.393 3	0.798 9	7.056 8
	Berman 方法	12.718 0	0.751 7	7.733 6
	本文方法	15.289 9	0.846 2	7.877 5
a2	He 方法	10.438 2	0.724 8	6.404 5
	Tarel 方法	12.347 4	0.804 8	5.865 0
	Berman 方法	10.399 8	0.615 1	6.567 4
	本文方法	13.955 0	0.852 7	6.860 7
a3	He 方法	17.312 0	0.924 7	2.623 5
	Tarel 方法	13.861 8	0.794 0	4.853 4
	Berman 方法	15.006 3	0.757 5	5.286 4
	本文方法	20.701 8	0.958 0	5.505 5

4 结语

提出了一种基于双重暗通道结合与高斯加权的单幅图像去雾方法。首先用超像素分割算法把有雾图像分割为多个景深一致的超像素块，并基于超像素块对最小值图进行滤波求取第一层暗通道；其次，采用中值滤波对最小值图进行滤波求取第二层暗通道；然后，利用像素级加权平均对两层暗通道进行结合，并构造高斯函数优化暗通道的远景区域，利用引导滤优化透射率。基于 HSV 空间提取有雾图像的白色区域，引入概率函数把白色区域前 10%的像素点的明度分量平均值作为大气光的估计值；最后结合大气散射模型恢复无雾图像。实验结果和数据分析表明，本文算法改善了暗通道先验算法的伪影效应以及近景与远景交界处存在残雾的问题，去雾效果较好。但是去雾后色调整体偏暗，一定程度上影响了视觉效果，且超像素算法分割算法的计算时间较长，对计算机设备性能要求较高，后期需要进一步的优化。

参考文献：

[1] Tan R T. Visibility in bad weather from a single image[C]// IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, 2008: 1-8.

[2] Fattal R. Single image dehazing[J]. Proc. of SIG-GRAPH, 2008, 27(3): 1-9.

[3] He K M, Sun J, Tang X. Single image haze removal using dark channel prior[J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2010, 33(12): 2341-2353.

[4] Gibson K B, Vo D T, Nguyen T Q. An investigation of dehazing effects on image and video coding[J]. IEEE Trans. on Image Processing, 2012, 21(2): 662-673.

[5] 唐美玲，张小刚，陈 华，等. 一种自适应中值滤波去雾算法[J]. 计算机工程与应用，2015，51(10)：186-190.
Tang M L, Zhang X G, Chen H, et al. Self-adaptively dehazing method based on median filter [J]. Computer Engineering and Applications, 2015, 51(10): 186-190.

[6] 杨爱萍，王海新，王金斌，等. 基于透射率融合与多重导向滤波的单幅图像去雾[J]. 光学学报，2018，38(12)：112-122.
Yang A P, Wang H X, Wang J B, et al. Image dehazing based on transmission fusion and multi-guided filtering [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(12): 112-122.

[7] 王 睿，李 蕊，廉小亲. 基于大气多散射模型和超像素分割的图像去雾[J]. 光子学报，2016，45(4)：130-136.
Wang R, Li R, Lian X Q. Multiple scattering model based image dehazing with superpixel [J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(4): 130-136.

[8] 徐 浩，谭一博，刘博文，等. 基于超像素和暗通道先验的图像去雾复原方法[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版)，2020，50(10)：118-124.
Xu H, Tan Y B, Liu B W, et al. Image dehazing method based on super pixels and dark channel prior[J]. Periodical of Ocean University of China, 2020, 50(10): 118-124.

[9] McCartney E J. Optics of the atmosphere: scattering by molecules and particles[J]. Phys. Today, 1977: 76.

[10] Narasimhan S G, Nayar S K. Vision and the atmosphere[J]. Inter. J. of Computer Vision, 2002, 48(3): 233-254.

[11] 安　冬，国凌明，邵　萌，等. 基于暗通道先验的自适应超像素去雾算法[J]. 控制与决策，2020，35(8)：1929-1934.
An D，Guo L M，Shao M，et al. An adaptive superpixel defogging algorithm based on dark channel prior[J]. Control and Decision，2020，35(8)：1929-1934.

[12] 陈　永，卢晨涛. 基于超像素分割和暗亮通道结合的单幅图像去雾[J]. 激光与光电子学进展，2020，57(16)：239-247.
Chen Y，Lu C T. Single image dehazing based on superpixel segmentation combined with dark-bright channels[J]. Laser & Optoelectronics Progress，2020，57(16)：239-247.

[13] Tang X，Sun J，He K. Guided image filtering[J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence，2013，35(6)：1397-1409.

[14] 徐　晶，刘　鹏，唐降龙. 大气光估计对单幅图像去雾复原的影响[J]. 智能计算机与应用，2012，2(3)：68-71.
Xu J，Liu P，Tang X L. Impact on single image haze removal caused by the estimation of atmospheric light[J]. Intelligent Computer and Applications，2012，2(3)：68-71.

[15] 张国权，李战明，李向伟，等. HSV 空间中彩色图像分割研究[J]. 计算机工程与应用，2010，46(26)：179-181.
Zhang Guoquan，Li Zhanming，Li Xiangwei，et al. Research on color image segmentation in HSV space[J]. Computer Engineering & Applications，2010，46(26)：179-181.

[16] Tarel J，Hautiere N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image[C]// IEEE Inter. Conf. on Computer Vision，2009：2201-2208.

[17] Berman D，Treibitz T，Avidan S. Non-local image dehazing[C]// IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition，2016：1674-1682.

[18] 刘海波，汤群芳，杨　杰. 去雾图像质量客观评价方法研究[J]. 量子电子学报，2016，33(1)：20-28.
Liu H B，Tang Q F，Yang J. Research of objective assessment method for defogged image quality[J]. Chinese J. of Quantum Electron.，2016，33(1)：20-28.

作者简介：

何柯辰(1996－)，男，遂宁人，硕士研究生，主要从事图像处理方面的研究；

刘　奇(1966－)，男，成都人，博士，教授，研究生导师，主要从事信号与信息处理、生物医学工程方面的研究。

(上接第 753 页)

[15] 彭海峰，巩　岩，赵　磊. 光刻投影物镜中柔性多弹片支撑方式的性能分析[J]. 光电工程，2013，40(2)：71-75.
Peng Haifeng，Gong Yan，Zhao Lei. Performance index analysis of the support of lithographic lens with multi flexural brackets[J]. Opto-Electronic Engineering，2013，40(2)：71-75.

[16] 华洋洋，巩　岩. 光刻物镜高精度挠性结构镜框设计及分析[J]. 光电工程，2013，40(7)：39-43.
Hua Yangyang，Gong Yan. Design and analysis for the high-precision lens flexible structure of lithography objective lens[J]. Opto-Electronic Engineering，2013，40(7)：39-43.

[17] 赵　磊，彭海峰，于新峰，等. 具有整体径向挠性的光学元件多点均匀支撑结构[J]. 光电工程，2015，42(10)：43-48.
Zhao Lei，Peng Haifeng，Yu Xinfeng. et al. Lens support structure of multi point equal supporting with wholly radical freedom[J]. Opto-Electronic Engineering，2015，42(10)：43-48.

作者简介：

刘　绚(1997－)，女，四川资阳人，硕士研究生，主要从事光学检测方面的研究；

贾　辛(1982－)，男，博士，副研究员，硕士生导师，主要从事亚纳米级面形检测方面的研究。

(上接第 746 页)

Song Zhenqing. The control system design of DMD high frame rate dynamic scene simulator[D]. Xi'an：Xidian University，2017.

[13] 刘　龙. 基于 DMD 的动态同步高帧频投影技术研究[D]. 西安：西安电子科技大学，2020.
Liu Long. Research on dynamic synchronous high frame rate projection technology based on DMD[D]. Xi'an：Xidian University，2020.

[14] Texas Instruments. DLP® Discovery™ DLPC410 DMD Digital Controller[EB/OL]. (2020-02)[2021-04-20]. https://www.ti.com.cn/.

[15] Texas Instruments. DLP7000 DLP® 0.7 XGA 2x LVDS Type A DMD[EB/OL]. (2019-6)[2021-04-20]. https://www.ti.com.cn/.

[16] Xilinx. FIFO Generator v13.2 Product Guide[EB/OL]. (2017-10)[2021-04-20]. https:// china.xilinx.com/.

作者简介：

张　林(1997－)，男，江苏泰兴人，硕士研究生，主要研究方向为嵌入式数字系统设计；

胡丹峰(1978－)，男，安徽蚌埠人，硕士，副教授，主要研究方向为嵌入式系统应用和生物医学信号处理。