

文章编号:1007-2780(2018)08-0669-07

一种灰度梯度暗通道图像自动调焦方法

王佳松, 孙海江*, 江 山, 王嘉成

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:针对目前调焦评价函数存在的灵敏度低、鲁棒性差、易进入饱和区等问题,提出了一种融合灰度梯度和暗通道 L_0 范数的调焦评价函数。首先分析并证明了清晰图像与离焦图像相比具有亮度更大、更稀疏的暗通道这一特性,然后选择了暗通道的 L_0 范数对图像的离焦情况进行评价,最后融合图像灰度梯度与暗通道的 L_0 范数构建了一种新的调焦评价函数。在对森林、公路、天空中的无人机、室内静物等多种场景的调焦实验中,使用单核 DSP 处理速度为 9 Hz,基本满足实时性;受到外界干扰时函数曲线没有出现伪峰;在离焦比较严重的情况下没有进入饱和区,仍然能够保持一定的陡峭度。实验结果表明,本文提出的调焦评价函数具有较好的灵敏度和鲁棒性,可以满足光电成像系统对实时调焦的要求。

关键词: 自动调焦;调焦评价函数;暗通道;清晰度评价

中图分类号: TP394.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20183308.0669

Auto-focusing method based on gray gradient and dark channel

WANG Jia-song, SUN Hai-jiang*, JIANG Shan, WANG Jia-cheng

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to solve the problem of current focus measure function, such as low sensitivity, poor robustness and easy to enter the saturated zone, a new function based on gray gradient and dark channel is proposed. Firstly, a characteristic is analyzed and proved that a clear image has brighter and sparser dark channel compared with a defocus image. Secondly, the L_0 norm of dark channel is selected to estimate the degree of defocus. Finally, a new focus measure function is constructed by integrating the gray gradient and the L_0 norm of dark channel. The processing speed of single core of DSP is 9 Hz, which basically meets real-time performance in focusing experiments on various scenes such as forests, roads, drones in the sky, indoor still life, etc. Also, pseudo peak cannot be observed when the focusing process is disturbed and the function can still maintain a certain degree of steepness when the defocus is serious. A series of experiment results showed that the focus measure function proposed in this paper has good sensitivity and robustness, which can meet the real-time focusing requirement in electro-optical imaging system.

Key words: auto-focusing; focus measure function; dark channel; definition evaluation

收稿日期:2018-06-20;修订日期:2018-07-26.

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(No.61602432)

Supported by Young Scientists Found of the National Natural Science Foundation of China(No.61602432)

* 通信联系人, E-mail: sunhaijiang@126.com

1 引言

为了达到对探测范围内各距离物体均能够清晰成像的要求,一个光电成像系统通常具备一定的调焦能力。基于图像的自动调焦技术主要是通过选取适当的调焦评价函数对图像清晰度进行判断,然后按照调焦搜索算法控制调焦机构,直到调焦评价函数达到极值点^[1]。

常用的调焦评价函数主要有灰度梯度类函数、频域分析函数和信息熵函数^[2-6]:灰度梯度类函数主要使用不同的梯度算子与图像进行卷积,然后使用梯度图像的亮度值作为评价函数。这种方法的计算量很小,抗噪声能力较弱,现有的研究大多是选择不同的梯度算子以提升灵敏度^[7-8],并设置梯度阈值以减少噪声的干扰^[8-19],但算法提升效果比较有限;频域分析函数主要使用傅里叶变换或小波变换将图像分解成不同频率的信息,然后使用图像的高频分量来判断图像的清晰度。文献[10]在小波调焦评价函数的基础上,根据 HVS 特性计算高频分量的权重,取得了较好的效果,但进行多层小波分解的计算量很大,难以满足实时性的要求;信息熵函数一般直接使用图像的信息熵作为调焦评价函数,这种函数的灵敏度很低,目前针对信息熵函数还没有很好的改进方法。

本文基于图像的暗通道理论,提出了一种融合灰度梯度信息与暗通道 L_0 范数的调焦评价函数。首先,分析得到了清晰图像具有亮度更大、更稀疏的暗通道这一结论,说明了暗通道也可以成为评价图像清晰度的标准之一,然后使用 L_0 范数表示图像的稀疏性,构建了融合 Tenengrad 函数和暗通道 L_0 范数的调焦评价函数。经实验验证,本文提出的调焦评价函数计算量介于灰度梯度函数和频域分析函数之间;受到外界干扰时函数曲线没有出现伪峰,具有很强的鲁棒性;在离焦比较严重的情况下没有进入饱和区,仍然能够保持一定的陡峭度。

2 离焦模型

离焦是图像退化的一种,图像退化的一般模型^[11]如图 1 所示:

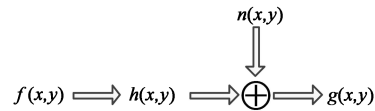


图 1 图像退化模型

Fig.1 Image degradation model

其表达式为:

$$g(x, y) = f(x, y) * h(x, y) + n(x, y), \quad (1)$$

其中: $f(x, y)$ 为原始图像, $h(x, y)$ 为点扩散函数, $n(x, y)$ 为成像噪声, $g(x, y)$ 为经过退化系统后得到的退化图像。

对于离焦图像而言,点扩散函数 $h(x, y)$ 一般可视为一个均匀分布的圆盘函数^[12]。

$$h(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{\pi r^2} & x^2 + y^2 \leq r^2 \\ 0 & x^2 + y^2 > r^2 \end{cases}, \quad (2)$$

其中: r 是离焦模糊半径。

公式(1)、(2)说明离焦图像是清晰图像在圆形邻域内的加权平均,因此经过离焦模糊后的图像在空域上表现为对比度降低,相邻像素之间的差异变小;在频域上表现为高频分量减少^[13]。根据这些特性,目前的调焦评价函数主要分为灰度梯度函数、频域分析函数和信息熵函数。

3 调焦评价函数

3.1 灰度梯度函数

图像的细节纹理特征可以用灰度的梯度来表示,如图 2 所示。基于 Sobel 算子的 Tenengrad

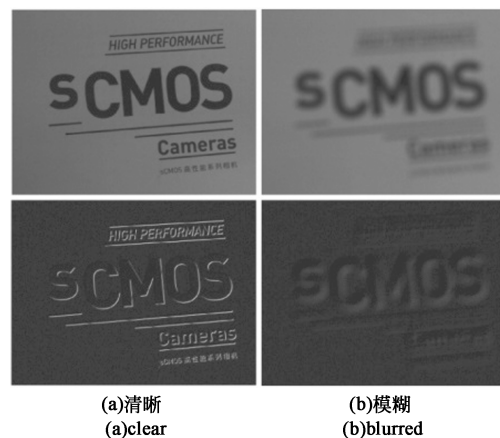


图 2 清晰图像与模糊图像的灰度边缘信息

Fig.2 Gray edge of clear image and blurred image

函数是一种最常见的灰度梯度类调焦评价函数,其表达式为:

$$E = \sum_x \sum_y [s(x, y)]^2, \quad (3)$$

其中: $s(x, y)$ 表示点 (x, y) 上图像与 Sobel 算子的卷积:

$$s(x, y) = \sqrt{G_x(x, y)^2 + G_y(x, y)^2}, \quad (4)$$

$$S_x(x, y) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{pmatrix}, S_y(x, y) = \begin{pmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

式中: $G_x(x, y) = f(x, y) * S_x(x, y)$, $G_y(x, y) = f(x, y) * S_y(x, y)$ 。

Tenengrad 函数综合考虑了图像在水平方向和竖直方向上的梯度信息,但计算结果很容易受

到噪声干扰。因此文献[8-9]均提出了在 Tenengrad 函数中加入灰度梯度阈值,只有超过阈值的梯度才会被认为是有效梯度。加入的灰度梯度阈值约束条件可表示为:

$$G(x, y) = \begin{cases} f(x, y) * S(x, y) & f(x, y) * S(x, y) \geq T \\ 0 & f(x, y) * S(x, y) < T \end{cases}, \quad (6)$$

其中:新引入的灰度梯度阈值 T 可采用 Otsu 分割算法求解^[14],在适当增加计算量的基础上可有效抑制噪声对计算结果的影响。

3.2 频域分析函数

频域分析函数主要使用图像的高频分量来判断图像的清晰度,图像越清晰,高频分量越丰富。基于频域分析的方法主要包括傅里叶变换法和小波变换法,其中小波变换可以兼顾空域与频域信息,是一种比较理想的调焦评价函数。

对于一幅数字图像,一级小波分解会将图像分为不同频率和方向的4个子带:低频子带 LL 表示了图像的大体结构;高频子带 HL、LH 和 HH 分别表示了图像水平方向、竖直方向和对角方向的边缘特性。对标准 Lena 图像的一级小波分解结果见图3所示。

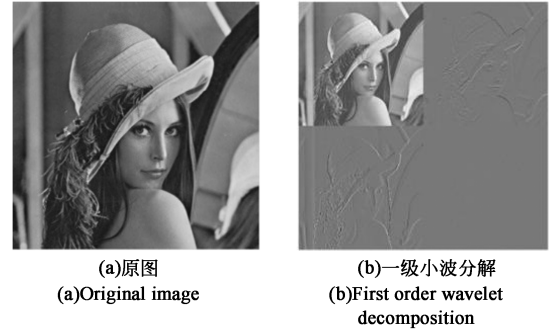


图3 图像的小波变换

Fig.3 Wavelet transform of image

基于小波变换的调焦评价函数使用高频子带来判断图像的清晰度,其表达式如下:

$$M_{WT} = \sum_{(x, y) \in S_{HL}} W_{HL}^2(x, y) + \sum_{(x, y) \in S_{LH}} W_{LH}^2(x, y) + \sum_{(x, y) \in S_{HH}} W_{HH}^2(x, y), \quad (7)$$

其中: S_{HL} 、 S_{LH} 、 S_{HH} 表示高频子带图像窗口, W_{HL} 、 W_{LH} 、 W_{HH} 表示分解后的高频系数。

3.3 信息熵函数

信息熵表示的是图像的信息量,清晰图像的信息熵大于模糊图像的信息熵,因此图像的信息熵也可以作为一种调焦评价函数。图像的信息熵可表示为:

$$H = - \sum_{k=0}^G p(k) \log p(k), \quad (8)$$

其中: G 是一幅图像的最高灰度级, $p(k)$ 表示像素的灰度为 k 的概率。

目前针对调焦评价函数的研究大都是在以上三类函数的基础上,对权值、阈值的计算或梯度算子做出适应性改动。虽然在一定程度上能够提升调焦评价函数的性能,但却很难避免三类函数在原理上的缺陷:灰度梯度函数的灵敏度不高,鲁棒性差;频域分析函数的计算量很大;信息熵函数效果很不稳定,难以保持单峰

性,并且三类函数在离焦严重的情况下函数陡峭性都很低,因此,本文的主要目的在于找到一种新的属性作为评价图像清晰度的标准。经查阅文献以及大量实验,发现图像的暗通道与图像清晰度具有一定联系。

4 融合暗通道的调焦评价函数

4.1 暗通道理论

根据何凯明博士^[15]的研究,在绝大多数非天空的局部区域里,某一些像素总会有至少一个颜色通道具有很低的值,即该区域光强度的最小值是一个很小的值。对于数字图像 f ,其暗通道可用式(11)表达:

$$f^{\text{dark}}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} [\min_{c \in (r, g, b)} f^c(y)], \quad (11)$$

式中: f^c 表示彩色图像的每个通道, $\Omega(x)$ 表示以

像素 x 为中心的一个窗口,对于灰度图像,则有

$$\min_{c \in (r, g, b)} f^c(y) = f(y)。$$

通过对 3200 幅图像的实验以及相应的理论推导^[16],人们发现绝大多数清晰图像的暗通道是稀疏的,并且模糊图像的暗通道比清晰图像要稠密,如图 4 所示。



图 4 清晰图像与模糊图像的暗通道图

Fig.4 Dark channel of clear image and blurred image

4.2 构建调焦评价函数

根据公式(1)在不考虑噪声的情况下,离焦图像的二维离散形式可表示为:

$$g(x, y) = f(x, y) * h(x, y) = \sum_{(m, n) \in \Omega_h} f(x + m, y + n) \cdot h(m, n), \quad (9)$$

若计算暗通道的邻域尺寸大于模糊核的尺寸,即 $\Omega_d \geq \Omega_h$ 时,有

$$g(x, y) \geq \sum_{(m, n) \in \Omega_h} \min_{(i, j) \in \Omega_d} [f(i, j)] \cdot h(m, n) = \min_{(i, j) \in \Omega_d} [f(i, j)] \cdot \sum_{(m, n) \in \Omega_h} h(m, n) = \min_{(i, j) \in \Omega_d} [f(i, j)], \quad (10)$$

点 (x, y) 是邻域内的暗像素,则有

$$g^{\text{dark}}(x, y) \geq f^{\text{dark}}(x, y), \quad (12)$$

公式(12)说明了与清晰图像的暗通道相比,离焦图像的暗通道具有更大的亮度值。因此,暗通道也可以像灰度梯度、频域信息和信息熵一样,成为评价图像清晰度的标准之一。在使用图像暗通道构建调焦评价函数时,最常见的方法就是像公式(3)和公式(7)一样,计算暗通道灰度值的平方和。这种方法通过平方操作增加了函数在峰值附近的灵敏度,但在离焦较为严重情况下函数会陷入饱和区。饱和区内的函数斜率很低,函数值基本没有变化,这对实时调焦来说是十分不利的。因此,本文在构建调焦评价函数时并没有直接累加暗通道的亮度值,而是改为计算暗通道的稀疏性。

图像的 L_0 范数是指非零元素的个数,可以用来表示图像的稀疏性,根据公式(12)可以很容易

的得到公式(13):

$$\|g^{\text{dark}}(x, y)\|_0 \geq \|f^{\text{dark}}(x, y)\|_0. \quad (13)$$

式(13)说明了离焦图像的暗通道更稠密这一结论。

为了进一步证明使用暗通道 L_0 范数构建调焦评价函数的优越性,本文使用多种算法对调焦过程中的图像序列进行清晰度评价,得到结果如图 5 所示。可以明显看出暗通道平方和函数虽然具备单峰性,但灵敏度、陡峭性等性能均落后于暗通道 L_0 范数。

此外,通过大量实验发现仅使用单一属性构建的调焦评价函数很难对各种场景均具备适应能力。因此本文综合考虑灰度梯度信息与暗通道的稀疏性,建立新的调焦评价函数如公式(14)所示:

$$E = \alpha \cdot \sum_x \sum_y [s(x, y)]^2 + \beta \cdot (H \cdot V - \|g^{\text{dark}}(x, y)\|_0), \quad (14)$$

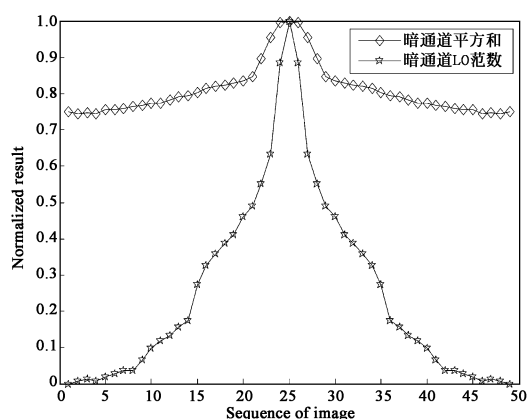


图 5 两种暗通道函数的性能比较

Fig.5 Performance comparison of two dark channel functions

其中: H 和 V 表示图像的水平、竖直方向分辨率, α 和 β 是加权因子。

5 实验结果

为验证本文算法效果,实验采用 Baslar 公司

的 acA2000-340km 相机和 SPACECOM 变焦镜头采集图像,图像分辨率为 640×512 ;图像的采集和处理使用基于 TMS320C6678 多核 DSP 的嵌入式图像处理平台。

5.1 实时性分析

由公式(14)可知,本文算法计算了 Tenengrad 函数和图像的暗通道,因此计算量要大于灰度梯度函数。为综合比较各算法实时性,将算法移植到嵌入式图像处理平台中,得到各算法的计算时间如表 1 所示。

表 1 调焦评价函数计算时间

Tab.1 Calculation time of focus measure function

	Tenengrad	Wavelet	信息熵	本文算法
时间/ms	2.893	509.157	2.137	116.853

本文算法在实时性方面介于灰度梯度函数和频域分析函数之间。在使用 DSP 单一核心时,运算速度约为每秒 9 帧,可满足实时调焦的需求。

表 2 调焦评价函数归一化结果

Tab.2 Normalization result of focus measure function

	SCMOS	SCMOS	SCMOS	SCMOS	SCMOS	SCMOS
Tenengrad	0.154 5	0.178 0	0.146 7	0.179 8	0.342 7	1.000 0
Wavelet	0.212 9	0.225 1	0.221 3	0.256 1	0.369 7	1.000 0
信息熵	0.930 9	0.929 0	0.946 1	0.947 8	0.964 7	1.000 0
本文算法	0	0.141 6	0.211 1	0.263 3	0.386 6	1.000 0

5.2 性能分析

在实验中,控制镜头调焦位置从零开始沿一个方向运动,并且在运动过程中人为晃动一次镜头以测试调焦评价函数的鲁棒性,然后依次计算多种调焦评价函数,将计算结果记录后导出到上位机,得到经过归一化后的调焦评价函数结果如表 2 所示,函数曲线如图 6 所示。

可以看出,本文提出的调焦评价函数在整个区间内的灵敏度高于其他算法;在第 1~9 帧之间离焦比较严重的情况下,本文算法没有进入饱和区,仍然能够保持较高的陡峭度;在聚焦点附近的陡峭度与 Tenengrad 函数和 Wavelet 函数基本相

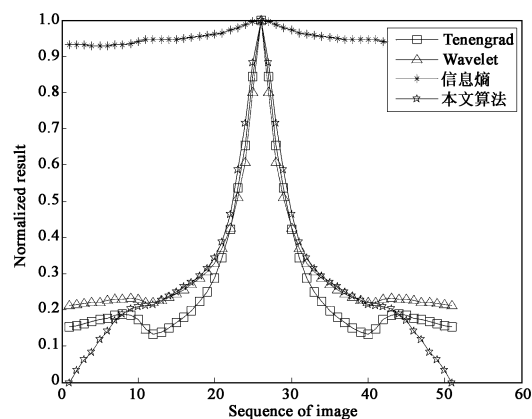


图 6 调焦评价函数性能比较

Fig.6 Comparison of focus measure function

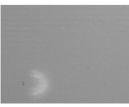
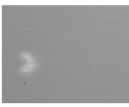
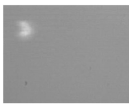
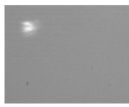
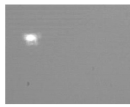
同,远大于信息熵函数;在第 10 帧左右, Tenengrad 函数、Wavelet 函数和信息熵函数均出现了不同高度的伪峰,但本文算法的鲁棒性很强,仍然能够保持函数值上升的趋势。

5.3 场景适应性分析

在实际的光电成像系统中,需要面对不同背景、不同对比度、目标移动等多种情况。因此本部分实

验测试了对森林、公路、室外建筑物、天空中的无人机、室内静物等多种物体的自动调焦,部分测试结果如表 3 所示。本实验的难点在于很多物体都是非静态目标,如森林会随风轻微摆动、公路上有车经过、无人机在空中随机运动等。但最后的测试结果表明,本文提出的调焦评价函数具有良好的环境适应能力,在不同场景下均能够正确找到聚焦位置。

表 3 多场景自动调焦测试结果
Tab.3 Result of automatic focusing for multiple scenes

场景一						
归一化结果	0	0.018 5	0.048 4	0.076 6	0.257 5	1.000 0
场景二						
归一化结果	0	0.021 0	0.048 4	0.128 5	0.509 6	1.000 0
场景三						
归一化结果	0	0.015 2	0.054 2	0.302 4	0.774 6	1.000 0

6 结 论

根据离焦图像的暗通道比清晰图像要稠密这一特性,提出了一种融合图像灰度梯度和暗通道 L_0 范数的调焦评价函数。该函数在基于 TMS320C6678

多核 DSP 的嵌入式图像处理平台上可实现每秒 9 帧的单核处理速度,如果充分利用 8 核资源,算法速度可提升 6~7 倍。实验结果表明本文算法在离焦严重的情况下仍然能够保持较高的陡峭度,并且没有像其他算法一样出现伪峰,是一种可以兼顾实时性、灵敏度和鲁棒性的自动调焦方法。

参 考 文 献:

[1] 徐贵力,刘小霞,田裕鹏,等. 一种图像清晰度评价方法[J]. 红外与激光工程,2009,38(1):180-184.
XU G L, LIU X X, TIAN Y P, *et al.* Image clarity-evaluation-function method [J]. *Infrared and Laser Eng.*, 2009, 38(1):180-184. (in Chinese)

[2] 张来线,孙华燕,郭惠超,等. 基于图像灰度梯度最大值累加的自动调焦算法[J]. 光子学报,2013,42(5):605-610.
ZHANG L X, SUN H Y, GUO H C, *et al.* Auto focusing algorithm based on largest gray gradient summation [J]. *Acta Photonica Sinica.*, 2013, 42(5): 605-610. (in Chinese)

[3] 陈晓彬. 基于小波的自动对焦算法研究[J]. 通信技术,2010,43(6):210-212.
CHEN X B. Study on auto-focus algorithm based on wavelet transform [J]. *Communications Technology*, 2010, 43 (6):210-212. (in Chinese)

[4] 王永红,柏天舒,但西佐,等. TFT-LCD 面板光学检测自动聚焦算法研究与比较[J]. 液晶与显示,2016,32(4): 339-345.

- WANG Y H, BO T S, DAN X Z, *et al.* Research and comparison of TFT-LCD panel optical detection auto-focus algorithm [J]. *Liquid Crystals and Displays*, 2016, 32(4):339-345. (in Chinese)
- [5] 赵志彬,刘晶红. 基于图像处理的航空成像设备自动调焦设计[J]. *液晶与显示*, 2010, 25(6):863-868.
- ZHAO Z B, LIU J H. Auto-focusing method for airborne image equipment based on image processing [J]. *Liquid Crystals and Displays*, 2010, 25(6):863-868. (in Chinese)
- [6] 邱胜根,周杰,刘旭,等. 阵列像素器件投影显示系统中自动对焦评价函数研究[J]. *光学学报*, 2004, 24(4):460-464.
- QIU S G, ZHOU J, LIU X, *et al.* Research of sharpness evaluation function in array pixel device projection display's auto focusing system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(4):460-464. (in Chinese)
- [7] 张艳超,赵建,韩希珍,等. SUSAN 清晰度评价函数在自动对焦中的应用[J]. *中国光学*, 2014, 7(2):240-244.
- ZHANG Y C, ZHAO J, HAN X Z, *et al.* Application of SUSAN definition evaluation function in auto-focusing [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(2):240-244. (in Chinese)
- [8] 洪裕珍,任国强,孙健. 离焦模糊图像清晰度评价函数的分析与改进[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(12):3401-3408.
- HONG Y Z, REN G Q, SUN J. Analysis and improvement on sharpness evaluation function of defocused image [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(12):3401-3408. (in Chinese)
- [9] 莫春红,刘波,丁璐,等. 一种梯度阈值自动调焦算法[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(1):323-327.
- MO C H, LIU B, DING L, *et al.* A gradient threshold auto-focus algorithm [J]. *Infrared and Laser Eng.*, 2014, 43(1):323-327. (in Chinese)
- [10] 黄德天,刘雪超,张红胜,等. 基于人类视觉的快速自动调焦法[J]. *液晶与显示*, 2014, 29(5):768-776.
- HUANG D T, LIU X C, ZHANG H S, *et al.* Fast auto-focusing method based on human visual system [J]. *Liquid Crystals and Displays*, 2014, 29(5):768-776. (in Chinese)
- [11] 徐晓睿,戴明,尹传历. 基于小波变换的 RL 湍流退化图像复原算法[J]. *液晶与显示*, 2017, 32(10):822-827.
- XU X R, DAI M, YIN C L. RL turbulence degraded image restoration algorithm based on wavelet transform [J]. *Liquid Crystals and Displays*, 2017, 32(10):822-827. (in Chinese)
- [12] KUNDUR D, HATZINAKOS D. Blind image deconvolution [J]. *IEEE Trans. Signal Processing Magazine*, 1996, 13(3):43-64.
- [13] 翟永平,周冬翔,刘云辉,等. 聚焦函数性能评价指标设计及最优函数选取[J]. *光学学报*, 2011, 31(4):0418002.
- ZHAI Y P, ZHOU D X, LIU Y H, *et al.* Design of evaluation index for auto-focusing function and optimal function selection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(4):0418002. (in Chinese)
- [14] 何志勇,孙立宁,陈立国. Otsu 准则下分割阈值的快速计算[J]. *电子学报*, 2013, 41(2):267-272.
- HE Z Y, SUN L N, CHEN L G. Fast computation of threshold based on otsu criterion [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2013, 41(2):267-272. (in Chinese)
- [15] HE K M, SUN J, TANG X. Single image haze removal using dark channel prior [C]. *CVPR*, 2009:1956-1963.
- [16] PAN J SH, SUN D Q, PFISTER H, *et al.* Blind image deblurring using dark channel prior [C]. *CVPR*, 2016: 1627-1636.

作者简介:王佳松(1992—),男,黑龙江鸡西人,硕士,研究实习员,2014 年于哈尔滨工程大学获得学士学位,2016 年于哈尔滨工程大学获得硕士学位,主要从事高速图像跟踪方面的研究。E-mail:wjssquid@163.com

孙海江(1980—),男,吉林辉南人,博士,副研究员,主要从事目标识别与跟踪技术及高清视频图像增强显示方面的研究。E-mail:sunhaijiang@126.com