

基于光斑与图像特征的动态激光干扰效果评估

钱方^{1,2} 孙涛¹ 郭劲¹ 王挺峰¹

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 激光主动成像系统通常用于重要区域监视和危险目标识别,其上的光电成像探测器易受敌方激光干扰产生局部饱和甚至损伤,导致目标识别失效。在实际中,激光干扰功率和光斑位置等因素均时刻发生变化,导致激光对每帧图像的干扰效果也不尽相同,因此,动态的衡量激光干扰效果具有重要意义。提出了一种基于光斑特征和图像特征的无参考动态激光干扰图像评估算法,通过加速分隔测试特征(FAST)算法提取特征点,并运用特征点匹配确定图像的目标区域,在该目标区域利用饱和像素数和光斑相对位置变化表示光斑特征对图像质量的影响,利用图像中特征点和边缘点分布特性以及边缘清晰度表示图像特征的变化,将 5 个评价因子相乘,得到归一化的评估指标。利用激光主动成像识别系统对设定目标进行照明成像识别实验,采集不同干扰功率和干扰方位的激光干扰图像。基于提出的无参考动态特征评估算法对获得的连续多帧激光干扰图像进行评估,结果表明该算法能够准确评价不同功率、方位激光的干扰效果,客观反映光斑遮盖下自动目标识别算法的失效程度。

关键词 图像处理;图像质量评价;激光干扰;特征点;目标识别

中图分类号 TN977 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.0609004

Dynamic Assessment of Laser-Dazzling Effects Based on the Character of Laser-Spot and Image Feature

Qian Fang^{1,2} Sun Tao¹ Guo Jin¹ Wang Tingfeng¹

¹ State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

² University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Laser active imaging systems are usually used in important region surveillance and dangerous target identification. However, the photoelectric imaging detector in the imaging systems is easy to be disturbed from opponents and this leads to errors of the recognition. In practice, the laser power and the spot position change momentarily and this leads to different laser-dazzling effects in every frame. Therefore, dynamic assessments of laser-dazzling effects must be better understood. A new no-reference dynamic feature metric (DFM) assessment algorithm based on the character of the laser spot and image feature is proposed. The features from accelerated segment test (FAST) algorithm is used to extract feature points of the target image and disturbed image. The target area is obtained via feature-point matching, and the characteristic of the laser spot reflects the image quality through the saturated pixel number and spot position in the target area. After that, the distribution of the feature points, edges and edge definition reflect the varieties of the image feature. The normalized DFM is obtained via product of the five factors above. The luminance imaging experiment is performed for the targets by utilizing the laser active imaging system. In the experiment, the disturbed images of different disturbing powers and different spot positions are obtained. The proposed DFM algorithm is used to evaluate the newly obtained laser-dazzling images, and the results show that the DFM gives a more reasonable evaluation result for different laser-dazzling images. The evaluation results reflect the invalidation of the target identification algorithm objectively.

Key words image processing; image quality assessment; laser-dazzling; feature points; target identification

OCIS codes 100.1160; 110.2960; 110.3008; 140.3330

收稿日期: 2013-12-19; 收到修改稿日期: 2013-12-31

基金项目: 国家重点实验室自主基础研究(SKLLIM1203-01)、长春市科技计划项目(2013270)

作者简介: 钱方(1987—),女,博士研究生,主要从事图像处理方面的研究。E-mail: qfmail@sina.cn

导师简介: 郭劲(1964—),男,研究员,博士生导师,主要从事激光与物质相互作用方面的研究。

E-mail: guojin_1964@126.com

1 引言

激光主动成像克服了传统被动成像易受环境光影响的缺点,具有分辨率高、不受光照条件限制等优点,然而这类系统中的光电成像器件容易受到激光干扰产生饱和甚至损伤,导致系统在后续的目标识别和跟踪过程中失效。在实际应用中,激光主动成像系统很难获得背景纯净和目标无失真的原始图像,此外,随着激光干扰功率以及光斑位置的不断变化,连续多帧干扰图像所反映的干扰效果不尽相同。因此,可以从分析光斑的分布信息以及光斑遮挡对图像特征变化的影响角度出发,建立无参考的动态评估模型来评价激光干扰效果,该评价结果对于指导激光干扰设备的研制和光电探测装备的激光防护,都具有重要的研究意义和实用价值。

图像质量评价方法包括全参考、部分参考和无参考评价方法,但是全参考和部分参考评价方法都需要提供无失真的原始图像或原始图像的部分信息,而在实际应用中原始图像信息很难获取,此时需要使用无参考图像质量评价方法。常见的无参考图像质量评价算法有 Wang 等^[1]提出的一种针对联合图像专家小组(JPEG)压缩图像的无参考评价方法,该方法通过块效应评估图像的模糊程度,还有基于图像变换域^[2]的评价方法,该方法通过计算图像中的高频分量的大小判断图像的清晰程度,基于梯度函数^[3]的评价方法,该方法认为图像的梯度幅值越大,则图像的边缘越锐利,图像清晰度越高,基于熵函数^[4]的评价方法,该方法认为图像越清晰则其熵函数值越大。以上这些方法计算简单,但有些方法只针对某一类的失真图像进行评估,而激光干扰图像是一种基于掩盖效应的局部严重失真图像,光斑的特征以及光斑对图像信息的遮盖程度才是影响图像质量的关键,以上因素需要被考虑到评估方法中。此外,在实际中激光干扰主动成像系统是一个动态的过程,实验中将连续获取多帧不同干扰效果的图像,以上的评价方法都适用于评价单幅静态图像的质量,而无法动态的衡量激光的干扰过程,导致评价结果准确性降低。

本文在分析了激光干扰图像特征、光斑性质变化以及光斑分布对目标遮挡程度的基础上,提出了一种结合光斑特征和图像特征的无参考动态特征评估算法(DFM)。算法计算干扰过程中光斑大小、强度以及光斑距离目标中心的距离,分析光斑遮挡对图像目标区域特征点提取、目标边缘复杂度以及清晰度的影响,并利用这些评价因子得到归一化的图

像质量评价价值,并通过实验对评估模型的性能进行了分析。

2 基于光斑和图像特征的动态特征评估算法分析

通过分析图像受到激光干扰后特征点、图像特征信息以及光斑自身特征的变化情况,提出了一种光斑特征和图像特征相结合的动态特征激光干扰效果评估算法,该算法可用于衡量激光主动照明识别及目标跟踪算法的失效程度,并指导系统的研制与改进。

2.1 光斑特征动态评价函数分析

在激光干扰图像中光斑通常位于图像的某一固定区域,该区域的像素灰度值基本相同,随着激光功率的增强,光斑逐渐变大,目标被遮挡的范围增大,图像质量下降,因此可以通过图像中饱和像素的数量来动态衡量激光光斑的大小,并作为评价光斑特征改变对图像质量影响的评价因子之一。

饱和像素率函数 N 定义为

$$N = \frac{N_s}{N_p}, \quad (1)$$

为了减小计算量,文中仅在图像规定的目标区域计算评价因子。式中, N_s 为目标区域内饱和像素点数目, N_p 为目标区域内所有像素点个数。激光干扰会使一部分像素达到饱和,完全饱和时像素灰度值变为 255。实际中,若干扰图像中的像素灰度值大于 245,则认为该像素达到饱和。 N 的值越大,说明干扰图像目标区域中达到饱和的像素点越多,光斑覆盖的面积越大,激光干扰效果越明显。

此外,虽然激光干扰仅发生在图像局部区域,但是当激光干扰功率相同时,光斑出现的位置不同,干扰效果也会有所不同。当光斑接近目标时,由于掩盖效应,目标区域内可用的识别信息减少,而当光斑远离目标时,细节信息受到的干扰就相对较小。因此可以通过光斑与目标中心的距离衡量激光干扰对目标的遮挡程度。本文选择激光光斑位置信息作为一个衡量光斑特征改变的比较因子,定义光斑重要性表示光斑位置的改变对图像质量的影响。

光斑重要性函数 D 定义为

$$D = \sqrt{(x_0 - x_t)^2 + (y_0 - y_t)^2} / d_{\max}, \quad (2)$$

式中 x_0 、 y_0 为激光光斑中心位置, x_t 、 y_t 为目标中心位置, d_{\max} 为目标区域内单像素到目标中心的最大距离。为了求得设定目标和光斑的准确位置信息,

对模板图像和激光干扰图像采用自适应阈值法选取阈值,并进行二值化处理。在模板图像中运用最小二乘法可以计算目标中心位置,通过坐标变换得到该中心在干扰图像中的相对位置,并与干扰图像中得到的光斑中心位置进行比较计算。

激光光斑位置计算过程如下:

1) 对激光干扰图像的二值图像进行区域分割,选取二值图中任一点为中心,如果该中心点上、下、左或右某位置点的像素值与其不同,认为此区域不连通,反之则连通。遍历整个图像,据此得到的若干个连通区域;

2) 在图像采集的过程中发现,图像二值化后,如果灰度值为 1 的区域面积大于总面积的 3% 时,人眼就可以明显的识别该区域。因此,若某连通区域中像素个数大于图像总个数的 3%,则认为该区域可能存在激光光斑,否则舍弃该区域;

3) 由于光斑形状一般近似为圆形,所以在保留的区域中选择长宽比趋于 1 的区域为激光光斑区。当激光功率足够强时,激光光斑区所包含的像素个数通常最多,最后运用最小二乘法计算光斑中心。 D 的值越大,说明干扰图像中光斑距离目标越远,对目标特征点、边缘等信息的提取影响越小,图像质量越好,目标识别受到激光干扰的影响程度越小。

2.2 图像特征动态评价函数分析

激光主动成像系统需要利用目标局部特征进行目标检测与匹配识别,一般通过提取目标的特征点来实现。简单来说,图像的特征点就是图像中一些灰度变化剧烈的点或图像边缘曲线上具有曲率极大值的点,而识别和跟踪过程就是先从模板图像上的一个特征点开始,再在干扰图像中搜索出一批候选对应点,运用不同算法选出最佳匹配的候选点作为该特征点的匹配点,通过对匹配点的操作确定目标位置。所以当图像受到激光干扰后,光斑周围像素的灰度信息发生改变,图像的亮度和对比度发生改变,图像的边缘、纹理等细节信息被光斑遮挡,图像的清晰度下降,这些都导致特征点提取和匹配算法失效。

由于光斑的遮挡将导致该区域的像素灰度趋于饱和,特征点提取算法失效,所以本文选择特征点数量的变化情况作为衡量光斑对图像灰度变化影响的评价因子,定义为特征点保持度。本文中运用加速分隔测试特征(FAST)方法计算图像特征点,选择图像中某一像素点为圆心,在以 3.4 pixel 长度为半径的圆上的 16 pixel 点中,若至少有 9 个连续的像

素点灰度值全比中心像素点大或者小,则当前像素点定义为一个 FAST 特征点。用此方法遍历整幅图像,可以得到若干特征点^[5-11]。通过特征点匹配划分出图像中的目标区域,由于这类成像识别系统通常以仅包含目标的图像作为基础模板,因此本文只在目标区域中计算特征点的变化情况。

特征点保持度函数 S 定义为

$$S = \gamma \times \delta \times \frac{N_R}{H \times V}, \quad (3)$$

$$\gamma = \frac{1}{1 + 1/\{1 + \log_2[N_R(i)_{\max}/H]\}},$$

$$\delta = \frac{1}{1 + 1/\{1 + \log_2[N_R(i)_{\max}/V]\}}, \quad (4)$$

式中 H 和 V 分别为干扰图像目标区域的行和列包含的像素数, N_R 表示整个目标区域提取到的特征点数目, α 和 β 为加权值, $N_R(i)_{\max}$ 或 $N_R(j)_{\max}$ 是包含特征点数目最多的那一行或列的特征点数,当某一行或列中的特征点数目接近行或列中像素数时, γ 和 δ 接近 1。 S 的值越大,说明目标区域的特征点比较密集,图像中灰度信息的损失比较小,干扰图像特征点的提取受到激光干扰的影响程度越小。

图像中视觉信息的改变有时不会影响主观感知,而人类视觉系统在处理图像时更关注类似于边缘变化这种会导致图像低层特征改变的因素。同时,边缘信息组成的目标轮廓也通常被用于图像的认识与匹配,而且边缘点也是特征点的重要组成部分。由于激光干扰会破坏边缘信息,所以本文选取干扰后图像中边缘点出现的概率来衡量图像边缘的损失程度。

边缘复杂度函数 E 定义为

$$\begin{cases} E = \sum_{i=1}^{N_R} \sum_{l=1}^2 P_i(l) \log_2 \frac{1}{P_i(l)}, \\ P_i(2) = 1 - P_i(1) \end{cases}, \quad (5)$$

在图像中目标区域进行边缘提取,将边缘点处的灰度值设为 1,其他位置灰度值设为 0,它们出现的概率分别为 $P_i(l)$,则每种灰度值所具有的信息复杂度分别为 $\log_2[1/P_i(l)]$ 。 E 的值越大,说明目标区域内边缘信息越丰富,图像轮廓越清晰,激光干扰对图像边缘提取的影响程度越小。

梯度可以反映图像中微小细节的反差和纹理分布特性,梯度幅值越大,表示图像沿此方向的灰度变化越明显,边缘的清晰度越高。光斑区域内的灰度变化被遮挡,导致特征点提取算法无法获得相关的灰度信息,边缘模糊,图像质量下降。干扰后图像梯

度幅值的变化情况反映了边缘清晰程度的变化,所以本文选取梯度幅值来衡量激光干扰对图像清晰度的影响。

边缘清晰度函数 G 定义为

$$G = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N g(i, j), \quad (6)$$

$$g(i, j) =$$

$$\sqrt{g_{i,j}^2(45^\circ) + g_{i,j}^2(90^\circ) + g_{i,j}^2(135^\circ) + g_{i,j}^2(180^\circ) + g_{i,j}^2(225^\circ) + g_{i,j}^2(270^\circ) + g_{i,j}^2(315^\circ) + g_{i,j}^2(360^\circ)}, \quad (7)$$

在图像目标区域中每个像素点上计算 8 个方向(45°、90°、135°、180°、225°、270°、315°、360°)的梯度值,累加后得到 $g(i, j)$,平均梯度幅值为 G , H 和 V 分别为目标区域的行和列包含的像素数。 G 的值越大,说明目标的清晰程度越高,激光对目标识别的干扰效果不明显。为方便比较,对(6)式进行归一化处理

$$G_{\text{Normal}} = \frac{|G - G_{\text{min}}|}{|G_{\text{max}} - G_{\text{min}}|}, \quad (8)$$

式中 G_{min} 是所有 G 值的最小值, G_{max} 是所有 G 值的最大值。

2.3 基于光斑和图像特征的动态评价算法

根据以上分析,结合光斑和图像特征的动态评价算法分为两个部分,分别是基于光斑特征的评价函数以及基于图像特征的评价函数。光斑特征评价函数包含两个部分:饱和像素率 N 和光斑重要性 D 。其中, N 越大,说明图像中达到饱和的像素点越多,图像失真程度越高。 D 越小,说明光斑位置距离目标中心越近,对图像重要信息的遮盖程度越高。图像特征评价函数包含三个部分:特征点保持度函数 S 、边缘复杂度函数 E 、边缘清晰度函数 G 。其中, S 越大,说明干扰图像中能提取到的特征点越多,光斑对图像中灰度变化信息的遮挡越少,图像中可用于识别的信息越多。 E 越大,说明图像中能提取到的边缘信息越多,图像的边缘信息越丰富,图像整体轮廓易于识别。 G 越大,说明图像中的边缘越锐利,图像的清晰度越高,图像的分辨率越高,图像的细节信息易于识别。为了方便比较,结合(1)、(2)、(3)、(5)和(8)式的 5 个比较函数,定义结合光斑与图像特征的 DFM 图像评价算法为

$$f_{\text{DFM}} = [(1 - N) \times D]^\alpha [S \times E \times G_{\text{Normal}}]^\beta, \quad (9)$$

式中 N 越大,图像失真程度越高, f_{DFM} 值越小,即 N 与 f_{DFM} 值成反比,所以取 $1 - N$ 为计算因子之一。 D 、 S 、 E 、 G_{Normal} 均与 f_{DFM} 成正比。参数 $\alpha > 0$, $\beta > 0$, 主要用来调整两个部分的相对重要性,两个参数取值分别为 0~1。在本文实验中,认为光斑和图像特征对图像质量影响的程度相当,因此取 $\alpha = \beta = 1$, 通过 f_{DFM} 可以分析出光斑大小、位置以及图像特征信

息的变化情况。

3 实验结果与分析

为了验证本文算法评价激光干扰图像质量的有效性,实验搭建一套激光干扰图像系统:使用波长为 532 nm 的激光二极管泵浦固体激光器发射,光束照射远处的目标,并使用 Falcon HG 1M120CMOS 相机作为接收装置采集图像,像元尺寸为 7.4 μm ,帧频为 30 fps,图像大小为 1024 pixel \times 1024 pixel。软件编程环境为 Pentium Dual-Core CPU、2.60 GHz 主频、内存 2 G、matlab2008a。激光主动成像系统如图 1 所示,图 1(a)中左上角为激光发射系统,右上角为成像接收系统,中间为控制转台,转台底座固定在实验台上,电脑上显示的是自制操作界面,如图 1(b)所示。实验中采集了不同激光干扰功率和不同光斑位置两种图像,采用本文提出 DFM 评价方法对连续多帧图像的质量进行评价^[12-17]。

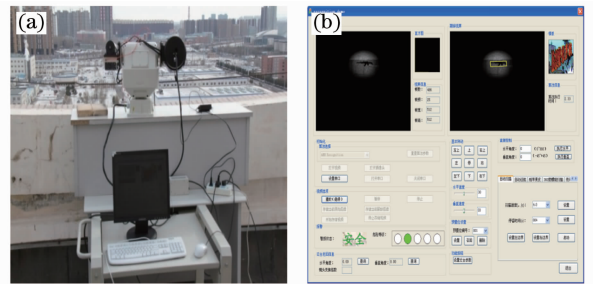


图 1 激光主动成像识别系统。(a) 识别系统;
(b) 操作控制界面示意图

Fig. 1 Laser active imaging and recognition system.

(a) Recognition system; (b) operation control interface

3.1 不同干扰功率的激光干扰图像质量评价

运用结合光斑特征与图像特征的 DFM 算法,对不同激光干扰功率的连续多帧干扰图像进行评价,实验图像如图 2 所示。图 2 为在夜间环境下,使用激光照射 350 m 远处的物体。

图 2(a)是目标模板,大小为 128 pixel \times 128 pixel,(b)是其中一幅干扰图像,(c)是(b)的激光光斑提取图,用来计算光斑的位置,(d)是(b)的特征

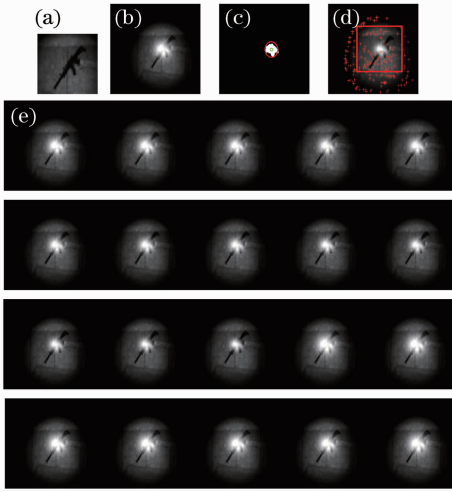


图2 激光干扰图像。(a) 目标图像；(b) 干扰图像；(c) 激光光斑；(d) 匹配图像；(e) 不同功率激光干扰图像
 Fig.2 Laser-dazzling images. (a) Target image; (b) laser-dazzling image; (c) laser spot; (d) matching image; (e) laser-dazzling image with different powers

点匹配图像,通过与图(a)进行匹配确定目标区域位置,文中各种评价函数均仅在目标区域内计算,(e)是连续多帧激光干扰图,大小为 256 pixel×256 pixel,图中的枪为设定的目标。图(e)采集的是一组激光功率逐渐增大的干扰图像,从主观评价出发,随着激光功率的增强,光斑逐渐增大,光斑掩盖的目标信息逐渐增多,干扰效果逐渐增强,图像质量下降明显。经过计算,5种评价因子的结果如表1所示。

对激光干扰功率不同的图像,随着激光干扰功率的增加,达到饱和的像素点数目逐渐增多,目标区域内被光斑遮挡的信息逐渐增多,在目标枪位置能提取到的特征点和边缘点数目减小,同时由于光斑的影响,图像中灰度起伏的区域被遮挡,导致该区域梯度幅值减小,边缘清晰度下降。从表1结果可以看出,当光斑位置不变,激光干扰功率逐渐增强, N 值逐渐增大, S 、 E 和 G 值逐渐减小, f_{DFM} 逐渐减小,说明图像质量逐渐下降,干扰效果逐渐增强,DFM算法给出的评价结果符合人类视觉系统的主观感知。

表1 不同激光干扰功率图像评价结果

Table 1 Laser dazzling images quality assessment

Power /mW	200	220	240	260	280
<i>D</i>	0.4880	0.4880	0.4880	0.4880	0.4880
<i>N</i>	0.0269	0.0328	0.0355	0.0382	0.0409
<i>S</i>	0.0082	0.0075	0.0074	0.0072	0.0072
<i>E</i>	0.1121	0.1116	0.1105	0.1096	0.1087
<i>G</i>	5.3024	5.2885	5.2742	5.2552	5.2375
f_{DFM}	0.4365	0.3808	0.3567	0.3250	0.3046
Power /mW	300	320	340	360	380
<i>D</i>	0.4880	0.4880	0.4880	0.4880	0.4880
<i>N</i>	0.0441	0.0466	0.0491	0.0521	0.0541
<i>S</i>	0.0068	0.0067	0.0065	0.0063	0.0063
<i>E</i>	0.1061	0.1019	0.1019	0.1006	0.1006
<i>G</i>	5.2179	5.2032	5.1855	5.1675	5.1467
f_{DFM}	0.2628	0.2359	0.2142	0.1906	0.1744
Power /mW	400	420	440	460	480
<i>D</i>	0.4880	0.4880	0.4880	0.4880	0.4880
<i>N</i>	0.0565	0.0598	0.0625	0.0649	0.0679
<i>S</i>	0.0063	0.0059	0.0059	0.0056	0.0052
<i>E</i>	0.1002	0.1002	0.0968	0.0968	0.0962
<i>G</i>	5.1282	5.1083	5.0889	5.0672	5.0482
f_{DFM}	0.1593	0.1347	0.1166	0.0964	0.0775
Power /mW	500	520	540	560	580
<i>D</i>	0.4880	0.4880	0.4880	0.4880	0.4880
<i>N</i>	0.0699	0.0726	0.0756	0.0785	0.0814
<i>S</i>	0.0051	0.0051	0.0049	0.0045	0.0043
<i>E</i>	0.0962	0.0939	0.0939	0.0918	0.0918
<i>G</i>	5.0248	5.0031	4.9828	4.9594	4.9169
f_{DFM}	0.0623	0.0485	0.0355	0.0205	0.0109

从图 3 中可知,随着激光干扰功率的增加,图像质量逐渐下降,图像饱和像素率增加, N 值增大,图

像特征点减少,边缘复杂度下降,清晰度下降, S 、 E 和 G 值逐渐减小, f_{DFM} 下降。

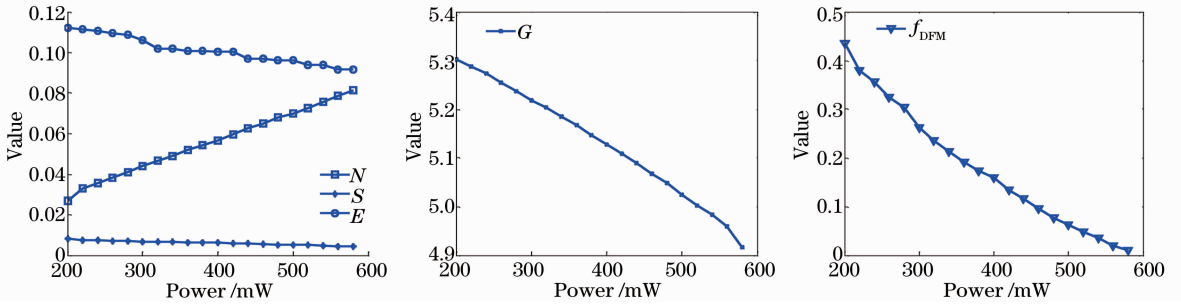


图 3 不同功率评价曲线

Fig. 3 Different values for different powers

由于 DFM 算法与目标识别算法是直接相关的,特征点,并计算图像的 f_{DFM} ,实验结果如表 2 所示。另外采用 Harris 和 SIFT 算法提取实验图像中的特

表 2 不同特征点提取方法图像评价结果

Table 2 Images quality assessment for different feature-point extraction methods

Power /mW	200	220	240	260	280
f_{DFM} Harris / 10^{-4}	0.9582	0.9457	0.9312	0.9177	0.9046
f_{DFM} SIFT / 10^{-3}	0.1544	0.1524	0.1500	0.1377	0.1357
Power /mW	300	320	340	360	380
f_{DFM} /Harris	0.8280	0.7909	0.7861	0.7256	0.7212
f_{DFM} /SIFT	0.1315	0.1256	0.1249	0.1224	0.1172
Power /mW	400	420	440	460	480
f_{DFM} /Harris	0.7139	0.7086	0.6800	0.6754	0.6249
f_{DFM} /SIFT	0.1160	0.1152	0.1063	0.1055	0.1042
Power /mW	500	520	540	560	580
f_{DFM} /Harris	0.6207	0.6015	0.5971	0.5792	0.4961
f_{DFM} /SIFT	0.1034	0.0962	0.0955	0.0927	0.0916

使用不同的特征点提取算法对 f_{DFM} 函数进行验证,从图 4 中可知,随着激光干扰功率的增加,

f_{DFM} 下降,该评价价值同样能正确反映图像质量的变化情况,说明 DFM 评估算法具有良好的适应性。

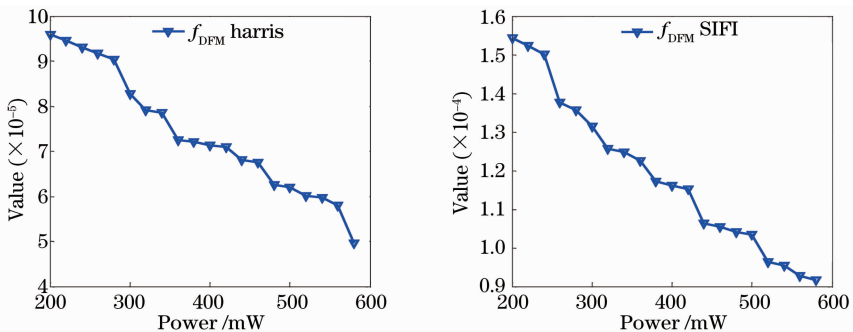


图 4 不同特征点提取方法价值曲线

Fig. 4 Values for different feature-point extraction methods

3.2 不同位置的激光干扰图像质量评价

运用结合光斑特征与图像特征的 DFM 算法,对不同光斑位置的连续多帧干扰图像进行评价,实验图像如图 5 所示,图中实验人员手持目标枪支。图 5 为在日间环境下,使用激光照射 400 m 远处的物体。

44 pixel,枪为设定的识别目标,(b)是其中一幅干扰图像,(c)是(b)的激光光斑提取图,用来计算光斑的位置,(d)是(b)的特征点匹配图像,通过与图(a)进行匹配确定目标区域位置,文中各种评价函数均仅在目标区域内计算,(e)是连续多帧激光干扰图,大小为 256 pixel×256 pixel。图(e)中激光功率不变,

图 5 (a) 是目标模板,大小为 96 pixel ×

光斑位置不同,其中前两行为光斑从枪中心向枪尾端移动,第3行为光斑从枪中心向枪前端移动,第4行为光斑从枪中心向枪上方移动,第5行为光斑从枪中心向枪下方移动。从主观评价出发,当光斑距

离目标枪较远时,光斑遮挡的细节信息较少,图像质量较好,而当光斑接近目标枪时,图像中枪的细节信息很难辨认,图像质量下降明显。经过计算,5种评价因子的结果如表3所示。

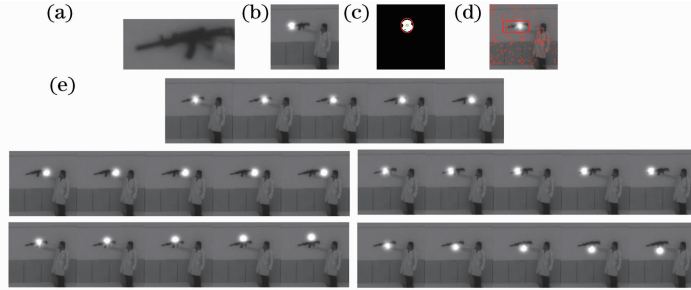


图5 激光干扰图像。(a) 目标图像; (b) 干扰图像; (c) 激光光斑; (d) 匹配图像; (e) 不同位置激光干扰图像

Fig.5 Laser-dazzling images. (a) Target image; (b) laser-dazzling image; (c) laser spot; (d) matching image;

(e) laser-dazzling images with different positions

表3 不同光斑位置激光干扰图像评价结果

Table 3 Laser dazzling images quality assessment

Distance /mm	14. 5129	20. 0700	25. 5353	31. 3538	36. 5941
Function					
<i>D</i>	0. 1512	0. 2091	0. 2660	0. 3266	0. 3812
<i>N</i>	0. 1527	0. 1527	0. 1527	0. 1527	0. 1527
<i>S</i>	0. 0085	0. 0109	0. 0140	0. 0144	0. 0154
<i>E</i>	0. 0663	0. 0693	0. 0712	0. 0715	0. 0722
<i>G</i>	4. 7621	5. 1299	5. 2338	5. 2476	5. 3086
f_{DFM}	0. 0564	0. 1126	0. 1928	0. 2452	0. 3127
Distance /mm	41. 8597	46. 3763	50. 7397	55. 3115	59. 9696
<i>D</i>	0. 4360	0. 4831	0. 5285	0. 5762	0. 6247
<i>N</i>	0. 1527	0. 1527	0. 1527	0. 1527	0. 1527
<i>S</i>	0. 0166	0. 0168	0. 0178	0. 0180	0. 0189
<i>E</i>	0. 0744	0. 0753	0. 0767	0. 0793	0. 0813
<i>G</i>	5. 6570	5. 9396	6. 0430	6. 0932	6. 0971
f_{DFM}	0. 4234	0. 5044	0. 6060	0. 6964	0. 8133
Distance /mm	5. 2319	9. 9873	14. 0776	18. 3599	23. 3356
<i>D</i>	0. 0545	0. 1040	0. 1466	0. 1912	0. 2431
<i>N</i>	0. 1527	0. 1527	0. 1527	0. 1527	0. 1527
<i>S</i>	0. 0097	0. 0104	0. 0104	0. 0114	0. 0133
<i>E</i>	0. 0647	0. 0757	0. 0757	0. 0761	0. 0780
<i>G</i>	6. 1773	6. 4510	6. 6527	6. 7681	6. 8472
f_{DFM}	0. 0529	0. 1086	0. 1681	0. 2312	0. 3165
Distance /mm	13. 8765	17. 1973	20. 0385	23. 3585	27. 2209
<i>D</i>	0. 1445	0. 1791	0. 2087	0. 2433	0. 2836
<i>N</i>	0. 1527	0. 1527	0. 1527	0. 1527	0. 1527
<i>S</i>	0. 0104	0. 0128	0. 0147	0. 0154	0. 0156
<i>E</i>	0. 0699	0. 0715	0. 0741	0. 0751	0. 0751
<i>G</i>	5. 3379	5. 4041	5. 5080	5. 8202	5. 8491
f_{DFM}	0. 0765	0. 1211	0. 1571	0. 1991	0. 2570
Distance /mm	17. 9414	22. 4060	27. 1985	31. 1601	34. 7798
<i>D</i>	0. 1869	0. 2334	0. 2833	0. 3246	0. 3623
<i>N</i>	0. 1527	0. 1527	0. 1527	0. 1527	0. 1527
<i>S</i>	0. 0142	0. 0152	0. 0180	0. 0185	0. 0187
<i>E</i>	0. 0719	0. 0751	0. 0767	0. 0770	0. 0770
<i>G</i>	5. 4145	5. 7981	5. 9502	6. 1623	6. 2121
f_{DFM}	0. 1709	0. 2181	0. 3174	0. 3886	0. 4420

当激光干扰功率相同时,随着光斑位置的移动,激光干扰的效果也不相同。表 3 中第 1~3 组数据为光斑水平移动的干扰图像,其中第 1 和 2 组为光斑从中心向尾部移动,从数据可以看出,随着 D 值的增大,即光斑逐渐远离枪中心。当光斑接近枪中心位置时,光斑的遮盖导致枪中部特征点无法提取,此处的灰度、边缘等能反映图像关键特征的信息比较丰富,导致 S 、 E 和 G 值逐渐减小。当光斑远离目标中心,虽然光斑周围区域的像素点灰度值也发生了变化,但是枪中主要部分的特征点基本能够准确提取, S 、 E 和 G 值逐渐增大, f_{DFM} 评价价值逐渐增大,图像质量提高。第 3 组数据为光斑从中心向前端移

动,随着 D 值的增大, S 、 E 和 G 值逐渐增大,从表中可知第 3 组 S 、 E 和 G 值比相近位置的第 1 组数据值大,这是由于枪前部的图像特征没有后部的丰富。第 4 和 5 组数据为光斑垂直移动的干扰图像,随着 D 值的增大, S 、 E 和 G 值逐渐增大。

从图 6 中可知,干扰激光功率不变,随着光斑距离目标枪中心距离的增加,光斑对图像的遮挡程度逐渐减小,图像可提取到的特征点增多,边缘复杂度升高,清晰度升高, S 、 E 和 G 值逐渐增大, f_{DFM} 评价价值逐渐增大,图像质量逐渐升高。图(a)、(b)和(c)中评价价值不同,这是因为光斑移动方向不同,在图像不同位置所包含的信息量不同。

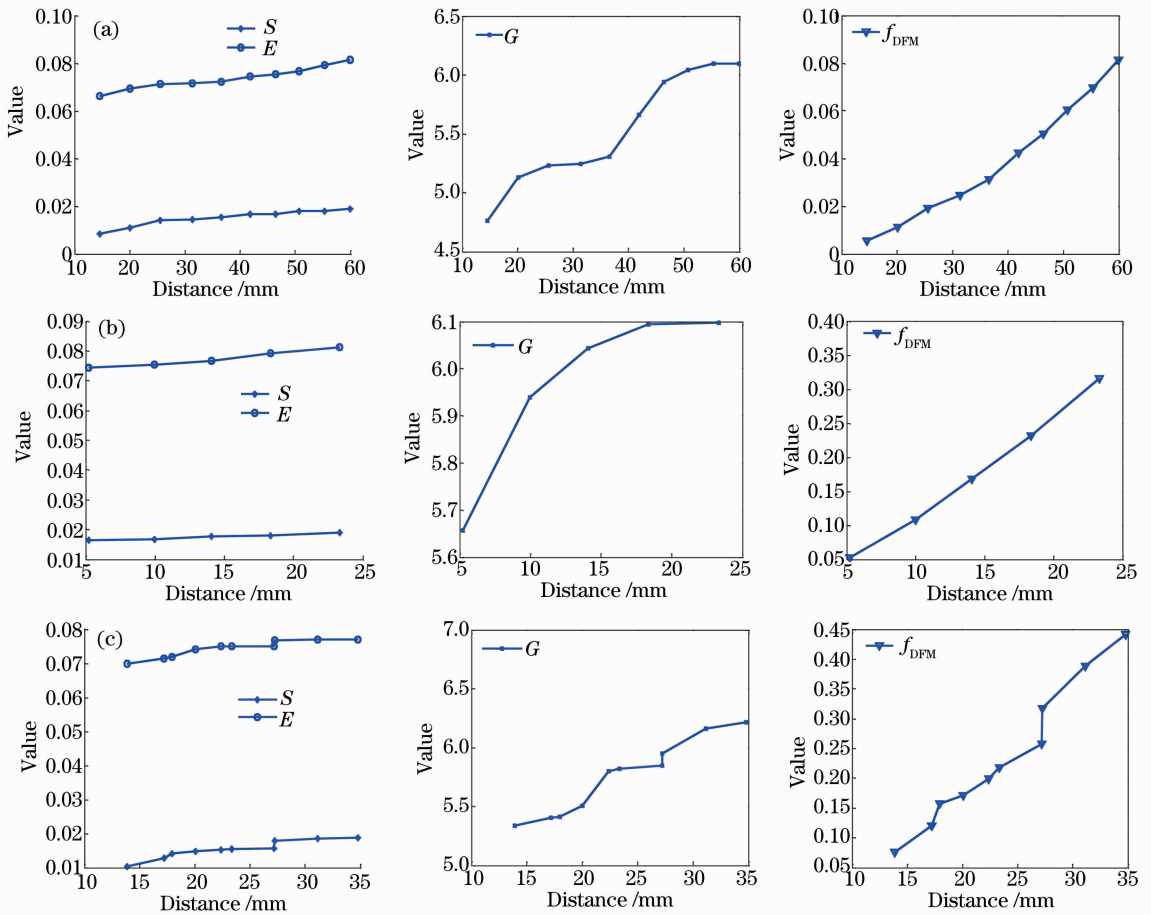


图 6 不同距离评价价值曲线。(a) 光斑从中心向后; (b) 光斑从中心向前; (c) 光斑垂直运动

Fig. 6 Different values for different distances. (a) Laser spot from center to the back; (b) laser spot from center to the front; (c) laser spot vertical motion

由于 DFM 评价算法与目标识别算法是直接相关的,另外采用 Harris 和 SIFT 算法提取实验图像的特征点,并计算图像的 f_{DFM} ,实验结果如表 4 所示。

使用不同的特征点提取算法对 f_{DFM} 函数进行

验证,从图 7 中可知,随着光斑距离图中目标中心距离的增加, f_{DFM} 升高,该评价价值同样能正确反映图像质量的变化情况,说明 DFM 评估算法具有良好的适应性。

表4 不同特征点提取方法图像评价结果

Table 4 Images quality assessment with different feature-point extraction methods

Distance /mm	14.5129	20.0700	25.5353	31.3538	36.5941
Function					
$f_{DFM}^{Harris} / 10^{-4}$	0.0597	0.0930	0.1240	0.1533	0.1827
$f_{DFM}^{SIFT} / 10^{-4}$	0.0597	0.0930	0.1240	0.1533	0.1827
Distance /mm	41.8597	46.3763	50.7397	55.3115	59.9696
f_{DFM}^{Harris}	0.3060	0.3603	0.4085	0.4643	0.5164
f_{DFM}^{SIFT}	0.2295	0.2702	0.3064	0.3482	0.3873
Distance /mm	5.2319	9.9873	14.0776	18.3599	23.3356
f_{DFM}^{Harris}	0.0287	0.0776	0.1133	0.1541	0.2344
f_{DFM}^{SIFT}	0.0446	0.0905	0.1322	0.1798	0.2344
Distance /mm	13.8765	17.1973	20.0385	23.3585	27.2209
f_{DFM}^{Harris}	0.0662	0.1324	0.1549	0.1958	0.2469
f_{DFM}^{SIFT}	0.0662	0.0851	0.0999	0.1259	0.1587
Distance /mm	17.9414	22.4060	27.1985	31.1601	34.7798
f_{DFM}^{Harris}	0.1554	0.1896	0.2367	0.2941	0.3309
f_{DFM}^{SIFT}	0.0996	0.1219	0.1521	0.1891	0.2127

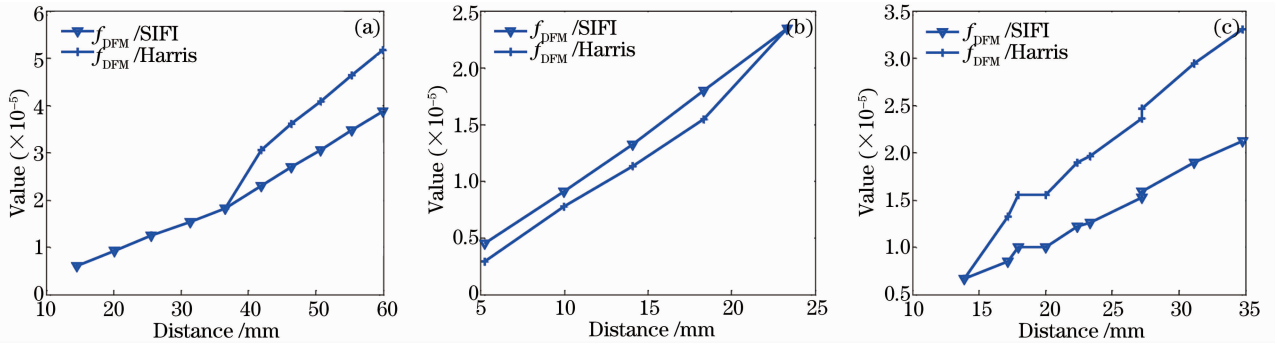


图7 不同特征点提取方法价值曲线。(a) 光斑从中心向后；(b) 光斑从中心向前；(c) 光斑垂直运动

Fig. 7 Value for different feature-point extraction methods. (a) Center to the back; (b) center to the front; (c) vertical motion

4 结 论

对于激光主动成像系统来说,获取图像的质量决定了其目标识别和跟踪的效果。从激光光斑性质的变化、激光干扰对特征点提取的影响和获取图像特征的损失角度出发,提出了一种无参考动态评估激光干扰效果的DFM算法。实验中共采集了连续多帧不同激光干扰功率和不同光斑位置的干扰图像,运用提出的DFM算法对实验图像进行评价。结果表明,算法中提出的饱和像素率 N 和光斑重要性 D 评价因子可以连续动态反映激光干扰功率和光斑位置的变化情况,特征点保持度函数 S 、边缘复杂度函数 E 和边缘清晰度函数 G 可以连续动态反映激光干扰对图像中信息的遮挡程度以及图像重要特征信息的损失情况,综合以上评价因子,得到的归一化 f_{DFM} ,该值反映了实验过程中多帧图像光斑及

图像质量的动态变化情况。该DFM算法考虑了激光干扰过程中光斑特征与图像特征的综合变化,能更合理的反映激光干扰的效果。该算法对于保护光电成像系统和评估激光主动成像系统目标识别能力具有重要作用。

参 考 文 献

- 1 Wang Z, Sheikh H R, Bovik A C. No-reference perceptual quality assessment of JPEG compressed images[C]. IEEE Image Processing International Conference, 2002, 1(1): 477-480.
- 2 Liu S, Bovik A C. Efficient DCT-domain blind measurement and reduction of blocking artifacts[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2002, 12(12): 1139-1149.
- 3 Sang Qingbing, Su Yuanyuan, Li Chaofeng, et al.. No-reference blur image quality assessment based on gradient similarity[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2013, 24(3): 573-577.
桑庆兵, 苏媛媛, 李朝锋, 等. 基于梯度结构相似度的无参考模糊图像质量评价[J]. 光电子·激光, 2013, 24(3): 573-577.
- 4 Li C, Bovik A C, Wu X. Blind image quality assessment using a general regression neural network[J]. IEEE Transactions on

- Neural Networks, 2011, 22(5): 793–799.
- 5 Schmid C, Mohr R, Bauckhage C. Evaluation of interest point detectors[J]. International Journal of Computer Vision, 2000, 37(2): 151–172.
 - 6 Rosten E. High Performance Rigid Body Tracking [D]. Cambridge: University of Cambridge, 2006.
 - 7 Yuan L H, Fu L, Yang Y, *et al.*. Analysis of texture feature extracted by gray level co-occurrence matrix [J]. Journal of Computer Applications, 2009, 29(4): 1018–1021.
 - 8 Liu Guixi, Liu Dongmei, Liu Fengpeng, *et al.*. Robust image registration algorithm based on feature points matching[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(3): 454–461.
刘贵喜, 刘冬梅, 刘凤鹏, 等. 一种稳健的特征点配准算法[J]. 光学学报, 2008, 28(3): 454–461.
 - 9 Tang Yonghe, Lu Huanzhang. Fast local feature description algorithm based on grayvalue differential invariants[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(2): 447–454.
唐永鹤, 卢焕章. 基于灰度差分不变量的快速局部特征描述算法[J]. 光学精密工程, 2012, 20(2): 447–454.
 - 10 Mi Zengzhen, Xie Zhijiang, Chen Tao, *et al.*. Key technology of image enhancement and edge extraction for heavy rail[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(9): 1645–1652.
米曾真, 谢志江, 陈涛, 等. 重轨图像增强与边缘提取的关键技术[J]. 光学精密工程, 2012, 20(9): 1645–1652.
 - 11 Han Xizhen, Zhao Jian. Enhancement of image texture and contrast combined with partial differential equation[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(6): 1382–1388.
韩希珍, 赵建. 结合偏微分方程增强图像纹理及对比度[J]. 光学精密工程, 2012, 20(6): 1382–1388.
 - 12 Xu Y, Sun X Q, Shao L. Simulation of laser jamming and its influence on CCD imaging performance[C]. SPIE, 2010, 7850: 1–8.
 - 13 Dimmeler A, Eberle B, Van den Heuvel, *et al.*. Laser dazzling of focal plane array cameras[C]. SPIE, 2007, 6738: 1–10.
 - 14 Dureuc A, Bourdon P, Vasseur O. Laser-dazzling effects on TV-cameras: analysis of dazzling effects and experimental parameters weight assessment[C]. SPIE, 2007, 6738: 1–6.
 - 15 Dureuc A, Vasseur O, Bourdon P. Assessment of laser-dazzling effects on TV-cameras by means of pattern recognition algorithms [C]. SPIE, 2007, 6738: 1–9.
 - 16 Zhang Shaodi, Sun Honghai. High precision method of long-ranged laser spot position measurement[J]. Chinese J Laser, 2012, 39(7): 0708003.
张少迪, 孙宏海. 远距离激光光斑位置高精度测量方法[J]. 中国激光, 2012, 39(7): 0708003.
 - 17 Qian Fang, Guo Jin, Sun Tao, *et al.*. Assessment of laser-dazzling effects based on weighted wavelet transforms [J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2013, 28(5): 781–787.
钱方, 郭劲, 孙涛, 等. 基于小波加权的激光干扰效果评估[J]. 液晶与显示, 2013, 28(5): 781–787.

栏目编辑: 张浩佳