

# 结合激光功率和光斑位置的多帧动态干扰效果评估

钱方<sup>1,2</sup> 孙涛<sup>1</sup> 郭劲<sup>1</sup> 王挺峰<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 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)  
<sup>2</sup> 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, 当该系统受到敌方激光干扰时, 其成像质量将会下降。由于目标、成像系统和干扰源的相对位置, 以及干扰源的干扰功率处于时刻变化中, 导致不同时刻的干扰效果不尽相同, 如何衡量一段时间内激光对成像系统的干扰效果成为一个难题。提出了一种基于连续多帧图像动态特征变化的无参考激光干扰评估算法, 在图像目标区域内分析单帧干扰图像中特征点的匹配准确率和空间变化率以及多帧图像特征点变化的准确性、空间性、结构性差异、频率和显著性特征, 最终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。基于提出的特征点动态性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一段持续干扰过程中不同功率、方位的激光干扰效果, 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** 成像系统; 图像质量评价; 激光干扰; 特征点

中图分类号 TN977 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.1102001

## Dynamic Assessment of Laser-Dazzling Effects Based on the Laser Power and Spot Position of Multi-Frame Images

Qian Fang<sup>1,2</sup> Sun Tao<sup>1</sup> Guo Jin<sup>1</sup> Wang Tingfeng<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics Chinese Academy of Sciences, State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun, Jilin 130033, China)  
<sup>2</sup> 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 imaging system is easy to be disturbed and this leads to the distortion of the images. The positions of the target, imaging system, interference and the laser power change momentarily, so the dazzling effect is different in every frame. Therefore, how to evaluate the influence of the laser on imaging systems must be better understood. A new no-reference image quality assessment algorithm based on the dynamic features of consistent multi-frame images is proposed, which is called feature-point dynamic (FPD). The feature-point matching correlation and area diversification of one frame are calculated in the target region. The difference of correlation, area distribution, structure, frequency and salience of multi-frame images are also compared in the target region. The normalized results are obtained via product of these factors above. The luminance imaging experiment is performed for the targets by utilizing the laser active imaging system. The disturbed images of different disturbing powers and different spot positions are obtained. The proposed FPD algorithm is used to evaluate the laser-dazzling images, and the results show that the FPD gives a more reasonable evaluation for multi-frame laser-dazzling images in the period of time. The evaluation results reflect the invalidation of the target identification algorithm objectively.

**Key words** imaging systems; image quality assessment; laser-dazzling; feature points

**OCIS codes** 110.3000; 110.2960; 140.3330

收稿日期: 2014-04-24; 收到修改稿日期: 2014-06-04

基金项目: 国家重点实验室自主基础研究(SKLLIM1203-01)

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等方面的研究。

E-mail: guojin\_1964@126.com

## 1 引言

激光主动成像系统通过特征点的提取来实现目标识别与跟踪,因此系统中接收装置获取图像的质量决定了识别的准确程度。当系统中的光电成像探测器受激光干扰产生局部饱和甚至损伤时,获取图像的质量下降,因此可以通过图像质量的损失程度评估激光干扰效果。传统的质量评价方法一般是比较两幅静态图像间灰度值、信噪比的差异或结构相似度等,而激光干扰是一个持续的过程,在连续采集的多帧图像中激光功率、光斑位置等影响图像质量的因素随时变化,原有的静态图像质量评估方法均无法衡量连续干扰过程。特征点位置或数量的变化可以随时反映图像中细节信息的变化情况,因此,可以从分析图像中特征点特性变化的角度出发建立评估模型,而实际中无失真的原始图像很难获取,所以提出了一种基于特征点变化的无参考图像质量评价方法,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<sup>[1]</sup>提出的一种针对 JPEG 压缩图像的评价方法,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的评价方法<sup>[2]</sup>,该方法通过计算图像中的高频分量的大小来判断图像的清晰程度;基于梯度函数的评价方法<sup>[3]</sup>,该方法认为图像的梯度幅值越大,图像的边缘越锐利,图像清晰度越高;基于熵函数的评价方法<sup>[4]</sup>,该方法认为图像细节越丰富则其熵函数值越大。实际中激光干扰是一个动态过程,激光功率和光斑位置都实时发生变化,以上的评价方法仅适用于评价单帧静态图像质量,对于实验中获取的连续多帧不同干扰效果的图像,以上方法无法动态衡量激光的干扰过程,对多帧图像的干扰效果无法给出总体评价。

提出了一种针对连续多帧图像的特征点动态性(FPD)评估算法,该方法基于统计一段时间内连续多帧图像特征的动态变化情况,计算图像中特征点的匹配准确率、空间变化率,得到单帧图像的质量评估函数  $f_{\text{FPD}}$ ,并通过以上结果得到连续两帧图像特征点的匹配动态性和空间动态性,通过分析连续两帧图像间特征点集合的变化情况得到特征点结构动态性,通过分析特征点变化的次数和感知程度得到

特征点的频率动态性和显著动态性,根据以上 5 个比较因子得到归一化的评价价值  $v_{\text{FPD}}$ ,并通过实验对评估模型的性能进行分析。

## 2 特征点变化动态评价算法分析

在所使用的激光主动照明系统中,目标识别是通过特征点的提取与匹配实现的。特征点提取算法就是在图像中寻找一些灰度变化剧烈的像素点或边缘曲线上具有曲率极大值的点。当激光干扰功率增大时,图像中的饱和像素点增多,目标的边缘或细节信息被遮挡,导致光斑位置提取不到特征点。同时光斑附近区域的像素点灰度值发生变化,也将导致特征点提取出现误差。随着激光功率、光斑位置的不同,每帧图像中特征点数目、位置、分布疏密程度都将随时发生变化。激光干扰是一个持续的过程,连续多帧图像中特征点性质的变化可以反映出激光性质的变化情况,由此判断出激光干扰的效果。通过分析图像受到激光干扰后特征点的变化情况,提出了一种 FPD 评估算法,通过分析单帧图像特征点的匹配准确程度和分布情况以及连续多帧图像特征点的特性差异、变化频率和显著特性,最终得到归一化的评价结果,该结果可用于衡量激光主动照明系统目标跟踪及识别算法的失效程度。

### 2.1 特征点变化动态性评价函数

运用加速分割测试特征(FAST)方法提取图像特征点,选择图像中某一像素点为圆心,在以 3.4 个像素长度为半径的圆上的 16 个像素点中,若至少有 9 个连续的像素点灰度值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<sup>[5-11]</sup>。通过特征点匹配划分出图像中的目标区域,而当激光光斑出现在目标区域时才能对成像系统实现干扰,所以算法 FPD 只在图像目标区域中计算特征点的变化情况。通过计算每帧图像中准确匹配的特征点数目和分布疏密度可以评价该时刻激光干扰对图像质量的影响程度。

单帧图像特征点匹配准确率函数  $M_d$  定义为

$$M_d = \frac{\sum_{j=1}^{N_R} d_j}{N_R}, \quad (1)$$

式中  $d_j$  的计算方法如下:

$$d_j = \begin{cases} 1, & \text{if } |D_m - D_x| \leq N_{\text{dis}}, \\ 0, & \text{if } |D_m - D_x| > N_{\text{dis}}, \end{cases} \quad (2)$$

式中  $m$  为匹配模板,  $x$  为干扰图像,  $N_R$  为模板图像

中能提取到的特征点个数,  $d_j$  用于统计干扰图像中仍能准确匹配的特征点, 计算方法为: 通过灰度相关法确定目标区域, 即计算  $m$  和  $x$  中的搜索窗口之间的灰度相似性, 相似性度量值最大的搜索窗口位置就是目标区域位置, 目标区域大小与模板  $m$  相同; 分别提取目标模板和干扰图像目标区域中的特征点, 记录模板图像  $m$  中特征点的位置, 通过坐标变换在干扰图像目标区域中相同位置处寻找距离该点位置最近的特征点, 若两点间距离  $|D_m - D_x| \leq N_{\text{dis}}$  个像素长度时 (取  $N_{\text{dis}} = 2$ ), 认为干扰图像中该位置处提取到了准确的特征点。  $M_d$  的值越大, 说明干扰图像中提取的特征点越准确, 误提取和特征点丢失的情况比较少, 目标识别受到激光干扰的影响程度越小。

单帧图像特征点空间变化率函数  $A_d$  定义为

$$A_d = \sqrt{A_h^2 + A_v^2}, \quad (3)$$

式中  $A_h$  和  $A_v$  分别表示水平和垂直方向的空间特征点分布深度, 反映了水平和垂直方向特征点分布的疏密程度。

$$A_h = \alpha \times \frac{1}{H} \sum_{i=1}^H \frac{N_F(i)}{N_F(i)_{\max}},$$

$$\alpha = \frac{1}{1 + \{1/\{1 + \log_2 [N_F(i)_{\max}/H]\}\}}, \quad (4)$$

$$A_v = \beta \times \frac{1}{V} \sum_{j=1}^V \frac{N_F(j)}{N_F(j)_{\max}},$$

$$\beta = \frac{1}{1 + \{1/\{1 + \log_2 [N_F(j)_{\max}/V]\}\}}, \quad (5)$$

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,  $N_F(i)$  或  $N_F(j)$  分别为在干扰图像目标区域第  $i$  行或第  $j$  列中提取的能准确匹配的特征点的个数,  $N_F(i)_{\max}$  或  $N_F(j)_{\max}$  分别是包含特征点数目最多的那一行或列的特征点个数,  $\alpha$  和  $\beta$  为加权值, 当  $N_F(i)_{\max}$  或  $N_F(j)_{\max}$  接近整行或整列像素个数时,  $\alpha$  或  $\beta$  接近 1。  $N_F(i)_{\max}$  或  $N_F(j)_{\max}$  减小时,  $\alpha$  和  $\beta$  减小。  $N_F(i)$  或  $N_F(j)$  的值越大, 则  $A_h$  或  $A_v$  值越大,  $A_d$  值越大, 说明此处是特征点密集区域, 是图像结构和纹理变化明显的区域。相应的  $A_d$  值越大, 说明激光干扰对提取算法的影响程度越小。

由于激光干扰的时变性, 可以通过比较采集到的前后两帧图像中特征点性质的变化规律, 得到短时间内激光功率、光斑位置的变化信息。

两帧图像特征点匹配动态性计算公式如下:

$$\Delta_{i-1,i} M_d = |M_{d_i} - M_{d_{i-1}}|, \quad (6)$$

$M_{d_i}$  为特征点匹配准确率函数, 计算方法见(1)式,

$\Delta_{i-1,i} M_d$  表示相邻两帧图像间匹配准确率变化程度。  $\Delta_{i-1,i} M_d$  越大说明图像特征点匹配的准确性之间的变化越明显, 前后两帧中激光功率或者光斑位置都发生了明显变化, 而  $M_d$  值较小的一帧图像的质量较差, 干扰更加明显。

两帧图像特征点空间动态性计算公式如下:

$$\Delta_{i-1,i} A_d = |A_{d_i} - A_{d_{i-1}}|, \quad (7)$$

式中  $A_{d_i}$  为特征点空间变化率函数,  $\Delta_{i-1,i} A_d$  为相邻两帧图像间空间变化程度差异的度量。  $\Delta_{i-1,i} A_d$  越大, 说明前后两帧图像之间特征点的疏密程度变化越大,  $A_d$  值较大的一帧图像提取到的特征点较多, 说明光斑面积较小或光斑没有遮挡图像中细节信息密集的区域, 图像质量较高。

两帧图像特征点结构动态性计算公式定义为

$$\Delta_{i-1,i} St_d = \frac{|S_i \cup S_{i-1} - S_i \cap S_{i-1}|}{|S_i \cup S_{i-1}|}, \quad (8)$$

实验中共采集  $n$  帧干扰图像, 用  $\langle S_1, S_2, \dots, S_i, \dots, S_n \rangle$  表示每幅图像中能提取到的所有特征点的集合。式中  $S_i, S_{i-1}$  分别为表示连续两帧图像中提取到的特征点集合,  $|S_i \cap S_{i-1}|$  表示在两帧图像中特征点集合的交集的元素个数。  $|S_i \cup S_{i-1}|$  表示在两帧图像中特征点并集的元素个数, 包括从  $S_{i-1}$  至  $S_i$  过程中相同的特征点, 以及损失、位置变化和新增的特征点。

由于激光干扰的时变性和持续性, 可以通过比较连续多帧图像中特征点的变化规律, 得到整个实验过程中激光干扰效果的动态统计。

多帧图像特征点频率动态性计算公式定义为

$$F_d = \frac{\sum_{j=1}^{n-1} F_j}{n-1}, \quad (9)$$

$$F_j = \begin{cases} 1, & \text{if } \Delta_{i-1,i} St_d \neq 0 \\ 0, & \text{if } \Delta_{i-1,i} St_d = 0 \end{cases}, \quad (10)$$

式中  $F_j$  反映了已采集的连续  $n$  帧干扰图像中, 与前一帧相比, 当前帧特征点发生变化的图像数目。如果图像特征点在每一帧更新时都发生了变化, 则  $F_j = 1$ , 如果特征点一直没有变化, 则  $F_j = 0$ 。  $F_d$  越大说明不同帧图像间特征点的变化越频繁, 干扰激光的特征变化越明显, 图像间质量差异越大。

多帧图像特征点显著动态性函数计算公式定义为

$$S_d = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} V_i}{(n-1) \times F_d}, \quad (11)$$

$$V_i = \begin{cases} 1, & \Delta_{i-1,i} St_d \geq \sigma \\ 0, & \Delta_{i-1,i} St_d < \sigma \end{cases}, \quad (12)$$

式中  $\sigma$  是显著动态性阈值, 分子表示在  $n$  帧图像的变化过程中, 特征点结构动态性大于等于阈值  $\sigma$  的次数。 $S_d$  表示从第一帧图像到第  $n$  帧的变化过程中, 前后两帧图像的特征点结构动态性大于阈值  $\sigma$  的次数占总的变化次数的百分比,  $\sigma$  取值为 0.2。 $S_d$  从时间和空间两个角度整体上衡量了在整个  $n$  帧图像中

$$\begin{cases} f_{\text{FPD}} = M_d \times A_d \\ \nu_{\text{FPD}} = [\Delta_{i-1,i} M_d \times \Delta_{i-1,i} A_d \times \Delta_{i-1,i} St_d]^{\omega_1} [S_{d_{1\sim i}} \times F_{d_{1\sim i}}]^{\omega_2} \end{cases}, \quad (13)$$

式中  $f_{\text{FPD}}$  表示的是单帧图像的质量评价, 该值越大说明图像的质量越好, 干扰效果越弱,  $M_d$  值越大说明特征点提取的准确率越高,  $A_d$  值越大说明特征点分布越密集。 $\nu_{\text{FPD}}$  表示的是连续多帧图像在激光干扰过程中的质量变化规律, 其中,  $\Delta_{i-1,i} M_d$  表示的是前后两帧图像在受到激光干扰后仍能准确匹配的特征点数量的差异,  $\Delta_{i-1,i} A_d$  表示前后两帧图像中特征点分布规律的变化情况, 如果它们的值较大则说明激光干扰功率或光斑位置在两帧图像中发生了明显变化。 $\Delta_{i-1,i} St_d$  表示前后两帧图像中发生变化的特征点数量的比例, 若其值较大则说明前后两帧图像中提取的特征点变化较明显, 干扰程度相差较大, 以上三个比较因子主要分析连续两帧图像中特征点性质的变化情况, 表明了激光在不同时刻对图像的干扰情况。 $F_{d_{1\sim i}}$  表示已采集的所有图像中特征点变化的频率, 其值越大说明激光自身特性的变化越频繁。 $S_{d_{1\sim i}}$  表示已采集的图像中特征点的性质变化能引起关注的次数, 其值越大说明激光干扰所产生的效果越明显。 $\Delta_{i-1,i} M_d$ 、 $\Delta_{i-1,i} A_d$  和  $\Delta_{i-1,i} St_d$  表示的是局部连续两帧图像间的变化情况,  $F_{d_{1\sim i}}$  和  $S_{d_{1\sim i}}$  主要用来衡量整个激光干扰过程中的干扰效果, 参数  $\omega_1 > 0$ ,  $\omega_2 > 0$ , 主要用来调整两个部分的相对重要性, 两个参数取值范围分别为  $0 \sim 1$ 。实验中, 对图像前后两帧间和连续  $n$  帧特征点的整体变化都十分关注, 因此取  $\omega_1 = \omega_2 = 1$ , 通过 FPD 评价可以分析出光斑大小、位置以及特征点信息的变化情况。

### 3 实验结果与分析

为了验证 FPD 算法评价激光干扰图像质量的有效性, 搭建一套激光干扰图像系统: 使用波长为 532 nm 的激光二极管抽运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

特征点变化的重要性, 即  $S_d$  值越大, 则变化越显著且频繁, 越容易被感知。

### 2.2 基于特征点性质变化的动态评价算法

根据以上分析, 特征点动态性评估算法包括两个部分。

为接收装置采集图像, 像元尺寸为  $7.4 \mu\text{m}$ , 帧频为 30 frame/s, 图像大小为  $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ 。软件编程环境为 Pentium Dual-Core CPU、2.60 GHz 主频、内存 2G、matlab2008a。激光主动成像系统如图 1 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, 采用提出的 FPD 评价方法对连续多帧图像的质量进行评价<sup>[12-17]</sup>。

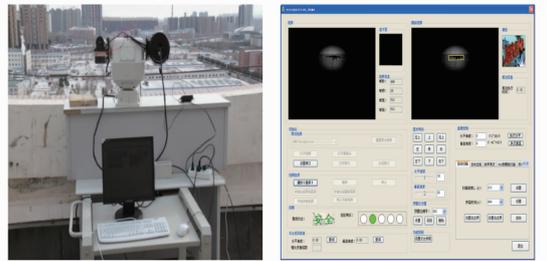


图 1 激光主动成像识别系统

Fig. 1 Laser active imaging and recognition system

### 3.1 不同干扰功率的激光干扰图像质量评价

运用特征点动态性算法, 对不同激光干扰功率

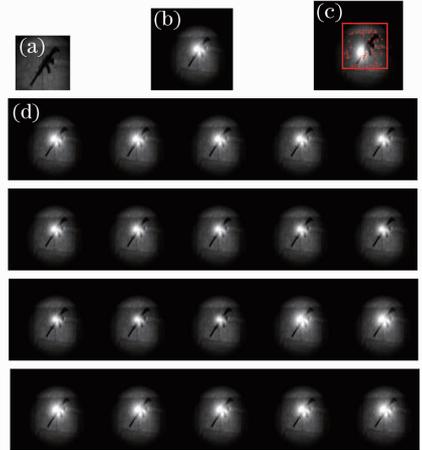


图 2 激光干扰图像。(a) 目标图像; (b) 干扰图像; (c) 匹配图像; (d) 不同功率激光干扰图像

Fig. 2 Laser-dazzling images. (a) Target image; (b) laser-dazzling image; (c) matching image; (d) laser-dazzling images with different powers

的连续多帧干扰图像进行评价,结果如图 2 所示。

图 2(a)是目标模板,大小为 128 pixel × 128 pixel,图 2(b)是其中一幅干扰图像,图 2(c)是(b)的特征点匹配图像,通过与图 2(a)进行匹配确定目标区域位置,各种评价函数均仅在目标区域内计算,图 2(d)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 2(d)采集的是一组激光功率逐渐增大的干扰图像,随着激光功率的增强,图像质量明显下降。实验过程中,随着激光干扰功率的变化,每帧图像特征点匹配准确率和空间变化率的计算结果如表 1 所示,前后两帧和连续多帧图像的特征点动态变化规律计算结果如表 2 所示。

表 1 单帧图像质量评价结果

Table 1 Quality assessment of a single image

Function	Value									
Power /mW	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380
$M_d$	0.7436	0.6603	0.6154	0.5769	0.5513	0.5257	0.5001	0.4809	0.4617	0.4425
$A_d$	0.2225	0.2058	0.1941	0.1831	0.1748	0.1665	0.1592	0.1542	0.1492	0.1442
$f_{FPD}$	0.1655	0.1359	0.1194	0.1056	0.0964	0.0875	0.0796	0.0742	0.0689	0.0638
Power /mW	400	420	440	460	480	500	520	540	560	580
$M_d$	0.4233	0.4105	0.3977	0.3913	0.3849	0.3785	0.3721	0.3657	0.3657	0.3657
$A_d$	0.1409	0.1376	0.1348	0.1326	0.1307	0.1290	0.1276	0.1264	0.1262	0.1262
$f_{FPD}$	0.0596	0.0565	0.0536	0.0519	0.0503	0.0488	0.0475	0.0462	0.0462	0.0462

表 2 特征点变化动态性评价结果

Table 2 Feature-point variety dynamic evaluating results

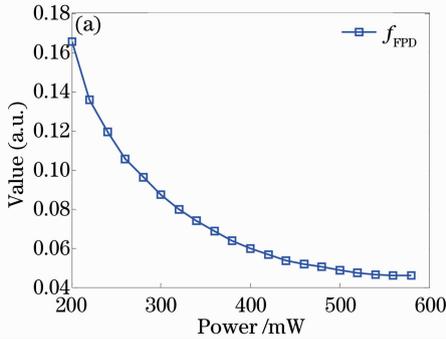
Power /mW	$\Delta_{i-1,i} M_d$	$\Delta_{i-1,i} A_d$	$\Delta_{i-1,i} St_d$	$F_{d_{1\sim i}}$	$S_{d_{1\sim i}}$	$v_{FPD}$
200~220	1.0000	1.0000	0.4118	1	1	0.4118
220~240	0.5390	0.7006	0.3982	1	1	0.1504
240~260	0.4622	0.6587	0.3942	1	1	0.1200
260~280	0.3073	0.4970	0.3889	1	1	0.0594
280~300	0.3073	0.4371	0.3543	1	1	0.0476
300~320	0.3073	0.2994	0.3495	1	1	0.0322
320~340	0.2305	0.2994	0.2895	1	1	0.0200
340~360	0.2305	0.2994	0.2857	1	1	0.0197
360~380	0.2305	0.1976	0.2846	1	1	0.0130
380~400	0.2305	0.1976	0.2735	1	1	0.0125
400~420	0.1537	0.1677	0.2720	1	1	0.0070
420~440	0.1537	0.1317	0.2541	1	1	0.0051
440~460	0.0768	0.1138	0.2538	1	1	0.0022
460~480	0.0768	0.1018	0.2296	1	1	0.0018
480~500	0.0768	0.0838	0.2028	1	1	0.0013
500~520	0.0768	0.0719	0.2000	1	1	0.0011
520~540	0.0768	0.0120	0.1985	1	0.9421	0.0002
540~560	0	0	0.1603	1	0.8889	0
560~580	0	0	0.1563	1	0.8421	0

实际中,随着激光干扰功率增强,光斑及其周围的像素点灰度值逐渐增大,甚至趋于饱和,导致特征点提取算法失效。从主观角度出发,光斑变大,光斑对目标区域的遮挡面积增大,图像信息无法分辨,质量逐渐下降。从表 1 的结果可知, $M_d$  和  $A_d$  值逐渐下降,说明图像中可正确匹配的特征点数目逐渐减少,特征点分布逐渐稀疏。表 1 中  $f_{FPD}$  值逐渐下降,说明该评价与主观感知较为一致,能正确反映激光干扰对图像质量及特征点提取的影响。

表 2 中  $\Delta_{i-1,i} M_d$ 、 $\Delta_{i-1,i} A_d$  和  $\Delta_{i-1,i} St_d$  随着激光干扰功率的增强逐渐减小,说明前后两帧图像间特征点的个数及分布规律等特性的差异逐渐减小。 $F_{d_{1\sim i}}$  值表示了已采集的图像中特征点的变化频率,表 2 中该值为 1,说明实验过程中激光干扰功率时刻在发生变化,同时每帧图像的特征点信息都在发生变化。 $S_{d_{1\sim i}}$  值表示了第一帧至当前帧中特征点变化能引起主观注意的程度,阈值取 0.2,表 2 中该值逐渐减小,其中 1~16 帧图像中特征点的变化容易

被主观识别。根据(13)式,计算得出的  $\nu_{FPD}$  值逐渐减小,并且变化逐渐趋于平缓,这是由于当激光干扰功率达到一定强度时,图像光斑区域附近的像素点大部分趋于饱和,一定范围内基本提取不到特征点,即使继续增大激光干扰功率,对图像特征点的提取也不会有更加明显的影响。从表 2 中可知,随着激光干扰功率的变化,1~14 帧图像的评价值差异较大,15~20 帧图像的评价值基本相同,特征点的动态性变化不明显,可以认为当激光干扰功率增加到 460 mW 后,激光干扰已经使特征点提取算法失效,很难在目标区域提取到准确特征点,即使继续增加激光功率,干扰效果也不会明显增强。

图 3 为多帧图像评价曲线,从图 3 中可知,随着激光干扰功率的增加,  $f_{FPD}$  值逐渐减小,说明图像



质量逐渐下降,该值准确的反映了干扰过程中图像质量的变化情况。 $\nu_{FPD}$  值逐渐减小,该值反映了图像在干扰过程中特征点数目、位置、分布特性、变化频率以及变化显著程度方面的差异,是一个综合的评价值,该值变小说明图像间的质量差异逐渐不明显,干扰效果变化趋于平缓。从图中可以看出,随着激光功率的增大,图像质量逐渐下降,14 帧以后  $f_{FPD}$  值仍逐渐减小但各帧间变化不明显,第 14~20 帧图像中,  $\nu_{FPD}$  值基本相同,说明图像目标区域内大部分像素点已经达到饱和,特征点基本提取不到,此时已经达到干扰效果,不需要继续增加激光干扰功率,可以认为在兼顾干扰效果和实际实验条件的前提下,当激光功率达到 460 mW 时,采集到的第 14 帧图像的干扰效果比较好。

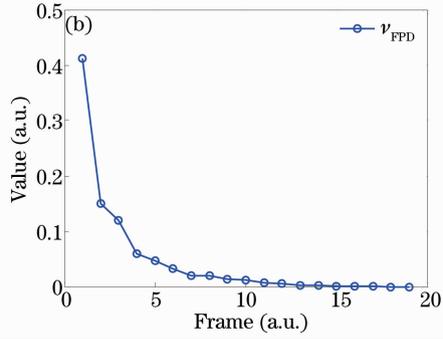


图 3 多帧图像评价曲线

Fig. 3 Different values for different frames

### 3.2 不同位置的激光干扰图像质量评价

运用特征点动态性算法,对不同光斑位置的连续多帧干扰图像进行评价,结果如图 4 所示,图中为实验人员手持目标枪支。

图 4 (a) 是目标模板,大小为 96 pixel × 44 pixel,枪为设定的识别目标,图 4 (b) 是其中一幅干扰图像,图 4 (c) 是 (b) 的特征点匹配图像,图 4 (d) 是连续多帧激光干扰图,大小为 256 pixel × 256 pixel。图 (d) 中激光功率不变,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。实验过程中,随着激光光斑位置的变化,每帧图像特征点匹配准确率和空间变化率的计算结果如表 3 所示,前后两帧和连续多帧图像的特征点动态变化规律计算结果如表 4 所示。

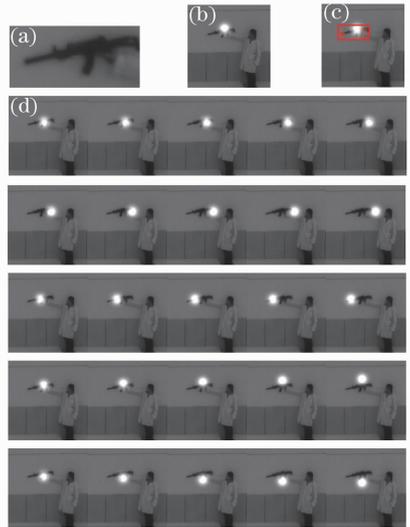


图 4 激光干扰图像。(a) 目标图像; (b) 干扰图像; (c) 匹配图像; (d) 不同位置激光干扰图像

Fig. 4 Laser-dazzling images. (a) Target image; (b) laser-dazzling image; (c) matching image; (d) laser-dazzling images with different positions

表 3 单帧图像质量评价结果  
Table 3 Quality assessment of a single image

Function	Value				
Distance /mm	14. 5129	20. 0700	25. 5353	31. 3538	36. 5941
$M_{d_i}$	0. 4167	0. 5357	0. 6547	0. 7142	0. 7737
$A_{d_i}$	0. 2026	0. 2706	0. 3269	0. 3545	0. 3766
$f_{FPD}$	0. 0844	0. 1450	0. 2140	0. 2532	0. 2914
Distance /mm	41. 8597	46. 3763	50. 7397	55. 3115	59. 9696
$M_{d_i}$	0. 8213	0. 8689	0. 8927	0. 9165	0. 9284
$A_{d_i}$	0. 3987	0. 4208	0. 4310	0. 4365	0. 4412
$f_{FPD}$	0. 3275	0. 3656	0. 3848	0. 4001	0. 4096
Distance /mm	5. 2319	9. 9873	14. 0776	18. 3599	23. 3356
$M_{d_i}$	0. 1548	0. 2738	0. 3333	0. 3690	0. 3809
$A_{d_i}$	0. 2003	0. 2291	0. 2488	0. 2635	0. 2702
$f_{FPD}$	0. 0310	0. 0627	0. 0829	0. 0972	0. 1029
Distance /mm	13. 8765	17. 1973	20. 0385	23. 3583	27. 2209
$M_{d_i}$	0. 4286	0. 5238	0. 5833	0. 6309	0. 6752
$A_{d_i}$	0. 2477	0. 3082	0. 3553	0. 3922	0. 4128
$f_{FPD}$	0. 1062	0. 1614	0. 2072	0. 2474	0. 2787
Distance /mm	17. 9414	22. 4060	27. 1985	31. 1601	34. 7798
$M_{d_i}$	0. 5643	0. 6071	0. 6476	0. 6786	0. 7024
$A_{d_i}$	0. 3139	0. 3716	0. 4077	0. 4292	0. 4339
$f_{FPD}$	0. 1771	0. 2256	0. 2640	0. 2913	0. 3048

表 4 特征点变化动态性评价结果  
Table 4 Feature-point variety dynamic evaluating results

Distance /mm	$\Delta_{i-1, i} M_d$	$\Delta_{i-1, i} A_d$	$\Delta_{i-1, i} St_d$	$F_{d_{1 \sim i}}$	$S_{d_{1 \sim i}}$	$v_{FPD}$
14. 5129~20. 0700	1. 0000	1. 0000	0. 2917	1	1	0. 2917
20. 0700~25. 5353	1. 0000	0. 8152	0. 2203	1	1	0. 1796
25. 5353~31. 3538	0. 4444	0. 3618	0. 1250	1	0. 6667	0. 0134
31. 3538~36. 5941	0. 4444	0. 2749	0. 0909	1	0. 5000	0. 0056
36. 5941~41. 8597	0. 3333	0. 2749	0. 0714	1	0. 4000	0. 0026
41. 8597~46. 3763	0. 3333	0. 2749	0. 0533	1	0. 3333	0. 0016
46. 3763~50. 7397	0. 1111	0. 0869	0. 0500	1	0. 2857	0. 0001
50. 7397~55. 3115	0. 1111	0. 0126	0. 0417	1	0. 2500	0
55. 3115~59. 9696	0	0	0. 0132	1	0. 2222	0
5. 2319~9. 9873	1. 0000	1. 0000	0. 7342	1	1	0. 7342
9. 9873~14. 0776	0. 4444	0. 5882	0. 5645	1	1	0. 1476
14. 0776~18. 3599	0. 2222	0. 3620	0. 5625	1	1	0. 0452
18. 3599~23. 3356	0	0	0. 4821	1	1	0
13. 8765~17. 1973	0. 8197	0. 5924	0. 4156	1	1	0. 2018
17. 1973~20. 0385	0. 4099	0. 4501	0. 3934	1	1	0. 0726
20. 0385~23. 3585	0. 2732	0. 3418	0. 3889	1	1	0. 0363
23. 3585~27. 2209	0. 2354	0. 1688	0. 3333	1	1	0. 0132
27. 2209~17. 9414	1. 0000	1. 0000	0. 6277	1	1	0. 6277
17. 9414~22. 4060	0. 2181	0. 5626	0. 3544	1	1	0. 0435
22. 4060~27. 1985	0. 1917	0. 3333	0. 3448	1	1	0. 0220
27. 1985~31. 1601	0. 0827	0. 1783	0. 2556	1	1	0. 0038
31. 1601~34. 7798	0	0	0. 2386	1	1	0

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情况,其中第 1 和第 2 组为光斑从中心向尾部移动,Distance 值增大表示光斑逐渐远离枪中心。当光斑接近枪中心位置,光斑的遮盖导致枪中部特征点无法提取,而此处的灰度、边缘等能反映图像关键特征的信息比较丰富,所以能准确提取的特征点数目减小,特征点分布较为稀疏, $M_d$ 、 $A_d$  值较小。当光斑远离目标中心,虽然光斑周围的像素点灰度值也发生了变化,但对目标枪的特征点提取影响较小, $M_d$ 、 $A_d$  值较大。第 3 组数据为光斑从中心向前端移动的情况,随着 Distance 值的增大, $M_d$ 、 $A_d$  值逐渐增大。第 4 和第 5 组数据为光斑垂直移动的情况,随着 Distance 值的增大  $M_d$ 、 $A_d$  值逐渐增大。从表中可知在 1~3 组 Distance 值相近

处, $M_d$ 、 $A_d$  不同,这是由于枪不同部分的图像特征丰富程度不同。在每组数据中,根据(13)式,计算的  $f_{FPD}$  值随着 Distance 值的增大而逐渐增大,说明图像质量逐渐升高,该结果与主观感知一致,准确的反映了激光干扰的效果。

表 4 中第 1 组为光斑从中心向尾部移动的情况,第 2 组数据为光斑从中心向前端移动的情况,第 3 组数据为光斑垂直移动的情况,其中  $\Delta_{i-1,i} M_d$ 、 $\Delta_{i-1,i} A_d$  和  $\Delta_{i-1,i} S_{td}$  表示前后两帧图像间特征点位置、数目和分布的变化情况。 $F_{d_{1\sim i}}$  值为 1,说明每帧图像中的特征点信息与前帧相比都发生了变化。 $S_{d_{1\sim i}}$  值为 1 说明光斑位置的变化对每帧图像的特征点提取都有影响,同时能被主观感知。第 1 组中从第 4 幅图像开始  $S_d$  值不为 1,说明有些图像中特征点变化不被视觉系统感知,虽然光斑位置发生变化,但

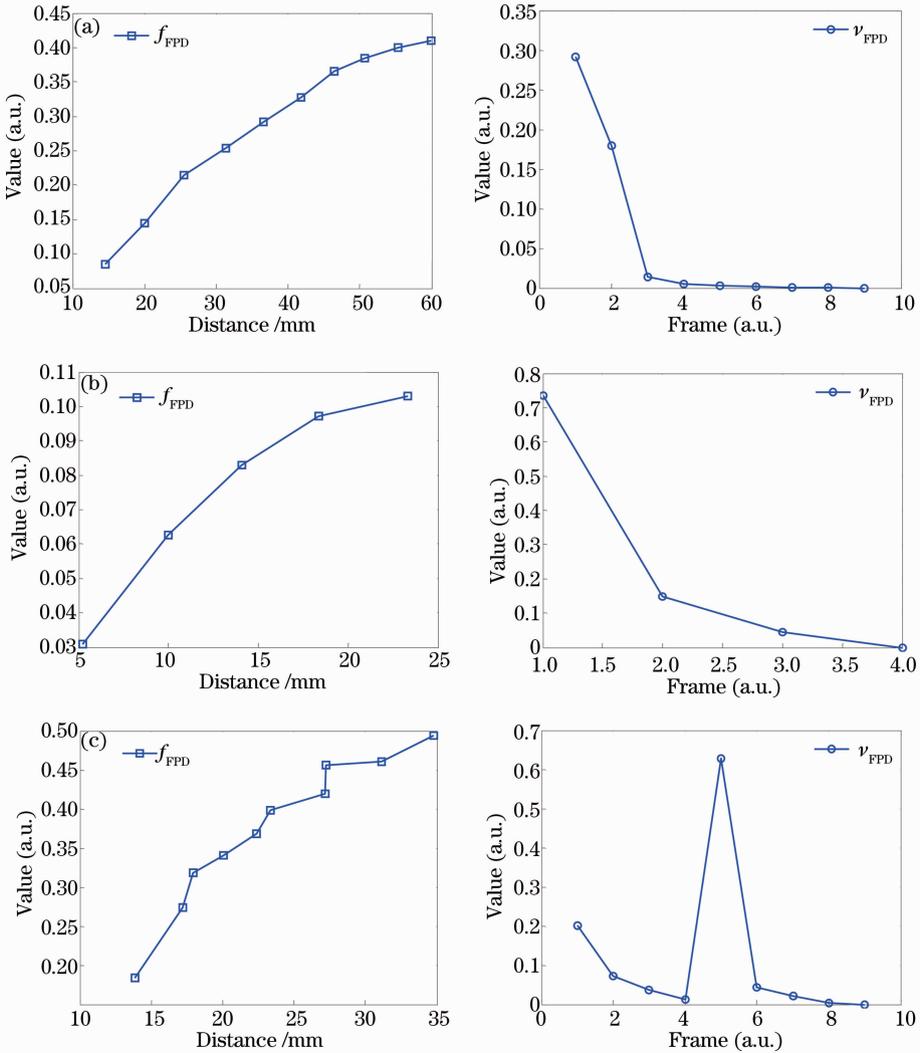


图 5 多帧图像评价曲线。(a) 光斑从中心向后；(b) 光斑从中心向前；(c) 光斑垂直运动

Fig. 5 Different values for different frames. (a) Laser spot from center to the back; (b) laser spot from center to the front; (c) laser spot vertical motion

是对图像的主观质量影响不大。随着 Distance 值的增大,根据(13)式,计算的  $\nu_{\text{FPD}}$  值逐渐减小,这是由于光斑远离目标后,对目标区域特征点提取的影响减小,激光干扰效果减弱。第 2 和第 3 组数据变化规律与第 1 组相似。

从图 5 中可知,无论光斑的运动轨迹如何,随着激光光斑中心与目标中心距离的增加,  $f_{\text{FPD}}$  值逐渐升高,图像质量逐渐升高。 $\nu_{\text{FPD}}$  值反映了多帧图像在特征点数目、位置、分布特性、变化频率以及变化显著程度方面的差异,图(a)中前 7 帧图像的  $f_{\text{FPD}}$  值较大,说明在光斑移动的过程中,光斑位置对特征点的提取影响较大,而 8~10 帧图像的  $\nu_{\text{FPD}}$  值较小,变化趋于平缓,说明光斑的移动对特征点提取的影响不大,结合  $f_{\text{FPD}}$  值可知,此时光斑已经远离目标中心位置,干扰效果不明显,所以第 1 帧中的光斑干扰位置最佳。图(b)曲线变化规律与(a)相似,图(c)中 1~5 帧的  $\nu_{\text{FPD}}$  值下降,结合  $f_{\text{FPD}}$  值可知图像的光斑逐渐远离目标区域,干扰效果减弱,第 5 和第 6 帧图像  $\nu_{\text{FPD}}$  值出现突变,说明此时光斑位置发生较大改变,光斑接近目标中心,6~10 帧图像  $\nu_{\text{FPD}}$  值减小,说明此时光斑又逐渐远离目标中心,干扰减弱,所以第 1 帧中的光斑干扰位置最佳,其次是第 2 帧和第 6 帧。通过比较  $\nu_{\text{FPD}}$  值的变化可以分析一段时间内光斑的运动趋势,结合  $f_{\text{FPD}}$  值可以分析出光斑位置的具体变化情况,得到光斑的最佳干扰位置。

## 4 结 论

对于激光主动成像系统来说,特征点提取的准确性决定了其目标识别和跟踪的效果。提出的 FPD 算法包括两个部分:1) 单帧图像质量评估函数  $f_{\text{FPD}}$ ,通过比较干扰图像与目标模板间特征点的匹配准确性和分布特性,评估图像质量;2) 是动态变化评估函数  $\nu_{\text{FPD}}$ ,通过比较前后两帧图像间特征点的匹配准确率和空间动态性、结构动态性差异,以及所有采集图像的频率动态性和显著动态性,评价整个干扰过程中激光变化对图像质量和特征点提取的影响。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 FPD 算法对实验图像进行评价。结果表明,所提算法中  $f_{\text{FPD}}$  可以准确反映激光干扰对单帧图像质量的影响,结果符合人类主观感知; $\nu_{\text{FPD}}$  可以反映整个干扰过程中图像质量和特征点性质的变化规律,动态地评价激光干扰效果。

## 参 考 文 献

- 1 Z Wang, H R Sheikh, A C Bovik. No-reference perceptual quality assessment of JPEG compressed images[C]. IEEE Image Processing International Conference, 2002, 1(1): 477-480.
- 2 S Liu, A C Bovik. 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.
- 4 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.
- 5 C Li, A C Bovik, X Wu. Blind image quality assessment using a general regression neural network[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2011, 22(5): 793-799.
- 6 C Schmid, R Mohr, C Bauckhage. Evaluation of interest point detectors[J]. International Journal of Computer Vision, 2000, 37(2): 151-172.
- 7 E Rosten. High Performance Rigid Body Tracking [D]. Cambridge: University of Cambridge, 2006.
- 8 L H Yuan, L Fu, Y Yang, *et al.* Analysis of texture feature extracted by gray level co-occurrence matrix [J]. Journal of Computer Applications, 2009, 29(4): 1018-1021.
- 9 Liu Guixi, Liu Dongmei, Liu Fengpeng, *et al.*. Robust image registration algorithm based on feature points matching[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(3): 454-455.
- 10 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): 454-455.
- 11 Tang Yonghe, Lu Huanzhang. Fast local feature description algorithm based on gray value differential invariants[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(2): 447-454.
- 12 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.
- 13 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(7): 1645-1652.
- 14 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(7): 1645-1652.
- 15 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.
- 16 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.
- 17 X Xu, X Q Sun, L Shao. Simulation of laser jamming and its influence on CCD imaging performance[C]. SPIE, 2010, 7850: 78501W.
- 18 M A Schleijsen, A Dimmeler, B Eberle, *et al.*. Laser dazzling of focal plane array cameras[C]. SPIE, 2007, 6738: 67380O.
- 19 A Dureuc, P Bourdon, O Vasseur. Laser-dazzling effects on TV-cameras: analysis of dazzling effects and experimental parameters weight assessment[C]. SPIE, 2005, 6738: 67380L.
- 20 A Dureuc, O Vasseur, P Bourdon. Assessment of laser-dazzling effects on TV-cameras by means of pattern recognition algorithms [C]. SPIE, 2007, 6738: 67380J.
- 21 Zhang Shaodi, Sun Honghai. High precision method of long-ranged laser spot position measurement[J]. Chinese J Laser, 2012, 39(7): 0708003.
- 22 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.
- 23 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.
- 24 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