

文章编号 1004-924X(2015)04-1179-08

无参考的特征点复杂度激光干扰图像评估

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: 由于目标识别和检测效果取决于目标提取的准确性, 本文结合主动成像与目标识别技术搭建了激光主动成像系统实验平台, 研究了激光干扰对获取图像质量以及特征点提取效果的影响。提出了一种无参考的特征点复杂度图像评估算法。该算法在目标区域位置计算图像的特征点、纹理、梯度和对比度复杂度, 然后综合 4 个因子得到归一化的评估结果。利用激光主动成像系统对设定目标进行了照明成像实验, 同时采集了不同干扰功率和光斑位置的干扰图像。使用本文提出的特征点复杂度算法对标准数据库及实验获得的激光干扰图像进行了评估。实验结果表明: 提出的评估算法能够客观地反映图像质量的变化情况, 可对不同程度的激光干扰图像给出合理的评估结果, 其评价结果更符合主观视觉感受, 并且能够指导激光主动成像识别系统的防护与应用。

关键词: 图像处理; 图像质量评价; 激光干扰; 特征点相似度; 目标识别

中图分类号: TN977; TP391.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152304.1179

No-reference laser-dazzling image quality assessment based on feature-point complexity

QIAN Fang^{1,2}, SUN Tao¹, GUO Jin^{1*}, WANG Ting-feng¹

(1. State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics,
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: guojin1964@126.com

Abstract: The validity of target recognition and target detection depend on the accuracy of target extraction, this paper establishes an experiment platform of laser active imaging system combining laser active image technology and target recognition technology. The image quality and feature-point extraction were researched in the target area after laser jamming, and a new No-reference Feature-point Complexity Metrics (NRFPCM) assessment algorithm was proposed. In the algorithm, the feature-point, texture, gradient and contrast complexity were computed in the target area, then the normalized NRFPCM was obtained via production of the four factors above. Finally, the luminance imaging experiment was performed for the target by utilizing the laser active imaging system and the disturbed images with different disturbing powers and different spot positions were obtained. The

收稿日期: 2014-04-17; **修订日期:** 2014-05-21.

基金项目: 激光与物质相互作用国家重点实验室科研基金资助项目 (No. SKLLIM1203-01); 吉林省重大科技攻关专项资助项目 (No. 20126015)

proposed NRFPCM algorithm was used to evaluate the standard image database and the newly obtained laser-dazzling images. The results show that the proposed algorithm reflects the image quality objectively and gives a more reasonable evaluation results for different laser-dazzling images. Moreover, evaluation results are more suitable for the subjective visual feeling. The NRFPCM gives the guidance to the laser active imaging system in the defense and application.

Key words: image processing; image quality assessment; laser-dazzling; feature-point similarity; target recognition

1 引言

相比于激光被动成像,激光主动成像系统具有成像清晰,对比度和分辨率高,不易受环境光影响等优点,目前已广泛应用于区域监视和目标识别等领域。在实际的识别和跟踪过程中,准确提取图像中的特征点是实现目标匹配和目标识别的先决条件,然而当成像系统中目标所在区域受到激光干扰等外界因素影响时,主动成像系统获取的图像质量会下降,特征点将出现误匹配,甚至无法提取特征点。这种情况下多需要根据图像中的特征点及其周围区域图像特征的变化角度建立评估模型来评价激光干扰对图像质量的影响。

常用的图像质量评价方法一般包括全参考、部分参考和无参考方法。其中采用全参考和部分参考方法进行评价时都需要无失真的原始图像或原始图像的部分特征。由于实验条件的限制,实际中许多情况下无法获取原始图像,因此对无参考图像质量评价方法的研究十分必要。近年来,Zhou Wang 等提出了一种针对 JPEG 压缩图像的无参考评价方法(NRS),该方法结合块效应估计图像的模糊程度,并根据图像水平和垂直方向差分信号的过零点比率确定块的活跃性,最后使用非线性回归分析获得最佳参数^[1]。但这种方法仅考虑了 JPEG 压缩的一种失真情况,不利于评价其他类型的失真。此外,常用的无参考评价方法还有基于图像变换域的方法(DCT-domain)^[2]等多种。该方法认为高频分量越多,则图像越清晰,但其需要进行空域与频域的变换,计算复杂,同时在变换过程中容易引入新的误差。基于梯度函数的评价方法^[3](NRGSZM)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。基于熵函数的评价方法^[4](Entropy)认为图

像越清晰则其熵函数值越大。这些方法一般对于噪声均匀分布的失真图像有效,但对于局部严重失真的激光干扰图像则由于没有考虑图像中光斑的特征以及光斑遮盖对特征提取方法的影响而不适用。

本文在分析特征点数目、位置、分布特性以及特征点周围图像特征变化的基础上,提出一种无参考特征点复杂度图像评估算法(No Reference Feature-Point Complexity Metric, NRFPCM)。算法首先使用加速分隔测试特征算法(Features from Accelerated Segment Test, FAST)方法提取干扰图像目标区域内的特征点,以特征点为基础计算图像的空间和纹理复杂度,然后在每个特征点位置处构建大小为 3×3 的图像矩阵,计算该图像矩阵的梯度和对比度失真程度,并通过以上 4 个评价指标评价干扰效果,最后通过实验对评估模型的性能进行了分析。

2 基于特征点复杂度的评估算法

在本文所使用的激光主动照明系统中,目标识别是通过特征点提取与匹配实现的。特征点一般为灰度变化剧烈的点或图像边缘上具有曲率极大值的点,而受到激光干扰后图像的亮度、对比度以及边缘特征都发生了变化,干扰光斑遮盖了图像中的信息,使得许多细节无法分辨,这将导致局部特征点提取失败或引入其他与目标无关的误匹配特征点。因此,本文通过分析图像受到激光干扰后特征点及其周围图像特征的变化情况,提出了一种无参考特征点复杂度评估算法。

2.1 整体特征复杂度函数分析

由于激光干扰功率不同,图像中饱和区域的面积和像素数目都会不同,干扰功率越强则光斑越大,被光斑遮盖的图像纹理及边缘等细节信息

越多,图像中可提取到的特征信息减少。当干扰功率一定时,光斑位置不同,图像中提取到的特征点的数量和分布规律也会有所不同,光斑越接近目标位置则对特征点提取准确性的影响越大。

本文中运用基于灰度变化的 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 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全比中心像素点大或者小,则将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^[5-9]。通过灰度匹配提取出图像中的目标区域,由于主动成像识别系统通常仅以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以及图像特征的变化情况。综合以上分析,定义整体特征评价函数包含空间复杂度和纹理复杂度因子。

空间复杂度函数 SC 定义为:

$$SC = \sqrt{SC_h^2 + SC_v^2}, \quad (1)$$

式中: SC_h 和 SC_v 分别表示水平和垂直方向的空间复杂度,反映了水平和垂直方向特征点的疏密程度。

$$SC_h = \alpha \times \sum_{i=1}^m \frac{N_F(i)}{m},$$

$$\alpha = \frac{1}{1 + \frac{1}{1 + \log_2 \frac{N_F(i)_{\max}}{m}}}}, \quad (2)$$

$$SC_v = \beta \times \sum_{j=1}^n \frac{N_F(j)}{n},$$

$$\beta = \frac{1}{1 + \frac{1}{1 + \log_2 \frac{N_F(j)_{\max}}{n}}}}, \quad (3)$$

式中: m 和 n 分别为干扰图像中目标区域的行和列所包含的像素数; $N_F(i)$ ($N_F(j)$) 为干扰图像第 i 行(第 j 列)提取的特征点的个数; $N_F(i)_{\max}$ ($N_F(j)_{\max}$) 是包含特征点数目最多的那一行(列)的特征点数; α 和 β 为加权值。当某一行(列)中的特征点数目接近该行(列)中像素数时, α 和 β 接近 1。 $N_F(i)$ ($N_F(j)$) 的值越大,说明此处的特征点越密集,是图像结构和纹理变化明显的区域。相应的 SC 值越大,说明干扰图像特征点的提取受到激光干扰的影响程度越小。

纹理复杂度函数 TC 定义为:

$$TC = \sum_{i=1}^{m \times n} \sum_{l=1} P_i(l) \log_2 \frac{1}{P_i(l)},$$

$$P_i(1) = 1 - P_i(0), \quad (4)$$

对目标区域图像提取边缘并进行二值化处理,边缘点处灰度值设为 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量分别为 $\log_2 [1/P_i(l)]$ 。TC 越大,说明图像中提取到的边缘点越多,图像所包含的纹理越丰富,激光光斑对图像中关键信息的遮挡越少。

公式(4)中提取边缘的方法见公式(5):

$$|\nabla f(x, y) - \nabla f(x_0, y_0)| \leq E_0,$$

$$|\gamma(x, y) - \gamma(x_0, y_0)| < A_0. \quad (5)$$

在干扰图像目标区域提取特征点的基础上,以该特征点 (x_0, y_0) 为中心,取其 8 邻域,组成 3×3 的矩阵,邻域内某一点坐标为 (x, y) ,通过 Sobel 水平和垂直算子计算相应点的梯度幅值。 $\nabla f(x_0, y_0)$ 为特征点位置处的梯度幅值; $\alpha(x_0, y_0)$ 为特征点位置处的梯度方向; $\nabla f(x, y)$ 为邻域内某点位置处的梯度幅值; $\alpha(x, y)$ 为邻域内某点位置处的梯度方向; E_0 取 25, A_0 取 10° ,即若二者梯度幅值差不大于 25 且梯度方向差小于 10° ,则该点为边缘点。用此方法遍历目标区域内所有特征点,得到整个目标区域图像的所有边缘点。

2.2 局部特征复杂度函数分析

特征点提取主要是基于寻找图像中灰度突变的边缘点、角点或交叉点等。激光干扰改变了图像的亮度和对比度信息,使得干扰图像中提取的特征点位置与原始图像相比出现偏差或者无法识别某些位置的特征点。图像中梯度的变化情况反映了图像的边缘清晰程度,梯度值高的区域图像边缘丰富,特征点数目较多,而此处对比度的改变也能反映像素灰度值的变化程度,同时也会影响特征点的准确提取。因此,本文定义了梯度和对比度复杂度用来分析干扰后特征点周围的图像特征的变化情况。

梯度复杂度函数 GC 定义为:

$$GC = \frac{1}{N_R} \sum_{i=1}^{N_R} g(i), \quad (6)$$

式中: N_R 为干扰图像目标区域内提取到的特征点个数。在目标区域中提取特征点,并以该特征点为中心,分别取其上、下、左、右、左上、右上、左下和右下的 8 个像素点,即 8 邻域,组成 3×3 的矩阵,在每个矩阵上计算 8 个方向 (45° 、 90° 、 135° 、 180° 、

225°、270°、315°、360°)的梯度值,累加后得到目标区域中各 3×3 矩阵的梯度幅值 $g(i)$,如公式(7):

$$g(i) = \sqrt{g_i^2(45^\circ) + g_i^2(90^\circ) + g_i^2(135^\circ) + g_i^2(180^\circ) + g_i^2(225^\circ) + g_i^2(270^\circ) + g_i^2(315^\circ) + g_i^2(360^\circ)}. \quad (7)$$

特征点周围的像素受光斑干扰后数值会发生变化,故可以通过提取梯度值求和平均反映局部区域灰度信息的变化程度。GC 的值越大,说明特征点周围清晰度较高,边缘结构更加锐利,特征点提取的稳定程度越高,激光干扰对目标识别的影响越不明显。为了方便比较,可以对 GC 进行归一化处理,计算方法如式(8)所示:

$$GC_N = \frac{|GC|}{|GC_{\max}|}, \quad (8)$$

其中: GC_{\max} 是所有 GC 中的最大值。

对比度复杂度函数 CC 定义为:

$$CC = \frac{1}{N_R} \sum_{i=1}^{N_R} c(i). \quad (9)$$

同公式(7)中方法,提取特征点位置处的 3×3 图像矩阵, N_R 为图像目标区域内提取到的特征点个数。

$$c(i) = \frac{|P_T(i) - \mu_B(i)|}{\mu_B(i)}, \quad (10)$$

式中: $P_T(i)$ 为第 i 个 3×3 矩阵中特征点的灰度值; $\mu_B(i)$ 为以该特征点为中心的矩阵的平均灰度值; CC 的值越大,说明干扰图像的对比度越大,目标区域越清晰,干扰激光对目标识别的影响越小。

2.3 特征点复杂度算法分析

综合以上分析,定义 NRFPCM 图像评价算法包含 4 个评价因子。其中空间复杂度函数 SC 和纹理复杂度函数 TC 反映了干扰图像中特征点数目、位置的变化情况,以及图像边缘信息的损失情况;梯度复杂度函数 GC 从特征点周围梯度幅值的改变角度出发,反映了当图像受到干扰后清晰度的变化;对比度复杂度函数 CC 反映了特征点周围图像灰度特征的变化情况。为了方便比较,结合公式(1)、(4)、(8)和(9)中的 4 个函数,定义 NRFPCM 方法的计算公式为:

$$NRFPCM = SC \times TC \times GC_N \times CC. \quad (11)$$

3 实验结果与分析

实验中采用不同的无参考图像质量评价算法对

4 个标准数据库中不同类型的失真图像进行评价,并计算它们的有效性统计值。同时实验搭建了一套激光主动成像识别系统,系统组成为: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 $7.4 \mu\text{m}$,帧频为 30 frame/s。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。在此基础上引入敌方干扰激光,采集了不同激光干扰功率和不同光斑位置的图像,采用本文提出 NRFPCM 方法评价激光干扰图像的质量,并分析评价结果。

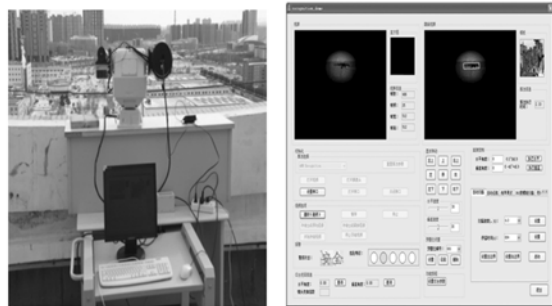


图 1 激光主动成像和识别系统

Fig. 1 Laser active imaging and recognition system

3.1 标准数据库图像质量评价

为了验证 NRFPCM 的有效性,运用已有的无参考图像质量评价算法(NRS、Entropy、DCT-domain、NRGSIM)和 NRFPCM 算法对 4 个标准数据库(TDI2008、LIVE、CSIQ、IVC)图像进行质量评价。以上数据库都提供了不同类型失真图像的主观差异平均评分值(Difference Mean Opinion Score, DMOS)。通过与算法得到的客观评价价值进行非线性关系运算,可以得出不同算法的线性相关系数(Correlation Coefficients, CC)、均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)和误点率(Outlier Ratio, OR),结果见表 1。

表 1 几种图像质量评价方法在 4 种数据库中的性能比较
Tab.1 Performance comparison of IQA metrics on 4 databases

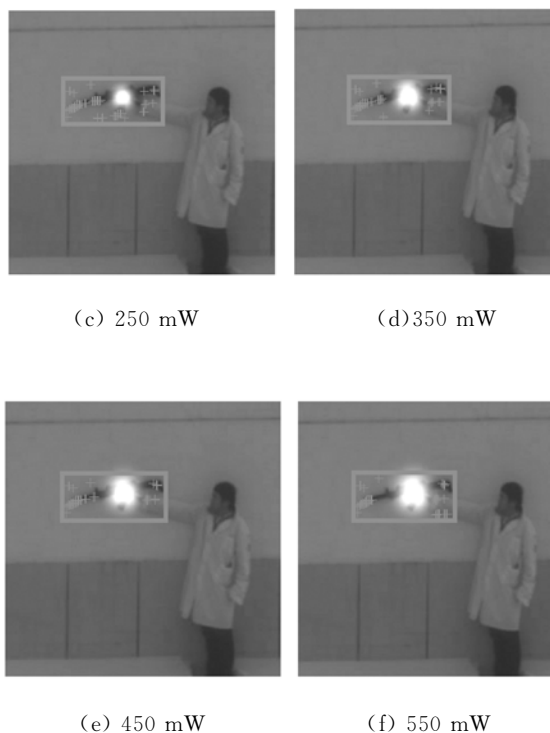
		NRS	Entropy	DCT-domain	NRGSIM	NRFPCM
TID2008	CC	0.739 4	0.870 5	0.884 0	0.905 1	0.910 5
	RMSE	0.981 3	0.835 7	0.729 9	0.713 8	0.694 3
	OR	0.140 0	0.140 0	0.066 1	0.053 7	0.006 4
LIVE	CC	0.866 0	0.875 5	0.944 5	0.954 7	0.963 4
	RMSE	13.196	11.193	8.945 6	7.529 7	7.124 2
	OR	0.189 0	0.163 0	0.056 0	0.049 0	0.003 8
CSIQ	CC	0.805 3	0.816 0	0.919 3	0.922 2	0.930 6
	RMSE	0.181 7	0.175 5	0.131 4	0.114 5	0.105 4
	OR	0.183 0	0.076 0	0.055 0	0.043 0	0.001 3
IVC	CC	0.683 3	0.798 1	0.884 7	0.908 1	0.929 0
	RMSE	0.855 6	0.725 8	0.650 7	0.547 4	0.423 7
	OR	0.195 0	0.140 0	0.081 0	0.055 0	0.003 9

CC 值越大,说明算法的客观评价与主观评价 DMOS 相关性越好,而 RMSE 和 OR 的值越小,说明算法的评价与主观评价误差越小。表 1 结果表明,NRFPCM 的 CC 值与其他 4 种算法相比更大, RMSE 与 OR 值更小,说明该算法更能准确反映人眼主观评价。

3.2 不同干扰功率的激光干扰图像质量评价

运用 NRFPCM 算法对不同激光干扰功率^[10-14]的干扰图像进行评价,如图 2 所示。图 2(a)是目标模板,大小为 96×44,图 2(b)~2(f)是激光干扰图,大小为 256×256,图中的枪为设定的目标。

图 2(b)~图 2(f)的激光干扰功率逐渐增强。FAST 算法是基于像素点周围灰度的起伏变化来确定特征点的。随着激光干扰功率的增大,光斑逐渐增大,光斑区域饱和的像素点也增多,光斑遮挡了图像中的边缘等细节信息会导致



(c) 250 mW

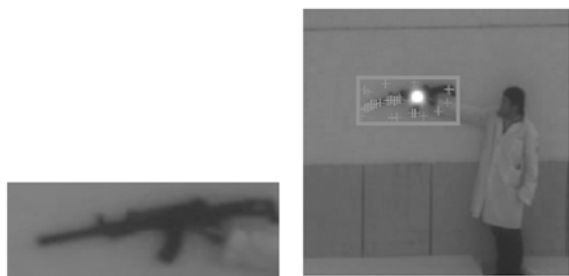
(d) 350 mW

(e) 450 mW

(f) 550 mW

图 2 具有不同干扰功率的激光干扰图像

Fig. 2 Laser dazzling images with different powers



(a) 目标模板

(b) 150 毫瓦

(a) Target image

(b) 150 mW

FAST 算法提取到误匹配特征点,甚至在某些关键位置提取不到特征点。从图 2(b)~2(f)可以看出,目标枪周围能提取到的特征点逐渐减少,而在光斑位置已经提取不到特征点。经过计算,4 种评价因子的结果如表 2 所示。

表 2 不同激光干扰功率图像评价结果

Tab. 2 Quality assessment of images with different laser dazzling powers

Parameter	b	c	d	e	f
SC	0.966 6	0.927 2	0.556 8	0.489 6	0.311 4
TC	0.493 1	0.315 8	0.234 3	0.216 6	0.173 8
GC_N	0.793 6	0.765 5	0.733 1	0.703 0	0.676 2
CC	0.981 2	0.954 7	0.934 7	0.922 2	0.912 7
NRFCM	0.371 1	0.214 0	0.089 4	0.068 8	0.033 4

从表 2 结果可知,随着激光干扰功率的增强,提取的特征点数量下降,即 SC 值减小,同时光斑周围提取到的边缘信息减少,即 TC 值减小。光斑不仅遮挡了图像灰度和纹理等特征的变化,同时改变了图像的对比度和清晰度,图像的对比度下降,分辨率降低,清晰度下降, GC_N 和 CC 值下降,故 NRFCM 值下降。从主观角度分析,图 2 (b)~图 2 (f) 质量也逐渐下降,所以, NRFCM 方法评价结果与主观评价结果较为一致。

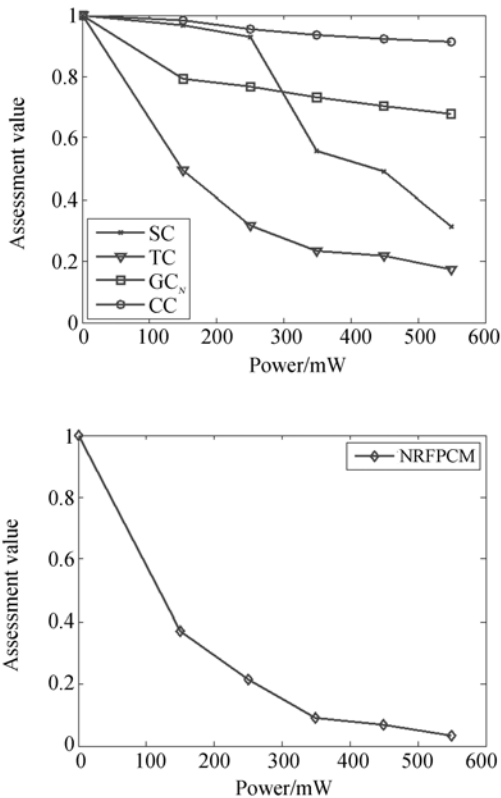


图 3 不同功率评价曲线

Fig. 3 Assessment curves for different powers

从图 3 也可以看出,随着激光干扰功率的增加,SC、TC、 GC_N 和 CC 值均逐渐减小, NRFCM

综合评价价值减小,图像质量逐渐下降。

3.3 不同光斑位置的激光干扰图像质量评价

运用 NRFCM 算法,对不同光斑位置的激光干扰图像进行评价,结果如图 4 所示,仍设定枪支为识别目标。图 4(a)是目标模板,大小为 96×44 ,图 4(b)~图 4(f)是激光干扰图,大小为 256×256 。

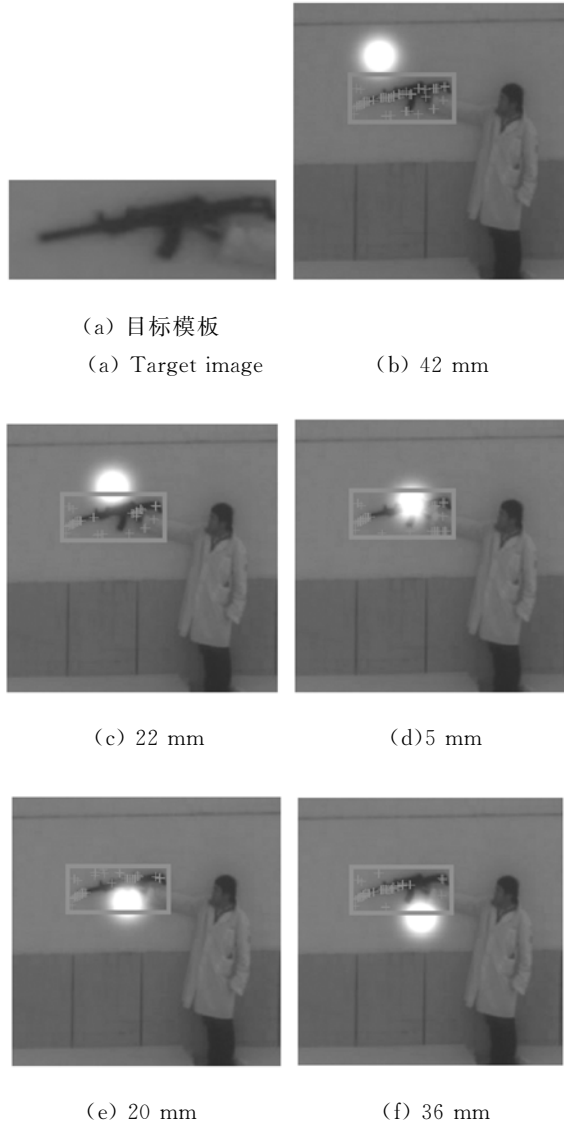


图 4 具有不同光斑位置的激光干扰图像

Fig. 4 Laser dazzling images with different spot positions

图 4 中激光干扰功率不变,但激光光斑所处位置不同。图 4(a)是目标模板,图 4(b)~4(f)中光斑从目标枪斜上方入射,逐渐接近目标中心,之后再逐渐远离目标。当光斑正好位于枪中心位置时,光斑的遮盖导致枪支上大部分特征点无法提取。当光斑远离目标时,虽然光斑周围区域的像

素点的灰度值也发生了变化,但是基本能够准确提取枪中主要部分的特征点。经过计算,4 种评价因子的结果如表 3 所示。

表 3 不同光斑位置激光干扰图像评价结果

Tab.3 Quality assessment results for laser dazzling image with different spot positions

Parameter	b	c	d	e	f
SC	0.965 7	0.258 3	0.711 4	0.659 6	0.895 6
TC	0.514 7	0.489 0	0.212 2	0.336 0	0.492 8
GC _N	0.804 5	0.716 2	0.304 9	0.596 0	0.755 1
CC	0.996 6	0.866 4	0.683 8	0.753 4	0.986 6
NRFCM	0.398 5	0.078 4	0.031 5	0.099 5	0.328 8

由于激光干扰功率不变,图中光斑面积大小不变。从特征点提取的角度分析,图 4(d)中特征点损失最严重。从主观角度分析可有,图 4(b)、4(f)、4(c)、4(e)、4(d)质量逐渐降低。在表 3 中,SC、TC、GC 和 CC 值也按以上顺序逐渐减小, NRFCM 值也逐渐减小。由此可知, NRFCM 方法评价与主观评价较为一致,准确地反映了光斑位置变化对图像质量的影响。

从图 5 可知,激光干扰功率不变时,当光斑逐渐远离目标中心,图像质量逐渐升高,图像特征点数目增多,纹理复杂度升高,图像更加清晰,对比度升高, SC、TC、GC_N 和 CC 值逐渐增大, NRFCM 综合评价值增大。

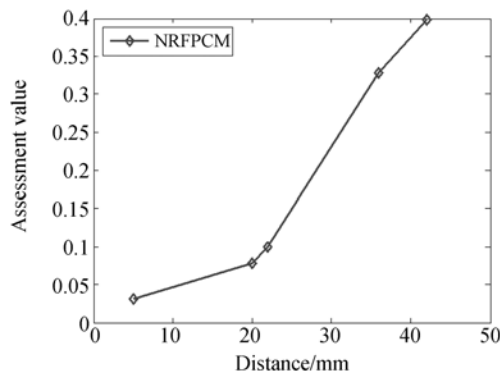
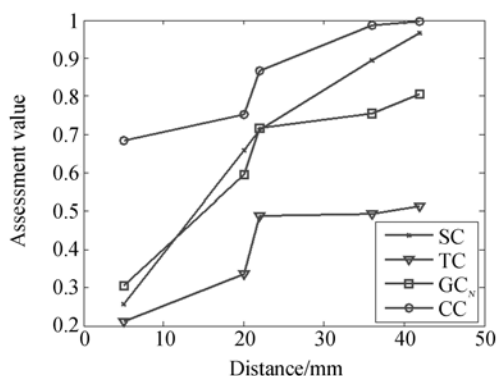


图 5 不同距离评价曲线

Fig.5 Assessment curves for different distances

4 结 论

对于激光主动成像系统来说,能否准确提取特征点决定了系统的目标识别和检测效果。本文根据激光干扰对特征点提取以及图像特征变化的影响,对激光干扰主动成像系统的效果进行了评估。实验中采集了不同激光干扰功率和不同光斑位置的干扰图像,运用本文提出的无参考 NRFCM 算法对标准数据库图像和实际采集的激光干扰实验图像进行评价。结果表明,相比于 NRS、Entropy、DCT-domain、NRGSIM 算法,本文算法与主观评价的相关性和一致性更高,误点率更低。针对激光干扰图像,本文的 NRFCM 算法提出的空间复杂度 SC 反映了干扰图像中特征点分布特性的变化情况,纹理复杂度 TC 反映了图像中边缘的丰富程度,梯度复杂度 GC 从特征点周围梯度幅值的变化情况出发,反映了干扰后图像清晰度的变化,对比度复杂度 CC 反映了特征点周围像素灰度特征的变化。对实验数据的分析表明:NRFCM 算法在无法获取原始图像的情况下,能够根据光斑的大小和位置,以及对图中关键信息遮挡的程度给出合理的评价结果,能够真实地反映激光干扰的效果,并与主观评价保持了较好的一致性,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 SH ZH, 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] 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.
- SANG Q B, SU Y Y, LI CH F, *et al.*. No-reference blur image quality assessment based on gradient similarity [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2013, 24(3): 573-577. (in Chinese)
- [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]. *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] 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.
- TANG Y H, LU H ZH. Fast local feature description algorithm based on greyvalue differential invariants [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(2): 447-454. (in Chinese)
- [9] 刘志文, 刘定生, 刘鹏. 应用尺度不变特征变换的多源遥感影像特征点匹配[J]. *光学 精密工程*, 2013, 21(8):2146-2153.
- LIU ZH W, LIU D SH, LIU P. SIFT feature matching algorithm of mutli-source remote image [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(8): 2146-2153. (in Chinese)
- [10] 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.
- QIAN F, GUO J, SUN T, *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. (in Chinese)
- [11] XU X, SUN X Q, SHAO L. Simulation of laser jamming and its influence on CCD imaging performance [J]. *SPIE Optoelectronic Imaging and Multimedia Technology*, 2010, 7850:1-7.
- [12] SCHLEIJPEN M A, DIMMELER A, EBERLE B, *et al.*. Laser dazzling of focal plane array cameras [J]. *SPIE Technologies for Optical Countermeasures*, 2007, 6738:1-9.
- [13] DUREUC A, BOURDON P, VASSEUR O. laser-dazzling effects on TV-cameras: analysis of dazzling effects and experimental parameters weight assessment [J]. *SPIE Technologies for Optical Countermeasures*, 2005, 6738:1-6.
- [14] DUREUC A, VASSEUR O, BOURDON P, *et al.*. Assessment of laser-dazzling effects on TV-cameras by means of pattern recognition algorithms [J]. *SPIE Technologies for Optical Countermeasures IV*, 2007, 6738:1-8.

作者简介:



钱方(1987—),女,吉林长春人,博士研究生,主要从事图像处理技术研究。
E-mail: qfmail@sina.cn

导师简介



郭劲(1964—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,2007年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事激光与物质相互作用技术研究。E-mail: guojin1964@126.com

(版权所有 未经许可 不得转载)