

doi:10.3788/gzxb20134203.0342

复杂背景下混合畸变目标识别技术

尚吉扬, 张宇, 张淇博, 王文生

(长春理工大学 现代光学测试技术研究室, 长春 130022)

摘 要: 结合高斯函数和最大平均相关高度算法设计了高斯-最大平均相关高度滤波器, 解决了光学相关识别系统对混合畸变目标(同时存在比例畸变和旋转畸变的目标)的识别问题. 在设计滤波器时, 通过优化平衡高斯-最大平均相关高度滤波器的标准差 σ 、输出噪声方差系数 α 、平均相关能量系数 β 及平均相似测量系数 γ 来提高高斯-最大平均相关高度滤波器对混合畸变目标的响应能力. 最后通过仿真实验可知, 在畸变容差范围(比例畸变 0.92~1.16 倍, 旋转畸变 -8 度~24 度)内, Vander Lugt 相关器利用单个高斯-最大平均相关高度滤波器可以实现任意状态混合畸变目标的识别. 作为实例, 用高斯-最大平均相关高度滤波器对复杂背景下的飞机目标进行了识别实验, 验证了该方法的可行性.

关键词: 光学相关; 混合畸变; 匹配滤波; 高斯-最大平均相关高度滤波器; 复杂背景

中图分类号: O438.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)03-0342-6

Recognition Technology of Hybrid-distortion Target in Cluttered Background

SHANG Ji-yang, ZHANG Yu, ZHANG Qi-bo, WANG Wen-sheng

(Laboratory of Contemporary Optical Measure Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: Combined Gauss function with Maximum Average Correlation Height (MACH) algorithm, Gauss-Maximum Average Correlation Height (GMACH) filter is designed. The Hybrid-Distortion target (existing the scale distortion and rotation distortion simultaneously) could be recognized with GMACH filter. In order to improve the Hybrid-Distortion target response ability of the GMACH filter, the standard deviation σ , output noise variance coefficient α , the average correlation energy coefficient β and average similarly measure coefficient γ are optimized and balanced. Through the simulation experiment, it is known that the arbitrary hybrid-distortion target can be recognized by a single GMACH filter within the distortion tolerance range (the scale distortion tolerance is 0.92~1.16 times and the rotation distortion tolerance is -8~24 degrees). As experiment example, a plane under cluttered background was recognized using the GMACH filter. Experiment results prove the feasibility of this method.

Key words: Optical correlation; Hybrid-Distortion; Matching filter; Gauss Maximum Average Correlation Height (GMACH); Cluttered background

0 引言

随着现代科学技术的迅猛发展, 在战场上能够对敌方目标进行有效地跟踪是进行精度打击的前提. 匹配滤波作为一种有效的目标识别分类方法, 尤

其是基于相关匹配原理的光学相关识别技术, 由于其具有电学系统无可比拟的运算速度及并行处理能力, 被广泛地应用到战场上进行敌方目标识别. 尽管光学相关识别具有平移不变性, 但是在识别过程中, 目标相对模板会产生旋转和尺寸畸变, 导致相关峰

基金项目: 总装备部预言基金资助

第一作者: 尚吉扬(1985-), 男, 博士, 主要研究方向为目标识别. Email: shzy163@126.com

导师(通讯作者): 王文生(1943-), 男, 教授, 主要研究方向为光学相关、全息、散斑. Email: wwsciom@163.com

收稿日期: 2012-08-18; 录用日期: 2012-11-20

强度迅速下降,给目标识别带来困难甚至造成目标的丢失^[1-2].

为了克服相关匹配技术对畸变目标识别困难的问题,人们对相关匹配方法进行了大量改进.一类是从运算方式上进行改进,最典型的代表是采用分数傅里叶变换代替相关识别中的传统傅里叶变换,实现分数相关尺度畸变识别.但是该方法光效率不是很高,并且识别范围也不大,只能实现 1.1 倍的尺度畸变识别,不能实现大畸变容差的识别^[3].第二类是分析待测图像成分后再进行匹配识别,典型代表是用梅林变换、圆谐展开、极坐标变换等.这种方法只能对特定的畸变类型(如平面内的旋转或径向的比例改变)实现小范围畸变识别,并且受背景噪声影响很大,不能普遍解决畸变目标的识别问题.第三类是改进匹配滤波器的设计,如综合鉴别函数(Synthetic Discriminate Function, SDF)、复合滤波器等,以及综合鉴别函数的改进算法如最小方差综合鉴别函数(Minimum Variance Synthetic Discriminate Function, MVSDF)、最小平均相关能量(Minimum Average Correlation Energy, MACE)滤波器及最大平均相关高度(Maximum Average Correlation Height, MACH)滤波器^[4-8]等.

综合鉴别函数及其衍生方法能够有效地解决畸变目标的识别问题.如文献[9]用综合鉴别函数融合 K-L 变换实现了 0.9~1.05 倍的尺度畸变目标识别,但是无法实现混合畸变目标的相关识别.而文献[10]中采用的用优化折中综合鉴别函数滤波器虽然能够完成混合目标的识别,并且其混合畸变容差为旋转 0~30 度、尺度 1~0.8 倍,但是需要对一个待识别目标制作 80 幅训练图像,这在实际应用中计算量是非常大的,导致该方法可行性不高^[9-10].

由于定焦镜头在摄取待识别目标时其相对目标的方位角和距离总是在改变,所以混合畸变目标是匹配识别系统中最为常见畸变类型.而到目前还没有能够有效解决混合畸变目标的识别问题的相关匹配方法.如果不能有效地解决混合畸变目标的识别问题,将严重制约匹配识别系统的应用.

为了能够有效地解决混合畸变目标的识别问题,本文结合高斯函数在频域具有低通平滑滤波的性能及最大平均相关高度算法所具有的大畸变容差特性,设计出高斯-最大平均相关高度(Gauss Maximum Average Correlation Height, GMACH)滤波器,并优化平衡了高斯-最大平均相关高度滤波器的标准差 σ 、输出噪声方差系数 α 、平均相关能量系数 β 、平均相似测量系数 γ 及制定了训练图像选取的方法,增强了匹配识别系统的输出相关峰强度,

以最少数量的训练图像解决了较大畸变范围内的混合畸变目标的匹配识别问题.

1 匹配识别原理及装置

1.1 匹配识别原理

为了从图像中确定出是否存在某一目标,可以把某目标从标准图像中预先提取出来作为描述目标的模板,然后在另一幅图像中搜索有无这种目标.匹配方法主要有两种:全图匹配和特征匹配.最为常用的是基于相关的频域匹配,属于特征匹配的一种.在匹配中,设 $f(x, y) = t(x, y) + n(x, y)$ 是一幅包含目标和背景噪声的图像,其中 $t(x, y)$ 是目标函数, $n(x, y)$ 是背景噪声函数,并且有 $t(x, y) \neq n(x, y)$. 而 $H(u, v)$ 是预先从标准图像中提取出来的模板,模板的值正比于目标函数的傅里叶变换的共轭,即 $H(u, v) \propto T^*(u, v)$,其中 $T(u, v)$ 为目标函数 $t(x, y)$ 的傅里叶变换, $*$ 表示共轭.如果要在图像 $f(x, y)$ 中寻找是否存在目标 $t(x, y)$,用模板 $H(u, v)$ 对 $f(x, y)$ 进行搜索.令 $F(u, v)$ 和 $N(u, v)$ 分别表示 $f(x, y)$ 和 $n(x, y)$ 的傅里叶变换,则

$$F(u, v)H(u, v) = T(u, v)T^*(u, v) + N(u, v)T^*(u, v) \quad (1)$$

对式(1)求傅里叶逆变换得

$$f(x, y) \star h(x, y) = t(x, y) \star t(x, y) + n(x, y) \star t(x, y) \quad (2)$$

式中 \star 表示相关运算.如果模板 $H(u, v)$ 在 $f(x, y)$ 中找到目标 $t(x, y)$,则两个函数的相关值会在 $f(x, y)$ 中相应的位置上达到最大,表示为输出图像中的最亮的相关峰,其余位置为黑色的弥散斑^[11-12].

1.2 匹配识别装置

典型的光学相关匹配识别装置是 Vander Lugt 相关器.将待识别图像输入到 Vander Lugt 相关器中,由傅里叶透镜进行傅里叶变换得到待识别图像的频谱,待识别图像的频谱用本文中的 GMACH 滤波器进行滤波,再用傅里叶透镜进行傅里叶逆变换,得到输出相关峰,这样就可以在 Vander Lugt 相关器上实现混合畸变目标的识别.

2 高斯-最大平均相关高度滤波器

2.1 高斯函数

对于二维线性高斯滤波器通常可以表示为

$$G(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x^2 + y^2)}{2\sigma^2}\right) \quad (-l \leq x, y \leq l) \quad (3)$$

其中, σ 是标准差, l 是函数的边界.线性高斯函数对图像滤波后可以去除图像的噪声^[13].

2.2 最大平均相关度算法

最大平均相关高度算法是综合鉴别函数的改进方法. 最大平均相关高度算法优化了综合鉴别函数的四个互相制约的指标, 即: 输出噪声方差、平均相关能量、平均相似性测量和平均相关高度. 最大平均相关高度算法使平均相关高度最大并使平均相似性测量最小, 同时用来锐化相关峰的平均相关能量和抑制噪声的输出噪声方差也被优化和平衡. 用 M 个 d 维列向量 x_1, x_2, \dots, x_M 表示 M 个训练图像的傅里叶变换, 则最大平均相关高度滤波器可以写为

$$h = \frac{p_x^*}{\alpha N + \beta C_x + \gamma S_x} \quad (4)$$

式中, $*$ 表示共轭; p_x 是 M 个向量 x_1, x_2, \dots, x_M 的平均值; N 是 $d \times d$ 维的对角矩阵, 表示噪声功率谱; C_x 是 $d \times d$ 维对角矩阵, 对角线上元素是训练图像的平均功率谱密度值, 表示平均相关能量; S_x 是 $d \times d$ 维对角矩阵, 表示平均相似测量, 分别定义为

$$C_x = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M X_i^* X_i \quad (5)$$

$$S_x = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (X_i - P_x)^+ (X_i - P_x) \quad (6)$$

式中, $+$ 表示共轭转置; X_i 表示单个训练图像的傅里叶变换, 为 $d \times d$ 维对角矩阵, x_i 是对角线上的元素. P_x 是训练图像的平均傅里叶变换, 定义为

$$P_x = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M X_i \quad (7)$$

式中 α, β 和 γ 为非负数, 且 $0 \leq \alpha, \beta, \gamma \leq 1$, 选择不同的 α, β 和 γ 值可以控制 MACH 滤波器的特性, 以满足不同的应用需求. 例如: 当 $\beta = \gamma = 0, \alpha = 1$ 时, 此时的滤波器特性像最小方差综合鉴别函数, 能够有效地滤掉噪声但是相关峰较宽; 当 $\alpha = \gamma = 0, \beta = 1$ 时, 此时的滤波器特性像最小平均相关能量滤波器, 能产生尖锐的相关峰并抑制噪声, 但是对畸变敏感; 当 $\alpha = \beta = 0, \gamma = 1$ 时, 此时滤波器有较高的畸变容差^[14-15].

2.3 高斯-最大平均相关高度滤波器的设计

为了解决混合畸变目标的识别问题, 本文结合高斯函数和最大平均相关高度算法设计了高斯-最大平均相关高度滤波器. 用高斯函数对最大平均相关高度滤波器进行增强, 所得的高斯最大平均相关高度滤波器为

$$\text{GMACH} = h \times G(x, y) = \frac{p_x^*}{\alpha N + \beta C_x + \gamma S_x} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot \exp\left(-\frac{(x^2 + y^2)}{2\sigma^2}\right) \quad (8)$$

这样, 高斯函数的频域低通滤波特点和最大平均相关高度算法的高畸变容差特性都结合在一起,

形成 GMACH 滤波器. 并对 GMACH 的标准差 σ 、输出噪声方差系数 α 、平均相关能量系数 β 、平均相似测量系数 γ 进行优化, 这样 GMACH 的低频分析能力得以提高, 并去掉无用的高频噪声, 提高畸变容差和识别精度, 满足识别混合畸变目标的条件.

2.4 高斯-最大平均相关高度滤波器的优化

1) 在计算高斯-最大平均相关高度滤波器噪声模型时, 根据不同的复杂背景选用不同的模拟背景图像, 同时加入 25 dBW 的白噪声计算式(8)的噪声功率谱 N ;

2) 对 GMACH 滤波器的标准差 σ 、输出噪声方差 α 、平均相关能量 β 、平均相似测量的 γ 值进行优化, 使滤波器具有很高的畸变容差, 同时能够锐化相关峰和抑制噪声. GMACH 滤波器的标准差初始值 $\sigma = 1$, 首先由 3.2 节已知当 $\alpha = \beta = 0, \gamma = 1$ 时, 滤波器具有最大的畸变容差, 但是此时相关峰较宽并且有很大的噪声; 然后使 $\beta = 0, \gamma = 1$, 通过实验发现当 $\alpha = 0.5$ 时, 相关面上的噪声已被有效地抑制, 但是相关峰仍然比较宽; 其次在 $\gamma = 1, \alpha = 0.5$ 的基础上, 通过实验得知, 在 $\beta = 0.45$ 时, 输出相关峰变得较为尖锐; 最后在 $\gamma = 1, \alpha = 0.5, \beta = 0.45$ 的基础上, 改变标准差 σ , 实验发现当标准差由 1 逐渐减小时, 滤波器的输出的相关峰值没有明显改善. 但是当标准差 σ 由 1 逐渐增大时, 滤波器的畸变容差进一步提升, 输出相关峰的能量逐渐增强, 但是当标准差 σ 的值超过 20 时, 噪声会明显增强, 使相关峰的能量减弱. 所以, 优化后的 GMACH 滤波器的标准差 $\sigma = 20$, 输出噪声方差系数 $\alpha = 0.5$, 平均相关能量系数 $\beta = 0.45$, 平均相似测量系数 $\gamma = 1$. 这样, 设计出来的 GMACH 滤波器具有高的畸变容差和抑制噪声的能力, 通过选择合适的训练图像, 可以完成混合畸变目标的识别.

2.5 GMACH 滤波器的合成

为了识别混合畸变目标, 所选取的训练图像既要包含比例畸变图像又要包含旋转畸变图像. 通过实验研究得出, 训练图像要按照表 1 的关系选取.

表 1 训练图像关系

Table 1 Relationship of training image					
Scaling factor	Rotation angle/(°)				
0.92 time	-8	0	8	16	24
1 time	-8	0	8	16	24
1.08 times	-8	0	8	16	24
1.16 times	-8	0	8	16	24

按照表 1 的关系对待测目标制作 20 幅训练图像, 然后用上述 20 幅训练图像根据等式(8)和 2.4 节中 GMACH 滤波器的优化结果合成 GMACH 滤波器, 实现复杂背景下混合畸变目标的识别. 相比文

献[10]中的方法所用的训练图像少了 4 倍,但是混合畸变容差却比文献[10]有所提高.

由于要处理 20 幅训练图像来合成 GMACH 滤波器,因此要限制图像的像素大小来控制计算量,提高滤波器的合成速度. 实验中训练图像的像素大小为 640×480 ,在笔记本电脑上用 MATLAB 合成 GMACH 滤波器的时间为 6.28 s,如果用 DSP 进行滤波器的合成,会大大缩短运算时间,所以 GMACH 滤波器具有实际应该价值.

3 实验结果

3.1 真目标实验

为了验证 GMACH 滤波器理论的合理性及畸变容差范围,本文编写了 GMACH 滤波器的合成程序并用 GMACH 滤波器进行了大量的混合畸变目标的识别实验,实验结果表明该滤波器对混合畸变目标有很高的识别率及鲁棒性. 作为实例,本文用战斗机作为目标,进行混合畸变目标的识别实验. 战斗机的原始图像如图 1(a)所示,战斗机的 GMACH 滤波器如图 1(b). 对战斗机目标在比例缩放 $0.92 \sim 1.16$ 倍同时旋转 $-8 \sim 24^\circ$ 的混合畸变的范围内,以 0.01 倍和 1 度为步长进行了逐点识别实验,其相关峰强度与目标相对模板的缩放比例及旋转角度的关系如图 2 所示. 其中部分战斗机的实验结果如图 3 和图 4 所示. 图 3 所示的是缩小 0.96 倍并旋转 -4° 的混合畸变目标识别结果. 图 4 所示的是多个不同状态下混合畸变目标识别结果,每个目标的状态如图 4(a)所示.

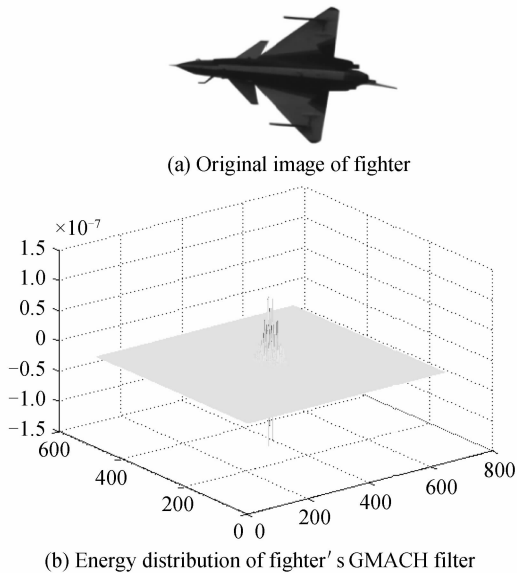


图 1 战斗机的原始图像及 GMACH 滤波器
Fig. 1 Original image and GMACH filter of fighter

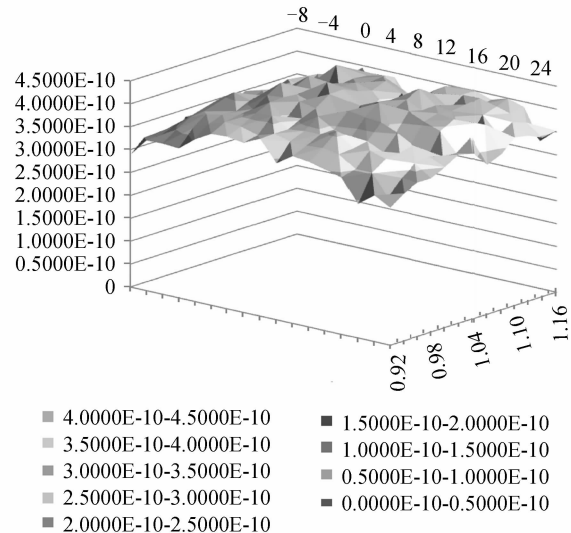
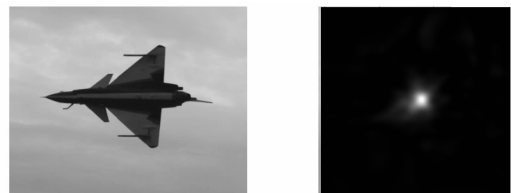


图 2 混合畸变目标的相关峰强度
Fig. 2 The correlation peak intensity



(a) Scale shrunk 0.96 times and rotated -3 degree of original image (b) 2-D correlation peak

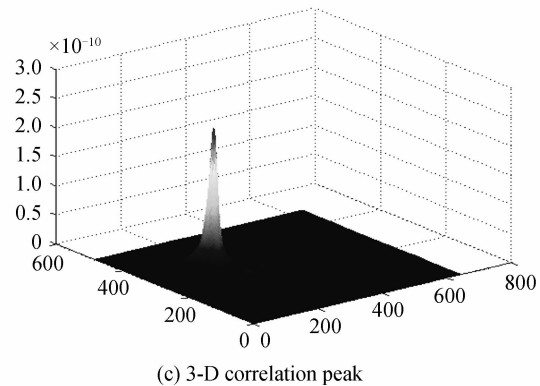


图 3 缩小 0.96 倍且旋转 -4° 的混合畸变战斗机目标识别结果

Fig. 3 Hybrid-distortion fighter target recognition result of shrinking 0.96 times and rotating -4 degrees



(a) The detected targets images

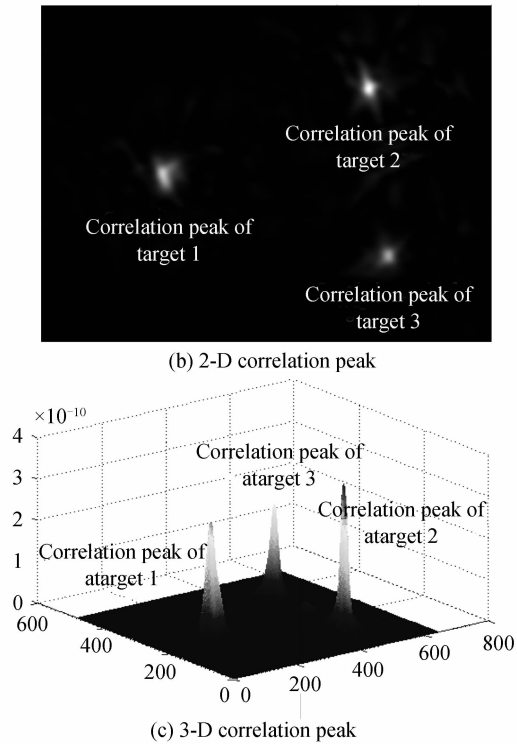


图 4 不同状态下混合畸变目标识别结果
Fig. 4 Recognition result of hybrid-distortion fighter target in different status

图 2 表明 GMACH 对畸变容差范围内的混合畸变目标输出的相关峰强度在同一数量级,输出的相关峰强度比较稳定.图 3 图 4 中的二维相关峰中的亮点位置代表对应的待测目标的位置;三维相关峰表示了相关峰的强度大小.由三维相关峰结果可以看出,GMACH 滤波器对输出旁瓣控制得很好,在整个输出相关面内,只有一个主相关峰,没有旁瓣效应.实验结果表明待测目标的位置和相关峰的位置有着明确的对应关系,既相关峰和输出图像中心之间的距离等于待测目标和基准之间的距离.由图 2、图 3 及图 4 表明,应用 GMACH 滤波器可以完成混合畸变目标的识别.

为了验证所设计的高斯-最大平均相关高度滤波器相对原有的最大平均相关高度滤波器的优越性,对图 3(a)所示的目标用最大平均相关高度滤波器进行了对比实验,实验结果如图 5.

由图 5 所示的相同目标用最大平均相关高度滤波器的识别结果可以发现,最大平均相关高度滤波器对混合畸变目标输出的相关峰对比度很低,并且相关峰周围的噪声能量很高,不利于目标的精确定位.所以所设计的高斯-最大平均相关高度滤波器能够有效地解决混合畸变目标的识别问题.

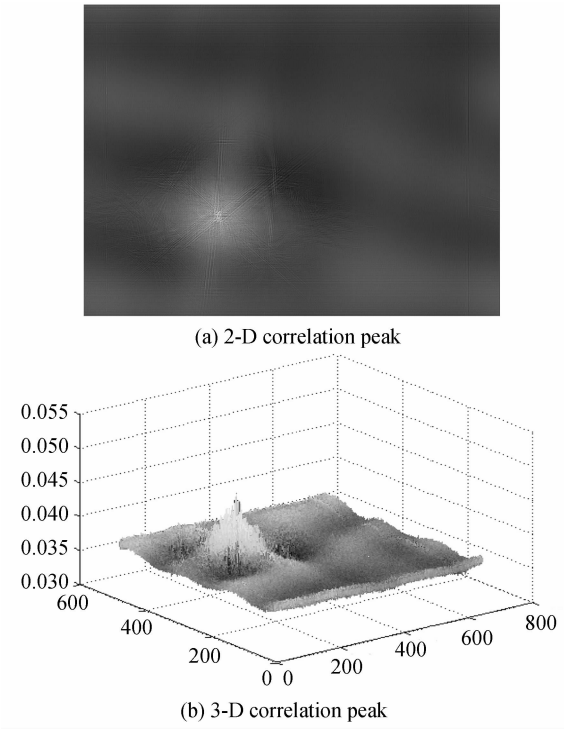


图 5 图 3(a)所示目标用最大平均相关高度滤波器的识别结果
Fig. 5 Recognition result of Fig. 3(a) target using maximum average correlation height filter

3.2 伪目标实验

为了验证 GMACH 滤波器区分真伪目标的能力,本文选取了两个和模板战机相似的飞机作为伪目标,同两个不同状态下战机混合畸变目标一起进行识别.待识别图像如图 6 所示.识别结果如图 7 所示.

由图 7 的实验结果可知,GMACH 滤波器对伪目标的相关峰输出强度远远小于真目标输出相关峰的强度,在相关平面内只有两个真目标的相关峰.所以 GMACH 滤波器能够有效地区分真伪目标,防止伪目标对识别跟踪的干扰.

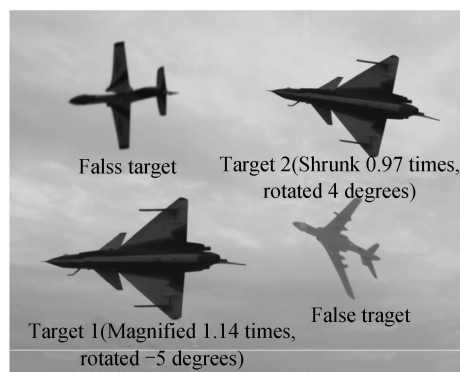


图 6 伪目标和混合畸变目标
Fig. 6 False target and hybrid-distortion target

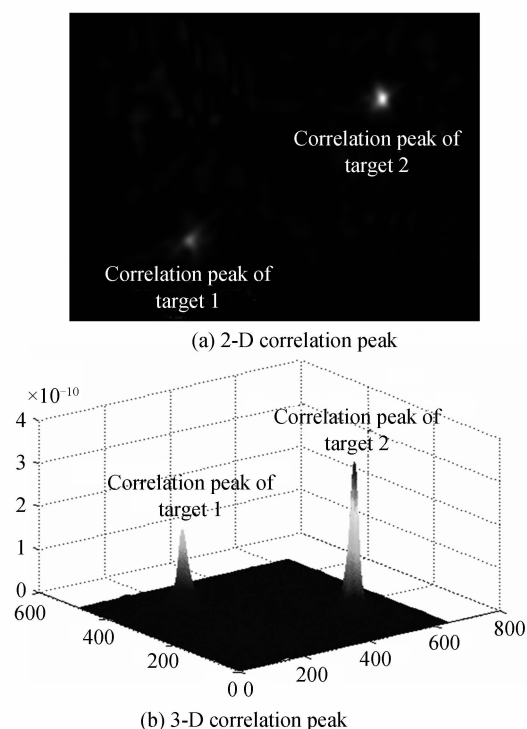


图7 伪目标和混合畸变目标的识别结果
Fig. 7 Recognition result of false target and hybrid-distortion target

4 结论

本文为了解决图像匹配相关识别系统对混合畸变目标(同时具有比例畸变和旋转畸变)识别困难的问题,结合高斯算法和最大平均相关高度算法的各自的优势设计了GMACH,并优化的GMACH滤波器的标准差 σ 、输出噪声方差系数 α 、平均相关能量系数 β 及平均相似测量系数 γ ,使GMACH滤波器具有高的畸变容差和很强的抑制噪声能力,同时改进了选取训练图像的方法.实验结果表明,当 $\sigma=20$, $\alpha=0.5$, $\beta=0.45$, $\gamma=1$ 时,GMACH滤波器可以有效地滤掉复杂的背景噪声,产生尖锐明亮的相关峰,实现混合畸变目标的识别,并能够有效地区分真伪目标及完成多目标识别.通过这种方法,在缩放比例0.92~1.16倍及旋转角度 $-(8\sim 24)^\circ$ 的范围内,用单个GMACH滤波器就可以对任意状态的混合畸变目标进行准确地识别,并且合成CMACH滤波器只用20幅训练图像.相比于文献[10]完成混合畸变目标识别所采用的方法,不仅使所需的训练图像仅为文献[10]的四分之一,并且提高了畸变容差.对于超出上述畸变容差范围的目标,相关峰强度逐步减弱,但部分仍然可以识别.新设计的GMACH滤波器在混合畸变目标的探测识别领域具有很强的优势和良好的应用前景.

参考文献

[1] GUO Wei, ZHAO Yi-gong, XIE Zhen-hua. An improved

normalized cross-correlation for template matching of infrared image [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(1): 189-193.

郭伟,赵亦工,谢振华.一种改进的红外图像归一化互相关匹配算法[J].光子学报,2009,**38**(1):189-193.

[2] YIN Song-feng, WANG Yi-cheng, CAO Liang-cai, et al. Fast correlation matching based on fast Fourier transform and integral image [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(12): 2246-2250.

殷松峰,王一程,曹良才,等.基于快速傅里叶变换和积分图像的快速相关匹配[J].光子学报,2010,**39**(12):2246-2250.

[3] HAN Li, LIU Shu-tian, WANG Qi, et al. The performance of fractional correlation applied in distortion-invariant pattern recognition [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(2): 131-136.

韩利,刘树田,王琪,等.分数相关畸变不变模式识别特性研究[J].光子学报,2000,**29**(2):131-136.

[4] 陈鹏.目标跟踪与背景减除算法研究[D].杭州:浙江大学,2010.

[5] BONE P, YOUNG R, CHATWIN C. Position rotation scale and orientation-invariant multiple object recognition from cluttered scenes [J]. *Optical Engineering*, 2006, **45**(7): 1-8.

[6] SADJADI F A, MAHALANOBIS A. Target-adaptive polar metric synthetic aperture radar target discrimination using maximum average correlation height filters [J]. *Applied Optics*, 2006, **45**(13): 3036-3070.

[7] MAHALANOBIS A, KUMAR B V K V, FRANKOT R T. Intra-class and between-class training-image registration for correlation-filter synthesis [J]. *Applied Optics*, 2000, **39**(17): 2918-2924.

[8] SHANG Ji-yang, ZHANG Yu, CHEN Chi, et al. Distorted target recognition based on wavelet-modified maximum average correlation height (MACH) algorithm [J]. *Journal of Scientific Instrument*, 2011, **32**(9): 2057-2065.

尚吉扬,张宇,陈驰,等.小波改进最大平均相关高度法实现畸变目标识别[J].仪器仪表学报,2011,**32**(9):2057-2065.

[9] SHAO Jun, HUA Wen-shen, ZHOU Zhong-liang, et al. Optical correlation image recognition technology to resist scale distortion [J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, **29**(4): 504-507.

邵珺,华文深,周中亮,等.一种抗尺度畸变的光学相关图像识别技术[J].应用光学,2008,**29**(4):504-507.

[10] WU Wei, ZHOU Jin-peng, WANG Xing-shu, et al. Design of matched filters for image correlation recognition of distortion targets [J]. *Journal of Applied Optics*, 2009, **30**(1): 11-15.

吴伟,周金鹏,王省书,等.用于畸变目标相关识别的匹配滤波器设计[J].应用光学,2009,**30**(1):11-15.

[11] 龚声蓉,刘纯平,王强,等.数字图像处理与分析[M].北京:清华大学出版社,2006:242-244.

[12] SU Yan-ming, QI Min, LI Da-jian, et al. Image correlation matching algorithms and infrared target tracking [J]. *Computer Simulation*, 2011, **28**(9): 46-49.

宿燕鸣,齐敏,李大健,等.图像相关匹配算法研究与红外目标跟踪应用[J].计算机仿真,2011,**28**(9):46-49.

[13] QIAN Xiao-liang, GUO Lei, YU Bo. Adaptive Gaussian filter based on object scale [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2010, **46**(12): 14-16.

钱晓亮,郭雷,余博.基于目标尺度的自适应高斯滤波[J].计算机工程与应用,2010,**46**(12):14-16.

[14] SHEN Xue-ju, WANG Yong-zhong, YAO Guang-tao. Research on unconstrained phase-only matched filtering design [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(5): 945-948.

沈学举,王永仲,姚广涛.非约束纯位相空间匹配滤波器设计研究[J].光子学报,2007,**36**(5):945-948.

[15] KUMAR B V K V, DANIEL W C. Optimal trade-off synthetic discriminant function filters for arbitrary devices [J]. *Optical Society of America*, 1994, **19**(10): 1556-1558.