

文章编号:1004-4213(2011)08-1231-7

最大平均相关高度滤波算法在畸变目标识别中的应用

尚吉扬,陈驰,张宇,王文生

(长春理工大学 光电工程学院 现代光学测试技术实验室,长春 130022)

摘 要:为了解决在联合变换相关器上无法识别复杂背景下畸变目标(目标的平面内旋转或尺寸改变)的问题,对其应用最大平均相关高度滤波算法进行畸变目标识别.首先在频域内优化最大平均相关高度滤波器的三个性能控制参量;然后将优化好的最大平均相关高度频域滤波器映射到物空间,得到最大平均相关高度参考模板.作为实例,本文对复杂背景下的军舰和汽车目标进行了光学识别实验,结果表明,当滤波器的控制参量为 $\gamma=1, \alpha=0, \beta=0.1$ 时,得到的 MACH 参考模板最为清晰,目标产生的相关峰最为尖锐明亮.通过这种方法,在联合变换相关器上能够得到的比例畸变容差为 28%,旋转畸变容差为 20°,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.改进后的 MACH 滤波器在畸变目标的探测领域具有很强的优势和良好的应用前景.

关键词:光电混合联合变换相关器;最大平均相关高度滤波器;畸变目标;傅里叶光学;复杂背景
中图分类号: O438.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/gzxb20114008.1231

0 引言

近年来,目标识别技术在机器人和机器视觉等领域中起到关键作用而逐渐受到人们的重视.光学相关识别技术因为其内在的并行处理能力和快速傅里叶变换能力而被广泛地应用在机器视觉和自动模式识别中.比较典型的光学相关器包括 Vander Lugt 相关器和联合变换相关器.与 Vander Lugt 相关器相比,联合变换相关器不用事先制作匹配滤波器,且不用对滤波器进行精确定位,能够同时对参考模板和目标图像进行处理,可以进行实时处理^[1-3].

但在模式识别的实际应用中,因为目标相对探测器的位置不固定,所采集的目标相对预先设定的模板会产生畸变,这使得复杂背景下畸变目标的识别成为一项具有挑战性的任务.目前有许多方法用来解决畸变目标的识别和探测问题,这些方法大致分为两种^[4-6]:一种方法是分析图像的成分,不需要训练图像,包括梅林变换、圆谐展开和极坐标变换等.但是它们的缺点是特定的算法只适用特定的畸变类型(目标旋转变换或径向比例改变),并且背景噪声对识别结果影响很大;另一种方法是用一系列畸变目标的训练图像来合成滤波器,对待测畸变目

标进行滤波来完成识别,如综合鉴别函数、复合滤波器和广义滤波器.在上述方法中,综合鉴别函数(Synthetic Discriminant Function, SDF)法是一项比较成熟的技术,它有许多变形:如最小方差综合鉴别函数滤波器(Minimum-Variance Synthetic Discriminant Function, MV-SDF)、最小平均相关能量滤波器(Minimum Average Correlation Energy, MACE)和最大平均相关高度滤波器(Maximum Average Correlation Height, MACH)等.

Mahlanobis 等人于 1994 年提出 MACH 滤波器^[7],并用于 Vander Lugt 相关器上进行频域滤波.但是,到目前为止,MACH 滤波器的应用只局限于频域滤波,还没有成功地用在联合变换相关器上,而联合变换相关器也没有识别畸变目标的有效方法.本文首先对所选取的训练图像集进行边缘提取,在频域内合成 MACH 滤波器,并对其重新设计,最后将重新设计的 MACH 滤波器映射到物面得到最大平均相关高度参考模板,这样就可以成功地将 MACH 算法用在联合变换相关器上,解决了联合变换相关器对畸变目标的识别问题,并提高了畸变目标识别的准确率.

基金项目:总装备部预研局十一五基金(51×××××05)资助

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

导 师: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:2011-01-11;修回日期:2011-04-08

1 光学相关探测原理

联合变换相关器是一种较为先进的光学模式识别器,它是用光学的方法探测目标函数与模板函数的相似度.用高分辨率空间光调制器(Spatial Light Modulator, SLM)和电耦合器件(CCD)代替传统联合变换相关器中的胶片构成光电混合联合变换相关器,其原理如图 1.

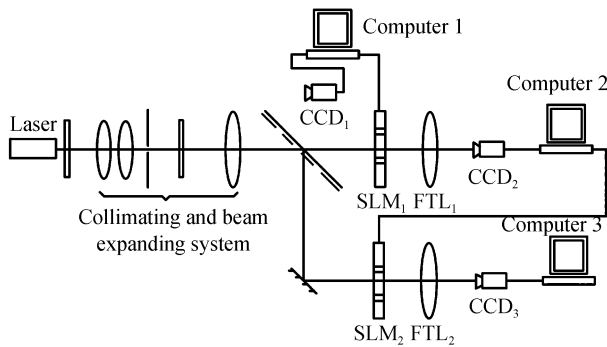


图 1 光电混合联合变换相关器原理

Fig. 1 Schematic diagram of hybrid optoelectronic joint transform correlator

设参考函数为 $r(x, y)$, 由 CCD_1 拍摄的待测图像函数为 $w(x, y) = t(x, y) + n(x, y)$, 其中 $t(x, y)$ 是探测的目标函数, $n(x, y)$ 是复杂背景噪声函数, 并且 $t(x, y) \neq n(x, y)$. 把 $r(x, y)$ 和 $w(x, y)$ 同时输入 SLM_1 中, 被准直相干光照射后经过傅里叶透镜 1 (FTL_1) 进行傅里叶变换, CCD_2 在第一次傅里叶变换平面上记录了联合变换功率谱(JTPS). 设 $t(x, y)$ 的中心在 $(a, 0)$ 处, $r(x, y)$ 的中心在 $(b, 0)$ 处, 在 FTL_1 的后焦面处有

$$\iint [t(x-a, y) + r(x-b, y)] \exp[-i2\pi(ux + vy)] dx dy = \exp(-i2\pi ua) T(u, v) + \exp(-i2\pi ub) R(u, v) \quad (1)$$

所以由 CCD_2 记录的联合变换功率谱为

$$|I(u, v)|^2 = |\exp(-i2\pi ua) T(u, v) + \exp(-i2\pi ub) \cdot R(u, v)|^2 = T(u, v) T^*(u, v) + \exp[-i2\pi u(a-b)] T(u, v) R^*(u, v) + \exp[-i2\pi u(-a+b)] T^*(u, v) R(u, v) + R(u, v) R^*(u, v) \quad (2)$$

联合变换功率谱被输入 SLM_2 中, 被准直相干光照射后经过傅里叶透镜 2 (FTL_2) 进行傅里叶逆变换, CCD_3 在 FTL_2 的后焦面上记录到的图像函数为

$$\iint T(u, v) T^*(u, v) \exp[i2\pi(ux + vy)] dudv + \iint \exp[-i2\pi u(a-b)] T(u, v) R^*(u, v) \cdot \exp[i2\pi(ux + vy)] dudv + \iint \exp[-i2\pi u(-a+b)$$

$$b)] T^*(u, v) R(u, v) \exp[i2\pi(ux + vy)] dudv + \iint R(u, v) R^*(u, v) \exp[i2\pi(ux + vy)] dudv = C_a(x, y) + C_b(x, y) + C_c(x, y) + C_d(x, y) \quad (3)$$

式(3)所示的第二项和第三项分别为中心在 $(a-b, 0)$ 和 $(-a+b, 0)$ 的互相关输出, 它们是待测目标的有效信号, 通过对互相关信号的检测可以判断目标的位置; 而第一项和第四项对应的是自相关输出, 是噪音信号. 因为它们的中心在 $(0, 0)$, 所以它们可以很容易与互相关信号分离^[8-9].

实验所采用的光电混合联合变换相关器中, 用 Ar^+ 离子激光器作为光源, 用 $10 \mu m$ 的针孔对激光进行空间滤波以提高空间相干度, 电寻址液晶(EALCD)作为空间光调制器, 用三台电脑分别控制的是待测图像的输入、相关峰的采集和功率谱的采集及输出.

2 MACH 滤波器原理及其改进

2.1 MACH 滤波器原理

MACH 滤波器是由综合鉴别函数(SDF)演变而来的. SDF 滤波器 f 有输出噪音方差(ONV)、平均相关能量(ACE)、平均相似测量(ASM)及平均相关高度(ACH)四个性能指标, MACH 滤波器是 SDF 的最佳折衷结果. 这个滤波器同时具有三个得天独厚的优点, 即: 容易探测到相关峰、大的畸变容差和有效抑制复杂背景噪音的能力. 设计 MACH 滤波器的目的就是使 ACH 最大, 使 ASM 尽量减小, 同时 ACE 和 ONV 也要得到平衡^[10-11]. 这就要求最小化下面的能量函数应为

$$E(f) = \alpha(ONV) + \beta(ACE) + \gamma(ASM) - \delta(ACH) = \alpha f^+ N f + \beta f^+ C_x f + \gamma f^+ S_x f - \delta |f^T p_x| \quad (4)$$

这个函数是滤波器的四个性能指标的加权和.

用 K 个包含复数的 d 维列向量 x_1, x_2, \dots, x_K 表示 K 个训练图像(每幅图像有 d 个像素)的傅里叶变换. 所采用的训练图像要尽可能涵盖待测目标的各种畸变情况. 用 d 维列向量 f 描述频域内 MACH 滤波器.

输入待测目标图像总是会被各种噪音所衰减. 而这些噪音并不是固定的, 通常在设计滤波器时用白噪音的协方差对噪音值进行计算, 而由此产生的相关结果为

$$ONV = f^+ N f \quad (5)$$

式中 N 是 $d \times d$ 的对角矩阵, N 的对角线元素由噪音的功率谱构成, 上角标 $+$ 表示共轭转置. 等式(5)中的 ONV 描述了在所有输出像素上的输出噪音方差, 要尽可能的最小化 ONV.

最小化式(5)中的 ONV 会导致定位不准的宽的相关峰输出.为了解决此问题,要使 ACE 最小化,即

$$\text{ACE} = f^+ C_x f \quad (6)$$

式中

$$C_x = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K X_i^* X_i \quad (7)$$

C_x 是 $d \times d$ 对角矩阵,它对角线上的元素是训练图像的平均功率谱密度值. X_i 是 $d \times d$ 对角矩阵,向量 x_i 中元素是它对角线上的元素.上角标 * 表示共轭.最小化 ACE 通常导致在相关输出中出现低的旁瓣.

为了使滤波器保持平均相似测量(ASM)性,在设计滤波器时要最大限度地提高训练图像在原点处的平均相关输出. MACH 滤波器通过最小化 ASM 来提高其畸变容差. ASM 的值越小,滤波器就会有越高的畸变容差响应. ASM 的定义为

$$\text{ASM} = f^+ S_x f \quad (8)$$

式中

$$S_x = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K (X_i - P_x)^* (X_i - P_x) \quad (9)$$

S_x 是 $d \times d$ 的对角矩阵. P_x 是包含了训练图像平均傅里叶变换的对角矩阵,其定义为

$$P_x = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K X_i \quad (10)$$

在设计 MACH 滤波器时,要放宽关于相关峰的限制,而同时要求 ACH 最大,即

$$\text{ACH} = \left| \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K f^T X_i \right| = |f^T p_x| \quad (11)$$

式中 p_x 是 K 个向量 x_1, x_2, \dots, x_K 的平均值.上角标 T 表示转置.

在能量函数中因为 ACH 被最大化,并且 ACH 在 $E(f)$ 中是负的,为了最小化 $E(f)$,所以剩下的三个性能指标都要被最小化.式(4)可以简化为

$$E(f) = f^+ M f - \delta |f^T p_x| \quad (12)$$

式中

$$M = \alpha N + \beta C_x + \gamma S_x \quad (13)$$

为了最小化 $E(f)$,根据最小二乘法原理,对式(12)两边求导并令其等于零,得

$$E'(f) = 2Mf - \delta p_x^* = 0 \quad (14)$$

所以,由式(14)得到

$$f = \frac{\delta p_x^*}{2M} = \frac{\delta}{2} \frac{p_x^*}{\alpha N + \beta C_x + \gamma S_x} \quad (15)$$

式(15)为 MACH 滤波器.上角表 * 表示共轭.因为 $\delta/2$ 是常量,对滤波器性能没有影响,所以可以令 $\delta/2=1$.

因此 MACH 滤波器可以表示为

$$f = \frac{p_x^*}{\alpha N + \beta C_x + \gamma S_x} \quad (16)$$

式中 α, β 和 γ 为非负数,并且 $0 \leq \alpha, \beta, \gamma \leq 1$.选择不同的 α, β 和 γ 值可以控制 MACH 滤波器的性能,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(MVSDF)滤波器,能够有效地滤掉噪音但是相关峰较宽;当 $\alpha = \gamma = 0, \beta = 1$ 时,此时的滤波器特性像最小平均相关能量(MACE)滤波器,能产生尖锐的相关峰并抑制噪音,但是对畸变敏感;当 $\alpha = \beta = 0, \gamma = 1$ 时,此时的滤波器有较高畸变容差^[12].

2.2 MACH 滤波器的改进

由于在联合变换相关器上第一次傅里叶变换后得到的是联合变换功率谱,所以对于频域滤波的 MACH 滤波器不能直接用在联合变换相关器上,需要对其进行改进.

对在频域合成的 MACH 滤波器进行傅里叶逆变换,使其返回物空间,得到 MACH 参考模板.将 MACH 参考模板和待测目标同时输入到联合变换相关器中,就可以在联合变换相关器上应用 MACH 算法实现畸变目标的识别.

实验中,在频域合成 MACH 滤波器时对其进行了改进,对控制参量 α, β 和 γ 的值进行优化,使返回到物空间的 MACH 参考模板有较高的畸变容差.由于本文是先对目标及模板图像进行边缘增强处理,抑制了无用的背景噪音,所以在合成滤波器时不用考虑噪音的干扰,设滤波器控制参量 $\alpha = 0$;其次由 2.1 节所述 α, β, γ 的关系可知,当 $\gamma = 1$ 时,滤波器的畸变容差最大,因此滤波器控制参量的初步设计结果为 $\gamma = 1, \alpha = 0$;此时,滤波器虽然有高的畸变容差,但是其响应的相关峰较宽,影响识别的定位准确度,所以要改变 β 值来控制 ACE 的强度,以控制相关峰的尖锐程度.实验得出 β 值本身的大小影响了滤波器的强度,其关系如图 2.

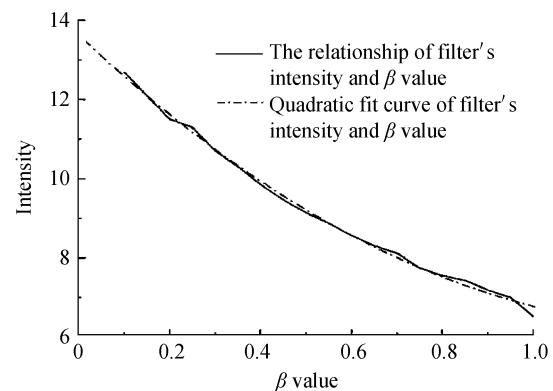


图 2 滤波器强度与 β 值的关系

Fig. 2 The relationship of filter intensity and β value

由图 2 可知, β 值越大,滤波器的强度越小,滤

波器具有的畸变容差也就越小. 实验发现当 β 由 0 增强到 0.1 时, 滤波器响应的相关峰已经变的较为尖锐. 所以通过实验得出, 滤波器的控制参量为 $\gamma=1, \alpha=0, \beta=0.1$.

2.3 MACH 参考模板的合成

首先对待测目标图像进行边缘提取. 然后, 按照表 1 改变待测目标的尺寸, 得到 5 幅训练图像. 最后, 用上述 5 幅训练图像根据式(16)和上述改进后的结果在频域合成 MACH 滤波器, 并将其做傅里叶逆变换映射到物空间, 得到待测目标的 MACH 参考模板. 这样可以在联合变换相关器上实现比例畸变目标的识别.

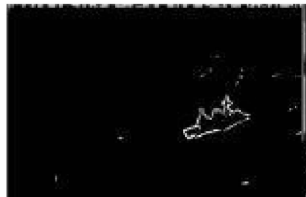
表 1 训练图像比例关系

Table 1 Scale relationships of training-images

Image number	Scaling factor
1	93%
2	100%
3	107%
4	114%
5	121%



(a) Original image of warship



(b) Edge extraction of warship



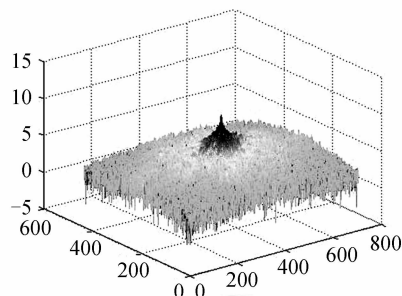
(c) Original image of car



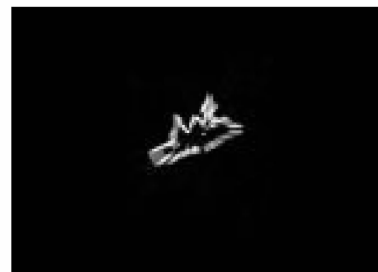
(d) Edge extraction of car

图 3 原始图像

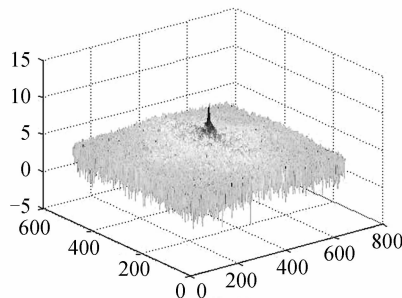
Fig. 3 Original image



(a) MACH filter of warship .



(b) MACH reference template of warship



(c) MACH filter of car



(d) MACH reference template of car

图 4 MACH 滤波器和 MACH 参考模板

Fig. 4 MACH filter and MACH reference template

基于相同的方法, 使相邻两幅训练图像的角度间隔为 5° , 获得 5 幅训练图像 ($0 \sim 20^\circ$), 可以完成旋转畸变目标的识别.

3 实验结果

应用 MATLAB 软件可以方便的制作任意目标的 MACH 参考模板. 考虑到联合变换相关器上的电寻址液晶的最大分辨率及合成 MACH 参考模板时的计算量, 所用的待测目标图像分辨率不能超过 1024×768 pixel. 此时该算法在普通台式机上用 MATLAB 来合成滤波器的总耗时为 2.0428 s. 如果用基于 DSP 的数字图像处理系统进行滤波器的合成会进一步提高运算速度, 因此该算法有实际应用的價值.

为了验证 MACH 参考模板在联合变换相关器上的可行性并确定其识别范围, 对一个水面微光军舰和地面可见光汽车进行了光学实验. 原始图像如图 3, 对应的 MACH 参考模板如图 4.

对不同大小的军舰目标和不同角度的汽车目标分别进行识别,相关峰的强度与目标大小、旋转角度的关系分别如图 5 和图 6. 其中,部分军舰目标的实

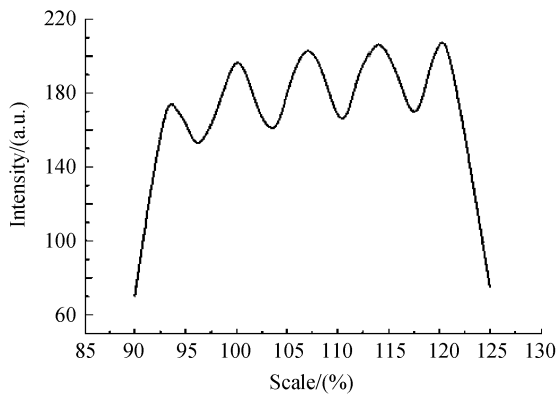


图 5 不同大小军舰的相关峰强度
Fig. 5 The peak intensity of different scale warships

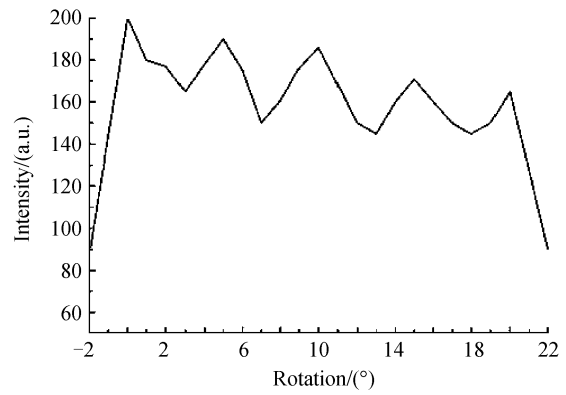


图 6 不同角度汽车的相关峰强度
Fig. 6 The peak intensity of different angle cars

验结果如图 7,分别是相对原始图像面积放大 95%和 120%;部分汽车目标的实验结果如图 8,分别是相对原始目标旋转 2°和 21°. 两个相关峰的位置分别对应目标和模板的位置.

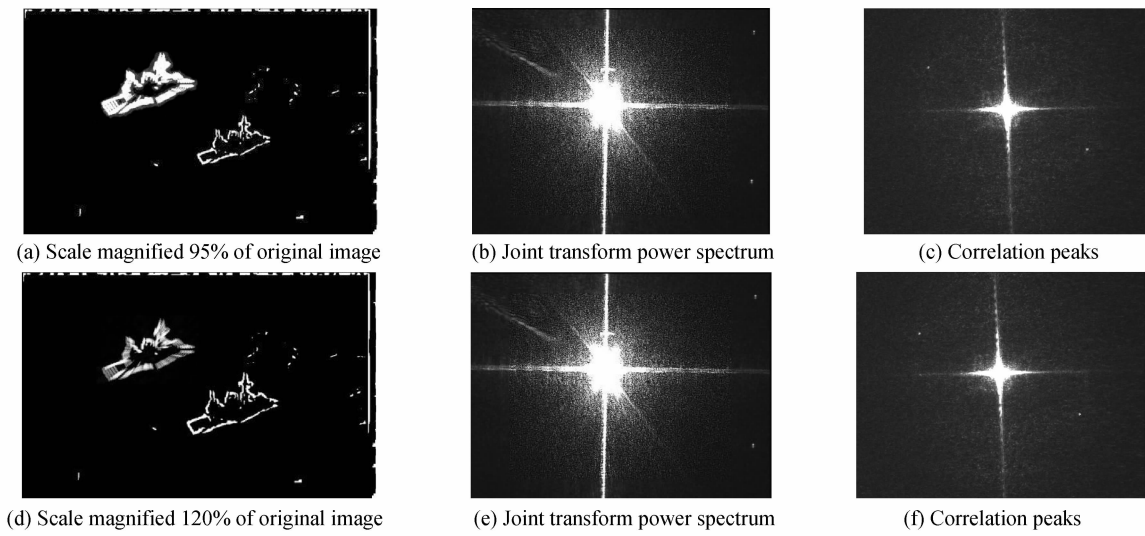


图 7 军舰目标的实验结果
Fig. 7 Experimental results of warships

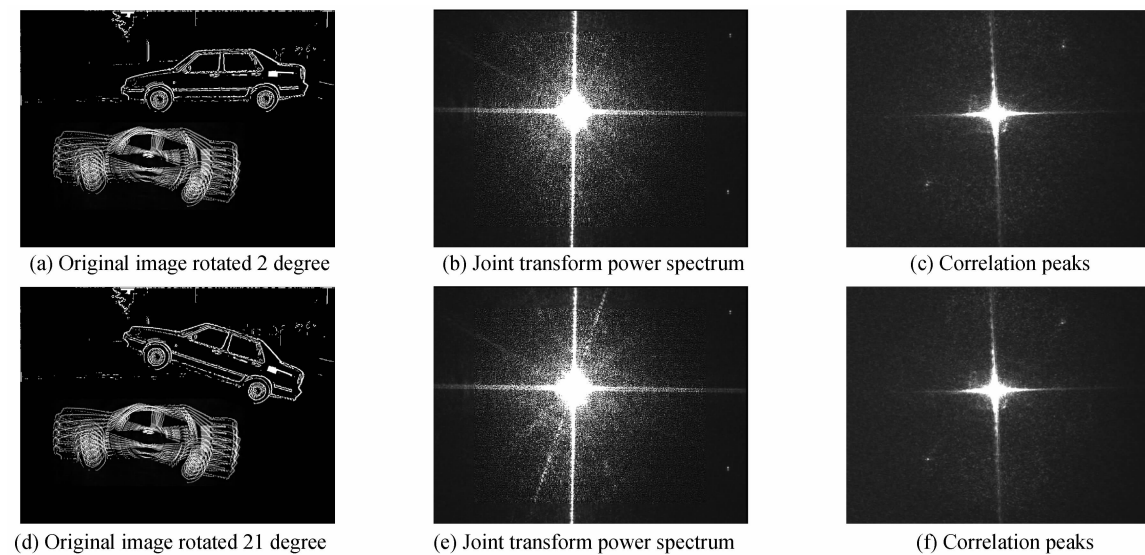


图 8 汽车目标的实验结果
Fig. 8 Experimental results of cars

图 5 是对军舰目标从 90% 开始以 1% 为步长对不同大小的目标进行测试,用以测定 MACH 参考模板的比例畸变容差,结果表明,在训练图像所包含的范围内该参考模板能够响应强度为 150 以上的相关峰,所展示的结果就是图 7 所示的相关亮点,此时能够有效的识别出目标.因此 MACH 参考模板的比例畸变识别范围为 93%~121%.

图 6 是对汽车目标从 -2° 开始以 1° 为步长对不同角度的目标进行测试,用以测定 MACH 参考模板的旋转畸变容差,结果表明在训练图像所包含的范围内该参考模板能够响应强度为 150 以上的相关峰,所展示的结果就是图 8 所示的相关亮点,此时能有有效的识别出目标.因此 MACH 参考模板的旋转畸变识别范围为 0 到 20° .

由实验发现,如果不对待测图像和训练图像进行边缘提取,在联合变换相关器上应用 MACH 参考模板进行识别时,相关峰会淹没在噪音中,导致目标的无法识别.所以边缘提取可以增强的相关峰的强度,使目标易于探测和发现.

4 结论

本文提出了将 MACH 算法应用在联合变换相关器上以解决联合变换相关器对畸变敏感的问题,同时避免了 Vander Lugt 相关器需要对滤波器进行精确定位的缺陷.结果表明,当滤波器的控制参量为 $\gamma=1, \alpha=0, \beta=0.1$ 时,得到的 MACH 参考模板最为清晰,目标产生的相关峰最为尖锐明亮.通过这种方法,在联合变换相关器上能够得到的比例畸变容差为 28%,旋转畸变容差为 20° ,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.改进后的 MACH 滤波器在畸变目标的探测领域具有很强的优势和良好的应用前景.

参考文献

- [1] SUN Xiao-ming, HUO Fu-rong, TIAN Fan, *et al.* Research on auto recognition technology with low contrast target [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(11): 2153-2156.
孙晓明, 霍富荣, 田凡, 等. 低对比度目标自动识别技术研究 [J]. 光子学报, 2007, **36**(11): 2153-2156.
- [2] SHEN Xue-ju, YAO Guang-tao, HU Wen-gang, *et al.* Enhancing correlation peak value in VLC by diffraction characteristic of SLM [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **16**(11): 2110-2113.
沈学举, 姚广涛, 胡文刚, 等. 利用空间光调制器的衍射特性提高 VLC 输出相关峰值 [J]. 光学精密工程, 2009, **16**(11): 2110-2113.
- [3] GE Hua-yong, BAI En-jin. A new method for edge enhancement and its application to joint transform correlator [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(9): 1907-1911.
葛华勇, 白恩健. 边缘增强新方法及其在联合变换相关器中的应用 [J]. 光子学报, 2008, **37**(9): 1907-1911.
- [4] SHEN Xue-ju, WANG Yong-zhong, YAO Guang-tao, *et al.* Study on extended equal correlation peak synthetic discriminant function algorithm [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(1): 156-160.
沈学举, 王永仲, 姚广涛, 等. 扩展等相关峰综合鉴别函数算法研究 [J]. 光学精密工程, 2008, **16**(1): 156-160.
- [5] CHEN Mou, TAN Xiao-yu, JIANG Chang-sheng. IR small target recognition in sky background based on information fusion [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(8): 2032-2039.
陈谋, 谭晓宇, 姜长生. 基于信息融合的空中红外小目标识别 [J]. 光学精密工程, 2009, **17**(8): 2032-2039.
- [6] YUAN Xiang-yan, YU Da-yong, TAO Chun-kan. Distortion-invariant joint transform correlator based on phase-encoding technique [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(10): 1238-1243.
袁祥岩, 于大勇, 陶纯堪. 基于相位编码的畸变不变联合变换相关器的设计 [J]. 光子学报, 2002, **31**(10): 1238-1243.
- [7] GOYAL S, NISHCHAL N K, BERI V K, *et al.* Wavelet-modified maximum average correlation height filter for rotation invariance that uses chirp encoding in a hybrid digital-optical correlator [J]. *Applied Optics*, 2006, **45**(20): 4850-4857.
- [8] 宋菲君. 近代光学信息处理 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2004. 79-91.
- [9] WANG Wen-Shen, CHEN Yu, LIANG Cui-ping, *et al.* Hybrid optoelectronic joint transform correlator for recognition of targets in cluttered scenes [C]. *SPIE*, 2005, **5642**: 204-212.
- [10] SADJADI F A., MAHALANOBIS A. Target-adaptive polarimetric synthetic aperture radar target discrimination using maximum average correlation height filters [J]. *Applied Optics*, 2006, **45**(13): 3063-3070.
- [11] BERI VK, NISHCHAL N K, GUPTA A K, *et al.* Design parameters of hybrid correlator [J]. *Indian Journal of Pure & Applied Physics*, 2008, **46**(11): 844-851.
- [12] JOHNSON O C, EDENS W, LU T T, *et al.* Optimization of OT-MACH filter generation for target recognition [C]. *SPIC*, 2009, **7340**: 734008-1; 734008-9.

Application of Maximum Average Correlation Height Filter Algorithm in Distorted Target Recognition

SHANG Ji-yang, ZHAN Xue, WANG Wen-sheng

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

Abstract: Maximum Average Correlation Height (MACH) algorithm was applied on JTC to achieve distortion target recognition to solve the problem of inaccurate recognition for distorted target (the targets rotated in plane or scale changed) in cluttered background with Joint Transform Correlator (JTC). First of all, three performance control parameters of MACH filter were optimized in frequency domain, and then the optimized MACH frequency domain filter was projected to object space; the MACH reference template could be obtained. As practical examples, the optical experiments on warship and car in clutter background were presented. The results show that when the control parameters of the filter are $\gamma=1$, $\alpha=0$ and $\beta=0.1$, the obtained MACH reference template is clearest, the correlation peak of the target is sharpest and brightest. In this way, the obtained scale distortion tolerance on the JTC is 28%, and rotation distortion tolerance is 20°. For the target which exceeding the distortion tolerance range, the correlation peak is weaker and weaker, but some can still be recognized. In the field of distorted target detection, the improved MACH filter has a powerful advantage and a good application prospect.

Key words: Hybrid optoelectronic joint transform correlator; Maximum Average Correlation Height (MACH) filter; Distorted target; Fourier optics; Clutter background