

# 复杂背景下运动目标的光学相关识别

张 肃 王文生

(长春理工大学现代光学测试技术研究室, 吉林 长春 130022)

**摘要** 在应用光电混合联合变换相关器实现运动目标相关识别的过程中, 针对目标与模板由于运动所产生的差异和复杂背景影响相关器识别率的问题, 采用了一种以高斯函数的一阶导数做小波多尺度边缘提取和形态学膨胀进行边缘加粗处理相结合的方法。这种方法可充分利用小波多尺度的特点, 使得提取后的边缘在抑制噪声的同时, 能保留更多的细节信息, 明显改善复杂背景下运动目标的相关识别问题。对以低对比度和小目标为特点的动态序列进行光学相关实验, 结果表明, 这种方法能有效增强探测目标的相关峰亮度, 验证了算法对复杂背景下运动目标识别的可行性。

**关键词** 傅里叶光学; 光学相关识别; 小波多尺度边缘提取; 运动目标; 膨胀; 复杂背景

**中图分类号** O438.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0107001

## Optical Correlation Recognition of the Moving Target in Cluttered Background

Zhang Su Wang Wensheng

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

**Abstract** In the application of achieving the correlation recognition of moving target with hybrid optoelectronic joint transform correlator (HOJTC), the differences resulting from the movement between the target and the template and the cluttered background influence the correlation ratio of the correlator. A combined method of wavelet multi-scale edge extraction which uses the first order derivative of Gaussian function and edge processing with morphological dilation is applied. This method can fully use the wavelet multi-scale characteristics. After extracting the edge, the noise can be suppressed and more details can be retained. It can improve the detection efficiency of the moving target in cluttered background apparently. The optical correlation experiments on a low contrast and small moving target show that this method can enhance the brightness of the correlation peaks and verify that the algorithm is feasible to the moving target recognition in cluttered background.

**Key words** Fourier optics; optical correlation recognition; wavelet multi-scale edge extraction; moving target; dilation; cluttered background

**OCIS codes** 070.5010; 100.5010; 230.2090

## 1 引 言

基于动态图像序列的运动目标识别探测技术在军事、工业过程控制、交通监控和太空探测等领域有着广泛的应用前景<sup>[1,2]</sup>, 通过对视频图像的分析, 可实现对场景中目标的定位和识别。与其他探测方法

相比, 应用光电混合联合变换相关器(HOJTC)的光学相关方法具有光学信息处理的并行、大容量和高速度等优点, 只需一个正透镜组便可以光速实现图像的二维傅里叶变换<sup>[3,4]</sup>, 避免了传统  $4f$  系统中制作匹配滤波器和精确复位<sup>[5]</sup>的复杂问题, 容易实现

收稿日期: 2011-07-08; 收到修改稿日期: 2011-08-15

基金项目: 总装备部预研局十一五基金资助课题。

作者简介: 张 肃(1985—), 女, 博士研究生, 主要从事现代光学测试技术方面的研究。E-mail: susiezhang21@126.com

导师简介: 王文生(1943—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事现代光学测试技术方面的研究。

E-mail: wwsciom@163.com

快速实时相关,满足对动态序列中目标的实时探测识别的要求。

但在实际应用的过程中,目标与模板由于物体的运动都会产生一定的差异,严重影响相关器的识别率。对于战场环境下的运动目标来说,因其具有背景噪声干扰复杂、对比度低、目标小和图像畸变(旋转和形状变化)的特点,很难甚至无法得到相关点。为了处理这一类问题,国内外已有很多研究者对运动目标的检测与提取做了一些工作。Cheung等<sup>[6]</sup>运用背景相减法与一些图像处理方法相结合的改进算法对目标图像进行了提取,能避免传统背景相减法由于光照、天气等外界因素对检测结果的影响,但这种方法需要预先知道背景,对于在非控环境中背景图像的更新有很高的要求。王鲲鹏等<sup>[7]</sup>提出了一种基于正负差图像的运动目标提取的新方法,改变了现有运动目标检测领域利用绝对值差图像的检测,避免了检测时噪声的干扰,但这种检测易产生空洞现象。文献<sup>[8,9]</sup>提出了几种边缘检测算法,其基本思想是对原有边缘提取算子的改进,这些改进方法能有效地抑制噪声,去除部分伪边缘。而本文将小波多尺度边缘提取与形态学膨胀处理的集成应用运用到像面的目标提取中,利用小波的多尺度特点<sup>[10]</sup>,可改善传统算子只在单一尺度上对图像进行边缘提取的不足,能分别提取出图像细结构与粗结构的边缘,减少了提取中边缘模糊和弱化的现象,对噪声有很好的抑制作用,且能更好地检测出边缘细节信息。而形态学膨胀方法可对检测出的边缘进行加粗操作,对填补分割后边缘中的空洞起着很大的作用<sup>[11]</sup>。

这一方法的有效应用,使运动目标能从空中、地面和水上等任意变化的复杂背景中被检测出来,并可对探测目标进行相关识别,从而达到相关点从无到有、从弱到强的目的,实现对复杂背景下运动目标的识别与探测。

## 2 基于小波变换的多尺度边缘提取

图像的边缘结构常常是模式识别中最重要的信息,其可定义为图像中亮度的峰变点<sup>[12]</sup>。但这一峰变点中也包括图像中并不能令人满意的纹理信息,边缘与纹理的界限通常依赖于观察与分析的尺度,所以在不同尺度下检测图像的峰变点已受到研究者的广泛关注。

同一场景的图像灰度变化在不同的分辨率级别上有不同的表现。为了减少纹理与噪声的影响,应

用了多尺度边缘提取的方法,即先在较低分辨率图像中做初步提取,然后在这一结果的基础上,在更高分辨率图像上完成边缘点的准确定位和必要的补充连接<sup>[13]</sup>。运用具有微分功能的小波,可通过小波变换方便地实现对多个分辨率近似图像的梯度矢量的计算,从而实现多尺度边缘提取。

与其他单尺度边缘处理方法相比,经多尺度方法提取后的边缘包含了图像中各类细节的信息,能有效地抑制噪声,保留有效的真实边缘,为后续的相关识别提供一定的基础。

### 2.1 小波函数的构造与选取

由于小波变换中所用到的小波函数具有不唯一性,所以在工程应用中人们通常根据分析所处理图像的结果与理论结果的误差来构造或者选取最佳的小波函数。因此,小波函数的构造与选取无论对于理论分析还是实际研究都具有重要意义。

在边缘检测中,小波函数应具有紧支集、对称和一阶消失矩的特点。由于高斯函数

$$f(x) = a \exp[-(x-b)^2/c^2]$$

(式中  $a, b, c$  为实常数且  $a > 0$ ) 为光滑函数,满足小波函数的构造要求,所以选取二维高斯函数来构造小波函数。设二维高斯函数为  $o(x, y)$ , 则其满足条件

$$\begin{cases} \iint_{RR} o(x, y) dx dy = 1, \\ \lim_{|x| \rightarrow \infty, |y| \rightarrow \infty} o(x, y) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

令其一阶偏导为

$$\begin{cases} \varphi^{(x)}(x, y) = \frac{\partial o(x, y)}{\partial x}, \\ \varphi^{(y)}(x, y) = \frac{\partial o(x, y)}{\partial y}, \end{cases} \quad (2)$$

则  $\varphi^{(x)}(x, y), \varphi^{(y)}(x, y)$  为构造的基本小波函数。在尺度  $2^j$  时有

$$\varphi_{2^j}^{(x)}(x, y) = \frac{1}{2^j} \varphi^{(x)}\left(\frac{x}{2^j}, \frac{y}{2^j}\right), \quad (3)$$

$$\varphi_{2^j}^{(y)}(x, y) = \frac{1}{2^j} \varphi^{(y)}\left(\frac{x}{2^j}, \frac{y}{2^j}\right). \quad (4)$$

### 2.2 基于小波变换的多尺度边缘提取的原理

由(3),(4)式得到的在尺度  $2^j$  时的小波基函数  $\varphi_{2^j}^{(x)}(x, y), \varphi_{2^j}^{(y)}(x, y)$  对  $f(x, y) \in L^2(R^2)$  进行的小波变换为

$$\omega_{2^j}^{(x)} f(x, y) = f * \varphi_{2^j}^{(x)}(x, y), \quad (5)$$

$$\omega_{2^j}^{(y)} f(x, y) = f * \varphi_{2^j}^{(y)}(x, y), \quad (6)$$

于是,  $f(x, y)$  的小波系数形成的梯度为

$$w_{2^j} f(x, y) = \begin{bmatrix} w_{2^j}^{(x)} f(x, y) \\ w_{2^j}^{(y)} f(x, y) \end{bmatrix} = 2^j \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} (f * o_{2^j})(x, y) \\ \frac{\partial}{\partial y} (f * o_{2^j})(x, y) \end{bmatrix} = 2^j \nabla (f * o_{2^j})(x, y). \quad (7)$$

$w_{2^j} f(x, y)$ 在点 $(x, y)$ 与尺度 $2^j$ 时,最大绝对值沿梯度方向,这个局部极值就是多尺度边缘点。其模为

$$|w_{2^j} f(x, y)| = \sqrt{|w_{2^j}^{(x)} f(x, y)|^2 + |w_{2^j}^{(y)} f(x, y)|^2}, \quad (8)$$

幅角为

$$a_{2^j} f(x, y) = \arg[w_{2^j}^{(x)} f(x, y) + jw_{2^j}^{(y)} f(x, y)], \quad (9)$$

即 $|w_{2^j} f(x, y)|$ 是沿 $a_{2^j} f(x, y)$ 方向的局部极大值,它包含了重构 $f(x, y)$ 的重要信息。所以只要沿着梯度方向检测小波变换的系数模的极大值点即可得到图像的边缘点。

### 2.3 小波多尺度边缘提取的实现步骤

对于小波多尺度边缘提取的具体实现,其方法和步骤可归结如下:

- 1) 选定高斯函数 $o(x, y)$ ,则函数 $o(x, y)$ 的一阶偏导数为小波函数,设定不同的分解级数,构成多尺度小波变换。
- 2) 对图像进行最低一级尺度上的小波变换,由小波系数计算该尺度下的幅角和梯度矢量模。
- 3) 将计算出的幅角分别沿水平,垂直,对角线和反对角线分为4个部分。依次检测每一个像素点,看其是否为沿幅角方向上的局部极大值。若是,保留该梯度值,若不是,将其置为0。即得到该尺度上的图像边界。
- 4) 重复以上过程,用下一级尺度对所得到的图像边界再进行二次小波变换,用模极大值法找到边界。
- 5) 将最终得到的图像边界与阈值门限做比较,得到二值化图像。

### 3 形态学膨胀

膨胀是在二值图像中对边缘加粗或拉长的操作,其变粗的程度由一个称为结构元素的集合控制。移动一个结构元素并以一种类似于卷积操作的方式进行。像卷积一样,结构元素可以具有任意的大小,也可以包含任意的0与1的组合。

图1给出了膨胀的计算过程,其中图1(a)是一

个简单的二值图像,图1(b)是以对角线排列的5 pixel结构元素,结构元素的原点带有黑框,图1(c)是输出图像。在膨胀处理过程中,将结构元素的原点平移过整个图像区域,并且核对与值为1的像素重叠的地方,则输出图像在原点的每个位置均为1,从而在输入图像中结构元素至少重叠了一个1值元素。

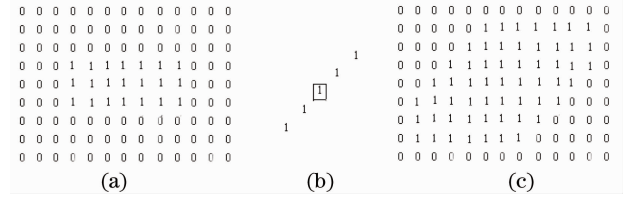


图1 膨胀的计算过程

Fig.1 Calculative process of the dilation

一般膨胀定义为

$$D = A \oplus B = \{x, y | (\hat{B})_{xy} \cap A \neq \emptyset\}, \quad (10)$$

式中 $\emptyset$ 为空集, $B$ 为结构元素, $A \oplus B$ 表示 $A$ 被 $B$ 膨胀。也就是说, $B$ 对 $A$ 膨胀产生的二值图像 $D$ 是由这样的点 $(x, y)$ 组成的集合,如果 $B$ 的原点位移到 $(x, y)$ ,那么它与 $A$ 的交集为非空。图2为膨胀的示意图。

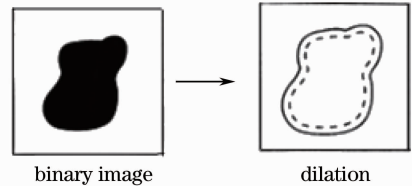


图2 膨胀的示意图

Fig.2 Schematic diagram of the dilation

当选取 $3 \times 3$ 的结构元素时,可明显提高相关峰亮度。图3是经过多尺度边缘提取后的图像,其边缘较细且易出现断点现象,经过联合变换相关器后得到的相关峰亮度灰度值为67.88,相关峰亮度较弱。而经过形态学膨胀处理后的边缘提取图像,其断点现象得到缓解,边缘明显加粗,经光学相关识



图3 边缘提取图像

Fig.3 Image after edge extraction

别,得到亮度为 105.47 的相关峰图像。这一过程和最终结果如图 4~6 所示。

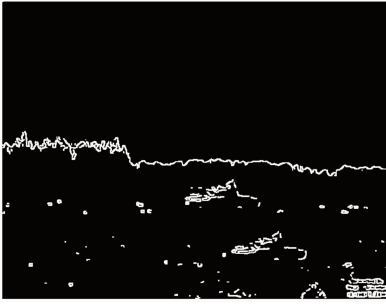


图 4 边缘提取后经膨胀处理的图像

Fig. 4 Image after edge extraction and dilation

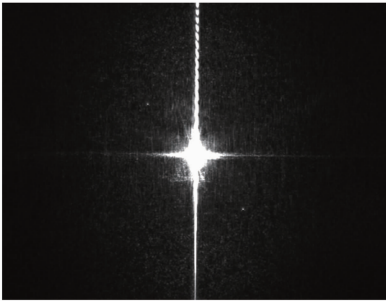


图 5 边缘提取后相关峰

Fig. 5 Correlation peaks after edge extraction

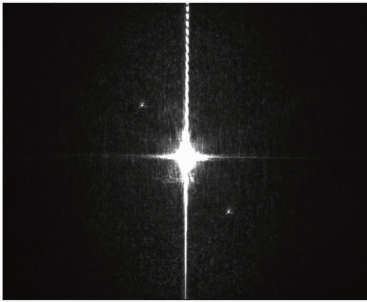


图 6 边缘提取后经膨胀处理的相关峰

Fig. 6 Correlation peaks after edge extraction and dilation

#### 4 光电混合联合变换相关器的原理及实验装置

光电混合联合变换相关器主要根据衍射原理和透镜傅里叶变换的功能来实现输入图像的联合傅里叶变换。对于高速(速度约 60 km/h)运动的坦克目标,用普通的计算机方法计算傅里叶变换在运算速度上是很难满足实时探测要求的,应用联合变换相关器却可实现以光速并行运算的二维傅里叶变换,满足运动目标实时处理的要求,在提取的目标图像与参考图像相同时,则其相关输出会得到一个最大值,产生一对明显的相关峰,这对相关峰即可用于对

运动目标的识别。

##### 4.1 联合变换相关器的实验装置

图 7 为所用到的 HOJTC 的实验装置原理图,其中激光器、电寻址液晶(EALCD)、傅里叶透镜(FTL)、电荷耦合器件(CCD)以及分别实现功率谱处理和相关峰处理的处理器 PC2 和 PC3 是其实现运动目标识别的关键部件。

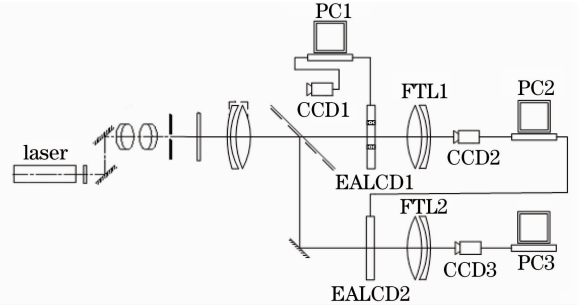


图 7 光电混合联合变换相关器的实验装置原理图

Fig. 7 Experimental schematic diagram of HOJTC

图 8 为 HOJTC 的小型化装置。考虑到正常的氙离子激光器体积庞大,不便于运动目标实时探测,采用半导体泵浦 YAG 倍频激光器和透射式电寻址液晶方案的联合变换相关器小型化装置,将整体体积控制在 350 mm×260 mm×200 mm 之内,减少占用空间,便于运动目标的实时探测识别。

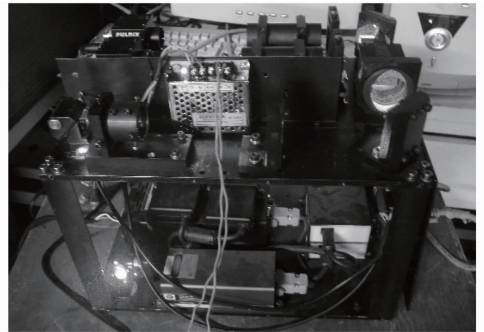


图 8 光电混合联合变换相关器的小型化装置

Fig. 8 Small device of HOJTC

##### 4.2 联合变换相关器相关识别的原理

采用激光器作为光源,通过一系列元件形成均匀的准直扩束平行光,其被分为两束,一束用来获得联合变换功率谱(JTPS),另一束用于得到相关峰。首先将 CCD1 接收到的运动目标  $o(x, y)$  与存储在处理器 PC1 中的参考图像  $r(x - x_r, y - y_r)$  一同写入电寻址液晶 EALCD1,如忽略噪声,输入函数可写为

$$a(x, y) = o(x, y) + r(x - x_r, y - y_r), \quad (11)$$

将目标图像与参考图像联合组成的输入函数  $a(x, y)$  通过透镜进行傅里叶变换,得到

$$A(f_x, f_y) = O(f_x, f_y) + R(f_x, f_y) \times$$

$$\exp(-j2\pi f_x x_r) \exp(-j2\pi f_y y_r), \quad (12)$$

式中  $O(f_x, f_y)$  和  $R(f_x, f_y)$  分别为  $o(x, y)$  和  $r(x, y)$  的傅里叶变换,  $A(f_x, f_y)$  为  $o(x, y)$  和  $r(x - x_r,$

$y - y_r)$  的联合傅里叶谱,  $A(f_x, f_y)$  的平方即为联合变换功率谱, 表示为

$$I(f_x, f_y) = |A(f_x, f_y)|^2 = O(f_x, f_y)O^*(f_x, f_y) + R(f_x, f_y)R^*(f_x, f_y) + O^*(f_x, f_y)R(f_x, f_y) \times \exp(-j2\pi f_x x_r) \exp(-j2\pi f_y y_r) + O(f_x, f_y)R^*(f_x, f_y) \exp(-j2\pi f_x x_r) \exp(-j2\pi f_y y_r), \quad (13)$$

将联合变换功率谱输入到 EALCD2, 通过透镜进行逆傅里叶变换, 则得到

$$a(x_1, y_1) = o(x_1, y_1) \otimes o^*(x_1, y_1) + r(x_1, y_1) \otimes r^*(x_1, y_1) + o^*(x_1, y_1) \otimes r(x_1, y_1) \times \delta(x_1 + x_r) \delta(y_1 + y_r) + o(x_1, y_1) \otimes r^*(x_1, y_1) \times \delta(x_1 - x_r) \delta(y_1 - y_r), \quad (14)$$

(14)式中前两项为自相关, 两输出信号重叠在输出平面坐标中心, 称之为零级衍射, 它们并不是需要探测的信号, 而是输出信号中最大的噪声信号; 最后两项则为目标图像与参考图像的互相关, 为正负一级衍射项, 它们的中心在输出平面上沿  $y$  轴分别移动  $+y_r$  和  $-y_r$ , 沿  $x$  轴平移  $+x_r$  和  $-x_r$ 。它们是探测的有用信号, 根据是否有相关点及相关点的强度来探测识别目标。

当  $o$  与  $r$  相同时, 两互相关可得到最大相关点, 其联合变换功率谱为

$$I(f_x, f_y) = 2|O(f_x, f_y)|^2 \left[ 1 + \cos\left(2\pi u \frac{a+b}{\lambda f}\right) \right]. \quad (15)$$

此时, 联合变换功率谱可认为是两函数上对应的无数点对形成的杨氏条纹的相干叠加。因子  $\left[ 1 + \cos\left(2\pi u \frac{a+b}{\lambda f}\right) \right]$  是理想的杨氏条纹,  $2|O(f_x, f_y)|^2$  则是杨氏条纹的包络。即使包络有变化, 仍能观察到相关峰。因此, 关键的是探测所产生的杨氏条纹。杨氏条纹的衍射图包含两个亮斑 ( $+1$  级和  $-1$  级衍射) 及  $0$  级衍射, 这两个亮斑即是所要探测的目标的相关峰。

## 5 实验结果

在大量研究的基础上, 取近百组动态图像进行了光学实验, 其中包括联合变换相关器中 CCD1 所采集的可见光序列、红外图像以及微光图像等, 这些图像分别具有空中、地面和水上等不同特点的复杂背景。对于一些复杂背景有变化的动态序列, 应用这种方法仍能提取出目标图像的边缘, 抑制复杂背景的干扰, 便于相关器的识别, 其识别率可高达近 95%, 充分验证了算法的可行性、实用性和普遍性。仅以在长春装甲兵学院拍摄的高速运动 (速度约 60 km/h) 的坦克为例, 给出相应的处理结果。在这组

动态序列中图像采集距离约为 2 km, 其分辨率取决于联合变换相关器中所用到的 CCD1 的像素, 实验中 CCD1 的像素为 752 pixel  $\times$  582 pixel。根据联合变换相关器中 CCD 捕捉图像速率 (25 frame/s) 的特点, 可以取第 1 帧图像和第 25 帧图像分别做第 25 帧和第 50 帧图像的参考目标, 若其通过联合变换相关器可各自得到相关点, 则说明运动目标是可以被探测的, 通过这种递推关系, 可以探测到第 1~50 帧甚至更多帧的动态序列。

在如下的处理结果中, 图 9 为第 1 帧和第 25 帧的原图像, 图 10 为处理后的图像。通过计算得知, 原图像是灰度对比度为 1.31% 的低对比度图像, 并且目标像素在整幅图像中所占的比例为 2.59%, 可认为是小目标图像, 所以通过图 11 可以得知由于原图像的探测目标与参考模板的灰度大致相同, 背景又对目标有着很大的噪声干扰, 所得到的相关峰亮度的灰度值仅为 41.86, 并无明显相关峰产生, 无法探测到目标。而经过小波多尺度边缘提取和膨胀处理后的图像, 很好地提取了目标边缘, 如图 10 所示。在进行边缘提取处理时, 选取的阈值为 0.14, 实验证实, 选择阈值过大或过小分别会使得处理后图像目标边缘缺失和背景噪声过多。通过大量实验选择合适的阈值, 对于处理后结果起着关键作用。图 12 为对处理后图像进行光学相关处理的结果, 在图中



图 9 图像原图 (第 1 帧和第 25 帧)

Fig. 9 Original image (frames 1 and 25)

可清晰得到相关峰,其亮度灰度值为 105.47,起到了探测目标的作用。

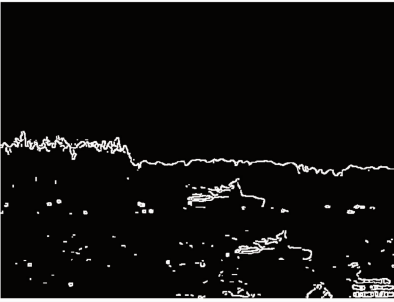


图 10 处理后图像(第 1 帧和第 25 帧)  
Fig. 10 Processed image (frames 1 and 25)

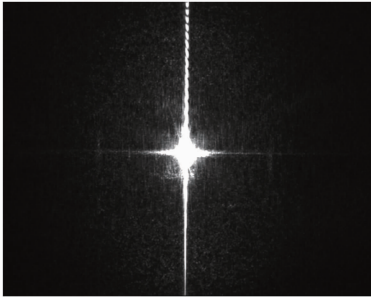


图 11 原图相关峰(第 1 帧和第 25 帧)  
Fig. 11 Original correlation peaks (frames 1 and 25)

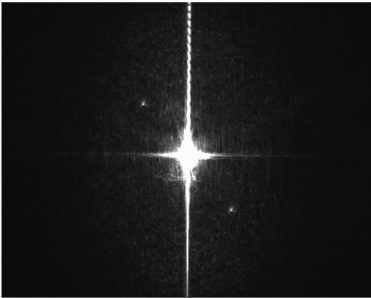


图 12 处理后图像相关峰(第 1 帧和第 25 帧)  
Fig. 12 Processed correlation peaks (frames 1 and 25)

图 13 为第 25 帧和第 50 帧的图像原图,是灰度对比度为 0.34% 的小目标图像;处理后图像如图 14 所示。原图像通过联合变换相关器后可得到峰值亮



图 13 图像原图(第 25 帧和第 50 帧)  
Fig. 13 Original image (frames 25 and 50)

度为 37.16 的相关峰图像,如图 15 所示。同样,经过阈值为 0.14 的小波多尺度边缘提取和膨胀处理后,得到含有较粗边缘的处理后图像(图 14),其经过光学相关处理后,在图 16 中可得到一对明显的

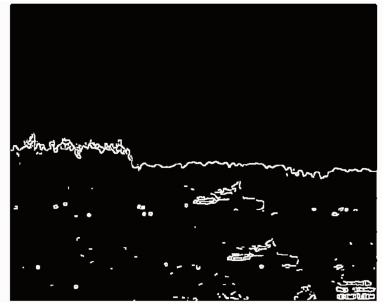


图 14 处理后图像(第 25 帧和第 50 帧)  
Fig. 14 Processed image (frames 25 and 50)

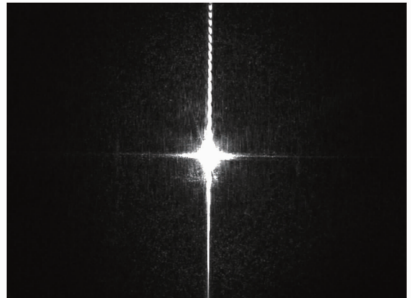


图 15 原图相关峰(第 25 帧和第 50 帧)  
Fig. 15 Original correlation peaks (frames 25 and 50)

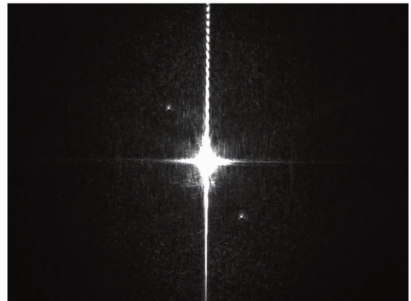


图 16 处理后图像相关峰(第 25 帧和第 50 帧)  
Fig. 16 Processed correlation peaks (frames 25 and 50)

经过这样依次实验,可获得整个动态序列的识别相关峰,最终达到探测运动目标的目的。

## 6 结 论

在运动目标光学相关识别中,目标往往受到运动模糊、背景噪声、低对比度和小目标等多种因素的影响。应用小波多尺度边缘处理和形态学膨胀相结合的方法,在提取目标边缘的同时,能有效抑制背景噪声,提取出目标信息。通过这种像面处理,可大大

提高联合变换相关器的识别率,增强相关峰的亮度。大量实验结果表明,将这种方法运用到联合变换相关器的识别中,可有效解决复杂背景下运动目标的相关识别问题,扩展了光学相关识别方法的适用范围,并使联合变换相关器由实验室走向应用。

### 参 考 文 献

- 1 Li Kexin, Zhang Wei, Cong Mingyu *et al.*. A streak detection algorithm of space target in deep space background [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 445~450  
李克新, 张 伟, 丛明煜等. 一种深空背景空间小目标条纹检测算法 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 445~450
- 2 Hai Deng, Braham Himed, Michael C. Wicks. Image feature-based space-time processing for ground moving target detection [C]. *IEEE 2006*, 2006, **13**(4): 216~219
- 3 Chen Yu, Miao Hua, Lang Qi *et al.*. Application of Mellin transform in opto-electronic hybrid target detection technology [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2): 421~425  
陈 宇, 苗 华, 郎 琪等. 梅林变换在光电混合目标探测技术中的应用 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(2): 421~425
- 4 Alpana Bhagatji, Naveen K. Nishchal, Arun K. Gupta *et al.*. Extended fractional wavelet joint transform correlator [J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(1): 44~48
- 5 Y. Eldar, A. Oppenheim. Orthogonal matched filter detection [C]. *IEEE*, 2001, **5**: 2837~2840
- 6 Sen-Ching S. Cheung, Chandrika Kamath. Robust techniques for background subtraction in urban traffic video [C]. *SPIE*, 2004, **5308**: 881~892
- 7 Wang Kunpeng, Zhang Xiaohu, Li Lichun *et al.*. New method for moving target detection based on positive and negative difference images [J]. *J. Applied Optics*, 2007, **28**(5): 521~525  
王鲲鹏, 张小虎, 李立春等. 一种基于正负差图像的运动目标检测新方法 [J]. *应用光学*, 2007, **28**(5): 521~525
- 8 Zhao Jiangbo, Shen Wei, Wang Junzheng. Extraction of moving object in video sequences of a dynamic scene based on gray [J]. *Optical Technique*, 2008, **34**(1): 55~57  
赵江波, 沈 伟, 王军政. 基于灰度信息的动场景视频序列中运动对象的提取 [J]. *光学技术*, 2008, **34**(1): 55~57
- 9 Zhao Laigang, Chen Daojiong. A new edge-extracting technique based on Sobel operator [J]. *Machinery and Electronics*, 2011, (2): 59~61  
赵来刚, 陈道炯. 一种基于 Sobel 算子的新型边缘提取技术 [J]. *机械与电子*, 2011, (2): 59~61
- 10 Chen Fanghan, Miao Hua, Chen Yu *et al.*. Target recognition based on wavelet multiscale product [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1223~1226  
陈方涵, 苗 华, 陈 宇等. 基于小波多尺度的目标识别 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1223~1226
- 11 R. C. Gonzales, R. E. Woods, S. L. Eddins. *Digital Image Processing Using Matlab* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005. 289~292
- 12 Stephane Mallat. *A Wavelet Tour of Signal Processing* [M]. Beijing: China Machine Press, 2002. 142~148
- 13 Wang Dakai, Peng Jinye. *Wavelet Analysis and Its Application in Signal Processing* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006. 150~151  
王大凯, 彭进业. *小波分析及其在信号处理中的应用* [M]. 北京: 电子工业出版社, 2006. 150~151

栏目编辑: 韩 峰