

文章编号:1004-4213(2011)02-0295-5

基于多小波变换的红外目标探测与识别

陈方涵, 王文生, 杨坤, 郭霏

(长春理工大学 现代光学测试技术研究室, 长春 130022)

摘 要:针对光电联合变换相关器目标识别的实际应用,对待测红外目标图片进行多小波变换,并利用模板大值法提取其边缘.通过获取更多的轮廓信息,从而提高对目标的识别能力.计算机模拟了常用于红外目标处理的多小波 GHM 和 SA4,实验结果表明:基于 GHM 多小波提取的边缘能获得大量的图像轮廓信息,其识别结果明显优于 SA4 多小波.将目标原图的光学相关探测结果与基于 GHM 多小波提取的边缘图像光学相关探测结果进行比较发现,经多小波预处理后的边缘图像能有效增强相关峰强度.

关键词:光学相关;目标识别;红外目标;多小波变换;边缘提取

中图分类号:TP391.4

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20114002.0295

0 引言

红外图片的获取将人们的视野从可见光扩展到红外波段,增强了目标的可观性,避免了在夜间观察产生的不利局面.因此,成功地实现红外目标的探测与识别受到人们的广泛关注.为了突出红外目标本身携带的特征信息,提高目标的识别能力,通常都需要对其进行相应的预处理,如图像去噪、图像增强或边缘提取等.其中,小波变换因具有多分辨率的特性,以独特的优势用于目标图像的预处理,在红外目标探测中具有良好的应用^[1-2].

在信号处理研究中,正交性能保持能量,对称性可以保持线性位相,使得信号在边界易于处理,因此分析工具能同时拥有这两种性质是十分必要的.但是在实数域中,紧支、对称、正交的标量小波是不存在的.1993年,Goodman Lee 和 Tang 为弥补这一不足提出了多小波的概念.多小波作为小波理论的延伸与扩展,因能同时具有对称性、正交性、短支性、高阶消失矩等特性^[3-4],其应用得到越来越多的重视,涉及医学图像^[5]、虹膜识别^[6-7]等领域.就红外目标识别而言,目前也有多小波应用的相关文献报道:它们先采用多小波对红外图像进行去噪或纹理分析等预处理,然后通过概率统计学的方法来实现探测^[8-9].

与概率统计学不同,本文采用光学相关探测的方法实现红外目标识别,具体的识别系统为光电联

合变换相关器.该系统通过目标轮廓的相似程度来实现识别,因此目标的边缘特征尤为重要.鉴于这一点,本文采用多小波对红外目标图像进行变换,并用模板大值法提取出图像的边缘,然后对其进行探测.光学实验表明,基于多小波变换的边缘提取能成功实现红外目标的识别.

1 光电联合变换相关器探测原理

光电联合变换相关器具有实时、灵活、结构紧凑等诸多优点,图 1 是光电联合变换相关器的装置示意图.

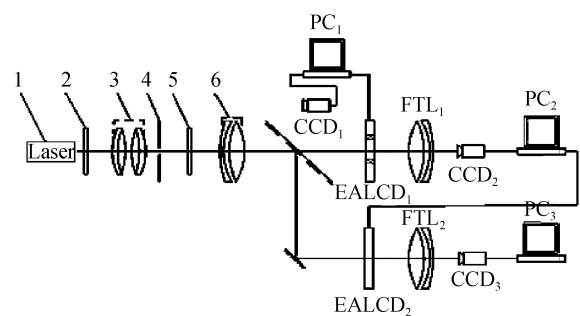


图 1 光电联合变换相关器装置

Fig. 1 Device schematic of opto-electronic joint transform correlator

该装置以激光作为光源,经衰减片 2 和由显微镜物镜 3、针孔 4、偏振片 5 和准直物镜 6 组成的准直扩束系统后,得到一束准直平行光.该平行光经半反半透后,分别照射电寻址液晶 EALCD₁ (Electrically

基金项目:总装备部预研局十一五重点项目(No. 5131 * * * * 105)资助

第一作者:陈方涵(1983-),女,博士研究生,主要研究方向为光学相关探测与目标识别. Email: chenhan620@163.com

导师:王文生(1943-),男,教授,博导,主要研究方向为现代光学测试技术. Email: wwsciom@163.com

收稿日期:2010-09-13;修回日期:2010-11-01

Addressed Liquid Crystal Display, EALCD) 和 EALCD₂, 其后在傅里叶变换透镜 FTL₁ (Fourier Transfrom Lens, FTL) 和 FTL₂ 的后焦面上获取相关结果。

联合变换相关的主要特征是将参考图像 $r(x, y)$ 与目标图像 $t(x, y)$ 同时输入光学运算系统. 假定 $t(x, y)$ 置于输入平面 EALCD₁ 的一侧, 其中心位于 $(a, 0)$; 参考图像 $r(x, y)$ 置于 EALCD₁ 的另一侧, 中心位于 $(b, 0)$, 则经一次傅立叶变换后, 电荷耦合器件 CCD₂ (Charge Coupled Device, CCD) 在 FTL₁ 的后焦面记录联合变换功率谱

$$I(u, v) = |F(u, v)|^2 = |\exp(-i2\pi ua)T(u, v) + \exp(-i2\pi ub)R(u, v)|^2 = T(u, v)T^*(u, v) + \exp(-i2\pi u(a-b))T(u, v)R^*(u, v) + \exp[-(-i2\pi u(-a+b))]T^*(u, v)R(u, v) + R(u, v)R^*(u, v) \quad (1)$$

联合变换功率谱经计算机 PC₂ 反馈到 EALCD₂ 后又经过第二次傅立叶变换, 在 FTL₂ 后焦面上的 CCD₃ 上获取一对相关输出

$$\begin{aligned} & \iint [F(u, v)F^*(u, v)\exp(i2\pi(ux+vy))]dudv + \\ & \iint \{\exp[-i2\pi u(a-b)]T(u, v)R^*(u, v) \cdot \\ & \exp(i2\pi(ux+vy))\}dudv + \iint \{\exp[-i2\pi u \cdot \\ & (-a+b)]T^*(u, v)R(u, v)\exp(i2\pi(ux+ \\ & vy))\}dudv + \iint \{R(u, v)R^*(u, v)\exp(i2\pi(ux+ \\ & vy))\}dudv = C_u(x, y) + C_v(x, y) + C_n(x, y) + \\ & C_r(x, y) \end{aligned} \quad (2)$$

当 $t(x, y)$ 与 $r(x, y)$ 相同时, 两互相关获得最大的相关峰, 其联合变换功率谱可以写作

$$I(u, v) = 2|F(u, v)|^2 \times \left[1 + \cos\left(2\pi u \frac{a+b}{\lambda f}\right)\right] \quad (3)$$

式中, f 是傅里叶透镜的焦距。

这样当目标与模板相同时, 联合变换功率谱可以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: $\left[1 + \cos\left(2\pi u \frac{a+b}{\lambda f}\right)\right]$, 即是理想的杨氏条纹, $2|F(u, v)|^2$ 则是杨氏条纹的包络. 杨氏条纹比包络更重要, 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. 杨氏条纹经过傅立叶变换后的衍射图包含 0 级(直流)衍射光斑和两个 ± 1 级衍射亮斑. 这两个对称分布的亮斑即是相关峰。

2 多小波理论及发展

小波是由一个尺度函数生成的, 那么将一个尺度函数扩展成多个, 就自然引出了多小波的概念. 与标量小波相比, 多小波具有更多的性质, 例如短支

性、正交性、对称性、消失矩等, 这些特性是标量小波不能同时满足的. 因此, 多小波为其在信号及图像处理方面的应用提供了良好的理论支持^[10-12].

标准的多分辨率分析 (Multiresolution Analysis, MRA) 只考虑了一个尺度函数 $\varphi(t)$, 平移后的 $\varphi(t-k)$ 线性独立, 并生成子空间 V_0 ; 伸缩后的 $\varphi(2^j t-k)$ 生成子空间 $V_j, j \in Z$. 此外, MRA 中还有一个小波函数 $w(t)$, 它的平移 $w(t-k)$ 生成了细节子空间 W_0 , 并且满足 $V_1 = V_0 \oplus W_0$.

和标量小波一样, MRA 同样适用于多小波, 不同之处在于 V_0 是由 N 个尺度函数平移后的 $\varphi_1(t-k), \varphi_2(t-k), \dots, \varphi_N(t-k)$ 生成. 矢量 $\Phi(t) = [\varphi_1(t), \dots, \varphi_N(t)]^T$ 满足矩阵等式

$$\Phi(t) = \sum_k C_k \Phi(2t-k) \quad (4)$$

式中, 系数 C_k 是 $N \times N$ 的矩阵.

与这些尺度函数相关联的 N 个小波 $w_1(t), \dots, w_N(t)$ 所组成的矢量 $W(t) = [w_1(t), \dots, w_N(t)]^T$ 也满足矩阵小波等式

$$W(t) = \sum_k D_k \Phi(2t-k) \quad (5)$$

同样的, 系数 D_k 也是 $N \times N$ 的矩阵. 式(4)和式(5)一起构成了多小波的双尺度方程.

早期著名的多小波是由 Geronimo, Hardin 和 Massopust 于 1994 年构造出来的, 通常称为 GHM 多小波, 它有两个尺度函数和两个小波. GHM 多小波的成功构造与应用, 使得多小波的发展受到更多的关注. 1996 年, Chui 和 Lian 通过研究多小波的正交性、紧支撑、对称性和插值性后, 利用对称性构造出二重多尺度函数和多小波, 称为 Chui-Lian 多小波. 到了 1999 年, L. Shen, Hwee Huat Tan, Jo Jew Than 给出了对称-反对称多小波, 如 SA4 多小波. 它是直接根据单小波扩展来构造的, 具有很好的性质, 并且在图像处理中, 其处理效果优于一般的多小波。

3 基于多小波的边缘提取算法

为了获取更多的目标图像特征信息, 成功识别红外目标, 本文采用基于多小波的边缘提取算法对目标联合图像进行预处理. 要实现该算法, 首先要对图像进行多小波变换, 其次才是根据变换系数提取边缘特征. 与标量小波不同, 多小波变换之前还需进行预处理, 本文采用的是用于特征提取的行重复过采样预处理; 然后再通过滤波器矩阵实现多小波变换. 对二维图像矩阵, 当只对图像执行一层多小波分解, 则其相应的矩阵表示为

$$\begin{bmatrix} H_1 H_1 & H_1 H_2 & H_1 G_1 & H_1 G_2 \\ H_2 H_1 & H_2 H_2 & H_2 G_1 & H_2 G_2 \\ G_1 H_1 & G_1 H_2 & G_1 G_1 & G_1 G_2 \\ G_2 H_1 & G_2 H_2 & G_2 G_1 & G_2 G_2 \end{bmatrix}$$

式中具有代表性的矩阵块 $H_1 G_2$ 中包含对应水平方向的第一个尺度函数的低通系数和对应竖直方向的第二个小波的高通系数. 有了这些矩阵块系数, 便可根据实际应用对其进行不同的处理.

为了提取图像的边缘特征, 首先要定义水平方向的平方滤波器输出^[13-14], 其表达式为

$$\begin{aligned} Wh_1 &= Wh_1^+ + Wh_1^- \\ Wh_2 &= Wh_2^+ + Wh_2^- \end{aligned} \quad (6)$$

式中

$$\begin{aligned} Wh_1^+ &= ((H_1 G_1)^+)^2 + ((H_1 G_2)^+)^2 \\ Wh_1^- &= ((H_1 G_1)^-)^2 + ((H_1 G_2)^-)^2 \\ Wh_2^+ &= ((H_2 G_1)^+)^2 + ((H_2 G_2)^+)^2 \\ Wh_2^- &= ((H_2 G_1)^-)^2 + ((H_2 G_2)^-)^2 \end{aligned} \quad (7)$$

矩阵块 R^+ 定义为 $R^+ = \begin{cases} R & R \geq 0 \\ 0 & R < 0 \end{cases}$, R 的定义为

$$R^- = \begin{cases} -R & R < 0 \\ 0 & R \geq 0 \end{cases}$$

类似地, 可以得到平方滤波器输出为

$$\begin{aligned} Wv_1 &= Wv_1^+ + Wv_1^- \\ Wv_2 &= Wv_2^+ + Wv_2^- \end{aligned} \quad (8)$$

式中

$$\begin{aligned} Wv_1^+ &= ((G_1 H_1)^+)^2 + ((G_1 H_2)^+)^2 \\ Wv_1^- &= ((G_1 H_1)^-)^2 + ((G_1 H_2)^-)^2 \\ Wv_2^+ &= ((G_2 H_1)^+)^2 + ((G_2 H_2)^+)^2 \\ Wv_2^- &= ((G_2 H_1)^-)^2 + ((G_2 H_2)^-)^2 \end{aligned}$$

接下来定义的是图像的梯度向量模值和相应的方向角, 具体表达式为

$$M_1 = \sqrt{Wh_1 + Wv_1} \quad (9)$$

$$A_1 = \arg [(Wh_1^+ + Wh_1^-) + i(Wv_1^+ + Wv_1^-)] \quad (10)$$

根据式(9)、(10)可以得到梯度向量的模极大值点集. 也就是说, 图像的边缘是通过模极大值法确定的. 为了得到更好的轮廓信息, 增强联合变换相关器的识别能力, 还应适当减少背景噪音对目标的影响. 因此, 还需设定一阈值对模极大值点集进行剔除, 然后再输出图像的边缘点.

总结起来, 基于多小波的边缘提取算法实现过程为: 1) 读入图像; 2) 对图像的各行向量进行预处理后, 根据滤波器矩阵实现行向量小波变换, 并重置行向量; 3) 对图像列向量进行与行向量相同的处理; 4) 根据所得的多小波系数, 按式(6)~(10)确定图像

的梯度向量模值与方向角, 并确定出模极大值点集合; 5) 设定一阈值, 令非边缘点像素值为零, 获取边缘输出.

4 实验结果

在基于多小波的边缘提取实现过程中, 多小波基的选取也尤为重要, 因为不同的多小波基直接影响着变换结果. 目前, 常用于红外目标预处理的有 GHM 多小波与 SA4 多小波. 下面以图 2(a) 中的红外目标为例, 给出多小波在该类目标探测中的应用情况. 图 2(a) 中有两条船, 其中一条是需要探测的目标, 另一条是由目标实时提取出的模板. 将该联合图像输入光电混合联合变换相关器的 EALCD1 中, 期望在 PC3 上显示出一对相关点, 便于判断目标和模板的相对位置. 然而, 图 2(b) 示出的相关结果却不尽人意, 除了零级自相关项, 找不到相关峰的痕迹, 视为识别失败. 为了解决相关点强度弱的问题, 此处采用多小波边缘提取的方法对图 2(a) 进行预处理.

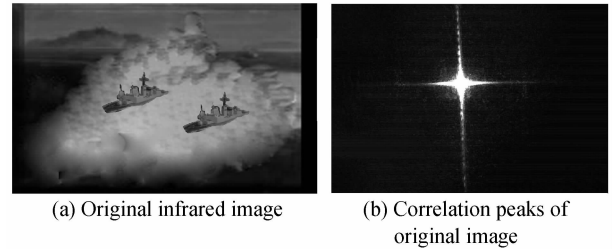


图 2 输入实验图片及其光学探测结果

Fig. 2 Inputted experimental images and its results of optical detection

图 3(a) 给出了原红外图像经 GHM 多小波变换后结果, 经模极大值的系数处理后, 可得到图 3(b) 所示的边缘图像.

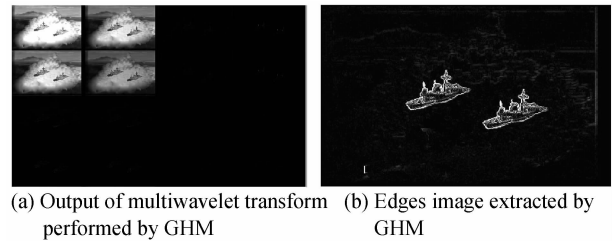
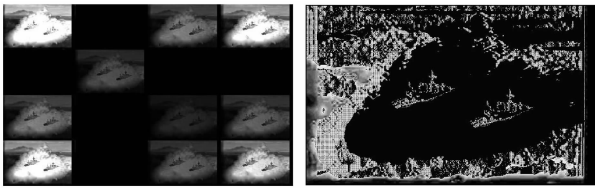


图 3 红外图像 GHM 多小波变换及其边缘提取结果

Fig. 3 Multiwavelet transform performed by GHM of infrared image and its output of edge extraction

同样, 图 4 也给出了图像经 SA4 变化后的结果及其边缘提取结果. 从直观上分析, 经 GHM 多小波处理后的红外图像加强了目标与模板的边缘信息, 突出了轮廓特征; 而 SA4 多小波的处理结果却差强人意.

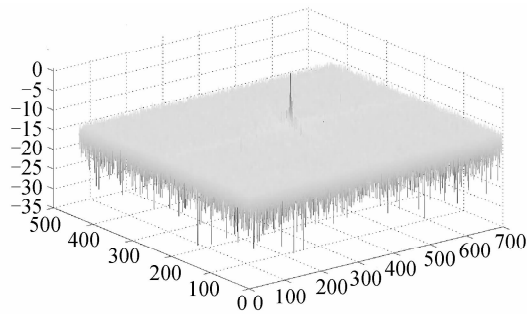


(a) Output of wavelet transform performed by SA4 (b) Edges image extracted by SA4

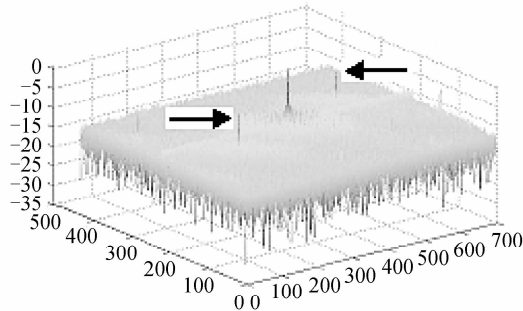
图4 红外图像SA4多小波变换及其边缘提取结果

Fig. 4 Multiwavelet transform performed by SA4 of infrared image and its output of edge extraction

这一点也可由图5给出的计算机模拟实验结果得到证实.图5(a)给出的SA4多小波边缘提取的相关峰模拟结果,几乎看不到微弱的相关峰;而GHM多小波边缘提取的相关峰却很明显,如图5(b)中箭头所示.当把图3(b)输入光电联合变换相关器中,可得到图6示出的探测结果,该相关峰较图2(b)有明显的增强,将复杂的图像识别问题转化为输出面的点识别,成功实现了红外目标的探测.



(a) Correlation peaks of edge extracted by SA4



(b) Correlation peaks of edge extracted by GHM

图5 计算机模拟实验比较

Fig. 5 Comparison of simulation experiments

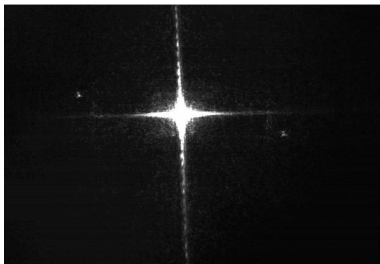


图6 GHM多小波边缘提取光学实验结果

Fig. 6 Optical experimental results of edge image extracted by GHM

5 结论

多小波将小波理论由标量空间扩展到向量空间,能同时满足对称性、正交性、短支性、高阶消失矩等特性.本文通过研究多小波的性质,采用基于多小波的模极大值法,获得了一种新的目标图像处理方法.该方法能对红外目标进行特征提取,使边缘信息清晰明亮,成功地实现了红外目标的识别,扩展了联合变换相关器的识别范围.

参考文献

- [1] WEI Ying, SHI Ze-lin, LI Cheng-jun, *et al.* Detection algorithm for infrared small target in background of sea and sky[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, **32**(2):153-156.
魏颖,史泽林,李成军,等.海空背景下红外小目标检测算法[J].*红外与激光工程*. 2003, **32**(2):153-156.
- [2] CHEN Fang-han, LI Chun-jie, LIU Dong-yue, *et al.* Application of joint transform correlator in detection of infrared target[C]. *SPIE*, 2007, **6837**: 1F. 1-1F. 8.
- [3] CHENG Zheng-xing, ZHANG Ling-ling. Analysis of multiwavelet and application[J]. *Journal of Engineering Mathematics*, 2001, **18**(1): 99-107.
程正兴,张玲玲.多小波分析及应用[J].*工程数学学报*, 2001, **18**(1):99-107.
- [4] CHENG Zheng-xing, YANG Shou-zhi, ZHANG Ling-ling. The study and evolution of the theory of multiwavelets[J]. *Journal of Engineering Mathematics*, 2001, **18**(5):1-16.
程正兴,杨守志,张玲玲.多小波理论的发展与研究[J].*工程数学学报*, 2001, **18**(5):1-16.
- [5] WEI Hong-li, YU Xin-bo, ZHAO Wen-cang, *et al.* The medical image threshold value segmentation algorithm study based on multiwavelet analysis [J]. *CT Theory And Application*, 2009, **18**(1): 8-15.
韦洪丽,于新波,赵文仓,等.基于多小波的医学图像阈值分割算法研究[J].*CT理论与应用研究*, 2009, **18**(1):8-15.
- [6] WEI Lian-xin. Multiwavelet theory and its application in iris identification technology [D]. Changchun: Jilin University, 2006.
魏连鑫.多小波理论及其在虹膜识别技术中的应用[D].长春:吉林大学,2006.
- [7] GONG Jun-hui. Feature extraction and recognition of iris based on multiwavelets [D]. Guilin: Guangxi Normal University, 2005.
龚军辉.基于多小波的虹膜特征提取和识别[D].桂林:广西师范大学,2005.
- [8] XU Ying-bing, PEI Xiandeng, XIA Yong. Small weak infrared target detection based on SA4 multiwavelet transform and Fisher algorithm[J]. *Infrared*, 2003(12):7-10.
徐永兵,裴先登,夏涌.基于SA4向量小波变换及Fisher算法的红外弱小目标探测[J].*红外*, 2003(12):7-10.
- [9] GAO Jing-li. Multiwavelet multiresolution texture analysis based on small detection in infrared image [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2004.
高景丽.基于向量小波多尺度纹理分析的红外小目标检测[D].武汉:华中科技大学,2004.
- [10] BERTHE K, YANG T. Multi-edge extraction and image transform base on multiwavelets theory[C]. *Proceedings, IEEE Info-tech and Info-net*, 2001, 1: 285-290.

- [11] COTRONEI M, MONTEFUSCO L B, PUCCIO L. Multiwavelet analysis and signal processing [J]. *IEEE transactions on Circuit and system II; Analog and Digital Signal Processing*, 1998, **45**(8): 970-987.
- [12] STRELA V, HELLER P N, STRANG G, *et al.* The application of multiwavelet filter banks to image processing [J]. *IEEE Transaction on Image Processing*, 1999, **8**(4): 548-563.
- [13] ZHONG Hua. Multiwavelets theory and application of multiwavelets to image edge detection [D]. Nanchang: Jiangxi Normal University, 2005.
- 钟华. 多小波理论及其在边缘检测方面的应用[D]. 南昌:江西师范大学,2005.
- [14] CAI Chao, DING Yue-ming, ZHOU Cheng-ping, *et al.* Composite edge detector based on multiwavelet operator[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2004, **9**(2): 134-138.
- 蔡超,丁明跃,周成平,等. 一种基于多小波算子的复合边缘提取方法[J]. 中国图像图形学报, 2004, **9**(2):134-138.

Detection and Recognition of Infrared Target Based on the Multiwavelet Transform

CHEN Fang-han, WANG Wen-sheng, YANG Kun, GUO Fei

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

Abstract: Considering the practical application of target recognition with optoelectronic joint transform correlator, the infrared image detected was processed by multiwavelet transform, and its edge points were extracted by the method of local modulus maximum. Capturing much contour can improve the capacity of target recognition. The multiwavelet functions usually used to infrared target processing are GHM and SA4. Simulation experiments show that the correlation output of edges extracted by GHM is obviously better than that one of edges extracted by SA4, because the former edges carry much contour of image. Compared to the optical correlation detection result of original image with that of edge image extracted by GHM, it is found that the latter effectively enhances the intensity of correlation peaks.

Key words: Optical correlation; Target recognition; Infrared target; Multiwavelet transform; Edge extraction