

基于小波边缘提取的目标光学相关识别

洪雪婷 石晓卫 钱义先

浙江师范大学信息光学研究所, 浙江 金华 321004

摘要 为提高联合变换相关器对复杂背景图像的识别能力,提出了基于小波变换边缘提取的联合变换相关器。利用具有多尺度分析功能的小波变换工具对联合图像进行边缘检测,所提取的边缘图像能保留更多的细节信息,改善复杂背景下的目标识别能力。计算机模拟和光学实验结果均表明,用小波变换边缘提取的联合图像进行相关识别,能明显增强相关峰的强度,提高目标识别能力。

关键词 图像处理;小波变换;边缘提取;光学相关器

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.041004

Optical Correlation Recognition Based on Edge Detection of Wavelet Transform

Hong Xueting Shi Xiaowei Qian Yixian

Institute of Information Optics, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China

Abstract In order to improve the recognition ability of joint transform correlator in complex background, we propose a joint transform correlator based on wavelet transform edge detection. Multi-scale analysis of wavelet is used to detect the joint image edge, so that the edge can keep more details, and the ability of target recognition in complex background can be improved. Computer simulations and optical experimental results show that, our proposed method can enhance the intensity of the correlation peaks and improve the ability of correlation recognition greatly.

Key words image processing; wavelet transform; edge extraction; optical correlator

OCIS codes 100.2000; 100.3008; 230.2090

1 引言

联合变换相关器利用光学透镜的傅里叶变换功能来完成目标识别,和匹配相关器相比,它无需预先制作匹配滤波器,也不要求在识别过程中精确复位。此外,联合变换相关器具有实时高速并行处理、高空间带宽积、高调制度等优点,易于快速实现光学相关运算。在军事上能为图像匹配制导提供高精度、实时的光学相关测试方法,用于巡航导弹等精确制导武器,实现对目标的精确打击,为空中侦察搜索目标,提供自动探测和定位的技术^[1]。然而由于输入图像对比度低、信噪比低以及背景复杂等因素,往往探测不到相关峰,并存在较大的旁瓣。为改善这种状况,国内外学者提出了很多改进相关峰的方法,主要分成两大类:第一类是直接处理联合图像,如数学形态学、边缘检测、中值滤波等方法^[2-4];第二类是处理联合功率谱,如条纹调制、二值化功率谱、功率谱相减等方法^[5-7]。本文使用具有多尺度分析功能的小波变换(WT)工具提取所要识别的目标信息,减少背景等不相关信息。更重要的是,小波变换的边缘检测方法可改善传统边缘算子局限在单一尺度的问题,能有效提高联合变换相关器的识别能力。

收稿日期: 2013-10-23; 收到修改稿日期: 2013-11-15; 网络出版日期: 2014-03-11

基金项目: 国家自然科学基金(61377014)、浙江省自然科学基金(LY12F05001)

作者简介: 洪雪婷(1991—),女,硕士研究生,主要从事光学相关探测处理方面的研究。E-mail: hongxueting@sina.com

导师简介: 钱义先(1974—),男,博士,副教授,主要从事航空光学遥感、光信息处理、图像复原等方面的研究。

E-mail: qiannyixian@zjnu.edu.cn (通信联系人)

2 光学相关识别原理

2.1 光电联合变换相关器原理

图1是光电联合变换相关器^[5,8-11]的原理图。系统采用氦氖激光器(波长为632.8nm)作为光源,通过衰减片调制出需要的光强。经显微物镜聚焦、针孔进行空间滤波,再经双分离准直透镜形成均匀的准直扩束平行光。由CCD1实时拍摄的第一帧图像作为参考图像存储在PC1中,下一帧图像作为目标图像,并在计算机PC1中制作成联合图像送入空间光调制器(SLM)中。联合图像经傅里叶变换透镜(FTL)后得到的联合功率谱由计算机CCD2接收并送入PC2。再将PC2中存储的联合功率谱送入SLM中,联合功率谱经FTL傅里叶变换后,由CCD2获取相关峰,在PC2中显示。

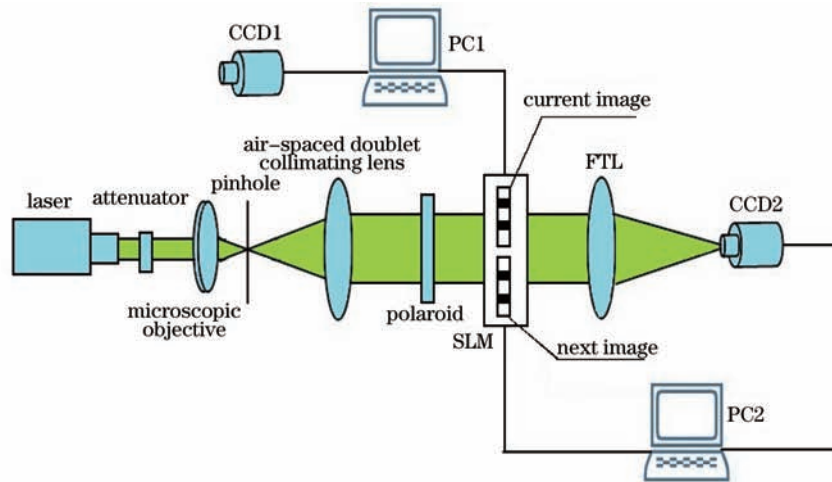


图1 光电混合联合变换相关原理图

Fig.1 Schematic diagram of optoelectronic hybrid JTC

设输入到空间光调制器中的参考图像函数为 $f_i(x, y)$, 其中心位于 $(a, 0)$; 目标函数为 $f_{i+1}(x, y)$, 其中心位于 $(a, 0)$ 。参考图像和目标图像组成的联合图像 $s(x, y)$ 可以表示为

$$s(x, y) = f_i(x + a, y) + f_{i+1}(x - a, y). \quad (1)$$

联合图像被准直的激光照明,通过透镜进行傅里叶变换,在透镜后焦面被 CCD2 探测得到联合图像的联合功率谱(JPS) $|S(u, v)|^2$

$$|S(u, v)|^2 = |F_i(u, v)|^2 + |F_{i+1}(u, v)|^2 + \exp\left[i\frac{4\pi}{\lambda f} au\right] F_i(u, v) F_{i+1}^*(u, v) + \exp\left[-i\frac{4\pi}{\lambda f} au\right] F_i^*(u, v) F_{i+1}(u, v), \quad (2)$$

式中 $S(u, v)$, $F_i(u, v)$ 和 $F_{i+1}(u, v)$ 分别是联合图像 $s(x, y)$, 参考图像 $f_i(x, y)$ 和目标图像 $f_{i+1}(x, y)$ 的傅里叶变换, u 和 v 分别代表 x 和 y 坐标在傅里叶平面上的空间频率,且满足 $x = \lambda fu$, $y = \lambda fv$, λ 和 f 分别为激光的波长和傅里叶变换透镜的焦距。

将上述 JPS 输入到空间光调制器中,经过傅里叶变换得到相关输出 $c(x, y)$, 可表示为

$$c(x, y) = f_i(x, y) \otimes f_i(x, y) + f_{i+1}(x, y) \otimes f_{i+1}(x, y) + f_i(x, y) \otimes f_{i+1}(x, y) \sigma(x + 2a, y) + f_{i+1}(x, y) \otimes f_i(x, y) \sigma(x - 2a, y). \quad (3)$$

(3)式右边第一、二项分别是 $f_i(x, y)$ 和 $f_{i+1}(x, y)$ 的自相关项,第三、四项是 $f_i(x, y)$ 和 $f_{i+1}(x, y)$ 的互相关项。自相关项属于零级衍射,不是所要探测的信号。互相关项是 ± 1 级衍射,它们与零级项分离,正是要寻求的相关输出信号。它的强度大小就表征目标图像和参考图像之间的相似程度。

2.2 小波变换边缘提取

图像的边缘结构是模式识别中最重要的信息,可定义为图像中亮度的突变点。近几十年来,边缘检测已有不少的经典算子,如 Sobel 算子、Robert 算子、Prewitt 算子等。这几种算法都是基于一阶求导,这类求导运算的方法存在放大噪声、边缘定位不准确等问题。而经多尺度小波变换的方法提取的边缘,包含了图像中各类细节信息,边缘信息更加丰富,为后续的相关识别提供一定的基础。研究人员对小波模极大值边缘检测进行了研究,得出的结果是小波变换模极大值算法相对于 Sobel 等经典算子更能描述信号的边缘点^[12-13]。

在边缘检测中,小波函数^[14-15]应具有紧支集、对称和一阶消失矩的特点,高斯函数就具有这个特点,因此本文选取高斯函数作为尺度函数。设高斯函数为 $\eta(x,y)$, 则应满足

$$\int_R \int_R \eta d_x d_y = 1, \quad (4)$$

$$\lim_{x,y \rightarrow \infty} \eta(x,y) = 0. \quad (5)$$

其一阶导数为

$$\varphi^{(x)}(x,y) = \frac{\partial \eta(x,y)}{\partial x}, \quad (6)$$

$$\varphi^{(y)}(x,y) = \frac{\partial \eta(x,y)}{\partial y}. \quad (7)$$

$\varphi^{(x)}(x,y)$, $\varphi^{(y)}(x,y)$ 就是构造的基本小波函数。在 2^i 尺度上有

$$\varphi_{2^i}^{(x)}(x,y) = \frac{1}{2^i} \varphi^{(x)}\left(\frac{x}{2^i}, \frac{y}{2^i}\right), \quad (8)$$

$$\varphi_{2^i}^{(y)}(x,y) = \frac{1}{2^i} \varphi^{(y)}\left(\frac{x}{2^i}, \frac{y}{2^i}\right). \quad (9)$$

设输入的图像为 $f(x,y)$, 用在尺度 2^i 下得到的小波基函数 $\varphi_{2^i}^{(x)}$ 和 $\varphi_{2^i}^{(y)}$ 对 $f(x,y)$ 进行小波变换, 有

$$w_{2^i}^{(x)} f(x,y) = f(x,y) * \varphi_{2^i}^{(x)}(x,y), \quad (10)$$

$$w_{2^i}^{(y)} f(x,y) = f(x,y) * \varphi_{2^i}^{(y)}(x,y). \quad (11)$$

$f(x,y)$ 的小波系数 $w_{2^i}^{(x)} f(x,y)$ 和 $w_{2^i}^{(y)} f(x,y)$ 形成的梯度表示为

$$w_{2^i} f(x,y) = \begin{bmatrix} w_{2^i}^{(x)} f(x,y) \\ w_{2^i}^{(y)} f(x,y) \end{bmatrix} = 2^i \nabla (f * \eta_{2^i})(x,y). \quad (12)$$

梯度 $w_{2^i} f(x,y)$ 的局部模极值就是多尺度边缘点, 其模表示为

$$|w_{2^i} f(x,y)| = \sqrt{\left|w_{2^i}^{(x)} f(x,y)\right|^2 + \left|w_{2^i}^{(y)} f(x,y)\right|^2}, \quad (13)$$

幅角为

$$a_{2^i} f(x,y) = \arg[w_{2^i}^{(x)} f(x,y) + iw_{2^i}^{(y)} f(x,y)]. \quad (14)$$

小波系数的系数模 $|w_{2^i} f(x,y)|$ 沿着幅角 $a_{2^i} f(x,y)$ 方向的极大值就是需要的图像边缘点。

3 计算机模拟和光学实验

采用一幅基于实际的飞机图像制作而成的联合图像作为实验图, 如图 2 所示。为了更好地说明小波变换在边缘检测方面的优越性, 对联合图像分别进行 Prewitt、Sobel、Roberts 边缘检测和小波边缘检测。从图 3 所示结果中看出, 基于一阶求导的 Prewitt、Sobel 和 Roberts 三种算子得到的边缘检测图像相差无几并且都缺少



图 2 输入的联合图像

Fig.2 Input joint image

了很多细节边缘,而用多尺度的小波变换得到的边缘图像细节信息相对比较全面。可见多尺度分析功能的小波变换在边缘检测上具有一定优势^[16-19]。

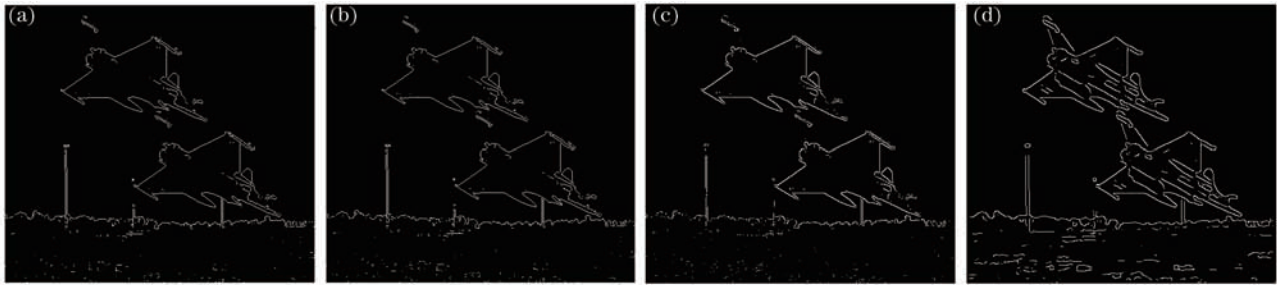


图3 (a) Prewitt边缘提取图像;(b) Sobel边缘提取图像;(c) Roberts边缘提取图像;(d)小波变换边缘提取图

Fig.3 (a) Enhanced image edge extracted by Prewitt operator; (b) enhanced image edge extracted by Sobel operator; (c) enhanced image edge extracted by Roberts operator; (d) enhanced image edge extracted by WT

图4是计算机模拟联合变换相关运算的结果。图4(a)是输入图2获取的相关峰,由于复杂背景的干扰,获得相关峰并不明显,而且存在很多旁瓣。图4(b)是将小波边缘检测结果即图3(b)作为输入图像获得的相关峰,结果显示,用小波边缘检测的图像进行相关识别可以增强相关峰的强度和联合变换相关器的相关识别能力。

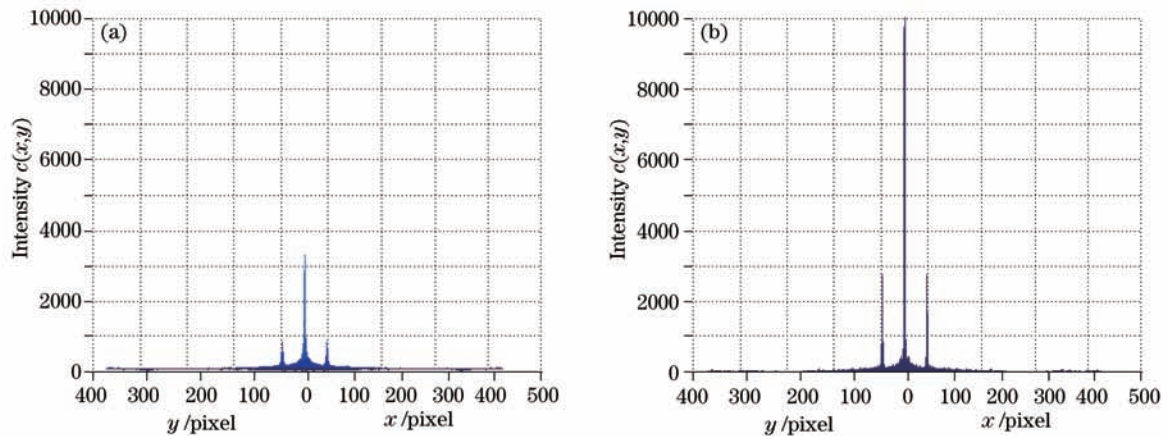


图4 (a)未处理联合图像得到的相关峰;(b)小波边缘检测得到的相关峰

Fig.4 (a) Correlation output without processing; (b) correlation output after WT processing

为验证基于小波边缘检测目标识别的可行性,搭建了图5所示的光学实验装置。将图2输入图5装置中,得到图6(a)所示相关峰图。图6(b)是把小波变换处理的边缘图像图3(b)输入到光学实验装置中得到的相关峰。由图6所示光学实验结果可以很明显地看出经过小波边缘提取后再进行目标识别时,得到的相关峰强度高,相关识别效果明显。

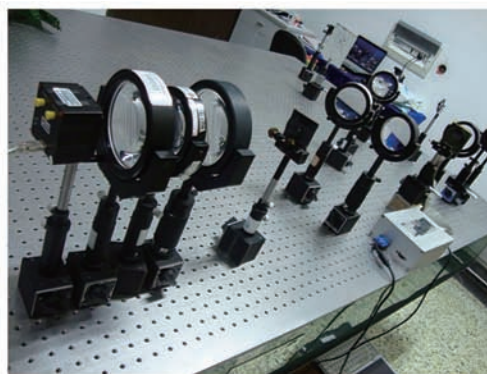


图5 光电混合联合变换实验装置

Fig.5 Experimental apparatus of opto-electronic hybrid JTC

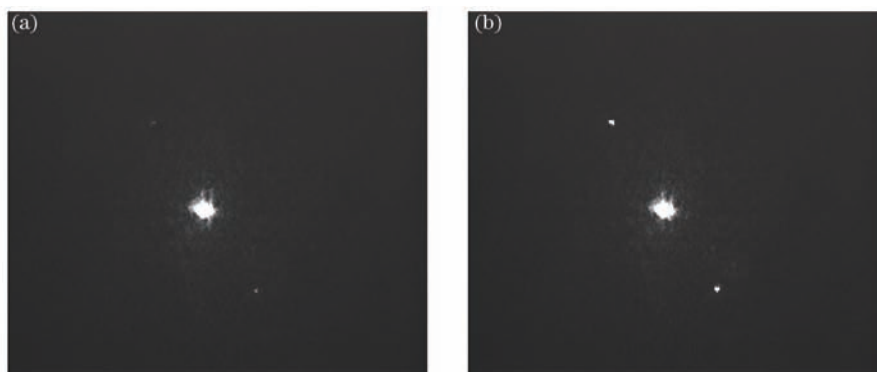


图6 (a)未处理联合图像得到的相关峰;(b)小波边缘检测后得到的相关峰

Fig.6 (a) Correlation peak output without processing; (b) correlation peak output by WT processing

4 结 论

为提高联合变换相关器对复杂背景图像的识别能力,提出了基于小波变换的联合变换相关器。这种联合变换相关器充分利用了小波变换的多尺度分析功能,能获得良好的边缘图,为下一步目标识别打下基础。为验证本文方法的可行性,用计算机模拟小波边缘提取的目标识别,并搭建了光学实验装置。实验结果表明基于小波变换的联合变换相关器能明显提高相关峰的强度,具有较好的识别能力。

参 考 文 献

- 1 Wensheng Wang, Yu Chen, Cuiping Liang, *et al.*. Hybrid opto-electronic joint transform correlator for the recognition of target in cluttered scenes [C]. SPIE, 2005, 5642: 204-212.
- 2 Debayle J, Pinoli J C. Multiscale image filtering and segmentation by means of adaptive neighborhood mathematical morphology [C]. IEEE International Conference on Image Processing, 2005. 537-540.
- 3 Shih F Y, Wu Yi-Ta. Decomposition of binary morphological structuring elements based on genetic algorithms [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2005, 99(2): 291-302.
- 4 Lin Yuchi, Cui Yanping, Huang Yinguo. Study on edge detection and target recognition in complex background [J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(3): 509-514.
林玉池, 崔彦平, 黄银国. 复杂背景下边缘提取与目标识别方法研究 [J]. 光学精密工程, 2006, 14(3): 509-514.
- 5 Joewono Widjaja. Wavelet filter for improving detection performance of compression-based joint transform correlator [J]. Appl Opt, 2010, 49(30): 5768-5777.
- 6 A Bal, A M El-Saba, M S Alam. Improved fingerprint identification with supervised filtering enhancement [J]. Appl Opt, 2002, 41(35): 7416-7422.
- 7 Ma Jin, Tian Tao. Target tracking method based on joint transform correlation [J]. J Applied Optics, 2012, 33(5): 904-908.
马进, 田涛. 基于联合变换相关的目标跟踪方法 [J]. 应用光学, 2012, 33(5): 904-908.
- 8 Qian Li, Cui Yang, Jian-Qi Zhang. Target acquisition performance in a cluttered environment [J]. Appl Opt, 2012, 51(31): 7668-7673.
- 9 Widjaja Joewono. Noisy face recognition using compression-based joint wavelet-transform correlator [J]. Opt Commun, 2012, 285(6): 1029-1034.
- 10 Widjaja Joewono. Detection performance of wavelet-based joint transform correlation [J]. Appl Opt, 2007, 46(34): 8278-8283.
- 11 P Kaewkasi, J Widjaja, J Uozumi. Effect of three-hold on single-target detection by using modified amplitude-modulated joint transform correlator [J]. Opt Commun, 2007, 271(2): 8-58.
- 12 Li Chen, Wang Junfeng. A new adaptive threshold edge detection method based on lifting wavelet [J]. Optoelectronic Technology, 2012, 32(2): 91-104.
李晨, 王军锋. 基于提升小波的自适应阈值边缘检测新算法 [J]. 光电子技术, 2012, 32(2): 91-104.
- 13 Wang Haihong, Zeng Ni, Lu Wei, *et al.*. Edge detection of laser imaging radar based on wavelet transform and mathematical morphology [J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(6): 903-906.

- 王海虹, 曾妮, 陆威, 等. 基于小波变换和数学形态学的激光成像雷达图像边缘检测[J]. 中国激光, 2008, 35(6): 903-906.
- 14 Xiang Rujian, Tian Yinghua, Ji Yunsong, *et al.*. Application of wavelet transform in background processing of 2D image [J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(Suppl): 280-283.
向汝建, 田英华, 季云松, 等. 小波变换在二维图像背景处理中的应用[J]. 中国激光, 2006, 33(Suppl): 280-283.
- 15 Qiuping Wang, Tiepeng Wang, Ke Zhang. Image edge detection based on the grey prediction model and discrete wavelet transform [J]. Kybernetes, 2012, 4(5-6): 643-654.
- 16 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. 基于小波多尺度积的目标识别[J]. 光学学报, 2009, 29(5): 1223-1226.
- 17 Ge Huayong, Bai Enjian. 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.
- 18 He Junfa, Zhao Xuanke, Wang Hongxia, *et al.*. Joint transform correlation recognition based on optical wavelet-transform differentiation-preprocessing [J]. Acta Photonica Sinica, 2002, 1(12): 1538-1541.
何俊发, 赵选科, 王红霞, 等. 基于光学小波微分预处理的联合变换相关目标识别[J]. 光子学报, 2002, 1(12): 1538-1541.
- 19 Jianlin Zhao, Qitui Xu, Wangmin Zhou. Photorefractive edge-enhancement joint transform correlator [J]. Opt Commun, 2002, 212(4-6): 287-292.