

文章编号 1674-2915(2009)05-0460-06

基于输入面形态学预处理的条纹调制滤波 联合变换相关器

王 勇^{1,2}, 朱 明¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:为改善联合变换相关器的相关输出结果,提高图像识别能力,提出了一种将输入面形态学处理与功率谱面条纹调制滤波(FAF)处理相结合的方法。介绍了经典联合变换相关器的基本原理;针对联合变换相关器的不足将输入面形态学预处理和功率谱 FAF 处理相结合,来改进经典联合变换相关器的相关输出性能,详细分析了上述改进型联合变换相关器的参数选取问题。实验结果显示,改进的联合变换相关器相关峰很尖锐,峰值为 9.882×10^8 ,比传统的联合变换相关器互相关峰值提高了 5.761×10^8 ,表明将输入面形态学处理与功率谱面 FAF 处理相结合效果好于单独使用其中一种方法,改善了传统联合变换相关器的目标识别能力。

关键词:联合变换相关器;预处理;数学形态学;条纹调制滤波

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A

Research on FAF joint transform correlator based on morphological processing of input image

WANG Yong^{1,2}, ZHU Ming¹(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: A image processing method combining a input plane mathematical morphology processing with a power plane Fringe Adjusted Filter(FAF) processing has been proposed to improve the recognition ability of a Joint Transform Correlator(JTC). The theory of classical JTC is introduced, and then, aiming at its disadvantage, the combination of the input plane morphology processing and the power spectrum plane FAF processing is used to improve the correlation output performance of JTC. Finally, the parameters of the proposed JTC are analyzed and the optimum parameters are selected. Experimental results show that a very sharpness correlation peak with a peak value of 9.882×10^8 is obtained by the proposed correlator, which is 5.761×10^8 higher than that of classical JTC. The proposed method improves the target detecting ability of the JTC, for its performance

收稿日期:2009-06-15;修订日期:2009-08-18

基金项目:国家 863 计划“2005AA778032”

is better than that of any single method based on JTC.

Key words: joint transform correlator; preprocess; mathematical morphology; Fringe-Adjusted Filter (FAF)

1 引言

联合变换相关器 (Joint Transform Correlator, JTC) 是由 Weaver 和 Goodman 于 1966 年首次提出的^[1]。它具有无需制作和精确复位空间滤波器的优点,一问世就成为光学图像识别中的重要方法。然而,经典的联合变换相关器 (C-JTC) 在相关面上存在较强和较宽的零衍射级,且相关信号本身强度较弱,不够尖锐,直接影响到相关峰的探测。

近年来,国内外学者在如何改进 C-JTC 的相关性能上做了大量工作^[2-6]。这些工作主要集中在两个方面:一是对 C-JTC 的输入面联合图像进行预处理,如灰度变换、形态学方法、微分算子及小波边缘提取等;二是功率谱的优化处理,如功率谱的二值化、对数变换、指数变换、拉普拉斯锐化及条纹调制滤波 (Fringe Adjusted Filter, FAF) 方法等,这些方法都不同程度地改善了 C-JTC 的性能。

为进一步改善 C-JTC 的相关输出,本文采用输入面形态学处理与功率谱 FAF 处理相结合的方法,提出了输入面形态学预处理的 FAF 联合变换相关器 (Morph FAF-JTC)。对输入面进行形态学处理可以使相关输出峰变窄,但降低了相关峰值;对功率谱进行 FAF 处理可以提高相关峰的高度,但峰值不够尖锐。将二者相结合并适当调整 FAF 的参数,集中了两种方法的优点,极大地提高了 C-JTC 的相关识别性能。实验表明本文提出的方法比使用单一的预处理或功率谱处理方法更大程度地增大了互相关峰值,减小了互相关峰的宽度。

2 C-JTC 基本原理

JTC 是一种光电混合的目标识别装置,它结合了光学的高速并行性和电子计算机的灵活性、可编程性等优点,成为目标识别领域极具发展前

途的重要装置之一。

JTC 的结构如图 1 所示,参考图像预先存在计算机 1 (Computer₁) 中,用 CCD₁ 获取目标图像并输入 Computer₁,参考图像和目标图像组成的联合图像经 Computer₁ 做图像预处理后并排显示在空间光调制器 SLM₁ 上,SLM₁ 位于傅里叶变换透镜 FTL₁ 的前焦面上,用平行相干光垂直照射 SLM₁,可在 FTL₁ 的后焦面上得到联合变换功率谱。用 CCD₂ 记录该功率谱,并输入到 Computer₂ 中进行优化处理,处理后的功率谱呈现在 SLM₂ 上,经傅里叶变换透镜 FTL₂ 再次进行傅里叶变换,便可在输出面上得到相关输出相关输出。由 CCD₃ 记录,并输入 Computer₂ 中。

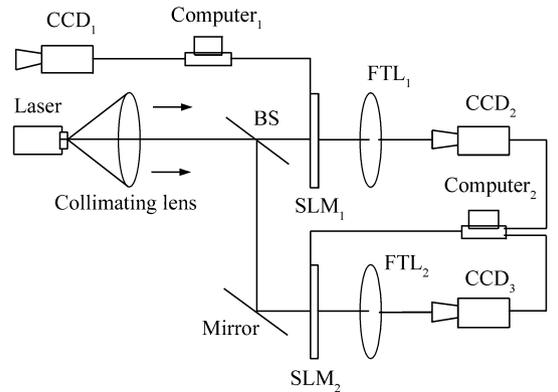


图 1 联合变换相关器结构图

Fig. 1 Structure of JTC

若输入到 SLM₁ 的参考图像函数为 $r(x, y)$, 其中心位于 $(-a, 0)$; 目标图像函数为 $t(x, y)$, 其中心位于 $(a, 0)$ 。由参考图像和目标图像组成的联合图像 $f(x, y)$ 被准直的激光照明, 并通过透镜进行傅里叶变换。若输入面的图像分布表示为:

$$f(x, y) = r(x + a, y) + t(x - a, y), \quad (1)$$

则透镜后焦面的傅立叶谱分布为:

$$F(u, v) = \exp[j2\pi au]R(u, v) + \exp[-j2\pi au]T(u, v), \quad (2)$$

$$R(u, v) = \iint r(x, y) \exp[-j2\pi(ux + vy)] dx dy, \quad (3)$$

$$T(u, v) = \iint t(x, y) \exp[-j2\pi(ux + vy)] dx dy, \quad (4)$$

其中 $F(u, v)$ 、 $R(u, v)$ 和 $T(u, v)$ 分别为联合图像、参考图像和目标图像的傅立叶变换。用平方律探测器在透镜的后焦面上探测到联合变换功率谱为 $F(u, v)^2$ 。

$$|F(u, v)|^2 = |R(u, v)|^2 + |T(u, v)|^2 + \exp[j4\pi au] R(u, v) T^*(u, v) + \exp[-j4\pi au] T(u, v) R^*(u, v), \quad (5)$$

将上述联合功率谱经透镜做逆傅里叶变换得:

$$f(\xi, \eta) = r(\xi, \eta) \otimes r(\xi, \eta) + t(\xi, \eta) \otimes t(\xi, \eta) + r(\xi, \eta) \otimes t(\xi, \eta) * \delta(\xi + 2a) + t(\xi, \eta) \otimes r(\xi, \eta) * \delta(\xi - 2a), \quad (6)$$

式(6)中“ \otimes ”表示相关,“ $*$ ”表示卷积,第一项与第二项重叠在输出平面中心附近,称之为零级衍射项,不是须要探测的信号。两个互相关项第三项和第四项分别为正负一级衍射,它们在输出平面上沿轴分别平移 $-2a$ 和 $2a$,与零级项分离,正是须要寻求的相关信号。在参考图像 r 和目标图像 t 相同的情况下,第三项和第四项的互相关就等于自相关,峰值会达到最大。

C-JTC 存在两个缺点:第一,由于联合变换相关器存在较强的零级衍射,从而使输出面中相关输出的衍射效率较低,影响了相关峰的检测;第二,因为联合变换相关输出面中零级衍射峰的宽度很大,限制了输入面的目标图像和参考图像的大小和相对位置,降低了对输入面空间带宽积的使用。

因此,削弱或去除零衍射级,增强互相关峰的强度,提高相关性能成为设计各种新型 JTC 的重要依据。对输入面图像进行预处理或对功率谱进行优化处理可以改善 JTC 的相关输出性能。

3 输入面形态学预处理及功率谱面 FAF 处理

3.1 形态学联合变换相关器

形态学联合变换相关器(Morph-JTC)是用数学形态学(Mathematical Morphology)方法对 C-JTC 的联合输入图像进行预处理,以期改善 C-JTC 的

图像识别能力。

形态学运算^[7~9]是针对二值图像,并依据数学形态学集合论方法发展起来的图像处理方法。其基本思想是用具有一定形态的结构核去度量和提取图像中的对应形状,以达到对图像分析和识别的目的。

常见的结构核有菱形、方形和圆形3种。

二值形态学边缘检测主要有3种方法,可分别得到图像的外边界、内边界和形态学梯度。

对于对象 f 和结构核 k ,用膨胀图像减去原图像可得到图像的外边界,表达式为:

$$g = f \oplus k - f, \quad (7)$$

原图像减去腐蚀的图像可得到图像内边界,表达式为:

$$g = f - f \odot k, \quad (8)$$

膨胀图像减去腐蚀图像得到形态学梯度,表达式为:

$$g = f \oplus k - f \odot k, \quad (9)$$

其中“ \oplus ”为膨胀,“ \odot ”为腐蚀。

这里可通过控制结构核的大小和形状,选用不同的检测方法,得到不同厚度和形状的边界。

3.2 条纹调制滤波

Alam 等人提出使用 FAF 乘以联合功率谱以后进行逆傅里叶变换产生互相关输出^[10]。FAF 的函数表达式为:

$$H_{\text{FAF}}(u, v) = \frac{B(u, v)}{A(u, v) + |R(u, v)|^2}, \quad (10)$$

式中 $A(u, v)$ 和 $B(u, v)$ 是常数或 (u, v) 函数。 $A(u, v)$ 抑制噪声并且把被滤波的数据限制在一定的取值范围内,防止出现极大的尖峰值。合适的 $B(u, v)$ 可以避免产生大于单位值的光学增益,保证 FAF 增益小于或者等于原频率值。 $R(u, v)$ 是参考图像的频谱。

当 $B(u, v) = 1$, 且 $|R(u, v)|^2 \gg A(u, v)$ 时,式(10)可写为:

$$H_{\text{FAF}}(u, v) = \frac{1}{|R(u, v)|^2}. \quad (11)$$

可以事先对参考图像 $r(x, y)$ 进行傅里叶变换,进而得到 $|R(u, v)|^2$, 计算出 $H_{\text{FAF}}(u, v)$ 并存在计算机中。此方法操作简单,容易实现实时性。

Morph FAF-JTC 是将输入面图像的形态学预处理和功率谱面的条纹调制滤波相结合的改进型

联合变换相关器。它结合了 Morph-JTC 和 FAF-JTC 的优点,既减小了输出面的带宽,又锐化了相关峰。

4 仿真试验结果

图 2(a)为目标图像和参考图像在输入面组成的联合图像。图(b)为形态学边缘提取的结果,所选的结构核为菱形,半径为 1,提取边缘为

式(9)所描述的形态学梯度。由(c)可以看出,在输入图像不经任何预处理,功率谱也没有经过滤波的情况下,C-JTC 的输出带宽较宽,峰值不够尖锐,不利于相关识别。图(d)是作了输入面的形态学处理后联合变换相关器的输出相关结果,也就是(b)的相关结果。(e)图为对联合功率谱做 FAF 滤波处理后的输出图像。由表 1 可以看出,图 2(d),(e)虽然使相关峰得到了锐化,但降低了峰值,效果并不十分理想。

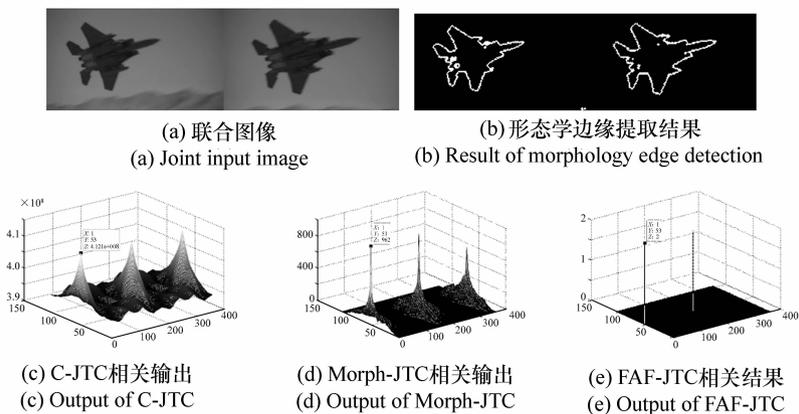


图 2 当 $B(u,v) = 1, |R(u,v)|^2 \gg A(u,v)$ 时

Fig. 2 When $B(u,v) = 1, |R(u,v)|^2 \gg A(u,v)$

表 1 图 2(c),(d),(e) 互相关峰值

Tab. 1 Cross-correlation values of Fig. 2(c),(d),(e)

	C-JTC	Morph-JTC	FAF-JTC
互相关峰值	4.121×10^8	962	2

当式(10)中 $B(u,v) = 1$ 时,调整参数 $A(u,v)$ 的值,FAF-JTC 的相关输出如图 3 所示,由表 2 可见,不同的 $A(u,v)$ 取值,对于 FAF-JTC 互相关峰值的大小没有太大变化,当 $A(u,v) \leq 10^{-5}$ 时,互相关峰开始变得尖锐。Morph FAF-JTC 的相关输

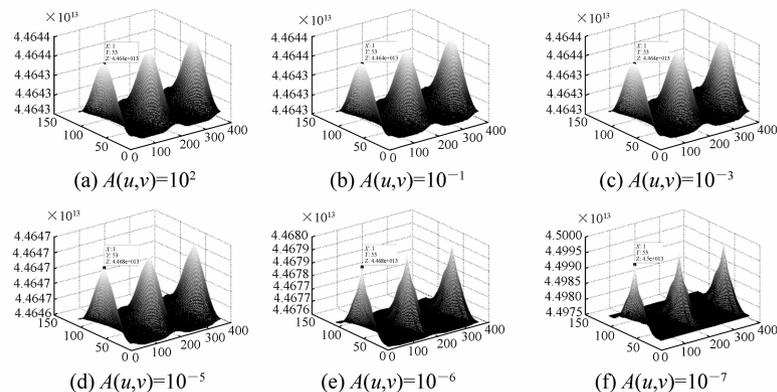


图 3 当 $B(u,v) = 1, A(u,v)$ 取不同值时,FAF-JTC 的相关输出图

Fig. 3 Outputs of FAF-JTC when $B(u,v)$ is 1 and $A(u,v)$ is set to different values

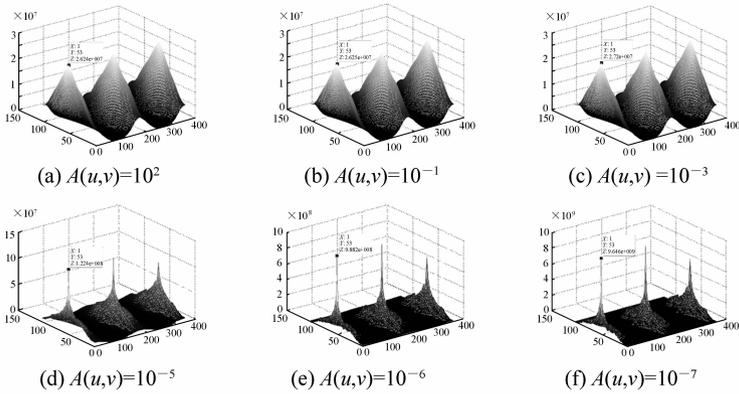


图4 当 $B(u,v) = 1$ 时, $A(u,v)$ 取不同的值,Morph FAF-JTC的相关输出图

Fig.4 Outputs of Morph FAF-JTC when $B(u,v)$ is 1 and $A(u,v)$ is set to different values

出如图4所示,当 $A(u,v) > 10^{-5}$ 时,互相关峰值大小没有明显变化,波形也基本相同;当 $A(u,v) = 10^{-5}$ 时,互相关峰值显著增大,峰值开始比较尖锐;当 $A(u,v) < 10^{-5}$ 时, $A(u,v)$ 每减小一个数量级,互相关峰值就增大一个数量级,并且峰形非常尖锐。为了防止出现极大的尖峰值,取 $A(u,v) = 10^{-6}$ 比较合适。

表2 $B(u,v) = 1, A(u,v)$ 取不同值时,FAF-JTC和Morph FAF-JTC的互相关峰值

Tab.2 Cross-correlation values of FAF-JTC and Morph FAF-JTC when $B(u,v)$ is 1 and $A(u,v)$ has different values

$A(u,v)$ 值	FAF-JTC	Morph FAF-JTC
$A(u,v) = 10^2$	4.464×10^{13}	2.264×10^7
$A(u,v) = 10^{-1}$	4.464×10^{13}	2.625×10^7
$A(u,v) = 10^{-3}$	4.464×10^{13}	2.72×10^7
$A(u,v) = 10^{-5}$	4.465×10^{13}	1.224×10^8
$A(u,v) = 10^{-6}$	4.468×10^{13}	9.882×10^8
$A(u,v) = 10^{-7}$	4.5×10^{13}	9.646×10^9

器相关识别性能。实验结果表明,单独使用形态学方法可以使相关峰变得尖锐,但相关峰值却大幅下降;而单独使用条纹调制滤波时,如果选择参数为 $B(u,v) = 1$ 时, $|R(u,c)|^2 \gg A(u,v)$,则相关峰得到了锐化,但峰值很小,仅为2;保持 $B(u,v) = 1$,调整 $A(u,v)$ 的值,相关输出结果没有太大变化,峰值不尖锐,不利于相关识别。换言之,单独使用上述两种方法中的任何一种,虽然在一定程度上改进了C-JTC的性能,但还具有局限性。将形态学预处理和条纹调制滤波结合起来,选择适当的参数,不仅减小了相关峰的宽度,而且增大了互相关峰值,锐化了相关峰,极大地改善了传统联合变换相关器的性能。为了防止出现极大的尖峰值,选择 $B(u,v) = 1, A(u,v) = 10^{-6}$,此时,相关峰很尖锐,峰值为 9.882×10^8 ,比传统的联合变换相关器互相关峰值高了 5.761×10^8 。

综上所述,组合方法的使用效果优于单一方法的使用效果,表明输入面形态学预处理的FAF联合变换相关器很有应用前景。

5 结 论

本文将输入图像的形态学预处理和功率谱条纹调制滤波相结合,改进了传统的联合变换相关

参考文献:

- [1] WEAVER C S, GOODMAN J W. A technique for optically convolving two functions[J]. *Appl. Opt.*, 1966, 5(7): 1248-1249.
- [2] 刘广利, 李彪. 提高光电联合变换相关器识别能力的输入面预处理实验研究[J]. *长春理工大学学报*, 2005, 28(2):

17-22.

LIU G L, LI B. Experimental research about pretreatment on input plane in order to improve the photoelectric joint transform correlator's ability of recognition[J]. *J. Changchun University Sci. Technol.*, 2005, 28(2):17-22. (in Chinese)

- [3] 陈宇, 王文生, 苗华, 等. 灰度变换在光学相关探测与识别中的应用[J]. *仪器仪表学报*, 2005, 26(8):676-683.
CHEN Y, WANG W SH, MIAO H, *et al.*. Application of gray-scale transformation in optical correlation detection and recognition[J]. *Chinese J. Sci. Instrument*, 2005, 26(8):676-683. (in Chinese)
- [4] ZHANG S, KAEIM M A. Morphologically preprocessed joint transform correlation[J]. *Appl. Opt.*, 1999, 38(11):2182-2188.
- [5] 余杨, 张旭革. 联合变换相关器形态学处理可调节性研究[J]. *光子学报*, 2005, 34(3):460-463.
YU Y, ZHANG X P. Research on adjustability of morphological processing of joint transform correlator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(3):460-463. (in Chinese).
- [6] ALAM M S, KARIM M A. Fringe-adjusted joint transform correlation[J]. *Appl. Opt.*, 1993, 32(23):4344-4350.
- [7] 张旭光, 孙巍, 韩广良, 等. 一种弹孔自动识别算法的研究[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(6):747-753.
ZHANG X G, SUN W, HAN G L, *et al.*. An automatic recognition algorithm for bullet holes[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(6):747-753. (in Chinese)
- [8] 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.
LIN Y CH, CUI Y P, HUANG Y G. Study on edge detection and target recognition in complex background[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3):509-514. (in Chinese)
- [9] 刘松涛, 王学伟, 周晓东, 等. 基于传感器参数和目标轮廓中心的自动配准算法研究[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(3):354-363.
LIU S T, WANG X W, ZHOU X D, *et al.*. Automatic registration algorithm based on sensor parameters and target's contour centroid[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(3):354-363. (in Chinese)
- [10] ALAM M S, KARIM M A. Multiple target detection using a modified fringe-adjusted joint transform correlator[J]. *Opt.*, 1994, 33(5):1610-1617.

作者简介:王 勇(1982—),女,山西太原人,博士研究生,主要从事数字图像处理、模式识别等方面的研究。

E-mail:wang_yong8205@163.com

朱 明(1964—),男,江西南昌人,研究员,博士生导师,主要从事从事视频图像处理、自动目标识别技术研究及成像目标跟踪。E-mail:zhu_mingca@163.com