

# 基于微分滤波的联合变换相关\*

冯继宏 金国藩 邬敏贤 颜树华 严瑛白  
(清华大学精仪系, 北京 100084)

**摘 要** 分析了微分滤波对联合变换功率谱的影响, 得到了一种称之为功率谱形式的微分滤波器。该滤波器的滤波函数为一实数并且有一定的特点, 因此很容易制得。计算机模拟表明, 功率谱微分滤波联合变换相关器在相关峰值、旁瓣比、半宽度等方面比一般联合变换相关器有显著的改善, 可以大大提高相关图像识别的可靠性。文中给出了实验结果, 与模拟计算结果吻合, 引入一个新参数可以更好地描述相关图像识别中的相关性。

**关键词** 联合变换相关, 功率谱微分滤波。

## 1 引 言

范德拉格特空间匹配滤波器<sup>[1]</sup>和联合变换相关器(JTC)<sup>[2]</sup>是用于图像识别的两类主要的相关器, 其中联合变换相关器具有原理简单、容易配置以及无需制作和精确复位复空间匹配滤波器的优点, 更容易在实时方式下工作<sup>[3~5]</sup>。一般来讲, 联合变换相关沿着两个方向发展, 一是, 实时联合变换相关, 二是, 对联合变换的频谱进行二值化等非线性处理<sup>[6~8]</sup>, 改善相关峰值、旁瓣比、半宽度等性能参数, 提高相关图像的识别能力。尽管, 对联合变换频谱进行二值化等非线性处理有以上优点, 但它所需要的计算量很大, 因而不易实时进行, 并且最严重的是二值化处理会引入伪相关峰进而造成误判<sup>[9]</sup>。当前, Javidi 等人又引入啁啾编码的联合变换相关器将其产生的不同相关项输出到不同平面上, 来提高联合变换的相关识别能力<sup>[10]</sup>。本文研究了功率谱形式的微分滤波对实时联合变换相关结果的影响, 该方法的主要优点是该滤波器具有通用性, 适用于各种图像也很容易制得, 并且该联合变换相关器在相关峰值、旁瓣比、半宽度方面比一般联合变换相关器有显著的改善, 中央零级的半宽度也大大减小, 具有很好的图像识别能力。

## 2 分 析

在如图 1 所示的联合变换相关系统中, 设输入面中放置的参考图像和输入的目标图像分别为  $r(x - x_0, y)$  和  $t(x + x_0, y)$ , 它们中心分别位于  $(x_0, 0)$  和  $(-x_0, 0)$  处, 其傅里叶变换后

\* 国家自然科学基金资助课题和国家科委 863 高科技项目。

收稿日期: 1993 年 12 月 7 日; 收到修改稿日期: 1994 年 4 月 8 日

再通过微分滤波得到的频谱为

$$E(u, v) = 2\pi(u + iv) [R(u, v) \exp(-i2\pi ux_0) + T(u, v) \exp(i2\pi ux_0)] \quad (1)$$

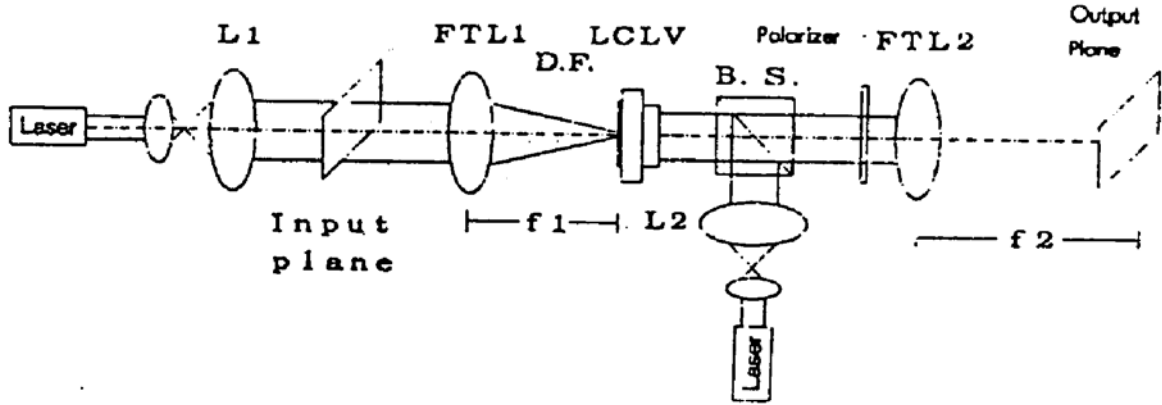


Fig. 1 Classical joint transform correlator (JTC) using D. F.

其中  $2\pi(u + iv)$  为二维微分滤波函数,  $u = x/\lambda_f$ ,  $v = y/\lambda_f$  为空间频率,  $R(u, v)$  和  $T(u, v)$  为输入图像和参考图像的傅里叶变换函数, 经液晶光阀(LCLV)读出功率谱为

$$I(u, v) = |E(u, v)|^2 = 4\pi^2(u^2 + v^2)[R^2(u, v) + T^2(u, v) + R(u, v)T^*(u, v) \exp(-i4\pi ux_0) + R^*(u, v)T(u, v) \exp(i4\pi ux_0)] \quad (2)$$

$4\pi^2(u^2 + v^2)$  为上述二维微分滤波函数的模方 [ $-4\pi^2(u^2 + v^2)$  也可表示二次微分滤波函数]。

$$(-id/dx + d/dy)r(x, y) = \iint 2\pi(u + iv)R(u, v) \exp[i2\pi(ux + vy)] dudv \quad (3a)$$

$$(-id/dx - d/dy)r(x, y) = \iint 2\pi(u - iv)R(u, v) \exp[i2\pi(ux + vy)] dudv \quad (3b)$$

这里, 求导是求偏导数。对该功率谱进行反傅里叶变换得到的相关输出为

$$\begin{aligned} I(x_3, y_3) = & \left(\frac{d}{dx} + \frac{d}{dy}\right) r(x_3, y_3) \otimes \left(\frac{d}{dx} + \frac{d}{dy}\right) r(x_3, y_3) \\ & + \left(\frac{d}{dx} + \frac{d}{dy}\right) t(x_3, y_3) \otimes \left(\frac{d}{dx} + \frac{d}{dy}\right) t(x_3, y_3) \\ & + \left(\frac{d}{dx} + \frac{d}{dy}\right) r(x_3 - 2x_0, y_3) \otimes \left(\frac{d}{dx} + \frac{d}{dy}\right) t(x_3, y_3) \\ & + \left(\frac{d}{dx} + \frac{d}{dy}\right) r(x_3 + 2x_0, y_3) \otimes \left(\frac{d}{dx} + \frac{d}{dy}\right) t(x_3, y_3) \end{aligned} \quad (4)$$

该式未考虑微分滤波表达式中引入的位相因子, 其中  $\otimes$  代表卷积,  $(x_3, y_3)$  为相关平面的坐标。根据(1)式, 很容易想到如同图 1 所示的光学系统那样利用二维微分滤波器改善联合变换相关器的相关输出, 但是二维微分滤波器用光学方法制作比较困难, 故现在一般采用计算全息的方法制作, 由于采用计算全息的方法制作的二维微分滤波器对图像微分进行边缘增强时会产生各级次的图像, 而各级次(主要是正负一级)图像之间的互相关会引入伪相关峰进而造成误判。在实验中, 作者已经观察到了这种现象。另一方面, 根据(2)式, 在联合变换相关器的读出光路中加入透过率为  $4\pi^2(u^2 + v^2)$  的滤波器就相当于其写入光路中的普通的二维微分滤波器, 这就是功率谱微分滤波器的来由, 并且由此可以非常清楚地看出, 微分滤波起到增强高频成分而相应地压抑低频成分的作用, 实际上, 功率谱微分滤波联合变换相关器更多地比较图像的细节变化, 增加了相关图像的信息量。根据(4)式, 最后输出的相关是经过微分

滤波得到的边缘增强图像的相关, 根据相关的物理意义这一般将会使相关峰变窄, 能量集中, 提高相关识别的可靠性。该滤波器的滤波函数为具有一定的特性的实数, 在光学上很容易制得, 并且还可以避免伪相关峰的出现, 不会产生误判。

### 3 计算机模拟

在计算机模拟运算中, 进行了一般联合变换相关和功率谱微分滤波联合变换相关的对比实验。计算所用的二维快速傅里叶变换子程序, 其大小为  $128 \times 128$ , 作为参考图像和目标图像的字母其大小为  $16 \times 16$  像素点阵, 参考图像和目标图像放置在  $128 \times 128$  像素点阵中央, 相距为 48 个像素点, 模拟计算所得的相关输出用三维作图子程序绘制得到。分别计算相关峰强度(相关场中直流项归一化时的相对值), 旁瓣比(定义为相关峰强度与相关峰的旁瓣中光强度最大值之比), 半宽度(定义为相关值降至其峰值一半时的宽度)<sup>[6~8]</sup>。引入峰值宽度比(定义为相关峰强度与其半宽度之比)来描述功率谱微分滤波联合变换的相关场。通常, 相关峰值的大小决定了探测的难易, 而相关峰的半宽度的大小是限制参考图像和输入的目标图像大小以及相对位置的一个决定因素, 这在大的参考图像和目标图像以及多目标识别中有着重要的意义, 同时该参数又能描述相关图像识别中能量有效利用情况, 即集中到半宽内的能量。

首先进行了自相关的数值计算, 其中参考图像和目标图像分别为字母 O 和 O, 将其联合变换, 图 2(a) 为一般联合变换的相关结果, 图 2(b) 为功率谱微分滤波联合变换的相关结果。接着进行了互相关的数值计算, 其中参考图像和目标图像分别为字母 O 和 C, 图 3(a) 为一般联合变换的相关结果, 图 3(b) 为功率谱微分滤波联合变换的相关结果。这里所说的功率谱微分滤波是指根据 (2) 式, 将联合变换功率谱乘以  $4\pi^2(u^2 + v^2)$ , 再进行反傅里叶变换得到相关输出, 数值计算过程中没有直接进行微分计算, 而联合变换功率谱一般是连续的, 再乘以  $4\pi^2(u^2 + v^2)$ , 也不会产生奇点, 计算过程中对联合变换功率谱分析证明了这点; 一般联合变换数值计算过程类似于功率谱微分滤波联合变换的, 只不过对直接联合变换功率谱进行反傅里叶变换得到相关输出。这里,  $4\pi^2(u^2 + v^2)$  项根据其物理意义, 是无量纲量代表透过率函数, 因此相关输出具有光强纲量。

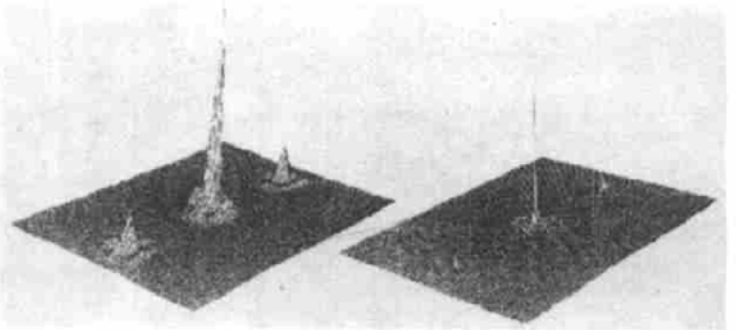
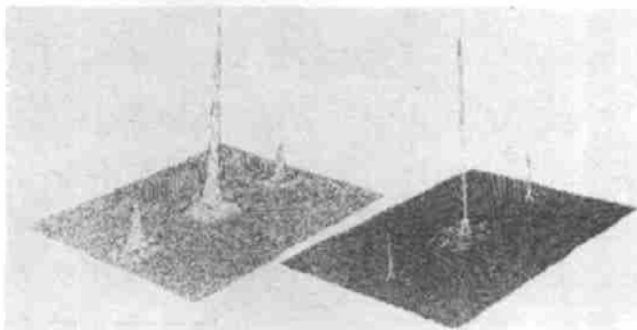


Fig. 2 Computer simulation auto-correlation results

(a) Classical JTC's auto-correlation of characters of O and O, (b) PSDF JTC's auto-correlation of characters of O and O

Fig. 3 Computer simulation cross-correlation results

(a) Classical JTC's cross-correlation of characters of O and C, (b) PSDF JTC's cross-correlation of characters of O and C

表 1 是图 2 和图 3 的数值计算结果, 从该表可以看到字母 O 和 O 的一般联合变换相关

和功率谱微分滤波联合变换相关的自相关峰值为 0.249, 相对于直流分量是不变的。而字母 O 和 C 的功率谱微分滤波联合变换相关的互相关峰值为 0.102, 而一般联合变换相关的互相关峰值为 0.176, 功率谱微分滤波联合变换相关的互相关比一般联合变换相关的互相关下降了 58.0%。字母 O 和 O 的功率谱微分滤波联合变换相关得到的旁瓣比为 37.7, 而一般联合变换相关得到的旁瓣比为 13.2, 前者为后者的 2.86 倍。字母 O 和 O 的功率谱微分滤波联合变换相关得到的相关峰和直流项为脉冲形状, 而一般联合变换相关得到的相关峰和直流项沿  $x$ - $y$  方向的半宽度分别为 (4, 4) 和 (5, 5)。字母 O 和 O 的功率谱微分滤波联合变换相关得到的峰值宽度比远大于 0.249, 而一般联合变换相关得到的峰值宽度比为 0.623, 前者比后者远远大于 4.00 倍。

Table 1. Comparison of correlation results

input scene	correlation peak intensity	peak-to-sidelobe ratio	half-width		peak-to-width ratio
			peak intensity	DC. term	
O O classical JTC	0.249	13.2	(4,4)	(5,5)	0.0623
O O differential JTC	0.249	37.7	(1,1)	(1,1)	0.249
O C classical JTC	0.176	7.03	(6,4)	(4,2)	0.0352
O C differential JTC	0.102	8.71	(1,1)	(1,1)	0.102

Here, differential JTC means power spectrum differential filtering joint transform correlator (PSDF JTC); half-width (1,1) of correlation and D. C term of PSDF JTC, is smaller than 1, because the intensity which position is moving 1 unit along  $x$  or  $y$  axis from the position of the correlation peak drops below 1/10 of the peak intensity.

## 4 实验结果

在如图 4 所示的联合变换相关实验系统中, 为了简单, 用一束氦氖激光照射带有参考图像和目标图像的黑白底片代替可实时刷新的空间光调制器, 参考图像目标图像如图 5 所示。光束经过傅里叶变换透镜形成联合变换频谱, 通过实时光强探测器件液晶光阀 (LCLV) 将联合变换频谱转变成功率谱。用另一束氦-氖激光去读该功率谱, 经过另一个傅里叶变换透镜进行反变换, 得到相关输出, 用 CCD 来进行接收, 通过图像板采集到计算机中, 进行取阈值操作, 再送到监视器上。

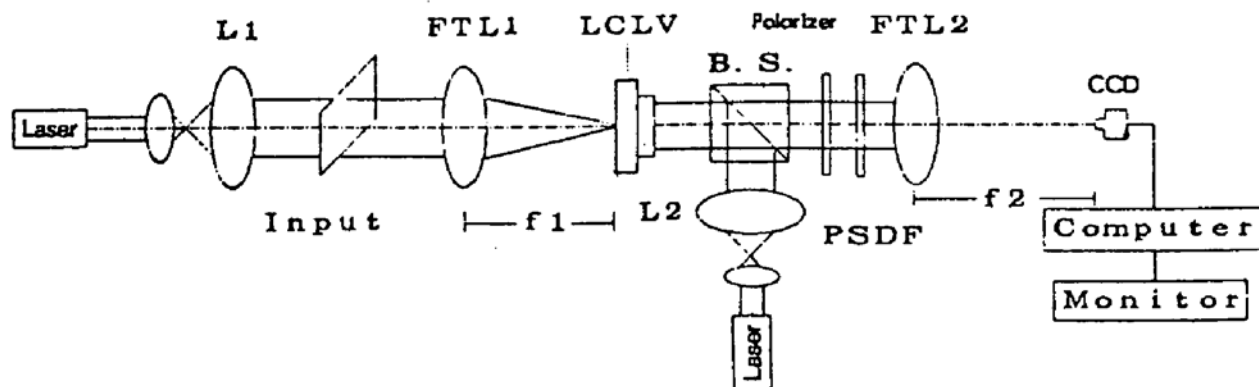


Fig. 4 Power spectrum differential filtering (PSDF) JTC

进行了两组对比实验, 一组是一般联合变换相关, 另一组功率谱微分滤波联合变换相关, 实验结果如图 5 所示。图 5(a) 为输入场景, 其中参考图像和目标图像都是字母 O, 图 5



Fig. 5 Experimental results (a) Input scene, (b) Classical JTC' result (low threshold), (c) PSDF real time JTC' result (low threshold), (d) Classical JTC' result (high threshold), (e) PSDF real time JTC' result (high threshold)

(b) 和 5(c) 分别为计算机取低阈值时, 一般联合变换和功率谱微分滤波联合变换的相关结果; 对应地, 图 5(d) 和 5(e) 分别为计算机取高阈值时, 一般联合变换和功率谱微分滤波联合变换的相关输出。由该图可以看出, 功率谱微分滤波联合变换相关器的相关点和零级直流项光点的亮度增强面积变小, 与数值计算结果吻合。

功率谱微分滤波器是按下述方式制得的: 根据(2)式, 分析功率谱微分滤波器的滤波函数的特性, 可以看出, 它在形式上非常近似于高斯分布函数台劳级数展开式中的第二项, 根据这一特点利用高斯光束对全息干板直接曝光, 在近轴近似的情况下, 略去高次项得到透过率为  $-1 + (u^2 + v^2)/2$  (式中的  $-1$  实际上是光强透过该滤波器时的衰减因子) 近似  $4\pi(u^2 + v^2)$ , 以实现准功率谱微分滤波。图 6 是实验测得的利用该方法制得的功率谱微分滤波器的透过率分布, 由该图可以看出: 由该方法制得的功率谱微分滤波器的透过率函数, 虽然有一些不规则的起伏, 但总体上很接近  $(u^2 + v^2)$ 。

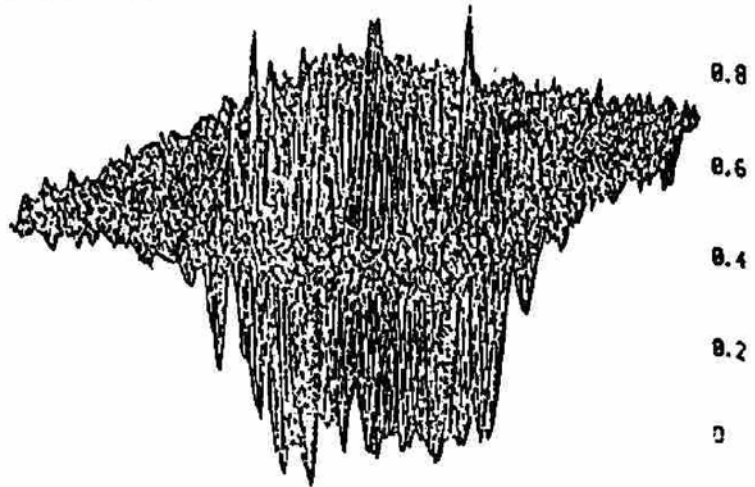


Fig. 6 Transparency distribution function for PSDF in experiments

## 5 结 论

本文分别计算了功率谱微分滤波联合变换相关和一般联合变换相关的相关场, 发现功率谱微分滤波联合变换相关的自相关峰值同其互相关之比为一般联合变换相关的 1.73 倍。自相关计算时, 功率谱微分滤波联合变换相关的旁瓣比为一般联合变换相关的 2.86 倍, 功率谱微分滤波联合变换相关相关峰和直流项的半宽度为脉冲形状, 而一般联合变换相关的半宽度分别为 (4, 4) 和 (5, 5), 功率谱微分滤波联合变换相关的峰值宽度比一般联合变换相关的远远大于 4.00 倍, 这样就大大提高了联合变换相关器对图像的识别能力。

从实验结果来看, 功率谱微分滤波联合变换相关器的自相关同一般联合变换相关的相比, 相关峰强度和零级直流项明显变锐, 可以避免大的参考图象和目标图象以及多目标识别过程中因为相关峰混叠而产生的伪相关峰, 从而大大降低了对参考图象和输入的目标图象大小和距离的限制(取决液晶光阀的分辨率), 这对于大的参考图象和目标图象以及多目标识别非常有意义, 另一方面, 功率谱微分滤波联合变换相关器的自相关同一般联合变换相关的相

比, 其旁瓣光强变小, 相关场的能量相对地集中到相关峰上, 提高了光电探测的信噪比, 也与数值计算结果吻合。实验结果与数值计算还表明, 文中给出了一个新参数可以更好地描述相关识别中图像的相似性。

本文提出的功率谱微分滤波联合变换相关器同一般的联合变换相关器相比, 大大地提高了图像识别的可靠性, 也很容易在实时条件下工作, 因而在一些实时图像识别的领域中具有广阔的应用前景。

### 参 考 文 献

- [1] A. Vander Lugt, Signal detection by complex spatial filtering. *IEEE Trans. Inf. Theory*, 1964, IT-10(2): 139
- [2] C. S. Weaver, J. W. Goodman, A technique for optically convolving two functions. *Appl. Opt.*, 1966, 5( ): 1248
- [3] F. T. S. Yu, X. J. Lu, A real-time programmable joint transform correlator. *Opt. Commun.*, 1984, 52(1): 10
- [4] E. C. Tam, F. T. S. Yu, D. A. Gregory *et al.*, Data association multiple target tracking using a phase-mostly liquid crystal television. *Opt. Engng.*, 1990, 29( ): 1114
- [5] X. J. Lu, A. Kalt, E. G. Kanterakis *et al.*, Joint transform correlator that uses wavelet transforms. *Opt. Lett.*, 1992, 17( ): 1700
- [6] B. Javidi, C. J. Kou, Joint transform image correlator using a binary spatial light modulator at the Fourier plane. *Appl. Opt.*, 1988, 27( ): 663
- [7] B. Javidi, Nonlinear joint power spectrum based optical correlation. *Appl. Opt.*, 1989, 28( ): 2358
- [8] B. Javidi, J. L. Horner, Multifunction nonlinear signal processor; deconvolution and correlation. *Opt. Engng.*, 1989, 28( ): 837
- [9] F. T. S. Yu, Feng Chang, T. Nagata *et al.*, Effects of fringe binarization of multiobject joint transform correlation. *Appl. Opt.*, 1989, 28( ): 2988
- [10] Qing Tang, B. Javidi, Technique for reducing the redundant and self-correlation terms in joint transform correlators. *Appl. Opt.*, 1993, 32( ): 1911

## Joint Transform Correlator Based on Differential Filtering

Feng Jihong      Jin Guofan      Wu Mingxian      Yan Shuhua      Yan Yingbai

(Dept. of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084)

(Received 7 December 1993; revised 8 April 1993)

**Abstract** In this paper, the effect of differential filter on joint power spectrum has been analyzed and so-called power spectrum differential filter is introduced. The function of this filter is real with some peculiarity, so it is easy to make. Computer simulations indicate that the performance of power spectrum differential filter joint transform correlator (JTC) is improved obviously than that of a classical JTC in the areas of peak intensity, peak-to-sidelobe, half correlation width and so on. It will greatly enhance the reliability of pattern recognition. The experimental result is agreement with that of computer simulation. A new parameter is introduced in this paper that can describe correlation better.

**Key words** joint transform correlator, power spectrum differential filtering.