

使用功率谱相减的实时联合变换 相关器作多目标检测*

黄献烈 赖虹凯

(厦门大学物理系 厦门 361005)

提要 提出一种使用功率谱相减的实时联合变换相关器作多目标检测。使用这种方法,输入面有两套联合图像。在第二套联合图像中,参考图像是对比度反转的。使用衍射光栅对这两套联合功率谱作相减处理,这种方法可大大抑制输出面的直流项及不想要的伪相关峰,增强相关峰的强度、锐度和峰噪比,提高抗噪声干扰的能力,从而提高对多目标检测的准确度。给出对具有灰度级的多目标输入景物的计算机模拟结果和光学实验结果。实验结果证实了该系统设计及性能分析的正确性。

关键词 光学图像识别,联合变换相关器,多目标检测,功率谱相减

1 引 言

在实时目标识别和跟踪方面,联合变换相关器(JTC)最近几年发展迅速,与传统的匹配滤波相关器不同,在 JTC 中参考图像和目标图像同时从输入面输入,不需要预先制作复空间匹配滤波器,同时可以采用液晶显示屏等空间光调制器作为输入器件,用液晶光阀记录和显示联合功率谱,满足实时处理的要求^[1-3]。但当 JTC 用于多目标检测时,在相关输出平面上,除了存在所想要的参考图像与目标图像之间的互相关峰项之外,还同时存在很强的直流项和不想要的各目标图像之间的互相关峰项等,降低了多目标检测的准确性。为了使输出中所想要的互相关峰项与直流项、不想要的互相关峰项和谐波峰项分开,提出了啁啾编码的 JTC^[4,5]。

我们在研究实时 JTC 中^[6],发现读出光能和液晶光阀的有效使用面积未得到充分利用。为了提高光能的利用率,改善相关输出性能,本文提出一种使用功率谱相减的实时 JTC 作多目标检测。使用这种方法,输入面有两套联合图像。第一套为参考图像和多目标图像;第二套为对比度反转的参考图像和多目标图像,它们各自形成一套联合功率谱并写入液晶光阀。然后使用衍射光栅对这两套联合功率谱作相减处理。这种方法可大大抑制输出面的直流项及不想要的伪相关峰,增强相关峰的强度、锐度和峰噪比,提高抗噪声干扰的能力,使相关输出性能有了明显的提高,这种系统设计实用可行。

2 多目标检测原理

使用功率谱相减的实时联合变换相关器作多目标检测的实验系统如图 1 所示。一束 He-

* 福建省自然科学基金资助项目。

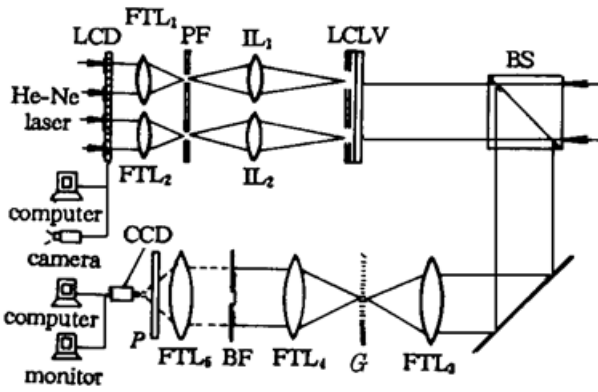


图1 功率谱相减的实时联合变换相关器的实验系统概图

Fig. 1 Experimental diagram of the power spectrum subtracted real-time joint transform correlator

后,在各自的后焦平面上呈现出联合图像的频谱和光栅状结构的衍射级。用预滤波器 PF 滤波,使联合图像 $r - \sum_i t_i$ 和 $\bar{r} - \sum_i t_i$ 的频谱从光栅状结构的 0 级(或 0 级和 ± 1 级)通过。由于液晶光阀的分辨率偏低,分别采用成像透镜 IL₁ 和 IL₂ 放大这两套联合图像的频谱,并使联合功率谱写入液晶光阀 LCLV 的左、右两半部分。

用另一束平行的 He-Ne 激光通过分束器 BS 去读出这两套联合功率谱,应用相干光 $4f$ 系统,用衍射光栅 G 对这两套联合功率谱作图像相减处理。在输出面的光轴附近得到相减的联合功率谱。并用后滤波器 BF 使相减的联合功率谱通过。最后用另一傅里叶变换透镜 FTL₅ 和偏振器 P 得到相关输出,用面阵 CCD 进行接收,通过图像卡采集到计算机中,进行归一化和取阈值处理,再送到监视器上。

设液晶显示屏 LCD 上显示的参考图像、对比度反转的参考图像和输入的多目标图像分别为 $r(x - x_0, y - y_0)$, $\bar{r}(x - x_0, y - y_0)$ 和 $\sum_i t_i(x - x_i, y - y_i)$, 输入图像的背景为 $b(x, y)$, 则写入液晶光阀 LCLV 上的联合图像 $r - \sum_i t_i$ 的联合功率谱为

$$\begin{aligned} |F_1(f_x, f_y)|^2 = & |R(f_x, f_y)|^2 + |B(f_x, f_y)|^2 + R(f_x, f_y)B^*(f_x, f_y) + \text{C. C.} + \\ & \sum_i \sum_j T_i(f_x, f_y)T_j^*(f_x, f_y) \exp\{-i2\pi[f_x(x_i - x_j) + f_y(y_i - y_j)]\} + \\ & \sum_i R(f_x, f_y)T_i^*(f_x, f_y) \exp\{-i2\pi[f_x(x_r - x_i) + f_y(y_r - y_i)]\} + \text{C. C.} + \\ & \sum_i B(f_x, f_y)T_i^*(f_x, f_y) \exp\{-i2\pi[f_x(-x_i) + f_y(-y_i)]\} + \text{C. C.} \quad (1) \end{aligned}$$

其中 $R(f_x, f_y)$, $T_i(f_x, f_y)$ 和 $B(f_x, f_y)$ 分别为 $r(x, y)$, $t_i(x, y)$ 和 $b(x, y)$ 的傅里叶变换。上标星号表示复数共轭, C. C. 表示前一项的复数共轭。

写入液晶光阀 LCLV 上的联合图像 $\bar{r} - \sum_i t_i$ 的联合功率谱为

$$\begin{aligned} |F_2(f_x, f_y)|^2 = & |\bar{R}(f_x, f_y)|^2 + |B(f_x, f_y)|^2 + \bar{R}(f_x, f_y)B^*(f_x, f_y) + \text{C. C.} + \\ & \sum_i \sum_j T_i(f_x, f_y)T_j^*(f_x, f_y) \exp\{-i2\pi[f_x(x_i - x_j) + f_y(y_i - y_j)]\} + \\ & \sum_i \bar{R}(f_x, f_y)T_i^*(f_x, f_y) \exp\{-i2\pi[f_x(x_r - x_i) + f_y(y_r - y_i)]\} + \text{C. C.} + \\ & \sum_i B(f_x, f_y)T_i^*(f_x, f_y) \exp\{-i2\pi[f_x(-x_i) + f_y(-y_i)]\} + \text{C. C.} \quad (2) \end{aligned}$$

其中 $\bar{R}(f_x, f_y)$ 为对比度反转的参考图像 $\bar{r}(x, y)$ 的傅里叶变换。这两套联合功率谱在相干光

Ne 激光经针孔滤波器后扩束为一束平行光照射液晶显示屏 LCD 上(也可以采用两个小液晶显示屏)。参考图像 r 及对比度反转的参考图像 \bar{r} 预先存入计算机内存,多目标图像 $\sum_i t_i$ (其中 i 取目标的个数)经由计算机控制从摄像机实时采样获得,并利用计算机进行控制,使联合图像 $r - \sum_i t_i$ 显示于显示屏的左半部,联合图像 $\bar{r} - \sum_i t_i$ 显示于显示屏的右半部。在两组联合图像中,参考图像和多目标图像的大小、取向和间距应保持相同。

由于显示屏的分辨率远低于胶片,所以图像分别经傅里叶变换透镜 FTL₁ 和 FTL₂ 变换

4f 系统中用衍射光栅 G 作功率谱相减^[7] 得

$$G(f_x, f_y) = |R(f_x, f_y)|^2 - |R(f_x, f_y)|^2 + [R(f_x, f_y) - R(f_x, f_y)]B^*(f_x, f_y) + \text{C.C.} + \sum_i [R(f_x, f_y) - R(f_x, f_y)]T_i^*(f_x, f_y) \exp\{-i2\pi[f_x(x_r - x_i) + f_y(y_r - y_i)]\} + \text{C.C.} \quad (3)$$

通过后滤波器 BF 的功率谱 $G(f_x, f_y)$ 经逆傅里叶变换得输出为

$$g(x', y') = \text{D.C.} + \sum_i [r(x', y') - \bar{r}(x', y')] \otimes t_i(x', y') * \delta[x' - (x_r - x_i), y' - (y_r - y_i)] + \text{C.C.} \quad (4)$$

其中算符 \otimes 表示相关运算, 算符 $*$ 表示卷积运算。

由式(4)可见, 输出含有三个部分, 第一项是直流项, 重迭地位于输出平面的中心。由于采用了联合功率谱相减, 直流项大为减弱, 输入图像背景噪声的影响得到抑制。第二、三项分别是 $r(x, y)$ 和 $t_i(x, y)$ 的互相关, 位于 $(x' = x'_r - x'_i, y' = y'_r - y'_i)$ 和 $[x' = -(x'_r - x'_i), y' = -(y'_r - y'_i)]$ 。这是一对共轭的互相关, 光学图像识别只需探测其中一项即可。由于采用了联合功率谱相减, 当目标图像与参考图像相同时, 相关峰变得很尖锐。以上这些特性有利于多目标的检测。

3 计算机模拟结果

为了研究使用功率谱相减的实时联合变换相关器作多目标检测的相关输出性能, 我们采用具有灰度级的物体作为输入景物。采用目标背景强度的平均值为背景噪声。输入景物的背景噪声取 25% 至 55%。模拟试验采用二维快速傅里叶变换子程序, 大小为 128×128 , 结果用三维绘图子程序绘制相关输出三维图。输入景物为汽车模型及背景, 如图 2 所示。图中上半部的 0 号汽车为参考图像, 大小为 31×15 像素点阵, 图中下半部为有背景噪声情况下的多目标图像, 大小取 128×80 像素点阵, 其中 1, 2 号汽车与参考汽车相同, 3 号汽车与参考汽车不同但相似。

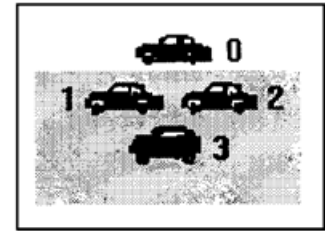


图 2 计算机模拟试验用的物体
Fig. 2 Objects for the computer simulation tests

进行了两组对比试验, 一组是一般的联合变换相关, 另一组是功率谱相减的联合变换相关。在计算机模拟运算中, 输入图像的背景噪声取 25%。对比度反转的参考图像的范围取 (33×17) 像素点阵。运算中分别计算相关峰强度、半宽度、峰噪比、识别力和直流项强度等。试验结果列于表 1。表中总的输出能量归一化为 100, 相关峰的强度用输出面总的输出能量归一化。表中 I_{AC} 为自相关峰强度, I_{CC} 为互相关峰强度, I_{DC} 为直流项强度, FWHM 为自相关峰由最大强度降至半强度的宽度。峰噪比 PNR 定义为相关峰强度与其周围(输入图像的大小)的噪声强度平均值之比。识别力 ACR 定义为自相关(0 号与 1, 2 号汽车)峰强度与互相关(0 号与 3 号汽车)峰强度之比。

由表 1 可见, 对一般的 JTC, 自相关峰相当宽, 以致邻近目标图像的相关峰互相影响, 峰噪比很低, 中央直流项相当强, 比自相关峰强 3 倍。对功率谱相减的 JTC, 自相关峰很强, 半宽度相当窄, 峰噪比很高, 中央直流项相当弱, 比自相关峰弱 4 倍。可见, 功率谱相减的 JTC 的相关输出性能明显优于一般的 JTC。图 3 给出一般的 JTC 和功率谱相减的 JTC 对相似汽车识别的

输出三维图。由图 3 可见,一般的 JTC 还会在输出面上产生伪相关峰,如图中在(25, 64)和(103, 64)像素点处出现强度比相关峰大的伪相关峰 4 和 5,整个输出面的噪声很大。因此,功率谱相减的 JTC 特别适用于信噪比不高的多目标检测。

表 1 两种联合变换相关的计算机模拟结果

Table 1 Computer simulation results for two joint transform correlation

JTC	I_{AC}	FWHM	I_{CC}	ACR	PNR	I_{DC}
classical	0.013	(54×15)	0.007	1.86	1.5	0.033
PSS	0.249	(3×3)	0.126	1.98	14.1	0.060

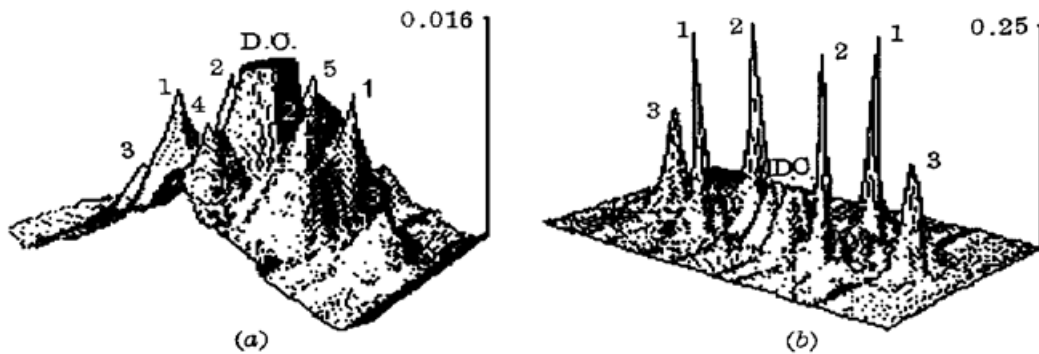


图 3 计算机模拟结果。(a) 一般 JTC; (b) 功率谱相减 JTC

Fig. 3 Computer simulation results. (a) classical JTC; (b) power spectrum subtracted JTC

计算机模拟试验研究了对比度反转的参考图像的选取范围。输入图像的背景噪声同样取 25%, 对比度反转的参考图像的范围分别取(31×15), (33×17)和(35×19)像素点阵。试验结果列于表 2。由表 2 可见,当选取的范围扩大时,(1) 自相关峰值强度由小到大,再变小,峰值半宽度的 x 方向由大变小;(2) 中央零级直流项的双峰逐渐远离输出面的中心,靠近相关区;(3) 相关区的图像识别力 ACR 逐渐增大,但峰噪比由小到大,再变小。因此应从综合观点考虑选取适当的范围,如本试验中取(33×17)像素点阵为宜。若选取的范围过大,致使各目标图像的相关区互相重叠,输出将严重失真。可见参考图像的范围取得比欲探测的目标图像稍大一点为好。这样,参考图像 r 和反转的参考图像 \bar{r} 的强度分布比较相近。若参考图像 r 的范围取得太大,反转的参考图像 \bar{r} 中,高强度值的像素点过多,引起相关输出性能变坏。

表 2 对比度反转的参考图像的计算机模拟结果

Table 2 Computer simulation results for the contrast reversed reference image

range	I_{AC}	FWHM	I_{CC}	ACR	PNR	I_{DC}
(31×15)	0.117	(5×3)	0.080	1.46	8.6	0.048
(33×17)	0.249	(3×3)	0.126	1.98	14.1	0.060
(35×19)	0.109	(3×3)	0.037	2.94	9.4	0.064

计算机模拟试验还研究了输入图像背景噪声的影响。对比度反转的参考图像的范围取(33×17)像素点阵。输入图像的背景噪声分别取 25%, 35%, 45% 和 55% 四种情况。试验结果列

于表 3。由表 3 可见, 当目标图像的噪声级增加时, 峰值强度和识别力均有所下降。但当噪声在 45% 以下, 背景噪声对相关输出性能的影响不大, 说明功率谱相减的 JTC 的抗噪声能力较强。从表 3 还可以看出, 中央直流项的强度变化不大, 均比相关峰小得多。

表 3 有噪声的目标图像的计算机模拟结果

Table 3 Computer simulation results for the noisy target image

noise level	I_{AC}	FWHM	I_{CC}	ACR	PNR	I_{DC}
25%	0.249	(3×3)	0.126	1.98	14.1	0.060
35%	0.249	(3×3)	0.138	1.80	15.1	0.071
45%	0.204	(3×3)	0.132	1.55	14.4	0.070
55%	0.156	(3×3)	0.115	1.36	13.3	0.067

4 光学实验结果

使用功率谱相减的实时联合变换相关器作多目标检测的实验系统见图 1。液晶显示屏上的像素分辨率为 640×480 。输入景物见图 2, 但整个图像转过 90° 。液晶显示屏上的目标大小约为 4.0×5.3 (mm), 参考图像范围取 6.0×7.4 (mm), 目标与参考图像的最近距离为 14 mm。液晶光阀为上海光学仪器研究所生产的硒化镉交流液晶光阀, 光阀的通光孔径为 45 mm, 分辨率为 40 线对/mm, 工作状态为 200 Hz, 2.3 V, 液晶光阀上左、右两部分频谱的距离为 21 mm。衍射光栅的空间频率为 30 线对/mm。频谱放大系统的放大率为 8 倍, 傅里叶变换透镜的焦距均为 550 mm。

我们进行了一般的 JTC 和功率谱相减的 JTC 的对比实验, 由面阵 CCD 接收并显示在监视器屏幕上的多目标检测结果如图 4 所示。由图 4 可见, 功率谱相减的 JTC 的自相关峰强且窄, 中央直流项较弱。光学实验结果与计算机模拟结果基本吻合, 但由于液晶显示屏的散射较严重, 衍射光栅的衍射效率较低, 系统光学元件的性能限制(如傅里叶变换透镜用平行光管代), 以及光学系统调节的不完善, 致使光学实验结果与计算机模拟结果仍有一定的差距。虽然我们的实验是初步的, 但实验结果证实了这一实验系统的设计和性能分析的正确性。这一实验系统在图像识别、目标跟踪和机器人视觉等领域中将有广阔的应用前景。

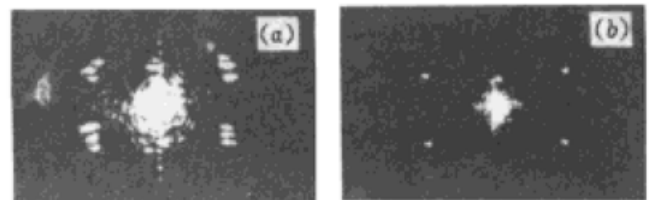


图 4 光学实验结果

(a) 一般 JTC; (b) 功率谱相减 JTC

Fig. 4 Optical experimental results

(a) classical JTC; (b) power spectrum subtracted JTC

参 考 文 献

- 1 Yu F. T. S., Lu S. J.. A real-time programmable joint transform correlator. *Opt. Commun.*, 1984, **52** (1): 10~ 16
- 2 Tan E. C., Yu F. T. S., Gregory D. A. *et al.*. Data association multiple target tracking using a phase-locked liquid crystal television. *Opt. Eng.*, 1990, **29**(9): 1114~ 1121
- 3 秦玉文, 黄战华, 张以谟. 实时光电混合联合变换相关器单元的实验研究. *光学学报*, 1994, **14**(8): 829~ 833

- 4 Tang Q., Javidi B.. Multiple-object detection with a chirp-encoded joint transform correlator. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(26) : 5079~ 5088
- 5 黄献烈, 曹国强. 使用啁啾编码的高通联合变换相关器作多目标检测. 中国激光, 1996, **A23**(6) : 569~ 573
- 6 黄献烈, 赖虹凯, 曹国强. 实时高通滤波的联合变换相关器. 厦门大学学报(自然科学版), 1996, **35**(3) : 348~ 353
- 7 Lee S. H., Yao S. K., Milnes A. G.. Optical image synthesis (complex amplitude addition and subtraction) in real time by a diffraction-grating interferometric method. *J. Opt. Soc. Am.*, 1970, **60**(8) : 1037 ~ 1041

Multitarget Detection Using a Real-time Joint Transform Correlator with Power Spectrum Subtraction

Huang Xianlie Lai Hongkai

(*Department of Physics, Xiamen University, Xiamen 361005*)

Abstract Multitarget detection using a real-time joint transform correlator with power spectrum subtraction is proposed. It has two joint images in the input plane. In the second joint image, the reference image is contrast-reversal. The two joint power spectra are subtracted using a diffraction grating. The D. C. term and undesired terms are substantially suppressed by this technique. It can yield strong auto-correlation peak intensity, sharp auto-correlation peak width, big peak-to-noise ratio, and the high capability of anti-background noise. Thus it produces higher accuracy of detection. Computer simulation results and optical implementation for input scenes of the gray-scale multitarget are given. The experimental results have verified the correctness of the system design and performance analysis.

Key words optical pattern recognition, joint transform correlator, multitarget detection, power spectrum subtraction