

基于相移功率谱相减的二元联合 变换相关识别

陈怀新 陈祯培 陈晓伟

(四川大学光电科学技术系 成都 610064)

提要 提出基于相移联合功率谱相减的二元联合变换相关识别的新方法:制作特殊的半波片,采用 π 相移技术,将零级功率谱从联合功率谱中去掉,并进行二值化。与经典联合相关变换和二元联合相关变换相比,基于相移功率谱相减的二元联合相关变换,使输入面的空间带宽得到更充分的利用,还得到了更高、更尖锐的相关峰,更大的相关信噪比,提高了相关识别能力。给出了相应的计算机模拟和光学实验结果。

关键词 联合变换相关,相移技术,半波片

1 引 言

在光学模式识别中,与匹配相关器相比,联合变换相关器(Joint Transform Correlator, JTC)不存在制作复滤波器及其严格的复位问题,易于实现光学相关识别的实时处理。但由于联合变换的目标图像和参考图像是同时输入于联合变换的输入面,根据联合变换相关原理^[1],经典联合变换相关器(CJTC)存在两个方面的弱点:一方面,由于联合变换相关存在较强的零衍射级,从而使输出面中相关输出的衍射效率较低,它影响相关峰的探测;另一方面,联合变换相关输出面中零级衍射峰的宽度较大,限制了其输入面的目标图像和参考图像的大小和相对位置。因此,除去或削弱零衍射级,能有效地提高联合变换相关的图像识别能力,充分利用输入面的空间带宽。

为了减小或消除经典联合变换相关器输出面零衍射级的影响,许多学者进行了进一步的研究,提出了相应的算法和构造,来提高联合变换输出面的相关性能。A. Tanone 等人采用对联合功率谱硬截止和直流阻挡(Hard Clipping and dc Blocking)方法^[2],来降低零衍射级对输出的相关信号的影响。C. J. Kuo 提出三通道的联合相关变换的方法^[3],并采用位相型 SLM 来消除联合变换相关的零衍射级。M. Schönleber 提出基于输入的参考物对比度反转的相移技术^[4],来消除联合变换相关的零衍射级。后两种方法,需要采用位相型 SLM。目前振幅型的 SLM 使用较广泛,我们制作了特殊的半波片,采用相移技术和零阈值二值功率谱的方法,提出了基于相移功率谱相减的 $1-f$ 型二元联合变换相关器(DBJTC),来减小联合变换相关的输出面的零衍射级,增强相关峰,以提高其相关识别能力。

2 系统结构与基本原理

基于相移功率谱相减的 $1-f$ 型联合变换相关器的原理概图如图 1 所示。

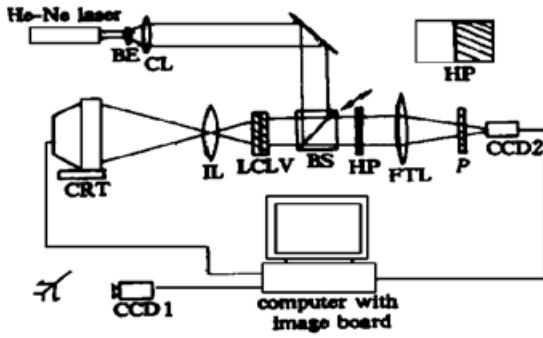


图 1 基于相移功率谱相减的联合变换相关器的系统概图

Fig. 1 Schematic diagram for the JTC

BE: beam expander; BS: beam splitter; HP: half-wave plate; IL: image lens; LCLV: liquid crystal light valve; FTL: Fourier transform lens; P: polarizing plate; CRT: cathode-ray tube

联合变换相关分两步。第一,联合功率谱平方律转换阶段,由 CCD1 实时摄入待识别的图像或字符,由计算机控制,将相距 $2b$ 的目标图像和参考图像构成的联合输入图像同时显示于监视器 CRT,再由成像透镜 IL 投射到液晶光阀 LCLV 上。He-Ne 激光经扩束器 BE 和准直透镜 CL 得到准直相干光,并由反射镜和分束器 BS 作为 LCLV 的读出光。读出的联合图像经傅里叶变换透镜 FTL 得到联合功率谱 (JPS),用面阵 CCD2 接收,通过图像板采集到计算机中,进行取阈值或相减、取阈值等处理,再送到监视器 CRT 上。

为了减小或消除联合功率谱的直流项,我们在通常的联合相关器中设置了一特殊的半波板 HP(如图 1 所示),该半波板一半相对另一半的位相相差 π 。记录两套功率谱:在记录第一次功率谱时,设置 HP,

使读出的目标图像和参考图像通过半波板 HP 的同一位相部分,在记录第二次功率谱时,使读出的目标图像和参考图像分别通过半波板 HP 的不同位相部分;从而使第二次的功率谱相对第一次的功率谱,输入的参考物加 π 位相,将两次记录的功率谱相减来去掉功率谱的零级谱。

假设联合输入图像 $f(x, y)$ 和 $r(x, y)$ 的灰度级在 $(0, G/2)$ 范围, G 为振幅型 SLM 的动态范围。

第一次输入的联合函数为

$$t_0(x, y) = f(x + b, y) + r(x - b, y) + G/2 \quad (1)$$

第二次输入的联合函数为

$$t_\pi(x, y) = f(x + b, y) - r(x - b, y) + G/2 \quad (2)$$

(1) 式相对于(2)式来说,参考函数加 π 位相。加偏值量 $G/2$, 保证联合输入函数为非负实值函数。

(1) 和(2)式的傅里叶变换分别得到对应的联合功率谱

$$J_0(u, v) = |F(u, v)|^2 + |R(u, v)|^2 + G^2/4\delta(u, v) + F(u, v)R^*(u, v)\exp(j4\pi bu) + F^*(u, v)R(u, v)\exp(j4\pi bu) + G/2\delta(u, v)\{[F(u, v) + R^*(u, v)]\exp(j2\pi bu) + [F^*(u, v) + R(u, v)]\exp(-j2\pi bu)\} \quad (3)$$

$$J_\pi(u, v) = |F(u, v)|^2 + |R(u, v)|^2 + G^2/4\delta(u, v) - F(u, v)R^*(u, v)\exp(j4\pi bu) - F^*(u, v)R(u, v)\exp(j4\pi bu) + G/2\delta(u, v)\{[F(u, v) - R^*(u, v)]\exp(j2\pi bu) + [F^*(u, v) - R(u, v)]\exp(-j2\pi bu)\} \quad (4)$$

因此,对联合输入图像的参考函数不加相移和加 π 相移的联合功率谱的差值功率谱为

$$DJ(u, v) = J_0(u, v) - J_\pi(u, v) = 2F(u, v)R^*(u, v)\exp(j4\pi bu) + 2F^*(u, v)R(u, v)\exp(j4\pi bu) +$$

$$G\delta(u, v) [R(u, v) \exp(-j2\pi bu) + R^*(u, v) \exp(j2\pi bu)] \quad (5)$$

其中

$$\delta(u, v) = \begin{cases} 1 & \text{当 } u = 0, v = 0 \text{ 时} \\ 0 & \text{其它情况} \end{cases} \quad (6)$$

从(5)式可以看出, 差值功率谱不存在零级谱项($|F(u, v)|^2$ 和 $|R(u, v)|^2$), 而位于坐标中心的直流偏值项仅在输出面中心处产生一脉冲峰; (5)式与(3)式相比, 前者的载频调制项是后者的两倍。因此, 相移功率谱相减的联合相关变换与经典联合相关变换相比, 减小了输入联合图像的目标物 $f(x, y)$ 和参考物 $r(x, y)$ 大小和相对位置的限制, 并提高了其相关输出的衍射效率。

对联合功率谱(3)式进行非线性的变换而构造的非线性联合变换相关器(NJTC), 可提高输出面的相关性能。非线性联合变换相关器中典型的有二元联合相关器(BJTC), 它是采取阈值方法将功率谱二值化为(0, 1)或(-1, 1), 二值化的作用是将振幅调制的功率谱转化为脉冲调制的功率谱, 以增强联合功率谱的调制条纹结构, 从而获得输出面更尖锐的相关峰, 尖锐的相关峰有利于相关信号位置的探测。由于相移所得到的差值功率谱 $DJ(u, v)$ 为某一正、负取值范围内的振幅型调制的谱, 为了使所得的差值功率谱能直接显示于 CRT, 投射写入 LCLV, 并在输出面上获得尖锐的相关峰, 对此, 将(5)式取零阈值进行二值化

$$DJ(u, v) = \begin{cases} 1 & \text{当 } DJ(u, v) > 0 \\ 0 & \text{当 } DJ(u, v) \leq 0 \end{cases} \quad (7)$$

便可使差值功率谱 $DJ(u, v)$ 转换为非负的二值功率谱。由此构成相移功率谱相减的二元联合变换相关器(DBJTC)。

第二, 相关变换阶段。移去系统的半波片 HP, 将计算机处理并写入 LCLV 的 JPS, 由相干光读出, 再经 FTL, 在相关输出面得到相关峰。为了检验本文方法的有效性, 我们就经典联合相关器(CJTC)、二元联合相关器和相移功率谱相减的二元联合变换相关器(DBJTC), 进行了计算机模拟及光学对比实验。

3 计算机模拟结果

计算机模拟运算采用二维快速傅里叶变换子程序, 其大小为 128×128 。输入的目标图像和参考图像对称地嵌于 128×128 的像素点阵中央, 大小为 27×27 像素点阵。模拟实验中, 进行自相关的数字计算时, 目标物和参考物分别取二值汉字“光”和“光”; 进行互相关的数字计算时, 目标物和参考物分别取二值汉字“光”和“学”; 计算机模拟所得的相关输出结果采用三维作图程序绘制。采用计算机模拟实验, 比较了经典联合相关器(CJTC)、二元联合变换相关(BJTC)和基于相移功率谱相减的二元联合变换相关器(DBJTC)的相关输出性能。图 2(a) 为 CJTC 的输出结果, 图 2(b) 为 BJTC 的输出结果, 图 2(c) 为 DBJTC 的结果。从图 2 可看出, 相移功率谱相减的二元联合变换相关器较前两者输出面的自相关峰更强、更尖锐, 由此说明相移功率谱相减的二元联合变换相关器(DBJTC)比经典联合相关器(CJTC)和二元联合变换相关器(BJTC)有更好的自相关识别性能; 从图 2 还可看出, 与经典的和二元的联合变换相关器相比, 相移功率谱相减的二元联合变换相关器输出面的零级峰峰宽更窄, 这可避免大的目标图像和参考图像以及多目标识别过程中因相关峰混叠而出现伪相关峰, 也降低了对联合输入的

目标物和参考物的大小和相对位置的限制。

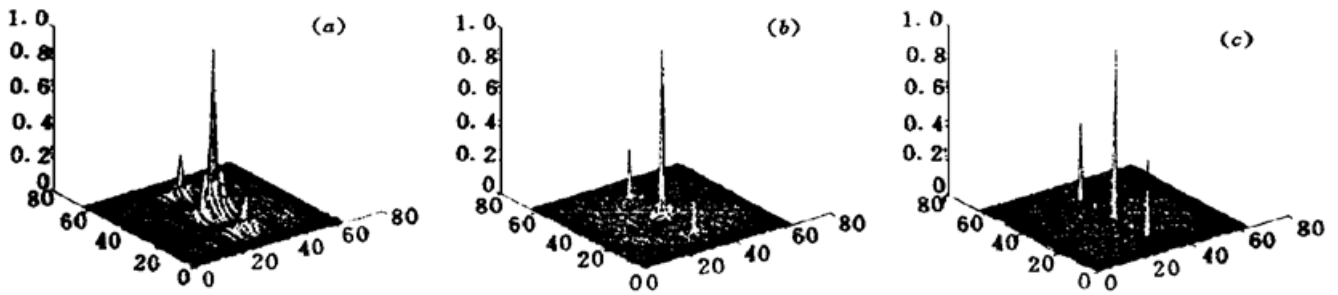


图 2 计算机模拟的自相关输出结果。(a) 经典 JTC; (b) 二元 JTC; (c) 相移功率谱相减的二元 JTC

Fig. 2 Computer simulation the output for auto-correlation. (a) CJTC; (b) BJTC; (c) DBJTC

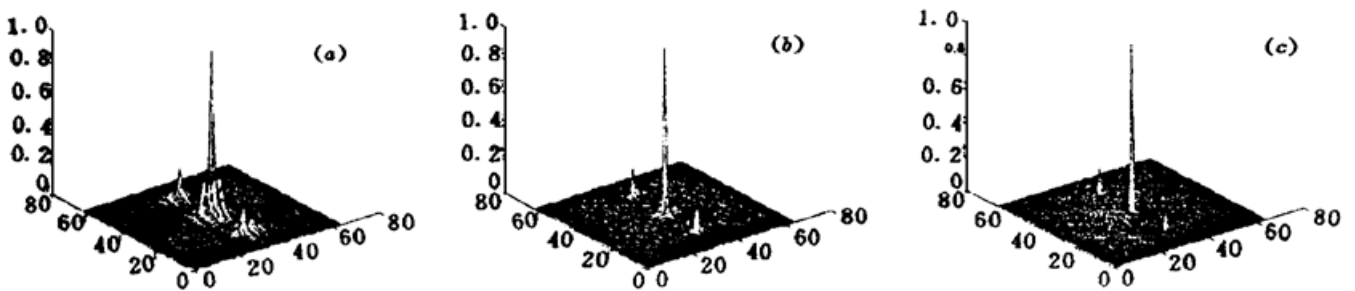


图 3 计算机模拟的互相关输出结果。(a) 经典 JTC; (b) 二元 JTC; (c) 相移功率谱相减的二元 JTC

Fig. 3 Computer simulated output for inter-correlation. (a) CJTC; (b) BJTC; (c) DBJTC

图 3 (a) ~ (c) 分别为进行互相关的数字模拟时, CJTC, BJTC 以及 DBJTC 输出的互相关峰。比较图 2 与图 3 对应的自相关峰值与互相关峰值大小, 可得出基于相移功率谱相减的联合变换相关器, 较前两种相关器, 大大提高了图像识别能力。

为了定量比较三种联合变换相关器的相关输出性能, 分别计算了相关峰 API (相关输出中直流项归一化的相对值)、峰值旁瓣比 PSR (相关峰强度与相关峰旁瓣中的最大值之比)、信噪比 SNR (相关峰强度与相关峰旁瓣外的噪声均方差之比)、半宽度 FWHM (相关峰值降至其峰值的一半时的宽度)、相关鉴别率 ACR (自相关峰与互相关峰的比值), 三种联合变换相关器的相关输出的定量结果列于表 1。

表 1 三种相关器相关输出的计算机模拟结果

Table 1 Simulation correlation result of the three types of JTC

Type	API	PSR	SNR	FWHM	ACR
CJTC	0.2427	10.78	10.53	(7, 7)	1.32
BJTC	0.2816	73.01	32.61	(2, 2)	1.68
DBJTC	0.4475	941.3	149.9	(1, 1)	2.93

从表 1 看出, 相移功率谱相减的二元联合变换相关器(DBJTC)与经典联合变换相关器(CJTC)和二元联合变换相关器(BJTC)相比, 对归一化自相关峰值 API, 前者分别比后两者高 1.84 倍和 1.59 倍, 说明 DBJTC 的自相关峰强度高; 就峰值旁瓣比 PSR, 前者分别比后两者大 87.3 倍和 12.9 倍, 而相应的 FWHM, 前者分别比后两者小 7 倍和 2 倍, 这两项指标说明 DBJTC 的自相关峰更尖锐; 对信噪比 SNR, 前者分别比后两者大 14.2 倍和 4.6 倍; 相应的识别

力 ACR,前者分别比后两者提高 2.2 倍和 1.7 倍,由此得到 DBJTC 有更好的相关识别力。

4 光学实验

制作半波片 HP: 采用甩胶机,在玻片上的部分甩明胶,使未甩胶的部分与甩胶的部分存在一定的光程差,用 Alpha-step 500 型台阶仪测定胶层的厚度 $h = 543 \text{ nm}$,如图 4 所示;明胶的折射率 $n_1 = 1.55$,相应两部分的位相差为 $(n_1 - n_0)h * 2\pi/\lambda = 0.94\pi(\lambda = 632.8 \text{ nm})$,接近于 π 相差。平方律记录 and 转换的空间光调制器 SLM,采用光寻址液晶光阀 LCLV(中国科学院西安光机所研制),其有效工作面积为 $3.5 \times 3.5 \text{ mm}^2$,分辨率为 30 lp/mm ;工作频率为 600 Hz ,电压为 2.1 V ;傅里叶变换透镜的焦距为 1000 mm 。

采用图 1 所示的 $1-f$ 型实时联合相关系统,就经典 JTC,二元 JTC 和基于相移功率谱相减的 JTC,对输入的二值字符(“光”-“光”,“光”-“学”)进行了相关的对比实验研究。基于相移功率谱相减的 JTC,系统中设置半波片 HP,CCD2 摄入两套 JPS,经计算机进行相减、取零阈值处理,得到其差值的 JPS,再显示于 CRT。图 5 为自相关实验的 JPS,其中 (a) 为 CJTC 的 JPS, (b) 为参考图像加 π 位相的 JPS; (c), (d) 分别为 (a), (b) 的二值化 JPS; (e) 为 (a) 与 (b) 的差值、二值化的 JPS; (f) 为 (e) 的反转图。对比三种相关器所得到的 JPS,可以看出,基于相移功率谱相减的二元 JTC 的功率谱,不仅低频成分大大削弱,而且功率谱的调制条纹对比度和高频成分都明显增强。

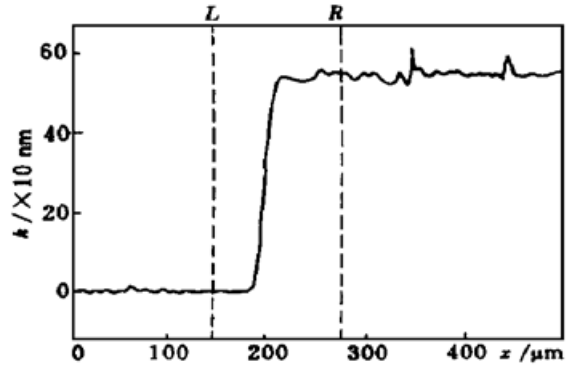


图 4 Alpha-step 500 型台阶仪测定半波片的明胶层厚度

Fig. 4 Measurement of gelation depth of the half-wave plate using an Alpha-step 500

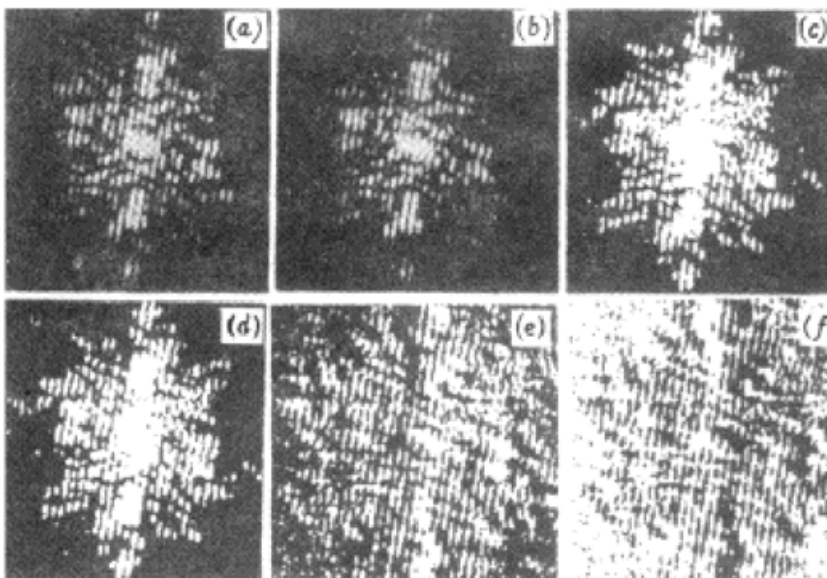


图 5 功率谱 JPS 的光学实验结果

(a) 经典 JTC; (b) 相移的 JTC; (c) (d) 对应 (a) 和 (b) 的二值化形式; (e) 相移功率谱相减的二元 JTC; (f) 为 (e) 的对比度反转图

Fig. 5 Optical experimental results of power spectrum JPS

(a) CJTC, (b) CJTC imposed pi phases into reference image; (c) and (d) is binarized version of (a) and (b) respectively; (e) DBJTC; (f) inverse version of (e)

将图 5 (a), (c), (e) 分别显示于 CRT, 移去 HP, 则相应的相关峰由 CCD2 接收; 图 6 (a), (b), (c) 分别为 CJTC, BJTC, DBJTC 的相关输出; 相关输出的实验对比结果可看出, DBJTC 的自相关峰强、尖锐, 且中心的直流零级峰相对减弱, 因此 DBJTC 不仅具有好的相关识别性能, 而且放宽了对输入物间的相对位置的限制。所得的光学实验结果与计算机模拟结果基本一致, 但

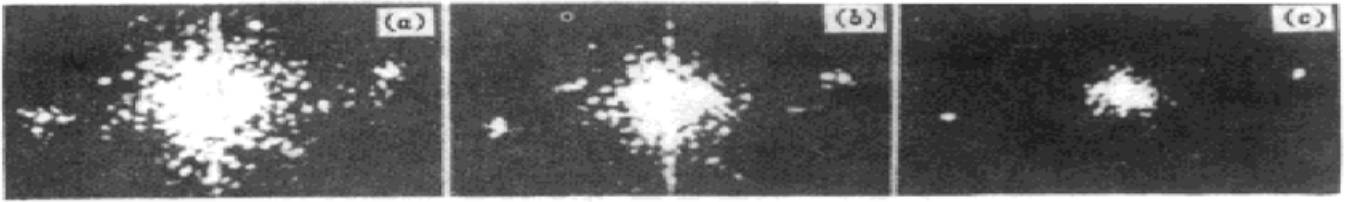


图 6 相关输出的光学实验结果
(a) 经典 JTC; (b) 二元 JTC; (c) 相移功率谱相减的二元 JTC

Fig. 6 Optical auto-correlation results of
(a) CJTC; (b) BJTC; (c) DBJTC

其效果比模拟差一些,这主要是因为制作的半波片 HP 的两部分并非严格地相差 π , LCLV 的分辨率不够高,其表面的光散射,以及读出激光的相干噪声影响等。然而初步的光学实验结果仍证实了本文设计的实验系统的相关识别性能较经典和通常的二元相关器有所改善。

致谢 作者感谢四川大学光信息研究所庞霖博士为本研究测定半波片厚度。

参 考 文 献

- 1 F. T. J. Johnson, T. H. Barnes, T. Eiju *et al.*. Analysis of a joint transform correlator using a phase-only spatial light modulator. *Opt. Eng.*, 1991, **30**(12) : 1947~ 1957
- 2 A. Tanone, C.-M. Uang, F. T. S. Yu *et al.*. Effects of thresholding in joint-transform correlation. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(23) : 4816~ 4822
- 3 C. J. Kuo. Joint-transform correlator improved by means of the frequency-selective technique. *Opt. Eng.*, 1994, **33**(2) : 522~ 527
- 4 M. Schönleber, G. Cedilnik, H. J. Tiziani. Joint transform correlator subtracting a modified Fourier spectrum. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(32) : 7532~ 7537

Binary Joint Transform Correlator Subtracting a Power Spectrum Based on a Phase-Shift Technique

Chen Huaixin Chen Zhenpei Chen Xiaowei

(Department of Optoelectrics, Sichuan Uinon University, Chengdu 610064)

Abstract In this paper, a binary joint transform correlator subtracting a power spectrum baesd on a phase-shift technique (DBJTC) is presented. A special half-wave plate is fabricated. The zero-order spectra (i. e., the autocorrelation power spectra) are removed form the joint-transform power spectrum using the phase-shift technique, so that higher diffraction output and more limited size and relative position of the images in the input plan are obtained. Simulation and optical experimental results show that DBJTC has the advantages of higher efficiency, and better peak-to-sibelabe and signal-to-noise ratios compared with the classical JTC and binarized JTC.

Key words joint-transform correlator, phase-shift technique, half-wave plate