

文章编号 1004-924X(2009)03-0499-07

基于马赫-曾德尔干涉仪的单 相关峰联合变换相关技术

邓晓鹏

(怀化学院 物理与电子科学信息系, 湖南 怀化 418008)

摘要:针对经典联合变换相关器互相关峰能量分散以及输入图像大小和相对位置受到限制的缺陷,提出了基于马赫-曾德尔干涉仪的单相关峰联合变换相关技术。目标图像和参考图像通过马赫-曾德尔干涉仪的两臂无相对位移输入,实现了互相关峰重叠位于探测器中心,缓解了输入图像的大小和相对位置与变换透镜孔径和探测器接收面积之间的矛盾;采用功率谱相减技术,消除了零级自相关峰对互相关峰的影响,增强了衍射效率。理论分析和实验结果表明,该方法不仅能获得高强度的单相关峰,使抗噪声能力是 CJTC 的 6 倍,从而大大增强了识别能力,而且充分利用了输入面空间带宽和探测器的效率,降低了系统成本,特别适合于弱信号噪声环境和大尺寸图像的识别。

关键词:联合变换相关;马赫-曾德尔干涉仪;单相关峰;相对位移

中图分类号:TH744.3 **文献标识码:**A

Only-one correlation-peak joint transform correlator based on Mach-Zehnder interferometer

DENG Xiao-peng

(Department of Physics and Electronic Information, University of Huaihua, Huaihua 418008, China)

Abstract: An only-one correlation-peak joint transform correlator based on Mach-Zehnder interferometer is presented aiming at the shortcomings in the energy dispersion of correlation peak and of Classic Joint Transform Correlator(CJTC) the input image size and relative position to be restricted. The image input of proposed method has no relative displacement between input images by Mach-Zehnder interferometer, and realizes a high intensity overlap correlation-peak in the center of detector, so that the contradiction between the input image size and relative position with the transform lens aperture and detector reception area is relaxed. Moreover, zero-order autocorrelation peak is eliminated and diffraction efficiency is enhanced by power spectrum subtraction. The theoretical analysis and experimental results show that proposed method can offer a high intensity correlation-peak and its anti-noise ability is six times that of CJTC, which enhances the recognition ability of the system. Also, this method makes good use of the space bandwidth and reduces the system costs, so that it is suitable for large

收稿日期:2008-03-15;修订日期:2008-06-04.

基金项目:湖南省教育厅资助科研项目(No. 07C506);怀化学院资助科研项目

size image recognition and weak signal detection in noisy environment.

Key words: joint-transform correlation; Mach-Zehnder interferometer; only-one correlation-peak; relative displacement

1 引言

在光学模式识别中,主要有匹配滤波相关器和联合变换相关器两大类^[1-8]。由于联合变换相关器无需制作要求精确复位的复滤波器,因而更适合用于对图像进行实时识别。但是,据联合变换相关原理^[3],经典联合变换相关器(CJTC)存在较强的零级衍射项,从而使输出面中相关输出的衍射效率较低,影响了相关峰探测,限制了输入图像的大小和相对位置。为了克服上述缺点,许多学者进行了进一步的研究,提出了许多改进的算法和系统构造。这些方法主要集中在以下两个方面;一是消除零级衍射项,保留和增强互相关项^[3];二是锐化互相关峰^[5-8]。上述两种改进方法,虽然使相关器的识别能力有所提高,但是由于输入面目标图像和参考图像之间存在一定的位移,在输出面上存在两个分别位于中心两侧的互相关峰,使互相关峰的能量比较分散,在一定程度上影响了相关器的识别能力;同时,对于面积较大的图像,要成功实现识别的话,需要大口径的变换透镜和大面积的探测器,在一定程度上增加了系统的成本,降低了探测器的使用效率;另外,虽然可以通过去除零级衍射项缓解传统联合变换相关器对输入图像大小和相对位置的限制,但是,零级衍射项去除以后,随着互相关项的能量相对增大,必须考虑互相关项的部分重叠,为了避免它们重叠,输入图像大小和相对位置仍然受到一定的限制。针对以上缺点,本文提出一种基于马赫-曾德尔干涉仪的单相关峰联合变换相关器(Only One Correlator Peak Joint Transform Correlator, OCPJTC),该方法改变了传统联合变换相关器的输入方式,通过把目标图像和参考图像分别置于马赫-曾德尔干涉仪的两臂上来进行输入,且输入时目标图像和参考图像的中心与各自的坐标中心重合,从而使两互相关峰重叠位于探测器的中心。为了消除零级自相关峰对互相关峰的影响,采用了功率谱相减技术^[4],这样,最后在输出面上的中心获得一个互相关峰,且其能量为传统相关器上单个相关峰能量的两倍,大大增强了识

别能力,而且不需要大口径的傅里叶变换透镜和大面积高成本的探测器。该方法尤其适合尺寸较大的图像识别。

2 理论分析

在传统联合变换相关器中,令输入面上的目标图像为 $s(x-a, y)$, 参考图像为 $r(x+a, y)$, 则输入函数可表示为:

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

经过透镜的傅里叶变换后为:

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

其中, $F(u, v)$ 、 $R(u, v)$ 和 $S(u, v)$ 分别是输入函数 $f(x, y)$ 、参考图像 $r(x, y)$ 和目标图像 $s(x, y)$ 的傅里叶变换。式(2)的功率谱为:

$$|F(u, v)|^2 = |R(u, v)|^2 + |S(u, v)|^2 + R(u, v)S(u, v)^* \exp(j4\pi au) + R(u, v)^* S(u, v) \exp(-j4\pi au), \quad (3)$$

联合功率谱再经透镜逆傅里叶变换后在输出平面上得到相关输出:

$$c(x, y) = s(x, y) \otimes s(x, y) + r(x, y) \otimes r(x, y) + r(x, y) \otimes s(x, y) * \delta(x+2a, y) + s(x, y) \otimes r(x, y) * \delta(x-2a, y), \quad (4)$$

其中,符号 \otimes 表示相关运算, $*$ 表示卷积运算。式(4)中前两项分别表示目标图像和参考图像的自相关,它们重叠位于输出面中心,构成零级衍射项,第三、四项分别位于 $(-2a, 0)$ 和 $(2a, 0)$ 处,是一对共轭的互相关项。由于输入的目标图像和参考图像之间存在相对位移 $2a$, 这样会产生两个明显的问题:一是输入图像的大小、相对位置与变换透镜的孔径和探测器的接收面积之间存在不可协调的矛盾,要想成功实现识别的话,就需要大口径的透镜和面积较大的探测器,这必然会增加识别成本,而要想降低成本的话,就不能成功识别,这个问题对于面积较大的图像来说尤其突出;二是两互相关峰分离,相关信号能量分散,由于式(4)中的第三、四项代表的均是目标图像和参考图像的相关峰,如果使两者重叠在一起,能量集中在一个相关峰上,将会大大提高相关器的识别能力,特

别是在信号微弱和有噪声的情况下,这种效果将会更加明显。

对于传统联合变换器,造成上述问题的原因是输入的目标图像和参考图像之间存在相对位移,要想解决上述问题,就必须改变输入方式,消除目标图像和参考图像之间的相对位移,但是传统联合变换器,无法做到这一点。为了实现上述目标,本文把目标图像和参考图像分别置于马赫-曾德尔干涉仪的两臂上来进行输入,且输入时目标图像和参考图像的中心与各自的坐标中心重合,具体原理如图1所示。

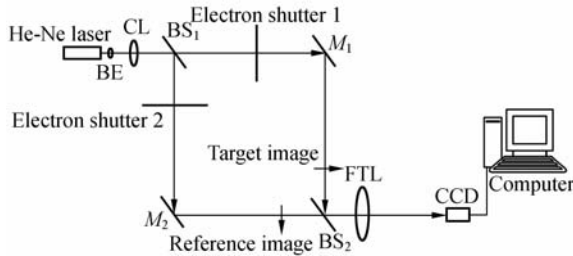


图1 基于马赫-曾德尔干涉仪的联合功率谱记录光路图
Fig. 1 Setup for JTC based on Mach-Zehnder interferometer

He-Ne激光器发出的激光经扩束器BE和准直透镜CL获得准直相干光,由分光镜BS₁分成两路,分别经过平面反射镜M₁和M₂照射到目标图像和参考图像上,再经分光镜BS₂合成一路,最后在傅里叶变换透镜的焦平面上用CCD接收其联合功率谱。此时由于目标图像和参考图像分别位于坐标中心,所以联合变换相关器的输入函数为:

$$f(x, y) = r(x, y) + s(x, y), \quad (5)$$

经过透镜的傅立叶变换后为:

$$F(u, v) = R(u, v) + S(u, v), \quad (6)$$

上式的功率谱为:

$$|F(u, v)|^2 = |R(u, v)|^2 + |S(u, v)|^2 + R(u, v)S(u, v)^* + S(u, v)R(u, v)^*, \quad (7)$$

对上式再作逆傅里叶变换,在输出平面上得到相关输出为:

$$c(x, y) = s(x, y) \otimes s(x, y) + r(x, y) \otimes r(x, y) + r(x, y) \otimes s(x, y) + s(x, y) \otimes r(x, y), \quad (8)$$

从式(9)可以看出,所有的自相关项和互相关项重叠位于探测器的中心,如果目标图像和参考图像相同,则上式合成一项,即探测器上只有一个相关峰,但是在目标图像和参考图像不相同的情

况下,虽然后面表示互相关的两项不会出现峰值,但是由于它们与前面两项自相关重叠位于探测器中心,此时也会出现一个峰值,从而造成误判。为了避免这种现象出现,必须在作相关运算之前,消除自相关项。本文通过如图1所示的光路先分别记录目标图像和参考图像的功率谱,并把它们储存在电脑里面,然后与它们的联合功率谱相减^[4]。具体操作如下:先打开电子快门1(Electron shutter1),关闭电子快门2(Electron shutter2)记录目标图像(Target image)的功率谱;然后打开电子快门2(Electron shutter2),关闭电子快门1(Electron shutter1)记录参考图像(Reference image)的功率谱;最后打开电子快门1和2记录它们的联合功率谱。通过电脑运算获得差值功率谱为:

$$D|F(u, v)|^2 = R(u, v)S(u, v)^* + S(u, v)R(u, v)^*, \quad (9)$$

把差值功率谱显示在监视器上,并通过透镜成像在液晶光阀上,最后通过激光读出作逆傅里叶变换,其相关输出为:

$$Dc(x, y) = r(x, y) \otimes s(x, y) + s(x, y) \otimes r(x, y), \quad (10)$$

从式(10)可以看出,通过功率谱相减去除自相关项以后,当目标图像和参考图像不相同,探测器的中心不会出现相关峰;当目标图像和参考图像相同时,探测器的中心只有一个相关峰,且能量为传统相关器上单个相关峰能量的两倍,大大增强了识别和抗噪声能力。

以上所述情况为理想状态,没有考虑透镜的孔径大小对输出的影响。实际上,透镜是一个低通滤波器,要想成功识别的话,要求透镜的孔径远远大于输入图像的尺寸。在传统联合变换相关器中,如果输入图像的尺寸为 $2b$,它们之间的相对位移为 $2a$,则在透镜孔径不变的情况下,采用新的输入方式,可以使输入图像的尺寸增大到 $2(a+b)$ 。对于这么大尺寸的输入图像,采用传统输入方式,不仅需要增大透镜的孔径,而且探测器的接收尺寸至少要达到 $4(a+b)$,因此采用新的输入方式,不仅能获得高强度的单互相关峰,而且大大缓解了输入图像的大小与变换透镜的孔径和探测器的接收面积之间的矛盾。这一点对于面积较大的图像尤其重要。

3 计算机模拟和分析

为了验证所提出的方案的有效性,本文用 Matlab 进行了计算机模拟。图 2 为二值图像的模拟结果,图 3 为灰度图像的模拟结果。

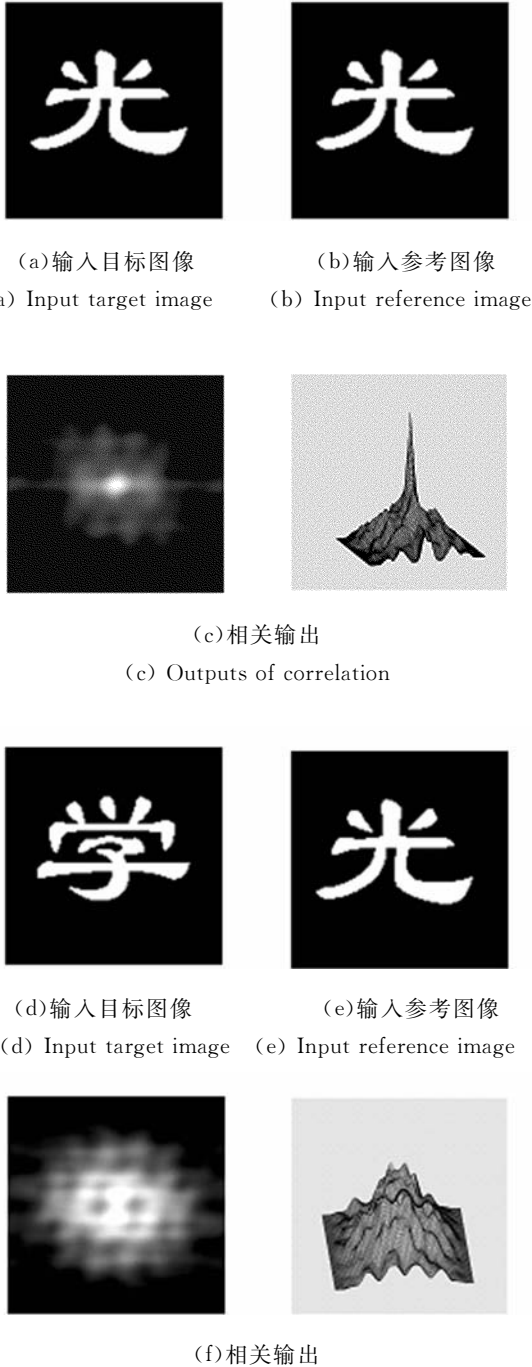


图 2 二值图像的模拟结果

Fig. 2 Simulated results for binary images



图 3 灰度图像的模拟结果

Fig. 3 Simulated results for gray images

从图 3 可以看出,当输入相同时,在输出面上只出现一个相关峰,且位于输出面的中心;当输入不相同,在输出面上不会出现相关峰。如果要得到尖锐的相关峰,还可通过对输入函数进行相位调制来实现^[5]。

为了衡量 OCPJTC 抗噪能力,计算了在不同噪声情况下,OCPJTC 与 CJTC 的相关输出平面上互相关峰强度与输出面信号的平均强度之比,输入噪声在 0~0.2 噪声级(噪声的均方差)的情况下,对于 CJTC 强度之比在 10.928~9.334 之

间;而 OCPJTC 在 65.610 9~58.178 8 之间,相比之下,OCPJTC 的抗噪性能更优越。图 4 为 0.2 噪声级情况下,CJTC 和 OCPJTC 的相关输出。从图(4)可以看出,当噪声水平为 0.2 时,对于 CJTC 几乎看不到互相关峰,而 OCPJTC 仍然能够正确识别。

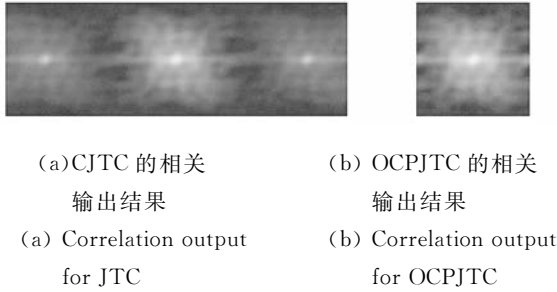


图 4 0.2 个噪声级下两种联合变换相关器的输出结果比较

Fig. 4 Comparison of correlation outputs among two JTCS under 0.2 noise level

在实际应用中,考虑到当目标像和参考图像存在位移及噪声上的差别时,由于互相关运算不满足交换率,这时式(10)中前后两项可能存在相互抵消作用,使得相关峰出现分裂或强度降低,降低识别能力。为了定量地分析这种情况对系统的影响,针对目标图像和参考图像在不同噪声级和不同位移量的情况下,分别计算了峰值旁瓣比(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)。定量结果如表 1 所示。

表 1 OCPJTC 的计算机模拟结果

Tab. 1 Simulation results of the OCPJTC

输入情况	SNR	FWHM	PSR
噪声级别为 0 和 0.05	56.95	(5 5)	4.16
噪声级别为 0 和 0.1	54.71	(5 5)	3.84
噪声级别为 0.05 和 0.1	52.59	(5 5)	3.70
噪声级别为 0.05 和 0.15	51.38	(5 5)	3.44
噪声级别为 0.1 和 0.2	50.43	(5 5)	3.12
相对位移为一个像素(0.031 5 cm)	76.2	(5 5)	4.76
相对位移为三个像素(0.094 5 cm)	54.77	(7 5)	3.84
相对位移为四个像素(0.126 cm)	43.43	(9 5)	3.44

从表 1 可以看出,目标图像和参考图像的不同噪声级别对相关峰的半宽度 FWHM 几乎没有影响,而相应的 PSR 和 SNR 变化也不是非常大,即噪声对 OCPJTC 的相关性能影响不大;当目标图像和参考图像之间存在相对位移时,相关峰分裂为两个,即为联合功率谱相减的输出情况^[4]。

4 光学实验

联合功率谱记录光路如图 1 所示。目标图像和参考图像采用的是计算机设计的透明胶片,

其尺寸为 16 mm×16 mm。傅里叶变换透镜的口径为 70 mm,焦距为 240 mm。CCD 像素为 2 023 pixel×1 520 pixel,尺寸为 10.0 mm×7.48 mm。照明相干光源为氦氖激光器,波长 $\lambda=632.8$ nm。进行相关运算的光路如图 5 所示。

图 5 中所采用的 LCLV 为中国科学院西安光机所研制,傅里叶变换透镜的焦距为 70 mm,口径为 40 mm。在计算机中获得的差值功率谱,显示于 CRT 上,经成像透镜 IL 投射到液晶光阀 LCLV 上作为 LCLV 的写入光;He-Ne 激光经分束器 BS 作为 LCLV 的读出光。读出的差值功率

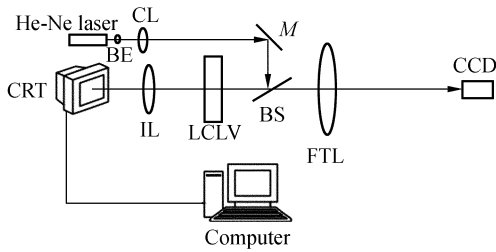
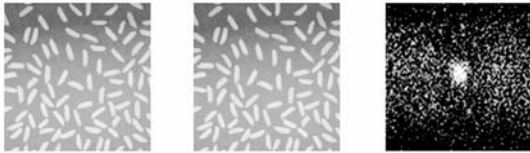


图 5 相关运算的光路

Fig. 5 Setup for JTC

谱图像经傅里叶变换透镜 FTL 得到相关输出,用 CCD 接收,并做 0.2 的阈值处理,结果如图 6 所示。



(a) 目标图像 (b) 参考图像 (c) 相关输出

(a) Target image (b) Reference image (c) Correlation output

参考文献:

- [1] 沈学举,王永仲,姚广涛,等. 扩展等相关峰综合鉴别函数算法研究[J]. 光学 精密工程, 2008, 16(1): 156-160.
SHEN X J, WANG Y ZH, YAO G T, *et al.*. Study on extended equal correlation peak synthetic discriminant function algorithm [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(1): 156-160. (in Chinese)
- [2] 王玉荣,徐鹏,王青圃,等. 光电混合联合变换相关器中各元器件结构参数之间的关系[J]. 光学 精密工程, 2005, 13(3): 336-383.
WANG Y R, XU P, WANG Q P, *et al.*. Relationship between parameters in hybrid optical/electronic joint transform correlator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(3): 336-383. (in Chinese)
- [3] JOHNSON F T J, BARNES T H. Analysis of a joint transform correlator using a phase only spatial light modulator [J]. *Opt. Eng.*, 1991, 30 (12): 1947-1957.



(d) 目标图像 (e) 参考图像 (f) 相关输出

(d) Target image (e) Reference image (f) Correlation output

图 6 光学实验结果

Fig. 6 Optical experiment results

5 结 论

本文从经典联合变换相关器的原理出发,首先分析了经典联合变换相关器的缺陷及其产生原因,然后提出了基于马赫—曾德尔干涉仪的单相关峰联合变换相关器技术,最后,对该技术的有效性和可行性进行了计算机模拟和实验验证。实验证明,该技术不仅能获得高强度的单互相关峰,增强相关器的识别能力,而且抗噪声能力是经典联合变换相关器的 6 倍;同时由于采用目标图像和参考图像之间无相对位移输入方式,大大降低了系统的成本,特别适合于大尺寸图像的识别。

- [4] 陈怀新,陈祯陪. 基于相移功率谱相减的二元联合变换相关识别[J]. 中国激光, 1998, 25(4): 353-358.
CHEN H X, CHEN ZH P. Binary joint transform correlator subtracting a power spectrum based on a phase shift technique [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1998, 25(4): 353-358. (in Chinese)
- [5] 袁祥岩,陶纯堪,于大勇,等. 基于相位编码的畸变不变联合变换相关器的设计[J]. 光子学报, 2002, 31(10): 1238-1242.
YUAN X Y, TAO CH K, Yu D Y, *et al.*. Distortion-invariant joint transform correlator based on phase-encoding technique [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, 31(10): 1238-1242. (in Chinese)
- [6] GUO W L, ZHENG ZH, YU F T S. Phase-encoded input joint transform correlator with improved pattern discriminability [J]. *Opt. Lett.*, 1995, 20(11): 1307-1311.
- [7] 李春,安毓英,曾晓东,等. 一种新的相位编码幅值调节联合变换相关器[J]. 光子学报, 2003, 32(3): 327-331.

LI CH, AN Y Y, ZENG X D, *et al.*. A novel phase-encoded amplitude-modulated joint transform correlator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(3): 327-331. (in Chinese)

[8] 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, 31(12): 1538-1541.

HE J F, ZHAO X K, WANG H X, *et al.*. Joints transform correlation recognition based on optical wavelet-transform differentiation-preprocessing[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, 31(12): 1538-1541. (in Chinese)

作者简介:



邓晓鹏(1972—), 男, 湖南沅陵人, 副教授, 1995年于吉首大学获学士学位, 2003年于电子科技大学获硕士学位, 主要从事信息光学方面的研究。E-mail: dxpzh@163.com

●下期预告

多基地周视红外搜索系统的目标定位模型与精度分析

贾庆莲^{1,2}, 乔彦峰¹, 邓文渊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 130031;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

对周视红外搜索系统提出了一种新的目标定位模型, 推导了定位误差公式。在建立这种目标定位模型的推导过程中, 首先分析了影响目标搜索定位的主要因素, 如搜索站站址误差, 各站对目标定位的方位角误差、俯仰角误差以及目标距离等。其次采用矩阵分析并利用提高数据冗余的方法推导了目标的三维坐标及相对各搜索基地的距离值的表达式, 由此计算目标定位误差的处理速度显著加快。最后通过仿真试验并利用定位误差的三维几何分布(GDOP)图分析了三站、正方形四站、菱形四站及五站模式的周视搜索系统对目标的定位误差数值及分布规律。结果表明, 针对周视红外搜索系统, 这种新的算法中正方形四站模式与其它几种模式相比具有最高的精度。