

# 修正振幅调制的光电混合圆谐联合变换 相关器作旋转不变的目标检测\*

黄晓菁

黄献烈

(集美大学水产学院基础部, 厦门 361021) (厦门大学物理系, 厦门 361005)

**摘 要** 提出一种修正振幅调制的光电混合圆谐联合变换相关器作旋转不变的目标检测的实验系统。参考图像(即圆谐展开分量的实部和虚部)、圆盘状的局部偏置函数以及目标图像同时显示于输入面。此方法对联合功率谱作了修正, 先将联合功率谱减去纯输入景物(含局部偏置函数)的功率谱和参考图像(含局部偏置函数)的功率谱, 再加上局部偏置函数的功率谱, 然后将所得修正的联合功率谱乘以振幅调制滤波函数。这种方法能产生比普通的圆谐联合变换相关器更好的相关输出。给出计算机模拟结果及光电混合实验结果。

**关键词** 光学图像识别, 圆谐函数, 联合变换相关器, 目标检测。

## 1 引 言

目前光学图像识别常用的一种结构是联合变换相关器(JTC)<sup>[1]</sup>。与传统的匹配滤波相关器相比, 其主要优点是能进行实时处理和无需预先制作复空间匹配滤波器。但经典的联合变换相关器对目标的方向是敏感的。为了实现目标的旋转不变检测, 可采用圆谐联合变换相关器<sup>[2]</sup>, 即用真目标的某一阶圆谐展开分量(CHC)的实部和虚部作参考图像。与经典的联合变换相关器相同, 它也具有相关宽度大, 光效率低, 在输出面上存在强的零级项, 峰噪比低, 对相似图像的识别力不强等缺点。

为了提高经典的联合变换相关器的输出性能, 出现了多种改进的联合变换相关器, 如基于振幅调制滤波器的联合变换相关器<sup>[3]</sup>, 基于条纹调节滤波的联合变换相关器<sup>[4, 5]</sup>, 基于修正的条纹调节滤波的联合变换相关器<sup>[6]</sup>以及振幅调制和功率谱相减的联合变换相关器<sup>[7]</sup>等。这些联合变换相关器使得相关输出性能越来越好, 相关峰强度、识别力、峰噪比大大提高。但它们对目标的方向仍然敏感, 不能做到旋转不变检测。

为了不受目标图像方向限制, 改善普通圆谐联合变换相关器(CHJTC)对目标旋转不变相关输出性能, 本文使用修正振幅调制的圆谐联合变换相关器作旋转不变的目标检测。输入面的参考图像有两个, 即某一阶圆谐展开分量(CHC)的实部和虚部, 各自加上一个圆盘状的局部偏置函数使其能在光学上实现, 在频谱面上对联合功率谱进行修正, 再乘以振幅调制的滤

\* 集美大学水产学院青年专项科研基金资助项目。

收稿日期: 1998-06-08; 收到修改稿日期: 1998-09-28

波函数。这种方法产生的相关峰比普通的圆谐联合变换相关器尖锐得多,且峰噪比及识别力都有较大提高。联合变换相关器采用单空间光调制器(SLM)的光电混合结构。这种结构可以充分发挥光学联合变换相关器的并行处理、大容量和高速度等优点,又能利用计算机处理的灵活性、可编程性和准确性。

## 2 分 析

修正振幅调制的圆谐联合变换相关器作旋转不变的目标检测,是将两个参考图像和待检测的目标同时显示于输入平面,两个参考图像设计如下:

任一图像函数  $t(r, \theta)$  在极坐标系中均可表示为一系列圆谐分量之和,即

$$t(r, \theta) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} t_m(r) \exp(jm\theta) \quad (1)$$

其中

$$t_m(r) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} t(r, \theta) \exp(-jm\theta) d\theta \quad (2)$$

令  $t_m(r, \theta) = t_m(r) \exp(jm\theta)$ ,  $t_m(r, \theta)$  为  $t(r, \theta)$  的第  $m$  阶圆谐展开分量。由于通常目标图像  $t(r, \theta)$  为实函数, (1) 式可写为

$$t(r, \theta) = t_0(r) + 2 \sum_{m=1}^{+\infty} \operatorname{Re} [t_m(r) \exp(jm\theta)] =$$

$$t_0(r) + 2 \sum_{m=1}^{+\infty} |t_m(r)| \cos(m\theta + \phi_m) \quad (3)$$

其中  $t_m(r) = |t_m(r)| \exp(j\phi_m)$ 。取第  $k$  阶圆谐展开分量  $t_k(r, \theta)$  作联合变换相关器的参考函数。为实现数值运算,定义两个参考函数

$$r_{k1}(r, \theta) = 2|t_k(r)| \cos(k\theta + \phi_k) \quad (4)$$

$$r_{k2}(r, \theta) = 2|t_k(r)| \sin(k\theta + \phi_k) \quad (5)$$

其中  $r_{k1}(r, \theta)$ 、 $r_{k2}(r, \theta)$  分别代表  $t_k(r, \theta)$  的实部和虚部。

用  $r_{k1}(r, \theta)$  作参考函数和用  $t(r, \theta + \alpha)$  作输入目标函数,互相关的中心值为

$$C_{k1}(\alpha) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} t(r, \theta + \alpha) r_{k1}(r, \theta) r dr d\theta \quad (6)$$

将(3)式和(4)式代入(6)式,并注意到除了  $m = k$  外所有其它项都消失,则上式简化为

$$C_{k1}(\alpha) = 4\pi \cos(k\alpha) \int_0^{\infty} r |t_k(r)|^2 dr =$$

$$2C_k(0) \cos(k\alpha) \quad (7)$$

其强度为

$$I_{k1}(\alpha) = 4C_k^2(0) \cos^2(k\alpha) \quad (8)$$

它随目标方位的余弦平方而变化。类似地,若用  $r_{k2}(r, \theta)$  作参考函数,相关中心的强度则为

$$I_{k2}(\alpha) = 4C_k^2(0) \sin^2(k\alpha) \quad (9)$$

(8)式与(9)式之和为

$$I_k(\alpha) = I_{k1}(\alpha) + I_{k2}(\alpha) = 4C_k^2(0) \quad (10)$$

表明  $I_k(\alpha)$  与方位角  $\alpha$  无关,从而实现旋转不变的相关检测。

为了能在光学上实现,需采用非负的参考图像函数,因此在输入面加上一偏置函数。输入面上图像用直角坐标表示为

$$f(x, y) = t(x + a, y) + r_{k1}(x - a, y - b) + d(x - a, y - b) + r_{k2}(x - a, y + b) + d(x - a, y + b) \quad (11)$$

其中

$$d(x, y) = \begin{cases} d, & \sqrt{x^2 + y^2} \leq r_0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

式中  $d(x, y)$  为圆盘状的局部偏置函数。 $d$  为  $r_{k1}$  和  $r_{k2}$  中最大负值的大小,  $r_0$  为圆谐展开分量的范围半径。经透镜作傅里叶变换后, 在频谱面上功率谱为

$$\begin{aligned} |F(u, v)|^2 = & |T(u, v)|^2 + |R_{k1}(u, v)|^2 + |R_{k2}(u, v)|^2 + |D(u, v)|^2 2(1 + \cos 2vb) + \\ & T(u, v)R_{k1}^*(u, v) \exp[j(u2a + vb)] + \text{C. C.} + \\ & T(u, v)R_{k2}^*(u, v) \exp[j(u2a - vb)] + \text{C. C.} + \\ & T(u, v)D^*(u, v) \exp(ju2a)[\exp(jvb) + \exp(-jvb)] + \text{C. C.} + \\ & R_{k1}(u, v)R_{k2}^*(u, v) \exp(-jv2b) + \text{C. C.} + \\ & R_{k1}(u, v)D^*(u, v)[1 + \exp(-jv2b)] + \text{C. C.} + \\ & R_{k2}(u, v)D^*(u, v)[1 + \exp(jv2b)] + \text{C. C.} \end{aligned} \quad (12)$$

其中  $T(u, v)$ 、 $R_{k1}(u, v)$ 、 $R_{k2}(u, v)$ 、 $D(u, v)$  分别为  $t(x, y)$ 、 $r_{k1}(x, y)$ 、 $r_{k2}(x, y)$ 、 $d(x, y)$  的傅里叶变换;  $u$ 、 $v$  是互相独立的频率域变量, 以因子  $2\pi/\lambda f$  标度,  $\lambda$  为准直光波长,  $f$  为傅里叶变换透镜的焦距; 上标星号表示复数共轭; C. C. 表示前一项的复数共轭。

如用上式所表示的联合功率谱经透镜作逆傅里叶变换产生相关输出, 则有几项: 目标图像、参考图像的实部和虚部、局部偏置函数的自相关、目标图像与参考图像的实部和虚部的互相关、目标图像和局部偏置函数的互相关、参考图像的实部和虚部与局部偏置函数的互相关以及参考图像的实部和虚部的互相关。而所需要的只是目标图像与参考图像的实部和虚部的互相关, 其它各相关项除了位于输入面中心的强的零级项以外, 还会产生一些虚假的相关峰, 给目标检测带来困难, 容易造成误判。为了消除这些多余的项, 可采用如下方法:

在联合变换相关器的输入面上只显示目标图像和局部偏置函数, 并记录其功率谱  $|TD(u, v)|^2$ ,

$$\begin{aligned} |TD(u, v)|^2 = & |T(u, v)|^2 + |D(u, v)|^2 4 \cos^2 vb + \\ & T(u, v)D^*(u, v) \exp(ju2a) [\exp(jvb) + \exp(-jvb)] + \text{C. C.} \end{aligned} \quad (13)$$

然后只显示参考图像实部和虚部及局部偏置函数, 其功率谱  $|RD(u, v)|^2$  为

$$\begin{aligned} |RD(u, v)|^2 = & |R_{k1}(u, v)|^2 + |R_{k2}(u, v)|^2 + |D(u, v)|^2 4 \cos^2 vb + \\ & R_{k1}(u, v)R_{k2}^*(u, v) \exp(-jv2b) + \text{C. C.} + \\ & R_{k1}(u, v)D^*(u, v)[1 + \exp(-jv2b)] + \text{C. C.} + \\ & R_{k2}(u, v)D^*(u, v)[1 + \exp(jv2b)] + \text{C. C.} \end{aligned} \quad (14)$$

最后只显示局部偏置函数, 功率谱  $|DD(u, v)|^2$  为

$$|DD(u, v)|^2 = |D(u, v)|^2 4 \cos^2 vb \quad (15)$$

将(12)式所表示的联合功率谱减去(13)式和(14)式的功率谱再加上(15)式, 得到修正的联合功率谱  $P(u, v)$ ,

$$\begin{aligned} P(u, v) = & |F(u, v)|^2 - |TD(u, v)|^2 - |RD(u, v)|^2 + |DD(u, v)|^2 = \\ & T(u, v)R_{k1}^*(u, v) \exp(ju2a + jvb) + \text{C. C.} + \end{aligned}$$

$$T(u, v)R_{k2}^*(u, v) \exp(ju2a - jvb) + C. C. \quad (16)$$

以上运算可以用计算机完成后再输入到光学系统中。由(16)式可以看出, 强的零级项完全被除去, 而且其他互相关项产生的虚假相关峰也被消除, 只保留目标和参考图像的实部和虚部的互相关项。

为进一步提高圆谐联合变换相关器的性能和减少输入景物中噪声的影响, 可采用振幅调制的滤波函数(AMF)乘以  $P(u, v)$ , 滤波函数为

$$H_{\text{amf}}(u, v) = \begin{cases} l_{\text{th}}/|R(u, v)|^2, & |R(u, v)|^2 \geq l_{\text{th}} \\ 1, & |R(u, v)|^2 < l_{\text{th}} \end{cases} \quad (17)$$

其中  $|R(u, v)|^2$  为输入面只有参考图像实部和虚部时的功率谱。两个参考图像(实部和虚部)傅里叶变换后其功率谱  $|R(u, v)|^2$  在低空间频率集中了大部分能量, 在高频只有小部分能量。而高频通常是识别物体特征的重要体现。由(17)式可见, 振幅调制滤波器减小了低空间频率的贡献, 选取适当的阈值  $l_{\text{th}}$ , 可以使圆谐参考图像实部和虚部的傅里叶变换的能量对系统的贡献趋于均匀, 使得修正的功率谱  $P(u, v)$  乘以  $H_{\text{amf}}(u, v)$  后高频分量得到加强, 经逆傅里叶变换, 其目标图像与参考图像实部和虚部的相关峰比普通的圆谐联合变换相关器好得多。

### 3 计算机模拟结果

用具有灰度级的物体作为参考图像和被检测的目标图像。参考图像的圆谐展开分量取第二阶 ( $k = 2$ ), 其实部和虚部按(4)式、(5)式定义, 并各自加上一圆盘状的局部偏置函数。计算机模拟实验采用二维快速傅里叶变换(FFT)子程序, 大小为  $128 \times 128$ , 结果用三维绘图子程序绘制相关输出三维图。输入图像如图 1 所示, 汽车大小为  $15 \times 7$  像素点。为了和普通的圆谐联合变换相关器比较, 分别试验了普通的圆谐联合变换相关器及所提出的修正振幅调制的圆谐联合变换相关器, 振幅调制滤波器的阈值  $l_{\text{th}}$  取  $5 \times 10^{-3}$ , 试验中计算了相关峰强度(IAC)、半宽度(FWHM)、峰噪比(PNR)和识别力(ACR)等。相关峰强度为目标图像与参考图像实部的相关峰强度加上目标图像与参考图像虚部的相关峰强度。相关峰半宽度定义为相关峰值由最大降至一半时的总宽度。峰噪比定义为相关峰强度与周围的噪声强度平均值之比。识别力定义为目标图像为真目标(图 3 汽车 1)的相关峰强度和目标图像为伪目标(图 3 汽车 2)的相关峰强度之比。结果列于表 1。表 1 中的数据为目标方向  $0^\circ$  时的情况。由表 1 可见, 修正振幅调制的圆谐联合变换相关器的相关峰强度、峰噪比和识别力均比普通的圆谐联合变换相关器高, 半宽度也小得多。两种圆谐联合变换相关器对真目标未旋转时检测的相关输出



Fig. 1 Images on the input plane

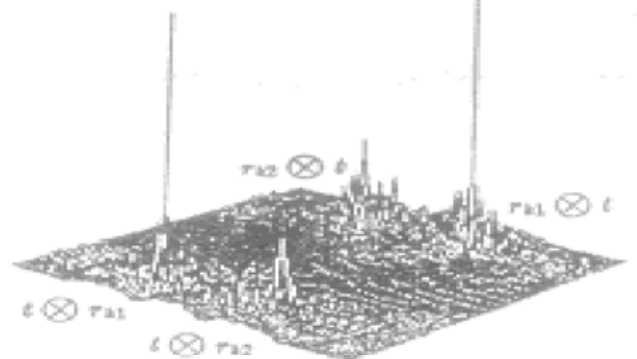


Fig. 2 3-D plot of correlation output for computer simulation results

三维图如图 2, 试验中输出能量归一化为 100, 相关峰强度用输出面总的输出能量归一化。由图 2 可见, 真目标与参考图像实部的相关峰  $t \otimes r_{k1}$  比真目标与参考图像虚部的相关峰  $t \otimes r_{k2}$  高得多,  $\otimes$  表示相关运算。对于对称性强的目标更是如此。在这种情况下, 参考图像可以只取实部。

Table 1. Computer simulation results of the two types of CHTJC

CHTJC	IAC	FWHM	ACR	PNR
classical	0.06	$16 \times 14$	1.63	4.0
MAM	0.75	$1 \times 2$	2.29	22.0

模拟试验还验证了修正振幅调制的圆谐联合变换相关器对目标的旋转不变性。分别对真目标汽车 1 和伪目标汽车 2(图 3) 的四个输入方向( $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ ) 进行试验, 输出相关峰强度与目标转角的关系曲线如图 4。可以看出, 真目标相关峰强度最小值为最大值的 94%, 达到旋转不变目标检测, 而且与真目标相似的伪目标各方向的相关峰强度均大大低于真目标, 说明所提出的圆谐联合变换相关器具有很好的相似图像的认识力。



Fig. 3 Objects for the experimentation

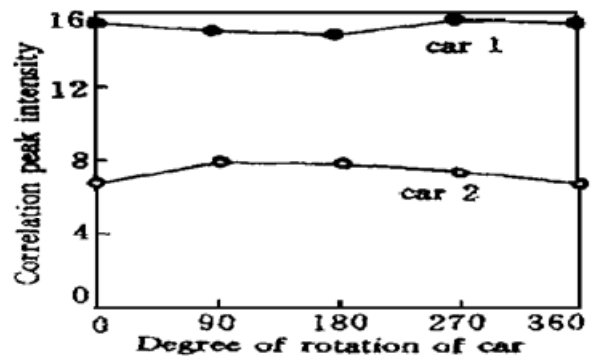


Fig. 4 Plot of the correlation peak intensity vs the car orientation

同时还研究了振幅调制滤波器阈值  $l_{th}$  的选取对所提出的圆谐联合变换相关器输出性能的影响, 分别试验了取不同阈值  $l_{th}$  时  $0^\circ$  真目标图像的相关峰强度[图 5(a)]、识别力[图 5(b)]和峰噪比[图 5(c)]。从图 5(a) 可以看出, 阈值越大, 相关峰强度越强, 但由图 5(b) 看出, 识别力在  $10^{-3} \leq l_{th} \leq 10^{-2}$  时较高,  $l_{th} = 5 \times 10^{-3}$  时最高, 而由图 5(c) 可见, 峰噪比在  $5 \times 10^{-4} \leq l_{th} \leq 5 \times 10^{-3}$  时较高,  $l_{th} = 10^{-3}$  时峰噪比最高, 综合考虑, 取  $l_{th} = 5 \times 10^{-3}$ 。

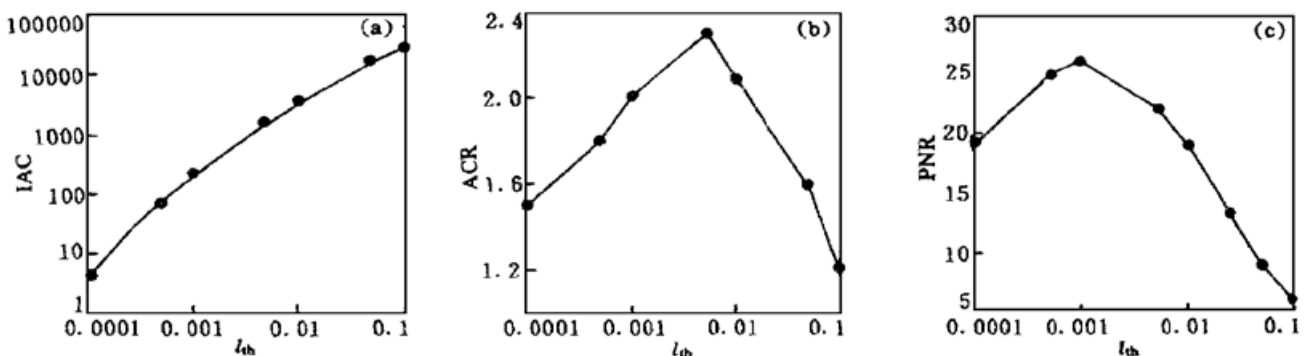


Fig. 5 Simulated correlation output performance as function of threshold value

## 4 光学实验结果

光电混合的修正振幅调制的光电混合圆谐联合变换相关器的实验系统如图 6。这一实验系统属于

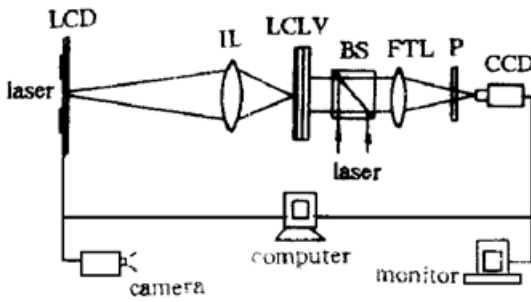


Fig. 6 Diagram of experimental system of the hybrid optical circular harmonic JTC

可编程的单空间光调制器联合变换相关器。为了提高系统的分辨本领和空间带宽积，这一可编程的单空间光调制器由液晶显示屏(LCD)、成像透镜(IL)和液晶光阀(LCLV)组成。液晶显示屏的像素分辨率为  $640 \times 480$ ，即  $3.08 \text{ pl/mm}$ 。液晶光阀采用上海光学仪器研究所生产的硒化镉交流液晶光阀，其通光孔径为  $45 \text{ mm}$ ，分辨率为  $40 \text{ pl/mm}$ ，工作状态为  $100 \text{ Hz}$ ， $2.9 \text{ V}$ ，成像系统的缩小倍数为 13 倍。

输入联合图像如图 1 所示，其参考图像的实部与虚部及两个偏置函数预先用计算机算好并储存在存储器中，目标图像可由摄像机实时摄取，并与参考图像的实部和虚部同时引入液晶显示屏，经成像透镜缩小，成像在液晶光阀上。一相干光读出其联合图像并经傅里叶变换透镜(FTL)作傅里叶变换，CCD 列阵记录这一联合功率谱(JPS)，记录到的联合功率谱如图 7，并输入计算机。随后再记录目标图像和局部偏置函数的功率谱。而参考图像实部和虚部及局部偏置函数的功率谱、局部偏置函数的功率谱和振幅调制的滤波函数也可预先记录和用计算机算好并储存在存储器中。功率谱的处理速度取决于所用计算机的运行速度，随着计算机技术的进步，光电混合系统可以达到准实时处理。处理后得到修正振幅调制的联合功率谱如图 8 所示，然后再重新引入液晶显示屏，作逆傅里叶变换，得相关输出。

输入联合图像如图 1 所示，其参考图像的实部与虚部

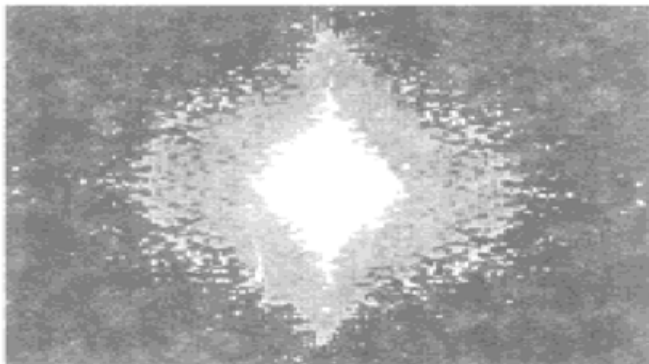


Fig. 7 Experimentally recorded joint power spectrum

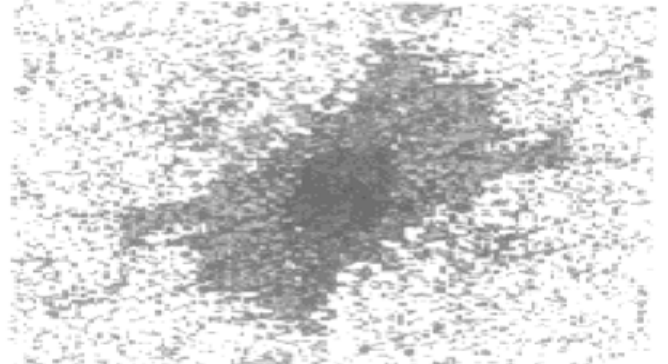


Fig. 8 The modified joint power spectrum

实验记录的修正振幅调制的圆谐联合变换相关器(MAM-CHJTC)对  $0^\circ$  真目标的相关输出如图 9 所示。从图 9 可以看到宽且强的零级项。这是由于实验系统采用液晶光阀所致，对目标检测没有影响。由图 9 还可以看出真目标与参考图像实部的相关强度远大于真目标与参考图像虚部的相关强度，与计算机模拟结果相符。

还用修正振幅调制的圆谐联合变换相关器对真目标的四个输入方向  $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $270^\circ$  进行实验。实验结果列于表 2。由表 2 可见，真目标相关峰强度的最小值为最大值的 88%，与计算机模拟结果接近。由表 2 还可看出，当真汽车目标 1 与伪汽车目标 2(图 3)的识别力大于 1.05 时，还可识别。作者还对普通的圆谐联合变换相关器作了相同的实验，发现识别

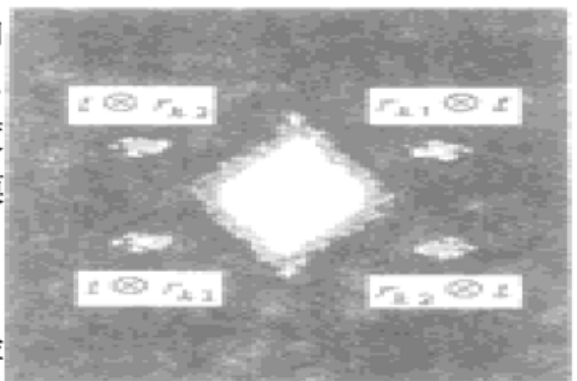


Fig. 9 Experimental recorded correlation output corresponding to Fig. 1

力为 1, 不能识别图 3 的汽车 1 和 2。可见修正振幅调制的圆谐联合变换相关器的相关性能优于普通的圆谐联合变换相关器。

Table 2. Optical experimental results for the real part of a MAM-CHJTC

orientation	0°	90°	180°	270°
<i>I</i>	206	191	181	181
ACR	1.19	1.10	1.05	1.05

### 参 考 文 献

- [1] Weaver C S, Goodman J W. A technique for optically convolving two functions. *Appl. Opt.*, 1966, **5** (7) : 1248~ 1249
- [2] Yu F T S, Li X, Tam E *et al.*. Rotation invariant pattern recognition with a programmable joint transform correlator. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(22) : 4725~ 4727
- [3] Fing D, Zhao H, Xia S. Amplitude-modulated JTC for improving correlation discrimination. *Opt. Commun.*, 1991, **86**(3/4) : 260~ 264
- [4] Alam M S, Karim M A. Fringe-adjusted joint transform correlation. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(23) : 4344 ~ 4350
- [5] Alam M S, Karim M A. Multiple target detection using a modified fringe adjusted joint transform correlator. *Opt. Engng.*, 1994, **33**(5) : 522~ 527
- [6] Wang R K, Shang L, Chatwin C R. Modified fringe-adjusted joint transform correlation to accommodate noise in the input scene. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(2) : 286~ 296
- [7] 赖虹凯, 黄献烈, 高泽华. 使用振幅调制和功率谱相减的联合变换相关器作多目标检测. *光学学报*, 1997, **17**(9) : 1225~ 1231

## Rotation Invariant Target Detection Using a Modified Amplitude Modulated Hybrid Optical Circular Harmonic Joint Transform Correlator

Huang Xiaojing

(Department of Basic Science, Fisheries College, Jimei University, Xiamen 361021)

Huang Xianlie

(Department of Physics, Xiamen University, Xiamen 361005)

(Received 8 June 1998; revised 28 September 1998)

**Abstract** Rotation invariant target detection using a modified amplitude modulated hybrid optical circular harmonic joint transform correlator is proposed. In this technique, the reference images (i. e. the real and imaginary parts of the circular harmonic component), the disk-like local bias function and the target image are displayed simultaneously in the input plane. The joint power spectrum is firstly modified by the subtraction of the power spectra of the input-scene-only (with local bias function) as well as of the reference image (with local bias function) and by the addition of the power spectrum of the local bias function from it. Then the resultant modified joint power spectrum is multiplied by the amplitude modulated filter function. The technique is found to yield a better correlation output than a classical circular harmonic joint transform correlator does. Computer simulation results and hybrid optical experimental results are given.

**Key words** optical pattern recognition, circular harmonic function, joint transform correlator, target detection.