

doi:10.3788/gzxb20144309.0910004

# 大尺度混合畸变的目标识别技术

任兵<sup>1</sup>, 马军<sup>2</sup>, 蓝岚<sup>1</sup>, 王文生<sup>1</sup>

(1 长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022)

(2 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

**摘 要:**为解决目标识别技术中混合畸变目标的识别难题,提出了一种面积极坐标变换算法.该算法利用相似图形尺寸与面积的满射函数关系和极坐标变换的旋转不变特性,对目标与模板同时进行面积变换和极坐标变换.将面积极坐标变换算法与基于形态学膨胀的边缘加粗处理算法相结合应用于光电混合联合变换相关器,实现了大尺度混合畸变目标的识别.以空中飞机为例,光学相关实验表明,该方法可显著提高混合畸变目标的相关峰强度,旋转畸变容差为 $0^{\circ}\sim 100^{\circ}$ ,比例畸变容差为 $100\%\sim 200\%$ ,具有较大尺度的混合畸变容差,扩大了识别范围.其混合畸变识别能力优于极坐标对数变换算法与综合鉴别函数法其衍生方法,其“时间复杂度”远小于综合鉴别函数及其衍生方法.

**关键词:**光电混合联合变换相关器;目标识别;混合畸变;面积极坐标;形态学膨胀

中图分类号:O438.2

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2014)09-0910004-7

## Recognition Technology of Large-Scale Hybrid-Distortion Target

REN Bing<sup>1</sup>, MA Jun<sup>2</sup>, LAN Lan<sup>1</sup>, WANG Wen-sheng<sup>1</sup>

(1 School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

(2 Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** In this paper, area-polar algorithm is firstly proposed to solve the problem of hybrid-distortion target recognition technology. This method makes area transform and polar coordinate transform for both target and template, based on the surjective function relationship between the scale and the area of similar figures and the invariance of rotation of polar coordinate. Applied on hybrid optoelectronic joint transform correlator, a combined method can achieve large-scale hybrid-distortion target recognition, which includes area-polar algorithm and edge extracting process based on morphological dilation. Presented with examples of planes, The optical correlation experiments show that this method can enhance the brightness of the correlation peaks for hybrid-distortion target, which possesses large hybrid-distortion tolerance (with  $0^{\circ}\sim 100^{\circ}$  rotation distortion tolerance and  $100\%\sim 200\%$  scale distortion tolerance), and expands the scope of target recognition. The hybrid-distortion target recognition capability by this method is better than by Log-polar transform algorithm, and also better than by synthetic discriminant function and by derivative methods, besides its time complexity is far less than synthetic discriminant function's and derivative methods'.

**Key words:** Hybrid optoelectronic joint transform correlator; Target recognition; Hybrid-distortion; Area-polar; Morphological dilation

**OCIS Codes:** 100.3008; 100.5760; 100.3005; 070.4550; 070.5010

基金项目:总装备部预研局项目资助

第一作者(通讯作者):任兵(1989-),男,硕士,主要研究方向为现代光学测试. Email: custrb@163.com

导 师:王文生(1943-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为现代光学测试. Email: wwscom@163.com

收稿日期:2014-06-06;录用日期:2014-08-20

<http://www.photon.ac.cn>

## 0 引言

目标识别技术是模式识别范畴的一个重要分支,目前已经广泛应用于指纹识别、人脸识别、光纤检测、工业零件识别、汽车牌照识别等领域.然而,面对真实场景,视频序列的目标姿态相对于模板必然会发生变化,这会给目标识别与跟踪带来困难甚至造成目标丢失,混合畸变问题(角度和比例均改变)更严重.畸变难题是急需解决的实际问题,也是目标识别技术的瓶颈<sup>[1]</sup>.

解决畸变目标的相关识别问题有多种方法,目前还没有一种很有效的方法.图像的分析法如极坐标变换、梅林变换<sup>[2]</sup>、圆谐展开<sup>[3]</sup>,都只适用于单一的畸变问题(仅角度或者比例中的一种发生变化).综合鉴别函数法及其衍生算法<sup>[4]</sup>实现大尺度混合畸变目标识别需要大量的畸变训练图像,难以满足实时性要求.文献<sup>[5]</sup>提出优化折中的综合鉴别函数滤波器可实现的混合畸变容差为旋转 $0^\circ\sim 30^\circ$ ,比例畸变容差为 $1\sim 0.8$ ,但需要制作80幅训练图像;文献<sup>[6]</sup>提出的高斯-最大平均相关高度滤波器可实现的混合畸变容差为旋转 $-8^\circ\sim 24^\circ$ ,比例畸变容差为 $0.92\sim 1.16$ ,也需要至少20幅训练图像.Casasent等人提出极坐标对数变换算法,但变换后图像太窄,缺乏实用价值.文献<sup>[7]</sup>通过一个乘积因子将其极径的值域变宽,至于乘积因子如何取值却没有相关论述.圆谐梅林变换算法理论上可解决混合畸变问题,但对于其关键性参量 $p, q$ 的选择还没有成熟的算法,其物理意义也不是很明确,另一方面由于只利用了一个圆谐分量,圆谐展开的相关峰强度明显变小<sup>[8]</sup>.极坐标梅林变换可实现一定混合畸变范围内的目标识别,文献<sup>[9]</sup>模拟极坐标梅林变换实现了旋转 $0^\circ\sim 40^\circ$ ,比例 $0\sim 20\%$ 的混合畸变目标的仿真识别.

本文利用相似图形尺寸与面积的满射函数关系和极坐标变换的旋转不变特性,提出了一种新的算法——面积极坐标变换算法.面积极坐标变换采用面积变换消除比例畸变影响,是一种几何变换,极坐标梅林变换<sup>[10]</sup>是利用梅林变换实现,类似于傅里叶变换,是一种积分变换.另一方面,形态学膨胀可减少目标边缘的断点现象,实现边缘的加粗处理,在目标识别领域的合理运用可提高相关峰强度<sup>[11]</sup>.

面积极坐标变换与形态学膨胀相结合的方法,可实现大尺度混合畸变的目标识别,混合畸变识别范围大于上述方法,同时由于不用制作大量畸变训练图像,时间复杂度远小于综合鉴别函数法及其衍生方法,因而该方法具有良好的混合畸变识别能力和实时性的优点.

## 1 联合变换相关器原理

光电混合联合变换相关器(Hybrid Photoelectric

Joint Transform Correlator, HOJTC)是一种较为先进的光学模式识别器,它用傅里叶透镜组实现对图像的傅里叶变换,计算速度为光速,因而具有光学信息处理的并行、高速度、大容量的优点,HOJTC的实验装置原理图见图1.

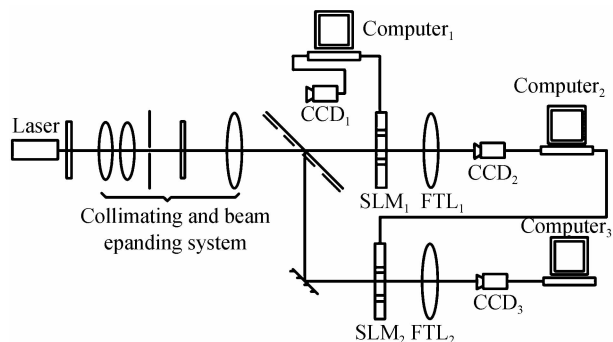


图1 HOJTC示意图

Fig. 1 Schematic diagram of HOJTC

氩离子激光器发出的光源经过准直扩束系统和半反透镜后分为两束平行光,一束用于获取联合变换功率谱,另一束则用于得到相关峰.经CCD<sub>1</sub>(Charge-Coupled Device)摄像机实时摄取的目标图像 $t(x, y)$ 与事先存贮在computer<sub>1</sub>的参考模板 $r(x-x_0, y-y_0)$ 一同写入到空间光调制器SLM<sub>1</sub>(Spatial Light Modulator)中.输入函数(即联合图像)为

$$j(x, y) = t(x, y) + r(x-x_0, y-y_0) \quad (1)$$

这里的 $x_0, y_0$ 为参考模板相对目标位置的偏移量.联合图像 $j(x, y)$ 经过透镜FTL<sub>1</sub>(Fourier Transform Lens)进行傅里叶变换,得到其联合傅里叶频谱,即

$$J(f_x, f_y) = T(f_x, f_y) + R(f_x, f_y) \times \exp(-j2\pi f_x x_0) \exp(-j2\pi f_y y_0) \quad (2)$$

式中, $T(f_x, f_y)$ 和 $R(f_x, f_y)$ 分别为 $t(x, y)$ 和 $r(x, y)$ 的傅里叶变换,联合傅里叶频谱被平方率探测器CCD<sub>2</sub>接收,其联合变换功率谱为

$$I(f_x, f_y) = |J(f_x, f_y)|^2 = T(f_x, f_y)T^*(f_x, f_y) + R(f_x, f_y) \times R^*(f_x, f_y) + T(f_x, f_y)R^*(f_x, f_y) \times \exp(-j2\pi f_x x_0) \exp(-j2\pi f_y y_0) + T^*(f_x, f_y) \cdot R(f_x, f_y) \times \exp(-j2\pi f_x x_0) \exp(-j2\pi f_y y_0) \quad (3)$$

联合变换功率谱经过透镜FTL<sub>2</sub>进行傅里叶逆变换,在该透镜的后焦面得到相关峰输出,即

$$j(x_1, y_1) = t(x_1, y_1) \otimes t^*(x_1, y_1) + r(x_1, y_1) \otimes r^*(x_1, y_1) + t^*(x_1, y_1)r(x_1, y_1)\delta(x_1+x_0) \cdot \delta(y_1+y_0) + t(x_1, y_1)r^*(x_1, y_1)\delta(x_1-x_0) \cdot \delta(y_1-y_0) \quad (4)$$

这里的“ $\otimes$ ”为相关运算,右上角“ $*$ ”为共轭.式(4)中前两项为自相关项,称为零级衍射,输出在图像(即相关峰图)中心,通过一定方法消除零级衍射可提高探测信号的效率.后两项为参考模板与待测目标的

互相关项,即探测目标的有用信号,根据该信号的强度可以实现对待测目标的识别<sup>[12]</sup>.

氩离子激光器体积庞大,不便于运动目标的实时检测,如图2,采用半导体YAG倍频激光器和透射式电寻址液晶方案的联合变换相关器小型化装置,可将整体装置体积控制在 $350\text{ mm}\times 260\text{ mm}\times 200\text{ mm}$ 之内,大大缩小占用体积,保证了检测的实时性.

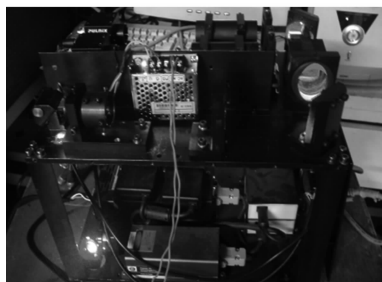


图2 光电混合联合变换相关器的小型化装置  
Fig. 2 Minimized setup of HOJTC

## 2 面积坐标变换算法、形态学膨胀的原理

### 2.1 面积变换

根据相似图形的性质,无论目标相对于模板发生任何角度和大小的改变,目标与模板的相似性始终不会改变.由于相似图形的尺寸和面积之间是满射函数关系,故当目标与模板的面积相等时,目标与模板必然是同一尺寸(即消除了比例畸变).基于该性质,对目标和模板按照统一面积标准进行缩放就可以消除目标的比例畸变引起的相关探测的低识别率问题.这里的统一面积标准具体取值对相关峰输出影响较小,但须避免缩放后目标过大或过小,过大则联合图像超出液晶显示尺寸,过小则成为小目标识别,不利于探测相关峰.

为了实现该算法的应用,需要计算目标面积.然而目标在真实场景中是连续的,经过CCD摄像机接收为离散的数字图像,其面积超出了传统解析法的范畴,计算出现困难.对于离散的数字图像,区域像素个数等效于区域面积,因此,这里的目标面积 $S$ 定义为目标区域的像素个数,即

$$S = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n d(i, j) \quad d(i, j) = \begin{cases} 1 & d(i, j) \in T \\ 0 & d(i, j) \notin T \end{cases} \quad (5)$$

这里待测目标图像大小为 $m \times n$ 像素, $d(i, j)$ 为图像的第 $i$ 行,第 $j$ 列像素的面积微元取值,若该像素点属于目标区域 $T$ ,取值为1,反之则为0,计算目标与模板面积可由MATLAB数字图像处理实现.

本实验的畸变飞机放大比例与面积关系见表1,第一列为待测畸变飞机的序号,第二列为其相应的放大比例(100%~200%,以10%为采集间隔),第三列为

运用MATLAB程序计算出的待测畸变飞机面积,单位为像素个数.从表中可看出,面积与放大比例之间为满射函数关系,且为增函数.

表1 飞机的放大比例与面积关系

Table 1 The relationship between planes' scale and area

Image number	Scaling factor	Area
1	100%	3 050
2	110%	3 717
3	120%	4 396
4	130%	5 128
5	140%	5 970
6	150%	6 844
7	160%	7 821
8	170%	8 816
9	180%	9 883
10	190%	10 971
11	200%	12 200

### 2.2 极坐标变换

光学相关系统可由傅里叶变换实现平移不变性,但对旋转却异常敏感,其旋转不变性可由极坐标变换实现<sup>[13-14]</sup>.

极坐标变换是将物体从原来的 $x-y$ 直角坐标系映射到 $r-\theta$ 直角坐标系,这里 $r$ 的物理意义为极径, $\theta$ 的物理意义为辐角, $r, \theta$ 与 $x, y$ 的转换关系为

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}, \theta = \arctan(y/x) \quad (6)$$

如图3,在 $x-y$ 直角坐标系中的一个圆,经过极坐标变换后,在 $r-\theta$ 直角坐标系中为一条线段.因此, $x-y$ 直角坐标系的圆周运动经过极坐标变换为 $r-\theta$ 直角坐标系 $\theta$ 方向上的平移运动,这就是极坐标变换的旋转不变性.

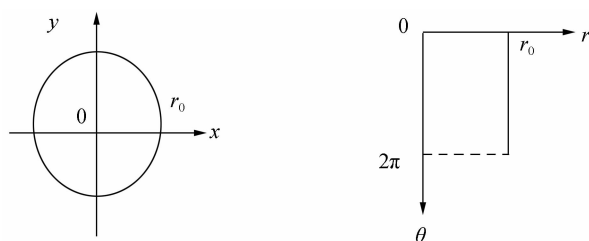


图3 两坐标系间的变换

Fig. 3 Transformation of two coordination systems

经过面积坐标变换后的畸变目标图像与模板图像的宽度(极径 $r$ 方向)可能不一致,所组成的联合图像的宽度(极径 $r$ 方向)将随着待测目标比例畸变大小的变化而变化.但这不影响识别效果,只是变换后目标图像中的背景被压缩或放大了,待识别的有用信号——目标与模板,始终全等且只存在辐角 $\theta$ 方向上的平移.

因此,将面积变换、极坐标变换和傅里叶变换相结合光学相关系统可同时实现目标识别的比例、旋转、平移不变性.

### 2.3 形态学膨胀

用  $D$  对  $C$  进行膨胀运算, 定义为

$$C \oplus D = \{x \mid [(D)_{\hat{x}} \cap C] \neq \phi\} \quad (7)$$

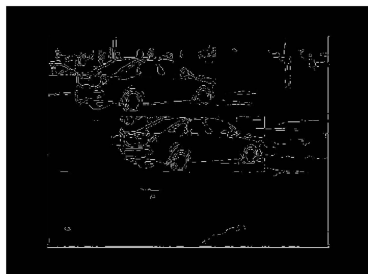
这里  $\hat{D}$  表示  $D$  的反射,  $\hat{D} = \{k \mid k = -a, a \in D\}$ .

$(D)_{\hat{x}}$  表示对  $D$  的反射进行位移  $x$ . 用  $D$  膨胀  $C$  的过程就是先对  $D$  作原点的映射, 再将其平移  $x$ , 这里的  $C$  与  $D$  交集不能为空集. 借助卷积的概念来理解, 可以将  $D$  看作是一个卷积模板, 膨胀就是先对  $D$  做关于原点的映射, 再将映射连续地在  $C$  上移动.

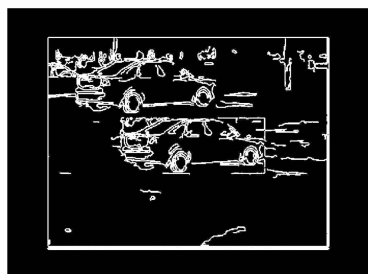
如图 4 将形态学膨胀用于红外汽车目标的边缘处理, 图(a)为拍摄的红外汽车的灰度图像, 图(b)为边缘提取图像, 对(b)膨胀后得到图(c). 从图中可以看出, 膨胀后边缘断点现象明显缓解, 目标边缘显著加粗, 有利于提高探测的相关峰强度.



(a) Infrared car



(b) Infrared car before dilation



(c) Infrared car after dilation

图 4 形态学膨胀实例

Fig. 4 An example of Morphological dilation

### 2.4 方法实现的流程

方法实现过程: 首先, 由  $CCD_1$  摄像机摄取的目标图像来计算待测目标的初始面积, 根据统一面积标准缩放目标图像, 实现面积变换; 其次, 对目标图像与模板图像分别进行边缘提取, 再分别进行极坐标变换; 然后, 将变换后的待测目标图像与模板图像组合成联合

图像, 并对联合图像进行合理的膨胀处理, 见图 5. 基于该方法制作的联合图像写入到  $SLM_1$ , 系统便会输出识别结果.

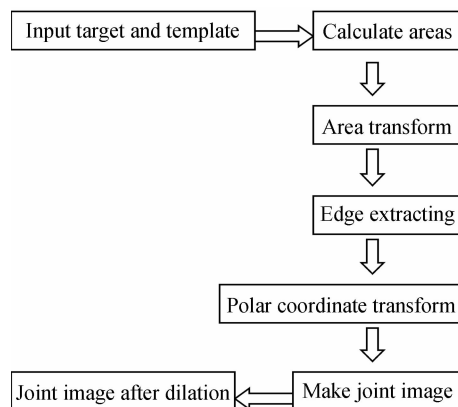


图 5 该方法的流程

Fig. 5 Flow chart of this method

## 3 实验结果

### 3.1 方法的实现及其实验结果

为了验证方法的可行性及其畸变容差范围, 本文基于该方法编写了 MATLAB 程序. 对大量混合畸变目标进行了计算机模拟识别实验后再利用联合变换相关器进行了光学相关识别实验, 实验结果均验证了算法的可行性. 光学相关实验步骤如下

1) 计算待测目标的面积并进行面积变换, 根据统一面积标准对目标与模板进行放缩, 这里的统一面积标准设定为 3050 个像素点;

2) 对统一面积标准下的目标和模板进行边缘提取, 这里须注意选择合适的阈值, 阈值过大或者过小分别会造成目标缺失或者背景噪音过多, 本实验选取的阈值为 0.15;

3) 对目标和模板进行极坐标变换, 制作联合图像;

4) 选取合适的结构元素对边缘提取后的目标和模板进行膨胀, 膨胀程度不可过大或者过小, 经实验验证, 采用  $3 \times 3$  圆盘结构元素的实验效果更好;

5) 提前对联合变换相关器装置进行光路调试, 消除实验条件对实验结果的影响, 再对联合图像进行光学相关实验, 记录相关峰输出结果. 光路调试必须保证良好的光路共轴性和激光光束的均匀性, 不共轴会使 CCD 接收不到相关峰, 光束不均匀会大幅度地降低相关峰强度;

6) 根据实验结果得出结论, 并分析其原因

这里给出了空中混合畸变飞机目标的 4 组光学实验结果, 其放大比例、旋转角度及相关峰强度见表 2. 对于各种混合畸变的飞机目标, 运用面积极坐标算法, 结合形态学膨胀边缘处理, 联合变换相关器响应的相关峰强度值均不低于 170(本实验 CCD 输出图像为

表 2 各种混合畸变的飞机目标

Table 2 Different hybrid-distortion plane targets

Image number	Rotate distortion	Scaling factor	Correlation peak
1	20	180%	200
2	40	160%	179
3	80	120%	173
4	100	200%	170

256 灰度级),具有良好的稳定性,实现了混合畸变飞机目标的识别,其混合畸变容差为旋转  $0\sim 100^\circ$ 、比例  $100\%\sim 200\%$ 。

图 6 为飞机模板,是某一瞬时拍摄的飞机图像,其面积为 3 050 个像素点,其中(a)为灰度图片,(b)为边缘提取后的图片,图中可以看出目标边缘无缺失,故选取的阈值 0.15 较为合理.图 7、8、9 分别为旋转  $40^\circ$  和

放大 160%、旋转  $80^\circ$  和放大 120%、旋转  $100^\circ$  和放大 200% 的混合畸变飞机的相关识别结果,其中,(a)为模拟的待测混合畸变飞机目标,由于不能随意地更改

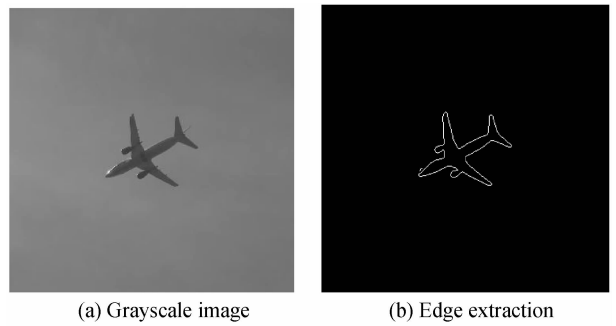


图 6 飞机模板

Fig. 6 Template of plane

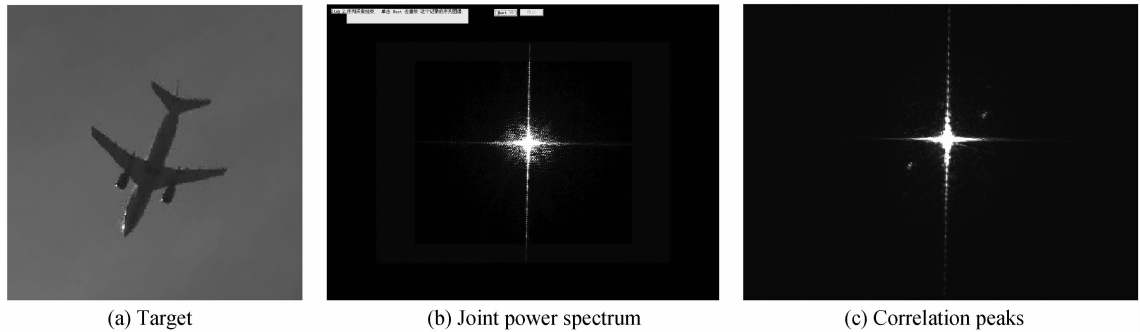


图 7 旋转  $40^\circ$  和放大 160% 的混合畸变飞机目标实验结果

Fig. 7 Hybrid-distortion planes' recognition result of magnifying 1.6 times and rotating  $40^\circ$

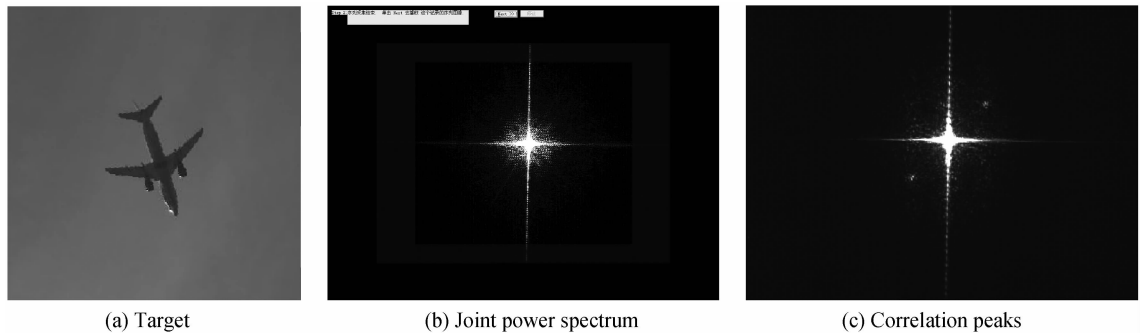


图 8 旋转  $80^\circ$  和放大 120% 的混合畸变飞机目标实验结果

Fig. 8 Hybrid-distortion planes' recognition result of magnifying 1.2 times and rotating  $80^\circ$

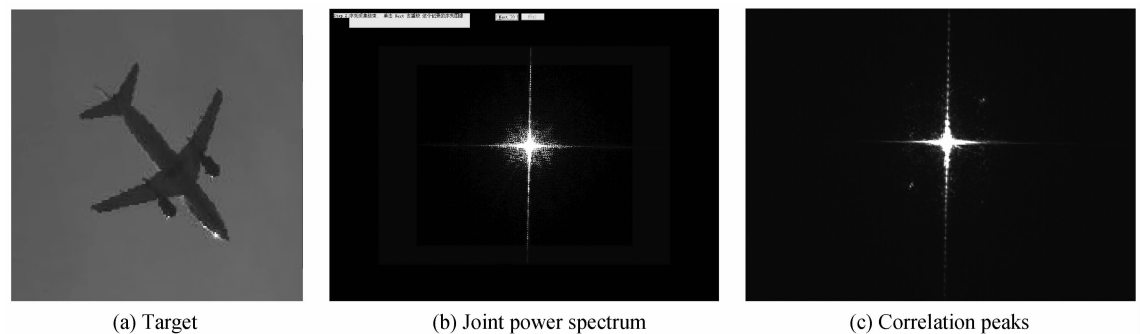


图 9 旋转  $100^\circ$  和放大 200% 的混合畸变飞机目标实验结果

Fig. 9 Hybrid-distortion planes' recognition result of magnifying 2 times and rotating  $100^\circ$

真实飞机的大小,故由 MATLAB 模拟各混合畸变飞机目标以测试本文所提方法的可行性(依据该方法制作的联合图像写入到 SLM1,系统则会输出对应的(b)、(c)实验结果);(b)为拉普拉斯锐化后的功率谱图像,在 computer 2 上得到;(c)为相关峰图像(由此可求出相关峰强度),在 computer 3 上得到.从三个混合畸变飞机的相关峰图中观察到响应的相关峰清晰明亮,中央衍射级旁瓣较小,这表明面积极坐标变换与形态学膨胀相结合的方法在联合变换相关器上实现了混合畸变飞机的识别,其混合畸变容差为旋转  $0\sim 100^\circ$ 、比例  $100\%\sim 200\%$ .

另一方面,识别实验利用双核 2.2 GHz 的低配笔记本电脑和光电混合联合变换相关器完成,完成识别的时间均在 0.33 s 左右,仅为文献[15]中识别时间的七分之一,因而具有良好的实时性优点,时间稳定性也较好.

进行原因分析得出,各混合畸变组合的待测飞机目标经过面积极坐标变换后,其旋转和比例变化转化为联合图像辐角方向上的平移变化.又由于本身具有平移不变性,故光学相关识别系统可实现混合畸变目标的识别.同时,由于形态学膨胀对联合图像边缘的合理加粗,有效缓解了目标边缘的断点现象,提高了目标与模板的相关度,故得到更好的识别效果.此外,由于面积极坐标变换只需要计算面积和进行极坐标变换,不用制作大量畸变训练图像,因而具有较好的实时性.

### 3.2 方法的比较

面积极坐标变换算法与极坐标对数变换算法的区别在于对混合畸变目标的比例畸变处理方式不同.前者在极坐标变换之前用面积变换的方法减小目标的比例畸变对目标识别的影响,而后者在极坐标变换之后利用极径的对数压缩来实现,导致压缩后图像宽度过窄,改进方法中添加了一个乘积因子.新方法改进的极坐标对数变换算法的实验结果比较见图 10、11,目标为旋转  $20^\circ$ 、放大  $180\%$  的畸变飞机.图 10 为面积极坐标变换处理结果,相关峰清晰明亮,相关峰强度达到 200,可实现对畸变飞机的识别.图 11 为极坐标对数变换的处理结果,由于强度值太低,相关峰已淹没在噪音之中,无法识别出畸变飞机.因此,新方法的混合畸

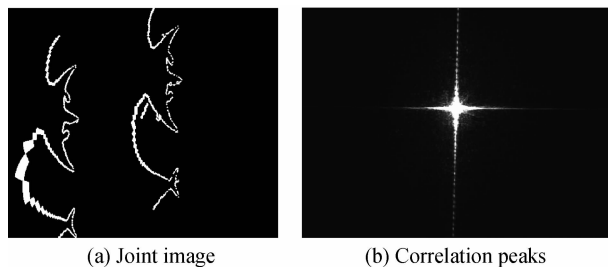


图 11 极坐标对数算法

Fig. 11 Log-polar algorithm

变识别能力优于极坐标对数变换.

## 4 结论

为了解决目标识别技术的混合畸变难题,本文提出了一种新的算法——面积极坐标变换算法,该方法在很好地处理旋转畸变的同时,采用了一种新的比例畸变识别方法(面积变换法).面积极坐标变换与形态学膨胀相结合的方法具有良好的混合畸变识别能力,且兼具实时性的特点,实验表明,该方法可实现混合畸变目标的光学识别,识别所需时间为 0.33 s,仅为文献[15]识别完成时间的七分之一,同时大大提高了可识别目标的混合畸变尺度:旋转畸变容差为  $0^\circ\sim 100^\circ$ ,比例畸变容差为  $100\%\sim 200\%$ ,扩大了文献 [5-6]、[9]、[15] 等的混合畸变识别范围.对于更大尺度混合畸变目标仍可部分识别,但相关峰减弱.该方法的混合畸变识别能力优于改进的极坐标对数变换和综合鉴别函数法,时间复杂度远小于综合鉴别函数法及其衍生方法,因而在目标识别领域具有良好的应用前景.

### 参考文献

- [1] EDWARD H, ALVARO C, MARTIAL H. Making specific features less discriminative to improve Point-based 3D object recognition[C]. IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2010: 2653-2660.
- [2] CHEN Yu, MIAO Hua, LANG Qi, et al. Application of mellin transform in opto-electronic hybrid target detection technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(2): 421-423.  
陈宇,苗华,郎琪,等.梅林变换在光电混合目标探测技术中的应用[J].中国激光,2009,36(2):421-423.
- [3] HU Hai-tao, PING Zi-liang, WU Bin. Quick algorithm of image moments with rotational invariance[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(2): 394-398.  
胡海涛,平子良,吴斌.具有旋转不变性的图像矩的快速算法[J].光学学报,2010,30(2):394-398.
- [4] SHEN Xue-ju, WANG Yong-zhong, LI Ying-hua, et al. Unconstrained wiener synthetic discriminant function arithmetic research[J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(4): 630-634.  
沈学举,王永仲,李英华等.非约束维纳滤波综合鉴别函数算法研究[J].光子学报,2006,35(4):630-634.
- [5] WU Wei, ZHOU Jin-peng, WANG Xing-shu, et al. Design of matched filters for image correlation recognition of distortion targets[J]. Journal of Applied Optics, 2009, 1(30): 11-15.  
吴伟,周金鹏,王省书,等.用于畸变目标相关识别的匹配滤波

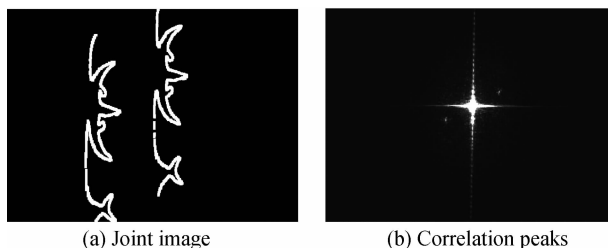


图 10 面积极坐标和膨胀算法

Fig. 10 Area-polar and dilation algorithm

- 器设计[J].应用光学,2009,1(30):11-15.
- [6] SHANG Ji-yang, ZHANG Yu, ZHANG Qi-bo, *et al.* Recognition technology of hybrid-distortion target in cluttered background[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(3): 342-347.  
尚吉扬,张宇,张淇博,等.复杂背景下混合畸变目标识别技术[J].光子学报,2013,42(3):342-347.
- [7] ZHANG Ye, QU Hong-song, ZHAO Jian, *et al.* Log-polar image matching for moving target attitude detection[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(6): 11-15.  
张叶,曲宏松,赵建,等.对数极坐标图像匹配在目标姿态测量中的应用[J].光电工程,2007,34(6):11-15.
- [8] WU You-peng, WANG Hong-xia, ZHOU Zhan-rong, *et al.* Simulation of circular harmonic Mellin filter in pattern recognition[J]. *Laser Technology*, 2007, **31**(1): 86-88.  
吴有朋,王红霞,周战荣,等.圆谐梅林滤波器在模式识别中的计算机仿真研究[J].激光技术,2007,31(1):86-88.
- [9] LV Zhan-wei, DENG Chuan-jia. Application of Fourier-Mellin transformation(FMT) in distortion-invariant image recognition [J]. *Journal of Applied Optics*, 2009, **30**(5): 783-786.  
吕占伟,邓传加.傅里叶-梅林变换(FMT)在畸变-不变图像识别中的应用[J].应用光学,2009,30(5):783-786.
- [10] JIAO Ji-chao, ZHAO Bu-jun, ZHOU Gang. A fast image registration algorithm based on fourier-mellin transform for space image[J]. *Acta Armamentarii*, 2010, **31**(12): 1551-1556.  
焦继超,赵保军,周刚.一种傅里叶-梅林变换空间图像快速配准算法[J].兵工学报,2010,31(12):1551-1556.
- [11] ZHANG Su, WANG Wen-sheng. Optical correlation recognition of the moving target in cluttered background[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 0107001-3.  
张肃,王文生.复杂背景下运动目标的光学相关识别[J].光学学报,2012,32(1):0107001-3.
- [12] WANG Wen-Sheng, CHEN Yu, LIANG Cui-ping, *et al.* Hybrid optoelectronic joint transform correlator for recognition of target in cluttered scenes[C]. SPIE, 2005, **5642**: 204-212.
- [13] CHEN Xi-chun, CAO Feng-mei, JIN Wei-qi. Recursive model of forward motion blurred image based on polar coordinates[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(3): 552-556.  
陈喜春,曹峰梅,金伟其.基于极坐标的相向运动图像模糊的递归模型[J].光子学报,2007,36(3):552-556.
- [14] WANG Li, LI Yan-jun, ZHANG Ke. The application of target recognition algorithm based on log-polar transformation for imaging guidance[J]. *Journal of Astronautics*, 2005, **26**(3): 330-333.  
王立,李言俊,张科.对数极坐标变换识别算法在成像制导中的应用[J].宇航学报,2005,26(3):330-333.
- [15] SHANG Ji-yang, ZHAN Xue, WANG Wen-sheng. Application of maximum average correlation height filter algorithm in distorted target recognition[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(8): 1232-1233.  
尚吉扬,张宇,陈驰等.最大平均相关高度滤波算法在畸变目标识别中的应用[J].光子学报,2011,40(8):1232-1233.