

文章编号 1004-924X(2008)01-0156-05

# 扩展等相关峰综合鉴别函数算法研究

沈学举,王永仲,姚广涛,胡文刚

(军械工程学院,河北 石家庄 050003)

**摘要:**为改进等相关峰综合鉴别函数(ECPSDF)算法,提出了在其约束条件中利用空域构造样本 $(f_i(x,y) - \beta m(x,y))$ 取代训练样本 $f_i(x,y)$ ,将平均训练样本 $m(x,y)$ 引入到ECPSDF算法的约束条件中,得到了扩展ECPSDF算法(EECPSDF)。在匹配滤波器设计过程中,针对目标图像、训练样本数和训练样本畸变量间隔,选择合适的 $\beta$ 值,使设计的匹配滤波器性能达到最佳。对飞机图像的相关识别进行了模拟和实验,结果表明,当训练样本角间距分别取 $6^\circ$ 和 $8^\circ$ 时,其 $\eta$ 值分别由0.858 4和0.671 9减小为0.214 5和0.186 5,EECPSDF算法能较好地克服ECPSDF算法的缺点。

**关键词:**光学相关识别;匹配滤波器;等相关峰综合鉴别函数算法;扩展等相关峰综合鉴别函数算法

中图分类号:O438.2;TP391 文献标识码:A

## Study on extended equal correlation peak synthetic discriminant function algorithm

SHEN Xue-ju, WANG Yong-zhong, YAO Guang-tao, HU Wen-gang

(Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

**Abstract:** To improve the Equal Correlation Peak Synthetic Discriminant Function (ECPSDF) algorithm, the samples  $(f_i(x,y) - \beta m(x,y))$  in space domain are used to replace the training samples  $f_i(x,y)$ , and the mean training sample  $m(x,y)$  is introduced into the constraint condition of ECPSDF algorithm. Thus the Extended ECPSDF (EECPSDF) algorithm is obtained. According to the target image, the number of training samples and the interval of distortion variables of training sample, the appropriate  $\beta$  value is chosen to optimize the matched filter. The experiment for the correlation recognition of the plane image is carried out, and the results show that the  $\eta$  value decrease to 0.214 5 and 0.186 5 from 0.858 4 and 0.671 9 respectively when angle interval of training sample is equal to  $6^\circ$  and  $8^\circ$ , which can improve performance of ECPSDF algorithm.

**Key words:** optical correlation recognition; matched filter; Equal Correlation Peak Synthetic Discriminant Function (ECPSDF) algorithm; Extended ECPSDF (EECPSDF) algorithm

## 1 引言

光学相关器包括联合变换相关器<sup>[1]</sup>和Vander Luget 相关器(Vander Luget Correlator, VLC)。VLC中匹配滤波器设计的基本算法<sup>[2-15]</sup>是综合鉴别函数<sup>[3-4]</sup>(Synthetic Discriminant-Function, SDF)算法,如等相关峰综合鉴别函数(Equal Correlation Peak Synthetic Discriminant-Function, ECPSDF)算法<sup>[4]</sup>、最小平均相关能量(Minimum Average Correlation Energy, MACE)匹配滤波器算法<sup>[9]</sup>、最大平均相关高度(Maximum Average Correlation Height, MACH)匹配滤波器算法<sup>[12]</sup>等等。

ECPSDF是按照SDF概念提出的一种匹配滤波器算法<sup>[3]</sup>,由于其约束条件仅考虑了训练样本图像和相关点在原点的值而没有考虑所有输入图像和整个输出相关平面<sup>[12]</sup>,因此ECPSDF算法设计的匹配滤波器畸变容限低,且相关面上产生较大的旁瓣。

针对ECPSDF算法的缺点,通过改造其约束条件,得到了扩展ECPSDF(Extended ECPSDF, EECPSDF)算法。

## 2 扩展等相关峰综合鉴别函数

### 2.1 等相关峰综合鉴别函数

设训练样本图像 $f_i(x, y)$ 有 $d$ 个像素,其中 $i=1, 2, \dots, N$ ,可表示为 $d$ 维列向量,则空域中的SDF为<sup>[3]</sup>

$$h(x, y) = \sum_{i=1}^N \lambda_i f_i(x, y), \quad (1)$$

其中 $\lambda_i$ 是叠加系数。约束条件为 $N$ 个训练图像在相关平面上原点处的相关输出取确定值,用矢量表示为

$$\mathbf{X}^T \mathbf{h} = \mathbf{u}, \quad (2)$$

其中训练样本集 $\mathbf{X} = [f_1, f_2, \dots, f_N]$ 是 $d \times N$ 维矩阵, $\mathbf{u} = [1, 1, \dots, 1]^T$ 表示相关输出约束的列矢量, $\top$ 表示转置。式(1)中系数矩阵可表示为

$$\mathbf{a} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{u}, \quad (3)$$

其中 $\mathbf{R} = \mathbf{X}^+ \mathbf{X}$ , $+$ 表示矩阵复共轭转置。则空间频率域中匹配滤波函数为

$$H(u, v) = \{\text{FT}(h(x, y))\}^*, \quad (4)$$

其中 $*$ 表示矩阵复共轭,FT表示傅里叶变换。

### 2.2 扩展等相关峰综合鉴别函数

由于ECPSDF算法的缺点源于其约束条件仅考虑了训练样本和输出相关面的原点值,要改进ECPSDF算法的性能需要对其约束条件进行修改。按照文献<sup>[12]</sup>所述,VLC中理想相关输出应是平均训练样本图像的相关输出。因此,在ECPSDF算法的约束条件中使用空域构造样本( $f_i(x, y) - \beta m(x, y)$ )来代替训练样本图像 $f_i(x, y)$ ,将平均训练样本图像引入约束条件中,得到的匹配滤波器算法称为EECPSDF算法,其中 $(x, y)$ 是空间坐标, $m(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_i(x, y)$ 是平均训练样本图像, $N$ 是训练样本数, $\beta$ 是权重因子。通过构造样本中的 $\beta$ 参量,调节平均训练样本图像和单个训练样本图像影响约束条件的相对重要性,选择合适的 $\beta$ 参量可使EECPSDF算法特性达到最佳。

在EECPSDF算法中将ECPSDF算法的约束条件式(2)表示为 $N$ 个空域构造样本在相关面上原点处的相关输出取确定值。用矢量表示为

$$\mathbf{X}'^T \mathbf{h}' = \mathbf{u}, \quad (5)$$

其中构造样本集 $\mathbf{X}'$ 是 $d \times N$ 维矩阵,可表示为

$$\mathbf{X}' = [f_1 - \beta m, f_2 - \beta m, \dots, f_N - \beta m]. \quad (6)$$

空域中的SDF为

$$h'(x, y) = \sum_{i=1}^N \lambda_i' f_i(x, y), \quad (7)$$

其中 $\lambda_i'$ 是叠加系数,式(7)中系数矩阵可写为

$$\mathbf{a}' = \mathbf{R}'^{-1} \mathbf{u}, \quad (8)$$

其中 $\mathbf{R}' = \mathbf{X}'^+ \mathbf{X}'$ 。则空间频率域中的匹配滤波函数可写为

$$H'(u, v) = \{\text{FT}(h'(x, y))\}^*. \quad (9)$$

从式(5)~(9)中可看出,由于构造样本的引入,改变了SDF中各训练样本叠加系数,从而改变了2.1中的ECPSDF。选择最佳 $\beta$ 参量可使所设计的匹配滤波器性能最好。当 $\beta=0$ 时,EECPSDF算法对应于ECPSDF算法。

## 3 模拟和实验结果

分别使用EECPSDF算法和ECPSDF算法针对图1所示的飞机图像来设计匹配滤波器,并通过模拟和实验来比较两种算法所设计匹配滤波

器的性能。图像大小为 256 pixel×256 pixel。



图 1 0°飞机图像

Fig. 1 Plane image at 0° (aspect angle)

### 3.1 模拟结果

以 6°和 8°角间距旋转飞机图像得到两个训练样本集,改变  $\beta$  值按 EECPSDF 算法和迂回相位编码方法设计制作匹配滤波器。每个训练样本集含 9 个训练样本图像,分别覆盖 48°和 64°角度

范围。同时,分别以 3°和 4°角间距旋转飞机图像构造了同样角度范围的输入目标图像集。

图 2 为不同  $\beta$  值的匹配滤波器模拟输出的相关峰值随输入目标图像旋转角变化而变化的曲线,图 2(a)所用匹配滤波器对应训练样本角间距为 6°,图 2(b)所用匹配滤波器对应训练样本角间距为 8°。图 2 中曲线是按图 2(a)中极大相关峰值归一化为 255 灰度值画出的。其中  $\beta=0$  曲线对应于 ECPSDF 算法。

$$\sigma^2 = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (c_i - \bar{c})^2$$

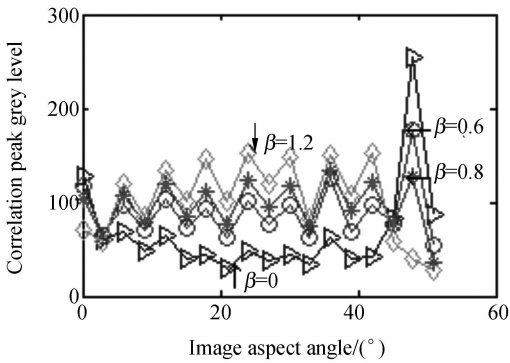
表征匹配滤波器的畸变容限<sup>[11]</sup>,其中  $M$  是输出相关峰数目, $c_i$  是第  $i$  相关峰灰度值。 $\sigma$  值越大,畸变容限越小。用平均相关峰灰度值  $\bar{c} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M c_i$  比较使用不同匹配滤波器时的输出相关峰值高低, $\bar{c}$  越大,输出相关峰值越高。用  $\eta = \frac{\sigma}{\bar{c}}$  综合地表征所设计匹配滤波器的畸变容限和输出相关峰值的高低, $\eta$  值越小,畸变容限越大,输出相关峰值越高,滤波器性能越好。模拟得到的  $\bar{c}, \sigma, \eta$  参量值见表 1。

表 1  $\sigma, \bar{c}$  和  $\eta$  的模拟值

Tab. 1 Simulation results of  $\sigma, \bar{c}$  and  $\eta$

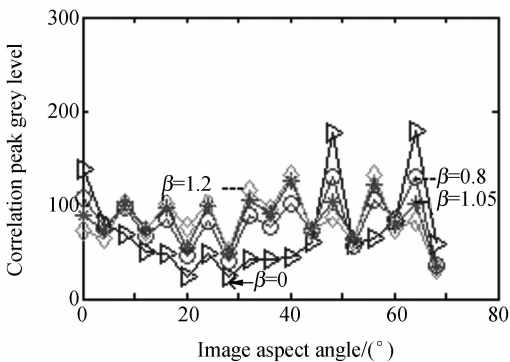
$\beta$		$\sigma$ grey level		$\bar{c}$ grey level		$\eta$	
6°	8°	6°	8°	6°	8°	6°	8°
0	0	51.40	45.28	66.63	70.60	0.772	0.641
0.6	0.8	28.21	31.22	88.94	79.52	0.317	0.393
0.75	0.9	25.28	26.76	94.61	81.55	0.267	0.328
0.8	1	25.60	24.49	96.31	83.03	0.266	0.295
0.85	1.05	27.35	24.45	98.17	83.31	0.279	0.294
1	1.1	32.59	25.48	100.89	83.25	0.323	0.306
1.2	1.2	39.28	26.75	102.08	83.04	0.385	0.322

由图 2 和表 1 可看出,训练样本图像角间距为 6°时,图 2(a)中对应  $\beta=0.8$  的曲线  $\eta$  值最小,相应的  $\sigma, \bar{c}$  和  $\eta$  参量分别为 25.60、96.31 和 0.266,匹配滤波器性能最好。而  $\beta=0$  时的 ECPSDF 算法对应的曲线  $\eta$  值最大,相应的  $\sigma, \bar{c}$  和  $\eta$  参量分别为 51.40、66.63 和 0.772,匹配滤波器性能最差。类似地,训练样本图像角间距为 8°时,取  $\beta=1.05$ ,所设计的匹配滤波器性能最好。



(a) 训练样本角间距为 6°

(a) Angular separation of training sample is 6°



(b) 训练样本角间距为 8°

(b) Angular separation of training sample is 8°

图 2 模拟相关峰值随目标图像旋转角变化而变化的曲线

Fig. 2 Simulation curves of correlation peak grey level with the variation of image rotation angle in the input scene

### 3.2 初步实验结果

用 3.1 中制作的匹配滤波器和输入场景图像进行实验并比较不同  $\beta$  值的匹配滤波器性能。实验中焦距为 400 mm 的傅里叶透镜  $L_1$  和  $L_2$  构成  $4f$  系统,空间光调制器  $SLM_1$  和  $SLM_2$  分别置于输入平面( $L_1$  前焦面)和滤波平面( $L_1$  后焦面),其型号为 GAX1,像素间距为  $36 \mu\text{m}$ ,光源为 He-Ne 激光器,波长为  $0.6328 \mu\text{m}$ 。L 是准直透镜,将激光束准直为平面波。将目标图像和匹配滤波器分别加载到  $SLM_1$  和  $SLM_2$  上,由 CCD 摄像头探测输出平面( $L_2$  后焦面)上的相关点。

由实验数据得到实验曲线如图 3 所示(对应于图 2 中模拟曲线),实验测量过程中设定图像采集卡的灰度和对比度参量不变,且使接收的最大相关峰灰度值  $< 255$ 。图 3 中曲线也是将最大相关峰值归一化为 255 灰度值画出的。

由实验得到的  $\sigma, \bar{c}, \eta$  值示于表 2 中。从图 3 (a)、(b)中曲线和表 2 中的数据可以看出,训练样本角间距为  $6^\circ$  时,  $\beta=0.8$  对应的曲线  $\eta=0.2145$  为最小值,匹配滤波器性能最好;若  $\beta=0$ , 曲线对应的  $\eta=0.8584$  为最大值,匹配滤波器性能最差。训练样本角间距为  $8^\circ$  时,取  $\beta=1.05$ , 匹配滤波器性能最好。同样地,若  $\beta=0$ , 匹配滤波器性能最差。

表 2  $\sigma, \bar{c}$  和  $\eta$  的实验值

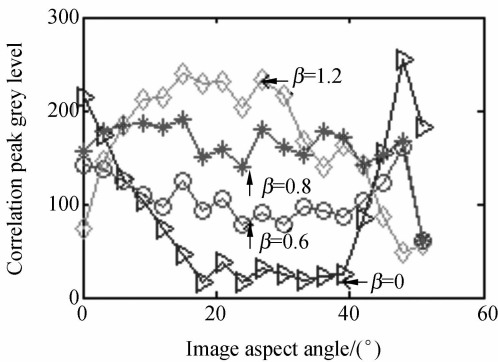
Tab. 2 Experimental results of  $\sigma, \bar{c}$  and  $\eta$

$\beta$	$\sigma$		$\bar{c}$		$\eta$		
	grey level		grey level				
	$6^\circ$	$8^\circ$	$6^\circ$	$8^\circ$	$6^\circ$	$8^\circ$	
0	0	75.27	64.87	87.68	96.54	0.858 4	0.671 9
0.6	0.8	24.67	43.61	104.99	127.96	0.234 9	0.340 8
0.8	1	24.78	26.81	115.5	85.69	0.214 5	0.312 9
1	1.05	45.13	25.13	131.04	127.96	0.344 4	0.196 5
1.2	1.2	62.81	38.48	164.4	131.67	0.382 0	0.292 2

由于激光功率的波动、匹配滤波器的对准精度等因素的影响,尽管实验数据和模拟数据并不完全一致,但两者所反映的匹配滤波器的性能是一致的,即训练样本角间距为  $6^\circ$  时,  $\beta=0.8$ , 匹配滤波器性能最好,训练样本角间距为  $8^\circ$  时,取  $\beta=1.05$ , 匹配滤波器性能最好。

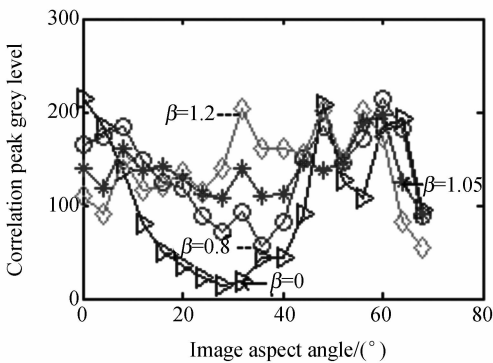
## 4 结 论

通过分析 ECPSDF 算法的缺点及其原因,利用构造样本中的  $\beta$  参量将平均训练样本引入 ECPSDF 算法的约束条件中,得到 EECPSDF 算法。用 EECPSDF 算法设计匹配滤波器对图 1 中目标图像相关识别的模拟和实验结果表明,训练样本角间距分别取  $6^\circ$  和  $8^\circ$  时,  $\beta$  分别取 0.8 和 1.05,设计的匹配滤波器性能最好,其  $\eta$  值比 ECPSDF 算法减小 3~4 倍。因此 EECPSDF 算法利用空域构造样本,在设计匹配滤波器时,针对目标图像、训练样本数和训练样本畸变量间隔等,选择合适的  $\beta$  值,可以有效地改进 ECPSDF 算法的缺点,明显提高匹配滤波器的畸变容限和输出相关峰值。



(a) 训练样本角间距为  $6^\circ$

(a) Angular separation of training sample is  $6^\circ$



(b) 训练样本角间距为  $8^\circ$

(b) Angular separation of training sample is  $8^\circ$

图 3 实验相关峰值随目标旋转角变化而变化的曲线  
Fig. 3 Experimental curves of correlation peak grey level with the variation of image rotation angle in the input scene

## 参考文献:

- [1] 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):376-384.  
WANG Y R, XU P, WANG Q P, *et al.*. Relation between parameters in hybrid optical/electronic joint transform correlator[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005,13(3):376-384. (in Chinese)
- [2] HESTER C F, CASASSENT D. Multivariant technique for multiclass pattern recognition[J]. *Applied Optics*, 1980, 19 (11):1758-1761.
- [3] KUMAR B V K V. Tutorial survey of composite filter designs for optical correlators[J]. *Applied Optics*, 1992, 31 (23) : 4773-4801.
- [4] CASASSENT D, CHANG W T. Correlation synthetic discriminant function[J]. *Applied Optics*, 1986, 25(14): 2343-2350.
- [5] CASASSENT D. Unified synthetic discriminant function computational formulation[J]. *Applied Optics*, 1984, 23 (10): 1620-1627.
- [6] OPPENHEIM A V, LIM J S. The importance of phase in signals[J]. *Proc. IEEE*, 1981, 69(5):529-541.
- [7] HORNER J L, GIANINO P D. Phase-only matched filtering[J]. *Applied Optics*, 1984, 23(16):812-816.
- [8] KUMAR B V K V. Minimum-variance synthetic discriminant functions[J]. *J. Opt. Soc. Am. A.*, 1986, 3 (10): 1579-1583.
- [9] MAHALANOBIS A, KUMAR B V K V, CASASSENT D. Minimum average correlation energy filters[J]. *Applied Optics*, 1987, 26 (17): 3633-3640.
- [10] REFREGIER P H, FIGUE J. Optimal trade-off filter for pattern recognition and their comparison with Weiner approach[J]. *Opt. Computer Process*, 1991, 1(1):3-10.
- [11] RAVICHANDRAN G, CASASSENT D. Minimum noise and correlation energy optical correlation filter[J]. *Applied Optics*, 1992, 31(11):1823-1833.
- [12] MAHALANOBIS A, KUMAR B V K V, SONG S, *et al.*. Unconstrained correlation filters[J]. *Applied Optics*, 1994, 33 (17):3751-3759.
- [13] ALKANHAL M, KUMAR B V K V, MAHALANOBIS A. Improving the false alarm capabilities of the maximum average correlation height correlation filter[J]. *Opt. Eng.*, 2000, 39(5): 1133-1141.
- [14] 沈学举,王永仲.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.  
SHEN X J, WANG Y ZH. Unconstrained wiener synthetic discriminant function arithmetic research[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006,35(4):630-634. (in Chinese)
- [15] 沈学举,王永仲.非约束纯相位匹配滤波器设计研究[J].光子学报,2007,36(5):945-949.  
SHEN X J, WANG Y ZH. Research on unconstrained phase-only matched filtering design[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(5):945-949. (in Chinese)

作者简介:沈学举(1963—),男,山东人,硕士,副教授,主要从事光学相关识别方面的研究。E-mail:shxjoptics@yahoo.com.cn