

# 光电混合综合判别相关器

何万涛 洪汝桐

(西南技术物理研究所计算机室, 成都 610041)

连铜溢

(北京理工大学信息工程学院光电工程系, 北京 100081)

**摘 要** 论述了综合判别函数(SDF)的基本理论, 简明地给出了用综合判别函数实现畸变不变相关的技术途径。在此基础上, 构造了一个光电混合综合判别相关器实验系统, 并用它实现了三重(位移、旋转、尺度)畸变不变实时相关识别。

**关键词** 光学模式识别, 综合判别函数, 相关器

由于光学处理和电子学处理的优缺点互补, 因此在视觉图像识别的研究中, 人们越来越趋向于采用光电混合处理方式。在光电混合处理的研究中, 怎样使系统具有畸变不变功能。一直是国内外学者着力解决的问题。对该问题的研究已经尝试了多种方法<sup>[1, 2]</sup>。但是直到1984年, Casasent 提出用综合判别函数<sup>[3]</sup>制作匹配空间滤波器(MSF), 进行畸变不变相关识别, 才真正在畸变不变的研究上实现了突破<sup>[4]</sup>。由于综合判别函数是脱机综合, 在线使用, 灵活性较大<sup>[5]</sup>。目前它被认为是解决光学模式识别(OPR)畸变不变相关的有效途径。本文对应用综合判别函数相关滤波技术实现畸变不变相关识别进行了深入细致的研究。

## 1 基本理论

综合判别函数的基本思想是将某类目标图像及其畸变图像以及有关图像组成一个训练集, 由训练集的这些图像进行组合, 找出综合判别函数, 据此做出综合判别函数匹配空间滤波器, 当正确目标输入时, 相关面内有一相关峰, 且峰值不随目标畸变而改变。采用综合判别函数与光电混合处理技术, 对某一特定目标进行三维畸变不变实时光学相关识别分为类内识别(*intra-class recognition*)与类间识别(*inter-class recognition*)两种情况:

### 1.1 类内识别

综合综合判别函数的目的是寻求这样一个滤波函数, 使其对于同一种试验物体的各种畸变形态(旋转、方位等)输入时都得到相等的相关输出峰值(ECP)。设  $\{f_n\}$  为特定目标畸变像的训练样本集,  $n = 1, \dots, N$ ;  $\{f_n\}$  应在统计上能很好地代表物体的各种畸变形态, 如旋转、尺度和方位等等。假设滤波函数  $h$  是训练集  $\{f_n\}$  的线性组合, 按等相关峰的定义,  $h$  与  $\{f_n\}$  的

任一成员  $f_n$  的相关峰为一常数(取为 1)。即:

$$f_n \star h = C = 1. \quad (1)$$

其中  $\star$  代表相关运算, 并且  $h$  是  $\{f_n\}$  的线性组合, 也就是:

$$h = \sum_{n=1}^N a_n f_n. \quad (2)$$

由于只考虑相关输出的中心峰值, 则可以只用投影形式(点乘)表示相关, 而不必考虑(1)式和(2)式的  $f$  和  $h$  的空间关系。这样将(2)代入(1)式得:

$$f_n \star h = f_n \cdot h = f_n \cdot \sum_{m=1}^N a_m f_m = \sum_{m=1}^N a_m r_{nm} = 1. \quad (3)$$

其中  $r_{nm}$  表示  $\{f_n\}$  的交相关矩阵  $R$  的矩元,  $r_{nm} = f_n \cdot f_m$ , 将(3)式写成矩阵形式, 则有:

$$Ra = (1, \dots, 1)^T = \mu. \quad (4)$$

对  $R$  求逆, 可得:

$$a = R^{-1}\mu. \quad (5)$$

因此, 求  $h$  的问题变为求训练样本函数的相关矩阵的逆阵问题。

## 1.2 类间识别

### 1.2.1 多类(multilevel 综合判别函数)问题

假定第一类物体训练样本数为  $N_1$ , 第二类物体训练样本数为  $N_2$ , 第三类物体训练样本数为  $N_3$ , 根据定义, 有:

$$f_n \star h = n. \quad (6)$$

其中  $n = 1, 2, 3, \dots$  表示不同类物体相关输出水平, 滤波函数  $h$  被定义为:

$$h = \sum_{m=1}^{N_1+N_2+N_3} a_m f_m. \quad (7)$$

式中  $a_m$  的矩阵解为:

$$a = R_3^{-1}\mu_3 \quad (8)$$

其中  $R_3$  是包括全部训练样本的  $(N_1 + N_2 + N_3)$  阶交相关矩阵,  $\mu_3 = [1, \dots, 1, 2, \dots, 2, 3, \dots, 3]^T$ ,  $\mu_3$  中有  $N_1$  个 1,  $N_2$  个 2,  $N_3$  个 3。这是以一个滤波器的不同输出水平来进行分类。

当  $N_3 = 0$  时, 多类问题则变为了两类问题, 此时区分两类物体的依据是滤波器的两种不同的输出水平, 1 对应第一类物体, 2 对应第二类物体。

### 1.2.2 $N$ 类(K-tuple 综合判别函数)问题

以 4 类 ( $N = 4$ ) 为例, 根据  $2^K = N$ , 有  $K = 2$ , 即二个二值(0, 1)输出的滤波器。假设第一、二、三、四类物体训练样本数分别为  $N_1, N_2, N_3, N_4$ ; 四类物体分别表示为  $\{f_1\}, \{f_2\}, \{f_3\}, \{f_4\}$ ; 两个滤波器表示为  $h_a$  和  $h_b$ 。根据定义:

$$h_a = \sum_{n=1}^{N_1+N_2+N_3+N_4} a_n f_n, \quad h_b = \sum_{n=1}^{N_1+N_2+N_3+N_4} b_n f_n, \quad (9)$$

其中的系数  $a_n$  和  $b_n$  的矩阵解为:

$$a = R_4^{-1}\mu_a, \quad b = R_4^{-1}\mu_b. \quad (10)$$

式中  $R_4$  为包括全部  $N_1 + N_2 + N_3 + N_4$  个训练样本的交相关矩阵;

$\mu_a = [0, \dots, 0, 0, \dots, 0, 1, \dots, 1, 1, \dots, 1]^T$ , 其中有  $N_1 + N_2$  个 0,  $N_3 + N_4$  个 1;

$\mu_b = [0, \dots, 0, 1, \dots, 1, 0, \dots, 0, 1, \dots, 1]^T$ , 其中有  $N_1 + N_3$  个 0,  $N_2 + N_4$  个 1。

在实际上为不混淆第一类和没有物体输入这两种情况, 要区分  $N$  类, 需  $K + 1$  个滤波器。

以  $m = 4$  为例, 除  $h_0$  和  $h_1$  外, 还须  $h_2, h_3 = \sum_{n=1}^{N_1+N_2+N_3-N_4} c_n f_n$ , 对应的系数矩阵解为:  $c = R_4^{-1} \mu_c$ , 式中  $\mu_c = [1, \dots, 1, 1, \dots, 1, 1, \dots, 1, 1, \dots, 1]^T$ , 矩元为全 1。

## 2 综合判别函数相关器的技术途径

### 2.1 预处理

#### 2.1.1 图像噪声的消除

数字图像往往存在着噪声干扰, 这些噪声将与图像信号迭加, 对后续处理将产生极为不利的影响, 因此对于采集的数字图像, 必须采用预处理, 消除噪声, 提高图像的质量。为此采用了平均值滤波的方法, 即对于灰度图像  $f$ , 设像素  $f(i, j)$  周围 8 个像素的灰度平均值为  $a$ , 进行如下处理: 若  $|f(i, j) - a| < \epsilon$ ,  $f(i, j) \leftarrow a$ ; 若  $|f(i, j) - a| \geq \epsilon$ ,  $f(i, j)$  不变。

#### 2.1.2 训练样本的预处理

经计算机模拟相关及光学相关均证明, 直接以原始图像综合它的综合判别函数, 其样本与综合判别函数相关的信噪比低, 得不到尖锐的相关峰, 产生这种现象的主要原因是原始图像的低频成份占优势。为提高  $S/N$ , 必须进行增强图像高频成份的预处理。为此采用 sobel 边缘增强算法: 对于灰度图像  $f$ , 计算以像素  $f(i, j)$  为中心的  $3 \times 3$  区域同 sobel 算子的加权和, 生成微分图像  $g$ 。sobel 算子为:

$$\Delta_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad \Delta_j = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}.$$

因此  $g(i, j) = \sqrt{\Delta_i^2 + \Delta_j^2}$

#### 2.1.3 综合判别函数的预处理

采用功率谱平滑化处理, 以增强综合判别函数有高频分量。

### 2.2 综合判别函数的脱机(off-line)综合

#### 2.2.1 $r$ 的计算

首先调样本  $f$  预处理, 并经傅里叶变换得到  $f$  的频谱  $F_f$ ; 然后计算其共轭相乘  $F_f^* F_f$ , 并计算  $\mathcal{F}^{-1}(F_f^* F_f)$ , 得到  $f \star f$ ; 最后搜索最大峰值  $P_{ij}$ , 这样从  $r_{ij} = P_{ij} / \sqrt{P_{ii}} \sqrt{P_{jj}}$ , 得到矩元  $r$ 。

#### 2.2.2 $h$ 的计算

$R$  求逆, 得到  $a = R^{-1} \mu$ , 据(1)式可得  $h = \sum_{n=1}^N a_n f_n$ 。

### 2.3 综合判别函数的在线(on-line)光学执行

综合判别函数的光学执行过程如图 1 所示。将综合判别函数模板图像经图像子系统输出到 CRT-LCLV 上, 用准直激光束读取综合判别函数的图像信息; 然后透镜

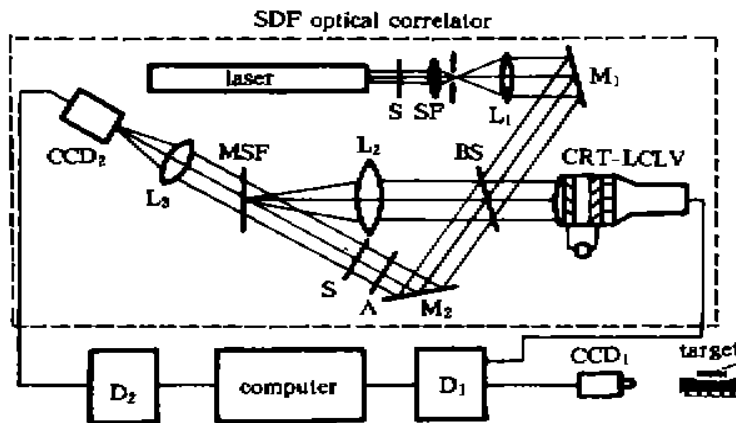


Fig. 1 Experimental arrangement for SDF optical correlator  
A: attenuator. S: Shutter, Laser: 30 mw He-Ne linearly polarized, D<sub>1</sub>: Input scene display, D<sub>2</sub>: Correlation display, SF: 20 times objective/10 micron pinhole

$L_2$  对综合判别函数作傅里叶变换, 在  $L_2$  的焦平面上用全息干版同时记录综合判别函数的功率谱和与之匹配的参考光; 再后取下全息干版, 对其作显影、定影处理, 形成空间匹配滤波器后再精密复位; 最后遮住参考光, 依次输入训练样本及非样本图像进行相关峰检测, 相关峰的信息经摄像机  $CCD_2$  探测后, 结果存入计算机。

### 3 实验结果

#### 3.1 训练样本的采集

1) 为检验该相关器的旋转、尺度不变性, 首先用计算机产生上一幅比较简单的二值化的模拟坦克像, 如图 2 所示。这幅图像的 8 个旋转方向(每  $45^\circ$  一幅), 和三个不同尺度(1:2:3), 就形成一套共 24 幅图像组成的一个旋转、尺度不变的训练样本集。

2) 为使相关器能实用化, 必须考察它能否对实际物体进行畸变不变相关识别, 但是由于采用的空间光调制器分辨率不高。对实际物体同时实现旋转不变和尺度不变有一定的困难, 因此在实际工作中, 是将实际物体的旋转和尺度两种畸变分开考虑的。① 用 CCD 摄像机将坦克模型(图 3)输入图像系统(每帧  $256 \times 256 \times 8 \text{ bit}$ ), 并由系统软件实现 8 个方向(每个方向为  $45^\circ$ )旋转, 构成一组 8 幅图像组成的旋转畸变不变训练样本集。② 用 CCD 摄像机的变焦物镜摄入坦克模型的三个不同比例(1:2:3)图像, 形成一组 3 幅图像组成的尺度畸变不变训练样本集。

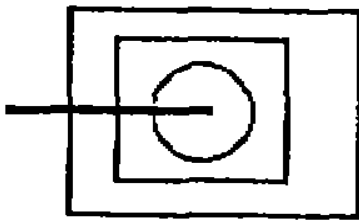


Fig. 2 Rotation scale invariant training image



Fig. 3 Rotation invariant training image

#### 3.2 计算机模拟相关

##### 3.2.1 计算机生成图像(图 2)的模拟相关

实验表明各个训练样本同综合判别函数相关的信噪比都较高, 相关峰很锐。图 4 是这 24 幅图像组成的综合判别函数, 图 5 是某一样本与综合判别函数计算机模拟相关的结果。

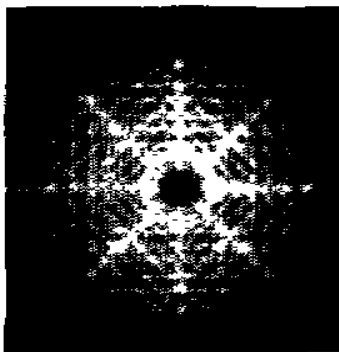


Fig. 4 Rotation scale invariant SDF



Fig. 5 Computer simulation correlation of Fig. 2

##### 3.2.2 Sobel 预处理后的旋转不变模拟相关

将坦克模型(图 3)的 8 个方向模板经 sobel 变换后, 综合成一旋转不变的综合判别函数, 如图 6 所示。计算机模拟的相关情况表明, 各样本与综合判别函数相关的  $S/N$  较高, 相关峰

很锐。图 7 显示的是  $S/N$  最低的相关情况。

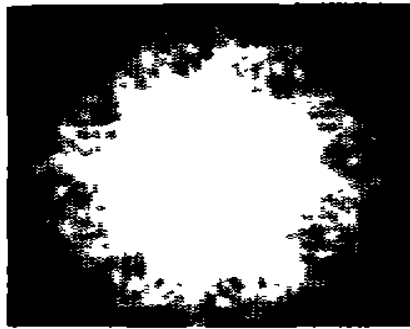


Fig. 6 Rotation invariant SDF of sobel preprocessing

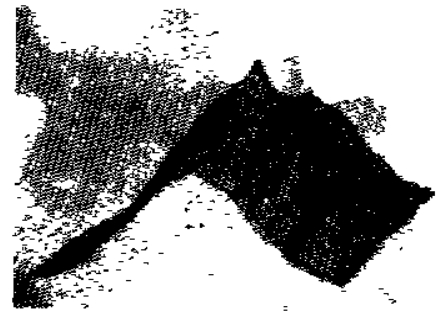


Fig. 7 Computer simulation correlation of Fig. 3 sobel preprocessing

### 3.2.3 Sobel 预处理后的尺度不变模拟相关

将坦克模型(图 3)的三个尺度(1:2:3)的模型像,经 Sobel 预处理后,综合一个尺度不变的综合判别函数,如图 8 所示。模拟相关的情况表明各样本与综合判别函数相关的  $S/N$  较高,相关峰很锐,图 9 显示的是  $S/N$  最低的相关情况。

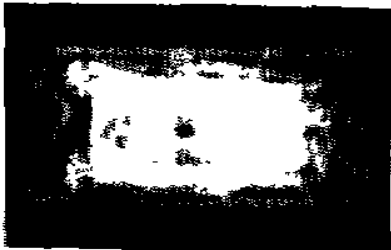


Fig. 8 Scale invariant SDF

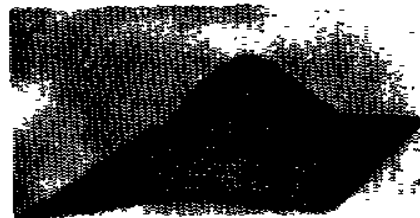


Fig. 9 Scale invariant computer simulation correlation

## 3.3 光电混合实时相关

### 3.3.1 旋转、尺度不变性

分别用图 4、图 6 和图 8 所示的综合判别函数进行混合处理,各样本与各自综合判别函数的光学相关峰如图 10 所示。图 10(a)是坦克模拟像在旋转、尺度两种畸变同时存在时,任一训练样本与综合判别函数(图 4)相关的结果,图 10(b)是坦克模型像只有旋转畸变时,任一训练样本与综合判别函数(图 6)相关的结果,图 10(c)是坦克模型像只有尺度变化时,任一训练样本与综合判别函数(图 8)相关的结果。从图中可以看出,相关的  $S/N$  较高,相关峰很锐。这说明本相亲器具有旋转、尺度不变性。

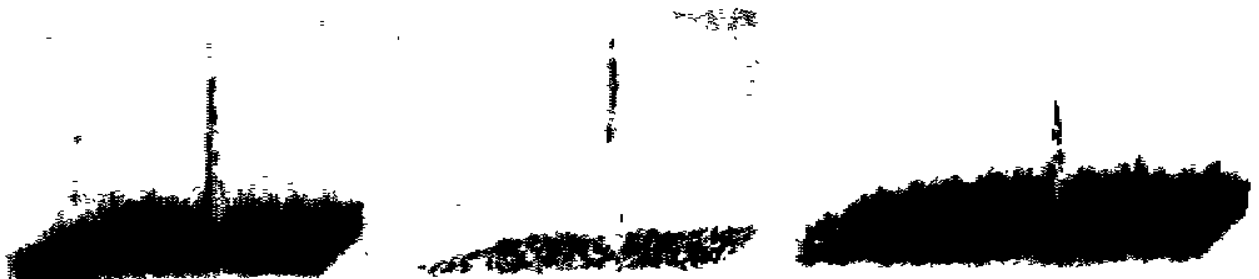


Fig. 10 Real-time optical correlation

(a) Rotation scale invariant optical correlation, (b) Rotation invariant optical correlation, (c) Scale invariant optical correlation

### 3.3.2 位移不变性

在综合判别函数相关器(图 1)中,坦克模型在视场内作二维运动,其运动轨迹如图 11 所

示。目标在相关平面的相关点也将发生相应的运动，目标每一位置所对应的相关点的测量坐标见表 1。据表 1 数据绘制出相关点的移动轨迹，可以看出目标和相关点的移动轨迹极其相似，这说明本相关器具有位移不变性。

Table 1. Correlation point location coordinate

target location	O	O <sub>1</sub>	O <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>
corelation point coordinate	(0, 0)	(-125, 60)	(60, 202)	(117, 160)

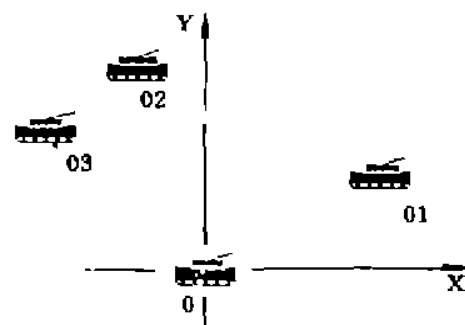


Fig. 11 Target moving track

**结 论** 通过综合判别函数脱机数字综合到在线光学执行的实验不难看出：1) 样本的 Sobel 预处理对综合综合判别函数及相关效果是较为理想的；2) 单匹配滤波器通过光学执行后可实时旋转、尺度、位置不变的相关识别。这说明以综合判别函数技术与相干光空间匹配滤波相结合的光电混合相关器能够实现实时畸变不变光学相关识别。这一技术的好处是将光学的高速、高分辨、多目标位置不变等优点与计算机的灵活性相结合，针对不同的任务，选择不同的畸变类型(不限于旋转、尺度)来进行综合判别函数综合，以达到特定的目的。这一技术在制导、机器人视觉、文字识别等方面有广泛的应用前景。

### 参 考 文 献

- [1] D. Casasent, Shao-Feng Xia, Andrew J. Lee *et al.*, Real-time deformation invariant optical pattern recognition using coordinate transformations. *Appl. Opt.*, 1987, 28(5): 938~942
- [2] 宋建中, 旋转、比例、平移不变的图形识别系统. *光学机械*, 1987, 2: 1~11
- [3] D. Casasent, Unified synthetic discriminant function computational formalation. *Appl. Opt.*, 1984, 23(10): 1620~1627
- [4] D. Casasent, Computer generated holograms in pattern recognition: a review. *Opt. Engng.*, 1985, 24(5): 724~730
- [5] D. Casasent, W. Rozzi, Donald Fetterly, Projection synthetic discriminant function performance. *Opt. Engng.*, 1984, 23(6): 716~720

## Electro-Optical Hybrid Synthetic Discriminant Function Correlator

He Wantao      Hong Rutong

(Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041)

Lian Tongshu

(Department of Opto-Electronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

(Received 19 October 1994; revised 22 December 1994)

**Abstract** In this paper, the Synthetic Discriminant Function (SDF) algorithm is reviewed and a method to realize SDF distortion invariant correlation is suggested. On the basis of above, we successfully demonstrated and electro-optical hybrid SDF correlator experimental system and realized shift, rotation and scale distortion invariant correlation using the SDF correlator.

**Key words** optical pattern recognition, synthetic discriminant function, correlator.