

利用光学微分预处理的强度光学相关

陈文忠 王肇圻 母国光

(南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

提要: 本文把采用菲涅耳全息滤波器的强度光学相关识别系统与光学微分预处理系统相结合, 通过对输入图像进行边缘增强预处理, 强度相关器的鉴别能力得到了改善。给出了理论分析和实验演示的结果。

关键词: 强度光学相关

Intensity optical correlation through optical differentiation preprocessing

Chen Wenzhong, Wang Zhaoqi, Mu Guoguang

(Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin)

Abstract: A high discrimination intensity optical correlation system is presented. By using a lensless spatial differentiation filter to realize edge enhancement for the input images, the discrimination of the intensity optical correlator with the Fresnel holographic filter is improved. Theoretical analysis and experimental demonstrations are given.

Key words: intensity optical correlation

一、引 言

采用菲涅耳全息滤波器(FHF)实现强度光学相关识别, 已经进行了较深入的研究^[1, 2, 3]。这种新型滤波器具有诸多优点。

但是, 用 FHF 的强度光学相关系统, 是对光强函数而不是复振幅函数进行相关运算, 它所处理的是非负实函数, 因而降低了相关检测的鉴别力。另外, 对于实际中的很多物体, 如飞机、坦克等, 它们的傅里叶频谱都含有较多的零频分量, 自相关分布是一个较大的弥散斑, 这就更需要解决特征识别的鉴别力问题。利用光学微分预处理对图像进行边缘增强, 由于消除了图像中的零频分量和一些低频分量, 突出了高频信息, 从而锐化了自相关峰, 提高了图像的鉴别力。本文就是把一般 FHF 强度光学相关系统和光学微分预处理系统结合起来, 得到一个既具有灵活性又具有高鉴别力的光学相关检测系统。

二、理论分析

仅考虑一维的情况, 将表示特征信号强度分布的实函数 $T(x)$ 展开成具有不同空间频率 f_n 的余弦函数的叠加^[4]:

$$T(x) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} I_n(f_n) \text{rect}\left(\frac{x}{2L}\right) \cos(2\pi f_n x) \quad (1)$$

其中 $I_n(f_n)$ 为第 n 级余弦分量的权重, $2L$ 为取样间隔。为简单起见, 这里仅考虑零频分量对相关峰的影响。上式可以分解为

$$T(x) = I_0 \text{rect}\left(\frac{x}{2L}\right) + \sum_{n \neq 0} I_n(f_n) \text{rect}\left(\frac{x}{2L}\right) \cos(2\pi f_n x) \quad (2)$$

其中 I_0 为零频分量。特征信号的强度自相关分布为

$$\begin{aligned} I(u) &= \int_{-\infty}^{+\infty} T(x) T^*(x+u) dx \\ &= \frac{|I_0|^2}{2L} \wedge\left(\frac{u}{2L}\right) + \sum_{n \neq 0} |I_n(f_n)|^2 \int_{-\infty}^{+\infty} \text{rect}\left(\frac{x}{2L}\right) \cdot \text{rect}\left(\frac{x+u}{2L}\right) \\ &\quad \cdot \cos(2\pi f_n x) \cos[2\pi f_n(x+u)] dx \end{aligned} \quad (3)$$

其中第一项的三角函数 $\wedge\left(\frac{u}{2L}\right)$ 是由零频分量所提供的背景, 与求和项相比较, 它是一个缓变函数。(3)式成立的条件是忽略不同空间频率之间的互相关的影响。

我们定性分析 $\wedge\left(\frac{u}{2L}\right)$ 对相关峰锐度的影响。设(3)式中求和项的相关峰高度为 $2h$, 半强度宽点距峰值点为 h , 由 $\wedge\left(\frac{u}{2L}\right)$ 形成的缓变背景高度为 $2H$ 。因而在有背景的情形下, 半强度点距峰值点为 $h+H$ 。相对于无背景的情形, 半强度点向轮廓线的下部移动了 H 的距离, 因而半强度宽度增大, 相关峰变宽。并且零频分量越大(即 H 越高), 相关峰就越宽。图像中的一些低频分量也有类似的作用。为了得到较锐的相关峰, 就需要消除或者减少图像的零频分量和低频分量, 边缘增强的光学微分预处理就是一种行之有效的手段。

三、微分图象的强度光学相关

为了实现微分图像的强度光学相关识别, 必须首先制备一个空间微分滤波器, 用来对特征物或输入物进行光学微分预处理, 得到边缘增强的微分图像。采用秦秀香^[5]报道的无透镜空间微分滤波器进行微分预处理。无透镜空间微分滤波器的记录装置如图1所示。用一束平面波和一束球面波经过两次曝光来记录一维微分滤波器。会聚球面波的位置用图1中的 d 和 a 两个量来表征。平面波束垂直于全息干板 H 作第一次曝光。第二次曝光之前, 平面波束的方向改变一微小角度 $\Delta\theta$, 并且两次曝光时间相同。经过适当的显影定影处理, 得到了所需要的无透镜空间微分滤波器。二维无透镜空间微分滤波器可以用类似的方法来制备。

微分图像的非涅耳全息滤波器, 是用图2所示的光路制备的。从 P_1 平面输入特征物 $g(x, y)$, 在透镜 L_1 的后焦面 P_2 上放置无透镜空间微分滤波器。适当调整微分滤波器的位置

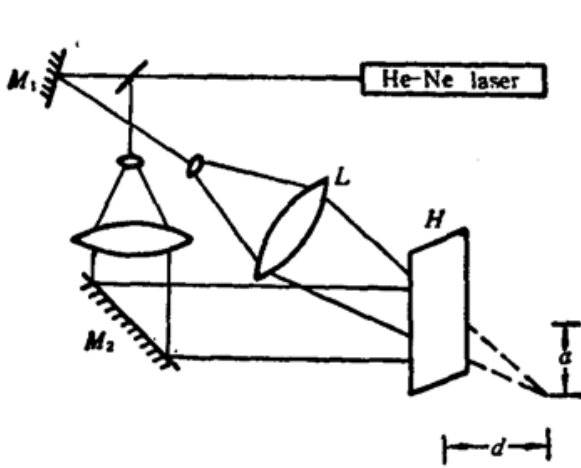


Fig. 1 Optical path of the lensless spatial differentiation filter

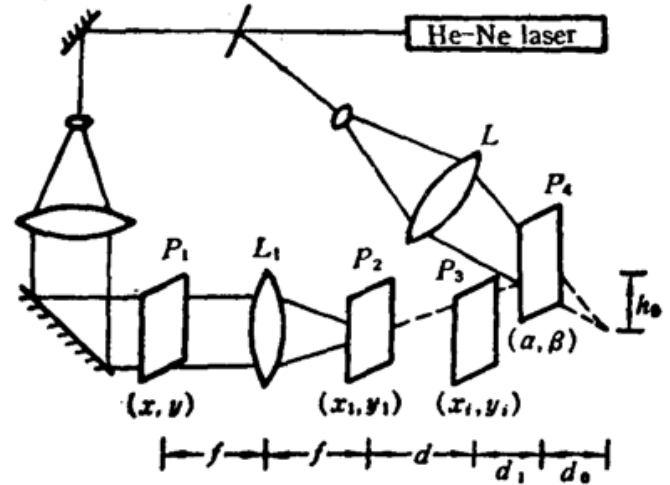


Fig. 2 Recording arrangement of the Fresnel holographic filter for differential images

(沿 x_1 方向移动一个距离 $b = \lambda/2\Delta\theta$), 在 P_3 平面上即可得到边缘增强的微分图象:

$$g_i(x_i, y_i) = g(x, y) * [\delta(x + a + b + \lambda\theta f, y) - \delta(x + a + b, y)] \quad (4)$$

其中 * 号表示卷积运算, (x, y) 和 (x_i, y_i) 分别为输入平面 P_1 和微分输出平面 P_3 的坐标。以此微分图像作为物光, 在其后为 d_1 的 P_4 平面上放置全息干板, 用一会聚参考光记录微分图像的菲涅耳全息滤波器。会聚参考光的会聚点距离全息干板 d_0 , 距离系统的光轴 h_0 。在菲涅耳近似下, 到达全息干板平面的物光波和参考光波分别为

$$O(\alpha, \beta) = C_1 \iint_{-\infty}^{+\infty} g_i(x_i, y_i) e^{\frac{j\pi}{\lambda d_1}[(\alpha - x_i)^2 + (\beta - y_i)^2]} dx_i dy_i \quad (5)$$

$$R(\alpha, \beta) = C_2 e^{\frac{-j\pi}{\lambda d_0}[(\alpha - h_0)^2 + \beta^2]} \quad (6)$$

其中 C_1 和 C_2 是复常数, (α, β) 为 P_4 平面的坐标。经过适当的曝光显影处理, 即可得到微分图像的菲涅耳全息滤波器。其振幅透过率为

$$T(\alpha, \beta) \propto |R(\alpha, \beta) + O(\alpha, \beta)|^2 = |R|^2 + |O|^2 + R^*O + RO^* \quad (7)$$

在这四项衍射中, 和光学相关运算有关的一项为

$$\begin{aligned} T(\alpha, \beta) &= R(\alpha, \beta)O^*(\alpha, \beta) \\ &= C_3 e^{\frac{-j\pi}{\lambda d_0}[(\alpha - h_0)^2 + \beta^2]} \\ &\quad \times \iint_{-\infty}^{+\infty} g_i^*(x_i, y_i) e^{\frac{j\pi}{\lambda d_1}[(\alpha - x_i)^2 + (\beta - y_i)^2]} dx_i dy_i \end{aligned} \quad (8)$$

其中 C_3 也是复常数。

微分图像强度光学相关系统的光路如图

3 所示。该系统是由光学微分预处理和强度光学相关两个子系统组成的。从 P_1 平面输入待识别的物体 $f(x, y)$, 在其频谱面 P_2 上放置无透镜空间微分滤波器, 经过这一光学微分预处理子系统, 在 P_3 平面上可以得到边缘增强的微分图像 $f_i(x_i, y_i)$ 。在 P_3 平面放置一连续运动

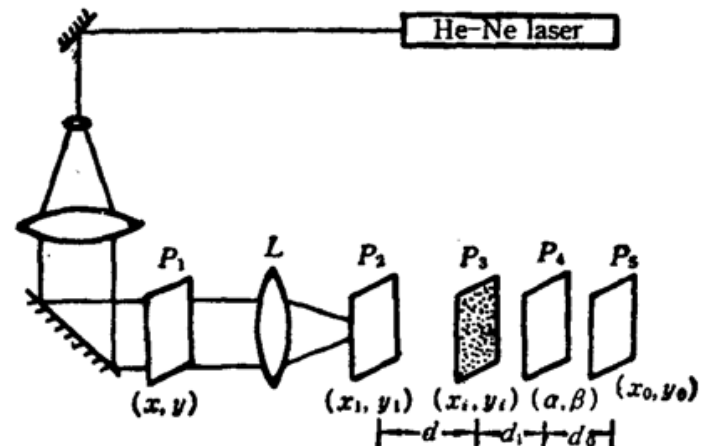


Fig. 3 Intensity optical correlation system for differential images

的漫散射屏,作为强度光学相关子系统的输入平面,同时将空间相干光转换成空间非相干光。把上面所制备的微分图像的非涅耳全息滤波器放在空间滤波平面 P_4 上, P_4 和 P_8 之间的距离为 d_1 。强度光学相关系统对于输入光强是线性的,因而表征系统输入输出关系的物理量是辐照脉冲响应函数。我们首先计算系统的脉冲响应函数。假设从相关系统的输入平面 P_3 输入一脉冲 $\delta(x_i - x', y_i - y')$, 它在 P_4 平面上的光波场是一发散球面波。那么刚从相关滤波器平面出射的光波场为

$$E(\alpha, \beta) = e^{\frac{j\pi}{\lambda d_1}[(\alpha - x')^2 + (\beta - y')^2]} T(\alpha, \beta) \quad (9)$$

相干脉冲响应函数是(9)式传播到 P_5 平面的菲涅耳衍射积分:

$$h(x_0, y_0; x', y') = \iint_{-\infty}^{+\infty} E(\alpha, \beta) e^{\frac{j\pi}{\lambda d_0}[(x_0 - \alpha)^2 + (y_0 - \beta)^2]} d\alpha d\beta \quad (10)$$

将(8)式和(9)式代入(10)式并完成积分。当满足条件 $d_1 = d_0$ 时可以得到

$$h(x_0, y_0; x', y') = g_i^*(x_0 + x' - h_0, y_0 + y') \quad (11)$$

辐照脉冲响应函数是脉冲响应函数模的平方:

$$h_i(x_0, y_0; x', y') = |g_i^*(x_0 + x' - h_0, y_0 + y')|^2 \quad (12)$$

系统的输出辐照度是相关系统输入函数辐照度与辐照脉冲响应函数的卷积:

$$I(x_0, y_0) = \iint_{-\infty}^{+\infty} |f_i(x_i, y_i)|^2 |g_i^*(x_0 + x_i - h_0, y_0 + y_i)|^2 dx_i dy_i \quad (13)$$

此即为边缘增强的微分图像的强度相关运算。

四、实验演示及结果

在本实验中所用的相干光源是一台 60 mW 氦氖激光器,记录介质是天津缩微技术开发公司生产的 HEP 633 型全息干板。利用特殊的“慢显影”处理技术,这种全息干板的衍射效率可达 30~40%。实验中选用图 4(a) 中的一幅图像作为输入物或特征物。经过无透镜空间微分滤波器进行光学微分预处理,得到边缘增强的微分图像如图 4(b) 所示。这一微分图像,用非涅耳全息滤波器实现强度光学相关识别,得到的自相关结果如图 4(c) 所示。为了作一比较说明,图 4(d) 给出了未经微分预处理的原输入图像的强度光学相关结果。可以看出,图像的鉴别力得到了明显的改善。

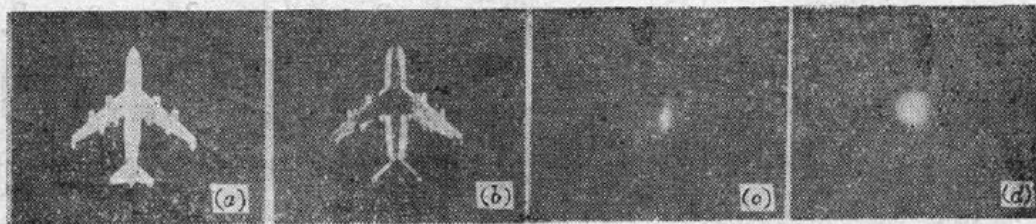


Fig. 4

为定量地说明鉴别力的改善情况,还作了计算机的模拟实验。我们以英文字母“O”,“O”和“T”作为靶物,用计算机模拟强度相关系统对字母“O”的鉴别力。鉴别力 Δ 定义为自相关峰和互相关峰高度差的相对值:

$$\Delta = \frac{h_{auto} - h_{cross}}{h_{auto}} \times 100\% \quad (14)$$

式中 h_{auto} 和 h_{cross} 分别代表自相关峰的高度和互相关峰的高度。实验中用 256×256 点的快速傅里叶变换处理 128×128 点的二维图像(英文字母)。对于未经微分预处理的情形,“O”和“O”的鉴别力为 $\Delta=1.2\%$,“O”和“T”的鉴别力为 $\Delta=21.0\%$ 。而对于经微分预处理的情形,“O”和“O”的鉴别力为 $\Delta=12.6\%$,“O”和“T”的鉴别力为 $\Delta=48.5\%$ 。可见,鉴别力有很大的改善,并且二图像的差别越小(如“O”和“O”),鉴别力的改善就越明显。表 1 给出了计算机模拟实验的具体数据,其中相关峰高度的数据是经过归一化的。

Table 1 correlation discrimination with original images and correlation images respectively

Input image	correlation	correlation peak weight	discriminating force
Original image O and C	$O \otimes O$	1.000	1.2
	$O \otimes C$	0.988	
Differential image O' and C'	$O' \otimes O'$	0.719	12.6
	$O' \otimes C'$	0.627	
Original image O and T	$O \otimes O$	1.000	21.0
	$O \otimes T$	0.790	
Differential image O' and T'	$O' \otimes O'$	0.719	48.5
	$O' \otimes T'$	0.370	

参 考 文 献

- 1 G. G. Mu *et al.*, *Optik*, **75**(3), 97 (1987)
- 2 G. G. Mu. *et al.*, *Optik*, **76** (4), 139 (1987)
- 3 G. G. Mu *et al.*, *Opt. Lett.*, **13**(6), 434 (1988)
- 4 王肇圻,中国激光,**14** (11), 658 (1987)
- 5 秦秀香,光学技术,(6), 14(1981)

(上接第 696 页)

K 通过一个阀门给出 $3K$ 的三个符号函数 $J_0(K)$ 、 $J_1(K)$ 和 $J_2(K)$,而这三个符号函数和三个信号 x 、 y 和 z 分别通过三个与门。根据 K 的不同状态,有不同的变量输出。三值与门可用如图 4 所示的简化与门线路。

参 考 文 献

- 1 N. Bar-Chaim, K. Y. Lau *et al.*, *Proc. Soc. Photo. Opt. Inst. Eng.*, **466**, 65 (1984)
- 2 H. D. Law., *Proc. Soc. Photo. Opt. Inst. Eng.*, **466**, 69 (1984)
- 3 K. Okumura, Y. Ogawa *et al.*, *IEEE J. Quant. Electr.*; **QE-21**, 377 (1985)
- 4 S. Fukushima, T. Kurokawa *Opt. Lett.*, **12**, 965 (1987)
- 5 K. Okumura, Y. Ogawa *et al.*, *Opt. Lett.*, **9**, 515 (1984)