

菲涅尔全息滤波光强相关识别 的理论及实验依据

母国光 王许明

(南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

提 要

本文对用菲涅尔全息滤波器进行无透镜光强相关识别的问题重新进行了论证, 结果再次证明菲涅尔全息滤波器完全可以用作相关识别。

关键词: 菲涅尔全息滤波器、模式识别、无透镜系统、光强相关器。

一、引 言

我们于1986年在北京国际全息应用会议上首次提出用菲涅尔全息滤波器^[1]进行无透镜光强相关识别的概念, 并提供了理论依据及实验结果^[2, 3]。无透镜光强相关器具有如下优点: (1) 作为光强的空不变线性系统, 其对输入物及系统脉冲响应的位相畸变不敏感; (2) 对全息滤波器的面内平移具有不变性, 而其能容忍的面外移动量亦远远高于经典匹配滤波器; (3) 对滤波器的全息记录动态范围的要求低; (4) 由于采用空间非相干光照明, 系统的输出信噪比高, 不存在相干噪声的影响。(5) 整个系统只有一个滤波器, 一个输入器件和一个输出面(探测器)构成, 结构简单。这一点有别于其它光强相关器^[4, 5]。这些特点都是应用空间匹配滤波器(MSF)的振幅型相关器所不具备的。此技术在多色目标识别^[6], 白光图象识别^[7]等方面的应用都得到了理想的结果。

需要指出的是此系统对尺度及旋转变化的敏感性小于Vander Lugt型系统^[8], 但我们并不认为它具有尺度和旋转不变性。要解决这些问题需要借助梅林变换和圆余弦函数展开或多通道综合等方式^[9, 10]。

由于一个是光强相关, 一个是振幅相关, 在某种意义上说光强相关器的鉴别力不同于Vander Lugt型相关器, 但决不会“远低于”后者, 以致于达到“不适宜于作相关识别的”程度, 因为两种相关器所依据的原理都是函数的相关运算, 在本质上是相似的, 但前者所具有的优点是相干滤波所不能比拟的。我们曾于1988年对与异议文献^[11]相似的问题作过书面答复。现在, 我们也愿意就该文所提出的这些问题予以澄清, 以免混淆视听; 并愿意在必要时提供详细的理论及现场实验演示。

二、关于无透镜光强相关的理论

在我们以前发表的文章中^[2, 3], 就无透镜菲涅尔相关滤波器的行为给出了理论证据, 限

于篇幅,中间过程没能详细给出,但只要有兴趣认真地推导一下,不难得出后继的结果。

对于理论的问题,文献[11]认为“得到强度相关结果的数学推导”存在问题,“时间平均的求法是根本错误的”。该文给出一个由多重积分表示的输出光强的时间平均表达式,并由此断言不能得到我们所期望的光强相关的输出结果。其实,该文是由于武断地认定此多重积分无法再化简下去才导致了其对光强相关结果所下的根本错误的结论。

文献[11]所述重积分式应该写成

$$\begin{aligned}
 I(\xi, \eta) = & \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T \left\{ \iint f'(x_1, y_1) e^{i\theta(x_1 - vt, y_1)} \right. \\
 & \times f^*(x_1 d/d_1 + \xi d/d_2 + 2p_0 + h, y_1 d/d_1 + \eta d/d_2 + 2q_0) \\
 & \times e^{i\phi(x_1, y_1, \xi, \eta)} f'^*(x_2, y_2) e^{-i\theta(x_2 - vt, y_2)} \\
 & \times f(x_2 d/d_1 + \xi d/d_2 + 2p_0 + h, y_2 d/d_1 + \eta d/d_2 + 2q_0) \\
 & \left. \times e^{-i\phi(x_2, y_2, \xi, \eta)} dx_1 dy_1 dx_2 dy_2 \right\} dt, \quad (1)
 \end{aligned}$$

式中 $\theta(x, y)$ 是所附散射屏的位相延迟函数, $\phi(x, y, \xi, \eta)$ 为其它位相函数。上式中五个积分元的积分次序是可以互换的。先完成其中对时间的积分

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T e^{i[\theta(x_1 - vt, y_1) - \theta(x_2 - vt, y_2)]} dt = K \delta(x_1 - x_2, y_1 - y_2), \quad (2)$$

式中 K 为恰当常数。上式表达了照明物片光场的空间相干性(时间平均意义上的)。运动散射屏的作用就是消除照明光场的空间相干性^[4]。根据这一结果,可以对上面的重积分(1)式进行化简。完成对 x_2, y_2 的积分,我们有

$$\begin{aligned}
 I(\xi, \eta) = & \int f'(x_1, y_1) f^*(x_1 d/d_1 + \xi d/d_2 + 2p_0 + h, y_1 d/d_1 + \eta d/d_2 + 2q_0) \\
 & \times e^{i\phi(x_1, y_1, \xi, \eta)} \left[\int f'^*(x_2, y_2) f(x_2 d/d_1 + \xi d/d_2 + 2p_0 + h, y_2 d/d_1 + \eta d/d_2 + 2q_0) \right. \\
 & \left. \times e^{-i\phi(x_2, y_2, \xi, \eta)} K \delta(x_1 - x_2, y_1 - y_2) dx_2 dy_2 \right] dx_1 dy_1 \\
 = & K \int |f'(x_1, y_1)|^2 |f(x_1 d/d_1 + \xi d/d_2 + 2p_0 + h, y_1 d/d_1 + \eta d/d_2 + 2q_0)|^2 dx_1 dy_1, \quad (3)
 \end{aligned}$$

这正是我们已经给出的输出分布^[1], 是运动散射屏引起的时间平均作用的结果。我们并没有象文献[11]所说的那样“将两对不同的积分变量元错弄成了同一对积分变量元,而且将两个积分的乘积错弄成了两个乘积的积分”; 否则的话,根本不需要对时间进行平均就能得出所需要的相关结果。问题是批评者们宁愿做断言而不愿进行认真地推导。

综上所述,关于无透镜光强相关器的理论是正确的,是经得起推敲的。

三、关于相关识别

应用 $4f$ 光学信息处理系统的相干匹配滤波法(MSF)给出的输出结果可以表示为^[1]

$$I(\xi, \eta) = K' \left| \int f'(x, y) f^*(x + \xi, y + \eta) dx dy \right|^2 \quad (4)$$

其中 $f'(x, y)$ 为输入物光场的振幅分布, $f^*(x, y)$ 为待识别物片的振幅透过率分布的复共轭,即相关系统的脉冲响应函数。作为对照,在取 $d_1 = d_2 = d$ (“放大率为 1:1”)时,菲涅尔滤波

器给出的结果可以表示为

$$I(\xi, \eta) = K'' \int |f'(x, y)|^2 |f(x+\xi, y+\eta)|^2 dx dy \quad (5)$$

其中 $|f'(x, y)|^2$ 为输入物的光强分布, $|f(x, y)|^2$ 为待识别物体的光强透过率分布, 即相关系统的点扩散函数。从相关识别的角度看, 两种方法的意义是相同的, 本质上是一致的。下面我们以此为据, 给出在此两种不同相关器中, 两个不同类型的图象的自相关结果的计算机模拟实例。

如果认定在任何情况下, 由 Vander Lugt 型匹配滤波得到的自相关分布都接近一个“ δ 函数”是不恰当的。从事光学模式识别工作的人们都知道, 自相关中会出现“亮点”并不意味着相关输出结果中除此“亮点”外别无它物; 而实际结果中, 还有不很亮的旁伴出现。另一方面, 此“亮点”也不一定会接近一个 δ 函数, 而具有一定的峰宽。确实, 用不同字符制作各自的滤波器, 在输出面上形成的自相关分布当然是各不相同的。同样, “若用不同的字符输入到同一滤波器上, 相应的输出也必然是不同的”, 否则, 就无所谓识别。相关函数的分布取决于所选择的待识别函数及输入物函数的分布。一般地说, 待识别函数的分布越是无规, 相关分布中自相关峰才越明显(如图 1 所示)。当待识别函数为简单分布时, 其自相关峰的形状就会远离“ δ 函数”。这时它的峰/峰宽比和峰伴 (Peak to sidelobe) 比就会较小(如图 2 所示)。所以, 人们引入了仅位相匹配滤波^[13], 振幅补偿滤波^[14], 图象边缘增强^[15] 等技术来增强简单待识别函数中的高频成份比重, 以提高光学模式识别系统的鉴别能力及其它性能指标。

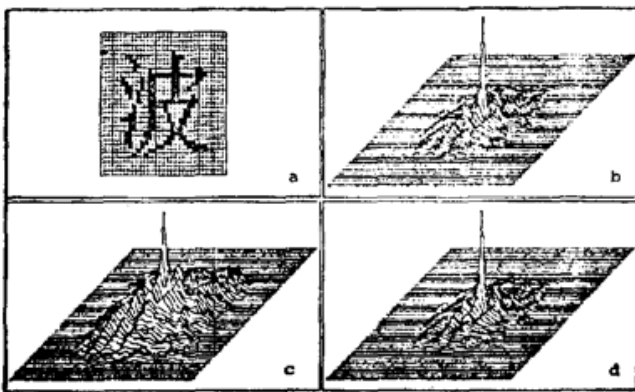


Fig. 1 Computer comparison of autocorrelation outputs of a complex object

- (a) the original reference object;
- (b) result by a matched spatial filter;
- (c) result by a Fresnel filter;
- (d) result by a Fresnel filter detected by a square-law detector

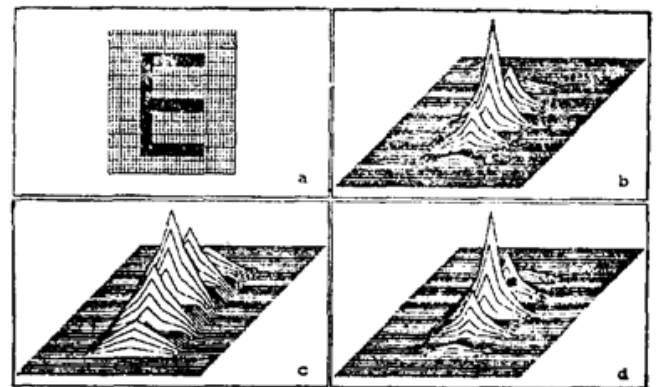


Fig. 2 Computer comparison of autocorrelation outputs of a simple object.

- (a) the original reference object;
- (b) result by a matched spatial filter;
- (c) result by a Fresnel filter;
- (d) result by a Fresnel filter detected by a square-law detector.

图 1 给出的是待识别图象较复杂的汉字“波”时的自相关结果。我们可以看出, 两种相关都会给出一个“接近 δ 函数”的自相关峰。在图 2 给出的英文字母“E”的两种不同相关的输出结果中, 伴峰的存在是不可避免的。在这些实例中, 经典匹配滤波(MSF)与非涅尔滤波(FHF)之间的差别仅在于, 前者是后者的平方率关系。用一个平方率探测器对光强相关器的输出结果进行探测, 所得到的结果就会与 Vander Lugt 型相关器的结果相似(如图 1d 和

2d 所示), 这一点用现有的 COD 单色摄像机和实时图象采集卡就可以办到。因为光强相关输出的高信噪比(无相干噪声影响, 正象文献[11]所说“光斑上的结构更加清晰”), 此输出结果的稳定性及重复性都很好。

四、关于文献[11]中的实验

文献[11]所述的实验现象是正确的, 但由此而发表的某些评论却不切实际。所列(1-3)的现象纯属简单全息再现问题, 与光强相关的问题无关。我们不难看到, 文献[11]所述之(4-5)现象以及紧接着的评论, 除个别句外, 都是对本文(3)式, 即文献[2]的(7)式的实验解释。

确实, 在光强相关器中, 输入面上的每一点都相当于与其它点无相干性的点光源。在记录滤波器时放置待识别物的位置上放置一个点光源, 相当于光强相关中的输入物函数为 δ 函数, 相应的输出结果

$$I_0(\xi, \eta) = K \int \delta(x, y) |f(xd/d_1 + \xi d/d_2 + 2p_0 + h, yd/d_1 + \eta d/d_2 + 2q_0)|^2 dx dy$$

$$\Rightarrow |f(\xi d/d_2 + 2p_0 + h, \eta d/d_2 + 2q_0)|^2 \quad (6)$$

是一个清晰的待识别物体的实像。当点光源在输入面内“左右”移动时, 即输入物成为 $\delta(x - x_0, y - y_0)$, 相应的输出结果

$$I_1(\xi, \eta) = K \int \delta(x - x_0, y - y_0) |f(xd/d_1 + \xi d/d_2 + 2p_0 + h, yd/d_1 + \eta d/d_2 + 2q_0)|^2 dx dy$$

$$\Rightarrow I_0(\xi + x_0 d_2/d_1, \eta + y_0 d_2/d_1), \quad (7)$$

正是在“右左”移动, 这也从一个侧面说明无透镜光强相关系统具有输入的平移不变性。当点光源“前后”移动时, 由于要求输出、输入平面满足^[2]

$$2/d = 1/d_1 + 1/d_2 \quad (8)$$

故 d_1 发生“大小”变化时, d_2 相应进行“小大”变化, 即输出是“后前”移动的。

文献[11]也承认加上运动的毛玻璃后, 字符 \mathbb{E} 上各点都发出非相干球面波, 每一点的球面波都在输出平面上给出各自的待识别物的实像, 在输出平面上是许多待识别物移位像的叠加, 这恰恰是无透镜光强相关的原理, 正是光强相关输出结果的定性描述。

在选取待识别物为字符 \mathbb{E} 时, 相关输出正如图 1 所示, 当然不可能接近 δ 函数(“一个”亮点), 而是一个具有自相关峰的复杂分布。在这一点上, Vander Lugt 型滤波器和我们的 FHF 滤波器的问题是一样的。

必须指出, 文献[11]中所提的让“毛玻璃准确复位, 在 P_3 平面上有明亮的光点出现”等等仍然是全息的再现问题, 与本题无关。

五、关于系统性能的结论

根据上面的论证, 我们得出结论:

(1) 我们提出的由菲涅尔全息滤波器组成的无透镜光强相关器能够进行相关识别是毫

无问题的,其理论是经过严格推论的。

(2) 系统中对输入物片及 FHF 滤波器的面内平移具有不变性,并被我们已发表的理论表述和大量的实验结果所证实。

(3) 本技术所依据的原理类似于 Vander Lugt 型相干匹配滤波,用于进行相关识别的判据是与之相同的。

(4) 文献[11]对菲涅尔全息滤波器所发表的评论及所下的结论是轻率而错误的。

参 考 文 献

- [1] Mu Guoguang *et al.*; *Digest of ICHA* (Beijing, 1986), 256.
- [2] G. G. Mu *et al.*; *Proc. SPIE*, 1987, Vol. 673, 546.
- [3] 王许明等;《中国激光》,1987, **14**, No. 9 (Sep), 537.
- [4] A. W. Lohmann; *Appl. Opt.*, 1968, **7**, No. 3 (Mar), 561.
- [5] O. I. Potaturkin *et al.*; *J. Optics*, 1980, **11**, No. 5 (Sep-Oct), 305.
- [6] Guo-Guang Mu *et al.*; *Opt. Lett.*, 1988, **13**, No. 5 (May), 434.
- [7] Mu Guoguang *et al.*; *Optik*, 1987, **76**, No. 4 (Jul), 139.
- [8] 王肇圻;《中国激光》,1987, **14**, No. 11 (Nov), 658.
- [9] Xu-Ming Wang; *J. Optics*, 1990, **21**, No.5 (Sep-Oct), 217.
- [10] Guo-Guang Mu *et al.*; *Optik*, 1989, **81**, No. 1 (Jul), 76.
- [11] 顾去吾等;《光学学报》,1991, **11**, No. 12 (Dec), 1101.
- [12] J. W. Goodman;《傅里叶光学导论》,(科学出版社,1976 北京),187.
- [13] J. L. Horner *et al.*; *Appl. Opt.*, 1984, **23**, No. 6 (Mar), 812.
- [14] Guo-Guang Mu *et al.*; *Appl. Opt.*, 1988, **27**, No. 16 (Aug), 3461.
- [15] Guo-Guang Mu *et al.*; *Optik*, 1990, **84**, No. 1 (Jan), 23.

Theoretical and experimental supports to Fresnel holographic filter used as an intensity correlator

MU GUOGUANG AND WANG XUMING

(*Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071*)

(Received 1 September 1991)

Abstract

Some reevaluations of the lensless intensity correlator using a Fresnel Holographic Filter (FHF) are presented. It is confirmly concluded that there is no problem for the FHF to be used as a lensless intensity correlator for pattern recognition.

Key words: FHF, pattern recognition, lensless system, intensity correlator.