

散斑剪切照像术中孔径函数的影响

严 跃
(淮阴师专)

提 要

本文对散斑剪切照像术中傅里叶滤波平面的光场分布进行了讨论, 得出滤波系统频谱面上的光场分布是以孔径函数的自相关和互相关的边界为周界; 对最佳拍摄孔径的设计作了探讨, 认为采用适当分离的孔径可以研善波效果, 提高条纹的质量。实验的验证结果与理论相吻合。

关键词: 散斑剪切照相术; 孔径函数

一、引 言

散斑剪切照像术作为一种新的表面应变测量方法已经逐步在工程上得到应用^[1], 近年来关于剪切照像术的频率成份的研究, 国内也有报道^[2]。本文主要是讨论散斑剪切照像术中孔径函数对滤波效果的影响, 提出滤波系统频谱面上光场分布以剪切孔径的相关函数为界, 可以通过改进孔径函数来改善输出条纹的亮度和对比度, 在对双缝孔径讨论的基础上得出最佳的孔径分布函数, 并推广到圆形孔径。实验验证了在不同孔径间距条件下, 频谱面的光场分布为孔径函数的相关函数, 并利用改进后的孔径得出比较好的实验结果。

二、原 理

散斑剪切照像的拍摄和滤波系统如图1和图2所示。在图1中设所拍摄的物函数为 $U(x, y)$ 经剪切成像系统后, 在像平面的理想几何像为 $U_1(x+\delta x, y)$ 和 $U_2(x-\delta x, y)$ 。 δx 是由剪切元件产生的像偏移量。当物函数 $U(x, y)$ 形变后, 理想几何像为 $U'_1(x+\delta x, y)$, $U'_2(x-\delta x, y)$, 如果考虑拍摄过程中孔径函数的影响。设孔径函数分别为 P_1 和 P_2 。实际像平面接收到的是物函数经剪切后得到的几何像与孔径函数所确定的脉冲响应 h 的卷积^[3], 在这里孔径函数所确定的脉冲响应为孔径的傅里叶变换

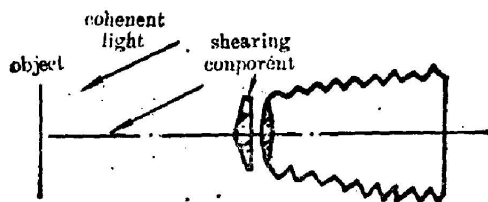


Fig. 1 Experimental set-up

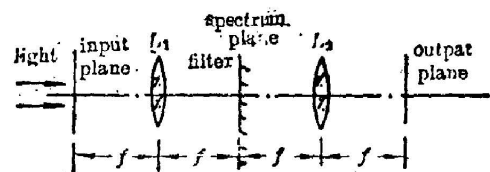


Fig. 2 4f Fourier filter system

$$h_i = \mathcal{F}P_i, \quad (1)$$

i 为孔径的序数。在相干光照明下, 像平面上的物函数形变前后记录到的光强和为

$$\begin{aligned} I = & (U_1 \otimes h_1)(U_1 \otimes h_1)^* + (U_2 \otimes h_2)(U_2 \otimes h_2)^* + (U_1 \otimes h_1)(U_2 \otimes h_2)^* \\ & + (U_1 \otimes h_1)^*(U_2 \otimes h_2) + (U_1' \otimes h_1)(U_1' \otimes h_1)^* + (U_2' \otimes h_2)(U_2' \otimes h_2)^* \\ & + (U_1' \otimes h_1)(U_2' \otimes h_2)^* + (U_1' \otimes h_1)^*(U_2' \otimes h_2), \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $*$ 表示函数的共轭复数。对于线性记录过程, 得到照片的透过率函数

$$t = a - bI, \quad (3)$$

a 和 b 是与记录过程有关的常数。将此透过率函数放入 $4f$ 滤波系统中, 频谱面上的光场分布 V 为透过率函数 t 的傅里叶变换。

$$V = \mathcal{F}t = a\mathcal{F}I - b\mathcal{F}I, \quad (4)$$

式中第一项为一 δ 函数, 可见频谱面上光场分布正比于 I 的傅里叶变换。利用卷积的傅里叶变换关系, 并考虑孔径函数为实函数则

$$\begin{aligned} V \propto \mathcal{F}I = & (\mathcal{F}U_1 \cdot \mathcal{F}h_1) \otimes (\mathcal{F}U_1^* \cdot \mathcal{F}h_1) + (\mathcal{F}U_2 \cdot \mathcal{F}h_2) \otimes (\mathcal{F}U_2^* \cdot \mathcal{F}h_2) \\ & + (\mathcal{F}U_1 \cdot \mathcal{F}h_1) \otimes (\mathcal{F}U_2^* \cdot \mathcal{F}h_2) + (\mathcal{F}U_1^* \cdot \mathcal{F}h_1) \otimes (\mathcal{F}U_2 \cdot \mathcal{F}h_2) \\ & + (\mathcal{F}U_1' \cdot \mathcal{F}h_1) \otimes (\mathcal{F}U_1^* \cdot \mathcal{F}h_1) + (\mathcal{F}U_2' \cdot \mathcal{F}h_2) \otimes (\mathcal{F}U_2^* \cdot \mathcal{F}h_2) \\ & + (\mathcal{F}U_1' \cdot \mathcal{F}h_1) \otimes (\mathcal{F}U_2^* \cdot \mathcal{F}h_2) + (\mathcal{F}U_1^* \cdot \mathcal{F}h_1) \otimes (\mathcal{F}U_2 \cdot \mathcal{F}h_2). \end{aligned} \quad (5)$$

频谱面上的光强分布 \mathcal{I} 为

$$\mathcal{I} = V \cdot V^*. \quad (6)$$

对于实际拍摄过程 U_1, U_2, U_1^*, U_2^* 及 $U_1', U_2', U_1'^*, U_2'^*$ 均为随机散斑场, 其傅里叶变换仍为随机散斑场, 在 $4f$ 系统频谱面上为一高频分布。由于 $h_1 = \mathcal{F}P_1, h_2 = \mathcal{F}P_2$, h_1, h_2 的傅里叶变换正好是孔径函数的几何像, 即 $\mathcal{F}h_1 = P_1, \mathcal{F}h_2 = P_2$ 。

(5) 式中括号内各项均可看作是被散斑调制的孔径函数, 当我们仅研究频谱面上光场分布周界时, 可以仅看作为孔径函数。一般情况下孔径函数均为实函数, 剪切也多为二维剪切。这样(5)式中第 1、5 项为孔径 P_1 的一维自相关, 第 2、6 项为孔径的一维自相关, 根据剪切干涉的原理^[1,2], 这四项中不含剪切干涉的条纹信息, 条纹信息包含在互相关的第 3、4、7、8 项中。

三、孔径设计

对于最简单的双缝孔径如图 3 中虚线所示, 孔径函数为

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= \text{rect} \frac{x - (D/2)}{d}, \\ P_2 &= \text{rect} \frac{x + (D/2)}{d}, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中 D 是双孔的中心距, d 是缝的宽度。

$P_1 P_2$ 的自相关和互相关均为 Λ -函数, 这时滤波系统频谱面上的光场分布如图 3 中实线所示, 中间的 Λ -函数为两个孔径各自自相关的迭加, 两边则与孔径的互相关对应。如果

$D=d$, 即两个孔并在一起, 可以看到中间的大函数将覆盖两边互相关 Δ -函数的绝大部分。

常用的剪切照像过程往往是在成像透镜前简单地加一个剪切镜(如头棱镜)形成两个靠在一起的半圆形孔径, 这样滤波系统中频谱面上的光场分布为两个半圆形孔径的一维互相关和自相关的迭合, 中间是自相关, 频谱面上的周界为一圆, 直角坐标下的方程为

$$x^2 + y^2 = R^2, \quad (8)$$

式中 R 为成像透镜的孔径半径值。互相关的周界为两个椭圆方程的复合。

$$\left. \begin{aligned} [(3/2)x]^2 + y^2 = R^2, \quad x \geq 0 \text{ 或 } x < 0 \\ (2x)^2 + y^2 = R^2, \quad x < 0 \text{ (或 } x \geq 0) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

互相关函数的空间图形如图 4 所示, 由于自相关部分的幅值为互相关部分的两倍, 所以自相关部分也覆盖着互相关的绝大部分。在这种情况下, 要使滤波系统输出面有比较好的对比度, 且有较强光强的条纹输出所要求的条件是苛刻的, 主要原因在于孔径函数自相关部分和互相关部分相互重叠, 滤波器的输出含有较大的直流成分; 或者为避开自相关的直流成分而将滤波孔向外移, 这样会使滤波器输出的光强比较弱。

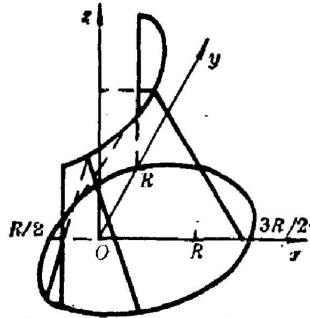


Fig. 4 Result of intercorrelation of half-circle functions

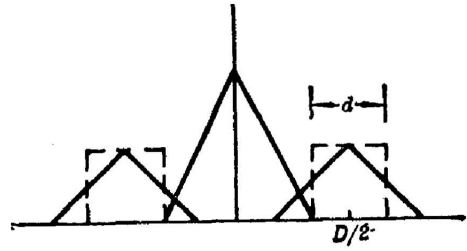


Fig. 3 Result of correlation between double rectangular apertures

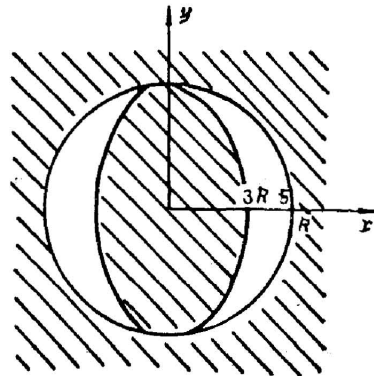


Fig. 5 Optimum aperture function

根据上面的分析讨论, 要同时在输出面上得到高对比度和高强度的条纹必须使孔径函数的自相关部分和互相关部分在频谱面上分离, 达到这个目的最简单的方法是在拍摄过程中使两个孔径函数分离开一定的距离。按一维矩形函数的相关结果可知, 自相关与互相关部分不重叠所要满足的条件为

$$D \geq 4d. \quad (10)$$

若为充分利用成像透镜的孔径可以将两个孔设计为两个相向的月牙形孔径, 如图 5 所示, 其边界方程为一个圆和它的内接椭圆。

$$x^2 + y^2 = R^2, \quad [(5/3)x]^2 + y^2 = R^2. \quad (11)$$

它可以保证对任何一个 y 值, x 均满足 $D=4d$ 的条件。(剪切方向与 x 轴平行)

四、实验验证

拍摄系统光路如图 1, 剪切元件为一双棱镜, 成像透镜焦距为 25 cm, 矩形孔径的宽度 $d=1$ cm, 为了比较, 采用了 $D=d$, $D=2d$, $D=3d$ 和 $D=4d$ 四种孔径间距进行了实验。滤波系统采用 $4f$ 系统, 透镜 L_1L_2 的焦距均为 25 cm, 图 6(a) 为滤波系统频谱面上光强度分布照片, 图 6(b) 为频谱面上光强分布的测量曲线。光电接收器孔径为 $0.4 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$, 曲线按边峰值进行了归一化处理。

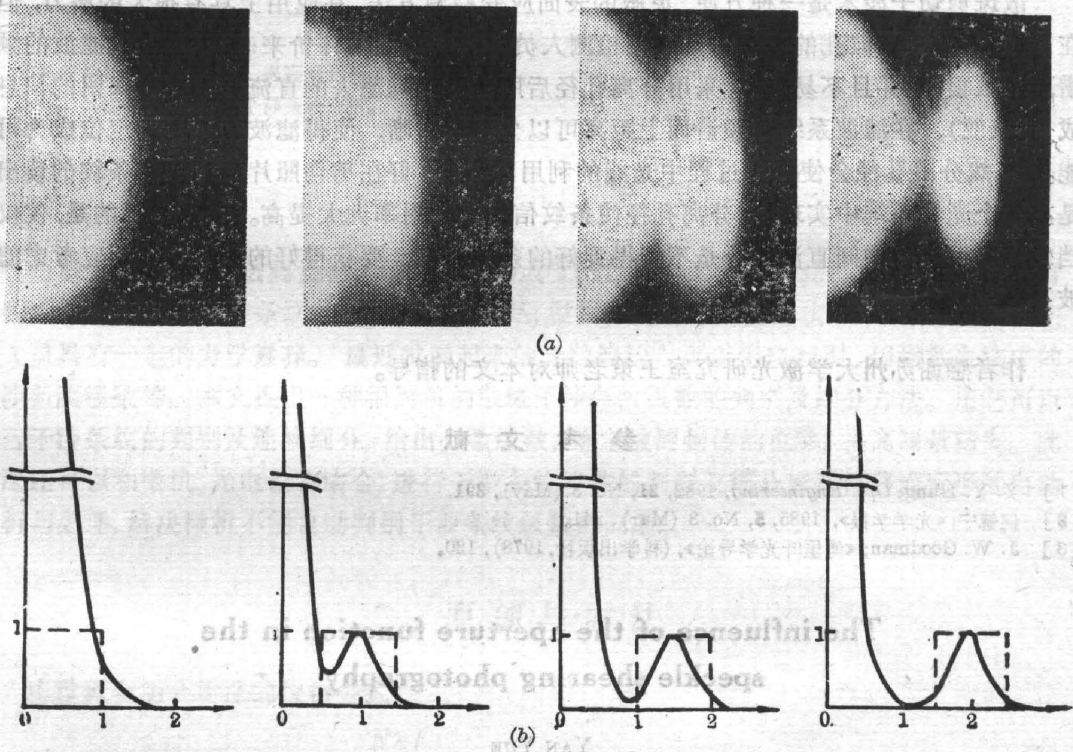


Fig. 6 a) Distribution pattern of double rectangular apertures in filtering plane
b) Curve of light intensity distribution

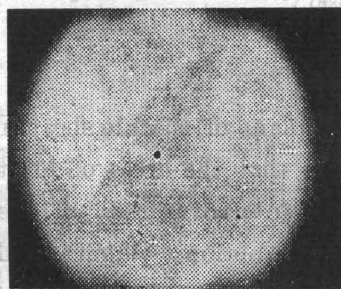


Fig. 7 Spectral distribution of the optimum aperture function in filtering plane

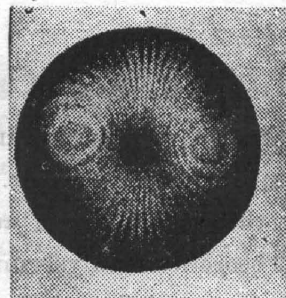


Fig. 8 Output fringe pattern

根据图形和曲线的轴对称性, 图 6 中给出的仅是横坐标大于 0 的半区间值, 从图 6 可以

看出随着拍摄孔径的分开, 频谱面上的自相关部分和互相关部分也相应有所分离。由于条纹信息只寄存在互相关部分, 两部分分离后对于提取条纹信息显然是极为有利的, 图 7 是采用图 5 所示的最佳孔径函数拍摄的剪切图在频谱面上的光强分布照片, 图 8 是经小孔在互相关区域滤波后得到的条纹。条纹的对比度和强度比用半圆形孔径函数有明显的提高。试件采用四周紧固的圆形薄铝板, 中心法向加载, 中心位移量为 0.012 mm。

五、结 束 语

散斑剪切干涉术是一种方便、灵敏的表面应变检测方法, 在应用上具有很大的潜力, 但在目前条件下, 滤波孔的位置仅是根据检测人员对条纹的主观评价来确定, 可实现滤波的频谱面区域很小, 并且不易确定, 采用分离孔径后照片中的需滤去的直流成分和需保留的信息成分(条纹), 在滤波系统的频谱面上距离可以分得较清晰, 使得滤波器的自动定位成为可能。当然分离孔径会使拍摄过程中光能的利用率降低, 好在剪切照片的拍摄和条纹的读出是在两个光学系统中实现的, 分离孔径使条纹信息的利用率大大提高。值得指出的是, 仅仅挡住频谱面上的中间直流部分是不能得到好的条纹输出, 要获得好的条纹输出还应考虑滤波孔径大小的影响。

作者感谢苏州大学激光研究室王策老师对本文的指导。

参 考 文 献

- [1] Y. Y. Hung; *Opt. Engineering*, 1982, 21, No. 3 (May), 391.
- [2] 何毓宁;《光学学报》, 1985, 5, No. 3 (Mar), 241.
- [3] J. W. Goodman;《傅里叶光学导论》, (科学出版社, 1978), 120.

The influence of the aperture function in the speckle shearing photography

YAN YUE

(Huaiying Teacher's College)

(Received 14 May 1986)

Abstract

The light field distribution in Fourier filtering plane of speckle shearing photography is discussed in this paper. The conclusion is that the areas of light field are limited by the boundaries of autocorrelation and intercorrelation of the aperture functions. Theoretical analysis on optimum aperture functions, which could improve effects of filtering and the quality of fringe pattern is also made. Experimental results accord with the theoretical analysis.

Key Words: speckle shearing photography; aperture function