

一种用于自动分析散斑摄影条纹图的 数字图像复原技术——衍射晕影响的消除

胡逸群

(长沙铁道学院科研所)

提 要

本文提出了一种消除衍射晕非均匀照度影响、提高计算机自动测量散斑摄影条纹图精度的数字图像复原算法。简单介绍了散斑摄影条纹图的自动分析过程。在 VAX-11/785 计算机上对模拟的无噪声白光散斑条纹进行验证,结果表明,本算法和程序是可靠的。

关键词: 散斑摄影, 条纹图, 数字图像复原技术, 衍射晕。

一、引 言

近年来,人们把数字图像处理技术用于散斑摄影条纹图的自动分析^[1],首先找到条纹灰度的极值,再由它们的位置确定条纹间距。然而,由于杨氏条纹调制了一个充满散斑的强度不均匀的衍射晕^[2],条纹极值点发生了飘移。因此,在这种情况下,由灰度极值点得到的条纹间距是不准确的^[3,4]。衍射晕对条纹间距测量精度的影响随晕内条纹数和对比度的减小而显著增加。当晕内条纹少于5个或3个时,单独使用条纹极大或极小来测量条纹间距是很不准确的^[5]。

本文提出一种消除衍射影响的数字图像复原算法,并且对计算机模拟的不同条纹数和对比度的无噪声白光散斑摄影条纹图进行了检验。为了比较的目的,文中还细详列出了在相同条件下,不消除衍射晕的影响时所测得的条纹间距及相对误差。指出了条纹密度和对比度对条纹方向测量精度的影响。

二、原 理

对于产生面内位移的物体,其散斑摄影条纹图归一化的照度公式为^[4]

$$I(x, y) = \left[\frac{1-\nu}{1+\nu} + \frac{2\nu}{1+\nu} \cos^2 \frac{\pi}{g} (-x \sin \theta + y \cos \theta) \right] I_0(x, y), \quad (1)$$

式中 ν 是可见度, g 为条纹间距, $I_0(x, y)$ 是衍射晕函数。 θ 为条纹与 x 轴的夹角。对于不同形状光瞳的记录系统,晕函数有不同形式,本文仅讨论实际中常用的圆孔。对于白光散斑 $I_{ow}(x, y)$ 和激光散斑 $I_{oL}(x, y)$ 分别有

$$I_{ow}(x, y) = \begin{cases} \left(\frac{2}{\pi}\right)^2 [\cos^{-1}\rho - \rho(1-\rho^2)^{1/2}]^2, & (\rho \leq 1) \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (2)$$

$$I_{oL}(x, y) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} [\cos^{-1}\rho - \rho(1-\rho^2)^{1/2}], & (\rho \leq 1) \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (3)$$

式中 $\rho = \rho_{\max}^{-1}(x^2 + y^2)^{1/2}$, $\rho_{\max} = (\lambda r_0 z / q \lambda_0)$ 是晕半径。 λ_0 是记录时光源的平均波长, λ 是分析所用的激光波长, q 是记录系统像距, r_0 是光瞳半径, z 是散斑图到观察平面距离。由(2)、(3)式可知, 即使衍射晕大小相同, 激光散斑和白光散斑的晕强度分布是不同的, 这一点在进行复原处理时必须考虑。显然, 晕函数仅与径向距离 ρ 有关。将方程(1)进行旋转变换, 新坐标为 (x', y') , x' 轴与条纹平行, y' 轴与条纹垂直, 得

$$I(x', y') = \left[\frac{1-\nu}{1+\nu} + \frac{2\nu}{1+\nu} \cos^2 \frac{\pi}{g} y' \right] I_0(\rho). \quad (4)$$

令 $y' = 0$, 则

$$I(x', 0) = I_0(\rho), \quad (\rho = x'), \quad (5)$$

过晕中心的条纹极值线的强度分布, 代表了晕函数的径向分布规律。那么 $[I(x, y)/I(x', 0)]$ (对于 $(x^2 + y^2)^{1/2} = x'$) 即为消除了衍射晕影响的杨氏条纹图。

三、图像分析过程

1. 条纹图的计算机模拟

由方程(1)和(2)计算若干个 256×256 的离散灰度矩阵, 从矩阵各元素(像素)的可能值为 $0 \sim 127$ 。灰度 127 表示最大照度, 0 表示黑。衍射晕直径取为 240, $\theta = 20^\circ$, 对比度 ν 可以从 $0.1 \sim 1.0$ 变化, 条纹间距 g 从 $20 \sim 120$ 可变。图 1 是在 VAX-11/785 小型机上模拟的无噪声白光散斑摄影条纹图照片, 晕内条纹数为 8 (间距 30), 对比度分别为 0.1、0.5 和 1.0。由于衍射晕的存在, 靠近晕中心的条纹亮度高, 远离晕中心的条纹亮度低, 因而实际能看见的条纹少于 8。

2. 确定条纹方向

首先确定晕中心位置, 然后选取一适当长度和角间距, 在 $0 \sim \pi$ 范围内做一系列径向矢量。沿着这些矢量对条纹图进行灰度积分, 积分值最大的角位置就是条纹方向的近似值 θ_1 。以 θ_1 为中心, 选择较小的扫描范围和角间距重复此过程, 便可得到满意精度的 θ 。

3. 条纹图复原

根据各像素相对于晕中心的距离, 进行下列灰度变换

$$\begin{aligned} I'(x, y) &= 127 \times [I(x, y)/I(x', 0)], \\ x' &= (x^2 + y^2)^{1/2}, \end{aligned} \quad (5)$$

产生的新图像 $I'(x, y)$ 即为复原了的散斑摄影条纹图。由方程(3)可知, 当 $(x^2 + y^2)^{1/2}$ 接近于 ρ_{\max} 时, 方程(6)中右边的分母 $I(x', 0)$ 很小, 由于量化误差的存在(图像灰度取离散整数)有可能使变换后的图像发生畸变。为此必须设立一个门限值 T , 当 $I(x', 0) \leq T$ 时, 不进行灰度变换。图 2 是图 7 经复原处理后的情形, 其 T 值为 2。很显然, 条纹可读性提高了。

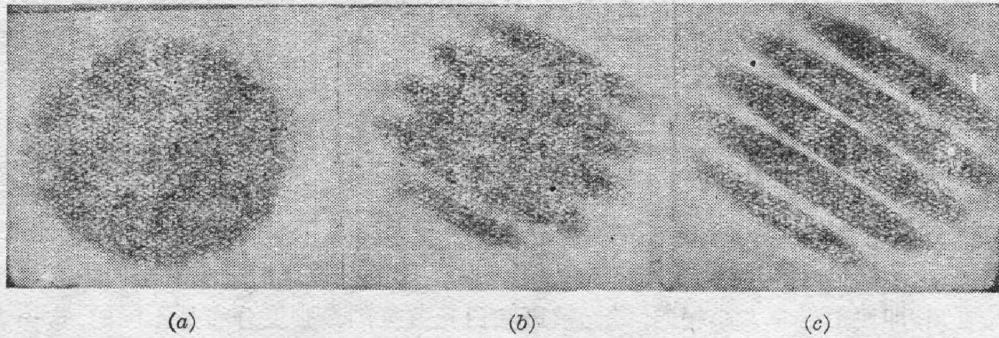


Fig. 1 Analogous noise-free white light speckle photography fringe patterns. The visibilities of them are (a) 0.1; (b) 0.5; (c) 1.0 respectively

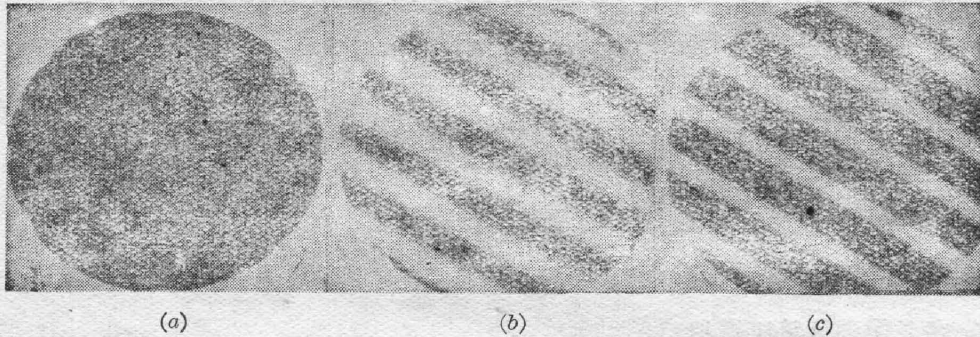


Fig. 2 Fig. 1 after restoration

4. 条纹压缩及间距测量

做若干条以 $\operatorname{tg} \theta$ 为斜率的平行等间距直线, 沿它们进行灰度积分, 将积分值除以路径长度, 便得到一维强度分布曲线, 二维条纹图被压缩为一维条纹图。找出一维条纹图的所有极值点, 相邻两个极小或极大之间的距离即为条纹间距。

四、结果及讨论

为了便于比较, 表 1 中列出了在相同条件下不消除衍射晕影响所测得的条纹间距, 表 2 是采用数字图像复原技术后的结果。其计算过程除了上节第(3)点条纹图复原外, 其余相同。由表 1 可以看出, 由条纹极大得到的间距偏小, 而由条纹极小得到的间距偏大, 随着晕内条纹数的减少和条纹对比度下降, 偏离增大。比如当条纹少于 6 个时, 由条纹少于 4 个时, 误差大于 10%。另一方面, 只要条纹反差比较好, 由条纹极小测得的间距误差小得多。条纹间距越大, 要想得到有意义的结果, 对反差要求就越高。表中“—”号表示在对应条件下测量失败。由表 2 可知, 采取复原技术消除衍射晕影响后, 测量精度大为提高。即使条纹数少, 对比度低, 也能得到满意的结果。很显然, 该技术增加了自动分析条纹图的可靠性, 提高了对质量较差的图像的处理能力。

测量结果表明, 条纹方向的测量误差随条纹数的减少和对比度的降低而有所增大, 但在

Table 1 measurement result of fringe space with the influence of diffraction halo (halo's diameters are 240)

fringe number	12		8		6		4		3		2	
given space	20		30		40		60		80		120	
measured point	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Min	
tested space												
	<i>g</i>	<i>e</i> (%)	<i>g</i>	<i>e</i> (%)	<i>g</i>	<i>e</i> (%)	<i>g</i>	<i>e</i> (%)	<i>g</i>	<i>e</i> (%)	<i>g</i>	<i>e</i> (%)
visibility	0.1	16.0	20.0	21.3	6.5	24.0	20.0	38.0	27.0	—	—	—
	0.2	19.3	3.5	20.7	3.5	27.5	8.3	31.3	4.3	35.0	12.5	46.0
	0.3	19.3	3.5	20.5	2.5	28.0	6.7	30.7	2.3	35.0	12.5	44.0
	0.4	19.3	3.5	20.0	0.0	29.0	3.3	30.7	2.3	36.5	8.8	42.0
	0.5	19.3	3.5	20.0	0.0	29.0	3.3	30.7	2.3	37.5	6.3	41.3
	0.6	19.3	3.5	20.0	0.0	29.0	3.3	30.7	2.3	38.0	5.0	40.6
	0.7	20.0	0.0	20.0	0.0	29.0	3.3	30.0	0.0	38.0	5.0	40.6
	0.8	20.0	0.0	20.0	0.0	29.0	3.3	30.0	0.0	38.0	5.0	40.0
	0.9	20.0	0.0	20.0	0.0	29.0	3.3	30.0	0.0	38.0	5.0	40.0
	1.0	20.0	0.0	20.0	0.0	29.0	3.3	30.0	0.0	38.0	5.0	40.0

Table 2 measurement result of fringe space after restoration (halo's diameters are 240)

fringe number	12~6		4		3		2	
given space	20~40		60		80		120	
measured point	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Min	
tested space								
			<i>g</i>	<i>e</i> (%)	<i>g</i>	<i>e</i> (%)	<i>g</i>	<i>e</i> (%)
visibility	0.1	no error	58.0	3.3	62.0	3.3	83.5	4.4
	0.2		58.0	3.3	62.0	3.3	83.5	4.4
	0.3		58.0	3.3	62.0	3.3	83.5	4.4
	0.4		58.0	3.3	62.0	3.3	82.0	2.5
	0.5		58.0	3.3	60.0	0.0	82.0	2.5
	0.6		61.0	1.7	60.0	0.0	82.0	2.5
	0.7		61.0	1.7	60.0	0.0	82.0	2.5
	0.8		61.0	1.7	60.0	0.0	82.0	2.5
	0.9		61.0	1.7	60.0	0.0	82.0	2.5
	1.0		61.0	1.7	60.0	0.0	82.0	2.5

以上表中的各种条件下,最大误差仅为 1.1°。

五、结 论

本文提出了一种能有效地消除衍射晕非均匀照度影响,提高计算自动分析散斑摄影杨

氏条纹间距精度的数字图象复原算法,且进行了模拟计算和对比。只要记录系统具有圆形光瞳,无论白光散斑还是激光散斑,此技术均适用。我们编制的自动分析程序,工作精度可靠。为了突出本算法在消除衍射晕非均匀照度影响方面的功效,文中来涉及噪声问题。但衍射晕本身是充满噪声的,这无疑会给计算机条纹自动分析带来影响,使精度降低,在此情况下,本算法的效果如何,采取何种措施克服不利因素?我们将在另一篇论文中叙述。

感谢谷士文副教授、沈新权、陈练兵等同志的热情帮助。

参 考 文 献

- [1] David W. Robinson; *Appl. Opt.*, 1983, **22**, No. 14 (Jul), 2169~2176.
- [2] R. Meynart; *Appl. Opt.*, 1984, **23**, No. 14 (Jul), 2235~2236.
- [3] S. A. Isaacson, G. H. Kaufmann; *Appl. Opt.*, 1985, **24**, No. 2 (Jan), 189~193.
- [4] S. A. Isaacson, G. H. Kaufmann; *Appl. Opt.*, 1985, **24**, No. 10 (May), 1444~1447.
- [5] Jordanka Georgieva; *Appl. Opt.*, 1986, **25**, No. 22 (Nov), 3970~3974.

A digital image restoration method for automatic analysis of speckle photography fringe pattern—Elimination of influence of diffraction halo

HU YIQUN

(Research Department, Changsha Railway Institute)

(Received 5 October 1987; revised 14 December 1987)

Abstract

A digital image restoration algorithm is discussed which can eliminate the influence of non-uniform intensity distribution of diffraction halo and enhance the accuracy for computer to analyze speckle photography fringe pattern automatically. The computing program is also presented briefly. Test results using the algorithm and the program to deal with analogous white light speckle photography fringe without noise are very satisfactory.

Key words: speckle photography, fringe pattern, digital image restoration method, diffraction halo.