

# 条纹图的图像处理方法

尹志武 程维明 陈明仪

(上海大学精密机械工程系 上海 201800)

**摘要** 条纹图中的条纹反映了被检测物体的信息,条纹分析技术在全息干涉技术、散斑干涉技术、莫尔技术中起着重要作用。本文研究和提出处理条纹图中条纹的一些方法,并给出了理论分析和模拟实验结果。

**关键词** 条纹分析 图像处理

## 1 引言

在光学检测中经常要对条纹图进行分析研究。根据形成机理,条纹图可以分为干涉条纹图、莫尔条纹图、光栅直接投影的调制条纹图等多种,每种条纹图中的条纹包含了所研究物体的信息,所以条纹分析法<sup>[1]</sup>进行测量占有十分重要的地位,而在测量物体长度和物体面形<sup>[2]</sup>等应用领域中,条纹的移动和级次的测量是其中的一个关键技术。在工程度量中获得的条纹图往往信噪比低且不为常值,这就给条纹的自动计数及定位造成很大的困难,而且可能会严重地影响测量精度。本文针对这一情况,提出了二值化、二值滤波、求条纹升降沿三者结合的综合方法,模拟实验证明,此方法可取得很好的效果。

## 2 条纹处理

### 2.1 模板的赋值处理

由于在处理过程中用到模板,这样就涉及到模板如何取值的问题。特别在图像的周边,出现所谓的越界现象,如图1,用 $5 \times 5$ 的模板,夹在两黑框之内的部分即为越界部分,这使得处理起来不方便。作者认为,可以采用两种方法处理,一种是扩大边缘法,一种是搜索法。

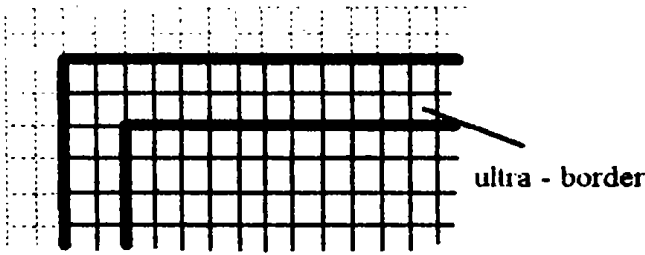


Fig. 1 Fringe widen technique

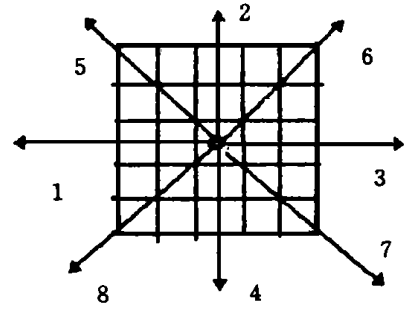


Fig. 2 Direction of search

扩大边缘法是指把原有的图像扩大,使得最边缘点就在模板中心,扩大区域内的灰度取值为各对应边缘点的灰度值。如图 1,这种方法的优点是扩大区域形成后,各点的灰度取值确定,因此处理起来就很方便,缺点是另外需要一个大于原图像的数组,这样就多点内存空间,例如,对于一个有  $row$  行、 $col$  列的数字图像,用  $5 \times 5$  的模板,需要多开一个  $(row + 4) \times (col + 4)$  的数组。

搜索法是指以数字图像的各点为模板中心,向 8 个方向搜索,确定模板内的各点取值,搜索方向如图 2。用  $m \times n$  ( $m, n$  通常取奇数) 的模板处理一个行数为  $row$ , 列数为  $col$  的数字图像,可采取以下步骤对模板赋值:(1) 模板中心值取为当前点值,(2) 从模板中心出发,分别沿着 1、2、3、4 方向搜索赋值,(3) 从模板中心出发,沿着 5、6、7、8 方向搜索赋值。

数字图像当前处理点为  $h(i, j)$  时,以 1、2、5 方向为例,说明赋值原则:

模板中心点: 模板中心点值取为图像当前点值

$$w(k_0, l_0) = h(i, j) \quad (k_0 = (m + 1) / 2, l_0 = (n + 1) / 2) \quad (1)$$

$w(k, l)$ , ( $1 \leq k \leq m, 1 \leq l \leq n$ ) 表示模板点取值,  $h(i, j)$ , ( $1 \leq i \leq col, 1 \leq j \leq row$ ) 为数字图像的各点灰度;

方向 1: 图像当前点  $i$  坐标不小于模板当前点(模板内正在被赋值的点)与模板中心点的间距时,则模板当前点取图像对应点的值;图像当前点  $i$  坐标小于模板当前点与模板中心点的间距时,则模板当前点取模板中此方向上它最相邻点的值,

$$w(k, l) = h(i - (k_0 - k), l) \quad (i > k_0 - k, l = l_0) \quad (2a)$$

$$w(k, l) = w(k_0 + 1, l) \quad (i < k_0 - k, l = l_0) \quad (2b)$$

方向 2: 图像当前点  $j$  坐标不小于模板当前点模板中心点的间距时,则模板当前点取图像对应点的值,图像当前点  $j$  坐标小于模板当前点与模板中心点的间距时,则模板当前点取模板中此方向上它最相邻点的值,

$$w(k, l) = h(i, j - (l_0 - l)) \quad (j > l_0 - l, k = k_0) \quad (3a)$$

$$w(k, l) = w(k, l + 1) \quad (j < l_0 - l, k = k_0) \quad (3b)$$

方向 5: 图像当前点  $i$  坐标不小于模板中心点与模板当前点的横坐标差值,  $j$  坐标不小于模板中心点与模板当前点的纵坐标差值,模板当前点取图像对应点的值;当图像当前点  $i$  坐标不小于模板中心点与模板当前点的横坐标差值,  $j$  坐标小于模板中心点与模板当前点的纵坐标差值,

模板当前点取模板中 2 方向上它最相邻的模板点值; 当图像当前点  $i$  坐标小于模板中心点与模板当前点的横坐标差值,  $j$  坐标不小于模板中心点与模板当前点的纵坐标差值, 模板当前点取 1 方向上与它最相邻的模板值; 当图像当前点  $i$  坐标小于模板中心点与模板当前点的横坐标差值,  $j$  坐标小于模板中心点与模板当前点的纵坐标差值, 模板当前点取对角线方向上与它最相邻的模板值。

$$w(k, l) = h(i - (k_0 - k), j - (l_0 - l)) \quad (i > k_0 - k, j > l_0 - l) \quad (4a)$$

$$w(k, l) = w(k, l - 1) \quad (i > k_0 - k, j = l_0 - l) \quad (4b)$$

$$w(k, l) = w(k - 1, l) \quad (i = k_0 - k, j < l_0 - l) \quad (4c)$$

$$w(k, l) = w(k - 1, l - 1) \quad (i = k_0 - k, j = l_0 - l) \quad (4d)$$

其它方向依此类推。这种方法不需要另开一个数组, 节约了空间内存, 而且较之于扩大边缘法运行时间并不长, 作者建议使用这种方法。

## 2.2 二值化处理

所谓二值化, 就是通过设定阈值把灰度图像变换成仅用两个值分别表示目标和背景的二值图像。图像二值化可根据下列的阈值处理<sup>[3]</sup> (thresholding) 来进行:

$$g(i, j) = \begin{cases} 1 & h(i, j) > t \\ 0 & h(i, j) < t \end{cases} \quad (5)$$

通过阈值  $t$  的划分, 灰度图像  $h(i, j)$  变换为二值图像  $g(i, j)$ , 其中, 1 值部分表示目标子图, 0 值部分表示背景子图。根据图像的内容和所提内容与背景之间的关系, 二值化的门限分为静态门限, 一般动态门限, 背景动态门限。

### 2.2.1 静态门限

静态门限指的是阈值为固定的门限。用静态门限简便快速, 但要求背景要尽可能的均匀, 并且图像的对比度高。关于门限值的大小究竟取多少合适, 有多种判断方法, 这里采用判断分析法, 即计算图像每个像素点灰度值与其它像素点灰度值差的绝对值的和, 其中使得和值最小的灰度值为阈值。

$$t = h(i_0, j_0) \quad (1 \leq i_0 \leq \text{col}, 1 \leq j_0 \leq \text{row}) \quad (6)$$

其中满足  $(\sum_{j=1}^{\text{row}} \sum_{i=1}^{\text{col}} |h(i_0, j_0) - h(i, j)| = \min_{j=1}^{\text{row}} \sum_{i=1}^{\text{col}} |h(i, j) - h(i, j)| \quad (i = 1, 2, \dots, \text{col}, j = 1, 2, \dots, \text{row}))$

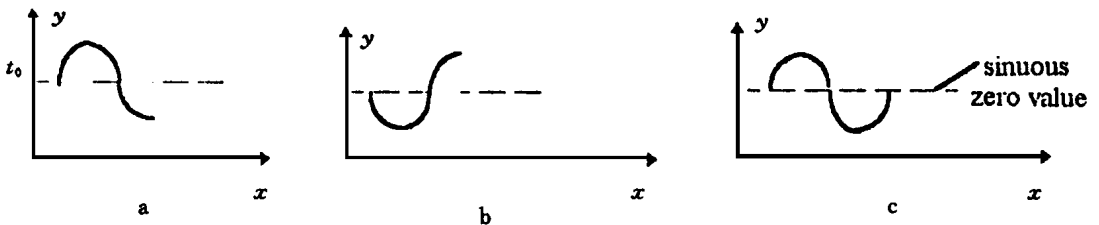


Fig. 3 Pixel value distribution of fringe pattern

作者注意到, 对同一对象重复测量或比较时, 这种方法所取阈值会因为所取区间或所取范围的不同而与实际所需阈值出现偏差。如图 3, a, b, c 示, 虽然灰度分布规律相同(正弦函数), 应有

同一门限阈值 ( $t = t_0$ ), 但却可能得到不同的阈值 ( $t_a > t_0, t_b < t_0, t_c = t_0$ ) 从而使得所得条纹的宽窄各不相同, 甚至于得到的条纹数目不一样, 因此引起测量结果不相同, 表 1 给出了灰度分布为  $y = 2 + \sin(x)$  的数字图像的实验结果。

Table 1 Value of static threshold

B \ A	1	2	3	4	5	6	7
4	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
6	2.87	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	200
8	2.71	2.71	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
10	2.59	2.59	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
12	2.87	2.50	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
14	2.78	2.43	2.43	2.00	2.00	2.00	2.00
16	2.71	2.38	2.38	2.00	2.00	2.00	2.00
18	2.65	2.34	2.34	2.39	2.00	2.00	2.00
20	2.59	2.31	2.31	2.34	2.00	2.00	2.00
22	2.76	2.28	2.28	2.31	2.31	2.00	2.00
24	271	2.26	2.26	2.26	2.26	2.26	2.26
30	2.74	2.40	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21

表 1 中, A 表示条纹图中条纹的数目, B 表示每条条纹中的采样点数, 表中值表示所取条纹图比实际条纹图少半个条纹时, 所得的阈值。与理想阈值 2.00 比较, 从表 1 中可以看出, (1) 条纹采样点数与条纹数目不同时, 阈值就可能不一样; (2) 条纹数大于 6 及每条条纹采样点数小于 24 时, 阈值误差可以不考虑; (3) 每条条纹中采样点越多, 为得到理想阈值, 条纹图中条纹数就必须越多。作者在实验中采取了整周期 (为 24 个像素宽) 的条纹图, 用判断分析法得到的阈值就能很准确地得到黑条纹 (宽 11 个像素) 和亮条纹 (宽 13 个像素) (灰度值不低于正弦零位的部分计为亮条纹, 否虽为暗条纹)。

### 2.2.2 一般动态门限

在实际测量中, 对于不具有均匀背景及较高的对比度的条纹图, 可选择一种能根据条纹图像的局部特征自动调节门限的方法。其算法是以当前点为模板中心, 取模板内最大值 ( $W_{\max}$ ) 和最小值 ( $W_{\min}$ ) 的平均值作为门限。

$$t(x, y) = (W_{\max} + W_{\min}) / 2 \quad (7)$$

实验证明, 这种方法对存在带有加性白噪声干涉图的处理效果很好, 本实验中得到的亮条纹宽 (12 个像素) 暗条纹宽 (12 个像素) 相等, 不足之处是, 会将残留高频噪声转化为许多黑白斑点。

### 2.2.3 背景动态门限

在一些特定的环境下, 如果干涉图的背景光强分布符合一定的数学特征 (Lorenz 函数, sinc 函数等), 就应该用特定变化的门限阈值。例如: 激光束照射产生的孔径背景光强近似高斯分布, 门限函数取为高斯函数<sup>[4]</sup>的形式

$$t(x, y) = T_0 [\exp(r^2 / 2z^2)]^2 \quad (8)$$

$T_0$  为中心门限,  $z$  表示衰减函数的方差,  $r$  表示点到孔径中心的距离。这种方法去噪效果十分明

显,但必需要有先验知识,要知道背景光强的分布特征。

### 3 二值图像滤波

在对条纹图进行二值化的过程中,难免存在有由动态门限假边缘造成的噪声,有其它原因造成黑白点孤立噪声,这不仅对提取条纹中心极为不利,而且可能会造成条纹计数的失败,这些噪声必须滤除掉。考虑到旋转滤波能够保护条纹的边缘,并能消除条纹中的噪声,因此可以应用二值图像的旋转滤波法,其原理是,以当前点为中心,按图 4 的 8 个方向扫描,找出梯度变化最大的方向,在此方向上,如果暗点总数小于某一值,则暗点变亮点,反之,如果亮点总数小于某一值,则此方向的亮点变暗点。几次滤波以后,黑条纹中的亮点和亮条纹中的暗点就会被打扫干净。实验中模拟了不加噪声和加噪声倾斜角为  $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$  和  $60^\circ$  的正弦条纹图,并用文中所述的方法进行了处理。这里,选择其中的 3 幅条纹图进行比较分析。

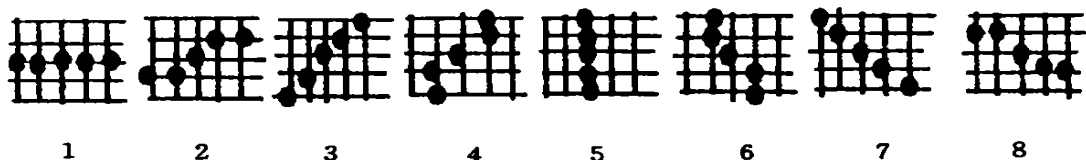


Fig. 4 Rotatory filter technique

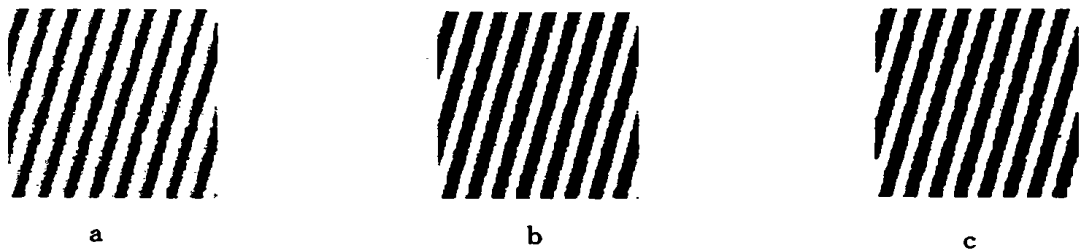


Fig. 5 Imitative fringe patterns and results of experiment

图 5, a: 含噪声的 15 条纹图, b: 含噪声的 15 条纹图二值化后条纹图, c: b 图二次滤波后条纹图。

可以看到, c 图中不存在黑白孤立点噪声,也不存在黑白斑块,所以,上面所述方法是有效的。

### 4 求上升下降沿

用求上升沿下降沿的方法,能得到每级条纹的确切位置,较之于仅求条纹中心<sup>[5]</sup>信息量更大。通过扫描记下每个条纹的上升沿坐标和下降沿坐标以及条纹级数,再根据各点的坐标关系,进行信息分析和条纹计数与定位。

扫描的方向有几种,如图 6,大致分为: a,沿  $i$  轴逐列扫描各行; b,沿  $j$  轴逐行扫描各列; c,沿  $45^\circ$  对角线方向扫描。对于同一个条纹图来说,扫描方向的不同,会造成测量结果的不一致,甚至于某些方向的测量由于受到残存噪声的干扰,结果完全失真,而有时为了得到所需结果,

只能按照某一方向进行扫描。这样必须讨论一下条纹的扫描方向的选择问题。

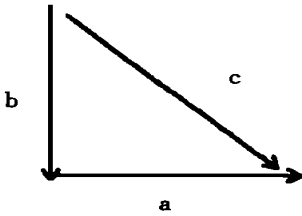


Fig. 6 Scanning direction

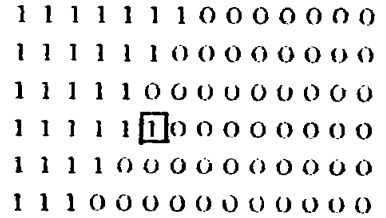


Fig. 7 Binary numeral image

处理条纹切线与  $i$  轴夹角  $\varphi$  (如图 8) 满足  $\varphi < 30^\circ$  条纹图时, 最好用方向 a, 当条纹切线与  $i$  轴夹角  $\varphi$  满足  $\varphi > 60^\circ$  时, 最好用方向 b, 当条纹切线与  $i$  轴夹角  $\varphi$  满足  $30^\circ < \varphi < 60^\circ$  最好用方向 c。因为即使对干涉条纹图进行很成功的去噪工作, 在亮条纹和暗条纹的交界处, 不可避免的带有一些连结噪声, 所以一定要注意扫描方向的选择, 例如图 7, 就不能用方向 b, 否则, 会使得条纹的级次紊乱。

但是, 究竟哪些点归于同一级呢? 图 (8) 为直接计算法<sup>[6]</sup> 测量物体面形时所得条纹图二值化以后的图像, 以此为例, 说明如下:

(1) 由于用直接计算法, 当 0 级条纹位于条纹图中心附近时, 处理更方便, 所以将条纹图中心点作为开始点;

(2) 从坐标原点出发, 沿  $i$  轴正向扫描, 若第一次后点的灰度值大于前点灰度值, 则后点记为 0 级上升沿, 继续沿  $i$  正向扫描, 若第一次后点的灰度值小于前点灰度值, 则该前点记为 0 级下降沿, 若第二次后点的灰度值大于前点灰度值, 则该后点记为大一级上升沿, 上升沿个数加 1, 一直到这行的行尾。

$$u_1 = i \quad u_j = j \quad u_g = p \quad s = p + 1 \quad (h(i, j) > h(i - 1, j), i < (col + 1)/2, p = 0, 1, \dots) \quad (9)$$

$$d_1 = i - 1 \quad d_j = j \quad d_g = k \quad t = q + 1 \quad (h(i, j) < h(i - 1, j), i < (col + 1)/2, q = p) \quad (10)$$

$u_i, u_j, u_g$  分别表示条纹上升沿的横坐标、纵坐标、级数;  $d_i, d_j, d_g$  分别表示条纹下降沿的横坐标、纵坐标、级数;  $h(i, j)$  表示坐标为  $(i, j)$  点的灰度;  $p$  表示沿每一扫描方向, 后点的灰度值大于前点的灰度值出现的次数;  $q$  表示沿每一扫描方向, 前点的灰度值大于后点的灰度值出现的次数;  $s, t$  分别表示取到的上升沿和下降沿的个数。

(3) 从零级条纹的上升沿开始, 向  $i$  轴反向扫描, 若第一次后点的灰度值大于前点灰度值, 则该后点记为 -1 级下降沿, 下降沿个数加一, 继续向  $i$  轴反向扫描, 若第一次后点的灰度值小于前点灰度值, 则该前点记为 -1 级上升沿, 上升沿个数加一, 余下类推, 一直到这行的行首。

$$d_i = i \quad d_j = j \quad d_g = -q \quad t = t_0 + q \quad (h(i, j) > h(i + 1, j), i > (col + 1)/2, q = 0, 1, \dots) \quad (11)$$

$$u_i = i + 1 \quad u_j = j \quad u_g = -q \quad s = s_0 + p \quad (h(i, j) < h(i + 1, j), i > (col + 1)/2, p = q) \quad (12)$$

$s_0, t_0$  分别表示某一方向扫描结束时所取到的上升沿和下降沿的个数;

(4) 上棚一定行  $f$  (行数不超过  $j$  方向上条纹宽度  $e$  的  $1/2$ ), 从点  $((col + 1)/2, (row + 1)/2 - f)$  出发, 沿  $i$  轴正向扫描, 若第一次后点的灰度值大于前点灰度值, 将此后点的横坐标与上一次计得的 0 级条纹的横坐标进行比较, 若两者绝对值之差小于一个  $i$  方向上暗条纹的宽度, 则该后点记为 0 级上升沿, 否则, 当该后点横坐标大于上次 0 级条纹的横坐标时, 则该后点为 1 级上升沿, 当该后点横坐标小于上次 0 级条纹横坐标时, 则该点为 -1 级上升沿, 余下处理同上次。

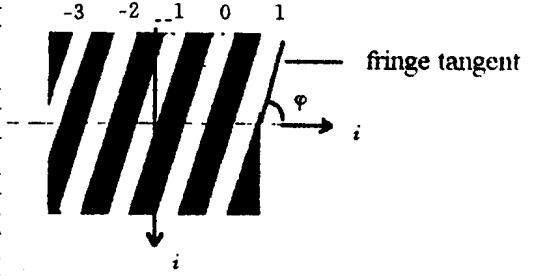


Fig. 8 Fringe pattern

$$u_i = i \quad u_j = j \quad s = 1 + s_0 \quad (h(i, j) > h(i - 1, j), p = 1) \quad (13a)$$

$$u_s = 0 \quad (h(i, j) < h(i - 1, j), p = 1, |u_{ji} - i| < e/2) \quad (13b)$$

$$u_s = 1 \quad (h(i, j) > h(i - 1, j), p = 1, |u_{ji} - i| \geq e/2, u_{ji} > i) \quad (13c)$$

$$u_s = -1 \quad (h(i, j) > h(i - 1, j), p = 1, |u_{ji} - i| \geq e/2, u_{ji} < i) \quad (13d)$$

$u_{ji}$  表示纵坐标为  $j$  的各点中, 沿  $i$  轴正向扫描时的第一个上升沿横坐标

(5) 条纹图的上半部分处理好以后, 同样处理下半部分。

通过上述步骤以后, 得到了每条纹的上升沿下降沿坐标和级数。

## 5 讨 论

模拟实验证明, 用以上所述的综合方法, 能有效地抑制条纹图上的噪声, 可以处理到信噪比为 8.2 分贝的条纹图, 获得精确的条纹位置信息(精度为  $\pm 1$  个像素), 处理结果如表 2。

Table 2 Results of imitative experiment

$Z$	0	20	40	60	80	90	100	110	120
$P_0$	0.00	0.45	0.48	0.50	0.51	0.51	0.51	~	~
$P_1$	0.00	0.45	0.48	0.50	0.51	0.51	0.51	~	~
$Q_0$	1.00	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	~	~
$Q_1$	0.00	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	~	~

表中,  $Z$  表示所加的噪声大小,  $P_0$  表示相差为 0 个像素的上升沿总数占上升沿总数的比例。  $P_1$  表示相差为 1 个像素的上升沿总数占上升沿总数的比例。  $Q_0$  表示相差为 0 个像素的下降沿总数占下降沿总数的比例,  $Q_1$  表示相差为 1 个像素的下降沿总数占下降沿总数的比例。从表 2 可以看出, 当噪声为 100 个单位时, 上升下降沿的误差最大也只有 1 个像素, 从而进一步验证了文中所述的方法的可行性。

## 参 考 文 献

- 1 Funnell W R J. Image processing applied to the interactive analysis interferometric fringes. *Appl Opt*, 1981, 20( 18): 3245 ~ 3250
- 2 Cheng Weiming, et al. Surface measurement of optical cylinder using multiaperture overlap-scanning technique (MAOST). *Proc SPIE*, 2860: 321 ~ 328
- 3 余松煜等. 数字图像处理, 电子工业出版社, 1989: 87 ~ 97
- 4 Chen MingYi, et al. Gaussian threshold for high-fidelity of digital wavefront reconstruction. *Proc SPIE*, 1993, 2003: 348 ~ 352
- 5 Chen Hui, et al. A fast contour tracing mathing thinning algorithm. *Journal of Electronics*, 1996, 18( 4): 432 ~ 434
- 6 张海波等. 像移技术用于三维物体面形的测量, 光学学报, 1994, 14(4): 408 ~ 410

## Image Processing about Fringe Pattern

YIN Zhi-Wu, CHENG Wei-Ming, CHEN Ming-Yi

(*Department of Precision Mechanical Engineering, Shanghai University, Shanghai 201800*)

### Abstract

The optical characteristics of detected optics can be extracted from its fringe in the frige pattern, and a technique for fringe analysis is of importance in holographic interferometry, speckle pattern interferometry and Moire technique. Some methods of fringe analysis have been studied and proposed, and theoretical analysis and experimental results are given.

**Key words:** Fringe analysis, Image processing

尹志武 男, 1974 年 11 月生, 1996 年毕业于河北燕山大学机械工程系, 1996 年进上海大学机电学院精密机械系攻读硕士学位, 专业方向为光学度量技术。所感兴趣课题: 面形测量和图像信息处理。