

# 干涉条纹的处理方法研究

吴东楼 叶莉华 卞保民 贺安之

(南京理工大学应用物理系, 南京 210094)

**摘 要** 论述了干涉图的图像处理方法。提出了干涉图反高斯变换的光强平均分布处理, 保证了干涉图信息的完整性, 同时将基于视觉零交叉理论的边缘检测方法应用于干涉条纹的边缘检测中, 精确地检测了干涉条纹的边缘, 减小了由干涉条纹提取相位差的误差, 并与常用的二值化方法进行比较, 最后给出了一个有效的干涉条纹细化方法, 并与其它处理方法进行了比较。

**关键词** 干涉, 图像处理, 高斯分布, 边缘检测, 细化。

## 1 引 言

在众多从干涉图提取相位的图像处理方法中, 都是直接对灰度图像进行处理, 没有考虑到产生干涉图的激光光束的特性<sup>[1-5]</sup>。本文在处理干涉图像时, 分析了激光光束的特性, 提出对光束的光强进行平均分布处理, 进行高斯分布反变换, 并获得良好的效果。同时, 从计算机视觉角度, 应用与人的眼睛识别模式一致的零交叉边缘检测方法代替通常使用的二值化方法, 获得了光滑的、无分叉、不断裂的干涉条纹, 能够对干涉条纹进行精确地定位, 为细化提供了良好的处理结果, 避免了细化时导致条纹分叉或断裂。与图像处理中的常用方法比较, 这种方法具有良好的效果。本文最后给出了一个有效的细化方法。

## 2 光强平均分布处理

由于激光光束强度分布是高斯分布, 所以其产生的干涉图是余弦调制的高斯分布。在处理图像时, 希望其灰度值分布是均匀的, 且视场信息完整, 以方便对干涉图的处理, 在已有的处理方法中没有光强平均分布处理的方法, 这样不可避免地丢失大量数据。

激光光束的强度分布是高斯分布, 可得

$$I(r) = |A|^2 \exp\left(-\frac{2\pi r^2}{b^2}\right) \quad (1)$$

其中  $b$  为光束的有效宽度,  $A$  为光束的振幅。高斯光束与平面波、球面波一样, 在传播过程中不改变高斯光束的基本性质。经过光学系统时, 只有光束的有效宽度及波面的曲率半径发生变化, 故记录的干涉图的强度分布呈高斯分布。本文采用高斯函数的倒数进行反高斯变换, 使干涉图强度分布平均化。

$$G_0(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

$$G'(x, y) = 2\pi\sigma^2 \exp\left(\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

其中  $\sigma$  为有效宽度参数, 调节  $\sigma$ , 可实现对干涉图强度的均匀化处理。

图 1(a) 是原始的干涉图像, 图 1(b) 是干涉图的光强平均分布处理的结果。可以看出, 经过反高斯变换后的干涉图其视场范围与原场基本一致, 干涉图的信息得以较好地保存。

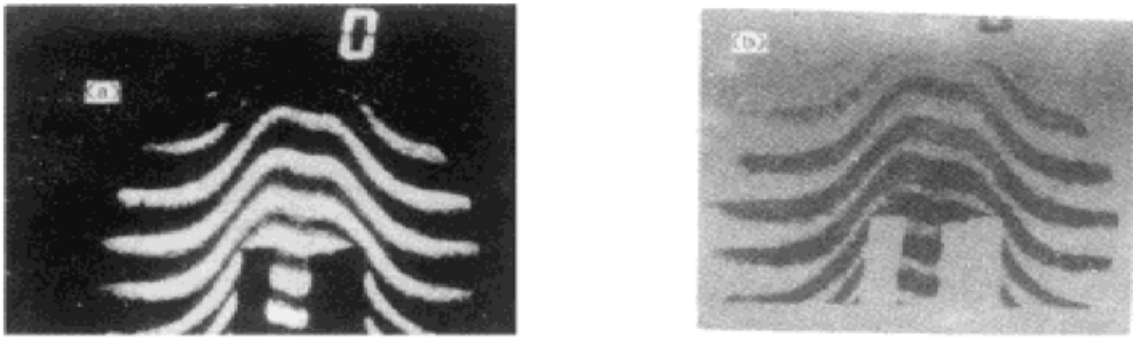


Fig. 1 (a) Original interferogram, (b) Anti-Gauss transform

### 3 干涉条纹的边缘检测

从计算机视觉的角度对条纹边缘进行零交叉检测, 确保干涉条纹的连续性和边缘平滑。

二维干涉条纹的强度分布可由下式描述:

$$I(x, y) = B(x, y) + A(x, y) \cos [P(x, y)] \quad (4)$$

式中,  $I(x, y)$  为光强分布,  $B(x, y)$ 、 $A(x, y)$  为强度分布参数,  $P(x, y)$  为相位差。由于干涉条纹边界是图像上灰度变化比较剧烈的地方, 数学上用灰度的导数来刻画变化。因而早期的一些边缘检测的方法是基于像素附近的数值导数的。在实际的干涉图中, 不仅有如(4)式所表示的有规律的灰度值分布, 而且有噪声存在。由于求导运算起到了噪声放大的作用, 因而这类方法效果并不好。改进的方法是先对图像进行适当的平滑, 以抑制噪声, 然后求导数。对图像进行线性平滑, 在数学上是进行一次卷积运算

$$P = \omega \circledast p \quad (5)$$

$p$  为原来像素的灰度值,  $\omega$  为权函数,  $P$  为平滑后的灰度值, 即求某个邻域中的灰度值的加权平均。平滑用高斯函数来进行:

$$G_0(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (6)$$

得到

$$P(x, y) = G_0(x, y) \circledast p(x, y) \quad (7)$$

其中  $\sigma$  是一个尺度参数。由于边缘点是在图像中灰度值变化剧烈的地方, 一阶导数的极值点即为二阶导数的零点, 故用沿梯度方向二阶导数的零交叉点, 即是所探测的边缘。由于沿梯度方向二阶导数是非线性的, 计算较为复杂, 可用线性拉普拉斯算子来代替

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \quad (8)$$

即用

$$\nabla^2 [G_0(x, y) \otimes p(x, y)] = \nabla^2 G_0(x, y) \otimes p(x, y) \quad (9)$$

的零交叉点作为边缘点, 其中

$$\nabla^2 G_0(x, y) = \frac{-1}{\pi\sigma^4} \left(1 - \frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (10)$$

并且可以利用尺度因子  $\sigma$  的调节来更好地检测边缘。

图 2(a) 为反高斯变换后干涉图的干涉条纹边缘检测结果。图 2(b) 为未经过反高斯变换的自动域值二值化方法获得的干涉图。图 2(c) 为经过反高斯变换后的自动域值二值化方法获得的干涉图。图 2(d) 为固定域值法处理的二值化干涉图。

可以看出, 经过光强平均分布处理后的边缘检测方法和自动域值方法效果比其他方法的效果好, 干涉条纹连续、光滑且丢失数据少。与图 2(b) 相比, 图 2(c) 数据量增加, 条纹断裂减少, 有效数据范围与视场一致。可见, 经过光强平均分布处理后的边缘检测方法效果最好, 条纹光滑、连续、无分叉、数据完整性好。

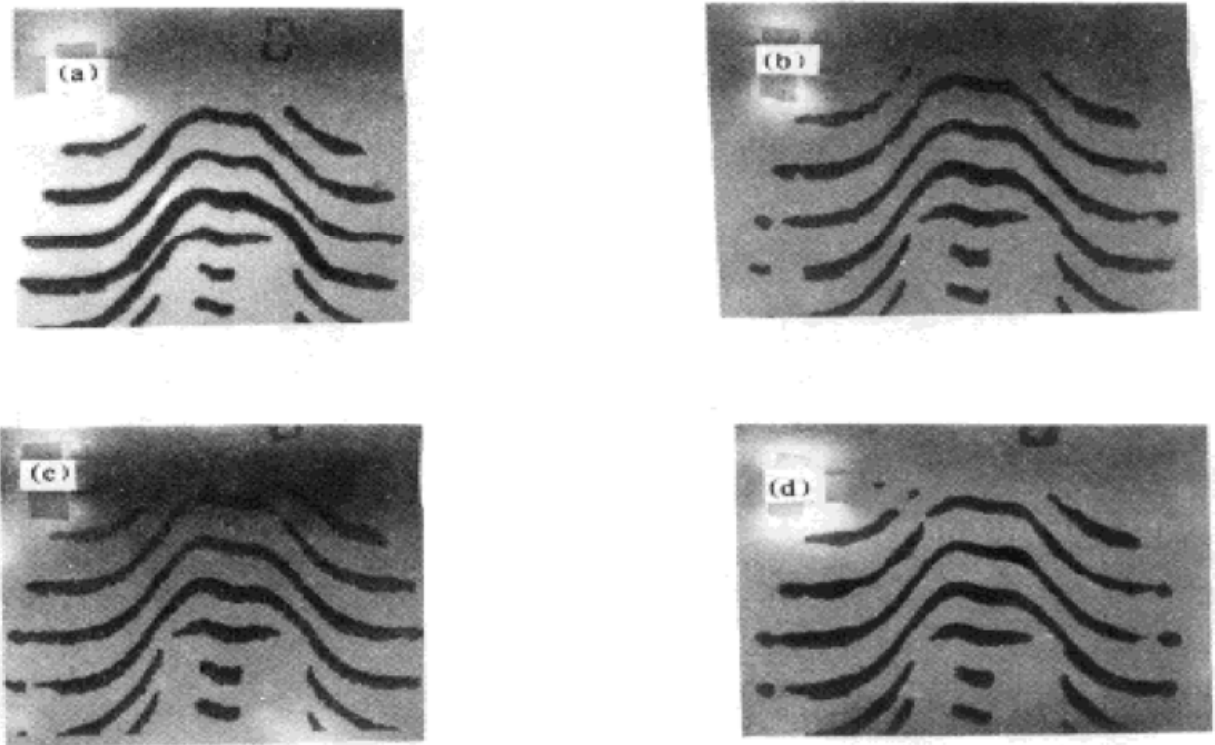


Fig. 2 (a) Edge detection, (b) Automatic valued binary, (c) Automatic valued binary after anti-Gauss transform, (d) Fixed value binary

## 4 干涉图的细化

干涉条纹的细化问题在于解决骨架抽取, 防止断点出现和剔除毛刺。在以往许多文献中, 大多采用霍尔迪氏(Hilditch)细化方法。此方法不能解决分枝问题和易产生断点。本文采用的八邻域填充和删除模板, 其优点在于对条纹平滑和骨架抽取同时进行, 可以解决以上所面临的问题。

其方法是采用 4 个  $3 \times 3$  模板。模板如图 3 所示,  $x$  为  $3 \times 3$  模板的中心像素,  $o_i$  为模板中其它相邻像素点的值。条纹平滑由填充和删除两个过程组成。填充过程将  $x$  为 “0” 的像素与  $x$  的四邻域( $o_{i-5}$ ) 中有三个或三个以上的邻域为 “1” 的单像素点置为 “1”, 删除过程则是将  $x$  为

$(o_5 + o_3 + o_2)(o_4 + o_6 + o_7) + (o_2 + o_1 + o_4)(o_5 + o_7 + o_8) = 0$  的像素以及  $x$  不是端点的像素置为零。模板 a、b 表示对条纹平滑处理的填充与删除过程，其作用是填充条纹边界的单像素凹坑和删除条纹边界的单像素分支或毛刺，以防止出现断点和分叉。

$o_1$	$o_2$	$o_3$
$o_4$	$x$	$o_5$
$o_6$	$o_7$	$o_8$

Fig. 3 Model

骨架抽取过程是从左到右，自顶向下对干涉条纹扫描。在扫描中根据逻辑运算，将二值化后的干涉条纹进行删除或标记为骨架点或标记为候选点。第一次遍历时，条纹上所有为 1 像素的点均为候选点，第二次覆盖时，只对第一次遍历后标记为候选点的像数进行处理。经过多次迭代，直到使条纹形成单像素宽度为止。如果某像素  $x$  满足以下条件，则删除：

- 1) 逻辑表达式  $\sum_{i=1}^4 o_{2i-1}(o_{2i} + o_{2i+1}) = 1, (o_9 = o_5)$ ;
- 2)  $BN > 1$ ,  $B$  为起始点像素,  $N$  为结点像素;
- 3)  $BN < T$ ,  $T$  为起始点与最大距离结点的长;
- 4) 在前一次覆盖时,  $x$  未被标记为骨架点。

如果上述条件 1)、2) 为假，则将  $x$  标记为骨架点，如果条件 3) 为假，则将  $x$  标记为候选点，供下一次覆盖时使用。条件 1) 表示只对两个像素以上宽度的候选点和非边界点进行处理，确保条纹细化后的连通性，条件 2)、4) 防止过度删除，条件 3) 防止条纹上产生断口。

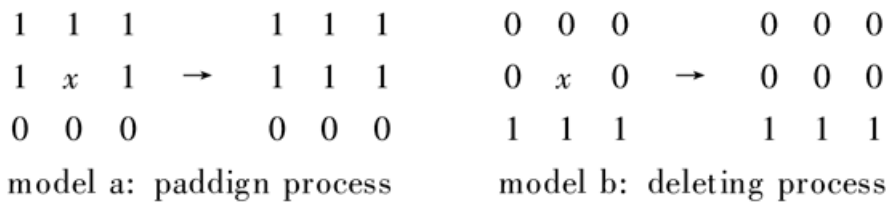


Fig. 4 (a) Model thinning process, (b) Hilditch thinning process

图 4(a) 给出了上述方法的细化结果，图 4(b) 为霍尔迪氏细化结果。由图 4 可知，本文所用方法具有条纹光滑连续，断点少，无分叉的优点，比霍尔迪氏细化效果好。

**结 论** 提出用反高斯变换对干涉图进行光强平均分布处理，较完整地保持了干涉图的数据信息，经过处理后的干涉条纹范围与实际中所观察到的范围基本一致，减少了数据丢失，为以后的处理提供了良好的基础。本文提出了应用边缘检测的方法来代替常用的干涉图二值化方法，这种方法在实际应用中具有条纹定位准确、数据量完整、条纹光滑且不断裂、细化后条纹不分叉等优点，在实际处理中取得了良好的效果。

## 参 考 文 献

- [1] Enxi Yu, Soyong S. Cha. Two-dimensional nonlinear regression for interferogram analysis. *Proc. SPIE*, 1995, **2546**: 297~ 306
- [2] James S. Slepicka, Soyong S. Cha. Stabilized nonlinear regression for interferogram analysis. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(8): 5039~ 5046
- [3] Wonjong Joo, Soyong S. Cha. Automated interferogram analysis based on an integrated expert system. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(11): 7486~ 7496
- [4] Thomas M. Kreis. Computer aided evaluation of fringe patterns. *Optics and Lasers in Engineering*, 1993, (19): 221~ 240
- [5] Huang Zhi, Rolf B. Johansson. Interpretation and classification of fringe patterns. *Optics and Lasers in Engineering*, 1992, (17): 9~ 25
- [6] 胡逸群. 用数字滤波消除散斑条纹噪声. 光学学报, 1989, **9**(1): 61~ 66
- [7] 李德喜, 方 强, 谭 玉. 散斑条纹的快速高精度处理技术. 光学学报, 1991, **11**(1): 88~ 91
- [8] 刘杰克, 姜宗林, 倪 刚. 纹影干涉图的图像处理方法研究. 气动实验与测量控制, 1991, **5**(2): 53~ 59
- [9] 贺安之, 闫大鹏. 全息散斑条纹的提取及图像处理. 光学学报, 1993, **13**(4): 340~ 344

**Research on the Interferogram Processing**

Wu Donglou    Ye Lihua    Bian Baomin    He Anzhi

(Applied Physics Department, Nanjing University of Sciences and Technology, Nanjing 210094)

(Received 23 October 1997; revised 12 January 1998)

**Abstract** A series of image processing methods of fringe analysis is given. It includes mean processing of intensity distribution using the anti-Gauss distribution, edge detection instead of binary method and an effective thinning method. The practical methods have been used to process the interferogram of optical computer tomography and good results are obtained.

**Key words** interferometry, image processing, Gauss distribution, edge detection, thinning.