

热流场层析图的预处理实验研究

姚 卫 闫大鹏 王振东 尤海航 贺安之

(南京理工大学应用物理系, 南京 210094)

摘 要 热流场的层析图是一些以条纹为主要特征的流场信息记录。条纹分析无论对干涉层析术还是对莫尔层析术都是极为关键的步骤。如何从各种噪声尤其是强烈的不均匀背景光噪声中提取清晰完整的条纹是热流场层析图预处理的主要问题。本文从热流场层析图的特征入手, 修正灰度直方图重心, 引入可提取概率作为区分噪声和信号的判据, 将灰度图像依据由图像性质决定的投影函数投影到概率平面上, 进行迭代以增强信号, 衰减噪声。事实证明, 本文所提出的方法对热流场层析图的预处理是行之有效的。

关键词 光学层析, 热流场, 图像处理。

1 引 言

光学层析技术对热流场的三维检测因其具有非接触、抗干扰、可定量等优点已得到越来越多的应用^[1, 2]。目前, 无论是莫尔层析术还是干涉层析术, 热流场的定量测试都主要依靠对干涉层析图或莫尔层析图的条纹分析。如何从各种噪声中提取出清晰完整的条纹, 以进行下一步的跟踪和计算, 是图像预处理技术的主要研究目的。

热流场的层析图向来被认为是比较困难的一类, 原因在于除了与一般干涉图处理中遇到的光学元件缺陷、散斑、接收系统误差等相同的噪声外, 热流场层析图的特殊困难是严重的照度不均和边缘模糊。但同时层析图又是一种以条纹为特征的背景比较单一的图像, 而预处理的目的是要从背景中提取能完整保存信息的条纹。一般的预处理方法, 对热流场的图像是不适用的。图 3(a) 是一个典型的热流场莫尔层析图, 用常规的方法处理, 结果如图 3(b) 所示, 人们最为关注的高亮区和视场边界比对区的的信息几乎完全损失。近年来, 许多图像研究人员提出了大量基于统计的处理模板^[3, 4], 但无论模板做得怎样小, 在其去除噪声的同时均不可避免地使原本就混叠难辩的图像边界和背景更加难以区分。Cha 等人把条纹的方向作为干涉条纹的特征设计了方向线型滤波器^[5]。然而, 对于热流场来说, 由于集中在高亮区的的信息不可丢失, 整个图像视场内的灰度梯度很大, 并有可能出现条纹中断不连续的情况, 方向探测难以实现, 也就谈不上找出合适的方向线型滤波模板, 所以模板类的条纹提取方法很难对视区边界和高亮区的条纹提取作到同时兼顾。

本文针对热流场层析图的特征, 提出自适应的概率平面滤波方法。所谓自适应, 是指图像向其概率平面投影或映射的函数是由图像的性质决定的。在概率面上对图像的投影作必要

的迭代滤波后再反投影成所需图像。

2 设计思想

热流场层析图必须转化为二值化图像,才能抽取出所需要的条纹信息。一般来说,直接二值化意味着极大的信息损失,所以在二值化之前,必须使图像的信息部分和背景部分都具有较均匀的灰度,同时两部分还要有比较明确的灰度差别。由于严重的照度不均,条纹信息区分布在灰度梯度很大的视场内,这样,既要保留与背景几乎混叠的边界区作为参考条纹,又要最大可能地突出高亮区的信号条纹,使二值化前预处理成为主要难题。但是,热流场层析图的这一鲜明特征也正是可以利用的突破口,即不属于视场的背景是图像最暗的部分,并可以认为亮条纹是所要提取的信号。基于这一考虑,人们对于图像的每一像素提出“可提取概率”或“信息概率”的概念,即对层析图上各点定义其为被提取信号点的概率。按照热流场层析图的特征分析,不妨设最亮点为信号点的概率为 1,这样背景的“信息概率”就是最小的。然而,由于照度不均,故每一像素的“可提取概率”值必须依据层析图的照度分布加以修正。在提出图像向其特征概率面投影的投影函数之前,分析一下热流场层析图的灰度直方图分布,对于自适应修正的参数设计是非常必要的。图 1 是典型热流场层析图的灰度直方图。条纹几乎呈余弦平方分布在除去背景外的所有灰度级上。由图 1 中可见,暗区(零灰度附近)和高亮区(最大灰度附近)集中了大量的像素。也就是明暗两端灰度区内的信息密度大,中间灰度区的信息密度小。热流场层析图的这一特征决定了由灰度图像向其相应概率面投影的投影函数的基本形状应是如图 2 所示的非线性曲线。选择这样的投影函数实际上同时完成了直方图修正与逐点的“可提取概率”的求取。

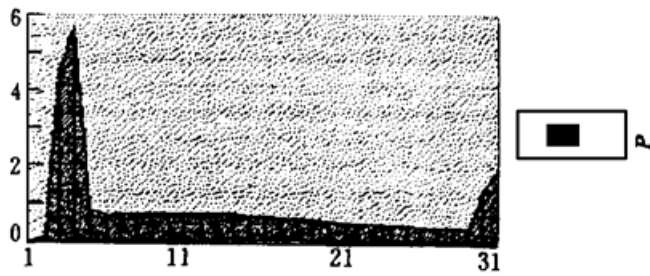


Fig. 1 Histogram of a tomogram of thermal flow field

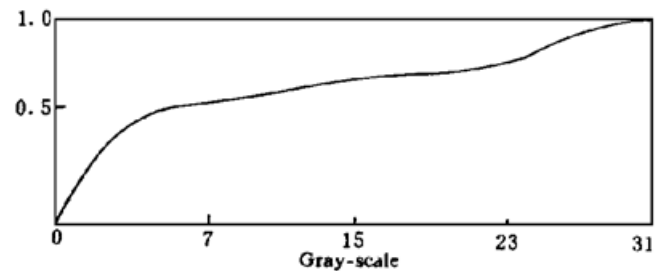


Fig. 2 Basic shape of mapping function curve where the lowest and highest gray-scale sections have more steep slope

本文提出的投影函数是一个动态调整的求取各像素“可提取概率”的映射,其数学模型如下:

$$P(m, n) = \begin{cases} \left[1 + \frac{G_{\max} - G(m, n)}{\alpha} \right]^{-\beta} & G(m, n) < \alpha \\ \left[1 + \frac{G(m, n) - G_{\max}}{k} \right]^{\frac{1}{\beta}} & G(m, n) \geq \alpha \end{cases} \quad (1)$$

式中 $G(m, n)$ 为层析图各像素的灰度值, G_{\max} 为层析图上最亮点的灰度值, β 为由图像灰度梯度决定的参数。通常在高亮区信息对比度差却又必须保留该区特征时, β 取较大值。

α 的取值是为保证当指定某一 $G(m, n)$ 时,由(1)式计算对应此灰度的像素的“可提取概率”为 0.5。换言之,若记 $P(m, n) = 0.5$ 时的 $P(m, n)$ 为阈值 P_{th} ,则由:

$$0.5 = [1 + (G_{\max} - P_{th})/\alpha]^{-\beta} \quad (2)$$

可求得 α 。k 的取值应满足使分段投影函数连续的条件。

得到层析图的其概率平面上得投影后,就可以在概率平面上进行处理。对 $P(m, n)$ 作对比度增强处理 T' :(r 为迭代次数)

$$P'(m, n) = T[p(m, n)]$$

$$\text{其中: } P'(m, n) = \begin{cases} (\alpha/G_{\max})P(m, n) & 0 \leq P(m, n) \leq 0.5 \\ 1 - (\alpha/G_{\max})(1 - P(m, n)) & 0.5 < P(m, n) \leq 1 \end{cases} \quad (3)$$

最后,将概率平面上得处理结果反投影成灰度分布,得到所需的热流场层析图。

由于概率映射中参数 α 、 β 的值直接影响到投影函数的曲线形状,如何结合层析图的灰度特征确定 α 、 β 是至关重要的。如函数定义中所述, α 是由指定的灰度阈值 P_{th} 决定的,是反映均值的量。本文采用修正直方图重心的方法选择灰度的阈值,从而确定了 α 的取值:

在如图 1 的直方图上找出一个灰度级 L ,使 L 左右的直方图下的面积近似相等,认为此点为直方图的重心。

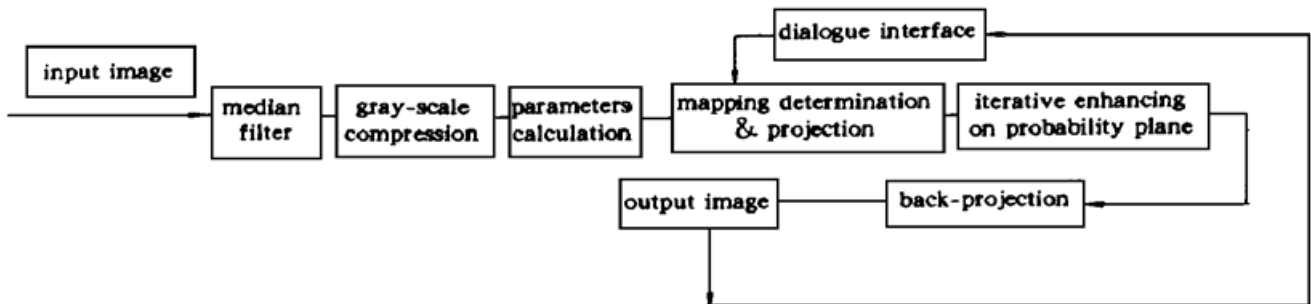
$P_{th} = L$, 即由 $0.5 = [1 + (G_{\max} - L/\alpha)]^{-\beta}$, 求出 α 。

α 值与图像的若干已知信息比较,在 L 附近调整 P_{th} 直至 α 满足各判据。

β 是由灰度梯度决定量,反映图像的方差。 β 的大小极大地影响投影函数的明暗两区的斜率,也就是以多大比例展开这两个信息密集区。按照一定规则将灰度方差归化到 1~3 之间,确定为投影函数的 β 值。

3 处理方法

热流场层析图的预处理框图可表示为:



本文研究方法的实施步骤如下:

1) 对图像作普通的 3×3 掩模(Mask)的中值滤波去除散斑噪声。

2) 为减少计算时间,将 256 灰度级的图像压缩至 32 灰度级。求取最大灰度 G_{\max} ,并记录此点坐标为 (m_m, n_m) 。求各像素梯度 $\text{Grad}(m, n)$:

$$\text{Grad}(m, n) = \frac{G_{\max}^2 - G(m, n)^2}{(m_m - m)^2 + (n_m - n)^2} \quad (3)$$

计算最大灰度,并将之归化至 1~3 之间,确定为 β 值。

3) 计算直方图,求取直方图重心 L ,使 L 左右两侧灰度级对应直方图下的面积相等。以 L 为阈值计算 P_{th} ,试算 α ,并迭代修正以得到符合要求的阈值,最终确定 α 值。

4) 按文所述的投影函数求得各像素的“可提取概率”,得到层析图的概率面投影。

5) 按文所述的概率面增强算法 T ,经 r 次迭代,使图像对比度增强。

6) 将概率面投影反投影成图像, 经人机接口确认是否得到满意结果, 若不尽满意, 可重复(3)~(6), 调整各参数再次处理。

7) 输出图像, 以进行后继的二值化、细化处理。

本程序在 Visual C++ 4.0 for Windows95 环境下调试运行, 有良好的人机界面, 易于结合先验知识调整参数, 获得满意效果。

4 实验结果

图 3(a) 是模拟炮管膛口喷射的热流场莫尔层析图。经通常的预处理后, 如图 3(b) 所示, 由于严重的照度不均, 人们几乎从层析图无法观察高亮区流场的特性。图 3(c) 是经概率滤波处理后的层析图。处理后的图像不仅尽可能地突出了亮区的条纹, 极好地将背景和视区边界区分开来。这样, 可以清楚地观察到了膛口周边热流场呈现出的条纹分布, 从而得出该喷射状态呈脉冲型, 即喷发不稳定、不均匀的结论。着对于评价膛口设计, 提高射击稳定性和精度有重要意义。图 3(d) 是由图 3(c) 得到的二值化图像。

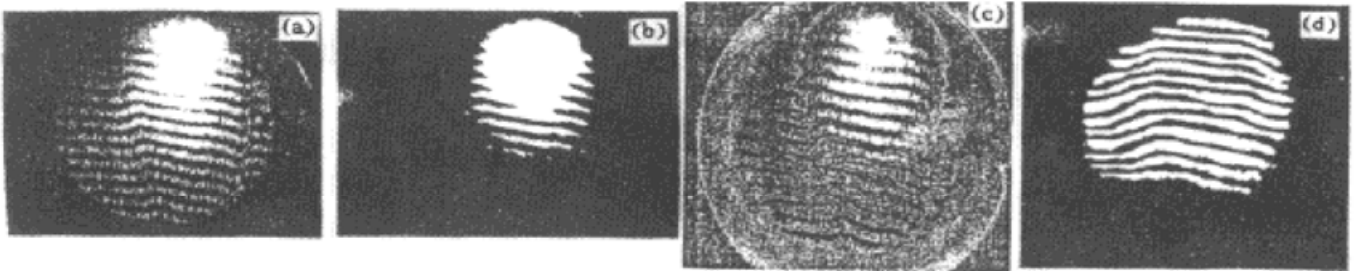


Fig. 3 Tomogram and its preprocessing results of flow field of a gun muzzle. (a) Moire tomogram sampled by a 512×512 CCD. (b) Result of binarization following median-filtering, routine processing procedure. (c) Image after probability filtering presented above. (d) Binary image from (c)

图 4(a) 是酒精灯似稳场的莫尔层析图。图 4(b) 是按通常方法处理的二值化结果。由于必须保留亮区信息, 视场边界模糊缺损, 难以寻找条纹位移的参考位置。图 4(c) 是经概率滤波处理后的层析图, 它很好地保留了视场的圆形边界。图 4(d) 给出由图 4(c) 得到的二值化图像。

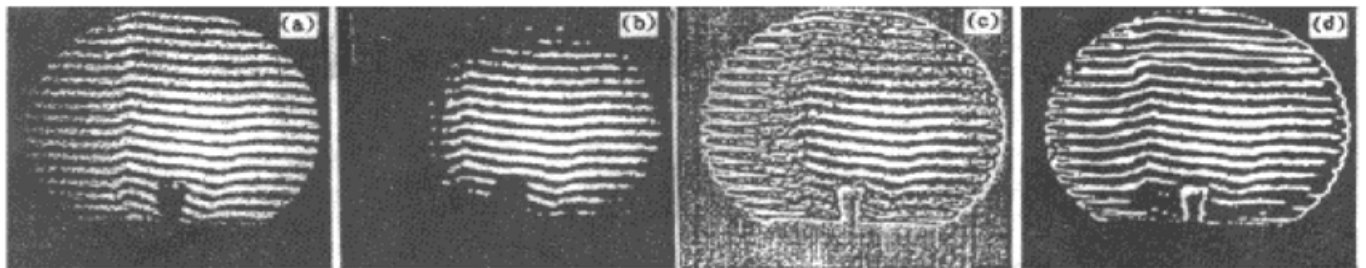


Fig. 4 Tomogram of thermal field of a spirit lamp and its preprocessing results. (a) Moire tomogram sampled by a 512×512 CCD. (b) Result of binarization following median-filtering, routine processing procedure. (c) Image after probability filtering presented above. (d) Binary image from (c)

图 5(a) 是液体火药滴在着火点引燃时的干涉层析图。图 5(b)、图 5(c) 分别是按通常方法和概率滤波处理的结果。图 5(d) 给出由图 5(c) 得到的二值化图像。

从上述实验可以很明显地看出, 由概率滤波处理后再进行二值化, 能够提取更多的有用信息, 对后继的处理是非常重要的。

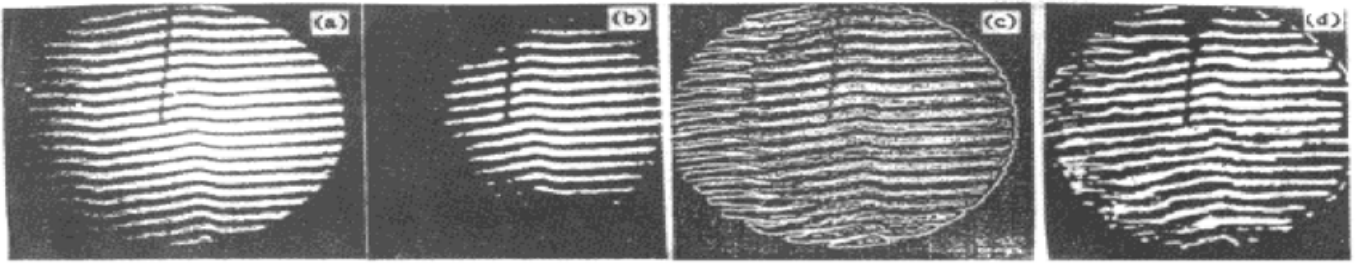


Fig. 5 Tomogram of thermal field of ignition of liquid powder and its preprocessing results. (a) Interferometric tomogram sampled by a 512×512 CCD. (b) Result of binarization following median-filtering, routine processing procedure. (c) Image after probability filtering presented above. (d) Binary image from (c)

结 论 本文所设计使用的热流场层析图的预处理算法引入了像素灰度和隧“可提取概率”之间的动态映射，既完整地保存了暗背景中地边界信息又最大可能地突出了高照度区的条纹。经对多种热流场层析图的试验，收到良好的效果。进一步的二值化和细化算法也在此基础上得到改进。这方面的工作将另文详述。

参 考 文 献

- [1] 贺安之, 闫大鹏, 激光瞬态干涉度量学, 北京: 机械工业出版社, 1991
- [2] 闫大鹏, 刘 峰等, 一种改进的代数迭代重建技术及其在三维温度场再现中的应用. 光学学报, 1996, 16(9): 1296~ 1300
- [3] Makoto Nagao, Takashi Matsuyama, Edge preserving smoothing. *Computer Graphics and Image Processing*, 1997, 9(3): 394~ 407
- [4] G. T. Reid, Automatic fringe pattern analysis: A review. *Opt. & Lasers in Engng.*, 1987, 20(4): 429~ 415
- [5] Enxi Yu, Wonjong Joo, Soyoung S. Cha, Directional smoothing for interkrogram reduction. *Proc. SPIE*, 1993, 2005: 553~ 561

Experimental Study on Image Preprocessing of Thermal Flow Field Tomogram

Yao Wei Yan Dapeng Wang Zhengdong You Haihang He Anzhi

(Department of Applied Physics, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094)

(Received 16 April 1997; revised 14 November 1997)

Abstract Tomograms of thermal flow field are the information records characterized of fringes. Fringe analysis is a critical step both for interferometric and Moire tomography. How to extract clear and intact fringes from all kinds of noises, especially strongly inhomogeneous background illumination, is the key problem in preprocessing of thermal flow field tomogram. The characteristics of thermal flow field are analyzed and a probability filter method is developed, in which the center of image histogram is corrected, a so-called “extractable probability” is introduced as the standard for identifying signal from noise. According to a projection function determined by image features, gray image is projected into its probability plane where iterative signal enhancing and noise reduction are performed. It is proved that the probability filter presented in this paper is effective to the tomograms of thermal flow field.

Key words optical tomography, thermal flow field, image processing.