

粒子场全息分析中的自动判焦 与自动阈值选择方法

赖天树 谭玉山

(西安交通大学 机械系, 西安 710049)

提 要

本文提出一种新的自动判焦与自动阈值选择方法, 并在由 IBM/PC-XT 计算和 PCVISION plus 图象板组成的系统上实现。通过对实际粒子场全息图的分析, 表明该方法效果良好, 是一种更一般的、适应性更广的方法。

关键词: 粒子场全息图; 图象分析; 判焦, 阈值选择。

一、引 言

粒子场的全息测量包括两个过程: 粒子场的全息记录和全息图的分析。实际上, 全息术仅仅是记录三维粒子场, 而要获得粒子大小和空间分布, 必须分析全息图的再现现象。由于全息图所包含的信息十分丰富, 一张全息图通常包含数千幅独立的图象^[1]。若由人工分析, 显然是很困难的, 且难于保证分析精度。随着图象处理技术的发展, 粒子全息图的分析也开始采用图象处理技术来完成。已报道了几种用于粒子图象分析的图象处理系统和分析方法^[2~4], 而对粒子场分析中的最实质性的两个问题——判焦与阈值选择, 研究甚少, 作者认为, 不解决这两个问题, 粒子场全息图的分析就不可能实现全自动化。本文的工作针对粒子图象的特点, 提出一种较普遍、实用的全自动判焦与阈值选择方法。

二、自动阈值选择方法和二值化过程

在粒子图象分析中, 提取目标的最常用的方法是设置灰度门限。选择阈值的方法很多^[5], 最常用最简单的方法是根据灰度直方图分布来确定阈值。文献[6]报道了一种根据背景灰度和粒子边缘灰度来自动选择阈值的方法, 该方法的困难在于要确定粒子边缘的灰度。文献[7]提出了一种交叉边缘线阈值法 (cross-edge-line thresholding), 然而, 该方法较复杂, 实现困难, 并对噪声灵敏。

本文提出一种根据粒子图象的灰度概率分布来自动选择阈值法, 其基点是粒子在整个图象中所占比例是很小的, 图象的灰度均值主要反映背景的平均强度, 而偏差才反映粒子灰度偏离均值的程度, 因此, 可以利用图象的均值与偏差作为自动阈值选择的依据。

设粒子图象的灰度概率分布为 $p(I)$, $I=0, 1, \dots, 255$, 则灰度均值 \bar{I} 和灰度偏差 σ 分别为

$$\bar{I} = \sum_{I=0}^{255} I p(I), \quad (1)$$

$$\sigma = \sqrt{\sum_{I=0}^{255} (I - \bar{I})^2 p(I)}. \quad (2)$$

通常认为粒子图象的背景灰度分布服从正态分布, 而微粒在整个图象中所占比例又是很小的, 因此, 整个粒子图象的灰度概率分布 $p(I)$ 仍近似服从正态分布。对于正态分布, 高于均值 1.5σ 处的概率已达 93.32%, 显然, 这样大的概率完全可以认为是绝对多数了。因此, 若取灰度阈值为 $\bar{I} + 1.5\sigma$ (亮粒子暗背景图象), 则完全可以分离背景与粒子。而此时, 粒子灰度所占概率为 6.68%, 即少数。然而, 这种一步阈值法的抗噪声干扰能力较弱。假若

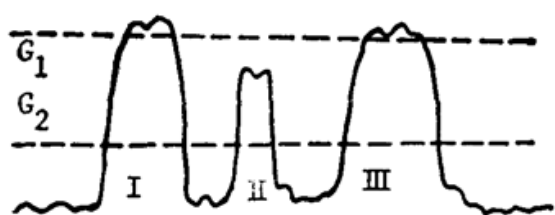


Fig.1 Example of two-step thresholding

如图 1 所示的灰度信号, I、III 表示聚焦粒子, II 表示某种噪声起伏。若直接取阈值为 G_2 , 则 I、II、III 均被当作粒子提取出来, 显然, II 是一个误判; 若选取较高阈值为 G_1 , 则只有 I、III 被提取, 而 II 被丢失。但此时 I、III 的提取是不完整的。若再以 G_2 为阈值, 以已提取到的属于 I、III 的点为源点, 采用中心化区域生长法膨胀粒子 I、III, 则 I、III 就能完整地提取,

同时, 噪声 II 又不被提取。这充分显示了二级门限法比单级门限法具有更强的抗噪声干扰能力。因此, 文本提出二级自动阈值选择法。

(1) 对于暗背景、亮粒子图象, 一级灰度阈值选为

$$I_{Hth1} = \sum_{I=M_H}^{255} I p(I), \quad (3)$$

式中 $M_H = \bar{I} + K_{H1}\sigma$, K_{H1} 为一松弛因子, 通常取 2~2.5。

第二级灰度阈值选为

$$I_{Hth2} = \bar{I} + K_{H2}\sigma, \quad (4)$$

式中 K_{H2} 为一松弛因子, 通常取 1.5~2.0。

(2) 对于暗粒子, 亮背景图象, 一级灰度阈值选为

$$I_{Lth1} = \sum_{I=0}^{M_L} I p(I), \quad (5)$$

式中 $M_L = \bar{I} - K_{L1}\sigma$, K_{L1} 为一松弛因子, 通常取为 2~2.5。

第二级灰度阈值选为

$$I_{Lth2} = \bar{I} - K_{L2}\sigma, \quad (6)$$

式中 K_{L2} 为一松弛因子, 通常取 1.5~2.0。

首先以 (3) 式或 (5) 式确定的第一级阈值将图象按图 2 或图 3 所示的变换关系半门限化。然后, 以方程 (4) 式或 (6) 式确定的值为第二级阈值, 以半门限化过程中已提取到的粒子点为源点, 采用中心化区域生长法膨胀粒子, 使其完整, 以提高测量精度。当区域生长结束后, 再用 (3) 或 (5) 式定义的一级阈值将背景全部置成 0 (暗背景) 或 255 (亮背景) 灰度。至此, 图象就被二值化了, 实现了粒子与背景的分。

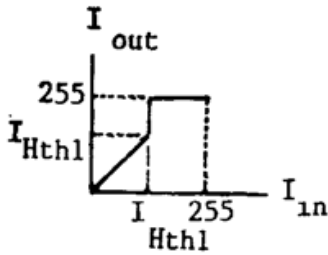


Fig. 2 Top half thresholding

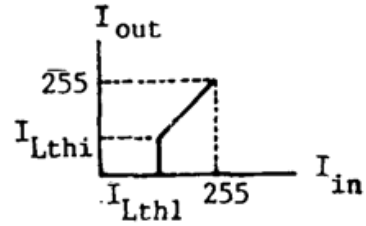


Fig. 3 Bottom half thresholding

从上面的二值化过程可以很清楚地看到两级门限 I_{Hth1} 和 I_{Hth2} 或 I_{Lth1} 和 I_{Lth2} 的作用。实质上, 第一级阈值 I_{Hth1} 或 I_{Lth1} 仅仅是用来发现可能的粒子。而并不一定要完整提取粒子的边界。松弛因子 K_{H_1} 或 K_{L_1} 越大, 抗噪声干扰能力也越强, 但同时发现粒子的概率降低。反之, 抗噪声干扰能力变弱, 但发现粒子的概率增大。因此, 应在抗噪声干扰能力和发现粒子的概率之间折衷选择 K_{H_1} 或 K_{L_1} 。实践表明, K_{H_1} 和 K_{L_1} 取值范围为 $2 \sim 2.5$ 是一个较好的折衷。第二级阈值 I_{Hth2} 或 I_{Lth2} 才是用来完整提取第一级阈值所发现的可能粒子的边界的。松弛因子 K_{H_2} 或 K_{L_2} 的大小决定了不同的粒子边界, 进而决定了粒子大小的测量精度。实践表明, K_{H_2} 或 K_{L_2} 取值范围为 $1.5 \sim 2.0$ 较好。此时, 粒子灰度概率占 $2.27\% \sim 6.68\%$ 。 K_{H_2} 或 K_{L_2} 的大小对聚焦粒子的边界影响较小, 因聚焦粒子的边界灰度变化迅速。分析结果表明, K_{H_2} 或 K_{L_2} 在 $1.5 \sim 2.0$ 范围变化时, 聚焦粒子的边界变化最多一个象素, 即 $2.2 \mu\text{m}$ 。

上述方法的不足之处是当图象中不存在粒子时, 也可能会提取一些噪声伪粒子。不过, 通过自动判焦后, 有可能消去它们。总之, 上述的二级阈值方法和二值化过程是一种较适用的方法。参数 K_{H_1} 、 K_{H_2} 和 K_{L_1} 、 K_{L_2} 只要取值在给定范围, 对结果的影响不灵敏, 从而保证了处理结果的稳定性和准确性。

三、自动判焦

采用图象二值化后, 粒子已被提取。然而, 提取的粒子中, 有的是聚焦的, 有的是散焦的, 有的还可能是噪声。怎样判别它们的属性呢? 关于这个问题的研究目前还没有一种好的方法。本文提出一种较一般的自动判焦方法, 其原理是基于二值化的粒子边缘梯度图象与二值化粒子图象之间的相关值。根据相关值的大小判断该粒子是否聚焦。

本文采用微分算子求粒子图象的梯度^[8], 该算子对局部噪声不敏感, 而通常的微分算子都是采用相邻点之间的差分^[5], 它对局部噪声敏感。文献[8]中的微分算子如图4所示, 它是用邻域均值之间的差分代替了点之间的差分。任一点 (i, j) 的梯度等于水平差分的绝对值加上垂直差分的绝对值, 即

$$g(i, j) = \nabla_H + \nabla_V, \quad (7)$$

$$\nabla_H = |\bar{f}(i, j-2) - \bar{f}(i, j+2)|, \quad \nabla_V = |\bar{f}(i-2, j) - \bar{f}(i+2, j)|。$$

式中 $g(i, j)$ 为梯度图象中 (i, j) 点的灰度。 $\bar{f}(i, j)$ 表示粒子图象 $\{f(i, j)\}$ 中 (i, j) 点的 3×3 邻域的均值。

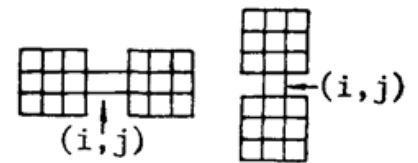


Fig. 4 Templates used for gradient estimation

用(3)和(4)式选择两级阈值,并用上述的二值化过程将梯度图象 $\{g(i, j)\}$ 二值化,就获得一幅边缘图象。该图象由聚焦粒子的边缘和它的非粒子但边缘变化比较陡的目标及区域的边界组成。将此图象暂存起来。

用自动阈值选择法和二值化过程,将粒子图象二值化。然后,采用边缘跟踪技术跟踪每个粒子的边缘,并记录下边缘点的坐标。设跟踪到某一粒子的边缘由 N 个象素构成,边缘点坐标集合为 S 。再检查二值化梯度图象中对应于坐标集合 S 的那些点,若有 M 个边缘点相对应,则定义相关系数 $C = (M/N)$ 。当 C 大于等于某一阈值 C_{th} 时,则认为该粒子是聚焦的,否则,是散焦的,或者不是粒子,把它去掉。图 5 表明了自动判焦的过程。(a)为二值化的粒子图象,(b)为二值化的梯度图象。(a)与(b)相关后,粒子 1 的相关系数为 1;粒子 2 的相关系数小于 1 但大于 $C \cdot S$,粒子 3 的相关系数为 0,粒子 4 的相关系数小于 0.5。若取相关阈值 $C_{th} = 0.5$,则粒子 3 和 4 被消去,只留下粒子 1 和 2。如图 5 (c)。由于聚焦粒子的边缘较锐,因此,聚焦粒子的相关系数都接近 1。实验分析表明:相关阈值 C_{th} 取 0.5 较好。 C_{th} 的变化对聚焦粒子的判焦影响不大,而对于聚焦不好的粒子影响较大。 C_{th} 的取值越大,判焦就越严格,反之,判焦就较松。对于一般的粒子大小测量, C_{th} 取 0.5 完全能满足精度要求。经验表明, C_{th} 的变化对测量精度、结果的稳定性影响不大。

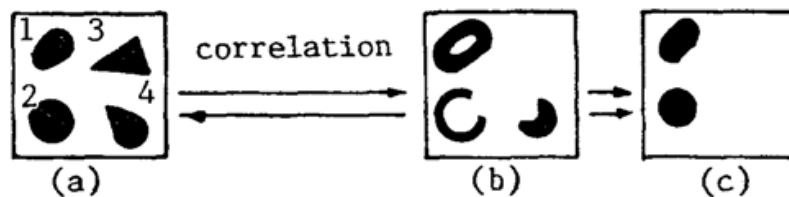


Fig. 5 Process of automatic focussing recognition using correlation

四、算法实现及处理结果

由 IBM/PC-XT 微机 and PCVISION plus 图象板组成的系统上,用 C 语言实现了自动阈值选择和自动判焦算法。并对实际的同轴和离轴粒子场全息图进行了处理,处理过程及结果如图 6 和图 7。

图 6(a) 为一幅固体以箭推进剂燃烧粒子场全息图的显微再现照片。可以看到。由于燃烧的影响,该图的质量很差,亮度极不均匀,因此,必须分块处理。对于质量这样差的热态粒子图象的自动分析是很困难的,目前报道的粒子图象分析系统都是针对冷态粒子场图象的,如柴油雾滴,水滴等粒子图象。为了检验本文提出的自动阈值选择和自动判焦方法的适应能力,可以对图 6(a)进行了分析。图 6(b)为图 6(a)的直方图,显然是一个单峰结构。图 6(c)为图 6(a)的梯度图象,显然图 6(a)的背景分布很不均匀,图 6(d)为图 6(c)的二值化图象。图 6(e)为图 6(a)的二值化图象,可以看到,它含有聚焦粒子,散焦粒子以及噪声伪粒子。图 6(f)为图 6(d)和图 6(e)相关判焦后图 6(e)的输出结果。显然,图中现在只含有聚焦粒子,而散焦粒子和噪声伪粒子都被自动消去。

为了比较本文的方法与常用的根据直方图双峰设定阈值的方法,分析了图 7(a)所示的

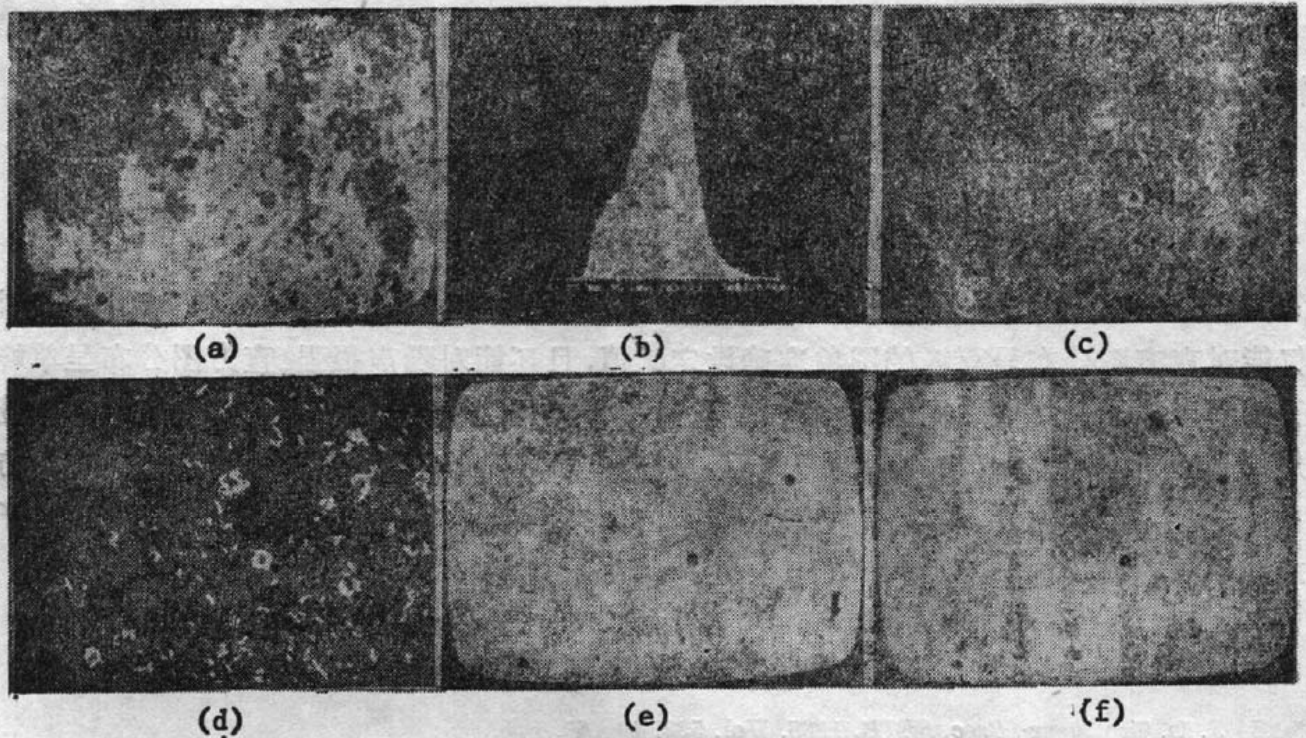


Fig. 6 Process of automatic analysis using the new method.

(a) Original image; (b) Grey-level histogram of (a); (c) Gradient image of (a); (d) Thresholded two grey-level image of (c), $K_{H_1}=2.0$, $K_{H_2}=1.5$; (e) Thresholded two grey-level image of (a), $K_{L_1}=2.2$, $K_{L_2}=1.8$; (f) Resultant in-focus particle image

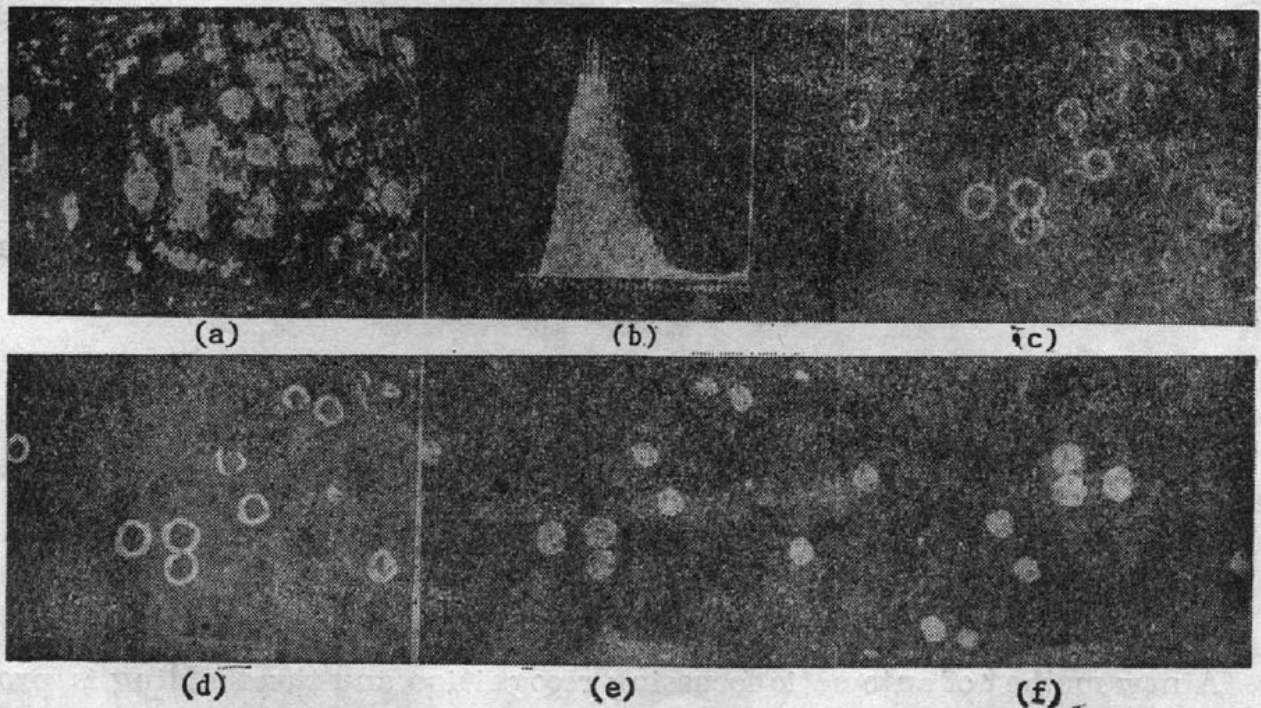


Fig. 7 Process of automatic analysis using the new method

(a) Original image; (b) Grey-level histogram of (a); (c) Gradient image of (a); (d) Thresholded two grey-level image of (c), $K_{H_1}=2.2$, $K_{H_2}=1.8$; (e) Thresholded two grey-level image of (a), $K_{H_1}=2.0$, $K_{H_2}=1.8$; (f) Resultant in-focus particle image

玻璃微珠同轴全息图显微再现图象。图 7(b) 为图 7(a) 的灰度直方图分布，显然，它是一个典型的双峰结构，用通常的设定阈值在两峰之间的谷点或中点的方法也能较好的提取目标粒子，但部分亮背景噪声也被提取。本文介绍的两级阈值法分析图 7(a) 的过程如图 7(c)、图 7(a) 和图 7(e)。从图 7(d) 和图 7(e) 可以看到，两级阈值法非常准确地提取了粒子和梯度

边缘,同时又有强的抑制噪声的能力。图 7(f)为图 7(e)和图 7(d)相关判焦后图 7(o)图的输出结果,图 7(e)中左、右上角的两个散焦粒子或噪声伪粒子已被消除。

五、结 论

从图 6、图 7 的分析表明,本文提出的自动阈值方法是一种更一般的自动阈值方法,不仅能对直方图分布呈双峰的图象准确设定阈值,且还能对噪声很强、直方图分布呈单峰的粒子图象准确设定阈值。同时,由于二值化过程中采用了两级阈值、半门限化和中心化连接区域生长技术,提高了对噪声的抑制能力,又保证了粒子的完整提取。本文的自动判焦方法也是一种更一般的方法,与粒子的形状无关,因而可用于象煤粉那样的形状不规则的粒子的自动判焦。

参 考 文 献

- [1] J. D. Trolinger; *Prco. SPIE*, 1985, Vol. 532, 40~60.
- [2] H. J. Caulfield; *Opt. Engng*, 1985, **24**, No. 3, 462~463.
- [3] G. P. Bertollini, L. M. Oberdier *et al.*; *Opt. Engng*, 1985, **24**, No. 3, 464~469.
- [4] P. R. Payne, K. L. Corder *et al.*; *Appl. Opt.*, 1984, **23**, No. 2 (Feb), 204~210.
- [5] 余松煜,周源华等;《数字图象处理》,(电子工业出版社,北京,1989),150~171.
- [6] K. D. Ahlers, D. R. Alaxander; *Opt. Engng*, 1985, **24**, No. 6, 1060~1064.
- [7] E. L. Hanzevack, Chi-Hong Ju; *Opt. Engng*, 1988, **27**, No. 7, 528~534.
- [8] A. C. Bovik, D. G. Munsan Jr.; *Opt. Engng*, 1986, **25**, No. 11, 1246~1252.

A new method of automatic focussing recognition and thresholding for analysis of particle holograms

LAI TIANSHU AND TAN YUSHAN

(Department of Mechanical Engineering, Xian Jiaotong University, Xian 710049)

(Received 8 June 1990; revised 6 August 1990)

Abstract

A new method of automatic focussing recognition and thresholding is proposed and implemented on the system based on IBM/PC-XT and PCVISION plus frame grabber. The practical holograms of particle field are analysed using this new method. The results show that the new method is favorable and can be applied to automatic analysis of more general and extensive particle holograms.

Key words: particle field hologram, image analysis, focussing recognition, thresholding.