

# 喷雾图像的自动分析

宋 建 中\*

**摘要:** 本文叙述一个由电视、激光和计算机构成的自动分析喷雾图像的系统。它可以精确、快速地分析喷雾图像。无论构成喷雾的粒子是透明还是不透明的,是球形还是任意复杂的形状,都能进行分析。能自动挑选出聚焦的粒子并测出它们的大小、形状、位置和速度。

计算机仿真和对实际图像的分析都证明所用的分析方法是准确、可靠的。这种图像分析系统对分析各种喷雾图像是可行的,优点是明显的。对 $512 \times 512$ 个像元的图像,分析误差为5%左右。

## 一、引 言

喷雾图像的分析包括测定构成雾的粒子的大小、形状、位置以及流体的动态结构等问题。喷雾图像的分析对工业、国防、医药、农药、食品加工、燃烧、环境保护、气象等都很重要。

从前,喷雾图像分析是用机械办法对雾进行采样,或用照像方法把雾的图像照下来后,用人工进行分析。这种方法的优点是“眼见为实”,能看到喷雾中的粒子。但分析起来既费时间又不准确。得到一个完整的喷雾在时间和空间上的统计就更加困难。

后来发明了一些仪器,可以测量粒子的统计分布。其原理都是基于光的衍射和干涉。比如Malven Laser Diffraction Analysers (MLDA) 和Phase Doppler Spray Analyzer (PDSA)。MLDA是用一个环形探测器,测喷雾所衍射的第一级频谱。大小不同粒子的一级衍射谱分布到环形探测器的不同环内。根据不同环内得到的数据,导出粒子的统计分布。这种办法的优点是得到统计结果快,缺点是对大粒子和非球形粒子测量不准确。特别是不能得到具体的粒子分布结构,也不能测出粒子的速度。

PDSA比MLDA有所改进,它把被测量的粒子放在两束相干光的交叉点上,然后测量干涉条纹的变化,导出粒子的尺寸和速度。粒子的空间分布是靠一个两维的机械结构来测量。它的优点是可以得到单个粒子的大小和速度。但是它的动态范围小,对复杂形状的粒子测不准。

本文叙述的方法是从照像法发展而来的。它继承了照像法的优点,又比照像法有了改进,用计算机代替人去完成大量重复性的工作,并能自动对图像进行分析。随着计算机的发展和普及,小型图像处理系统的价格已经下降到能为一般用户所接受,这种电视、激光和计算机相

\* 注: 本文的作者是在美国Carnegie-Mellon大学D. Casasent和N. Chigier教授指导下进行的工作。部分内容曾在Pittsburgh 第三届国际煤炭会议上以“雾化的水煤浆图像分析”为题与张济宇(山西煤炭化学研究所)合作发表。

结合的系统，是目前分析喷雾图像最理想的办法。

## 二、图像质量和电视测量

在数字图像分析系统中，图像以三种形式存在。图 1 给出了这三种图像的示意图。

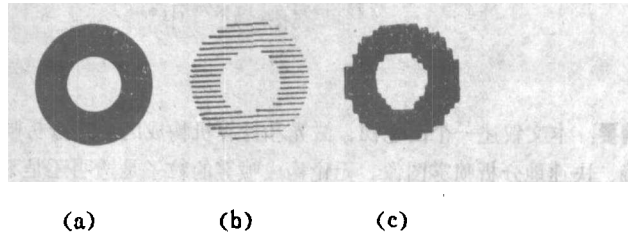


图 1 (a) 光学图像, (b) 视频图像, (c) 数字图像

被计算机分析的是数字图像，也就是说喷雾图像在被分析之前，经过了光—电转换和模—数转换。它们都影响着被分析的图像的质量。

要获得一个高质量的数字图像，也就是分辨率高、对比度好、噪声低的数字图像，首先要有高质量的光学图像。光学系统应有调光、调焦机构，保证光学图像强度合适、聚焦良好。同时，光学系统的视场、倾角、焦深和放大倍数也都要精心选择。

要获得一个高质量的数字图像，还要选择合适的电视摄像机。做为测量系统的检测元件，电视摄像机除了要有足够的灵敏度和带宽以外，还要有高的信噪比和良好的扫描线性。尤其是后者，直接影响测量的精度。因为扫描的非线性会造成视频图像的畸变，给分析结果带来误差。CCD像机不用电子束扫描，所以几乎不引起几何畸变，是较理想的电视摄像机。

最后，要获得高质量的数字图像，还要选择合适的数—模转换器。如果图像的最高空间频率为 $U_m$ ，采样频率为 $f_s$ ，则根据采样定理，必须有：

$$f_s > 2U_m$$

在器件允许的情况下，采样频率越高，造成的空间不连续性越小，图像边缘越平滑，数字图像在几何上越接近光学图像。当然，还要考虑到采样频率与扫描频率的同步关系。数—模转换器本身也有噪声，包括构成数—模转换器的元器件的噪声和量化噪声。一般当图像的灰度被量化成 256 个灰度级以上时，将会引起量化噪声，许多像元的灰度将随机发生变化，给测量和分析引入误差。

所以，自动图像分析系统的成败，不仅仅决定于计算机系统和支持软件及应用软件的好坏，还决定于光学系统、电视系统和光源的条件。质量太差的数字图像是很难用计算机去分析的。

本文中的图像分析方法，应用了电视测量的原理。电视摄像机把一个两维的光学图像编码成一维的时间信号序列，以复合视频信号的形式输出，供显示或处理。复合视频信号由图像信号和参考信号迭加组成。图像信号的幅度代表了入射到传感器上的光强。参考信号又叫同步信号，它由水平同步脉冲和垂直同步脉冲组成。水平同步脉冲决定每行扫描的起点和终点，垂直同步脉冲决定每场扫描的起点和终点。如果图像中有一个粒子，视频信号中就有一组脉冲信号，粒子在水平方向的宽度决定了这些脉冲的宽度，粒子在垂直方向的宽度决定了这组脉冲串里的脉冲个数。这些脉冲与行同步之间的间隔代表了粒子水平方向的位置，这些脉冲与场同步之间的间隔代表了粒子在垂直方向的位置。这正是从电视摄像机输出的视频信

号中可以抽取喷雾图像的特征的道理。

### 三、喷雾图像分析系统

整个喷雾图像分析系统的方框图示于图2。它由光学机械系统、电视系统和计算机系统组成。光学机械系统包括脉冲激光源,精密测量架和带有调光、调焦装置的成像系统。激光波长为 $0.6943\mu\text{m}$ ,脉冲持续时间为 $30\text{ns}$ ,两次脉冲间歇时间小于 $10\text{ms}$ 。准直后的激光只照亮一个指定的小范围,通过机械系统的调整可改变测量的位置。成像系统是个长焦距显微镜、焦距可由 $0.5\text{m}$ 变到 $1.3\text{m}$ 。

电视系统包括电视摄像机、监视器、录像机和同步机。摄像机是SC500型CCD固体摄像机。它的传感器尺寸为 $5.3\times 5.3\text{mm}^2$ ,由 $604\times 576$ 个像元构成。如果规定被测粒子的最小尺寸必须大于2倍的像元尺寸,最大尺寸必须小于100倍像元尺寸,则这个CCD像机的测量粒子的范围是从 $4.1\mu\text{m}$ 到 $4583\mu\text{m}$ ,它的信噪比是 $50\text{db}$ ,带宽 $5.7\text{MHz}$ ,调光范围为7个光圈。录相机是必须的,它把喷雾随时间的变化记录下来供事后处理和分析喷雾的动态过程。同步机被计算机的时钟控制,它又控制着光源和摄像机,使整个系统协调地工作。

计算机系统是与VAX-11/750联机使用的IBM-AT微型计算机,配有图像处理功能的硬件板和支持软件。

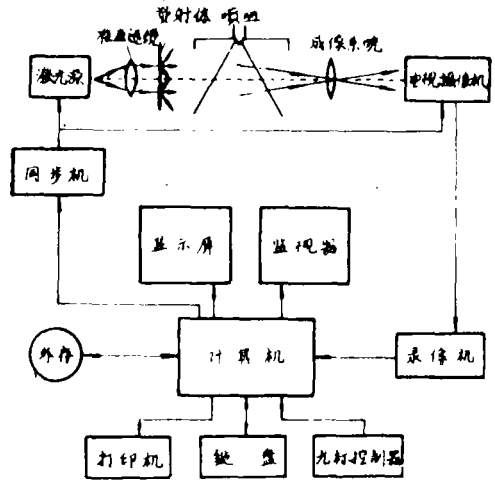


图2 喷雾图像分析系统方框图

### 四、喷雾图像分析

图10和11给出二个典型的喷雾图像,一个是水煤浆的,一个是水的。它们都是由聚焦的粒子、散焦的粒子和不均匀的背景所组成的。图像分析的要求是把聚焦的粒子挑出来并把它们的特征(大小、形状、位子和速度等)提取出来,最后给出一个统计结果。

从图像角度来说,粒子聚焦好坏的直观标准是粒子图像的边缘的清晰程度。聚焦好的粒子,边缘清楚,也就是粒子边缘处的灰度变化陡峭,或者说灰度梯度大。反之,在散焦的粒子图像的边缘处,灰度变化平缓、梯度小。不均匀的背景可以看成是连成一片的散焦粒子图像,因为和聚焦粒子相比,背景的灰度变化是缓慢的。所以用图像的灰度梯度做判别粒子聚焦好坏的特征是合适的。由于粒子在空间中占有一定体积,在不同方向上,散焦的程度不一样,所以判定一个粒子是否聚焦时,不能只考虑一个方向的梯度值。

图3是分离聚焦粒子的计算机程序方框图。经过分离后的图像是只有那些聚焦粒子剪影的二值图像。计算机对这个二值图像进行分析后给出粒子的尺寸、位置、形状和速度等特征。

由于粒子的形状有时很复杂,不能用由半径求圆面积那样的简单方法来得到粒子的大小等参数。本文中采用的方法是在计算机视觉中普遍采用的技术,用一个 $2\times 2$ 的窗口扫描图像,

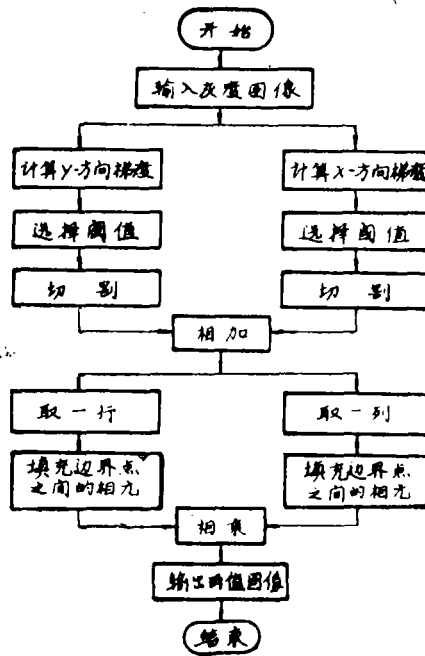
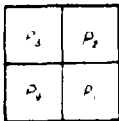


图3 分离聚焦粒子的流程图

对每一个像元及它的三个邻居进行检查后决定该像元与其它像元的连接关系。

窗口图形如图4所示。 $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 和 $P_4$ 是窗口所覆盖的四个像元。 $P_1$ 是被检查的像元，其它三个是它的邻居。由于这四个像元的取值只有二种，不是0就是1。所以窗口内的像元最多只能构成16种状态。如果以 $W$ 代表窗口状态，那么窗口状态数码可由下式求得：



$$W = P_1 + 2P_2 + 4P_3 + 8P_4$$

图4 扫描窗口 对应每一种窗口状态，计算机对被检查的像元有相应的一套算法。16种状态，已经足够分析一个二值图像。状态数 $W$ 和相应的算法之间的关系列于表1。

粒子的特征如下规定：连在一起的像元构成一个粒子。粒子边界内的像元数为粒子的面积。粒子的质心为粒子的位置，它如下计算：

$$X_c = \sum_{i=1}^N X_i / A$$

$$Y_c = \sum_{i=1}^N Y_i / A$$

这里  $(X_i, Y_i)$  是粒子中第  $i$  个像元的座标。

$(X_c, Y_c)$  为粒子质心位子。

$A$ 是粒子面积。

$N$ 是粒子总像元数。

粒子的这些特征，在窗口扫描图像的过程中就被记录下来。当一幅图像被扫完后，全部特征立即打印输出。抽取特征用的图像分析程序流程图示图5。采用这种分析方法，无论粒子的形状如何复杂，都能得到精确的分析结果。

表1 窗口状态数与算法行动对应表

窗口状态数 $W$	算 法 行 动
1	记录一个新目标; 记录当前目标在X和Y方向的起始位子; 记录当前目标的相元数; 设置合并标识符 = 1。
2	记录旧目标在Y方向的结束位子。
3	记录各旧目标的相元数; 更新在X方向的最小起始位子。
4	通过。
5	记录各旧目标的相元数; 更新在X方向的起始位子。
6	通过。
7	记录各旧目标的相元数; 更新在X方向的最小起始位子。
8	记录当前目标在X方向的结束位子; 更新最大结束位子; 设置合并标识符 = 0。
9	记录当前目标的相元数。
10	记录当前目标的结束位子; 把当前目标的相元数合并到相连的旧目标去; 更新在X方向的起始位子与结束位子; 更新在X方向的最小起始位子; 更新在X方向的最大结束位子; 目标数减1。
11	记录当前目标相元数; 新目标的相元数合并到相连的旧目标去; 更新在X方向的起始位子; 更新在X方向的最小起始位子; 目标数减1。
12	记录当前目标在X方向的结束位子; 更新在X方向的最大结束位子; 设置合并标识符 = 0。
13	记录当前目标的相元数。
14	记录当前目标在X方向的结束位子; 更新在X方向的最大结束位子; 设置合并标识符 = 0。
15	记录当前目标的相元数。

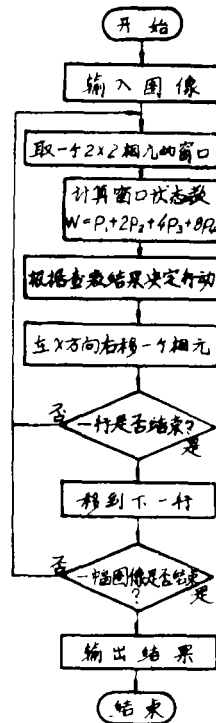


图5 特征抽取流程图

### 五、实验结果

为了证明本文中提出的图像分析方法的可靠性和精确程度，对整个分析过程逐步进行了检测。

首先，对分析二值图像的精度进行检测。用计算机产生一个测试图形（如图6所示），它包括不同形状的已知参数的子图形。计算机对它进行分析，结果如图7所示。图7说明，计算机分析二值图像（不存在光—电转换和模—数转换的问题）的结果与真实值完全一致。

然后，用一个标准测试卡，它包括12个不同尺寸的圆（如图8所示）。经过摄像机的光—电转换，A/D转换再送到计算机存储器内进行目标分离和特征分析。结果如图8所示。这个实验包括了整个系统中各部分的影响。由于可以认为CCD摄像机不引入几何畸变，又已证明对二值图像的分析也不引入误差。所以图8所示的误差就是由A/D转换和目标分离所引入的。本系统所用A/D变换器把图像在空间上采样成 $512 \times 512$ 像元，幅度量化为256级。这是较先进的水平。图8表明，实测的粒子大小与测试卡给出的值之间，最大偏差为5%。

进而，又对大量从现在得到的喷雾图像进行了测量。本文举出其中两个结果以说明对于各种粒子，（透明的与不透明的，球形和任意复杂形状的）都能准确的测量。分析过程在图10和图11中给出。图10是雾化的水煤浆，图11是水的喷雾。计算机打印输出的分析结果列于图

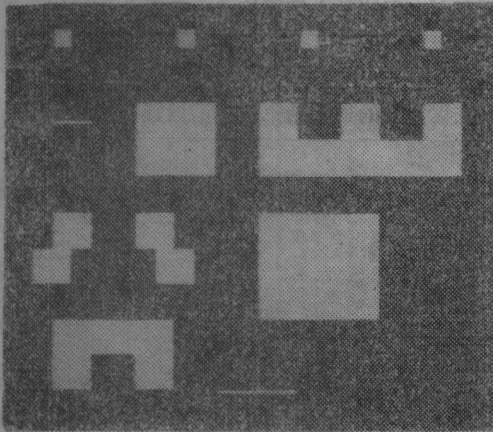


图6 计算机产生的图形

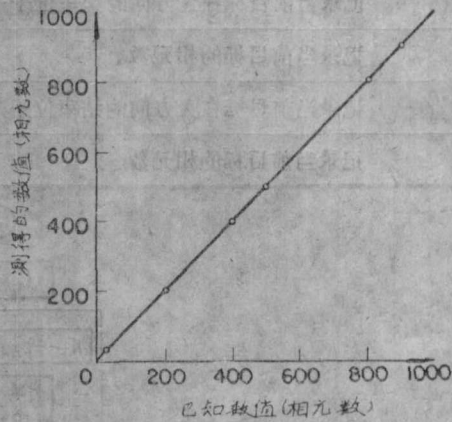


图7 对计算机产生的图形的分析结果

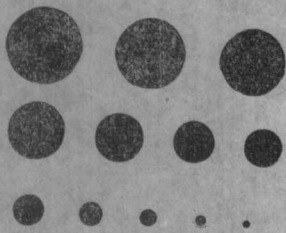


图8 由12个已知尺寸的圆形组成的测试卡

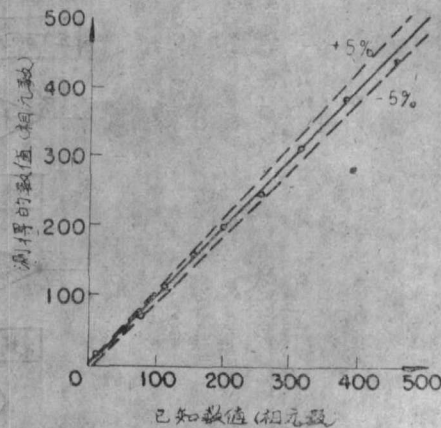
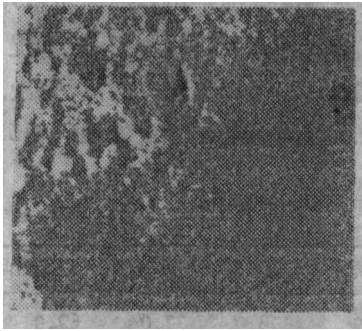
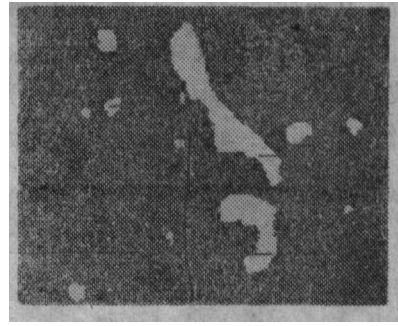


图9 对12个圆组成的测试卡的测试结果

12. 对雾化的水煤浆只列出那些面积大于20个像元的粒子, 对水的喷雾只列出大于5个像元的粒子。

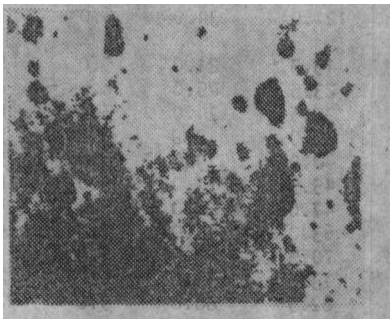


a. 雾化的水煤浆的数字图像

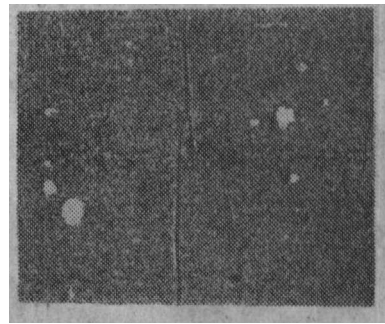


b. 与背景分离后的图像

图10 雾化的水煤浆的图像



a. 水的喷雾的数字图像



b. 经过分离的图像

图11 水的喷雾的图像

## 六、讨 论

在使用本文所述系统对喷雾进行分析之前, 先要对系统的光学放大倍数( $\beta$ ) 进行校准。可用一个标准尺寸为 $S(\mu\text{m})$ 的平面样板图形做为被测目标, 调整光学系统的倍率和聚焦, 使其成像大小适中并清楚, 然后测得其大小为 $T(\mu\text{m})$ , 来进行校准。于是系统工作时的光学放大倍数为:

$$\beta = S/T$$

记下样板所在的位置。将实测的喷雾的中心定在这个位置。以后在整个测量中, 光学系统只调焦、不变倍。所测的粒子大小均乘以 $\beta$ , 输出单位为 $\mu\text{m}$ 。每次工作距离变化后 $\beta$ 应重新校准。

在本文的喷雾图像分析中, 影响精度的主要因素是对聚焦粒子的分离这一步骤。本文所述的自适应切割办法虽然能使切割电平随着图像局部灰度的变化而变化, 在大多数情况下能将目标和背景分离开, 但当图像噪声较大时, 背景仍切不干净。另外, 切割电平在允许范围内变化时, 被分离出的粒子大小略有变化。这是因为粒子边界处的灰度梯总是有限大小。这就造成分析的误差。如何分离目标和背景, 又如何确定目标的边界是图像处理中普遍遇到的难题。目前尚无一个通用的满意方法, 有待进一步研究。

另外, 对在视场边缘处的不完整的粒子, 如何确定其位置和大小, 还有一些较大的粒子,

其局部是聚焦的，应如何处理，这些都是分析喷雾图像时要进一步解决的问题。

空间采样频率也影响分析的精度。由于空间采样，使连续平滑的粒子边界变得锯齿样地曲折。从而按像元数来计算的粒子面积就增加了。采样频率越高，边界的曲折越小、计算面积时误差越小，但采样频率不能太高，因为那样会使图像处理的时间加长，成本提高，以致不能被用户所接受。本文中的系统是先把一幅图像采样成 $512 \times 512$ 像元，然后，每次处理 $128 \times 128$ 像元。虽然一幅图像是分16次处理完，但总的处理时间还是比一次处理一幅 $512 \times 512$ 像元的图像要短得多。

喷雾	No	x-水平中心	y-垂直中心	面积	x-水平大小	y-垂直大小
水煤浆 <sup>2</sup>	1	72.0	51.5	598.0	37.0	62.0
	2	33.0	27.5	52.0	7.0	8.0
	3	34.5	51.5	32.0	6.0	10.0
	4	114.5	60.0	29.0	6.0	7.0
	5	96.0	62.5	58.0	9.0	8.0
	6	78.5	100.0	303.0	20.0	29.0
	7	22.5	121.0	34.0	6.0	7.0
水 <sup>3</sup>	1	39.0	15.5	21.0	5.0	6.0
	2	39.5	23.5	25.0	6.0	6.0
	3	101.0	25.5	24.0	5.0	6.0
	4	109.5	40.0	12.0	4.0	5.0
	5	12.5	42.0	19.0	6.0	5.0
	6	95.0	45.5	71.0	9.0	10.0
	7	84.0	47.0	20.0	5.0	5.0
	8	11.0	63.0	13.0	5.0	5.0
	9	98.0	70.5	21.0	5.0	6.0
	10	11.5	73.5	33.0	6.0	7.0
	11	20.0	82.5	86.0	9.0	12.0

1. x-水平中心 = 粒子的中心在x方向的位置；y-垂直中心 = 粒子的中心在y方向的中心位置；面积 = 粒子的最大截面积；x-水平大小 = 粒子在x方向的最大尺寸；y-垂直大小 = 粒子在y方向的最大尺寸。
2. 取水煤浆粒子的最大截面积大于20个相元； 3. 取水雾的粒子的最大截面积大于5个相元。

图12 对雾化的水煤浆和水的喷雾测试结果①

## 七、结 论

用脉冲激光做光源，用电视摄像机做图像传感器，采用电视测量和计算机视觉的有关技术，用计算机来自动分析喷雾图像是可行的。

仿真和实验证明本文所谈的分离聚焦粒子和分析粒子特征的算法都是正确的。

本系统对每幅空间采样为 $512 \times 512$ 像元的图像，分析误差小于5%，分析时间约为1.5分钟。



## 参 考 文 献

- [ 1 ] W.D.Bachalo, Droplet Analysis Techniques, Their Selection and Applications, Liquid particle size measurement techniques, American Society for Testing and Materials, 1984, pp5-21
- [ 2 ] W.D.Bachalo, phase/Doppler Spray Analyzer for Simulataneous measurements of Drop Size and Velocity Distributions, Optical Engineering, Sep. Oct.,1984, 23, No.5,583
- [ 3 ] L.M.Oberdier, An Instrumentation System To Automate the Analysis of Fuel-spray Images Using Computer Vision, American Society [for Testing and Materials, 1984, pp123-136
- [ 4 ] Ballard, Dana H. and Christopher C. Brown, Computer Vision Prentice-Hall, 1982
- [ 5 ] Jay Martin Tenenbaum, Accommodation in Computer Vision, Stanford Atificial Intel- ligence Project MEMO AIM-134, Computer Sience Department Report No. CS182, Oct. 1970

## Automatic Analysis of Spray Image

Song Jianzhong

## Abstract

An automatic spray image analysing system combined with a television system, a pulsed laser and computer techniques, has been established. Using this system, an accurate and speedy analysis of a spray can be obtained no matter what kind of droplets in the spray is, spherical or non-spherical, transparent or non-transparent.

The method based on the adaptive threshold of a gradient image segments the droplets from the background, then TV measurement and computer vision techniques are used for feature extraction. The programmes developed in this system can automatically select in-focus droplets and measure their size, aspect ratio, location and velocity. The reliability of the computer programmes developed in this system has been proved by computer simulation and experiments.

For a digitized image with  $512 \times 512$  pixels/frame, the deviation of analysis is less than 5%, the running time of the computer, which is IBM-AT connected with vax-11/750, is 90 seconds/frame or so.