

雾滴图像粘连特征改进判断及分离计数方法优化

吴亚奎¹ 祁力钧¹ 张亚² 程焯焯¹ 程一帆¹ 杨知伦¹

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

摘要: 雾滴在靶标上常出现粘连的情况, 为准确测量雾滴尺寸、掌握雾滴分布规律, 需要判断雾滴是否粘连, 并用图像处理技术将粘连雾滴分开。首先提出判断雾滴是否粘连的改进方法, 该方法结合雾滴的形状因子和面积阈值对粘连雾滴进行判断和特征提取, 并用极限腐蚀法和迭代开运算法对粘连雾滴进行计数处理, 其次调用迭代开运算标记的分水岭算法分割, 最后对分割后雾滴的连通域进行标记及形状圆整。试验结果表明: 该方法可实现粘连雾滴的自动判断和特征提取, 弱粘连准确率 100%, 强粘连可达 97.2% 以上。该算法获得的雾滴粒径参数与激光粒度仪试验测量结果接近, 其尺寸测量准确度较 Deposit Scan 软件计算平均提高了 7.67%。基于相同的样本, 与人工计数标定结果对比表明, 该方法获得的雾滴个数快速且精准度达 97.06% 以上。

关键词: 粘连雾滴; 特征提取; 快速计数; 改进分割; 参数优化

中图分类号: TP391.4; S126 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)S0-0220-08

Optimized Method of Improved Characteristics Judgment and Separation Counting for Adhesive Droplets

WU Yalei¹ QI Lijun¹ ZHANG Ya² CHENG Zhenzhen¹ CHENG Yifan¹ YANG Zhilun¹

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Droplet adhesion on target is a common practice in pesticide spray. In order to accurately measure the droplet size and evaluate the distribution, adhesive droplets need to be identified and segmented by image processing. An improved method for judging the droplet adhesion and extracting the features based on droplet shape factor and area threshold of droplets was proposed in this paper. The adhesive droplets were counted by using ultimate erosion and iterative opening operation and segmented by using the watershed algorithm marked with the iterator open operation. The connection areas of the segmented droplets were marked and the shape was rounded. Experimental results showed that the method can effectively extract the characteristics of the adhesion droplets. The accuracy rate of judgment is 100% for weak adhesion and up to 97.2% for strong adhesion. The droplet size obtained by this image process is very close to that measured by laser particle size analyzer. Comparing with Deposit Scan software, this method may improve the size measurement accuracy about 7.67%. Based on the same sample, the comparative analysis showed that the proposed method may obtain the droplet numbers in a much faster speed than the artificial counting and achieved an accuracy of more than 97.06%. The research result also showed that compared with the laser particle size method, the image measurement method was more simple, effective, and suitable for measurement and statistics of the droplet parameters in the field spray experiment.

Key words: adhesive droplets; feature extraction; quickly counting; improved segmentation; parameter optimization

收稿日期: 2017-07-15 修回日期: 2017-11-22

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0701400、2016YFD0200708)

作者简介: 吴亚奎(1991—), 男, 博士生, 主要从事图像处理与模式识别研究, E-mail: kevin_wuyalei@cau.edu.cn

通信作者: 祁力钧(1963—), 男, 教授, 主要从事农业装备与计算机测控研究, E-mail: qilijun@cau.edu.cn

引言

评定植保机械性能优劣的主要指标之一是喷雾质量,包括覆盖率、飘移性和均匀性。覆盖率、飘移性与雾滴尺寸相关,均匀性与雾滴在靶标的分布参数相关^[1-4]。分析雾滴数据的关键是准确测量雾滴尺寸,并实时检测雾滴在作物靶标上的分布参数。因此,优化雾滴参数检测技术对进一步提高喷雾质量有重要意义^[5-6]。

传统的雾滴分布检测方法^[7]是人工利用水敏试纸收集雾滴,雾滴尺寸测量和计数工作量大、效率低,误差大。基于光学原理的检测方法^[8-9]精度高,但只能在室内测量,无法测量雾滴在靶标上的分布情况。图像处理技术^[10-15]是一种有效的雾滴参数测量和统计方法,在喷雾过程中,采集到的雾滴图像中却经常出现雾滴重叠和粘连的情况。为解决该粘连问题,祁力钧等^[16]提出用改进的分离粘连雾滴算法进行分离处理,但该算法仅通过圆形度对雾滴粘连进行判断,判断结果精确度较低,雾滴分割后未进行圆整,虽分离了雾滴,但会消除较多重叠的小区域。同时对于目标图像雾滴粘连的分割还存在很多种方法,如基于颜色相似性及满足形态“凸性”准则的区域增长方法^[17]、二值图像多边形近似找凹点切割法^[18],以及分水岭(又称流域或水坝)算法^[19-20]。这些方法要求图像目标具有某些特定性质,在实际处理中存在一定的局限性。

本文以水敏试纸采集的雾滴为研究对象,提出一种粘连雾滴分离判断的改进方法,首先利用极限腐蚀法和迭代开运算实现雾滴计数,然后调用迭代开运算标注的分水岭对雾滴进行分割,最后运用区域标记的角度识别算法进行形状圆整。

1 雾滴图像采集与预处理

1.1 粘连雾滴样本

弱粘连雾滴:粘连部分多以雾滴边缘相碰,粘连幅度较小,在水敏纸上发生的概率低于未粘连雾滴,但比强粘连数量多。弱粘连较强粘连雾滴易判断和提取,弱粘连如图 1a 所示。

强粘连雾滴:粘连区域较大,在水敏纸上发生的概率低于弱粘连雾滴。强粘连雾滴近似球形,粘连判断一般仅通过形状因子值很难进行判断和提取,须对算法进行改进,确保与未粘连雾滴准确分离,强粘连如图 1b 所示。

1~5 分别对应不同的雾滴区域,见图 1,0.452、0.826、0.621、0.489 和 0.640 分别为对应各区域的形状因子值。

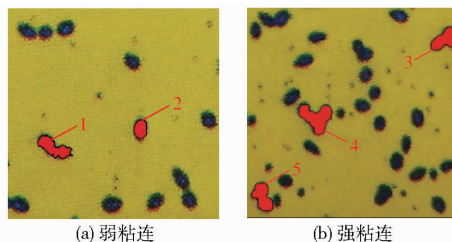


图 1 粘连雾滴图像

Fig. 1 Images of adhesive droplets

1.2 图像采集

水敏纸用于与背景有明显灰度差别的雾滴斑痕采集,收集雾滴后的水敏试纸先依次通过汉王袖宝 A8 型扫描仪扫描,扫描前需选择白色卡片校准,确认灰度扫描,像素 600,用于 Deposit Scan 软件处理;同时高分辨率工业 CCD 相机(BC1000-BC1600 型)采集雾滴图像通过以太网回传至计算机端,用于改进方法处理,采用 LED 可调一体光源作为补光源。

采集图像主要分为 2 类:一类为 Tee-Jet 公司生产的 F-110-01 型和 F-110-03 型喷头在相同喷雾压力、相同测量距离下喷洒后幅面较小且发生粘连的雾滴图像,人工挑选各种粘连情况雾滴样本 25 个,作为研究各种粘连雾滴粘连判断改进算法的试验样本;另一类为 F-110-01 型和 F-110-03 型喷头在不同压力、不同测量距离下载物台采集得到的雾滴图像作为最终算法验证的样本。由于雾滴较小,水敏纸图像尺寸很大,为方便说明全文粘连雾滴图片采用局部放大图。

1.3 雾滴图像的预处理

图像预处理包括图像去噪和图像二值化,采用高通滤波法对粘连雾滴图像进行去噪处理,便于图像的后续提取和分割。为使图像有效二值化,采用最大类间方差法进行自动阈值处理,对图像进行二值化。整体的流程如图 2 所示。

2 雾滴粘连判断改进方法研究

通过对雾滴图像样本研究发现,雾滴粘连重叠现象常见,直接对雾滴进行标记会造成计数结果偏低、雾滴粒径偏大,为准确计数和尺寸测量,需先判断雾滴图像是否存在粘连。若不存在粘连,直接进行雾滴参数计算,否则将进行提取、分割。

2.1 传统雾滴粘连判断法

一般正常单个雾滴形状呈圆形,但在水敏试纸上面呈现的形状大多为椭圆形,而粘连雾滴形状更为复杂。通过最小外接矩形法^[21]计算雾滴图像的长宽比,即可对雾滴进行特征提取。

针对粘连雾滴区域边界轮廓比单个雾滴区域边

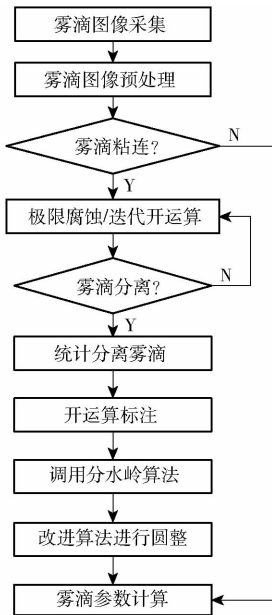


图2 系统流程图

Fig. 2 Flow chart of the system

界轮廓更为复杂的情况,本文选择描述目标边界的形状因子和面积阈值作为粘连雾滴判断的依据。形状因子^[24]是通过面积 D 和周长 E 来度量二维物体形状复杂程度的特征量,计算公式为

$$S_f = \frac{4\pi D}{E^2} \quad (1)$$

式中 D ——雾滴一个连通区域的面积像素值

E ——该雾滴连通区域的周长像素值

形状因子的取值范围为 $0 < S_f \leq 1$,当目标区域为圆形时取最大值1。当多个雾滴粘连、重叠时,其边界由于出现凹陷而变得复杂。在相同面积情况下,有凹陷比没有凹陷的周长要大,形状因子相应会变小。基于祁力钧等^[16]提出的改进分离粘连雾滴算法进行分离处理,采用圆形度对雾滴粘连进行判断,求解图1中红色区域分别对应的形状因子值,可以看出粘连与非粘连区域的形状因子具有一定的区分度,确定阈值 S_{F_0} 。

2.2 基于形状因子和面积阈值的雾滴粘连判断改进方法

实际喷雾中由于并不能保证雾滴轨迹垂直于水敏试纸,少量夹角很小的扇形结构也是存在的,其次强粘连雾滴中存在过度粘连情况,过度粘连雾滴圆形度较好、相对面积较大且没有明显的分割点,一般通过形状因子不能准确提取,需要面积阈值作为辅助进行特征提取,结合最大面积阈值 D_{\max} ,作为雾滴粘连判断依据。即当某区域满足: $S_f > S_{F_0}$ 且 $D_i < D_{\max}$ (D_i 为雾滴面积)时,则为单个雾滴,否则雾滴存在粘连。改进判断法对粘连雾滴图像进行提取,算法的具体步骤如下:

(1)首先对原始图像进行预处理,获取二值图像。同时在原始图像上随机选取3块未粘连处 $0.5\text{ cm} \times 0.5\text{ cm}$ 的雾滴图像,同样进行预处理运算,得到未粘连处雾滴图像所有单个雾滴的面积像素值。

(2)根据未粘连处雾滴图像中雾滴大小的径谱范围,采用加权平均法以不同的权数加以平均面积的方法,完成单个雾滴最大面积阈值 D_{\max} 的确定。

(3)然后针对每一个目标区域,根据形状因子阈值 S_{F_0} 进行粘连判断,同时结合最大面积阈值 D_{\max} ,作为雾滴粘连判断依据。

(4)若存在粘连则进行粘连雾滴提取,否则提取下一个目标区域,直至所有目标判断完毕。

2.3 不同流量情况下粘连雾滴特征提取

根据2种粘连雾滴出现的概率,选取小流量F-110-01型和大流量F-110-03型的2幅水敏纸图像进行特征提取。对比图3b和图3f可知:首先,小流量较大流量中粘连雾滴数量少,但其弱粘连所占粘连雾滴的百分比相对较大。其次,大流量较小流量中强粘连雾滴多,过度粘连雾滴仅通过形状阈值不易被提取,易造成提取误差,因此,采用面积阈值辅助的提取方法,结果更为准确。针对这一实际情况,本文对上述2种情况分别进行特征提取,提取结果如图3c和图3g所示。

2.4 粘连雾滴特征提取的准确性研究

选取小流量和大流量雾滴粘连图像各25幅,分别利用圆形度提取方法和改进判断后的提取方法对粘连雾滴进行提取,并进行人工校正,得到2种方法准确度分布情况如图4所示。

通过对比分析可知改进判断法可实现粘连雾滴的自动判断和特征提取,由图4可知:改进判断法相比于圆形度判断法准确率高,弱粘连准确率100%,强粘连可达97.2%以上。小流量中雾滴粘连表现为弱粘连,个别粘连雾滴存在强粘连,大流量中强粘连雾滴数目较多。造成改进算法提取误差的主要原因是个别强粘连雾滴面积相对较小。

3 粘连雾滴个数统计

3.1 基于极限腐蚀的区域标记粘连雾滴个数统计

利用2.2节中改进判断方法对粘连雾滴图像进行提取,用极限腐蚀法^[23]将提取出来的只包含粘连雾滴图像进行腐蚀处理,直到分割出单个雾滴;每次腐蚀后对单个雾滴进行区域标记并记录该次腐蚀后单个雾滴的个数,继续下一次腐蚀,查找新的未加标记的像素,重复上述步骤,直到腐蚀完毕。叠加每次腐蚀后单个雾滴图像,进行区域标记完成计数,腐蚀及计数过程如图5所示。由于极限腐蚀法会导致目

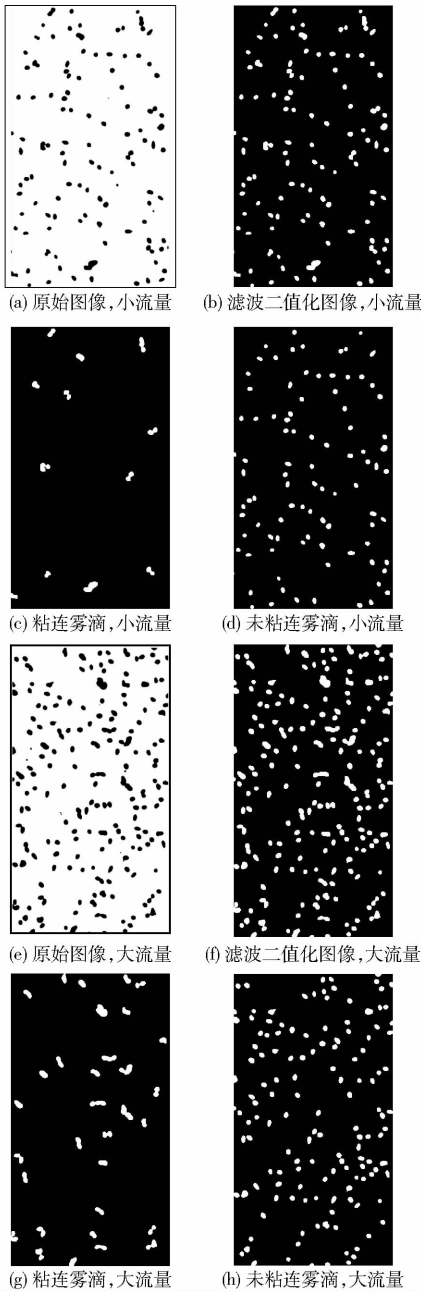


图3 小流量与大流量粘连雾滴的特征提取

Fig.3 Feature extraction of droplets with small and big flow

标像素面积减小,不适用于后续将面积阈值 D_{max} 作为特征进行目标识别的场合^[22],故选择描述目标边界的形状因子作为腐蚀后粘连雾滴判断的依据,具体步骤如下:

- (1) 提取整幅图像上各雾滴轮廓的面积和周长,计算其形状因子。
- (2) 如果各轮廓的形状因子 $S_f > S_{f_0}$ 即可判断图像中不存在粘连雾滴,进行雾滴区域标记,实现单个雾滴计数;反之,腐蚀结构元素大小加1,对图像进行腐蚀操作,符合条件 $S_f > S_{f_0}$,部分粘连雾滴分离,单个雾滴计数叠加。
- (3) 反复进行步骤(2)直到粘连雾滴全部分离,叠加每次腐蚀后单个雾滴图像完成计数统计。

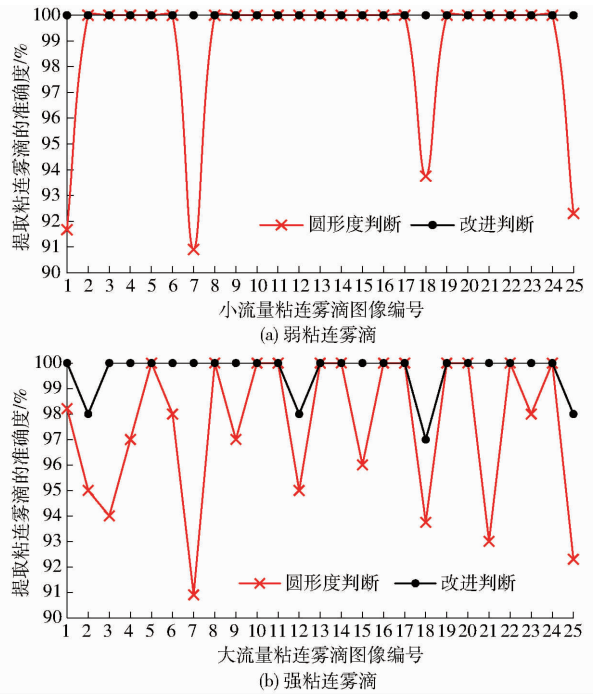


图4 粘连雾滴准确度提取

Fig.4 Accuracy extraction of adhesive droplets

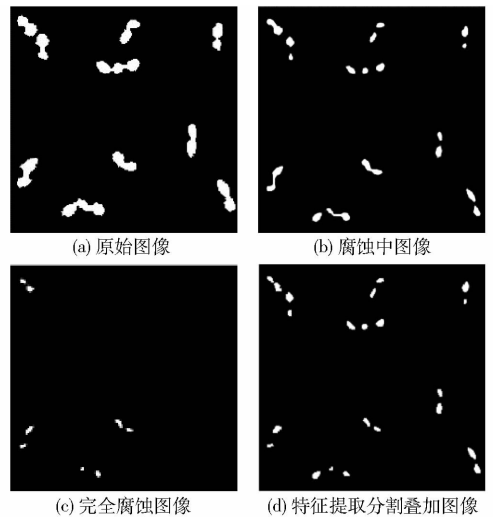


图5 基于极限腐蚀计数的结果

Fig.5 Count results based on limit corrosion

3.2 基于迭代开运算的区域标记粘连雾滴个数统计

开运算^[24]是 F 被 M 腐蚀后再用 M 来膨胀的腐蚀结果,公式定义为

$$F \circ M = (F \ominus M) \oplus M \quad (2)$$

即对粘连雾滴二值图像先腐蚀后膨胀,删除不能包含结构元素的粘连雾滴区域,可平滑雾滴的轮廓,断开粘连雾滴图像中粘连的部分,去除细小的突出部分。实际喷雾中由于并不能保证雾滴轨迹垂直于水敏试纸,所以在图像并不能全部表现为圆点状,而相应会出现类似夹角很小的扇形结构,选择形状因子 $S_f > S_{f_0}$ 和面积阈值 $D_i < D_{max}$ 作为腐蚀后粘连雾滴判断的依据,利用2.2节中改进判断方法对粘连雾滴图像进行提取,用迭代开运算法将提取出来的只

包含粘连雾滴的图像进行处理,直到分割出每个雾滴;每次腐蚀后进行区域标记,继续下一次运算,查找新的未加标记的像素,重复上述步骤,直到运算完毕。提取每次利用开运算分离开的粘连雾滴,并将分离开的雾滴二值图像叠加,如图6d所示,可以完成粘连雾滴的个数统计。

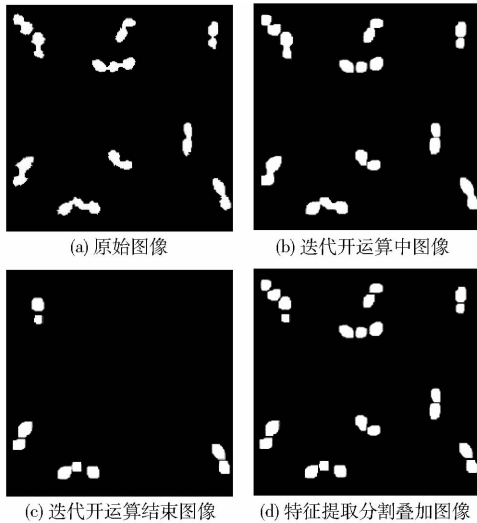


图6 基于迭代开运算计数的结果

Fig. 6 Count results based on iterative operation

4 粘连雾滴图像分割及其圆整改进方法

4.1 基于雾滴迭代开运算标记的分水岭分割

传统分水岭算法^[25-27]中,每个局部极小值点对应一个分割区域,其中既包含真实目标极小值点又包含由背景噪声和纹理细节引入的伪局部极小值点,因此传统分水岭方法易造成过分割,如图7b所示。为准确得到雾滴尺寸,用高通滤波法对图像进行去噪处理,有效抑制噪声对图像分割算法的影响。极限腐蚀算法在连续腐蚀过程中会出现种子点丢失的情况,从而在调用分水岭算法对图像进行分割过程中易造成欠分割,故本文利用迭代开运算标记的分水岭方法进行分割。

首先通过迭代开运算将各个粘连雾滴分离开,对3.2节图6d中特征提取分割的叠加图像进行边缘检测,提取边缘获得背景标记,利用所测结果作为标注点作用于原二值化图像上,再调用分水岭算法和边缘标注点进行“与”运算,覆盖掉单个雾滴斑痕内部的脊线,得到改进的分水岭脊线图,然后将分水岭脊线图叠加到原二值图像上,生成的黑色分割线将粘连雾滴分割开。由于迭代开运算有效避免了种子点丢失的情况,因此采用迭代开运算标记的分水岭方法改进算法准确率高于传统标记分水岭算法,且避免过分割和欠分割,可以实现粘连雾滴分割并且会在雾滴粘连处形成黑色分割线,如

图7所示。

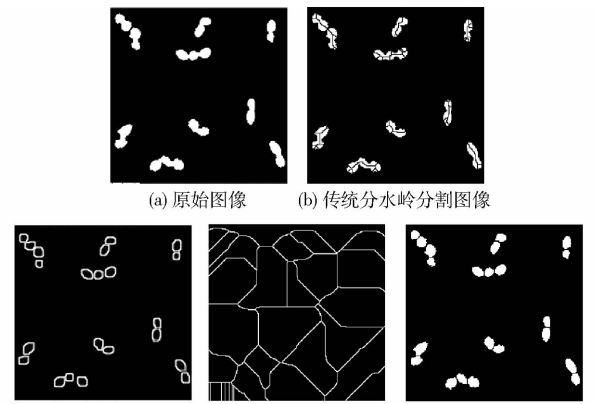


图7 迭代开运算标注的分水岭分割图

Fig. 7 Image of watershed segmentation marked with iterative

4.2 分割后优化圆整

从图8中可以看出, a 、 b 分别为粘连雾滴的分离点且 c 为粘连雾滴的重叠面积;分割线 ab 越短,粘连强度越小,反之分割线 ab 越长的粘连雾滴,粘连强度也就越大。粘连强度小的雾滴,被分割开后可忽略对后续参数计算误差的影响,但是粘连强度大的雾滴,分割会造成一部分面积 c 的缺失,对计算雾滴的算术平均粒径会产生影响。改进圆整方法是以假设分割线两端分离点的坐标与形心坐标连线夹角为基础的,通过改进圆整的方法,可以有效识别雾滴是否圆整,以及对未圆整雾滴粒径进一步优化,使得所测雾滴粒径与真实值更加趋近。

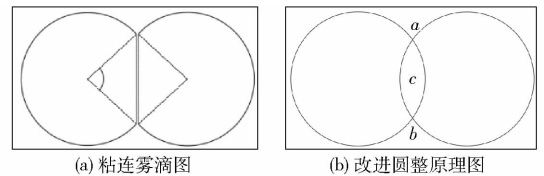


图8 改进圆整方法原理图

Fig. 8 Principle image of improved roundness

5 试验

5.1 试验环境和方法

试验在中国农业大学教育部现代精细农业系统研究重点实验室进行,室内温度 25°C ,相对湿度35%。喷头选取 Tee-Jet 公司生产的 F-110-01型、F-110-03型的喷头,分别在距离水敏纸0.25、0.40、0.55、0.70 m的高度上采用3种不同压力进行喷雾,压力为0.15、0.3、0.5 MPa。作业速度设为 2 m/s ,与喷杆方向平行且运动方向垂直的两个间距20 cm的不同轴线分别定义为前轴线与后轴线,前轴线中心处布置2张水敏纸,间距0.08 m,后轴线上布置5张水敏纸,间距0.25 m,共有24种组合,每种组合方式进行3次重复试验。

5.2 雾滴计数试验结果与分析

首先采用人工计数的方法对雾滴个数进行统计,是以假设雾滴是圆形的且粘连雾滴的分离点出现在长轴两侧为依据计数^[16]。然后将 Deposit Scan 软件、极限腐蚀法和迭代开运算分别应用于不同雾滴粘连强弱的计数,处理得到的雾滴数量,如表 1 所示。表 1 为不同方法的计数结果,本试验的图像采用 2 种不同型号的喷头在相同的条件下后轴线上的样本,F-110-01 型喷头下采集的图像为弱粘连雾

滴图像,F-110-03 型喷头下采集的图像为强粘连雾滴图像。对每种粘连程度,随机选取 45 幅图像,各分为 3 组,最终每组雾滴的计数结果是对 15 个样本计数的平均值。

误差率计算公式为

$$\varepsilon = \frac{|\alpha - \beta|}{\alpha} \times 100\% \quad (3)$$

式中 ε ——误差率 α ——人工计数
 β ——方法计数

表 1 不同算法计数验证误差

Tab. 1 Error of different algorithms count validation

粘连强弱	图像组别/组	人工计数/个	Deposit Scan 计数/个	Deposit Scan 误差率/%	极限腐蚀 计数/个	极限腐蚀 误差率/%	迭代开运算 计数/个	迭代开运算 误差率/%
弱粘连	1	145	133	8.28	142	2.07	143	1.38
	2	138	121	12.32	135	2.17	136	1.45
	3	178	163	8.43	173	2.81	175	1.69
强粘连	4	216	199	7.69	210	2.56	212	1.92
	5	255	231	9.58	248	2.94	250	1.87
	6	228	206	9.52	223	2.24	224	1.76

由表 1 分析可知:Deposit Scan 软件对雾滴图像未去粘连,计数误差率范围为 7.69% ~ 12.32%;极限腐蚀法去粘连后再用连通域计数,误差率范围为 2.07% ~ 2.94%;迭代开运算法去粘连后再用连通域计数,误差率范围为 1.38% ~ 1.92%。基于相同的样本,与人工计数标定结果对比表明,该方法获得的雾滴个数快速且精准度达 97.06% 以上。试验结果表明,Deposit Scan 软件处理误差最大;极限腐蚀对弱粘连的雾滴计数较为准确,但是强粘连计数中,误差较大;迭代开运算较极限腐蚀法计数准确度更高,原因是极限腐蚀法在连续腐蚀过程中会出现严重的种子点丢失^[28]且目标像素面积减小,所以面积阈值不能作为形状因子判断粘连的辅助依据。

5.3 雾滴粒径分布结果与分析

由于雾滴在重力下的扩散效应,雾滴斑痕比实际尺寸大,根据雾滴扩展方程^[16],将测量的雾滴斑痕直径转换为实际直径。图 9 为在前轴线上,不同压力下,2 种不同型号的喷头分别在 0.25、0.40、0.55、0.70 m 高度处雾滴粒径测量结果折线图。

由图 9 分析可知:图 9a 中 F-110-01 型喷头在不同压力下,其曲线趋势基本一致,其雾滴体积中径随喷头离采样点距离的增加呈不断增大趋势,这与实际相符,验证了本文图像处理法测量雾滴粒径分布的可靠性。按照 Miller PH 速度模型,F-110-01 型喷嘴产生的小雾滴多,开始受切向气流影响而改变方向,与其他雾滴组合成较大的雾滴,随着距离增加,动能急剧减少,作用效果大于摩擦及蒸发,雾

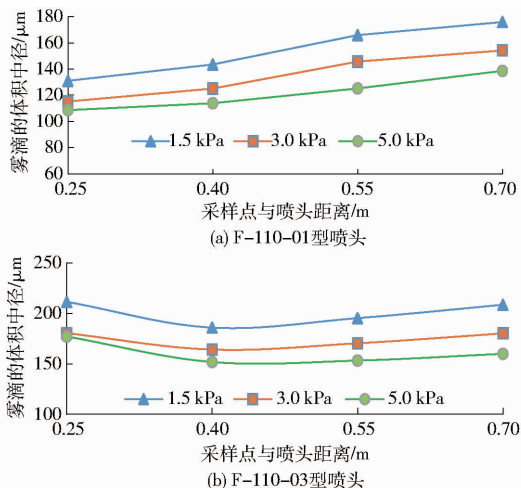


图 9 F-110-01 型和 F-110-03 型喷头的参数测量

Fig. 9 Parameters measurement of F-110-01 and F-110-03

滴体积中径呈逐渐增大的趋势。

图 9b 中 F-110-03 型喷头在不同压力下,其曲线坡度和趋势基本一致,其雾滴体积中径随喷头离采样点距离的增加呈先减小后变大的趋势,这与实际也相符,同时验证了本文图像处理法测量雾滴粒径分布的可靠性。F-110-03 型喷头产生的小雾滴开始受摩擦和蒸发的影响,雾滴粒径变小,随着距离增加,切向气流加大了小雾滴的结合,雾滴粒径呈现增大的趋势。

为对比测量精度,表 2 为 0.3 MPa 下,2 种不同型号的喷头分别在 0.25、0.40、0.55、0.70 m 高度进行喷雾,在同一高度上,分别选取前轴线上 F-110-

01型和F-110-03型喷头下采集的图像各6幅,各自分为2组,最终每组雾滴粒径结果是对3个样本计算的平均值。本文利用激光粒度仪进行标定试验,测量结果与测量误差见表2。将斑点粒径转化为实际雾滴粒径,扩散因子常数由Salyani等测定。计算实际雾滴粒径的最终方程为

$$d = 0.95d_s^{0.910} \quad (4)$$

式中 d 、 d_s ——雾滴的实际粒径、扩散粒径

表2 雾滴体积中径算法验证误差

Tab.2 Error of volume droplet diameter algorithm validation

距离/ m	喷头	雾滴体积中径/ μm			测量误差/%	
		激光 粒度仪	图像 处理法	Deposit Scan法	图像处理 的误差	Deposit Scan误差
0.25	F-110-01	117.2	125.9	136.4	7.42	16.38
	F-110-03	181.3	193.6	208.2	6.78	14.83
0.40	F-110-01	131.1	140.5	152.1	7.17	16.02
	F-110-03	165.5	174.6	189.2	5.49	14.32
0.55	F-110-01	147.7	156.3	167.9	5.82	13.68
	F-110-03	171.3	181.4	194.8	5.89	13.71
0.70	F-110-01	156.2	167.2	176.6	7.04	13.06
	F-110-03	181.1	192.2	201.2	6.13	11.09

基于图像处理测量的雾滴粒径较激光粒度仪所测结果略大,且误差不超过7.5%。原因在于高通滤波去噪处理的图像会损失图像低频信息,即很小雾滴按噪声被消除,影响雾滴粒径测量精度。

5.4 算法优劣的讨论与分析

由表1可知,极限腐蚀法对粘连程度小的雾滴图像计数较为准确,但随着粘连程度提高,该方法在

连续腐蚀过程中会出现严重的种子点丢失,导致计数误差较大;而Deposit Scan软件未去粘连,利用连通区域标记法^[16]计数结果将偏低,测量结果最大相差12.32%,导致测量结果缺乏足够的准确性;该迭代开运算法则可以有效保证粘连计数的精准度,较人工计数工作量小,效率高。由表2可知,该算法获得的雾滴粒径参数与激光粒度仪试验测量结果接近,其尺寸测量准确度较Deposit Scan软件计算平均提高了7.67%。该算法获得的雾滴粒径参数与激光粒度仪试验测量结果接近,同时较其在田间测试更具便捷性。然而该算法也存在不足之处,对粘连程度不同的雾滴,程序运行平均耗时相对较长,需对算法进一步优化。

6 结束语

以靶标上粘连雾滴为研究对象,基于图像处理技术能够定量计算粘连雾滴的个数和尺寸。试验结果表明,在特征改进判断中,该方法可对粘连雾滴进行有效提取,各种粘连准确率可达97.2%以上;在个数统计中,迭代开运算较极限腐蚀法计数准确度更高,误差率范围为1.38%~1.92%;在尺寸测量中,当不同型号喷头随着距离变化时,试验结果验证了雾滴粒径变化趋势与实际所测雾滴粒径分布规律相一致;同时,与激光粒度仪的测量结果对比表明,基于图像处理测量的雾滴粒径较激光粒度仪所测结果略大,且误差不超过7.5%。较激光粒度法而言,图像测量方法更为简单便捷,适合田间喷雾试验雾滴参数的测量和统计。

参 考 文 献

- FERGUSON J C, HEWITT A J, O'DONNELL C C. Pressure, droplet size classification, and nozzle arrangement effects on coverage and droplet number density using air-inclusion dual fan nozzles for pesticide applications[J]. Crop Protection, 2016, 89: 231-238.
- 袁会珠, 杨代斌, 闫晓静, 等. 农药有效利用率与喷雾技术优化[J]. 植物保护, 2011, 37(5): 14-20.
- YUAN Huizhu, YANG Daibin, YAN Xiaojing, et al. Pesticide efficiency and the way to optimize the spray application [J]. Plant Protection, 2011, 37(5): 14-20. (in Chinese)
- 吕晓兰, 傅锡敏, 吴萍, 等. 喷雾技术参数对雾滴沉积分布影响试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(6): 70-75.
- LÜ Xiaolan, FU Ximin, WU Ping, et al. Influence of spray operating parameters on droplet deposition[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6): 70-75. (in Chinese)
- 吴亚全, 祁力钧, 张亚, 等. 基于驻波率原理的农药雾滴沉积量检测系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(15): 64-71.
- WU Yalei, QI Lijun, ZHANG Ya, et al. Design and experiment of pesticide droplet deposition detection system based on principle of standing wave ratio[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(15): 64-71. (in Chinese)
- 廖娟, 臧英, 周志艳, 等. 作物航空喷施作业质量评价及参数优选方法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(增刊2): 38-46.
- LIAO Juan, ZANG Ying, ZHOU Zhiyan, et al. Quality evaluation method and optimization of operating parameters in crop aerial spraying technology[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(Supp. 2): 38-46. (in Chinese)
- 邱白晶, 闫润, 马靖, 等. 变量喷雾技术研究进展分析[J]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 59-72.
- QIU Baijing, YAN Run, MA Jing, et al. Research progress analysis of variable rate sprayer technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 59-72. (in Chinese)
- 史春建. 植保机械雾化性能的图像检测方法研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2005.
- SHI Chunjian. Image detecting method atomization performance of the plant protection machinery [D]. Zhenjiang: Jiangsu

- University, 2005. (in Chinese)
- 8 DUMOUCHEL C, YONGYINGSAKTHAVORN P, COUSIN J. Light multiple scattering correction of laser diffraction spray drop-size distribution measurements[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2009, 35(3):277-287.
- 9 张慧春, DORR Gary, 郑加强, 等. 扇形喷头雾滴粒径分布风洞试验[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(6):53-57.
ZHANG Huichun, DORR Gary, ZHENG Jiaqiang, et al. Wind tunnel experiment of influence on droplet size distribute on of flat fan nozzles[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(6):53-57. (in Chinese)
- 10 SUDHEER K P, PANDA R K. Digital image processing for determining drop sizes from irrigation spray nozzles[J]. *Agricultural Water Management*, 2000, 45(2):159-167.
- 11 MARMOTTANT P, VILLERMAUX E. On spray formation [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2004, 498(1):73-111.
- 12 BLAISOT J B, YON J. Droplet size and morphology characterization for dense sprays by image processing. Application to the diesel sprays [J]. *Experiments in Fluids*, 2005, 39(6):977-994.
- 13 GADGIL H, DOLATABADI A, RAGHUNANDAN B N. Mass distribution studies in effervescent sprays [J]. *Atomization and Sprays*, 2011, 21(5):375-390.
- 14 薛峰. 图象处理在雾滴关键参数测量中的应用[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
XUE Feng. Application of digital image processing in droplet key parameters measurement [D]. Beijing: China Agricultural University, 2005. (in Chinese)
- 15 陈小艳, 周骛, 蔡小舒, 等. 大型喷雾粒径分布的图像法测量[J]. *化工学报*, 2014, 65(2):480-487.
CHEN Xiaoyan, ZHOU Wu, CAI Xiaoshu, et al. Particle size distribution measurement of large spray by imaging[J]. *CIESC Journal*, 2014, 65(2):480-487. (in Chinese)
- 16 祁力钧, 胡开群, 莽璐, 等. 基于图像处理的雾滴检测技术[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(增刊):48-51.
QI Lijun, HU Kaiqun, MANG Lu, et al. Droplet detection based on image processing [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(Supp.):48-51. (in Chinese)
- 17 梁萍, 程伟. 基于分水岭的粘连雾滴图像分割方法[J]. *重庆工学院学报:自然科学版*, 2008, 22(10):170-174.
LIANG Ping, CHENG Wei. Research of conglomerated droplets image segmentation based on watershed algorithm[J]. *Journal of Chongqing Institute of Technology:Natural Science*, 2008, 22(10):170-174. (in Chinese)
- 18 WANG W X. Binary image segmentation of aggregates base on polygonal approximation and classification of concavities [J]. *Pattern Recognition*, 1998, 31(10):1503-1524.
- 19 孙万蓉, 俞下章. 基于数学形态金字塔分解和流域分割的骨髓细胞图像分割[J]. *西北工业大学学报*, 2006, 24(5):609-613.
SUN Wanrong, YU Bianzhang. Faster segmentation of marrow cell images based on morphological pyramid and watershed segmentation[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2006, 24(5):609-613. (in Chinese)
- 20 邱白晶, 王天波, 李娟娟, 等. 黄瓜蚜虫的图像识别与计数方法[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(8):151-155.
QIU Baijing, WANG Tianbo, LI Juanjuan, et al. Image recognition and counting for glass house aphid *Gossypii*[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(8):151-155. (in Chinese)
- 21 卢蓉, 范勇, 陈念年, 等. 一种提取目标图像最小外接矩形的快速算法[J]. *计算机工程*, 2010, 36(21):178-180.
LU Rong, FAN Yong, CHEN Niannian, et al. Fast algorithm for extracting minimum enclosing[J]. *Computer Engineering*, 2010, 36(21):178-180. (in Chinese)
- 22 李文勇, 李明, 钱建平, 等. 基于形状因子和分割点定位的粘连害虫图像分割方法[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(5):175-180.
LI Wenyong, LI Ming, QIAN Jianping, et al. Segmentation method for touching pest images based on shape factor and separation points location[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(5):175-180. (in Chinese)
- 23 王娜. 颗粒图像分割与分析方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2009.
WANG Na. Particle image segmentation and analysis methods [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2009. (in Chinese)
- 24 周天娟, 张铁中, 杨丽, 等. 基于数学形态学的相接触草莓果实的分割方法及比较研究[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(9):164-168.
ZHOU Tianjuan, ZHANG Tiezhong, YANG Li, et al. Comparison of two algorithms based on mathematical morphology for segmentation of touching strawberry fruits[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(9):164-168. (in Chinese)
- 25 牛杰, 卜雄洙, 钱堃. 利用骨架特征信息的粘连谷粒图像分割方法[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(9):280-284.
NIU Jie, BU Xiongzhuzhu, QIAN Kun. Touching corn kernels based on skeleton features information[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(9):280-284. (in Chinese)
- 26 宋鹏, 张晗, 王成, 等. 玉米籽粒考种信息获取装置及方法[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(11):1-8.
SONG Peng, ZHANG Han, WANG Cheng, et al. Maize kernel traits acquisition device and method [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(11):1-8. (in Chinese)
- 27 RAO A R, SRINIVAS V V. Regionalization of watersheds by fuzzy cluster analysis[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 318(1-4):57-79.
- 28 王鑫, 胡洋洋, 杨慧中. 基于迭代腐蚀的粘连细胞图像分割研究[J]. *南京理工大学学报:自然科学版*, 2016, 40(3):285-289.
WANG Xin, HU Yangyang, YANG Huizhong. Segmentation of adherent cell image based on iterative erosion [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology: Natural Science*, 2016, 40(3):285-289. (in Chinese)