doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.005

基于衍射重构技术的作物真菌病害孢子微型检测装置

杨　宁[1]　陈驰原[1]　李国晓[1]　王爱英[2]　张荣标[1]　唐　健[2]

(1. 江苏大学电气信息工程学院, 镇江 212013; 2. 中国水稻研究所稻作技术研究与发展中心, 杭州 311401)

摘要: 为了解决现有孢子检测系统体积大、成本高等问题,提出了一种基于衍射重构技术的作物真菌病害孢子检测方法。根据惠更斯-菲涅尔原理、角谱理论,利用衍射成像复合重构计算设计了一种包含富集、进样机构的真菌病害孢子检测系统。该系统可以定时完成富集、进样、拍摄、重构和检测等操作,并通过重构算法实现对真菌病害孢子原像的重建,根据重构后的图像提取面积(Area)、细度(Thinness ratio)两个重要形态学特征,对稻瘟病孢子进行检测识别。实验结果表明,所设计装置对稻瘟病孢子的检测结果与人工显微镜识别结果高度线性相关,决定系数为 0.99,平均检测误差为 5.91%,具有较好的准确性。

关键词: 衍射; 角谱理论; 稻瘟病; 图像处理; 真菌病害孢子

中图分类号: S435.111.4+1; TP23　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2019)04-0042-07

Micro Detection Device for Fungal Spores of Crops Based on Diffraction Reconstruction

YANG Ning[1]　CHEN Chiyuan[1]　LI Guoxiao[1]　WANG Aiying[2]　ZHANG Rongbiao[1]　TANG Jian[2]

(1. *School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang* 212013, *China*
2. *Research and Development Center of Rice Cropping Technology, China National Rice Research Institute, Hangzhou* 311401, *China*)

Abstract: Collecting airborne spores of rice blast in rice fields using spore trap devices has currently become an important approach for devising strategies early and effectively controlling rice blast. In order to solve the problems of large volume and high cost of existing spore detection system, a spore detection method for crop fungal diseases was proposed based on diffraction reconstruction technology. Based on Huygens-Fresnel principle and angular spectrum theory, a spore detection system for fungal diseases, including enrichment and sampling mechanism, was designed by using diffraction imaging complex reconstruction calculation. The system can complete a series of operations such as enrichment, sampling, shooting, reconstructing and detection, and reconstruct the original spore image of fungal diseases by reconstruction algorithm. According to the morphological characteristics of reconstructed images, two important parameters, area and thinness ratio, were extracted to detect and identify spores. Rice blast spores were selected as the research object to carry out detection and verification experiments. The experimental results showed that the system could capture the micro-images of diffractions of rice blast spores, with 2 592 pixels × 1 944 pixels resolution. The experiments validated that the correlation coefficient between the detection results of rice blast spores and the identification results of artificial microscope can reach 0.99, while the average detection error rate was 5.91%, which had good accuracy. The research provided a design scheme for the research and development of low-cost early warning equipment for crop fungal diseases.

Key words: diffraction; angular spectrum theory; rice blast; image processing; spores of fungal diseases

收稿日期: 2018-10-17　修回日期: 2019-01-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(31701324、61673195)、江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(18)3043)、中国博士后科学基金项目(2018M642182)、江苏省高校优势学科建设工程项目(PAPD)和江苏省优秀青年科学基金项目(BK20180099)

作者简介: 杨宁(1984—),男,副教授,主要从事微传感与自动化检测技术研究,E-mail: yangn@ujs.edu.cn

通信作者: 唐健(1963—),男,研究员,主要从事精准农业与数字农业研究,E-mail: tangjian@mail.hz.zj.cn

0　引言

作物真菌病害因其传播速度快、危害大等特点给病害检测预警带来了巨大的挑战[1-2]。真菌病害是由散布在空气中的真菌孢子浸染水稻引起的[3-6]。因此,对空气中孢子浓度的测定是病害流行分析和预警中不可或缺的部分[7]。

作物真菌病害的检测方法归结起来主要有免疫检测法、核酸检测法、微悬臂梁检测法、分子生物学检测法、形态学鉴定法等。免疫检测法利用抗原和抗体特异性结合的原理,实现特定微生物浓度的快速检测,精度较高[8]。核酸检测法利用分子扩增技术,大大减少了检测时间,且灵敏度较高。上述方法需要特异性抗体或引物以及专业的人员及设备,实现野外即时检测的难度较大[9]。微悬臂梁检测法是一种将敏感材料或受体分子修饰在微悬臂梁表面,对待检目标气体或液体分子进行吸附,造成微悬臂梁运动状态改变来标定待检物浓度的方法[10]。如 NUGAEVA 等[11]使用镀金和未涂覆硅的微机械悬臂阵列,快速定量检测了黑曲霉和酿酒酵母浓度。该方法具有高精度与高灵敏度的特点,但是微悬臂梁检测法对检测环境要求严格,当环境中的杂质污染物被吸附时,将影响最终的检测结果,难以适应复杂的野外环境条件[12]。显微图像计数法由人工观察显微图像并计算孢子数量,检出限更低,检测精度较高,克服了上述检测方法的弊端,但检测时间长、人力消耗大、数字化程度低[13]。而目前利用图像形态学鉴定进行自动识别真菌孢子个数的相关技术也逐步出现,李小龙等[14]、齐龙等[15]利用形态学鉴定方法对捕捉的孢子实现准确计数,但该检测法主要依赖野外采样和实验室观测两个步骤,滞后性较大,不能实现对作物真菌病害的早期预警。

姜玉英等[16]、雷雨等[17]将自动对焦显微镜集成到孢子捕捉仪上实现捕捉数量的大概计数,MELO 等[18]利用神经网络深度学习检测方法对孢子进行分类计数,这些方法依旧需要借助高倍显微镜等昂贵的仪器进行辅助检测,相较于显微图像计数法,提升了数字化水平,但是技术复杂,成本仍然较高,无法推广实施。国内托普云农研制的孢子捕捉仪处于国际领先地位,但它仍然是基于传统显微图像检测方法,使用气泵直接抽取空气到捕捉仪内的显微镜下,搭载图像采集卡的显微镜采集孢子图像,然后传输到上位机对孢子进行识别,整个系统体积巨大、成本高昂,不适合大面积农业推广与野外布置。

衍射技术多应用于血液检测[19]、藻类检测[20]和精子检测[21]等生物医学相关领域。LI 等[22]根据惠更斯-菲涅尔衍射原理设计了基于衍射指纹的癌细胞活性检测系统,该系统体积较大,使用不便。因为细胞培养环境纯净,所以每个衍射环均表示细胞,而病害孢子在野外传播时,空气环境复杂,有的衍射环可能表示其他杂质,所以不宜直接分析衍射环,需要重构后再分析,以便于专家直接标记孢子和评判装置检测结果准确性。拍摄细胞衍射图像时,只需将细胞培养皿放置在系统内即可,而病害孢子在空气中传播,无法直接采样放置到系统内检测,所以需要富集装置。针对孢子检测的特点,本文将孢子的富集与衍射重构检测相结合,减小装置体积与质量,设计一种定时完成富集、进样、拍摄、重构和检测等系列功能于一体的装置。

1　材料与方法

1.1　实验材料

选用稻瘟病孢子作为研究对象,实验样本于 2018 年 10 月在中国水稻研究所采集。为了模拟稻瘟病孢子在空气中的传播状态,利用气溶胶发生器将稻瘟病孢子制成气溶胶粒子,均匀释放在体积为 1 L 的容器中。将气泵分别与容器和检测装置相连,这样容器中混有稻瘟病孢子的气体可被抽集至涂有凡士林的 PDMS 薄片上用于图像采集,空气中病害真菌孢子实际浓度 C 的计算公式为

$$C=\frac{N}{tV} \tag{1}$$

式中　N——一次实验中采集到的孢子个数

t——气泵工作时间,s

V——气泵流量,L/s

使用的微型气泵流量为 0.02 L/s,开展 10 组采样实验,并在显微镜下观察每组采样的孢子数,最后由式(1)得出样本的平均浓度为 100 个/L,将此浓度视为标准单位浓度。为保证装置中用于采样的 PDMS 薄片可长期使用,只需将本次检测到的孢子数减去前一次检测到的孢子数即为本次实验采集到的孢子数,无需每次更换。

1.2　衍射重构技术理论

1.2.1　衍射成像装置工作原理

传统光学显微镜成像技术是基于光穿过透明物质时发生波长(颜色)和振幅(亮度)变化来实现的,肉眼通过显微镜直接观察微生物等的形态。LED 发出的光通过微孔转换成相干光,从而实现相干照明。如图 1 所示,LED 光源发出的光经过其正下方的微孔后,产生部分相干光,部分相干光传播 l_1 距离后照射到样本平面(PDMS 薄片)上。样本平面上样

本的支透光与样本的散射光互相干涉并被其正下方相距 l_2 的 CMOS 成像芯片拍摄下来,图 2 为样本的衍射全息图。首先利用角谱理论对全息图进行相位信息恢复,并基于恢复后的孢子图像研究其形态学特征。

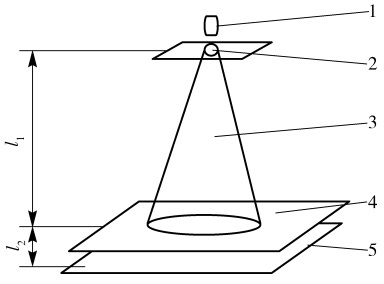


图 1 装置成像原理示意图

Fig. 1 Diagram of equipment imaging principle

1. 光源 2. 微孔 3. 部分相干光 4. 样本平面 5. CMOS 成像芯片

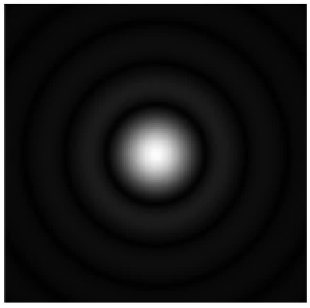


图 2 衍射全息图像

Fig. 2 Hologram image

1.2.2 角谱重构理论

在标量衍射的亥姆霍兹方程理论中,角谱理论从频域的角度准确描述了光的衍射过程,将部分相干光场看作不同方向传播的平面波分量,光传播方向上任意一点的复振幅均被表示出来[23]。

振幅为 U,波长为 λ,方向余弦为 $\cos\alpha$、$\cos\beta$、$\cos\gamma$ 的波矢传播的平面波复振幅为

$$U(x,y,z) = U\exp\left(i\frac{2\pi}{\lambda}(x\cos\alpha + y\cos\beta + z\cos\gamma)\right) \tag{2}$$

令 $f_x = \frac{\cos\alpha}{\lambda}, f_y = \frac{\cos\beta}{\lambda}, f_z = \frac{\cos\gamma}{\lambda}$,则

$$U(x,y,z) = U\exp(2\pi i(xf_x + yf_y + zf_z)) \tag{3}$$

式中 x、y——全息图像素坐标

z——再现距离

α、β、γ——平面参考光波与空间的 yoz 平面、xoz 平面、xoy 平面的夹角

根据角谱理论,由角谱重构法得到的原像光场 $U(x_i,y_i,z_i)$ 的复振幅分布为

$$U(x_i,y_i,z_i) = F^{-1}(F(R(x,y)I(x,y))G_{AS}(f_x,f_y)) \tag{4}$$

其中

$$G_{AS}(f_x,f_y) = \exp\left(i\frac{2\pi}{\lambda}z_i\sqrt{1-(\lambda f_x)^2-(\lambda f_y)^2}\right) \tag{5}$$

其中 $f_x = \frac{x}{\lambda z_i}$ $f_y = \frac{y}{\lambda z_i}$

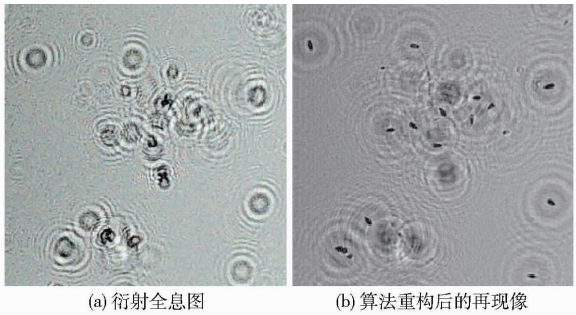
式中 F、F^{-1}——傅里叶变换和逆傅里叶变换

$I(x,y)$——全息图的强度分布

$R(x,y)$——参考光波振幅分布

$G_{AS}(f_x,f_y)$——衍射在频域的传递函数

角谱重构过程如图 3 所示,其中图 3a 是装置采集的衍射全息图,图 3b 是计算机利用角谱法计算重构后得到的原像,可以看出孢子的轮廓被清晰地重构出来。



(a) 衍射全息图 (b) 算法重构后的再现像

图 3 孢子重构图像

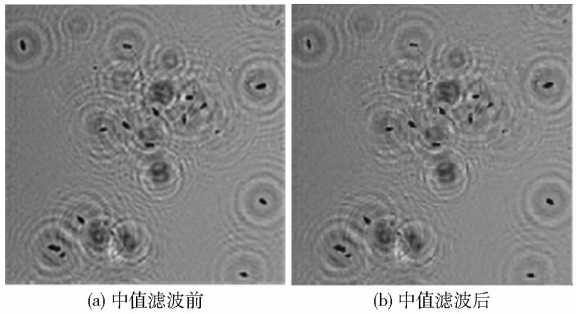
Fig. 3 Spore reconstruction images

1.3 稻瘟病孢子再现像的目标识别

为了准确地识别出再现像中稻瘟病孢子,使用数字图像处理技术对图像进行滤波、阈值分割和特征提取等操作。

1.3.1 中值滤波

图 4a 为角谱重构之后得到的再现像,其中椒盐噪声和脉冲噪声较多,针对该类图像,选择中值滤波进行降噪[24]。图 4b 是中值滤波后图像,选取 3×3 的窗口对重构图像进行滤波,在降低噪声的同时尽可能地减少了细节丢失。



(a) 中值滤波前 (b) 中值滤波后

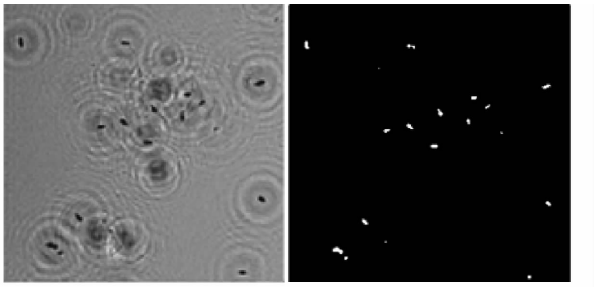
图 4 中值滤波

Fig. 4 Median filtering

1.3.2 阈值分割

由图 5a 知,检测目标颜色与背景颜色相差较大,故可以采用阈值分割的方式将图像分为背景区域和目标区域。预备试验知孢子灰度主要分布在 0 ~

100 之间，灰度较高部分均为背景。故本文采用枚举法确定阈值，枚举区间为 0 ~ 100，步长为 0.5，阈值分割流程如图 6 所示，每次阈值加 0.5，当阈值为 76.5 时，轮廓最为明显，分割结果如图 5b 所示。



(a) 阈值分割前　　(b) 阈值分割后

图 5　阈值分割

Fig. 5　Threshold segmentation

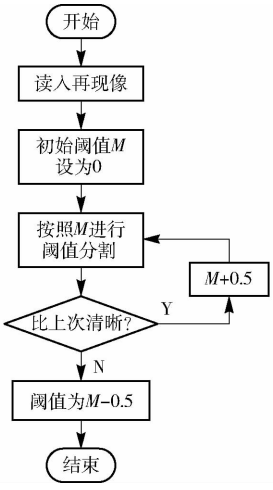


图 6　阈值分割流程图

Fig. 6　Flow chart of threshold segmentation

1.3.3　基于形状特征的识别与计数算法

稻瘟病孢子具有独特的形态特征（细长的梨形）和较为固定的尺寸范围（长（15 ± 5）μm，宽（7 ± 2）μm）。因此，可以对重构后的稻瘟病孢子选择面积（Area）、细度（Thinness ratio）两个形态学参数进行稻瘟病孢子的识别和计数。其中面积 A 定义为目标区域所包含的像素数量，用于描述区域面积。细度 T 用于描述目标形状的纤细程度，定义为

$$T = \frac{4\pi A}{P^2} \tag{6}$$

式中　P——稻瘟病孢子的周长

测定 50 组共 500 个稻瘟病孢子重建后图像的面积 A 和细度 T，其中一组数据如图 7 所示，矩形方框内为稻瘟病孢子。故将同时满足 A 为 10 ~ 30，且 T 为 0.9 ~ 1.4 的目标判定为稻瘟病孢子。

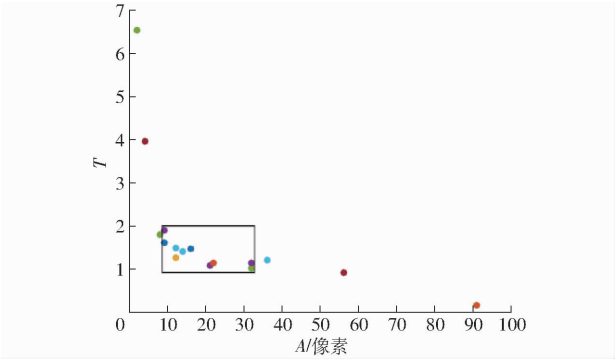


图 7　面积-细度特征二维图

Fig. 7　Two-dimensional chart of area-thinness characteristic

1.4　真菌病害微型检测装置设计

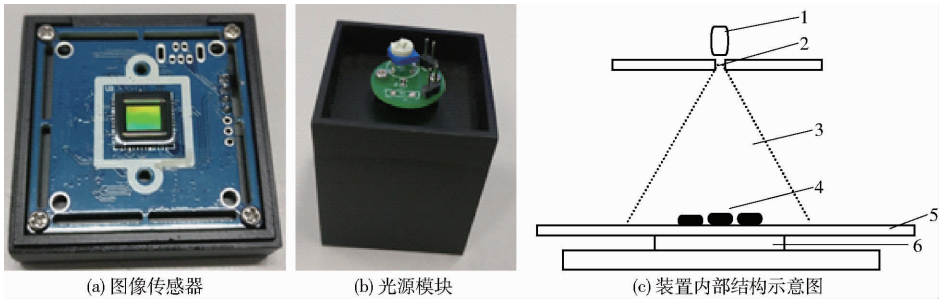
1.4.1　图像采集与光源模块设计

利用 CMOS 图像传感器采集衍射全息图，结果如图 8a 所示。选择 Aptina 公司 500 万像素的 MT9P031 型图像传感芯片，成像区域尺寸为 5.70 mm × 4.28 mm。由于 LED 光源是单色光，故定制了该芯片的黑白版来直接获得灰度图像，以提升图像的信噪比。

光源模块（图 8b）长度为 4 cm（对应图 1 的 l_1），其内部光路和部件位置如图 8c 所示，微孔直径设定为 100 μm，选择 OSRAM 公司的 LA E65B 型（LED 波长 617 nm），两部件位于光源模块正上方，从上往下发出部分相干光覆盖 CMOS 模块的感光区域；订制的 PDMS 薄片厚度为 1 mm（对应图 1 的 l_2），此设计可以简化光学设计，无需使用其他聚焦或校准透镜就可以照亮 CMOS 图像传感器的全部视场[25]。

1.4.2　真菌病害微型检测装置设计

检测装置如图 9 所示，采用锂电池供电。实验



(a) 图像传感器　　(b) 光源模块　　(c) 装置内部结构示意图

图 8　图像采集与光源模块结构

Fig. 8　Image acquisition and light source module

1. LED 光源　2. 微孔　3. 部分相干光　4. 样本　5. PDMS 薄片　6. CMOS 模块

时,计算机通过 WiFi 与图像采集模块通讯,并分析处理图像数据。为了满足气传孢子富集进样和装置内部避光的要求,设计了如图 10 所示的迂回式气路结构。气体从装置上方入口进入,沿着气道从装置两侧排出。

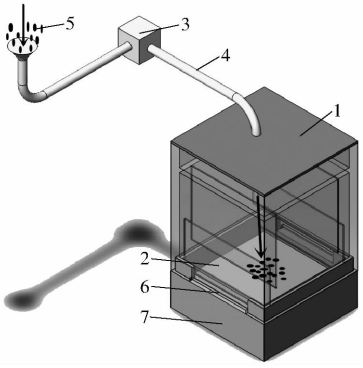


图 9 真菌病害微型检测装置示意图

Fig. 9 Sketch of micro detection device for fungal disease

1. 光源 2. PDMS 薄片 3. 气泵 4. 导管 5. 孢子 6. 出气口 7. CMOS 模块

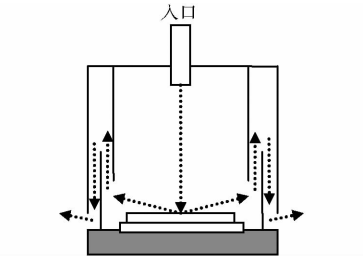


图 10 真菌病害微型检测装置气路结构示意图

Fig. 10 Pneumatic schematic of miniature detection device for fungal diseases

在实验室中(温度为(24 ± 2)℃,相对湿度为(55 ± 5)%,微尘数量在 1 000 个/m^3 以内)进行验证实验。首先打开气泵将混有孢子的气体吹集到涂有凡士林的 PDMS 薄片上。富集完成后,开启 LED 光源和 CMOS 芯片对 PDMS 薄片上的样本进行拍照获取衍射全息图,并将图像传至计算机分析处理。装置初步实现对病害真菌孢子进行定时富集、进样、拍摄,以及对图像进行重构和检测等操作。

2 结果与分析

为了评价本文装置的准确性,以及其他环境杂质等干扰物对稻瘟病孢子检测的影响,用稻瘟病孢子(中国水稻研究所提供)、杂质(主要包括微颗粒、菌丝等物质)进行检测实验,将本装置的计数结果与人工计数结果进行比较。

图 11 表明了 PDMS 薄片重复使用时的孢子检测准确率变化情况,当孢子累计数量分别在 2 500 个和 3 000 个左右时,准确率约为 94% 和 90%,超过 3 000 个时,孢子重叠率较高,准确率明显下降。据文献[26]可知,一季水稻成长期为 110 d 左右,其中有大约一半的时间孢子浓度为 0,剩下的一半时间中,约 70% 的时间内孢子浓度不到 100 个/m^3,少数几天孢子浓度超过 500 个/m^3。该装置每天工作 2 h(孢子捕捉仪在凌晨孢子萌发时开启[27]),通常情况下,在孢子浓度为 100 个/m^3时,装置使用 110 d(一季水稻成长期)时,收集的孢子不到 2 000 个,故本装置无需更换 PDMS 薄片即可满足一季水稻监控预警需求。图 12 是一组实验结果,其中稻瘟病孢子轮廓用红色线条和数字标记,图 12b 是对图 12a 矩形框内图像的局部放大。稻瘟病孢子显微人工计数结果和自动计数结果如表 1 所示,误差($|N - M|/M \times 100\%$)最大不超过 10%,平均误差 5.91%,均属于可接受范围。图 13 是对两种方法进行 Bland - Altman 分析的结果,所有点均在 95% 一致性区间以内,一致性较好。实验结果表明,基于衍射重构技术的作物真菌病害微型检测装置可以检测并识别稻瘟病孢子,其自动计数结果与人工计数结果高度线性

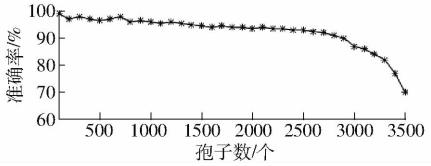
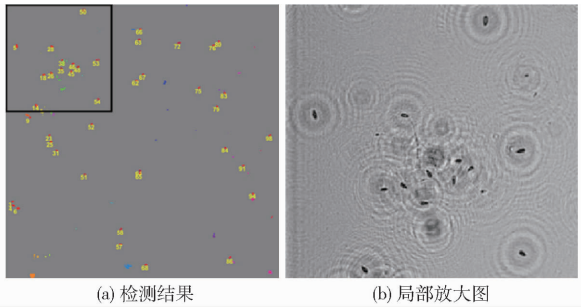


图 11 薄片重复使用时孢子检测准确率

Fig. 11 Detection accuracy of repeated PDMS using



(a) 检测结果 (b) 局部放大图

图 12 装置检测结果

Fig. 12 Diagram of equipment test result

表 1 人工计数与装置自动计数结果

Tab. 1 Manual counting and device automatic counting results

样本编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
人工计数 M	11	20	23	33	15	46	37	41	21	100	86	60	42	39	51	72	50	67	81	93
自动计数 N	12	19	21	31	16	42	34	43	20	95	90	57	45	38	53	68	53	63	85	88
误差/%	9.1	5.0	8.7	6.1	6.7	8.7	8.1	4.9	4.8	5.0	4.7	5.0	7.1	2.6	3.9	5.6	6.0	6.0	4.9	5.4

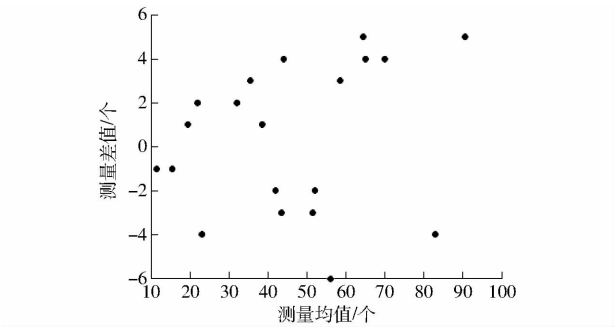


图 13　Bland－Altman 方法分析

Fig. 13　Analysis by Bland－Altman method

相关(决定系数 R^2 为 0.99),平均误差为 5.91%,在实验室条件下具有较好的准确性。

3　结束语

提出了一种基于衍射重构技术的作物真菌病害孢子检测方法,依据惠更斯-菲涅尔原理设计了作物真菌病害孢子微型检测装置。实验结果表明,所设计装置的检测结果和人工计数结果高度线性相关,决定系数为 0.99,平均误差为 5.91%,具有较好的准确性。装置体积为 4 cm × 4 cm × 5 cm,且在实验室条件下测试可实现定时富集、进样、拍摄、重构和检测功能,为微型低成本作物真菌病害早期预警系统的研发提供了解决方案。

参　考　文　献

[1] 王文斌,张荣胜,罗楚平,等. 中国主要稻区稻曲病菌的生物学特性及群体遗传多样性[J]. 中国农业科学, 2014, 47(14):2762－2773.
WANG Wenbin, ZHANG Rongsheng, LUO Chuping, et al. Biological characteristics and genetic diversity of *Ustilaginoidea virens* from rice regions in China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(14):2762－2773. (in Chinese)

[2] 俞咪娜,陈志谊,于俊杰,等. 来源于同一穗不同稻曲球的稻曲病的致病性及遗传多样性[J]. 植物病理学报,2013, 43(6):561－573.
YU Mina, CHEN Zhiyi, YU Junjie, et al. Genetic diversity and pathogenicity of *Ustilaginoidea virens* isolated from different rice false smut balls of a diseased spike [J]. Acta Phytopathologica Sinica, 2013, 43(6):561－573. (in Chinese)

[3] BLOCK E K, LACHER T E, BREWER L W, et al. Population responses of *Peromyscus* resident in Iowa cornfields treated with the organophosphorus pesticide COUNTER[J]. Ecotoxicology, 1999, 8(3):189－200.

[4] 傅泽田, 祁力钧. 国内外农药使用状况及解决农药超量使用问题的途径[J]. 农业工程学报, 1998, 14(2):7－12.
FU Zetian, QI Lijun. Over-use of pesticide and approaches to reduce pesticide dosage [J]. Transactions of the CSAE,1998, 14(2):7－12. (in Chinese)

[5] SUGENG A J, BEAMER P I, LUTZ E A, et al. Hazard-ranking of agricultural pesticides for chronic health effects in Yuma County, Arizona [J]. Science of the Total Environment, 2013, 463(5):35－41.

[6] WAHID F A, WICKLIFFE J, WILSON M, et al. Presence of pesticide residues on produce cultivated in Suriname [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2017,189(6): 303.

[7] 杨燕, 何勇. 基于高光谱图像的稻瘟病抗氧化酶值早期预测[J]. 农业工程学报, 2013, 29(20):135－141.
YANG Yan, HE Yong. Early prediction of antioxidant enzyme value of rice blast based on hyper-spectral image [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(20):135－141. (in Chinese)

[8] ZHANG Y, YANG J, LU Y, et al. A competitive direct enzyme-linked immunosorbent assay for the rapid detection of deoxynivalenol: development and application in agricultural products and feedstuff [J]. Food and Agricultural Immunology, 2017,28(3):516－527.

[9] YANG F, WANG G P, XU W X, et al. A rapid silica spin column-based method of RNA extraction from fruit trees for RT－PCR detection of viruses [J]. Journal of Virological Methods, 2017, 247:61－67.

[10] 王军军, 谢海芬, 周嘉,等. 微悬臂梁在化学及生物传感器中的应用进展[J]. 微电子学, 2004, 34(5):493－496.
WANG Junjun, XIE Haifen, ZHOU Jia, et al. Development of micro cantilever-based chemical and biological sensors [J]. Microelectronics, 2004,34(5):493－496. (in Chinese)

[11] NUGAEVA N, GFELLER K Y, BACKMANN N, et al. Micromechanical cantilever array sensors for selective fungal immobilization and fast growth detection [J]. Biosensors & Bioelectronics, 2005, 21(6):849－856.

[12] 李鹏, 李昕欣, 王跃林. 用于化学气体检测的压阻检测式二氧化硅微悬臂梁传感器[J]. 传感技术学报, 2007, 20(10):2174－2177.
LI Peng, LI Xinxin, WANG Yuelin. Piezoresistive silicon dioxide microcantilever sensor for chemical gas detection [J]. Journal of Transduction Technology, 2007, 20(10):2174－2177. (in Chinese)

[13] 李仪芳, 杨冠玲, 李丰果,等. 大气 PM2.5 显微图像的处理与分析[J]. 光电工程, 2005, 32(11):54－58.
LI Yifang, YANG Guanling, LI Fengguo, et al. Processing and analysis for micrograph of PM2.5 in atmosphere [J]. Opto-Electronic Engineering, 2005, 32(11):54－58. (in Chinese)

[14] 李小龙, 马占鸿, 孙振宇,等. 基于图像处理的小麦条锈病菌夏孢子模拟捕捉的自动计数[J]. 农业工程学报, 2013, 29(2):199－206.
LI Xiaolong, MA Zhanhong, SUN Zhenyu, et al. Automatic counting for trapped urediospores of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* based on image processing [J]. Transactions of the CASE, 2013, 29(2):199－206. (in Chinese)

[15] 齐龙, 蒋郁, 李泽华,等. 基于显微图像处理的稻瘟病菌孢子自动检测与计数方法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(12): 186－193.

QI Long, JIANG Yu, LI Zehua, et al. Automatic detection and counting method for spores of rice blast based on micro image processing [J]. Transactions of the CASE, 2015, 31(12):186 - 193. (in Chinese)

[16] 姜玉英, 罗金燕, 罗德平,等. 远程控制病菌孢子捕捉仪对小麦气传病害的监测效果[J]. 植物保护, 2015,41(6):163 - 168.
JIANG Yuying, LUO Jinyan, LUO Deping, et al. Monitoring effect of remote-controlled spore trap on wheat aero-borne diseases [J]. Plant Protection, 2015,41(6):163 - 168. (in Chinese)

[17] 雷雨,姚志凤,何东健. 小麦条锈病菌夏孢子显微图像远程采集系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(11):39 - 47.
LEI Yu, YAO Zhifeng, HE Dongjian. Design and experiment of micro-image remote acquisition system of uredinispores of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 39 - 47. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20181105&flag = 1&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.005. (in Chinese)

[18] MELO C, LOPES J G, ANDRADE A O, et al. Semi-automated counting of arbuscular mycorrhizal fungi spores using artificial neural network [J]. IEEE Latin America Transactions, 2017, 15(8):1566 - 1573.

[19] ROY M, JIN G, SEO D. A simple and low-cost device performing blood cell counting based on lens-free shadow imaging technique [J]. Sensors & Actuators B Chemical, 2014, 201(4):715 - 723.

[20] SEO D, ROY M, KIM J. High-throughput and real-time microalgae monitoring platform using lens-free shadow imaging system (LSIS) [C]// Sensors, IEEE,2016:1 - 3.

[21] ZHANG X, KHIMJI I, GURKAN U A. Lensless imaging for simultanrous microfluidic sperm monitoring and sorting [J]. Lab on a Chip, 2011, 11(15):2535 - 2540.

[22] LI G X, ZHANG R B, YANG N, et al. An approach for cell viability online detection based on the characteristics of lensfree cell diffraction fingerprint [J]. Biosensors and Bioelectronics,2018,107:163 - 169.

[23] THOMAS B P, RAJENDREN K V, PILLAI S A. Wholefield NDT of porous materials using digital holography[C]// Proc. National Seminar on Non-Destructive Evaluation. Hyderabad: Indian Society for Non-Destructive Testing, 2006:229 - 234.

[24] LEE Y H, KASSAM S A. Generalized median filtering and related nonlinear filtering techniques [J]. Acoustics Speech & Signal Processing IEEE Transactions on, 1985, 33(3):672 - 683.

[25] MUDANYALI O, TSENG D, OH C. Compact, Light-weight and cost-effective microscope based on lensless incoherent holography for telemedicine applications [J]. Lab on a Chip, 2010, 10(11):321 - 328.

[26] 许燎原, 赵丽稳, 胡宇峰,等. 稻瘟病菌孢子 qPCR 方法的建立及用于监测气传菌源的研究[J]. 浙江农业学报, 2016, 28(8):1368 - 1373.
XU Liaoyuan, ZHAO Liwen, HU Yufeng, et al. Development of a qPCR detection method for monitoring conidial density of rice blast fungus in the air [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis,2016,28(8):1368 - 1373. (in Chinese)

[27] 陈浩,康晓慧,张梅,等. 稻瘟病菌空中孢子量与气象因子的关系[J]. 湖北农业科学,2009,48(8):1869 - 1871.
CHEN Hao, KANG Xiaohui, ZHANG Mei, et al. Relationship between spatial spore amount of *Pyricularia oryzae* cavara and meteorological factors [J]. Hubei Agricultural Science, 2009,48(8):1869 - 1871. (in Chinese)

(上接第 41 页)

[21] 徐小龙,蒋焕煜,杭月兰. 热红外成像用于番茄花叶病早期检测的研究[J]. 农业工程学报,2012, 28(5): 145 - 149.
XU Xiaolong, JIANG Huanyu, HANG Yuelan. Study on detection of tomato mosaic disease at early stage based on infrared thermal imaging[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(5): 145 - 149. (in Chinese)

[22] MAHLEIN A K, OERK E C, STEINER U, et al. Recent advances in sensing plant diseases for precision crop protection[J]. European Journal of Plant Pathology, 2012, 133(1): 197 - 209.

[23] RAZA S A, SANCHEZ V, PRINCE G, et al. Registration of thermal and visible light images of diseased plants using silhouette extraction in the wavelet domain[J]. Pattern Recognition, 2015,48(7): 2119 - 2128.

[24] JIAO Leizi, WU Weibing, ZHENG Wenge, et al. The infrared thermal image-based monitoring process of peach decay under uncontrolled temperature conditions[J]. Journal of Animal and Plant Sciences, 2015, 25(3Supp. 1): 202 - 207.

[25] 王栋,尚堃. 基于改进蚁群算法的红外图像边缘检测方法[J]. 四川兵工学报, 2014, 35(7): 87 - 90.
WANG Dong, SHANG Kun. Edge detection algorithm of image based on improved ant colony optimization[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2014, 35(7): 87 - 90. (in Chinese)

[26] 陈浩,方勇,朱大洲,等. 基于蚁群算法的玉米植株热红外图像边缘检测[J]. 农机化研究,2015,37(6): 49 - 52.
CHEN Hao, FANG Yong, ZHU Dazhou, et al. Thermal infrared image edge detection method based on ant colony algorithm for corm plant[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(6): 49 - 52. (in Chinese)

[27] 李存兵,姜伟,华金. 基于小波变换的水果红外图像目标识别[J]. 机电工程,2007,24(8): 24 - 26.
LI Cunbing, JIANG Wei, HUA Jin. Wavelet transformation for infared fruit images object identify[J]. Mechanical and Electrical Engineering, 2007, 24(8): 24 - 26. (in Chinese)

[28] 周建民,尹洪妍,张瑞丰,等. 基于红外热成像树上板栗机器识别研究[J]. 中国农机化学报,2012,33(3): 132 - 136.
ZHOU Jianmin, YIN Hongyan, ZHANG Ruifeng, et al. Study on machine recognition of Chinese chestnut on trees based on infrared thermograghy[J]. Chinese Agricltural Mechanization, 2012, 33(3): 132 - 136. (in Chinese)