

基于四旋翼无人机快速获取大田植株图像的方法及其应用

李晓鹏¹ 胡鹏程¹ 徐照丽² 晋艳² 杨宇虹² 郑邦友³ 段涛¹ 郭焱^{1*}

(1. 中国农业大学 资源与环境学院, 北京 100193;

2. 云南省烟草农业科学研究所, 昆明 650021;

3. CSIRO Agriculture and Food, Queensland Biosciences Precinct, Brisbane, St Lucia 4067 QLD, Australia)

摘要 利用低空无人机获取农田信息, 具有实时以及灵活性高、成本低等优势。为快速、精确监测大田规模化种植作物的生长发育状况, 以四旋翼无人机为平台, 结合数字图像技术, 建立快速获取大田烟株中前期图像的方法。结果表明, 在天空辐射条件较稳定的条件下, 采用较低的飞行高度(如 20 m)航拍获取田块图像, 能够得到清晰的拼接图像和三维重建效果; 采用基于决策树的植被分割算法将烟草和非植被部分分割后, 得到较高精度的大田植株图像。在此基础上进行大田烟草缺苗数估测, 所估算的缺苗数与实测值吻合较好。

关键词 无人机; 植物表型; 生长发育; 图像拼接; 三维点云; 植被分割; 烟草

中图分类号 V279+.2

文章编号 1007-4333(2017)12-0131-07

文献标志码 A

Method for rapidly acquiring images of field-grown crops using a quad-rotor UAV and its application

LI Xiaopeng¹, HU Pengcheng¹, XU Zhaoli², JIN Yan², YANG Yuhong²,
ZHENG Bangyou³, DUAN Tao¹, GUO Yan^{1*}

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Yunnan Academy of Tobacco Agricultural Sciences, Kunming 650021, China;

3. CSIRO Agriculture and Food, Queensland Biosciences Precinct, Brisbane, St Lucia 4067 QLD, Australia)

Abstract Because of the characteristics of high flexibility and low cost, there are lots of advantages to use unmanned aerial vehicle (UAV) to collect the real-time information of field. In order to quickly monitoring the growth and development of crops grown in large scale field, a method for rapidly acquiring images of field-grown tobacco using quad-rotor UAV and digital image processing techniques was explored. The results show that under a relatively stable sky radiation condition, the images acquired with low flight height (e. g. 20 m) can be used to produce rather high quality ortho-mosaic and 3D reconstruction. The images of individual field-grown tobacco plants were acquired using the vegetation segmentation algorithm based on decision tree to segment tobacco and non-vegetation part. The missing plant number of tobacco in individual plots was computed based on this algorithm and the results agree to the measured values well. Accordingly, this study provided a reliable way for rapidly and accurately accessing the growth and development of field-grown tobacco and studying plant phenotype in large scale.

Keywords unmanned aerial vehicle; crop phenotyping; growth and development; ortho-mosaic; 3D point cloud; vegetation segmentation; tobacco

近年来, 分子技术的发展特别是高通量基因测序技术的进步使得对植物基因组的研究水平飞速提

高, 但对田间状态下的植物表型研究仍然停留在劳动密集型和破坏性取样测量的水平。缺乏快速、高

收稿日期: 2016-10-07

基金项目: 中国烟草总公司云南省公司科技项目(2017YN07); 云南中烟工业有限责任公司项目(2014YL01)

第一作者: 李晓鹏, 硕士研究生, E-mail: xiaopengli0811@163.com

通讯作者: 郭焱, 教授, 主要从事数字农业研究, E-mail: yan.guo@cau.edu.cn

效的数据采集、分析和评估技术,已成为了大田作物生长发育和表型研究的瓶颈之一^[1]。无人机(Unmanned aerial vehicle, UAV)能够携带多种传感器,可高通量地拍摄田间图像,具有受地面状况影响较小、不接触和不扰动植株等优点^[2-3]。

旋翼无人机受起飞、降落场地的限制少,适合于低空飞行,飞行高度可调、飞行速度可控且可根据需要随时悬停,因而非常适用于规模化种植区的实时监测。目前,国际上在多方面开展了无人机遥感技术的应用^[4-10],如搭载孢子采样器研究病害传播^[11-12]、利用光谱相机监测作物氮营养状况^[13-14]以及监测冠层温度^[15]等。此外,还开展了植物生长发育参数估测的研究,如出苗率^[16]、叶片夹角^[17]、活力^[18]、覆盖度^[19]等。国内对利用低空无人机在农田信息采集方面的应用发展较晚,已有的研究以使用光谱传感器的较多^[20-21]。

烟草是我国重要的经济作物。目前,获取大田烟草生长发育信息仍采用需要大量时间和人力投入的传统方法,亟需快速、高效的方法。基于低空无人机平台获取精确的烟草生长发育和表型信息,对于烟草育种和田间管理都具有重要意义,但目前在这方面鲜有报道。本研究采用携带高分辨率航拍相机的四旋翼无人机,对大田烟草进行航拍。航拍时采用了不同无人机飞行参数、不同航拍相机拍摄参数的方案。同时,选用基于决策树的植被分割算法^[22]对所获得的航拍图像进行处理分析,旨在建立能够获取用于精确分析植株生长发育参数的高分辨率图像的方法,并基于所获得一定精度的植株图像,进行大田烟株缺苗数估测的探索。

1 材料与方法

在位于云南省玉溪市的云南省烟草农业科学研究院研和烟草实验基地(102°30'E, 24°14'24"N)进行了无人机航拍。时间为2016年5月26—29日,基地的烟草总种植面积为8.67 hm²。土壤类型为红壤。航拍目标为设置了水稻-烟草水旱轮作处理和烟草-玉米旱旱轮作处理的试验区。烟苗移栽时间为2016年4月28日。

1.1 UAV 航拍系统

选用四旋翼无人机航拍系统 Inspire 1 Pro(大疆公司,中国)并采用禅思 X5 航拍相机,其主要技术参数见表1。无人机地面控制系统分为主遥控器和副遥控器。

表1 Inspire 1 Pro 无人机航拍系统的主要技术参数
Table 1 Main parameters of the Inspire 1 Pro UAV system

组件 Item	参数 Parameter
无人机	机体质量为2.87 kg,携带 X5 航拍相机时的起飞质量为3.4 kg 飞行速度为0~18 m/s,续航时间约为15 min
数码相机	4/3 英寸 CMOS 传感器,有效像素为1 600 万像素照片,最大分辨率为4 608×3 456,每张图像约为3.5 M,存储格式为JPG 焦距为15 mm,电子快门速度为8~1/8 000 s
云台	采用三轴增稳的云台,可使相机能以高达0.02°的精度实现亚像素稳定拍摄 可控旋转范围:俯仰为-90°~+30°,水平为±320° 最大控制转速:俯仰为120°/s,水平为180°/s

1.2 航拍流程和方案

所采用的无人机航拍及图像处理流程为:在航拍前在卫星地图上定位目标航拍区,规划飞行航线,设置无人机和相机的参数,然后对目标航拍区进行航拍。回到室内后,对采集的航拍图像进行图像整理和地理定位,然后进行图像拼接与3D重建,并进行拼接图像的修整和分割,之后即可基于所得图像应用于相关领域。

电池容量是制约无人机航拍时间的重要因素。较高飞行高度可使无人机航拍系统在较短的时间内完成较大面积的航拍,但所获得的航拍图像精度较低;较低飞行高度可获取精度较高的航拍图像,但一次飞行任务完成的航拍区域较小,从而无法在一定时间内完成较大面积目标区域的航拍。因此,在制定航拍方案时,需同时兼顾航拍图像精度和飞行时间。为比较不同飞行高度无人机航拍所获取图像精度的差异,进行了所选定的试验区的15、20、30和50 m等4个飞行高度的航拍。

1.3 飞行任务规划与执行

使用开源软件 Mission planner for UAV (<https://croptsrv-cdc.it.csiro.au/shiny/users/zhe00a/missionplanner/>)规划航线。在设置好飞行高度、图像重叠度及拍摄间隔后,飞行速度会在软件

中自动计算生成。设置前后、左右相邻图像的重叠度均为 80 %，并将相机拍摄间隔设置为 2 s。考虑到卫星地图与实际区域之间可能会有偏差，在规划航线时考虑了这个偏差，保证航拍区域完全覆盖目标区域。在笔记本电脑上打开飞控软件 Litchi (<https://flylitchi.com/hub>)，载入已规划航线任务。

起飞前，将无人机主遥控器与平板电脑(华为，Android 系统)连接，在平板电脑上使用 Litchi App 进行无人机飞行参数设置。无人机辅遥控器与手机(华为，Android 系统)连接，使用 DJI GO App 对相机参数进行设置。航拍相机曝光模式设置为快门优先，快门速度为 1/1 250 s， F 值为 3~5。本研究中，航拍在晴天条件下进行，故将白平衡设置为晴天模式，ISO 为 200。

1.4 航拍图像的处理

从无人机存储设备导出航拍图像后，使用 Pix4Dmapper 软件(<https://pix4d.com/>)生成拼接图像、三维点云及数字表面模型(DSM)。然后，利用基于决策树的植被分割算法对拼接图像进行分割，以便进一步分析作物生长动态参数和表型性状等。植被分割需要设置植被和背景训练集，其中植被训练集包括阴影叶、光照叶等植被部分场景，背景训练集包括土壤、道路、汽车等非植被场景。航拍图像处理使用的图形工作站，其处理器为 Intel Core i7 6800，显卡为 NVIDIA GTX1080，内存为 32 G，操作系统为 Microsoft Windows 10。

采用地面采样距离(GSD, cm)比较不同航拍高度获得的图像精确度，其计算方法如式 1 所示^[23]：

$$GSD = S \cdot H / f \cdot 10^{-3}$$

(1)

其中： S 为像元尺寸， μm ， f 为焦距， mm ， H 为航拍高度， m 。GSD 的实质为用地面距离单位表示像素大小，GSD 越大，像素代表的地面距离越大，则图像的精确度越低。

1.5 基于分割图像的缺苗数估测

基于航拍图像处理后获得的拼接图像计算试验小区的烟草缺苗数，包括确定烟株轮廓和茎秆位置、计算株距，判定相邻烟株间是否缺苗及缺多少等步骤。具体过程为：将烟草分割图像旋转至茎向处于水平方向；在图像中确定烟株轮廓，并依据预设的轮廓像素个数(面积阈值)过滤较小轮廓，得到各烟株的轮廓图像(图 1)；遍历各烟株轮廓，分别对其骨架化^[24-25]；查找各轮廓骨架的交点，当交点数 ≥ 3 时，将各交点的平均点视为烟株茎秆位置(图 1)。当骨架交点数 < 3 时，将此轮廓的包围盒中心视为茎秆位置；根据茎向对茎秆位置进行排序和聚类，得到各垄烟株的茎秆位置；对每垄烟株的茎秆位置进行线性回归得到茎向回归直线；将烟株茎秆位置向茎向回归直线进行投影，分别计算相邻投影点间的距离，取其中位数作为此垄烟株的平均株距；根据式 2 计算相邻烟株间的缺苗数：

$$M_{ij} = \text{round}(D_{ij}/AD_i + 0.5) - 1$$

(2)

其中： M_{ij} 为第 i 垄的第 j 和 $j + 1$ 烟株间的缺苗数， D_{ij} 为第 j 和 $j + 1$ 烟株间距离， AD_i 为第 i 垄的平均株距， $\text{round}()$ 为取整函数。

选取了烟草-玉米旱旱轮作处理的 5 个小区，计算各小区的缺苗数。将缺苗数计算结果与图像目视判读法(即直接从田块拼接图上目视判读的缺苗数)相比较，以检验缺苗数计算方法的准确性。



图 1 烟株轮廓(左)及其骨架化(右)示意图。红色点为骨架交点,黄色点为计算出的烟株茎秆位置
Fig. 1 Contour of a tobacco plant(left)and its skeleton(right). Red points indicate the intersection points of the skeleton,and yellow point indicates the position of the tobacco stem

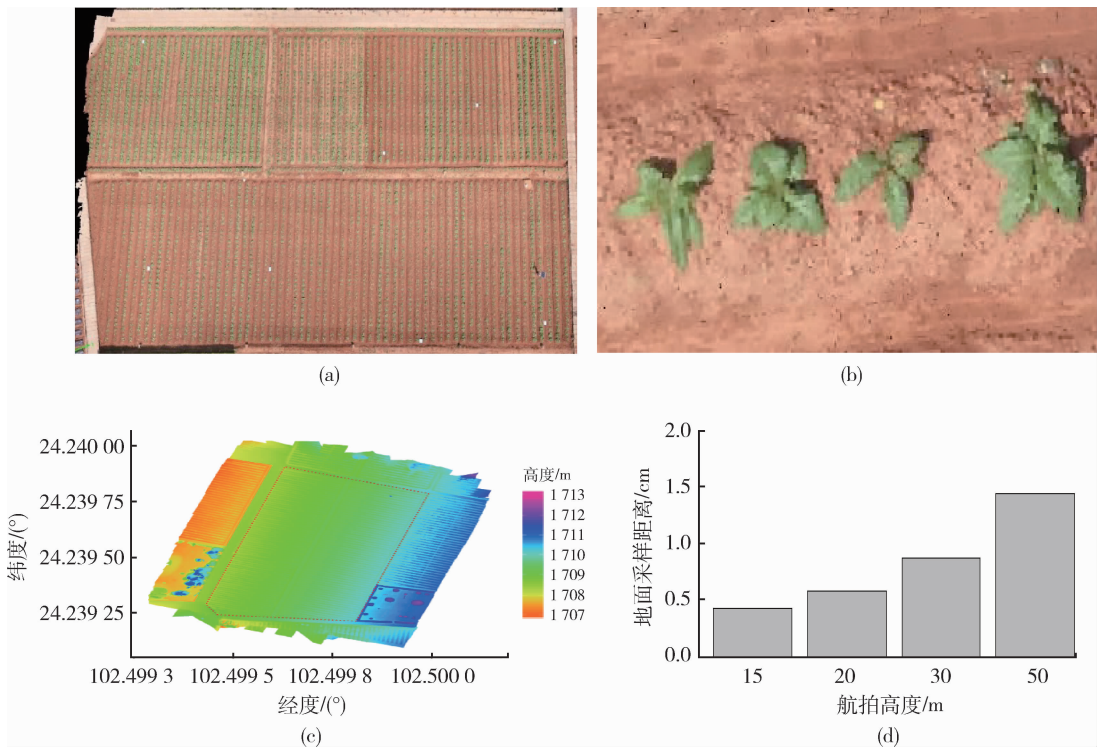
2 结果与分析

2.1 UAV 图像的精度和 3D 重建

采用 15、20、30 和 50 m 的飞行高度航拍所选试验区,所需飞行时间分别为 16、11、5 和 2 min。对不同飞行高度航拍图像进行了处理。图 2 为飞行高度为 20 m 的试验区航拍图像处理结果。图 2(a)为生成的实验区三维点云,图 2(b)为局部放大的图像,能够肉眼辨识烟草叶片,可通过目视判别法比较烟株之间的生长差异。图 2(c)为 DSM 图像,表征

试验区的高程变化。

计算各个航拍高度的 GSD 值。由图 2(d)可知,飞行高度越低 GSD 越小,表明采用较低的飞行高度航拍可获得较高的图像精度。其中,飞行高度为 15 和 20 m 的航拍图像的 GSD 分别为 0.43 和 0.58 cm,二者较小且相近。而飞行高度为 30 和 50 m 的航拍图像的 GSD 分别为 0.87 和 1.44 cm。由于采用 20 m 飞行高度航拍试验区所需时间相对较短而所获得航拍图像的 GSD 值相对较小,故后续分析选用了该飞行高度的航拍图像。



(a) 为试验区三维点云;(b)为局部放大的图像;(c)为 DSM(虚线框内为试验区);(d)为不同航拍高度的 GSD 值。

(a) 3D point cloud of the experimental field;(b) A partial magnified image;(c) DSM (Dashed line box indicates the experimental field);(d) The computed GSD values for different flight altitudes.

图 2 飞行高度为 20 m 的试验区航拍图像的处理效果

Fig. 2 Processed results of the aerial images collected at the 20 m flight altitude of the experimental field

2.2 UAV 图像分割

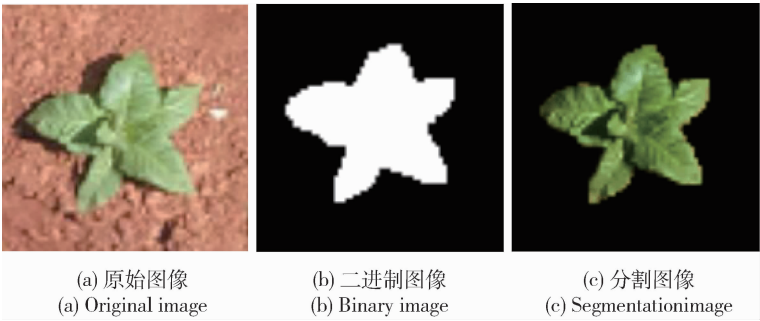
UAV 飞行高度为 20 m 的航拍图像经过植被分割算法处理后,可以获得较好的分割效果,背景扣除干净,且植株轮廓清晰、完整(图 3)。

太阳高度角的变化会导致植被阴影发生变化。同一飞行高度在一日不同时段对同一地块进行航拍所获得的图像中,阴影会有显著差异。如图 3(a)所示,原始图像包含烟株阴影,而经过植被分割算

法处理后的图像(图 3(b)和(c))中烟株阴影完全剔除。

2.3 缺苗数估测

基于拼接图像进行计算,得到小区中的缺苗位置(图 4)。由图 4 可知,计算的各烟株茎秆位置基本处于各烟株实际茎秆部位,且垄向回归线经过大部分烟株的茎秆部位。通过烟株茎秆部位投影点计算平均株距,能够准确地定位缺苗位置。



飞行高度为 20 m,天气条件为晴天,时段为 14:00-14:30。

Flight altitude:20 m; Sky condition:sunshine;flight period:14:00-14:30.

图 3 航拍图像的植被分割效果。分割图像分为植物(绿)和背景(黑)部分

Fig. 3 The result for an image before and after vegetation segmentation processing.
The image was segmented into background(black)and plant(green) parts

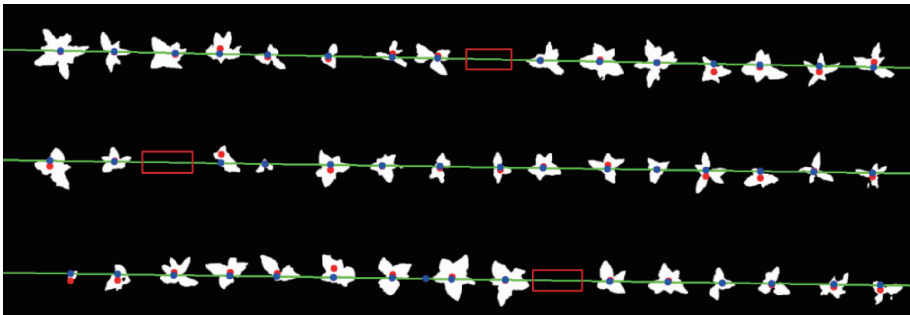


图 4 试验小区(局部)烟株的茎秆位置(红色点)、茎向回归线(绿色直线)、茎秆位置投影点(蓝色点)及缺苗位置(红色矩形框)

Fig. 4 Stem positions (red points),fitted row lines (green lines),projected points of stem positions (blue points) and missing plant positions (red rectangles) of tobacco plants in a plot(partial)

计算了烟草-玉米旱旱轮作处理各小区的缺苗数(表 2)。从表可知,各小区的缺苗数为 4~6 株,计算的缺苗数与图像目视判读法得到的缺苗数基本一致。

表 2 烟草-玉米旱旱轮作处理各小区的缺苗数

Table 2 Missing plant number for different plots of the tobacco-maize rotation treatment			
小区 Plot ID	总株数 Total plant number	缺苗数 Missing plant number	
		目视判读法 Visual interpreted	计算值 Calculated
1	190	4	4
2	195	4	5
3	191	5	5
4	192	5	6
5	193	6	6

3 讨 论

为了快速、高效地获取规模化连片种植作物的生长发育状况,以及在作物育种中高通量地分析和评估众多品系的植株表型信息,建立基于无人机航拍技术的大田植株图像数据高通量采集方法是十分必要的。本研究采用四旋翼无人机对大田种植的烟草进行了航拍,比较了设置无人机和航拍相机不同参数条件下航拍所获取图像的差异,并进行了烟草缺苗数的估测。

飞行任务规划、无人机和相机参数设置会显著影响航拍效果。在规划飞行任务时,需要考虑到相邻图像之间的重叠度,只有合适的重叠度才能获得良好的拼接图像和三维点云。无人机飞行速度和相机快门速度的合理搭配是保证所拍摄图像清晰度的关键,若快门速度过慢而飞行速度较快,则图像会模糊。拍摄间隔的设置需同时考虑飞行速度和图像覆

盖度,本研究将图像重叠度设置为80%,拍摄间隔设置为2 s,达到了较好的效果。

采用较高的飞行高度航拍(如50 m),能够快速获得大面积种植田块的图像,但由于GSD较大,所获得的航拍图像不能用于植株性状的精确分析。较低的飞行高度有利于获得可进行植株性状精确分析的航拍图像。UAV航拍高度设置需综合考虑航拍目标范围和电池续航能力,如本研究试验区选择20 m为宜,若目标航拍区较大,则可以选择30 m的飞行高度。飞行高度过低(如15 m)时,除了需考虑电池续航能力外,还需要考虑田间电线、树等障碍物对飞行安全的影响。

使用无人机航拍,天气条件是重要影响因素。天空光照是否均匀与光照强度大小是影响植被分割的关键。同一天不同时段拍摄时,植株在图像中会产生不同面积的阴影,这是影响图像分析的主要干扰因素之一。近年来由于算法的改进,已可较好地克服阴影对图像分析的干扰。本研究结果表明,采用基于决策树的植被分割算法可使航拍图像的阴影不显著影响植被分割效果。由于田间杂草颜色与烟草相近,已有的算法难以将杂草扣除。因此,烟田杂草是影响烟草植株分割效果的重要因素。

应用本研究方法计算的各处理缺苗数与目视判别法基本一致。由于本方法能够快速计算整个田块的缺苗数并对缺苗位置进行定位,因而效率很高。移栽后的烟苗较小且叶片数较少,相邻烟苗之间无相互遮挡,有利于对烟苗轮廓进行骨架化。田间杂草可能会被分割算法错误地视为烟株,在查找烟株轮廓时设置面积阈值,能够过滤田间杂草轮廓,从而减少这类问题带来的误差。在烟苗移栽后,通常会对烟垄进行培土等田间管理,这可能会使部分烟叶被土壤覆盖。在进行植被分割时,被土壤覆盖的烟苗将被分割成多个较小轮廓,从而影响计算茎秆部位。另外,还会出现因烟苗轮廓的像素个数小于面积阈值而被过滤的问题,这是导致部分处理的缺苗数估算值略大于目视判读法的主要原因。

参考文献 References

[1] Sankaran S, Khot L R, Espinoza C Z, Jarolmasjed S, Sathuvalli V R, Vandemark G J, Miklas P N, Carter A H, Pumphrey M O, Knowles N R, Pavek M J. Low-altitude, high-resolution aerial imaging systems for row and field crop phenotyping: A review[J]. *European Journal of Agronomy*, 2015, 70: 112-123

[2] Tattaris M, Reynolds M P, Chapman S C. A direct comparison of remote sensing approaches for high-throughput phenotyping in plant breeding[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 7: 1131-1131

[3] Chapman S C, Merz T, Chan A, Jackway P, Hrabar S, Dreccer M F, Holland E, Zheng B Y, Ling T J, Berni J J. Pheno-Copter: a low-altitude, autonomous remote-sensing robotic helicopter for high-throughput field-based phenotyping[J]. *Agronomy*, 2014, 4(2): 279-301

[4] Rasmussen J, Nielsen J, Garcia-Ruiz F, Christensen S, Streibig J C. Potential uses of small unmanned aircraft systems(UAS) in weed research[J]. *Weed Research*, 2013, 53(4): 242-248

[5] Gonzalez F, Castro M P G, Narayan P, Walker R, Zeller L. Development of an autonomous unmanned aerial system to collect time-stamped samples from the atmosphere and localize potential pathogen sources[J]. *Journal of Field Robotics*, 2011, 28(6): 961-976

[6] d'Oleire-Oltmanns S, Marzolf I, Peter K D, Ries J B. Unmanned aerial vehicle(UAV) for monitoring soil erosion in morocco[J]. *Remote Sensing*, 2012, 4(11): 3390-3416

[7] Gago J, Douthe C, Coopman R E, Gallego P P, Carbo M R, Flexas J, Escalona J, Medrano H. UAVs challenge to assess water stress for sustainable agriculture[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 153: 9-19

[8] Calderón R, Montes-Borrego M, Landa B B, Navas-Cortés J A. Detection of downy mildew of opium poppy using high-resolution multi-spectral and thermal imagery acquired with an unmanned aerial vehicle[J]. *Precision Agriculture*, 2014, 15(6): 639-661

[9] Zhang C, Kovacs J M. The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: A review[J]. *Precision Agriculture*, 2012, 13(6): 693-712

[10] Merz T, Chapman S. Autonomous unmanned helicopter system for remote sensing missions in unknown environments[J]. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2011, 38: 143-148

[11] Aylor D E, Schmale D G, Shields E J, Newcomb M, Nappo C J. Tracking the potato late blight pathogen in the atmosphere using unmanned aerial vehicles and Lagrangian modeling[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(2): 251-260

[12] Di Gennaro S F, Battiston E, Di Marco S, Facini O, Matese A. Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-based remote sensing to monitor grapevine leaf stripe disease within a vineyard affected by esca complex[J]. *Phytopathologia Mediterranea*, 2016, 55(2): 262-275

[13] Agüera F, Carvajal F, Pérez M. Measuring Sunflower Nitrogen Status from AN Unmanned Aerial Vehicle-Based System and AN on the Ground Device[J]. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2011, 3822: 33

[14] Zaman-Allah M, Vergara O, Araus J L, Tarekegne A,

- Magorokosho C, Zarco-Tejada P J, Hornero A, Albà A H, Das B, Craufurd P, Olsen M, Prasanna B M, Cairns J. Unmanned aerial platform-based multi-spectral imaging for field phenotyping of maize[J]. *Plant Methods*, 2015, 11: 35
- [15] Chapman S C, Merz T, Chan A, Jackway P, Hrabar S, Dreccer M F, Holland E, Zheng B Y, Ling T J, Jimenez-Berni J. Phenocopter: A low-altitude, autonomous remote-sensing robotic helicopter for high-throughput field-based phenotyping [J]. *Agronomy*, 2014, 4(2): 279-301
- [16] Sankaran S, Khot L R, Carter A H. Field-based crop phenotyping: Multispectral aerial imaging for evaluation of winter wheat emergence and spring stand[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2015, 118: 372-379
- [17] McNeil B E, Pisek J, Lepisk H, Flamenco E A. Measuring leaf angle distribution in broadleaf canopies using UAVs [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 218: 204-208
- [18] Kipp S, Mistele B, Baresel P, Schmidhalter U. High-throughput phenotyping early plant vigour of winter wheat[J]. *European Journal of Agronomy*, 2014, 52, Part B: 271-278
- [19] Zaman-Allah M, Vergara O, Araus J L, Tarekegne A, Magorokosho C, Zarco-Tejada P J, Hornero A, Albà A H, Das B, Craufurd P, Olsen M, Prasanna B M, Cairns J. Unmanned aerial platform-based multi-spectral imaging for field phenotyping of maize[J]. *Plant Methods*, 2015, 11: 35-44
- [20] 李冰, 刘镨源, 刘素红, 刘强, 刘峰, 周公器. 基于低空无人机遥感的冬小麦覆盖度变化监测[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(13): 160-165
- Li B, Liu R Y, Liu S H, Liu Q, Liu F, Zhou G Q. Monitoring vegetation coverage variation of winter wheat by low-altitude UAV remote sensing system[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(13): 160-165 (in Chinese)
- [21] 田振坤, 傅莺莺, 刘素红, 刘峰. 基于无人机低空遥感的农作物快速分类方法[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(7): 109-116
- Tian Z K, Fu Y Y, Liu S H, Liu F. Rapid crops classification based on UAV low-altitude remote sensing[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(7): 109-116 (in Chinese)
- [22] Guo W, Rage U K, Ninomiya S. Illumination invariant segmentation of vegetation for time series wheat images based on decision tree model [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2013, 96: 58-66
- [23] 吴云东, 张强. 立体测绘型双翼民用无人机航空摄影系统的实现与应用[J]. *测绘科学技术学报*, 2009, 26(3): 161-164
- Wu Y D, Zhang Q. Implementation and application of aerial photographic system by civil Unmanned Biplane for survey and stereomapping [J]. *Journal of Surveying and Mapping Science and Technology*, 2009, 26(3) 161-164 (in Chinese)
- [24] Zhang T Y, Suen C Y. A fast parallel algorithm for thinning digital patterns[J]. *Communications of the ACM*, 1984, 27(3): 236-239
- [25] 王传宇, 郭新宇, 肖伯祥, 杜建军, 吴升. 基于图像拼接的苗期玉米植株缺失数量自动测量方法[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(12): 148-153
- Wang C Y, Guo X Y, Xiao B X, Du J J, Wu S. Automatic measurement of numbers of maize seedlings based on mosaic imaging [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(12): 148-153 (in Chinese)

责任编辑：王燕华