

基于处方图的喷头喷洒半径模糊控制研究

程梦洁, 胡波*, 张大伟, 胡平

(广西科技大学自动化学院, 广西柳州 545616)

摘要: 【目的】研究如何通过超低空无人机基于处方图喷头喷洒半径的模糊控制, 减少农药的过量使用, 提高农药的利用率, 减少环境污染。【方法】通过分析作物密度、作物密度变化量与喷头喷洒半径之间的关系, 建立喷头喷洒半径的模糊控制器, 确定不同作物密度下的喷头喷洒半径, 生成喷洒处方图。【结果】通过比较超低空无人机定量喷洒和基于处方图变量喷洒的喷洒效果, 与定量喷洒相比, 变量喷洒的效果远远大于定量喷洒; 变量喷洒时作物的沉积剂量大于定量喷洒。【结论】无人机基于处方图变量喷洒可有效提高喷洒效果, 减少药剂用量, 同时减少环境污染。

关键词: 处方图; 模糊控制; 作物密度; 喷头喷洒半径

引言

近年来, 我国航空施药技术发展迅速, 与传统的人工施药和地面机械施药方式相比具有不可替代的优势, 凭借可人机分离、人药分离、可适应复杂地形^[1]、机动灵活、高效省工、节水节药等优势^[2]被广泛用于水田、高秆作物和丘陵山地等人工和地面机械难以下地的场景。但实际喷洒作业时, 无论是传统的人工施药、地面机械施药还是无人机施药, 大部分都是大面积粗放喷洒, 对作物空缺没有识别和选择能力, 农药喷洒精确性不足, 导致农药使用量大, 这样不仅难以达到农药的最佳效果, 而且会造成环境污染^[3]。因此, 为了提高农药利用率、减少农药浪费, 国内外专家学者设计出基于处方图的变量喷药控制系统, 根据田间作物生长情况提出最佳施药方案, 并将其与作物位置对应成一张变量喷洒处方图, 以控制无人机按图作业^[4]。

基于处方图的变量喷洒技术根据田间作物的长势和稀疏程度等指标喷洒不同剂量的农药实现“按需喷药”。许真珠和黄莺^[5]通过超绿(2G-R-B)模型灰度化识别作物区域和非作物区域, 然后将图像划分为4行×4列的网格, 根据网格内作物区域面积占比生成处方图, 根据处方图控制喷头开启程度, 最终实现精准喷药。尹东富等^[6]在HSV空间利用最大类间方差法对灰度图进行动态阈值分割, 通过设置B、R间标准差差值 $S_b - S_r < 5$ 保留图中杂草, 根据网格中杂草面

积生成喷洒除草剂处方图。根据处方图控制不同喷头开关实现4种喷药量, 比传统喷药方式节省除草剂量60%以上。Mattivi等^[7]通过使用可复制和可扩展的低成本UAS, 结合开放的地理信息系统软件和开放算法, 在传统种植系统中识别和绘制杂草空间分布, 然后通过网格划分田地并计算每个网格单元的杂草覆盖面积百分比获得处方图。Sapkota等^[8]结合商用尺寸喷雾器绘制喷洒玉米田中杂草的处方图并创建网格, 在含有杂草的特定网格上喷洒除草剂, 无杂草的网格不喷洒除草剂, 以此减少除草剂的使用。实验结果表明, 该方法减少了26.2%的喷洒面积。

已有研究显示, 没有明确的标准和通用的方法确定施药剂量, 只能根据经验, 作物密度大时施药剂量大; 作物密度小时施药剂量小。Li等^[9]基于归一化差异植被指数(NDVI)考虑单位农药需求量的变化, 并给出了根据归一化差异植被指数确定不同农药需求、获得不同位置的施药量的方法。为研究作物密度和施药剂量之间的关系, 本文通过引入模糊控制确定施药剂量的大小, 建立作物密度和喷头喷洒半径的模糊控制器——根据作物密度获得喷头喷洒半径, 从而控制施药剂量。通过图像处理技术生成处方图, 分析模糊控制下变量喷洒和定量喷洒的喷洒效果。处方图在农业生产中的作用不容忽视, 因此利用遥感数据绘制作物处方图对农业生产和可持续发展具有重要意义^[10]。

1 低空近景图像的喷洒特点

随着农业无人机技术的发展, 无人机可以在低空进行喷洒作业。根据需求设置一定数量的喷头完成喷洒作业, 常安装四个或六个喷头均匀喷洒, 但田间

作者简介: 程梦洁, 硕士研究生, 研究方向: 图像处理与模式识别。Email: CMJ15169955463@163.com

通讯作者: 胡波, 副教授, 研究方向: 图像处理与模式识别。Email: 443722152@qq.com

作物长势和稀疏程度不同，因此均匀喷洒的喷洒精度不高。为提高无人机喷洒的精确性，农业生产引入了处方图控制无人机喷洒作业。由于无人机在低空作业时可以悬停，因此可以实时控制施药剂量，实现基于处方图的变量喷洒，提高喷洒精度。无人机喷洒作业是按照其飞行方向进行的农药喷洒，故在喷洒处方图形成前要先确定无人机的飞行航线。因为无人机的喷头是固定的，所以飞行的航线和喷头位置是一致的。田间各垄作物长势和稀疏程度不同，为了更多的将农药喷洒在作物上，通过聚类确定无人机喷头的位置，如图1所示，一个喷头的最大喷洒范围可以覆盖该垄作物的宽度，因此喷头数量根据作物垄数确定为四个喷头。

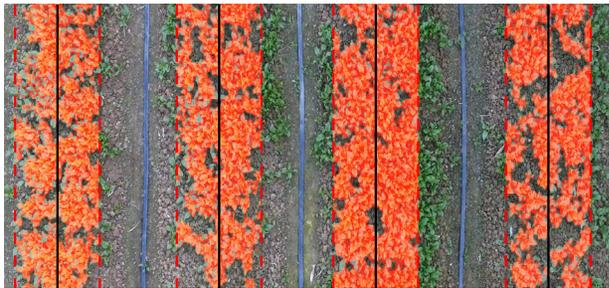


图1 无人机喷头位置图

图中黑色直线为无人机喷头的位置，即无人机飞行的航线，红色虚线为无人机喷头喷洒时的最大喷洒宽度。若无人机根据图中黄色框线位置均匀喷洒，则没有识别作物空缺的能力，将有许多农药喷洒到土壤上，会造成农药浪费和环境污染。因此，可根据作物的长势和稀疏程度，改变喷头的喷洒范围，从而改变施药量，减少农药的浪费和环境污染。

为计算作物密度，首先需要对图像进行栅格化，即将图像分成多个网格，然后计算网格内作物密度，以此表示作物生长情况，并由此确定施药剂量。在栅格化时，若所划分栅格较大降低无人机喷洒精度；若所划分网格较小会增加农药用量，造成浪费。由许真珠和黄莺^[5]、尹东富等^[6]、陈志刚等^[11]等人的研究可知，栅格的大小可以根据作物的长势和设备的喷洒范围进行划分，既可以满足单位面积作物对农药的需求，又可以避免因栅格太大造成漏喷或因栅格太小造成重喷。在本研究中，根据无人机喷头位置和喷洒范围将每垄作物划分为两列 80×230 像素的网格，如图2所示。

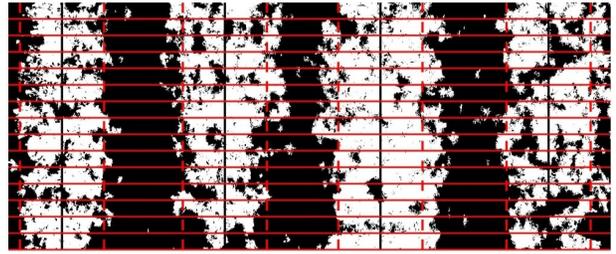


图2 栅格化图

在栅格化图像中，虽然喷头所在位置左右两边的栅格大小是相等的，但是其作物密度是不同的，根据栅格化图像计算作物密度，统计喷头所在位置左右两边栅格内作物像素点个数除以栅格的总像素点个数，作为每个栅格的作物密度，其取值范围为 $[0, 1]$ 。

无人机喷洒时，农药从无人机喷头喷出一般按圆锥形均匀分布，底面圆的直径为最大喷洒范围，即在该范围内的作物会有农药的沉积，超出该范围的作物无农药的沉积。而通过控制喷头的喷洒半径可以控制农药的沉积范围，喷头喷洒半径越大，农药沉积范围越大，施药剂量越大；喷头喷洒半径越小，农药沉积范围越小，施药剂量越小。模糊控制是建立在人工经验基础之上的，它是从行为上模仿人的模糊推理和决策过程的一种智能控制方法，因此可建立喷头喷洒半径的模糊控制器——根据作物密度确定无人机喷头喷洒半径的大小，生成变量喷洒处方图。

2 模糊控制器的建立

根据日常经验，单位面积作物多时，施药剂量多，无人机喷头喷洒半径应较大；单位面积作物少时，施药剂量小，无人机喷头喷洒半径应较小。但是，在无人机实际喷洒作业时，若作物密度变化较小，可以不调节喷头的喷洒半径，以提高作业效率。因此，以作物密度和作物密度变化量作为输入，喷头喷洒半径作为输出，可以建立作物密度与喷头喷洒半径的模糊控制器。为适应不同型号的喷头，本文将喷头喷洒半径进行归一化，取值范围为 $[0, 1]$ ，设计控制喷头喷洒半径的模糊控制器，模糊控制器的原理图如图3所示。

在模糊控制中，输入、输出变量的大小都是以语言形式描述的，因此需要模糊化输入量作物密度、作物密度变化量和输出量喷头喷洒半径。作物密度指当前网格内作物的像素点个数除以该网格总像素点个

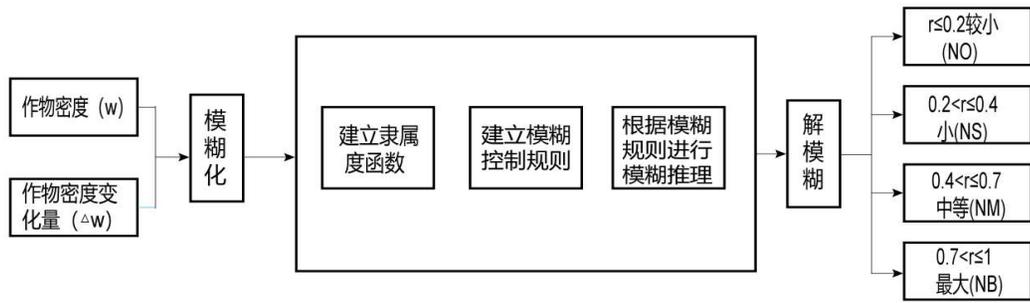


图3 模糊控制器原理图

数，作物密度变化量为当前网格作物像素点个数减前一个网格作物像素点个数除以10000个像素点。

将输入量作物密度 w 分为5个模糊集：极小 (SS)、小 (NS)、中等 (NM)、较大 (NL)、最大 (NB)；将输入量作物密度变化量分为5个模糊集：负大 (NB)、负小 (NS)、零 (ZO)、正小 (PS)、正大 (PB)。将输出量喷头喷洒半径 r 分为4

个模糊集：较小 (NO)、小 (NS)、中等 (NM)、最大 (NB)。为了实现作物密度的模糊化，本文需要建立隶属度函数，确定某个作物密度隶属于作物密度模糊集中某一等级的程度，分别选用如下函数定义作物密度和作物密度变化量的隶属度函数，作物密度的隶属度函数如图4 (a) 所示，作物密度变化量的隶属度函数如图4 (b) 所示。

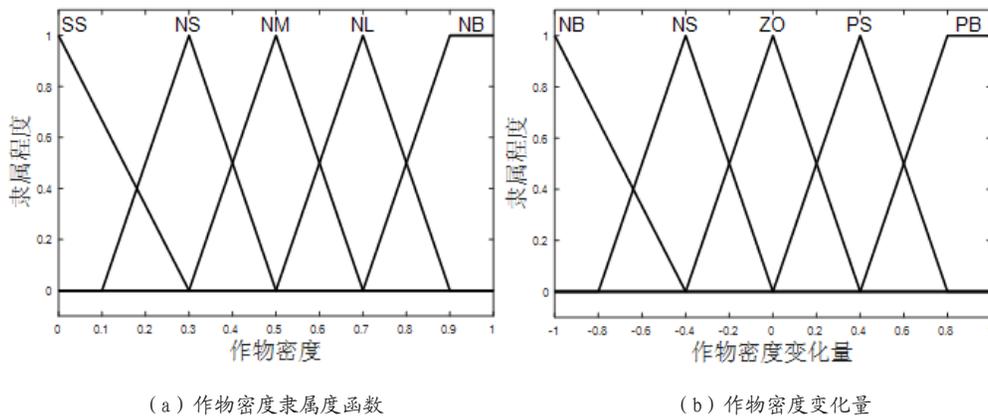


图4 输入隶属度函数

同理，为了实现喷头喷洒半径的模糊化，本文建立隶属度函数，确定某个喷头喷洒半径隶属于喷头喷洒半径模糊集中某一等级的程度，选用如下函数定义喷头喷洒半径的隶属度函数，如图5所示。

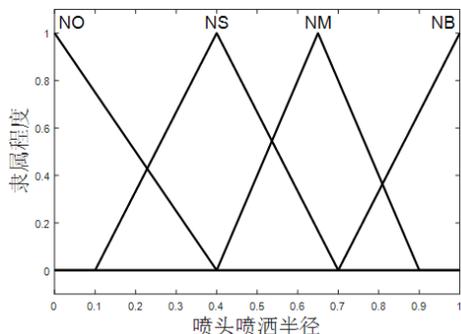


图5 输出隶属度函数

分析作物密度和作物密度的变化量可以发现，当作物密度小并且作物密度变化量小时，喷头的喷洒半径较小；当作物密度小，但是作物密度变化量大时，证明下一格内的作物密度是增大的，喷头喷洒半径应适量增大。根据不同情况下的变化规律，可以得到 5×5 的25种控制规则，模糊控制规则如表1所示。

表1 模糊控制规则表

w \ Δw	Δw				
	NB	NS	ZO	PS	PB
SS	NO	NO	NO	NS	NS
NS	NO	NO	NS	NS	NM
NM	NO	NS	NM	NM	NB
NL	NS	NM	NM	NB	NB
NB	NS	NM	NB	NB	NB

模糊控制器的输出就是由模糊规则表推理所得到的，因此需要进行反模糊化，才能得到精确的推理结果。假设农作物密度 $w=0.89$ ， $\Delta w=-0.16$ 时，根据重心法进行反模糊化，无人机喷头喷洒半径 $r=0.7472$ ，即喷头开启程度为最大喷洒半径的74.72%。

3 实验结果与分析

实验共采集田间作物图像10张。处理所采集的图像后，根据所建立的模糊集控制器生成喷洒处方图。由于每垄作物以喷头为中心被分成左右两列，模糊控制器的输出为喷头左右两边的最佳喷洒半径，为了将更多的农药喷洒在作物上而不是土壤上，本文选择其平均值作为喷头的喷洒半径。由于作物密度变化量是根据当前网格作物像素点个数减前一个网格作物像素点个数除以10000个像素点得到的，因为第一行的作物没有作物密度变化量，所以在实际喷洒时，可根据第二行作物喷洒半径大小进行设置。对作物喷洒

植物生长调节剂，比较定量喷洒和基于处方图变量喷洒的喷洒效果。根据毛罕平等^[12]在《机器视觉识别杂草中除草剂喷洒参数的优化》一文中对除草剂喷洒要求的分析，植物生长调节剂的喷洒效果 W 可表示为：

$$\max W = U_w - C_p \times U_p = \left(\frac{Q_w}{S_w} - C_p \times \frac{Q_p}{S_p} \right) \times 100$$

式中的 U_p 、 U_w 分别表示植物生长调节剂在土壤、作物上的平均沉积剂量； Q_p 、 Q_w 分别表示植物生长调节剂在土壤、作物上的总沉积剂量；为简化计算本文将喷洒最大范围作为该区域植物生长调节剂的沉积量，即 Πr^2 ； S_p 、 S_w 分别表示土壤、作物的面积，可通过图像分割提取感兴趣区域获得； C_p 表示土壤上的药剂沉积对调节剂效果的影响系数，主要考虑植物生长调节剂在土壤的残留对环境的影响，可根据植物生长调节剂的降解难易程度取值，可视为常系数。定量喷洒和基于处方图变量喷洒的植物生长调节剂喷洒情况如图6所示。

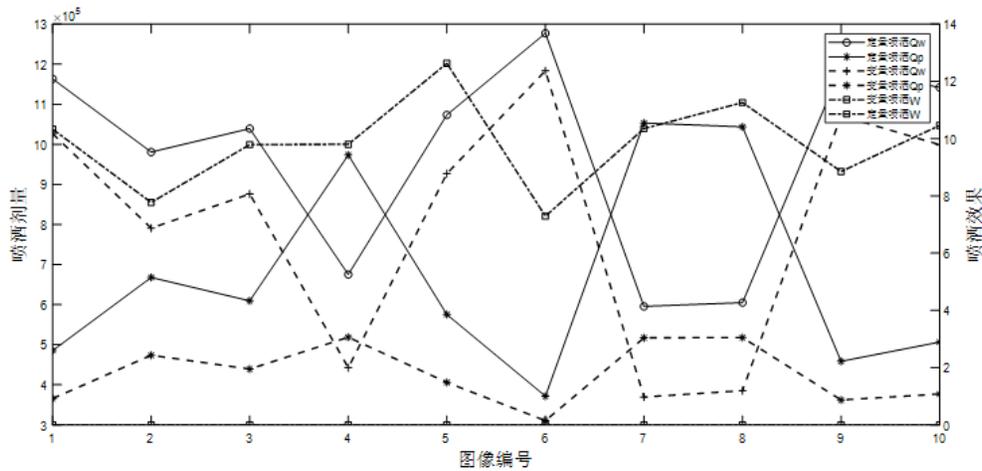


图6 定量-变量喷洒情况图

根据表格中数据计算所得定量喷洒效果 $W=0$ ，是因为 C_p 取值为1，喷洒效果为作物的平均沉积剂量减去土壤的平均沉积剂量，而定量喷洒时，土壤的平均沉积剂量和作物的平均沉积剂量是相等的，因此其喷洒效果 W 为0。由图可以很明显的看出，基于处方图的变量喷洒效果均在10左右，远好于定量喷洒效果。

植物生长调节剂主要是喷洒在作物上促进、抑制或延缓它们的生长，所以喷洒时应尽量多的喷洒在作物上，避免植物生长调节剂喷洒在土壤上造成农药残留对环境产生污染。定量喷洒和基于处方图变量喷

洒的作物沉积剂量占比，结果如图7所示。

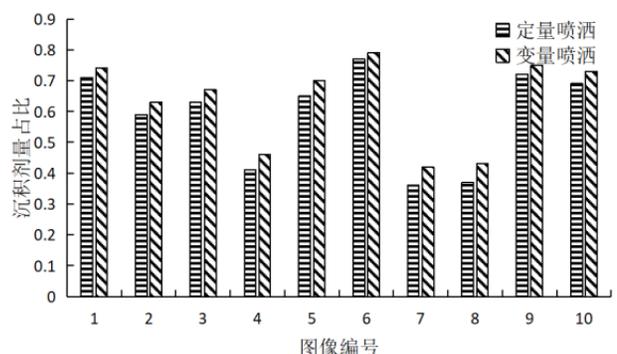


图7 作物沉积剂量占比

由图可知,基于处方图变量喷洒时的作物沉积剂量占比均大于定量喷洒时的作物沉积剂量占比,因此,基于处方图的变量喷洒比定量喷洒可以将更多的植物生长调节剂喷洒到作物上,可以提高农药的利用率,减少环境污染。

4 结论

本文根据作物密度与喷洒半径之间的关系,建立作物密度和喷洒半径的模糊控制器,确定不同密度下的施药量,生成无人机喷洒处方图,比较定量喷洒和基于处方图变量喷洒的喷洒效果,实验结果表明,与定量喷洒相比:(1)由喷洒效果可知,同一片作物,基于处方图变量喷洒的效果远远好于定量喷洒;(2)由作物沉积剂量占比可知,变量喷洒时可以将更多的植物生长调节剂喷洒在作物上,有效减少了植物生长调节剂的使用,提高了植物生长调节剂的利用率。

参考文献

- [1] Hu H, Kaizu Y, Huang J, et al. Research on methods decreasing pesticide waste based on plant protection unmanned aerial vehicles: areview[J].*Front Plant Sci*, 2022, 13: 811256.
- [2] 王昌陵,何雄奎,曾爱军,等.基于仿真果园试验台的植保无人机施药雾滴飘移测试方法与试验[J].*农业工程学报*, 2020, 36(13):56-66.
- [3] Chen CC, WangSS, Wang XC, et al. Improved fluid search optimization-based real-time weed mapping[J].*Information Processing in Agriculture*, 2020, 7(3):403-417.
- [4] 庄稼也可对症下药专家制出处方图控制变量喷药系统[J].*科技传播*, 2010, 2(11):22.
- [5] 许真珠,黄莺.基于无人机技术的水稻精准喷药系统研究[J].*农机化研究*, 2019, 41(2):238-241+247.
- [6] 尹东富,陈树人,裴文超,等.基于处方图的室内变量喷药除草系统设计[J].*农业工程学报*, 2011, 27(4):131-135.
- [7] Mattivi P, Pappalardo S E, Nikolić N, et al. Can commercial low-cost drones and open-source GIS technologies be suitable for semi-automatic weed mapping for smart farming?A case study in NE Italy[J].*Remote Sensing*, 2021, 13(10):1869.
- [8] Sapkota R, Stenger J, Ostlie M, et al. Towards reducing chemical usage for weed control in agriculture using UAS imagery analysis and computer vision techniques[J].*Scientific Reports*, 2023, 13:6548.
- [9] Li Y, WuYQ, XueXY, et al. Efficiency-first spraying mission arrangement optimization with multiple UAVs in heterogeneous farmland with varying pesticide requirements[J].*Information Processing in Agriculture*, 2024, 11(2):237-248.
- [10] TaoJB, LiuWB, Tan WX, et al. Fusing multi-source data to map spatio-temporal dynamics of winter rape on the Jiangnan Plain and Dongting Lake Plain, China[J].*Journal of Integrative Agriculture*, 2019, 18(10): 2393-2407.
- [11] 陈志刚,陈梦溪,魏新华,等.基于北斗定位的农田变量处方施药喷雾系统[J].*排灌机械工程学报*, 2015, 33(11):965-970.
- [12] 毛罕平,胡波,张艳诚,等.机器视觉识别杂草中除草剂喷洒参数的优化[J].*仪器仪表学报*, 2008, 29(4):816-820.