综述文章

印度尼西亚无人驾驶飞行器在喷洒应用和作物监测中的实施与挑战综述

作者：

Muhamad Rausyan Fikri[1,2], Taufiq Candra[3], Kushendarsyah Saptaji[4], Ajeng Nindi Noviarini[5], Dilla Ayu Wardani[3]

1. 自动化技术与机械工程，坦佩雷大学工程与科学学院，坦佩雷，33720，芬兰2. 信息系统，三宝麟大学工程与技术学院，雅加达，12780，印度尼西亚3. 工业工程，三宝麟大学工程与技术学院，雅加达，12780，印度尼西亚4. 机械工程，三宝麟大学工程与技术学院，雅加达，12780，印度尼西亚5. 计算机科学，三宝麟大学工程与技术学院，雅加达，12780，印度尼西亚

摘要：

技术的迅速发展使无人驾驶飞行器（无人机）在当今时代广为人知。预计未来无人机市场将持续增长，相关技术也将不断发展。无人机已应用于畜牧业、林业和农业等多个领域。在农业应用中，无人机能够显著提高农场生产力，并减轻农民的工作负担。本文探讨无人机在农业中的应用，尤其是喷洒和作物监测。本文研究了在农业部门实施无人机的紧迫性，并简要回顾无人机的发展历程，以展现其随时间推移的发展变化。本文还讨论了无人机分类，以区分不同类型的无人机。无人机在喷洒和作物监测中的应用，依据的是众多科学团体和研究人员此前开展的研究；他们密切合作，致力于为农业相关问题提出解决方案。此外，本文还指出了无人机应用的局限性，并介绍了在印度尼西亚实施农业无人机面临的挑战。

关键词：

无人飞行器、农业无人机、喷洒、作物监测。

1. 引言

据联合国（UN）预测，到2050年，世界人口将达到97亿（UN, 2015）。未来，人口大幅增长可能使粮食需求翻一番（Hunter et al., 2017）。因此，未来人口持续增长可能导致粮食短缺。联合国粮食及农业组织（FAO）也提出了类似预测，指出到2050年，农业生产必须提高70%，才能满足人们对高质量粮食日益增长的需求（Mundial, 2021）。饥饿人口的数量反映了粮食短缺问题的严重程度。据报告，2018年有超过8.2亿人营养不足（WHO, 2019）。值得注意的是，前述数据表明，饥饿人口呈上升趋势：2015年，约有6.9亿人遭受饥饿。这些数据确实与联合国（UN）于2015年通过的第二项可持续发展目标（SDGs）相矛盾。该目标旨在消除饥饿，并确保所有人都能获得粮食（UN, 2015）。另一方面，人口老龄化和劳动者人数减少导致农业部门劳动力短缺，使情况进一步恶化。农业领域劳动力不足会扩大每名劳动者负责的耕地面积，并增加其工作负担（Seo & Umeda, 2021）。

需要采取替代性和创新性解决方案，以应对这些问题并提高粮食生产。一种提高粮食生产的方式是推广物联网、机器人技术和人工智能（AI）。通过将劳动力转向技术应用，预计可以解决劳动力短缺问题并提升农民的技能。这一转型离不开不断推动工业创新的革命性产业。近年来出现的一些工业创新，例如传感器技术、大数据和人工智能（AI），已被欧盟委员会（EC）视为“工业5.0”时代的开端（EC，2021年）。人们认为，以先进数字化为特征的新兴技术将在提高生产灵活性、增强价值链韧性方面发挥重要作用，从而使技术能够减轻农民的工作负担，并提高工作速度和精度。

在前文提到的技术中，无人驾驶飞行器（无人机）是提高粮食生产的一种可行方式。无人机成本较低，已应用于农业的许多领域，包括喷洒、杂草识别和作物监测（Mogili & Deepak，2018 年）。无人机能够及时、可靠地提供有关生产、产量和作物管理的信息，这有助于保障农民和销售单位等利益相关者的食品安全与粮食安全（Martos 等，2021年）。农业中的无人机技术还能够从生长季开始直至收获结束，对作物状况进行全面监测（Silver 等，2017年）。

通过在农业部门实施无人机，可以实现一些领先技术。因此，本文重点综述无人机在农业领域的喷洒和作物监测应用。本文对无人机用于喷洒和作物监测的一些研究成果进行了深入讨论，以突出无人机的应用及农业部门的特点。本文还综述了无人机实施过程中存在的一些局限性，以揭示无人机在农业领域实施方面的不足。本文其余部分的组织结构如下：第2节介绍无人机的历史和无人机分类；第3节介绍无人机的应用，重点关注喷洒和作物监测；第4节阐述农业部门采用无人机技术的局限性；第5节讨论在印度尼西亚实施无人机所面临的挑战；最后一节给出结论。

2. 印度尼西亚的农业及其挑战

2.1. 当前状况

印度尼西亚的农业计划一直是国家层面的重要议程，例如国家议程21、国家发展计划以及农业和林业振兴战略，这些计划推动印度尼西亚采用可持续农业。中央规划局（BAPPENAS）、农业部和环境部已实施了这些理念。其中大多数计划都包含适用于有效环境管理印度尼西亚农产品出口的组成部分。

采用这些策略的动机随时间发生了变化，似乎是对多种不同趋势作出的回应。首先，印度尼西亚的国家计划优先考虑社会经济目标，而非生态可持续目标。不过，环境问题日益受到重视，近期的改革以及

战略文件中生态问题出现频率不断上升，都印证了这一点。其次，随着手段组合发生变化，战略文件也显示出方向上的转变：逐渐减少对法律法规的关注，转而更加重视市场创建和自愿方法。不同技能、保护目标与地方创收需求之间的矛盾，导致全国各地不同地区呈现出不同的成效模式。随着信息增多以及全球最佳实践的推广，农业环境规则的现代化取得了重大进展。环境危害对地方或全球构成的威胁、特定产品造成的环境退化程度，以及次国家级政府在法律、执法、预算和监管能力方面的可用资源，都会影响政策工具的选择。

出于实际考虑，印度尼西亚决策者采用了一系列机制来尽量减少农业的环境足迹，包括直接监管、市场创建或市场调整激励措施、自愿且有益的解决方案，以及市场调整激励措施。这些政策通过立法和监管机制实施，可能主要针对种植园州和大型农场。值得注意的是，强制性ISPO标准的存在（见本地监管手段一节）：这些标准最近才被采纳，此前的自愿标准也因此转为强制标准。影响决策者选择实施特定手段的其他因素，还包括该手段相对于其成本的潜在效力，以及决策者在可能遭遇政治反对的情况下执行该手段的能力。在这方面，实施监管和立法工具似乎是监测重大投资的最有效方法，例如种植限制和环境影响评估要求。根据印度尼西亚研究的发现，外国压力促使种植限制在全国范围内推广。此外，如果监管手段的行政和监测成本已纳入现有行政体系，其实施可能最为有效；例如，进口限制所涉及的间接产品收费已纳入现有行政体系。

2.2. 印度尼西亚农业面临的挑战

其中一个因素是，由于土地改革，印度尼西亚许多大省的农业用地普遍供应有限。随着人口增长，住房需求也随之增加。

因此，开发商占用大量农业用地来建设房地产。人口增长也推高了贸易和旅游业的需求，进而增加了对土地的需求。在这种情况下，农民出售农场并不应受到指责。由于缺乏知识和技术、农业成本高昂以及生活必需品价格上涨，农民不得不出售土地。印度尼西亚受教育程度较低的农民几乎别无选择，只能到农业产业以外谋生；因此，没有土地的人只能成为佃农。食品价格上涨本应是农民梦寐以求的好事，因为他们的收入几乎肯定会增加。遗憾的是，由于印度尼西亚的大多数农民都是佃农，这反而损害了他们的福祉。食品价格上涨对印度尼西亚农民的福祉影响甚微。他们的收入依旧微薄，还必须继续按市场价格购买基本生活必需品。拥有土地的人则从价格上涨中获益。此外，公众普遍认为农民的工作做得不好。年轻一代更愿意从事非农业工作，例如成为农民子女的家长。因此，农民再生产受到阻碍，许多人选择出售土地，将其作为创业资本，或转而在非农业部门工作。

随着世界人口以惊人的速度增长，农业必须克服重重困难，不断扩大规模，以满足日益增长的粮食需求。农业部门最容易受到影响，因为在消除环境相关挑战、提高当前生产率的过程中，整合新兴现代创新技术会对其产生重大影响。那么，我们究竟该如何做到这一点？作为“绿色革命”的第三次浪潮，借助无人机（UAV）等技术的精准农业理念，如今因其巨大的优势而在广阔的农业领域日益普及。借助精准数据，农民和管理者能够提高运营效率、降低成本、减少浪费，并改善作物质量。总的来说，技术一直是推动农业发展以及为该行业带来其他新发现的关键因素。

3. 无人机（UAV）

3.1 无人机发展史

无人机（UAV）是一种机上没有飞行员的航空器；换言之，它指的是自动驾驶航空器（Ahmad 等人，2021）。无人驾驶航空器可以通过两种方式运行：由人类操作员操控，或在……的控制下自主运行

机载计算机（Pablo等人，2020）。根据美国国防部（DOD）的定义，无人机可以指单架飞行器（配备监视传感器），也可以指由三至六架飞行器、地面控制站和支援设备组成的无人机系统（UAS）（Gertler，2012）。此外，无人机通常会在执行任务时结合遥感技术。这种遥感通常称为无人机遥感，它结合了无人机与遥感技术，能够快速获取有关土地、环境和资源的信息，以供后续数据处理（Shi & Liu，2011）。在美国及其他发达国家，无人机遥感已应用于林业、环境保护、土地和军事等多个领域（Xiang & Tian，2011）。采用无人机遥感是因为它可以快速部署并反复使用。此外，与有人驾驶飞机相比，无人机成本更低、更安全，飞行高度灵活，并且能够获取极高分辨率的影像（Yang等人，2011）。

无人驾驶飞行器也称为遥控航空器（RPA）。尽管 UAV 和 RPA 这两个术语可以互换使用，但航空组织通常使用 UAV 一词（Santos et al., 2019），而 RPA 一词则广泛用于欧洲（Gallardo- Saavedra et al., 2018）。早在 1930年，无人机也被称为“Queen Bees”（Vroegindeweij et al., 2014），最初用于军事目的（Muchiri & Kimathi, 2016）。1986年，专用于农业领域的无人机问世，最初用于监测蒙大拿州的森林火灾；随后，1994年，人们利用无人机获取了更高分辨率的图像（Muchiri & Kimathi, 2016）。此后，雅马哈最终开发出功能更复杂的无人机型号“雅马哈 RMAX”，主要用于害虫防治和作物监测（Mogili & Deepak, 2018）。该无人机型号用于亚洲稻田的农药喷洒。与地面喷雾器相比，该无人机型号的农药沉积效果相当，但明确用于高价值作物种植环境（Giles & Billing, 2015）。

3.2 无人机分类

一般而言，无人机平台有三种类型：固定翼、旋翼无人机和无翼无人机（图 1）。固定翼无人机类似于飞机，起飞和着陆需要跑道或 Modelsurface（草地或道路）（Pederi & Cheporniuk，2015）。这类无人机利用推力和空气动力升力飞行。它的尺寸比旋翼

无人机型号更大，主要用于在较长时间内进行大范围航空测绘、喷洒和摄影（Li & Yang，2012）。这类无人机通常无法悬停，但能够以较高速度持续飞行较长时间（Ahmad 等人，2021）。固定翼飞机具备滑翔能力，因此续航时间更长，能够飞行更远距离（最远可达 15–20 km）（Paneque-Gálvez 等人，2014）。

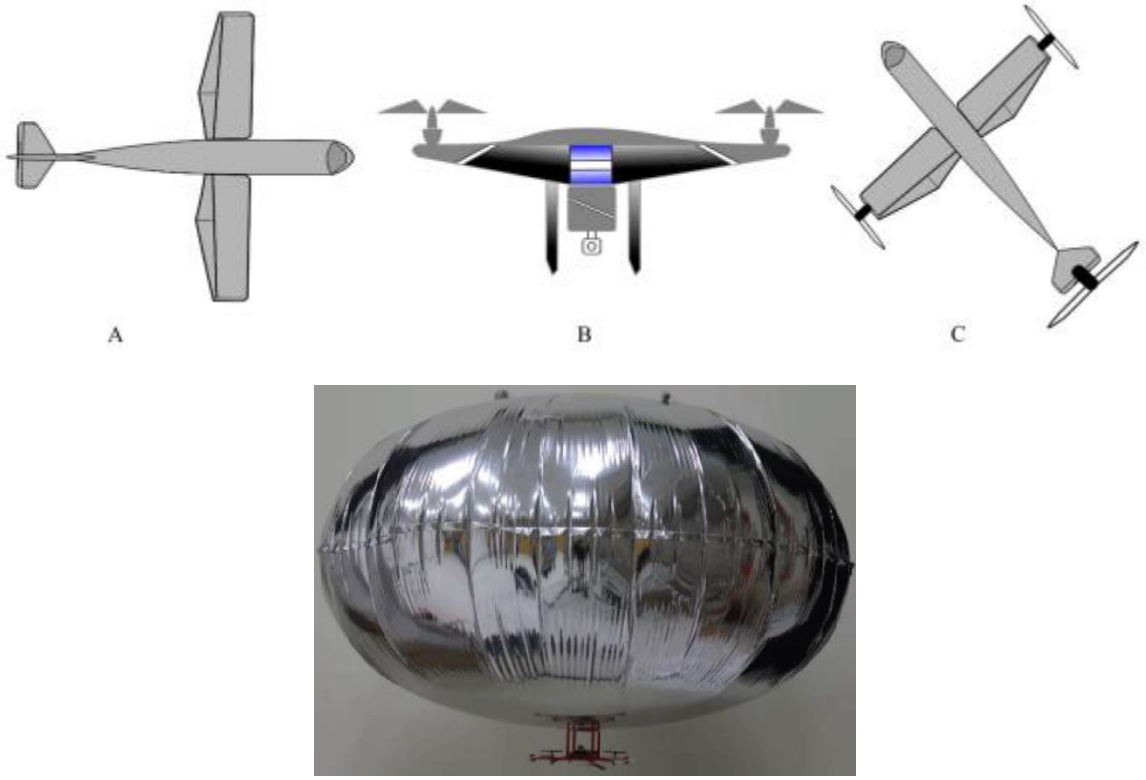

图1. 基本无人机示意图：(A) 固定翼无人机 (B) 旋翼无人机 (C) 组合概念（来源：Ahmad 等人，2021年），(D) 飞艇（来源：Tao et al., 2018年）

另一方面，旋翼无人机主要分为直升机型和多旋翼型。直升机型旋翼无人机的独特之处在于机身顶部配有一个大型螺旋桨。它广泛用于喷洒和航空摄影（见图2）（Swain等人，2010年）。这类无人机能够悬停、垂直起飞和降落，机动灵活，但低速飞行的持续时间较短（Ahmad等人，2021）。相比之下，多旋翼机型根据旋翼的数量命名（Kim等人，2019）。四旋翼无人机、六旋翼无人机和八旋翼无人机是广为人知的多旋翼无人机（图3）。这类无人机依靠相应数量的旋翼产生升力并推进（Mogili & Deepak, 2018）。



图2. 单旋翼/直升机型无人机（来源：Huang 等，2009年）

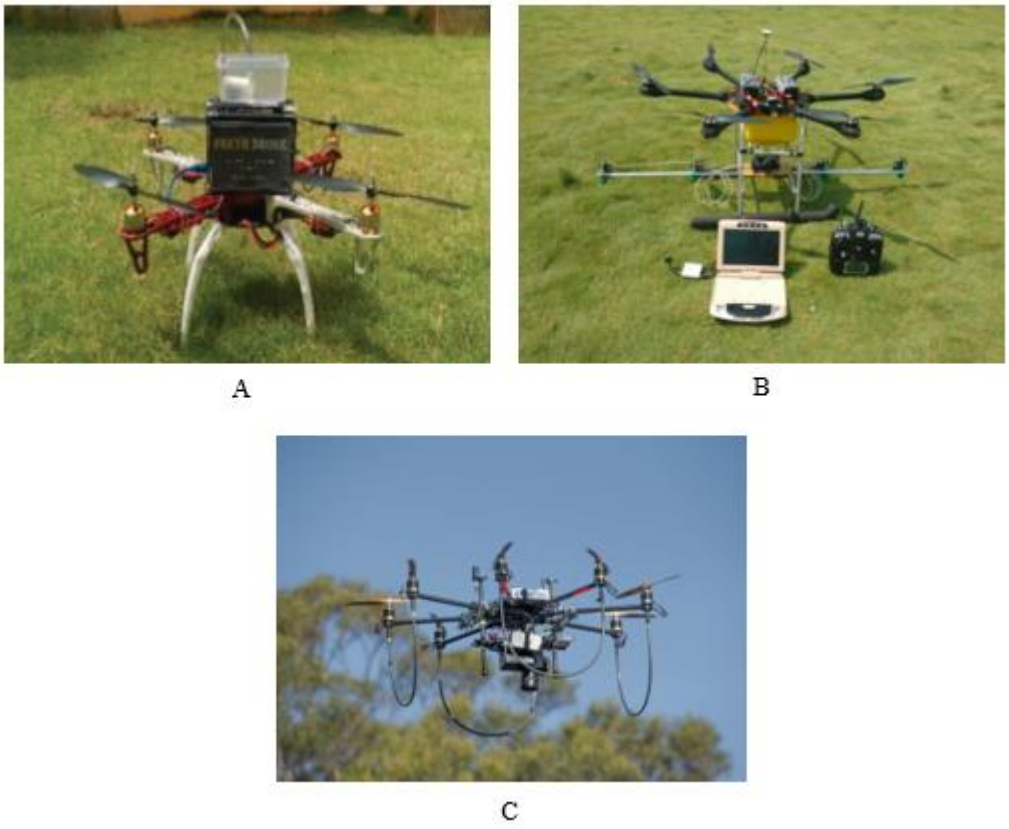

图3. 多旋翼无人机，（A）四旋翼无人机（来源：Spoorthi 等人，2017年）（B）六旋翼无人机（来源：Yallappa 等人，2017年）（C）八旋翼无人机（来源：Wallace 等人，2016年）

例如，四旋翼无人机的旋翼运动负责产生升力。在四旋翼无人机中，四个旋翼中的两个沿一个方向转动，另两个则沿相反方向转动；其中两个顺时针旋转，另外两个逆时针旋转。四旋翼无人机绕轴的运动包括偏航（顺时针和逆时针）、俯仰（向后和向前）以及横滚角（向右和向左）。四旋翼无人机使用控制系统来保持平衡

各旋翼的推力用于支持无人机的升力以及偏航、俯仰和横滚角（Mogili & Deepak, 2018）。事实证明，该控制系统能够实现无人机的稳定飞行（Patel et al., 2013）。此外，四旋翼飞行器构型包括十字形构型（+）和交叉形构型（X）两种类型，如图4所示。由于稳定性更高，交叉形构型在这两种型号中更为常见（Kedari et al., 2016）。

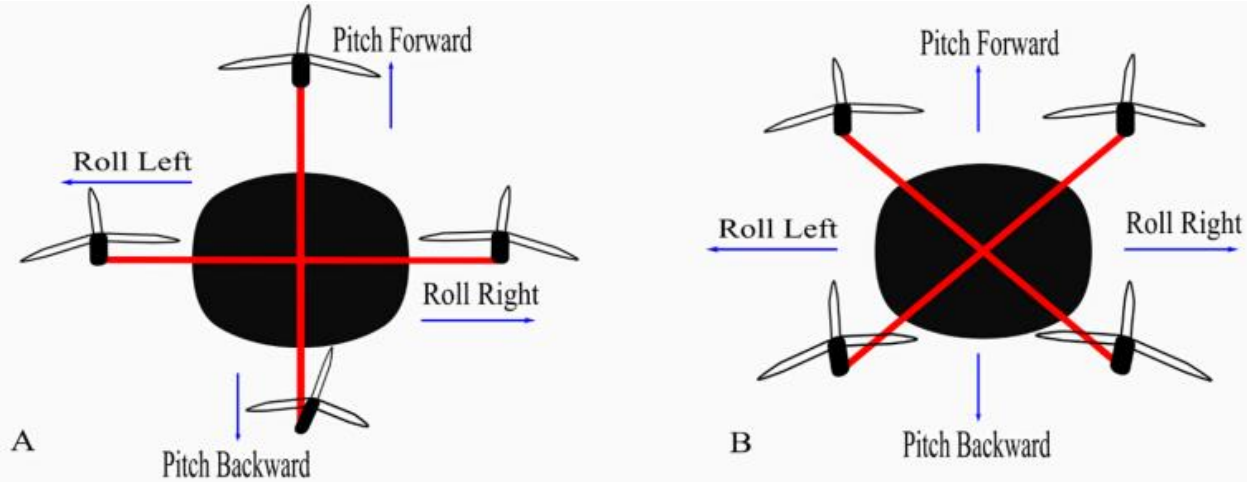

图4. 四旋翼飞行器构型型号（A）十字形构型（B）交叉形构型（来源：Mogili & Deepak, 2018）

此外，这些多旋翼无人机通过配备适当的传感器（如视觉、红外、多光谱和高光谱相机）扩展了其功能。无人机功能的扩展带来了重大影响，尤其是增强了无人机的能力。这些传感器用于获取植被、反射率指数和叶面积等数据，从而提供有关作物当前状态的信息。借助这些信息，农民可以根据作物状况采取相应的补救措施或制定相关政策（杂草防治、施肥、灌溉）（Gonzalez-De-Santos, 2016）。

此外，为了满足飞行机器人的长续航需求，人们开发了无翼无人机，这类无人机轻于空气（LTA），例如飞艇。飞艇的尺寸明显大于固定翼和旋翼无人机，其外部包覆着充氦气囊，因此即使发生碰撞，机器人在室内飞行也不会对人类及周围环境构成威胁（Tao et al., 2018）。飞艇依靠空气浮力提供升力，续航时间可超过 2 小时（Cho et al., 2017）。飞艇是轻于空气的无人机的一种（Krishna, 2021a; Thusoo, 2021; Tsouros et al., 2019）。它采用坚韧织物制成气球状主体，并充入氦气（Prisacariu et al., 2019）。飞艇也被称为飞船，最早由

亨利·吉法尔于 1852 年设计（Krishna, 2021a）。这种类型的无人机续航能力强，飞行时间比其他类型的无人机更长，航程约为 1 至 3 周（Krishna, 2021a）。凭借这些特性，飞艇在包括军事和农业在内的诸多生活领域都具有优势。它曾用于货物运输，并在导弹基地与军营之间执行警戒任务（Krishna, 2021a）。它还用于远距离监测，尤其是城市交通和建筑物监测。在精准农业中，它可监测作物生产、识别植物病害和侵蚀，并检测洪水或干旱状况（Krishna, 2021a）。与其他无人机不同，飞艇也被视为一种安全技术，因为它能留在空中，即使失去动力也不会发生碰撞（Krishna, 2021a; Tsouros et al., 2019）。此外，利兹大学的研究表明，飞艇是用于地形测绘成本最低的无人机（Krishna, 2021a）。因此，它能够提供有关作物、地表矿物、植被和水质的详细信息及进一步说明。

4. 飞艇在农业中的应用

与其他无人机相比，飞艇在载荷能力、安全性、质量和环境安全方面具有关键优势，因此适用于日常生活。研究人员指出，飞艇载重量可达400吨，飞行速度为110–160公里/小时（Krishna, 2021a）。除了能够长时间飞行外，飞艇还能在各种地面上着陆。在环境影响方面，飞艇可减少二氧化碳排放（Krishna, 2021a）。

如今，飞艇具有多种功能，可用于特定用途。飞艇分为五种类型：系留飞艇、非系留飞艇、遥控飞艇、巨型飞艇和混合动力飞艇（Krishna, 2021a）。系留飞艇（系留气球）借助坚固的系绳实现自由飞行和稳定的锚定飞行（Mahmood & Ismail, 2020）。系留飞艇能够准确获取立体图像，覆盖范围可从35平方米到20,000立方米（Krishna, 2021a）。与此同时，非系留飞艇通常用于货物运输、旅行和空中监视。第三，遥控飞艇采用机器人技术，按照预设的飞行计划飞行。遥控飞艇有两种类型：小型和大型。小型飞艇通常用于广告，而巨型飞艇（巨型飞艇）则主要用于军事目的。最后，混合动力飞艇是一种新型改良飞艇，能够适应极端条件，可用于货物运输和民用运输。

与其他常见的无人机类型——多旋翼无人机和固定翼无人机相比，精准农业中使用的飞艇数量微不足道（Krishna，2021b；Tsouros 等人，2019）。然而，考虑到飞艇的优势特征和功能，可以开始将飞艇视为改进精准农业的优先选择。

Mogili 和 Rao Deepak（2021）指出，将飞艇与四旋翼无人机航空自动喷药机（AAPS）结合，按照 GPS 高度在较低飞行高度进行农药喷洒至关重要。这项技术通过安卓应用程序进行控制，以实现有效的成本节约（Mogili，Rao Deepak，2021）。此外，其他研究人员将飞艇与电荷耦合器件结合，用于识别大豆和稻田中的叶面积指数和生物量（Chilonga & Kiswisch，2016）。研究结果表明，这项技术稳定，且能提供高分辨率图像（Chilonga & Kiswisch，2016）。Ponti 等人（2016）还指出，飞艇可通过组合使用1/2.3英寸CCD传感器、6.3至18.99的镜头焦距以及1000万像素数码相机，实际应用于监测豆类作物数据集。该研究在巴西发现了29,556个正样本和11,404个负样本数据集（Ponti et al., 2016）。

飞艇可广泛用于农业监测（Mahmood & Ismail, 2020）。例如，Bajoria等人开展的研究提出了一种系留浮空器系统，可用于减轻脊椎哺乳动物和鸟类造成的危害；在印度，这类危害导致的作物损失占18%–43%。研究证明，所提出的设计可搭载约50 kg的有效载荷，并能承受25 m/s的环境风速（Bajoria et al., 2017）。其他研究表明，系留浮空器结合光电、声学和激光传感器，可以驱赶鸟类及其他害虫（Krishna, 2021a）。为减少害虫侵扰，其他研究人员还设计了鹰形风筝和Helikite浮空器混合体，用于驱赶鸽子、海鸥、鹦鹉、秃鼻乌鸦、乌鸫等鸟类（Perigrine有限公司，2018年）。

此外，系留飞艇（浮空器）可以提供自然灾害区域周边的航空图像。这些图像有助于识别因洪水、大面积土壤侵蚀、干旱以及害虫侵袭而受损的作物田（Krishna, 2021a）。它还可用于维持田间质量，因为浮空器能够在上空进行全天候监控。因此，农民无需直接前往农场，便可借助浮空器控制和监测田间情况。除上述原因外，浮空器还可以降低采集作物数据的高昂成本。农民可以利用浮空器获取作物数据，并将其数字数据传输至计算机程序中（Krishna, 2021a）。此外，将浮空器与传感器结合，可以帮助农民持续获取作物养分状况数据。因此，这有助于农民评估施用于作物的养分数量（Krishna, 2021a）。

5. 农业无人机

近年来，在农业中应用更先进的技术受到了越来越多的关注。卫星、无人机、地理信息系统（GIS）、全球定位系统（GPS）以及许多其他技术应用已经逐步进入农业领域。流程现代化和工业革命带来了技术应用方面的诸多创新，也为精准农业打开了大门（Ahmad等人，2021）。精准农业被定义为在农业生产系统中利用技术，以确定、分析和管理农业因素，从而提高作物生产力、确保环境可持续性并改善企业盈利能力（Unal & Topakci, 2013）。由于其在耕地持续减少、全球人口增长以及因水和化学品使用浪费而导致农业成本上升等压力条件下具备有效功能，这种精准农业似乎能够提高粮食生产（Abdullahi等人，2015）。

无人机已成为精准农业的重要组成部分，并日益普及，以确保农业可持续性（Rani等人，2019年）。无人机的使用在减少数据采集时间和处理成本方面发挥着关键作用，这被认为是其广受欢迎的主要原因（Berni 等人，2009年）。无人机的快速发展使其功能扩展至航空摄影、视频拍摄和天气预报，并在空间数据采集的支持下帮助利益相关者制定政策和决策，从而吸引了众多参与方使用无人机（Sylvester，2018年）。

此外，预计到2020年年底将达到2000亿美元的无人机市场，也成功体现了无人机的普及程度（Puri 等人，2017年）。对无人机总市场规模的巨大估值表明，无人机的市场价值在三年内翻了一番。普华永道无人机动力解决方案团队量化得出，2017年无人机的总市场价值约为1273亿美元（Silver 等人，2017年）。尽管对2020年无人机市场价值的估算和2017年无人机总市场价值的统计并非专门针对农业部门，但这一数字足以展现无人机市场的发展情况。

此外，无人机价格实惠，也是如今影响其普及的另一个因素。低成本促使许多小型企业转而使用操作系统简单易懂的无人机，为农业部门的部分活动提供服务，包括面积测量和作物监测（Hatfield & Prueger，2010年）。

6. 无人驾驶飞行器在精准农业中的应用

目前，无人机在精准农业中有许多应用，适用于作物种植的多个领域。本节介绍农业无人机的两种应用，即喷洒和作物监测。总结见表 1。

6.1 喷洒

此前在将无人机用于喷洒之前，农民使用喷洒背袋在整个农场喷洒农药（Spoorthi 等人，2017年）。人工喷洒对工人来说非常危险，因为每公顷农业用地的农药用量与工人患病风险相关。农民背负的沉重背袋也可能使他们劳累。幸运的是，使用无人机可以减少农药用量、提高效率并改善工人的福祉（Luck 等人，2010年；Pyo，2006年）。

人工喷洒也被认为不适合用于农田，因为农药可能无法均匀覆盖每个区域。某些农业用地过量使用化学品或农药，会导致土壤肥力流失、土壤退化，并进一步造成水生生态系统退化。此外，作物以及水和土壤等自然资源吸收的化学品或农药可能带来污染风险，并对环境造成严重影响。因此，需要利用无人机在目标区域开展精准喷洒，以尽量减少此类危害（Daponte 等人，2019年）。

此外，为了推动可持续农业的发展，在农业部门使用无人机也能带来其他操作方面的益处。与其他方法相比，实施无人机应用可以让作业过程更快、成本更低（Rani 等人，2019年）。文献中也广泛报道了无人机的高效应用。使用3WWDZ-10A、XAG喷洒农药，成功有效地控制了草地贪夜蛾——一种入侵性甘蔗害虫（Song 等人，2020年）。此外，研究发现，使用无人机（DJI Phantom 3）也能有效地在指定区域喷洒农药；该区域采用电子诱捕器（E-traps），可对昆虫进行计数并将数据传输至服务器（Psirofonia 等人，2017年）。研究还发现，为无人机配备精准控制算法，可能提高对作物的控制精度（Faiçal 等人，2016年）。总之，事实证明，无人机应用具有多项优势，能够减轻农民的工作负担，并在农业领域提供高效、低成本的服务。

尽管实施无人机应用有诸多优势，但在农作物区域重叠处及外围边缘使用无人机仍存在一些问题。这些问题源于部分农田在喷洒过程中未能得到充分覆盖，导致特定区域的作物质量下降。为解决这一问题，人们在无人机操作中引入了群体控制回路算法（Yao 等人，2016年）。群体控制被视为一项实用技术，因为它可以由一名操作员或一个程序控制多架无人机。在群体控制方法中，操作员可以根据应用需求选择合适的队形，使无人机群按照所需队形进行集中式、分散式或分布式编排（Kim等人，2019年）。此外，作物喷洒农药的过程会根据部署在田间的无线传感器网络（WSNs）所提供的反馈进行组织（Costa 等人，2012年）。控制回路负责各架无人机之间的通信，并根据风速变化及彼此交换的消息数量调整无人机航线（Faiçal 等人，2014年）。在这一通信过程中，控制回路可能会出现短暂延迟，因为无人机需要时间分析来自无线传感器网络的数据，以规划后续航线（Kale 等人，2015年）。研究人员开发了一种无人机自动导航喷洒系统，用于引导无人机飞往特定区域（Xue 等人，2016年）。

群体控制的另一种应用方式是采用任务分配技术。目前，这项技术用于农业用地测绘（Barrientos 等人，2011年）。要使用群体技术，需为每架无人机分配一条航线。通过将每个区域划分给多架无人机来规划航线。利用安装在无人机上的摄像传感器拍摄单张照片，即可获得该区域的地图（Ju & Son，2018年）。这种技术需要使用K均值算法，以降低复杂性并防止无人机之间发生碰撞。这种群体技术最重要的特点是结合多种算法，有助于保持无人机之间的稳定距离。稳定的间距使线性控制和非线性控制能够抵御强烈的外部影响（Kim等人，2019年）。农业中群体技术和任务分配的实施如图5所示。这种应用很可能提高农业作业的精度，减少操作员的控制工作量和作业时间，但也会造成电池电量和有效载荷不足。

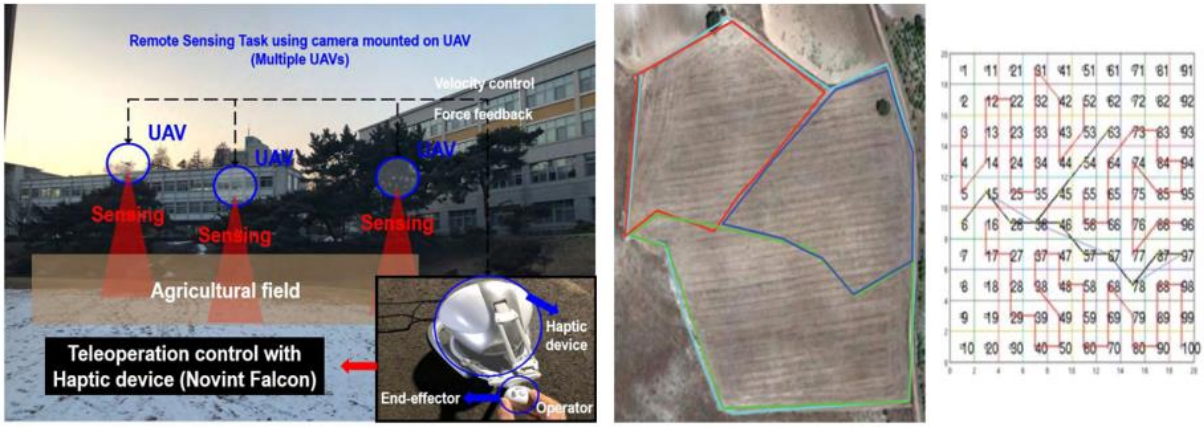

图 5。（A）群体控制（来源：Ju & Son，2018年）（B）任务分配（来源：Barrientos 等人，2017年）

使用无人机进行喷洒时，喷洒系统安装在无人机下部，农药箱下方设有喷嘴，以便将农药向下喷洒至田间。选择合适的喷嘴是农药施用的重要环节，因为它会显著影响单位面积的喷雾量、目标表面的覆盖情况、潜在飘移量以及施用均匀度（Ru 等人，2014年）。此外，喷洒系统通常包含两个模块：控制器和喷洒系统。喷洒系统装载喷洒物质，即农药或肥料。同时，控制器用于触发喷雾器的喷嘴。在农药施用中使用PWM 控制器可以提高控制器的效率（Zhu 等人，2010年；Huang 等，2009年）。

喷洒系统的另一个重要组成部分是压力泵，它用于对储罐中的农药加压，使其流经喷嘴（Tang等人，2018年）。压力泵与电机驱动集成电路密切配合，共同完成加压喷洒农药的任务（Mogili & Deepak, 2018）。完整的喷洒系统见图 6。无人机与喷洒系统的集成，有望为害虫管理和媒介控制提供一个潜在平台，从而在大面积农田中实现精准定点施用。为此，需要使用重载无人机覆盖大片区域（Sarghini & De Vivo, 2017）。

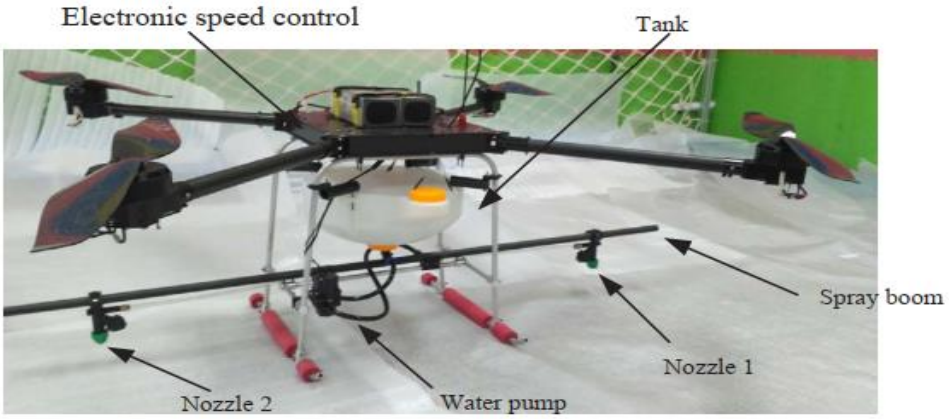

图 6. 喷洒系统结构图（来源：Tang等人，2018年）

6.2 作物监测

作物监测是指通过分析现有作物数据来预测产量或作物质量（Kim等人，2019年）。这对于优化作物生产至关重要，因为它能够评估作物健康状况，并识别细菌或真菌感染。此外，可见光和近红外（NIR）光进行作物扫描所产生的数据，能够反映绿光和近红外光的不同含量；这些数据对于生成多光谱图像至关重要，可用于追踪作物变化并评估其健康状况（Costa等人，2012年）。根据这些信息，农民可以针对已识别的问题更准确地规划并采取补救措施。这有助于快速应对细菌或真菌感染及虫害，并增强作物应对未来问题的耐受力。

无人机用于作物监测也备受关注，因为它们能够监测大面积农场。借助无人机，可以对大面积农田进行全面监测，从而减少人工监测大片农田所需的大量时间和劳动力（Kim等人，2019年）。Aasen 等人（2015年）指出，无人机的应用能够降低作物监测成本。这得益于轻型传感器的使用以及低空飞行无人机的实施（见图7）。



图7. 无人机平台（来源：Aasen 等人，2015年）

配备相机的无人机还可以利用不同指数观测作物（Simelli 和 Tsagaris，2015年）。Turner 等人（2011年）使用安装在无人机上的多光谱相机，分析从葡萄园获取的葡萄植被指数。这些植被指数数据被认为十分重要，有助于突出能够提高生产力、弥补农业活动不足的关键指标。此外，无人机在作物监测中的应用还体现在其单次飞行即可覆盖数公顷田地的能力上。为此，多光谱相机和热成像相机被安装在无人机底部，用于记录植被冠层的反射情况（Bendig 等人，2012年；Colomina 和 Molina，2014年）。这些相机每秒可拍摄一张图像，并将其存储在存储器中。图像涵盖可见光的五个波段，分别对应五种不同波长：（i）蓝光波长440–510 nm；（ii）绿光波长520–590 nm；（iii）红光波长630–685 nm；（iv）红边波长690–730 nm；（v）近红外波长760–850 nm。随后，这些图像通过遥测发送至地面站。通信过程采用MAVLINK 协议。多光谱相机采集的数据采用地理指标归一化植被指数（NDVI）进行分析（Reinecke 和 Prinsloo，2017年；Bhandari 等人，2012年）。

此外，无人机已应用于作物监测，执行多项任务，包括监测作物生长、叶绿素和物候测量，以及统计植株数量（Pino，2019年）。这些任务通过 SenseFly 的 e Bee Ag 完成，该设备配备近红外和归一化差异植被指数传感器。这些传感器能够减少人为误差，从而取代传统的农田巡查（Natu 和 Kulkarni，2016年）。此外，无人机还用于监测丘陵地区的作物，而这些地区被认为难以通过传统巡查进行监测（Rani 等人，2019年）。

表1. 农业无人机的应用

Task	UAV 型号	指数	Crop	飞行高度 (m)	传感器		任务周期	参考文献
					Type	型号		
喷洒	固定翼 UAV	归一化差异植被指数（归一化差异植被指数）	玉米青贮饲料	150	-	Canon s110	全年 全年	（Castaldi 等等，2017年）
	直升机	喷洒作业率	葡萄园	3-4	数码相机	-	May	（Giles & Billing, 2015年）
		航线精度、喷洒均匀性	小麦	5, 7, 9	图像发射器	-	夏季	（Xue 等人, 2016年）
		液滴大小、流量	田间	6	专有无线电接收器	-	全年 全年	（Huang 等，2009年）
		叶面积指数（LAI），归一化差异植被指数（NDVI）	玉米青贮饲料	35	多光谱相机	Agrosenso	全年 全年	(Castaldi 等, 2017年)
		-	田间	20	无线传感器网络	-	-	（Faiçal 等人, 2017年）
	四旋翼无人机	一个传感器之间的通信时间传感器	大豆、水稻、玉米 葡萄, 甘蔗	5、10、20	射频模块	XBee-PRO 第 2 系列	夏季	(Faiçal 等人, 2014年)
		液滴覆盖率、密度, 液滴大小	鸡尾酒, 葡萄柚, 柑橘	3.5、4、4.5	数字植物冠层成像仪	Camas CI-110	春季-夏季	(Pan 等人, 2016年)
		观测沉积速率、田间作业速率	田间	Few 米	多光谱相机, 高光谱相机, 近红外、彩色-红外	-	全年 全年	(Meivel等, 2016年)
		液滴覆盖率、密度, 液滴大小	柑橘	0.6, 1.2, 1.8	水敏纸卡片（WSPs）	-	一天	（Tang等人, 2018年)
	六旋翼无人机	喷雾流量和喷液压力 喷液、喷洒均匀性、喷雾 喷液损失、液滴大小和密度。	水稻和花生	1	高清第一人称视角摄像机	-	全年 该年份	（Yallappa 等人等，2017年)

表1（续）

Task	无人机型号	指数	Crop	飞行高度 (m)	传感器		任务周期	参考文献
					Type	型号		
Crop 监测	固定翼 UAV	归一化差异植被指数（归一化差异植被指数）	耕地作物（玉米、棉花，向日葵）	120	多光谱-光谱相机	Parrot Sequoia Plus	六月至十月	(Bollas等人，2021年)
		归一化差异植被指数（归一化差异植被指数）	Rice	20	多光谱相机	Tetracam ADC 相机	95天	(Swain等人，2010年)
	四旋翼无人机	归一化差异植被指数、安大略省土壤与作物改良协会	大豆、小麦、大麦，燕麦、油菜	120	数码相机	Aeryon Photo3S	春季-秋季	(Zhang 等人，2014年)
		可见光波段差异植被指数，归一化绿蓝差异小麦指数，绿红比值指数	小麦	100	数码相机	SONY ILCE-6000	9月-July	（Du & Noguchi，2017年）
		叶面积指数（LAI）、总干重（TDW）、植物长度（PL）	三个水稻品种：Nipponbae（粳稻），IR64（籼稻），Basmati370（籼稻）	30	RGB 相机	Zenmuse X4s	夏季	（Peprah 等人，2021年）
		植被指数（VI）、叶面积指数（LAI）	咖啡	30	数码 RGB 相机	Sony EXMOR 1/2.3"	全年 全年	(Barbosa 等，2021年)
		土壤调节植被指数(SAVI)、叶面积指数（LAI），归一化差异植被指数（NDVI）	向日葵	75	数码相机	Tetracam ADC Lite	四天	（Vega 等，2015年）
		-	田间	-	RGB 相机	-	-	（Doering 等 a.，2014年）
	六旋翼无人机	归一化差异植被指数（NDVI）	葡萄园	150	ADC-Lite 相机	Tetracam ADC-lite 相机	一天	(Primicerio 等，2012年)

表1（续）

Task	UAV 型号	指数	Crop	飞行高度 (m)	传感器		Task 时期	参考文献
					Type	型号		
Crop 监测	六旋翼无人机	归一化绿红差异指数（NGRDI）	豌豆、燕麦	30	RGB相机	松下LUMIX DMC-GF1	四月-八月	（Jannoura 等人, 2015年）
		蓝绿素指数2（BGI2），修正差值植被指数（RDVI）	大麦	30	高光谱相机	Firefly超高清清晰度185	夏季	（Aasen 等人, 2015年）
	八旋翼无人机	归一化差异植被指数、土壤调节植被指数、优化土壤调节植被指数（OSAVI）和激光雷达	大麦	50	RGB传感器	松下LUMIX GXI	4月-July	(Bending等, 2015年)
		运动恢复结构 (SfM), 机载激光扫描（ALS）	桉属 Pulchella	30	RGB相机	Canon 55D	一天	（Wallace 等人, 2016
		归一化差异植被指数（NDVI）、热温度	甜菜	55	多相机 多光谱相机阵列（多光谱相机）相机	Tetracam mini MCA	一天	（Bendig 等人, 2012年）
		-	向日葵	122	多光谱相机	ADC Snap	-	(Noriega 和 Anderson, 2016年)

7. 在农业部门采用无人机技术的局限性7.1 技术决策

许多制造商和公司已在商业市场上生产了各种类型的无人机，从爱好型产品到工业模型飞机，不一而足。由于目前没有专门针对农业用途的无人机开发标准，因此很难找到专为农业场景打造的无人机（Huang 等人，2013）。此外，假设现有的商业软件包虽支持摄影测量数据处理，却未针对农业用途进行标准化，那么传感器可能无法恰当地采集所需的无人机图像。因此，一旦发生与其他飞行物体碰撞等意外情况，用户可能无法采取适当措施（Abdullahi，2015）。

与技术决策相关的另一个主要问题是电池使用和飞行时间限制。目前无人机使用的锂离子电池优于传统电池，尤其是容量更大。然而，容量增大也会使电池重量增加（Saha 等人，2011）。遗憾的是，这个问题至今仍难以解决。另一个与电池使用相关的问题是电池管理。尽管人们知道无人机电池需要定期维护，但大多数无人机操作员常常忘记维护，也没有认真关注这一问题。因此，电池需要定期更换，产生了额外成本（Lee 等人，2012）。最后，无人机在使用新电池时可飞行约 20 至 30 分钟，这段时间仍足以完成作物监测（Baha 等人，2012）。研究人员正尝试开发经过优化的混合电池，以解决这一问题。

7.2 成本

人们对无人机成本缺乏了解，是这项技术在农业部门推广较慢的原因之一。入门系统中的农业无人机价格从1,000 美元到 10,000 美元，甚至20,000 美元不等，具体取决于摄像机和功能（Stehr，2015）。这笔费用并不便宜，肯定会成为小农户采用无人机技术的一大障碍（Ahmad 等人，2021）。有意使用无人机但无力承担费用的农民，可以组成团体签约购买无人机服务，以减少个人支出。

另一种降低无人机成本的可行方案是购买价格低廉的机身和低成本相机。然而，这种方案可能会缩短无人机平台的续航时间。此外，低成本无人机通常配备轻量化

发动机，这可能会限制无人机可达到的飞行高度。相机成本低，也会限制传感器载荷的尺寸和重量，并降低图像质量（Abdullahi，2015年）。此外，单独采购无人机组件需要由高技能工程师或技术人员进行集成和组装，这可能会增加总费用（Huang 等人，2013年）。

除了配备相机以及用于处理航空影像的软件的飞行器成本外，农民还需要考虑操作员执照的费用。由于并非人人都获准操作无人机，因此需要安排操作员，这意味着还要投入额外的时间和成本。不过，这些成本今后将逐年降低（Bollas等人，2021）。

7.3 有效载荷

载荷重量和尺寸是无人机的关键因素，因为必须根据无人机的具体应用进行仔细配置。无人机准备就绪后，需要对其进行配置，并注意载荷设计以及机械和电气方面的适配，尽管目前并无必须遵循的具体工程指南（Huang 等人，2013）。

7.4 操作

在无人机操作中，大多数类型的无人机都不具备自动起飞和着陆的能力（Huang 等人，2013）。此外，应谨慎选择无人机的飞行频率，因为目前关于无人机飞行的法规并不完善。某些地区甚至出于安全防范考虑限制无人机的使用（Eisenbeiss，2009）。另一项挑战是，无人机在雨天或暴风雨等极端天气条件下无法采集数据（Abdullahi 等人，2015）。因此，需要具备高超技能的遥控操作员。然而，中小型生产者难以找到熟练的无人机操作人员，这成为他们采用无人机技术的一大障碍。培训问题，以及短期和中期内缺乏已证实的财务回报，被认为是造成这一问题的原因（Abdullahi 等人，2015）。因此，按照地理参考坐标进行自主飞行，已成为无人机在农业中实际应用的一项迫切需求（Huang 等人，2013）。

集群控制技术可用于高效控制多架无人机执行各种任务。尽管集群控制能够提供实用的方法，降低电池成本、提高运行效率并缩短飞行时间，但仍需改进用户界面，以便年龄较大或不熟悉无人机的人也能轻松控制无人机。用户

界面的改进通过考虑多模态反馈来实现，包括视觉、听觉和触觉反馈。因此，主要侧重于以人为中心的用户界面和反馈的改进，似乎是应对多架无人机的两种有效方式（Hong 等，2017年）。

8. 在印度尼西亚实施无人机面临的挑战

Kavianand 等人（2016年）指出，农业发展对印度尼西亚至关重要，因为农业一直是印度尼西亚国内生产总值的重要来源。印度尼西亚国内生产总值总额中约有 14.4% 来自农业部门；农业部门吸纳了 38.6% 的劳动力，从而降低了失业率（David 和 Ardiansyah，2017年）。尽管农业对印度尼西亚国内生产总值的贡献相当可观，但过去五十年来，由于生产率低下，农业对印度尼西亚国内生产总值的贡献显著下降。一些自然现象，如极端天气变化，也影响了印度尼西亚的农业（Syuaib，2016年）。

许多研究人员建议通过无人机实施精准农业，以提高农业生产力。应用无人机带来了诸多益处，不仅能够提升经济收益，还能为解决当前农业问题提供适当的方案。然而，尽管印度尼西亚依赖农业，其农业领域对无人机的应用仍远未达到将最新技术引入农场的程度。尽管一些发达国家已开始在精准农业中使用无人机，并证明这项技术对于减轻农民工作负担至关重要，印度尼西亚似乎仍然落后，继续依靠人工操作开展农场作业。

阻碍无人机应用的一个重要原因是农民的教育水平。印度尼西亚的大多数农民未完成高中学业，当地有38%的农民仅从小学毕业（Haq et al., 2016）。此外，只有6%的当地农民完成了高中或大学学业。这些数字充分反映了印度尼西亚农民的现状。教育程度不足可能导致他们对技术应用缺乏了解。此外，理解程度较低还可能使他们对重新学习如何整合农业与技术感到焦虑（Suryanegara et al., 2019）。

尽管存在上述原因，研究人员仍在多个农业领域测试了无人机的应用。例如，无人机已在印度尼西亚农业中实际应用

若干局限性（Norasma et al., 2019）。由于动力发动机功

2019）。这一问题值得高度关注，因为印度尼西亚地处赤道带地区，定期遭遇暴雨。此外，无人机还需要数据密集型流程

以及大学；其余人员仅接受过小学教育，38%接受过初中教育（Haq 等人，2016年）。因此，大多数农民对技术和物联网

（2019年）指出，大多数商用无人机的飞行时间仅为30分钟至1小时。此外，每次飞行只能覆盖较小的受限区域。因此，

购买用于精准农业的无人机技术所需的总成本可能并不划算。

9. 结论

如今，无人机的应用展现出无限潜力，尤其是在农业部门。本文讨论了无人机在农业部门的两大应用，即喷洒和作物监测。为了建立精准农业，应用无人机的必要性以及无人机的实施都至关重要。本文还重点介绍了未来可能出现的诸多问题和挑战，并通过提供各种数据和资料，提高人们对这些问题的认识。无人机在喷洒和作物监测中的应用是本文的主要内容，因为我们对无人机的应用进行了全面研究，包括其带来的益处、不同类型研究中无人机的各种应用形式，以及无人机的操作流程。此外，本文还识别了无人机应用中存在的局限性，以揭示无人机在农业领域实施方面的空白。最后，本文还讨论了实施无人机所面临的挑战，尤其是在印度尼西亚。

参考文献

Aasen, H., Burkart, A., Bolten, A., & Bareth, G.（2015）。利用轻型无人机快照相机生成用于植被监测的三维高光谱信息：从

（

空

PA）：对可持续发展的追求。《Agronomy》，11(1)，7。

Bajoria, A., Mahto, N. K., Boppana, C. K., & Pant, R. S.（2017年）。用于缓解动物和鸟类危害的系留浮空器系统设计。
《I
Co 97。Barrientos, A.,
群
20 本微型无人机。《国际摄影测量、遥感与空间信息科学档案》，39，
作
外 ronos, V.
市 ldi, F., Pelosi, F., Pascucci, S., & Casa, R.（2017年）。评估无人机
Ta ang, F.（2017年）。一类微型自主飞艇的自动驾驶
迈
测

DeSA, 联合国（2015年）。《世界人口展望：2015年修订版——主要发现和预先发布表格》。工作论文第。Hunter, M. C., Sm
《I ）。印度尼西亚的有机农业：挑战与机遇。《Organic Agriculture》，
在
人
人 图。《遥感》，9(3), 289。Eisenbeiss, H.（2009年）。
., Freitas, H.,
Ar e Carvalho, A. C. &
Ue s in
针
To 5(01), 1660003。Gallardo-Saavedra, S., Hernández-Callejo, L., & Duque-Perez, O.（2018年）。光伏电站航空热成
像 , J.（2012年）。美国无
机部署与性能。
Em L., & Armada, M.（2020年）。智能农场田间机器人——借鉴工业领域功能。《Agronomy》，10(11), 1638。
Go ma, C., López-Granados, F., Brandstoetter, M., Tomic, S., ... &
S., 《Int. J. Agric.
农 ohnson, L. F., Dunagan, S. E., Higgins, R. C., Sullivan, D.
V., 《Computers and Electronics in

Hong, A., Lee, D. G., Bülthoff, H. H., & Son, H. I.（2017年）。用于户外环境中多台移动机器人远程操作的多模态反馈。《[illegible] Y., Wu, W., & Fritz, B. K.（2009年）。无人机平[illegible]

[illegible] Huang, Y., Thomson, S. J., Hoffmann, W. C., Lan, Y., & Fritz, [illegible]

R.. [illegible]

[illegible]18年）。农业应用的多无人机系[illegible]

P. [illegible]年）。用于喷洒肥料和农药的农业无人机。《国际计算机科学与软件工程高级研究杂志》，5(12), 804-807。

Ra[illegible]《2010[illegible]

Ni[illegible]《帝国跨学科研究杂[illegible]

[illegible]

K. [illegible] Lee, B., Park, P., Kim, C., Yang, S., & Ahn, S.（2012年）。无人机混合电力[illegible]299。Li, X., & Yang, L.（2012年8月）。无人机智能航拍[illegible]

D., [illegible] R., Fulton, J. P., & Higgins, S. F.（2010年）。基于地图的自动喷[illegible]

K[illegible]工程科学杂志》[illegible]

htt[illegible]

代[illegible]感确保农业可持续性。《应用科学》，11(13), 5911。

Meivel, S., Dinakaran, K., Gandhiraj, N., & Srinivasan, M. (2016). 尿素喷洒农业无人机系统的遥感。载于2016年第三届

无人机

书综述。《Procedia计算机科学》，133，502-509。Muchiri, N., & Kimathi, S. (2016). 无人机的

定有效政策应对措施. 以应对饥饿和营养不良的疫情。《专题文件》. 1-22。

研发。《IEEE应用地

Roslin, N.

《IOT会议系列：物料科学与工程》，

线

& Haiyang, P. (2016). 柑橘树形和小型无人机喷洒高度对液滴分布的影响。《国际农业与生物工程

，Palleque-Galvez, J., McCall, M. K., Napoletano, B. M., Wich, S. A., & Koh, L. P. (2014). 用于社区

O., Yamashita, M.,

Perigrine有限公司（2018）。轻型Helikites（36英寸）（第1-3页）

技术未来。Idesia（阿里卡），37(1)，75-84。

Ponti, M., Chaves, A. A., Jorge, F. R., Costa, G. B. P., Colturato, A., & Branco, K. R. L. J. C. (2016). 精准农业：利用低成本系统 [illegible] 种用于精准农业的灵活无人 [illegible] Academy, F., & Cheval, S. (2019). 使用UAV-LTA进 [illegible] 重点关注作物保护：三个创新案例研究。《国际农业科学与技术期刊》，5(1)，30 [illegible]

A [illegible] H., Sinha, N., Mohanty, M., & Chaudhary, R. (2019). 无人机：面向未来农业的绿色技 [illegible] Reinecke, M., & Prinsloo, T. (2017). 无人机监测对作物健康和收获量的影响。载于 [illegible] 在 [illegible] 《环境科学会议论文集》，24，245–253。

Ntu [illegible] T. G., Hernina, R., Ardhianto, R., [illegible] 24 [illegible] Z. (2014). 用于航空喷洒的旋转式液压雾化喷 [illegible] om, T. [illegible]

IEI [illegible] 架优化电动无人机的电池寿命。载于2012年 [illegible] D. S., & Andrade, A. D. (2019). 遥控航空器在精准 [illegible] 雾 [illegible] 读发展》，13(5)，2618。Shi, G., & Liu, Y. (2011). 无人机遥感系统的海事应用。《 [illegible] 29-32。

Silver, B., Mazur, M., Wiśniewski, A., & Babicz. (2017). 欢迎来到无人机驱动解决方案的时代：电信运营商新的重要收入
来
(2015) 无人机系统（UAS）在农业中的应用。载于
020) 草地
贫
, 22(4), 734-737。Spoorthi, S.,
20
在农业的最新
M.
ess, 7, 2957-2968。
食
F. (2016). 印度尼西亚的可持续农业：与环境和谐共进的事实与挑战。
Ag
。2018年第十五届
Ts
idis, P. G. (2019). 基于无人机的精准农业应用综述。Information (Switzerland),
处
载于第34届环境遥感国际研讨会论文集（第4页）。Unal, I., &
To
亚
ga, F. A., Ramirez, F. C., Saiz, M. P., & Rosua, F. O. (2015). 利用无人机多时相成像监测向日葵作物。

Vera, J., Conejero, W., Mira-García, A. B., Conesa, M. R., & Ruiz-Sánchez, M. C. (2021). 朝着基于介电土壤传感器的灌溉自
齐衰退（第2019卷）。
的自动航空喷洒系统。Computers and electronics in
R., ng, Y.,
M.
W., Hoffmann, W. C., Huang, Y., Xue, X., & Fritz, B. (2010) “无人机用PWM精密喷洒控