

利用无人机辅助放牧实验研究

张智宇^{1,2}, 王东亮^{1,*}

1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 中国科学院陆地表层格局与模拟院重点实验室, 北京 100101;
2. 长江大学地球科学学院, 武汉 430100

摘要: 无人机具有机动灵活、易于操作等特点, 现已成为地理信息科学与生态学等研究中打破地形壁垒, 安全高效获取地表海量数据以及低空近地观测的重要工具, 并且在草原畜牧业管理、辅助放牧等领域已开始应用。研究团队于2020年在呼伦贝尔开展了无人机放牧羊群、牛群、驴群等家畜实验, 分析了无人机在畜群的不同驱赶位置以不同驱赶方式对不同家畜种群的放牧效果。实验初步结果表明: 无人机在辅助放牧方面具有较大的应用潜力; 无人机从畜群两侧或绕至畜群尾部对畜群驱赶的效果优于从正上方经过对畜群驱赶; 搭载喊话器的无人机放牧效果优于未搭载喊话器的无人机。通过实验, 作者探讨了无人机放牧现存的问题和挑战, 并展望了未来的发展方向。研究针对无人机飞行高度、姿态、噪声等因素对畜群驱赶效果影响的分析, 有利于制定规范化驱赶标准, 也可为响应草原环境下无人机放牧高度智能化的需求提供理论参考。

关键词: 无人机放牧; 典型应用案例; 辅助放牧效果; 喊话器

DOI: <https://doi.org/10.3974/geodp.2022.03.20>

CSTR: <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2022.03.20>

数据可用性声明:

本文关联实体数据集已在《全球变化数据仓储电子杂志(中英文)》出版, 可获取:

<https://doi.org/10.3974/geodb.2022.03.01.V1> 或 <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2022.03.01.V1>.

1 前言

信息技术的快速进步推动着地理科学的不断发展, 无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)应用直接促进了低空近地遥感科技与其他学科的交叉融合, 形成了“无人机+”的新型应用模式^[1]。目前无人机广泛应用于土地勘测、植保作业、灾难救助、野生动植物观察等领域^[2], 极大拓展了无人机应用的广度和深度^[3]。草原牧区特殊的地理和自然条件赋予它独特的牧业资源^[4]。无人机时代的到来对草原牧业的发展提出了新要求。探讨无人机与牧业的深度融合有利于优化草原牧业放牧方式, 提高牧业生产效率, 促进牧业向智能化发展, 实现实时动态监测畜群具有重要的研究意义和实际应用价值。

收稿日期: 2022-03-01; 修订日期: 2022-06-29; 出版日期: 2022-09-25

基金项目: 中华人民共和国科学技术部(2021YFD1300501, 2021xjkk1402); 中国科学院(XDA26010201); 国家自然科学基金(41501416)

*通讯作者: 王东亮, 中国科学院地理科学与资源研究所, wangdl@igsrr.ac.cn

数据引用方式: [1] 张智宇, 王东亮. 利用无人机辅助放牧实验研究[J]. 全球变化数据学报, 2022, 6(3): 487-500. <https://doi.org/10.3974/geodp.2022.03.20>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2022.03.20>.
[2] 张智宇, 王东亮. 呼伦贝尔无人机放牧家畜实验数据集[J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2022. <https://doi.org/10.3974/geodb.2022.03.01.V1>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2022.03.01.V1>.

二十世纪九十年代以前,我国草原牧民的放牧方式多为徒步或骑马跟随;九十年代以来,摩托车逐渐替代马匹成为牧民首选的辅助放牧工具^[5]。二十世纪七十年代前,国外牧民多以马或汽车为主要放牧工具;七十年代后,国外一些大型牧场开始借助小型直升机辅助放牧^[6]。骑马或摩托等与徒步跟随等方式相比极大提高了放牧效率,但依旧需要牧民时刻跟随畜群,此外在高寒草原高地、山林等地区,地理环境复杂,马匹、摩托等跟随困难;直升机虽可无视地形对牧区进行大面积快速跟随监控,但其成本过高且需要驾驶者具有专业飞行技能,不具普适性。近年来,无人机相关技术逐渐成熟,制造成本迅猛下降并广泛应用于各领域,国内外一些牧民已实现利用无人机辅助放牧^[7]。无人机体积小、携带方便、机动性强,可远距离快速获取地面目标的影像资料,并可通过传感器实时传输到地面的接收终端,有助于畜群信息采集和畜群管理。本文系统梳理了无人机在放牧方面的应用,并结合呼伦贝尔无人机放牧家畜实验,探讨了无人机在辅助放牧领域存在的问题和挑战,以及未来的发展方向。

2 无人机在牧业中的应用

2.1 畜群识别计数

畜群识别计数是无人机在牧业中的重要应用之一。长期以来,大体量家畜数量的快速精准统计十分困难,无人机的应用可极大提高数量统计的准确性和快速性^[8]。搭载高清分辨率相机的无人机可从近地低空获取畜群的正射影像,通过人工目视解译或计算机视觉目标检测等能够实现精准的动物种群计数。基于无人机影像的人工目视解译已经被广泛用于动物数量调查研究。徐源新等利用无人机对莫莫格国际自然保护区内湿地鸟类生态多样性的调查中,将无人机拍摄的保护区影像合成.tif格式后输入PhotoShopCC2018软件,经过专家目测判读,以直接计数法统计影像内雁鸭类种群数量,为莫莫格湿地雁鸭类水鸟多样性现状及生境选择研究提供精准的数据支持^[9]。王方等以无人机技术替代常规野生动物调查方法,经过对航空拍摄的动物影像进行目测识别和手动计数,获取了准确、完整的亚洲象分布、数量、活动轨迹等信息^[10]。Vermeulen等利用搭载高分辨率可见光和热成像相机的无人机在传统野生动物调查法的基础上对非洲布基纳法索南部狩猎场非洲象进行了种群数量调查研究,精度颇高^[11]。

基于人工目视判读的动物种群计数方法自动化程度低且精度主要依赖于作业者的专业素养与主观判断,不具客观事实性。此外,在面对大体量种群计数时,目视解译工作进展困难。高分辨率航空影像近年来在全球范围内越来越常见,为现有的自动或半自动的动物种群计数向高精度高自动化的目标识别与计数转化提供数据基础。此外,深度学习技术的日渐成熟,已在动物识别领域开始应用^[12]。Hodgson等组合使用深度学习网络模型开展了基于无人机影像的海鸟识别与计数研究,并对分别采用传统地面调查法和无人机调查法的海鸟种群数量实验报告进行对比,结果表明无人机自动计数调查法的统计更加精确^[13]。Linchant等使用无人机和iMUAS软件对刚果民主共和国加拉巴国家公园两个河马园区内河马数量进行计数统计,统计结果与当地工作人员提供的真值对比十分接近^[14]。吴方明等利用Inspire2和MavicPro无人机对三江源大型食草动物数量进行自动化检测,经过精度检验

方法为手工计数与自动计数结果比较,相对平均误差为 4.8,大多数情况均可达到此水平^[15]。基于无人机的深度学习计数统计法虽仍有一定误差,但对大尺度种群数量的估计却能发挥很大优势,可为生态学者们对草原载畜量统计、野生动物种群估算研究提供数据支持。

2.2 畜群定位

我国自主研发搭建的北斗系统是可为用户提供全天候、全天时、高精度的定位、导航和授时服务的国家重要空间基础设施。截至 2020 年 7 月我国北斗三号系统已经搭建完成,开始提供全球服务。李吉等在考察四川省阿坝州茂县唱斗村的特殊地形后,提出利用卫星定位技术和无人机技术实现“北斗放牧”构建“航空生态牧场”^[16]。简单来说就是给每个畜群个体在脖颈处佩戴一个带有定位功能的特殊项圈,项圈里面配置北斗定位模块和红外测温模块可以发射位置信息和家畜体温信息。无人机飞行到牧场上空采集项圈信息,并将坐标信息传送到牧民手机应用端,形成信息回路,牧民可以远距离实现实时获取畜群位置信息。一旦畜群或个体偏离牧场范围,牧民便可驱使无人机现场驱赶。北斗系统的定位精确度可达 1.2 m,测速精度可达精度 0.2 m/s,精度完全达到牧民对畜群的掌控的要求。“航空生态牧场”简化了牧民放牧流程,牧民无需翻越山岭去寻找查找畜群,对于越界的个体家畜,可将该个体的位置信息传送给无人机,无人机寻找到个体后可手动控制驱赶,提高了放牧效率。唱斗村村民吴万全利用北斗放牧系统实现了对 20 头犏牛的无人化管理,放牧驱赶效果出色^[16]。

2.3 畜群驱赶

在英国、荷兰等欧洲国家,牧民将无人机应用于畜群管理,例如无人机驱赶放牧。以“绵羊国”著称的新西兰正在掀起一场无人机牧羊的新潮。新西兰传统的放牧方式是野外大面积散牧,羊群全年大部分时间在南阿尔卑斯山上自由活动,秋季时才会将游走在牧场各处的畜群赶回平缓且温暖的低海拔草场,然而畜群的驱赶往往十分困难。牧群长时间自由行动,位置散乱,并且草原辽阔、牧场宽广,地势复杂山岭、沟壑众多,人工搜寻效率低下。此外,新西兰牧群体量往往很大,在复杂的地形环境下牧民驱赶近千米长的羊群队伍十分困难。当地传统的驱赶方法是携带牧羊犬一起乘直升机抵达山顶,从山顶向下搜索驱赶,费时费力。而无人机的投入弱化了这项工作的强度,借助无人机的高空视角牧民可快速定位羊群,并利用无人机以不同的飞行姿态引导羊群的运动方向,从而替代牧民亲自驱赶,很大程度上缩短了畜群搜寻时间。

新西兰牧民 Tony Buchanan 拥有 5,210 只羊,畜群体量大,人工驱赶费时费力,他经常使用 DJI Phantom 4 RKT 无人机协助放牧。Tony Buchanan 在驱赶时将无人机飞行高度控制在 5–10 m,利用螺旋桨发出的噪声干扰羊群的运动,此外再由牧羊犬加以驱赶,形成了无人机与牧犬结合的新型放牧方式^[17]。无人机单架次续航时间约为 30 分钟,低电回航后换上备用电池即可返回返航点再次工作,借助机载相机采集的航拍画面定位羊群位置、俯视图搜寻羊群,极大方便了畜群位置的查找,放牧时间由 5 小时缩短至 2 小时左右。农场主 Brett Sanders 的牧场里有 8,000 多头羊,他利用 MATRICE M200 无人机对羊群进行监控、搜索。Brett Sanders 的牧场大多在山上,以往携带牧羊犬亲自驱赶需要花费 3 个小时,而后在 MATRICE M200 辅助下,驱赶羊群的时间缩短至一半^[17]。以色列农场主借助视觉深度学习

算法开发了基于无人机的自主放牧系统,并利用搭载了该系统的 Mavic2 无人机自主识别草原上的牛群,借助牛群对无人机的生理反应特征驱赶畜群。该系统极大的降低了牧场运营成本,提高的牧民野外放牧的效率^[18]。另一位新西兰牧民 Jason Rentoul 利用消费级无人机 DJI Phantom4 Advance 来管理牧群^[19]。Jason Rentoul 在原机的基础上进行简单改造: Jason Rentoul 在无人机上加装了音频播放器,通过无人机向羊群交替播放狗吠声和星球大战电影插曲。畜群在听到噪声的刺激后,本能的恐惧促使它们快速集中向某个远离声音源的方向跑去。经实践结果对比分析,无人机放牧远比牧犬高效,在驱赶带着牛犊的母牛时无人机的驱赶效果明显优于牧犬,尤其驱赶带着牛犊的母牛。面对牧犬时母牛更容易被激发出强烈的攻击性且容易失控而无人机则不会引起母牛的攻击行为。上述所涉及的无人机具体参数见表 1。

表 1 国内外无人机放牧研究与应用所用无人机参数

驱赶家畜种类	羊群	羊群	羊群	牛群
产品名称	DJI Phantom4 RKT	DJI Phantom4 Advance	MATRICEM200	御 Mavic2
控制距离/m	FCC:7000; CE:3500 SRR:4000	FCC:7000; CE:3500 SRR:4000	FCC:7000; CE:3500 SRR:4000	FCC:7000; CE:4000 SRR:4000
影像传感器	1 英寸 CMOS, 有效像素 2,000 万	1 英寸 CMOS, 有效像素 2,000 万	1 英寸 CMOS, 有效像素 2,000 万	1 英寸 CMOS, 有效像素 2,000 万
电池/mAh	4,920	5,870	4,280	3,850
悬停精度/m	垂直: ±0.1	垂直: ±0.1	垂直: ±0.5	垂直: 0.1
	水平: ±0.1	水平: ±0.3	水平: ±1.5	水平: 0.3
轴距/mm	350	350	643	354
飞行时长/min	30	30	27	31
来源文献	15	15	16	17

3 呼伦贝尔无人机放牧家畜实验与讨论

无人机放牧实验在呼伦贝尔市陈巴尔虎旗牧场开展。呼伦贝尔草原位于内蒙古自治区东北部,地处大兴安岭以西的呼伦贝尔高原上,是世界著名的高原牧场。所使用的飞行器为大疆精灵 4 (DJI Phantom4),实验对象为羊群、牛群与驴群。该研究实验测试了大疆精灵 4 在不同飞行高度以不同靠近方式(从群体或个体的边缘、前后靠近)和驱赶手段(无人机本身及其噪声、通过喊话器喊话)对不同家畜的放牧效果。2020 年 8 月 15 日至 2020 年 8 月 31 日期间,在天气良好、草原环境允许的条件下一共进行了 24 次无人机放牧实验,并分别从空中无人机视角和地面手机视角,记录了实验过程,得到呼伦贝尔无人机放牧家畜实验数据集。按照牧群种类分别讨论无人机放牧效果。

3.1 飞行器和喊话器

实验所用无人机产品为 DJI Phantom4,重量为 1,380 g,电池容量为 5,870 mAh,最大上升速度约为 6 m/s,悬停精度垂直方向 0.1 m、水平方向 0.3 m,室外在无干扰、无遮挡情况下最远通讯距离约为 5,000 m,飞行时长为 30 分钟。此外,该无人机具有障碍感知、智能跟随、指点飞行三项创新功能,可在放牧过程中提供重要帮助。实验所用无人机喊话器适配 DJI Phantom4,安装方式为捆绑安装。该喊话器采用数字加密传输,不受干扰。机载

端重量约为 115 g，噪声低、声音识别度高，喊话器重量在无人机配种范围内，不干扰无人机正常作业。飞行器的主要参数见表 2，高空喊话器主要参数见表 3。

表 2 无人机主要参数

产品名称	控制距离/m	影像传感器	电池 /mAh	悬停精度 /m	产品重量 /g	轴距 /mm	飞行时长 /min	最大承受 风速 m/s	工作环境 温度(℃)
DJI Phantom4	FCC: 5,000 CE: 3,500	1 英寸 CMOS, 有效像素 200 万	5870	垂直: ±0.1 水平: ±0.3	1,380	350	30	10	0~40

表 3 喊话器主要参数

产品名称	传声距离 /km	发射功率 /w	频率 /MHz	体积 /cm ³	重量 /g	声压 /分贝	充电时长 /h	续航时长 /h	是否防水
无人机喊话器	5~10	5	433	7×5.5×5.5	118	125~140	2	4	是

3.2 无人机牧羊实验

利用无人机分别从羊群中心位置、羊群尾部和羊群两侧沿着羊群移动方向或者垂直于羊群运动方向的方向驱赶羊群。在不同的驱赶位置分别利用空载无人机和搭载高空喊话器的无人机进行 2~3 次牧羊实验，共计 17 次。分八组，从畜群反应时间、畜群运动状态、畜群运动方向的准确性三方面判断无人机牧羊效果。其中畜群反应时间是指无人机开始驱赶牧群到牧群做出反应的时间；畜群的运动状态是无人机驱赶过程中畜群的移动速度、畜群离散情况；畜群运动方向是畜群是否朝向目标驱赶方向运动。牧羊实验中无人机以 20 m 的高度追赶羊群，抵达驱赶位置后调整至实验飞行高度。在驱赶过程中无人机的飞行速度和飞行方向根据羊群的运动状态实时调整。无人机牧羊实验驱赶过程和效果见表 4、图 1。

表 4 2020 年无人机牧羊实验

驱赶家畜种类	羊群 1	羊群 2	羊群 3	羊群 4	羊群 5	羊群 6	羊群 7	羊群 8
实验时间	08.15 09:24	08.15 10:12	08.15 16:40	08.16 13:34	08.26 09:20	08.26 10:15	08.26 10:45	08.30 11:20
经/纬度坐标(°)	120.031,5 49.380,9	120.302,5 49.379,7	119.954,8 49.325,7	119.900,7 49.305,8	119.936,7 49.312,9	119.935,4 49.313,9	119.937,2 49.313,9	119.933,9 49.313,5
家畜数量/只	425	425	856	154	300	356	356	356
是否携带喊话器	否	是	否	否	是	否	是	是
飞行高度/m	16	15	12	12	15	7	7	5

实验过程与结果说明如下。

(1) 羊群 1

驱赶方式和过程：未搭载喊话器飞行至羊群中心位置，沿着羊群行进方向俯冲驱赶。

牧羊效果：羊群朝向四处奔散，离开无人机旋翼噪声区域后再次集中在一起，反应时间短且反应迅速，羊群运动速慢、运动状态混乱，群体运动目标方向不明确。

(2) 羊群 2

驱赶方式和过程：搭载喊话器飞至羊群中心在牧民喊话辅助下沿羊群移动方向俯冲驱赶。

牧羊效果:羊群朝向四处奔散,离开无人机旋翼及喊话器传声区域后再次集中在一起、反应时间短,羊群运动速度极快,运动状态混乱,群体运动目标方向不明确。

(3) 羊群 3

驱赶方式和过程:未搭载喊话器飞行至羊群尾部,沿着羊群运动方向俯冲驱赶。

牧羊效果:羊群集中在一起,沿着无人机飞行方向运动,运动速度慢、反应速度快,运动状态由混乱逐渐稳定、有序,群体运动目标方向明确。

(4) 羊群 4

驱赶方式和过程:搭载高空喊话器飞行至羊群尾部在牧民喊话辅助下沿着羊群运动方向俯冲驱赶。

牧羊效果:羊群沿着无人机飞行朝向运动,运动速度快、反应迅速,运动状态由混乱逐渐稳定,群体运动目标方向明确。

(5) 羊群 5

驱赶方式和过程:搭载高空喊话器飞行至羊群尾部在牧民喊话辅助下沿着羊群运动方向俯冲驱赶。

牧羊效果:羊群沿着无人机飞行朝向运动,运动速度快、反应十分迅速,运动状态稳定,群体运动目标方向明确。

(6) 羊群 6

驱赶方式和过程:未搭载喊话器飞行至羊群行进方向两侧沿着羊群行进方向俯冲驱赶。

牧羊效果:羊群向远离无人机的方向运动,运动速度快、反应较为迅速,运动状态由混乱逐渐稳定,群体运动目标方向明确。

(7) 羊群 7

驱赶方式和过程:搭载高空喊话器飞至羊群两侧在牧民喊话辅助下沿着与羊群运动垂直方向俯冲驱赶。

牧羊效果:羊群向远离无人机的方向快速运动,反应较为迅速,运动状态稳定、有序,群体运动目标方向明确。

(8) 羊群 8

驱赶方式和过程:搭载高空喊话器飞至羊群两侧在牧民喊话辅助下沿着羊群运动方向俯冲驱赶。

牧羊效果:羊群向远离无人机的方向快速运动,反应十分迅速,运动状态稳定、有序,群体运动目标方向明确。

每次实验时长约 15 至 20 分钟。经实验结果分析,无人机在羊群两侧和尾部驱赶的效果优于在羊群中心位置驱赶的效果;搭载喊话器的无人机牧羊效果优于未搭载喊话器无人机的牧羊效果;在无人机噪声以及喊话器声音的传播范围内无人机飞行高度对羊群驱赶效果的差异不明显。



图 1 无人机牧羊实验效果

绵羊性情温顺、胆小，对外界环境突变敏感。无人机飞至羊群中心位置距离羊群大约 16 m 高度时，羊群会以无人机所在位置为中心缓慢向四周奔散，运动方向不明确，这种情况随着飞行高度的升高有所改善，经过半分钟左右羊群绕过无人机重新聚集在一起。未搭载喊话器的无人机从畜群尾部靠近驱赶时，羊群迅速聚拢并朝远离无人机的方向缓慢向前运动，操纵无人机紧随羊群，当无人机再次接近羊群尾部时，羊群会加速朝远离无人机的方向继续运动。搭载高空喊话器的无人机从尾部靠近羊群时，牧民通过对讲机向羊群喊话辅助无人机俯冲驱赶，羊群会迅速聚拢且运动速度更快，反应时间更短。从尾部驱赶畜群的两次牧羊实验中羊群均准确朝向无人机驱赶方向快速运动，羊群运动状态稳定。未搭载喊话器的无人机从羊群两侧沿羊群运动方向俯冲驱赶时，羊群迅速沿垂直于无人机运动方向远离无人机，且羊群整体速度不均匀。具体表现为距离无人机较远的羊群运动速度明显慢于靠近无人机的羊群，运动状态混乱运动方向不明确。搭载高空喊话器的无人机从羊群两侧沿着羊群运动方向和垂直于羊群运动方向俯冲驱赶时，牧民对着羊群持续喊话，羊群

在听到声音后迅速聚集在一起，并快速、稳定地向着远离无人机的方向运动。观察八组牧羊实验可以看出，羊群对牧民喊话的声音敏感，在听呼喊时羊群会迅速集聚在一起，并在无人机的干扰下沿目标方向移动。此外，羊群对无人机驱赶存在一个适应过程：羊群刚开始对无人机有恐惧心理，在无人机刚开始靠近时，羊群会迅速做出反应奔跑，且运动状态较为混乱，待无人机在羊群上空悬停一段时间后羊群开始熟悉无人机的声音，此时对羊群尾部稍加驱赶羊群便能很好的朝某一特定目标方向移动。在三个不同位置进行的无人机牧羊实验，除了在羊群中心位置驱赶时会使羊群运动混乱外，在其他位置均顺利将羊群驱赶至羊群附近的水槽，且无人机对不同体量的羊群驱赶效果无差异，牧羊效果达到预期。

3.3 无人机牧牛实验

利用未搭载高空喊话器的无人机和搭载高空喊话器的无人机分别在牛群中心和尾部驱赶牛群，共进行六次实验。从牛群反应时间、牛群运动状态、牛群运动方向的准确性三方面判断无人机牧牛效果。在驱赶过程中，无人机的飞行高度速度和飞行方向根据牛群的运动状态实时调整。无人机牧牛实验驱赶过程和效果见表 5、图 2。

表 5 无人机牧牛实验参数表

驱赶家畜种类	牛群	牛群	牛群	牛群	牛群	牛群
实验时间	2020.08.24 15:15	2020.08.24 16:07	2020.08.25 18:08	2020.08.27 18:30	2020.08.31 09:12	2020.08.31 17:50
经/纬度坐标(°)	119.946,2 49.331,7	119.941,4 49.324,3	119.892,6 49.309,5	119.893,4 49.310,0	119.857,3 49.301,5	119.940,9 49.315,1
家畜数量/只	17	16	50	50	57	23
是否携带喊话器	否	是	否	是	否	是
飞行高度/m	10	10	2	2	5	6

实验过程与结果说明如下。

(1) 牛群 1

驱赶方式和过程：未搭载喊话器飞行至牛群中心位置，沿着目标驱赶方向俯冲驱赶。

牧牛效果：靠近无人机的牛群停止运动观望无人机，在无人机向下俯冲时向远离无人机方向缓慢移动；牛群反应时间长、运动状态混乱、运动目标方向不明确。

(2) 牛群 2

驱赶方式和过程：搭载喊话器飞至牛群中心位置，在牧民喊话辅助下俯冲驱赶牛群。

牧牛效果：部分个体停止运动观望无人机，其余部分牛群，缓慢移动，反应时间较长，运动状态混乱、无规律，运动目标方向不明确。

(3) 牛群 3

驱赶方式和过程：未搭载喊话器飞行至牛群尾部沿着牛群行进方向俯冲驱赶。

牧牛效果：牛群尾部个体向远离无人机的方向运动，运动速度缓慢、反应迟钝，牛群整体运动状态稳定，运动目标明确。



图 2 无人机牧牛实验效果

(4) 牛群 4

驱赶方式和过程：搭载喊话器飞行至牛圈内牛群尾部在牧民喊话辅助下俯冲将牛群驱赶出圈。

牧牛效果：牛群尾部部分个体观望无人机，在无人机俯冲时牛群朝远离无人机方向运动，移动缓慢、反应迟钝，运动状态稳定，运动目标方向明确。

(5) 牛群 5

驱赶方式和过程：未搭载喊话器飞行至牛群尾部，沿着目标方向俯冲驱赶；飞行至脱离群体个体附近，沿着目标方向俯冲驱赶。

牧牛效果：尾部牛群朝向无人驱赶方向移动，运动速度缓慢、反应时间长，运动状态混乱；单个个体驱赶时，个体反应迟钝、移动速度缓慢、运动状态稳定。

(6) 牛群 6

驱赶方式和过程：搭载喊话器飞行至牛群尾部在牧民喊话辅助下俯冲驱赶；飞行至脱离群体个体附近，沿着目标方向俯冲驱赶。

牧牛效果：尾部牛群朝向无人驱赶方向移动，运动速度缓慢、反应迟钝，运动状态稳定；单个个体驱赶时，个体反应迅速、移动速度快、运动状态稳定。

经实验分析，无人机在牛群尾部的驱赶效果优于在牛群中心位置的驱赶效果；利用搭载高空喊话器的无人机牧牛效果优于未搭载高空喊话器的无人机放牧效果。

牛群的群居倾向弱，进食时站位分散，利用无人机驱赶牛群时需针对离群个体进行单独驱赶。无人机以 10 m 飞行高度飞至牛群中心位置时，靠近无人机的个体停止运动并注视无人机；操纵无人机向下俯冲驱赶，距离无人机较近的牛会朝远离无人机的方向运动，但外围远离无人机的个体运动状态未改变，牛群整体的运动状态受到无人机俯冲驱赶的影响较弱。未搭载喊话器的无人机以 2 m 飞行高度飞至牛群尾部俯冲驱赶时，尾部的牛缓慢向无人机飞行方向后退，前方牛群受到尾部牛群后退运动的影响也随之向无人机飞行方向运动，牛群整体向无人机驱赶方向缓慢移动；当牛群离开无人机噪声范围一段距离后牛群减速，此时驱使无人机继续在牛群尾部俯冲驱赶牛群继续无人机驱赶方向缓慢运动。搭载高空喊话器的无人机以 2 m 的飞行高度在牛群尾部驱赶时牛群运动状态更稳定，牧民通过对

讲机向牛群喊话，牛群听到声音后反应迅速，且保持相对稳定的速度向无人机驱赶方向运动。对比后四组无人机牧牛实验发现：傍晚时无人机驱赶畜群时牛群的运动状态最好。牧民通常在下午六时左右将牛群驱赶回圈，牛群已经形成了生物钟，无人机在此时稍加驱赶牛群便朝向目标方向移动。

3.4 无人机牧驴实验

利用未搭载喊话器的无人机和搭载喊话器的无人机分别在驴群中心和尾部驱赶驴群，一共进行三组实验。从驴群反应时间、驴群运动状态、驴群运动方向的准确性三方面判断无人机牧驴效果。在驱赶过程中，无人机的飞行速度和飞行方向根据驴群的运动状态实时调整。无人机牧驴实验驱赶过程和效果见表 6、图 3。

表 6 无人机牧驴

驱赶家畜种类	驴群	驴群	驴群
实验时间	2020.08.31 14:48	2020.08.31 15:10	2020.08.31 15:30
经/纬度坐标(°)	119.938,3, 49.315,3	119.937,2, 49.313,9	119.933,9, 49.313,5
家畜数量/只	15	15	15
是否携带喊话器	否	否	是
飞行高度/m	5.5	6	5
驱赶方式和过程	飞行至驴群中心位置，朝着驴群中母驴运动行进方向俯冲驱赶	飞行至驴群尾部，沿着驴群运动的方向俯冲驱赶	无人机搭载高空喊话器飞至驴群尾部，在牧民喊话辅助下沿着与驴群运动方向俯冲驱赶
牧驴效果	在无人机飞至驴群中心时驴群散开；在无人机俯冲时迅速向驴群中母驴靠拢并且沿着无人机飞行方向快速运动，运动状态稳定、有序，群体目标方向明确	位于尾部的少数个体注视无人机，在无人机俯冲时迅速向母驴靠拢、并且快速沿着无人机飞行方向运动，运动状态稳定、有序，群体目标方向明确	牧民喊话时，驴群注视无人机，在无人机俯冲时迅速靠拢、并且快速沿着无人机飞行方向运动，运动状态稳定、有序，群体目标方向明确



图 3 无人机牧驴实验效果实拍照片

驴性格温驯,胆小,对外界环境变化敏感,且奔跑速度快。未搭载喊话器的无人机和搭载喊话器的无人机向下俯冲驱驴群时,驴群均迅速向母驴靠拢,并随着母驴一起朝向无人机驱赶方向快速运动。第三次牧驴实验无人机飞至驴群尾部时,尾部个别个体驻足注视无人机,牧民用对讲机向驴群喊话驱赶后,离群个体迅速转身奔向母驴。三次牧驴实验均成功将驴群赶至畜圈水槽处。

3.5 不同家畜种类无人机放牧效果对比

对比无人机牧羊、牧牛、牧驴实验发现,无人机放牧效果良好,且无人机驱赶羊群和驴群的效果优于驱赶牛群。羊群和驴群的群居倾向强,且个体的行动更容易受到群体行动的影响,因此无人机通过控制畜群中的关键个体驱赶整个畜群。畜群对外界噪音反应程度由强到弱依次是羊群、驴群、牛群。牧民喊话的声音能明显刺激并影响羊群和驴群的行动,而牛群对声音的抗干扰能力较强,驱赶时要长时间喊话并用无人机多次俯冲驱赶。在牧羊过程中,羊群对无人机驱赶存在一个适应的过程,无人机从开始下降到进入羊群听力范围内的一段时间里,羊群会因受到噪音的干扰迅速散开朝向某个不确定方向奔跑,待羊群对无人机噪音熟悉后,以15 m左右的飞行高度从羊群一端驱赶效果最好。并且在牧民喊话辅助的情况下驱赶效果明显优于单独利用无人机驱赶效果。此外,不同体量的羊群驱赶效果无差异,八组实验中均成功利用无人机驱赶羊群。畜群运动稳定性强弱依次是驴群、羊群、牛群。在无人机驱赶畜群的过程中,驴群的运动表现最为稳定,幼驴始终围绕母驴运动;羊群在受到外界声音干扰后会迅速集中在一起朝着某一方向运动,偶尔会跑散分成两部分,稍加驱赶会再次迅速聚集;牛群驱赶时部分个体运动缓慢且整体站位相对分散,运动速度不协调,为确保牛群朝驱赶方向运动往往还需要牧民或牧羊犬协助。

牧驴实验具有特殊性,一是呼伦贝尔草原牧驴人较少;二是实验对象的驴群是母驴及其幼崽组成的特殊群体,该群体的行动极大程度上受到母驴行动的影响。经过实验发现母驴对无人机和牧民的声音反应均敏感,在驱赶过程中幼崽围绕母驴运动,在牧民喊话辅助下驴群的运动状态以及方向都表现良好。牛群对无人机噪音的反应较弱,在利用无人机驱赶牛群时需将无人机调整至距离牛群2–3 m左右驱赶,并且在驱赶过程中需根据个体反应情况及时调整无人机机位。

4 无人机放牧应用的问题和挑战

无人机在空中高度灵活,搭载高分辨率相机的无人机可帮助牧民了解牧区畜群的情况。国内外已有很多利用无人机放牧的案例,且放牧效果良好。但目前而言无人机放牧在草原的应用仍存在一些问题和挑战。

(1) 草原牧场无人机放牧的自动化程度不足。无人机操作简单使用灵活,但在放牧过程中依旧需要牧民主动操控无人机寻找牧群,对牧民依赖程度大。目前已有学者研发了基于无人机的目标识别和跟踪算法,但跟踪系统还未集成应用,自动跟踪识别的可靠性还有

待检验。

(2) 无人机电池续航能力有待提高。由于无人机自身最大承重的限制使得电池的规格限定在一定范围内。以大疆无人机为例,空载起飞最大续航时间约为30分钟。目前市场上无人机电池充电时间普遍较长,为了确保无人机作业时长需要携带多块备用电池,此外在牧区范围较大时,还需骑行摩托车前往驱赶地点。如何优化电池解决方案,延长无人机单次作业时长的问题亟待解决。

(3) 无人机定位系统精度稳定性不足。目前无人机定位导航主要采用GPS和北斗双星模式,各大无人机厂商基于导航卫星定位系统已对巡航算法进行优化,使定位精度达到米级。但无人机在高纬度地区作业时,容易受地形、天气等客观条件影响,导航卫星信号受到干扰致使无人机脱离预定轨道,精度稳定性不足的问题有待解决。

(4) 无人机图传等通讯能力有待提高。无人机与地面控制端主要进行图像传输(图传)、数据传输(数传)以及遥控交互。市场上大部分无人机在无信号遮挡的情况下最大信号传输距离为4~7 km,然而在很多复杂情况下实际信号传输距离达不到此标准,无法满足远距离放牧的需求。此外,目前的网络基站不能完整覆盖整个飞行空域,无人机远距离放牧容易出现图传信号丢失、地面端对无人机的遥控延迟的状况。如何增强无人机的数据传输能力与信号传输能力是限制无人机放牧的关键难题。

(5) 无人机放牧过程中副产的海量地理数据未充分利用。搭载高分辨率光学相机的无人机是地理学、草地学、生态学等多学科中收集近地地表地形数据的重要工具。无人机在放牧驱赶、畜群搜寻以及监测过程中会产生大量的地表影像数据,这些数据不仅包含地理位置等属性信息还包括地表形态、地物种类等信息。这些海量的影像可经过系统组织、过筛选过滤,可作为牧区范围内的草地状况评估、检测的数据来源,具有重要意义。而目前无人机放牧过程中所副产的海量影像信息还缺乏有效的管理手段,如何组织建立影像数据库还有待研究。

5 展望

无人机是实现放牧自动化的重要工具,其在草原放牧管理中发挥着越来越重要的作用。本文介绍了无人机放牧的相关技术及发展现状,总结了国内外无人机在放牧中的应用,并结合呼伦贝尔无人机放牧家畜实验分析了无人机放牧的效果和可行性。近年来,研究人员探索了一系列创新技术来满足复杂场景下对无人机硬件的高要求。随着人工智能、新型电池、5G通讯等新技术的深入研究及推广,无人机在草原放牧管理的相关技术应用将进入全新的发展阶段,实现高度自动化的无人机放牧指日可待。

(1) 人工智能助力无人机放牧向高自动化发展。近年来,目标跟踪算法的应用与实践逐渐趋向成熟,大量的研究表明了卷积神经网络在图像识别领域与目标跟踪的高效性与可行性。搭载智能跟踪模块的无人机技术研究将成为亮点。

(2) 家畜监控系统促进提升无人机放牧软实力。国内外研究者们做了大量的基于无人

机地面野生动物识别研究,取得了丰硕成果。王东亮等研制了基于无人机的畜群实时识别系统,实现了家畜的在线识别、计数和体重估算,且精度高达90%以上。针对密集畜群的识别时,误差较大。未来通过丰富样本库数据和模型改进,将更精准地实现家畜低误差识别,辅助牧民实现家畜自动化管理。

(3) 新型电池材料成就无人机超长续航。就市场上现有的小型固定翼和多旋翼无人机而言,其动力来源以锂离子动力电池为主,电池的两极材料对性能及成本起着决定性作用。硅碳复合材料是一种新型电极材料,各大锂电池厂商纷纷开始研究,部分厂商通过硅碳包覆、掺杂等手段尝试解决硅碳复合材料充放电时体积膨胀、吸液能力强以及循环寿命差的问题,并且取得了一定成就。作为未来负极材料的一种,硅碳复合材料理论克容量约为4,200 mAh/g,比石墨类负极的372 mAh/g高出了10倍有余,待其产业化后,将大大提升电池的容量,延长无人机续航时间。此外,纳米管和气凝胶电池的应用也将大幅度提高无人机的长时作业能力。

(4) 5G通讯模块辅助无人机做牧民的“天眼”。5G通讯最大的特点就是超大带宽,理论上,5G的带宽可以达到20 Gbps以上。在减低信号干扰方面,5G可采用铺设大规模天线较窄波束对准服务用户,进而减弱用户区间内的相互干扰,为无人机低空通信提供可靠保障。5G泛在网络可提高飞行距离和定位精度,解决无人机操控距离的限制。此外,5G网络具有超低时延的特性,能够提供毫秒级的传输时延,这意味着拥有5G通讯能力的无人机对地面控制端指令响应更快,对放牧过程中经过复杂地形的避障能力进一步提高。

(5) 地理空间数据云主助力构建无人机草地监测大数据体系。搭载高分辨率可见光传感器的无人机放牧过程中可自发获取地面正射影像,无人机在草原牧业领域大量应用后会生产大量草地影像数据。这些海量的数据按照一定格式化以一定组织方式排列同步上传至云端,可形成基于地理空间数据云的草地大数据。经过影像拼接、数据信息挖掘等生成一些列多时段草地近地遥感影像,可对草原监测、畜牧业可持续发展等形成有力支持,同时为辅助政府制定草地发展政策。

(6) 地面监控系统与无人机结合,构建空地一体化畜牧检测平台。地面监控系统(例如球机摄像头)具有区域目标自动跟踪和锁定精确跟踪功能,可实现大范围连锁监控,在草原牧场管理与放牧中有巨大的应用潜力。与无人机相比,高清摄像头监控系统具有全天候、全天时、长时定点监测等优势,可一定程度上弥补无人机远程监控的不足。将无人机与地面监控系统结合可实现对牧区的区域化管理,通过摄像头监控畜群运动状态,对部分“问题”个体单独利用无人机监控或驱赶,形成动静结合的空地一体化畜牧检测体系。

作者分工: 王东亮对数据集开发及无人机放牧实验做了总体设计;张智宇采集和处理了无人机数据,并撰写了数据论文等。

利益冲突声明: 本研究不存在研究者以及与公开研究成果有关的利益冲突。

参考文献

- [1] 高娟婷, 孙飞达, 霍霏等. 无人机遥感技术在草地动植物调查监测中的应用与评价[J]. 草地学报, 2021, 29(1): 1–9.
- [2] 张云秀, 曾庆达, 张伟. 无人机发展综述[J]. 河南科技, 2017(9): 58–59.
- [3] 张伟华. 民用无人机技术在漳卫南运河流域的具体应用及前景分析[J]. 海河水利, 2018(4): 65–67.
- [4] 陈玉福, 刘彦随, 阎建苹. 论我国草原牧区畜牧业与乡村发展[J]. 地理科学进展, 2005(3): 17–24.
- [5] 陈一. 经济发展带来变化: 摩托车改变青海藏人的生活[N/OL]. Global Times, 2016, 2006-07-28.
- [6] 李蕊娟. 驾着直升机放牧: 我在澳洲当“美女牛仔”[J]. 成功之路, 2012(4): 32–34.
- [7] 廖小罕, 周成虎, 苏奋振等. 无人机遥感众创时代[J]. 地球信息科学学报, 2016, 18(11): 1439–1447.
- [8] 李志敏, 付芳芳, 徐新霞等. 基于无人机的动植物种群数量统计系统的研制[J]. 电子世界, 2019(13): 15–17.
- [9] 徐源新. 基于无人机技术的大鸨与雁鸭类调查研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2020.
- [10] 王方, 郑璇, 马杰等. 无人机技术在中国野生亚洲象调查研究及监测中的应用[J]. 林业建设, 2019(6): 38–44.
- [11] Vermeulen, C., Lejeune, P., Lisein, J., *et al.* Unmanned aerial survey of elephants [J]. *PLoS ONE*, 2013, 8(2): e54700.
- [12] 罗巍, 邵全琴, 王东亮等. 基于面向对象分类的大型野生食草动物识别方法——以青海三江源地区为例[J]. 野生动物学报, 2017, 38(4): 561–564.
- [13] Hodgson, J. C., Mott, R., Baylis, S. M., *et al.* Drones count wildlife more accurately and precisely than humans [J]. *Methods Ecol Evol*, 2018, 9: 1160–1167.
- [14] Linchant, J., Lhoest, S., Quevauvillers, S., *et al.* UAS imagery reveals new survey opportunities for counting hippos [J]. *PLoS ONE*, 2018, 13(11): e0206413.
- [15] 吴方明, 朱伟伟, 吴炳方等. 三江源大型食草动物数量无人机自动监测方法[J]. 兽类学报, 2019, 39(4): 450–457.
- [16] Li, X. P. “UAV herding cattle” makes agriculture and animal husbandry at the forefront of fashion [N/OL]. *Agricultural Science and Technology*, 2020. 2020-01-06. http://www.eb.nkb.com.cn/nykjb/20200701/html/page_07_content_001.htm.
- [17] Carrick. UAV herding in Zeeland: “Air Sheepdog” [N/OL]. *Asia Times*, 2020. 2020-01-06. <http://atimescn.com/TechnologyView-11547.html>.
- [18] Wang, C. British ranchers use UAV to “her sheep” [N/OL]. *NetEase News*, 2016. 2016-03-15. <https://www.163.com/tech/article/BI76BMAT00094P0U.html>.
- [19] Sensv. UAV herding sheep, AI pig raising, this may be the future of agriculture [N/OL]. *World Wide Web*, 2019. 2015-04-08. <https://uav.huanqiu.com/article/3wRvosxFoLA>.