

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2417697

基于无人机的光伏清洁机器人转运系统研究^{*}

张 白 丁启翔 孔德超

(北方民族大学 电气信息工程学院 银川 750021)

摘要: 针对光伏清洁机器人在沙戈荒地区中因运输不便导致作业效率降低的问题,本文提出了一种基于无人机的光伏清洁机器人空中转运系统。首先设计一种近红外光源引导标志,采用 OPENMV 模块进行图像识别,利用阈值分割法与边缘识别法构建引导标志识别算法,提高引导标志的定位精度与抗干扰性。其次设计锥形吸附式对接结构与平行对称式归中对接结构,实现倾斜条件下光伏清洁机器人与无人机的对接问题。最后研制了无人机与两种对接平台样机,并开展了无人机视觉定位精度实验以及对接平台转运实验。实验结果表明,无人机视觉定位误差在 10 cm 内,能够有效降低外界环境对识别效果的干扰。两种对接平台能够适应光伏板架设倾角 40° 以内的对接作业需求,且对接成功率稳定在 90% 以上,满足对接稳固和脱离简单的作业需求。

关键词: 光伏清洁机器人;无人机;视觉定位;电磁吸附;对接平台

中图分类号: TP273;TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8060

Research on transfer system of photovoltaic cleaning robot based on UAV

Zhang Bai Ding Qixiang Kong Dechao

(School of Electrical Information Engineering, North Minzu University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: To address the problem of reduced operational efficiency of photovoltaic cleaning robots caused by inconvenient transportation in the desert area of Shago, an aerial transfer system for photovoltaic cleaning robots based on drones was proposed in this study. Initially, a near-infrared light source guide sign was designed, and the OPENMV module was employed for image recognition. The threshold segmentation method and edge recognition method were applied to construct a guide sign recognition algorithm, enhancing the positioning accuracy and anti-interference capability of the guide sign. Subsequently, a conical adsorption docking structure and a parallel symmetrical centering docking structure were designed to solve the docking issues between photovoltaic cleaning robots and drones under inclined conditions. A prototype of the drones and two docking platforms was then developed, and experiments were conducted on the visual positioning accuracy of drones and the transportation performance of the docking platforms. The experimental results indicate that the visual positioning error of drones remains within 10 cm, effectively reducing the external environment's interference on the recognition effect. Both docking platforms adapt to docking operation requirements at photovoltaic panel inclination angles within 40 degrees, achieving a docking success rate consistently exceeding 90%, thereby meeting the operational requirements for stable docking and simple separation.

Keywords: photovoltaic cleaning;drones;visual positioning;electromagnetic adsorption;docking platform

0 引 言

光伏发电效率与光伏组件积灰状态密切相关,为了保障光伏发电效率,定期清洗光伏组件成为光伏电站的常规工作。当前清洁机器人因其高效智能等优点已成为光伏清洁领域内的新焦点^[1-2]。西北“沙戈荒”地区已成为光伏电站建设的主要场地,然而该类环境的特殊性也为清洁机器

人的维护和管理带来了诸多挑战。例如:如何在沙戈荒环境中实现较少人工干预的精准放置与回收,仍是光伏清洁领域亟待解决的难题。由于无人机的空中飞行灵活性的特点,设计基于无人机的空中转运系统则是解决上述问题的有效方案之一^[3]。

要想通过无人机进行清洁机器人的转运作业,高精度的位置信息不可或缺。传统 GPS 定位不仅存在累积误差,

收稿日期:2024-12-21

* 基金项目:国家自然科学基金(52465062)、宁夏自然科学基金(2022AAC02045)项目资助

且定位精度也无法满足作业需求^[4]。随着机器视觉技术的发展,视觉定位逐渐成为无人机导航的辅助解决方案^[5]。无人机可通过机载视觉设备提取出图像的有效信息,例如颜色、形状等,并根据算法解算出无人机与目标中心的相对位置偏差^[6-7]。孟学斌等^[8]设计一种由同心圆环和正三角形组成的定位标志,使得无人机在不同高度都能获得较好的定位精度。但该方式不适合夜间和强光条件下工作,定位精度受光线影响较大。郭佳倩等^[9]设计了一种嵌套式 Apriltag 识别标志,保证定位精度的同时提高了动态跟踪性能。但该方式需要设计面积较大的标志才可以实现无人机的精准降落,不适用光伏机器人的转运工作。洪富祥等^[10]利用不同尺寸、不同颜色的同心圆为无人机提供精准降落信息。但该方式需要设计大尺寸同心圆且无法在弱光条件下应用。

本文以研究光伏清洁机器人无人机转运平台为主要目的,设计一种基于红外视觉的无人机定位方案,使得无人机在沙戈荒环境下应用机器视觉来获取精准定位,并能够在全天候的环境下保持识别精度。同时设计锥形吸附式对接结构与平行对称式归中对接结构,用于完成不同作业场景下的无人机与清洁机器人对接工作。并将定位引导标志集成至对接平台,为解决无人机执行转运任务中定位与投放回收的难题,为光伏清洁领域实现高效化、智能化作业提供有利技术支持。

1 系统总体设计

为实现光伏清洁机器人的精准定位与空中转运,本文设计的无人机空中转运系统包括:无人机平台与设置于光伏清洁机器人上方的对接平台。系统总体结构如图 1 所示。

为实现高效转运作业,无人机首先通过 RTK 定位至目标位置附近。然后通过视觉识别定位标志并不断校正姿态,确保其位置全程在对接允许的误差范围内。通过气压计和加速度计完成高度控制,当达到对接高度范围时,无人机向对接平台发送指令,使其打开电磁吸附并完成对接作业。无人机与清洁机器人对接完成后会进行系统判断,当该区域还存在未进行清洁作业的光伏板且二者电量满足再次作业条件,则无人机将光伏清洁机器人转运至下一工作地点进行作业,否则无人机转运机器人返回至基地。

2 系统硬件设计

2.1 引导标志设计

为使无人机视觉能够获得更好的定位精度,本文采用红外光源来构建引导标志。该方式既可以有效弱化背景、环境光等干扰对视觉识别的影响,又可以作为标志物使识别特征点全部点亮。为了使系统有更好的穿透力和环境适应性,本文选择近红外 LED 灯珠作为光源。市面常见的红外 LED 光源波长主要有 850 nm 和 940 nm 两种^[11]。而由

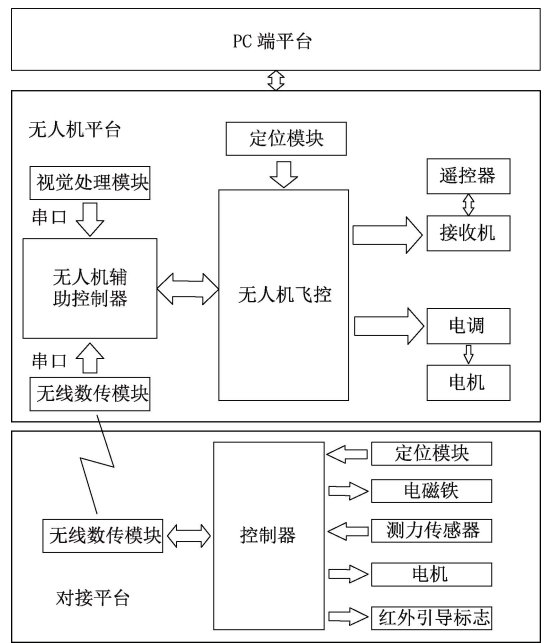


图 1 系统总体结构

Fig. 1 The overarching architecture of the system

于单目相机对于光线的敏感度一般随着波长的增加而逐渐减弱,所以本文选用波长为 850 nm 的红外 LED 搭建引导标志。

本文设计的圆环状红外引导标志包括光源电路板与电源驱动模块,如图 2 所示。圆环半径为 10 cm,可以直接固定至对接平台上方,在满足高空视觉识别性能需求的同时又提高了空间利用率^[12]。其中光源电路板是由 24 个功率 5 W 的红外 LED 构成,通过 3 并 8 串的连接方式排列成圆环状,这种均匀对称的布局方式使得红外灯珠在各个方向上的光照度更加均匀。

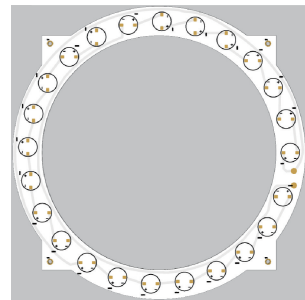


图 2 红外引导标志

Fig. 2 Infrared guide sign

2.2 锥形吸附式对接平台设计

本文设计一种锥形吸附式对接平台结构,用于解决 20° 内光伏阵列倾角条件下无人机与光伏清洁机器人对接问题。该结构采用电磁吸附技术与锥形自导向结构相结合,能够在对接过程中提供较大的容错范围和较高的对接精度。通过锥形导向结构,无人机可以在一定悬停误差的情况下借助于锥形自导向特性顺利完成磁性材料的对接导

入,而电磁铁吸附机制则确保对接的持续稳定。此外,对接平台还配备了微型测力传感器,用于实时监控对接状态,确保在转运过程中对接的可靠性与安全性,具体结构如图 3 所示。

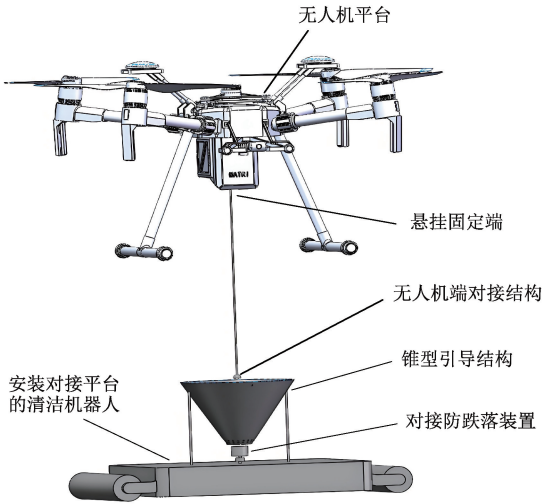


图 3 锥型吸附式对接平台示意图

Fig. 3 Schematic diagram of conical adsorption docking platform

对接平台的整体结构由三大部分组成:无人机端的对接结构、设置于光伏清洁机器人上方的引导结构以及对接防跌落装置。无人机通过固定于机体正下方的碳素纤维绳悬挂一个铁质半球,作为无人机端对接结构。安装于清洁机器人上方的对接平台包括锥形引导结构以及对接防跌落装置,其中锥形引导结构半径为 10 cm,以适应无人机视觉定位的最大误差。其顶部安装本文设计的环状识别标志,可被视觉模块捕获并为无人机精准定位提供基准。对接防跌落装置由上下两部分组成,上半部分为电磁铁,当铁半球通过结构滑至对接平台正上方时,电磁铁通电吸合完成对接。下半部分装有微型测力传感器,对接完成后可通过获取传感器的数据来判断此次对接是否稳固,预防转运过程中发生跌落风险造成意外事故。

2.3 平行对称式归中对接平台设计

为了拓展无人机空中转运系统的作业场景,解决大倾角条件下的光伏清洁机器人转运对接问题,本文设计了一种平行对称式归中对接平台结构。该结构延续了电磁吸附与柔性引导的理念,通过分层平行归中结构实现目标在不同方向上的自动归中,确保无人机悬挂的铁质半球能够定位至平台中央的电磁铁上方,从而达到精准对接的效果。上层结构由左右方向通过弹簧固定的丝杆进行归中,下层结构则由前后方向通过弹簧固定的丝杆进行归中,对向两根丝杆间采用碳纤维线进行固定连接,并通过绕线导轮连接至电机转子端。当平台接收到对接指令后,电机转动会带动两端的丝杆逐渐向中心聚拢,通过上层和下层丝杆间的协调约束,使落在平台任意点位的铁半球最终都能被有效引导至中心处的电磁铁上方,进而完成吸附对接。如

图 4 所示为平行对称式归中对接平台示意图。

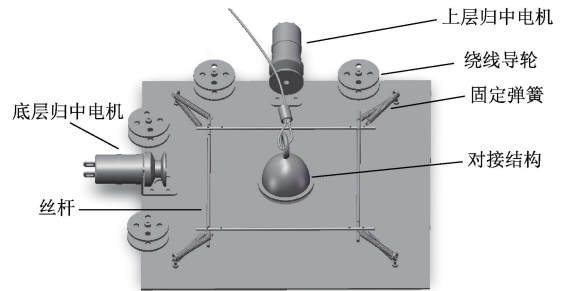


图 4 平行对称式归中对接平台示意图

Fig. 4 Parallel symmetrical centering docking platform schematic diagram

平行对称式归中对接结构用于解决倾角 40° 以内的光伏清洗机器人转运对接需求。通过两层丝杆的协调作用,不仅保证了无人机对接端在归中过程中的位置调整,还能有效防止对接端在归中时掉落,从而进一步增强了对接的稳定性和可靠性。

3 系统软件设计

3.1 图像识别流程

视觉模块的作用是识别定位引导标志,系统通过采集到的引导标志解算出目标圆的圆心与半径,以便为无人机动态调整飞行姿态提供数据支撑。本文利用阈值分割法与边缘识别法构建识别算法^[13]。具体算法流程如图 5 所示。

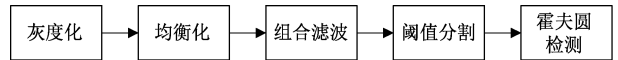


图 5 图像识别算法流程

Fig. 5 Image recognition algorithm flow

第 1 步选用加权平均法对彩色图像进行灰度化处理,根据视觉对不同颜色亮度的敏感性,分别对 RGB 3 个通道赋予不同的权重,再通过加权求和取得最终的图像灰度值;第 2 步对图像进行直方图均衡化处理,以增强图像对比度及成像质量;第 3 步在灰度化与直方图均衡化处理的基础上进一步进行组合滤波处理,以便降低无人机的轻微高频抖动和自然光的变化对图像产生的噪声干扰^[14]。本文应用中值滤波与高斯滤波组合方式对噪声进行处理,以减小引导标志的视觉误识率;第 4 步采用阈值反二值化方法,对处理后的图像进行分割操作,将引导标志与背景分离开^[15];最后一步采用 Hough 识别算法对处理后的图像进行特征识别,并提取出圆心坐标与半径。

3.2 无人机相对位置解算

在视觉引导无人机对接的过程中,首先通过 RTK 将无人机定位至引导标志位置,当视觉识别模块识别到引导标志时开始进行无人机姿态校正。当返回的偏移量连续小于预设的偏移阈值后,系统控制无人机定速下降并循环校正,直至无人机高度满足与清洁机器人的对接条件。系统

首先估算无人机与标志物的相对位置,然后根据这一位置关系对无人机的水平位置进行控制,并逐步引导无人机飞行至标志物正上方^[16]。由空间成像原理可得到无人机与标志物在 X 轴和 Y 轴上的水平位置偏移量如式(1)所示。

$$\begin{cases} X_f = \frac{P_s(P_x - T_x)H}{f} + H \tan(\theta) - X_0 \\ Y_f = \frac{P_s(P_y - T_y)H}{f} + H \tan(\phi) - Y_0 \end{cases} \quad (1)$$

其中, X_f 和 Y_f 分别是无人机大地坐标系下无人机水平 X 方向和水平 Y 方向与引导标志中心的相对偏差。 P_s 为镜头中每个像素单元对应的物理距离, P_x 、 P_y 为整个图像平面的中心点像素坐标值。本模块镜头设定值为 120 和 160; f 为模块镜头焦距, H 为无人机由气压计获取的垂直对地高度。 θ 、 ϕ 分别为无人机的横滚角和俯仰角。由于实际条件限制,导致视觉模块的安装位置与机身中央存在一定偏差,所以需要通过测量标定以获取镜头与机体正中心在水平 X 方向和 Y 方向上的偏移量 X_0 、 Y_0 。

3.3 无人机对接控制过程

无人机视觉引导定位过程中 OPENMV 视觉处理模块实时捕获镜头视野内的图像,同时不断检测视野内是否出现引导标志信息,并根据所获得的图像数据来估算出无人机的相对位姿偏移。当无人机视野内检测到目标圆环图像后,系统通过算法实时计算出图像中心坐标,并将其与视觉模块的镜头中心坐标进行比对,从而获取无人机中心与引导标志中心之间的相对偏移量。然后无人机根据实时反馈的偏移量来进行位姿校正。当水平精度误差达到要求时,系统进入对接阶段,无人机开始缓慢下降高度,在下降过程中若出现识别目标丢失或者识别错误,则无人机重新向上高度并进行识别。当下降至满足对接所需高度时,无人机再次进行误差判定,如果此时误差小于 10 cm,悬停进行对接作业,否则无人机上高度并重新进行位姿校正。具体对接流程如图 6 所示。

4 实验与分析

4.1 实验平台搭建

为了开展无人机空中转运系统的相关实验,本文研制了无人机平台和吸附式对接平台的实物。无人机平台主要由飞控、视觉模块 OPENMV、无人机辅助控制器以及无人机机体套件组成。本文搭建的四旋翼无人机平台如图 7 所示。机身尺寸为 780 mm×780 mm×460 mm,正下方安装视觉模块以及悬挂对接端,满足转运系统应用需求。

本文研究的基于无人机的光伏清洁机器人转运系统应用前提是在常规天气条件下进行作业,不满足无人机起飞条件以及光伏清洗作业的极端天气条件,无需开展光伏清洗作业。因此未开展雨、雾、大风等复杂天气条件下的相关实验。

4.2 无人机视觉定位精度实验

本文通过无人机视觉定点悬停实验来验证其定位效

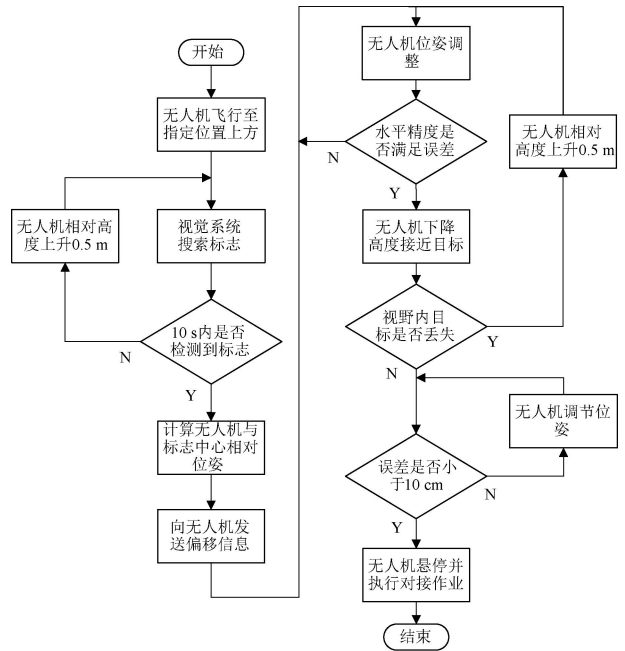


图 6 视觉引导定位流程

Fig. 6 Visual guidance positioning process



图 7 无人机实物平台

Fig. 7 UAV physical platform

果。无人机飞行进入视觉识别范围后,开始根据视觉反馈的数据进行姿态调整。然后逐步降落至一定高度并进行定点悬停,通过多次实验记录每次悬停过程的实际偏移误差。如图 8 所示,展示了无人机在视觉校正部分过程中的水平方向上误差变化情况。

为了验证近红外引导标志的抗干扰效果和引导定位算法的识别效果,分别在不同光照环境下进行视觉定位实验,并记录最终定位误差,如表 1 所示。

由表 1 可知,无人机在不同光照环境下的视觉定位误差最大值为 9.5 cm,最小值为 4.5 cm,平均误差在 6.5 cm。在实际应用中,上述误差满足光伏清洁机器人空中转运系统对视觉定位的要求。

4.3 吸附式对接平台转运实验

为了模拟无人机与清洁机器人在不同光伏组件倾角下的对接转运过程,本文分别对两种吸附式对接平台进行实

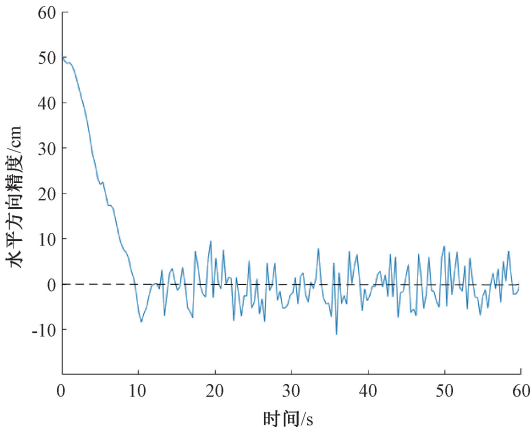


图 8 水平方向相对误差

Fig. 8 Relative error in horizontal direction

表 1 无人机定位误差

Table 1 UAV positioning error

序号	环境	定位误差/cm
1	白天强光	8.5
2	白天强光	9.5
3	白天强光	8.5
4	白天强光	8.0
5	白天强光	7.8
6	白天强光	8.3
7	白天强光	8.0
8	白天强光	7.5
9	白天强光	7.6
10	白天强光	8.8
11	白天多云	7.5
12	白天多云	7.0
13	白天多云	7.2
14	白天多云	6.2
15	白天多云	6.8
16	白天多云	6.5
17	白天多云	7.0
18	白天多云	6.0
19	白天多云	5.0
20	白天多云	6.5
21	夜晚无光	4.5
22	夜晚无光	5.0
23	夜晚无光	4.8
24	夜晚无光	4.6
25	夜晚无光	4.6
26	夜晚无光	4.5
27	夜晚无光	4.8
28	夜晚无光	5.0
29	夜晚无光	4.7
30	夜晚无光	5.0
平均值	—	6.5

验。分别为 0° 光伏组件倾角下的锥型对接结构转运实验以及 40° 光伏组件倾角下的平行对称式归中对接结构转运实验。

无人机转运高度设为 3.3 m, 并将光伏清洁机器人初始位置放置在距离无人机 5 m 处进行模拟测试。图 9 展示了无人机与锥型对接结构转运作业的全流程。



图 9 锥型对接平台转运实验

Fig. 9 Conical docking platform transfer experiment

无人机与平行对称式归中对接结构执行完整转运作业的全流程,如图 10 所示。从图 10 中可以看出,在光伏板架设倾角 40° 且户外环境光线充足的情况下,无人机能够较准确的与装有归中对接平台的清洁机器人完成对接操作,并顺利执行完整的转运任务。验证了本文设计的归中对接平台在一定倾角的作业条件下仍旧具有良好的稳定性。

在同一实验条件下,重复进行多次上述实验,用于评估转运系统的成功率。观察无人机首次对接失败的情况下,是否能够依靠其恢复机制顺利完成对接任务。记录对接失败与最终成功率如表 2 所示。

总体来看,10 次实验中仅有 1 次在进行 3 次对接尝试后仍未成功,对接成功率达 90%,且本文无人机系统对接冗余次数可达 5 次,能够进一步提升对接成功率。实验结果表明本文设计的无人机空中转运系统具有良好的对接稳



图 10 归中对接平台转运实验

Fig. 10 Transfer experiment of Guizhong docking platform

表 2 无人机对接成功率测试

Table 2 UAV docking success rate test

序号	对接效果
1	首次对接成功
2	首次对接成功
3	3 次对接成功
4	首次对接成功
5	2 次对接成功
6	2 次对接成功
7	首次对接成功
8	3 次内对接失败
9	首次对接成功
10	2 次对接成功

定性 与 定位 精度。

针对 不同 倾角 光伏板 无人机 与 光伏 清洁 机器人 自主 转运 实验 结果 表明, 本文 设计 的 红外 引导 标志 和 对接 结构 可 以 根据 视觉 识别 获取 的 信息 引导 无人 机 与 清洁 机器人 完成 对接 作业, 能够 满足 不同 光照 环境 下 光伏 清洁 机器人 转运 需求。

5 结 论

针对 沙 戈 荒 环境 下 光伏 清洁 机器人 在 执行 作业 时, 往往 需要 依赖 大量 人力 进行 辅助 转运, 影响 作业 效率, 增加 维护 成本 等 问题。 本文 提出 了 一种 基于 无人 机 的 光伏 清洗 机器人 转运 系统。 系统 以 四 旋翼 无人 机 为 研究 对象, 结合 机器 视觉 研究 荒漠 环境 下 的 精准 定位 与 稳定 对接 技术, 设计 一种 近 红外 光源 引导 标志。 采用 OPENMV 模块 进行 图像 识别, 利用 阈值 分割 法 与 边缘 识别 法 构建 引导 标志 识别 算法, 提高 引导 标志 的 定位 精度 与 抗 干扰 性, 实验 结果 表明 定位 误差 稳定 控制 在 10 cm 以 内。 研制 了 适用 于 清洁 机器人 转运 的 吸附 式 对接 结构, 能够 解决 $0^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 光伏 组件 倾角 条件 下 的 无人 机 对接 问题。 实验 结果 表明 对接 成功率 稳定 在 90% 以上, 满足 对接 稳固 和 脱离 简单 的 作业 需求。

参 考 文 献

[1] 兰智, 梁凤芝. 海上漂浮式光伏电站中光伏组件性能影响因素分析及解决策略[J]. 太阳能, 2024(8): 29-35.
LAN ZH, LIANG F ZH. Analysis of factors affecting the performance of PV modules in offshore floating PV power stations and solutions[J]. Solar Energy, 2024(8): 29-35.

[2] 钟勇, 李方舟, 邱煌乐, 等. 一种适合大面积清扫的光伏板清洁机器人设计[J]. 科技与创新, 2023(11): 129-131, 134.
ZHONG Y, LI F ZH, QIU H L, et al. Design of a photovoltaic panel cleaning robot suitable for large-scale cleaning [J]. Science and Technology & Innovation, 2023(11): 129-131, 134.

[3] 陈浩安, 李晖, 黄瑞, 等. 基于树莓派 4B 的无人机动态追踪平台设计[J]. 电子测量技术, 2024, 47(6): 182-189.
CHEN H AN, LI H, HUANG R, et al. Design of dynamic tracking platform for unmanned aerial vehicle based on Raspberry Pi4B[J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(6): 182-189.

[4] TAHAR K N, KAMARUDIN S S. UAV onboard GPS in positioning determination [J]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2016, 41: 1037-1042.

[5] 张君轶, 陈仁文, 刘飞, 等. 基于嵌入式视觉的无人机目标定位系统[J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(2): 171-176.
ZHANG J Y, CHEN R W, LIU F, et al. UAV target positioning system based on embedded vision [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(2): 171-176.

[6] 陶孟卫, 姚宇威, 元海文, 等. 无人机自主降落视觉标

- 识设计及位姿测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(5):155-164.
- TAO M W, YAO Y W, YUAN H W, et al. Visual target design and pose measurement method for UAV autonomous landing[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(5):155-164.
- [7] 张小正, 周鑫, 陈丽娟, 等. 无人机视觉着陆位姿参数估计方法[J]. 电光与控制, 2017, 24(5): 26-29, 39.
- ZHANG X ZH, ZHOU X, CHEN L J, et al. Position and pose estimation for UAVs in visual landing[J]. Electronics Optics & Control, 2017, 24(5): 26-29, 39.
- [8] 孟学斌, 齐咏生, 李永亭, 等. 基于视觉的四旋翼无人机自主降落算法研究[J]. 控制工程, 2020, 27(10): 1751-1759.
- MENG X B, QI Y SH, LI Y T, et al. Study on autonomous landing system of quadrotor UAV based on vision[J]. Control Engineering of China, 2020, 27(10): 1751-1759.
- [9] 郭佳倩, 何东健. 农用无人机移动平台自主降落技术研究[J]. 农机化研究, 2022, 44(7):33-38.
- GUO J Q, HE D J. Research on autonomous moving platform landing technology for agricultural UAV[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(7):33-38.
- [10] 洪富祥, 陈冲, 丘仲锋. 一种基于机器视觉的无人机同心圆靶精准降落方法[J]. 量子电子学报, 2021, 38(3):307-315.
- HONG F X, CHEN CH, QIU ZH F. A precision landing method for unmanned aerial vehicle concentric round targets based on machine vision[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2021, 38(3):307-315.
- [11] 邱嘉聆, 付庄, 金惠良, 等. 体表血管近红外三维成像系统与识别算法研究[J]. 光学学报, 2023, 43(9): 196-205.
- QIU J L, FU ZH, JIN H L, et al. Near-infrared three-dimensional imaging system and recognition algorithm for subcutaneous blood vessels[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(9): 196-205.
- [12] 崔峻. PCB 与铝基板的组合焊接工艺研究[J]. 电子制作, 2020(12):95-96.
- CUI J. Research on combined welding technology of PCB and aluminum substrate[J]. Practical Electronics, 2020(12):95-96.
- [13] 王岩, 胡睿甫, 陈代鑫, 等. 基于自适应阈值分割改进 Canny 算子的管道边缘检测方法研究[J]. 光电子·激光, 2024, 35(2):164-170.
- WANG Y, HU R F, CHEN D X, et al. Research on pipeline edge detection based on improved Canny operator with adaptive threshold segmentation[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2024, 35(2): 164-170.
- [14] 林淑彬, 吴贵山, 姚文勇, 等. 基于光照自适应动态一致性的无人机目标跟踪[J]. 智能系统学报, 2022, 17(6): 1093-1103.
- LIN SH B, WU G SH, YAO W Y, et al. Unmanned aerial vehicles object tracking based on illumination adaptive dynamic consistency[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2022, 17(6): 1093-1103.
- [15] ZENG W P, CAI L SH, LIN ER M, et al. Design and production of tracking system based on OpenMV image recognition[C]. 2020 IEEE 5th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC). IEEE, 2020: 1198-1202.
- [16] 徐滔宏, 王志胜, 鹿山山. 基于视觉引导的无人机自主降落研究[J]. 机械与电子, 2020, 38(8): 44-46, 51.
- XU T H, WANG ZH SH, LU SH SH. Research on autonomous landing of UAV based on visual guidance[J]. Machinery & Electronics, 2020, 38(8): 44-46, 51.

作者简介

张白, 博士, 教授, 主要研究方向为现代精密测量技术与仪器。

E-mail: zhangbai6402@163.com

丁启翔, 硕士研究生, 主要研究方向为嵌入式系统开发。

E-mail: dingqixiang2000@163.com

孔德超(通信作者), 硕士, 工程师, 主要研究方向为现代精密测量技术与仪器。

E-mail: 1256919533@qq.com