
ADRR

树间机动与枝上栖息兼备的空中机器人：TreeSpider 树冠探索新方案

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/41880.html>

本文仅供学习交流之用，版权归作者所有，请勿用于商业用途！

ADRR 树间机动与枝上栖息兼备的空中机器人：TreeSpider 树冠探索新方案。



研究背景

森林树冠层是开展生物多样性调查、微环境观测与生态过程研究的重要空间，但其结构复杂、枝叶密集、可达性差，长期以来一直是环境监测中的难点区域。近年来，无人机与空中机器人在生态监测中的应用快速发展，为树冠观测提供了新的技术手段。然而，现有平台大多依赖自由飞行完成数据获取，在枝条密集、空间受限的树冠内部环境中，仍面临机动性不足、续航受限、环境扰动较大以及难以实施稳定接触式操作等问题。为应对上述挑战，本文提出了一种面向树冠探索与生态监测的新型机器人平台 -TreeSpider。该系统通过将系绳栖息机制、环形解耦结构、柔顺攀附机械臂以及叶片采样工具集成于同一空中平台，实现了在树冠内部的稳定停靠、局部运动控制与初步物理采样，为树冠原位监测提供了新的技术路径。

Research Article |  Open Access |  

TreeSpider: In-Canopy Exploration With Tether-Based Aerial Modular Arms

 This article relates to: 

[Luca Romanello](#) , [Tian Lan](#) , [Salaheldin Hassan](#), [Maximilian Leutschafft](#), [Erdem Ekinci](#),
[Sophie F. Armanini](#), [Mirko Kovac](#), [Basaran Bahadir Kocer](#)

First published: 30 January 2026 | <https://doi.org/10.1002/adrr.202500111>

文章概述

TreeSpider 是一种基于系绳的模块化空中机器人系统，其核心设计理念是通过将无人机锚定于树枝，借助外部支撑替代部分悬停需求，从而实现更高效、更稳定、对环境扰动更小的树冠内作业。系统采用环形机构实现系绳与机体运动解耦，使平台在锚定后仍具备一定的姿态与方向调节能力；机体下方集成的柔顺机械臂可执行树枝抓附与再次停靠；同时，平台还搭载了用于生态任务验证的叶片采样装置。

围绕该系统，我们开展了较为完整的研究工作，包括：

- 1) 面向树冠场景的系统总体设计；
- 2) 系绳约束下的平台动力学建模与分析；
- 3) 静态与动态控制方法设计；
- 4) 抓附保持性能、能耗与噪声特性实验评估；
- 5) 室内与室外场景下的任务验证。

研究表明，TreeSpider 能够在树冠环境中实现稳定停靠、受控运动与轻量级接触式操作，展现出在森林生态监测中的潜在应用价值。

图文导读

1. 树冠探索新思路：从自由飞行到附着式作业

本文首先提出了一种不同于传统树冠无人机的技术路线。相比依赖持续悬停完成观测的方式，Tr

eeSpider 通过系绳锚定于树枝，将树冠中的自然结构转化为可利用支撑点，使机器人能够在复杂环境中保持稳定工作状态。这一思路有助于缓解高能耗、强噪声和持续姿态控制压力等问题，为长时间原位作业创造条件。

图1

2. 环形系绳机构提升锚定后的机动能力

TreeSpider 的关键创新之一在于其环形系绳机构。该结构使系绳对机体姿态和运动的限制得到一定程度缓解，从而提升了平台在锚定状态下的灵活性。论文表明，该设计支持无人机以不同角度接近枝条，并在锚定后进行局部姿态调整 and 方向控制。这一结构设计为树冠内部多方向接近、多次停靠及局部巡检提供了机械基础。

3. 柔顺攀附机臂支持树枝交互

为增强系统与树冠结构的物理交互能力，作者在平台底部设计了变形线驱动无人机机臂。机臂采用仿生抓附思路，能够顺应枝条几何形态进行包覆和抓握，增强接触稳定性。实验结果显示，系统在不同枝条直径和拉拽条件下具备较好的保持能力，最大保持力达到 10

N。这一结果说明，TreeSpider

不仅能够靠近树枝，还具备一定程度的依附和保持能力，为稳定感知和采样操作提供了支持。

图2

4. 面向生态应用的叶片采样验证

除停靠和抓附外，论文还引入了叶片采样工具，用于验证该平台在生态监测任务中的实用潜力。该装置能够对目标叶片进行切割与夹持，实现树冠内部样本的初步获取。尽管该采样系统仍以原型验证为主，但其展示了 TreeSpider 从移动平台向作业平台扩展的能力，也体现了空中机器人在树冠原位采样方面的应用前景。

5. 动力学建模揭示节能机制

针对系绳约束下的平台运动特性，作者建立了相应动力学模型，并分析了不同系绳角度下的推力需求与系统行为。研究表明，在适当工况下，系绳可承担部分重力分量，从而降低无人机推进系统的负担。实验结果进一步验证，TreeSpider 在停靠状态下可实现显著节能，能耗相较自由悬停最高可降低约 2.5 倍。这一结果对需要长时间驻留的树冠监测任务具有直接意义。

6. 低噪声特性有利于生态监测

在环境监测场景中，平台产生的声学扰动可能影响野生动物活动，并干扰观测结果。本文通过噪声测试指出，由于系绳停靠减少了对高推力悬停的依赖，TreeSpider 在作业过程中可降低推进器转速，从而减小整体噪声输出。该特性使其更适用于对环境扰动敏感的树冠生态场景。

7. 专用控制架构实现稳定停靠与动态运动

针对系绳约束平台的非典型动力学特征，设计了相应控制方法，包括系绳角度估计、静态控制和动态控制。静态控制用于维持目标停靠姿态和角度，动态控制则支持平台围绕锚点执行圆周轨迹运动。室内实验结果表明，所提出控制框架可较好完成参考角度跟踪与局部轨迹控制，验证了该

平台在锚定状态下进行受控运动的可行性。

8. 室外实验验证真实场景可行性

在室外树冠环境测试中，TreeSpider 展示了从接近目标树枝、完成系绳停靠、机械臂抓附，到释放与脱离的完整任务流程。结果表明，系统能够在自然环境中较稳定地执行停靠和操控任务，并在停靠阶段显著降低功耗。叶片采样功能的初步实验也说明，该平台具备进一步服务于真实生态采样任务的潜力。

结论

本文提出的 TreeSpider 平台，展示了一种面向树冠生态监测的空中机器人新范式。与传统以自由飞行为主的树冠监测平台相比，TreeSpider 通过结合系绳栖息、机臂攀附和轻量级采样，实现了更稳定、更节能、扰动更低的树冠内作业方式。

总体而言，TreeSpider 将空中机器人从树冠外部观察工具进一步推进为树冠内部作业平台，在空
中机器人和生态监测交叉领域具有较强的探索意义和应用前景。

论文信息

Article title: TreeSpider: In-Canopy Exploration With Tether-Based Aerial Modular Arms

Luca Romanello, Tian Lan, Salaheldin Hassan, Maximilian Leutschafft, Erdem Ekinici, Sophie F. Armanini, Mirko Kovac, Basaran Bahadir Kocer

Advanced Robotics Research

DOI:10.1002/adrr.202500111

原文链接：

<https://doi.org/10.1002/adrr.202500111>

期刊介绍

Advanced Robotics Research涵盖了各种大小、形状和形式的机器人，包括仿人系统、自动驾驶车辆、无人机、多机器人系统、群体机器人、软体和仿生机器人、微纳机器人、大型工业机器人等。

期刊主页:

<https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/journal/29439973>

A promotional banner for 'Advanced Portfolio' with a dark green, abstract background. At the top, a white search bar contains a magnifying glass icon and the text 'Advanced Portfolio'. Below this, on the left, is the Chinese text '微信搜索Advanced Portfolio 或长按二维码关注我们 拓展学术视野，提升科研影响力!' (WeChat search Advanced Portfolio or scan the QR code to follow us, expand academic vision, and enhance research impact!). On the right is a square QR code with a white 'A' logo in the center.

来源：Advanced Robotics Research

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](http://iikx.com)转发