SLAP：基于拍击带的自主栖停无人机及其在垂直树干上的故障恢复

Julia Di 斯坦福大学 420 Panama Mall 斯坦福，加利福尼亚州 94305
juliadi@alumni.stanford.edu

Kenneth A. W. Hoffmann 斯坦福大学 420 Panama Mall 斯坦福，加利福尼亚州 94305
khffmnn@alumni.stanford.edu

Tony G. Chen 佐治亚理工学院 801 Ferst Drive 亚特兰大，GA 30332
tonygchen@gatech.edu

Tian-Ao Ren 斯坦福大学 420 Panama Mall 斯坦福，加利福尼亚州 94305
tianao@stanford.edu

Mark Cutkosky 斯坦福大学 420 Panama Mall 斯坦福，加利福尼亚州 94305
cutkosky@stanford.edu

arXiv:2601.00238v1 [cs.RO] 1 Jan 2026

摘要——栖停能够帮助无人飞行器（UAVs）降低能耗、在锚定状态下进行表面采样，或稳定地观测周围环境。以往在垂直表面栖停方面的研究，主要聚焦于轻量化机械设计方案，而系统级集成相对不足。此外，垂直表面的栖停策略通常要求以高速、激进的方式进行着陆操作，这对于机载敏感电子设备的测量无人机而言十分危险。本文初步研究了一种适用于较大型无人机的栖停方法，可使无人机轻柔地栖停于垂直树干上，并在栖停失败时作出响应并恢复。本文所述系统称为 SLAP，由基于视觉的栖停点检测器、基于惯性测量单元（IMU）的栖停失败检测器、用于柔性栖停的姿态控制器、光学近距离检测系统，以及由市售拍击带制成、带有微刺的快速主动弹性夹爪组成。我们通过对一架经过改装、重 1.2 kg 的商用四旋翼无人机进行组件分析和系统分析，验证了这一方法。初步的人在回路中的自主室内飞行实验表明，在 20 次飞行中，无人机在真实橡树段上的栖停成功率为 75%；在 2 次人为诱发栖停失败的飞行中，栖停失败恢复率为 100%。飞行测试的视频和代码可在我们的项目网站上查看：website-released-on-acceptance。

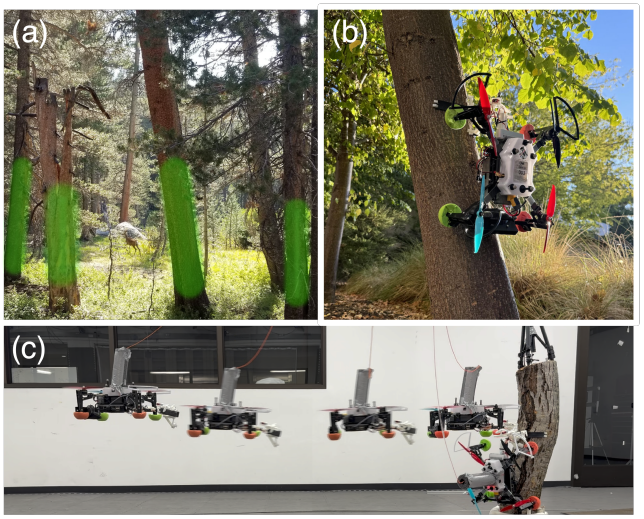


图1：(a) 在成熟森林中，如绿色标示处所示，垂直生长的树干是大型无人机可栖停的区域。（照片由 J. Di 在因约国家森林拍摄。）具备载荷能力、可栖停的无人机能够实现对周围环境的监测。(b) 栖停无人机系统停在一棵椴树上的概念照片。(c) 一架 1 千克级四旋翼无人机在真实橡树段上进行人在回路自主栖停序列的合成照片。系统识别栖停点，沿多项式轨迹飞行，并自主栖停。人在启动栖停前，会核验系统识别出的栖停点。

目录

1. 引言.1 2. 相关工作.2 3. 机器人设计方法.3 4. 瀑布式系统设计流程.5 5. 飞行验证与结果.6 6. 结论与未来工作.7 致谢.7 附录.7 A. 微刺布置的有限元分析.7 B. 飞行实验设置.8 参考文献.8 个人简介.9

1. 引言

在自然界中，栖停能力使动物得以捕猎、观察周围环境，并在飞行间隙休息。同样，四旋翼无人机等空中机器人在勘测和检查任务中表现出无可比拟的优势。配备栖停能力后，四旋翼无人机可以安静地监测野生动物、采集树木表面的样本，并通过太阳能采集延长作业时间 [1, 2]。

受鸟类栖停能力的启发，许多研究随后开发了用于空中机器人栖停的机械设计和控制策略。针对垂直表面，现有研究通常执行抬头操作或碰撞机动，以降低冲击能量 [3–6]。尽管这些机动对于在相对开阔区域作业的轻型无人机十分有效，但对于携带有效载荷、体型更大且重量更重的无人机而言，执行这些机动会变得更加困难，甚至存在危险。

979-8-3315-7360-7/26/$31.00 ©2026 IEEE

为避免具有风险的抬头操作，其他研究考察了在树枝和屋顶等水平表面上的栖停。在这些场景中，无人机可以通过坐落在目标上来实现栖停，而抓取通常借助仿鸟爪、缠绕式机械臂等被动机械方案，或仅使用能够将无人机固定在表面上的黏合剂来完成 [7–9]。尽管树枝等水平表面可能更适合承载较重的无人机，但它们可能不易到达，或只能提供受阻碍的周围环境视野。在成熟的树木环境中，垂直树干则提供了一种颇具吸引力的栖停点替代方案。

在本研究中，我们提出了一种方法，使载荷型多旋翼系统能够轻柔地栖停在垂直树木表面上，并报告了飞行测试的初步结果。实际的树木环境应用包括野生动物监测、生物多样性测绘和表面采样；该方法也适用于栖停在木制公用电线杆等人造垂直杆上。出于类似的动机，Askari 等人最近提出了一种被动机翼变形设计，使空中滑翔机能够撞向垂直杆，并通过机翼包覆形成环抱式抓取 [9]。然而，我们认为，对无人机而言，高速接近并不可取，因此提出了一种适用于垂直表面的自主栖停方法，无需激进飞行条件。类似地，Li 等人提出了 Treecreeper Drone，这是一种用于垂直树干的被动触发式栖停机构 [10], ，但该研究未涉及主动控制或栖停失败后的恢复。相比之下，我们的系统着重于载荷型无人机的主动抓取、故障检测与恢复，以及低速（轻柔）栖停，从而在真实树木环境中实现更安全、更可靠的运行。我们的系统由基于视觉的栖停点检测器、基于惯性测量单元的栖停失败检测器、用于柔性栖停的姿态控制器、光学近距离检测系统、机械枢轴点，以及一款主动弹性夹爪组成；该夹爪结合柔顺缠绕和微棘技术实现表面附着。

如图1所示，该飞行至栖停系统在一架 1.2 kg 的 Uvify IF O-S 四旋翼无人机上进行了验证。在橡树段上开展的人在回路（HITL）自主实验中，系统通过动作捕捉系统获取定位信息。人类输入用于安全确认，以启动栖停点检测器和栖停序列。栖停点检测、轨迹生成、飞行、栖停序列和栖停失败恢复均由系统自主完成。本文还介绍了促成飞行演示的系统开发过程。

本文的贡献如下：

- 采用双稳态弹性带和微刺设计快速主动夹爪，用于垂直树干栖停，从而实现低速接近飞行
- 面向树干栖停的系统工程方法，以及感知、规划器和柔和栖停控制器的集成
- 基于惯性测量单元的栖停失败恢复程序设计
- 人在回路自主室内系统在橡树树干上进行栖停和栖停失败恢复的演示

2. 相关工作

近年来，针对空中栖停机器人的新方法不断涌现，并已得到广泛综述 [1, 2]。为抵消栖停过程中产生的动态作用力，需要采用约束固定或抓取技术。因此，许多方法都专注于提出新的机械设计，以便牢固地附着在表面上。与本研究相关的是早期采用微棘爪夹持器附着于粗糙表面的研究 [4,5,11,12]。然而，这些早期的微棘爪夹持器仅在重量为数百克的轻型平台上得到验证。

本研究专门针对用于森林环境的较重型无人机，这类无人机可通过栖停开展科学监测与分析。对于 1kg+ 平台的树栖停，已取得成功的类似方法包括采用微棘的抓钩 [13]以及受鸟类启发的被动式爪形夹持器 [7, 8]。此前这些设计仅经过人工操作演示，且只在树枝等水平放置的圆柱结构上进行过测试。

对于在树木上栖停而言，垂直树干通常更便于飞行平台接近，因为其基本没有树枝和树叶的遮挡，但这也增加了栖停控制动力学的复杂性。为安全地栖停在表面上，无人机必须在栖停序列结束时储存和/或耗散动能。此前针对轻型平台的研究通过在接触前进入较大的攻角和失速状态来实现这一点 [4, 5, 9, 12, 14]。这些激进的飞行轨迹具有风险，尤其对于载有大量有效载荷的较大无人机而言，还会导致目标丢失和视觉运动模糊，从而可能造成栖停失败。此外，无人机从栖停点起飞时也容易受到影响。

相反，本研究采用前置式栖停机构，以简化垂直表面栖停所需的控制要求。与安装在机身下方的机构相比，这种方法虽然增加了前部质量，却降低了垂直表面栖停控制问题的复杂度。对于较重的无人机，栖停时还必须抵消额外的力臂，本研究通过机械枢轴点实现这一点。该机械枢轴与 Li 等人提出的方法类似 [10]；然而，他们工作中的被动触发设计具有严格的接近约束，且缺乏对系统故障恢复的分析。相比之下，本研究的夹爪采用主动栖停机构，利用两个双稳态拍带腕带实现快速闭合和内在缠绕，并结合基于棘爪的黏附。Zheng 等人最近提出了一种主动夹爪方案，同样使用卷尺弹簧，使微型无人机和 1 kg 无人机能够手动栖停在水平布置的树枝上 [15], ，但该方案未使用微刺，且仅在水平表面上进行了演示。

最后，迄今为止，大多数栖停飞行演示完全依赖人工操作，并且是在受控的实验室环境中进行的，但面向真实场景下系统自主性的研究正在稳步推进。Hang等人展示了一种基于视觉的栖停与停留无人机，可用于水平表面，但实验是在室内动作捕捉环境中进行的 [16]。Zufferey等人展示了一种扑翼机，能够在室内动作捕捉环境中自主检测水平圆柱结构并飞向该结构 [17]。户外栖停工作通常采用远程操控，近期有研究将自主性集成到力传感黏附笼在水平树枝上的栖停序列的部分环节中 [18]。相关应用已展示出颇具前景的系统级集成，例如由多所大学组成的AERIAL-CORE联盟开展的户外电力线检测与操作 [19], ，以及户外从水平平台上高速（2 m [16]s）空中抓取物体 [17]。不过，对于垂直表面，此类集成迄今仅在轻量级平台上用于室内动作捕捉实验室中的激进抬头机动 [18]，或应用于Treecreeper这类由人工操控飞行的被动系统中 [19], 。由于从垂直表面坠落可能会对飞行器造成严重损坏，因此检测并恢复栖停失败是系统自主性的关键部分。先前研究表明，机载加速度计数据能够识别重量为 20 g的Crazyflie的栖停失败，但对于尺寸显著更大的飞行器则无法做到，后者可能表现出不同的行为。

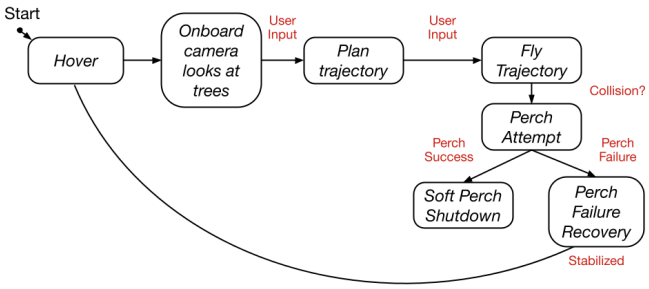


图 2：自主状态图。系统会在环有人确认，以验证树木检测结果并确认系统是否应启动栖停机动。如果栖停失败，系统会检测到自由落体，并在远离地面和树木的安全距离处稳定悬停。

速度（2 m/s）的空中抓取对象，来自水平平台 [20]。然而，对于垂直表面，此类集成迄今仅在轻量级平台上用于室内动作捕捉实验室中的激进抬头机动 [21, 22]，或应用于Treecreeper这类由人工操控飞行的被动系统中 [10]。由于从垂直表面坠落可能会对飞行器造成严重损坏，因此检测并恢复栖停失败是系统自主性的关键部分。先前研究表明，机载加速度计数据能够识别重量为20 g的Crazyflie的栖停失败，但对于尺寸显著更大的飞行器则无法做到，后者可能表现出不同的行为 [23]。

3. 机器人设计方法

为降低大型自主无人机进行垂直表面栖停的风险，本研究力求尽可能降低栖停序列中无人机受到撞击的风险。为此，我们做出了两项关键的系统设计选择：(i) 选择仅支持前向飞行即可完成栖停的系统设计，从而取消抬头机动；(ii) 将栖停系统设计为在目标处实现接近 0m/s 的撞击速度。

为了理解选择 (ii) 所带来的设计权衡，充分区域这一概念很有帮助，它定义了成功抓取所需设计参数的范围 [8, 24]。对于为撞击物体而设计的夹爪，我们会考察其在速度空间中的充分区域。一般而言，被动触发的夹爪要求无人机与目标之间存在一定的相对速度。已有文献表明，不同夹爪设计所需的最低速度约为 1m/s [24] 和 2 m/s [10]。载荷无人机系统以这些速度撞击树木，风险可能过高。为确保降低所需的相对速度，我们选择通过使用飞行时间（ToF）传感器和伺服电机主动控制夹爪。这使速度充分区域向左移动，从而使接近目标的速度可以接近 0m/s。然而，额外的电子设备会增加质量。选用的 Uvify IFO-S 平台在质量预算方面有余量，可采用主动抓取方案；但对于载荷能力较弱的四旋翼无人机而言，这种设计权衡并非最优。

其他目标包括：(i) 尽可能减小整体重量和惯性，(ii) 最大限度地补偿无人机飞行精度损失，以及

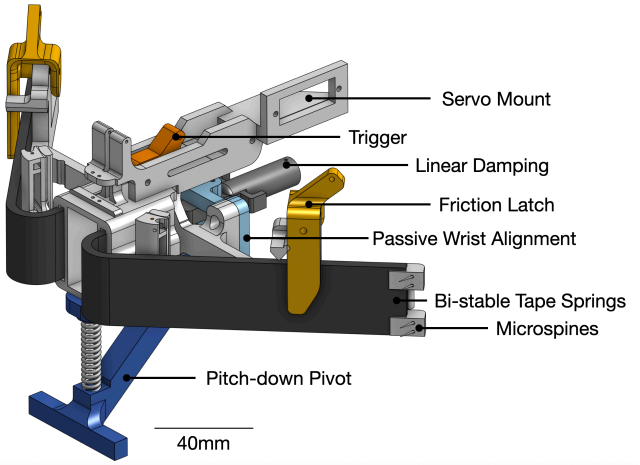


图 3：夹爪设计的 CAD 渲染图。单个伺服电机通过两根拉索触发两个摩擦锁扣，随后锁扣释放两根双稳态带簧，其尖端装有微刺。

(iii) 在栖停序列中尽可能减小微刺承受的扭矩，以免无人机从表面旋转脱落。

主动夹爪设计与航空电子设备

本研究所用抓取机构的 CAD 渲染图如图 3 所示。夹爪由四个主要子系统组成：(i) 抓取机构，(ii) 触发机构，(iii) 带内置柔顺性的腕部，以及 (iv) 俯仰下压枢轴。这些部件协同作用，使夹爪能够迅速闭合并牢固附着于树皮。

抓取机构—与机械式被动夹持器相比，主动夹爪必然会增加额外的抓取时间延迟。为尽可能缩短抓取时间，该抓取机构采用两根双稳态带簧；在初步探索弹簧刚度和曲率后，对市售拍打腕带（品牌：BRANDWINLITE BW-SB05-BK）进行了改装。每根腕带在触发前均保持储能状态，触发后会在 6 毫秒内啪地弹合，环抱树干。

为了在树木上支撑 1.2 kg 的质量，每根双稳态带簧的末端都装有四根微刺。微刺由器官针制成，针眼内填充了环氧树脂，以帮助防止断裂。一对微刺用氰基丙烯酸酯胶粘剂粘在一个3D打印瓦片上，两个瓦片则用胶水粘在带子的两端。

与岩石不同，树皮通常足够柔软，可以让微刺刺入其中。由于动能与速度的平方成正比，卷尺弹簧在抓取时快速弹开，能够产生足够的动能，使微刺形成自身的微观凸起。这种刺入确保了可靠的抓取，尽管微刺之间不存在载荷分担。除了为微刺刺入提供初始预载荷外，卷尺弹簧还为微刺保持啮合提供了轻微的内部力，详见附录A。该夹爪使用 Rigid 4k 材料，在 Formlabs Form3+ 树脂打印机上进行 3D 打印，重量仅为 125 g。

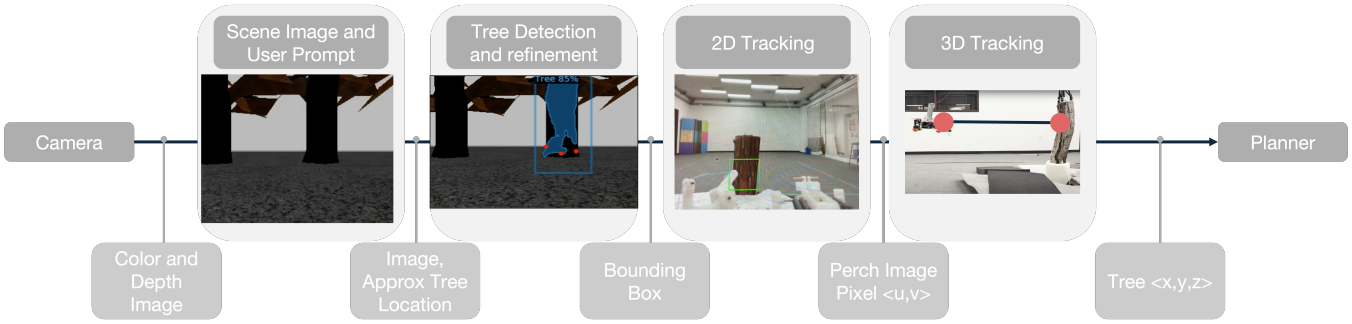


图 4：视觉处理流程概览。向用户显示 RGB-D 相机采集的原始图像，由用户提示系统搜索树木。随后，树木检测器会检测并显示合适栖停点的边界框和关键点，无人机在飞行过程中持续追踪这些信息，并将其提供给规划器。

触发机构—为了触发抓取序列，使用一个伺服电机（MKS HS75K）拉动主动触发器。四根弹簧常数为 105 N/m 的琴钢丝拉伸弹簧连接在相距 30 mm 的两个定位销之间，以提供 3.15 N 的力。当主动触发器被拉动时，其中一个定位销会被释放，从而拉动两根由高强度钓鱼线（“Power Pro Spectra 40lbs (178N)”）制成的拉索。每根拉索均在内部布设至摩擦锁扣的角部；拉动时，摩擦锁扣会绕销接关节转动，同时释放储存的卷尺弹簧。每次试验之间都需要手动复位触发机构。

安装在两条橡皮筋之间的飞行时间传感器（VL53L1X）测量与树木之间的距离，并在达到阈值距离时以电子信号触发伺服电机。

带柔顺性和悬架的腕部——夹爪机构经过设计，使其在撞击栖停点目标时，机械柔顺性能够减轻无人机承受的载荷，并补偿与目标之间的角度误差。结构两侧系有两条弹簧常数约为 30N/m 的稳定橡皮筋，以提供偏航角柔顺性。这种柔顺性允许夹爪旋转，有助于补偿与目标栖停点之间的角度误差，并吸收撞击时的部分动能。

如图 3 所示，夹爪悬架由两根相互套叠、可通过线性弹簧相对滑动的圆柱管构成。前管可以滑入后管，滑动距离由定位销设定。这种线性柔顺性也有助于吸收冲击动能。

俯仰下压枢轴—成功抓取后，肘关节可使无人机向下俯仰最多 120 度，底座处设有弹簧加载枢轴。在俯仰下压过程中，这对于提供一个额外的树木接触点至关重要，可防止微刺承受过大的力矩。弹簧加载支撑杆在平坦表面上静置时会被动收起。

轻柔栖停

为防止微刺从凸起上滑脱，最好尽量减少传递到微刺上的扭矩。无人机抓取树木后，需要有支撑杆来抵消重力产生的向下作用力。否则，刺就必须提供使无人机能够绕其转动的反向力矩。我们通过夹爪上的机械支撑杆以及尾部来实现这一点。

尾部存在一个问题：无人机断电时，尾部撞击树木可能导致微刺滑脱。事实上，这种情况在初期测试中确实发生过。因此，我们加入了柔和栖停控制器，根据无人机姿态调节电机推力。该设计的优点在于，无人机栖停并成功抓取后，系统会受到高度约束，实际上只剩下一个由无人机总推力控制的自由度。我们通过测试确定了推力下降所需的时长和速率，发现以 100 Hz 的频率在 4 秒内将推力从悬停推力降至零效果良好。

机器人机载自主性

基于视觉的栖 *perch* 点检测—为检测栖停点，检测器使用一台机载 Intel Realsense D435 RGB-D 相机，该相机刚性安装在无人机前部。相机输出两幅图像：一幅彩色帧和一幅对齐的深度帧，理想测距范围为 0.3 至 3 米。由于图像已经对齐，每个彩色像素都有对应的深度值。为了检测树木掩膜，我们使用了一种基于 PercepTree 的深度学习模型；PercepTree 是一种此前发表的、用于森林树木检测的基于卷积神经网络的模型 [25]。

感知系统必须能够适应栖 perch 硬件对机载相机造成的部分遮挡。由于夹爪在整个飞行过程中位置固定，因此可以通过屏蔽图像中夹爪遮挡视场的区域来实现这一点。这样做的代价是深度图像会受到严重遮挡，因此需要通过反复调整设计，在 RGB-D 相机与抓取器之间取得整体布局上的平衡。

基于树木掩膜，我们可以根据多个因素选择最终的栖停点：（i）树木截面的直径；（ii）可根据树种 [26], 学习并识别的树皮纹理；以及（iii）树木的轮廓。

（ii）树皮纹理之所以重要，有两个原因。首先，如前所述，拍击带弹簧具有足够的动能刺入树皮，因此微刺在柔软的树皮上能够可靠地发挥作用。其次，在初步测试中，我们发现较老、较大的树木往往树皮较为片状，且有较深的裂隙，这可能导致栖停失败，因为表面会剥落。因此，我们选择表面纹理均匀、从而性能更可预测的树木

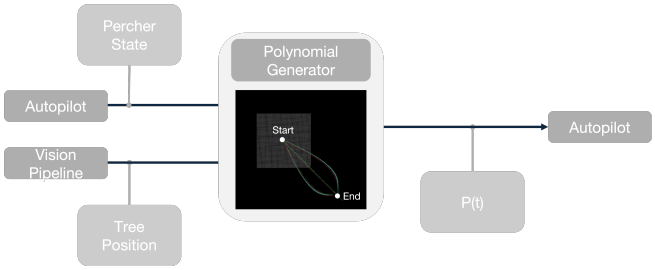


图5：规划器流程概览。规划器接收树木状态和无人机状态，生成通往目标的多项式轨迹。发布的输出包括轨迹$P(t)$以及供低层控制器跟踪的设定点。

进行测试。我们没有针对纹理分析实现专门的树种识别器，但可以采用深度学习方法实现。在本研究中，我们仅在橡树和椴树上测试了感知系统，这两种树的树皮较柔软。不过，也可以根据其三维树皮纹理识别其他树木 [26]。

最后，当前的栖停策略并非为悬垂情况而设计。我们实现了（iii），通过检查树木的深度剖面，确认栖停点是否会使无人机相对于地面至多呈垂直状态。

过滤后，检测器会确定树干的质心，以及到栖停点质心的对应深度。深度估计也会经过滤波以去除噪声。利用深度和图像空间质心，以及相机的内参和外参，我们便可确定目标栖停点的位姿。

轨迹规划器——为了到达目标栖停点，无人机需要一条按时间采样的栖停轨迹 $P(t)$。规划器以无人机当前状态和树木估计状态为输入，输出一条满足位置和速度约束、随时间变化的微分多项式轨迹。控制器根据这条轨迹，在离散时刻采样位置和速度设定点以执行飞行。

如图 5 所示，栖停规划器通过一个简单的多项式生成器处理输入，并对高阶导数施加约束，以确保运动在动力学上可行。轨迹的重要约束包括栖停无人机的当前位置，以及在目标栖停点处沿垂直于栖停点方向、朝向并进入栖停点的小速度，约为 0.1 m/sec。这是必要的，因为它有助于啮合抓取机构，并确保无人机以一定的向前速度进入树木，而不是在树木前停下。这意味着抓取会更加牢固，但也可能使夹持器结构承受更大的应力。无人机成功抵达栖停位置后，系统便转入栖停序列，并启动基于IMU的停靠失败检测程序，具体内容将在下一节介绍。

基于*IMU*的栖停失败检测—本研究的一项重要贡献是实现了自主栖停失败检测，为大型无人机提供了关键的安全保障，因为附着失败可能导致严重的结构损伤。由于微刺黏附本质上具有随机性，意外脱离是任何基于微刺的机器人系统都需要面对的问题。

在我们的系统中，规划器会持续监测无人机加速度的大小——

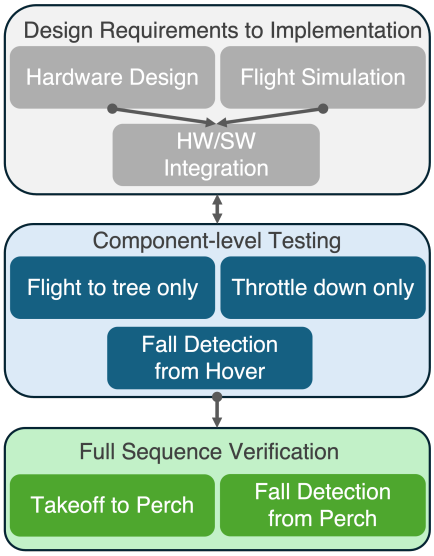


图 6：瀑布式系统设计与测试流程。在设计过程中，我们首先讨论设计要求，并借助飞行仿真，在硬件开发的同时并行测试算法。随后，我们进行组件级测试，最后验证完整的栖停流程和故障恢复。

——我们利用了这样一个事实：在自由落体状态下，加速度计的读数应为 0 m^2/sec。因此，如果无人机开始滑移，我们预计在栖停尝试开始时，悬停状态下约为 9.8m^2/sec 的加速度会逐渐降至 0 m^2/sec。

我们通过 5 次试验，将阈值设定为 7.0 m/sec^2 ，并通过实验确定，从加速度计到电机指令的系统延迟约为 100 ms。如果加速度低于给定阈值，规划器便会指令无人机飞往安全位置，该位置距栖停点 1 m，且位于树木的反方向。这种方法能够在栖停过程中发生滑移后，于 100 ms 内成功实现恢复。

自由落体过程中的位移为

$$d = \tfrac{1}{2} g t^2, \tag{1}$$

其中，$g = 9.8$ $m^2 s^{-1}$ 表示重力加速度，t 表示经过的时间。对于 $t = 0.1$ s，我们预计在螺旋桨开始响应之前，系统会下落约 5 cm。

4. 瀑布式系统设计流程

栖停系统的开发遵循结构化的瀑布式设计流程，如图 6 所示。在每个阶段，设计要求都会转化为可检验假设，其输出直接馈入开发的下一阶段。

在需求阶段，我们首先定义了系统的运行约束，并做出关键设计选择——采用 1.2 kg 四旋翼无人机栖停于垂直树干上，同时尽量降低冲击能量，并支持从栖停

失败中恢复，同时确保具备自主感知与规划能力。这些要求决定了关键的设计权衡，例如选择主动夹爪以降低速度要求，但会因此增加电子设备的重量。

与此同时，我们在 Gazebo 中实现了一个与 ROS-1 和 PX4 自动驾驶仪集成的高保真环境，以便在硬件设计进行期间，同时开发感知和规划子系统。规划和栖停环境使用 ROS 1 进行仿真，以集成 PX4 自动驾驶仪和 Gazebo 基于物理的仿真环境。在这一环境中，视觉和规划算法均经过了充分验证，然后才进入室内飞行实验阶段。我们加入了一个带纹理的圆柱形树干模型，用于测试完整的视觉处理流程，以及机器人的运动规划和飞行控制组件。由于仿真流程与真实系统架构相一致，使用该仿真环境最大限度地减少了将算法迁移到真实飞行环境时所需的重新校准工作。

在组件测试阶段，我们分别制造并独立评估了各个子系统。例如，我们在台面上和树木上测试了独立夹爪，以表征其在错位冲击下的闭合速度、刺状结构附着力和柔顺性。我们在枢轴安装导轨测试台上对柔和栖停控制器进行了调节，从而能够安全地迭代推力衰减曲线。

在最终集成与验证阶段，我们将完整系统组装到 Uvify I FO-S 四旋翼无人机上，并逐步开展室内飞行室飞行试验。在这一阶段，我们在人类参与监督下测试了完整的硬件和软件系统，包括基于视觉的栖 perch 点检测、轨迹规划、夹爪触发和故障恢复。瀑布流程的逐步推进确保及早处理风险，将故障限制在各个子系统内，并使最终演示建立在经过验证的组件之上。

5. 飞行验证与结果

所有室内飞行均在斯坦福大学波音飞行与自主实验室进行。我们使用 NVIDIA Orin 进行机外处理，并通过 ROS 1 与无人机双向传递信息。本研究使用的四旋翼无人机是经过改装的 Uvify IFO-S 四旋翼无人机。原装四旋翼无人机的起飞重量为 1 kg，包含电池和螺旋桨（7042 规格塑料螺旋桨）。安装栖 perch 硬件后，最终四旋翼无人机的起飞重量为 1.2 kg。

无人机的机载计算机为 NVIDIA Jetson Nano，可与低层 PX4 自动驾驶仪和高层 ROS 环境进行通信。改装后的四旋翼无人机装有一个 3D 打印保险杠（使用 Prusa MK3S+ 打印的黑色聚乳酸），栖停时可轻柔地将底部靠在表面上。保险杠上粘有一段泡沫泳池浮条，用于缓冲。每条机腿上也用双面胶带粘有泡沫球，以便在测试过程中实现软着陆。栖 perch 机构组件通过标准公制螺钉安装在四旋翼无人机上，增加的重量约为 200 克。

柔和栖停控制器的子系统验证

为安全地调试油门下降机动，我们搭建了一个油门下降测试装置：一段长 1 米的 80/20 型材导轨架设在两个高度对齐且稳固的三脚架上，如图 7 所示。

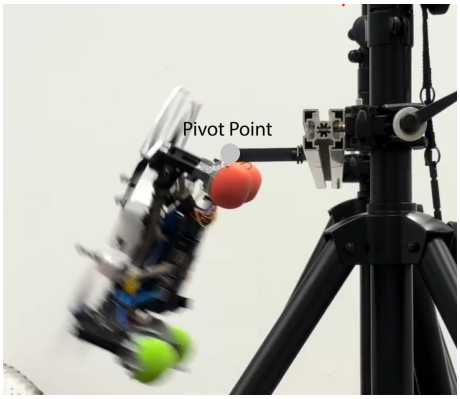


图 7：轻柔栖停控制器测试夹具。



图 8：室内飞行实验在动作捕捉环境中进行，四旋翼无人机连接有安全系绳（橙色轮廓所示）。Uvify IFO-S 四旋翼无人机加装了栖 perch 硬件，用于飞行实验。

随后，四旋翼无人机通过a 90°销接关节刚性固定在导轨上，使其能在悬停推力降低时摆动。该实验装置模拟了栖停时的单自由度条件，从而能够在最大限度降低无人机风险并排除额外变量的情况下进行控制器调试。

人在回路自主飞行实验

为确保机器人和人类操作员的安全，飞行室地面铺设了泡沫材料，四旋翼无人机则系上安全系绳，并将系绳穿过天花板上的滑轮。所有飞行测试期间，系绳均未处于张紧状态；但若发生意外，便可拉动系绳以防止坠机。附录 B 对飞行室的布置进行了更详细的讨论。

我们系统可能出现的失效模式包括：(i) 未能检测到树木，(ii) 未能定位树木，(iii) 未能规划出有效轨迹，(iv) 未能触发，(v) 未能抓取，(vi) 抓取/栖停期间发生滑移，(vii) 栖停后发生滑移，以及 (viii) 未能从滑移中恢复。

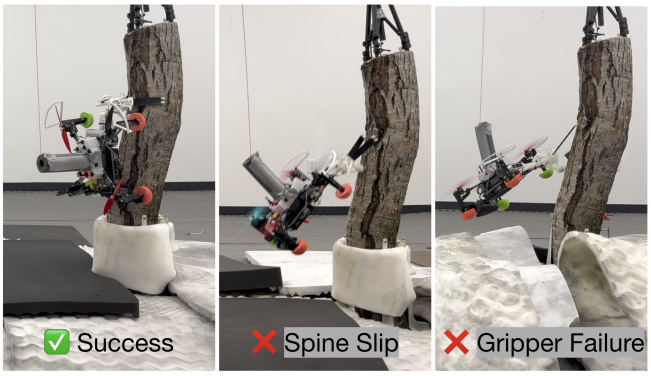


图 9：从左到右展示飞行实验的定格画面：(i) 栖停成功时的终止状态示例；(ii) 棘刺滑脱故障时的自由落体；(iii) 夹爪故障时的自由落体（此例中，拍击带未能正确粘牢）。

在橡树段上共进行了 20 次人在回路中的自主室内飞行试验，系统的**栖停成功率为 75%**。成功试验的定义是：无人机检测到树上栖停点，生成正确的轨迹，抵达栖停点，触发夹爪，并在至少 10 秒内保持附着且未发生滑移。成功栖停的最终状态如图 9 所示。

五次失败的试验中，两次是因为微刺在可能成功栖停后、10 秒时限之前随机滑脱，另外三次则是夹爪故障。进一步分析夹爪故障案例发现，其中两次是由于原型制作时胶水不足，导致拍击带从固定座中滑出；另一次则是夹爪塑料件意外发生灾难性故障。这些故障如图 9 所示。这些失效模式表明，若能改进夹爪原型制作的稳健性，自主性成功率就会更高。通过让人类参与闭环控制，可以较早发现视觉失效模式；还需要进一步研究，以确定感知系统在树木环境中的不足之处。

为了评估栖停失败恢复，我们在另外 2 次飞行中人为制造了受控故障：故意将夹爪的微刺磨钝，使其不太可能充分啮合。随后，我们进行了相同的自主栖停实验。两次实验中，基于惯性测量单元的故障检测都在 100ms 内正确识别出滑移开始，并触发恢复机动，**栖停失败恢复成功率达 100%**。无人机稳定在距树木 1m 的指令偏移位置，为基于加速度计的方法用于大型无人机故障检测提供了初步验证。

更多飞行测试视频和代码可在我们的项目网站上查看：website-released-on-acceptance。

6. 结论与未来工作

本文初步研究了一种适用于垂直表面承载空中机器人的轻柔栖停与栖停失败恢复方法。基于我们对被动夹爪速度空间中充分区域的了解，我们选择设计一种柔顺主动夹爪，以尽量减小触发夹爪所需的冲击相对速度。基于视觉的栖停点检测器、轨迹规划器和视觉跟踪流程，与基于惯性测量单元的故障检测及反应程序相结合，从而实现了完整的自主栖停框架。该系统在一棵真实橡树上进行了人在回路的自主室内实验验证，在20次试验中取得了75%的栖停成功率，并在2次人为诱发的栖停失败中实现了100%的恢复率。

除本研究之外，还有许多值得探索的方向。首先，夹爪机构不一定需要主动驱动；可以采用完全被动的夹爪方案，在无需较高相对速度来触发的情况下，同时最大限度地缩短响应时间并减轻重量。改用被动夹爪系统后，质量预算中便能腾出更多空间来搭载科学仪器或增加机载处理能力。此外，探索通过载荷分担来优化微刺与树皮表面的接触方式，也很有意义。

其次，本研究中的轨迹规划器为简化起见采用了多项式形式；扩展到更先进的轨迹框架，或可提高其在复杂森林环境中的可靠性与安全性。

最后，尽管实验中使用动作捕捉系统提供真实定位信息，但该平台的未来迭代版本应集成机载同步定位与地图构建或视觉惯性里程计系统，从而能够在无结构的户外环境中实现完全自主停 perch。综合来看，这些方向指向了稳健且可扩展的栖停系统，有望拓展无人机在生态监测、基础设施巡检及其他长时飞行任务中的运行能力。

致谢

作者感谢 James Biddle 和 University Tree Program，允许他们使用一段真实树木进行室内飞行测试。作者还感谢 Jun En Low 对无人机操控提供指导，并感谢 Joshua Dong 参与夹爪设计的早期原型制作。本研究由 EpiSys Science Inc. 提供支持，并由其分包给斯坦福大学设计研究中心。J. Di 在工作期间还获得了 P.E.O. Scholarship 和国际崇她社阿梅莉亚·埃尔哈特奖学金的支持。此外，在工作期间，J. Di、K. A. W. Hoffmann 和 T. G. Chen 均任职于斯坦福大学机械工程系。

附录

A. 微刺布置的有限元分析

我们在 COMSOL Multiphysics (v6.2) 中进行了初步仿真，以研究如图 10 所示的双稳态带扣合到圆柱表面时的接触应力。该仿真包含两个稳态步骤。第一步涉及沿两个方向移动，使预弯曲夹持器进入“弹开”状态。第二步涉及沿一个方向移动，以模拟锁扣运动。

夹爪采用Yeoh本构模型建模为超弹性橡胶，材料参数定义为 $\rho = 1100\,\mathrm{kg/m^3}$, $c_1 = 100\,\mathrm{kPa}$, $c_2 = 6\mathrm{kPa}$, and $c_3 = -30\mathrm{Pa}$，以捕捉弹性体的非线性大变形行为。代表

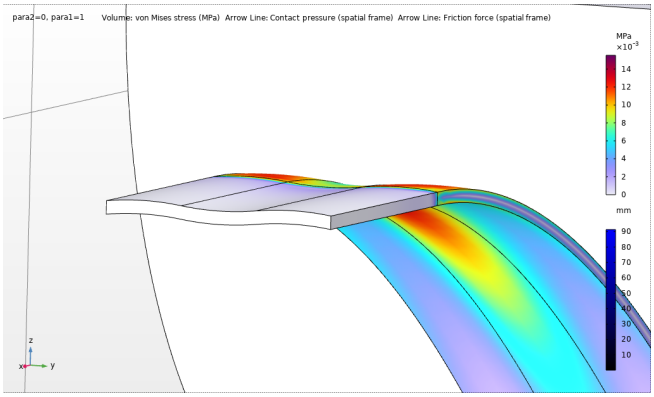


图10：有限元分析图显示，缠绕在弯曲物体上的弹性带，其接触应力在带尖端处最大。

树桩的目标物体被简化为刚性圆柱体。夹爪与刚性圆柱体之间的接触相互作用通过固体力学接口和适当的接触对进行建模。边界条件包括夹爪底座处的固定约束，以及滚轮约束和对称约束。

为确保准确解析变形和应力分布，计算域采用预定义的“极细”网格进行离散化，单元尺寸范围为 0.0367 mm 至 3.67 mm，曲率因子为 0.2，最大单元增长率为 1.3。COMSOL 仿真显示，带上的接触应力分布不均，主要集中在尖端。因此，将微刺布置在带尖端处有利于其保持与表面接触。

B. 飞行实验设置

所有室内飞行均在斯坦福飞行室进行。该飞行室是专用的动作捕捉设施，如图 11 所示。飞行空间为 $16 \times 6 \times 3$m，配备了 26 台高保真 Opti-track红外摄像机，用于运动追踪。该设施可提供亚毫米级位姿估计，并提供受控、无障碍的空间，非常适合开展空中机器人实验。环境支持严格的安全规程，包括用于紧急干预的天花板安装式系留系统、铺设软垫的地板，以及各方向充足的净空。

栖停实验中，测试用树干取自校园内一棵倒伏的橡树，如图12所示，并经大学树木项目许可。人工打磨树段以确保底面平整，随后用螺栓固定在带支撑的支架上，使其在测试期间保持稳定直立。



图11：斯坦福飞行室设置。



图12：取自斯坦福校园一棵倒伏橡树的橡树段。

参考文献

[1] J. Meng、J. Buzzatto、Y. Liu 和 M. Liarokapis，《具备抓取与栖停能力的空中机器人：综合综述》，*Frontiersin Robotics andAI*，第8卷，第739173页，2022年。[2] W. R. Roderick、M. R. Cutkosky 和 D. Lentink，《从触地到起飞：飞行与表面运动的交界处》，*Interfacefocus*，第7卷，第1期，第 20160094，2017年。

[3] D. Mellinger、M. Shomin 和 V. Kumar，“用于稳健栖停和着陆的四旋翼无人机控制”，载于国际动力升力会议论文集，2010年，第 205–225 页。[4] A. Lussier Desbiens、A. T. Asbeck 和 M. R. Cutkosky，“在垂直表面上着陆、栖停和起飞”，*The International Journal of Robotics Research*，第 30 卷，第 3 期，第 355–370 页，2011年。[5] M. T. Pope、C. W. Kimes、H. Jiang、E. W. Hawkes、M. A. Estrada、C. F. Kerst、W. R. Roderick、A. K. Han、D. L. Christensen 和 M. R. Cutkosky，“一种可在户外垂直表面栖停和攀爬的多模态机器人”，*IEEE Transactions on Robotics*，第 33 卷，第 1 期，第 38–48 页，2016年。

[6] A. Kalantari、K. Mahajan、D. Ruffatto 和 M. Spenko，“四旋翼微型飞行器在垂直墙面上的自主栖停与起飞”，载于*2015*年 *IEEE* 机器人与自动化国际会议（*ICRA*）。IEEE，2015年，第 4669–4674 页。[7] C. E. Doyle、J. J. Bird、T. A. Isom、J. C. Kallman、D. F. Bareiss、D. J. Dunlop、R. J. King、J. J. Abbott 和 M. A. Minor，“用于四旋翼栖停的仿鸟类被动机构”，*IEEE*/美国机械工程师学会机电一体化汇刊，第 18 卷，第 2 期，第 506–517 页，2012年。[8] W. R. Roderick、M. R. Cutkosky 和 D. Lentink，“树栖环境中的仿鸟类动态抓取与栖停”，*Science Robotics*，第 6 卷，第 61 期，第 eabj7562 页，2021年。[9] M. Askari、M. Benciolini、H.-V. Phan、W. Stewart、A. J. Ijspeert 和 D. Floreano，“抱翼机器人在垂直杆上的撞击停 perch”，*CommunicationsEngineering*，第 3 卷，第 1 期，第 98 页，2024年。[10] H. Li、S. Windsor 和 B. B. Kocer，“Treecreeper Drone：用于树干被动停 perch 的自适应机构”，*AdvancedIntelligent Systems*，第 2401101 页。[11] A. Lussier Desbiens 和 M. R. Cutkosky，“采用微刺在垂直表面着陆和栖停的小型无人飞行器”，*Journal of Intelligent andRoboticSystems*，第 57 卷，第 313–327 页，2010年。[12] M. Kovaˇc、J. Germann、C. H¨urzeler、R. Y. Siegwart 和 D. Floreano，“用于微型飞行器的栖停机构”，*Journal of Micro-NanoMechatronics*，第 5 卷，第 77–91 页，2009年。[13] H.-N. Nguyen、R. Siddall、B. Stephens、A. Navarro-Rubio 和 M. Kovaˇc，“用于稳健、可控栖停的被动自适应微刺抓钩”，载于*2019*年第二届 *IEEE* 软体机器人国际会议（*RoboSoft*）。IEEE，2019年，第 80–87 页。[14] J. Moore 和 R. Tedrake，“使用 LQR 树实现停 perch 无人机的控制综合与验证”，载于*2012*年 *IEEE* 第 *51* 届决策与控制会议（*CDC*）。IEEE，2012年，第 3707–3714 页。[15] L. Zheng 和 S. Hamaza，“Albero：面向环境机器人作业的树枝敏捷着陆”，*IEEERobotics andAutomationLetters*，2024年。[16] K. Hang、X. Lyu、H. Song、J. A. Stork、A. M. Dollar、D. Kragic 和 F. Zhang，“栖停与休息——采用模块化起落架的无人机机动范式”，*Science Robotics*，第 4 卷，第 28 期，第 eaau6637 页，2019年。[17] R. Zufferey、J. Tormo-Barbero、D. Feliu-Taleg´on、S. R.´Nekoo、J. A. Acosta 和 A. Ollero，“扑翼飞行器如何在树枝上自主栖停”，*Nature Communications*，第 13 卷，第 1 期，第 7713 页，2022年。[18] E. Aucone、S. Kirchgeorg、A. Valentini、L. Pellissier、K. Deiner 和 S. Mintchev，“利用无人机从树枝采集环境 DNA 以监测生物多样性”，*Sciencerobotics*，第 8 卷，第 74 期，第 eadd5762 页，2023年。[19]A. Ollero、A. Suarez、C. Papaioannidis、I. Pitas、J. M. Marredo、V. Duong、E. Ebeid、V. Kratky、M. Saska、C. Hanoune 等，“Aerial-core：用于电力基础设施巡检和维护的 AI 驱动空中机器人”，*arXiv* 预印本 *arXiv:2401.02343*，2024年。[20]S. Ubellacker、A. Ray、J. M. Bern 和 J. Strader，以及 L. Carlone，“使用具备机载感知能力的软体无人机进行高速空中抓取”，*npjRobotics*，第 2 卷，第 1 期，第 5 页，2024年。[21] J. Thomas、M. Pope、G. Loianno、E. W. Hawkes、M. A. Estrada、H. Jiang、M. R. Cutkosky 和 V. Kumar，“四旋翼无人机在倾斜表面上栖停的激进飞行”，*Journal ofMechanisms andRobotics*，第 8 卷，第 5 期，051007 页，2016年。[22] J. Mao、S. Nogar、C. M. Kroninger 和 G. Loianno，“四旋翼无人机在倾斜表面上的鲁棒主动视觉栖停”，*IEEE Transactionson Robotics*，第 39 卷，第 3 期，第 1836–1852 页，2023年。[23]H. Jiang、M. T. Pope、M. A. Estrada、B. Edwards、M. Cuson、E. W. Hawkes 和 M. R. Cutkosky，“通过机载传感检测栖停故障并进行恢复”，载于*2015 IEEE/RSJ*智能机器人与系统国际会议 *(IROS)*。IEEE，2015年，第 1264–1270 页。[24] T. G. Chen、K. A. Hoffmann、J. E. Low、K. Nagami、D. Lentink 和 M. R. Cutkosky，“空中抓取与速度充分区域”，*IEEERobotics andAutomation Letters*，第 7 卷，第 4 期，第 10 009–10 016 页，2022年。[25] V. Grondin、J.-M. Fortin、F. Pomerleau 和 P. Gigu`ere，“基于深度学习的树木检测与直径估计”，*Forestry: An International Journal ofForestResearch*，2022年10月。[26]A. Othmani、A. Piboule、O. Dalmau、N. Lomenie、S. Mokrani 和 L. F. C. L. Y. Voon，“基于三维树皮纹理分析的树种分类”，载于 *Image and Video Technology*：第六届环太平洋图像与视频技术研讨会，*PSIVT 2013*，墨西哥瓜纳华托，*2013*年*10*月*28*日至*11*月*1*日。论文集 *6*。Springer，2014年，第 279–289 页。

个人简介



Julia Di获得了哥伦比亚大学电气工程与计算机科学学士学位，并于2020年和2025年分别获得斯坦福大学（美国加利福尼亚州斯坦福）的机械工程硕士学位和博士学位。

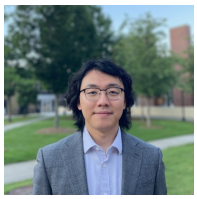
她在相关工作开展期间任职于斯坦福大学（美国加利福尼亚州斯坦福）机械工程系。她的研究兴趣包括触觉传感、自主性和抓取感知。



KennethA. Hoffmann于2017年获得伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校（美国伊利诺伊州厄巴纳）机械工程学士学位，并于2019年和2023年分别获得斯坦福大学（美国加利福尼亚州斯坦福）机械工程硕士学位和博士学位。

他曾任职于斯坦福大学机械工程系，工作期间就读于加利福尼亚州斯坦福大学。他的博士研究聚焦于视觉引导的空中抓取机器人的设计原则与系统分析。他的研究兴趣包括

机器人学、机电一体化、设计、控制与自主性，以及空中机器人领域的应用。



TonyG. Chen 于2020年和2023年分别获得佐治亚理工学院（美国佐治亚州亚特兰大）机械工程学士学位，以及斯坦福大学（美国加利福尼亚州斯坦福）机械工程理学硕士学位和博士学位。

他在此项工作开展期间任职于斯坦福大学（美国加利福尼亚州斯坦福）机械工程系。他现任佐治亚理工学院乔治·W·伍德拉夫机械工程学院助理教授。他的研究兴趣包括仿生机器人学和野外机器人学，尤其关注攀爬和栖停机器人的设计，以及这些机器人与复杂现实环境的交互。



Tian-AoRen于2023年获得北京化工大学（中国北京）机器人工程学士学位，并于2025年获得斯坦福大学（美国加利福尼亚州斯坦福）机械工程理学硕士学位，目前正在该校攻读机械工程博士学位。他研究兴趣include medical机器人、触觉传感、软体机器人以及从仿真到现实的应用。



MarkR.Cutkosky于1985年获得美国宾夕法尼亚州匹兹堡卡内基梅隆大学机械工程博士学位。

他现任美国加利福尼亚州斯坦福斯坦福大学机械工程弗莱彻·琼斯讲席教授。他的研究兴趣包括仿生机器人、触觉技术和快速原型制造工艺。

Cutkosky博士是IEEE和美国机械工程师学会会士，也是IEEE RA-L 机器人先驱。