

轻量化无人机抓取装置的仿生结构设计研究

程苏仙

杭州智翔航空技术有限公司 310030

【摘要】针对现有无人机抓取装置重量过大、适应性不足及抓取稳定性差等问题，提出基于仿生设计理念的轻量化抓取结构方案。以鹰爪与章鱼腕足为仿生原型，通过结构仿生优化、材料选型及传动机构轻量化设计，研制出一款重量仅285g的多自由度抓取装置。经试验验证，该装置对直径30-150mm、重量0.5-3.5kg的不规则物体抓取成功率达92.3%，在6级风力环境下抓取稳定性保持率为87.6%，相较于传统结构重量减轻34.7%，适配1.5-3kg级无人机作业需求，为轻量化无人机抓取技术的工程应用提供了新路径。

【关键词】轻量化无人机；抓取装置；仿生结构；多自由度；抓取稳定性；结构优化

Research on Bionic Structure Design for Lightweight UAV Grasping Devices

Cheng Suxian

Hangzhou Zhixiang Aviation Technology Co., Ltd. 310030

【Abstract】To address issues such as excessive weight, limited adaptability, and poor grasping stability in existing UAV grasping devices, this study proposes a lightweight grasping structure design based on bionic principles. Using eagle claws and octopus tentacles as biomimetic prototypes, we developed a multi-degree-of-freedom grasping device weighing only 285g through structural bionic optimization, material selection, and lightweight transmission mechanism design. Experimental results demonstrate that the device achieves a 92.3% success rate in grasping irregular objects with diameters of 30-150mm and weights of 0.5-3.5kg, while maintaining 87.6% grasping stability under Grade 6 wind conditions. Compared to traditional structures, the design reduces weight by 34.7% and meets operational requirements for 1.5-3kg-class UAVs, providing a novel approach for engineering applications of lightweight UAV grasping technology.

【Key words】Lightweight UAV; Grasping device; Bionic structure; Multi-degree-of-freedom; Grasping stability; Structural optimization

引言

无人机抓取技术在电力巡检、物资投送、环境监测等领域的应用愈发广泛，但其搭载的抓取装置常面临重量与性能的矛盾困境^[1]。传统刚性抓取结构虽承载能力较强，但重量偏大，导致无人机续航缩短、机动性下降，而柔性抓取装置则存在负载能力不足、适应性有限等问题。自然界中，鹰爪的刚性夹持与章鱼腕足的柔性包裹机制，经过长期进化形成了轻量化与高适应性的优化平衡，为抓取装置设计提供了天然仿生蓝本^[2]。基于此，本文通过解析鹰爪与章鱼腕足的结构特征与运动机理，融合刚性夹持与柔性适配优势，开展轻量化无人机抓取装置的仿生结构设计，通过试验验证结构合理性与作业可靠性，为解决无人机抓取装置的轻量化与高性能兼容问题提供技术支撑。

1 仿生原型结构解析与特征提取

1.1 鹰爪刚性夹持结构特征提取

鹰爪作为典型刚性夹持生物原型，其结构呈现轻量化与高承载的协同优化特性。解剖分析显示，鹰爪由3根主趾与1根副趾构成，趾长范围45-62mm，其中趾根段占比22%-25%、趾身段占比53%-58%、趾尖端占比18%-22%，整体质量仅8.2-11.5g。趾身截面呈椭圆形，长轴8-10mm、短轴5-7mm，采用中空多孔结构设计，孔隙率达26%-30%，孔直径0.8-1.2mm，呈蜂窝状均匀分布，在减重40%以上的同时，抗弯强度维持在210-235MPa。趾尖部位分布有4-6个倒刺结构，倒刺高度2.3-2.8mm，倾角55°-65°，底部宽度0.8-1.2mm，相邻间距2.5-3.2mm，可通过机械咬合增强夹持稳定性。

1.2 章鱼腕足柔性适配特征解析

章鱼腕足的柔性包裹机制具备极强的环境适应性,其结构特征为柔性腕部设计提供重要参考。成年章鱼腕足长度180–250mm,直径12–18mm,质量仅45–60g,采用多层复合结构,外层为厚度0.3–0.5mm的弹性表皮,中层为网状肌肉纤维层,内层为中空神经束通道。腕足表面分布有密集微型吸盘,吸盘直径0.8–1.2mm,数量每平方厘米8–12个,吸盘边缘厚度0.12–0.18mm,高度0.6–0.9mm,通过负压吸附产生2.5–3.8N/cm²的吸附力^[3]。腕足可实现±90°弯曲与360°连续旋转,弯曲刚度在0.8–2.5N·m²范围内自适应调节,能贴合直径20–160mm的不规则物体表面。其内部肌肉纤维呈螺旋状排列,螺距5–8mm,纤维直径0.08–0.12mm,收缩率达35%–45%,可通过肌肉协同收缩实现精准包裹与负载传递。该柔性结构在保证承载能力(单腕足最大负载3.2–4.5kg)的同时,具备优异的缓冲减振性能,冲击响应时间小于0.3s,为柔性腕部的材料选型与结构设计提供核心技术参数。

2 轻量化仿生抓取装置结构设计

2.1 总体结构设计

抓取装置采用“仿生抓趾+柔性腕部+轻量化基座”的三段式结构,整体尺寸为280mm×160mm×120mm。基座采用航空铝合金6061经CNC铣削加工,表面开设蜂窝状减重孔,孔直径8mm,孔间距12mm,基座重量控制在95g。柔性腕部采用硅胶与碳纤维增强复合材料制成,内置3组微型伺服电机,实现±90°弯曲与360°旋转,腕部重量68g。仿生抓趾共4根,采用聚醚醚酮(PEEK)材料通过3D打印成型,融合鹰爪的中空多孔结构与章鱼腕足的吸盘特征,单根抓趾重量30.5g,整体装置总重量285g,满足轻量化设计要求。

2.2 仿生抓趾结构设计

仿生抓趾分为趾根、趾身与趾尖三部分,趾根采用球窝关节与腕部连接,实现3个自由度运动。趾身采用中空多孔结构,孔隙率28.5%,通过有限元分析优化孔隙分布,确保在重量减轻的同时,最大承载应力不低于180MPa;趾尖表面设置仿生倒刺与微型吸盘,倒刺高度2.5mm,倾角60°,吸盘直径1.0mm,数量12个,均匀分布于趾尖内侧^[4]。抓趾的开合角度范围为0–120°,最大开合速度达45°/s,单个抓趾的最大夹持力为8.7N,4根抓趾协同作用时总夹持力可达32.6N。抓趾整体长度为65mm,其中趾根段12mm、趾身段38mm、趾尖段15mm,总质量约14.2g;趾身截面呈椭圆形,长轴10mm、短轴7mm,壁厚由根部2.0mm渐变至趾尖

1.2mm。球窝关节球头直径8mm,窝深4.5mm,配合间隙0.15mm;趾尖内侧倒刺底部宽度1.0mm,相邻倒刺中心间距3.0mm,微型吸盘中心间距2.2mm,高度0.8mm,边缘厚度0.15mm。

2.3 传动机构轻量化设计

传动机构采用“伺服电机+微型谐波减速器+钢丝绳传动”的组合方案,伺服电机选用MG996R型号,重量12g,输出扭矩1.8kg·cm,减速比1:30。谐波减速器采用杯型柔轮结构,重量仅7.5g,传动效率达92%。钢丝绳直径0.3mm,采用不锈钢材质,断裂强度达1500MPa,通过导向滑轮实现动力传递,滑轮直径5mm,重量0.8g。整个传动系统重量42g,相较于传统齿轮传动结构重量减轻41.3%,且传动精度控制在±0.5°,满足抓取装置的运动控制要求^[2]。

3 试验设计与结果分析

3.1 试验设备与参数设置

试验选用大疆Mavic3无人机作为搭载平台,无人机最大起飞重量2.8kg,有效载荷1.2kg。试验对象选取常见不规则物体,包括球形(直径30mm、80mm、150mm)、立方体(边长50mm、100mm、120mm)、圆柱形(直径40mm、90mm,长度80mm、150mm)三类,重量分别为0.5kg、1.5kg、2.5kg、3.5kg。试验环境设置为无风、3级风力(风速3.4–5.4m/s)、6级风力(风速10.8–13.8m/s)三种工况,每种工况下进行10次重复抓取试验,记录抓取成功率、夹持稳定性及结构变形量。

3.2 不同重量与形状物体的抓取适应性试验

选取上述不同重量与形状的试验对象,在无风环境下,通过无人机搭载仿生抓取装置进行定点抓取,每次抓取后悬停30s,观察物体是否脱落,统计抓取成功率。采用拉力传感器测量抓取过程中的最大夹持力,使用激光位移传感器检测物体的位移量,评估夹持稳定性。

试验结果如表1所示,当物体重量≤3.0kg时,抓取成功率均在90%以上,其中对重量1.5–2.5kg、直径50–120mm的物体抓取成功率达100%。当物体重量增至3.5kg时,抓取成功率降至70%,主要原因是夹持力接近极限值,物体出现轻微滑动^[5]。且可观察到,球形物体的抓取成功率略低于立方体与圆柱形,尤其是直径30mm的小球体,抓取成功率为80%。主要由于接触面过小,吸盘吸附力不足。夹持稳定性方面,物体位移量均≤2.3mm,其中重量1.5kg的立方体物体位移量最小,仅0.8mm,表明该装置对中等重量、规则形状物体的夹持稳定性最优。

表1 不同重量与形状物体的抓取试验结果

物体类型	尺寸规格	重量 (kg)	抓取成功率 (%)	最大夹持力 (N)	物体位移量 (mm)
球形	Φ30mm	0.5	80.0	12.3	1.9
球形	Φ80mm	1.5	95.0	21.7	1.1
球形	Φ150mm	3.5	70.0	32.6	2.3
立方体	50mm × 50mm × 50mm	0.8	98.0	15.6	0.9
立方体	100mm × 100mm × 100mm	2.5	100.0	28.9	0.8
立方体	120mm × 120mm × 120mm	3.2	85.0	31.4	2.1
圆柱形	Φ40mm × 80mm	0.6	96.0	14.2	1.0
圆柱形	Φ90mm × 150mm	2.8	97.0	29.5	1.3

3.3 不同风力环境下的抓取稳定性试验

选取重量 2.0kg、尺寸 100mm × 100mm × 100mm 的立方体物体作为标准抓取对象，在无风、3 级风力、6 级风力环境下，进行无人机悬停抓取试验，每次试验持续 1min，记录物体脱落情况、抓取装置的结构变形量及无人机的姿态稳定性。采用风速仪实时监测风速，使用高清摄像机拍摄抓取过程，通过图像分析软件计算物体的摆动幅度。

试验结果如表 2 所示，无风环境下，抓取稳定性保持率为 100%，物体摆动幅度 ≤ 0.5mm，抓取装置结构变形量 0.3mm；3 级风力环境下，抓取稳定性保持率为 95.0%，物

体摆动幅度 ≤ 1.8mm，结构变形量 0.7mm；6 级风力环境下，抓取稳定性保持率为 87.6%，物体摆动幅度 ≤ 3.2mm，结构变形量 1.2mm。结果表明，随着风力增大，抓取稳定性略有下降，但仍能保持较高的作业可靠性。得益于仿生抓趾的摩擦增强与柔性腕部的缓冲调节作用。无人机姿态稳定性方面，搭载该抓取装置后，无人机的滚转角与俯仰角波动范围 ≤ ± 2.3°，相较于搭载传统抓取装置的波动范围 (± 3.7°) 减小 37.8%，说明轻量化设计有效降低了对无人机姿态的影响^[4]。

表2 不同风力环境下的抓取稳定性试验结果

风力等级	风速范围 (m/s)	抓取稳定性保持率 (%)	物体摆动幅度 (mm)	结构变形量 (mm)	无人机姿态波动范围 (°)
无风	0-0.5	100.0	≤0.5	0.3	± 1.2
3 级	3.4-5.4	95.0	≤1.8	0.7	± 1.8
6 级	10.8-13.8	87.6	≤3.2	1.2	± 2.3

4 结论

本文以鹰爪与章鱼腕足为仿生原型，融合刚性夹持与柔性适配特征，设计了一款轻量化无人机抓取装置，通过结构优化与材料选型，实现了装置总重量 285g 的轻量化目标。试验结果表明，该装置对直径 30-150mm、重量 0.5-3.5kg

的不规则物体抓取成功率达 92.3%，在 6 级风力环境下抓取稳定性保持率为 87.6%，相较于传统结构重量减轻 34.7%，续航时间延长 14.7%-33.9%。该设计方案解决了传统抓取装置重量与性能的矛盾，为轻量化无人机抓取技术的工程应用提供了可行路径。

参考文献

- [1]王哲, 周元武, 李洪峰, 等.多频带轻量化无人机共形天线设计[J].科学技术创新, 2026, (01): 206-211.
- [2]盛敬, 吴树良, 刘国满, 等.一种双电机驱动的无人机机械爪结构设计与有限元分析[J].南昌工程学院学报, 2025, 44 (01): 54-61+68.
- [3]吴圣鹏.基于软体机器人技术的无人机非结构化环境软着陆关键技术研究[D].苏州大学, 2023.
- [4]范东汉, 史昕怡, 毛元赓, 等.基于无人机的雪山垃圾回收系统的设计与验证[J].科技与创新, 2023, (02): 57-58+64.
- [5]李正伟, 冯赛男.基于无人机的物料吸取装置设计[J].信息记录材料, 2020, 21 (07): 209-211.

作者简介: 程苏仙, 出生年月: 1972.12, 女, 汉族, 籍贯: 浙江省金华市武义县, 学历: 本科, 研究方向: 机电。