DOI: 10.3901/JME.2019.15.109

微小型跳跃机器人研究现状综述*

莫小娟¹ 葛文杰¹ 赵东来¹ 魏敦文²

(1. 西北工业大学机电学院 西安 710072;

2. 电子科技大学机械与电气工程学院 成都 611731)

摘要: 自然界的动物借助跳跃运动能够跨越数倍身体尺寸的障碍物,从而增强其越障能力和环境适应能力。动物跳跃运动模式主要包含以大型动物如袋鼠等采取的连续型跳跃,和各种小型动物如昆虫和青蛙等采取的间歇式跳跃。结合国内外微小型跳跃机器人的研究现状,将跳跃机器人分为非仿生跳跃机器人和仿生跳跃机器人,并对比现有机器人的跳跃性能,分析其在实现可控起跳、空中姿态调节和落地缓冲复位等方面采取的策略,最后展望了微小型跳跃机器人的发展趋势。

关键词: 跳跃机理; 跳跃运动; 微小型跳跃机器人; 仿生机器人

中图分类号: TG156

Review: Research Status of Miniature Jumping Robot

MO Xiaojuan¹ GE Wenjie¹ ZHAO Donglai¹ WEI Dunwen²

(1. School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering,

University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731)

Abstract: Some animals can overcome obstacles that are several times of their own body sizes relying on jumping, which helps animals increase the ability of crossing obstacles and environmental adaption. Jumping locomotion can be divided into continuous jumping adopted by kangaroo and other big size animals, and non-continuous jumping which is adopted by small size animals, such as frogs and some insects. Miniature jumping robots are classified into non-bionic and bionic jumping robots. The jumping performance and adopted strategies on controllable takeoff, in-air posture adjustment, landing buffering and resetting of existed miniature jumping robots are compared, and the developmental trend of miniature jumping robots are predicted.

Key words: jumping mechanism; jumping; miniature jumping robots; bionic robot

0 前言

跳跃运动,相比轮式、步行和履带式等移动模式,具有更好适应非结构化地形、更强越障和快速多躲避危险等性能优点,因而跳跃机器人在未来考古探测、反恐作战、星际探测和战场侦察中有广阔的应用前景。尤其是星际探测领域,在火星以及月球的低重力环境下,跳跃能够发挥更大的优势。

但跳跃运动是一种靠爆发力作用和短时能量密度很高的运动方式。在自然界中,跳跃通常和其他运动方式比如行走、滑行和飞行等结合,通过多种运动模式的协同作用使动物能够在各种复杂自然环

境中实现灵活高效的运动。跳跃是袋鼠和夜猴的主要运动方式,也辅助成年蝗虫达到飞行所需的速度。跳跃辅助脊柱动物(袋鼠、夜猴和青蛙等)和无脊椎动物(蝗虫、沫蝉、跳蚤和叩头甲等)跨越沟壑、障碍物等不平坦地面,大大提高了动物的移动性能。动物的跳跃运动给仿生工程带来了很多启示。目前跳跃研究主要集中在动物跳跃机理和跳跃机器人的研究。

卡耐基梅隆大学 RAIBERT 等在弹簧倒立摆模型基础上研制了单足、双足和四足跳跃机器人,并由此开启跳跃机器人的研究序幕^[1]。波士顿动力公司在此理论上研制的大狗机器人^[2]更是性能优越,有着惊人的肢体协调能力和环境适应能力。BROWN 等提出的平面弓形机器人^[3]和三维弓形机器人^[4]利用绳索机构在腾空阶段实现弓形腿蓄能并能够通过尾巴实现机体平衡完成连续跳跃。以上跳

* 国家重点研发计划(2017YFB1300101)、国家自然科学基金(51705066)和中央高校基本科研业务费(ZYGX2016KYQD137)资助项目。20180719收到初稿,20181112收到修改稿

跃机器人都是通过模仿大型动物的关节运动实现连续性跳跃,重量体积较大,涉及的动力学模型和控制理论复杂。

自然界中动物根据自身条件采取不同的跳跃方式,袋鼠可以在落地过程中实现能量积蓄和姿态调整,从而能够进行连续跳跃;而像蝗虫、青蛙等小型动物在落地后需要重新积蓄能量,只能实现间歇式跳跃。从质量不足 1 mg 的跳蚤到 2.5 g 的蝗虫都能利用储蓄的能量实现高效的间歇式跳跃,并和其他运动模式协同工作,实现运动的高效性和灵活性,这与动物们自身独特的身体结构和能量积蓄方式相关。而在机器人设计中,由于机器人的跳跃性能随着机体的总质量增加而降低,因此微型化和群体协作^[5]是跳跃机器人重要的发展方向。

本文主要针对结构最大尺寸在 50 cm 以内的微

小型跳跃机器人开展综述,在这一尺度内的跳跃机器人极少涉及多关节的复杂控制,跳跃功能的实现更多地依靠机构的优化设计,控制较为简单。本文将微小型跳跃机器人分为仿生与非仿生两类,对跳跃机理、空中姿态调节机理、落地缓冲和复位机理等研究现状做一个总结概述,并对微小型机器人未来的发展方向进行展望。

1 微小型跳跃机器人分类及研究现状

1.1 非仿生微小型跳跃机器人

非仿生微小型跳跃机器人的分类以及研究现状如表 1 所示。根据利用的驱动能量的不同,将其分为机械弹性能、化学释放能和场力作用能三类,其具体分类以及研究现状如表 1 所示。

表 1 非仿生微小型跳跃机器人分类

能源形式	驱动元件	作者	机器人类型	性能特征
机械弹性能	线型弹簧	FIORINI 等 ^[6-7]	JPL 第一代跳跃机器人	间歇式跳跃;球形外壳,低重心,自动复位
		GUNTHER 等 ^[8]	弧形脚自平衡跳跃机器人	连续跳跃;并联弹性驱动,正弦力矩曲线
	板簧	YAMADA 等 ^[9-10]	卡入式弯曲跳跃机器人	间歇式跳跃;封闭弹性圈,高频跳跃,控制简单
	曲梁	REIS 等 ^[11]	曲梁振动跳跃机器人	连续跳跃;小质量转动驱动曲梁振动,运动效率高
	扭簧	ZHAO 等 ^[12]	Msu tailbot	间歇式跳跃;轮式滚动,差速转向;平衡尾辅助模式切换
	高弹性体	CHURAMAN 等 ^[13]	MEMS 驱动跳跃机器人	间歇式跳跃;高弹性体,手动驱动,协同微纳制造
	记忆合金	SUGIYAMA 等 ^[14-15]	记忆合金爬跳机器人	间歇式跳跃;爬跳结合,落地稳定,电压交替驱动不同记忆合金丝
	气动元件	NI 等 ^[20]	气压驱动跳跃机器人	间歇式跳跃;四腿分别驱动,可以实现方向控制
化学释放能	气体燃烧	BARTLETT 等 ^[16]	刚度阶梯渐变跳跃机器人	间歇式跳跃;多种材料混合 3D 打印,刚度阶梯渐变,软体
		LOEPFE 等 ^[17]	球形跳跃机器人	间歇式跳跃;改变燃气比例和流速调节速度;球形柔性外壳实现落地缓冲和自动复位
		MIAO 等 ^[18]	蜂窝减震轮式跳跃机器人	间歇式跳跃;蜂窝减震轮滚动以及辅助落地缓冲,负载能力强
		SHEPHERD 等 ^[19]	三足软体跳跃机器人	间歇式跳跃;跳跃性能突出,软体辅助落地缓冲
场力作用能	外在磁场	HU 等 ^[21]	多运动模式软体机器人	间歇式跳跃;外在磁场驱动,体积微小型,多运动模式灵活切换

1.1.1 机械弹性能

大多数现有跳跃机器人采用的都是利用弹性元件和锁死释放机构结合,先蓄能后释放的方式实现间歇式跳跃,也有少数可以实现连续跳跃。

如图 1a 所示为美国宇航中心喷气实验室提出的第一代跳跃机器人^[6-7],利用线性弹簧储能,通过触发释放机构实现弹跳运动。落地后利用低重心不倒翁原理,球形外壳辅助机器人自动复位,再重新储能和释放,从而实现间歇性跳跃运动。密歇根州立大学利用扭簧的弹性变形设计了一系列的间歇式跳跃机器人。如图 1b 所示,其最新产品利用电动机和单向轴承对绳索机构实现蓄能和释放,并为机器人增加了一个用于空中姿态调节的尾巴^[12]。落地之后,跳跃电动机的传动齿轮和驱动尾巴的传动齿轮组成了一对滚动轮,可以实现滚动,利用两轮的差速运行实现转向。尾巴同时起到了支撑杆的作用,实现机器人两种运动

模式之间的快速切换。日本名古屋工业大学根据闭合弹性体的卡入式弯曲(Snap-through)设计了一系列的弹跳机构,利用该原理设计的单向驱动的台阶跳跃机器人^[9]能够实现高频率跳跃。

在利用弹性能实现跳跃的微小型机器人中,除了采取先蓄能再释放的间歇式弹射器机构,也有一些利用机械结构实现了小幅度的连续跳跃。如图 1c 所示,苏黎世联邦理工学院提出了利用小质量块转动引起的曲梁振动实现机器人连续稳定跳跃^[11]。该机器人的驱动方法非常新颖,并且能量利用率与人行走的效率相当。图 1d 为该研究团队提出的弧形脚自平衡跳跃机器人^[8],利用控制电动机输出正弦变化的力矩曲线,与弹簧组成的并联弹性驱动,通过优化弧形脚和机构其他参数,可以得到乐观的前进速度并能够实现稳定连续跳跃。

如图 1e 所示为基于弹性体结合 MEMS 技术研

制的 $4.0\text{ mm} \times 4.0\text{ mm} \times 0.3\text{ mm}$ 的 8 mg 的微尺寸跳跃机构, 能够在手动驱动和释放的情况下跳跃 32 cm , 是身体尺寸的 80 倍^[13]。该机构的研发是首次在 MEMS 技术中利用传统材料与高弹性体材料混合制造, 并验证了高弹性材料具有重复蓄能释放的潜在特性, 为跳跃机器人的进一步微小型化提供了设计和加工方案。如图 1f 所示, 日本立命馆大学利用电压交替驱动环形圈和球型圈内部多根记忆合金丝

来实现爬行和跳跃两种功能^[14], 并研究了起跳初始轮廓对于环形圈跳跃机器人跳跃性能的影响^[15]。该设计方案将滚跳结合, 运动灵活, 但目前采用记忆合金驱动的跳跃机器人没有解决能源自载的问题。香港科技大学研制的气压驱动跳跃机器人, 利用四个弹性体气动执行器分别驱动机器人的四条腿, 通过电磁阀控制每条腿的施加气压和加压顺序, 实现起跳控制^[20]。

图 1 机械弹性能驱动的跳跃机器人

目前采用机械弹性能驱动的跳跃机器人主要着眼于跳跃性能的提高, 在跳跃方向控制、落地缓冲以及姿态调整等上面有所缺失。

1.1.2 化学释放能

化学释放能能量密度大, 便于控制起跳速度和方向, 但是机构设计上较为复杂。

如图 2a 所示, 哈佛大学研制了利用多材料混合 3D 打印的刚度阶梯渐变的软体跳跃机器人, 该机器人通过控制三条气动腿的初始高度调节起跳角度并利用丁烷燃烧产生的能量实现跳跃。刚柔结合的设计思路在保证跳跃性能的同时, 解决了落地缓冲问题^[16]。如图 2b 所示, 瑞士苏黎世化学和生物工程研究所提出了一种基于一氧化二氮和丙烷/丁烷混合气体燃烧反应的球形跳跃机器人, 该机器人通过改变燃气比例和流速可以改变跳跃速度。柔性外壳可以实现落地缓冲, 球形外壳和低重心辅助实现主动复位^[17]。

图 2c 为哈尔滨工业大学深圳研究院研制的蜂窝减震轮式跳跃机器人^[18], 通过伺服电动机调节支撑腿的角度可以调节起跳角度。利用丙烷和一氧化二氮的燃烧反应来获得跳跃所需的能量。该机器人自重 1.25 kg , 在负重 3.75 kg 时可以达到 7.5 m 的跳跃高度, 虽然目前该机器人没有解决燃料携带的问题, 只能实现一次跳跃, 但其超强负载能力引人注

目。如图 2d 所示, 哈佛大学研制的三足软体跳跃机器人^[19], 利用甲烷燃烧反应在短时间内释放的能量, 能够实现 66 cm 的跳跃高度。

图 2 化学释放能驱动的跳跃机器人

利用化学释放能驱动的跳跃机器人负载较大, 但是具有独立完整驱动以及控制的跳跃机器人体积也相对较大, 微小型化较为困难。

1.1.3 场力作用能

在微小型机器人领域, 场力作用能驱动越来越

普遍。德国马克思普朗克科学院智能系统研究所研制的多运动模式软体机器人^[21]通过改变外在磁场的变化,可以实现爬行、跳跃、蠕动、游泳和负载运行等多种运动模式,并能快速切换运动模式以适应不同的运动环境。该机器人通过外在磁场解决了微小型机器人的驱动问题,为医疗领域内窥镜研究和靶向药运输提供了新的解决方案。

1.2 仿生微小型跳跃机器人

自然界中各种各样的昆虫和小型动物为研究仿生微小型跳跃机器人提供了模板。常见的仿生微小型跳跃机器人有仿蝗虫、仿跳蚤和仿夜猴跳跃机器人等。由于仿生微小型机器人种类繁多,故本文从仿生对象的角度来进行分类,并基于蓄能释放的机构进行总结。仿生微小型跳跃机器人的分类以及研究现状如表 2 所示。

表 2 仿生微小型跳跃机器人分类

仿生对象	作者	弹性元件	最大尺寸/cm	质量/g	跳跃高度/cm	性能特征
蝗虫	KOVAC 等 ^[22]	扭簧	5	7	140	离心凸轮,质量轻,跳跃性能优越
	ZAITSSEV 等 ^[23]	扭簧	18	22	310	扭簧模拟半月板,绳索离合机构传动比较高
	TRUONG 等 ^[24]	拉簧	5	7	71	模仿拉伸肌和屈曲肌的配合作用,离心凸轮
	ZHANG 等 ^[25-26]	扭簧	12	154	88	转动复位,用于监控的群机器人,单驱动爬跳结合
跳蚤 [27-28]	ACKERMAN 等 ^[29]	气压缸	—	—	1000	轮跳结合,跳跃角度和高度可调,仿水,实用型
	JUNG 等 ^[30]	记忆合金	2	1.1	60	模拟跳蚤跳跃机理,刚度模型分析腿部刚度影响
	KOH 等 ^[31]	记忆合金	2	0.03	60	双稳态扭矩反转,跳跃高度是身体的 150 倍
蟋蟀/ 蟑螂	BEER 等 ^[32]	气压缸	5	—	—	模仿蟑螂提升身倾角以提高越障能力的策略
	LAMBRECHT 等 ^[33]	拉簧	9~10	90~190	18	轮跳结合,三爪轮改进越障能力
	WOOD 等 ^[34]	压电驱动	0.45	2.8	—	厘米级制造和驱动技术,多运动模式,运动灵活
蝉	BONSIGNORI 等 ^[35]	拉簧	5	10	—	磁铁驱动
	BONSIGNORI 等 ^[35]	拉簧	5	15	—	首次提出离心凸轮这一设计方案
	SCARFOGLIERO ^[36]	拉簧	5	22	10	恒定加速度起跳+固定翼,落地冲击小
	JUNG 等 ^[37,50]	记忆合金	—	3.06	—	齿轮保证两腿同步,预调膝关节转角实现调向
夜猴	HALDANE 等 ^[38]	扭簧	15	98	100	串联弹性驱动+机械优势,惯性尾+螺旋桨实现姿态调控
水龟	YAN 等 ^[39-40]	拉簧	—	10.2	12	超疏水镍泡沫材料提供浮力以及减小能耗
	JIANG 等 ^[41]	碳纤维弹性带	10	12.5	9.5	结构简单,不完全齿轮和弹性元件结合实现跳跃
	KOH 等 ^[42]	记忆合金	10	0.068	14.2	尺寸,运动规律和支撑力变化趋势均与水龟接近

1.2.1 仿蝗虫跳跃机器人

蝗虫的跳跃机理研究较为透彻,蝗虫通过后腿胫节的快速释放实现跳跃。蝗虫后腿股节在跳跃之前通过屈肌的缓慢作用来拉伸伸肌和半月板,再通过伸肌和半月板的快速释放实现了胫节迅速蹬地获得较大的起跳力。除了跳跃以外,蝗虫还能够实现六足爬行和扑翼飞行。

如图 3a 所示,瑞士洛桑联邦理工学院提出的 7 g 仿蝗虫跳跃机器人利用微小型电动机以及减速箱驱动离心凸轮转动,对髁关节处的扭簧进行缓慢加载和快速释放。扭簧储蓄的能量通过平行四边形腿传递到脚,并对机器人机身进行加速^[22]。通过手动调节脚的长度,可以改变起跳角度、加速时间和脚的运动轨迹;通过手动调节扭簧固定的位置,可以实现扭簧储蓄能量在一个小范围内的阶梯变化。两者协调作用之下,可以调整起跳角度和速度。

如图 3b 所示,以色列特拉维夫大学模仿沙漠蝗虫的半月板^[23]在跳跃中的作用,设计了在关节处利

用扭簧蓄能的微小型跳跃机器人。该机构将蝗虫后足的股节和胫节设计成两根等长的碳纤维杆,在关节处用扭簧替代半月板,利用伺服电动机驱动绳索机构,实现能量积蓄之后,对机构进行锁死,然后电动机反转,释放绳索,在触碰到触发机构之后,后腿快速释放,实现高效的跳跃。理论计算表明,这套绳索驱动的机构的传动比约为 1/50,远远高于离心凸轮的传动比,约为 1/5~1/10。较高的传动比,使得利用小电动机可以驱动弹性系数更大的扭簧,积蓄更多的能量。

韩国建国大学通过模仿蝗虫起跳过程中股节中拉伸肌和屈曲肌的配合作用,用拉伸弹簧模拟拉伸肌肉,利用钢丝绳模拟屈曲肌并结合微小型电动机、减速齿轮箱和离心凸轮,设计的仿蝗虫跳跃机器人如图 3c 所示^[24]。东南大学提出了两代仿蝗虫跳跃机器人,并就转向复位和群机器人的路径规划等展开了系统深入的研究。第一代仿蝗虫跳跃机器人^[25],如图 3d 所示,采取的跳跃机理与瑞士洛桑联邦理工

学院研制的机器人^[22]类似, 利用离心凸轮压缩扭簧存储能量, 实现跳跃。新增有配重的支撑腿, 可以在机器人落地之后实现主动复位, 实现起跳方向的不连续调节。通过改变尾巴上的配重位置改变机器人质心位置调节起跳角度, 可以实现起跳角度在小范围内的改变, 并结合 zigbee 组网技术研究将该机器人应用于远程家庭环境监控的可能性。第二代仿蝗虫跳跃机器人利用单电动机驱动可以同时完成爬行和跳跃, 主要模仿蝗虫的多运动模式^[26]。

图 3 仿蝗虫跳跃机器人

北京航空航天大学在蝗虫跳跃机理、扑翼飞行和落地缓冲上展开了深入的研究^[43-46], 并研制了基于不完全齿轮驱动的轮式跳跃机器人。通过分析蝗虫落地的高速视频, 建立了相应的数学模型研究了蝗虫的落地缓冲机理, 提出的多分支缓冲腿模型, 为解决间歇式跳跃机器人解决落地缓冲问题提供了新思路。

图 4 仿跳蚤跳跃机器人

1.2.3 仿蟋蟀/蟑螂跳跃机器人

西储大学在蟋蟀的爬行和跳跃机理的基础上^[52], 提出了如图 5a 所示的基于气动驱动的仿蟋蟀爬跳

1.2.2 仿跳蚤跳跃机器人

不同类型的跳蚤跳跃性能各异, 但总体来说, 尺寸在几毫米左右的跳蚤可以实现约 30 cm 的跳跃距离, 是自身尺寸的数百倍, 跳跃性能惊人^[27]。跳蚤通过杠杆传递髁关节处的节肢蛋白积蓄的能量以驱动胫节和跗节, 从而获取跳跃所需的地面接触力^[28, 47]。

美国圣地亚国家实验室研制了气压驱动的弹跳机器人, 包括从第一代的 Urban Hopper 到和波士顿动力(Boston Dynamics)公司基于此联合研发的 SandFlea 弹跳机器人, 如图 4a 所示。SandFlea 可以自由调节起跳角度、高度和距离, 利用 CO₂ 产生的爆炸冲击能够实现 10 m 高的跳跃高度, 能够根据障碍物的高度调节跳跃高度, 可以实现 25 次连续跳跃^[29]。但其无法实现空中姿态调整, 导致该机器人空中姿态不稳定, 机身携带的相机无法获得有效的影像资料^[29]。

国立首尔大学通过模仿跳蚤的跳跃机理, 利用三根功能各异的记忆合金丝来模仿跳蚤的后腿中的肌肉工作协作机理^[48], 制造了近 1.1 g, 体长仅 2 cm 的机器人, 如图 4b 所示, 可以实现身体尺寸近 30 倍的跳跃高度。该团队研究了腿部刚度和起跳角度对于起跳效率和转换效率的影响^[30]。该团队后续提出双稳态扭矩反转机构仿跳蚤跳跃机器人^[31], 其结构如图 4c 所示, 质量仅为 30 mg 左右, 能够实现身体高度 150 倍的跳跃高度。在解决微小型尺寸跳跃机器人无法实现机载驱动问题时, 该团队提出可以考虑外加磁场、动物能和通过辐射传递热能驱动记忆合金实现跳跃^[49]。在现有微尺度机器人中, 有利用光场驱动的仿尺蠖爬行机器人^[50]和外磁场驱动的水母机器人^[51], 故通过场驱动来解决微尺度的跳跃机器人机载能源问题是比较合理的方案。

机器人^[32], 可以实现很短距离的跳跃。为了提高运动的灵活性, 提出了如图 5b 所示的仿蟑螂滚跳机器人^[33], 特殊的三爪轮结构设计通过模仿蟑螂跨过障

碍物时所采取的提升身体倾角的策略^[53], 大大提高该机器人跨越障碍物的能力, 跳跃能力也得到了提升。

哈佛大学最近提出的仿蟑螂爬行跳跃机器人 HARM^[34], 如图 5c 所示, 是该团队对于厘米级机器人制造技术和驱动技术的一次尝试。该四足机器

人四足构造一致, 两个压电微型制动器可以实现控制足部的全空间灵活运动。4.5 mm 长, 质量为 2.8 g 的机器人能够通过四足的协调控制, 实现 17.2 cm/s 的爬行速度, 像蟑螂一样高速爬行、跳跃、爬升和急转弯, 携带有效载荷并从高处坠落而不至于受伤。

图 5 仿蟋蟀/蟑螂跳跃机器人

1.2.4 仿蝉跳跃机器人

意大利圣安娜高等研究学校仿生机器人研究所利用高速摄像机发现叶蝉在起跳过程中保持恒定加速度。依据此发现, 提出了如图 6a 所示的第一代^[35], 如图 6b 所示的第二代^[35], 和如图 6c 所示的第三代机器人, 其中第三代机器人通过优化四杆机构参数能够模拟叶蝉的恒定加速度起跳^[54], 并在后续试验中为该机器人加上了固定翼。由于该机器人能够实现的跳跃距离和高度较小, 落地冲击较小, 借助固定翼的辅助, 该机器人可以实现稳定着地和连续跳跃。

图 6 仿蝉跳跃机器人

动物研究表明在稻飞虱幼虫的身体构造中, 两侧跳跃后腿基本保持在一个平面内, 两侧转子关节处存在着用于保证起跳过程高度同步的动物非对称齿轮机构^[55]。在沫蝉跳跃过程中, 昆虫通过调节两

侧后腿胫节的相对位置, 然后同步起跳, 实现对于起跳角度的控制^[56]。结合这些最新的动物研究结果, 首尔国立大学提出的仿沫蝉可调节起跳方向跳跃机器人通过一个齿轮机构来保证同步起跳并且预先调整胫节相对股节的位置, 实现起跳方向的可控性, 如图 6d 所示。尽管在提出的机构中, 关节处的角度并不能主动调节, 但是该方案的提出为微小型跳跃机器人在起跳方向的控制上提供新的思路^[37]。

1.2.5 仿夜猴跳跃机器人

如图 7 所示, 加州大学伯克利分校最近提出的仿夜猴跳跃机器人 Salto^[38], 通过多杆机构结构参数的优化设计可以实现足部轨迹始终保持在竖直直线上, 质心无偏转, 地面接触力始终保持为一个稳定值等多个目标, 并结合串联弹性驱动器设计, 可以

图 7 仿夜猴跳跃机器人

减少对于电动机功率的要求,实现高性能跳跃。第一代 Salto 通过一个惯性尾巴可以实现机器人俯仰姿态调整,实现类似人类的跑酷运动;改进后的 Salto-1P 通过增加了两个螺旋桨装置,已经能够实现机器人机身的偏航和滚动,实现连续跳跃,达到微小型跳跃机器人性能的新高度。这款微小型跳跃机器人不拘泥于形式上的仿生,更加注重与动物类似的跳跃机理和性能^[57]。

1.2.6 仿水黾跳跃机器人

水黾是一种在湖水、池塘、水田和湿地中常见的小型水生昆虫,可在水面上划行和跳跃。各国学者对水黾的飘浮机理和运动方式等进行了深入研究,研究结果表明水黾在水面的灵活运动能力主要得益于自身具有的超强疏水性^[58]的腿部结构为其运动提供了充足的表面张力,并且水黾可以通过增加腿部入水深度以达到增加支撑力的作用^[59]。

哈尔滨工业大学从微观上分析超疏水性材料的微观作用机理,并据此分析了仿水黾机器人的运

动机理,为后续仿水黾机器人的研发^[60]打下了基础。图 8a 为哈尔滨工业大学提出的仿水黾跳跃机器人,通过试验和仿真研究了脚掌面积、弹簧刚度和起跳角度对于机器人起跳性能的影响^[39],该机器人能够充分利用超疏水镍泡沫材料产生的浮力以及在减小能量消耗上的作用^[40]。密歇根州立大学研发了如图 8b 所示的利用不完全齿轮和绳索驱动碳纤维弹性带,实现脚掌的快速蹬水完成跳跃的机器人^[41]。

首尔国立大学和哈佛大学的研究人员合作研发了如图 8c 所示的质量仅 68 mg 的微尺度仿水黾跳跃机器人^[42]。该机器人尺寸、运动规律和起跳过程中足部的支撑力变化趋势均与水黾非常接近,并且在改变足部的长度情况下,可以使得在地面和水面的跳跃性能非常接近。同时该团队利用高速摄像机建立水黾起跳过程中腿部的支撑力的数学模型并总结出水黾通过将两侧四足向身体内侧运动而不破坏水面以获取最大动量的运动规律。

图 8 仿水黾跳跃机器人

最近,意大利圣安娜高等研究学校的软体机器人团队提出了模仿章鱼的水下跳跃机器人^[61],跳跃机器人的运动环境再一次被拓宽。

2 起跳可控性

微小型跳跃机器人的起跳可控性主要包括起跳方向、速度以及角度三方面。起跳方向控制主要是通过外加机构转动机身实现的,且目前能够实现起跳方向调整的机器人并不多。瑞士洛桑联邦理工学院通过另外一个电动机调整机器人身体绕碳纤维框轴线整体转动来实现起跳方向的连续可调^[62];东南大学提出的跳跃机器人通过辅助尾巴支撑转动身体方向,可以实现机器人起跳方向的不连续可调,每次机身转动,可以实现起跳方向 24° 的转动^[63];首尔国立大学提出的仿沫蝉可调节起跳方向跳跃机器人,通过改变两侧跳跃足膝关节夹角可以实现机器人起跳方向在一定范围内的改变,但是该机器人目前并没有增加膝关节角度调节机构^[37];美国宇航中

心喷气实验室提出的第三代跳跃机器人和大多数和轮式结合的机器人一样,通过差速轮实现身体转向,控制机器人的起跳方向。

大多数微小型跳跃机器人也一样不能实现自主实现起跳角度的调节,例如瑞士洛桑联邦理工学院提出的弹跳机器人^[22]和西北工业大学提出的可调传动比跳跃机器人^[64]分别通过改变杆长和齿轮传动比实现起跳角度的调节,但是必须对机器人进行重新组装;东南大学提出的第一代跳跃机器人可以通过调节配重改变机器人重心来实现机器人起跳角度在小范围内的调整^[65];目前能够实现起跳角度大范围调节的跳跃机器人有美国宇航中心喷气实验室提出的第三代跳跃机器人,通过电动机调节六杆跳跃机构相对地面的角度可以调节起跳角度^[66];Sandflea^[67]和哈尔滨工业大学深圳研究院研制化学能驱动的跳跃机器人^[18]通过类似的支撑腿结构调节起跳角度。

动物实现起跳速度的控制十分容易,只要调节弹性元件比如肌肉等中存储的能量,就能比较轻松

地实现起跳速度的控制,但由于微小型跳跃机器人大多属于间歇式跳跃,采用的能量存储和释放机构对于弹性存储元件的初始位置有明确的限制,因此目前已有的利用弹性元件储能的微小型跳跃机器人大多不能实现起跳速度的控制,特例如首尔国立大学提出的有两个临界储能终点状态的跳跃机器人可以实现两种不同的起跳速度^[68]。目前能够实现起跳速度调节的更多是化学能和其他能量驱动的机器人,例如瑞士苏黎世化学和动物工程研究所提出了基于燃烧反应的球形跳跃机器人,通过改变燃气比例和流速可以改变跳跃速度^[17]。理论上德国马克斯普朗克智能系统研究所研制的微小型多运动模式软体机器人^[21]通过改变外在磁场驱动强度和变化趋势可以实现起跳速度和方向的改变。日本立命馆大学提出的基于记忆合金驱动爬跳机器人^[69],通过控制记忆合金的变形程度和初始形状,可以改变存储的能量和能量转换率实现起跳速度的控制,但理论较为复杂。

虽然目前跳跃机器人的尺寸已经越来越接近动物尺寸,甚至在跳跃距离和高度上远远超过动物水平,但跳跃的可控性与动物之间的差距依然非常明显。动物机理的研究、微型机械和微型驱动技术的进步将进一步推进跳跃机器人的发展。

3 空中姿态调节机理研究

已经研发的跳跃机器人中考虑空中姿态调节的机器人并不多,目前主要采取的办法是增加平衡尾巴,例如密歇根州立大学通过增加平衡尾巴帮助机器人实现空中姿态平衡,并对比了不同控制器的动态控制效果^[12];中国台湾大学为仿袋鼠跳跃机器人增加的尾巴采用开环控制^[70],在初始几次跳跃过程中平衡效果显著,随着落地冲击造成的误差不断累积,机器人最终无法实现机身的平衡。由于跳跃持续时间短且起跳落地冲击大,因此采用平衡尾巴来实现机身平衡这一策略对于控制器设计和电动机响应时间等提出了很高的要求。

目前采取的空中姿态平衡的另一策略还有增加滑行翼,借助空气阻力实现滑行,还可以减小机身旋转,例如瑞士洛桑联邦理工学院为仿蝗虫机器人增加滑行翼^[71],卡耐基梅隆大学^[72]和以色列特拉维夫大学跳跃滑翔机器人^[73]。最近研发的夜猴跳跃机器人通过平衡尾和两个螺旋桨的协调作用可以实现空中姿态的调节,实现三维空间可控跳跃。

动物在起跳之后采取的身体姿态调节策略则相对更加灵活,例如蜥蜴和袋鼠利用尾巴实现身体姿

态平衡,蝗虫利用腹部摆动和扑翼飞行实现身体的平衡^[74],而猫和老鼠可以通过身体各部分的扭转来维持身体姿态的平衡;而无翅无足的蛇可以在腾空阶段用身体从头到尾横向波浪状的弯曲来实现偏航和扭转的控制,同时肋骨张开,让身体变得扁平,增加滑行面积,以利于空中稳定滑行。对比动物灵活的空中姿态调整能力,和当前跳跃机器人存在的不足,未来的跳跃机器人将更多地从动物中获取灵感,为机器人的空中姿态平衡提出更简洁的控制方案。

4 落地缓冲和复位机理研究

自然界有部分动物可以通过空中姿态调节来实现平稳落地,如袋鼠^[75],但也有很多动物如蝗虫,经常被观察到在跳跃之后背部着地^[76]。这些动物采取的落地缓冲原理各异,但无论采取什么样的姿态着地,动物都可以安全着陆并迅速调整姿态。在跳跃机器人中经常采用的落地缓冲和复位机构主要有主动复位支撑腿、辅助柔性框形结构、弹性缓冲腿和利用滑行翼降低落地速度以减小落地冲击。

4.1 主动复位

现有大多数微小型跳跃机器人的研究都忽略空中姿态调整和落地姿态问题,落地之后,存在很大可能性发生倾翻,背部或者侧身着地。利用支撑杆,在机器人落地之后,通过电动机驱动机身绕固定支撑点旋转,到达一定位置之后在重力的作用下,实现机器人复位。例如北京航空航天大学提出的滚跳机器人,如图 9a 所示,利用和跳跃腿固接的支撑腿为支点,旋转机身,实现复位^[77];东南大学提出的第一代仿蝗虫跳跃机器人也是通过增加支撑腿实现复位^[65];密歇根州立大学在机身两侧增加对称支撑腿实现机器人复位^[78],如图 9b 所示;美国宇航中心提出的第二代跳跃机器人在落地后先收缩六杆弹跳机构,再利用平面支撑腿将机身恢复到初始起跳位置,为下次起跳做好准备^[6],如图 9c 所示。

4.2 辅助柔性框形结构实现被动复位

目前现存的微小型跳跃机器人大多数都是采用辅助框架来实现落地缓冲并利用与不倒翁类似的低重心原理实现被动复位^[17,79]。例如瑞士洛桑联邦理工学院为仿蝗虫机器人设计的碳纤维框机构^[80],吸收了大部分的落地冲击并保护了内部的跳跃机构如图 10a 所示。与此同时,由于重心较低在落地之后可以实现被动复位;同样采取辅助框形结构来实现落地缓冲的还有英国巴斯大学研发的 Jollbot 球形滚跳机器人^[81],如图 10b 所示;和韩国建国大学开发的利用单电动机驱动的轮滚跳跃机器人^[82],如图

10c 所示。框形结构的采用在实现地面缓冲的同时, 还会增加新的运动模式, 比如 Jollbot 增加的滚动, 韩国建国大学研制的轮滚跳跃机器人和日本立命馆

大学研制的记忆合金滚动跳跃机器人, 如图 1f 所示。但是该复位机构大大增加了机器人的尺寸和质量, 机器人的灵活性和跳跃性能将大大降低。

图 9 主动复位跳跃机器人

图 10 柔性框辅助被动复位跳跃机器人

4.3 滑行翼的缓冲机理

第一次将滑行和跳跃机器人结合的是英国巴斯大学提出的 Glumper 跳跃滑行机器人^[81], 如图 11a 所示。该跳跃机器人在加入滑行功能之后在于空气阻力, 增加的自重和展开机构的摩擦力的共同作用下, 跳跃高度和跳跃距离下降严重^[83]。瑞士洛桑联邦理工学院大学受昆虫运动机理启示, 并结合已有的滑行机器人^[84], 对比研究了仿蝙蝠、仿蝴蝶和仿蝗虫三种折叠滑行翼, 提出了图 11b 所示的固定翼和仿蝗虫折叠翼, 并对比研究了无滑行翼, 固定或折叠滑行翼三种情况下跳跃机器人的飞行轨迹, 结果表明, 从一定高度的平台上起跳之后, 增加固定滑行翼可拉长运动轨迹并减小 54% 的落地冲击^[71], 但由于自身质量的增加, 跳跃高度从原来的 1.4 m 降低到了 12 cm。

卡耐基梅隆大学提出了一种将跳跃和滑翔结合的跳跃机器人, 如图 11c 所示, 这一机器人的跳跃模块和滑翔模块所利用的机构高度重合, 试验结果表明结合滑翔可以极大提高飞行距离和减小落地冲击^[85]。斯坦福大学提出了一种跳跃滑翔机器人, 并深入地研究了滑行翅对于延长运动距离的作用^[86],

发现可控活动折叠翼对于减少上升阶段的阻力效果显著。

以色列特拉维夫大学为已有的仿蝗虫跳跃机器人增加了折叠滑行翼和尾翼, 如图 11d 所示, 用于帮助跳跃机器人实现空中姿态调整和减小落地冲击^[87]。试验对比表明, 折叠翼相对固定翼而言, 有

图 11 跳跃滑行机器人

利于提高跳跃高度并通过减小滑行角度来获得更长的滑行距离。折叠翼的这一优势得以充分发挥的基础,是在增加了折叠翼之后,该跳跃机器人依然可以获得 1.7 m 的跳跃高度,为折叠翼模式切换和发挥作用提供充足的时间。动物中滑行模式普遍存在,但是扑翼更加广泛,动物的扑翼机构相对简单,对于整体质量影响较小,现有的扑翼结构与动物之间仍有较大的差距。

4.4 其他

弹性缓冲腿目前还处于理论研究阶段,北京航空航天大学关于蝗虫的落地缓冲机理的研究表明^[88],增加分支的新型弹性腿减小缓冲力幅值,对增大最大吸收能量和单位距离缓冲能量,有更好的缓冲作用。这些基础理论研究为新型仿生跳跃机器人奠定了基础。

5 关键技术及发展趋势

微小型跳跃机器人的性能指标主要有跳跃高度、距离、跳跃可控性、空中姿态平衡、落地缓冲、复位能力和新提出来的跳跃敏捷性等。表 3 为微小型跳跃机器人中的关键技术和现有机器人采取的策略。

表3 微小型跳跃机器人关键技术和采取的策略

阶段	关键技术	机理和采取的策略
起跳	能量存储 释放机构	离心凸轮; 不完全齿轮; 单向轴承; 棘轮棘爪
	能量来源	弹性势能; 化学能; 记忆合金; 外有磁场; 气动驱动
	起跳方向 控制	差速轮辅助转向; 尾巴辅助; 机身整体 转动; 旋翼辅助
	起跳角度 控制	支撑杆辅助调节; 变齿轮传动比; 调节 配重位置
	起跳速度 控制	多临界储能终点; 化学能; 外在磁场强 度; 记忆合金变形程度和初始位置
腾空	平衡尾巴; 滑行翼; 旋翼辅助	
落地缓冲	柔性框; 缓冲腿; 滑行翼	
复位	主动复位(支撑腿); 被动复位(弹性框, 不倒翁原理)	

纵观已有研究成果,很多微小型跳跃机器人在某些跳跃性能上已经远远超过动物,例如以色列特拉维夫大学开发的仿蝗虫跳跃机器人已经能够实现三米的跳跃高度和三米的跳跃距离^[89],这远远超过蝗虫的跳跃性能。同样,波士顿动力公司开发的仿跳蚤机器人能够达到十米高的跳跃性能,这是自然界中跳蚤无法实现的。但相对于微小型动物运动的灵活性和活动空间的多样性,微小型跳跃机器人依然存在很多局限。结合以上对于已有参考文献的研

究总结,本文预测未来微小型跳跃机器人的研究和发展将针对以下几个方面进行。

5.1 高度仿生化

随着动物跳跃机理进一步深入研究,将给跳跃机器人带来新的启发。动物在跳跃运动中采取的一些控制策略和协作策略将更多地融入到跳跃机器人的研发中,而微纳米制造技术为机器人在尺度和形态上接近动物提供了可能性。跳跃机器人在功能上将从跳跃动物运动规律中汲取灵感,实现跳跃角度、方向、速度和空中姿态的可控以及落地缓冲等。例如目前跳跃机器人中普遍采取的框形缓冲机构和被动复位机构增大了机器人的尺寸和质量,也降低了机器人的跳跃性能,而在动物中几乎无法找见类似的结构设计。未来的跳跃机器人在落地缓冲和复位功能的实现上,将更多地向动物学习,采用刚柔结合的身体结构布局,通过缓冲腿/滑行翼和扑翼等来减小落地冲击,尽可能避免机器人重量和尺寸的增加。

5.2 复合运动模式

自然界中大多数具有杰出跳跃能力的动物依然保有其他的运动模式,例如脊柱动物中的袋鼠大多数时间可以依靠前腿实现行走,老虎豹子等常用的运动模式是行走,只有在追捕猎物的时候才会奔跑跳跃。青蛙在跳跃的同时,可以实现爬行和借助于巨大的脚掌实现游泳,实现了水陆两栖。与此同时,具有杰出跳跃能力的昆虫,诸如蝗虫、跳蚤和沫蝉等,依然保有六足爬行能力,而蝗虫更是可以依靠扑翼和滑行的互相配合实现长距离的迁徙。跳跃机器人在实现跳跃过程中产生的巨大冲击力和落地时产生的冲击极易对机器人机身部件造成损害,单一跳跃模式极易造成机器人的可靠性和寿命降低。将跳跃和其他的运动模式,诸如飞行、爬行、轮式、滚式和履带等相互结合,将提高机器人的灵活性和鲁棒性。

5.3 群体化作业

微小型跳跃机器人结构简单,跳跃性能优越,并且成本较低。现阶段群机器人研究较多,并且有较广阔的研究前景,如利用群体水下机器人进行水下环境侦测和利用以及群智能机器人检测系统用于汽轮机喷气涡轮叶片质量的检测等。随着能源技术、通信技术和微小型制造系统的快速发展,相信低成本微小型跳跃机器人在不久的将来可以组成群体机器人,互相协同作业应用于危险环境,例如星际探索、考古探测、军事侦察和救援搜索等环境中。

5.4 柔性结构和弹性驱动

动物的身体构造都是刚性体和柔性体的共同组

成, 例如脊柱动物的骨骼外有肌肉再通过柔性关节连接, 蝗虫柔软的身体在落地的时候可以承受部分冲击。这启示设计者在机器人设计和制造时, 可以采取刚柔结合的策略, 充分利用柔性结构来解决跳跃机器人的落地冲击问题。弹性驱动器在跳跃机器人中的应用也越来越广泛, 夜猴机器人^[38]利用弹性驱动器所取得的杰出的跳跃性能, 能够实现跟脊柱动物类似的落地缓冲和能量积蓄^[90], 并为下一次跳跃做准备, 提高能量利用率。

5.5 新型材料的应用

从生物刚柔并济、身体结构柔顺和微小高效能特性获取灵感, 轻量化、高储能以及环境适应性强的复合材料、结构材料和智能材料成为主要发展方向, 材料新进展也将为微型跳跃机器人的驱动、性能提升以及落地缓冲等提供新思路。例如, 洛桑理工联邦学院为其研制的 7 g 仿蝗虫跳跃机器人增加的碳纤维框架有效解决了落地缓冲的问题^[80]; 记忆合金的应用利用材料的相变将跳跃过程中的蓄能、锁死和释放结合为一体, 并将滚动和爬行两种运动模式有效地结合^[14]; 德国马克思普朗克科学院智能系统研究所研制的多运动模式软体机器人^[21]由均匀在柔性材料分布的微小磁粒组成, 通过改变外在磁场的变化, 可以实现多种运动模式。

5.6 环境感知能力

动物通过视觉系统和触觉系统可以感知地面形态, 在判断遇到障碍物时, 可以根据障碍物的大小、尺寸和位置规划自己的运动轨迹, 相关的关于环境感知能力和在此基础上的运动轨迹规划也都是跳跃机器人真正意义上从实验室走向实际应用必须要经历的阶段。

6 结论

无论是否以动物作为仿生对象, 现有的微小型跳跃机器人都需要在跳跃可控性、空中姿态调节、落地缓冲和倾倒复位等问题上给出实际可行的应对策略。未来的微小型跳跃机器人将从外形和功能上实现高度仿生化, 拥有复合运动模式, 更多地使用柔性材料和弹性驱动, 结合各种新型材料实现轻量化以及跳跃性能的提升, 具备环境感知能力, 通过群体化作业协同完成任务。

参 考 文 献

- [1] RAIBERT M H. Legged robots that balance[M]. Cambridge, Mass: MIT Press, 1986.
- [2] RAIBERT M, BLANKESPOOR K, NELSON G, et al. Bigdog, the rough-terrain quadruped robot[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2008, 41(2): 10822-10825.
- [3] BROWN B, ZEGLIN G. The bow leg hopping robot[C]// 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 98CH36146), May 16-20, 1998, Leuven, Belgium: IEEE, 1998: 781-786.
- [4] ZEGLIN G, BROWN Jr H B. First hops of three-dimensional bow leg[C]// Proceedings of 5th International Conference on Climbing and Walking Robots and Their Supporting Technologies CLAWAR 2002, September 25-27, 2002, Paris, France: 2002: 357-364.
- [5] 魏敦文, 葛文杰. 跳跃机器人研究现状和趋势[J]. 机器人, 2014, 36(4): 503-512.
WEI Dunwen, GE Wenjie. Research status and development trend of hopping robots[J]. Robot, 2014, 36(4): 503-512.
- [6] BURDICK J, FIORINI P. Minimalist jumping robots for celestial exploration[J]. The International Journal of Robotics Research, 2003, 22(7-8): 653-674.
- [7] FIORINI P, HAYATI S, HEVERLY M, et al. A hopping robot for planetary exploration[C]// 1999 IEEE Proceedings of Aerospace Conference, March 7, 1999, Snowmass at Aspen, CO, USA: IEEE, 1999: 153-158.
- [8] GUNTHER F, GIARDINA F, IIDA F. Self-stable one-legged hopping using a curved foot[C]// 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 31 - June 7, 2014, Hong Kong, China: IEEE, 2014: 5133-5138.
- [9] TSUDA T, MOCHIYAMA H, FUJIMOTO H. Quick stair-climbing using snap-through buckling of closed elastica[C]// Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS), 2012 International Symposium on, November 4-7, 2012, Nagoya, Japan: IEEE, 2012: 368-373.
- [10] YAMADA A, MAMEDA H, MOCHIYAMA H, et al. A compact jumping robot utilizing snap-through buckling with bend and twist[C]// 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, October, 18-22, 2010, Taipei, Taiwan, China: IEEE, 2010: 389-394.
- [11] REIS M, IIDA F. An energy-efficient hopping robot based on free vibration of a curved beam[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2014, 19(1): 300-311.
- [12] ZHAO J, ZHAO T, XI N, et al. Msu tailbot: Controlling aerial maneuver of a miniature-tailed jumping robot[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2015, 20(6): 2903-2914.
- [13] CHURAMAN W A, GERRATT A P, BERGBREITER S.

- First leaps toward jumping microrobots[C]// 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, September 25-30, 2011, San Francisco, CA, USA : IEEE, 2011: 1680-1686.
- [14] SUGIYAMA Y, SHIOTSU A, YAMANAKA M, et al. Circular/spherical robots for crawling and jumping[C]// Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, April 18-22, 2005, Barcelona, Spain: IEEE, 2005: 3595-3600.
- [15] MATSUYAMA Y, HIRAI S. Analysis of circular robot jumping by body deformation[C]// 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, April 10-14, 2007, Roma, Italy: IEEE, 2007: 1968-1973.
- [16] BARTLETT N W, TOLLEY M T, OVERVELDE J T B, et al. A 3D-printed, functionally graded soft robot powered by combustion[J]. *Science*, 2015, 349(6244): 161-165.
- [17] LOEPFE M, SCHUMACHER C M, LUSTENBERGER U B, et al. An untethered, jumping roly-poly soft robot driven by combustion[J]. *Soft Robotics*, 2015, 2(1): 33-41.
- [18] MIAO Z, MO J, LI G, et al. Wheeled hopping robot with combustion-powered actuator[J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2018, 15(1): 1729881417745608.
- [19] SHEPHERD R F, STOKES A A, FREAKER J, et al. Using explosions to power a soft robot[J]. *Angewandte Chemie*, 2013, 125(10): 2964-2968.
- [20] NI F, ROJAS D, TANG K, et al. A jumping robot using soft pneumatic actuator[C]// 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 26-30, 2015, Seattle, WA, USA: IEEE, 2015: 3154-3159.
- [21] HU W, LUM G Z, MASTRANGELI M, et al. Small-scale soft-bodied robot with multimodal locomotion[J]. *Nature*, 2018, 554(7690): 81.
- [22] KOVAC M, FUCHS M, GUIGNARD A, et al. A miniature 7g jumping robot[C]// 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 19-23, 2008, Pasadena, CA, USA: IEEE, 2008: 373-378.
- [23] ZAITSEV V, GVIRSMAN O, BEN HANAN U, et al. A locust-inspired miniature jumping robot[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2015, 10(6): 66012.
- [24] TRUONG Q-T, ARGYOGANENDRO B W, PARK H C. Design and demonstration of insect mimicking foldable artificial wing using four-bar linkage systems[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2014, 11(3): 449-458.
- [25] ZHANG J, SONG G, QIAO G et al. A wireless sensor network system with a jumping node for unfriendly environments[J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2012, 8(7): 568240.
- [26] ZHANG J, SONG G, QIAO G, et al. A novel one-motor driven robot that jumps and walks[C]// 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 6-10, 2013, Karlsruhe, Germany: IEEE, 2013: 13-19.
- [27] CADIERGUES M C, JOUBERT C, FRANC M. A comparison of jump performances of the dog flea, *Ctenocephalides canis* (Curtis, 1826) and the cat flea, *Ctenocephalides felis felis* (Bouché, 1835)[J]. *Veterinary Parasitology*, 2000, 92(3): 239-241.
- [28] BENNET-CLARK H C, LUCEY E C A. The jump of the flea: A study of the energetics and a model of the mechanism[J]. *Journal of Experimental Biology*, 1967, 47(1): 59-76.
- [29] ACKERMAN E. Boston dynamics sand flea robot demonstrates astonishing jumping skills[J]. *IEEE Spectrum Robotics Blog*, 2012, 2(1): 1.
- [30] JUNG G P, HONG CHEOL CHOI, K J C. Effect of leg compliance in multi-directional jumping of the flea-inspired mechanism[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, 153(3): 942-947.
- [31] KOH J-S, JUNG S, WOOD R J. A jumping robotic insect based on a torque reversal catapult mechanism[C]// Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013 IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, November 3-7, 2013, Tokyo, Japan: IEEE, 2013: 3796-3801.
- [32] Micro-cricket robot series. Case Western Reserve University Center for Biologically Inspired Robotics Research[DB/OL]. (2013-5-11)[2018-10-29]. [http : //biorobots.case.edu/projects/c_mrobot/](http://biorobots.case.edu/projects/c_mrobot/).
- [33] LAKSANACHAROEN S, POLLACK A J, NELSON G M, et al. Biomechanics and simulation of cricket for microrobot design[C]// 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation, April 24-28, 2000, San Francisco, CA, USA: IEEE, 2000: 1088-1094.
- [34] BURROWS L. A cockroach-inspired robot. The Harvard Microrobotics Lab of Harvard University[DB/OL]. (2018-2-5)[2018-10-29]. [https : //www.seas.harvard.edu/news/2018/02/cockroach-inspired-robot](https://www.seas.harvard.edu/news/2018/02/cockroach-inspired-robot).
- [35] SCARFOGLIERO U, STEFANINI C, DARIO P. A bioinspired concept for high efficiency locomotion in micro robots: the jumping robot grillo[C]// 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 15-19, 2006, Orlando, FL, USA: IEEE, 2006: 4037-4042.
- [36] SCARFOGLIERO U, LI F, CHEN D, et al. Jumping mini-robot as a model of scale effects on legged

- locomotion[C]// 2007 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2007: 853-858.
- [37] JUNG G P, CHO K J. Frog-hopper-inspired direction-changing concept for miniature jumping robots[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2016, 11(5): 56015.
- [38] HALDANE D W, PLECNIK M M, YIM J K, et al. Robotic vertical jumping agility via series-elastic power modulation[J]. *Science Robotics*, 2016, 1(1): eaag2048.
- [39] YAN J, YANG K, WANG T, et al. A continuous jumping robot on water mimicking water striders[C]// 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 16-21, 2016, Stockholm, Sweden: IEEE, 2016: 4686-4691.
- [40] ZHAO J, ZHANG X, CHEN N, et al. Why superhydrophobicity is crucial for a water-jumping microrobot? Experimental and theoretical investigations[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2012, 4(7): 3706-3711.
- [41] JIANG F, ZHAO J, KOTA A K, et al. A miniature water surface jumping robot[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2017, 2(3): 1272-1279.
- [42] KOH J S, YANG E, JUNG G P, et al. Jumping on water: Surface tension - dominated jumping of water striders and robotic insects[J]. *Science*, 2015, 349(6247): 517-521.
- [43] CHEN D, ZHANG Z, CHEN K. Legs attitudes determination for bionic locust robot based on landing buffering performance[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2016, 99: 117-139.
- [44] ZHANG Z, ZHAO J, CHEN H, et al. A survey of bioinspired jumping robot: Takeoff, air posture adjustment, and landing buffer[J]. *Applied Bionics and Biomechanics*, 2017(1): 4780160.
- [45] CHEN Diansheng, YIN Junmao, CHEN Kewei, et al. Biomechanical and dynamic mechanism of locust take-off[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2014, 30(5): 762-774.
- [46] YIN Junmao, CHEN Diansheng, ZHAO Kewei, et al. Study on bio-locust subsequent attitude adjustment robot[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 328: 382-386.
- [47] SUTTON G P, BURROWS M. Biomechanics of jumping in the flea[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2011, 214(5): 836-847.
- [48] NOH M, KIM S W, AN S, et al. Flea-inspired catapult mechanism for miniature jumping robots[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2012, 28(5): 1007-1018.
- [49] SITTI M. Miniature devices: Voyage of the microrobots[J]. *Nature*, 2009, 458(7242): 1121.
- [50] ROGÓZ M, ZENG H, XUAN C, et al. Light-driven soft robot mimics caterpillar locomotion in natural scale[J]. *Advanced Optical Materials*, 2016, 4(11): 1689-1694.
- [51] DREYFUS R, BAUDRY J, ROPER M L, et al. Microscopic artificial swimmers[J]. *Nature*, 2005, 437(7060): 862.
- [52] LAKSANACHAROEN S, POLLACK A J, NELSON G M, et al. Biomechanics and simulation of cricket for microrobot design[C]// 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation, April 24-28 2000, San Francisco, CA, USA: IEEE, 2000: 1088-1094.
- [53] ALLEN T J, QUINN R D, BACHMANN R J, et al. Abstracted biological principles applied with reduced actuation improve mobility of legged vehicles[C]// 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, October 27-31, 2003, Las Vegas, NV, USA: IEEE, 2003: 1370-1375.
- [54] LI F, LIU W, FU X. Jumping like an insect: Design and dynamic optimization of a jumping mini robot based on bio-mimetic inspiration[J]. *Mechatronics*, 2012, 22(2): 167-176.
- [55] BURROWS M, SUTTON G. Interacting gears synchronize propulsive leg movements in a jumping insect[J]. *Science*, 2013, 341(6151): 1254-1256.
- [56] SUTTON G P, BURROWS M. The mechanics of azimuth control in jumping by frog-hopper insects[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2010, 213(9): 1406-1416.
- [57] HALDANE D W, PLECNIK M M, YIM J K, et al. Robotic vertical jumping agility via series-elastic power modulation[J]. *Science Robotics*, 2016, 1(1): eaag2048.
- [58] SHI F, NIU J, LIU J, et al. Towards understanding why a superhydrophobic coating is needed by water striders[J]. *Advanced Materials*, 2007, 19(17): 2257-2261.
- [59] SONG Y S, SITTI M. Surface-tension-driven biologically inspired water strider robots: Theory and experiments[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2007, 23(3): 578-589.
- [60] 王涛. 仿生水黾水面跳跃机器人的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- WANG Tao. Research on water jumping robot inspired by water spider[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [61] CALISTI M, FALOTICO E, LASCHI C. Hopping on uneven terrains with an underwater one-legged robot[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2016, 1(1): 461-468.
- [62] KOVAČ M, SCHLEGEL M, ZUFFEREY J-C, et al. Steerable miniature jumping robot[J]. *Autonomous Robots*, 2010, 28(3): 295-306.
- [63] ZHANG J, SONG G, LI Z, et al. Self-righting, steering and takeoff angle adjusting for a jumping robot[C]// 2012

- IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, October 7-12, 2012, Vilamoura, Portugal: IEEE, 2012: 2089-2094.
- [64] 柴辉, 李建华, 葛文杰. 基于可调齿轮-五杆机构的仿袋鼠跳跃机器人运动步态分析[J]. 机器人, 2009, 31(6): 487-492.
- CHAI Hui, LI Jianhua, GE Wenjie. Gait analysis on bionic kangaroo-hopping robot based on adjustable geared five-linkage mechanism[J]. Robot, 2009, 31(6): 487-492.
- [65] ZHANG J, SONG G, LI Y, et al. A bio-inspired jumping robot: Modeling, simulation, design, and experimental results[J]. Mechatronics, 2013, 23(8): 1123-1140.
- [66] FIORINI P, BURDICK J. The development of hopping capabilities for small robots[J]. Autonomous robots, 2003, 14(2-3): 239-254.
- [67] Urban Hopper, National Technology and Engineering Solutions of Sandia[DB/OL] (2013-11-19)[2018-10-29] https://www.sandia.gov/research/robotics/unique_mobility/urban_hopper.html.
- [68] JUNG G P, CASAREZ C S, JUNG S P, et al. An integrated jumping-crawling robot using height-adjustable jumping module[C]// 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Stockholm, May 16-21, 2016, Sweden: IEEE, 2016: 4680-4685.
- [69] SUGIYAMA Y, HIRAI S. Crawling and jumping by a deformable robot[J]. The International journal of robotics research, 2006, 25(5-6): 603-620.
- [70] LIU G H, LIN H Y, LIN H Y, et al. A bio-inspired hopping kangaroo robot with an active tail[J]. Journal of Bionic Engineering, 2014, 11(4): 541-555.
- [71] KOVAČ M, FAURIA O, ZUFFEREY J C, et al. The EPFL jumplider: A hybrid jumping and gliding robot with rigid or folding wings[C]// 2011 IEEE international conference on Robotics and Biomimetics, December 7-11, 2011, Karon Beach, Phuket, Thailand: IEEE, 2011: 1503-1508.
- [72] WOODWARD M A, SITTI M. Design of a miniature integrated multi-modal jumping and gliding robot[C]// 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, September 25-30, 2011, San Francisco, CA, USA: IEEE, 2011: 556-561.
- [73] BECK A, ZAITSEV V, HANAN U Ben, et al. Jump stabilization and landing control by wing-spreading of a locust-inspired jumper[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2017, 12(6): 66006.
- [74] CHEN D, CHEN K, ZHANG Z, et al. Mechanism of locust air posture adjustment[J]. Journal of Bionic Engineering, 2015, 12(3): 418-431.
- [75] PASKINS K E, BOWYER A, MEGILL W M, et al. Take-off and landing forces and the evolution of controlled gliding in northern flying squirrels *Glaucomys sabrinus*[J]. Journal of Experimental Biology, 2007, 210(8): 1413-1423.
- [76] PASKINS K E. The mechanics and energy economy of animal jumping and landing applied to autonomous robots[D]. Bath: University of Bath, 2007.
- [77] 陈殿生, 郑万军, 黄宇, 等. 弹跳机器人翻转机构的设计与优化[J]. 机械工程学报, 2011, 47(1): 17-23.
- CHEN Diansheng, ZHENG Wanjun, HUANG Yu, et al. The design and optimization of a hopping robot's tipping mechanism[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(1): 17-23.
- [78] ZHAO J, XU J, GAO B, et al. MSU jumper: A single-motor-actuated miniature steerable jumping robot[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2013, 29(3): 602-614.
- [79] ZHAO J, YANG R, XI N, et al. Development of a miniature self-stabilization jumping robot[C]// 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, October 10-15, 2009, St. Louis, MO, USA: IEEE, 2009: 2217-2222.
- [80] KOVAC M. Bioinspired jumping locomotion for miniature robotics[D]. EPFL, 2010.
- [81] ARMOUR R, PASKINS K, BOWYER A, et al. Jumping robots: A biomimetic solution to locomotion across rough terrain[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2007, 2(3): S65.
- [82] HO T, LEE S. A novel design of a robot that can jump and roll with a single actuator[C]// 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, October 7-12, 2012, Vilamoura, Portugal: IEEE, 2012: 908-913.
- [83] ARMOUR R H. A biologically inspired jumping and rolling robot[D]. Bath: University of Bath, 2010.
- [84] KOVAC M, GUIGNARD A, NICOU D-J, et al. A 1.5g SMA-actuated microglider looking for the light[C]// 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, April 10-14, 2007, Roma, Italy, IEEE, 2007: 367-372.
- [85] WOODWARD M A, SITTI M. MultiMo-Bat: A biologically inspired integrated jumping-gliding robot[J]. The International Journal of Robotics Research, 2014, 33(12): 1511-1529.
- [86] DESBIENS A L, POPE M, BERG F et al. Efficient jumpliding: Theory and design considerations[C]// 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 6-10, 2013, Karlsruhe, Germany: IEEE, 2013: 4451-4458.

- [87] BECK M A, ZAYTSEV M V, HANAN U Ben, et al. A Jumper-glider bio-robot inspired by the locust[J]. Robotics, 2016(4): 1.
- [88] 陈殿生, 张自强, 陈科位. 仿生蝗虫机构着陆缓冲过程中的能量分配[J]. 机械工程学报, 2015, 51(13): 196-202. CHEN Diansheng, ZHANG Ziqiang, CHEN Kewei, Energy allocation in landing buffering process for biomimetic locust mechanism[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(13): 196-202.
- [89] ZAITSEV V, GVIRSMAN O, HANAN U Ben, et al. Locust-inspired miniature jumping robot[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2015, 10(6): 066012.
- [90] MORGAN B D L, PROSKE U, WARREN D.

Measurements of muscle stiffness and the mechanism of elastic storage of energy in hopping kangaroos[J]. The Journal of Physiology, 1978, 282(1): 253-261.

作者简介: 莫小娟, 女, 1992 年出生, 博士研究生。主要研究方向为蝗虫跳跃机理和仿生跳跃机器人。

E-mail: momo152562@mail.nwpu.edu.cn

葛文杰(通信作者), 男, 1956 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为仿生跳跃机器人以及柔性机翼拓扑优化。

E-mail: gwj@nwpu.edu.cn

赵东来, 男, 1989 年出生, 博士研究生。主要研究方向为液压驱动跳跃机器人和爬壁机器人。

E-mail: dl_zhao@mail.nwpu.edu.cn

魏敦文, 男, 1986 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向仿生机器人, 机器人机构学及控制。

E-mail: weidunwen@uestc.edu.cn