

仿壁虎机器人脚掌的黏附性能研究及模拟微重力下黏脱附轨迹设计

汪中原^{1,2}, 陆晓波^{1,3}, 刘琦^{1,3}, 宋逸^{1,2}, 戴振东^{1*}

1. 南京航空航天大学仿生结构与材料防护研究所, 南京 210016;

2. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016;

3. 南京航空航天大学航天学院, 南京 210016

* 联系人, E-mail: zddai@nuaa.edu.cn

2016-11-29 收稿, 2017-01-17 修回, 2017-01-20 接受, 2017-03-23 网络版发表

国家自然科学基金(51435008)、江苏省研究生培养创新工程基金(KYLX_0240)和中央高校基本科研业务费专项资助

摘要 失重环境下固体间的稳定接触是空间站舱内外航天员作业、在轨维修、空间碎片捕获等任务面临的共性问题, 基于范德华力机制的刚毛黏附材料为解决上述问题提供了可能. 本文介绍使用仿生高分子黏附结构研制仿壁虎机器人脚掌所面临的问题. 用仿壁虎腿机构构成的黏附性能试验台, 研究了黏附脚掌的刚度、尺寸和黏附轨迹与黏附力、实际接触面积间的关系, 确定了脚掌黏附过程的稳定边界. 用重力补偿法模拟整体失重环境, 设计了脚掌黏脱附轨迹并实现了仿壁虎机器人在整体失重情况下的稳定黏附运动, 为在轨微重力环境下仿壁虎机器人的黏附运动提供了基础数据.

关键词 仿壁虎机器人, 黏脱附轨迹, 微重力

自从1957年前苏联发射第一颗人造卫星以来, 人类对太空的探索、研究与开发应用的能力已有大幅度提高^[1], 航天能力已经成为评价一个国家综合能力的重要部分. 1992年中国启动载人航天工程, 已成功实现5次无人飞船飞行和6次载人飞行, 预计2022年将建成空间站^[2,3]. 随着外层空间逐渐成为人类的活动空间, 针对航天设备的检查、维护、维修、燃料加注、轨道垃圾清理等在轨服务的需求变得越来越迫切. 为了降低成本, 提高航天员空间舱外作业效率, 空间机器人成为美国、欧盟、俄罗斯等航天重点发展方向.

外太空特殊的微重力环境, 使得在地球上依靠重力和摩擦完成的运动行走变得及其困难. 在固体界面形成稳定的接触成为很多航天作业面临的共性

问题. 2000年Autumn等人^[4,5]发现壁虎能够在各种表面上稳定黏附是其脚掌上数十万微纳米刚毛产生范德华力累积的结果(图1(a)). 2014年, 俄罗斯“Foton-M4”科学实验卫星搭载了5只壁虎进入外太空, 验证了壁虎能够在失重环境下稳定黏附^[6]. 基于壁虎黏附机制发展的仿生黏附材料和机构是微重力下实现固体间稳定黏附接触的最有效手段之一.

基于壁虎黏附机制, 国内外不少团队研发了各种仿生黏附机器人. 美国卡耐基梅隆大学Sitti课题组^[7,8]研发了履带式爬壁机器人Tankbot. 用聚二甲基硅氧烷(PDMS)为黏附材料, 实现了在竖直壁墙面上爬行. 用蘑菇状黏附阵列为黏附材料, 研发了一种轮腿式爬壁机器人Waalbot, 实现了三维空间的黏附和运动^[9,10]. 加拿大西蒙弗雷泽大学Ahmed课题组^[11,12]

引用格式: 汪中原, 陆晓波, 刘琦, 等. 仿壁虎机器人脚掌的黏附性能研究及模拟微重力下黏脱附轨迹设计. 科学通报, 2017, 62: 2149–2156

Wang Z Y, Lu X B, Liu Q, et al. Adhesion performance test and trajectory optimization for gecko-inspired footpad under simulated micro-gravity environment (in Chinese). Chin Sci Bull, 2017, 62: 2149–2156, doi: 10.1360/N972016-01329

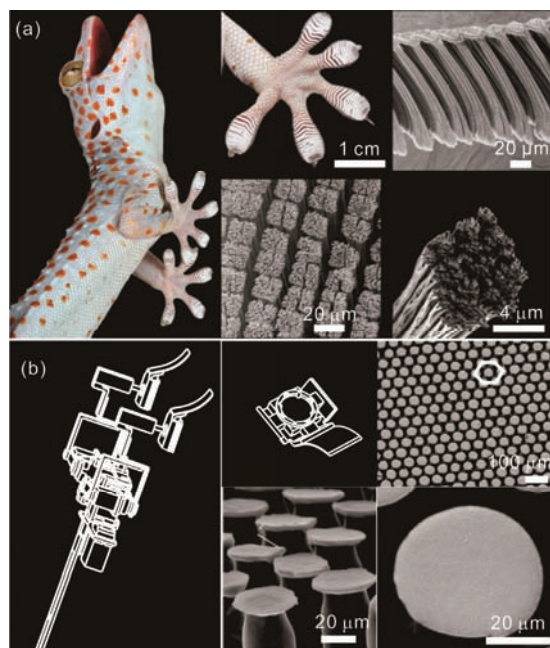


图1 (网络版彩色)(a) 壁虎脚掌及其刚毛的微观结构^[4]; (b) 仿壁虎机器人脚掌及仿生黏附材料的微观结构

Figure 1 (Color online) (a) Gecko's footpad and microstructure of the seta^[4]; (b) gecko-inspired robot's footpad and microstructure of the bio-inspired adhesive

研发了Abbigaille系列机器人, 实现了从水平面到竖直墙面的过渡. 美国斯坦福大学Kim等人^[13,14]研制了四足爬壁机器人Stickybot, 用具有各向异性的微观阵列作为黏附材料, 脚掌模拟壁虎的外翻主动脱附, 实现在竖直表面的爬行, 最大速度为2.4 cm/s. 2015年美国喷气推进实验室(jet propulsion laboratory, JPL)^[15]研制了手持式抓附机构, 实现了在微重力环境下对目标物体的黏附抓取. 中国科学院合肥智能机械研究所的梅涛课题组^[16,17]研制了干黏附材料并应用在履带式机器人上, 实现了在不同倾斜度表面的黏附和运动. 南京航空航天大学的戴振东课题组^[18,19]研发了系列足式仿壁虎机器人, 能在竖直表面稳定黏附和运动. 但上述机器人多数黏附的预压力源于重力, 在失重环境下的黏附性能和运动能力尚不明, 尚未见模拟微重力环境下实现机器人黏附运动的报道. 本文以南京航空航天大学仿生结构与材料防护研究所第五代仿壁虎机器人为基础^[20], 使用仿生黏附材料, 研究了黏附脚掌的刚度、尺寸和黏附轨迹与黏附力、实际接触面积间的关系, 确定了脚掌黏附过程的稳定边界. 用重力补偿法模拟整体失重环境, 设计了脚掌黏脱附轨迹并实现了仿壁虎机

器人在整体失重情况下的稳定黏附运动.

1 脚掌黏附性能评价方法

本文使用的黏附材料是具有微观结构的蘑菇状纤维阵列(图1(b))^[21]. 主要成分为聚乙烯硅氧烷(polyvinylsiloxane), 弹性模量为3 MPa, 剥落黏着能为1.4 J/m². 呈蘑菇状的纤维柱长约100 μm, 末端直径约40 μm, 中间直径约35 μm, 前端直径约20 μm, 顶端圆盘直径约40 μm, 厚度约2 μm. 这种长径比结构大大降低了材料的整体刚度, 使其对不同表面有更好的适应性. 紧密的蜂窝状排列方式不仅增加了材料的有效接触面积, 同时具有一定的抗污能力^[22].

传统上, 材料摩擦黏附性能评价采用试样法向加载(预压力), 法向卸载到分离, 测定法向黏附力, 或法向卸载到一定负值(黏附力下), 切向运动到分离, 测定切向黏附力. 用于机器人足端时, 其黏附性能还与材料特性和机器人脚掌的基底材料、黏附轨迹等有关. 为此采用本所研制的多用途黏附性能测试系统(图2(a)). 该系统由运动系统、力测试系统和观测系统组成. 运动系统由机器人的单腿构成, 髋关节固定在平台一端, 通过控制3个舵机完成脚掌在三维空间的运动, 足端由球关节和弹簧构成3个被动自由度, 增加脚掌对接触面的适应性. 脚掌由基底材料和黏附材料组成, 其中黏附材料贴合在基底材料的背部, 如图2(b)所示. 力测试系统由H型悬臂梁式二维力传感器^[23]和信号处理器组成, 用来记录脚掌的切向(y轴)和法向(z轴)接触力, 传感器的分辨率为0.5 mN, 采样频率为100 Hz. 观测系统由两个相机组成, 分别从侧视方向记录脚掌的运动行为和从俯视方向记录脚掌的接触面积. 接触面积用受抑全反射原理使用光带平行射入接触面获得^[24], 使用基本全局阈值图像处理方法对记录的视频图像进行处理获得有效接触面积^[25], 实验中定义接触面积的峰值为实际接触面积, 每组数据采集7个样本量, 如图2(c)所示.

本文黏附力的测试包括两个方面: 法向黏附力和切向黏附力测试. 首先在脚掌末端沿z轴施加一个竖直向下的位移获得一个预压力, 然后该预压力卸载为零, 最后若脚掌末端沿着z轴方向拉脱, 此时法向力的最小值记为法向黏附力; 若脚掌末端沿着y轴方向拉脱, 此时切向力的最大值记为切向黏附力. 以脚掌法向黏附力测试为例, 如图2(d)所示. 首先脚掌末端施加一个竖直向下的位移, 此时法向力和切向

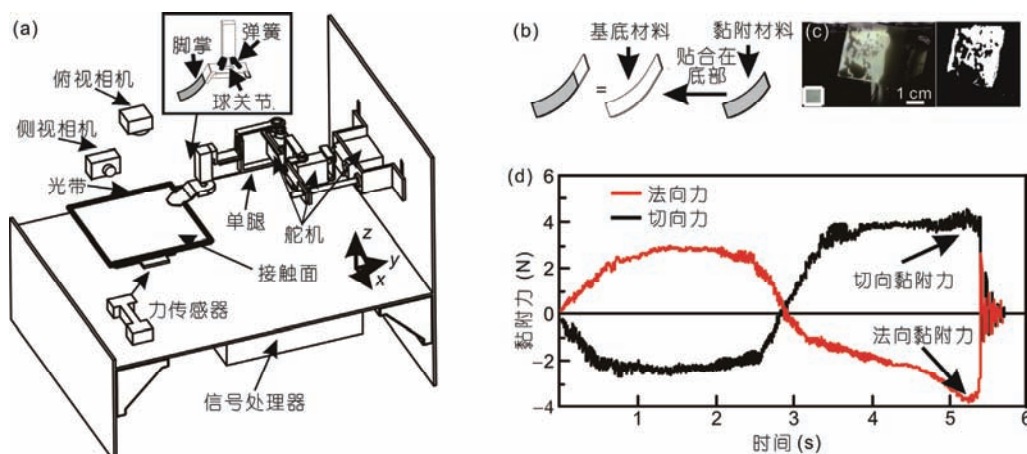


图2 (网络版彩色)(a)黏附性能测试系统; (b)脚掌的构成方式; (c)受抑全反射原理获得接触图像和基本全局阈值图像处理方法获得有效接触面积; (d)一个周期内法向力和切向力在脚掌末端沿竖直方向剥落的变化曲线

Figure 2 (Color online) (a) Adhesion performance test system; (b) constitute of footpad; (c) by adopting the principle of total reflection of frustrated light and the method of basic global threshold, the real contacting area of footpad is obtained; (d) typical normal force and shear force when the footpad is pulled along normal direction during one cycle

力的值都在逐渐增大; 施加到一定的位移后法向力保持在一个恒定值(3 N), 切向力也保持在一个恒定值(2.7 N). 接下来法向力和切向力卸载为零. 最后, 脚掌末端沿着z轴方向拉脱, 此时法向力的最小值(-3.9 N)即为法向黏附力. 实验中法向黏附力和切向黏附力的数据均采集7个样本量.

2 脚掌黏附性能的评价

2.1 脚掌刚度对黏附性能的影响

根据黏附机制, 实际接触面积决定黏附力的大小^[26]. 因此脚掌在黏附过程中需要满足脚掌在贴合过程尽可能地平行目标面, 从而获得大的接触面积, 同时预加载过程保证应力能够均匀分布, 使每个纤维束能够充分加载^[27]. 本文设计实验, 选取不同刚度的聚乙烯薄片作为脚掌基底材料, 测试材料的刚度对黏附性能的影响. 基底材料1~5的刚度分别为53.7, 61.6, 68.9, 78.9和89.2 N/m.

结果表明, 随着刚度增加, 切向和法向黏附力都增加. 当刚度增加到68.9 N/m时, 随着刚度减小, 切向和法向黏附力都减小, 如图3所示. 根据Kendall剥落模型^[28], 剥落强度随基底材料刚度的增大而增加, 因此其水平分量和竖直分量都在增加, 与本文实验结果一致. 但增大到一定值后, 切向和法向黏附力都减小, 这是由于虽然增大基底刚度可以增加剥落强度, 但是减小基底刚度却可以促进接触应力的均匀

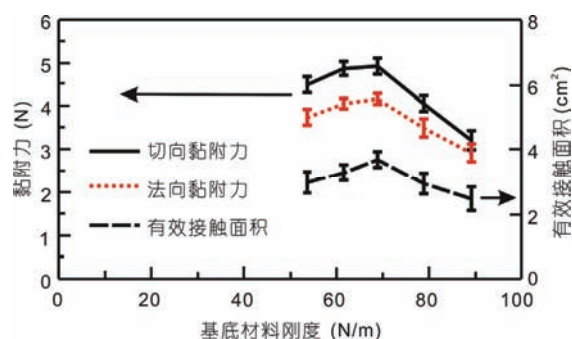


图3 (网络版彩色)不同基底材料的黏附力和有效接触面积的关系, 其中脚掌面积为8 cm²

Figure 3 (Color online) Relationship between adhesion force of different stiffness backing layers and effective contact area of footpad, area of footpad is 8 cm²

分布^[29], 这就意味着增大基底刚度可能会导致实际接触面积的减小. 本文测定的脚掌接触面积变化趋势与黏附力测试结果的变化趋势一致, 与该理论的预测一致. 根据测试结果, 确定脚掌的刚度为68.9 N/m.

2.2 脚掌面积对黏附性能的影响

本文使用刚度为68.9 N/m聚乙烯塑料片为基底材料, 测试了不同脚掌面积与黏附力的关系, 如图4所示. 结果表明切向黏附力和法向黏附力都随着脚掌面积的增加而增加, 并且切向黏附力的值始终大于法向黏附力的值. 理论上来说在完全接触的情况下, 最大黏附力与脚掌面积成线性比例关系^[29], 但是黏附力增加并没有成线性增加关系, 增加趋势随

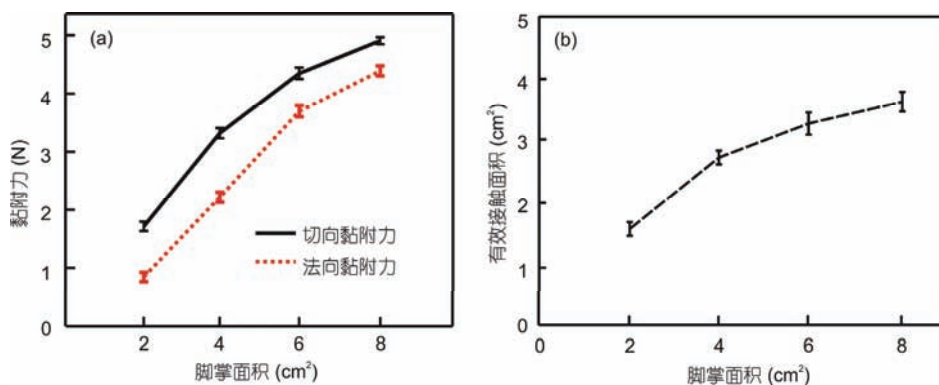


图4 (网络版彩色)(a) 脚掌面积与黏附力的关系; (b) 脚掌面积与有效接触面积的关系

Figure 4 (Color online) (a) Relationship between adhesion force and contact area of footpad; (b) relationship between area and effective contact area of footpad

随着脚掌面积的增加逐渐变缓。通过计算实际接触面积发现,虽然脚掌面积线性增加,但是实际接触面积增加的比例在逐渐减小。这是由于随着脚掌面积的增加,应力分布变得不均匀导致的^[30]。因此在设计脚掌面积的时候还要考虑到接触应力分布的问题。

2.3 脚掌黏附轨迹对黏附性能的影响

不同的脚掌黏附轨迹带来不同的接触方式从而会导致不同的黏附力。本文设计了5种不同的脚掌黏附轨迹,分析脚掌在接触面贴合过程中的末端轨迹对黏附性能产生的影响(图5(a))。相对于初始位置,轨迹1~3脚掌的末端处于挤压状态,轨迹4脚掌保持原长,轨迹5脚掌处于拉伸状态。图5(b)是脚掌在末端相对位置为 L 下预压力与黏附力的关系,结果表明该材料在较小的预压力下即可获得较大的黏附力,而传统的非结构型材料需要较大的预压力才能获得较大的黏附力。图5(c)是不同脚掌轨迹在相同预压力下的黏附力变化规律。可以看出轨迹1~4下的黏附力没有明显改变,轨迹5的黏附力相对有所下降。当脚掌处于拉伸状态时,黏附强度降低;当脚掌处于压缩状态时,黏附强度变化不大,可能是由于蘑菇状的微观阵列结构对拉应力敏感而对挤压应力不敏感造成的。结果表明脚掌是否挤压对黏附力的影响不大,而传统的非结构型黏附材料需要有一定的挤压力才能保证脚掌与接触面较好的贴合^[18,31,32],具有微观倾斜结构的黏附材料则需要一定的水平位移才能保证充分的接触^[13,14]。以上研究结果表明该黏附脚掌相对于其他黏附材料对黏附轨迹没有较高的要求,能很好地适应接触表面,更加适用于空间微重力环境。

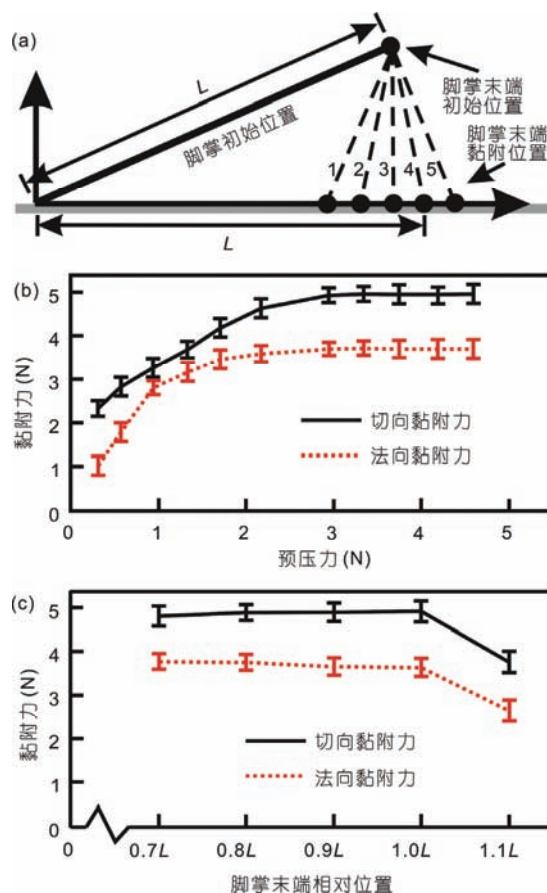


图5 (网络版彩色)(a) 黏附轨迹示意图; (b) 预压力与黏附力的关系; (c) 脚掌末端相对位置与黏附力的关系

Figure 5 (Color online) (a) Attaching trajectories; (b) relationship between pre-load force and adhesion force; (c) relationship between footpad position and adhesion force

2.4 黏附的稳定安全范围

图6(a)和(b)分别是机器人脚掌和壁虎脚趾在一

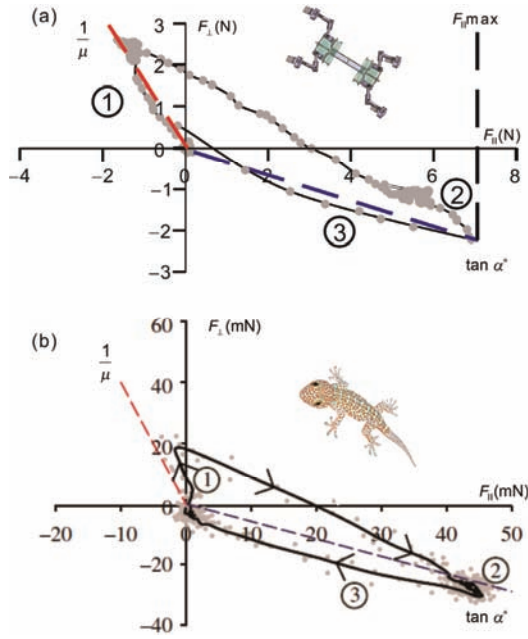


图 6 (网络版彩色)(a) 机器人脚掌在一个周期内切向力和法向力的关系; (b) 壁虎脚趾在一个周期内切向力和法向力的关系^[33]

Figure 6 (Color online) (a) Relationship between shear force and normal force of robot's footpad during one cycle; (b) relationship between shear force and normal force of gecko's toe during on cycle^[33]

个周期内切向力和法向力的关系。无论是机器人还是壁虎，其脚掌在运动中，都要经过3个阶段^[27,33]。第一阶段，脚掌与接触面接触，脚掌施加一个正向的预压力使其与接触面充分贴合；第二阶段，脚掌与接触面保持相对静止，拉伸从而让身体前移，此时脚掌产生黏附力保证机器人能够稳定黏附并且运动；第三阶段，脚掌从接触面剥落开始下一个周期。

根据经典摩擦定理，在第一阶段，切向力和法向力满足以下条件就不会发生滑移：

$$F_t \geq -\frac{1}{\mu} F_n, \quad (1)$$

其中， F_t 是法向力， F_n 是切向力， μ 是摩擦系数。

在黏附过程中，切向黏附力和法向黏附力也满足以下条件就能保证稳定黏附^[30]：

$$F_t \geq -\frac{F_n}{\tan \alpha^*}, \quad (2)$$

其中 α^* 为脱附角， $F_n \leq F_{n\max}$ 。

在脚掌运动过程中，式(1)和(2)构成了摩擦黏附边界^[14,33]，如图6(a)所示。其中实线边界是由材料本身的性能决定，为摩擦边界。虚线边界 $F_{n\max}$ 由材料本身的黏附性能和有效接触面积决定，虚线边界 α^*

由机器人脚掌的剥落角决定，它们共同构成了黏附边界。在机器人运动过程中，黏脱附轨迹设计的目标是支撑相的脚掌在机器人移动过程中获得较大的黏附边界保证强黏附性，摆动相的脚掌在剥落过程中获得较小的黏附边界保证易脱附性。因此在脚掌的运动过程中，可以通过调节剥落角 α^* 和调节有效接触面积来获得不同的黏附边界，从而获得机器人在不同状态下所需黏附安全范围。

3 仿壁虎机器人在模拟微重力环境下的黏附和运动实验

本文中仿壁虎机器人的结构呈对称分布，由4条腿构成，如前文所述，每条腿有3个主动自由度，机器人共有12个主动自由度。机器人长约32 cm，宽约17 cm，质量约为400 g。采用重力补偿法^[34]，使用氦气球平衡机器人的重量用以模拟微重力环境(图7(a))。根据前面的研究结果，本文选取了刚度为68.9 N/m聚乙烯塑料片作为基底材料，脚掌面积为8 cm²，最大可提供4.3 N的竖直方向黏附力。据此设计了脚掌的黏脱附轨迹(图7(c))。在第一阶段，由于脚掌对黏附轨迹的要求较低，根据2.3节的研究结果，黏附轨迹采用竖直下压的方式。在模拟微重力环境下，由于气球将机器人质心拉高，为了保证脚掌与接触面的充分贴合，脚掌在竖直方向的下压位移相对于脚掌水平位置多0.5 cm。在第二阶段，脚掌拉伸身体前移，此时为了保证最大范围的稳定黏附裕度，剥落角应当为零，脚掌沿着水平方向拉伸。由于在第一阶段脚掌下压位移的缘故身体质心被抬高，机器人的倾覆力矩增加。为了保证运动过程中的稳定性，脚掌水平拉伸的同时髋关节摆动使身体恢复至水平位置，降低质心的高度。在第三阶段，剥落角应当尽可能地增加以获得较小的脱附力，因此在第三阶段的初始阶段采用一个较大的剥落角，当剥落角到达机器人脚掌末端工作空间的限制以后，脚掌抬高使其脱离接触面。机器人在运动过程中采用对角步态，占空比为0.6(图7(b))，当处于对角的脚掌脱附时，处于另外两个对角的脚掌拉伸保证此时机器人脚掌在一个较大的稳定边界范围内(图7(d)~(e))。

实验结果表明当该气球完全平衡机器人的重量以后，设计的步态可以保证机器人的稳定黏附运动，速度为1 cm/s。当机器人的速度增大到2 cm/s时，机

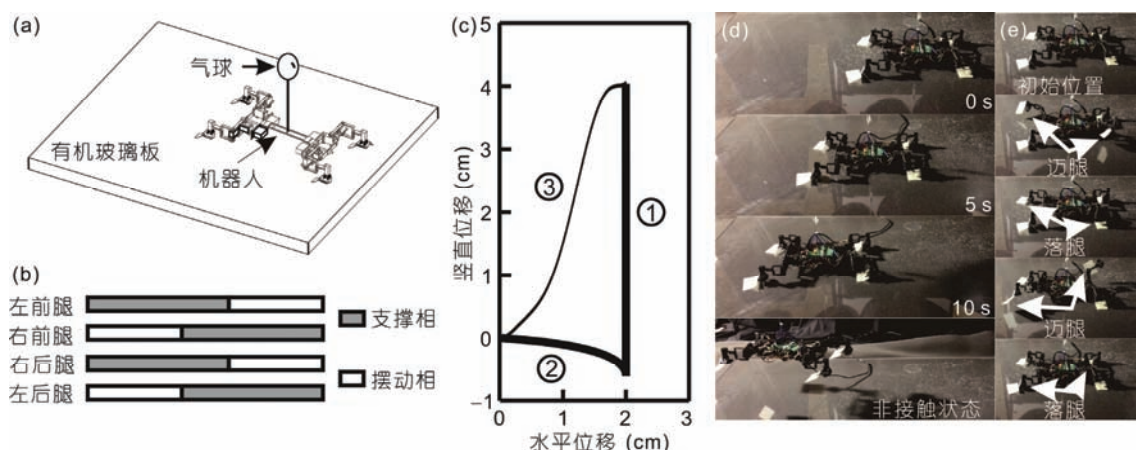


图7 (网络版彩色)机器人在模拟微重力环境下的实验图。(a) 机器人的脚掌轨迹;(b) 机器人在模拟微重力环境下的示意图;(c) 机器人运动过程中的时间序列图;(d) 机器人在运动过程中的侧视图;(e) 机器人在一个周期内的抬腿和落腿图

Figure 7 (Color online) Experiments of robot under micro-gravity environment. (a) Attaching and detaching trajectory of footpad; (b) diagram of robot climb under micro-gravity; (c) time series sequences of robot; (d) side view of the robot during locomotion; (e) attachment and detachment of footpad during one cycle

机器人出现了打滑现象,当速度增大到3 cm/s时,机器人的运动变得极其不稳定。这是由于在脚掌剥落过程中,微观的纤维柱存在弹性形变,出现拉伸现象^[35]。这些纤维柱的拉伸速度极大地影响了剥落强度。已有的研究结果表明传统胶带的剥落强度随着剥落速度的增加而增加^[36,37]。而机器人脚掌与平面的接触过程实际上是一个复杂的接触碰撞行为,影响脚掌的黏附接触因素包括脚掌的接触速度、弹性形变和能量损耗等一系列因素,需要进一步探究。

4 结论

本文使用仿壁虎腿机构构成的黏附性能试验台,研究了黏附脚掌的刚度、尺寸和黏附轨迹与黏附力、

实际接触面积的关系,确定了脚掌黏附过程的稳定边界。用重力补偿法模拟整体失重环境,设计了脚掌黏附轨迹并实现了仿壁虎机器人在整体失重情况下的稳定黏附运动。

尽管考虑到用重力补偿法模拟的微重力环境与太空微重力环境的差异,及空间环境(如辐射和高低温等)对材料黏附的可能影响,面向空间应用,还有不少工作需要开展。但本文直接采用机器人腿作为黏附试验机构的性能评价方法,同样适合其他用于机器人的仿生黏附材料的性能评价,设计黏脱附轨迹的方法也适用于其他的黏附机器人。因此本文工作可为空间环境下微型黏附机器人的发展提供借鉴。

参考文献

- 1 Yang B Y. Introduction to Space Technology (in Chinese). Beijing: China Astronautic Publishing House, 2009 [杨炳渊. 航天技术导论. 北京: 中国宇航出版社, 2009]
- 2 Dai Z D. Progress and key technologies in several frontiers of space robot (in Chinese). Manned Spacefl, 2016, 22: 9–15 [戴振东. 空间机器人的若干前沿领域: 研究进展和关键技术. 载人航天, 2016, 22: 9–15]
- 3 Dai Z D, Peng F J. Research progress of space robots and key technologies of gecko-inspired robots (in Chinese). Chin Sci Bull, 2015, 60: 3114–3124 [戴振东, 彭福军. 空间机器人的研究与仿壁虎机器人关键技术. 科学通报, 2015, 60: 3114–3124]
- 4 Autumn K, Liang Y A, Hsieh S T, et al. Adhesive force of a single gecko foot-hair. Nature, 2000, 405: 681–685
- 5 Autumn K, Sitti M, Liang Y A, et al. Evidence for van der Waals adhesion in gecko setae. Proc Natl Acad Sci USA, 2002, 99: 12252–12256
- 6 Barabanov V, Gulimova V, Berdiev R, et al. Object play in thick-toed geckos during a space experiment. J Ethol, 2015, 33: 109–115
- 7 Unver O, Sitti M. Tankbot: A palm-size, tank-like climbing robot using soft elastomer adhesive treads. Int J Robot Res, 2010, 29: 1761–1777
- 8 Seo T W, Sitti M. Tank-like module-based climbing robot using passive compliant joints. IEEE/ASME Trans Mech, 2013, 18: 397–408

- 9 Murphy M P, Sitti M. Waalbot: An agile small-scale wall-climbing robot utilizing dry elastomer adhesives. *IEEE/ASME Trans Mech*, 2007, 12: 330–338
- 10 Murphy M P, Kute C, Mengüç Y, et al. Waalbot II: Adhesion recovery and improved performance of a climbing robot using fibrillar adhesives. *Int J Robot Res*, 2011, 30: 118–133
- 11 Li Y, Ahmed A, Sameoto D, et al. Abigaille II: Toward the development of a spider-inspired climbing robot. *Robotica*, 2012, 30: 79–89
- 12 Henrey M, Ahmed A, Boscariol P, et al. Abigaille-III: A versatile, bioinspired hexapod for scaling smooth vertical surfaces. *J Bionic Eng*, 2014, 11: 1–17
- 13 Kim S, Spenko M, Trujillo S, et al. Whole body adhesion: Hierarchical, directional and distributed control of adhesive forces for a climbing robot. In: *Proceedings of 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 2007.
- 14 Kim S, Spenko M, Trujillo S, et al. Smooth vertical surface climbing with directional adhesion. *IEEE Trans Robot*, 2008, 24: 65–74
- 15 Jiang H, Hawkes E W, Arutyunov V, et al. Scaling controllable adhesives to grapple floating objects in space. In: *Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, Washington, USA, 2015. 2828–2835
- 16 Wang H J, Mei T, Wang X H. Adhesion array design of a novel biomimetic gecko crawling robot (in Chinese). *Robot*, 2006, 28: 191–194 [王辉静, 梅涛, 汪小华. 一种新型仿壁虎爬行机器人的黏附阵列设计. *机器人*, 2006, 28: 191–194]
- 17 Wu X, Wang D, Zhao A, et al. A wall-climbing robot with biomimetic adhesive pedrail. In: *Advanced Mechatronics and MEMS Devices*. New York: Springer, 2013. 179–191
- 18 Yu Z W, Li H K, Zhang X F, et al. Structure design of bionic gecko's toe and the adhesive locomotion performance test (in Chinese). *J Mech Eng*, 2011, 47: 7–13 [俞志伟, 李宏凯, 张晓峰, 等. 仿壁虎脚趾结构设计及黏附运动性能测试. *机械工程学报*, 2011, 47: 7–13]
- 19 Wang Z, Dai Z, Yu Z, et al. Optimal attaching and detaching trajectory for bio-inspired climbing robot using dry adhesive. In: *Proceedings of 2014 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. Besançon: IEEE, 2014. 990–993
- 20 Dai Z, Sun J. A biomimetic study of discontinuous-constraint metamorphic mechanism for gecko-like robot. *J Bionic Eng*, 2007, 4: 91–95
- 21 Gorb S, Varenberg M, Peressadko A, et al. Biomimetic mushroom-shaped fibrillar adhesive microstructure. *J R Soc Interface*, 2007, 4: 271–275
- 22 Varenberg M, Gorb S. Close-up of mushroom-shaped fibrillar adhesive microstructure: Contact element behaviour. *J R Soc Interface*, 2008, 5: 785–789
- 23 Wen Z P, Ji A H, Wang J T, et al. Optimization design of 2-dimensional force sensor (in Chinese). *Chin J Sensors Actuators*, 2008, 21: 938–941 [文智平, 吉爱红, 王金童, 等. 2-维应变式力传感器的优化设计. *传感技术学报*, 2008, 21: 938–941]
- 24 Eason E V, Hawkes E W, Windheim M, et al. Stress distribution and contact area measurements of a gecko toe using a high-resolution tactile sensor. *Bioinspir Biomim*, 2015, 10: 016013
- 25 Yin G F. Image segmentation technology based on thresholding (in Chinese). *Modern Electronics Tech*, 2007, 30: 107–108 [阴国富. 基于阈值法的图像分割技术. *现代电子技术*, 2007, 30: 107–108]
- 26 Johnson K L, Kendall K, Roberts A D. Surface energy and the contact of elastic solids. *Proc R Soc London A-Math, Phys Eng Sci*, 1971, 324: 301–313
- 27 Hawkes E W, Ulmen J, Esparza N, et al. Scaling walls: Applying dry adhesives to the real world. In: *Proceedings of 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. San Francisco: IEEE, 2011. 5100–5106
- 28 Kendall K. Thin-film peeling-the elastic term. *J Phy D Appl Phys*, 1975, 8: 1449
- 29 Labonte D, Federle W. Scaling and biomechanics of surface attachment in climbing animals. *Phil Trans R Soc B*, 2015, 370: 20140027
- 30 Kim S, Sitti M, Hui C Y, et al. Effect of backing layer thickness on adhesion of single-level elastomer fiber arrays. *Appl Phys Lett*, 2007, 91: 161905
- 31 Wang Z, Sun G, Dai Z. Trajectory Optimization for Robot Crawling on Ceiling Using Dry Elastomer Adhesive. In: *Advances in Reconfigurable Mechanisms and Robots II*. New York: Springer International Publishing, 2016. 593–601
- 32 Unver O, Sitti M. Flat dry elastomer adhesives as attachment materials for climbing robots. *IEEE Trans Robot*, 2010, 26: 131–141
- 33 Autumn K, Dittmore A, Santos D, et al. Frictional adhesion: A new angle on gecko attachment. *J Exp Biol*, 2006, 209: 3569–3579
- 34 Xu W F, Liang B, Li C, et al. A review on simulated micro-gravity experiment systems of space robot (in Chinese). *Robot*, 2009, 31: 88–96 [徐文福, 梁斌, 李成, 等. 空间机器人微重力模拟实验系统研究综述. *机器人*, 2009, 31: 88–96]
- 35 Zhou M, Pesika N, Zeng H, et al. Design of gecko-inspired fibrillar surfaces with strong attachment and easy-removal properties: A numerical analysis of peel-zone. *J R Soc Interface*, 2012, 9: 2424–2436
- 36 Blum F D, Metin B, Vohra R, et al. Surface segmental mobility and adhesion-effects of filler and molecular mass. *J Adhes*, 2006, 82: 903–917
- 37 Zhou M, Tian Y, Pesika N, et al. The extended peel zone model: Effect of peeling velocity. *J Adhes*, 2011, 87: 1045–1058

Summary for “仿壁虎机器人脚掌的黏附性能研究及模拟微重力下黏脱附轨迹设计”

Adhesion performance test and trajectory optimization for gecko-inspired footpad under simulated micro-gravity environment

WANG ZhongYuan^{1,2}, LU XiaoBo^{1,3}, LIU Qi^{1,3}, SONG Yi^{1,2} & DAI ZhenDong^{1*}

¹ Institute of Bio-inspired Structure and Surface Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

² College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

³ College of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

* Corresponding author, E-mail: zddai@nuaa.edu.cn

The extraordinary locomotory abilities of geckos are attributed to striking adhesive setae segmented into scansors or pads on the undersides of the toes or legs, have been well-known for many centuries due to van der Waals force. The outstanding climbing performances of the animal inspired the engineers and researchers for the design of artificial systems, such as adhesive materials, which in turn enabled the construction of climbing robots that are capable of climbing smooth walls and ceiling. The robot based on van der Waals force has a wide prospect for execution space task application.

Legged climbing robot involves the controlled application of forces during the leg-substrate contact and release, in order to propel the body forwards. The achievement of strong attachment and easy removal of the adhesive is the critical issues, when we apply the adhesive to the robot's footpad. Here, by using a custom-built force platform, adhesion performance of the bio-inspired adhesive which directly apply to the footpad were investigated. The effect of footpad stiffness, contact area and trajectory on adhesion force and real contact area is investigated. Results show that normal force and shear force increased as stiffness increase up to 68.9 N/m. After that, normal force and shear force decrease as stiffness increase. Both normal force and shear force increase as real contact area increase, but not increase linearly. Additionally, different attaching trajectories are applied to explore the adhesion characteristic of the footpad. The result indicates that for the robot, the footpad of this kind does not need much load control: the pad just needs to contact the surface, in order to produce substantial adhesion force and meet the requirement of the attaching phase. This characteristic of footpad is extremely beneficial for applying it at zero gravity, when the robot cannot rely on gravity to load the adhesive pad. Furthermore, normal force and shear of the footpad during one cycle are tested. The force is compared with the frictional-adhesion model. Stable adhesion region under different conditions can be obtained by adjust peeling angle and effective real contact area. Finally, optimized footpad stiffness, area and trajectory are selected and stable adhesion region is analyzed. By using gravity compensation method to simulate micro-gravity environment and designing attachment and detachment trajectory, the robot can climb stably under zero gravity environment up to 1 cm/s.

This paper presents adhesion performance test and trajectory optimization of gecko-inspired footpad under simulated micro-gravity environment. The experimental tests demonstrated that the robot can climb under mimic zero gravity at the velocity of up to 1 cm/s. The major contribution of this work is the application of the biological principle of footpad to the legged robot, and the demonstration of the feasibility and reliability of this design. To the best of our knowledge, the legged robot, climbing under nearly zero gravity, is demonstrated here for the first time. We also explore the effect of the stiffness, contact area and attaching trajectory on the reliability of the robot locomotion. This research could be a basis for the space application of micro-adhesion robot.

Gecko-inspired robot, trajectory optimization, micro-gravity

doi: 10.1360/N972016-01329