

DOI: 10.3901/JME.2009.10.001

柔性杆连接的仿壁虎机器人结构设计*

王田苗¹ 孟 僣² 官胜国¹ 裴葆青³

- (1. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院 北京 100191;
2. 北京航空航天大学宇航学院 北京 100191;
3. 北京航空航天大学生物工程系 北京 100191)

摘要: 设计并研制具有柔性元件的可采用人造壁虎脚掌吸附材料的足式仿壁虎机器人结构。针对采用人造壁虎脚掌吸附的足式爬壁机器人, 仿照生物壁虎设计基于连杆的仿壁虎机器人结构, 进行运动原理分析, 对机构进行简化, 以及自由度计算。设计相应的运动步态, 选用对角线步态实现机器人的直线行走以及转弯动作。为简化机构并使运动柔顺, 采用柔性杆作为仿壁虎机器人的身体连接件, 通过对机构自由度的计算, 分析机构的可行性, 并结合静力学分析对柔性杆的选择进行讨论。在 Adams 软件环境下建立虚拟样机进行仿真和测量, 对各关节的受力情况进行分析。通过实物样机爬行试验, 验证了设计的有效性和可行性。

关键词: 仿生机器人 壁虎 结构设计 柔性机构 虚拟样机

中图分类号: TP242

Structure Design of Gecko Robot with Compliant Shank

WANG Tianmiao¹ MENG Cai² GUAN Shengguo¹ PEI Baoqing³

- (1. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191;
2. School of Astronautics, Beihang University, Beijing 100191;
3. Bioengineering Department, Beihang University, Beijing 100191)

Abstract: A foot-type wall-climbing gecko robot using compliant shanks as body is designed, which uses dry adhesive to absorb. First of all, the structure of foot-type wall-climbing gecko robot based on link is designed by simulating biological gecko, the principle of movement and the degrees of freedom are analyzed, then the structure is simplified. Secondly the corresponding movement gait is designed, the diagonal gait is chosen to make the robot walk on straight line and turn around. Thirdly, to simplify the mechanism and make movement compliant, a compliant shank is used to connect the body parts, according to the calculation of degrees of freedom, the feasibility of mechanism is analyzed and a flat compliant shank is chosen on the basis of statics analysis. Lastly, by simulation using Adams and experiment with virtual machine, the force of every joint can be analyzed. Through making experiment by physical platform, analyzing the sample of the trajectory of robot crawling, the validity and feasibility of the design are verified.

Key words: Biorobot Gecko Mechanism design Compliant mechanism Virtual machine

0 前言

爬壁机器人可以在危险陡峭的竖直面工作, 在大厦外墙清洗、船舶检测、航天舱外维修等领域具有广泛的用途, 因而受到各发达国家的重视^[1]。

壁虎可在地面、陡壁、天花板等不同法向面上自由灵活地运动。壁虎的这种运动特征能力成为科学家研究模仿的对象^[2]。仿壁虎机器人是模仿生物壁虎吸附和移动方式的爬壁机器人。

吸附技术是机器人实现爬壁的核心技术。目前的爬壁机器人在吸附方式上主要有磁吸附、负压式吸附、攀援式吸附和干性粘合剂吸附。磁吸附是通过磁力吸附在附着面上, 吸附力大, 但要求附着面

* 国家自然科学基金(60535020)和国家杰出青年基金(60525314)资助项目。20081104 收到初稿, 20090601 收到修改稿

导磁。负压式吸附是抽出真空杯空气从而通过大气压力将机器人压附在附着面上,它不要求附着面导磁,但要求附着面平整易密封。这两种方式都已有工业产品出现。攀援式吸附是通过抓住或勾住壁面的突起实现爬壁,如斯坦福大学研制的用密布在足端的小刺倒勾住墙面的 SpinyBot^[3]。这种方式要求壁面粗糙,对于光滑平面则不合适。干性粘合剂是科学家在生物壁虎脚掌吸附的功能原理和作用机理的基础上,探索出的一种与壁虎脚趾表面结构相近的、经物理改性的极性高分子材料(人造仿生壁虎脚干性粘合剂),并应用微电子机械系统(Micro electro mechanical systems, MEMS)加工技术,设计并制作出模拟壁虎脚趾的吸附装置,该吸附装置对吸附面材质、形状无特殊要求,如斯坦福的 StickyBot 采用这种吸附材料。但目前干性粘合剂的吸附能力比起真实壁虎还是相差很多,而且加工不易却容易损耗。

移动技术是爬壁机器人完成任务的关键技术。目前的爬壁机器人在移动方式上主要有轮式、履带式、足式和混合式。轮式移动速度快、控制灵活,但越障能力差。履带式对壁面适应性强,着地面积大,但不易转弯。腿足式移动灵活,地形适应能力强,具有较高的越障能力和不同平面之间的过渡能力,但移动速度慢、控制复杂。混合式一般采用轮足混合,兼具车轮式移动和腿足式移动的优点,但控制和结构也更为复杂。

腿足式结构虽然控制复杂,但它是生物界多数动物为适应复杂多变环境而进化的选择,因此通过对某些生物特征和功能模仿研制的足式移动机器人具有轮式和履带式所没有的优点^[4],使足式结构在爬壁机器人中有较好的应用前景。目前常见的腿足式机器人以两足式、四足式、六足式应用较多。结构主要为缩放型机构、四连杆机构、多关节串联机构、平行杆机构、并联机构和摆动缩放机构。

仿壁虎足式机器人有着很强的运动灵活性,同时对行走地面要求低,有着广阔的应用前景^[5]。斯坦福大学研制的 StickyBot 模仿壁虎的脚掌和身体,但其腿部采用平行四边形机构,腿部只有2自由度,身体采用具有弹性的“弓”形结构^[6]。南京航空航天大学研制了每个腿具有3自由度的仿壁虎机器人,但由于身体缺乏柔性,所以移动过程中存在过约束现象。本文针对采用粘附材料的足式仿壁虎机器人研制需要,重点对移动机构进行了研究。首先仿照生物壁虎设计了基于连杆的仿壁虎机器人结构,针对采用粘附材料对仿壁虎机器人的设计要求分析了运动原理和设计了运动步态;其次为简化机构和运动柔顺,利用柔性杆进行了结构改进,结合

静力学分析对柔性杆的设计进行了讨论。最后通过 Adams 动力学仿真及研制的实际平台进行了相应的爬壁试验,证明了设计结构的有效性和可行性。

1 仿壁虎机器人结构设计及原理分析

通过对壁虎身体结构与运动规律的分析^[7],发现壁虎具有对称分布的四足。除去壁虎脚掌,壁虎的每条腿具有3个关节5自由度,分别是身体与大腿骨之间的根关节(记为 J_{BF} , 相当于球铰副关节,具有2自由度),大腿骨与小腿胫骨之间的膝关节(记为 J_{FT} , 相当于转动副关节,具有1自由度)和小腿胫骨与脚掌之间的踝关节(记为 J_{TF} , 相当于球铰副关节,具有2自由度)。此外,壁虎的身体是柔性的,在爬行过程中会左右扭动,因此壁虎的身体也参与了爬行移动。根据对壁虎的观察,本文设计仿壁虎机器人结构如图1所示。

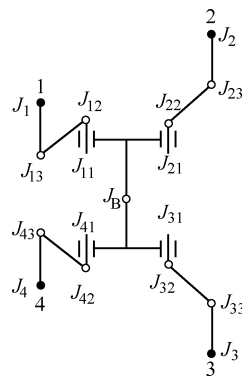


图1 仿壁虎机器人结构简图

按顺时针顺序,从左上开始依次对仿壁虎机器人四个脚掌进行编号,分别为1、2、3、4号足,其对应腿编号与足编号相同。脚掌与腿之间存在一个转动副关节,用 J_i 表示,其中 $i=1, 2, 3, 4$ 表示足或腿编号。每个足对应腿上有3个关节,用 J_{ij} 表示, $j=1, 2, 3$ 表示第 i 条腿的关节编号。其中 J_{i1} 的转动轴垂直于 J_{i2} 的转动轴且相交,所以 J_{i1} 与 J_{i2} 组成第 i 条腿的 J_{BFi} 关节。 J_{i3} 是第 i 条腿的 J_{FTi} 关节,且 J_{i3} 的转动轴平行于 J_{i2} 的转动轴且平行于 J_i 的转动轴。 J_i 相当于取了壁虎 J_{TF} 关节的1自由度,此处取1自由度的目的是为了简化机构。仿壁虎机器人的脚掌假设用圆盘代替。 J_B 为模拟壁虎身体的关节。

仿壁虎机器人的每条腿可以分为支撑状态与悬空状态。当腿处于悬空状态时成为一条串联开式链机构。为保证仿壁虎机器人的腿悬空状态时具有确定的状态,需要至少在 $J_{ij}(i=1, 2, 3, 4, j=1, 2, 3)$ 关节上安装驱动电动机,此时踝关节 J_i 成为局部自由度,不影响腿的状态。

仿壁虎机器人在爬行时, 最简单的方式是由两组处于对角线位置的足(1和3、2和4)交替支撑从而形成仿壁虎机器人运动。

仿壁虎机器人采用人造的仿生壁虎脚掌, 它由MEMS加工的无数细小刚毛组成。在吸附时刚毛嵌入附着面的缝隙中从而形成附着力。因此当脚掌处于吸附状态时, 应当避免脚掌沿附着面切向滑动, 否则会剪断刚毛, 影响吸附效果。为此, 设计的仿壁虎机器人行走机构必须能满足爬行过程中处于吸附状态的支撑足与支撑面不能存在沿切面的相对滑动。为此, 需要对仿壁虎机器人的运动链进行分析。

假设当足2和4处于支撑状态, 1和3处于悬空状态, 则此时仿壁虎机器人的平面运动链如图2所示。

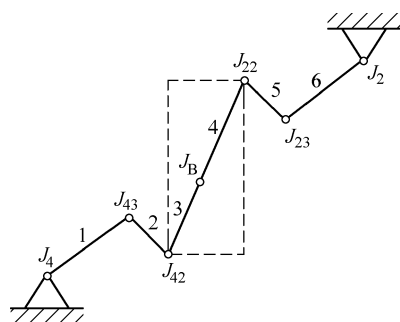


图2 仿壁虎机器人平面运动链示意图

足2、4吸附在附着面上, 从而形成基座。 J_{41} 和 J_{21} 转动轴平行于运动平面且在支撑相过程中应保持不变以维持支撑, 所以可以当作固连件。这样, 壁虎在平面的运动就等效于平面闭式多连杆机构, 其中输入源为 J_{43} 、 J_{42} 、 J_{22} 、 J_{23} 共计4个, 其余为被动关节。

根据平面机构的自由度 F 计算公式可知

$$F=3n-2P_L-P_H=3\times 6-2\times 7-0=4$$

式中 n ——活动构件数

P_L ——运动低副数

P_H ——运动高副数

输入与自由度相等, 可见该运动链机构有确定的运动规律且不存在过驱动或过约束现象, 吸附足与附着面之间的切向力是正常情况下产生运动所受的力。

与一般的四足机器人相比, 该仿壁虎机器人增加了身体关节 J_B 。可以证明, J_B 的存在是必要的。假设 J_B 不存在, 则图2所示机构的运动自由度为

$$F=3n-2P_L-P_H=3\times 5-2\times 6-0=3<4$$

即机构存在过驱动。过驱动情况下, 运动链易使吸附足与附着面之间产生较大的切向内应力。

2 机器人步态规划

所谓步态规划是指足式机器人实现各腿间协调运动的迈步时序。四足机器人常见的步态有对角小跑步态、三角步态等。图1所示的仿壁虎机器人可以实现对角线步态, 如图3所示。

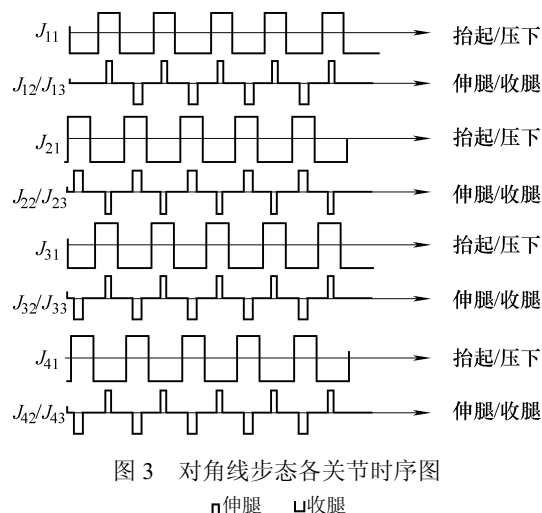


图3 对角线步态各关节时序图

假设初始状态下, 四足都吸附在支撑面上。则通过以下(1)~(6)的循环, 即可实现仿壁虎机器人的对角线步态。

(1) J_{21}/J_{41} , 使足2、4脱附并将腿2、4抬起。

(2) $J_{12}/J_{13}(i=1, 2, 3, 4)$, 同时运动行成身体的移动及悬空腿的迈步。

(3) J_{21}/J_{41} , 将腿2、4放下并使足2、4吸附。

(4) J_{11}/J_{31} , 使足1、3脱附并将腿1、3抬起。

(5) $J_{12}/J_{13}(i=1, 2, 3, 4)$, 同时运动行成身体的移动及悬空腿的迈步。

(6) J_{11}/J_{31} , 将腿1、3放下并使足1、3吸附。

通过对各关节运动量大小的协调, 此对角线步态可以实现仿壁虎机器人的前进、后退、转弯等。

3 基于柔性杆连接的结构改进设计

图1所示仿壁虎机器人具有模拟壁虎身体的关节 J_B , 此处 J_B 是个转动副关节。当仿壁虎机器人处于自由状态时, 希望其身体是伸直的。为此可以给 J_B 加一扭簧来实现。但生物壁虎的身体实际是柔性的, 为使仿壁虎机器人移动时的身体更柔顺, 拟采用柔性杆来连接仿壁虎机器人的前、后部分, 如图4所示。采用柔性杆连接还可以简化结构和杆件数, 减少装配^[8]。

对于具有柔性元素的仿壁虎机器人平面爬行运

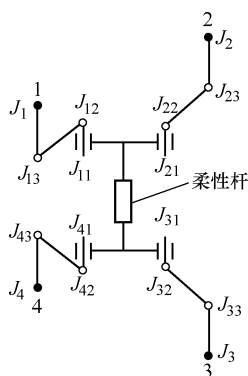


图4 具有柔性躯干的仿壁虎机器人

动链，理想情况下仍可用图2进行分析。理想情况下， J_{41} 和 J_{21} 保持不变以维持支撑， J_4 、 J_{43} 、 J_{42} 、 J_{22} 、 J_{23} 、 J_2 转轴平行，故约束柔性杆只能在爬行平行平面变形，此时柔性杆等效于图2中杆件3、4和 J_B 关节的组合。

从空间运动链角度进行分析。基于对角线步态的空间运动链如图5所示。

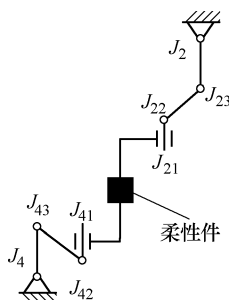


图5 仿壁虎机器人空间运动链示意图

具有柔性元素的机构称为柔性机构。柔性机构的自由度 F_c 计算公式为^[9]

$$F_c = F_r + C$$

式中， F_r 为广义平面刚体机构的自由度，即将柔性机构中的柔性元素均视为刚性时的机构自由度，可根据平面刚体机构的自由度计算公式来计算。 C 为柔度，即柔性机构中柔性元素的变形所具有的自由度总和。

对于 F_r ，将柔性杆刚化并应用断开机架法，根据空间单封闭性机构自由度分析公式^[10]

$$F = \Sigma f - \lambda = \sum_{k=1}^{\lambda-1} k p_k - \lambda$$

式中 Σf ——空间机构开链自由度总和

λ ——闭链约束数

p_k ——机构中 k 类运动副的个数

图4中广义平面刚体机构中只有8个转动副，所以， $p_1=8$ ；而闭链约束数 $\lambda=6$ （平动约束数3，转动约束数3），所以

$$F_r = 8 - 6 = 2$$

根据李团结^[11]对于柔性元素柔性含量值的归纳总结，对于柔性杆有 $C=4$ ，所以

$$F_c = F_r + C = 2 + 4 = 6$$

而图4中有 J_{21} 、 J_{22} 、 J_{23} 、 J_{41} 、 J_{42} 、 J_{43} 共6个驱动输入。所以该空间机构也具有确定的运动规律。

4 机器人静力学分析

当机器人爬行时，柔性杆将产生形变。形变产生的内应力将会对吸附足产生沿爬行面的切向力，此力不可避免，只能尽量减小。为减小内应力，应选择合适柔性杆，为此对柔性杆的受力变形进行分析。

图6所示为柔性杆受力变形的示意图，根据该示意图可以计算柔性杆的挠度方程 $f(z)$ ，然后计算其弯矩

$$M(z) = EI_y / \rho(z)$$

式中 $\rho(z)$ ——挠度函数的曲率

$M(z)$ —— z 处的弯矩

E ——柔性杆材料的弹性模量

I_y ——柔性杆 y 轴断面极惯性矩

$$I_y = \int_A y^2 dA$$

A ——横断面积

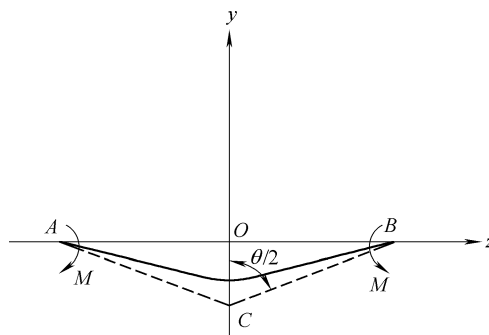


图6 柔性杆变形受力图

柔性杆在爬行过程中的最大弯曲变形量是由运动确定的，也即 $\rho(z)$ 最小值由运动确定。而内应力由 $M(z)$ 确定。为减小 $M(z)$ ，可以采取以下措施。

(1) 选择弹性模量 E 小的柔性材料。

(2) 减小 y 轴断面极惯性矩 I_y ，而为减小 I_y 需要减小横断面积 A 或柔性杆 y 向尺寸。因为希望有较大的扭转刚度和在垂直爬行面有较大刚度，所以宜选择扁平的柔性杆。

(3) 控制并尽量减小运动过程中柔性杆变形。

5 虚拟样机仿真

为了验证设计的合理性和正确性，并为实物设

计提供参考数据, 本文在 Adams 中设计了虚拟样机并进行了仿真试验。试验目标是要求仿壁虎机器人的整体质量小于 300 g, 参考大壁虎实物尺寸, 设计仿壁虎机器人的尺寸为小腿长 $L_T=|J_1J_{13}|=40$, 大腿长 $L_F=|J_{13}J_{12}|=40$, 身体宽 $L_W=|J_{11}J_{21}|=70$, 身体长 $L_H=|J_{12}J_{42}|=160$ 。

根据上述目标设计的虚拟仿真壁虎机器人如图 7 所示。利用该仿真模型进行对角线步态的爬行试验, 证明可以实现直线移动和原地转向。在此基础上, 对爬行过程中的柔性杆变形和驱动关节受力情况进行了仿真分析。

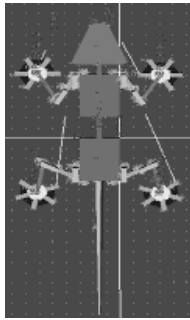


图 7 仿壁虎机器人仿真模型

5.1 柔性杆变形仿真分析

柔性杆变形会产生沿爬行方向的剪切力, 柔性杆变形量对剪切力大小有直接影响, 机构设计和步态规划的一个目标就是要限制柔性杆变形量。为分析该变形量, 这里用柔性杆两端切线夹角来表示变形量, 其夹角变化情况由仿真可得出, 如图 8 所示。由图 8 曲线可知, 在 30 s 的仿真过程中, 夹角变化范围在 $172.5^\circ \sim 187.5^\circ$, 变化幅度为 $-7.5^\circ \sim 7.5^\circ$ 。

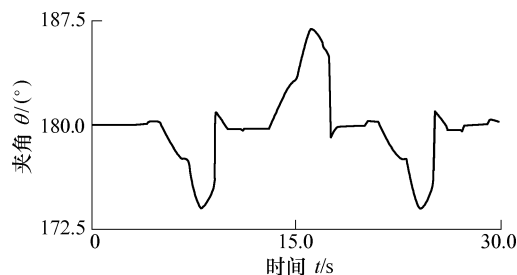
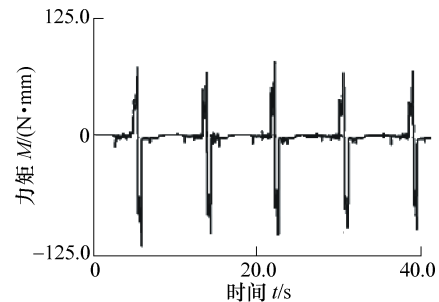


图 8 柔性杆变形曲线

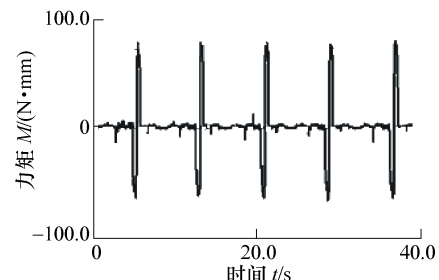
5.2 驱动关节受力仿真分析

通过对爬行过程中驱动关节的受力分析, 可以为选择驱动电动机提供参考依据。因为本体对称且各腿运动规律相似, 故任取一腿为例即可, 试验中以腿 2 为例。

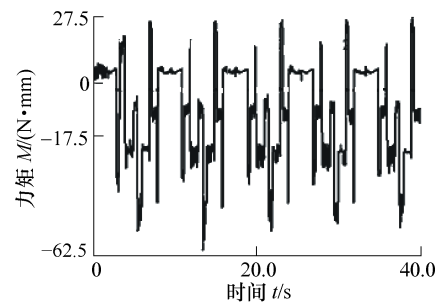
通过控制仿壁虎机器人在水平面、竖直面和天花板上爬行来仿真分析驱动关节的受力情况。腿 2 各驱动关节在上述三种情况下的受力分别如图 9~11 所示, 仿真时间为 40 s。



(a) J_{23} 关节

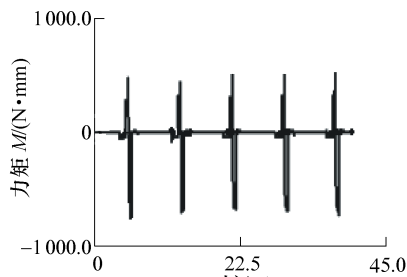


(b) J_{22} 关节

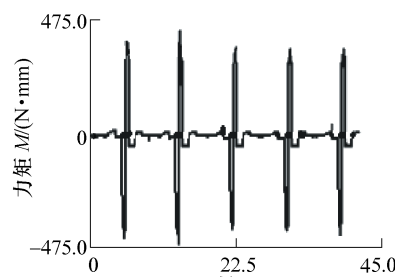


(c) J_{21} 关节

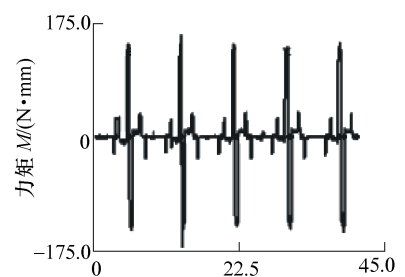
图 9 沿水平面爬行前进时腿 2 各关节所受力矩图



(a) J_{23} 关节



(b) J_{22} 关节



(c) J_{21} 关节

图 10 沿垂直壁面爬行前进时腿 2 各关节所受力矩图

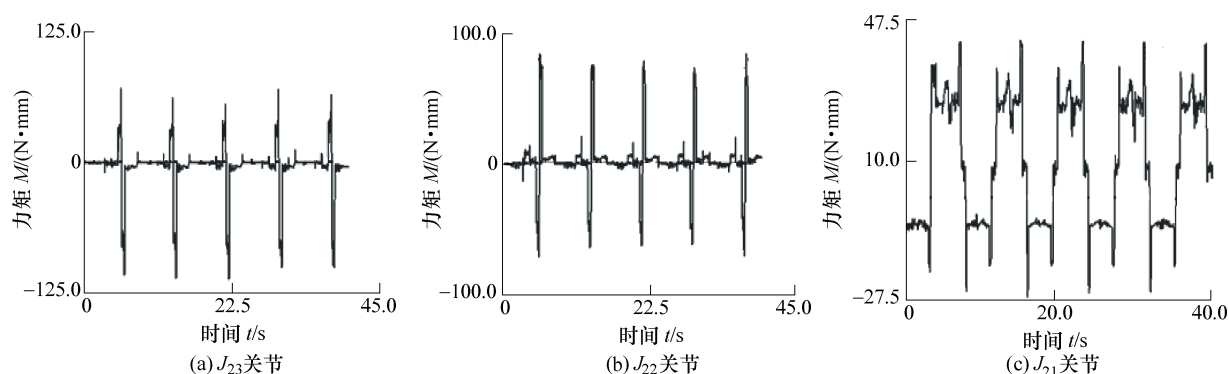


图11 沿天花板爬行前进时腿2各关节所受力矩图

仿真结果表明,在爬竖直面时各关节受力大于爬水平面和天花板时的受力。这是因为在爬竖直面时,重力方向与运动方向在平行平面内,而爬水平面或者天花板时重力方向与运动方向垂直。在仿真中可以发现,无论在何种情形下用于抬腿的 J_{21} 关节的峰值力矩最小,用于摆动小腿的 J_{23} 关节的峰值力矩最大,用于摆动大腿的 J_{22} 关节峰值力矩居中。通过分析认为,这是由于当足2处于吸附状态时 J_{22} 、 J_{23} 要带动身体移动造成的,离吸附足2越近,其力臂越小,故峰值力矩越大。而 J_{21} 仅负载腿或支撑时离足2较远,故峰值力矩反而小。根据仿真结果,应当在 J_{23} 关节处选择大电动机而 J_{21} 选择小电动机。但这样会显得很不对称。实际中可以选择相同电动机。

6 壁虎机器人实体试验

根据虚拟样机仿真结果,制作了仿壁虎机器人实物,其实体装配如图12所示。

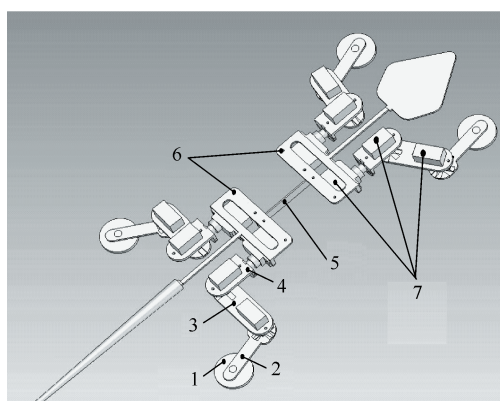


图12 装配实体

1. 吸附装置 2. 小腿零件 3. 大腿零件 4. 大腿根部零件
5. 柔性杆零件 6. 身体部分刚性零件 7. 舵机

为了尽量减轻机器人自身的质量,机器人本体制作材料主要选用铝合金。在零件设计过程中采用多种方法简化机器人零件和减轻零件的质量,如四腿足的零件以及零件的连接方式完全相同从而具有

互换性。柔性杆选用弹性扁平金属片。

由于尺寸结构的限制,驱动电动机选用 Futaba 公司生产的 S3107 舵机,舵机尺寸为 $21.8\text{ mm} \times 112\text{ mm} \times 19.8\text{ mm}$,舵机的质量为 9 g 。Futaba S3107 输出力矩基本满足机器人输入驱动的要求,而其体积小有利于机器人微型化。

由于条件的限制,在研制的机器人当中,吸附装置采用电磁铁代替人工壁虎脚掌。电磁铁选用巨龙公司生产的型号为 J236-AD1224 的产品,每个电磁铁质量为 46 g 。

最终研制的仿壁虎机器人样机如图13所示。该机器人共有4条腿、12个舵机,机器人总质量为 420 g ,除去电磁铁后质量为 236 g 。机器人通过无线串口接收 PC 行为指令,外部供应单一电源 12 V 。

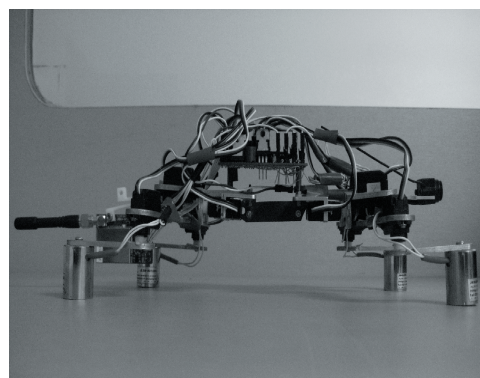


图13 仿壁虎机器人实物

利用研制的样机进行平面和竖直面上的爬行试验,结果表明,仿壁虎机器人的运动满足设计要求,能够在水平地面和垂直墙壁上爬行。而在实现前进、后退、左转、右转过程中,吸附足没有出现滑动现象,从而证明了结构设计的有效性与可行性。

7 结论

(1) 通过分析、仿真及实物试验证明,设计的仿壁虎机器人能够模仿壁虎爬行行为,并且满足应用人工壁虎脚掌材料对爬行运动的要求,而采用的

对角线步态可以完成壁虎直线行走以及原地转弯动作。

(2) 柔性杆件的应用不仅简化了机器人身体结构, 消除了存在的过约束现象, 还使身体的变形更为平滑。

设计的仿壁虎机器人目前还只能在平面上爬行, 运动的规划也比较简单。对于步态规划和运动规划可以更为详细, 以实现精确的移动控制。在复杂面上的行走, 还需要结合传感器信息并在控制算法上改进。在结构上, 不同法向面之间的过渡机构是一个急需突破的难点。

参 考 文 献

- [1] 肖立, 佟仕忠, 丁启敏, 等. 爬壁机器人的现状与发展[J]. 自动化博览, 2005, 1: 81-83.
XIAO Li, TONG Shizhong, DING Qimin, et al. The current situation and development of the wall-climbing robot[J]. Automation Panorama, 2005, 1: 81-83.
- [2] 王田苗, 孟偲, 裴葆青, 等. 仿壁虎机器人研究综述[J]. 机器人, 2007, 29(3): 290-297.
WANG Tianmiao, MENG Cai, PEI Baoqing, et al. Summary on gecko robot research[J]. Robot, 2007, 29(3): 290-297.
- [3] CUTKOSKY M. Spinybot[EB/OL]. [2007-04-26]. <http://bdml.stanford.edu/twiki/bin/view/Main/SpinyBot>.
- [4] 戴振东, 张昊, 张明, 等. 非连续约束变结构机器人运动机构的仿生: 概念及模型[J]. 科学通报, 2007, 52(2): 236-239.
DAI Zhendong, ZHANG Hao, ZHANG Ming, et al. The bionic simulation of robot mechanism bound by non-continuous variable structure: The concept and model[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(2): 236-239.
- [5] 吉爱红, 戴振东, 周来水. 仿生机器人的研究进展[J]. 机器人, 2005, 27(3): 284-288.
JI Aihong, DAI Zhendong, ZHOU Laishui. Research development of bio-inspired robotics[J]. Robot, 2005, 27(3): 284-288.
- [6] CUTKOSKY M. Stickybot[EB/OL]. [2008-11-10]. <http://bdml.stanford.edu/twiki/bin/view/Main/StickyBot>.
- [7] 刘晓燕, 戴振东, 曾小龙. 大壁虎附肢肌的研究进展[J]. 解剖学研究, 2005, 27(4): 292-301.
LIU Xiaoyan, DAI Zhendong, ZENG Xiaolong. A quantitative research on Gekko gecko's appendicular muscle[J]. Anatomy Research, 2005, 27(4): 292-301.
- [8] 王雯静, 余跃庆, 王华伟. 柔机构国内外研究现状分析[J]. 机械设计, 2007, 24(6): 1-4.
WANG Wenjing, YU Yueqing, WANG Huawei. Analysis on the research status of compliant mechanism at home and abroad[J]. Journal of Machine Design, 2007, 24(6): 1-4.
- [9] MURPHY M D, MIDHA A, HOWELL L L. On the mobility of compliant mechanisms[J]. ASME, Machine Elements and Machine Dynamics, 1994, 71: 475-479.
- [10] 张启先. 空间机构的分析与综合[M]. 北京: 机械工业出版社, 1984.
ZHANG Qixian. Analysis and synthesis of spatial mechanism[M]. Beijing: China Machine Press, 1984.
- [11] 李团结. 柔性机构的机构拓扑特征及其自由度分析[J]. 机械科学与技术, 2003, 22(1): 107-109.
LI Tuanjie. Analysis of the structural topological characteristics and the mobility of compliant mechanisms[J]. Mechanical Science and Technology, 2003, 22(1): 107-109.

作者简介: 王田苗, 男, 1960 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为微小型机器人、医疗机器人和嵌入式机电控制。

E-mail: itm@buaa.edu.cn

孟偲, 男, 1977 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为计算机视觉与智能机器人系统。

E-mail: tsai@buaa.edu.cn