

大壁虎运动体态及其与步态相关性的实验研究*

张昊¹ 成佳伟^{1,2} 肖世旭^{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

摘要 用高速摄像得到大壁虎地面、墙面(向上爬行和向下爬行)和天花板自由运动行为, 以壁虎肢体上分布的特征标示点建立在体坐标系, 研究了步态周期、占空比、身体弯曲位移和身体弯曲角等反映壁虎步态和体态的参数以及在上述4种运动状态下四肢与体态的协调关系. 研究表明: 大壁虎身体上任意一点在其爬行过程中均作复合运动; 大壁虎的身体弯曲位移和弯曲角幅度因所在状态的不同而不同, 天花板和墙面垂直向上的弯曲位移相近较另外两者大50%, 且前两者的弯曲角幅度较另外两者的幅度分别大55%和40%; 大壁虎的身体弯曲位移和弯曲角相位一致, 极值出现在支撑相和摆动相过渡时间; 大壁虎的身体弯曲位移和弯曲角成线性正比关系, 与所在的状态没有关系, 线性斜率与大壁虎所在状态以及身体长度有一定关系. 上述结果为设计具有柔性躯干, 更加灵活高效的仿壁虎机器人的体态和步态规划提供了生物学启示.

关键词 大壁虎 步态 体态 占空比

爬壁机器人在军事、航空、民用等方面有明确的需求^[1,2]. 现有爬壁机器人采用真空吸附^[3], 磁吸附^[4]和仿壁虎刚毛吸附^[5], 它们在运动的稳定性、灵活性、健壮性等方面还远远落后于动物^[6,7]. 因此国内外不少学者研究动物的运动行为, 希望启发仿生机器人设计.

Ritter等^[8]研究了蜥蜴运动时的脊椎弯曲行为, 得出腿的支撑相/摆动相转化与其脊椎横向弯曲之间的关系. Raoul等^[9,10]研究了壁虎运动中步态参数的变化规律. Zaaf等^[11]研究了地面运动和壁面运动壁虎的步态特性(步距, 腿跨距, 占空比及爬行的角度等)与其爬行速度之间的关系, 以及壁虎垂直面运动的运动学特性^[12,13]. 近年来, Autumn等研究了壁虎脚掌的表面结构^[14,15], 粘附力^[16,17], 粘附机制^[18,19]和自清洁能力^[20], 以及脚趾上分层的刚毛与接触面间 van der Waals 力的作用^[21,22], 但没有涉及到壁虎运动时的步态和体态. Bergmann等^[23,24]

研究了外界环境对壁虎运动的影响. 国内梅涛等^[25]研制了仿壁虎机器人的粘附脚掌. 戴振东等^[26]研究了仿壁虎机器人运动协调中的非连续约束的变结构运动机构问题和这类机器人的机构学、冗余驱动下的运动协调、非连续接触引发的动力学、机器人脚及地面反力、爬壁杆机构机器人黏附性脚掌的设计及相关微制造和相关步态规划与控制策略^[27], 以及大壁虎支配运动的神经信息、运动调控^[28,29]和电刺激大壁虎中脑诱导其运动转向的研究等^[30]. 因此, 研究壁虎运动时的肢体在时间/空间上的协调关系即步态和身体的姿势/形态即体态不仅可以避免形态差异对其运动规律和步态特性的影响, 对爬壁机器人的运动规划和实现三维运动有着十分积极意义.

本文利用壁虎步态实验系统对壁虎在地面、墙面(向上爬行和向下爬行)和天花板的自由运动进行实验, 得到其身体上特征部位点的数据, 通过对不同运动状态下壁虎爬行过程中的步态周期、占空

2009-04-07 收稿, 2009-06-03 收修稿

* 国家自然科学基金(重点项目批准号: 60535020, 面上项目批准号: 50705043, 30700068)、国家高技术研究发展计划(批准号: 2007AA04Z201)和固体润滑国家重点实验室开放基金资助项目

** 通信作者, E-mail: zddai@nuaa.edu.cn

比、身体弯曲位移和身体弯曲角等反映壁虎步态和体态的参数进行的比较和分析,初步揭示了壁虎爬行过程中的体态规律及其与步态关系,为柔性体躯干的仿壁虎四足机器人的设计提供参考。

1 实验

1.1 动物

实验所用大壁虎(*Gekko gecko*)属蜥蜴目,壁虎科,壁虎属,产自广西,用面包虫和水饲养在模拟自然环境的动物房。本实验所用大壁虎体重约(90.5 ± 6.2)g($n=3$),其体长约(255.5 ± 12.2)mm,其中

尾巴长度约为(102.4 ± 8.3)mm,如图1(a)所示,选定的大壁虎除体重随时间稍有变化外,其他体态特征未变。为便利观察壁虎运动的体态步态特征,选取左前肢(LF)与右前肢(RF)的2个髋关节点 A_1 和 A_2 ,两个髋关节点的连线与脊柱的交点定为 A 点;同理,选取左后肢(LH)与右后肢(RH)的2个髋关节点 E_1 和 E_2 ,两个髋关节点的连线与脊柱的交点定为 E 点; C 点为大壁虎脊柱在自然伸直状态下 AE 段的中点。实验前,在上述所述的5个数据点(A_1 , A_2 , C , E_1 和 E_2)用无毒荧光漆标记。

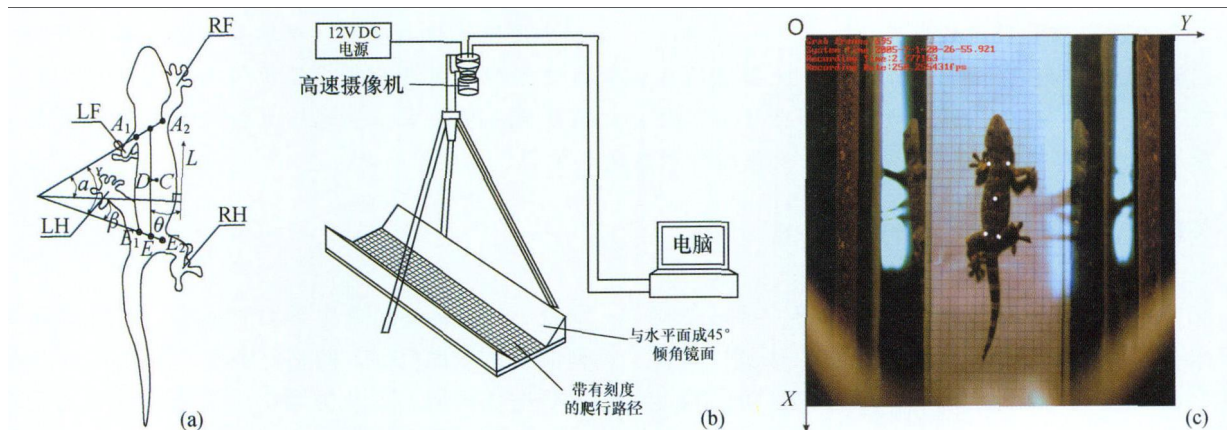


图1 实验动物与实验系统

(a) 大壁虎及参数定义; (b) 运动步态行为实验系统; (c) 运动图像

1.2 设备及参数

实验在步态实验系统中完成,如图1(b)所示。该装置的通道由带刻度的爬行路径和置于两侧的与路径成 45° 一对镜子组成,足够宽敞的通道不影响大壁虎足和身体的自由摆动。型号为MC1311的高速摄像机由三脚架支撑并调节到路径的距离,足够的距离可保证高速摄像的场景能达到大壁虎3—4个运动周期的运动距离。高速摄像机与计算机相连,并由驱动软件配置其参数,如:拍摄频率(100或250帧/s),像素(1024×1024)和拍摄时间(4 s)等。拍摄的启动由外界触发,这样可以捕捉到理想的壁虎运动步态。采集程序将大壁虎的运动步态以系列图片形式保存,图1(c)所示,像素为 1024×1024 ,左上角为坐标系原点 O ,右下角的坐标值为(1024, 1024),设定大壁虎的路径方向为 X 轴,即图中竖直方向,水平方向为 Y 轴。通过图像处理软

件SigmaScan拾取图片中各关键点的坐标,计算出其相对空间坐标值,从而可得出所需的体态特征参数。

相关体态特征参数定义如下(图1(a)所示):身体弯曲位移 H 为 C 点到 AE 连线的距离 CD ,沿大壁虎运动方向, C 点在 AE 的左侧为正值,右侧为负。前身弯曲角 α 为 A_1A_2 与垂直运动方向的夹角;后身弯曲角 β 为 E_1E_2 与垂直运动方向的夹角;身体弯曲角 γ 为 A_1A_2 与 E_1E_2 的夹角,即 $\alpha - \beta$;摆动角 θ 为 AE 与运动方向 L 直线的夹角。沿运动方向,逆时针方向角度定义为正,顺时针方向为负。

实验分为大壁虎在地面,墙面(向上爬行和向下爬行),以及天花板自由状态下,即不受外界干扰下的四组情况进行研究。

1.3 运动方向的确立

大壁虎在运动过程中身体上各点在其运动方向

上作有规律运动,为了更准确地描述大壁虎体态特征,需依据采集到的大壁虎在绝对坐标系中运动数据,建立大壁虎运动的在体坐标系,并确立大壁虎的运动方向.图2所示,以大壁虎地面运动时在绝对坐标系中C点的运动为例,可以发现C点的运动可分为两个相互垂直方向运动的合成运动,即由沿大壁虎运动方向的纵向运动和垂直于大壁虎运动方向的横向运动.取大壁虎在直线路径中2—3个周期的自由运动数据分析,由于刻度路径宽度限制,且运动距离较短,故可认为其运动为直线运动.利用Matlab的曲线拟合工具cftool对数据点进行四阶Gauss拟合得到运动轨迹 T ,采用linear polynomial(线性多项式)方法拟合^[31],得到与曲线近似相切的两条拟合直线 L_1 和 L_2 ,拟合直线的方向即为大壁虎的运动方向,以及两条相切直线与拟合曲线 T 的4个相交点 F_1, F_2, F_3 和 F_4 .通过4个点的坐标得出直线方程,计算可得:直线 L_1 和 L_2 直与 X 轴的夹角分别为 -2° 和 -3° ,故可取两条直线与 X 轴的夹角的平均值 -2.5° 作为大壁虎的实际运动方向.

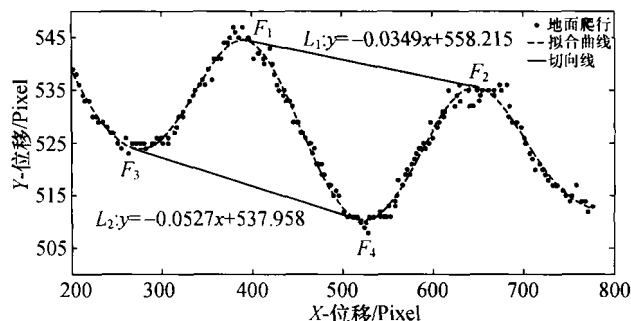


图2 大壁虎运动方向的确定

2 实验结果

在实验结果中,选取大壁虎在水平面(速度为 $340 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$)和墙面向下爬行(速度为 $330.3 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$)墙面向上爬行(速度为 $241.5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$)以及天花板上运动(速度为 $215.0 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$)的体态变化数据进行处理和比较.大壁虎运动速度可以固结于躯体上的标记点C为参考点进行计算.表1分别为四种实验条件下体态参数的极值及范围.

表1 大壁虎在4种壁面状态下体态参数的极值

	弯曲位移 H/mm		前身弯曲角 $\alpha/^\circ$		后身弯曲角 $\beta/^\circ$		身体摆动角 $\theta/^\circ$		身体弯曲角 $\gamma/^\circ$	
	最大	最小	最大	最小	最大	最小	最大	最小	最大	最小
地面爬行	7.6	-7.6	35.9	-30.0	22.6	-29.9	6.4	-5.4	56.8	-50.2
墙面向上爬行	12.5	-12.2	38.8	-40.8	31.0	-34.6	8.9	-9.3	71.7	-70.1
墙面向下爬行	7.0	-7.0	29.4	-28.4	30.1	-32.8	3.4	-4.7	62.1	-53.0
天花板爬行	11.1	-11.2	42.3	-43.0	40.5	-41.2	10.5	-10.5	84.2	-81.4

2.1 体态特征图

壁虎在长期的生物进化过程中,形成了具有自己种类特征的身体和肢体形状等形态特征,前肢短小,灵活,控制着身体的运动方向,后腿粗壮,提供前进动力.为了能够更好地实现不同状态下的运动,壁虎在运动过程中周期性的弯曲身体协调四肢运动,保证稳定的三足支撑或对角双足支撑,从而获得身体的平衡和稳定^[32].身体弯曲位移和身体弯曲角度表明了身体弯曲的程度,身体弯曲角与壁虎耗能,储能和再利用的能量成正比,并有利于实现身体平衡和运动^[33].由于壁虎前后身体的不对称性以及功能性的不同,在运动过程中产生的弯曲程度也会不同,从功能性角度讲,前身的弯曲要大于后身的弯曲.为了更好地比较在4种情况下体态特征与步态运动时

间的关系,将4种状态的特征图成4列,6个特征参数成6行,可得大壁虎4种状态下的运动特征图,如图3所示.通过分析壁虎运动的步态序列图,以脚掌接触和离开表面为界,可知各腿处于支撑相和摆动相的时间区域,将支撑相以灰色表示,摆动相以白色表示,即可得到不同壁面下的各腿占空图.

由图3和表1可以看出,大壁虎在天花板和墙面向上爬行的运动过程中身体的弯曲位移幅度(图3(b),(d))比较接近,大壁虎在地面爬行和墙面向下爬行的弯曲位移幅度(图3(a),(c))也比较接近,且前两者较后两者要大约50%;大壁虎在天花板运动过程中身体弯曲角幅度最大,墙面向上爬行过程中身体弯曲角幅度(图3(t),(r))次之,地面爬行过程中的身体弯曲角幅度最小并与墙面向下

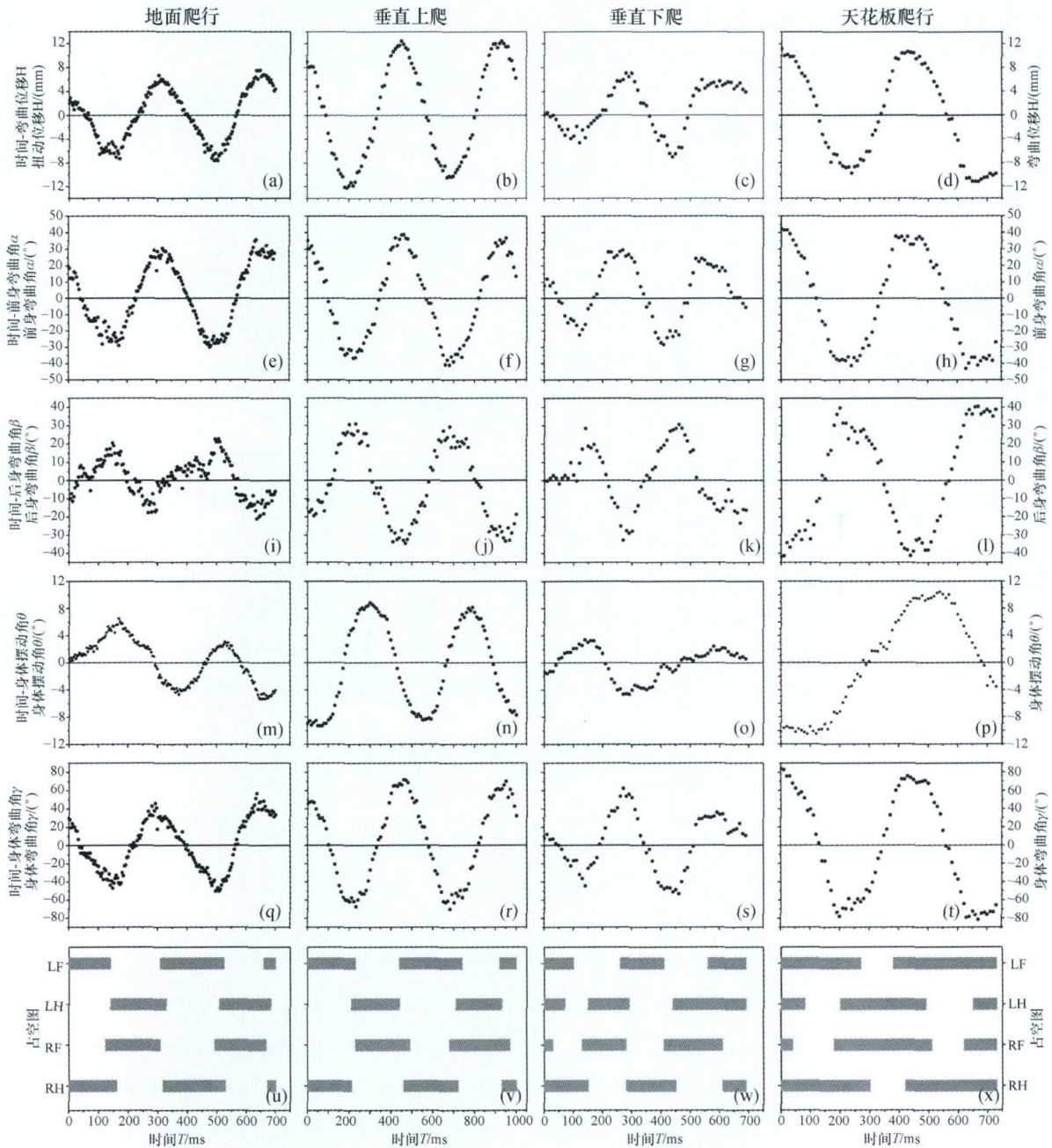


图3 大壁虎运动过程中体态特征相图

(a)~(d) 为大壁虎在地面爬行、墙面向上爬行、墙面向下爬行、天花板爬行过程中的时间—身体弯曲位移 H 图；(e)~(h) 依次为上述4种运动过程中的时间—前身弯曲角 α 相图；(i)~(l) 依次为上述4种运动过程中的时间—后身弯曲角 β 相图；(m)~(p) 依次为上述4种运动过程中的时间—身体摆动角 θ 相图；(q)~(t) 依次为上述4种运动过程中时间—身体弯曲角 γ 相图；(u)~(x) 依次为上述4种运动过程中的大壁虎四肢的占空图

爬行的身体弯曲角幅度(图3(q), (s))比较接近, 且前两者较后两者相应的要大约55%和40%; 相应的大壁虎在天花板和垂直向上的运动过程中前身体弯曲角和后身弯曲角(图3(f), (j), (h), (l))也比在地面爬行和墙面向下爬行的弯曲角幅度(图3(e),

(i), (g), (h))要大; 此外, 在同种运动状态下, 大壁虎在地面爬行, 墙面向上爬行和天花板爬行时前身的弯曲角幅度比后身的弯曲角幅度要大, 而在墙面向下爬行时则不同; 天花板爬行和墙面向下爬行的前后身体弯曲幅度相近, 且天花板爬行时前后

身体弯曲幅度达到 80° ，身体形成的弓形对应的圆心角即身体的弯曲角达到 166° 。另外，大壁虎在天花板身体的摆动幅度最大，墙面向上运动次之，地面爬行时摆动幅度最小。

身体的弯曲与其步态有着密切的关系，从步态周期性和时间角度上看，在单个步态周期内，身体弯曲位移，身体弯曲角，前身弯曲角，后身弯曲角和身体摆动角均出现一个波峰和一个波谷，且身体弯曲位移，身体弯曲角和前身弯曲角的相位完全一致，即同时到达波峰和波谷，后身弯曲角则与上三者相位相反，即身体弯曲位移，身体弯曲角和前身弯曲角到达极大值时，后身弯曲角到达极小值，这四者的波动周期与步态周期完全一致。而身体摆动角与前四者有相位差，因壁虎所在的状态不同，相位差不一样。身体弯曲位移，身体弯曲角，前身弯曲角，后身弯曲角到达极值的时间刚好处于步态的交替期，即由左前腿和右后腿支撑状态过渡到右前腿和左后腿支撑相状态，或由右前腿和左后腿支撑相状态过渡到左前腿和右后腿支撑相状态，这个时刻虽然弯曲程度最大，但由于同时支撑的脚多，达到 3 个或 4 个，身体的稳定性反而得到加强；四者到达零值时，大壁虎都处于两对称脚支撑状态；在一个周期内，对称的两脚支撑状态下，身体弯曲位移，身体弯曲角，前、后身弯曲角和身体摆动角的变化过程中出现一次极值和零值。图 4 为大壁虎在地面运动过程中一个周期内身体弯曲位移和弯曲角依次到达极值和零值时的步态序列图，其中图 4(a)，(e) 为到达极小值时的步态，图 4(b)，(d) 为到达零值时的步态，图(c) 为到达极大值时的步态，相邻两者之间的时间差分别为 20，22，23 和 24 ms。

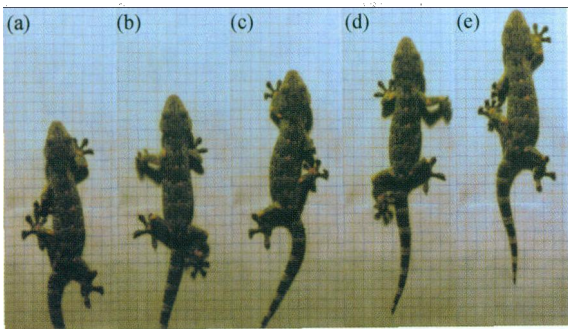


图 4 地面爬行特殊相位点步态序列图

上述情况表明，大壁虎在墙面向上爬行和天花板爬行这样相对困难环境下身体弯曲程度更大，更多的单腿支撑时间(表 2 所示)和显著的体态变化以保证运动的平稳和身体的平衡；弯曲位移和弯曲角越大，身体弓的程度越大，消耗和储存的能量也将增大，身体产生的张力也就越大，且张力的极值出现在 3 腿或 4 腿支撑的时间，可得到有效的保持并进行释放，在墙面向下爬行和天花板爬行时 3 腿和 4 腿支撑所占的时间比例分别达到 38.5% 和 60%，这种张力作用到支撑的前肢和后肢将成为脚掌刚毛产生切向运动的源泉，较大的切向力不仅可以平衡身体的重量(墙面向下爬行)，而且可以产生较大的黏附力(即法向力)平衡身体的重量(天花板运动)。当身体的弓形恢复时，势能转化为动能，成为身体前进的动力。

表 2 不同壁面下壁虎步态周期、各腿占空比^{a)}以及多腿同时支撑所占比例

	步态周期/ms	δ_{LF} / %	δ_{RF} / %	δ_{LH} / %	δ_{RH} / %	2 腿支撑 / %	3 腿支撑 / %	4 腿支撑 / %
地面爬行	336	55	55	55	55	84	13	3
垂直向上爬行	490	54	54	59	59	85	14	1
垂直向下爬行	310	51	51	51	51	61	34	45
天花板爬行	450	73	73	73	73	39	25	36

a) 占空比 δ 为一个运动步态周期内单腿支撑时间所占步态周期的比例。

2.2 体态特征相图

体态特征相图可以在一幅图中看出同一时间变量变化过程中一组参数的变化趋势。如图 5 所示为各种情况下运动时身体弯曲位移和身体弯曲角之间的相图。从图中可以明显看出，在各种运动情况下两者都成线性关系，线性度 $R^2 \geq 0.87$ 。说明大壁虎在运动过程中，身体弯曲位移与身体弯曲角成线性正比关系。直线的斜率与大壁虎身体 A_1A_2 到 E_1E_2 之间距离 $AE_{\max}$ (两者平行时) 以及壁虎所在的状态有关系。经测量在地面爬行，墙面向上爬行，墙面向下爬行，天花板爬行时所用大壁虎的 $AE_{\max}$ 分别为 85.0，90.9，91.7 和 80.9 mm。从图 5 可以看出垂直向上的斜率最大，地面爬行次之，墙面向下最小。在 $AE_{\max}$ 比较接近的个体，在身体弯曲角相同的情况下，为了获得更大的弯曲位移，可使脊背向外弯曲程度更高。由于在天花板运动的个体 $AE_{\max}$ 最小，要达到相同的弯曲位移，可增大其身体弯曲角。

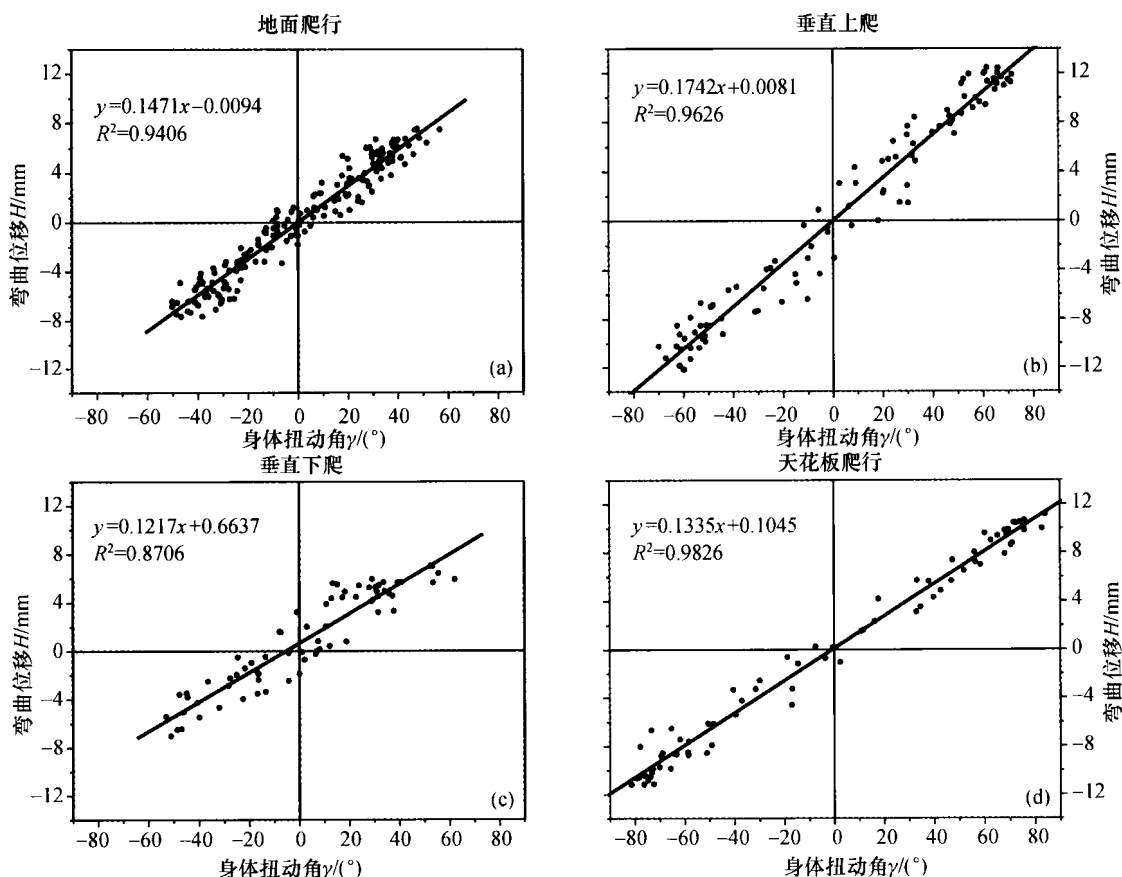


图5 大壁虎运动过程身体弯曲位移与弯曲角关系图

A、B、C、D 分别为大壁虎在地面爬行、墙面向上爬行、墙面向下爬行、天花板爬行运动过程中的身体弯曲位移 H -身体弯曲角 γ 关系图

3 讨论

大壁虎经过长期的进化而选择了适合其生存的运动模式。其所形成的特定的步态和体态特征密切联系着运动环境。大壁虎前后肢的形态差异对其在运动过程中的体态产生重要影响。运动过程中,较短的前肢运动灵活,离身体较近,掌控身体的运动方向,摆动相结束时,为协调较长后肢的运动步距,身体弯曲角增大,并尽量使前肢伸展,身体的动能转化为身体的势能,紧接着的支撑相状态下,身体的势能转化为身体前进的动能。

从体态及其与步态的相关性的角度研究壁虎的运动尽量避免了因个体差异带来的不便。大壁虎肢体的弯曲是其运动过程中身体动能与势能转换的外界表现,同时其特有的变化规律与四肢的协调运动提高了大壁虎运动的适应性和运动能量的效率。目前的足式仿壁虎机器人,身体是刚性的,没有像壁

虎一样的脊柱可以随着运动步态进行协调弯曲运动,或是柔性身体进行随动运动,或将身体简化成单个或多个自由度进行协调运动,从而导致机器人的运动灵活性和适应性显著降低。因此,研究大壁虎的体态及其与步态的相关性和对仿生壁虎机器人的设计,步态规划和控制也具有非常重要的指导作用。

4 结论

本文选取了3个体型,体长和体重近似的大壁虎进行多次实验,选择其中直线、匀速和自由爬行运动进行归纳分析,可得出以下结论:

(1) 大壁虎在其爬行过程中脊背上点都在做复合运动,即由与大壁虎整体运动方向相一致的(纵向)和垂直与此方向(横向)的两个运动合成,横向运动具有周期性,整体周期与步态周期相同。

(2) 大壁虎的身体弯曲位移和弯曲角幅度因所在状态的不同而不同,天花板和墙面向上爬行的弯

曲位移相近较另外两者大50%;且前两个的弯曲角幅度较另外两者的幅度分别大55%和40%。

(3) 大壁虎的身体弯曲位移和弯曲角相位一致,极值出现在支撑相向摆动相转换,或摆动相向支撑相转换时候,零值出现在两脚支撑或摆动相。

(4) 大壁虎的身体弯曲位移和弯曲角成线性正比关系,与所在的状态没有关系,线性斜率与大壁虎所在状态以及身体长度有一定关系。为设计具有柔性躯干的仿壁虎机器人的体态和步态规划提供依据。

参 考 文 献

- 1 王田苗, 孟 德, 裴葆青, 等. 仿壁虎机器人研究综述. 机器人, 2007, 29(3): 290—297
- 2 王田苗. 仿生、反恐排爆机器人. 中国制造业信息化, 2005, (11): 68
- 3 王 巍, 宗光华. 气动擦窗机器人的控制和环境检测. 液压与气动, 2001, (1): 4—7
- 4 张俊强, 张 华, 王伟民. 履带式爬壁机器人磁吸附单元的磁场及运动分析. 机器人, 2006, 28(2): 219—223
- 5 Stanford StickyBot pages. <http://bdml.stanford.edu/twiki/bin/view/Main/StickyBot> [2008-11-10]
- 6 吉爱红, 戴振东, 周来水. 仿生机器人的研究进展. 机器人, 2005, 27(3): 284—288
- 7 陈东辉, 佟 金, 李重焕. 人和动物的步态与步行机器人. 吉林大学学报(工学版), 2003, 33(4): 121—125
- 8 Ritter D. Axial muscle function during lizard locomotion. The Journal of Experimental Biology, 1996, 199(11): 2499—2510
- 9 Raoul V, Peter A, Bieke V. No trade-off between sprinting and climbing in two populations of the Lizard *Podarcis hispanica*. Biological Journal of the Linnean Society, 1997, 60(4): 493—503
- 10 Raoul V, Peter A, Bieke V. Variation in morphology gait characteristics and speed of locomotion in two populations of lizards. Biological Journal of the Linnean Society, 1998, 63(3): 409—427
- 11 Zaaf A, Van RD, Herrel A, et al. Spatio-temporal gait characteristics of level and vertical locomotion in a ground-dwelling and a climbing gecko. The Journal of Experimental Biology, 2001, 204(7): 1233—1246
- 12 Irschick DJ, Vanhooydonck B, Herrel A, et al. Effects of loading and size on maximum power output and gait characteristics in geckos. J Exp Biol, 2003, 206(22): 3923—3934
- 13 Autumn K, Hsieh ST, Dudek DM, et al. Dynamics of geckos running vertically. J Exp Biol, 2006, 209(2): 260—272
- 14 Autumn K, Peattie A. Mechanisms of Adhesion in Geckos. Soc Integ Comp Biol, 2002, 42(6): 1081—1090
- 15 Arzt E, Gorb S, Spolenak R. From micro to nano contacts in biological attachment devices. PNAS, 2003, 100(19): 10603—10606
- 16 Huber G, Mantz H, Spolenak R, et al. Evidence for capillarity contributions to gecko adhesion from single spatula nanomechanical measurements. PNAS, 2005, 102(45): 16293—16296
- 17 Bhushan B, Sayer RA. Gecko Feet: Natural Attachment Systems for Smart Adhesion. Applied Scanning Probe Methods VII. -Biomimetics and Industrial Applications. Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007, 41—76
- 18 Autumn K, Liang Y, Hsieh T, et al. Adhesive force of a single gecko foot hair. Nature, 2000, 405(6787): 681—685
- 19 Autumn K, Sitti M, Liang YA, etc. Evidence for van der Waals adhesion in gecko setae. PNAS, 2002, 99(19): 12252—12256
- 20 Hansen WR, Autumn K. Evidence for self-cleaning in gecko setae. PNAS, 2005, 102(2): 385—389
- 21 Kim TW, Bhushan B. Adhesion analysis of multi-level hierarchical attachment system contacting with rough surface. Journal of Adhesion Science and Technology, 2007, 21(1): 1—20
- 22 Bharat BGPA, Tae-Wan K. Adhesion analysis of two-level hierarchical morphology in natural attachment systems for smart adhesion. Journal of Adhesion Science and Technology, 2006, 20(13): 1475—1491
- 23 Bergmann P, Irschick DJ. Effects of temperature on maximum acceleration, deceleration and power output during vertical running in geckos. J Exp Biol, 2006, 209(8): 1404—1412
- 24 Bergmann PJ, Irschick DJ. Effects of temperature on maximum clinging ability in a diurnal gecko: evidence for a passive clinging mechanism? J Exp Zool, 2005, 303A(9): 785—791
- 25 王辉静, 梅 涛, 汪小华. 一种新型仿壁虎爬行机器人的粘附阵列设计. 机器人, 2006, 28(3): 191—194
- 26 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. 科学通报, 2007, 52(2): 236—239
- 27 戴振东. 非连续约束变结构杆机构机器人: 运动与控制的若干仿生基础问题. 科学通报, 2008, 53(6): 618—622
- 28 郭 策, 戴振东, 吉爱红, 等. 壁虎脚趾运动调控的研究. 中国生物医学工程学报, 2006, 25(1): 110—113
- 29 戴振东, 孙久荣. 壁虎的运动及仿生研究进展. 自然科学进展, 2005, 16(5): 519—523
- 30 王文波, 戴振东, 郭 策, 等. 电刺激大壁虎(*Gekko gekko*)中脑诱导转向运动的研究. 自然科学进展, 2008, 18(09): 979—986
- 31 张志勇. 精通 MATLAB 6. 5 版. 北京航空航天大学出版社, 2003, 3: 148—152
- 32 Schmiedel ER JP. The mechanics of and robotic design for quadrupedal galloping. Ph. D. Dissertation, The Ohio State University, 2001
- 33 Claire T. Farley, T, Christine KO. Mechanics of locomotion in lizards. Journal of Experimental Biology, 1997, 200(16): 2177—2188