



# 大壁虎脚趾运动和感觉的分区分级调控

郭策<sup>\*</sup>, 蔡雷, 谢合瑞, 王周义, 戴振东, 孙久荣<sup>\*</sup>

南京航空航天大学仿生结构与材料防护研究所, 南京 210016;

北京大学生命科学学院, 北京 100871

<sup>\*</sup> 联系人, E-mail: [guozc@nuaa.edu.cn](mailto:guozc@nuaa.edu.cn), [sjr@pku.edu.cn](mailto:sjr@pku.edu.cn)

2008-09-09 收稿, 2009-02-09 接受

国家自然科学基金面上项目(批准号: 30400086, 30770285, 30700068)和国家自然科学基金重点项目(批准号: 60535020)资助

**摘要** 近年来, 爬壁机器人是机器人领域研究和开发的一个热点课题. 大壁虎是研究爬墙机器人的理想模型. 在仿壁虎机器人的研制过程中, 脚掌(趾)的设计是关键技术之一. 采用高速摄像和电生理学方法, 观测了大壁虎前、后脚在不同界面爬行时不同的运动模式; 研究了5个脚趾的黏-脱附运动及其感觉信息传入的神经支配; 发现了5个脚趾运动和感觉功能的不同分区, 黏附和脱附行为及其感受传入的分级调控现象. 这些结果为当前仿壁虎机器人, 以及其他4足和多足机器人脚掌(趾)的结构和运动控制系统的设计提供重要的信息和理念.

**关键词**

大壁虎

神经支配

运动模式

感觉传入

机器人脚掌

随着社会的进步和科技的发展, 代替人类或辅助人类完成各种复杂、危险作业任务的特种机器人受到各国政府、学术界和工程技术部门的广泛关注. 近年来, 作为特种机器人大家族中的一员—爬壁机器人是研究和开发的一个热点课题. 在众多具有表面吸附能力的动物中, 大壁虎凭借其脚底刚毛优异的黏附性能, 脚掌黏-脱附的自如转换及其较强的负重能力, 成为研究爬墙机器人的理想模型. 在仿壁虎机器人的研制过程中, 壁虎机器人脚掌和脚趾的设计是关键技术之一. 2005年Carnegie Mellon大学研发出仿壁虎机器人“Geckobot”的脚由8片合成橡胶弹性体组成, 能够在85°斜坡上爬行<sup>[1]</sup>. 随后Stanford大学研制的仿壁虎机器人Stickybot又进了一步, 机器人脚与大壁虎脚相类似, 分为四趾并覆有人造刚毛与接触面实现黏附和脱附, 可在建筑物垂直的玻璃表面上攀爬<sup>[2]</sup>. 目前我们研制的仿壁虎机器人, 在机器人脚的结构设计和构建、运动控制系统的开发和检测等方面做了大量的研究工作<sup>[3-7]</sup>, 正在开展壁虎脚运动的精细调控和界面信息感受的研究工作.

大壁虎高超的攀爬能力和运动协调能力一直是科研人员重点的研究对象. 美国Autumn等人利用MEMS技术首次测量了单根壁虎刚毛的黏附力, 并

得出壁虎刚毛的吸附作用原理是Van der Waals力<sup>[8,9]</sup>. Zaaf等人研究了习惯在地面上运动和在墙壁上爬行的不同种类大壁虎的肌肉组织和骨骼系统的差异<sup>[10-12]</sup>. Autumn等人<sup>[13]</sup>研究了壁虎垂直爬行时的动力学问题. 李宏凯等人<sup>[14]</sup>研究了大壁虎在垂直面和水平面上小跑和行走时的前后肢关节角度的变化. 丁光、陈振昆解剖研究了大壁虎的附肢肌<sup>[15]</sup>. 我们和刘晓燕进一步对大壁虎附肢肌做了定量测量<sup>[16]</sup>. 前期我们完成了通过外周神经调控大壁虎脚掌运动的研究, 发现大壁虎脚趾的运动主要有外翻、扭动和内收三种模式, 分别对应大壁虎脚掌的脱附、移动和黏附. 当大壁虎与环境界面相接触时, 大壁虎通过调控其脚趾的运动, 实现外翻-扭动-内收的运动顺序, 动作和谐连贯<sup>[17]</sup>. 最近我们在利用高速摄像对大壁虎的运动形态做进一步观测时, 发现大壁虎同一只脚5个脚趾的黏附或脱附并不总是同时进行的, 有时存在先后次第的差别; 另外, 大壁虎在负表面上(即表面的法线方向为负, 如天花板)爬行时, 前、后脚的运动模式有时也不尽相同. 因此, 深入剖析大壁虎脚趾的运动模式和神经支配, 不仅有助于了解大壁虎运动的机理, 而且为仿大壁虎机器人, 以及其他4足和多足机器人脚掌(趾)结构和运动控制系统的设计提供

**引用格式:** 郭策, 蔡雷, 谢合瑞, 等. 大壁虎脚趾运动和感觉的分区分级调控. 科学通报, 2009, 54(7): 959-965

Guo C, Cai L, Xie H R, et al. The divisional and hierarchical innervations of G. gecko's toes to motion and reception. Chinese Sci Bull, 2009, 54, doi: 10.1007/s11434-009-0188-1

新的信息和理念.

## 1 材料和方法

( ) 材料. 6 只雄性成年大壁虎(*G. gecko*), 平均体重( $86.7 \pm 13.9$ ) g, 平均体长(S-V)( $165.3 \pm 4.6$ ) mm, 均购自广西贵港, 并在实验室习服半年以上.

( ) 方法. 整体运动行为的观测: 利用 Mikrotron MC1311 高速摄像系统(250 帧/s)分别记录大壁虎在正表面(表面的法线方向为正, 如地面)、零表面(表面的法线方向为水平, 如墙面)和负表面(表面的法线方向为负, 如天花板)的运动形态.

脚趾运动神经支配的观测: 大壁虎腹腔注射戊巴比妥钠(30 mg/kg)进行麻醉, 在 Leica-MZ95 体视显微镜下解剖, 分离大壁虎支配前、后肢和脚趾运动的神经, 并用 Motic Images advanced 3.1 系统进行观测、神经定位及拍照.

利用双极程控制刺激器 YC-2-S(中国成都仪器厂)刺激所分离的神经, 观测其与脚趾运动模式的关系. 电刺激的参数设定如下: 串单刺激, 脉冲数 20, 间隔 20 ms、延时 1 ms、串刺激间隔 1 min, 每个单刺激的波宽为 1 ms、幅度 0.05~0.8 V 连续可调, 以阈刺激时的电压幅值来显示神经-肌肉耦联的兴奋性. 刺激和记录用电极利用注射器针头和两根直径 100  $\mu$ m, 尖端间距 130  $\mu$ m, 外涂绝缘层的镍铬不锈钢丝(成都仪器厂提供)制成(图 1).

脚趾感觉传入信息的记录: 利用多通道生理信号采集处理系统 RM6240BD(中国成都仪器厂, 简称 RM6240BD 系统)记录脚趾神经传入放电活动. 放大器参数: 时间常数为 0.01, 高频滤波 3 kHz.



图 1 自制的刺激和记录电极  
白色部分表示去除绝缘材料

## 2 结果

### 2.1 大壁虎脚趾运动的两种模式

大壁虎脚趾的运动主要有外翻、扭动和内收 3 种形式, 分别对应大壁虎脚掌的脱附、移动和黏附. 一般情况下, 大壁虎脚趾的运动顺序是“外翻-扭动-内收”, 动作和谐连贯, 我们称之为“固有型”; 最近我们发现, 大壁虎在负表面(天花板)上爬行时, 前、后脚的运动模式有时不尽相同, 10 只被观测的大壁虎中有 5 只动物的前脚运动模式是“内抬-扭动”, 其中“内抬”表现为前臂抬起, 带动脚趾从掌心到趾端逐渐上抬来完成脱附和随后的扭动, 明显缺乏脚趾“外翻”行为; 而后脚没有此行为发生(图 2). 因为此运动模式不发生在地面和墙面的爬行过程中, 只在天花板上爬行, 动物身体快要下坠时才发生, 故称之为“应急型”.

### 2.2 大壁虎前、后脚的神经分布

解剖大壁虎外周神经, 得到控制大壁虎前、后肢和脚趾运动的神经分布, 如图 3 所示, 大壁虎的 5 个脚趾分别命名为 T1, T2, T3, T4 和 T5, 其中趾 I(T1)的尖端没有爪, 易于分辨.

大壁虎前肢小腿有 4 根神经. 在没有文献和前期工作可参考的情况下, 我们借鉴人体和哺乳动物神经系统解剖学, 分别命名为正中神经、T1 趾侧掌中神经、掌中神经和尺神经<sup>[18,19]</sup>, 其中正中神经沿大壁虎前臂的正中向末端走行, 在相当于腕部处分为两支, 一支走行至背侧面; 另一支走行至脚掌的腹面, 再分两支: T1 趾侧掌中神经和掌中神经, 前者沿 T1 趾侧走行, 主要支配 T1 和 T2 的脚趾屈肌; 后者沿掌中走行, 主要支配 T2 和 T3 的脚趾屈肌; 尺神经沿 T5 趾侧走行, 主要支配 T4 和 T5 的脚趾屈肌. 如图 3 Fv 所示. 前肢小腿背侧神经主要有沿 T5 趾走行的桡神经深支, 沿 T1 趾走行的桡神经浅支, 分布如图 3 Fd 所示.

大壁虎后肢小腿主要有胫神经和腓肠神经. 其中, 沿 T1 趾走行的胫神经在足底部分为两支: 足底内侧神经和足底外侧神经, 前者沿 T1 趾侧发出, 后者位于后脚掌腹面的正中走行, 如图 3 Hv 所示. 后肢小腿的背侧主要有腓深神经、腓浅神经和足背外侧皮神经, 它们分别沿 T1 趾侧、正中部位和 T5 趾侧走行, 支配 T1 ~ T3, T2 ~ T5 和 T5 趾的脚趾伸肌产生外翻运动, 如图 3 Hd 所示.

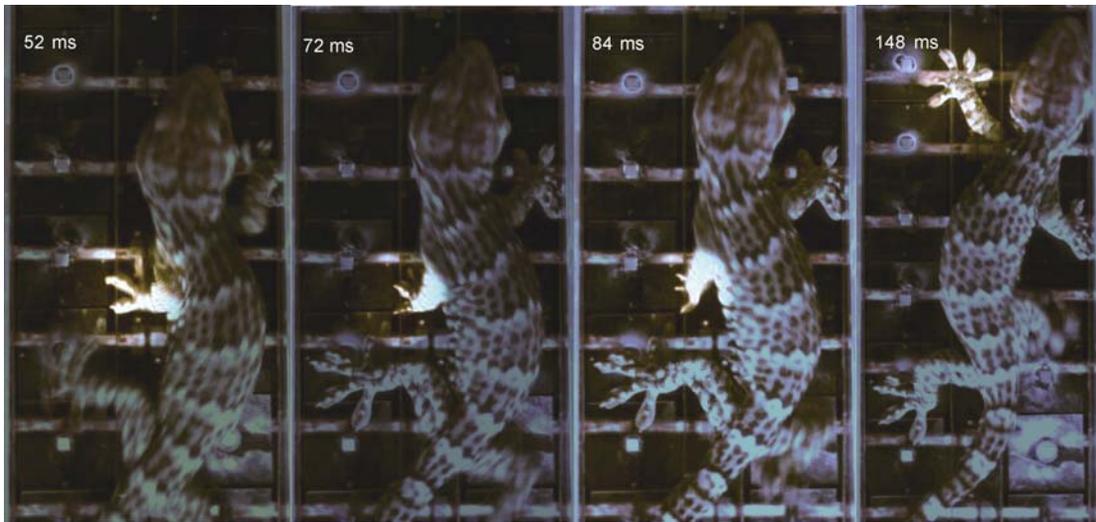


图2 大壁虎在天花板上的运动状态

选图为高速摄像(250 帧/s)的部分片段, 图中光圈显示大壁虎左前脚的“应急型”运动模式-没有外翻的脱附过程

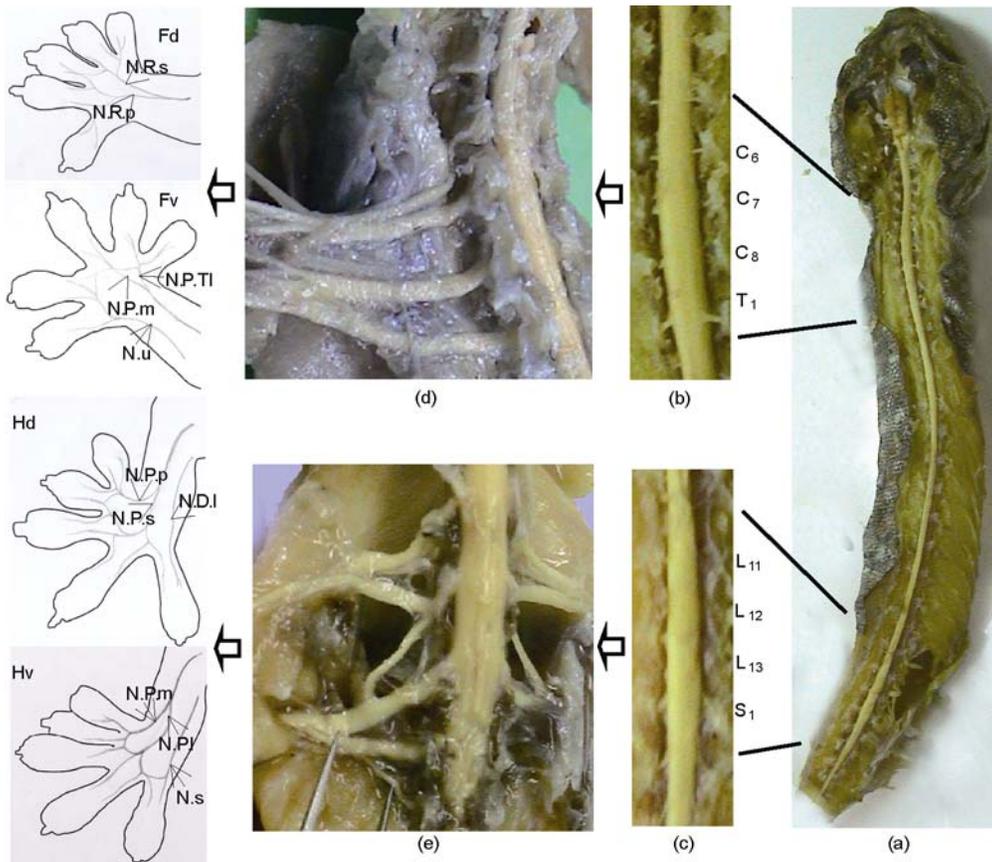


图3 大壁虎前、后脚的神经分布

(a) 大壁虎脑和脊髓; (b) 脊髓的颈膨大; (c) 脊髓的腰膨大; (d) 前肢神经干; (e) 后肢神经干。Fd 为前脚趾面神经分布, 其中 N. R. s 为桡神经浅支; N. R. p 为桡神经深支; Fv 为前脚掌面神经分布, 其中 N. P. TI 为 趾侧掌中神经; N. P. m 为掌中神经; N. u 为尺神经; Hd 为后脚趾面神经分布, 其中 N. P. p 为腓深神经; N. D. I 为足背外侧皮神经; N. P. s 为腓浅神经; Hv 为后脚掌面神经分布, 其中 N. P. m 为足底内侧神经; N. P. I 为足底外侧神经; N. s 为腓肠神经

2.3 大壁虎前、后脚运动的神经支配

为揭示大壁虎前、后脚掌和脚趾运动的神经支配, 实验中分别刺激所分离的神经, 观测神经与脚趾运动模式的关系, 结果见表 1 及表 2.

表 1 和表 2 的结果表明: ( ) 足腹(掌面)的神经与屈肌的兴奋-收缩耦联过程完成着脚趾内收, 即控制脚掌的黏附运动模式; 足背(蹠面)的神经与伸肌的兴奋-收缩耦联过程完成脚趾外翻, 即控制脚掌的脱附运动模式. 而我们前期观测到的脚掌扭动的运动模式应该是被前臂和小腿的神经, 例如正中神经和胫神经所支配. ( ) 脚趾的黏附和脱附是被分区调控的. 依其神经支配, 脚趾的运动行为, 无论是黏附, 还是脱附, 一般地被分为 T1~T3 和 T4~T5 两组; ( ) 趾的黏附和趾的脱附是被分级调控的, 它们的兴奋性有不同, 黏附运动模式的兴奋性比较高, 脱附的兴奋性比较低.

2.4 大壁虎前、后脚感觉信息的传入

为模拟大壁虎运动过程中脚趾受力的信息传入, 在麻醉状态下使用软细毛刷分别刺激大壁虎 T1~T5 趾的脚底毛, 每只脚趾重复刺激 3 次, 同时用 RM6240BD 系统记录大壁虎脚趾神经的传入冲动.

实验结果表明, 大壁虎脚趾受力的信息同样是分区传入的. 其中前脚趾的信息传入: T1 趾侧掌中神经传递 T1, T2 和 T3 趾的信息; 尺神经则传递 T4 和 T5 趾的信息; 后脚趾的信息传入: 足底内侧神经传递 T1, T2 和 T3 趾的信息; 腓肠神经传递 T3, T4 和 T5 趾受力的信息, 其中 T3 趾的信息经这两支神经传入, 但以腓肠神经传入为主(图 4).

当用毛刷以恒定压力, 沿两个不同方向, 即从趾尖到趾根或从趾根到趾尖, 分别刺激大壁虎 T1~T5 趾的脚底毛时, 发现神经传入放电的幅度有不同: 从趾尖到趾根方向刺激时, 壁虎的传入放电幅度由弱

表 1 大壁虎前脚的运动神经支配(n 3)<sup>a)</sup>

神经	刺激强度/V	参与的肌肉	运动模式	活动强度(由高至低)	图示
T1 趾侧掌中神经	0.3±0.1	T1~T3 趾屈肌	内收	T1-T2-T3	
掌中神经	0.65±0.15	T2~T3 趾屈肌	内收	T3-T2	
尺神经	0.25±0.05	T4~T5 趾屈肌	内收	T5-T4	
桡神经浅支	0.3±0.1	T1~T3 趾伸肌	外翻	T1-T2-T3	
桡神经深支	0.25±0.05	T3~T5 趾伸肌	外翻	T5-T4-T3	

a) 根据我们观测到的结果和文献[16], 大壁虎脚趾屈肌包括趾长屈肌、趾短屈肌和骨间肌等脚掌腹面肌. 大壁虎脚趾伸肌包括趾长伸肌、趾短伸肌和骨间背侧肌等足背肌

表 2 大壁虎后脚的运动神经支配(n 3)<sup>a)</sup>

神经	刺激强度/V	参与的肌肉	运动模式	活动强度(由高至低)	图示
腓肠神经	0.2±0.1	T4~T5 趾屈肌	内收	T5-T4	
足底内侧神经	0.08±0.03	T1~T3 趾屈肌	内收	T1-T2-T3	
足底外侧神经	0.17±0.08	T3~T5 趾屈肌	内收	T3-T4-T5	
足背外侧皮神经	0.15±0.05	T5 趾伸肌	外翻	T5	
腓深神经	0.25±0.15	T1~T3 趾伸肌	外翻	T1-T2-T3	
腓浅神经	0.15±0.05	T2~T5 趾伸肌	外翻	T5-T4-T3-T2	

a) 说明同表 1

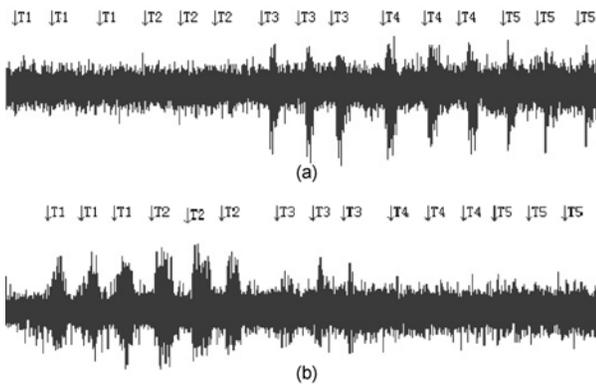


图4 壁虎后脚趾接触界面信息的传入

(a) 分别刺激 T1 ~ T5 趾脚底毛, 腓肠神经的传入放电活动;  
 (b) 分别刺激 T1 ~ T5 趾脚底毛, 足底内侧神经的传入放电活动

逐渐变强, 呈逐渐增强模式, 摩擦趾根部的放电幅度比摩擦趾尖部的高; 当刺激方向改为从趾根到趾尖时, 传入放电的幅度由强逐渐减弱, 呈逐渐减弱模式, 摩擦趾根部的放电幅度仍然比摩擦趾尖部的高。结果表明, 放电的幅度与摩擦的方向无关, 因摩擦部位的不同而异。依据神经生物学理论<sup>[20]</sup>, 神经动作电位的幅度与神经纤维的直径成正相关, 感受器细胞越小, 纤维的直径越细, 传入冲动的幅度越低, 兴奋性越高, 反之亦然。通过恒定压力而方向不同的摩擦实验证实, 大壁虎脚底受力的感觉信息也是分级感受和传入的, 其中趾尖部传入神经纤维的直径较细, 感觉最敏感, 保持低幅的紧张性放电活动; 趾的中部次之, 而趾根处的传入神经纤维直径较粗, 感觉敏感性最低, 受力达到一定程度时才被激活, 发出的神经冲动幅值较高。

### 3 讨论

#### 3.1 大壁虎脚趾运动的两种模式

高速摄像的结果揭示了大壁虎在负表面爬行时, 前、后脚的运动模式存在差异。通常情况下大壁虎的脚趾采用固有型运动模式, 即脚掌的脱附完全由外翻完成, 刚毛群的脱附方向从脚趾端部始到脚趾根部和掌心止。但有时前脚的运动为应急型, 没有外翻动作, 掌心直接上抬然后扭动。与固有型相比, 应急型的脱附过程方向完全相反, 即刚毛群从脚趾根部到脚趾端部逐步发生脱附。这样的方向导致黏附力在脱附过程中逐渐减小, 最具黏附作用的趾端部最后脱开, 从而有效地延长了大壁虎在天花板上的黏附时间, 这对于倒悬在天花板上的大壁虎是至关重

要的; 没有外翻环节, 减少下一步脚趾黏附的过程和时间, 避免了滑脱和身体失去平衡; 本实验证实, 脚趾的神经主要控制其内收(黏附)和外翻(脱附), 而扭动主要由腿部肌肉完成。与固有型运动模式相比, 应急型模式需要腿部肌肉过早地参与和协调运动, 这会消耗更多的能量。为了应急, 耗能是必须的。大壁虎的两种运动模式只发生在前脚, 可知, 前脚在大壁虎的运动中承担更多的功能。实验中发现, 后脚的运动轨迹只是重复前脚的足迹, 而前脚需要承担对环境界面的“探究”, 比后脚具更多的风险。尽管大壁虎前、后脚的神经支配有一定的差异, 但它们与这两种运动模式的关系, 即它们是如何调控这两种运动模式的尚不清楚, 有待进一步研究。目前四足或多足机器人的前、后脚的结构和控制系统相互雷同。大壁虎前脚的两种运动模式为四足或多足机器人前、后脚结构和控制原理的设计提供了重要启示。

#### 3.2 大壁虎脚趾运动和感觉的分区调控

大壁虎脚掌的外翻和内收运动不是“全或无”的; 同样对界面受力信息的反馈也不是“全或无”, 它们都是分区调控的; 这是神经分区支配的结果。通常脚趾的运动和感觉分为两组, 近脚 T1 趾侧的神经支配 T1 ~ T3 趾运动, 并传入其感觉; 近脚 T5 趾侧的神经支配 T4 和 T5 趾运动, 并传入其感觉。从结构与功能的角度看, 运动和感觉神经纤维走行在一起最合理。高速摄像的结果显示, 大壁虎脚趾运动常常出现一定次序的分组行为。例如, 后脚趾外翻时 T4 和 T5 趾在先, 而 T1 ~ T3 趾在后; 内收时则次序刚好相反, T1 ~ T3 趾在先, 而 T4 和 T5 趾在后(图 5)。这种运动模式是有利于黏附的, 保障了大壁虎身体平衡和安全。同时也启示, T1 ~ T3 趾在提供黏附力和驱动力方面扮演主要角色; 而 T4 和 T5 趾则在方向、力度和速度的变换过程中起辅助作用。在需要时, 两组之间可有一定程度的重叠, 例如, T3 趾的感觉信息可以从腓肠神经和足底内侧神经传入, 前主后次; 加大刺激时, 会出现 T1 ~ T4 趾或 T3 ~ T5 趾联动。这是由于两支神经之间存在细的神经交通支。

分区调控是大壁虎调控脚趾运动, 使其与环境变化相适应的基础。分区调控使大壁虎对运动行为的调控更快速、更精细、更和谐。目前, 四足或多足机器人脚的结构和控制系统均是“全或无”的设计理念, 这不利于机器人行为动作的精细调控和对环境

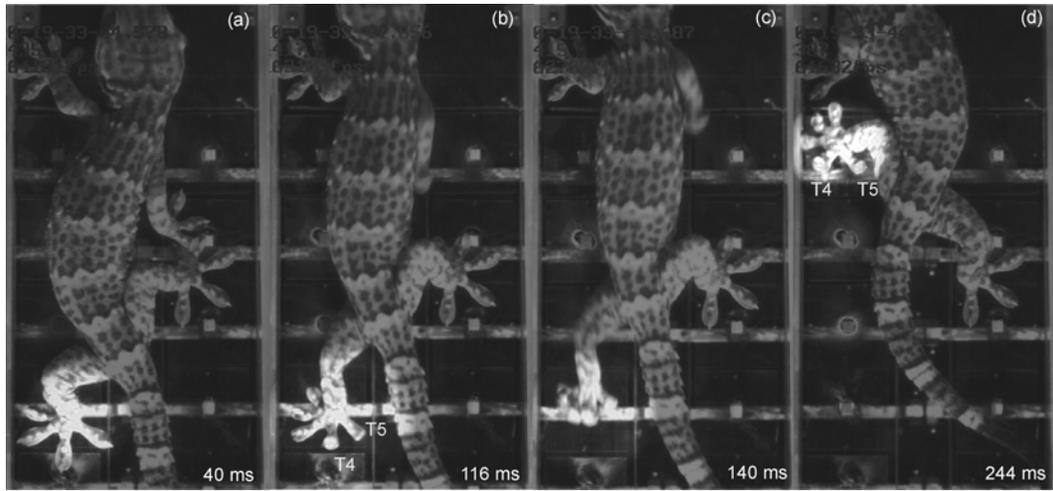


图5 大壁虎左后脚趾分组、有次序地进行脱附和黏附的运动过程

选图为高速摄像(250 帧/s)的部分片断。脱附时 T4 和 T5 趾先外翻, T1 ~ T3 趾后外翻, 见图(b); 黏附时, T1 ~ T3 趾先黏附, T4 ~ T5 趾后黏附, 见图(d)

的适应。大壁虎脚趾运动分区调控模式为四足或多足机器人脚的研发提供了重要启示。

### 3.3 大壁虎脚趾运动和感觉的分级调控

大壁虎脚趾运动的分级调控表现为, 刺激大壁虎脚趾黏附的阈值明显低于使其脱附的阈值, 即相对脚掌外翻脱附而言, 大壁虎脚更易内收实现黏附, 启动黏附过程所消耗的能量明显低于脱附所需要的, 这与大壁虎的生活习性相适应。通常情况下, 大壁虎吸附在山崖石壁上休息, 只有感受到危险或觅食时, 才会与接触面脱开, 爬行。与脱附相比, 黏附是大壁虎更经常和更重要的行为。因此, 降低能耗更有利于动物的生存和运动。实验中高位刺激大壁虎前肢正中神经干(刺激点位于前臂)的结果也证实了这一点(表3)。

表3表明, 刺激大壁虎肢体的高位神经干会诱发出黏附和脱附两种运动模式; 使大壁虎脚趾黏附的神经兴奋性明显高于使其脚趾脱附的神经兴奋性; 实验还表明, 当增大刺激强度, 脚掌发生外翻, 并且大壁虎脚一旦外翻后, 即使降低刺激强度, 也不再内收(除非停止刺激, 休息一段时间, 例如 5 min)。这说明大壁虎脚掌的外翻需要消耗更多的能量, 但“维持”这种运动行为却是低能耗的。此外, 大壁虎脚的内收与外翻是相互拮抗的关系。这种调控模式不仅使调节变得简捷易行, 而且降低能耗。这是动物长

表3 高位刺激大壁虎正中神经干产生的两种运动模式 (n = 5)<sup>a)</sup>

刺激强度	内收	外翻
0.22 ± 0.02	+	-
0.26 ± 0.02	+	-
0.30 ± 0.02	++	-
0.34 ± 0.02	++	-
0.38 ± 0.02	+++	-
0.40 ± 0.02	-	+
0.42 ± 0.02	-	+++
0.40 ± 0.02	-	++
0.36 ± 0.02	-	+
0.30 ± 0.02	-	+

a) “-”无行为, “+”有行为, “++”行为较明显, “+++”行为显著

期进化的结果, 也为机器人脚掌的研发提供另一个启迪。

大壁虎脚趾感觉的分级调控表现为, 壁虎脚趾不同部位的感觉敏感性不同: 趾尖感觉最敏感, 动作电位幅度低, 调控作用小; 趾中部的则次之; 而趾根和脚心处感觉不灵敏, 受力达到一定强度时才可被激活, 但其动作电位的幅度高, 调控作用也大。这与壁虎运动的精细调控相适应。运动状态的反馈也是机器人控制体系中的重要一环。如果仿壁虎脚来配置机器人用于运动信息反馈的换能器, 将会改善机器人运动的稳定性、操作的可靠性和行为的和谐性。

## 参考文献

- 1 Unver O, Uneri A, Aydemir A, et al. Geckobot: A gecko inspired climbing robot using elastomer adhesives. In: Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006 May 15—19, Orlando, Florida, USA. IEEE, 2006, 2329—2335
- 2 Santos D, Heyneman B, Kim S, et al. Gecko-inspired climbing behaviors on vertical and overhanging surfaces. In: Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2008 May 19-23, Pasadena, CA, USA. IEEE, 2008, 1125—1131
- 3 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
- 4 李宏凯, 孙久荣, 戴振东. 动物运动指令的中枢模式发生器对机器人运动控制的启示. 机器人, 2008, 37(3): 279—288
- 5 Dai Z D, Sun J R. Research progress in gecko locomotion and biomimetic gecko-robots. Progress in Natural Science, 2007, 11(1): 1—5
- 6 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
- 7 吉爱红, 戴振东, 颜化冰, 等. 动物运动力学测试系统. 传感器与微系统, 2006, 25(12): 59—61
- 8 Autumn K, Liang Y A, Hsieh S T, et al. Adhesive force of a single gecko foot-hair. Nature, 2000, 405: 681—685[[doi](#)]
- 9 Autumn K, Sitti M, Liang Y A, et al. Evidence for van der Waals adhesion in gecko setae. Proc Nat Acad Sci USA, 2002, 99(19): 12252—12256[[doi](#)]
- 10 Zaaf A, Herrel A, Aerts P, et al. Morphology and morphometrics of the appendicular musculature in geckoes (Lepidosauria) with different locomotor habits. Zoomorphology, 1999, 119(1): 9—22[[doi](#)]
- 11 Zaaf A, van Damme R. Limb proportions in climbing and ground-dwelling geckos (Lepidpsauria, Gekkonidae): A phylogenetically informed analysis. Zoomorphology, 2001, 121(1): 45—53[[doi](#)]
- 12 Zaaf A, van Damme R, Herrel A, et al. Spatio-temporal gait characteristics of level and vertical locomotion in a ground-dwelling and a climbing gecko. J Experimental Biology, 2001, 204(7): 1233—1246
- 13 Autumn K, Hsieh S T, Dudek D M, et al. Dynamics of geckos running vertically. Am Zool, 1998, 38(5): 84A
- 14 李宏凯, 戴振东, 石爱菊, 等. 大壁虎在垂直面和水平面上小跑和行走的关节角度观测. 科学通报, 2008, 53(22): 2697—2703
- 15 丁光, 陈振昆. 大壁虎(Gekko gecko)附肢肌的解剖. 云南农业大学学报, 1995, 10(1): 12—17
- 16 刘晓燕, 戴振东, 曾小龙, 等. 大壁虎附肢肌的定量研究. 解剖学研究, 2005, 27(4): 292—294, 301
- 17 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
- 18 杨安峰, 程红. 脊椎动物比较解剖学. 北京: 北京大学出版社, 1999
- 19 邹锦慧, 刘树元. 人体解剖学. 北京: 科学出版社, 2005
- 20 韩继生. 神经科学原理. 第2版. 北京: 北京医科大学出版社, 1999