

虎纹捕鸟蛛运动反力测试^{*}

王周义^{1, 2} 王金童^{1, 2} 吉爱红¹ 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 动物运动反力的测定将揭示动物运动过程的力学规律、启发仿生机器人控制设计。用三维力传感器测定虎纹捕鸟蛛水平运动时的三维运动反力, 高速摄像分析虎纹捕鸟蛛各步足的功能。结果表明蜘蛛前足支撑相和摆动相不连续, 运动方向受到的力始终和运动方向相反, 起探测和辅助支撑作用。后足受到的力最大, 方向始终和运动方向相同, 起主要驱动作用。中间两对足受到的力在支撑相前段与运动方向相反, 在支撑相后段与运动方向相同, 但侧向力最大, 对稳定运动贡献较大。运动中, 法向反力显著大于侧向和运动方向的反力, 各步足的支撑角变化不大, 均在 60° — 70° 间。上述结果表明了蜘蛛运动中各步足力学功能的差异, 为启发机器人结构设计、步态规划和控制规律提供了仿生依据。

关键词 三维运动反力 虎纹捕鸟蛛 三维力传感器 运动步态 仿生机器人

运动是动物的基本特征, 动物和环境间的作用反力是认识其运动行为的重要线索。运动反力的测试是动物运动力学研究的一个主要方面。1938年 Manter 研制了杠杆式测力装置, 并测定了猫的三维运动反力^[1]。Full 等对各种动物的运动反力进行了广泛的研究^[2]。1991年发现六足动物的运动反力与两足、四足、八足(蟹)动物运动反力有相近的特点^[3]。1995年测定了蟑螂的运动反力, 发现蟑螂在转向运动时的侧向反力可达直线运动时侧向力的8倍^[4]。2003年对蚂蚁在地面和墙面上运动行为研究时, 测量了蚂蚁在地面和壁面上的运动粘附力^[5, 6]。2005年 Chen 和 Autumn 等用单个传感器测定了壁虎在垂直面和水平面上的运动反力^[7, 8]。在蜘蛛运动行为方面, 20世纪80年代末, Shultz 比较分析了两种蜘蛛在地面与水面上的步态差异^[9]。Bramhall 考察了11种蜘蛛的心跳与运动之间的关系^[10]。2003年 Shapiro 等提出 PCG 算法, 用以分析仿蜘蛛机器人在平面隧道内的运动^[11]。Ohnishi 于2005年研制出了仿蜘蛛的八步足机器人, 探讨了新的运动

控制方法^[12]。这些研究揭示了蜘蛛运动行为的规律, 但尚未涉及蜘蛛运动过程中足与地面力的相互作用。本文运用我所研制的三维力传感器^[13]测定虎纹捕鸟蛛在水平面直线运动时的三维运动反力, 并分析其运动行为, 为仿蜘蛛机器人的设计提供步态规划和控制设计的动物学信息。

1 材料和实验方法

1.1 材料和实验设备

虎纹捕鸟蛛 (*Ornithoctonus huwena*) 是一种大型原蛛^[14], 该古老的物种对自然环境具有极强的适应性。实验用虎纹捕鸟蛛4只, 产自中国广西(体重分别为2.64, 2.85, 4.06, 6.35g)。蜘蛛用猪肝和水等单独饲养于笼子中, 处于自然光照, 温度 $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 。为表述方便定义其左右侧四对步足分别为 L I, L II, L III, L IV(左侧)和 R I, R II, R III, R IV(右侧)(图1)。

实验时, 用有机玻璃制成的透明狭长通道限制

2009-01-18 收稿, 2009-03-10 收修改稿

* 国家自然科学基金(批准号: 60535020, 30770285)和国家“八六三”计划(批准号: 2007AA04Z201)资助项目

** 通信作者, E-mail: zddai@nuaa.edu.cn

©1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

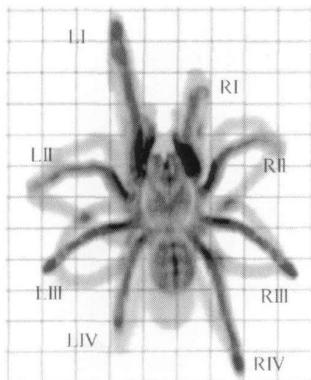


图 1 虎纹捕鸟蛛及步足定义

蜘蛛的运动, 使其保持直线运动并便于摄像记录运动图像. 通道上安装三维应变式小量程力传感器^[13], 测试虎纹捕鸟蛛在水平面运动时的三维运动反力(如图 2(a)), 并且传感器承力片平面与通道的底部在同一平面上. 蜘蛛运动行为用高速摄像机记录(100fps), 以便分析判断是哪个步足的足端作用于传感器的承力片上.

1.2 数据处理

1.2.1 数据转换 蜘蛛足端与传感器的承力片作用时, 身体和传感器的相对位置是变化的, 需将测得的运动反力从传感器坐标系($X_1 Y_1 Z_1$)转化到蜘蛛的在体坐标系($X_2 Y_2 Z_2$). 传感器测得的三维运

动反力($F_X F_Y F_Z$)和在体坐标系中的蜘蛛所受反力($F_L F_F F_N$)之间存在下列关系(图 2(b)).

$$\begin{bmatrix} F_L \\ F_F \\ F_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_X \\ F_Y \\ F_Z \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 θ 为传感器坐标系和在体坐标系的瞬时夹角(逆时针为正, 如图 2(b)).

蜘蛛运动驱动角 α 以及支撑角 β (图 2(c))由(2)式给出:

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \arctan(F_L/F_F), \alpha \in (0, 180^\circ) \\ \beta &= \arctan(F_N/\sqrt{F_L^2+F_F^2}), \beta \in (0, 90^\circ) \end{aligned} \right\} (2)$$

1.2.2 数据提取 根据高速摄像获取的图片资料信息, 判定蜘蛛足端与传感器的接触情况, 截取传感器测得的力数据, 经过数据转换后, 读取整个接触过程中足端接触反力在三个分力方向的峰值 F_L^M, F_F^M, F_N^M ; 足端切向力峰值 $F_{LF}^M (F_{LF} = \sqrt{F_L^2+F_F^2})$ 以及此时所对应的驱动角 α ; 接触反力的最大值 $F_T^M (F_T = \sqrt{F_L^2+F_F^2+F_N^2})$ 以及此时所对应的支撑角 β .

1.2.3 数据统计 考虑到动物运动中的运动反力与动物体重、应激状态、运动行为、环境条件等诸多因素相关, 其运动规律和力学规律必须借助统计

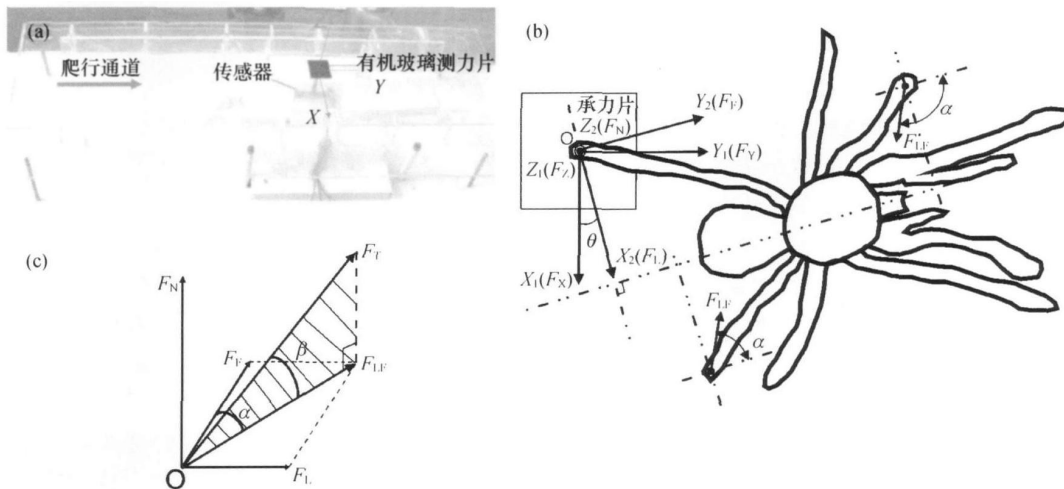


图 2 蜘蛛运动反力测定系统及反力的转化坐标关系

(a) 蜘蛛三维运动反力测试系统照片; (b) 蜘蛛运动反力传感器坐标与蜘蛛载体坐标系间的转换及驱动角 α 的定义; (c) 蜘蛛载体坐标系的运动反力及驱动角 α 和支撑角 β

学的工具进行分析. 本文对不同组别数据的差异性采用 T 检验的方法进行检验, 通过计算概率 $P > 0.05$, 则两组数据无显著性差异, 反之则存在差异; 对于两组或多组数据的线性回归采用方差分析 (ANOVA) 检验其显著性, $P < 0.05$ 则线性显著, 反之则认为没有显著线性关系. 均值和标准偏差的计算分析使用软件 SPSS (SPSS Inc., Chicago, USA) 计算. 本文结果中描述性统计值显示的是平均值 \pm 标准偏差 (mean \pm s. d.).

2 结果

由于蜘蛛身体具有对称性, 将左右两侧对应步足的反力做统计检验, 发现虎纹捕鸟蛛运动时, 左右两侧对应步足的运动反力没有显著性差异 ($P > 0.05$). 因此后续分析将左右两侧对应步足上的运动反力合并分析. 蜘蛛在水平直线运动状态下, 步足运动反力三个方向的峰值 F_L^M , F_F^M , F_N^M ; 足端切向力峰值 F_{LF}^M 以及此时所对应的驱动角 α ; 接触反力的最大值 F^M 以及此时所对应的支撑角 β 的统计值 (平均值) 如图 3 所示.

侧向力 F_L : 蜘蛛左右步足所受侧向力均指向身体中线, 即左侧步足产生向右推起蜘蛛的侧向力, 右侧步足产生向左推起蜘蛛的侧向力, 维持匍匐运动姿态 (图 3(a)). 其中足 III 产生的侧向力最大 ($0.17 \pm 0.08 \text{ mN} \cdot \text{g}^{-1}$), 与其他步足有显著性差异, 表明足 II 对于保持运动姿态和侧向稳定贡献最大; 足 I 的侧向力最小 ($0.08 \pm 0.04 \text{ mN} \cdot \text{g}^{-1}$); 足 II 和足 IV 分别为 $0.11 \pm 0.06 \text{ mN} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $0.11 \pm 0.04 \text{ mN} \cdot \text{g}^{-1}$.

驱动力 F_F : 蜘蛛各个步足产生的驱动力有着显著的不同 (图 3(b)). 足 IV 产生的驱动力最大 ($0.13 \pm 0.03 \text{ mN} \cdot \text{g}^{-1}$), 推动身体向前运动; 数值上与其他各步足有显著性差异, 说明运动过程中蜘蛛向前运动的驱动力, 主要由足 IV 提供. 运动中足 I 始终产生负驱动力 ($-0.04 \pm 0.02 \text{ mN} \cdot \text{g}^{-1}$), 减小质心速度, 提高运动的平稳性. 在运动周期的前段, 足 II、II 的驱动力与运动方向相反 (足 II: $-0.09 \pm 0.05 \text{ mN} \cdot \text{g}^{-1}$, 足 III: $-0.08 \pm 0.01 \text{ mN} \cdot \text{g}^{-1}$), 缓和运动; 运动周期的后段 足 II 和足 II 产生正驱动力 (足 II: $0.06 \pm 0.03 \text{ mN} \cdot \text{g}^{-1}$, 足 III: $0.07 \pm 0.04 \text{ mN} \cdot \text{g}^{-1}$), 辅助加速质心向前运动.

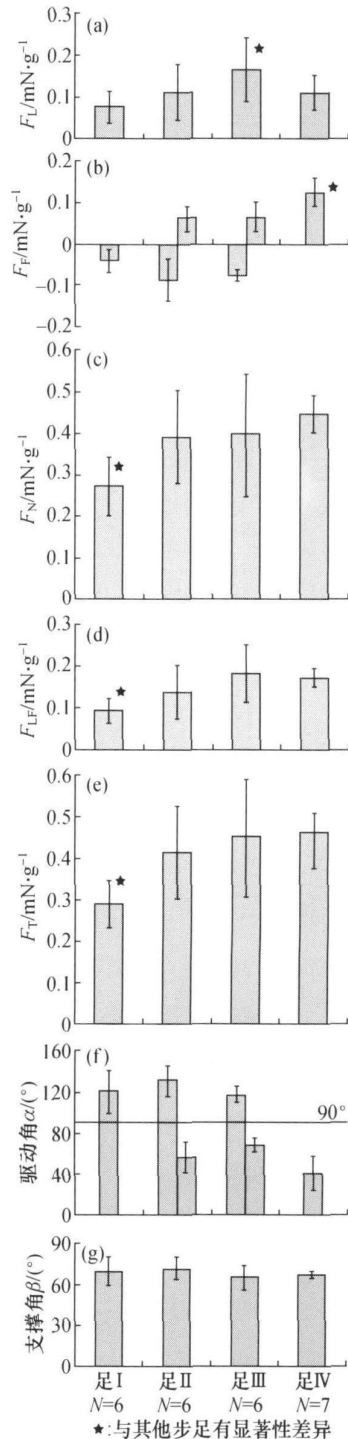


图 3 蜘蛛水平单腿地面反力平均值 (a) 侧向反作用力平均值; (b) 运动方向反作用力平均值; (c) 法向反作用力平均值; (d) 切向反作用力平均值; (e) 反作用合力平均值; (f) 驱动角平均值; (g) 支撑角平均值

法向力 F_N : 蜘蛛在水平面上运动时各步足均产生支撑体重的法向反力(正法向力), 不产生粘附力(负法向力)(图 3(c), 图 4). 足 I 产生的法向力最小($0.27 \pm 0.07 \text{ mN} \cdot \text{g}^{-1}$), 与其他各步足有显著性差异, 说明运动中身体的支撑, 足 I 不起主要作用; 足 IV 的法向力最大($0.41 \pm 0.04 \text{ mN} \cdot \text{g}^{-1}$); 足 II 和足 III 的法向力分别为 $0.39 \pm 0.11 \text{ mN} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $0.40 \pm 0.15 \text{ mN} \cdot \text{g}^{-1}$.

切向力 F_{LF} : 切向力反映蜘蛛在运动表面内的受力情况(图 3(d)). 足 I 产生的切向力($0.09 \pm 0.03 \text{ mN} \cdot \text{g}^{-1}$)最小, 与其他步足有显著性差异; 足 III 的切向力最大($0.18 \pm 0.07 \text{ mN} \cdot \text{g}^{-1}$); 足 II 和足 IV 的切向力分别为 $0.14 \pm 0.07 \text{ mN} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $0.17 \pm 0.02 \text{ mN} \cdot \text{g}^{-1}$.

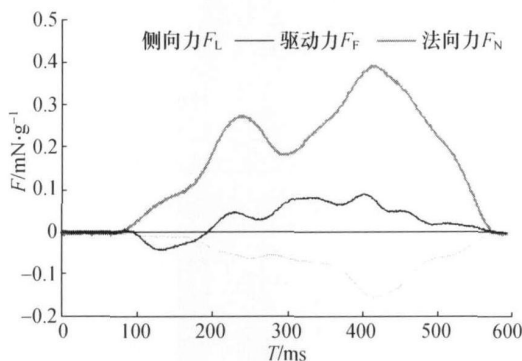


图 4 蜘蛛水平面爬行时足 II 反力曲线

合力 F_T : 蜘蛛在水平面运动中, 蜘蛛各步足受到的合力均指向质心方向, 维持运动姿态以及身体稳定性. 足 I 的 F_T ($0.29 \pm 0.06 \text{ mN} \cdot \text{g}^{-1}$)最小, 与其他步足有显著性差异, 表明在运动中足 I 不起主要作用; 足 IV 的合力($0.44 \pm 0.08 \text{ mN} \cdot \text{g}^{-1}$)最大; 足 II 和足 III 的合力分别为 $0.42 \pm 0.11 \text{ mN} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $0.43 \pm 0.14 \text{ mN} \cdot \text{g}^{-1}$ (图 3(e)).

驱动角 α : 足产生的驱动角 α 大于 90° ($120.43^\circ \pm 20.73^\circ$), 驱动力为负. 足 IV 的驱动角 α 小于 90° ($40.92^\circ \pm 16.33^\circ$), 驱动力始终为正值, 推动身体向前运动. 运动周期前段, 足 II、足 III 的 α 均大于 90° (足 II: $131.01^\circ \pm 14.88^\circ$, 足 III: $116.90^\circ \pm 8.08^\circ$), 驱动力为负值, 降低质心速度; 伴随身体前进, 足

II、足 III 的 α 变为锐角(足 II: $57.19^\circ \pm 15.17^\circ$, 足 III: $68.24^\circ \pm 6.82^\circ$), 驱动力变为正值, 驱动身体前进(图 3(f)). 可见足 IV 驱动效率最高, 驱动力也最大.

支撑角 β : 各步足之间的支撑角 β 无显著性差异(图 3(g)). 足 II 产生的 β 最大($71.60^\circ \pm 8.16^\circ$), 足 III 的 β 最小($64.70^\circ \pm 8.70^\circ$), 足 I 和足 IV 的 β 分别为 $69.93^\circ \pm 10.40^\circ$ 和 $67.00^\circ \pm 2.01^\circ$. 可见在支撑体重方面, 后面 3 对步足效率相近.

3 讨论

3.1 各步足在运动中的作用

虎纹捕鸟蛛是一种地上爬行蜘蛛, 其各步足的结构以及步足在替换过程中存在很大的区别, 故其在运动中发挥的作用也存在差异. 足 I 所受运动反力是最小的, 其驱动角 α 在 120.00° 左右, 支撑角 β 较大, 近似于 70.00° , 与其落地后逐步出现很大程度的卷曲相一致¹⁾; 摆动相时间远多于支撑相时间, 且左右两足没有重合时间¹⁾. 由此推断在运动中足 I 主要起缓冲和探测作用, 而在野外生存中足 I 和足 II 还用来捕食¹⁵⁾. 足 IV 的结构与足 I 的结构类似, 但运动中的作用存在很大差异, 其驱动角 α 在 40° 左右, 主要提供蜘蛛运动所需的驱动力 F_F , 且步足卷曲与伸展的方向与身体主轴方向夹角在 30° 左右¹⁾, 便于足 IV 对身体的驱动; 同时侧向力 F_L 和法向力 F_N 也较大, 支撑角 β 近似于 67.00° , 因此对运动姿态的保持以及身体的支撑起着重要的作用. 足 II 和足 III 的结构与步态参数比较接近, 在运动中的功能比较近似, 运动前期均产生负驱动力缓冲运动, 保持运动的平稳, 运动后期提供正驱动力, 其值仅约为足 IV 的 0.5, 对驱动身体起辅作用; 两者的法向力 F_N 大小相当, 对身体的支撑有着同等的作用. 同时也存在一些差别, 在保持运动姿态平稳方面, 足 II 的侧向力小于足 III 的侧向力, 足 II 的支撑角明显大于足 III 的支撑角, 表明运动中足 III 的展开距离比足 II 的展开距离大, 这与其步足在捕食中的作用有关¹⁵⁾.

3.2 不同动物步足的功能

经典质量弹簧模型¹⁶⁾, 从能量角度归纳地面有

1) 王金童等. 虎纹捕鸟蛛运动步态的测定及其对运动稳定性的影响. (待发表)

足动物运动的共性,但未区别不同运动姿态下,不同步足数目动物的各步足对运动的作用.步足数目和步足的功能之间的相互关系是值得研究的问题,从四足爬行动物到八足爬行动物,步足的功能存在差异和相似之处.

四足爬行动物壁虎^[8],前步足仅在每步开始的很短时间产生负驱动力;后步足既产生负驱动力又产生正驱动力,且正驱动力值是负驱动力的两倍,故其运动中前进的驱动主要是后步足输出.前步足起到缓冲作用,前后步足的法向力和侧向力大小相当,对身体的支撑和运动姿态的保持有着同等的作用(图 5(a)^[8]).

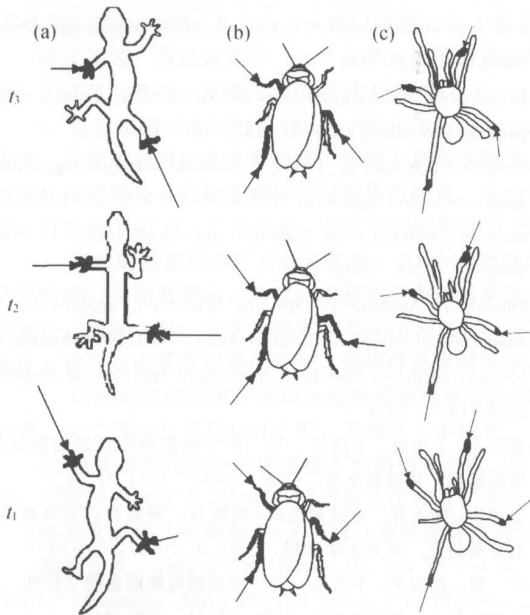


图 5 四、六、八步足爬行动物足端运动反力
(a) 壁虎; (b) 蟑螂; (c) 蜘蛛

六足昆虫蟑螂^[4],采用三角步态运动,三步足都产生了很大的侧向力,这些侧向力有助于蟑螂运动中的自我稳定^[4, 6, 8],保持运动姿态;前步足的法向力略小于其他步足;前步足降低质心速度,缓冲运动,后步足始终加速身体,提供正驱动力,中步足先阻碍运动后加速运动(图 5(b)^[8]).

通过对水平面平稳运动的八足动物虎纹捕鸟蛛各步足三维接触反力的测试发现,足 I 主要起缓冲的作用;足 II 和足 III 主要用于支撑身体,保持爬行运动姿态,并辅助驱动身体前进;前进的驱动力主

要由足 IV 提供(图 5(c)).

综上所述,快速平稳爬行的动物对步足有以下要求:(i)能够支撑身体,(ii)维持运动姿态,(iii)推进身体前进,(iv)保持运动平稳(缓冲).从四足爬行动物壁虎到八足爬行动物蜘蛛,不同数目步足的动物对于相同的运动要求,采取了不同的方式将其有效的分配到各个步足上(表 1,图 5).

蜘蛛、蟑螂、壁虎由于其生理结构的差异(两对中足——单对中足——无中足),从而导致运动要求的重新分配,中步足的作用是由后步足来承担,前步足只是继承了中步足对身体支撑的功能,三者相比较而言,八足蜘蛛运动中各步足的作用更类似于六足昆虫蟑螂(表 1).壁虎的四足,蟑螂的六足和蜘蛛的八足完成了相同的运动,可见壁虎和蟑螂单步足的重要性的功能都要强于蜘蛛,因而单个步足的强大功能增强了壁虎在水平面上的机动性^[8].另一方面,蜘蛛的四对步足实现了壁虎两对步足的运动,蜘蛛的单步足在重要性和功能方面要弱于壁虎,存在一定的冗余,但其稳定性好,且在代偿机制的作用下失去一只步足的蜘蛛仍然可以实现运动,蜘蛛的残肢代偿运动要好于壁虎或蟑螂.

表 1 爬行动物各步足在运动中的作用^{a)}

	蜘蛛	蟑螂	壁虎
支撑身体	II 步足, III 步足, IV 步足, I 步足(辅)	中足, 后足, 前足	前足, 后足
爬行姿态	I 步足, II 步足, III 步足, IV 步足	前足, 中足, 后足	前足, 后足
推进运动	IV 步足, II 步足(辅), III 步足(辅)	后足, 中足(辅)	后足
运动平稳	I 步足, II 步足(辅), III 步足(辅)	前足, 中足(辅)	前足, 后足(辅)

a) 表中的“(辅)”表示步足起辅助作用

4 运动反力的仿生意义

仿生机器人的运动能力、效率和可靠性是衡量其性能的主要指标.动物运动行为研究和现代机器人研究表明,非结构环境下机器人在运动平稳性、灵活性、健壮性、环境适应性以及能源利用效率等方面远远落后于动物^[17].而这些性能的提高很大程度上依赖于动物或者机器人对它们与环境间作用力的相互调控. Ohnishi^[12]等所研制的仿蜘蛛机器人主要是对蜘蛛运动步态以及生理结构方面的模仿,

缺乏模仿对象与环境间作用力的相互关系, 这直接影响到仿蜘蛛机器人的整体性能. 通过对运动中蜘蛛步足运动反力的测试, 对仿蜘蛛机器人的性能改进有很大的帮助. 本测试结果提示, 在仿蜘蛛机器人的研制中各个腿足的功能定位和结构设计应该有所差异, 足 I 以力反馈探测, 确认表面状态为主, 同时在其他步足从摆动相转移到支撑相过程中起到辅助支撑和稳定作用. 足 IV 系统设计上应该有较大的功率, 选择合适的位置, 注意驱动系的节能设计; 中间足 II、III 以保证运动中身体的姿态和稳定性为主, 设计上应该关注驱动电机和力传感器的范围. 4 个步足相对位置及其与蜘蛛重心的关系, 可引导机器人设计时相关步足的位置布置.

蜘蛛身体的独特结构以及异常灵活的步足使得蜘蛛适合于在不平整表面的运动, 是探星机器人设计很好的仿生对象. 其运动中的高稳定性将增强其作为探星机器人的可靠性, 步足的代偿机制将延长其使用寿命. 针对需求, 现有测试在下列方面还需要做进一步的实验. (1) 各步足在运动中的力学协调关系; (2) 在高低不平、倾斜等表面上的运动反力的规律; (3) 步足的运动代偿行为及其代偿极限. 这些工作的完成, 将较全面地揭示蜘蛛运动的力学关系, 为机械运动的稳定、仿蜘蛛机器人的设计和步态规划提供仿生的生物学基础知识.

参 考 文 献

- 1 Manter JT. The dynamics of quadrupedal walking. *Journal of Experimental Biology*, 1938, 15: 522—540
- 2 Dickinson MH, Farley CT, Full RJ, et al. How animals move: An integrative view. *Science*, 2000, 288: 100—106
- 3 Full RJ, Tu MS. Mechanics of a rapid running insect: Two-, four-, and six-legged locomotion. *Journal of Experimental Biology*, 1991, 156: 215—231
- 4 Full RJ, Yamauchi A, Jindrich DL. Maximum single leg force production: Cock roaches righting on photo elastic gelatin. *Journal of Experimental Biology*, 1995, 198: 2441—2452
- 5 Bartsch MS, Federle W, Full RJ, et al. Small insect measurements using a custom MEMS force sensor// TRANSDUCERS, solid-state sensors, actuators and microsystems. 12th International Conference on. Boston, USA, 2003, 1039—1042
- 6 Bartsch MS. Micromachined transducers for insect ground reaction force measurement. Ph. Dissertation California; Stanford University, 2003
- 7 Autumn K, Hsieh ST, Dudek DM. Dynamics of geckos running vertically. *Journal of Experimental Biology*, 2006, 209: 260—272
- 8 Chen JJ, Peattie AM, Autumn K, et al. Differential leg function in a sprawled-posture quadrupedal trotter. *Journal of Experimental Biology*, 2006, 209: 249—259
- 9 Shultz JW. Walking and surface film locomotion in terrestrial and semi-aquatic spiders. *Journal of Experimental Biology*, 1987, 128: 427—444
- 10 Bramhall C. Spider heart-rates and locomotion. *Journal of Comparative Physiology B*, 1987, 157: 451—460
- 11 Shapiro A, Rimon E. PCG: A foothold selection algorithm for spider robot locomotion in 2D tunnels. ICRA' 03. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 14-19Sept. 2003, 3: 2966—2972
- 12 Ohnishi T, Asakura T. Walking behavior of spider-robot with adaptation of environment information. SICE 2004 Annual Conference Sapporo; Society of Instrument and Control Engineers, 2005, 1999—2003
- 13 张正杰, 吉爱红, 王周义, 等. 用于壁虎脚掌接触力测试的三维传感器. *传感器学报*, 2007, 20(6): 1271—1274
- 14 朱明生, 宋大祥. 虎纹捕鸟蛛(蜘蛛目: 狒蛛科: 捕鸟蛛亚科)的分类研究. *河北大学学报* 2000, 3, 20(1): 53—56
- 15 王 智, 曾伯平, 王文彬, 等. 虎纹捕鸟蛛的生物学特性. *北华大学学报(自然科学版)*, 2002, 13(4): 298—313
- 16 Cavagna GA, Heglund NC, Taylor CR. Mechanical work in terrestrial locomotion: Two basic mechanisms for minimizing energy expenditure. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*, 1977, 233: R243—R261
- 17 戴振东, 张 昊, 张 明, 等. 非连续约束变结构机器人运动结构的仿生: 概念及模型. *科学通报*, 2007, 52(2): 236—239