大鼠在侧向冲击下的平衡调节行为

吉爱红^{①*}, 类彦锋^{①②}, 王周义^{①②}, 董本正^{①②}, 姚宁^{①②}, 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

* 联系人, E-mail: meeahji@nuaa.edu.cn

2013-11-19 收稿, 2013-12-30 接受, 2014-03-13 网络版发表

国家自然科学基金(51375232)、国家重点基础研究发展计划(2011CB302106)和南京航空航天大学基本科研业务费专项科研项目(NS2013094)资助

摘要 在外界的干扰下, 动物可以实时地调整运动模式, 来平衡外界的扰动以保持运动的平稳性. 本文以短腿直立动物大鼠(*Rattus norvegicus*)为研究对象, 用单摆分别冲击大鼠的胸外侧和腹外侧, 由高速摄像机和三维运动反力测试系统同步记录大鼠受到冲击时的运动行为和受到的地面反力. 研究大鼠受到侧向冲击的平衡调节策略. 大鼠抗冲击的平衡调节策略与身体受冲击的部位有显著相关性. 胸外侧受到冲击时, 大鼠主要依靠类弹簧的身体迅速弯曲吸收能量. 腹外侧受到冲击时, 大鼠通过身体的侧摆和腿的外支撑, 刚性地平侧向冲击力矩. 通过身体的侧摆实现应急缓冲比身体弯曲的应急缓冲时间短, 但是调整恢复到正常运动状态需要更多时间. 研究动物在外界干扰下的身体平衡调节策略, 可以为仿生机器人的鲁棒性设计提供参考.

关键词

侧向冲击
平衡策略
大鼠
身体弯曲
侧向跨步

运动是动物捕食、求偶、逃逸的基本条件, 通过肌肉、骨骼、神经、呼吸和循环等生理系统的相互作用实现^[1]. 亿万年的生存与演变过程中, 生物的形态结构、运动机理和行为方式逐渐与其生存环境相适应^[2,3]. 动物运动时, 身体质心始终落在由多条支撑腿组成的多边形中^[4-11]. 然而, 在外界干扰下如面对侧向突袭、侧向暴风等, 其质心可能超出其安全域^[12,13]. 动物是如何实时地调整其运动模式, 以克服/平衡身体受到的侧向扰动? 有必要研究动物在外界干扰下的身体平衡调节策略, 揭示动物如何迅速地从干扰中恢复以保持运动的稳定性. 从而为仿生机器人抗干扰能力的提升提供设计参考.

长腿的人和四足直立(upright posture)动物如狗, 在平衡侧向冲击时, 其较长的腿存在明显的先天力臂优势. 腿的小幅度侧向外伸即可实现对于侧向冲击的平衡^[14]. Bauby 和 Kuo^[15]通过简单的动力学模型发现人类在外界干扰下, 存在明显的主动控制行为

以稳定侧向运动, 如在前进方向和侧向方向上脚的位置存在显著性变化, 以增大抗干扰力矩的有效力臂. 仿大狗四足机器人“Bigdog”每条腿有 3 个靠传动装置提供动力的关节和 1 个弹性关节, 这些关节由计算机控制, 在受到侧向冲击时, 其机载主动平衡系统控制腿的外伸, 以扩大整个身体的稳定区域, 维持身体的稳定^[16]. 匍匐(sprawled posture)动物如蟑螂, 由于其身体为刚性, 抗冲击的策略与冲击的位置没有明显的相关性, 主要是通过腿的类弹簧弯曲缓解侧向冲击. 将蟑螂置于风洞中, 使其在跑步机上以给定的速度运动, 蟑螂与地面的摩擦力会明显增大以抵抗侧向风的冲击^[17]. Jinfrieh 和 Full^[18]在蟑螂的背部安装了侧向喷射装置作为蟑螂运动中的侧向扰动, 实验结果表明蟑螂步态没有明显的改变, 而是通过腿的弹性弯曲以抵抗和削弱来自侧向的扰动. 同样为匍匐动物的大壁虎(*Gekko gecko*)身体可发生柔性弯曲. 在受到侧向冲击后, 其柔性弯曲行为在转向运

引用格式: 吉爱红, 类彦锋, 王周义, 等. 大鼠在侧向冲击下的平衡调节行为. 科学通报, 2014, 59: 1249–1257

Ji A H, Lei Y F, Wang Z Y, et al. Balancing strategy to lateral impact in a rat *Rattus norvegicus* (in Chinese). Chin Sci Bull (Chin Ver), 2014, 59: 1249–1257, doi: 10.1360/972013-1274

动步态中有明显的表现^[19]. 身体柔性的短腿直立动物在运动过程中, 身体也会发生弯曲. 在受到侧向冲击后, 其身体平衡如何调节? 与长腿直立动物、长腿的匍匐运动且身体呈刚性的六足动物(昆虫)和短腿的匍匐运动且身体呈柔性的四足动物(如壁虎)有何不同? 本文选取短腿直立的大鼠(*Rattus norvegicus*)为研究对象, 使用悬挂的砝码作为单摆, 使其在下落到最低点位置时从侧向冲击大鼠的身体, 研究其在不同侧向冲击位置下的平衡调节策略.

1 材料与方法

1.1 实验动物

实验用大鼠(*Rattus norvegicus*)共 4 只, 购于南京医科大学实验动物养殖中心, 体重(148.01 ± 12.99) g. 大鼠养殖于专用饲养箱中, 以水、葡萄糖和专用鼠粮等喂食. 在大鼠尾部做上不同的标记以区分个体. 将大鼠的 4 条腿分别定义为 LF(左前腿)、LH(左后腿)、RF(右前腿)和 RH(右后腿)并在大鼠的身体头部 A、身体中部 B 和尾椎 C 做标记点, 以便于图像数据的提取及实验结果的统计与分析(图 1). 在饲养箱内放置可模拟实验装置的通道, 以训练大鼠使其适应实验装置通道直线行走.

1.2 实验装置

整个实验装置主要由动物三维运动反力测试系统、高速摄像系统、冲击单摆组成(图 1(a)). 动物三维运动反力测试系统包括由 24 只毫牛级三维力传感器组成的 3×8 传感器阵列^[20,21]、信号调理与数据采集设备(SCXI 系列, NI 公司, 美国)和一套在 Labview(NI 公司, 美国)环境下开发的可进行力学与图像数据采集、分析与测试的软件. 采集的信号滤波截止频率为 100 Hz. 传感器阵列嵌入前后两端和左右两侧都开口的透明的亚克力通道内, 并与通道底面共面, 形成大鼠运动实验通道, 使大鼠在通道内自由行走时保持近似直线运动. 实验通道两侧安装有与承力表面成 45° 夹角的镜子, 高速摄像机(Mikrotron, MC1311, 德国)从实验通道的正上方可以同时记录通道内大鼠的实时运动及两侧镜子内的运动行为($215 \text{ frames s}^{-1}$), 从而得到大鼠的三维运动行为. 24 只三维力传感器共 72 个通道的力信号采集与高摄像机的图像记录通过外部触发信号实现同步.

采用单摆作为大鼠的侧向冲击装置. 悬挂的砝码作为单摆, 其质量为 50 g, 单摆摆长为 130 mm, 将单摆从水平位置释放下落到最低点时的动能为 0.0637 J, 动量为 0.08 kg m s^{-1} . 每次实验保证砝码从水平位置释放.

1.3 数据处理

实验时, 选择砝码恰好下落到最低点时与大鼠发生碰撞冲击的实验作为有效实验且只选择冲击位置分别发生在大鼠胸外侧和腹外侧两个部位的实验进行保存记录, 以便于展开分析对比. 胸外侧受到冲击的位置确定在前后腿之间靠近前腿的位置, 从大鼠鼻端起 40%~50% 体长处; 腹外侧位置确定在前后腿之间靠近后腿的位置, 从鼻端起 65%~75% 体长处. 由三维力传感器阵列, 可得到大鼠在运动过程中每条腿的脚掌受到的地面反力. 该地面反力可分解为 3 个方向上的分量, 即在运动平面内平行于大鼠直线运动方向且以向前方向为正向的轴向力 F_F , 在运动平面内垂直于大鼠运动方向且以向右为正向的侧向力 F_L 和垂直于运动平面以向外为正向的法向力 F_N (图 1(a)).

在保存的高速图像中, 用定点坐标获取软件(Sigma Scan Pro, SPSS 公司, 美国)确定 A、B 和 C 点的坐标(图 1(b)), 用于计算身体的弯曲曲率半径. 由大鼠头部 A 点或多幅连续图像中移动的距离除以相应图像帧数的时间可以计算出大鼠在前进过程中的速度, 还可得到大鼠身体弯曲与恢复的时间. 定义单摆下落到最低点与大鼠开始接触的瞬时为 t_1 , 大鼠身体处于最大弯曲状态的时刻为 t_2 , 大鼠身体恢复到受到冲击前的直线运动状态的时刻为 t_3 . 则可以得到从冲击发生瞬时到身体弯曲度最大所用时间 t_{12} , 从身体弯曲度最大恢复到初始运动状态所用时间 t_{23} , 从冲击发生瞬时到恢复初始运动状态所需时间 t_{13} . 定义大鼠受到胸外侧冲击和腹外侧冲击调整过程中身体弯曲的曲率半径分别为 r_x 和 r_F ; 恢复到初始运动状态时身体相对于冲击发生之前的横向偏移距离分别为 l_x 和 l_F ; 受到侧向冲击前后, 大鼠在 x , y 方向上最大速度差分别为 Δv_x 和 Δv_y (图 1(b)).

1.4 数据统计

实验过程中, 大鼠的体重、身体活性状态以及环境因素等, 都会对大鼠的运动反力与运动行为产生影响, 会导致不同次的实验结果相差较大, 统计结果

图1 大鼠侧向冲击实验装置和实验方法

(a) 大鼠侧向冲击实验装置; (b) 大鼠受到胸外侧和腹外侧冲击过程图. 下标 X 表示胸外侧冲击; 下标 F 表示腹外侧冲击

具有较大的离散性. 因此, 由大量实验得到的大鼠运动力学与运动行为数据的统计和分析必须通过统计学的工具进行. 大鼠受到胸外侧冲击和腹外侧冲击的有效实验统计次数分别为 20 和 24 次. 我们对不同实验组实验结果的差异性采用 T 检验的方法进行检验. 当概率 $P>0.05$ 时, 反映了这两组实验数据之间没有显著性差异, 反之则存在着差异; 对于两组或多组实验数据的线性回归分析则采用方差分析 (ANOVA) 检验其相关性, 当概率 $P<0.05$, 则说明线性相关性显著, 反之则认为没有显著相关性. 本文实验数据中给出的统计值为平均值 $\pm$ 标准偏差.

2 实验结果

2.1 胸外侧冲击

(i) 姿态调整. 冲击发生之前, 大鼠成近似直线运动. 当大鼠身体右胸外侧部位受到下落到最低点的单摆冲击时(图 1(b)左), 大鼠迅速地发生沿冲击方向的侧向弯曲, 以避免冲击. 弯曲半径 r_x 不断减小, 经过 (81.40 ± 16.50) ms 后(图 2(a), t_{12}^x), 达到最小值 (192.67 ± 46.79) mm(图 2(b)). 接着, 大鼠的头部和胸部向左侧移动, 左前腿向左侧横向(冲击的相同方向)

迈出. 此后身体的侧向弯曲逐渐恢复, 经过 (103.26 ± 17.04) ms 后(图 2(a), t_{23}^x), 大鼠恢复到初始直线运动状态(图 3(a)). 整个调整过程中, 大鼠身体弯曲过程要快于恢复过程 ($t_{12}^x < t_{23}^x$, $P<0.01$). 从冲击发生瞬时到恢复初始运动状态所需时间为 (184.66 ± 26.18) ms(图 2(a), t_{13}^x). 用以缓冲侧向的冲击, 侧向上的偏移距离最大达到 (8.47 ± 5.36) mm(图 2(d), l_x).

(ii) 步态调整. 自由运动时大鼠的前向直线运动步态为对角小跑步态. 以一侧的前腿与另一侧的后腿形成一组, 两组的运动相互交替实现摆动相与支撑相的连续快速更替. 初始运动状态下, 左前腿和右后腿处于支撑状态(图 3(a), 状态①); 冲击的瞬间, 左前腿迈出, 右后腿即将抬起, 右前腿与左后腿处于支撑相(图 3(a), 状态②); 冲击发生后, 随着身体的侧向弯曲(图 3(a), 状态③), 左前腿迅速向左侧、向前跨出并着地, 左前腿着地的同时右前腿抬起; 随后右后腿着地, 着地点较冲击前沿冲击方向发生横向偏移, 右后腿着地的同时抬起左后腿(图 3(a), 状态④); 接着右前腿迅速向前迈出并着地, 左前腿随之抬起(图 3(a), 状态⑤); 最后左后腿着地, 右后腿抬起, 恢复到初始的运动步态(图 3(a), 状态⑥), 完成对外界冲击的调节. 从冲击发生瞬时到恢复初始运动状态,

图 2 大鼠受到胸外侧和腹外侧冲击的运动行为参数对比

(a) 响应时间; (b) 身体弯曲最大时的曲率半径; (c) 分别在 x 和 y 方向的速度差; (d) 横向偏移距离. “*”表示不同冲击位置的响应时间和恢复时间的相关性, “+”表示在相同冲击位置下的响应时间和恢复时间的相关性

大鼠在前进方向的速度明显下降(0.095 ± 0.015) m/s, 图 2(c), 图 3(a), Δv_x^x), 而横向速度有所增大(0.020 ± 0.003) m/s, 图 2(c), 图 3(a), Δv_x^x).

(iii) 运动反力调整. 冲击发生的瞬间, 右前腿和左后腿处于身体的支撑相, 右前腿的轴向力明显变小, 前后腿轴向力的合力为负, 使轴向运动速度明显下降. 大鼠处于支撑相的右前腿和左后腿的法向力合力最大值小于大鼠身体重力(约为体重 0.9 倍), 这说明大鼠在受到冲击之后的步态调整过程当中, 处于摆动相的左前腿跨出的同时, 身体存在跃起的趋势, 使得法向力明显减小. 左后腿由于来自侧向的突然冲击, 身体随冲击力向侧向摆动并弯曲, 故侧向力首先在冲击方向上增大, 之后又在反方向上突然变大, 来释放侧向冲击(图 4(a)).

2.2 腹外侧冲击

(i) 姿态调整. 当大鼠右腹外侧受到下落到最

低点的单摆冲击时(图 1(b)右), 头和胸在运动方向上没有显著的改变, 而身体的后部出现明显的侧摆弯曲现象(图 3(b)), 即臀部向左侧大幅摆动以避让冲击时, 身体也出现轻微弯曲. 弯曲半径 r_f 逐渐减小, 经过 (120.44 ± 11.30) ms (图 2(a), t_{12}^f)后, 达到最小值 (669 ± 427.38) mm(图 2(b)). 随着步态的调整, 大鼠身体臀部向右侧(冲击来源方向)移动, 而身体头部仍保持原来的运动方向, 经过 (81.00 ± 19.88) ms(图 2(a), t_{23}^f)身体调整为直线状态, 侧摆弯曲消失(图 3(b)). 从冲击发生瞬时到恢复初始运动状态, 经历约 (201.44 ± 32.18) ms 后实现了对外界冲击的平衡调整. 与胸外侧冲击相同, 大鼠在横向上也向左偏移 (9.01 ± 2.65) mm (图 2(d), l_f).

(ii) 步态调整. 自由运动时, 大鼠的两组腿在支撑相与摆动相的更替过程中会出现短暂的三腿同时悬空或同时着地的状态, 因此此时大鼠的前向直线运动步态为近似对角步态(图 3(b), 状态①). 冲击

图3 大鼠在侧向冲击下的步态序列和速度时间序列

(a) 胸外侧冲击; (b) 腹外侧冲击

发生前,大鼠右前腿抬起,左后腿即将抬起,而左前腿和右后腿处于支撑状态(图3(b),状态②);腹外侧冲击发生瞬间,左后腿迅速抬起并向外侧向前跨出(图3(b),状态③);随后右前腿着地,大鼠抬起左前腿和右后腿,出现右前腿单腿处于支撑相,另外三腿同时处于摆动相的短暂时刻(图3(b),状态④),即大鼠身体出现以右前腿为支点的向左摆动;直到左后腿着地(图3(b),状态⑤)。随后,大鼠身体迅速向前移动,左前腿和右后腿着地(图3(b),状态⑥),右后腿着地时有小幅度的向右侧跨步,使臀部少许右移,运动恢复到原来的运动步态,完成对腹外侧冲击的平衡调节。从冲击发生瞬时到恢复初始运动状态,大鼠在前进方向的速度下降(0.110 ± 0.012) m/s(图2(c),图3(b), ΔV_x^F),而横向速度增大(0.065 ± 0.012) m/s(图2(c),图3(b), ΔV_y^F)。

(iii) 运动反力调整。腹外侧冲击发生时,左前腿的法向力要大于右后腿的法向力,而侧向力始终为正;由于身体躯干腹外侧的弯曲,右后腿的轴向力为负值明显增大,侧向力也明显加大,出现后拉现象。随后,右前腿迅速着地,其他3条腿出现悬空的状态,右前腿成为唯一的支撑腿。且右前腿的法向力明显变小,出现身体的向上腾起趋势。随后左后腿迅速落地,在法向力方面来平衡身体的重力,侧向力为负,

并且峰值明显变大;接着左前腿和右后腿迅速着地,迅速推进身体向前运动(图4(b))。至此,大鼠完成身体对外界冲击的平衡调节。

3 讨论

3.1 大鼠的调节策略

(i) 大鼠受到侧向冲击时的应急响应机制。大鼠受到侧向冲击是一个瞬间发生的事件。在短暂的时间内,大鼠必须迅速做出相应的调节以维持运动的平稳性。首先,由于受到侧向冲击,大鼠被迫迅速地降低前进速度,并导致侧向速度增大。胸外侧冲击和腹外侧冲击的前进速度和侧向速度差没有显著性差异,说明大鼠在运动过程中受到外界的干扰后,速度的改变与在身体上的冲击部位无关。同时,身体的侧向弯曲也极大地缓解了侧向冲击。比较胸外侧和腹外侧冲击的实验结果可知,两者的调节方式有所不同(图1(b))。受到胸外侧冲击后大鼠身体呈“C”型弯曲,而受到腹外侧冲击后大鼠身体呈侧向摆动弯曲。胸外侧冲击的弯曲程度明显大于腹外侧冲击的弯曲程度(图2(b))。两者在弯曲方向上也存在差异。胸外侧冲击时身体沿冲击方向向左侧弯曲(弯曲曲率中心 O_1 位于大鼠身体右侧),而腹外侧冲击时身体向

图 4 大鼠在侧向冲击下的平衡调节过程中的地面反力

(a) 胸外侧冲击; (b) 腹外侧冲击

右侧弯曲(弯曲曲率中心 O_2 位于大鼠身体的左侧)。另一方面,虽然胸外侧冲击的侧向弯曲程度明显大于腹外侧冲击的侧向弯曲程度,但是从发生冲击瞬到身体形成最大弯曲,胸外侧冲击所用时间 t_{12}^x 却明显小于腹外侧冲击所用时间 t_{12}^x ($P < 0.01$)。原因之一是因为胸外侧冲击的位置靠近前腿,大鼠无法及时地实现以前腿或后腿为中心的向左摆动来躲避冲击,因此只能先使身体快速地弯曲以吸收冲击能量,以避免身体在冲击作用下的向左倾翻,然后再通过左前腿的向左跨步,逐步地将受到冲击所蓄积的能量释放;而腹外侧受到冲击的位置靠近后腿,大鼠以前腿为支点,臀部向左摆动,并在摆动中左后腿横向向外跨出落地,以平衡冲击力。因而,相对于胸外侧受到冲击的较短的弯曲变形缓冲时间,腹外侧受到冲击时的平衡调节时间包含了弯曲和后腿向左外伸和

空中摆动时间。另一个原因是大鼠身体受冲击部位的不同。胸外侧受冲击时的部位位于身体可以发生弯曲的柔韧段,身体的弯曲可以较快地实现(t_{12}^x 为 (81.40 ± 16.50) ms);腹外侧受到冲击部位的骨骼结构刚度较高,不易发生弯曲变形,只能通过以前腿为中心的侧向摆动来实现,导致响应时间要长于胸外侧受冲击时所用时间(t_{12}^x 为 (120.44 ± 11.30) ms)。

(ii) 大鼠运动姿态的恢复。大鼠从身体处于最大弯曲状态到恢复正常运动状态,是一种主动调节控制的过程。胸外侧冲击导致的身体弯曲程度较大,积蓄的能量缓慢地释放有助于减小身体脊椎等关节的损伤,因而其恢复时间较长(t_{23}^x 为 (103.26 ± 17.04) ms)。而腹外侧冲击造成的身体弯曲程度较小,并且在弯曲中已经同步实现了左后腿的侧向跨步,因而缩短了后续步态调节所需的恢复时间(t_{23}^x 为 (81.00 ± 19.88) ms)。

表1 大鼠受冲击前和平衡调节中的地面反力(%体重)

	单腿	F_F	F_N	F_L
冲击前	LF	-7.7 ± 8.9	54.9 ± 6.2	1.3 ± 10.6
	LH	8.9 ± 6.3	57.7 ± 4.8	0.4 ± 13.3
	RF	2.2 ± 11.0	56.7 ± 6.8	1.5 ± 8.6
	RH	4.9 ± 8.8	58.7 ± 8.1	3.5 ± 11.2
胸外侧冲击	LF	5.0 ± 11.1	62.6 ± 3.3	6.5 ± 16.7
	LH	15.6 ± 8.4	57.6 ± 8.4	19.6 ± 4.6
	RF	1.8 ± 14.4	61.8 ± 21.8	-7.4 ± 7.4
	RH	5.7 ± 11.3	60.3 ± 13.1	4.8 ± 10.6
腹外侧冲击	LF	10.7 ± 14.8	74.1 ± 9.3	5.2 ± 15.2
	LH	7.7 ± 12.5	65.9 ± 14.4	-7.9 ± 24.0
	RF	6.1 ± 18.7	65.4 ± 11.1	2.1 ± 10.9
	RH	13.4 ± 14.4	61.7 ± 14.3	-1.5 ± 17.1

虽然腹外侧冲击的恢复时间较短,但由于应急缓冲的调整时间较长,所以从冲击发生瞬间到恢复正常运动状态,腹外侧冲击所用时间要大于胸外侧冲击所用时间($t_{13}^F > t_{13}^X$)(图2(a)).

大鼠的身体相对于冲击发生之前有明显的向左侧偏移,受到胸外侧冲击的偏移量 l_X 小于受到腹外侧冲击的偏移量 l_F . 这是因为当冲击作用于胸外侧时,大鼠可能更倾向于通过身体弯曲和腿的小跨步缓解侧向冲击,对关节和腿的损伤较小,是一种柔性缓冲;而对于腹外侧冲击,大鼠只能采用身体的侧向摆动弯曲来平衡冲击,需要腿的大幅度向外伸展.

(iii) 地面反力作用. 冲击发生之前,后腿的轴向力峰值要大于前腿的轴向力峰值,说明后腿起到主要推进身体前进的作用;一个运动周期内,后腿落地时先使身体减速,然后待身体稳定后后腿推进身体向前运动,起到主要的驱动作用. 法向力始终为正,单腿上的法向力峰值超过体重的 50%. 前腿与后腿的侧向力曲线显示都其都受到外拉的作用力,保持正常运动状态下的稳定运动.

由于冲击来自身体的右侧,大鼠身体有以左脚掌为支点向左倾覆的趋势,且由冲击引起的地面反力的变化更多的体现在左侧脚掌上. 因此来自右侧的冲击发生导致左侧脚掌受到的轴线力、侧向力和法向力在数值上大都大于右侧对应脚掌的侧向力、驱动力和法向力(表1). 左脚掌上的法向力产生的顺时针方向的力矩,以平衡倾覆力矩.

单摆下落到最低点时的动量为 0.08 kg m s^{-1} , 与大鼠身体发生碰撞冲击后,砝码的速度近似为零. 计

算大鼠受到的侧向力从冲击发生瞬间到恢复正常运动状态(横向速度恢复近似为零)这段时间内的作用的冲量,受到胸外侧冲击时左前腿的冲量为 0.07 N s , 受到腹外侧冲击时左后腿的冲量为 0.06 N s , 都略小于单摆的动量的变化量. 可见对于不同部位受到的冲击,冲量的平衡主要是通过其靠近相应部位的腿实现. 冲量值的差异可能是由于不同位置的平衡方式不同,腹外侧的外跨过程类似于躲避,导致最终作用于身体作用冲量有所减小.

3.2 不同动物对于侧向冲击的调节策略

不同动物的类弹簧腿在运动中的功能有所不同^[22,23]. 对于长腿匍匐类动物(如昆虫),类弹簧腿的弯曲大大提高了运动中的侧向稳定性^[24~26]. 在侧向冲击下,由于身体的刚性,昆虫无法通过身体的弯曲变化吸收冲击能,但其通过类弹簧腿关节的弯曲,可以缓解侧向冲击并通过腿逐步释放冲击能量(图5(a)). 对于长腿直立动物,其身体质心较高,受到侧向冲击时产生的倾覆力矩较大(翻转加速度大),故其可用的调整时间非常有限. 最有效的方式就是腿的迅速外展以产生反向的倾覆力矩,并降低质心以减小倾覆

图5 不同动物受到来自右侧冲击后的调节策略模型

(a) 匍匐长腿动物(蟑螂); (b) 四足直立动物(狗); (c) 受到胸外侧冲击的大鼠; (d) 受到腹外侧冲击的大鼠

力矩(图 5(b)). 但这种调节方式会引起很大的冲击, 增加关节受伤的几率. 因而在外界冲击过大的情况下, 动物更倾向于选择一种类似于跳跃的身体随摆动作, 以增加冲击的作用时间减小冲击伤害, 在落地中通过各条类弹簧腿的弯曲释放冲击能量. 大鼠作为短腿直立的脊椎动物, 身体具有很好的柔韧性. 脊柱在各个椎点都可以发生弯曲. 侧向冲击实验中, 针对冲击位置的不同, 大鼠的身体平衡调节方式也不同. 大鼠胸外侧受到冲击时首先出现身体的迅速弯曲变形(缓冲), 随后左前腿向外伸展以释放冲击能量(图 5(c)). 腹外侧受到冲击时前腿的运动轨迹没有做出显著的改变, 而是以右前腿为支点, 后腿做出运动步态及反力调整, 通过迅速地外伸将冲击能量由腿

卸载, 腿处于一种刚性支撑状态(图 5(d)).

4 结论

大鼠抗冲击的平衡调节策略与身体受冲击的部位有显著相关性. 胸外侧受到冲击时, 大鼠的调节策略类似于匍匐动物, 都是一种柔性缓冲. 只是对于冲击能的吸收部位不同, 大鼠主要依靠类弹簧的身体弯曲吸收能量, 而蟑螂主要通过类弹簧腿的弯曲积蓄能量. 腹外侧受到冲击时, 大鼠的调节更趋近于直立动物, 通过身体的侧摆和腿的外支撑, 刚性地平衡侧向冲击力和力矩. 通过身体的侧摆实现应急缓冲比身体弯曲的应急缓冲时间短, 但是调整恢复到正常运动状态需要更多时间.

参考文献

- 1 Dickinson M H, Farley C T, Full R J, et al. How animals move: An integrative view. *Science*, 2000, 288: 100–106
- 2 Lu Y X. Significance and progress of bionics. *J Bionic Eng*, 2004, 1: 1–3
- 3 毕树生, 宗光华. 关于 21 世纪初我国仿生机械与仿生制造的若干思考. *中国机械工程*, 2001, 12: 1201–1204
- 4 Alexander D E. Unusual phase relationships between the forewings and hindwings in flying dragonflies. *J Exp Biol*, 1984, 109: 379–383
- 5 Cruse H, Schwarze W. Mechanisms of coupling between the ipsilateral legs of a walking insect (*Carausius morosus*). *J Exp Biol*, 1988, 138: 455–469
- 6 Delcomyn F. Motor activity during searching and walking movements of cockroach legs. *J Exp Biol*, 1987, 133: 111–120
- 7 Jander J P. Mechanical Stability in Stick Insects When Walking Straight and Around Curves. Berlin: Paul Parey, 1985. 33–42
- 8 王周义, 王金童, 吉爱红, 等. 壁虎的运动行为与动力学研究: 竖直面内运动方向的影响. *科学通报*, 2010, 56: 2339–2349
- 9 王周义, 王金童, 吉爱红, 等. 虎纹捕鸟蛛运动反力测试. *自然科学进展*, 2009, 19: 883–888
- 10 Full R J, Koditschek D E. Templates and anchors: Neuromechanical hypotheses of legged locomotion on land. *J Exp Biol*, 1999, 202: 3325–3332
- 11 Full R J, Tu M S. Mechanics of six-legged runners. *J Exp Biol*, 1990, 148: 129–146
- 12 Raibert M H, Brown H B, Chepponis M. Experiments in balance with a 3D one-legged hopping machine. *Inter J Robot Res*, 1984, 3: 75–92
- 13 Ting L H, Blickhan R, Full R J. Dynamic and static stability in hexapedal runners. *J Exp Biol*, 1994, 197: 251–269
- 14 Rubin C T, Lanyon L E. Limb mechanics as a function of speed and gait: A study of functional strains in the radius and tibia of horse and dog. *J Exp Biol*, 1982, 101: 187–211
- 15 Bauby C E, Kuo A D. Active control of lateral balance in human walking. *J Biomech*, 2000, 33: 1433–1440
- 16 Raibert M, Blankespoor K, Gabriel N, et al. BigDog, the rough-terrain quadruped robot. In: *Proc 17th World Congr Intern Feder Autom Contr*. Seoul, Korea, 2008, 7: 6–11
- 17 Full R J, Koehl M A R. Drag and lift on running insects. *J Exp Biol*, 1993, 176: 89–101
- 18 Jnfrich D L, Full R J. Dynamic stabilization of rapid hexapedal locomotion. *J Exp Biol*, 2002, 205: 2803–2823
- 19 Wang Z Y, Wang J T, Ji A H, et al. Behavior and dynamics of gecko locomotion: The effects of moving directions on a vertical surface. *Chin Sci Bull*, 2011, 56: 573–583
- 20 Dai Z D, Wang Z Y, Ji A H. Dynamics of gecko locomotion: A force-measuring array to measure 3D reaction forces. *J Exp Biol*, 2011, 214: 703–708
- 21 吴强, 俞志伟, 吉爱红, 等. 一种小型电阻应变式三维力传感器的仿真设计. *中国机械工程*, 2011, 22: 1288–1293
- 22 Cavagna G A, Heglund N C, Taylor C R. Mechanical work in terrestrial locomotion: Two basic mechanisms for minimizing energy expenditure. *Am J Phys-Regul Integr Comp Phys*, 1977, 233: 243–261
- 23 Jayes A S, Alexander R. Mechanics of locomotion of dogs (*Canis familiaris*) and sheep (*Ovis aries*). *J Zool*, 1978, 185: 289–308

- 24 Chen J J, Peattie A M, Autumn K, et al. Differential leg function in a sprawled-posture quadrupedal trotter. *J Exp Biol*, 2006, 209: 249–259
- 25 Full R J, Tu M S. Mechanics of a rapid running insect: Two-, four-, and six-legged locomotion. *J Exp Biol*, 1991, 156: 215–231
- 26 Full R J, Blickhan R, Ting L H. Leg design in hexapedal runners. *J Exp Biol*, 1991, 158: 369–390

Balancing strategy to lateral impact in a rat *Rattus norregicus*

JI AiHong¹, LEI YanFeng^{1,2}, WANG ZhouYi^{1,2}, DONG BenZheng^{1,2}, YAO Ning^{1,2} & DAI ZhenDong¹

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*

Animals can adjust movement pattern to balance the outside disturbance to keep stability. In this paper a rat *Rattus norregicus* was focused to study its balancing strategy to lateral impact. A pendulum was used to strike lateral thorax and lateral abdomen of the animal. Locomotion behavior was recorded by a high speed camera and ground reaction forces were measured by 3-dimensional forces sensors array synchronously during the whole progress of impact and adjustment. The result showed that the balancing strategy to lateral impact in a rat was closely related to the striked position of the body. The rat bent flexible body to absorb the impact energy when encountering the lateral thorax strike, and it resisted the impact force and torque through its side-sway and left leg supporting when encountering the lateral abdomen strike. Animal spent less time on side-sway than on body bending during emergency buffer, but it spent more time on side-sway than on body bending when reverting to original locomotion gait. Balancing strategy to lateral impact in a rat can be inspired to improve the robustness of bionic robot.

lateral impact, balancing strategy, rat *Rattus norregicus*, body bending, lateral step

doi: 10.1360/972013-1274