

虎纹捕鸟蛛水平面运动行为

王金童^{①②}, 王周义^{①②}, 李宏凯^①, 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

* 联系人, E-mail: zddai@nuaa.edu.cn

2010-10-14 收稿, 2011-05-27 接受

摘要 动物运动行为的研究对运动学的分析以及仿生机器人的研制有着重要意义. 运用动物运动行为观测系统获取了虎纹捕鸟蛛(*Ornithoctonus huwena*)水平面直线运动的运动学信息, 如步足的运动状态、质心的运动和步足各关节转动角度的变化等信息. 结果表明: 虎纹捕鸟蛛以一侧的步足 1 和 3 与对侧的步足 2 和 4 为一组运动相, 两组运动相在运动中相互交替运动相位. 运动速度的提高主要依靠于步频的提高来实现, 并且运动稳定性优于昆虫. 质心的速度和高度周期波动, 步足相位交替时质心的高度和速度均较高, 稳定运动状态下质心的高度和速度均较低. 步足 4 偏向角的变化最小, 有利于对身体的驱动; 由于步足 1 的探寻功能使得运动中其各关节转动角度的变化不定. 上述结果对仿生机器人的设计和步态规划有所启示.

关键词

运动行为
虎纹捕鸟蛛
仿生机器人
关节转动角度
高速摄像

动物的生理结构特征和运动行为与其生活的自然环境存在密切的联系. 动物的进化使其运动向着高效、灵活、适应性强、简单可靠的方向发展^[1], 这些功能需求促进了动物运动器官在形态学和生理学上的进化, 从而更好地适应生存环境^[2]. 动物的运动是肌肉、骨骼、神经系统和感知器官协调作用的结果, 对环境有着高度适应性. 不同种类的动物形成了与其生存环境相适应的运动方式, 其运动的平稳性、灵活性、健壮性、环境适应性及能源利用率等方面远远优于现有的机器人^[1]. 通过研究动物的运动行为, 将动物高超的运动能力融入到机器人的设计中, 研制出相应的仿生机器人^[3-7], 是长期以来人们所追求的目标.

二足、四足、六足动物的运动行为已有很多的研究^[8-15]. 对于八足动物(蜘蛛)的研究主要侧重于蜘蛛毒素及应用、蛛丝结构及力学性能^[16-19], 而在蜘蛛行为等方面的研究较少. 1971年 Land^[20]发现狼蛛通过侧眼神经系统引导转弯. Bromhall发现^[21]多种蜘蛛的心跳与运动行为间存在密切关系. Shultz^[22]比较分析

了地面爬行蜘蛛(*Lycosa rabida walckenaer*)和半水生蜘蛛(*Dolomedes triton*)在地面与水面上的运动差异. 我所测试了虎纹捕鸟蛛在水平面运动时各个步足的运动作用力, 并结合四足、六足爬行动物比较分析了各步足在运动中的功能^[23]. Ohnishi等人^[24]研究了仿蜘蛛机器人的运动控制问题. Gasparetto等人^[25]建立了蜘蛛运动模型, 开展了仿真分析.

虎纹捕鸟蛛(*Ornithoctonus huwena*)是一种大型穴居的八足动物, 一般生活在草丛、洞穴等复杂环境中^[26], 具有良好的越障能力和残肢运动能力, 成为研制高可靠、高越障能力的太空探索机器人很好的生物学模版; 其次, 蜘蛛运动中的冗余支撑与稳定性的关系, 以及多个步足间如何相互协调运动等问题尚不清楚, 有待解决. 本文运用动物运动行为观测系统测定虎纹捕鸟蛛水平面内运动的特征, 如步足的运动状态、质心的运动和步足各关节转动角度的变化等, 一方面揭示蜘蛛在运动中步足的运动规律及相互间的运动关系; 另一方面也为新型仿蜘蛛机器人的设计, 特别是运动规划和控制系统设计提供相应的生

物学知识.

1 材料和方法

1.1 材料与设备

虎纹捕鸟蛛(*Ornithoctonus huwena*)可分为头胸部、腹部和肢体 3 部分, 其中肢体包括 1 对螯肢和 4 对步足, 步足分为基节、转节、腿节、膝节、胫节、附节和前附节^[22]. 实验用虎纹捕鸟蛛 3 只(图 1(a)), 产自中国广西, 体态正常、身体状况良好, 其主要体态特征列于表 1. 实验蜘蛛用猪肝和水等分别独立饲养, 处于自然光照中, 温度在 $25\pm2^{\circ}\text{C}$.

动物运动行为观测系统由爬行通道、高速摄像机以及配套的计算机组成(图 1(b)). 爬行通道由表面标有刻度的底板(每格 1 cm, $15\text{ cm}\times 80\text{ cm}$)、一个透明的玻璃盖和一对与爬行通道成 45° 夹角的镜子组成; 蜘蛛在通道中运动时, 两面镜子中的图像即为蜘蛛在运动平面法向平面内身体侧面的位姿. 通道足够宽敞, 不会影响蜘蛛步足与身体的自由摆动. 高速摄像机(Mikrotron, MC1311, 德国)支撑在爬行通道之上并与计算机相连, 通过计算机配置高速摄像机的拍摄频率和图像像素, 并控制拍摄的启停(虎纹捕鸟

蛛步态实验: 100 帧/s, 像素 1024×1024). 在实验拍摄前, 将一个已知边长的立方体置于通道中央, 用高速摄像拍摄图片, 以标定图像^[27].

1.2 实验方法

为清晰表述蜘蛛的运动, 定义其左右两侧 4 对步足分别为 L1, L2, L3, L4(左侧)和 R1, R2, R3, R4(右侧) (图 2(a)). 定义三维运动观测系统中爬行通道底面为水平面(体平面); 身体的左右对称平面为矢状面; 通过步足与运动表面接触点以及基节与身体连接点, 且与体平面相垂直的平面为腿截面. 由于运动中前附节与地面接触方式基本不变, 与附节间的角度几乎不变; 转节和膝节相对较小. 因此在实际分析中, 忽略前附节对运动角度变化的影响, 并将转节和膝节简化为关节. 相关关节和角度(单位: $^{\circ}$) 定义如下: 腿节与胫节、胫节与附节、基节与腿节的连结分别定义为关节 a、关节 b 和关节 c. 其中偏向角(θ)为腿截面与矢状面的夹角, 即关节 c 在体平面内的变化角度(图 2(a)); 腿胫角(α)、胫附角(β)和提升角(γ)定义为腿截面内腿节与胫节的夹角、胫节与附节的夹角、腿节与过关节 c 且平行于体平面的面间的夹角, 即关节 a、关节 b 和关节 c 在腿截面内

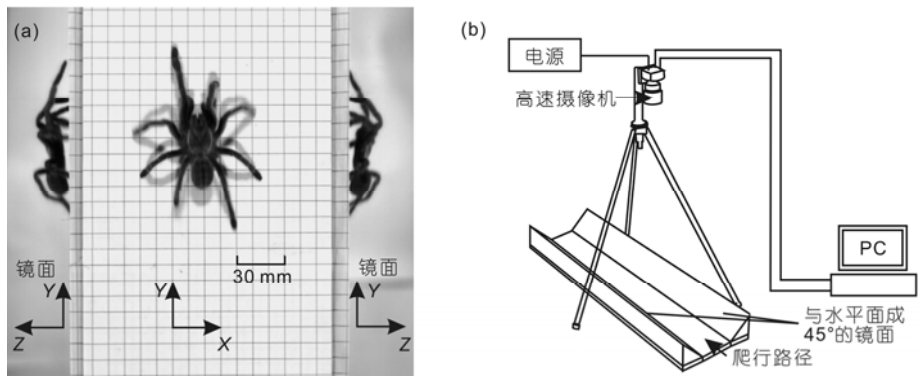


图 1 (a) 虎纹捕鸟蛛的三维运动图像; (b) 步态实验系统

表 1 虎纹捕鸟蛛体态特征数据

	体重 (g)	体长 (mm)	头胸部长 (mm)	头胸部宽 (mm)	步足长(mm)			
					步足 1	步足 2	步足 3	步足 4
蜘蛛 1	5.41	44.4	24.1	15.9	57.1	43.8	42.0	48.8
蜘蛛 2	6.35	53.4	30.6	17.6	62.8	46.7	44.2	56.5
蜘蛛 3	5.02	40.3	21.4	15.7	51.1	43.3	36.5	45.4
平均 $\pm$ 标准差	5.59 ± 0.56	46.0 ± 5.5	25.4 ± 3.9	16.4 ± 0.9	57.0 ± 4.8	44.6 ± 1.5	40.9 ± 3.2	50.23 ± 4.6

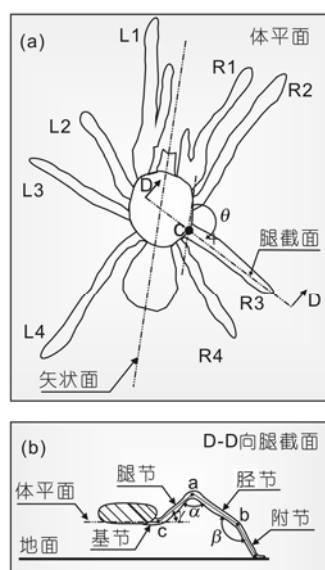


图2 蜘蛛水平面运动角度定义示意图

(a) 蜘蛛水平面运动体平面内关节c的变化角度为偏向角 θ ; (b) 腿截面内关节a、关节b和关节c的变化角度分别为腿膝角 α 、胫附角 β 和提升角 γ

的变化角度(图2(b)).

数据处理: 采用 SigmaScan pro 5(Systat Software Inc., California, USA)从系统拍摄的序列图片中读取标记点的位移信息, 体平面(X-Y 平面)信息从鸟视图图像获得, 而矢状面(Y-Z 平面)信息取自镜面图像, 将标记点的移动信息存储为 MS Excel 文件格式, 并在实验数据处理前, 运用实验中的标定图片对镜面部分图像和非镜面部分图像进行标定. 最终获得一个完整连续运动步态的运动学参数, 主要有步距(一个完整周期下, 身体前进的位移)、步频(单位时间内步态周期的次数)、负荷因数(步足支撑时间与一个周期时间的比值)、质心位置(体平面和矢状面内质心的轨迹)和关节转动角度值(关节转动的极限位置角度)等运动学参数. 根据固结于蜘蛛躯体上第一对复眼的参考点, 结合图片拍摄速率计算出每个周期的平均速度. 并对各参数与速度采用回归分析, 以速度参数作为协变量, 考察步态特征参数与速度关系. 在处理过程中, 人工采集的特征点位置必然存在误差, 使获得的参数数据不够连续, 必须借助滤波工具进行处理. 本文利用数字平滑滤波工具(Biotest, 德国)对数据进行滤波, 在去除数据抖动的同时保留了原曲线的峰值等特征, 并对滤波后的数据进行方差分析.

数据统计: 考虑到实验动物(虎纹捕鸟蛛)运动中

的运动行为与动物体重、应激状态、环境条件等许多因素相关, 其运动规律必须借助统计学工具进行分析. 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. 均值和标准差的计算分析使用软件 SPSS (SPSS Inc., Chicago, USA) 计算. 本文结果中所描述的统计值是平均值 $\pm$ 标准差(mean $\pm$ s.d.).

2 实验结果

虎纹捕鸟蛛身体具有对称性, 故将左右两侧对应步足的实验参数(步频、步距、各关节转动角度等)做统计检验, 结果表明虎纹捕鸟蛛运动时, 左右两侧对应步足的各实验参数没有显著性差异, 因此后续分析将左右两侧对应步足的各个实验参数合并分析.

2.1 步态特征参数

动物的运动速度是步距与步频的乘积, 因而受步距和步频的共同影响. 实验结果表明, 虎纹捕鸟蛛步距和步频与速度均有明显的相关性, 步距随着速度的增加有所减小, 而步频则随着速度的提高线性增加. 步距的变化对速度的影响显著低于步频的影响, 可见蜘蛛主要是通过改变步频以达到对速度的调控(图3(a), 表2). 各步足单腿步距与速度存在显著的相关性, 不同的速度下单腿步距有着明显的变化趋势和变化规律, 步足3单腿步距随速度变化幅度最大, 步足1随速度变化幅度最小. 虎纹捕鸟蛛步足1的负荷因数与速度间没有显著的相关性(表2), 随机性较大. 除步足1外其他各步足的负荷因数均与速度存在显著的相关性, 随着速度的增大而减小, 并且随速度变化趋势相同. 表明蜘蛛运动越快, 其步足处于摆动相的时间越长, 相应的处于支撑相的时间越短, 总体上表现是随着速度提高负荷因数降低(图3(b), (c), (d), (e), 表2).

2.2 运动步足状态

虎纹捕鸟蛛的运动步态随速度的变化不明显, 即随着速度的增加运动步态没有明显改变, 依然是两组步足的相互交替. 运动中蜘蛛的8个步足分为两组(L1, R2, L3, R4; R1, L2, R3, L4), 交替支撑身体并

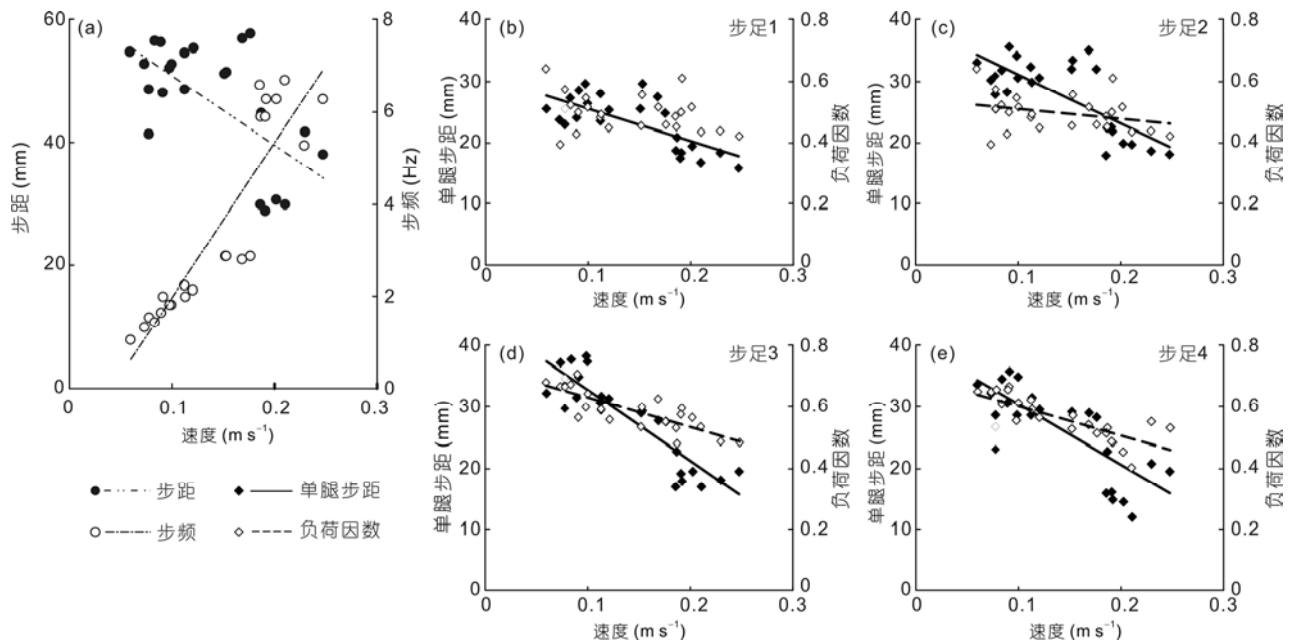


图 3 蜘蛛步距、步频、单腿步距和负荷因数与速度的关系

(a) 步距和步频与速度的关系. (b)~(e) 分别对应蜘蛛步足 1、步足 2、步足 3 和步足 4 的单腿步距和负荷因数与速度的关系

表 2 步态特征参数及其与速度关系

	步足	平均值	样本数	与速度的线性回归分析				
				<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ₂	<i>F</i>	<i>P</i>
	步距	48.24±10.24	27	-115.42	64.561	0.4	14.667	<0.001
	步频	3.43±2.06	27	33.4	-1.3539	0.669	50.5	<0.001
负荷因数	1	0.49±0.06	25	-	-	0.083	2.34	0.163
	2	0.59±0.07	25	-0.9147	0.7187	0.5236	25.2788	<0.001
	3	0.59±0.07	25	-0.9647	0.7263	0.6634	45.3304	<0.001
	4	0.52±0.07	25	-0.9528	0.6951	0.6051	35.2426	<0.001
单腿步距	1	23.33±4.25	25	-52.19	30.72	0.4743	19.849	<0.001
	2	27.80±5.97	25	-79.585	39.061	0.5602	28.0227	<0.001
	3	27.88±7.24	25	-114.82	44.113	0.792	83.7692	<0.001
	4	26.33±7.67	25	-98.424	40.249	0.5196	23.7952	<0.001

驱动身体向前运动. 从高速摄像所记录的序列图片中选取一个离散周期样本(从步足 R4 落地开始到下一次落地作为一个周期), 获取虎纹捕鸟蛛一个周期的步足状态. 一个运动周期包括两个稳定运动状态(状态 1, 5)和两个步足交替过程(状态 2, 3, 4; 状态 6, 7, 8), 且两个步足交替过程中步足的移动次序是相同的, 只是左右不同而已. 稳定运动状态 1 由 L1, R2, L3, R4 四步足同时驱动, 质心逐渐由后 3 只步足(R2,

L3, R4)支撑点构成的后支撑三角形内移动至前 3 只步足(L1, R2, L3)支撑点构成的前支撑三角形内; 同时步足 L2 和 R3 落于支撑的前三角区域(状态 2); 接着步足 L4 落地, R4 离地, 蜘蛛支撑步足落点区域由凸四边形变为三角形, 该支撑三角内有六步足处于支撑相(状态 3); 随后状态 1 中处于支撑相的步足陆续离地处于摆动相, 身体由步足 L2, R3, L4 支撑, 支撑三角完成替换(状态 4), 质心位于后支撑三角形内;

最后步足 R1 落地, 蜘蛛由 R1, L2, R3, L4 四步足支撑稳定运动状态(状态 5), 步足完成一次交替, 运动进入下一个步足交替过程(状态 6, 7, 8), 最终又回到四步足支撑稳定运动状态(状态 1)(图 4(a), (b)).

2.3 蜘蛛质心波动

周期的起始阶段为四步足稳定支撑(状态 1), 蜘蛛的质心较低, 运动速度较慢(图 4(c)). 随着身体向前运动, 进入步足交换阶段(状态 2, 3, 4), 再次转为稳定支撑运动(状态 5). 步足与地面初始接触阶段, 步足由摆动相过渡为支撑相, 质心运动减速, 蜘蛛质心的高度逐渐降低, 质心的速度和高度同时达到最低, 此时蜘蛛的质心跨越前后两个支撑三角形的边

界; 随后运动开始加速, 质心抬高, 在质心处于高速和高位时步足快速完成替换. 质心的运动速度和高度的周期性波动是与上述两种状态的交替直接相关, 其变化的频率是步频的 2 倍(图 4(d)).

2.4 关节转动角度

动物运动过程中, 其关节角度的时空变化是表示关节运动最直接的形式, 对仿生机器人的设计, 特别是步态规划及运动协调的控制具有直接的参考意义. 选取虎纹捕鸟蛛水平面上运动(0.095 m s^{-1})的各关节转动角度变化数据进行处理和比较. 表 3 为试验中各步足关节 a、关节 b 和关节 c 的转动角度极值及范围. 为了便于实验数据的对比, 把周期时间进行归

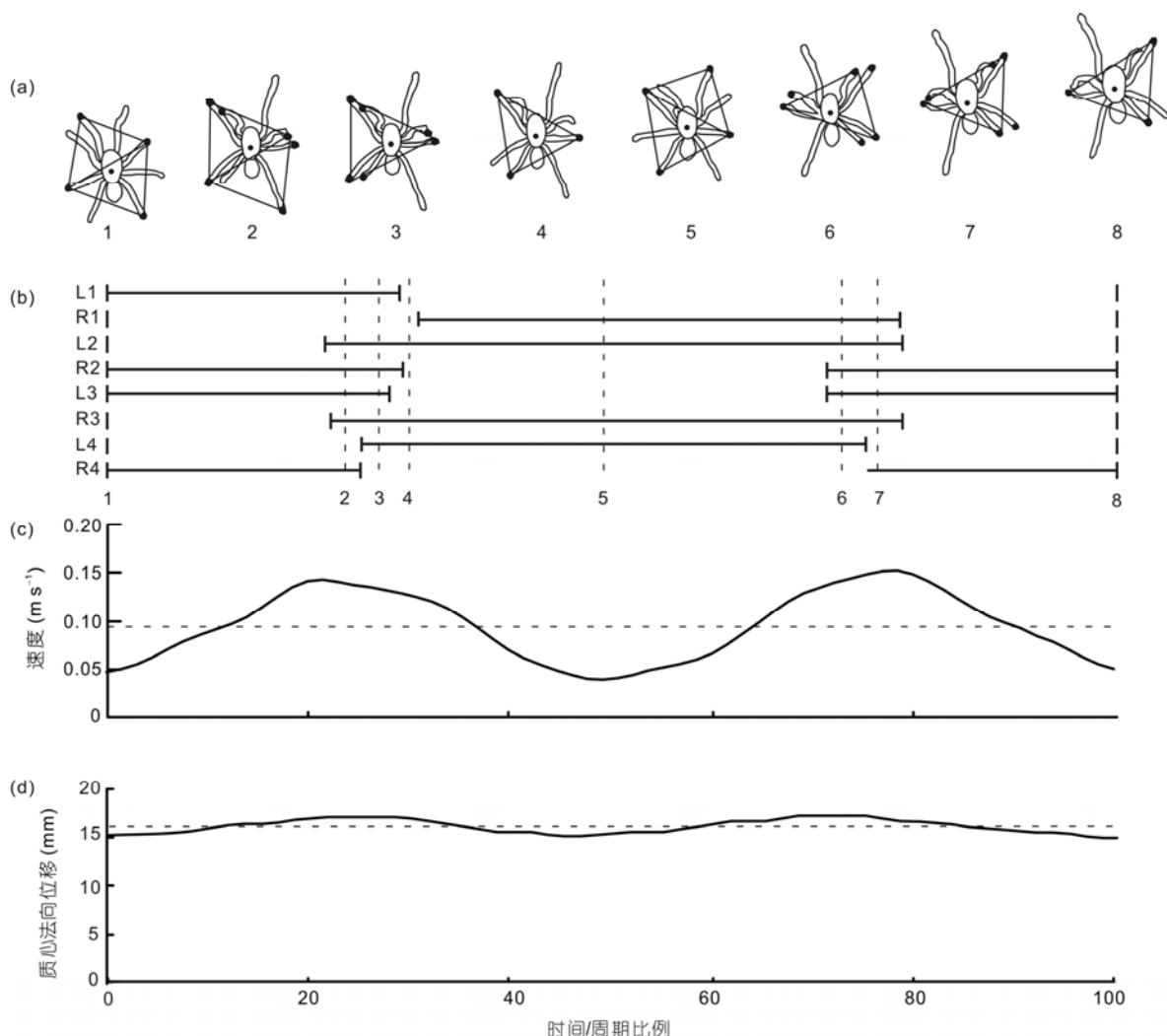


图 4 (a) 蜘蛛运动的步态序列(各图序号与(b)中标注的时刻对应); (b) 蜘蛛运动的步足状态; (c) 蜘蛛质心在运动平面内速度变化曲线; (d) 蜘蛛质心在重力方向上的波动曲线

一化处理, 蜘蛛各步足关节单周期内转动角度变化曲线如图5所示. 单个运动周期内, 从整个大趋势上看, 腿胫角、胫附角、提升角和偏向角均在步足相位转换处达到其峰值, 偏向角尤为明显.

(i) 腿胫角 α . 各步足腿胫角的变化差异明显. 步足1的腿胫角在支撑阶段变化很小, 而在摆动阶段经历减小、稳定、增大3个明显的过程, 即在摆动相, 步足1的关节a转动频繁; 步足2的腿胫角在支撑阶段先增大后减小, 摆动阶段仅存在微小的波动, 变化不明显, 即在支撑阶段关节a有一次伸展和卷曲; 步足3的腿胫角在整个支撑阶段的后期略有减小, 而在摆动相前期其关节a有一次卷曲与伸展, 并在展开后保持一段时间落地; 而步足4的关节a在支撑阶段展开, 摆动阶段卷曲, 使得其腿胫角在支撑阶段不断增大, 而在摆动阶段逐渐减小(图5).

(ii) 胫附角 β . 步足1的关节b在整个周期中变化比较复杂, 胫附角在支撑阶段不断增大, 而在摆动

阶段先增大再减小, 然后再次增大3个过程; 整个周期中步足2的关节b转动不明显, 因而其胫附角在整个周期中的变化很小, 仅存在微小的减小与增加; 而步足3的关节b在整个周期中存在一次伸展与卷曲, 在支撑阶段其胫附角不断增大, 随后在摆动阶段逐步减小到起始角度, 在步足相位转换时达到峰值(图5).

(iii) 提升角 γ . 步足1的提升角和腿胫角的变化趋势相似, 因而步足1的关节c在腿截面内的变化类似于关节a的变化; 步足2和3的提升角在支撑相增大, 并在相位转换处达到最大值, 随后不断减小, 整个周期变化中关节c在腿截面内仅有一次伸展与卷曲; 这与步足4提升角的变化恰恰相反, 步足4的关节c在支撑相卷曲, 摆动相伸展, 即提升角在支撑相减小, 摆动相增大(图5).

(iv) 偏向角 θ . 各步足的关节c在体平面内的变化趋势相似, 均为支撑阶段关节伸展, 偏向角增大, 摆动阶段关节卷曲, 偏向角减小; 步足3的偏向角变

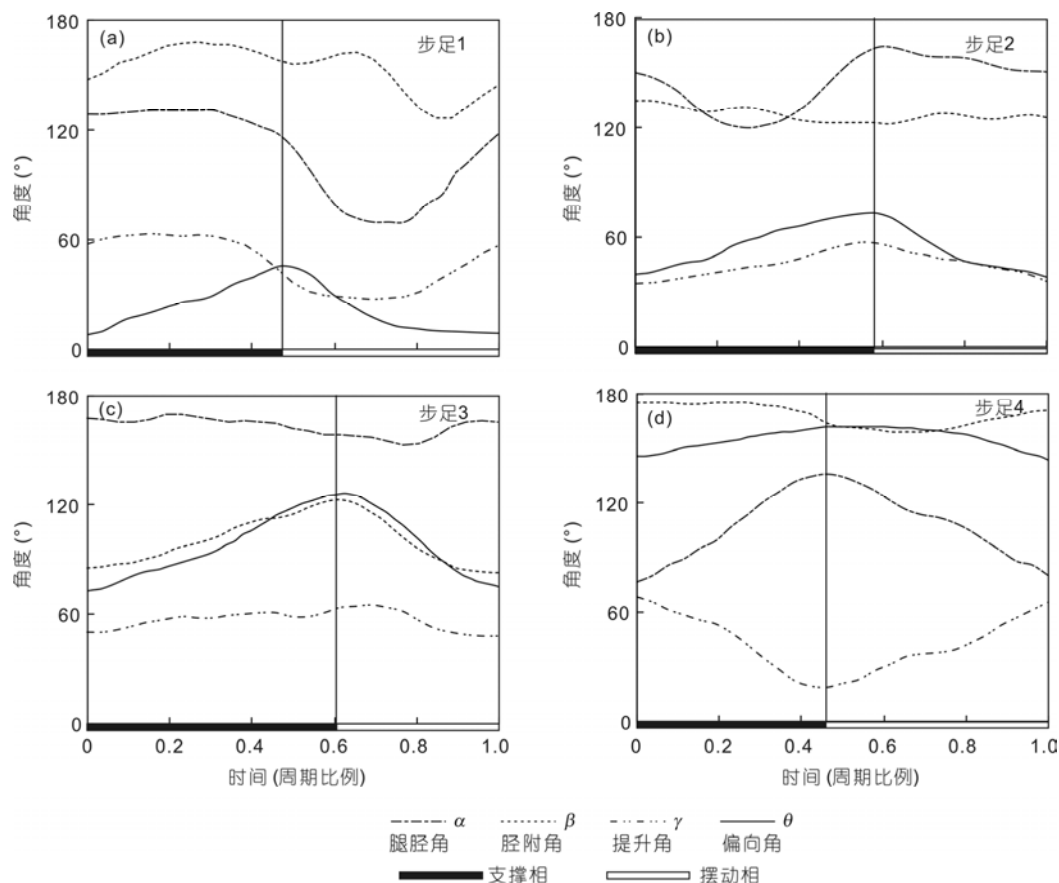


图5 虎纹捕鸟蛛关节转动角度单周期变化曲线

(a)~(d)分别为蜘蛛在水平面上四足支撑运动时各步足腿胫角 α 、胫附角 β 、提升角 γ 和偏向角 θ 单周期变化曲线图

化幅度最大, 步足 4 的偏向角变化幅度最小, 步足 1 和 2 的变化幅度相近(图 5).

3 讨论

虎纹捕鸟蛛是一种地面穴居大型蜘蛛, 其步足结构、步足功能、运动特征等方面的研究对于仿蜘蛛的八足机器人的研制有很好的启示, 尤其在机器人的步足设计和步态规划方面.

3.1 质心的运动

虎纹捕鸟蛛运动的步态为 1-3-2-4, 即是一侧的步足 1 和 3, 另一侧的步足 2 和 4. 从步足 4 的卷曲着地开始到完全伸展离地结束为一个步态周期, 该运动行为符合弹簧-质量模型及其所表述的能量储存和再利用的基本特征. 并且当蜘蛛在步足 1-3-2-4 处于支撑相时, 其他四步足处于摆动相. 步足 4 各关节逐步伸展伴随着释放能量, 并沿步足 4 方向驱动身体运动(图 6(a)); 身体作为一个独立刚体沿运动方向前进. 而且其驱动方向与运动方向存在一个角度, 使得两者之间存在着一定的阻碍作用, 因而必然影响步足 4 对于运动的驱动效率. 实验表明蜘蛛在运动中, 通过同时改变各步足的偏向角, 从而削弱这种阻碍作用, 以提高步足的驱动效率(图 4(a), 6(a)), 并且步足 4 的偏向角在整个运动中的变化明显小于步足 2 和 3 的变化, 使得运动中步足 4 所提供的主要驱动力能够更好地驱动身体, 提高整个运动的驱动效率(表 3, 图 5).

在一个步态运动过程中, 处于支撑相的步足与运动表面的接触点可作为固定点, 如 A_{L1} , A_{L3} , A_{R2} 和 A_{R4} . 现将蜘蛛一个步态的各支撑相接触点 A_{L1} , A_{L3} , A_{R2} 和 A_{R4} 相互连接将会得到一个支撑四边形, 在起始阶段, 蜘蛛的质心位于后支撑三角形 $A_{L3}A_{R2}A_{R4}$ 内; 随着步足 R4 的不断推进, 质心越过直线 $A_{L3}A_{R2}$ 进入前支撑三角形内(图 6(a)). 现将图 3(a)中蜘蛛连续步态的支撑四边形按步态时间序列进行叠加, 发现蜘蛛质心运动遵循: 在支撑前期质心位于支撑四边形的后支撑三角形内, 随着步足 4 的不断推进, 质心越

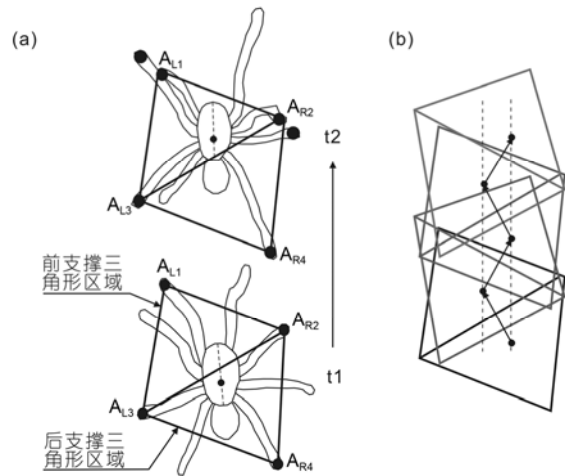


图 6 (a) 体平面内蜘蛛质心单个步态的位置示意图, 在支撑前期(t1)质心位于后支撑三角形内, 换步的同时质心移动到前支撑三角形内(t2); (b) 体平面内蜘蛛质心的运动轨迹示意图

表 3 蜘蛛各步足关节转动角度极值及范围($^{\circ}$)

项目		步足 1		步足 2		步足 3		步足 4	
		支撑相	摆动相	支撑相	摆动相	支撑相	摆动相	支撑相	摆动相
腿胫角 α	最大值	131.00	121.30	165.01	164.46	171.14	167.41	135.37	132.18
	最小值	121.30	69.37	120.83	152.45	159.01	154.10	77.77	76.59
	范围	9.70	51.92	44.19	12.01	12.13	13.31	57.60	55.59
胫附角 β	最大值	167.74	162.18	135.82	128.76	123.56	122.29	175.31	171.12
	最小值	147.99	126.26	123.16	126.07	86.83	86.83	168.53	158.58
	范围	19.76	35.92	12.66	2.70	36.74	35.46	6.79	12.54
提升角 γ	最大值	63.32	56.84	58.18	58.18	65.20	66.11	68.04	65.25
	最小值	51.59	27.46	35.71	35.54	51.52	48.87	19.64	18.72
	范围	11.73	29.38	22.48	22.64	13.68	17.24	48.40	46.52
偏向角 θ	最大值	44.94	44.67	74.46	74.30	125.87	127.01	162.01	161.58
	最小值	9.18	9.55	41.13	39.20	73.94	76.63	145.85	143.27
	范围	35.76	35.12	33.34	35.10	51.92	50.38	16.16	18.31

过步足2和3的足端连线进入支撑四边形的前支撑三角形内;由于步足相位的更替,质心落于下一步态支撑四边形的后支撑三角形内,随着步足4的不断推进,质心越过此次步态中步足2和3的足端连线进入支撑四边形的前支撑三角形内,如此往复的循环,使得质心在体平面内呈Z字形运动(图6(b)).由于各步足关节 c 在体平面内转动而引起的位移很小,因而在体平面内身体的转动是微小的,主要是沿驱动力方向的平动.为实现这一平动,不但要求左右步足各关节在腿截面内有所变化,而且左右的变化必须存在差异(表3,图5),从而形成平面内移动的位移差,最终实现质心在体平面内的移动,并使得质心在体平面内的移动速度随着运动存在一定的波动(图4(c)).

在整个运动过程中,由于步足各关节的空间转动,使其质心的高度随着运动前进而波动(图4(d)).蜘蛛在每步的开始阶段($0.00\pm 0.00\sim 0.16\pm 0.02$ 周期处),步足接地,使质心运动减速和高度降低,而后续阶段($0.16\pm 0.02\sim 0.25\pm 0.03$ 周期处),步足促使质心运动加速和高度抬高.整个过程可以把支撑相步足视为弹簧-质量模型^[28],初始步足接触地面,弹簧开始被压缩,质心运动速度和高度均降低,动能和势能均被弹簧存储,在后半步弹簧的能量释放,质心加速,高度抬高.每步后阶段的加速以及质心的抬高保证了步足替换过程中蜘蛛有较高的身体动能,顺利跨越驱动力的低谷,同时质心的抬高有利于步足替换的实现.

综上所述,将虎纹捕鸟蛛质心在体平面内的运动和矢状面内的运动统一分析,发现其质心的运动可以近似看作是绕步足2和3的足端连线的转动,及沿步足4驱动力方向的平动,其质心的运动体现了蜘蛛运动的波动性和周期性.通过对蜘蛛运动行为的观察与分析,将其结果应用于匍匐式腿结构仿蜘蛛八足机器人的设计中,使得机器人各关节的变化相互协调,努力的减小运动中不必要的振动,从而提高整个运动系统的稳定性.步足弹簧-质量模型很好地揭示了动物在运动过程中如何回收利用系统中的波动能量^[28],启发我们在研制中可以尝试利用蜘蛛的一些波动(如惯性摆动),将其转化为一种能量储存,并在运动中重新释放到系统中,从而降低整个系统的耗能,提高整个系统的利用率.

3.2 运动步态对比

虎纹捕鸟蛛是一种大型穴居原蛛,可以在崎岖、狭

窄等各种复杂的环境下运动,并在洞内和洞外结网,用于探测和捕食.虎纹捕鸟蛛的运动速度与步频和步距均有显著相关性,但步距变化对速度影响明显小于步频变化对速度的影响,因而其速度的改变主要是通过步频的调控;并且随着运动速度提高,负荷因数减小,步足的接地时间减小,步足替换阶段对整个周期时间较短,稳定运动状态支撑步足数为4,替换阶段多于4个步足处于支撑状态,并且大部分周期处于四步足支撑稳定运动阶段(图3,表2).比较分析可得,虎纹捕鸟蛛的基本运动特征与地行蜘蛛^[22]的存在相似性,与结网型蜘蛛^[29]的运动特征则有较大差异.结网型蜘蛛整个运动周期中没有明显支撑与替换阶段,整个周期中步足均在轮流进行支撑和摆动相的转换,处于支撑相的始终为5个步足.

3.3 运动的稳定性

自然界的动物是千姿百态的,其运动行为也是多种多样的,因而各种动物的运动步态及稳定性也存在着很多差异.如黄斑蝽、蟑螂和蚂蚁等“六足纲”昆虫,在水平面爬行时均以三角步态运动.2002年徐小云等人^[30]对微型仿生机器人三角步态的稳定性进行了分析,详细表述了三角步态稳定裕量的计算方法.若将其扩展至多边形特征的步态,定义稳定裕量为质心移出步足支撑点连成的凸多边形移动的最小距离,以相同尺度下稳定裕量表征运动稳定性.稳定裕量越大,运动过程的稳定性就越好,稳定裕量的大小决定于多边形的大小以及质心位置.现将虎纹捕鸟蛛运动的稳定性与身体可近似看作刚体、以步足运动的六足三角步态昆虫相比,虎纹捕鸟蛛在稳定运动阶段,身体由四步足支撑,步足分布成凸四边形,同等条件下重心在凸四边形中的稳定裕度与同一尺度下三角形中相比明显要大,即虎纹捕鸟蛛在稳定运动阶段的运动稳定性要高于昆虫三角步态运动的稳定性.在步足的替换阶段,步足的分布呈三角形,质心始终位于支撑三角形内接近中心位置(图4(a)).因此虎纹捕鸟蛛的运动稳定性优于六足昆虫,即虎纹捕鸟蛛冗余的步足结构对其运动过程的稳定性有所提高.但蜘蛛运动中各步足的交替时间是必然存在的,冗余的结构也势必会对其交替时间有所影响,从而间接的对其运动速度产生一定的影响.实验条件下虎纹捕鸟蛛的运动速度要明显低于同等运动条件下的六足昆虫,同时在平时饲养中发现,地行蜘蛛

的平均运动速度也不高。众所周知,动物生活特性的选择与其特殊的生理结构分不开。自然界中蜘蛛的基本生存均不建立于高速运动的基础上,以其独特的技能生存,例如以毒液恐吓敌人,采用织网捕食等。因而在机器人以及其他机械器件的驱动设计中,要根据实际要求取舍运动稳定性和速度,从而优化机械运动。例如在星际探险中,机器人的可靠运动比起快速运动更加重要。

目前对节肢动物虎纹捕鸟蛛稳定性的研究还处于前期探索阶段,有许多方面考虑的不是很全面。本文从蜘蛛水平面运动行为的观察入手,将研究限定在水平直线传统静态稳定性分析的基础上,从而获得蜘蛛的一些基本运动学信息,为后续蜘蛛多方面的研究(如越障、残肢、干扰等),提供基本的认知。而对于蜘蛛高速运动稳定性的研究,仅从运动学方面讨论,存在一定的不足。故在后续的工作中,将利用我所研制的动物运动行为与动力学测试系统,同步测试并记录运动中蜘蛛各步足的力学和运动学信息。将两者结合后分析其动力学问题,从而揭示蜘蛛运动的动态稳定性问题,以及其步足间的协调及其对速度的影响。

3.4 各步足的功能

为了适应地面穴居生活和捕食需要,虎纹捕鸟蛛的 4 对步足的形态差异使其运动具有自己的独特之处^[19]。各步足的结构以及步足在替换过程中均存在很大的区别,因此各步足在运动中发挥的作用也存在着一一定的差异。

步足 1 是所有步足中最长的步足,其负荷因数明显小于其他步足,在一侧的 1 号步足还没着地时,另一侧的步足就已经抬起,与速度并没有相关性,表现出很大的随机性(表 2)。此外,在整个支撑阶段,步足 1 的腿胫角、胫附角和提升角的变化微小,即在腿截面内各关节的转动微小;而在摆动阶段,各关节有明显的伸展与卷曲,转动角度变化较大,存在一种试探行为(图 5(a),表 3)。接触反力测试结果显示其作用力方向与运动方向相反^[20],可见步足 1 在运动中主要起导向、探路和缓冲的作用,并且在野外生存中步足 1 还可用于捕食^[31]。步足 4 与 1 的结构类似,长度稍短

一些,但行为特点和步态特征参数存在较大差异(单腿步距 t 检验 0.003,负荷因数 t 检验 0.001 均小于 0.05)。对侧步足 4 的相互替换发生在半周期处,一侧的接地,另一侧的即行离地,负荷因数接近等于 0.5(表 2);在支撑阶段步足 4 不断伸展释放能量以推动身体向前运动,摆动阶段步足 4 不断卷曲蓄积能量,这种较大程度的卷曲和伸展为运动提供充足的驱动能(表 3)。整个运动周期内步足 4 偏向角的变化最小,即在卷曲和伸展过程中,其与运动方向夹角基本一致。并且水平直线运动中蜘蛛的主要驱动力由步足 4 产生,接触力方向与运动方向也基本一致^[20]。这种运动特征大大提高了步足 4 的驱动效率,也有利于其转弯运动(图 5(d),表 3)。步足 2 和 3 的结构以及动作方式较为相似而且步态特征参数也比较接近(单腿步距的 t 检验为 0.282,负荷因数 t 检验为 0.753,均大于 0.05 无明显差异),将两者归在一处说明。步足 2 和 3 位于身体的中部,大半周期处在支撑相,它们交替时间较长,一侧的步足落地后,稍后另一侧的步足才会离开,因而两者的负荷因数较大(表 2)。步足 2 和 3 的结构决定其卷曲和伸展方向与运动方向的角度较大(约 75°),与横向趋于一致(表 3),主要由靠近身体的关节 c 在体平面内的摆动使足端的动作与运动方向相适应,类似于桨。并且步足 2 和 3 在平面内的侧向力均较大^[26],横向上适合承载较大的载荷;因而运动中步足 2 和 3 主要是支撑身体离开地面,在横向上能够承受较大冲击力,利于运动的横向稳定;并且在运动方向有一定的辅助驱动作用(图 5(b), (c))。

以上讨论了健康蜘蛛的步足功能,但在现实生活中蜘蛛可以在失去一只或几只步足的情况下继续运动,那么蜘蛛是如何运动的,其步足间功能是如何转换的,整个代偿机制是如何实现的?因此进一步研究虎纹捕鸟蛛运动代偿机制,对保证机械运动的稳定、机器人的设计和步态规划均有积极意义。例如在恶劣的环境中,八足机器人在某一或几个驱动足损坏的情况下,通过步足代偿机制重新自我规划步态,那么机器人可以继续或部分的完成其任务而不至于完全瘫痪,将极大提高机器人的工作能力、整体的可靠性和经济性。

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 Zaaf A, Damme R V, Herrel A, et al. Spatio-temporal gait characteristics of level and vertical locomotion in a ground-dwelling and a climbing gecko. *J Exp Biol*, 2001, 204: 1233–1246
- 3 Sirirak T N P, Tai Y C, Ho C M, et al. Microbat: A palm-sized electrically powered ornithopter. *Workshop Biomorph Robot*, 2000, 8: 14–16
- 4 Wang M, Zang X Z, Fan J Z, et al. Biological jumping mechanism analysis and modeling for frog robot. *J Bionic Eng*, 2008, 5: 181–188
- 5 Crespi A, Badertscher A, Guignard A, et al. Amphibot I: An amphibious snake-like robot. *Robotics Auto Sys*, 2005, 50: 163–175
- 6 Kato N. Control performance in the horizontal plane of a fish robot with mechanical pectoral fins. *IEEE J Oceanic Eng*, 2000, 25: 121–129
- 7 Collins S, Ruina A, Tedrake R, et al. Efficient bipedal robots based on passive-dynamic walkers. *Science*, 2005, 307: 1082–1085
- 8 Manter J T. The dynamics of quadrupedal walking. *J Exp Biol*, 1938, 15: 522–540
- 9 Pridmore P A. Trunk movements during locomotion in the marsupial *monodelphis domestica* (*Didelphidae*). *J Morphol*, 1992, 211: 137–146
- 10 Coppenolle V I, Aerts P. Terrestrial locomotion in the white stork (*Ciconia ciconia*): Spatio-temporal gait characteristics. *Anim Biol*, 2004, 54: 281–292
- 11 Wittlinger M, Wenner R, Wolf H. The desert ant odometer: A stride integrator that accounts for stride length and walking speed. *J Exp Biol*, 2006, 210: 198–207
- 12 Anderson F C, Pandy M G. Dynamic optimization of human walking. *J Biomech Eng*, 2001, 123: 381–390
- 13 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
- 14 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
- 15 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: 2697–2703
- 16 梁宋平, 覃于宾, 张东裔, 等. 虎纹捕鸟蛛毒的生物学活性鉴定. *动物学研究*, 1993, 14: 60–65
- 17 费瑞, 杨洋, 张丽娇, 等. 蜘蛛毒素的研究概况及应用. *吉林大学学报(医学版)*, 2004, 30: 994–996
- 18 Madsen B, Shao Z Z, Vollrath F. Variability in the mechanical properties of spider silks on three levels: Interspecific, intraspecific and intraindividual. *Int J Biol Macromol*, 1999, 24: 301–306
- 19 Oroudjev E, Soares J, Arcidiacono S, et al. Segmented nanofibers of spider dragline silk: Atomic force microscopy and single-molecule force spectroscopy. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2002, 99: 6460–6465
- 20 Land M F. Stepping movements made by jumping spiders during turns mediated by the lateral eyes. *J Exp Biol*, 1971, 57: 15–40
- 21 Bromhall C. Spider heart-rates and locomotion. *J Comp Physiol B*, 1987, 157: 451–460
- 22 Shultz J W. Walking and surface film locomotion in terrestrial and semi-aquatic spiders. *J Exp Biol*, 1987, 128: 427–444
- 23 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
- 24 Ohnishi T, Asakura T. Walking behavior of spider-robot with adaptation of environment information. In: *SICE 2004 Annual Conference*, Sapporo: Society of instrument and control engineers, 2005. 3: 1999–2003
- 25 Gasparetto A, Vidoni R, Seidl T. Passive control of attachment in legged space robots. *Appl Bionics Biomech*, 2010, 7: 69–81
- 26 朱明生, 宋大祥. 虎纹捕鸟蛛(蜘蛛目: 狍蛛科: 捕鸟蛛亚科)的分类研究. *河北大学学报*, 2000, 20: 53–56
- 27 肖世旭. 大壁虎的步态实验与分析. 博士学位论文. 南京: 南京航空航天大学, 2006
- 28 Cavagna G A, Heglund N C, Taylor C R. Mechanical work in terrestrial locomotion: Two basic mechanisms for minimizing energy expenditure. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*, 1977, 233: R243–R261
- 29 Takanobu H, Motegi S, Sanada M, et al. Spider based octopod. *Nippon Robotto Gakkai Gakujutsu Koenkai Yokoshu*, 2004, 22: 1F21
- 30 徐小云, 颜国正, 丁国清. 微型六足仿生机器人及其三角步态的研究. *光学精密工程*, 2002, 10: 392–396
- 31 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, 3: 298–299