

关于昆虫步态运动时神经控制机理的动力学分析*

张健鹏 王如彬 沈恩华 张志康

(华东理工大学信息科学与工程学院认知神经动力学研究所,上海 200237)

摘要 在 John Schmitt 和 Philip Holmes 工作基础上建立一个考虑阻尼效应的昆虫 LLS(lateral leg - spring)模型,并在 MATLAB 环境下对其步态运动进行计算机数值模拟,对昆虫在水平面爬行步态进行分析,发现考虑阻尼的模型更符合实际情况,并表现出更好的稳定性,证明了由力学和几何定理主导的控制行为在维持昆虫爬行的稳定性方面起到了十分重要的作用,从而减轻了神经系统的负担,同时也说明了引入阻尼在提高运动稳定性方面发挥的作用.

关键词 运动认知, 控制规则, LLS 模型, 爬行步态, 几何力学, 预反射

引言

运动认知活动是人类以及其他智能生物接受周围环境信息,与外界进行相互作用和赖以生存的自然过程^[1].爬行和行走是有足动物的一项基本的运动形式.步态运动的研究在研制行走机器人、研制智能义肢和康复工程等方面具有广泛的应用前景.

生物的步态控制是有层次的和模块化的.一个基本的步态控制依赖于三个层次的不同控制回路共同作用.处于最底层的是神经-力学控制层,其主要作用是神经对一定的身体姿态做出反应,从而触发或调整肌肉的作用以保证步态的稳定.第二层是 CPG(Central Pattern Generator)控制的前馈回路,通过适当地调节 CPG 网络和运动神经元的输出,并与感觉反馈驱动的反射相配合,使动物的步态更加灵活稳定.在最高层的皮层活动区,动物通过对环境变化的感知能力调整步态之间的节律以改变移动方向和速度来实现掠食或自卫行为^[2].

步态控制的各个模块之间,各个层次之间相互作用,相互耦合来实现稳定而高效的行走或爬行.生物步态的各控制层在相互耦合的同时保持一定的独立性,它们分工明确,各尽所能.同时我们发现,几何力学在维持动物周期步态的稳定性过程中起到了相当重要的作用,使得生物的神经中枢可以在一定程度上从重复的动作细节中解放出来,转而处理其他相对来说更加重要的事情,以提高控制系

统的工作效率. Brown 与 Loeb 将这种零滞后的,神经肌肉骨骼系统对抗动的固有响应定义为预反射(preflex)^[3].这里面所说的力学与几何定理,指的是昆虫肢体姿态所决定的几何、力学的关系(见图 2 至图 4 的几何关系和力学模型),在维持昆虫爬行的稳定性方面起到了重要作用.也就是说,我们假设在基本的几何、力学关系的作用下,昆虫爬行的肢体间的姿态能够维持爬行时的运动稳定性.传统的方法是通过一定的控制作用,使控制对象达到一定的姿态,从而达到行走的稳定,例如本田公司生产的人形机器人 ASIMO 就以这种形式实现控制.而本文在前人的工作基础上则提出了另一个可能性,即在很少的神经控制作用下,仅仅遵循基本的动力学及几何关系,也能够达到稳定的爬行运动.这种被动的动态行走方式能够表现出较高的能效与较好的稳定性,且行走姿态也比较自然.这为我们进行行走机器人的研究提供了新的思路.

本文将在 John Schmitt 等人工作基础上建立了一个昆虫爬行运动的更接近于实际情况的力学模型,在给定的速度下,本文考虑昆虫步态的底层控制,即力学-神经控制层,通过对模型的仿真获得的数据进行分析,来证明通过本体感受器感受爬行时的机械力学信息并进行反馈,昆虫能在一个给定的速度上保持爬行步态的稳定,从而说明这种步态控制的层次特点.

1 昆虫爬行步态的力学模型

1.1 昆虫爬行步态的描述

昆虫因为其特殊的生理构造,在爬行的时候具有高度的稳定性和较强的抗干扰能力,特别是较为简单的神经系统结构^[4],更适合用于仿生机机器人的研制,因而引起了人们的广泛关注.目前众多足式步行机器人都是以昆虫的步态行走为蓝本进行研制的,如德国慧鱼公司研制的慧鱼仿生六足机器人^[5],目前已经成为较成熟的步行平台,应用于众多的工程科研领域.

如图1所示,昆虫一共6条腿,每侧3条,每条5节.它行走不可能同时将6腿迈动.也不能像其他2、4足动物那样同时迈动一侧足,否则身体就会悬空或者摔倒.所以昆虫把6足分成2组,第一组由右前足、左中足、右后足组成.另外一组由左前足、右中足、左后足组成.昆虫向前爬行一步,身体就用两组中的一组支撑身体,另外一组则稍举起脱离地面向前迈进.这样昆虫始终被一个十分稳定的3角结构支撑着.

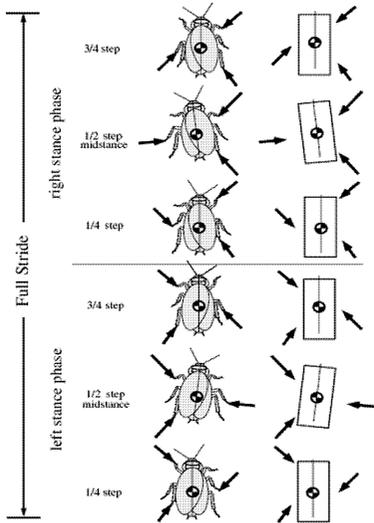


图1 昆虫的三角步态行走

Fig.1 Two-dimensional dynamics of hexapod running

当一组三角形支架中所有的足同时提起时,另一组三角形支架的三只足原地不动,支撑身体,并以其中足为支点,前足胫节的肌肉收缩,拉动身体向前,后足胫节的肌肉收缩,将虫体往前推,因此身体略作以中足为支点的转动,同时虫体的重心落在另一组“三角形支架”的三足上,然后再重复前一组的动作,相互轮换周而复始.这种行走方式使昆

虫可以随时随地停息下来,因为重心总是落在三角支架之内.这就是典型的三角步态行走法.

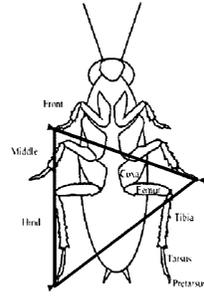


图2 支撑三角形

Fig.2 The support Tripod of hexapod running

仔细观察昆虫的爬行就会发现,它先由一组足的前足向前伸出,并且用附节上的钩爪抓住物体表面,起到向上拉的作用,另一侧的中足特别是同侧的后足,便尽量伸开足上的节,把身体推进.由于前足后足长度不同,后足向前用力的时候,便将离开地面的中足与身体偏转向前进路线的一方,使得身体中轴倾斜.当另一组足的前足抬起的时候,为了让身体向前行进,向与身体相反方向伸,后足用力推进,又将身体扭向另一方向.于是,昆虫实际上以“之”字形的爬行路线前进的如图1所示.

1.2 动力学模型

由于昆虫的头-胸-躯干不能灵活弯曲,而且腿部的重量只占全身重量的6%^[6],考虑到典型的展开的昆虫的腿的姿态,John Schmitt 和 Philip Holmes 提出了一种水平面运动的类似模型(不考虑重力).我们认为在这个模型中,径向(垂直)平面及水平面的相互关系仅仅是微弱的动态耦合,这样就可以通过对模型在水平面上进行独立的分析来帮助我们对整个六自由度躯体运动作较为深入的理解,而不需要考虑垂直平面上的运动对模型的影响.对模型进行理想化,认为其姿态循环的占空比为50%,不考虑垂直平面上的起跃相.

分别对所有腿和各个单腿的力学平台测量显示,在稳定地向前爬行时,力连续地从触地时的零开始连续增加,上升到最高点后又开始下降,直到在又一次抬起时恢复为零.半个步态周期的净纵向力曲线与负的正弦曲线相似,在前半周期为运动的阻力,在后半周期又成为运动的助力;净侧向力在全步态周期内的曲线与正弦曲线相似,当左三角触地时方向向右,而右三角触地时方向向左^[7].如文

献[8]所描述的可以将每条腿所产生的力和力矩分解成作用在肢体-躯干铰接点上的等效作用. 这样每一个三角可以被一个等效的铰接于躯干一个固定点的单“虚拟”腿所代替.

因此,可以将昆虫三角支架的联合作用简化为一个模拟肌肉-内表皮系统的弹性肢体,设昆虫的质量为 m ,转动惯量为 I ,弹性腿初始长度为 l . 为了便于建模,这里分别采用了惯性平面坐标系 (x, y, θ) 和相对于足部位置的极坐标 (ζ, ψ) 来对模型进行动力学描述.

如下图 3 所示, F 点表示当前足末端位置, P 点为腿与躯干的连接点, G 点表示重心,表示体轴与惯性坐标系纵轴的夹角. d 表示 p 点与 G 点的距离,在本文中为了简化,使 $d = 0$. 而 β 表示作用足起始状态相对于体轴的角度. f_1 和 f_2 表示腿部作用力以体轴为纵坐标,垂直于体轴方向为横坐标的两个分量,在松弛状态下模型足部的长度为 l_0 .

以相对于体轴的单位向量来表示当前足受到的力 $f = (f_1 \hat{e}_1 + f_2 \hat{e}_2)$. 同时令 $r = x \hat{e}_x + y \hat{e}_y$ 来表示模型质心 G 的位置,以 θ 来表示体轴方向相对于惯性坐标系 y 轴的角度, r_F 表示当前足的位置. 而 $R(\theta)$

$$= \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$

表示坐标系 (\hat{e}_1, \hat{e}_2) 与 (\hat{e}_x, \hat{e}_y) 之间的转换矩阵.

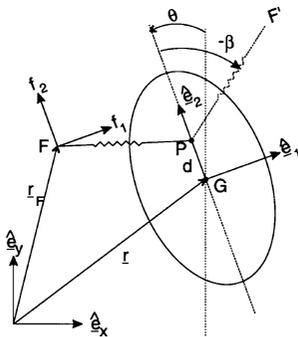


图 3 惯性平面描述

Fig. 3 The coordinate with respect to the inertial plane

图 4 为以极坐标 (ψ, ζ, θ) 描述昆虫的静态模型,以左足的末端为原点,其中 ψ 表示质心相对于坐标原点的角度, ζ 表示质心相对于坐标原点的距离,而 η 表示连接点 P 与足部末端的距离也就是腿长.

为了便于数学描述,采用事件驱动方式,即弹性腿经过压缩-伸长过程回到原长的时刻,来决定

左右腿的换步. (图 3 和图 4 引自^[13]).

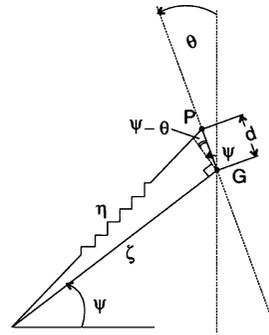


图 4 极坐标描述

Fig. 4 The polar coordinate relative to foot position

假设一开始起作用的弹性腿为左腿,且初始长度为 l_0 ,与体轴的夹角为 β . 给质心一个初速度 v ,由于惯性作用,质心将沿着初速度方向压缩弹性足. 同时,弹性足将对质心施加弹力,从而改变质心速度的方向和大小,并且将质心的动能转换为势能储存. 在腿部弹力的作用下,质心速度连续减小直到为零. 此时,弹性腿的压缩量最大,而长度最小,因此弹性腿开始伸长. 在腿部弹力的作用下,质心速度开始增大,并在弹性腿腿长度回到初始值时达到最大,这时右腿开始作用,重复前面的过程.

John Schmitt 等人通过对上述模型的描述整理得到昆虫爬行时的动力学方程为^[9]

$$\begin{aligned} m\ddot{\zeta} &= m\dot{\zeta}\dot{\psi} - k(\zeta - l) - c\dot{\zeta} \\ 2m\dot{\zeta}\dot{\zeta}\dot{\psi} + m\dot{\zeta}^2\ddot{\psi} &= k_h k l (\zeta - l) (\psi - (-1)^n \theta) \\ I\ddot{\theta} &= -(-1)^n k_h k l (\zeta - l) (\psi - (-1)^n \theta) \end{aligned} \quad (1)$$

其中整数 n 对脚步进行计数,约定 n 为偶数时表示左腿(L),奇数时表示右腿(R). 每一次迈步以腿松弛长度 l ,与身体中心轴成 $(-1)^n \beta$ 度开始,以腿部恢复到舒展状态结束, $k_h k l (\zeta - l) (\psi - (-1)^n \theta)$ 为弹性腿轴向力函数和弹性腿体轴之间夹角函数的乘积,这体现了简单的神经反馈作用.

昆虫体表有两类主要的本体感受器官:毛细胞和钟形感受器. 其中,毛细胞由表皮突或绒毛构成,连接于单个或多个神经元. 这种感受器能执行多种功能,包括机械感受,化学感受,湿度检测,以及热感应. 在图 5 中,我们可以观察到毛状组织生长在可变形的基座上. 毛细胞起到了检测肢体间夹角的作用. 图 6 为昆虫体表的钟形感受器. 钟形感受器由穹隆状的表皮圆突组成,对表皮变形比较敏感. 其主要作用为本体感受,提供有关身体方位,腿部、

翅膀及触角位置. 这类感受器多见于身体的膜体或者弹性区域,如肢体的基部,翅膀的基部.

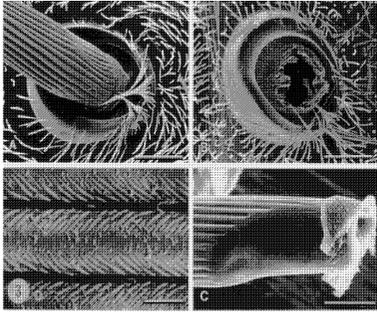


图5 昆虫体表的毛细胞
Fig.5 Trichoid sensillum of insects

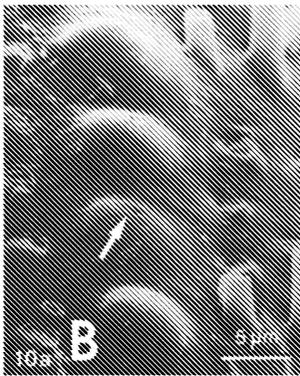


图6 昆虫体表的钟形感受器
Fig.6 Campaniform sensillae on the cuticle of insects

在运动方程(1)中,第一个等式为昆虫爬行时平移运动方程,第二个等式为关于足部换腿时的转动方程,第三个等式为刚体绕铰接点的摇摆运动方程.其中考虑了由于肌肉摩擦力产生的能量损耗的作用,用阻尼项 $c\dot{\zeta}$ 表示.

在 John Schmitt 等人的模型中,仅仅考虑了肌肉摩擦阻尼的作用,而在第二和第三个等式中都没有体现阻尼的作用.也就是说他们所建的模型没有考虑昆虫爬行时腿与地面摩擦力的相互作用.而只有当爬行昆虫与地面存在摩擦力的条件下昆虫才会按照“之”字形路线前行.我们通过数值分析发现,他们是通过对所建模型的参数值的不断调整来实现昆虫的爬行轨迹.因此这种模型的建立是虚拟的和理想化的,从而并不符合昆虫爬行的实际情况.事实上一定条件下,引入一定形式的阻尼反而有利于系统的稳定性.由于昆虫是一个生物系统,因此在运动过程中肌肉内部的摩擦以及足与地面摩擦产生的能量损耗会不断地由昆虫本体的生物能进行补充,基于这些原因,我们对原有的模型进

行修正,并引入新构造的阻尼项.则系统的动力学方程变为以下形式:

$$\begin{aligned} m\ddot{\zeta} - c(\ell_0 - \zeta^2)\dot{\zeta} &= m\dot{\zeta}\psi^2 - k(\zeta - \ell) \\ 2m\dot{\zeta}\zeta\dot{\psi} + m\zeta^2\ddot{\psi} &= k_h k l (\zeta - l) (\psi - (-1)^n \theta) \quad (2) \\ I\ddot{\theta} + c'\dot{\theta} &= -(-1)^n k_h k l (\zeta - l) (\psi - (-1)^n \theta) \end{aligned}$$

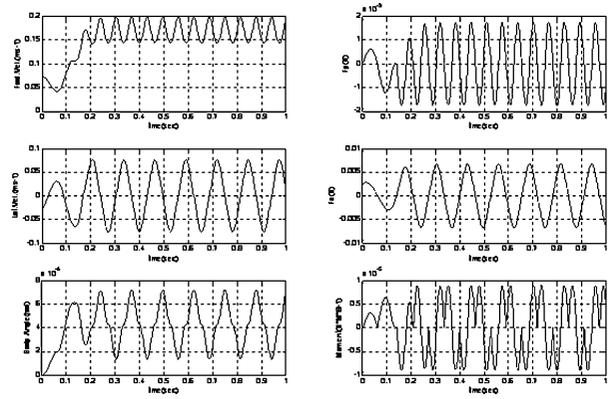


图7 各运动变量随时间变化曲线从上到下,自左往右分别为质心的纵向速度,侧向速度,偏摆角,腿部纵向弹性力,腿部侧向弹性力,以及髋部扭矩

Fig.7 Characteristics of insect locomotion during 1 second, represents the variation of forward speed, lateral speed, yaw angle, leg forces and body moment respectively

其中 l_0 为介于 ζ 最大长度和最小长度之间的一个常量, c 是一个小阻尼系数.在动力学方程中我们把昆虫的平移运动方程改变为自激振动方程.当 $\ell_0 < \zeta$ 时,系统消耗能量;当 $\ell_0 > \zeta$ 时,系统从昆虫本体吸收能量,以维持自身的爬行和正常运动.这样,在一部分步态周期内能量损耗,而在另一部份周期内又得到生物能的补充.此外,为了使昆虫能够沿“之”形运动,在摇摆运动方程中考虑了线性阻尼的效应.把运动方程修正为自激振动系统,并不意味着昆虫的爬行运动是一个自激系统.而是利用了自激系统中正负阻尼能够维持振动系统周期运动的特性来描述昆虫的稳定的爬行运动.实际上在生物系统中,为简单起见,我们有时并不需要非常严格地按照生物系统本身来建模,而可以按照生物系统运动过程所表现出来的运动特征和动力学特性用一个物理模型去替代它,只要这个物理模型能够展现该生物系统的活动规律.而在我们的模型中,正是利用了这样一个思想同时结合了昆虫爬行过程中的生物学特性和生物结构,准确地再现了由实验数据给出的昆虫爬行时的运动轨迹和运动稳定性(图7).这样的研究方法不是再造一个昆虫

的爬行运动,而是再造一个生物学意义上的类昆虫爬行运动,这就是仿生学的含义.

2 计算机数值模拟与结果分析

本文所叙述的模型是一个分段连续系统,被用来描述有腿行走并表现出较好的稳定性^[11],随着足部的踩下和抬起,定义拉格朗日方程的约束发生了改变.使用普通微分方程(ODE)来描述这种分段连续的混合动力学机械模型,在这种系统中,由相空间中解的位置所决定的事件相关法则驱动其状态在一组有界的向量空间中发生变化^[2].

我们使用^[12]中所介绍的 *Blaberus discoidalis* 蟑螂相应的参数来进行仿真,其中: $k = 2.25\text{Nm}^{-1}$, $m = 0.0025\text{kg}$, $I = 2.04 \times 10^{-7}\text{kgm}^2$, $l = 0.01\text{m}$, $\beta = 1$. 由于在换步的时,描述系统的坐标系是镜像交替的,而的变化使运动方程也发生了变化,系统的所有状态变量中,仅仅由绝对的惯性坐标系描述的质心速度和偏摆角是连续的. 因此在进行 MATLAB 仿真时,我们采用了以下方法,即在由腿部长度恢复到舒张状态决定的换步时刻前一瞬间将连续的速度和偏摆角提取出来,经过几何转换,变换成另一镜像坐标下的初始值代入描述运动的微分方程中进行运算,直到下一次换步时为止,如此循环.

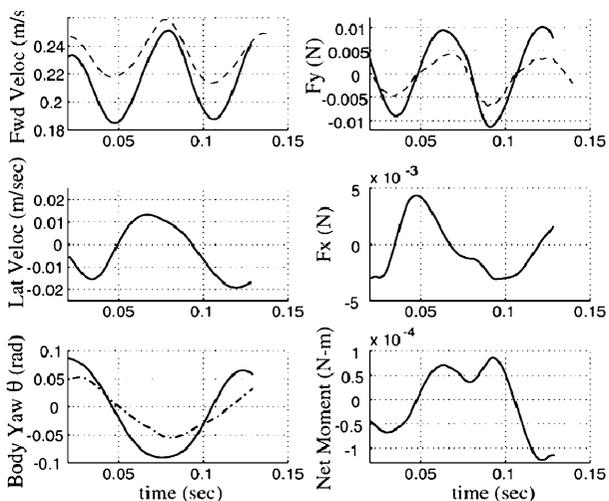


图 8 对 *Balabus discoidalis* 蟑螂爬行的两次观测数据, 分别用实线与虚线表示

Fig. 8 The observed variations over a stride. dashed curves are also provided to illustrate the variation of magnitudes with respect to different trial

如图 7 是一组描述运动状态的曲线. 通过观察可以发现,经过一段时间的调整之后,各变量最终达到了稳定;对纵向力和侧向力的观察可以发现,

半个步态周期的纵向力曲线与负的正弦曲线相似,净侧向力在全步态周期内的曲线与正弦曲线相似,这与观测的数据一致^[7]. 纵向平均速度维持在 0.15m/s 到 0.22m/s 之间,换步节奏在 6 ~ 10 赫兹左右,考虑到只在水平面上进行分析所造成的差异,这些数据基本上与昆虫爬行时的实验观测数据相符^[13],如图 8 所示. 通过改变模型的初始状态,以及在不同的阻尼系数条件下进行多次数值模拟,我们发现相较于原来的模型,本文所提出的修正模型能够在更大的初值范围内都能够达到很好的稳定性,且各个变量仍能够维持在较为合理的取值范围之内. 而根据前人所做的模型却达不到这样的效果. 如图 9 为昆虫爬行时的运动轨迹,仿真结果显示模型在爬行方向上具有非常好的稳定性.

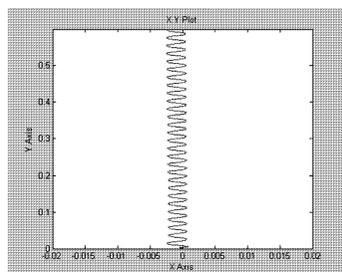


图 9 昆虫爬行时质心运动轨迹
Fig. 9 The trajectory of COM

3 结论

通过在 John Schmitt 等人工作的基础上建立一个更符合实际的昆虫爬行模型并进行了数值模拟,我们获得了昆虫爬行的稳定步态. 这一结果进一步证明了由 Brown 等人提出的预反射理论,即在快速爬行时,由于高层的指令系统无法及时响应,昆虫自身的力学结构在维持平衡时起到了主要的作用. 事实上这是一种较为合理的控制策略,可以使神经系统从繁杂的运动控制中解放出来,处理更为高级的控制任务,如路径规划,避障以及决策等,以减少神经计算的负担^[10]. 这一控制策略已经引起了研制行走机器人的科研人员的注意,因为这一控制策略在减少耗能等方面意义重大,并在此理论上研制了一系列被动动态机器人,表现出了相当自然的节能行走步态^[14].

参 考 文 献

1 孙久荣. 脑科学导论. 北京:北京大学出版社,2001:1 ~ 2

- (Sun Jiurong. Introduction of Brain science. Beijing: Beijing University press, 2001: 1 ~ 2 (in Chinese))
- 2 Philip Holmes, Robert J, Full Dan Koditschek, John Guckenheimer. The Dynamics of Legged Locomotion: Models, Analyses, and Challenges. *SIAM REVIEW Society for Industrial and Applied Mathematics*, 2006, 48(2): 207 ~ 304
 - 3 Brown IE, Loeb GE, "preflexes" – programmable, high – gain, zero – delay intrinsic responses of perturbed musculo-skeletal systems. *Soc Neurosci Abstr*, 1995, 21: 562 ~ 570
 - 4 T M Kubow, R J Full. The role of the mechanical system in control: a hypothesis of self – stabilization in hexapedal runners. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B*, 1999, 354: 849 ~ 861
 - 5 冯巍, 杨洋. 慧鱼六足仿生机器人步态研究与实现. 机械设计与研究, 2005, 21(3): 35 ~ 37 (Feng Wei, Yang Yang. A research and realization on the gait of the Fischertechnik hexapod bionic robot. *Machine Design and Research*, 2005, 21(3): 35 ~ 37 (in Chinese))
 - 6 Kram R, Wong B, Full RJ. Three – dimensional kinematics and limb kinetic energy of running cockroaches. *Journal of Experimental Biology*, 1997, 200(13): 1919 ~ 1929
 - 7 John Schmitt, Philip Holmes. Mechanical models for insect locomotion: Dynamics and stability in the horizontal plane I. Theory. *Bio. Cybern.* 2000, 83: 501 ~ 515
 - 8 Ting LH, Blickhan R, Full RJ. Dynamic and static stability in hexapedal runners. *J. Exp. Biol.*, 1994, 197: 251 ~ 269
 - 9 John Schmitt, Philip Holmes. Mechanical models for insects locomotion: active muscles and energy losses. *Biological Cybernetics*, 2003, 89: 43 ~ 55
 - 10 王如彬, 张志康, 沈恩华. 大脑皮层内神经元集团的能量演变. 动力学与控制学报, 2008, 6(1): 55 ~ 60 (Wang Rubin, Zhang Zhikang, Shen Enhua. Energy evolution of neural population in cerebral cortex. *Journal of Dynamics and Control*, 2008, 6(1): 55 ~ 60 (in Chinese))
 - 11 Ruina. A, Non – holonomic stability aspects of piecewise holonomic systems. *Rep Math Phys*, 1998, 42(1/2): 91 ~ 100
 - 12 Schmitt J, Holmes P. Mechanical models for insect locomotion: stability and parameter studies. *Physica D*, 2001, 156(1 – 2): 139 ~ 168
 - 13 J. Schmitt, M. Garcia, R. C. Razo, P. Holmes, R. J. Full. Dynamics and stability of legged locomotion in the horizontal plane: a testing case using insects. *Biol. Cybern.*, 2002, 86: 343 ~ 353
 - 14 Jonathan E. Clark, Jorge G. Cham, Sean A. Bailey, Edward M. Froehlich, Pratik K. Nahata, Robert J. Full, Mark R. Cutkosky. Biomimetic Design and Fabrication of a Hexapedal Running Robot, Robotics and Automation, Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Volume 4, Issue, 2001: 3643 ~ 3649

AN EXPLORATION OF DYNAMIS ON NEURAL CONTROL MECHANISM OF INSECT LOCOMOTION*

Zhang Jianpeng Wang Rubin Shen Enhua Zhang Zhikang

(Institute for Cognitive Neurodynamics, School of Information Science and Engineering,
East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract A horizontal LLS (lateral leg – spring) locomotion model of insect with damps was developed based on the work of John Schmitt and Philip Holmes, and the simulation was conducted in the MATLAB environment. The analysis of the locomotion gait of the model suggests that the model concerning damps is closer to the reality, and higher level of stability is attained. Thus the potential importance of control algorithm dominated by geometry and mechanical principle, which to some extent reduced the burden of nervous system of insects, was proposed. And the role the damps play in the stability was also discussed.

Key words motion cognition, control algorithm, LLS model, locomotion, geometrical mechanics, preflex