

# 基于能量的蛇形机器人蜿蜒运动控制方法的仿真与实验研究

王智锋<sup>1,3</sup> 马书根<sup>1,2</sup> 李斌<sup>1</sup> 王越超<sup>1</sup>

**摘要** 能量作为最基本的物理量之一,联系着蛇形机器人蜿蜒运动的各个方面. 能量耗散描述了环境交互作用,能量转换对应着运动的动力学过程,能量平衡反映了蜿蜒运动的协调性. 提出一种基于能量的蛇形机器人蜿蜒运动控制方法——被动蜿蜒. 通过输出关节力矩控制机器人蜿蜒运动,由机器人的能量状态调整力矩的大小. 仿真结果显示了被动蜿蜒控制下机器人的构形、角度、力矩、能量状态和转弯特性,并对控制力矩进行了递归分析. 基于 Optotrak 运动测量系统构建了被动蜿蜒控制的模拟/物理混合实验系统. 进行了移动实验和拖动实验,前者改变环境的摩擦特性,后者改变机器人的负载. 仿真和实验验证了蛇形机器人被动蜿蜒控制的有效性和适应性.

**关键词** 蛇形机器人, 蜿蜒运动, 能量, 适应性, 运动测量系统

**DOI** 10.3724/SP.J.1004.2011.00604

## Simulation and Experimental Study of an Energy-based Control Method for the Serpentine Locomotion of a Snake-like Robot

WANG Zhi-Feng<sup>1,3</sup> MA Shu-Gen<sup>1,2</sup> LI Bin<sup>1</sup> WANG Yue-Chao<sup>1</sup>

**Abstract** Energy plays an important role in the serpentine locomotion of a snake-like robot. The energy dissipation describes the environmental interaction; the energy transformation reflects the locomotion dynamics; the energy balance relates to the locomotion coordination. An energy-based control method for a snake-like robot, named passive creeping, is proposed. This method controls the robot by using torque inputs which are adjusted by the robot's energy state. In simulation, the configurations, angles, torques, energy states, and turning characteristics are revealed, and the torque data are analyzed by using a recurrence plot. Based on an Optotrak motion capture system, a virtual/physical mixed experimental system is constructed. A locomotion experiment and a drag experiment are performed. The former changes the environment, and the latter alters the payload. The simulations and experiments demonstrate the validity and adaptability of the passive creeping.

**Key words** Snake-like robot, serpentine locomotion, energy, adaptability, motion capture system

生物蛇遍布世界各地且种类繁多,在各种环境中都能够发现它们的身影. 蛇具有典型的无肢运动方式,根据其身体结构设计的蛇形机器人能够模仿蛇的无肢运动<sup>[1-2]</sup>. 蛇形机器人的无肢运动方式是区别于轮式、履带式 and 腿式移动的又一类新型的移动方式. 这种移动方式具有如下的特点: 1) 环境适应性,能够适应平地、沙地、水中、狭窄复杂环境等; 2) 步态多样性,能够实现蜿蜒运动、直线运动、侧

向运动、伸缩运动等,而蛇形机器人还能实现生物蛇不具有的其他运动步态,如翻滚运动、螺旋运动等; 3) 运动稳定性,因为蛇形机器人重心低、重量均匀分布,具有很好的稳定性.

然而蛇形机器人具有超冗余自由度、欠驱动、无固定基座和运动过程中与环境交互作用等特性,使得机器人动力学模型非常复杂<sup>[3-7]</sup>. 动力学的复杂性给蛇形机器人的运动控制带来了诸多挑战. 蜿蜒运动作为生物蛇最典型的一种运动,是蛇形机器人运动控制中的核心问题. 现有蛇形机器人蜿蜒运动控制方法主要分为: 1) 从形态学(即蛇的运动形状)的模仿以控制机器人的运动轨迹——Serpensoid 曲线<sup>[8-9]</sup>; 2) 从运动学或动力学模型中推导出运动控制律<sup>[10-11]</sup>; 3) 构建节律运动神经网络,即中枢模式发生器(Central pattern generator, CPG)输出关节控制量<sup>[12-13]</sup>. 基于 Serpensoid 曲线的方法是蛇形机器人控制中最普遍使用的方法,优点是能够产生各种步态且参数调整简单,缺点是步态转换不连续,

收稿日期 2010-09-08 录用日期 2010-11-24  
Manuscript received September 8, 2010; accepted November 24, 2010

国家自然科学基金(61075103),中国科学院知识创新工程青年人才领域前沿资助项目(07A1200101)资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (61075103) and the Knowledge Innovation Program of Chinese Academy of Sciences (07A1200101)

1. 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室 沈阳 110016 2. 日本立命馆大学机器人系 日本 草津 525-8577 3. 中国科学院研究生院 北京 100039

1. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, P. R. China 2. Department of Robotics, Ritsumeikan University, Kusatsu-Shi 525-8577, Japan 3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, P. R. China

缺少环境适应性等. 基于运动学/动力学模型的方法产生的蜿蜒运动不够协调, 轨迹不光滑, 因为这种基于模型的蛇形机器人控制方法缺少对蜿蜒运动特性及环境作用的考虑. 基于 CPG 的方法的优点是能够融合外部传感器信息, 但神经动力系统的复杂性使得该方法很难进一步耦合被控蛇形机器人的机械动力学. 以上方法具有各自的优缺点, 其中共性的缺陷是没有把蜿蜒运动控制问题放入“环境-本体”系统中考虑, 基本上都是侧重于某一方面, 如运动形态或复杂动力学本身. 造成这种缺陷的原因是没有找到一个合适的联系蛇形机器人的运动特点、动力学特性和环境交互之间关系的物理量.

事实上, 能量可以联系或描述蛇形机器人蜿蜒运动的各个方面: 1) 描述蜿蜒运动中机器人与环境的交互作用——能量耗散; 2) 描述蜿蜒运动中机器人的动力学过程——能量转换; 3) 描述蜿蜒运动中诸多关节之间的协调运动——能量平衡. 本研究从蜿蜒运动中能量“耗散-转换-平衡”的角度去理解蜿蜒运动的机理, 提出一种基于能量的蜿蜒运动控制方法——被动蜿蜒. 介绍基于 ODE (Open dynamics engine) 的被动蜿蜒控制仿真研究. 构建基于 Optotrak 三维测量系统的被动蜿蜒模拟/物理混合实验平台, 进行被动蜿蜒控制的移动实验与拖动实验, 所得实验结果与基于 Serpenoid 曲线控制的实验结果作对比研究. 通过仿真与实验验证这种基于能量的蜿蜒运动控制方法的有效性, 揭示被动蜿蜒控制对外部环境 (不同的摩擦环境) 和内部动力学 (未知的附加载荷) 的适应性.

## 1 能量在蜿蜒运动中的作用

生物蛇的蜿蜒运动涉及到肌肉骨骼系统、中枢神经系统与外部环境各部分之间复杂的生理反馈信息 (力、触觉、视觉、嗅觉、温度等), 运动过程中还有奇妙的运动自平衡、自稳定、自组织现象<sup>[4]</sup>. 所有这些因素使得蜿蜒运动中“环境-本体”动力系统极其复杂. 另一方面, 生物蛇蜿蜒运动时, 需要与环境相互作用 (主要为相互摩擦作用), 借助环境的反作用力推动身体的前进, 这就必然带来能量的耗散, 这部分能量的耗散是不可避免的, 同时生物蛇肌肉骨骼系统又维持与调节着运动中的能量循环过程. 所以这种由生物蛇和环境通过运动和力的相互作用引起、通过中枢神经控制的、在生物蛇的骨骼和肌肉系统内部的、在运动过程中有一部分耗散到环境中去的运动能量联系着生物蛇蜿蜒运动的各个方面, 如图 1 所示. 对照蛇形机器人的蜿蜒运动, 自然地猜想能量与蛇形机器人“环境-本体”系统的各方面也有着密切的关系.

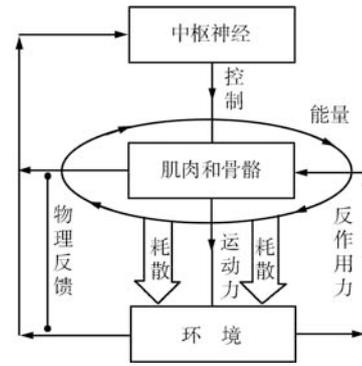


图 1 生物蛇运动的“神经-本体-环境”系统中的能量  
Fig. 1 Energy in the nerve-body-environment system of a snake's locomotion

### 1.1 能量耗散

能量的耗散反映了蜿蜒运动中蛇形机器人与环境的交互作用.

蛇形机器人的机构模型如图 2 所示.  $U_i$  ( $i = 3, \dots, n$ ) 表示蛇形机器人的第  $i$  个模块单元, 模块长度、质量和惯量张量分别为  $l_i$ 、 $m_i$  和  $I_i^b$ . 机器人的构形表示为  $\boldsymbol{x} = [x^1, x^2, x^3, x^4, \dots, x^n]^T$ , 其中,  $[x^1, x^2, x^3]^T$  为机器人在惯性坐标系  $S$  中的位姿,  $[x^4, \dots, x^n]^T$  为机器人关节的相对角度.

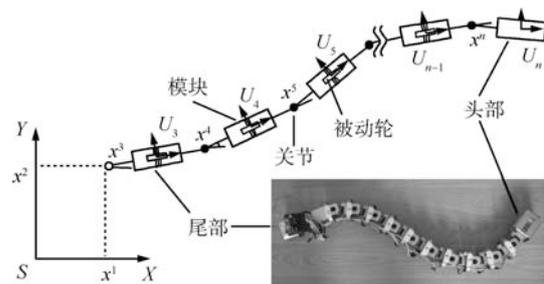


图 2 具有被动轮的蛇形机器人机构模型  
Fig. 2 Mechanism of a snake-like robot with passive wheels

由动力学分析可知, 蛇形机器人的动力学方程可以写成封闭形式<sup>[7]</sup>, 如

$$M\ddot{\boldsymbol{x}} + C\dot{\boldsymbol{x}} - {}^f\boldsymbol{Y} = \boldsymbol{\tau} \quad (1)$$

式中,  $M$  为机器人的度量矩阵;  $C$  为与科氏力及离心力相关的矩阵;  ${}^f\boldsymbol{Y}$  为摩擦力引起的广义力;  $\boldsymbol{\tau}$  为机器人的驱动力项, 即  $\boldsymbol{\tau} = [0, 0, 0, \tau_4, \dots, \tau_n]^T$ . 式 (1) 两边乘以  $\dot{\boldsymbol{x}}$  得到

$$\dot{\boldsymbol{x}}^T M \ddot{\boldsymbol{x}} + \dot{\boldsymbol{x}}^T C \dot{\boldsymbol{x}} - \dot{\boldsymbol{x}}^T {}^f\boldsymbol{Y} = \dot{\boldsymbol{x}}^T \boldsymbol{\tau} \quad (2)$$

另外, 由于  $M$  是对称的,  $\dot{M} - 2C$  是反对称的, 推导

得到蛇形机器人运动动能的变化率为

$$\dot{E} = \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} \dot{\mathbf{x}}^T M \dot{\mathbf{x}} \right) = \dot{\mathbf{x}}^T M \ddot{\mathbf{x}} + \dot{\mathbf{x}}^T C \dot{\mathbf{x}} \quad (3)$$

使用库仑摩擦力模型描述蛇形机器人与外部环境(地面)间的交互:

$$\mathbf{f}_i = [-\mu_c^t m_i g \cdot \text{sgn}(v_{S,i}^t), -\mu_c^n m_i g \cdot \text{sgn}(v_{S,i}^n)] \quad (4)$$

$i = 3, \dots, n-1$  (头部模块无被动轮). 式中  $v_{S,i}^t$  和  $v_{S,i}^n$  分别为机器人模块在全局坐标系中的线速度沿机器人身体切向和法向分解所得的速度分量;  $\mu_c^t$  和  $\mu_c^n$  分别为机器人与环境交互中沿着切向与法向的库仑摩擦系数;  $g$  为重力加速度;  $\text{sgn}(\cdot)$  为符号函数. 由虚功原理可以得到蛇形机器人运动时的耗散功率:

$$P_d = -\dot{\mathbf{x}}^T \mathbf{f} \mathbf{Y} = \sum_{i=3}^{n-1} (\mu_c^n m_i g |v_{S,i}^n| + \mu_c^t m_i g |v_{S,i}^t|) \quad (5)$$

所以, 式(2)中前两项描述了蛇形机器人运动中动能的变化率, 第3项描述了运动中的摩擦耗散功率, 等号右边描述了机器人电机的输入功率. 式(2)满足功能原理:

$$\dot{E} = \dot{\mathbf{x}}^T \boldsymbol{\tau} - P_d \quad (6)$$

式(6)中动能  $E$  具有下界(即  $E \geq 0$ ), 且耗散功率  $P_d \geq 0$ , 所以蛇形机器人“环境-本体”动力系统是被动(无源)的. 进一步, 在蛇形机器人运动中对所有时间  $t > 0$ , 总有  $\int_0^t P_d(\zeta) d\zeta > 0$ , 所以蜿蜒运动中机器人动力学系统是耗散的. 能量耗散如图1所示, 机器人整个机械系统的机械效率  $\eta_1$  由式(6)导出为

$$\eta_1 = \frac{\dot{E}}{\dot{E} + P_d} \quad (7)$$

## 1.2 能量转换

蛇形机器人运动动能中的转动动能与平动动能之间的转换联系着蜿蜒运动的动力学.

蛇形机器人蜿蜒运动中, 关节电机转动身体各个模块以推动机器人整体向前进, 在此运动过程中旋转身体模块意味着存在转动动能  $E_R$ , 而推动机器人向前运动意味着转动动能转换为平动动能  $E_T$ . 平动动能是机器人蜿蜒运动所期望获得的, 而转动动能是为获得平动动能所必须的, 所以两者之间的转换存在着某种优化关系. 下式描述了转动动能与平动动能在蛇形机器人单个模块中的关系

$$E_i = \frac{1}{2} (\mathbf{V}_{S,i}^b)^T M_i^b \mathbf{V}_{S,i}^b = \frac{1}{2} (\boldsymbol{\omega}_{S,i}^b)^T I_i^b \boldsymbol{\omega}_{S,i}^b + \frac{1}{2} m_i (\mathbf{v}_{S,i}^b)^T \mathbf{v}_{S,i}^b \quad (8)$$

式中  $M_i^b$  为广义惯性矩阵, 即  $M_i^b = \begin{bmatrix} I_i^b & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & m_i \mathbf{1} \end{bmatrix}$ , 其中  $\mathbf{1}$  表示  $3 \times 3$  的单位矩阵;  $\mathbf{V}_{S,i}^b$  为刚体速度, 可分解为角速度分量和线速度分量, 即  $\mathbf{V}_{S,i}^b = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\omega}_{S,i}^b \\ \mathbf{v}_{S,i}^b \end{bmatrix}$ .

则整个蛇形机器人的旋转动能与平动动能为

$$E_R = \frac{1}{2} \sum_{i=3}^n (\boldsymbol{\omega}_{S,i}^b)^T I_i^b \boldsymbol{\omega}_{S,i}^b \quad (9)$$

$$E_T = \frac{1}{2} \sum_{i=3}^n m_i (\mathbf{v}_{S,i}^b)^T \mathbf{v}_{S,i}^b \quad (10)$$

因为平动动能  $E_T$  直接与沿着蜿蜒运动轨迹前进的前向速度相关(并不是惯性坐标系中的直线前进速度), 所以平动动能在整个运动动能中的比例  $\eta_2$  是蛇形机器人蜿蜒运动的一个重要量化指标.

$$\eta_2 = \frac{E_T}{E_R + E_T} \quad (11)$$

指标  $\eta_2$  描述了蜿蜒运动稳定状态下能量转换的比例, 该比例关系一定程度上反映了蜿蜒运动的特点, 即往复扭转身体以推动前进.  $\eta_2$  的值高意味着较少的摆动运动就能较快地推动机器人沿蛇形轨迹前进. 而机械效率  $\eta_1$  只是定义了一般机械系统瞬时情况下的功率输入输出关系, 并没有区分摆动与前进. 所以能量比例  $\eta_2$  比起机械效率  $\eta_1$  更适用于描述稳定运动情况下的蜿蜒效率. 能量比例  $\eta_2$  在评估机器人蜿蜒运动环境适应性和构造被动蜿蜒优化适应律的研究中将起重要作用.

## 1.3 能量平衡

蛇形机器人各个运动关节之间能量的平衡与蜿蜒运动的协调性有关.

生物蛇的运动方式和生理结构有着密切的关系. 生物蛇的身体狭长且柔软, 由彼此相连的约 200~400 块脊骨组成. 蜿蜒运动步态是生物蛇在自然界中经过漫长的演化得来的, 这种高度协调性的运动必然非常适合于生物蛇的生理构造与所处的自然环境.

比起其他种类的机器人, 蛇形机器人具有更多的驱动关节, 且蜿蜒运动是所有关节运动共同作用的效果. 这种多关节协调运动, 必然涉及到能量的分布平衡问题或者多关节运动的耦合问题. 需要综合考虑机器人蜿蜒运动的能量消耗、机器人关节力矩大小和机器人动力学过程的轨道稳定等各个方面. 如此复杂的多关节协调运动的耦合问题还很难在现有能掌握的知识范围内解决, 这就使得科研人员转向自然界去学习模仿生物蛇的运动.

生物蛇无论是在进行蜿蜒运动、行波运动、直线运动还是侧向运动时, 身体中都存在一系列从头到尾传播的行波<sup>[15-16]</sup>. 基于 Serpenoid 曲线的方法把这一波考虑成各个关节角度之间的相位转移. 根据对蛇形运动的观察, 运动参数 (如幅值、频率等) 既不固定也不均匀, 即蛇形运动呈现非对称性<sup>[17-18]</sup>. 一般情况下, 生物蛇头部尾部摆动幅值较小而身体中间部分摆动幅值较大; 摆动频率根据不同的环境而改变. 而基于 Serpenoid 曲线的方法把所有这些参数看作是不变的, 降低了该方法对不同环境的适应能力与步态的灵活性. 从生物蛇头到尾的波动中, 只能获知蛇形机器人关节运动相位的次序, 表示为

$$x^n \succ x^{n-1} \succ \dots \succ x^5 \succ x^4 \quad (12)$$

式中,  $\succ$  表示相位次序的偏序符号. 这种次序关系是由蛇形机器人本体的链式机构决定的, 以此作为机器人蜿蜒运动的先验知识. 根据以上的先验知识, 提出不同于转移控制的一种动态转移方法以控制蛇形机器人的基本蜿蜒运动, 即

$$\tau_{n-i} = A_{n-i} (x^{n-i+1}(t) - x^{n-i}(t)) \quad (13)$$

$i = 1, \dots, n - 4$ , 式中  $A_{n-i}$  为控制关节力矩幅值的比例系数.

式 (13) 中当前关节的关节力矩受前一关节的角度与当前关节的角度差的影响, 所以式 (13) 控制下的蛇形机器人关节角度满足相位次序. 式 (13) 中机器人关节直接由力矩控制而不是规划好的关节角度, 区别于基于 Serpenoid 曲线方法的转移控制, 把这一相位控制方法称为动态转移. 蛇形机器人的动态转移控制带来最基本的蜿蜒运动趋势, 被认为是广义步态. 而蜿蜒运动趋势能否转换成真正的蜿蜒运动, 就需要确定一个合适的幅值系数  $A_{n-i}$ .

### 1.4 被动蜿蜒的概念

根据以上所述的能量 (运动动能) 在蛇形机器人蜿蜒运动中的作用, 提出一种基于能量的蜿蜒运动控制方法——被动蜿蜒, 该方法的基本概念如图 3 所示.

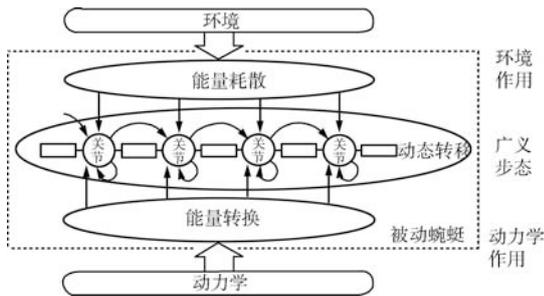


图 3 基于能量的被动蜿蜒控制概念图

Fig. 3 Concept of the passive creeping based on energy

被动蜿蜒的概念结合了蜿蜒运动的特性和能量的观点. 动态转移产生基本的蜿蜒运动趋势, 外部环境通过能量的耗散影响蜿蜒运动, 机器人动力学通过能量之间的转换影响蜿蜒运动. 通过一个统一的刻画指标——能量, 评估所处环境与自身动力学对机器人运动的作用, 使得蜿蜒运动适应不同的外部环境状况与内部机器人动力学状态.

## 2 基于能量的蜿蜒运动控制方法

被动蜿蜒试图控制蛇形机器人动态地产生蜿蜒运动, 并根据自身的能量状态适应外部环境与内部动力学. 由分析已知, 能量过程决定了整个蜿蜒运动的动态行为. 然而由于能量过程的复杂性, 很难直接应用经典的基于能量的控制方法 (如能量成形控制) 来控制蜿蜒运动. 自然地联想到应用能量反馈以调整关节输入力矩, 从而实现蜿蜒运动的适应性; 又考虑到蛇形运动的特性, 能量反馈需要与先验的动态转移相结合, 以产生稳定的蜿蜒运动. 观察式 (13) 发现, 动态转移中的比例系数可由能量控制项代替. 作为一种移动控制方法, 被动蜿蜒需要具备规划导航 (如转弯) 功能. 当把蜿蜒运动视为一种从头到尾传播的波时, 只需控制机器人的头部模块 (或头部关节) 即可实现基本的上层规划功能.

根据被动蜿蜒的概念, 结合动态转移与能量反馈控制, 提出蛇形机器人被动蜿蜒控制的具体控制框图如图 4 所示.

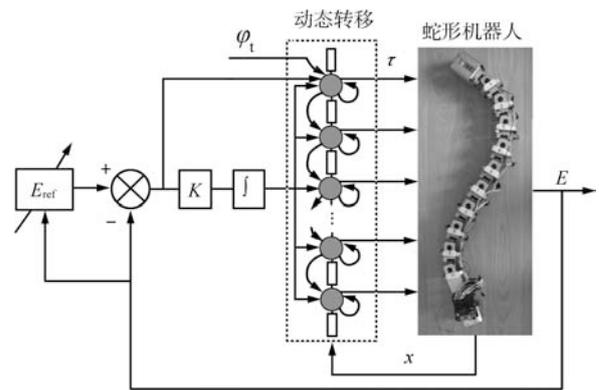


图 4 蛇形机器人被动蜿蜒控制框图

Fig. 4 Control diagram of the passive creeping for a snake-like robot

其数学表达式如下, 头部关节的控制力矩:

$$\tau_n = aI_n \left| K_n \left( \int_0^t (E_{ref} - E) dt \right) + E_{ref} - E \right| \times \left( \ddot{x}_d^n + k_d (\dot{x}_d^n - \dot{x}^n) + k_p (x_d^n - x^n) + \varphi_t \right) \quad (14)$$

身体关节的控制力矩:

$$\tau_{n-i} = K_{n-i} \left( \int_0^t (E_{\text{ref}} - E) dt \right) (x^{n-i+1} - x^{n-i}) \quad (15)$$

$i = 1, \dots, n-4$ . 式中  $a$ 、 $k_d$  和  $k_p$  为头部关节力矩控制的三个参数;  $I_n = I_n^b + m_n l_n^2/4$  为头部模块绕头部关节的转动惯量;  $\mathbf{K} = [K_n, K_{n-1}, \dots, K_4]^T$  为积分幅值系数向量;  $x_d^n$  为头部关节的参考角度以诱导头部关节摆动;  $\varphi_t$  为蜿蜒运动的转弯参数;  $E_{\text{ref}}$  和  $E$  为蛇形机器人的参考运动能量和实际运动能量. 作为控制量的参考能量  $E_{\text{ref}}$  可进一步根据不同的外部环境与内部动力学进行自适应, 以提高蜿蜒运动的效率. 关于  $E_{\text{ref}}$  的优化适应律设计将在未来的研究中展开, 文中  $E_{\text{ref}}$  被视为普通的控制参数.

蛇形机器人头部关节的控制力矩  $\tau_n$  在从头到尾的蜿蜒运动中用于实现上层控制, 如引导转向等. 实际关节角度  $x^n$  与参考角度  $x_d^n$  的误差使得头部关节获得持续的激励, 驱动该关节按照参考角度进行往复摆动. 转弯参数  $\varphi_t$  在持续摆动的基础上附加一个微小偏转量, 实现蜿蜒运动的方向控制. 式 (14) 部分地基于计算力矩控制方法, 与标准方法不同的是头部模块绕一位置不固定的关节轴转动. 头部关节的力矩幅值由  $|K_n(\int_0^t (E_{\text{ref}} - E) dt) + E_{\text{ref}} - E|$  进行控制, 其为 PI 控制律, 具有如下的功能: 1) 积分项补偿稳定运动情况下的能量误差; 2) 比例项使得蛇形机器人蜿蜒运动启动加快.

身体各关节力矩  $\tau_{n-i}$  使得机器人各关节运动达到同步, 最终实现稳定的蜿蜒运动. 前后关节角度的不同用于产生运动趋势, 能量状态决定力矩的大小. 能量积分误差  $\int_0^t (E_{\text{ref}} - E) dt$  具有如下的功能: 1) 基于能量控制调整身体关节力矩的幅值补偿能量误差; 2) 控制身体的摆动使得蜿蜒运动适应于不确定的环境或附加载荷. 蛇形机器人因其动力学特性的复杂性, 很难进行直接的力矩控制. 如果使用理想轨迹 (Serpenoid 曲线) 作为整个运动的跟踪轨迹以计算关节力矩<sup>[19]</sup>, 则无法预知各种环境或负载状态下蜿蜒运动所需的合适的关节输入, 降低了机器人的适应能力. 而能量误差积分根据不同的环境或状态自适应地调整力矩幅值, 从而能够克服蛇形机器人力矩控制所面临的困难. 比较式 (13) 和式 (15) 知, 比例系数由能量误差积分所替代. 生物蛇蜿蜒运动中身体上不同部位的力矩幅值是不同的, 因为头部、身体和尾部的驱动能力不同, 积分幅值系数向量中各分量的不同, 可以实现这种不同的驱动能力.

总而言之, 在被动蜿蜒控制中, 头部模块领导蜿蜒运动, 身体模块实现蜿蜒运动并推动机器人向前进. 按照系统层次结构的观点, 基本蜿蜒运动趋势的产生分布于控制系统的底层, 环境适应控制是集中

式的位于控制系统的中间层, 头部关节的运动规划在控制系统的顶层领导蜿蜒运动的方向.

以上构建了基于能量的蜿蜒运动控制方法, 即被动蜿蜒, 下面对该方法进行仿真与实验研究.

### 3 仿真研究

仿真研究基于多平台下的自由开源刚体动力学函数库 ODE (Open dynamics engine)<sup>[20]</sup> 构建蛇形机器人的动力学与控制仿真平台. 被动蜿蜒控制的仿真固定参数值如表 1 所示, 包括蛇形机器人的物理参数 (按照实际机器人参数设定)、仿真时间步及被动蜿蜒控制参数. 而可变的参数分别为: 1) 控制参数, 即参考运动动能  $E_{\text{ref}}$  和转弯参数  $\varphi_t$ ; 2) 环境参数, 即沿着机器人身体的切向摩擦系数  $\mu_c^t$  和垂直于机器人身体的法向摩擦系数  $\mu_c^n$ . 切向摩擦系数用于等效蛇形机器人被动轮与环境及轮轴之间的无量纲滚动摩擦系数, 而法向摩擦系数是被动轮与环境之间的滑动摩擦系数. 一般滚动摩擦系数比滑动摩擦系数小 1~2 个数量级, 实现对生物蛇腹部鳞片摩擦各向异性的模仿<sup>[21]</sup>.

表 1 基本仿真参数

Table 1 Basic parameters for simulations

参数名	符号	值
模块数	$n' = n - 2$	10
模块长度	$l_i$	0.08 m
模块质量	$m_i$	0.50 kg
转动惯量	$I_i^b$	0.00027 kg·m <sup>2</sup>
仿真步长	$T$	0.01 s
参考角度	$x_d^n$	$0.5 \sin(2t + \frac{\pi}{2})$ rad
头部控制参数 1	$a$	10.0
头部控制参数 2	$k_d$	1.0
头部控制参数 3	$k_p$	1.0
积分幅值系数向量	$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_n \\ K_{n-1} \\ \vdots \\ K_4 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.10 \\ 0.04 \\ \vdots \\ 0.04 \end{bmatrix}$

图 5 显示了蛇形机器人在被动蜿蜒控制下从直线状态到稳定蜿蜒状态的启动过程, 该过程中参考能量设定为 1.0 J, 法向摩擦系数为 0.3, 切向摩擦系数为 0.03, 转弯参数为 0. 通过比较机器人在初始状态与最终状态下的构形、力矩和角度可知, 被动蜿蜒控制是一个从无序运动到有序运动的动态过程. 机器人各个关节运动在初始时刻比较杂乱, 因为此时关节力矩的幅值不适用于该机器人及所处环境. 当能量反馈使得力矩幅值达到某一值后, 机器人各个关节运动逐渐实现同步化, 此时, 蛇形机器人身体内

建立起稳定的蜿蜒运动。

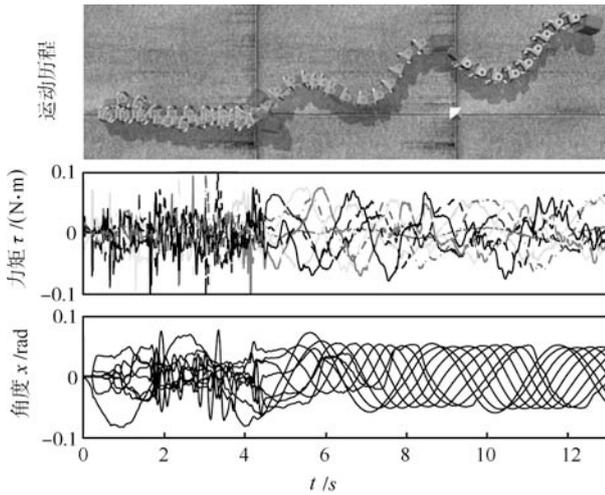


图5 蛇形机器人被动蜿蜒控制的启动过程

Fig. 5 Startup process of a snake-like robot under the passive creeping control

由图5发现,在第7秒后蛇形机器人蜿蜒运动的各个关节角度明显具有周期性,但仅由该图无法明确判断各关节力矩的周期特性,所以有必要对关节力矩的时间序列进行分析.此处应用递归图(Recurrence plot)方法<sup>[22]</sup>计算各个关节控制力矩的时间序列的距离相关性.递归图用二维方阵表示时间序列中各点的距离相关性,当序列中的两个点靠近而距离小于某一阈值时,则相关矩阵中元素记为1,相反记为0,根据相关方阵中的元素值,如数值为1,则在递归图中相应位置画上一个黑点,表示一个递归,相反为白点.通过这种方法应用二维黑白图形把高维空间中的时间序列的递归性形象地表示出来.递归图的数学表达式为

$$R(i, j) = \Theta(\varepsilon - \|\tau(i) - \tau(j)\|_2) \quad (16)$$

式中,  $\tau(i)$  表示关节力矩的时间序列;  $\Theta(\cdot)$  为 Heaviside 阶跃函数;  $\varepsilon$  为距离阈值,取  $\varepsilon = 0.08$ . 蛇形机器人关节力矩的时间序列的递归图如图6所示.图中黑色斜线明确地显示了各关节力矩在第7秒后建立了稳定的递归性.本质上,状态的递归性意味着动力系统的 Poisson 稳定性.从关节角度的直接观察和关节力矩的递归图来看,都表明了该仿真中被动蜿蜒控制在第7秒后实现了稳定的蜿蜒运动,机器人启动的瞬态过程在7秒内消失.但是,实现了节律化的蜿蜒运动并不意味着运动能量达到了参考值.

被动蜿蜒控制中,参考能量的大小决定了蜿蜒运动的激烈程度.图7显示了蛇形机器人在各种参考能量值、不同摩擦环境下的能量状态.图例中的三元组分别代表  $E_{\text{ref}}$ 、 $\mu_c^n$  及  $\mu_c^t$ , 在该仿真中转弯参

数设为0.由图7可知,蛇形机器人在被动蜿蜒控制下的运动动能可以达到参考值,但是无法收敛到参考值,即存在能量波动.这是因为:1) 能量反馈控制使得运动动能达到参考值;2) 作为持续激励的蛇形机器人头部摆动使得运动动能波动;3) 控制律无法预测头部摆动和能量波动之间的复杂关系.所以被动蜿蜒控制还无法抑制能量波动问题.在蜿蜒运动中轻微的能量波动现象的机理很复杂,但控制在一定范围内是可以接受的.

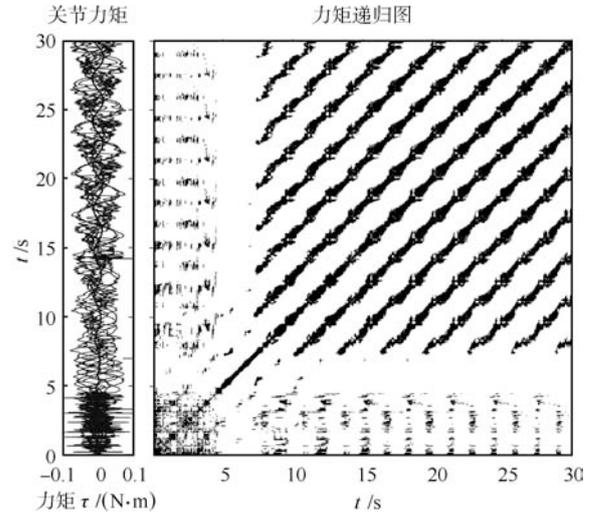


图6 关节力矩时间序列的递归图

Fig. 6 Recurrence plot of time series of joint torques

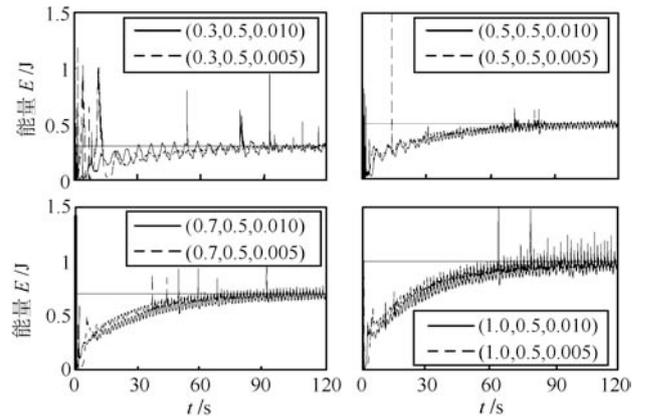


图7 蛇形机器人被动蜿蜒控制的能量状态

Fig. 7 Energy state of a snake-like robot under the passive creeping control

转弯参数  $\varphi_t$  对蜿蜒运动的影响比较直观.图8显示了不同转弯参数情况下蛇形机器人蜿蜒运动的头部轨迹,其中,  $E_{\text{ref}}$ 、 $\mu_c^n$  和  $\mu_c^t$  分别设定为 0.7J、0.50 和 0.01. 如果转弯参数为0,则机器人向前蜿蜒.转弯参数的正负号决定了蜿蜒运动的转弯方向,该参数的绝对值大小与转弯曲率半径成反比.被动蜿蜒控制中把机器人运动视为从头到尾的

波动,控制头部模块的偏转方向即可控制整个机器人的转弯方向.相对基于 Serpenoid 曲线的转弯控制方法<sup>[23]</sup>,被动蜿蜒控制简化了蛇形机器人转弯运动的控制策略.

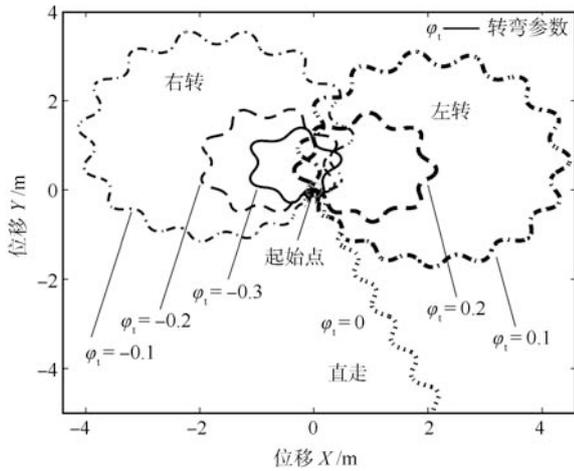


图 8 不同转弯参数下蛇形机器人运动的头部轨迹  
Fig. 8 Head trajectories of a snake-like robot with different turning parameters

### 4 实验研究

#### 4.1 实验系统

为蛇形机器人的被动蜿蜒控制构建一个模拟/物理实验系统(或半物理半仿真实验平台).该实验系统的硬件部分主要由蛇形机器人、Optotrak 三维运动测量系统和主计算机(惠普 XW8200 工作站)组成,如图 9 所示.蛇形机器人执行主计算机的控制命令,Optotrak 三维运动测量系统(作为位置传感器)跟踪测量机器人的运动,并反馈给主计算机.整个实验过程(包括蛇形机器人运动能量的测量)是在线实时的.蛇形机器人每执行一步控制命令,整个系统要经历如下的步骤.

在主计算机中应用 ODE 仿真模拟蛇形机器人的动力学环境,基于被动蜿蜒控制律计算关节力矩以控制仿真机器人.实时地通过串口输出仿真中机器人的关节角度给实际的蛇形机器人,使得机器人在实验环境中运动.同时使用 Optotrak 三维测量系统实时地测量机器人各个模块的位姿(位置和姿态),并通过 Optotrak API 扩展开发接口把实际机器人的运动信息传送给主计算机.主计算机通过数值算法计算蛇形机器人的实时运动能量.并把所得能量值反馈给 ODE 仿真程序,程序基于新采集的运动能量计算机器人新的关节控制力矩.

如此循环往复直到实验结束,程序流程如图 10 所示.通过主计算机中的 ODE 动力学仿真把力矩命令转化成了角度命令,以控制实验室现有伺服驱

动的蛇形机器人,实验中伴随的动力学仿真用以弥补实际蛇形机器人硬件控制上的缺陷.伴随仿真的准确性与实时性将影响整个实验的效果.



图 9 蛇形机器人被动蜿蜒控制的实验系统  
Fig. 9 Experimental system of the passive creeping for a snake-like robot

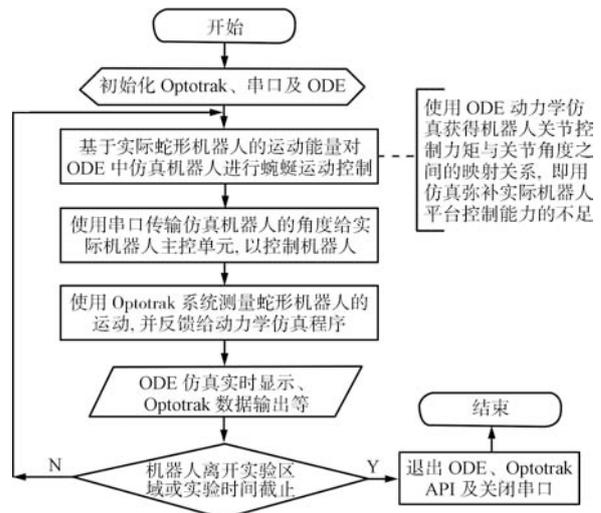


图 10 被动蜿蜒控制实验的程序流程图  
Fig. 10 Flow chart of passive creeping experiments

被动蜿蜒控制的基本思路是基于蛇形机器人自身的能量状态调整机器人的蜿蜒运动.能量联系着机器人“环境-本体”系统的各个方面,能量的引入给蜿蜒运动控制方法的设计带来了诸多好处,但能量的测量却并不简单.蛇形机器人运动能量的实时

测量按照如下方法实现: 每个机器人单元模块上规则地粘附 4 个标记点 (见图 9 左下角), 这种标记点是一种发光二极管, 可以 2500 Hz 的频率发射红外光, 这 4 个标记点作为整体表示 1 个刚体模块. Optotrak 测量系统的位置传感器由 3 个 CCD 线性传感器组成, 通过捕捉标记点发出的红外光, 并由 CCD 传感器获得的标记点位置关系解算出标记点在全局坐标系中的三维位置. 位置传感器以 20 Hz 的频率顺序采集完蛇形机器人 10 个模块上共计 40 个标记点的位置. 然后, 由模块上的 4 个标记点的三维位置解算出机器人刚体单元在全局坐标系中的位姿. 主计算机根据先后采样时刻的刚体位姿数据应用差分算法计算出蛇形机器人各个模块的线速度和角速度, 最后由运动速度计算出机器人的运动动能, 蜿蜒运动的能量比例  $\eta_2$  也可直接获得.

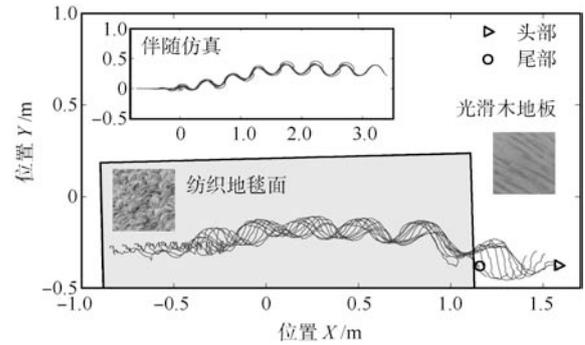
蛇形机器人被动蜿蜒控制实验在上述实验系统中进行, 实验分为两类: 移动实验和拖动实验. 其中, 移动实验验证被动蜿蜒控制在具有不同摩擦系数的环境中的适应性, 而拖动实验则验证被动蜿蜒控制在未知负载 (或重物) 情况下的适应性. 外部负载能够使得蛇形机器人的动力学完全改变, 所以拖动实验也验证被动蜿蜒对变化的动力学的适应性. 同时比较被动蜿蜒控制的实验结果与经典方法基于 Serpenoid 曲线控制的实验结果.

### 4.2 移动实验

移动实验中, 选择 5 种环境 (按照与被动轮间摩擦系数从大到小排列分别为: 纺织地毯面、粗糙橡胶面、中性橡胶面、光滑橡胶面和光滑木地板), 在每种环境中分别重复进行 5 次实验.

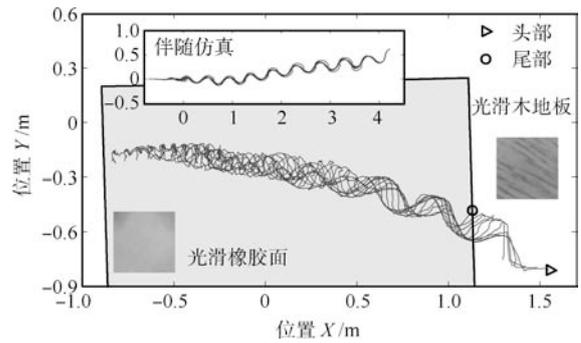
图 11 显示了机器人被动蜿蜒控制移动实验的部分结果. 由图 11 (a) 和 11 (b) 发现, 起初运动杂乱无章, 运行一段时间后实现稳定的蜿蜒运动, 即蜿蜒运动由混乱运动中发展出来, 与图 5 中仿真结果一致. 比较图 11 (a) 和 11 (b) 发现, 粗糙地毯上相对于光滑橡胶面上更容易形成节律化的蜿蜒运动, 即更大的摩擦有利于被动蜿蜒控制蛇形机器人. 理想情况下, 蜿蜒运动中机器人各单元的轨迹应该是重合的, 实验结果显示轨迹重合度不高, 原因如下: 1) 蛇形机器人单元的长度使得机器人对生物蛇的连续身体曲线的拟合程度不够高; 2) 由于制造与装配误差导致蛇形机器人被动轮与环境间的接触不良; 3) 因为被动轮悬空、运动过分激烈或表面光滑无法支撑蜿蜒运动而存在打滑现象. 由图 11 (c) 发现平均能量比例  $\bar{\eta}_2$  的值比较低 ( $< 0.5$ ), 即该实验中转动动能转化为移动动能的比例不高, 也说明了实验中蛇形机器人蜿蜒运动中存在打滑现象. 比较图 11 (c) 中实验历经时间与平均能量比例可知, 平

均能量比例与实验历经时间成反比, 该结果与能量比例的定义式 (11) 相一致. 而实验历时或能量比例与环境特性之间无清晰的关系.



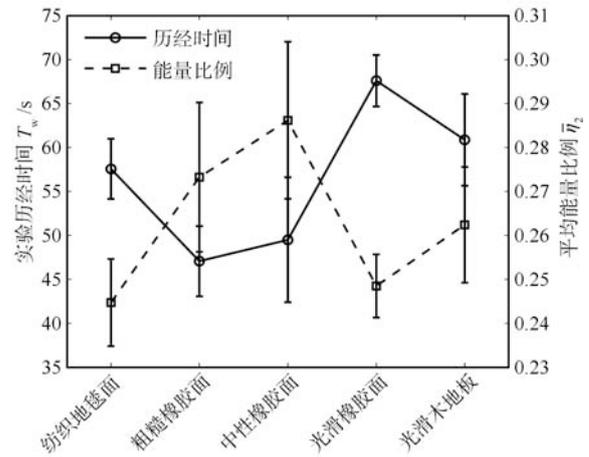
(a) 机器人各模块在粗糙地毯面上的移动轨迹

(a) Trajectories of modules on a textile carpet



(b) 机器人各模块在光滑橡胶面上的移动轨迹

(b) Trajectories of modules on a rubber covering



(c) 实验历经时间与平均能量比例

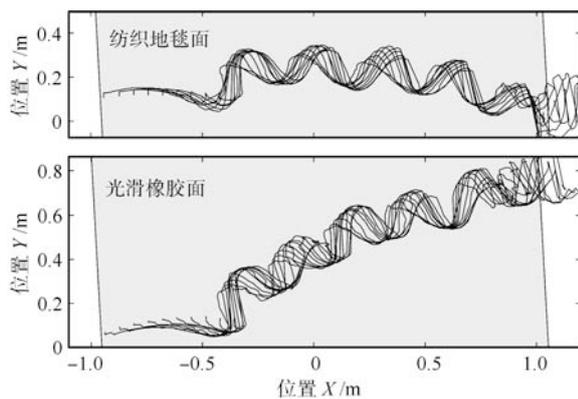
(c) Well clock time vs. average proportion of energy

图 11 被动蜿蜒控制的移动实验结果

Fig. 11 Results of the locomotion experiment of the passive creeping

作为比较, 基于 Serpenoid 曲线控制的移动实验的部分运动轨迹如图 12 (a) 所示. 比较图 11 (a) 和 11 (b) 与图 12 (a), 在初始阶段 (即轨迹前半段), 被动蜿蜒控制所得各个单元模块的轨迹不如基于

Serpentoid 曲线控制所得轨迹光滑. 这是因为被动蜿蜒并没有固定机器人各个关节的运动, 而需要由运动能量状态确定关节运动, 被动蜿蜒整个启动过程是由无序运动到有序运动的过程. 基于 Serpentoid 曲线的控制并不需要动态调整关节运动, 所以运动一开始就比较光滑. 当被动蜿蜒控制下的蛇形机器人进入稳定运动状态后, 两种方法所得运动轨迹并无区别. 为了进一步了解被动蜿蜒控制的移动性能, 比较了两种方法的平均能量比例  $\bar{\eta}_2$ , 结果见表 2. 发现被动蜿蜒控制与基于 Serpentoid 曲线控制的平均能量比例在数量上并无明显差别. Serpentoid 曲线是生物蛇蜿蜒运动轨迹的数学抽象, 是生物蛇在自然界中进化的结果, 两种方法在性能指标上的相近从某种程度上反映了被动蜿蜒控制能够实现“优化地”移动.



(a) 移动实验中的运动轨迹

(a) Trajectories of the locomotion experiment



(b) 拖动实验中的运动构形

(b) Configurations of the drag experiment

图 12 基于 Serpentoid 曲线控制的移动与拖动实验结果  
Fig. 12 Results of the locomotion and drag experiment of the Serpentoid curve-based control

表 2 平均能量比例的比较

Table 2 Comparison of average energy proportions

	被动蜿蜒控制	基于 Serpentoid 曲线控制
纺织地毯面	$0.245 \pm 0.010$	$0.255 \pm 0.009$
光滑橡胶面	$0.249 \pm 0.007$	$0.241 \pm 0.025$
光滑木地板	$0.262 \pm 0.013$	$0.240 \pm 0.005$

Gans 等曾对帝王蛇蜥的蜿蜒运动进行了测试, 结果显示帝王蛇蜥在光滑平面上进行蜿蜒运动时有最少 65% 的动能用于产生身体中的波动<sup>[24]</sup>. 也就

是存在侧向打滑情况下其蜿蜒运动的平均能量比例  $\bar{\eta}_2$  小于 0.35, 但蛇形机器人的平均能量比例比起帝王蛇蜥的平均能量比例低约 0.1. 这是因为蛇形机器人与环境只在个别点(触地的被动轮)上进行交互作用, 而无肢蛇蜥与环境在连续的区域上进行交互作用, 所以前者无法产生足够的推动力.

### 4.3 拖动实验

拖动实验中, 蛇形机器人在光滑橡胶面上拖动一重物向前移动 60 cm, 该距离等分为前后两段各 30 cm. 外加负载使得预先建立的蛇形机器人动力学模型完全失效, 另外也无法通过传感器测得不确定的外加负载的各种属性. 在这种情况下, 通过能量状态反映外部环境 with 内部动力学变化的被动蜿蜒控制显示出特有的适应性.

拖动实验重复进行三次, 选取其中一次实验结果如图 13 所示. 和移动实验一样, 拖动实验中蜿蜒运动的初始状态呈直线构形, 最终实现蜿蜒运动. 比较图 13 与图 11 发现, 拖动实验中身体摆动更剧烈, 关节角度幅值更大. 移动实验中关节角度幅值在 0.5~0.7 rad 之间, 如图 11(a) 和 11(b) 中的运动轨迹; 而拖动实验中最终关节角度幅值在 1.0 rad 以上, 如图 13(g) 和 13(h).

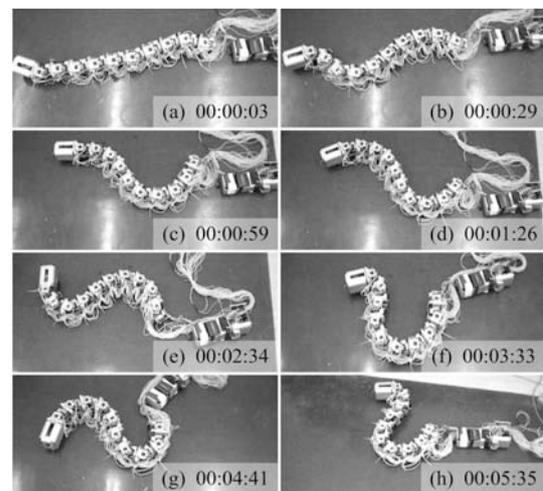


图 13 拖动实验中被动蜿蜒的自适应过程

Fig. 13 Adaptive process of the passive creeping in the drag experiment

被动蜿蜒控制与基于 Serpentoid 曲线控制的拖动历经时间比较如图 14 所示. 被动蜿蜒控制的蛇形机器人拖动第 1 个 30 cm 消耗时间  $238.97 \pm 7.96$  s, 而第 2 个 30 cm 所消耗时间仅为  $88.57 \pm 10.91$  s. 这说明蛇形机器人在后一段中具有更好的驱动能力, 即被动蜿蜒控制在第 2 段中对这种负载情况具有更好的适应性. 图 13 显示了被动蜿蜒控制下蛇形机器

人的构形对未知载荷的适应过程. 基于 Serpenoid 曲线控制的蛇形机器人在拖动实验中的运动构形不变, 见图 12 (b). 相应地, 后一阶段相对前一阶段的拖动时间也没有显著变化 (变化不超过 10%). 被动蜿蜒控制根据蛇形机器人自身的能量状态调整关节控制以适应当前所面临的状况 (未知附加载荷). 通过比较可知, 被动蜿蜒控制具有更好的适应性.

在拖动实验中, 蛇形机器人拖动重物, 机器人在光滑橡胶面上剧烈打滑, 即环境在此时无法提供足够的支撑, 机器人为了获得更大的驱动力加大了运动的激烈程度与运动幅度, 这一现象与帝王蛇蜥在光滑表面打滑时增加摆动幅度的观察相一致<sup>[24]</sup>.

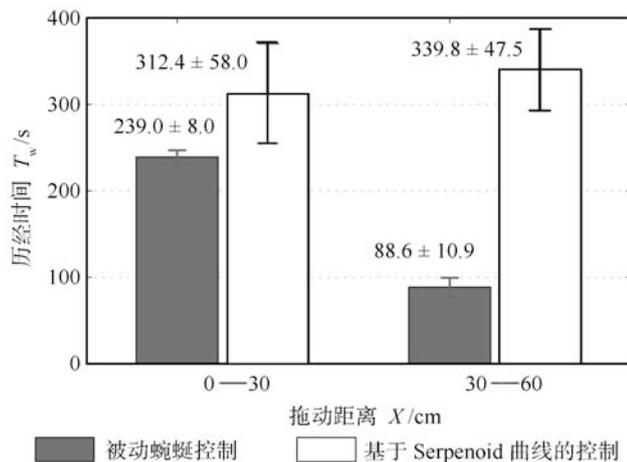


图 14 拖动实验历经时间比较

Fig. 14 Comparison of the time of the drag experiment

## 5 结论

1) 能量联系着蛇形机器人蜿蜒运动的各个方面. 能量耗散反映了机器人与环境的交互作用, 转动动能与移动动能的转换刻画了蜿蜒运动的动力学, 各个关节间能量的平衡意味着运动的协调性.

2) 基于能量的观点设计了蛇形机器人蜿蜒运动控制方法——被动蜿蜒. 之所以如此命名是因为该方法借鉴了被动动态双足机器人的控制思想, 另外蛇形机器人并不主动地测量环境信息或建立动力学模型, 而是依靠自身能量状态被动地适应各种环境或未知的载荷状态.

3) 基于 ODE 动力学函数库构建了蛇形机器人动力学与控制仿真平台. 仿真结果显示了被动蜿蜒控制中机器人的运动是一个从无序到有序最终实现运动同步的过程, 转弯运动的结果说明被动蜿蜒控制可简单地实现蜿蜒运动的规划导航.

4) 基于 Optotrak 三维运动测量系统搭建了蛇形机器人被动蜿蜒控制的模拟/物理实验系统. 完成了两类实验, 即移动实验和拖动实验. 验证了被动蜿

蜒控制方法的有效性和适应性. 其中, 移动实验针对不同环境中蜿蜒运动的适应性, 而拖动实验针对未知载荷条件下蜿蜒运动的适应性.

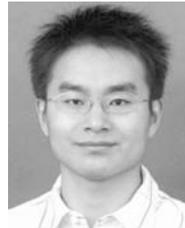
5) 这种基于能量的蛇形机器人蜿蜒运动控制方法具有如下优点: 包容性的概念, 因为能量联系着“环境-机器人”系统的各个方面; 清晰的控制策略, 关节力矩的调整、运动转向的控制等都只涉及一个单独的控制变量; 潜在的适应性, 能量状态能够有效地反映不同的环境或载荷对蜿蜒运动的作用.

6) 未来的研究包括: 蛇形机器人直接力矩控制关节的设计、应用内部传感器检测机器人的能量状态、被动蜿蜒控制下机器人动力系统吸引域的估计、被动蜿蜒控制中参考能量的优化适应律设计、具有柔性关节 (弹性势能) 的蛇形机器人的运动控制、二维蜿蜒控制向三维运动控制 (碰撞损耗和重力势能) 的拓展等.

## References

- Hirose S [Author], Cave P [Translator]. *Biologically Inspired Robots: Snake-like Locomotors and Manipulators*. Oxford: Oxford University Press, 1993. 1–49
- Hopkins J K, Spranklin B W, Gupta S K. A survey of snake-inspired robot designs. *Bioinspiration and Biomimetics*, 2009, 4(2): 1–19
- Transth A A, Pettersen K Y, Liljebäck P. A survey on snake robot modeling and locomotion. *Robotica*, 2009, 27: 999–1015
- Zhao Tie-Shi, Li Na. Nominal mechanism method of dynamic modeling for snake-like robots. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(8): 66–71 (赵铁石, 李娜. 蛇形机器人动力学建模的虚设机构法. *机械工程学报*, 2007, 43(8): 66–71)
- Sun Hong, Liu Li-Xiang, Ma Pei-Sun. On the tree-climbing static mechanism of a snake robot climbing trees. *Robot*, 2008, 30(2): 112–116 (孙洪, 刘立祥, 马培蓀. 攀爬蛇形机器人爬树的静态机理研究. *机器人*, 2008, 30(2): 112–116)
- Ma S G. Analysis of creeping locomotion of a snake-like robot. *Advanced Robotics*, 2001, 15(2): 205–224
- Wang Z F, Ma S G, Li B, Wang Y C. Dynamic modeling for locomotion-manipulation of a snake-like robot by using geometric methods. In: *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. St. Louis, USA: IEEE, 2009. 3631–3636
- Saito M, Fukaya M, Iwasaki T. Serpentine locomotion with robotic snakes. *IEEE Control Systems Magazine*, 2002, 22(1): 64–81
- Tesch M, Lipkin K, Brown I, Hatton R, Peck A, Rembisz J, Choset H. Parameterized and scripted gaits for modular snake robots. *Advanced Robotics*, 2009, 23(9): 1131–1158
- Date H, Takita Y. Adaptive locomotion of a snake like robot based on curvature derivatives. In: *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. San Diego, USA: IEEE, 2007. 3554–3559

- 11 Watanabe K, Iwase M, Hatakeyama S, Maruyama T. Control strategy for a snake-like robot based on constraint force and verification by experiment. *Advanced Robotics*, 2009, **23**(7–8): 907–937
- 12 Crespi A, Ijspeert A J. Online optimization of swimming and crawling in an amphibious snake robot. *IEEE Transactions on Robotics*, 2008, **24**(1): 75–87
- 13 Lu Z L, Ma S G, Li B, Wang Y C. Gaits-transferable CPG controller for a snake-like robot. *Science in China Series F: Information Sciences*, 2008, **51**(3): 293–305
- 14 Dickinson M H, Farley C T, Full R J, Koehl M A R, Kram R, Lehman S. How animals move: an integrative view. *Science*, 2000, **288**(5463): 100–106
- 15 Mosauer W. On the locomotion of snakes. *Science*, 1932, **76**(1982): 583–585
- 16 Gans C. Terrestrial locomotion without limbs. *American Zoologist*, 1962, **2**(2): 167–182
- 17 Gray J. The mechanism of locomotion in snakes. *Journal of Experimental Biology*, 1946, **23**(2): 101–123
- 18 Moon B R, Gans C. Kinematics, muscular activity and propulsion in gopher snakes. *The Journal of Experimental Biology*, 1998, **201**(19): 2669–2684
- 19 Mehta V, Brennan S, Gandhi F. Experimentally verified optimal serpentine gait and hyperredundancy of a rigid-link snake robot. *IEEE Transactions on Robotics*, 2008, **24**(2): 348–360
- 20 Smith R. Open dynamics engine v0.5 user guide [Online], available: <http://ode.org/ode-latest-userguide.html>, May 28, 2007
- 21 Hu D L, Nirody J, Scott T, Shelley M J. The mechanics of slithering locomotion. *Proceedings of the National Academy of Sciences of United States of America*, 2009, **106**(25): 10081–10085
- 22 Marwan N, Romano M C, Thiel M, Kurths J. Recurrence plots for the analysis of complex systems. *Physics Reports*, 2007, **438**(5–6): 237–329
- 23 Ye C L, Ma S G, Li B, Wang Y C. Turning and side motion of snake-like robot. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Washington D. C., USA: IEEE, 2004. 5075–5080
- 24 Gans C, Gasc J P. Tests on the locomotion of the elongate and limbless reptile ophisaurus apodus (sauna: anguidae). *Journal of Zoology*, 1990, **220**(4): 517–536



**王智锋** 中国科学院沈阳自动化研究所博士研究生. 主要研究方向为机器人动力学与控制, 蛇形机器人.

E-mail: zfwang@sia.cn

(**WANG Zhi-Feng** Ph. D. candidate at Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His research interest covers dynamics and control of robotics, and snake-like robots.)



**马书根** 日本立命馆大学机器人系教授, 中国科学院沈阳自动化研究所研究员. 主要研究方向为仿生机器人, 移动机器人和多机器人的协作. 本文通信作者.

E-mail: shugen@se.ritsumei.ac.jp

(**MA Shu-Gen** Professor in the Department of Robotics, Ritsumeikan University, Japan. Professor at

Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His research interest covers biomimetic robots, mobile robots, and multi-robot cooperation. Corresponding author of this paper.)



**李斌** 中国科学院沈阳自动化研究所研究员. 主要研究方向为仿生机器人, 移动机器人和机器人控制.

E-mail: libin@sia.cn

(**LI Bin** Professor at Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His research interest covers biomimetic robots, mobile robots, and

robot control.)



**王越超** 中国科学院沈阳自动化研究所研究员. 主要研究方向为机器人学.

E-mail: ycwang@sia.cn

(**WANG Yue-Chao** Professor at Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His main research interest covers robotics.)