

4-19-2022

Motion Simulation and Performance Analysis of 2D Variable Stiffness Snake-like Robot

Yanqin Long

1.School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China,;
1678539298@qq.com

Guifang Qiao

1.School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;2.School of Automation, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;

Guangming Song

1.School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China,;
mikesong@seu.edu.cn

Ying Zhang

2.School of Automation, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Motion Simulation and Performance Analysis of 2D Variable Stiffness Snake-like Robot

Abstract

Abstract: Mutual interference of vehicular laser radar causes serious performance reduction of target detection and tracking. From spatial, time and modulation frequency, various possible interference of lidars of pulse and frequency modulated continuous wave method in road environments are studied by simulation. The possibility of the interference is calculated, the features and performance reduction of the interference are analyzed. For the possible interference, *using a method of pseudo random noise code to modulate the output amplitude of the continuous wave laser can effectively reduce the probability of interference and ensure the reliable operation of lidar in road environments.*

Keywords

lidar, mutual interference, frequency modulated continuous wave, pseudo random noise code

Authors

Yanqin Long, Guifang Qiao, Guangming Song, Ying Zhang, and Linlin Cheng

Recommended Citation

Yanqin Long, Guifang Qiao, Guangming Song, Ying Zhang, Linlin Cheng. Motion Simulation and Performance Analysis of 2D Variable Stiffness Snake-like Robot[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(4): 759-767.

二维变刚度蛇形机器人的运动仿真与性能分析

龙艳琴¹, 乔贵方^{1,2}, 宋光明^{1*}, 张颖², 程琳琳¹

(1. 东南大学 仪器科学与工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 南京工程学院 自动化学院, 江苏 南京 211167)

摘要: 针对二维变刚度蛇形机器人运动性能的研究, 建立了 Simulink/Adams 联合仿真模型, 利用仿真模型研究变刚度驱动器的阻尼系数、刚度参数及角频率对其运动能耗的影响。为实现关节轨迹和关节刚度的同步控制, 提出了基于双层 CPG 的运动控制器。结果表明: 阻尼系数能够有效降低起动能耗占总能耗的比例, 且低速运动时的起动能耗占比随刚度参数的增加而提高; 高速运动时的变刚度蛇形机器人运动能耗存在峰值, 应避免在该条件下运动。

关键词: 蛇形机器人; 变刚度驱动器; 仿生控制; 能耗; 中枢模式发生器

中图分类号: TP249

文献标志码: A

文章编号: 1004-731X(2022)04-0759-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.20-0871

Motion Simulation and Performance Analysis of 2D Variable Stiffness Snake-like Robot

Long Yanqin¹, Qiao Guifang^{1,2}, Song Guangming^{1*}, Zhang Ying², Cheng Linlin¹

(1. School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. School of Automation, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: Aiming at the study on the motion performance of a two-dimensional variable stiffness snake-robot, a Simulink/Adams co-simulation model is established, and the effects of the damping coefficient, the stiffness parameters and the angular frequency of the variable stiffness actuator on the motion energy consumption are analyzed. To realize the synchronous control of joint trajectory and stiffness, a motion controller based on two-layer CPG is proposed. The results show that the damping coefficient can effectively reduce the proportion of starting energy consumption of the variable stiffness snake-like robot, and the ratio of starting energy consumption increases with the stiffness parameter increasing at low speed. The energy consumption of the variable stiffness snake-like robot has a peak value at high speed, so the movement under this condition should be avoided.

Keywords: snake-like robot; variable stiffness actuator; bio-inspired control; energy consumption; central pattern generator

引言

自然界中的生物蛇在复杂环境中表现出较好的运动灵活性和环境适应性。生物蛇具有多种运动步态, 目前已发现的典型运动步态包括蜿蜒运动、直线运动、侧移运动等, 其中蜿蜒运动被认

为是运动效率最高的一种步态, 也是生物蛇最常见的运动步态。受生物蛇骨骼结构的启发, Hirose S 等于 1972 年研制了蛇形机器人^[1]。经过几十年的发展, 国内外研究机构研制了许多蛇形机器人系统。Kelasidi E 等研制的 Mamba 三维蛇形机

收稿日期: 2020-11-10

修回日期: 2020-12-17

基金项目: 国家自然科学基金(51905258); 中国博士后科学基金(2019M650095); 江苏省自然科学基金(BK20170763)

第一作者: 龙艳琴(1996-), 女, 土家族, 硕士生, 研究方向为机器人仿生控制技术。E-mail: 1678539298@qq.com

通讯作者: 宋光明(1974-), 男, 博士, 教授, 博导, 研究方向为仿生机器人、分布式机器人。E-mail: mikesong@seu.edu.cn

器人,能够完成一定的水下作业^[2]。Wright C等研制的蛇形机器人采用正交关节结构,能够实现蜿蜒、滚动、侧向移动等运动步态^[3]。郁树梅等研制的探查者 III^[4]蛇形机器人能够实现水陆两栖运动步态。唐敬阁等研制的7关节蛇形机器人,能够实现水下滑翔等运动步态^[5]。魏武等研制的蛇形机器人能够沿桥梁缆索实现攀爬运动步态,从而完成对桥梁缆索的检测任务^[6]。

目前,大多数的蛇形机器人均采用关节电机的刚性连接方式。随着机器人机构学和仿生学技术的发展,柔性机构和柔性控制逐渐吸引了越来越多的研究人员开展相关研究^[7-8],从而使得机器人具有更好的环境适应性。Crespi A等研制的Salamandra Robotica II机器人的脊柱采用柔性连接,使机器人具有被动的环境适应性^[9]。Ijspeert A等研制的Lola-OP模块化蛇形机器人,能够被动地适应环境,在不同的管道内实现滚动运动^[10]。乔贵方等提出将蛇形机器人的模块之间采用柔性连接,仿真结果表明被动柔性连接的引入能够有效降低蛇形机器人的能耗^[11]。Park Y等研制的鱼形机器人采用变刚度尾部结构,研究结果表明调节刚度能够有效改善尾部推力^[12]。Takahide S等将串联弹性驱动器(serial elastic actuator, SEA)用于二维蛇形机器人的驱动关节,提高蛇形机器人在不同摩擦力地面的环境适应能力^[13]。Travers M等将SEA用于三维蛇形机器人的驱动关节,实现了蛇形机器人的柔性运动控制^[14]。A Kakogawa等将并联弹性驱动器(parallel elastic actuator, PEA)用于二维蛇形机器人的驱动关节,并重点分析了PEA弹性体的刚度参数对蛇形机器人运动能耗的影响^[15]。但由SEA或PEA驱动关节刚度无法进行自主调节,蛇形机器人的环境适应性和运动性能的调节受初始结构参数的限制。Zhang D等利用磁流变液设计了变刚度驱动器(variable stiffness actuator, VSA),实现了三维蛇形机器人的环境自适应控制^[16],但并未深入讨论变刚度驱动器的设计参数对运动性能的

影响。

本文重点研究二维变刚度蛇形机器人的运动仿真与性能分析,分析变刚度驱动器的特性参数(如刚度参数、阻尼系数)和运动控制器的控制参数(如角频率)对蛇形机器人运动性能的影响。

1 变刚度蛇形机器人物理仿真模型

为分析变刚度蛇形机器人的运动性能,本文所采用的蛇形机器人物理仿真模型如图1所示。该仿真模型主要参考文献[17]中所设计的双电机驱动的变刚度蛇形机器人。蛇形机器人的物理仿真模型共包含头部模块、尾部模块、连接模块和被动轮4个部分,该蛇形机器人全长为1460 mm,质量约为10.6 kg,共10个关节,关节轴线的间距均为135 mm,其他相关的物理参数如表1所示。

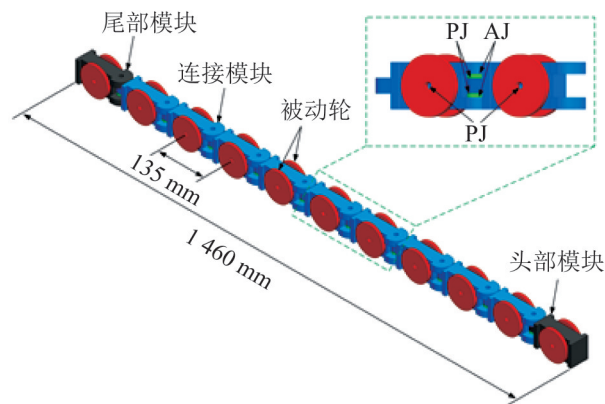


图1 蛇形机器人机械结构

Fig. 1 Mechanism of snake-like robot

表1 变刚度蛇形机器人模型的物理参数

Table 1 Physical parameters of variable-stiffness snake-like robot model

名称	长度/mm	宽度/mm	高度/mm	质量/kg
头部模块	135	50	60	0.937
连接模块	135	50	60	0.969
尾部模块	110	50	60	0.935
机体参数	1460	50	60	10.593

本文基于MSC.Adams与Simulink构建变刚度蛇形机器人的物理仿真环境,其中MSC.Adams中

提供的 Control 联合仿真接口, 能够与 Simulink 进行数据通讯^[18-19], 从而实现运动控制器对变刚度蛇形机器人的关节控制。蛇形机器人的被动轮与尾部模块、连接模块和头部模块间添加被动关节 (passive joint, PJ)。为实现变刚度关节的配置, 模块之间增加过渡零件, 其中上下 2 个过渡零件与前一连接模块间添加主动关节 (active joint, AJ), 用于模拟实际机器人的驱动电机, 与后一连接模块之间添加被动关节。并且在被动关节上附加扭簧, 蛇形机器人的关节刚度通过上下 2 个主动关节的相对转动进行调节, 扭簧的压缩量越大, 关节刚度越大。

2 基于双层级 CPG 的运动控制器设计

基于课题组前期研究^[20], 并结合变刚度蛇形机器人的结构特点, 本文设计了基于双层 CPG (central pattern generator) 的运动控制器, 能够实现关节运动控制和刚度调节, 该控制器的架构如图 2 所示。本文所设计的双层级 CPG 分为节律层和模式层^[2]。

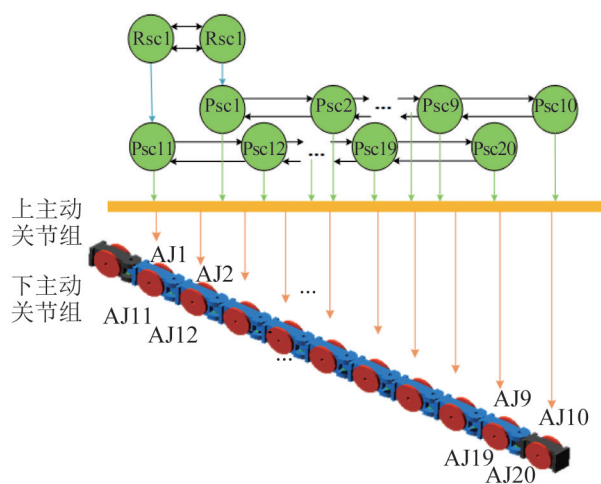


图 2 基于双层 CPG 的蛇形机器人运动控制器架构
Fig. 2 Architecture of locomotion controller for snake-like robot based on double-layered CPG

节律层包含 2 个中间神经元, 中间神经元间采

用双向耦合, 分别决定上下 2 个主动关节组的相位关系, 实现 2 个关节组的同步运动, 其数学模型为

$$\dot{\theta}_i = 2\pi\omega + \sum_{j=1}^N w_{ij} \sin(\theta_j - \theta_i - \varphi_{ij}) \quad (1)$$

式中: ω 为中间神经元的角频率; θ_i 为中间神经元的状态变量; w_{ij} 为中间神经元间的耦合强度, 通常耦合强度取定值, $w_{ij}=w$; φ_{ij} 为第 i 和第 j 个中间神经元间的相位差, 通常 $\varphi_{ij}=-\varphi_{ji}$ 。

模式层的中间神经元与节律层的中间神经元采用单向耦合。根据主动关节的轴线方向, 分为上下 2 个主动关节组, 每个关节组 10 个关节, 分别对应 10 个中间神经元。中间神经元以节律层的输出信号为基准, 不仅要确定关节组内中间神经元的相位关系, 还要确定机器人关节的运动轨迹。根据 Serpenoid 曲线的定义^[1], 蛇形机器人的关节运动轨迹为正弦函数, 因此, 蛇形机器人上层主动关节组 AJ1~AJ10 的中间神经元的数学模型为

$$\begin{cases} \dot{\theta}_i = 2\pi\omega + \sum_{j=1}^N w \sin(\theta_j - \theta_i - \varphi_{ij}) \\ \varphi_i = (1 - e^{-5t})(A \sin \theta_i) + \gamma \end{cases} \quad (2)$$

式中: $(1 - e^{-5t})$ 用于实现蛇形机器人平稳启动; γ 为关节角位移偏移量。

为实现关节刚度的调节, 下层主动关节组 AJ11~AJ20 的中间神经元数学模型为

$$\begin{cases} \dot{\theta}_i = 2\pi\omega + \sum_{j=1}^N w \sin(\theta_j - \theta_i - \varphi_{ij}) \\ \varphi_i = (1 - e^{-5t})(A \sin \theta_i + \beta) + \gamma \end{cases} \quad (3)$$

式中: β 为上下 2 个主动关节的角位移差值, 用于控制蛇形机器人的关节刚度。

本文利用 Simulink 软件构建双层级 CPG 的控制模型, 双层级 CPG 的仿真结果如图 3 所示。从图 3(d)中可以看出基于双层级 CPG 的运动控制器能输出相位稳定的运动控制信号, 并且从图 3(c)中可以看出双层级 CPG 的中间和神经元能够较快地实现相位同步。

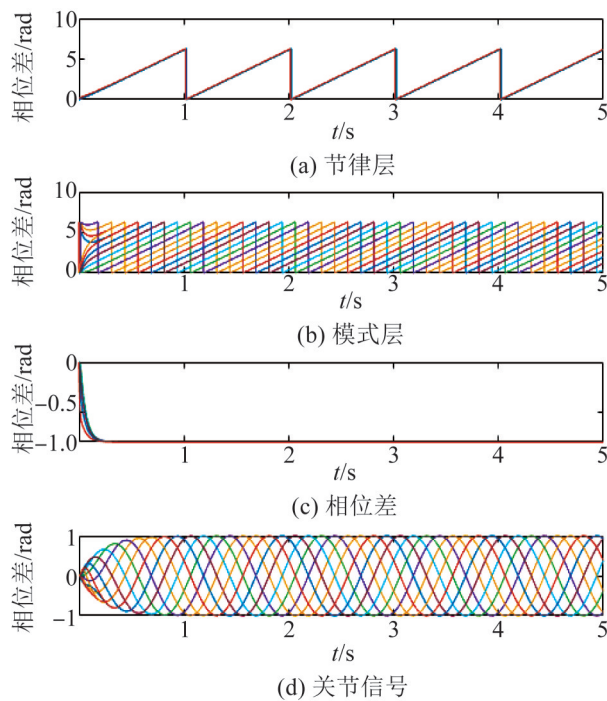


图3 基于双层级 CPG 的运动控制器输出信号
Fig. 3 Outputs of locomotion controller based on double-layered CPG network

3 变刚度蛇形机器人运动仿真分析

本文利用 MSC.Adams 软件中提供的 Control 联合仿真接口，与 MATLAB/Simulink 进行数据交互，实现变刚度蛇形机器人的仿真环境搭建，该

联合仿真控制模型如图 4 所示。弹性体的刚度和阻尼对变刚度蛇形机器人的运动效率具有影响，本文基于所建立的仿真环境分析变刚度蛇形机器人的关节特性参数(刚度参数 K ，阻尼系数 C)与运动控制参数(角频率 ω)对蛇形机器人蜿蜒运动效率的影响，所得分析结果能够为变刚度蛇形机器人的运动控制提供依据。在运动仿真中，变刚度蛇形机器人消耗的总能耗为

$$W = \sum_{i=1}^m W_i = \sum_{i=1}^m \int_0^t |l_i(t)| dt \quad (4)$$

式中： m 为变刚度蛇形机器人的关节电机总数，本文中为 20； W_i 为第 i 个关节电机的能耗； $l_i(t)$ 为关节电机 i 的消耗功率。

变刚度蛇形机器人的运动距离用 D 表示，本文将运动处于不稳定状态时的总能耗和启动能耗表示为 0。蛇形机器人初始位置表示为 $P_0(x_0, y_0)$ ，第 j 时刻的位置表示为 $P_j(x_j, y_j)$ ，运动距离为

$$D_j = \sqrt{(x_j^2 - x_0^2) + (y_j^2 - y_0^2)} \quad (5)$$

本文仿真研究过程中，参数 $A = \pi/6$ rad， $\varphi_{ij} = 3\pi/10$ rad， $\gamma = 0$ ，刚度参数 K 的取值范围为 [100, 300, 500, 700, 900, 1 100] N·mm/(°)，阻尼系数的取值范围为 [4, 8, 12, 16] N·mm/(°·s⁻¹)，角频率取值范围为 [0.4 π , 1.1 π , 1.8 π , 2.5 π , 3.2 π , 3.9 π] rad/s。

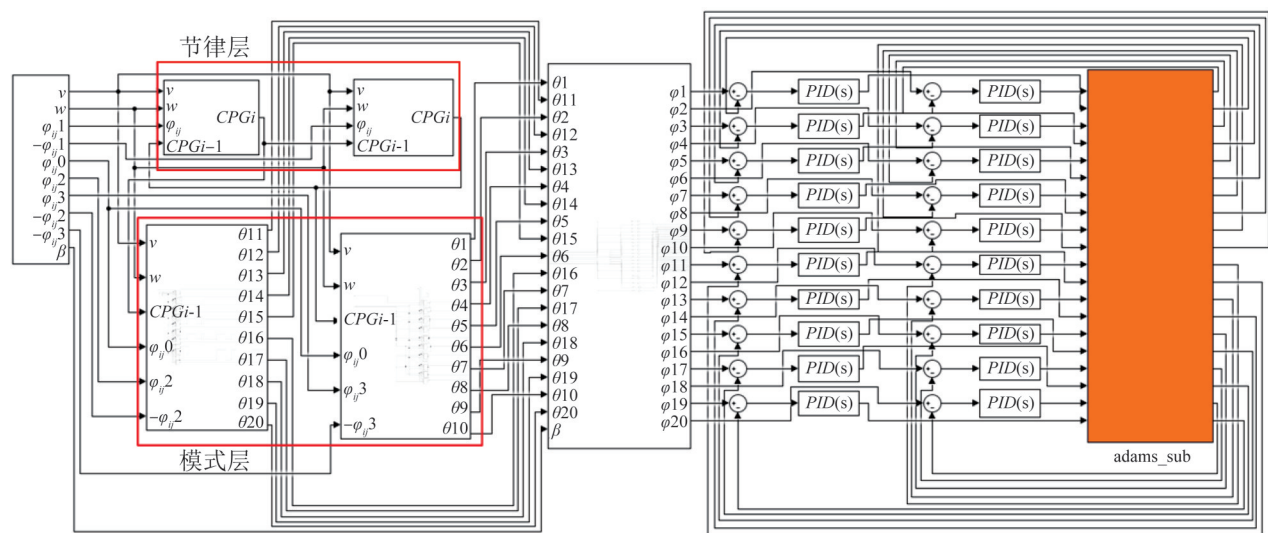


图4 联合仿真控制模型
Fig. 4 Control model of coordinated simulation

3.1 刚度参数、角频率在不同阻尼系数下对启动能耗的影响

本文将变刚度蛇形机器人运动过程分为启动过程和稳定运动过程。在仿真中, 变刚度蛇形机器人的各个关节的初始角度均为 0, 即变刚度蛇形机器人为如图 1 所示的状态。当双层级 CPG 的输出信号达到正常状态时, 变刚度蛇形机器人完成启动过程, 从图 3 可知, 启动过程所需时间为 0.4 s。每次运动仿真的时长设置为 $t=6$ s, 分析在不同阻尼系数下, 刚度参数、角频率对启动能耗 W_0 占总能耗 W 比例 R 的影响, 结果如图 5 所示。

$$W_0 = \sum_{i=1}^m W_{i_0} = \sum_{i=1}^m \int_0^{t_0} |l_i(t)| dt \quad (6)$$

本文将角频率 $\omega > 1.8\pi$ rad/s 定义为高速运动区, 反之称为低速运动区。由图 5 可知, 在高速运动区, 变刚度蛇形机器人的启动能耗占比较低, 大部分均低于 10%; 而在低速运动区中, 变刚度蛇形机器人启动能耗随着刚度参数增大而增大, 最大启动能耗占比将达到 30% 以上。无论高速运动区还是低速运动区, 变刚度蛇形机器人的启动能耗均随着角频率的增大而增大。弹性体的阻尼参数对启动能耗的影响相比角频率和刚度参数较小, 但在低速运动区中, 高阻尼系数的弹性体有效降低了启动能耗, 如图 5(d) 所示, 当阻尼系数达到 $16 \text{ N}\cdot\text{mm}/((^\circ)\cdot\text{s}^{-1})$ 时, 变刚度蛇形机器人的启动能耗均小于 30%。

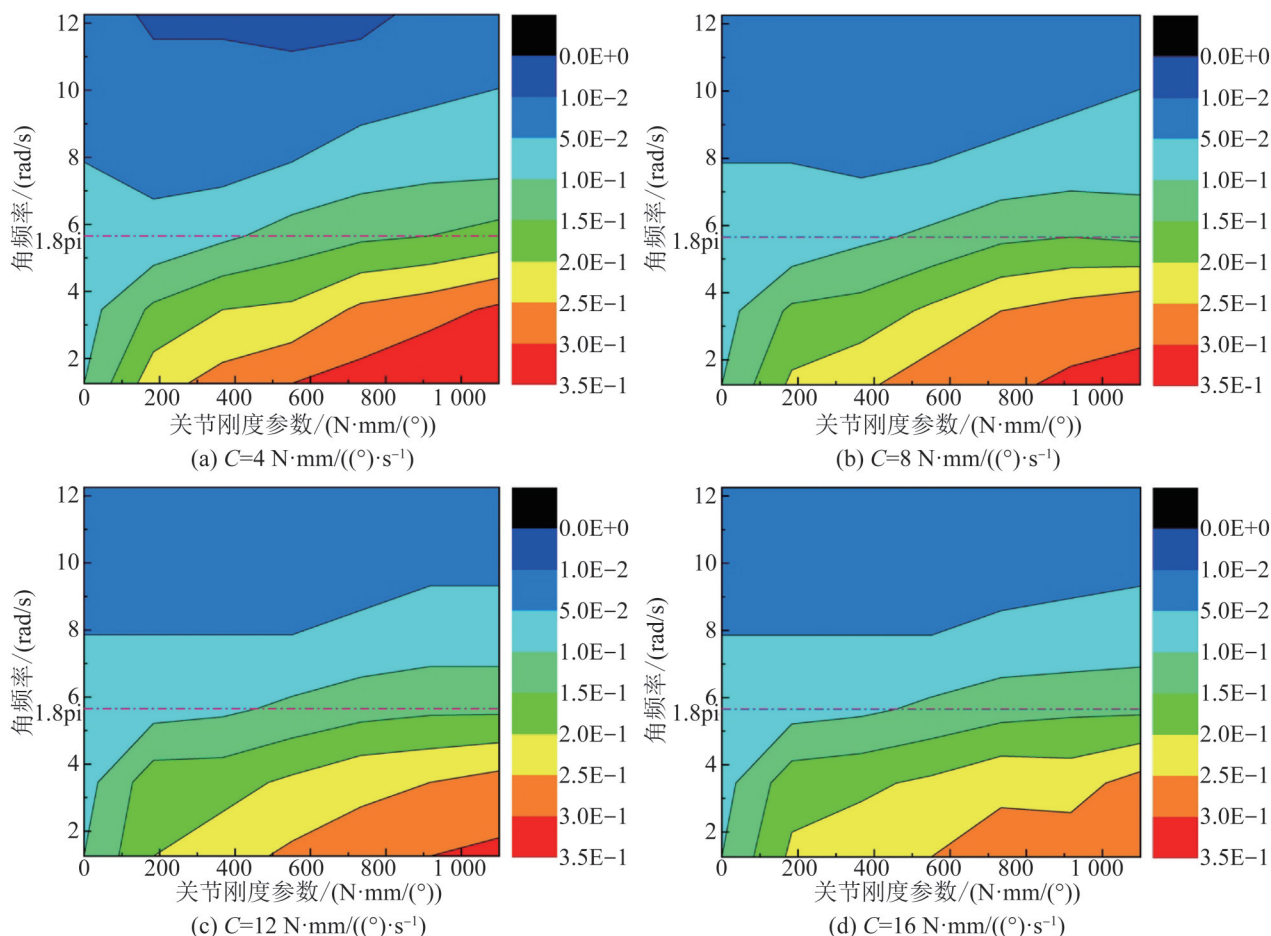


图 5 启动能耗 W_0 占总能耗 W 比例 R
Fig. 5 Percentage R of startup energy consumption W_0 in total energy consumption W

3.2 刚度参数、角频率在不同阻尼系数下对能效的影响

本小节主要分析变刚度蛇形机器人在正常运动阶段中刚度参数、角频率以及阻尼系数对能效的影响, 仿真结果如图6所示, 图中刚度参数为0的点为刚性蛇形机器人运动性能。本文将变刚度蛇形机器人的能效值 η 定义为运动能耗与运动距离的比值:

$$\eta = (W - W_0) / D \quad (7)$$

从图6(a), (c), (e), (g)中可以看出, 当处于低速运动区时, 变刚度蛇形机器人的能效值基本低于刚性蛇形机器人。整体呈现出变刚度蛇形机器人的能效值随弹性体刚度参数的增大而有一定范围的波动,

基本维持在恒定的能效值。从图6(b), (d), (f), (h)中可以看出, 当处于高速运动区时, 刚性蛇形机器人的能效值低于变刚度蛇形机器人, 并且变刚度蛇形机器人的能效值随角频率增加而增加, 即机器人的运动效率降低。如图6(b)所示, 当阻尼系数为 $4 \text{ N}\cdot\text{mm}/((^\circ)\cdot\text{s}^{-1})$, 角频率为 $3.9\pi \text{ rad/s}$, 刚度参数在 $[100, 900] \text{ N}\cdot\text{mm}/(^\circ)$ 范围内时, 变刚度蛇形机器人运动不稳定, 将其能效值设置为0。而当刚度参数继续增大时, 变刚度蛇形机器人的运动恢复正常。并且从图6(d), (f), (h)可以看出, 当增大阻尼系数时, 变刚度蛇形机器人的运动也可以恢复正常, 因此, 具有阻尼特性的弹性体更有利于设计变刚度蛇形机器人。

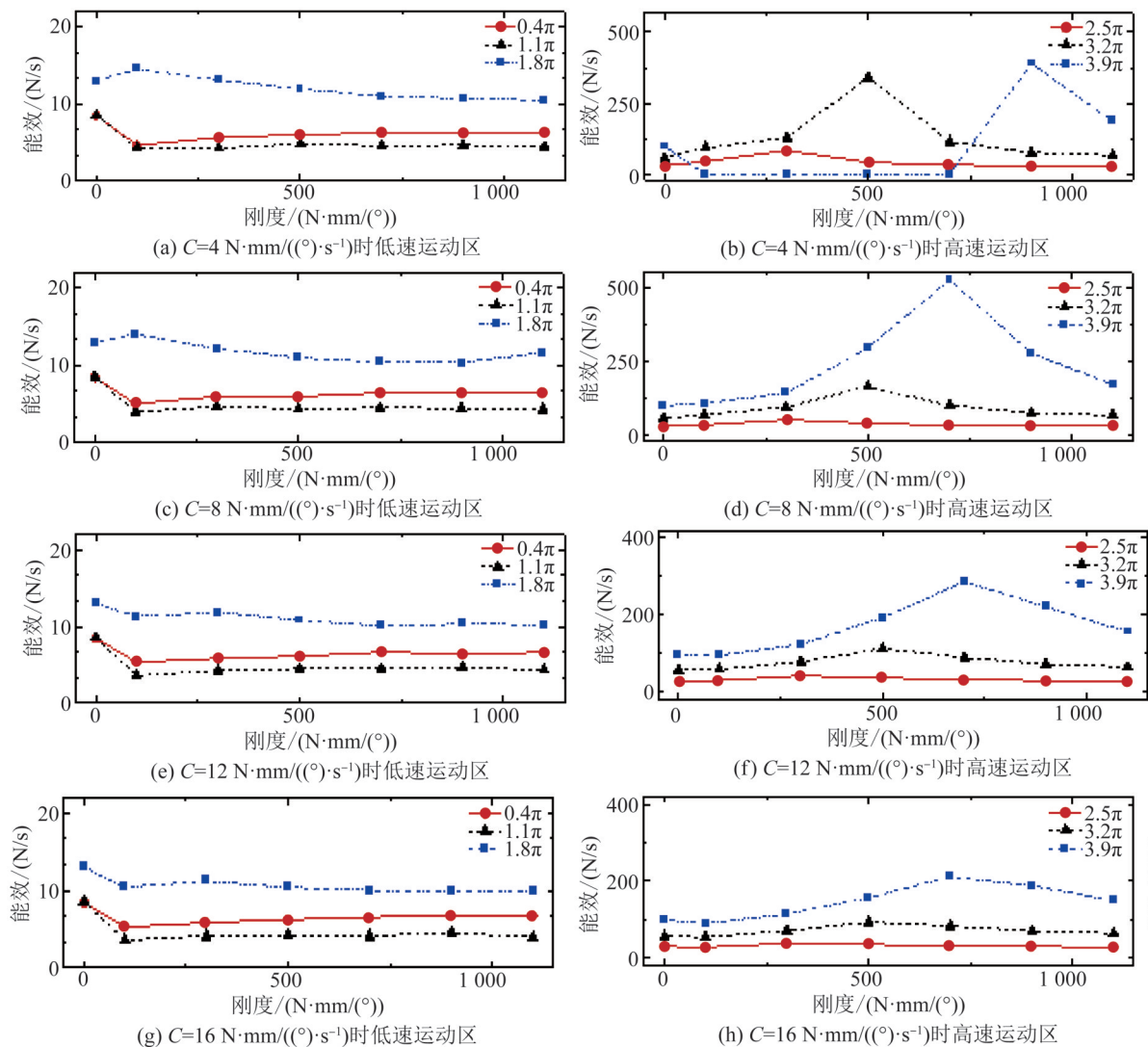


图6 刚度参数 K 与角频率 ω 对能效的影响

Fig. 6 Effect of stiffness K and angular frequency ω on energy efficiency

<http://www.china-simulation.com>

由图 6(b), (d), (f), (h)的结果可以看出, 在高速运动区中, 变刚度蛇形机器人在不同角频率条件下, 其能效值均存在一个峰值点, 即在该条件下的机器人运动能耗最大。并且在不同阻尼系数条件下, 变刚度蛇形机器人的峰值点随刚度参数增大而向右偏移。为分析该现象, 本文提取阻尼系数 $C=8 \text{ N}\cdot\text{mm}/((^\circ)\cdot\text{s}^{-1})$, 角频率 $\omega=3.9\pi \text{ rad/s}$, 刚度参数为 500, 700, 900 $\text{N}\cdot\text{mm}/(^\circ)$ 时的机器人关节控制曲线与对应关节形变曲线数据, 结果如图 7 所示。由于在运动过程中, 变刚度蛇形机器人的 3, 4, 5, 6 号关节的能耗较高, 因此在图 7 中仅展示以上 4 个关节的关节控制曲线和关节形变曲线。如图 7(a)所示, 刚度参数为 500 $\text{N}\cdot\text{mm}/(^\circ)$ 时, 3 号关节控制曲线与对应关节形变曲线的相位近似同步; 如图 7(b)所示, 刚度参数为

700 $\text{N}\cdot\text{mm}/(^\circ)$ 时, 4 号关节控制曲线与对应关节形变曲线的相位近似同步; 如图 7(c)所示, 刚度参数为 900 $\text{N}\cdot\text{mm}/(^\circ)$ 时, 4 号关节控制曲线的相位略微滞后与对应关节形变曲线。对比图 7(a)与 7(b), 关节形变量基本一致, 关节阻尼能耗与形变量幅值成正比, 可认为 2 种情况下的关节阻尼能耗近似相等, 但刚度参数为 500 $\text{N}\cdot\text{mm}/(^\circ)$ 时, 变刚度蛇形机器人的能耗较小, 因此, 可以得出以下结论: 当变刚度蛇形机器人的关节控制曲线的相位与关节形变曲线的相位同步接近于机器人两端, 其消耗能耗较小。对比图 7(b)与 7(c), 刚度参数为 900 $\text{N}\cdot\text{mm}/(^\circ)$ 时关节形变较小, 关节阻尼能耗少。因此, 在变刚度蛇形机器人运动控制过程中, 应该避免控制在能耗峰值点的位置, 从而实现能耗的优化。

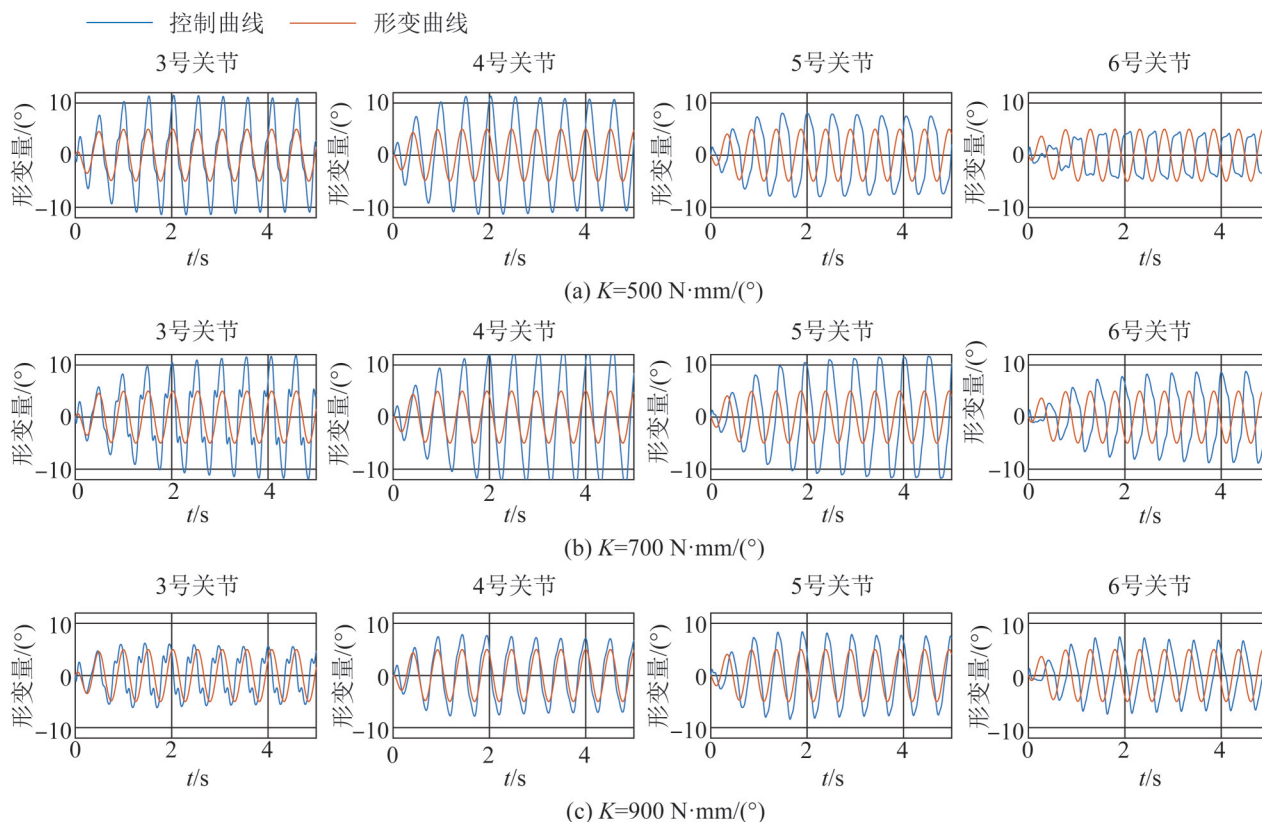


图 7 关节控制函数与对应关节角度形变量的关系
Fig. 7 Relationship between joint control function and corresponding joint torsion spring deformation

4 结论

本文通过 MSC.ADAMS 和 Simulink 软件构建了变刚度蛇形机器人的仿真环境, 研究分析了弹性体阻尼系数、刚度参数及角频率对变刚度蛇形机器人运动能耗的影响。首先, 根据变刚度蛇形机器人的控制要求, 设计了双层级 CPG 运动控制器, 该控制器能够实现关节轨迹和关节刚度的控制。其次, 通过运动仿真研究分析变刚度关节特性参数及控制参数对其运动能耗的影响。本文将变刚度蛇形机器人的运动过程分为了启动阶段和运动阶段, 并根据控制参数角频率将运动分为低速运动和高速运动。仿真结果表明: 在低速运动时, 变刚度蛇形机器人的启动能耗约占总能耗的 10%~35%, 并且启动能耗占比随刚度参数的增加则提高。而在高速运动时, 变刚度蛇形机器人的启动能耗占总能耗不足 10%。阻尼系数能够有效地降低启动能耗占比。而在运动阶段时, 低速运动中的变刚度蛇形机器人的能耗基本比刚性蛇形机器人的能耗小。高速运动中的变刚度蛇形机器人的能耗存在峰值点, 在该特性参数及控制参数的条件下, 变刚度蛇形机器人的能耗最大。因此, 在变刚度蛇形机器人的实际控制过程中, 应该避开机器人在此条件下工作。该极值点可以通过检测关节形变曲线与关节控制曲线的相位关系进行确定, 这将是未来的研究工作之一。

参考文献:

- [1] Hirose S. Biologically Inspired Robots: Snake-like Locomotors and Manipulators[M]. Oxford: Oxford University Press, 1993.
- [2] Kelasidi E, Pettersen K Y, Liljeback P, et al. Locomotion Efficiency of Underwater Snake Robots with Thrusters [C]// 2016 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics. Lausanne, Switzerland: IEEE, 2016: 174-181.
- [3] Wright C, Buchan A, Brown B, et al. Design and Architecture of the Unified Modular Snake Robot[C]// International Conference on Robotics and Automation. St Paul, MN: IEEE, 2012: 4347-4354.
- [4] 郁树梅, 王明辉, 马书根, 等. 水陆两栖蛇形机器人的研制及其陆地和 underwater 步态[J]. 机械工程学报, 2012, 48(9): 18-25.
Yu Shumei, Wang Minghui, Ma Shugen, et al. Development of Amphibious Snake-Like Robot and Its Land and Underwater Gait[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(9): 18-25.
- [5] 唐敬阁, 李斌, 常健, 等. 水下滑翔蛇形机器人滑翔运动建模与优化控制[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2019, 49(1): 94-100.
Tang Jingge, Li Bin, Chang Jian, et al. Modeling and Optimal Control on Gliding Motion of Underwater Gliding Snake-Like Robot[J]. Journal of Southeast University(Natural Science), 2019, 49(1): 94-100.
- [6] 魏武, 张杰, 高勇, 等. 基于旋量与包络理论的蛇形机器人安全攀爬[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2019, 47(10): 13-23.
Wei Wu, Zhang Jie, Gao Yong, et al. Safe Climbing of Snake-Like Robot Based on Screw and Envelope Theory [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science), 2019, 47(10): 13-23.
- [7] Soha P, Khodabakhsh M, Spröwitz A, et al. Spinal Joint Compliance and Actuation in a Simulated Bounding Quadruped Robot[J]. Autonomous Robots(S0929-5593), 2017, 41(2): 437-452.
- [8] Li J, Lam J, Liu M, et al. Compliant Control and Compensation for a Compact Cable-Driven Robotic Manipulator[J]. IEEE Robotics and Automation Letters (S2377-3766), 2020, 5(4): 5417-5424.
- [9] Crespi A, Karakasiliotis K, Guignard A, et al. Salamandra Robotica II: An Amphibious Robot to Study Salamander-Like Swimming and Walking Gaits[J]. IEEE Transactions on Robotics(S1552-3098), 2013, 29(2): 308-320.
- [10] Vespignani M, Melo K, Mutlu M, et al. Compliant Snake Robot Locomotion on Horizontal Pipes[C]// 2015 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics. West Lafayette, IA: IEEE, 2015: 1-6.
- [11] Qiao G F, Wen X L, Song G M, et al. Effects of the Compliant Intervertebral Discs in the Snake-Like Robots: A Simulation Study[C]// International Conference on Robotics and Biomimetics. Qingdao, China: IEEE, 2016: 813-818.
- [12] Park Y J, Huh T M, Park D, et al. Design of a Variable-Stiffness Flapping Mechanism for Maximizing the Thrust of a Bio-Inspired Underwater Robot [J]. Bioinspiration & Biomimetics(S1748-3182), 2014, 9(3): 1-11.
- [13] Sato T, Kano T, Ishiguro A. On the Applicability of the Decentralized Control Mechanism Extracted from the

- True Slime Mold: a Robotic Case Study with a Serpentine Robot[J]. *Bioinspiration & Biomimetics* (S1748-3182), 2011, 6(2): 1-12.
- [14] Travers M, Choset H. Use of the Nonlinear Observability Rank Condition for Improved Parametric Estimation[C]// 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Seattle, USA: IEEE, 2015: 1029-1035.
- [15] Kakogawa A, Jeon S, Ma S G. Stiffness Design of a Resonance-Based Planar Snake Robot with Parallel Elastic Actuators[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*(S2377-3766), 2018, 3(2): 1284-1291.
- [16] Zhang D, Yuan H, Cao Z C. Environmental Adaptive Control of a Snake-Like Robot with Variable Stiffness Actuators[J] *IEEE-CAA Journal of Automatica Sinica* (S2329-9266), 2020, 7(3): 745-751.
- [17] Sato T, Kano T, Ishiguro A. A Decentralized Control Scheme for an Effective Coordination of Phasic and Tonic Control in a Snake-Like Robot[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*(S1748-3182), 2012, 7(1): 1-12.
- [18] 吴伟, 李博, 刘娜娜, 等. 轮式牵引机器人优化设计及运动特性分析[J]. *系统仿真学报*, 2020, 32(5): 918-926.
Wu Wei, Li Bo, Liu Nana, et al. Optimization Design and Locomotion Characteristics Analysis of Wheeled Traction Robot[J]. *Journal of System Simulation*, 2020, 32(5): 918-926.
- [19] 尤波, 陶守通, 黄玲, 等. 基于 MATLAB 和 ADAMS 的肌电假手联合仿真[J]. *系统仿真学报*, 2017, 29(5): 957-964.
You Bo, Tao Shoutong, Huang Ling, et al. Coordinated Simulation of EMG Prosthetic Hand Based on MATLAB and ADAMS[J]. *Journal of System Simulation*, 2017, 29(5): 957-964.
- [20] 乔贵方, 韦中, 张颖, 等. 基于双层级 CPG 的 3 维蛇形机器人运动控制方法[J]. *机器人*, 2019, 41(6): 779-787.
Qiao Guifang, Wei Zhong, Zhang Ying, et al. Double-Layered CPG Based Motion Control Method of the 3D Snake-Like Robot[J]. *Robot*, 2019, 41(6): 779-787.