

蛇形机器人蜿蜒运动性能的仿真研究^①

谢亚飞^②* **** 卢振利^③* **** 刘超* 冯大宇* 单长考* 徐惠钢* 李斌**

(* 常熟理工学院电气与自动化工程学院 常熟 215500)

(** 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 110014)

(*** 中国矿业大学信息与电气工程学院 徐州 221116)

(**** 阿威罗大学,电子和信息通信工程研究所 阿威罗 3810-193,葡萄牙)

摘要 基于用 V-REP 仿真软件建立的蛇形机器人动力学模型,对蛇形机器人的蜿蜒运动性能进行了研究。首先通过蛇形曲线控制蛇形机器人实现蜿蜒运动,对关节角度和力矩情况进行了分析,其次通过变化蛇形曲线公式中的起始弯角、体内形成波个数、弧长变化率来观察分析这些参数对蛇形机器人蜿蜒运动性能的影响,最后研究分析了蛇形机器人蜿蜒运动的爬坡、转弯性能,得出对实现蛇形机器人的实用化有理论、技术意义的结论。

关键词 蛇形机器人, V-REP 仿真, 蛇形曲线, 蜿蜒运动

0 引言

机器人在实际应用环境中的运动,由于机器人机构与环境的不一致性因素较多,不可能很好地反映出其运动特性,因而对机器人运动特性的研究,需要采用机器人建模和仿真的手段^[1,2]。很多蛇形机器人,其本体中的运动控制是开环控制,没有读取关节的力矩和转动的角度,如果要实现闭环控制,需要增加很多传感器和机构装置,这不仅增大了工程难度,也有可能整体上改变了机器人的特性。而仿真软件环境中却可以通过读取关节力矩和转角的反馈来与给定值进行比较,由此可判断输出值是否符合给定值预设范围之内。蜿蜒运动是蛇形机器人运动最典型的节律运动步态之一^[3-6]。通常研究者依据模块化的思想设计搭建垂直关节和水平关节交叉连接的蛇形机器人模型^[7-9];应用蛇形曲线公式产生蜿蜒运动步态关节角度,通过蛇形曲线公式中的

参数来观察和分析其对蛇形机器人蜿蜒运动性能的影响^[10-15]。仿真软件环境下的蛇形机器人动力学模型的建立及相关蜿蜒运动研究可为蛇形机器人实用化的实现提供理论依据及技术储备。

1 蛇形机器人仿真模型的搭建

1.1 仿真平台

蛇形机器人的模型是在 V-REP 仿真平台上设计搭建的。仿真界面如图 1 所示。

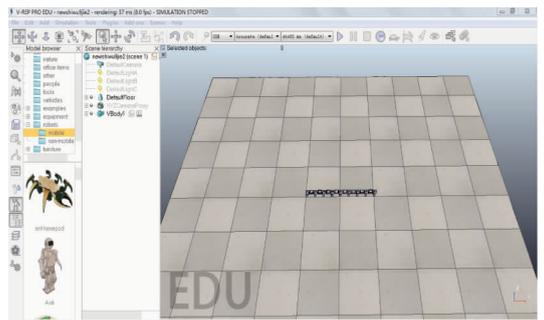


图 1 V-REP 仿真平台

① 国家自然科学基金(61473283),机器人学国家重点实验室开放基金(2014-008),校新引进教师科研启动项目(XZ1306)和葡萄牙科技部基金(CIENCIA2007)资助项目。

② 男,1991年生,硕士;研究方向:机器人智能控制;E-mail: yafei_xie1991@163.com

③ 通讯作者,E-mail: zhenlilu@cslg.cn
(收稿日期:2015-06-10)

1.2 蛇形机器人模型的搭建

本研究设计的蛇形机器人模型由相邻关节电机转轴正交串联而成,接触机构选择为有双向被动轮。模型有8个模块,每个模块由1个垂直舵机和1个水平舵机组成。通过添加 Cuboid(长方体)来组合

成蛇形机器人模块主体,添加 Joint(关节)来作为舵机转轴。舵机长、宽、高分别为 40mm、20mm、40mm;关节长为 44mm,直径为 6mm;舵机支架长、宽、高分别为 44mm、20mm、30mm,厚度为 2mm。单个模块组建过程如图 2 所示。

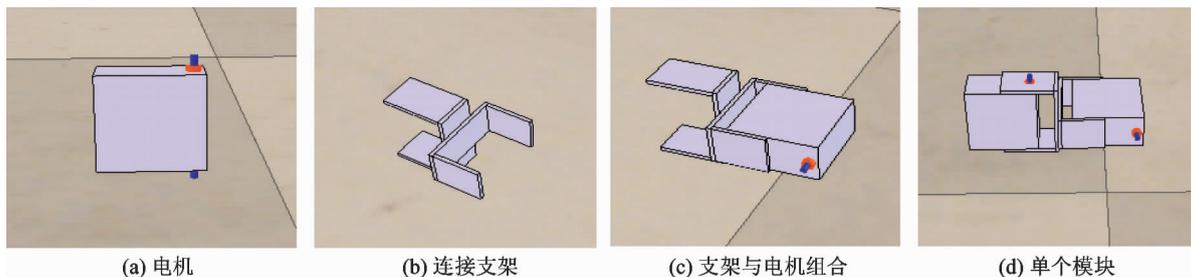


图 2 模块组建过程

在模块基础上,添加 Cylinder(圆柱体)来作为被动轮,关节作为被动轮轮轴,被动轮设计如图 3 所示。

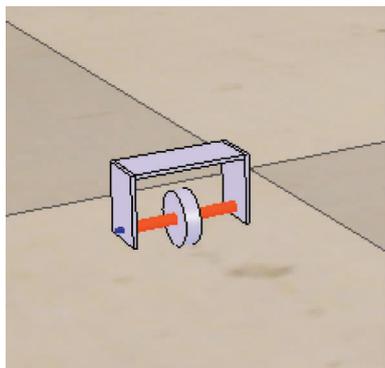


图 3 被动轮

蛇形机器人的运动是通过舵机轴的转动带动其运动的,所以蛇形机器人舵机关节要设置为 Torque 方式,而被动轮轮轴关节不需设置。蛇形机器人舵机关节的转动力矩设为 $10\text{N} \cdot \text{m}$,参照实际的水泥地面环境,在仿真环境中设置摩擦系数为 0.4,蛇形机器人仿真模型总长为 1.14m,总质量为 1.79kg,整体模型如图 4 所示。

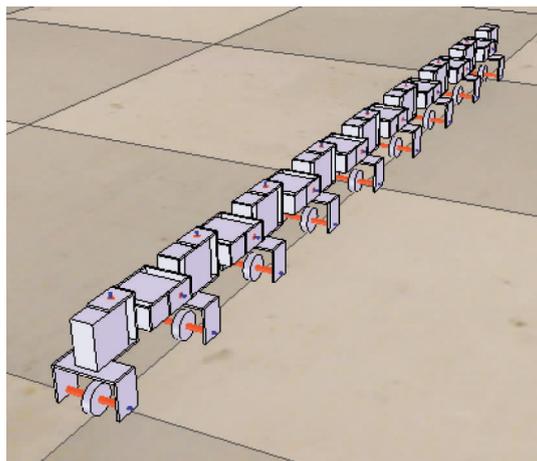


图 4 蛇形机器人仿真模型

蛇形曲线公式为

$$\begin{aligned} \text{rad}[i] = & (-2) \cdot \alpha \cdot \sin\left(\frac{kn \cdot \pi}{N}\right) \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot kn \cdot \pi \cdot \text{arcs}}{L}\right) \\ & + \frac{2 \cdot kn \cdot \pi \cdot i}{N} \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $\text{rad}[i]$ 为关节角度, i 为关节序号; α 为蛇形曲线起始弯角; kn 为蛇形机器人体内形成波个数; N 为模块数; L 为蛇形机器人总长度; arcs 是弧长; π 是圆周率。

2.2 蜿蜒运动及关节角度、力矩分析

在 V-REP 仿真过程中,通过读取蛇形机器人运动的各时刻关节转角值和力矩来观察和分析其蜿蜒运动的性能。蛇形机器人在做蜿蜒运动时是由 8 个

2 蜿蜒运动及关节角度和力矩分析

2.1 蛇形曲线

本文设计的蜿蜒运动试验是基于蛇形曲线进行的。

垂直关节起作用的,通过蛇形曲线产生每个关节相应的转角使机器人产生了类似于生物蛇蜿蜒运动的运动。通过比对规划关节角度与实际反馈关节角度,对分析蜿蜒运动特性具有重要意义。试验都是在 ODE 动力引擎、仿真步长为 50ms 的环境下进行的。选取蛇形曲线一组初始参数如表 1 所示。

表 1 曲线初始参数

| α (rad) | kn | N | L (m) | $arcs$ (m) |
|----------------|------|-----|---------|------------|
| 0.4 | 1.0 | 8 | 1.140 | 20 |

机器人垂直关节角度如图 5 所示。

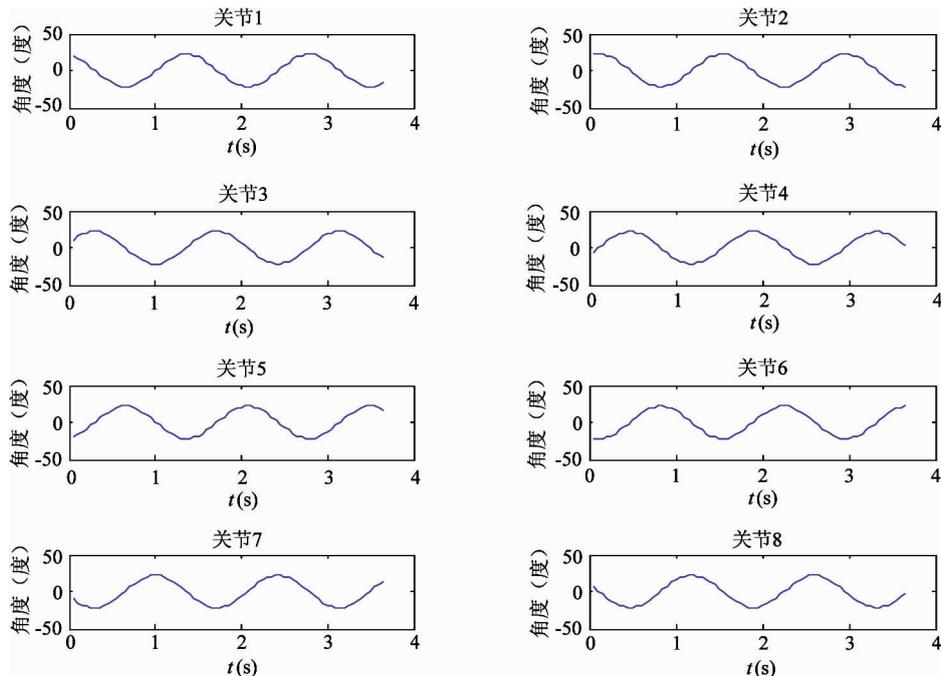


图 5 关节角度随时间变化曲线

对应电机力矩变化如图 6 所示。

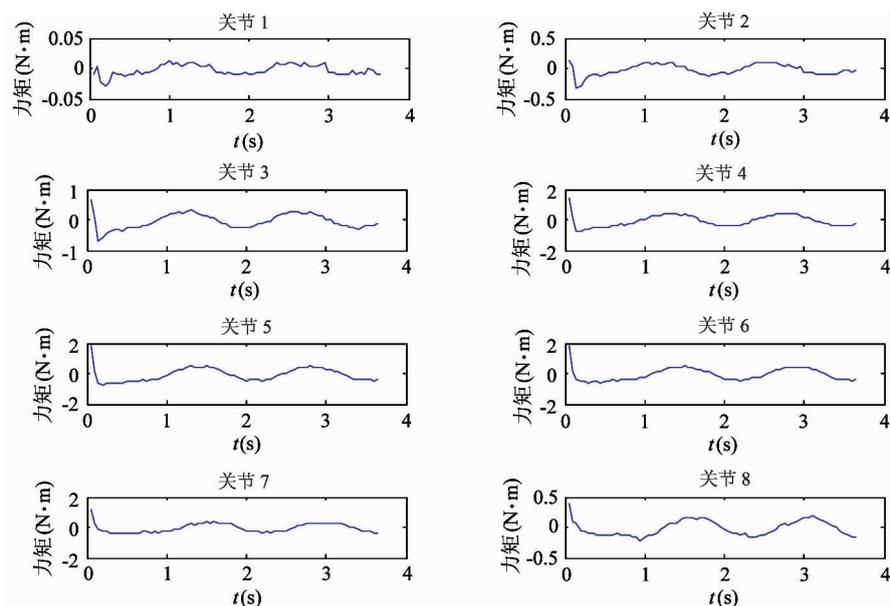


图 6 关节力矩随时间变化曲线

从图5、图6中看出,蛇形机器人在蜿蜒运动过程中关节的角度和力矩都呈现出周期性变化的规律。机器人关节电机的力矩设定值为 $10\text{N}\cdot\text{m}$,通过试验看出机器人运动过程的关节角度在 -90 度到 90 度之间,关节力矩也没有超出设定值,所以机器人充分完成了给定任务。同时,机器人的关节力矩在为机器人电机选择型号时提供依据。机器人试验运动过程如图7所示。注意,机器人真实运动与仿真环境中的各项设定不能完全一致,仿真结果只能提供参考。

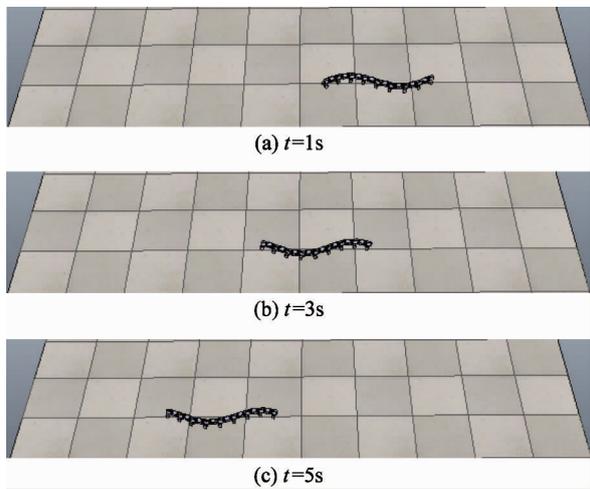


图7 基本运动过程

3 参数调节对蜿蜒运动影响实验

3.1 弧长变化率 (Δs) 对蜿蜒运动的影响

在起始弯角 α 、体内形成波个数 kn 等参数不变的情况下,通过改变 Δs ($arcs = arcs + \Delta s$) 的值,来观察其对蜿蜒运动性能的影响。

试验总结出的数据如表2所示。

表2 不同 Δs 下蛇形机器人前进速率

| Δs | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $V(\text{mm/s})$ | 139.5 | 246.8 | 297.8 | 301.9 | 308.3 | 315.8 | 328.5 |

给出 Δs 与蛇形机器人前进速率的关系曲线如图8所示。

从图8中可明显看出,在蛇形曲线中其它参数不变的情形下,随着 Δs 的逐渐增大,蛇形机器人的

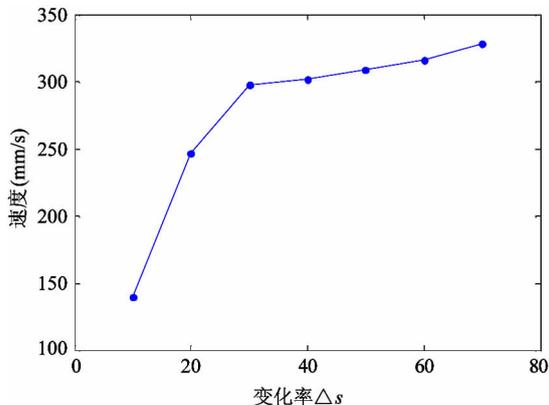


图8 变化率 Δs 与速率关系曲线

前进速率也逐渐增大。

3.2 起始弯角 α 的变化对蜿蜒运动的影响

α 表示蛇形曲线公式的起始弯角,单位为弧度 (rad)。改变蛇形曲线公式中的 α 取值,可以研究幅值变化对蜿蜒运动性能的影响。仿真试验保持参数 $\Delta s = 40$ 、 $kn = 1$ 不变,通过改变 α 取值,观察蛇形曲线公式输出角度对蜿蜒运动性能的影响。

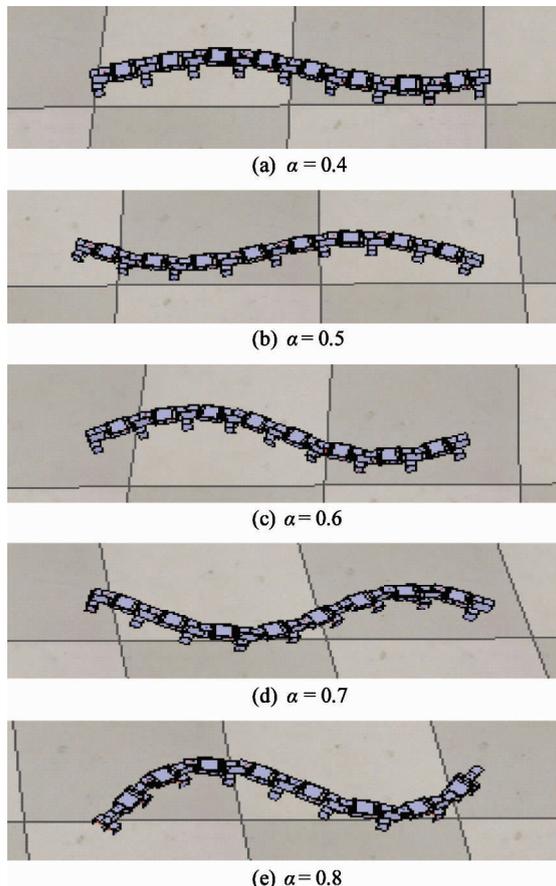


图9 不同 α 下的机器人运动状态

试验中选取 α 为0.4、0.5、0.6、0.7和0.8时的蛇形机器人某时刻运动状态分别如图9(a)、(b)、(c)、(d)、(e)所示。

试验得出的数据如表3所示。

表3 不同 α 下的蛇形机器人前进速率

| α (rad) | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.9 | 1.0 |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
| V (mm/s) | 307.1 | 327.9 | 338.8 | 349.9 | 343.7 | 336.7 | 330 |

根据得出的实验数据给出 α 与蛇形机器人前进速率的关系曲线如图10所示。从图10中可看出,在蛇形曲线其它参数不变的情形下,随着起始弯角 α 的增大,蛇形机器人的前进速率呈现一个先增大后减小的趋势。通过实验可知,在 α 为0.7时,蛇形机器人的速率最快。

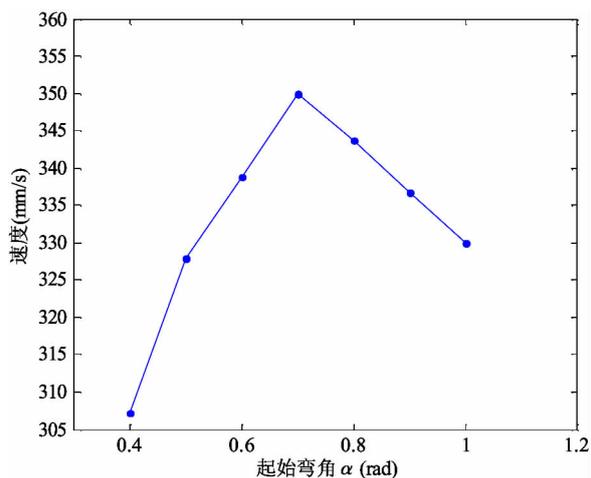


图10 起始弯角 α 与机器人运动速率关系曲线

3.3 体内形成波个数 kn 的变化对蜿蜒运动的影响

在仿真试验中选取 $\alpha = 0.4, \Delta s = 40$, 在蛇形曲线其余参数不变的情况下,改变蛇形机器人体内形成波个数 kn , 来观察其对蛇形机器人蜿蜒运动性能的影响。

试验中选取 kn 为0.5、1.0、1.5、2.0、2.5时的蛇形机器人运动状态分别如图11(a)、(b)、(c)、(d)、(e)所示。

试验得出的数据如表4所示。

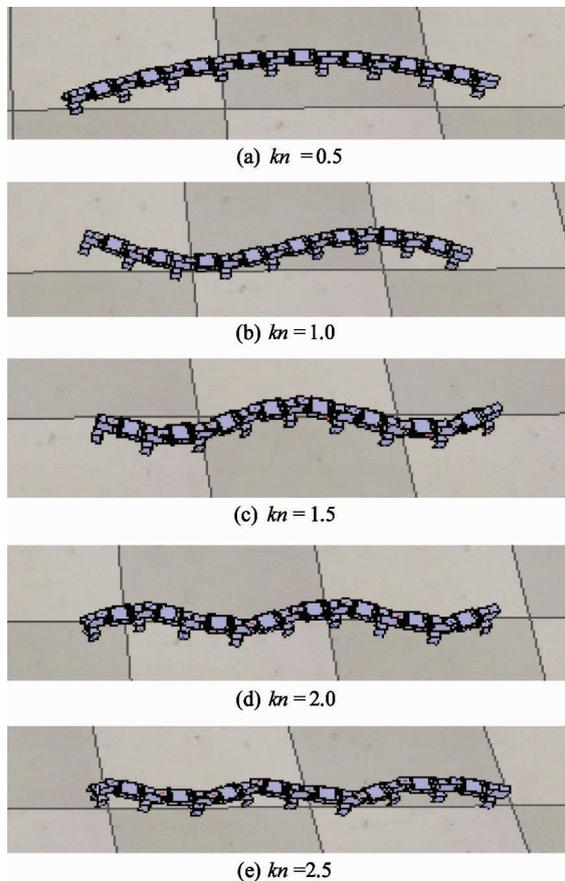


图11 不同 kn 下的机器人运动状态

表4 不同 kn 下的蛇形机器人前进速率

| kn | 0.5 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 2.5 |
|------------|-------|-------|-------|-------|-----|
| V (mm/s) | 365.5 | 307.1 | 295.6 | 272.7 | 220 |

依据实验数据,给出 kn 与蛇形机器人前进速率的关系如图12所示。

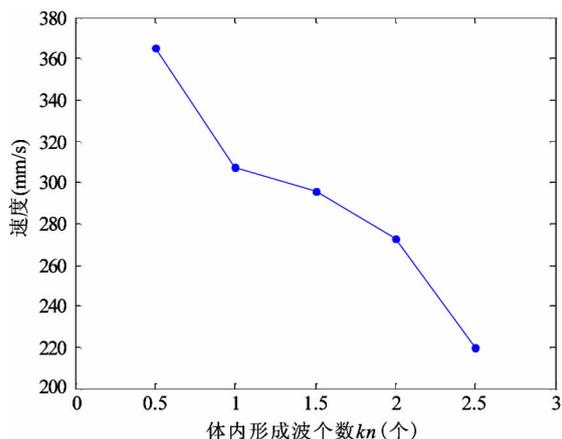


图12 kn 与机器人速率关系曲线

从图 12 中可明显看出,蛇形机器人的前进速率随着体内形成波个数 kn 的增大而减小。

4 蜿蜒运动爬坡试验

为了验证蛇形机器人蜿蜒运动的爬坡能力,为实物机器人能适应斜坡等复杂环境提供理论依据。在 V-REP 仿真软件中搭建了坡长同为 1m,坡度不同、坡面摩擦系数与地面摩擦系数一致的 3 种斜坡,来观其蜿蜒运动爬坡特性。

4.1 2°斜坡

根据表 1 参数,控制蛇形机器人通过蜿蜒运动爬坡,2°的斜坡时蜿蜒运动过程如图 13 所示。

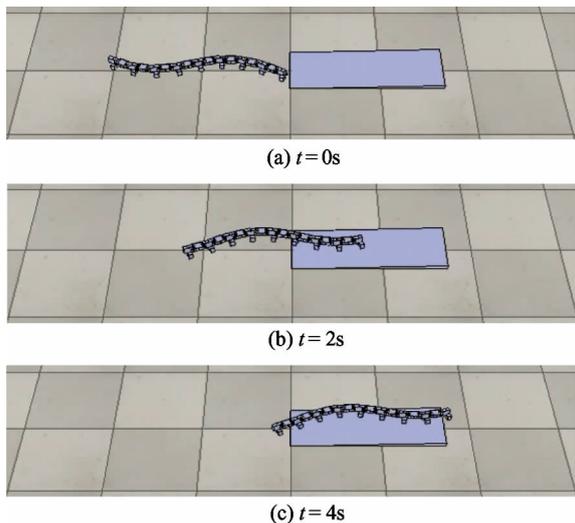


图 13 坡度为 2°的斜坡

4.2 3°斜坡

根据表 1 参数,控制蛇形机器人通过蜿蜒运动爬坡,3°斜坡时蜿蜒运动过程如图 14 所示。

4.3 4°斜坡

根据表 1 参数,控制蛇形机器人通过蜿蜒运动爬坡,4°的斜坡时蜿蜒运动过程如图 15 所示。

在坡度为 2°、3°的斜坡环境中,蛇形机器人能够通过相应的斜坡。而在坡度为 4°的斜坡中,蛇形机器人运动不能达到坡顶而出现下滑引起运动偏移。可见,蛇形机器人蜿蜒运动的爬坡性能不是很好。由于仿真中蛇形机器人的被动轮采用的是双向的,故爬坡效果不好。

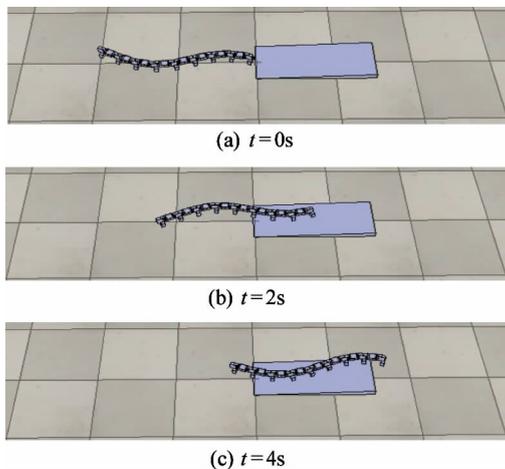


图 14 坡度为 3°的斜坡

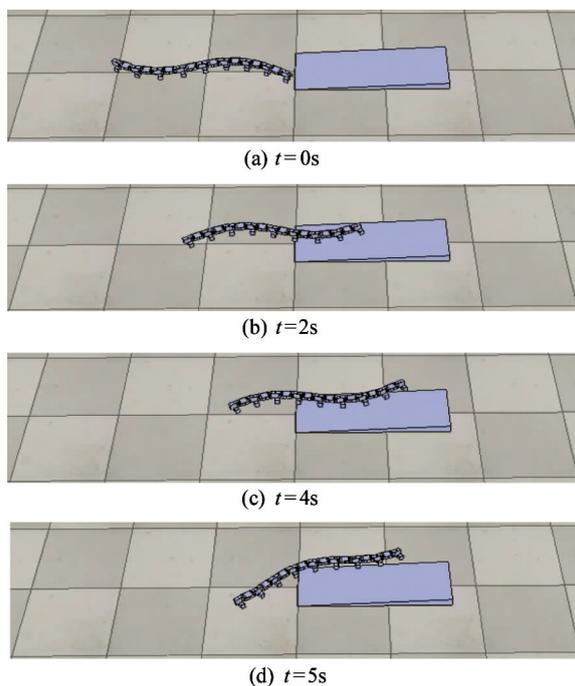


图 15 坡度为 4°的斜坡

5 相位调整法蜿蜒运动转弯试验

蛇形机器人实现转弯的方法有很多,通常是改变蜿蜒运动的幅值和相位差。

蛇形曲线公式为

$$\begin{aligned} \text{rad}[i] = & (-2) \cdot \alpha \cdot \sin\left(\frac{kn \cdot \pi}{N}\right) \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot kn \cdot \pi \cdot \text{arcs}}{L}\right) \\ & + \frac{2 \cdot kn \cdot \pi \cdot i}{N} - \frac{kn \cdot \pi}{N} + \frac{k1 \cdot L}{N} \quad (2) \end{aligned}$$

本试验中在蛇形曲线公式基础上,利用相位调整法来实现蜿蜒运动过程中的转弯,即通过设定相

位偏量 k_1 取值来观察转弯角度。转弯角度设置为 30° 、 45° 、 90° 来观察蜿蜒运动转弯的效果。在仿真环境中,根据角度坐标设置用红色的线条组成了这3种不同角度的环境。

试验中,当 k_1 取 0.0007 、 0.001 和 0.002 时,蛇形

机器人可实现 30° 、 45° 、 90° 转弯,如图 16、图 17 和图 18 所示。从转弯实验可看出,利用相位调整法能有效地实现蜿蜒运动的转弯且转弯连续、灵活、准确度高,基本满足角度环境设置的要求。

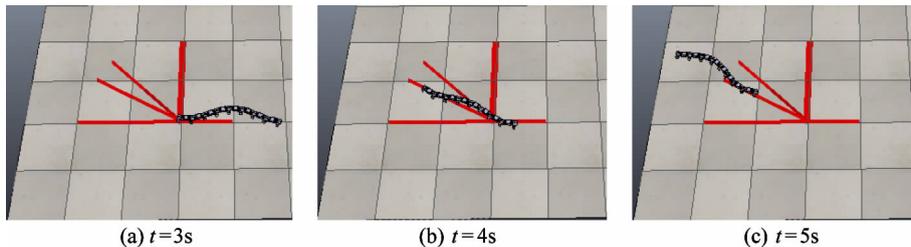


图 16 30° 转弯

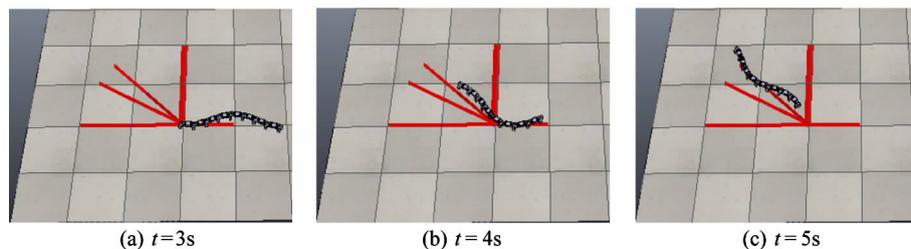


图 17 45° 转弯

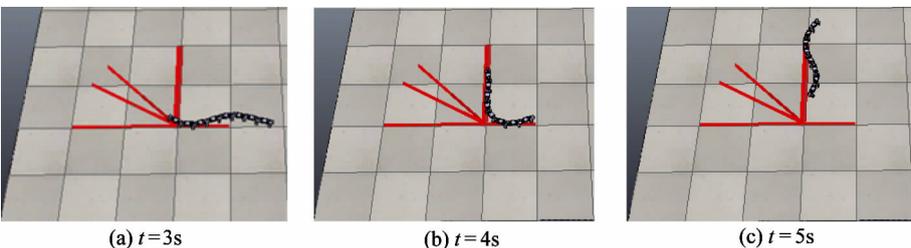


图 18 90° 转弯

6 结论

通过 V-REP 软件搭建蛇形机器人动力学仿真模型,变化蛇形曲线公式中 Δs 、 α 、 kn 来分析它们对蛇形机器人蜿蜒运动性能的影响。通过试验分析得出如下结论:(1)在参数 α 和 kn 不变时,在一个波长范围内,蛇形机器人的速率随着 Δs 的增大而增大。(2)在参数 Δs 和 kn 不变时, α 取值在 0 到 $\frac{\pi}{2}$ 之间,蛇形机器人的速率随着 α 的逐渐增大呈现一个

先增大后减小的趋势,峰值出现在 0.7 左右。(3)在参数 α 和 Δs 不变时,蛇形机器人的速率随着 kn 的增大而减小。

试验证明:(1)双向被动轮接触机构的蛇形机器人蜿蜒运动爬坡能力差;(2)相位调整法控制蜿蜒运动的转弯特性较好。

参考文献

[1] 代学耕,高理基,唐罗生. 国外机器人仿真技术的研究. 机器人, 1988, 10(6): 60-64
 [2] 冯玉倩,高锦宏,王殿君等. 基于 ADAMS 的七自由

- 度机器人动力学分析及仿真. 北京石油化工学院学报, 2013, 21(2): 39-44
- [3] 陈丽, 王越超, 李斌. 蛇形机器人研究现况与进展. 机器人, 2002, 24(6): 559-563
- [4] 刘华, 颜国正, 丁国清. 仿蛇变体机器人运动机理研究. 机器人, 2002, 24(2): 154-158
- [5] 黄恒, 颜国正. 蛇形机器人的运动策略. 电机与控制学报, 2002, 6(3): 249-251
- [6] 崔显世, 颜国正, 陈寅等. 一个微小型仿蛇机器人样机的研究. 机器人, 1999 21(2): 156-160
- [7] 叶长龙, 马书根, 李斌等. 具有万向机构的蛇形机器人运动控制. 中国机械工程, 2004, 15(24): 2235-2240
- [8] 杨文璟, 巩宇鹏, 王杨森等. 蛇形机器人运动机构设计. 企业技术开发, 2011, 30(3): 1-3
- [9] 叶长龙, 马书根, 李斌等. 新型蛇形机器人蜿蜒运动的动力学分析. 机器人, 2005, 27(6): 555-560
- [10] 王雪, 连晓峰, 陈天华等. 蛇形机器人蜿蜒运动控制分析. 计算机测量与控制, 2014, 22(9): 2801-2804
- [11] 左志坚, 李斌, 马书根等. 蛇形机器人水下蜿蜒运动的仿真研究. 仪器仪表学报, 2008, 29(4): 215-220
- [12] 张丹凤, 吴成东, 李斌. 蛇形机器人被动蜿蜒避障运动的研究. 仪器仪表学报, 2011, 32(6): 336-340
- [13] 叶长龙, 马书根, 李斌等. 蛇形机器人的转弯和侧移运动研究. 机械工程学报, 2004, 40(10): 119-123
- [14] 高琴, 王哲龙, 胡卫建等. 一种蛇形机器人蜿蜒运动的实现及环境适应性研究. 大连理工大学学报, 2015, 2: 013
- [15] 庞博, 邓宏彬. 基于 Recurdyn 的蛇形机器人的蜿蜒运动仿真. 河北工程大学学报(自然科学版), 2013, 30(1): 95-98

Simulation research on the serpentine locomotion performance of a snake-like robots

Xie Yafei^{* **}, Lu Zhenli^{* ** **}, Liu Chao^{*}, Feng Dayu^{*}, Shan Changkao^{*}, Xu Huigang^{*}, Li Bin^{**}

(* School of Electrical Engineering and Automation, Changshu Institute of Technology, Changshu 215500)

(** State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110014)

(*** China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116)

(**** IEETA, University of Aveiro, Aveiro 3810-193, Portugal)

Abstract

A dynamic model for snake-like robots was developed based on the V-REP simulation software, and a study on the serpentine locomotion performance of snake-like robots was conducted by using the model. Firstly, the serpenoid curve was used to control snake-like robots' serpentine locomotion for analysis of the angle and torque of the joints, secondly, the influences the parameters of bending angle, S-shape number and arc length variation speed on snake-like robots' serpentine locomotion were investigated and analyzed by changing the values of the above parameters in the serpenoid curve formula, and finally, the robots' climbing and turning performance was tested and analyzed. The study gives the conclusions of theoretical and technical significance for realizing snake-like robots' practical applications.

Key words: snake-like robot, V-REP simulation, serpenoid curve, serpentine locomotion