

基于幅值调整法的蛇形机器人避障研究<sup>①</sup>

卢振利<sup>②\*\*\*</sup> 谢亚飞<sup>\*\*\*\*</sup> 刘超<sup>\*</sup> 单长考<sup>\*</sup> 李斌<sup>\*\*</sup>

(<sup>\*</sup>常熟理工学院电气与自动化工程学院 常熟 215500)

(<sup>\*\*</sup>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)

(<sup>\*\*\*</sup>中国矿业大学信息与电气工程学院 徐州 221116)

**摘 要** 设计了蛇形机器人及其双向被动轮地面接触机构,给出了相应模块单元工程实现的技术路线,测试了该机器人系统在具体环境中应用蛇形曲线公式参数  $\alpha$  完成蜿蜒运动的性能及结合幅值调整法实现转弯的功能。应用红外传感器来感知障碍物的几何特性。针对不同尺寸障碍物采用绕障蜿蜒运动行进策略或顺障蜿蜒运动行进策略实现避障功能。该工作为蛇形机器人实用化提供技术储备。

**关键词** 蛇形机器人, 避障, 幅值调整(AM), 蜿蜒运动

0 引 言

蛇形机器人应用了独特的“无肢节律运动”来模仿生物蛇的蜿蜒运动、侧向运动和直线运动,这是机器人学运动方式的一个重大突破<sup>[1,2]</sup>,其中蜿蜒运动效率最高。在实际应用中,蛇形机器人在前进时经常会遇到障碍物,为了避免和障碍物发生碰撞,蛇形机器人必须具有避障功能,使其能够有效地避开障碍物,不贻误任务执行<sup>[3]</sup>。通常蛇形机器人应用蜿蜒运动结合转弯来实现避障功能<sup>[4]</sup>。本研究从工程应用的角度进行了探讨,提出了基于幅值调整的蛇形机器人避障方法。

1 研究特点及目的

蛇形机器人实现转弯的方式很多<sup>[5-12]</sup>,有的是基于环境作用力,有的是基于控制函数调节运动性能,但由于蛇形机器人身体结构和运动方式的特殊性,多数实验结果都是在单件蛇形机器人样机上取

得的,运动性能数据很难为其他蛇形机器人应用工程研发带来直接借鉴价值。本研究的特点和目的就是应用可以工程化的样机为蛇形机器人实用化提供技术储备。

为研究蛇形机器人实用性,本研究设计了蛇形机器人样机如图 1 所示<sup>[13,14]</sup>;应用红外传感器实现障碍物探测,避障传感器如图 2 所示。同时实现了相位调整法的避障功能<sup>[3]</sup>。

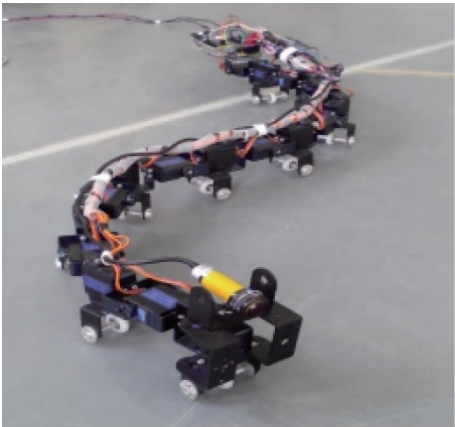


图 1 蛇形机器人体

① 国家自然科学基金(61333016),机器人学国家重点实验室开放基金(2014-008)和校新引进教师科研启动项目(XZ1306)资助项目。  
② 男,1974 年生,博士,硕士生导师;研究方向:机器人智能控制;联系人,E-mail: zhenlilu@cslg.cn  
(收稿日期:2016-07-12)

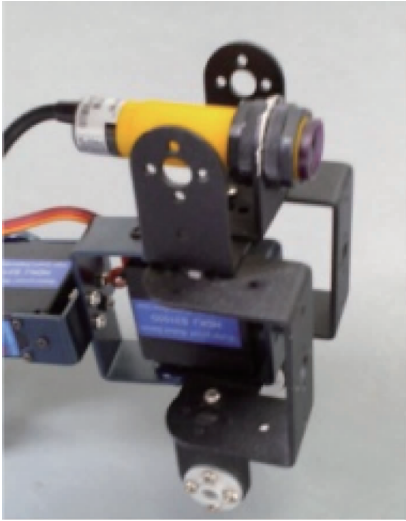


图 2 避障传感器

本文研究从工程角度,结合一致性的模块搭建了蛇形机器人本体。针对该蛇形机器人在特定环境(光滑水泥地面)中应用蛇形曲线公式控制蛇形机器人实现蜿蜒运动和转弯的参数运动性能进行了实验分析,得到的结果具有可再现性,可为推动蛇形机器人的工程化和实用化提供技术储备。

2 幅值调整法实现蜿蜒运动

蛇形机器人蜿蜒直线运动时,可以结合幅值调整法实现转弯功能,蛇形曲线公式如下:

$$\beta_i(s) = -2\alpha \sin(Kn\pi/N) (\sin(2Kn\pi s/L + 2Kn\pi/N))$$
  
(1)

式中  $\beta_i(s)$  为关节  $i$  的转角,  $\alpha$  为蛇形曲线起始弯角,  $Kn$  为  $S$  波个数,  $N$  为关节数,  $L$  为机器人长度,  $S$  为蜿蜒运动速率。

幅值调整法是指在蛇形曲线其它参数给定的情况下(如表 1 所示),通过改变  $\alpha$  的值来实现蛇形机器人蜿蜒运动的幅度(其中蛇形机器人蜿蜒运动的距离为 1.87m)。具体实验如下:

表 1 蛇形曲线参数表

|                |      |
|----------------|------|
| $Kn$           | 1.0  |
| $N$            | 8    |
| $L(\text{mm})$ | 1140 |
| $\Delta S$     | 3    |

(1) 当  $\alpha$  为 0、0.1、0.2 三个数值时,蛇形机器人不能正常蜿蜒运动,如图 3 所示。

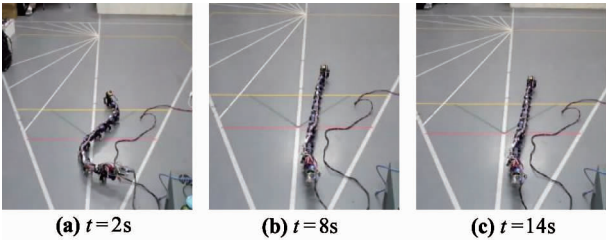


图 3 实验结果

(2) 当  $\alpha$  为 0.3、0.4、0.5 三个数值时,蛇形机器人蜿蜒运动速度较慢,如图 4 所示。 $\alpha$  为 0.3 时,蜿蜒运动速度  $V = 0.0935\text{m/s}$ 。

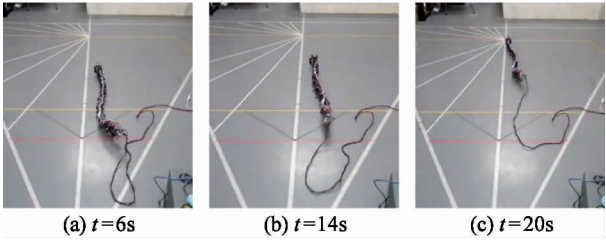


图 4 实验结果 ( $\alpha = 0.3$ )

(3) 当  $\alpha$  为 0.6、0.7、0.8、0.9 四个数值时,蛇形机器人蜿蜒运动速度较快,如图 5 所示。 $\alpha$  为 0.6 时,蜿蜒运动速度  $V = 0.1625\text{m/s}$ 。

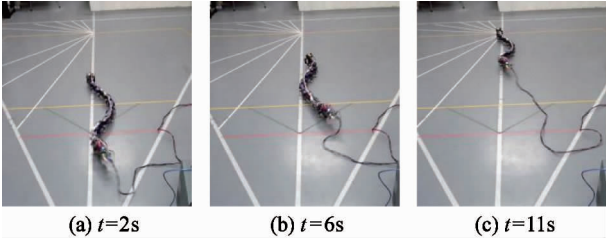


图 5 实验结果 ( $\alpha = 0.6$ )

(4) 当  $\alpha$  为 1.0、1.1、1.2 三个数值时,蛇形机器人蜿蜒运动速度较慢,如图 6 所示。 $\alpha = 1.1$ , 蜿蜒运动速度  $V = 0.1436\text{m/s}$ 。

(5) 当  $\alpha \geq 1.3$  时,由于受到蛇形机器人硬件机构的限制,蛇形机器人不能正常蜿蜒运动,如图 7 所示。

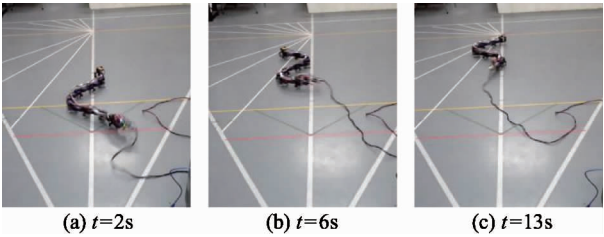


图 6 实验结果 ( $\alpha = 1.1$ )

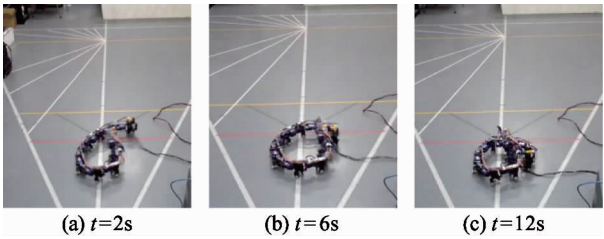


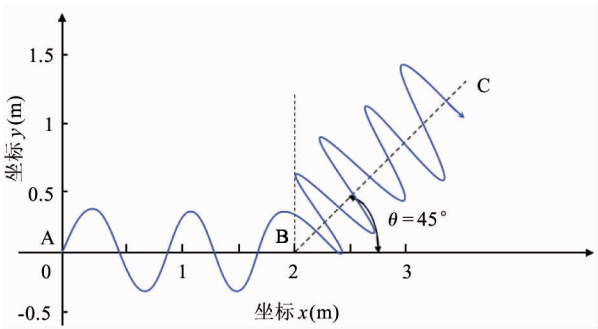
图 7 实验结果 ( $\alpha \geq 1.3$ )

通过以上实验得出蛇形曲线参数  $\alpha$  对蛇形机器人蜿蜒运动性能的影响,如表 2 所示。

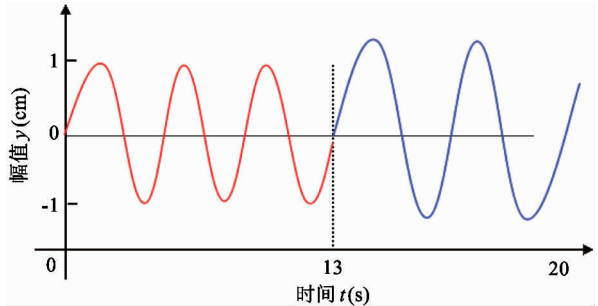
| 表 2 起始弯角弧度 $\alpha$ 对蛇形机器人运动性能的影响 |                            |            |              |
|-----------------------------------|----------------------------|------------|--------------|
| $\alpha$                          | 工作区                        | 时间 $t$ (s) | 速度 $V$ (m/s) |
| 0                                 |                            |            | 0            |
| 0.1                               | 不正常工作区                     |            | 0            |
| 0.2                               |                            |            | 0            |
| 0.3                               |                            | 20.00      | 0.0953       |
| 0.4                               | 正常工作区<br>(蛇形曲线幅度小,<br>速度慢) | 13.00      | 0.1438       |
| 0.5                               |                            | 12.50      | 0.1496       |
| 0.6                               |                            | 11.51      | 0.1625       |
| 0.7                               | 正常工作区<br>(蛇形曲线幅度大,<br>速度快) | 11.23      | 0.1665       |
| 0.8                               |                            | 11.20      | 0.1670       |
| 0.9                               |                            | 11.12      | 0.1682       |
| 1.0                               | 正常工作区                      | 11.24      | 0.1664       |
| 1.1                               | (蛇形曲线幅度太大,<br>速度慢)         | 13.02      | 0.1436       |
| 1.2                               |                            | 13.00      | 0.1438       |
| 1.3                               | 不正常工作区                     |            | 0            |

3 基于幅值调整法实现蛇形机器人转弯

通过改变蛇形曲线参数  $\alpha$  的值,来改变蛇形机器人蜿蜒运动的幅度,实现蛇形机器人转弯功能。蛇形机器人 45 度转弯的运动轨迹和关节角度变化如图 8 所示。



(a) 蛇形机器人运动轨迹示意图



(b) 关节角度变化

图 8 蛇形机器人 45 度转弯

3.1  $\alpha = 0.3$ ,依次增加 0.1 实现蛇形机器人转弯实验

(1)蛇形曲线参数  $\alpha$  由 0.3 依次增加 0.1 变为 0.4、0.5、0.6,无转弯效果。图 9 所示为  $\alpha$  由 0.3 变为 0.5 的实验结果。

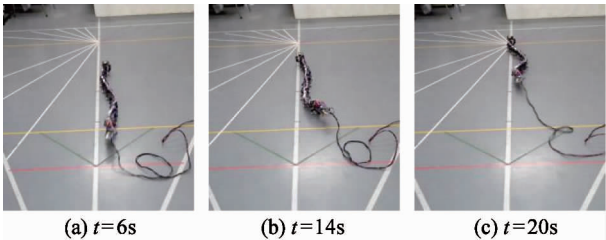


图 9 实验结果

(2)蛇形曲线参数  $\alpha$  由 0.3 依次增加 0.1 变为 0.7、0.8、0.9,其转弯效果不明显。图 10 所示为  $\alpha$  由 0.3 变为 0.9 的实验结果。

(3)蛇形曲线参数  $\alpha$  由 0.3 依次变为 1.0、1.1、1.2,其转弯效果明显。如图 11 所示为蛇形机器人 45 度转弯,  $\alpha$  由 0.3 变为 1.1 的实验结果。

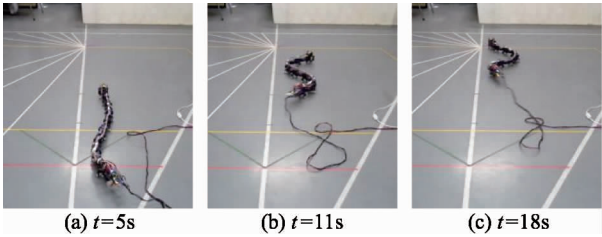


图 10 实验结果

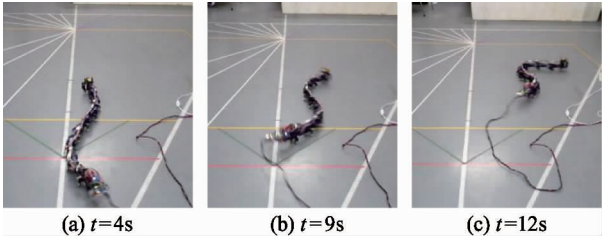


图 11 实验结果

3.2  $\alpha=1.2$ ,依次减小0.1 实现蛇形机器人转弯实

(1)蛇形曲线参数  $\alpha$  由 1.2 依次减小 0.1 变为 1.1、1.0,无转弯效果。图 12 所示为  $\alpha$  由 1.2 变为 1.1 的实验结果。

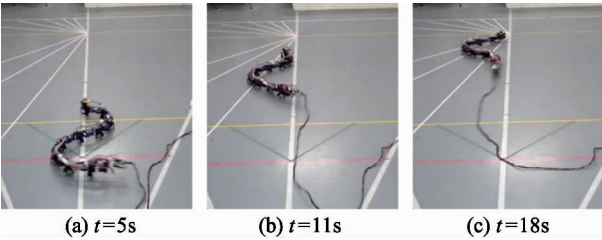


图 12 实验结果

(2)蛇形曲线参数  $\alpha$  由 1.2 依次减小 0.1 变为 0.9、0.8、0.7、0.6、0.5,转弯效果明显。如图 13 所示为蛇形机器人转弯 30 度, $\alpha$  由 1.2 变为 0.9 的实验结果。

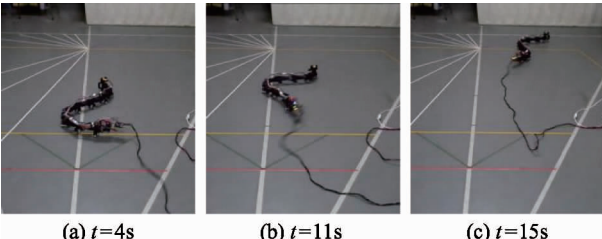


图 13 实验结果

(3)蛇形曲线参数  $\alpha$  由 1.2 依次减小 0.1 变为 0.4、0.3,转弯效果明显。图 14 所示为  $\alpha$  由 1.2 变为 0.4 的实验结果。

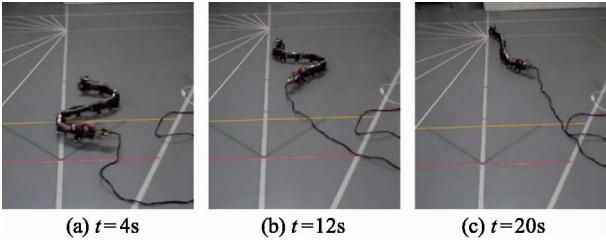


图 14 实验结果

3.3  $\alpha=0.7$ ,依次变化0.1 实现蛇形机器人转弯实

(1)蛇形曲线参数  $\alpha$  由 0.7 依次变化为 0.6、0.5、0.4、0.3,其无转弯效果。图 15 所示为  $\alpha$  由 0.7 变为 0.5 的实验结果。

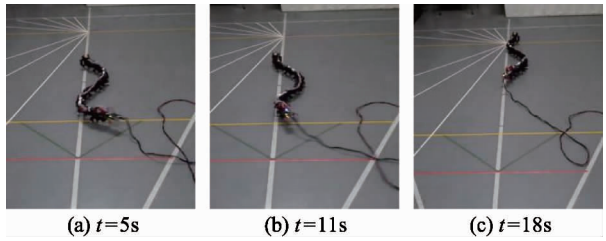


图 15 实验结果

(2)蛇形曲线参数  $\alpha$  由 0.7 依次变化为 0.8、0.9,其转弯效果差。图 16 所示为  $\alpha$  由 0.7 变为 0.9 的实验结果。

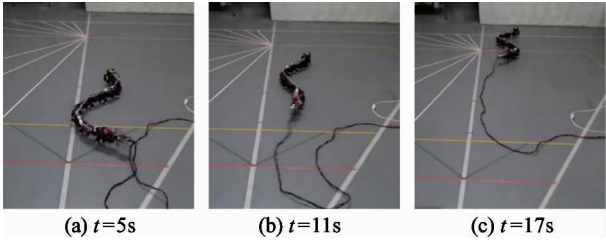


图 16 实验结果

(3)蛇形曲线参数  $\alpha$  由 0.7 依次变化为 1.0、1.1、1.2,其转弯效果明显。如图 17 所示为  $\alpha$  由 0.7 变为 1.0 的实验结果。

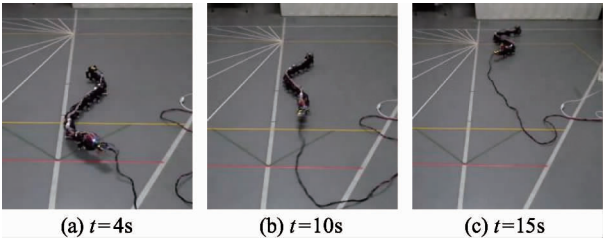


图 17 实验结果

3.4 讨论

通过上述实验结果可得,当蛇形曲线参数  $\alpha$  每次变化范围很小时,则蛇形机器人蜿蜒运动幅度变化也很小,其转弯效果很差,甚至无转弯效果;当蛇形曲线参数  $\alpha$  每次变化范围较大时,则蛇形机器人运动幅度变化也就很大,其转弯效果很明显。其中蛇形机器人每次转弯的方向是由蛇形机器人当前位置决定的,不是人为控制的。

4 蛇形机器人避障策略

在蛇形机器人头部装一个 E18-D80NK 红外光电开关传感器(漫反射式避障传感器模块),用来检测其前方是否有障碍物。蛇形机器人在其前进方向遇到障碍物时,利用幅值调整法来改变蛇形机器人蜿蜒运动的幅度,达到控制机器人蜿蜒运动中避开障碍物的目的。

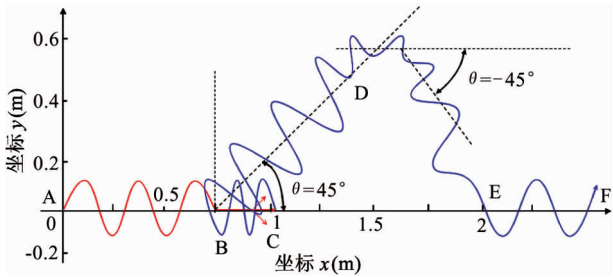
为实现避障,蛇形机器人要探测障碍物的几何尺寸。蛇形机器人头部关节安装的红外避障传感器左右分别旋转  $45^\circ$ ,若在  $45^\circ$  角位置红外传感器探测到前方无障碍物,则认为是遇到小型障碍物,执行绕过障碍物策略;若在  $45^\circ$  角位置红外传感器探测到前方仍有障碍物,则认为是遇到大型障碍物,执行转弯  $90^\circ$  后顺着障碍物边缘方向继续蜿蜒前行策略。

4.1 小型障碍物避障策略

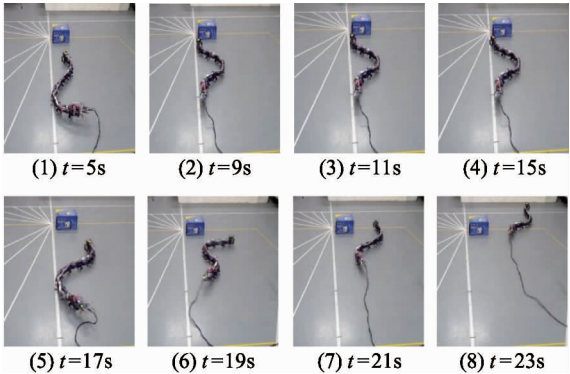
蛇形机器人实现小型障碍物避障策略步骤如:蛇形机器人按照探测结果,设定为小型障碍物,选择绕障策略。在前进方向遇到障碍物后转弯绕过障碍物,然后继续蜿蜒运动,如图 18 所示。

4.2 大型障碍物避障策略

蛇形机器人实现大型障碍物避障策略步骤如:遇到大型障碍物转弯后顺着障碍物边缘方向继续蜿蜒前行,实现避障功能,如图 19 所示。

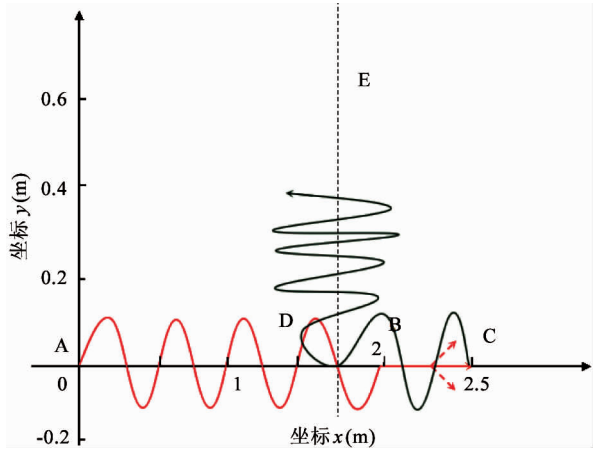


(a) 蛇形机器人运动轨迹示意图

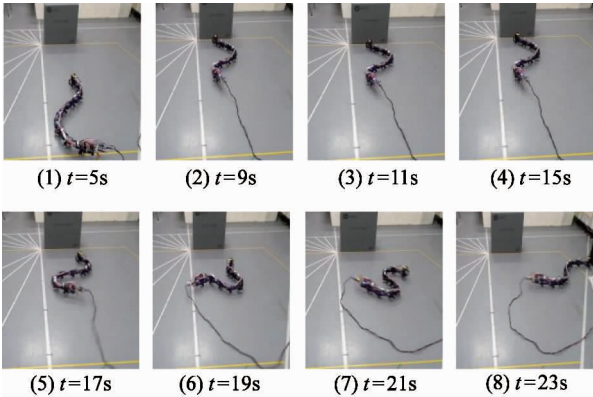


(b) 实验结果

图 18 蛇形机器人小型障碍物避障策略



(a) 蛇形机器人运动轨迹示意图



(b) 实验结果

图 19 蛇形机器人大型障碍物避障策略

## 5 结 论

本文从工程应用角度,以其他学者可以复现的方式,搭建了蛇形机器人及双向被动轮接触机构,解决了蛇形机器人运动中由于机构不一致和其他人难于复现实验结果的工程问题。同时结合特定环境下,测试了不同蛇形曲线参数  $\alpha$  作用下蛇形机器人实现蜿蜒运动及转弯的性能。针对特定环境下实验研究得出转弯角度与幅值调整法参数的关系,应用红外传感器探测障碍物的几何尺寸,根据结果选择绕障蜿蜒运动或者顺障蜿蜒运动策略实现避障功能。

本研究为面向实际应用的蛇形机器人系统设计提供了技术储备。

### 参考文献

[ 1 ] Bauchot R. Snakes—A Nature History. Sterling Publishing Company, Inc. New York, 1994. 60-75

[ 2 ] HIROSE S. Biologically Inspired Robots—Snake-like Locomotors and Manipulators. Oxford: Oxford University Press, 1993

[ 3 ] 卢振利,刘超,谢亚飞等. 基于相位调整法实现蛇形机器人避障功能的研究. 高技术通讯, 2015, 25(5): 508-514

[ 4 ] 胡德利. 蛇形机器人在障碍物环境中的运动研究:[硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳航空航天大学机电工程学院, 2011. 31-54

[ 5 ] 黄心汉,波斯科,王敏. 基于模糊传感器的机器人动

态障碍环境中的运动控制. 模糊系统与数学, 2000, 14(1):100-110

[ 6 ] Kohl A M, Pettersen K Y, Kelasidi E, et al. Planar path following of underwater snake robots in the presence of ocean currents. *IEEE Robotics & Automation Letters*, 2016, 1(1):383-390

[ 7 ] 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

[ 8 ] 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水下步态. 机械工程学报,2012,48(9): 18-25

[ 9 ] Wu X, Ma S. Head-navigated locomotion of a snake-like robot for its autonomous obstacle avoidance. In: *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Taipei, China, 2010. 401-406

[ 10 ] Transeth A A, Leine R I, Glocker C, et al. Snake robot obstacle-aided locomotion: modeling, simulations, and experiments. *Robotics IEEE Transactions on*, 2008, 24(1):88-104

[ 11 ] Şahin Yildirim, Yaşar E. Development of an obstacle-avoidance algorithm for snake-like robots. *Measurement*, 2015, 73:68-73

[ 12 ] Birbilis G I, Aspragathos N A. Multi-agent snake-like motion with reactive obstacle avoidance. In: *Proceedings of the Introduction to the special section on Innovative Production Machines and Systems (I \* PROMS)*, Oxford: Elsevier. 2006. 584-589

[ 13 ] 卢振利,刘超,谢亚飞等. 蛇形机器人的设计及摩擦力对其运动性能影响的分析. 高技术通讯, 2015, 25(3):293-299

[ 14 ] 卢振利,谢亚飞,张国栋等. 蛇形机器人伸缩运动性能研究. 高技术通讯, 2016, 26(4):381-388

## Study on obstacle avoidance of a snake-like robot based on amplitude modulation

Lu Zhenli<sup>\*\*\*</sup>, Xie Yafei<sup>\*\*\*\*</sup>, Liu Chao<sup>\*</sup>, Shan Changkao<sup>\*</sup>, Li Bin<sup>\*\*</sup>

(<sup>\*</sup> School of Electrical Engineering and Automation, Changshu Institute of Technology, 215500, Changshu)

(<sup>\*\*</sup> State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, CAS, Shenyang 110014)

(<sup>\*\*\*</sup> China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116)

### Abstract

A snake-like robot and its ground contacting mechanism with dual directional passive wheels were developed, and the technical solution for engineers to re-produce the corresponding modules was given. The performance of the robot in achieving serpentine locomotion by using the parameter  $\alpha$  of the serpoind curve formula in given environments and its function of realizing turn motion based on amplitude modulation were tested. An infrared sensor was used to sense the geometrical properties of obstacles, and the robot can adopt the direct serpentine locomotion or the roundabout sperpentine locomotion to realize obstacle avoidance according to the measured geometrical properties of obstacles. The study provides the technical reserve for practicalizing snake-like robots.

**Key words:** snake-like robot, obstacle avoidance, amplitude modulation (AM), serpentine locomotion