

蛇形机器人水中转弯游动仿真研究^①

卢振利^②*** 谢亚飞* **** 徐惠钢* 刘 军**** 单长考* 波罗瓦茨·布朗尼斯拉夫***** 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)

(**** 浙江大学生物医学工程与仪器科学学院 杭州 310027)

(***** 诺维萨德大学技术科学学院 诺维萨德 21000, 塞尔维亚)

摘 要 观察了自然界蛇在水中遇到障碍时的游动状态,基于 V-REP 动力学仿真软件搭建了适于水中蜿蜒游动的蛇形机器人,并在蜿蜒游动的基础上研究了其转弯游动的性能。依据蛇形曲线,拓展了生成相位调整、中心因子调整和幅值调整的转弯游动方式。分析比较了各转弯方式的优缺点,为蛇形机器人应用于实际水中转弯游动提供了技术储备和可行性验证。

关键词 蛇形机器人,动力学仿真,蛇形曲线,转弯游动

0 引 言

蛇形机器人多关节,高冗余,无肢,且能灵活穿行于狭小空间及有障碍物环境中,因而在星际探索、海洋矿产资源勘探、医学治疗等很多领域得到了广泛运用^[1]。从 1972 年日本 Hirose^[2] 等人研制出第一台蛇形机器人样机起,对蛇形机器人的研究与开发陆续展开。目前的研究仍然集中在样机机构设计和运动步态算法控制等方面^[3-5]。

常见蛇形机器人运动步态有蜿蜒运动、行波运动、侧移运动、螺旋翻滚,这几种运动步态已得到了广泛实现^[6-8]。经研究发现,蜿蜒运动是蛇形机器人运动方式中最灵活、耗能最少的运动步态。应对环境适应性需求,蛇形机器人面对障碍物时能灵活实现避障,因此转弯步态引起了研究者的兴趣。在陆地蛇形机器人转弯步态的研究上,叶长龙^[9] 等人提出了中心调整法、幅值调整法、相位调整法、侧

移调整法等方法的转弯运动控制函数,王超^[10] 等人对相位调整法进行了改进,提出了切线控制法,并融合其它几种转弯方式提出了组合控制法。

因水中环境不同于陆地环境,机器人在水中缺少支撑和足够的摩擦,一些陆地上的运动控制方式在水中未必可行。本文建立了蛇形机器人水中运动动力学仿真模型,在利用蛇形曲线实现蜿蜒运动的前提下,对中心因子调整法、幅值因子调整法、相位调整法的转弯运动进行了仿真分析研究,对这三种方式进行了比较分析,验证了适于水中运动的方法的可行性。

1 蛇形机器人仿真模型的建立

在 Windows 操作系统、酷睿 i5 处理器、CPU 内存为 2G 的操作环境下,用 V-REP 软件进行蛇形机器人仿真建模,仿真环境界面如图 1 所示。

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)和校新引进教师科研启动(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@ csig. cn

(收稿日期:2017-02-27)

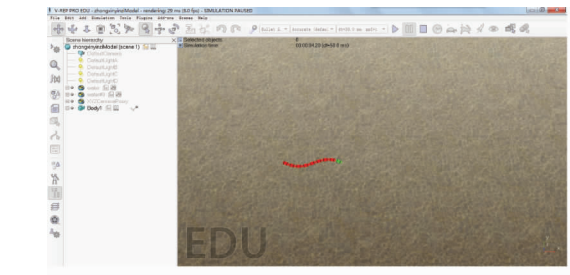


图1 仿真操作界面

动力学仿真模型选取 Cylinder(圆柱体)作为蛇形机器人的模块主体,Joint(关节)作为转轴,其类型选择为 Revolute,在动力学属性中设置其方式为 Force/Torque 模式,便可对关节进行编程驱动控制。基于机器人仿真软件 V-REP 建立的适于水中运动的 9 节蛇形机器人动力学模型,如图 2 所示。仿真实验过程中为便于对蛇形机器人运动的观察,将头部模块的外部边缘设置为绿色。该模型连杆与连杆之间关节采用平行串联方式,模型参数见表 1。

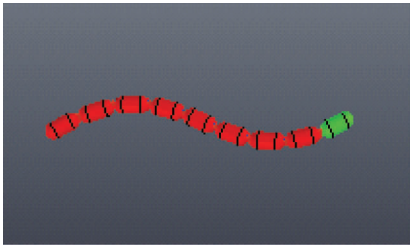


图2 蛇形机器人仿真模型

表1 水中蛇形机器人模型尺寸

模块数	模块长度	模块直径	模块质量	关节力矩
9	200mm	100mm	1.833kg	15 N·m

仿真模型建立时考虑到实际蛇形机器人在水中运动必然会受到水的浮力作用,使其处于半漂浮状态不至于因为下沉而影响二维空间的运动步态。仿真环境中,为了使蛇形机器人能较好模拟实际环境中的运动,运用力学函数给蛇形机器人每个模块添加与重力方向相反的力,模拟其实际受到的浮力,使蛇形机器人漂浮于水面之上。

2 蛇形曲线

为了更好地模拟生物蛇的蜿蜒运动形态,日本

Hirose 教授及其团队通过对大量生物蛇运动形态的观察研究,提出了“蛇形曲线”^[11,12],方程如下式所示:

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

式中, i 表示关节序号, α 代表起始弯角, kn 表示体内形成波个数, L 指蛇形机器人总长, N 指模块节数, $rad[i]$ 对应相应关节的转动偏角。 s 代表沿蛇形曲线轴线方向的位移,变量 s 在单位时间内变化的大小决定了蛇形曲线在波形运动方向上传播的快慢。仿真中 s 的变化关系为

$$s_{t+1} = s_t + \Delta s \tag{2}$$

式中, Δs 为单位步长内蛇形曲线轴线方向变化的位移。

3 转弯游动

3.1 中心调整法转弯游动

中心调整法控制函数如下:

$$\begin{aligned} rad[i] = & (-2) \cdot \alpha \cdot \sin\left(\frac{kn \cdot \pi}{N}\right) \\ & \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot kn \cdot \pi \cdot s}{L} + \frac{2 \cdot kn \cdot \pi \cdot i}{N}\right) \\ & + k \cdot l \end{aligned} \tag{3}$$

式中, l 为单节模块长度,单位为 mm, k 为中心调整因子, k 值的正负决定了转弯方向是左转还是右转,不代表数值大小。中心调整法控制下的仿真蛇形机器人转弯圆周运动轨迹如图 3 所示。



图3 圆周运动轨迹

为了体现转弯效果,实验中先设置一段蛇形机器人直线方向的水中蜿蜒游动,其次在此基础上实现转弯。实验在一组蛇形曲线参数给定的情形下(见表2)选取中心调整因子 k 值为 -0.0002 的转弯运动轨迹进行分析,如图4所示。仿真运动过程中通过 `simGetJointForce` 函数读取各关节的力矩状态,如图5所示。图中能明显看出在 $t = 10\text{s}$ 时刻,蛇形

表 2 蛇形曲线参数表

参数	参数值
仿真步长(ms)	50
α (rad)	0.4
kn	1
N (节数)	9
L (mm)	1800
l (mm)	200
k	-0.0002
Δs	40

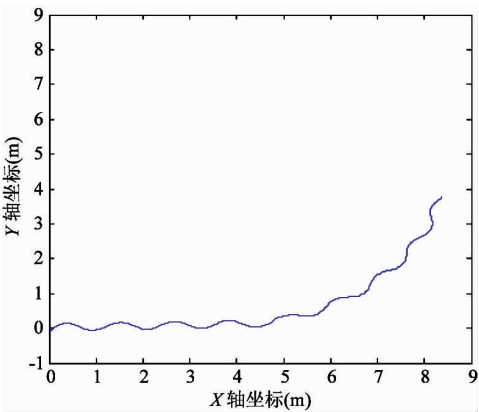


图 4 转弯轨迹

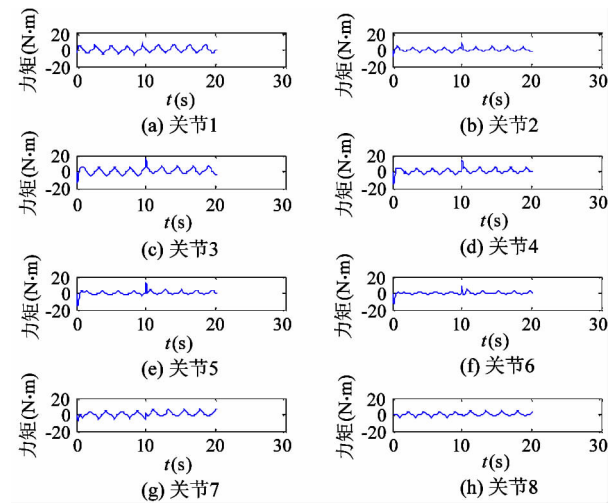


图 5 关节力矩

机器人在从蜿蜒游动切换到转弯游动时,关节力矩发生了明显的突变,机器人运动中也发生了突然的抖动现象。

k 值为 -0.0002 时的仿真运动轨迹如图 6 所示。

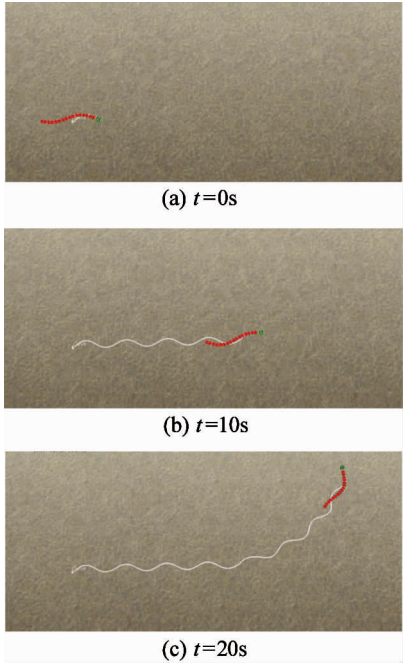


图 6 运动过程

在几组中心调整因子 k 值不同情况下的蛇形机器人转弯运动轨迹对比如图7所示。

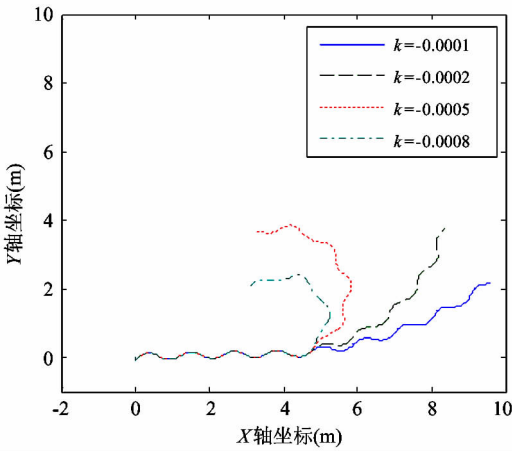


图 7 转弯运动轨迹

图 7 表明,在相同转弯时间内,调整因子 k 值不同时,转弯运动转过的偏角也就不同。随着中心调整因子 k 值的逐渐增大,蛇形机器人转过的角度也

逐渐增大,对应的转弯半径则逐渐减小。中心因子调整法运用在蛇形机器人转弯运动中转弯效果明显,有较宽的转弯范围,缺点是转弯角度不够精确,转弯过程中不能充分保持蛇形曲线。

3.2 幅值调整法转弯游动

基于蛇形曲线的幅值因子调整法控制函数如下:

$$\begin{aligned} rad[i] = & -2\alpha \cdot [1 + \Delta A \cdot \text{sgn}(\sin(\frac{2 \cdot kn \cdot \pi \cdot s}{L} \\ & + \frac{2 \cdot kn \cdot \pi \cdot i}{N}))] \cdot \sin(\frac{kn \cdot \pi}{N}) \\ & \sin(\frac{2 \cdot kn \cdot \pi \cdot s}{L} + \frac{2 \cdot kn \cdot \pi \cdot i}{N}) \quad (4) \end{aligned}$$

式中, ΔA 为幅值调整因子, sgn 是符号函数,其余参数与蛇形曲线一致。

幅值因子调整法下的蛇形机器人转弯运动,通过不断对幅值的调整来实现蛇形机器人方向的变化。幅值调整控制函数下的蛇形机器人绕圆周转弯过程如图 8 所示。



图 8 圆周运动轨迹

从控制函数中知道,幅值因子调整范围是受到限制的。幅值调整因子 ΔA 越小,幅值调整范围越窄。选取 ΔA 值为 0.5 时的幅值因子调整实验进行分析。蛇形机器人头部模块在 XY 轴空间平面内的运动轨迹如图 9 所示,图中明显反映了一个转弯的轨迹且过程中保持蛇形曲线连续性。各关节在幅值调整转弯过程中的力矩变化如图 10 所示,图中显示蛇形机器人步态由蜿蜒转变为转弯时力矩发生了改变,且变化范围明显变大。

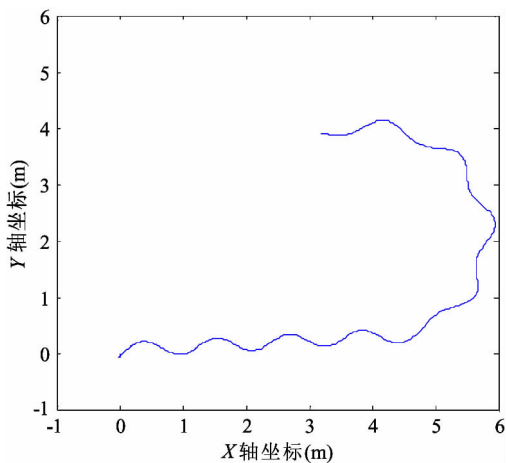


图 9 运动轨迹

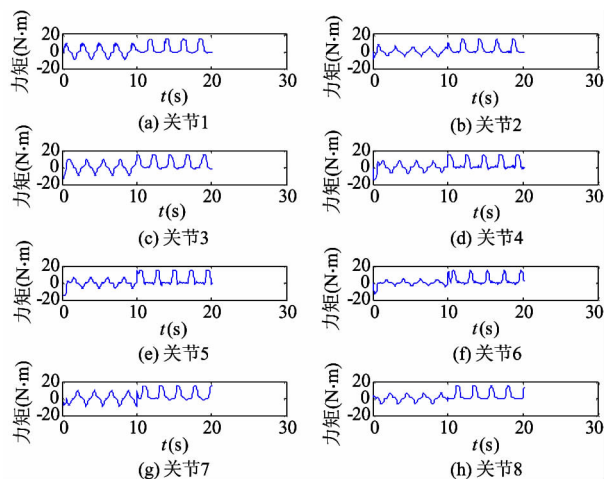


图 10 关节力矩

幅值调整因子 ΔA 为 0.5 时的仿真运动过程如图 11 所示。

通过幅值因子调整法实验发现,在蛇形机器人机构已定的情形下幅值因子具有受限性,取决于起始弯角,幅值因子盲目调节过大则影响机器人正常运动,达不到转弯效果。

图 12 显示了不同幅值调整因子运用在转弯运动时轨迹对比情形。表明了相同转弯时间前提下,幅值调整因子值越大,蛇形机器人转过的偏角越大,对应的转弯半径越小,反之调整因子越小,幅值变化越小,蛇形机器人转弯半径越大,转弯效果不明显。然而其优点是能较好地保持蛇形曲线运行,缺陷是转弯角度不够精确。

幅值调整因子 ΔA 值不同情况下的蛇形机器人转弯运动轨迹对比如图 12 所示。

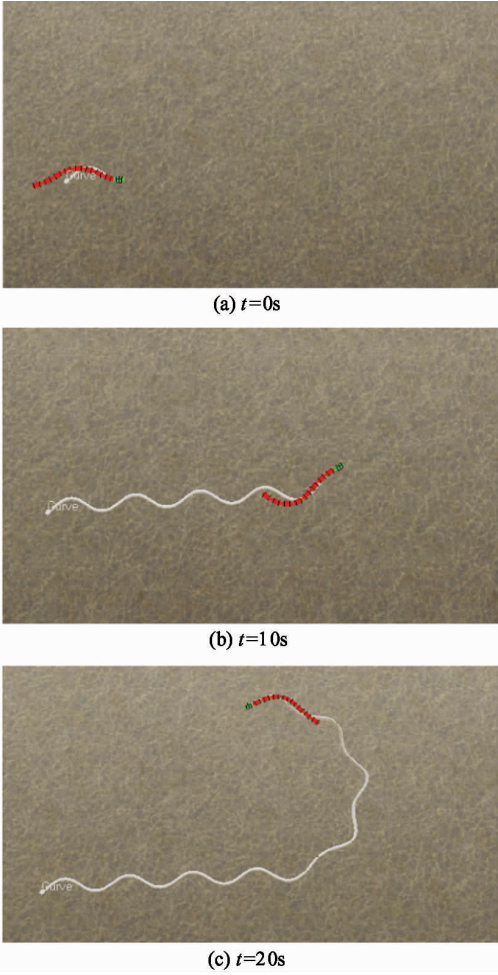


图 11 幅值调整转弯过程

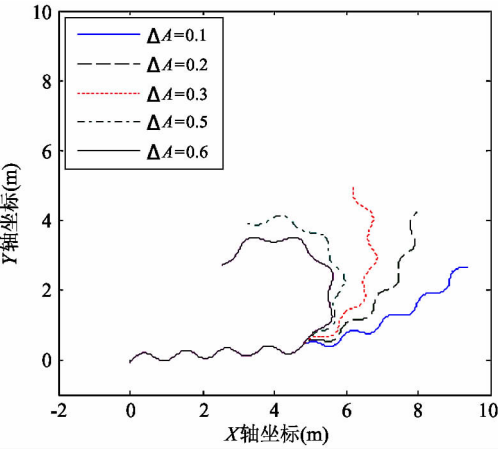


图 12 不同幅值因子转弯轨迹

3.3 相位调整法转弯游动

相位调整法控制函数如下：

rad[i] = -2α · sin(kn · π / N) · sin(2 · kn · π · s / L

+ 2 · kn · π · i / N + σ) (5)

式中,σ 是相位调整因子。当蛇形机器人蜿蜒直线运动时 σ = 0;转弯时,当机器人头部运动到其蛇形曲线的切线与转弯方向相同时,改变此时的相位角使机器人运动方向指向转弯方向。

相位调整转弯过程中,首先需确定蛇形机器人所需转弯角度 Φ,然后确定蛇形机器人在转弯处蛇形曲线的切线位置角度 Ψ:

Ψi(s) = -2α · sin(kn · π / N) · cos(2 · kn · π · s / L + 2 · kn · π · i / N) (6)

当 Ψi(s0) = Φ 时,令 σ = ± π / 2 - 2 · kn · π · s0 / L

使得新的输入函数为

Ψi(s) = { -2α · sin(kn · π / N) · sin(2 · kn · π / L · (s - s0) + 2 · kn · π · i / N ± π / 2), s ≥ s0; -2α · sin(kn · π / N) · sin(2 · kn · π / L · s + 2 · kn · π · i / N), s < s0 (7)

从而完成转弯过程。

3.3.1 游动转弯 30°实验

相位调整法转弯 30°实验,蛇形机器人在运动过程中各关节的角度变化如图 13 所示。图中看出在蜿蜒运动转换到转弯运动时刻(图中 t = 10s),关

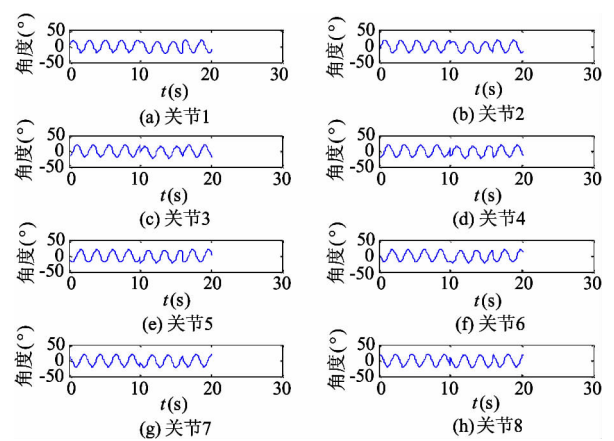


图 13 关节角度变化

节的角度发生了不连续现象,机器人也随之发生了抖动。头部运动轨迹如图 14 所示,图中明显显示,机器人在转弯的瞬间发生了不连续现象。

相位调整法转弯 30°角的实验运动过程如图 15 所示。

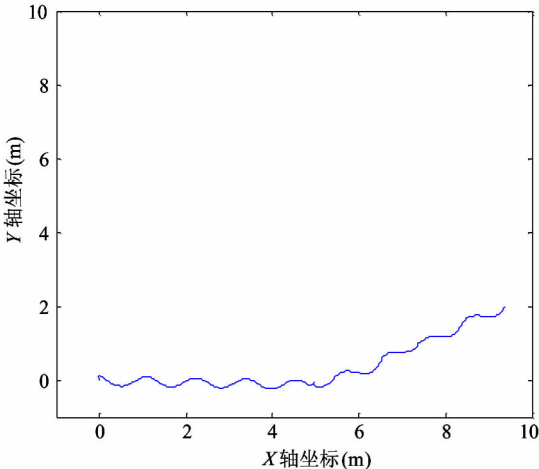


图 14 运动轨迹

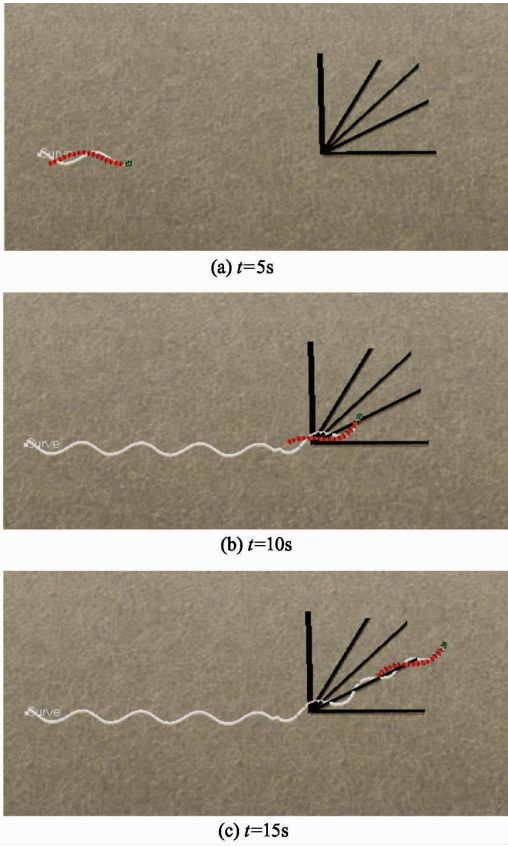


图 15 转弯 30°运动过程

3.3.2 游动转弯 45°实验

相位调整法转弯 45°实验过程中各关节角度变化如图 16 所示,图中表现了在转弯时刻关节出现了不连续的现象。其运动轨迹见图 17。

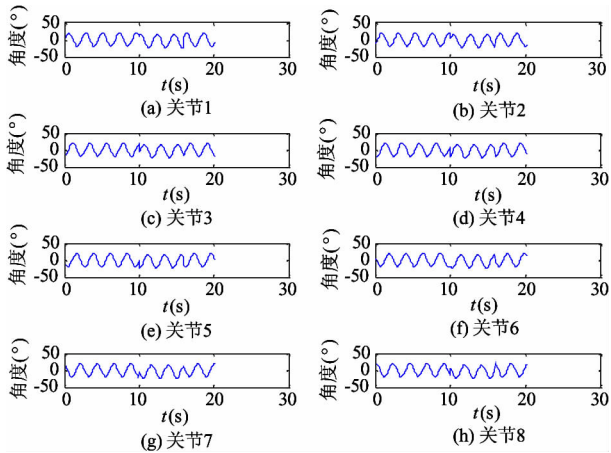


图 16 关节角度变化

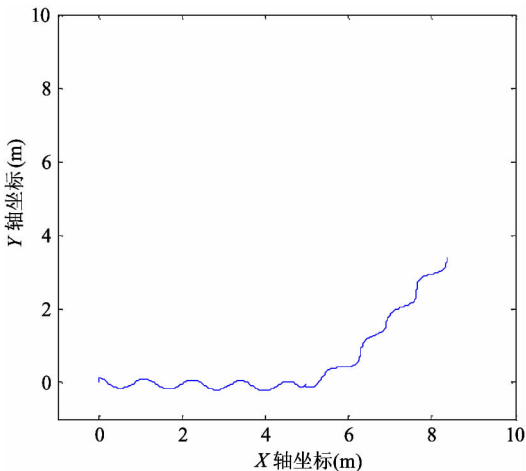


图 17 运动轨迹

相位调整法转弯 45°角的实验运动过程如图 18 所示。

3.3.3 游动转弯 60°实验

相位调整法转弯 60°运动过程中,各关节转角变化如图 19 所示,运动轨迹如图 20 所示。

相位调整法转弯 60°角的实验运动过程如图 21 所示。

相位调整法在转弯的瞬间关节角度出现了明显不连续的状况,这易使机器人产生抖动,但转弯角度准确。

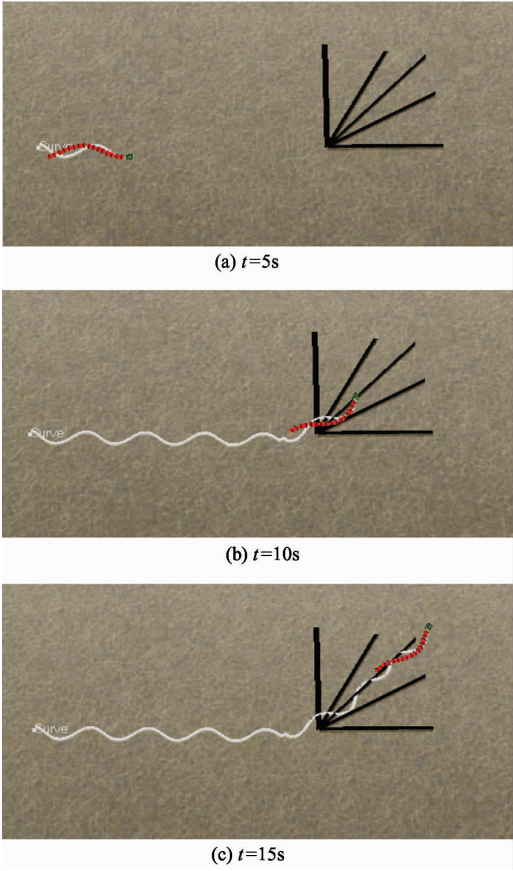


图 18 转弯运动过程

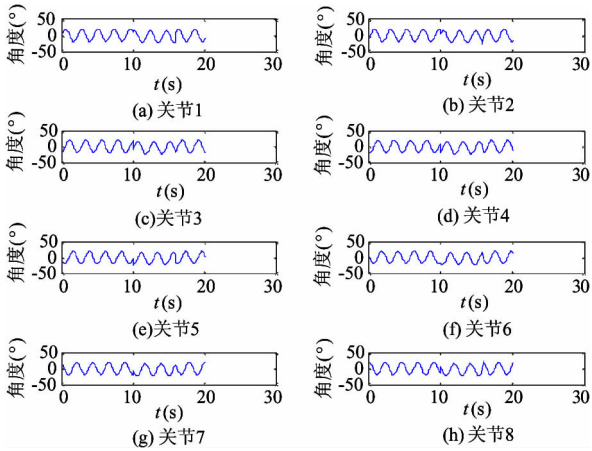


图 19 关节转角变化

4 结 论

结合蛇形机器人水中蜿蜒游动特性,应用中心因子调整法、幅值调整法和相位调整法实现了转弯控制。针对实验结果分析得出,中心因子调整法在

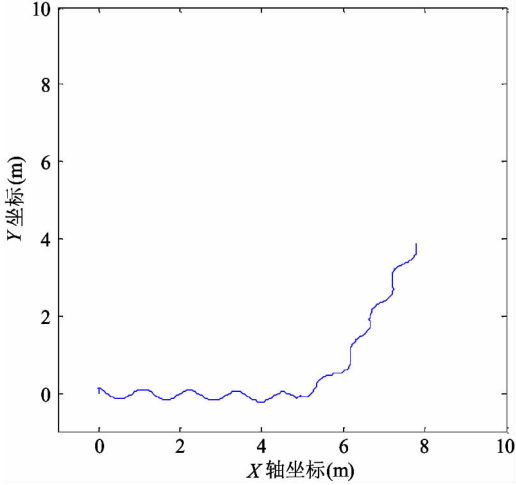


图 20 运动轨迹

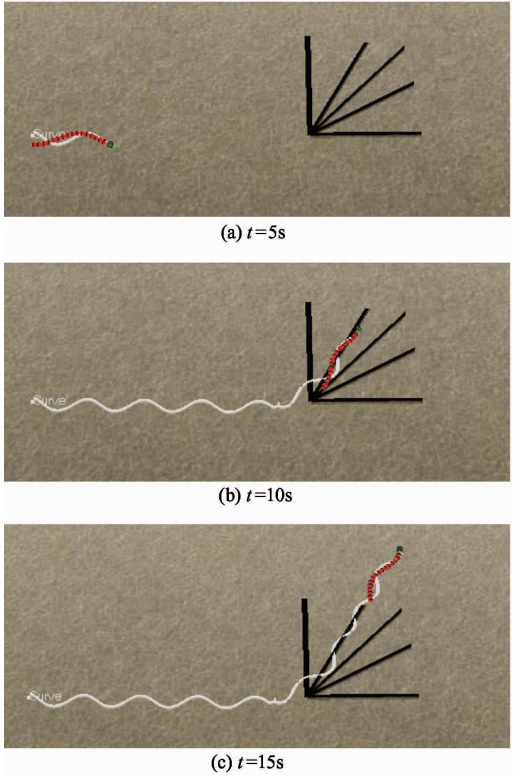


图 21 转弯运动过程

转弯过程中能实现范围大的转弯,转弯瞬间关节角度变化不连续,转弯过程中不能充分维持蛇形曲线。幅值调整法则在转弯过程中关节角度变化连续,能保持蛇形曲线,但幅值调整范围受到限制。相位调整法转弯角度精确,但转弯瞬间关节角度出现不连续的现象,使机器人发生抖动。相关技术为蛇形机

器人应用于勘查等作业提供了技术储备。

参考文献

- [1] 陈丽,王越超,李斌. 蛇形机器人研究现况与进展[J]. 机器人, 2002,24(6): 559-563
- [2] Endo G, Togawa K, Hirose S. Study on self-contained and terrain adaptive active cord mechanism[C]. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, Kyongju, Korea, 1999. 1399-1405
- [3] 张玲玲. 蛇形机器人的机构设计和运动研究:[硕士学位论文][D]. 大连:大连理工大学控制科学与工程学院, 2009
- [4] 郭燕. 蛇形机器人的运动控制及步态优化:[硕士学位论文][D]. 广州:华南理工大学自动化科学与工程学院, 2011
- [5] 张占. 正交关节蛇形机器人典型运动方式的控制函数实现及其优化:[硕士学位论文][D]. 广州:华南理工大学自动化科学与工程学院, 2011
- [6] Crespi A, Badertscher A, Guignard A, et al. AmphiBot I: an amphibious snake-like robot[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2005, 50(4):163-175
- [7] Sato M, Fukaya M, Iwasaki T. Serpentine locomotion with robotic snakes[J]. *Control Systems IEEE*, 2002, 22(1):64-81
- [8] 李斌,马书根,王越超,等. 一种具有三维运动能力的蛇形机器人的研究[J]. 机器人, 2004, 26(6): 506-509
- [9] 叶长龙,马书根,李斌,等. 蛇形机器人的转弯和侧移运动研究[J]. 机械工程学报, 2004, 40(10):119-123
- [10] 王超,邓宏彬,彭演宾,等. 蛇形仿生机器人的转弯运动控制方法[J]. 指挥与控制学报, 2015, 1(4):485-492
- [11] 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[J]. 高技术通讯, 2015, 25(5):508-514
- [12] 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[J]. 高技术通讯, 2015, 25(3):293-299

Simulation research on turning motion of underwater snake-like robots

Lu Zhenli^{***}, Xie Yafei^{****}, Xu Huigang^{*}, Liu Jun^{****}, Shan Changkao^{*}, Borovac Branislav^{*****}, 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)

(^{***} School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116)

(^{****} Faculty of Biomedical Engineering & Instrumentation Science, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

(^{*****} Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad, Novi Sad 21000, Serbia)

Abstract

Snake swimming locomotion in barrier environments is observed, and a snake-like robot model adaptable to underwater swimming is established by using the dynamics simulation software of V-REP, and then, its turning swimming performance is studied. According to the serpenoid curve, the turning swimming modes of phase adjustment, center factor adjustment and amplitude adjustment are generated. The advantages and disadvantages of each mode are analyzed and compared for providing the technical reserves and feasibility verification for snake-like robots' actual underwater turning swimming.

Key words: snake-like robot, dynamic simulation, serpenoid curve, turning swimming