

蛇形机器人水中上浮下潜运动仿真研究^①

谢亚飞^{②****} 卢振利^{③****} 徐惠钢^{*} 李 斌^{****}

(^{*} 常熟理工学院电气与自动化工程学院 常熟 215500)

(^{**} 中国矿业大学信息与电气工程学院 徐州 221116)

(^{***} 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)

摘 要 根据水下环境特征,研究蛇形机器人在水中三维空间的运动步态。基于虚拟机器人实验平台(V-REP)动力学仿真软件搭建了具有垂直和水平关节的蛇形机器人模型,在蛇形曲线生成蜿蜒运动的基础上,采用逐节升降法实现了水中的上浮下潜运动步态。分析了蛇形机器人在水中运动过程中的位态、受力、关节力矩及运动效率的状况,为蛇形机器人水中运动的实用化提供数据参考,同时验证了逐节升降法实现蜿蜒下潜上浮的有效性。

关键词 蛇形机器人,虚拟机器人实验平台(V-REP),仿真,蛇形曲线,上浮,下潜

0 引 言

在机器人领域,随着自动化、智能化技术的发展,仿生机器人成了研究的热点。科研学者们通过对自然界蛇运动的观察与研究,发现蛇具有运动灵活、运动姿态多样,能在复杂的环境下生存等特点^[1]。因这些特征,国内外学者对蛇形机器人展开了广泛的研究。近些年,研究者们对陆地蛇形机器人的研究已取得了巨大的成就,在蛇形机器人的机构设计和运动步态控制方法上尤为突出。在机构设计上,上海交大研制了只能实现二维平面内运动的关节平行串联的蛇形机器人样机,国内华南理工大学和国外卡内基梅隆大学为研制螺旋攀爬蛇形机器人,设计了可实现三维空间运动的正交连接的关节机构,此外中科院沈阳自动化研究所研制了齿轮耦合传递的 P-R 关节机构,日本 NEC 公司研制了一种万向关节相连的机构,其关节可实现 360 度球面旋转。在控制方法上,东京工业大学的 Hirose 教授提

出了控制蛇形机器人蜿蜒运动的 Serpenoid 曲线,郁树梅^[2]在蛇形曲线的基础上提出了扩展到三维空间运动的通式,卢振利^[3]基于循环抑制 CPG 模型对蛇形机器人的运动步态进行了研究。

由于运动空间的限制,适于陆地运动的蛇形机器人的研究也遭遇了发展的瓶颈,研究者们逐渐开始把研究重心放在了具有三维空间运动能力的水中蛇形机器人上。近几年,在水中蛇形机器人的研究上国内外都取得了一定的成果。瑞士洛桑理工学院 Ijspeert^[4,5]教授研制了 Amphibot 系列蛇形机器人,可实现水中的蜿蜒、转弯游动等运动,但仅限于二维空间;东京工业大学的 Hirose 教授及其团队研制了水陆两栖的蛇形机器人 ACM-R5^[6],可实现水中三维空间的上浮、下潜等运动。国内中科院沈阳自动化研究所基于国家 863 项目研制了“探查者 III”水陆两栖的蛇形机器人^[2,7],并在此基础上进行了水中三维步态的研究。西安电子科大也自主研发了水下蛇形机器人并进行了运动步态实验^[8]。

本文设计了具有垂直和水平关节的水中蛇形机

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项目(XZ1306)资助。

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:2016-07-27)

器人力学仿真模型,在蜿蜒游动的基础上通过逐节升降法来研究其下潜上浮步态,分析其在运动过程中的位态、水中受力等情形,证明了此方法的有效性,为水中蛇形机器人的实用化提供了实验数据参考和技术储备。

1 仿真模型搭建及受力分析

1.1 仿真模型描述

研究蛇形机器人在水中的上浮下潜运动步态,需搭建具有三维空间运动能力的蛇形机器人模型。模块与模块之间的关节设计采用正交方式组成垂直和水平两个自由度,如图 1 所示。利用虚拟机器人实验平台(virtual robot experimentation platform, V-REP)仿真软件设计的水中蛇形机器人动力学模型如图 2 所示。模型参数信息见表 1。

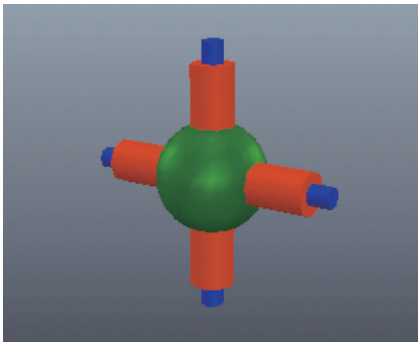


图 1 正交关节机构

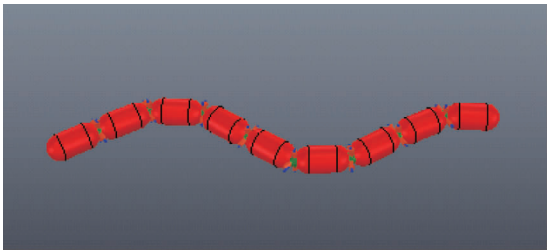


图 2 动力学蛇形机器人模型

表 1 模型参数

单模块长 (cm)	模块数 (节)	模块质量 (kg)	关节力矩 (N · m)
20	9	1	15

1.2 仿真模型水中受力分析

水中是复杂非线性的环境,刚体在其中的运动受力也较为复杂。在水中受力情形主要分为两类:水静力和水动力^[9,10]。水静力包括蛇形机器人自身的重力和与浸没在水中部分体积成正比的浮力。对于刚体在水中受到水动力的分析普遍形成了三种共识的理论:适合在低雷诺数下的 Taylor^[11] 模型,适于高雷诺数和细长刚体的 Lighthill^[12] 模型,介于两者之间的 Morison^[13] 模型。水动力由机器人和流体的运动状态和物理属性决定,主要包括附加质量力、粘滞阻力和流体力矩。附加质量力是蛇形机器人模块在水中摆动,被带动的流体对其产生的反作用力;粘滞阻力则与模块形状、表面材质和与水的相对速度有关。

限于仿真环境,机器人在水中受到的浮力不可直接得到,只能模拟一个力,通过力学函数来增加一个和浮力方向一致的等效力。设立参考水面,根据刚体的 Z 坐标相对于参考面的高低来添加适当的力 F, 式为

$$F = \frac{h - z}{h} \cdot m \cdot g \tag{1}$$

式中,变量 h 指刚体模块顶部离参考水面最高高度, z 指刚体模块质心的 z 轴坐标, m 指刚体模块的质量。

蛇形机器人前进动力则有仿真软件动力学引擎提供,所受粘滞阻力则通过力学函数添加,在 X、Y、Z 三轴线方向上分别添加模块在水中受到的阻力分量 f 来模拟设计环境中受到的阻力,其值与蛇形机器人相对于水的速度、粘滞系数有关。

$$\begin{cases} f_x = v_x \cdot m \cdot s \cdot cm \\ f_y = v_y \cdot m \cdot s \cdot cm \\ f_z = v_z \cdot m \cdot s \cdot cm \end{cases} \tag{2}$$

式(2)中, v_x, v_y, v_z 是模块在 X、Y、Z 三轴线方向速度分量, s 为粘滞系数,因阻力与运动方向相反,故系数设为负值, m 为模块质量, cm 取决于模块浸没在水中部分的质量。

2 蜿蜒游动

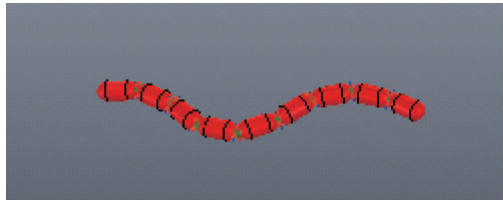
2.1 蛇形曲线

蜿蜒游动是二维空间的运动,其有节律的振荡运动是应用蛇形曲线产生的。蛇形曲线关节角度方程为

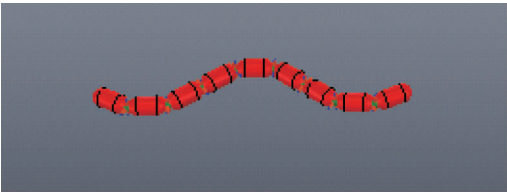
$$\varphi_i(t) = A \sin(\omega t + (i - 1)\beta) \tag{3}$$

式中, φ 为关节转动角度,单位为弧度; i 为关节序号; A 为蛇形曲线幅值; ω 为频率; t 为仿真时间; β 为初始相位。

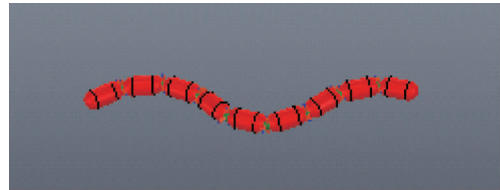
选取蛇形曲线公式中一组参数 $A = 1, \omega = 1, \beta = \pi/3$ 进行蜿蜒游动试验,其随时间 t 变化的运动过程如图 3 所示。



(a) $t = 1\text{s}$



(b) $t = 2\text{s}$



(c) $t = 3\text{s}$

图 3 蜿蜒游动

2.2 三维空间运动控制方程

在二维空间运动的基础上,考虑到蛇形机器人要实现三维空间的运动,需垂直和水平关节共同作用。扩展到三维空间的运动方程通式为

$$\begin{cases} \varphi_i^H(t) = A_H \sin(\omega t + (i - 1)\beta) \\ \phi_i^V(t) = A_V \sin(\omega t + (i - 1)\beta) \end{cases} \tag{4}$$

式中, φ_i^H 和 ϕ_i^V 分别代表垂直和水平关节的转角。 A_H 和 A_V 分别是垂直和水平关节输入波的幅值。

本文研究的蛇形机器人在水中三维空间的运动是基于此通式控制方程的。

3 水中下潜步态实验

海洋占地球 71% 的面积,物产资源丰富,目前人类只认知了海洋的 5%,大量的未知等待着人类去探索。由于海洋环境的特殊性,人类目前集中用水下机器人来代替人类进入水中进行资源勘探。因此水下蛇形仿生机器人的研究逐渐成为热点,而要想进入水下探索,其水下运动步态则成为研究的重中之重。

本文通过水下蛇形机器人三维空间运动通式,在保持蜿蜒运动的基础上,采用模块逐节下潜思想,衍生出蛇形机器人水中步态下潜方程:

$$\begin{cases} \varphi_i(t) = A \sin(\omega t + (i - 1)\beta), & i = 1, \dots, 8 \\ \phi_i(t) = \begin{cases} 0, & t < T_i \\ Deg, & t \geq T_i \end{cases} & i = 1, \dots, 4 \end{cases} \tag{5}$$

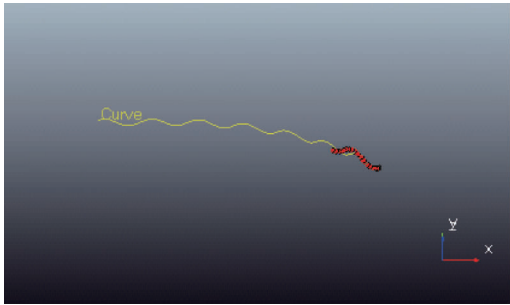
式中 t 是仿真时间, φ_i 和 ϕ_i 分别为垂直和水平关节的输入角度。 T_i 为第 i 个水平关节动作的时间。 Deg 是水平关节所需下潜的角度,下潜的水平关节数目 i 可根据实际需要选择。

运用逐节下潜控制策略进行下潜实验,实验在 ODE 动力学引擎,仿真步长为 50ms 下进行,前 4 个水平关节运动控制下潜,蛇形机器人下潜实验在不同视角下的运动过程如图 4 所示。

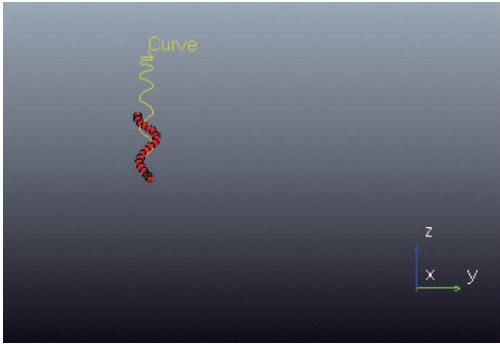
从图 4 中不同视角下的运动看出,蛇形机器人有明显的下潜过程,且下潜过程中时刻保持着蜿蜒游动,证明了逐节下降法实现蛇形机器人下潜步态的是有效的。

在下潜步态过程中,蛇形机器人的关节运动变化体现在垂直关节上各关节呈现出正弦波的变化曲线,如图 5 所示。在水平关节上,作用于下潜的关节输入曲线呈现出阶跃性的变化,未作用的关节则不发生变化,如图 6 所示。

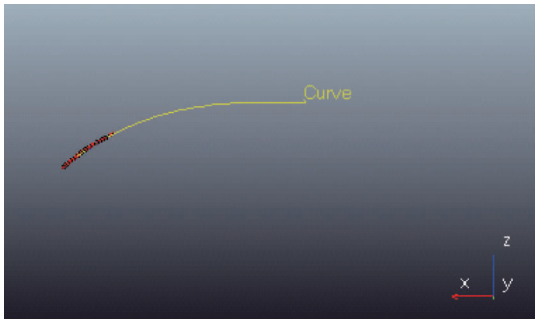
垂直和水平关节在蛇形机器人下潜过程中,力矩变化情形分别如图 7、图 8 所示。



(a) XOY 平面视角



(b) YOZ 平面视角



(c) XOZ 平面视角

图 4 下潜运动过程

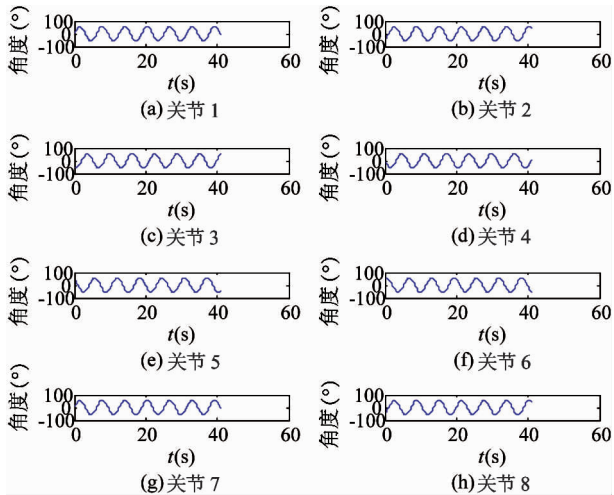


图 5 垂直关节角度输入曲线

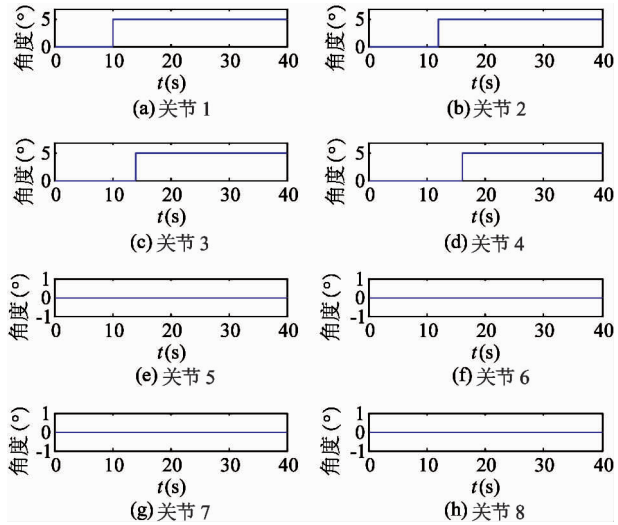


图 6 水平关节角度输入曲线

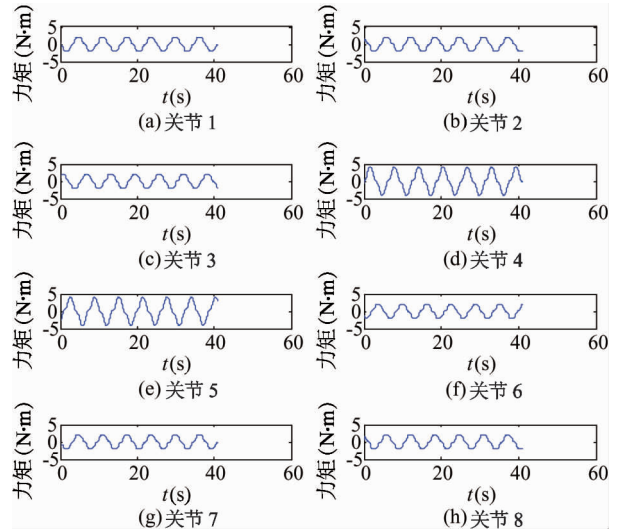


图 7 垂直关节力矩变化

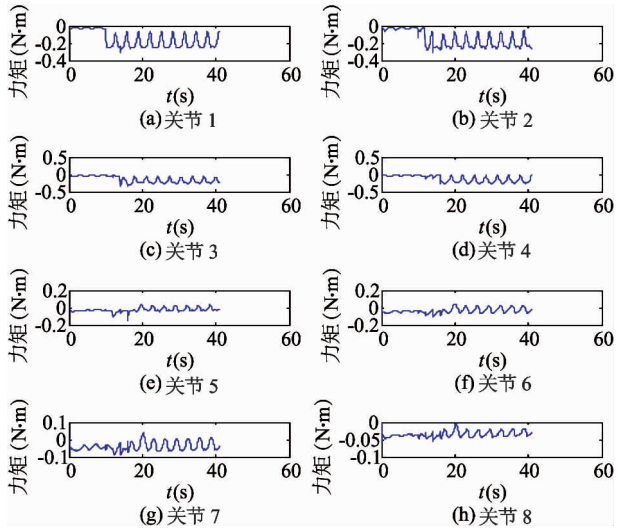


图 8 水平关节力矩变化

图 7 中,垂直关节主要在蛇形曲线的控制下,各关节力矩呈现出类似正弦波的变化规律。图 8 中从前 4 个关节的力矩变化看出,随着时间点的推移,前 4 个水平关节依次发生动作,完成下潜运动。在水平关节开始动作时,蛇形机器人会发生轻微的抖动,从图 7 中也可看出,未动作的水平关节在要动作的水平关节发生动作的瞬间也会发生抖动现象。

蛇形机器人下潜运动过程中,最重要的是对其在水中的位置、运动轨迹进行分析研究,这样便于更好地了解其下潜运动性能。头部模块的质心坐标随时间的变化规律如图 9 所示。

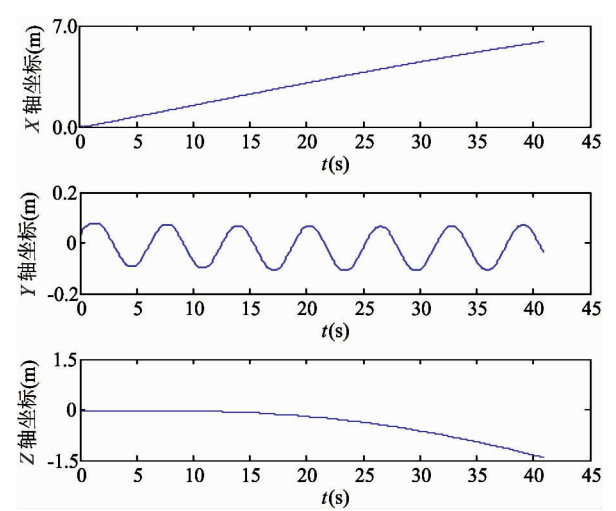


图 9 头部质心 XYZ 方向轨迹

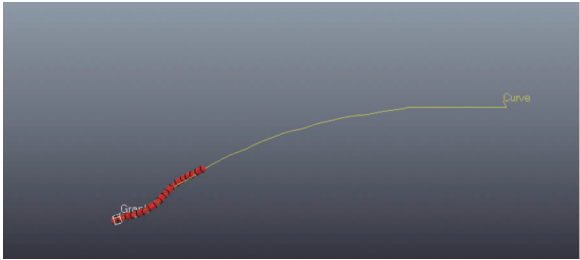
实验过程设计为 0 ~ 10s 是蜿蜒游动过程,10s ~ 40s 是游动下潜过程。下潜速率公式为

$$v = \frac{h}{t - 10} \tag{6}$$

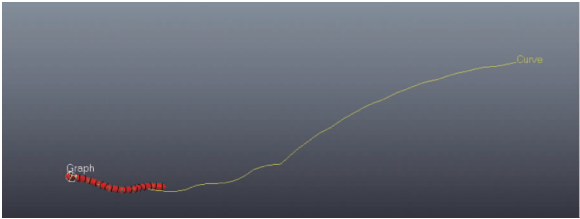
式中, h 是下潜深度, t 是蛇形机器人实验运行时间, v 是下潜平均速率。从图 9 中看出,在 40s 这个时刻,下潜深度约达到了 1.5m,可见在前 4 个水平关节作用下的蛇形机器人平均下潜速率为 50mm/s。采用水平关节的个数不同,蛇形机器人下潜的速率则不同。在下潜同等深度的前提下,作用的水平关节的个数越多,到达目标深度的速率越快,反之,越慢。

4 水中上浮步态实验

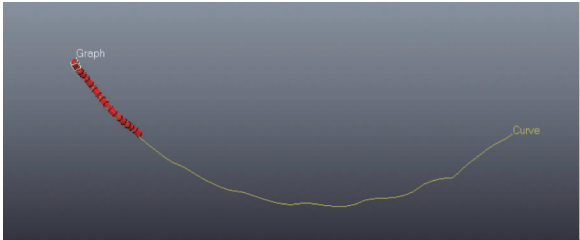
蛇形机器人在水中上浮步态的运动是其下潜运动的逆运动。垂直关节保持蜿蜒运动不变,水平关节则偏转到与下潜步态时相反的角度。进行上浮步态时,需先使蛇形机器人下潜到一定的深度,再控制其上浮。蛇形机器人从下潜到上浮的过程如图 10 所示。



(a) $t = 40s$



(b) $t = 60s$



(c) $t = 80s$

图 10 下潜到上浮过程

蛇形机器人在下潜到上浮的过程中,头部关节的质心坐标分别沿着 X、Y、Z 轴随着时间的变化规律如图 11 所示。

从图 11 中蛇形机器人质心坐标沿 Y 轴的变化规律看出,在下潜和上浮过程中,蛇形机器人在 XOY 平面内的蜿蜒游动由于没对运动轨迹进行反

馈修正,导致其随着时间的推移出现了运动偏移,这也是蛇形机器人蜿蜒运动控制方式中需进一步改善的。质心坐标沿着 Z 轴的变化能明显体现出蛇形机器人在水中所处位置的变化,图 10 中质心坐标沿 Z 轴的变化正体现了蜿蜒游动、游动下潜、游动上浮的过程。

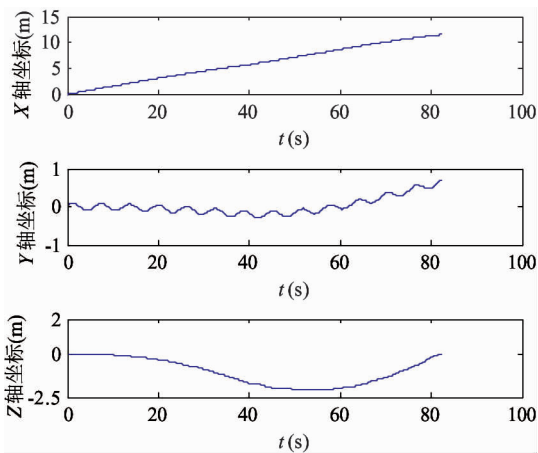


图 11 头部质心 XYZ 方向轨迹

蛇形机器人下潜到上浮过程的三维空间轨迹如图 12 所示。

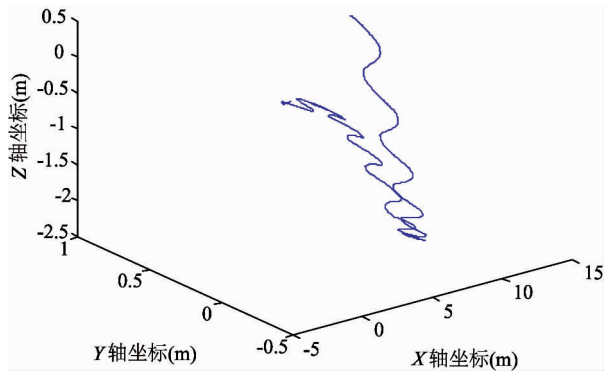


图 12 下潜上浮 3 维空间轨迹

5 结 论

本文设计了垂直和水平关节的动力学水中蛇形机器人模型,其具有三维空间的运动能力。在此基础上,利用模块逐节升降的思想对蛇形机器人的上浮和下潜步态进行了实验,并验证了此方法的可行性。对于机构不能通过自身吸排水调节水中所受浮

力的蛇形机器人来说,此方法为水中下潜上浮步态的实现提供借鉴。此外,对蛇形机器人在下潜过程中关节的受力及运行轨迹进行了分析,为蛇形机器人实际舵机选型及水中步态规划、水中障碍物避行提供了一种方法参考。缺陷在于研究仅局限于仿真环境,因实际水环境的复杂性,致动力学模型设计不是十分精确,不能充分反映实际运动的性能。为贴近实际水环境,水中理论模型所受水动力研究亟待进一步完善。

参考文献

- [1] 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
- [2] 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
- [3] 卢振利,马书根,李斌等. 基于循环抑制 CPG 模型控制的蛇形机器人三维运动. 自动化学报, 2007, 33(1):54-58
- [4] Crespi A, Ijspeert A J. AmphiBot II: An amphibious snake robot that crawls and swims using a central pattern generator. In: Proceedings of the 9th International Conference on Climbing and Walking Robots, Brussels, Belgium, 2006. 19-27
- [5] Crespi A, Ijspeert A J. Salamandra robotica: A Biologically Inspired Amphibious Robot that Swims and Walks. In: Artificial Life Models in Hardware, London: Springer, 2009. 35-64
- [6] Hirose S, Mori M, Yamada H, et al. Design and control of amphibious snake-like robot “ACM-R5”. The Japan Society of Mechanical Engineers. 2005 (In Japanese)
- [7] 郁树梅,马书根,李斌等. 水陆两栖蛇形机器人的上浮和下潜步态研究. 仪器仪表学报, 2011, 32(6): 276-279
- [8] 王新怀,李小双,何伟键等. 水下蛇形环境勘测机器人. 电子产品世界, 2015, 22(10):67-70
- [9] 李立,王明辉,李斌等. 蛇形机器人水下 3D 运动建模与仿真. 机器人, 2015(3):336-342
- [10] Lv Y H, Li L, Wang M H, et al. Simulation study on serpentine locomotion of underwater snake-like robot. International Journal of Control & Automation, 2015, 8: 373-384

[11] Taylor G. Analysis of the swimming of long and narrow animals. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1952, 214(1117): 158-183

[12] Lighthill M J. Large-amplitude elongated-body theory of fish locomotion. *Proceedings of the Royal Society of Lon-*

don, 1971,179(179):125-138

[13] Morison J R, Johnson J W, Schaaf S A. The force exerted by surface waves on piles. *Journal Petroleum Technology*, 1950, 2(5): 149-154

Simulation Study on Rising and Diving locomotion of underwater snake-like robot

Xie Yafei^{***}, Lu Zhenli^{****}, Xu Huigang^{*}, Li Bin^{***}

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

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

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

Abstract

The three-dimensional gait of a snake-like robot moving in water was studied according to underwater environment characteristics. A model for underwater snake-like robots with vertical and horizontal joints was established based on the dynamic simulation software called the virtual robot experimental platform (V-REP). Based on the serpenoid curve, the model’s depth in water was changed step by step to realize the rising and diving motions. The position, exerted force, joint torque and motion efficiency of snake-like robots moving in water were analyzed to provide practical referential data for practicalizing them. Besides, the effectiveness of the method for 3D space motion was verified.

Key words: snake-like robot, virtual robot experimental platform (V-REP), simulation, serpenoid curve, rising, diving