

DOI: 10.11992/tis.201710025

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1538.TP.20180427.0911.002.html>

新型仿生球形两栖子母机器人系统设计

刘羽婷^{1,2}, 郭健^{1,2}, 孙珊^{1,2}, 陈翔宇^{1,2}, 耿娜文^{1,2}, 宋伯文^{1,2}, 赖伊雯^{1,2}, 郭书祥^{1,2,3}

(1. 天津市复杂系统控制理论及应用重点实验室, 天津 300384; 2. 天津理工大学 电气电子工程学院, 天津 300384; 3. 日本香川大学 工学部, 日本 高松 7610396)

摘要:为解决传统两栖机器人的一些突出缺点, 探寻机器人领域更多的可能性。本文设计了一种新型仿生球形两栖子母机器人系统, 该系统球形两栖母机器人在陆地采用仿生四足爬行方式运动, 在水下采用矢量喷水电机进行喷水推进, 无噪声, 增加隐蔽性, 并为微型子机器人提供控制信号和能源。微型子机器人陆地采用轮式驱动, 设计了可以实现水陆两栖的桨叶轮。该子母机器人系统通过 XBee 通信模块实现无线通信。通过进行的子母机器人的陆地和水下运动试验, 验证了设计的子母机器人系统的有效性。

关键词:子母机器人; 仿生机器人; 微型子机器人; 轮式驱动; 球形两栖机器人; 远程无线控制; XBee 通信; 无线控制

中图分类号: TP242.6 文献标志码: A 文章编号: 1673-4785(2019)03-0582-07

中文引用格式: 刘羽婷, 郭健, 孙珊, 等. 新型仿生球形两栖子母机器人系统设计 [J]. 智能系统学报, 2019, 14(3): 582-588.

英文引用格式: LIU Yuting, GUO Jian, SUN Shan, et al. Novel bionic spherical amphibious mother-son robot system design[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2019, 14(3): 582-588.

Novel bionic spherical amphibious mother-son robot system design

LIU Yuting^{1,2}, GUO Jian^{1,2}, SUN Shan^{1,2}, CHEN Xiangyu^{1,2}, GENG Nawen^{1,2}, SONG Bowen^{1,2},
LAI Yiwen^{1,2}, GUO Shuxiang^{1,2,3}

(1. Tianjin Key Laboratory for Control Theory and Application in Complicated Systems and Biomedical Robot Laboratory, Tianjin 300384, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China; 3. Faculty of Engineering, Kagawa University, Takamatsu 7610396, Japan)

Abstract: In order to solve some outstanding shortcoming of traditional amphibious robots, and explore more possibilities in the field of robotics. In this paper, we present our novel spherical, amphibious mother-son robot system design, in which the spherical, amphibious mother robot performs a four-legged crawling movement on land. To reduce noise, increase concealment, send control signals, and provide energy to the son robot, the mother robot is equipped with a water-jet motor as an actuator under water. The son robot is wheel-driven on land and uses paddle wheels to perform amphibious movements. This novel, spherical amphibious mother-son robot system uses wireless communication via an XBee communications module. In this article, we describe the structure design, hardware structure, and the movement and communication methods used in the system. Additionally, we tested the land and underwater motions of the mother and son robots and verified the effectiveness of the designed system.

Keywords: mother-son robot; bionic robot; miniature robot; wheel-driven; spherical amphibious robot; remote wireless control; XBee communications; wireless control

随着人类探索资源、开发资源、保护资源进

程的越发深入, 更加需要能在复杂环境下灵活作业的机器人。两栖机器人作为一种性能优越的探索设备, 得到了迅猛的发展。两栖机器人具有工作环境适应性强、活动范围大、便于使用等诸多优势, 且可以用于执行环境探测、采集样品等多

收稿日期: 2017-10-30. 网络出版日期: 2018-04-27.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (61375094); 天津理工大学 2017 年度大学生创新创业训练计划项目 (201710060019).

通信作者: 郭健. E-mail: jianguo@tjut.edu.cn.

种任务。所以,两栖机器人的发展与研究在诸多领域拥有广阔的发展前景,并得到了世界各个国家研究团队的深入研究。

2016年,北京理工大学研发了一款通过模仿青蛙来控制机器人运动的水陆两栖蛙板机器人。它在水下和陆地上皆采用双摆臂的运动形式。在陆地运动依靠万向轮与地面的摩擦力提供推力,在水下通过摆动尾鳍产生推力。该机器人的运动方式灵活,同时搭载了多种传感器,具有较强的实用性^[1]。

瑞典 Rotundus 公司研发了一种名为 Guard-Bot 的球状两栖机器人,其摄像头能够保证 360° 观测,机体能够承载 2 kg 的物品。该机器人使用九轴稳定系统,同时通过装配于球形机器人里的摆锤以保持平衡,控制机体重心^[2-4]。

2014年,中国科学技术大学研制了一款两栖机器人,采用了复合推进结构,并为机器人设计了独特的弧形腿,增强了机器人对近陆地复杂地形和水下地理形态的适应性。该机器人进行了推进性能测试,能够实现多种步态的两栖行进^[5-7]。

虽然两栖机器人得到了迅猛的发展,但传统的两栖机器人仍然存在一些缺点:体积较大,工作时灵活性较低,环境适应能力差,无法满足狭窄空间探测的需求^[8-10];而体积较小的机器人续航能力较差,推动力较小^[11-13]。本文设计了一种仿生球形两栖子母机器人控制系统,不仅满足可以在宽阔的环境下工作,并兼备狭窄地域作业的优势,同时球形两栖母机器人提供大容量电源,提高了续航时间。该系统中,母机器人在陆地上四足爬行,在水中喷水推进;子机器人的驱动装置为一种特殊的桨轮结构,使其在陆地上通过车轮行进,在水中使用螺旋桨推进。上位机和母机器人采用 XBee 模块进行无线通信,子机器人和母机器人之间采用有线连接,进行通信。

1 仿生球形两栖子母机器人系统设计

1.1 系统简介

球形两栖子母机器人协同控制系统框图如图 1 所示。该系统由上位机、球形两栖母机器人及球形两栖子机器人组成。球形两栖母机器人上装有 XBee 无线通信模块,通过上位机软件发送控制信号,对球形两栖母机器人进行控制,同时可以通过母机器人将信号传递给子机器人,实现协同控制。



图 1 球形两栖子母机器人控制系统框图

Fig. 1 The block diagram of spherical amphibious mother-son robot control system

1.2 球形两栖子母机器人结构设计

1) 球形两栖母机器人结构设计

球形两栖母机器人由上半球壳、底板、8个防水舵机、4个喷水电机组成。球形两栖母机器人可以根据环境状况的不同实现陆地和水下2种运动方式的切换,在陆地采用四足爬行的方式前进,在进入水下后,陆地上的四足转变为喷水电机的4个喷水口,切换成矢量喷水的方式推进。球形两栖母机器人的整体结构如图 2 所示。

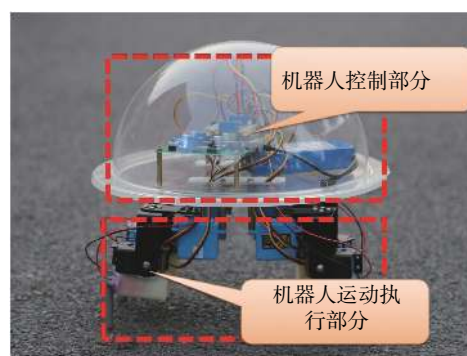


图 2 球形两栖母机器人结构图

Fig. 2 The structure diagram of the spherical amphibious mother robot

球形两栖母机器人的上球壳以及底板均是亚克力材质,其厚度都是 3 mm,上半球壳的直径为 370 mm,底板结构直径为 370 mm。喷水电机使球形两栖母机器人在水中实现前行、退后、正转及反转,其防水采用 3D 打印制成的防水外壳。球形两栖母机器人底部的喷水电机整体结构如图 3 所示。

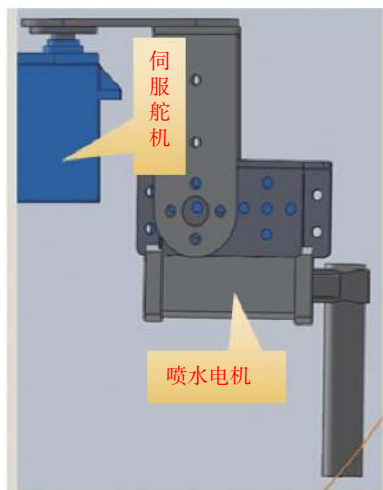


图 3 球形两栖母机器人喷水电机结构

Fig. 3 The structure diagram of water spray motor of the spherical amphibious mother robot

2) 球形两栖子机器人结构设计

球形两栖子机器人由球壳、底板和 5 个直流电机组成, 如图 4 所示。子机器人的球壳、底板及其密封零件都通过 3D 打印完成, 并设计子机器人的桨叶轮, 其结构如图 4 所示, 将车轮与三叶螺旋桨结合, 使子机器人能够实现水下和陆地的两栖运动。球形两栖子机器人在陆地采用四轮推进, 在水中则采用 5 个螺旋桨划水推进。子机器人底部安装有三叶螺旋桨, 用于控制在水中的上浮下沉运动。

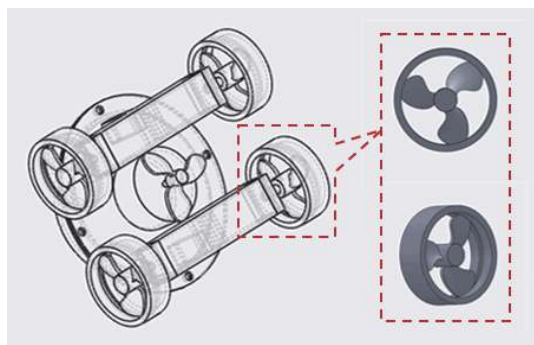


图 4 球形两栖子机器人及其车轮细节示意

Fig. 4 The diagram of the spherical amphibious son robot and its wheel details

3) 球形两栖子机器人释放装置设计

球形两栖子机器人的释放装置是由驱动器、搭载平台和固定装置组成。释放装置安装在球形两栖母机器人的底部。驱动器采用电磁继电器, 如图 5 所示, 由母机器人控制, 通过程序控制电磁继电器内铜柱的收缩。当子机器人未释放时, 驱动器处于伸张状态, 锁定固定装置, 当释放子机器人时, 驱动器处于收缩状态, 解锁固定装置, 完成球形两栖子机器人的释放。



图 5 球形两栖子机器人释放装置硬件图

Fig. 5 The release device hardware diagram of the spherical amphibious son robot

1.3 球形两栖子母机器人硬件电路设计

1) 球形两栖子机器人释放装置设计

球形两栖母机器人的硬件电路如图 6 所示。球形两栖母机器人采用 AVR mega2560 作为机器人系统的核心控制器, 能够通过输出 8 路 PWM 信号控制 8 个伺服舵机旋转角度和位置, 处理 XBee 传递的信息, 以及向球形两栖子机器人发送控制信号。

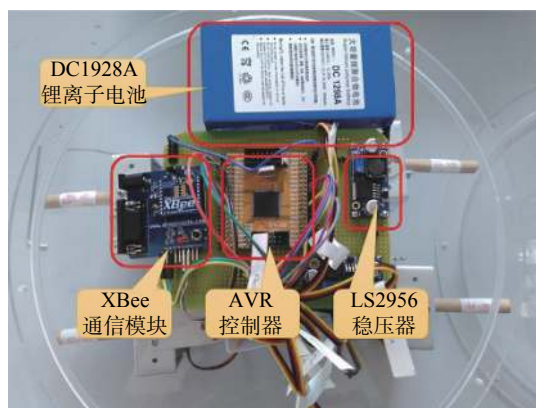


图 6 球形两栖母机器人硬件电路

Fig. 6 Design of spherical amphibious mother robot hardware

通信部分基于 XBee 无线通信模块, 将其与控制器连接起来, 使控制部分和通信部分实现信息的传递。同时驱动部分利用 2 个 L298N 驱动器控制 4 个喷水推进器输出推力大小, 进而可以综合地控制母机器人陆地和水下运动。

2) 球形两栖子机器人硬件电路设计

球形两栖子机器人采用 STC89C52 作为机器人系统的核心控制器, 采用 5 个 LB1938 驱动板作为机器人的驱动模块。控制器 STC89C52 能够通过输出 10 路信号控制 5 个驱动模块, 控制直流电机的转速, 同时能够接收并处理球形两栖母机器人发送的控制信息, 发送反馈信号。通过编写相应程序, 利用转速差异综合控制子机器人两栖环境下的行进速度与转向运动。球形两栖子机器人

的硬件电路设计实物如图7所示。

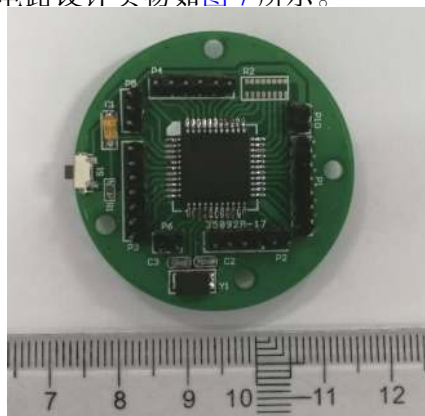


图7 球形两栖子机器人硬件电路图

Fig. 7 Design of spherical amphibious son robot hardware

3) 球形两栖子母机器人的通信设计

球形两栖子母机器人整体的控制系统框架如图8所示。球形两栖母机器人装有XBee无线通信模块,上位机向母机器人发送控制信号,母机器人接收信号并反馈,实现上位机和母机器人之间的无线通信。

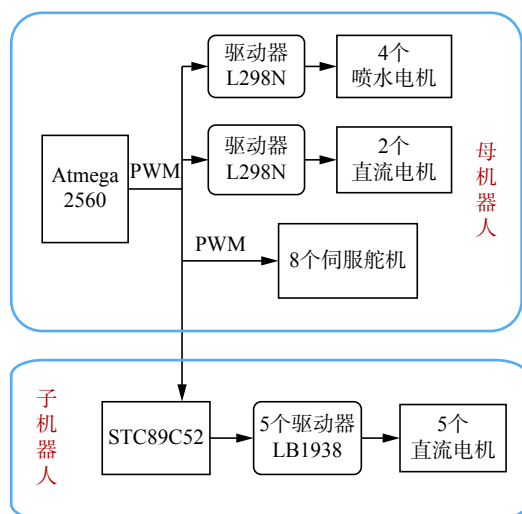


图8 球形两栖子母机器人控制系统框图

Fig. 8 The block diagram of spherical amphibious mother-son robot control system

AVR mega2560 与 STC89C52 之间采用点对点通信。当母机器人的通信模块接收到控制信号之后,将其传递到母机器人的控制器,由控制器判断执行命令或将信号传递给子机器人的控制器,从而整体控制子母机器人执行相应的命令,满足不同控制需求。

2 仿生球形两栖子母机器人运动设计

本项目为球形两栖母机器人和球形两栖子机器人分别设计了不同的水陆运动方案。母机器人在陆地上采用四足爬行方式运动,在水中则采用

喷水方式推进;子机器人在陆地上采用四轮推进,在水中则采用螺旋桨推水行进。基于该设计的球形两栖子母机器人均具备两栖作业能力。

2.1 球形两栖母机器人运动方式设计

1) 球形两栖母机器人的陆上运动方式

球形两栖母机器人在陆地上采用四足爬行方式运动,每条腿都具有垂直和水平两个方向的自由度,由两个伺服电机控制摆动方向,调整角度。母机器人的运动步态通过控制球形两栖机器人四足摆动的顺序控制。

球形两栖机器人爬行步态的三维图如图9所示。图中方向箭头标注的部分表示机器人的腿处在摆动状态,而没有标注的部分表示机器人的腿处在支持状态。由图可见,机器人任何一周期内都有3条腿处在支持状态,另外一条腿处在摆动状态。这种步态设计使机器人在爬行运动时,任意时刻的重心都处于机器人三条腿的区域内,保证了机器人的稳定性。

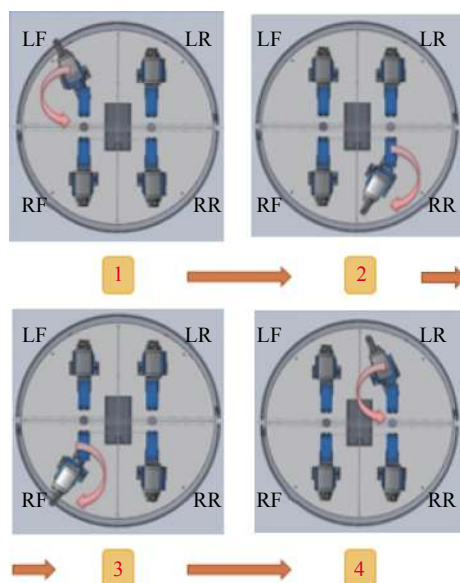


图9 球形两栖母机器人爬行步态三维图

Fig. 9 The three-dimensional figure of the spherical amphibious mother robot crawling gait

2) 球形两栖母机器人的水下运动方式

球形两栖机器人在水中采用矢量喷水方式推进。通过调节 AVR 单片机的 PWM 信号,可以实现对伺服电机旋转角度的调节,从而实现自由调整喷水推进器位置的功能。通过改变喷水推进器的输入电压值,调节喷水推力,从而实现球形两栖母机器人在水中的前进后退、正转反转和上浮下潜运动。

球形两栖母机器人水下运动方式的三维结构如图10所示。

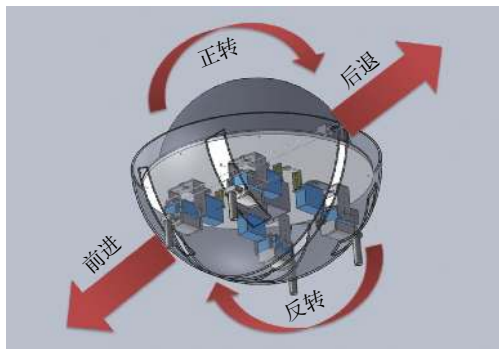


图10 球形两栖母机器人水中运动的三维结构

Fig. 10 The three-dimensional figure of the spherical amphibious mother robot's movement in the water

2.2 球形两栖子机器人运动方式设计

1) 球形两栖子机器人的陆上运动方式

球形两栖子机器人在陆地上采用四轮滚动方式运动,其运动方式如图11所示。每个车轮由一个直流电机控制,通过电机正反转实现对每个车轮的控制,实现子机器人的前进、后退运动。通过程序改变不同车轮的转速,使车轮间产生转速差,利用转速差对子机器人的运动方向进行调整,实现子机器人左右转向的功能。

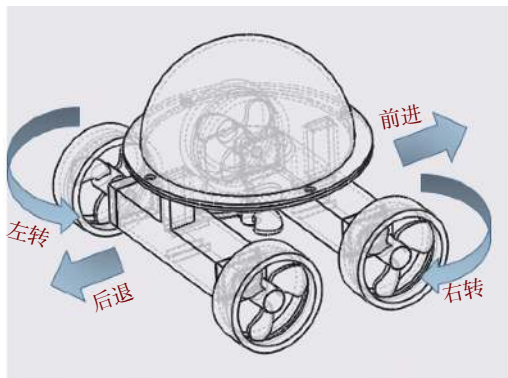


图11 球形两栖子机器人陆地运动方式图

Fig. 11 The figure of the spherical amphibious son robot's movement in the land

2) 球形两栖子机器人的水下运动方式

球形两栖子机器人的桨叶轮在水下时通过螺旋桨划水产生驱动力,运动方式如图12所示。水平方向上,由4个直流电机分别控制4个螺旋桨,通过调节单片机输出的PWM波信号,使不同螺旋桨产生转速差,从而通过程序控制机器人在水平方向的运动。同时,垂直方向上,在机器人底部安装了一个三叶螺旋桨,由直流电机控制,故而可以通过编写程序,调节底部的三叶螺旋桨的正反转向及其转速,调节机器人的上浮和下沉。实现球形两栖子机器人在水下的运动。

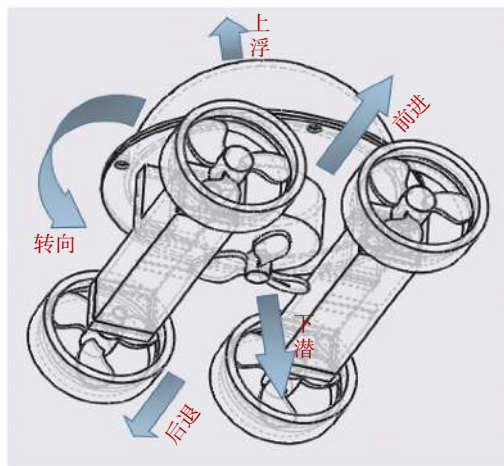


图12 球形两栖子机器人水下运动方式

Fig. 12 The figure of the spherical amphibious son robot's movement in the water

3 实验和数据分析

3.1 球形两栖子母机器人陆地性能测试

1) 球形两栖母机器人的陆地测试

为了评价球形两栖母机器人的陆地运动特性,本文分别在不同地形下做了实验,包括瓷砖路、大理石路、砖地以及水泥路。这些地形的特征主要在于摩擦系数的不同。

实验结果如图13所示,球形两栖母机器人在瓷砖地面上,在频率为1.25 Hz时取得了最大速度7.6 cm/s。当母机器人的运动频率小于1.25 Hz时,运动频率增加,机器人的运动速度也增加。机器人的运动频率大于1.25 Hz时,运动频率增加,机器人的运动速度反而减少。

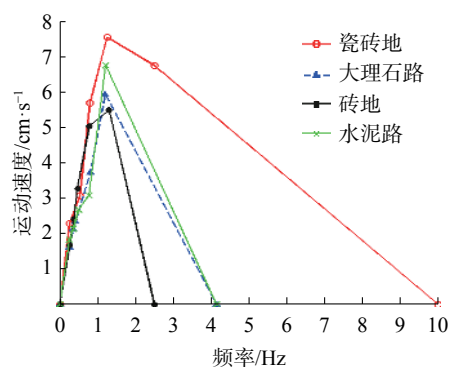


图13 球形两栖母机器人陆地运动特性图

Fig. 13 The land movement characteristic diagram of spherical amphibious mother robot

2) 球形两栖子机器人的陆地测试

为了评价球形两栖子机器人的陆地运动特性,本文分别在不同摩擦系数的地形下做了实验,包括瓷砖路、沥青路以及砖地路面,并通过改变

子机器人输出信号的占空比测量子机器人运行一段距离所用的平均时间,计算出在不同占空比下的平均速度。

实验结果如图14所示,在没有负载的情况下,球形两栖子机器人在瓷砖地面上,最大速度71.4 cm/s,在沥青路面上时运动速度最小,为16.1 cm/s。

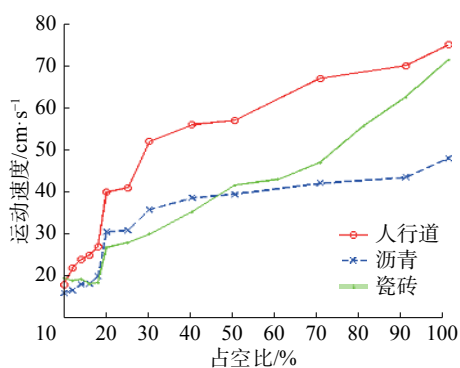


图14 球形两栖子机器人陆地运动特性图

Fig. 14 The land movement characteristic diagram of spherical amphibious son robot

由图14的占空比与速度关系的实验图像可以看出,球形两栖子机器人的路上运动速度与其输出信号的占空比成正比。

3.2 球形两栖子母机器人水下性能测试

为了测量子母机器人在水下的游动性能,本文在泳池内进行了水下释放实验,如图15所示。在游动实验中测得球形两栖母机器人水下前进运动速度与占空比关系如图16所示。当喷水电机两端的输入电压不断变化时,球形两栖母机器人的速度随着输入的电压增大,速度会越来越快。由于电池经过稳压电源输出的最大电压为7.4 V,故当喷水电机两端输入的电压为7.4 V,球形母机器人水平前进的最大速度为9.6 cm/s。子机器人前进运动时速度与时间的关系如图17所示,从图中可以看出微型子机器人在游动时速度不断增加,最大速度为13.3 cm/s。

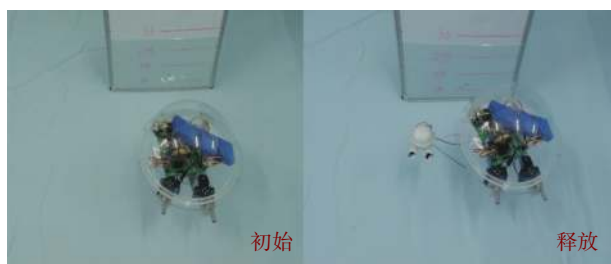


图15 球形两栖子母机器人水下释放实验

Fig. 15 The underwater released test of spherical amphibious mother-son robot

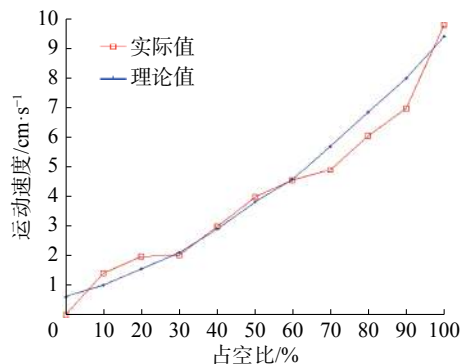


图16 球形两栖母机器人水下运动与占空比关系

Fig. 16 The relationship between movement speed of spherical amphibious mother robot

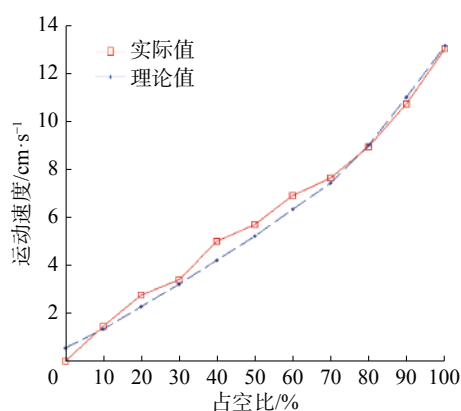


图17 球形两栖子机器人水下运动速度与占空比关系

Fig. 17 The relationship between movement speed of spherical amphibious son robot

4 结束语

本文设计了一种仿生球形两栖子母机器人系统,系统中分别设计了球型两栖母机器人和球形两栖子机器人的机械结构和硬件结构,同时实现了子母机器人之间的通信。球形两栖子母机器人均能实现两种运动的自由切换,母机器人在水下喷水式运动,陆地上采用仿生四足爬行,子机器人在陆地上采用轮式运动,在水下通过特殊设计的桨叶轮实现运动。球形两栖母机器人作为球型两栖子机器人的搭载平台为其提供信号和能源,两者采用有线连接,通过点对点通信实现信号传递,同时方便子机器人的回收。本文分别对母机器人和子机器人进行陆地实验,而且进行了水下的释放实验,验证了系统设计的有效性。接下来的工作中,可通过给子母机器人系统增加传感器,增加其对外部环境的感知能力,更方便地执行任务。该系统在海洋探索和军事侦察领域具有广泛的应用价值和前景。

参考文献:

- [1] 周耿. 水陆两栖蛙板机器人的设计、建模与控制 [D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
ZHOU Geng. Design, modeling and control of an amphibious robot called FroBot[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [2] DUDEK G, GIGUERE P, PRAHACS C, et al. AQUA: an amphibious autonomous robot[J]. *Computer*, 2007, 40(1): 46–53.
- [3] <http://www.rotundus.se/specifications.html>.
- [4] MEGHJANI M, MANJANNA S, DUDEK G. Multi-target rendezvous search[C]//Proceedings of 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Daejeon, South Korea, 2016: 2596–2603.
- [5] 孔子文. 两栖机器人步态规划研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.
KONG Ziwen. Research on the gait planning of a hexapod robot[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014.
- [6] 孔子文, 张世武, 许旻. 六足机器人爬楼梯步态规划 [J]. *机械与电子*, 2014(9): 77–80.
KONG Ziwen, ZHANG Shiwu, XU Min. Gait planning of a hexapod robot in stair climbing[J]. *Machinery & electronics*, 2014(9): 77–80.
- [7] 任小双, 梁旭, 孔子文, 等. 沙地环境下椭圆型腿运动特性实验研究 [J]. *机械与电子*, 2013(11): 77–80.
REN Xiaoshuang, LIANG Xu, KONG Ziwen, et al. Experimental study on the locomotion performance of elliptic-curve leg in sandy medium[J]. *Machinery & electronics*, 2013(11): 77–80.
- [8] EICHHORN M, TAUBERT R, AMENT C, et al. Modular AUV system for sea water quality monitoring and management[J]//Proceedings of 2013 MTS/IEEE OCEANS - Bergen. Bergen, Norway, 2013.
- [9] DU Jun, MENG Lingshuai, GU Haitao, et al. Optimal design of clamping mechanism for AUV underwater docking device based on Kriging model[C]//Proceedings of 2017 Asia-Pacific Conference on Intelligent Robot Systems. Wuhan, China, 2017: 310–314.
- [10] INZARTSEV A V, PAVIN A M. AUV cable tracking system based on electromagnetic and video data[C]//Proceedings of 2008- MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean. Kobe, Japan, 2008: 1–6.
- [11] 单彦霞, 李宇鹏. 基于 SMA 驱动的仿尺蠖微型机器人 [J]. *机械设计与研究*, 2017, 33(1): 50–53.
SHAN Yanxia, LI Yupeng. The inchworm-like bionic micro robot driven by SMA[J]. *Machine design and research*, 2017, 33(1): 50–53.
- [12] 孟庆喆. 浅谈微型机器人的控制 [J]. *电子世界*, 2017(14): 148.
MENG Qingzhe. Brief introduction of control by micro robot[J]. *Electronics world*, 2017(14): 148.
- [13] 贾永兴, 陈斌, 杨宇, 等. 一种小型水下机器人平台的设计与实现 [J]. *微型机与应用*, 2017, 36(12): 36–38.
JIA Yongxing, CHEN Bin, YANG Yu, et al. Design and realization of a small underwater vehicle platform[J]. *Microcomputer and its applications*, 2017, 36(12): 36–38.

作者简介:



刘羽婷, 女, 1997 年生, 本科生, 主要研究方向为机器人技术。



郭健, 男, 1982 年生, 副教授, 主要研究方向为机器人技术。主持 863 子课题 1 项、国家自然科学基金青年项目 1 项、天津市自然科学基金面上项目 1 项、天津市复杂系统控制理论及应用重点实验室开发基金 1 项, 获国际会议最佳论文奖 2 项。近 5 年被 SCI、EI 检索论文 40 余篇。



孙珊, 女, 1994 年生, 硕士研究生, 主要研究方向为机器人技术。发表学术论文 2 篇。