

多功能两栖生物型子母机器人系统研究

郭书祥^{1,2}, 石立伟^{1,2}

1. 北京理工大学生命学院现代医工学系统研究所, 北京 100081

2. 北京理工大学工业和信息化部融合医工系统与健康工程重点实验室, 北京 100081

对于水陆两栖及其过渡环境中狭小空间内的勘测, 微型水陆两栖机器人能够完成许多单一推进方式的机器人所无法完成的两栖任务, 如水下管道的检测、珊瑚礁内鱼类的监测、水下岩缝中矿物采样等, 因此需要一种能够具有微型结构、多功能运动模式、高精度位置、长续航时间等特点的机器人, 以适应复杂两栖环境。提出一种两栖子母机器人设计方案。其中, 两栖母机器人采用腿-矢量化喷水两栖推进, 利用一套驱动系统实现两栖运动, 以降低机构和控制的复杂度, 增大其负载能力。两栖推进机构和机器人外形可以根据介质环境以及任务特点的改变, 进行主动的形态与结构变化。微型子机器人由人工智能驱动器驱动, 可以实现游行、爬行、转动、上浮/下潜、抓取等动作。母机器人和子机器人之间通过智能软缆线连接, 实现子母机器人之间的通信及子机器人的回收。

水陆两栖机器人为了实现水陆两栖及其过渡环境中狭小空间内的勘测任务, 如水下管道的检测、珊瑚礁内鱼类的监测、水下岩缝中矿物采样等, 需要同时具有微型结构、多功能运动模式、有效的续航时间、环境友好等特点。由于以上几个特点之间有一定的矛盾性, 由单一的智能驱动器驱动的仿生微型机器人或者电机驱动的小型水陆两栖机器人很难同时满足以上需求。

1 国内外研究现状

1.1 两栖机器人的驱动构型

目前, 国内外对两栖机器人的研究主要有轮式/螺旋桨两栖机器人、腿式两栖机器人、腿浆式两栖机器人、履带式两栖机器人、球形滚动式两栖机器人和蛇形两栖机器人等。美国凯斯西储大学和美国海军研究院提出了一种具有全地形适应性的仿蟑螂两栖机器人设计方案, 其采用简化的轮式机构实现蟑螂腿的爬行功能。为了实现水中驱动, 其轮腿机构的轮辐采用传统螺旋设计(图1(a))^[1]。这种轮腿机构有着很好的陆地推进性能, 但受到轮腿机构限

制, 其水下螺旋桨推进时效率不高。加拿大麦吉尔大学、密歇根大学、加州大学伯克利分校、卡内基梅隆大学等机构联合研制了一系列腿式机器人 RHex(图1(b))^[2], 可以适应不平整地形, 可是由于只做了简单的防水处理, 其水下驱动方式仍只限于水底的爬行, 并无有效的水下驱动机构。加拿大麦基尔大学的机器人研究小组研制的 AQUA 两栖机器人, 将轮式驱动机构的旋转简化为一根弧形辐的转动, 在陆地时通过弧形辐的转动模拟腿式驱动实现爬行, 在水中时通过弧形辐的转动模拟浆的拨动实现前进运动(图1(c))^[3]。美国蒙特雷湾水族馆研究所的 Hobson 等^[4]研制了一种两栖机器龟, 其身体两侧各有两个平行的鳍作为驱动装置, 能在海底和海滩爬行。腿浆式机构有着很好的陆地适应能力, 但受到转动腿式机构的限制, 其在水中通过浆拨动时推进时效率不高。美国福斯特-米勒公司研制了一种使用履带推进的遥控型两栖小型机器人, 其水下驱动方式仍采用履带推进, 并无有效的水中驱动机构。瑞士研制的水陆两栖蜥蜴机器人(图1(d))^[5],

在陆地上行走时, 依靠身体四条可以转动的腿和可以弯曲的脊柱实现陆地爬行, 在水中时, 脊柱扭动的频率会加快, 依靠身体的波动产生驱动力。这种机器人依靠陆地腿式驱动和水下波动驱动两种机构的叠加, 由于波动驱动对机器人整体结构限制比较大, 其陆地和水下推进效率都不高。东京工业大学研制的名为“ACM-R5”的多关节水陆两栖机器蛇^[6], 在陆地上主要是依靠身体各关节的相互转动与地面产生的摩擦力进行推进, 水中推进则采用了仿生波动推进。由于仿生蛇的波动驱动是唯一在陆地和水下同时适用的推进方式, 所以可以利用一套机构实现两种运动。不过这种波动驱动方式本身的局限性, 其在非结构化地面(如碎石地、泥行地等)中蛇形推进方式的性能受到很大的影响^[7,8]。

在国内, 哈尔滨工程大学王立权等^[9]以河蟹作为原型, 研制了两栖仿生蟹。其通过8足机构实现陆地爬行, 在水下时采用整体包裹的防水方式, 因此其水下驱动方式仍采用爬行, 并无额外的水下驱动机构。北京航空航天大学

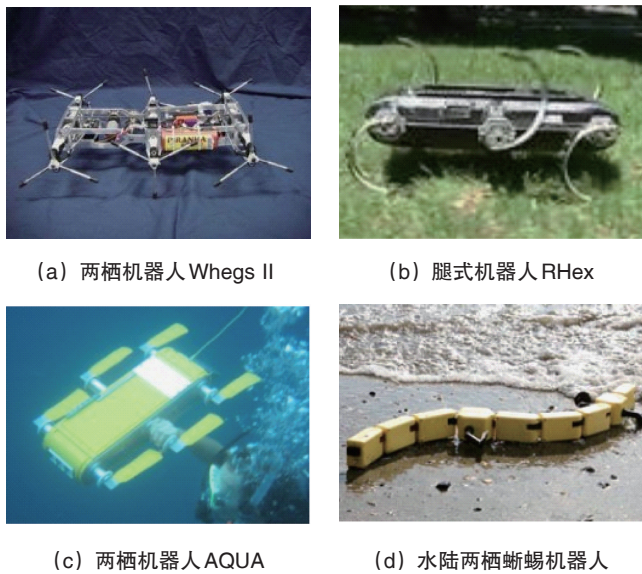


图1 不同构态的两栖机器人
Fig. 1 Amphibious robots with different shapes

冯巍等^[10]提出了一种陆地轮式驱动与水中桨式驱动相结合的两栖机器人推进机构,利用切换机构实现两栖运动转换。北京邮电大学的孙汉旭设计了一系列球形滚动机器人,并利用球形机器人全封闭的特性,通过在球形机器人内部安装螺旋推进装置的方法研制出具有水陆两栖功能的球形机器人。此外,孙汉旭将球形机器人与轮式机器人运动特点相结合,提出球-轮复合可变形机器人,该移动机器人可以通过自身几何形状发生变化以实现球形和轮式机器人互换^[11]。中国科学院自动化研究所和石河子大学共同研发了名为“AmphiRobot”的多模态两栖仿生机器鱼,采用陆地轮式驱动、水中波动驱动相结合的方式实现水陆两栖功能^[12]。中国科学院沈阳自动化研究所马秀云等提出一种足板驱动两栖机器人,并对其主要驱动方式的陆地运动进行步态和受力分析。中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室在国外RHex和AQUA机器人的启发下,先后设计了轮桨腿一体化两栖机器人、轮桨-足板混合驱动两栖机器人、足板驱动两栖机器人3种基于六推进器驱动的两栖机器人。中国科学技术大学的杨杰等^[13]提出了基于弧形足的足-蹼复合驱动机构,并测试其在松软介质中的

运动特性。上海交通大学机器人研究所的孙安等开发了一种仿生四足两栖机器龟,其在水中和陆地均采用爬行的方式进行推进。本研究小组通过分别分析水陆环境的多种仿生运动,提出基于矢量喷水推进的两栖驱动机构规划与验证^[14-21]。目前两栖机器人或采用两套独立的推进机构和推进变换机构,两套推进机构的设计大大增加了两栖机器人机构和控制的复杂度,降低了其空间机构和功能拓展能力。另外,其他两栖机器人或采用一种主要驱动方式(多为陆地驱动方式),在不改变主要驱动方式的基础上,通过改进驱动机构局部构型,利用陆地驱动机构来实现水中推进,而这种增加的驱动方式往往效率较低。水陆两栖机器人要想走向实用,还需解决陆地推进方式和水下推进方式如何有效复合的问题。

1.2 仿生微型机器人

为了实现水下机器人的小型化、低噪声,近几年报道了很多利用人工智能材料驱动的微型水下仿生机器鱼,主要有压电晶体式(PZT)微型机器鱼、永磁体式(NdFeB)微型机器鱼、离子交换聚合体膜式(IPMC)微型机器鱼、介电弹性体式(ANTLA)微型机器

鱼、形状记忆合金式(SMA)微型机器鱼和超磁致伸缩材料式(GMM)微型机器鱼等。

美国东北大学海洋科学中心1999年用形状记忆合金(SMA)和链杆结构开发了波动推进的机器鳗鱼RoboEel,通过身体侧向的波动,机器鳗鱼不仅驱动自身穿越水柱,而且能控制其浮游深度。美国弗吉尼亚理工大学2010年用形状记忆合金(SMA)和弹簧开发出了一种仿生鳍条(BISMALC),并利用8个仿生鳍条驱动仿生水母外壳收缩和复原(JET驱动方式),从而实现上浮/下潜运动。韩国首尔大学2011年用形状记忆合金(SMA)研发了胸鳍摆动推动的仿生机器海龟。哈尔滨工业大学研发的微型仿生鱼,尾部由两根形状记忆合金(SMA)驱动,最大游速达112 mm/s (2.7 Hz)。本文研究小组通过多种水下生物运动理论分析与实验验证,归纳出适用于水下微型机器人的软体驱动机构设计方法^[22-26]。

目前,运用人工智能材料研制的仿生微型机器鱼虽然具有微型结构、灵活性等特性,但离实现鱼类的真正仿生还有一定距离,与真正鱼类相比,在速度、续航时间等方面都存在很大差距,极大限制了仿生微型机器鱼的运动范围。另外,由于仿生微型机器鱼是靠胸鳍、尾鳍或者身体的摆动或波动产生向前的驱动力,这种驱动方式很难保证仿生微型机器鱼在水下狭小空间的游动时的位置精度。为了克服单一游泳驱动方式带来的限制,除了仿生机器鱼以外,迫切需要开发一种具有高位置精度、微型结构等特征的仿生微型机器人。

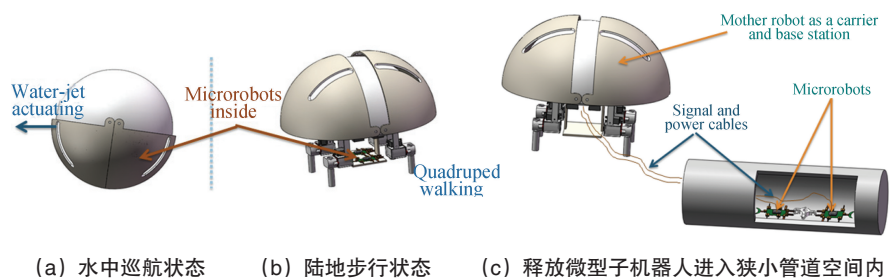


图2 子母机器人系统概念
Fig. 2 Proposed father-son robot system

2 水陆两栖用子母机器人系统

鉴于以上水陆两栖机器人与仿生微型机器人存在的不足,提出一种水陆两栖用子母机器人设计方案。如图2所示,此水陆两栖用子母机器人系统由一个水陆两栖母机器人和若干仿生微型子机器人组成。母机器人由电机驱动,具有多运动模式、长续航时间、稳定的移动速度等特点,可以将子机器人载往浅滩、水底的目标区附近。微型子机器人由离子交换聚合体膜(IPMC)式驱动,具有微型结构、高位置精度等特点,可进入狭小的空间,完成最终的监测。

3 方案设计

3.1 仿生微型子机器人

本研究组成功研制出离子交换聚合体膜(IPMC),可以直接将电能转换成机械能,低电压即可驱动,具有体积小、环境友好、柔性等优点^[17]。IPMC还具有传感器功能,可以实现精确到变形位置控制。并在此研究基础上对微型仿生机器人进行了大量研究。研制出由IPMC驱动的微型仿生机器鱼,并在“十一五”国家重大科技成就展展出。机器鱼长50 mm,具有水下三自由度运动^[27]。采用尾鳍摆动的驱动方式,减少了螺旋桨对周围水流影响;由于不用电机驱动,所以没有马达和螺旋桨的嗡嗡噪音,具有很好的环境友好性(图3)。

为了研究具有微型结构、高精度等特征的微型子机器人,本研究组提



图3 微型仿生机器鱼

Fig. 3 Fish-like microrobot

出一种微型可变形机器人方案(图4^[8])。这种微型机器人由离子交换聚合体膜(IPMC)驱动^[28, 29],左右两侧各4个爪,中间四条作为支撑爪,外侧4条作为驱动爪,可以实现爬行和回转;前端两个IPMC用作两个手指夹持一些微小物品;后端一个IPMC用作驱动尾鳍,实现水中游泳运动;通过低频率电压(小于0.3 Hz)驱动8条IPMC爪,可以电解产生气泡^[30, 31],气泡附着在机器人上改变了其浮力,实现上浮动作;在机器人身体下部,利用两个形状记忆合金(SMA)驱动两侧8条IPMC爪向下转动,从而实现身体形变(从爬行到站立)的动作。此提案保持了上浮、游动、抓取等动作,增加了爬行、旋转等动作以保证水中的位置精度。机器人通过身体的形变,可以实现平躺和站立两种运动形态,用以适应低平或高窄的狭小通道。

3.2 水陆两栖球形机器人

两栖驱动机构中,腿式推进具有较

强的越障能力,虽然步态控制复杂、运动速度不够理想,但对于两栖环境中不规则地形有很好的适应能力,对于不同松软度的介质环境,可以通过调整足部与介质的接触面积而降低腿的下陷问题。喷水推进是利用喷水装置产生的水的动量变化,形成机器人在水中运动的推力。这种驱动方式能够大大简化水动力特性,提高机器人的运动效率,通过对喷水方向和大小的控制,提高水下机器人的运动灵活性和可控性,还能降低对周围水流和生物的影响。

本研究提出将陆地腿式步行机构与水下矢量喷水驱动复合的设计方案。陆地上,喷水驱动器作为腿部的末端关节,通过对腿部的支撑实现爬行与转弯。在水中,通过腿部其他关节的转动改变喷水驱动器喷水方向,从而实现水中三自由度航行^[14-16]。两栖球形机器人的外形由1个半球形机体和4个腿组成。如图5、6所示,机器人上半球密闭,内部安装有控制系统和驱动电路。为了增加整个身体的对称性、承载和释放子机器人,在机器人下半部分增加两个1/4球壳,两个1/4球壳分别由两个电机驱动,可以打开和闭合(图7)。球形母机器人在水中由四个喷水电机驱动,通过调节四个喷水电机的方向和喷水大小,可以实现水平和垂直方向的运动(图8)。在水平运动时,母机器人还可以实现两个方向的直行,回转等运动(图9)。

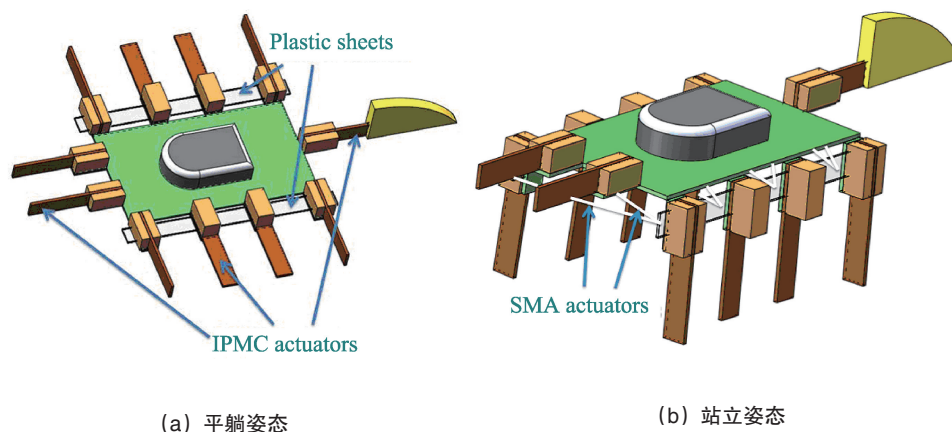


图4 微型可变形机器人

Fig. 4 Proposed transformable microrobot

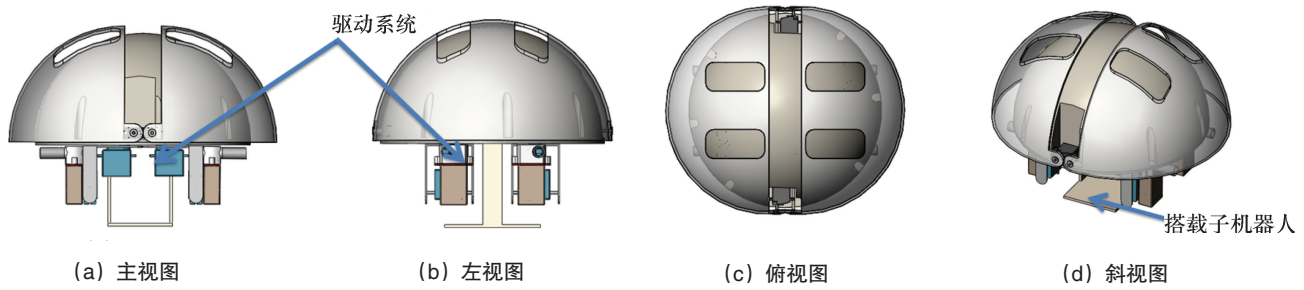


图5 两栖球形机器人整体设计（下球壳打开状态）
Fig. 5 Proposed amphibious spherical robot (opened state)

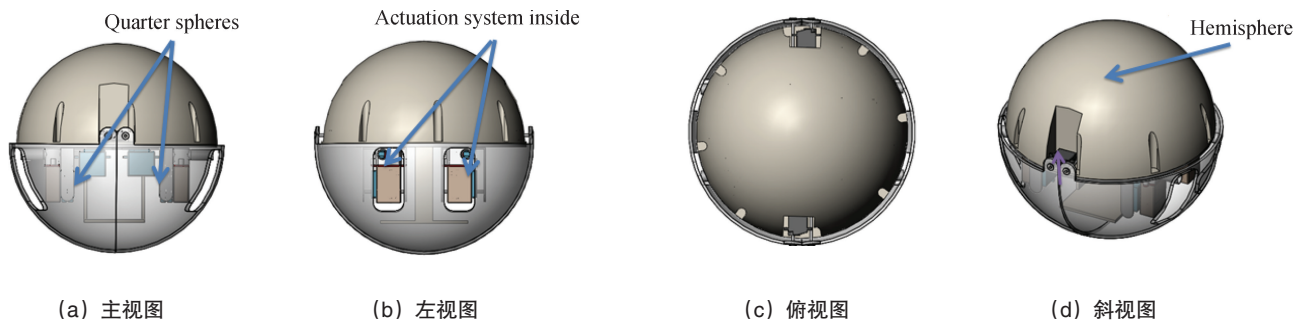


图6 两栖球形机器人整体设计（下球壳关闭状态）
Fig. 6 Proposed amphibious spherical robot (closed state)

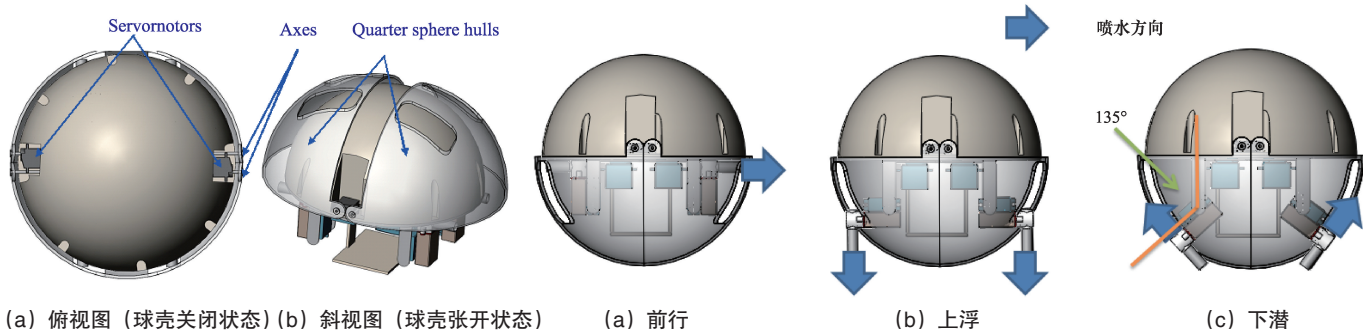


图7 球形母机器人的下球壳开合机构设计
Fig. 7 Opening mechanism of the spherical robot

图8 水中水平、垂直方向运动
Fig. 8 Underwater motions (front view)

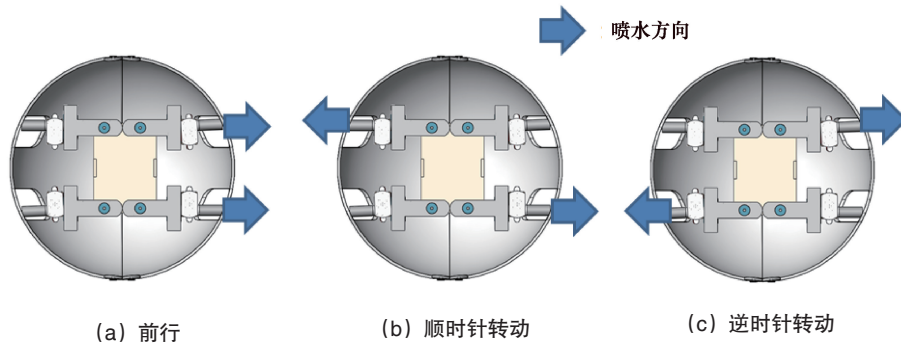
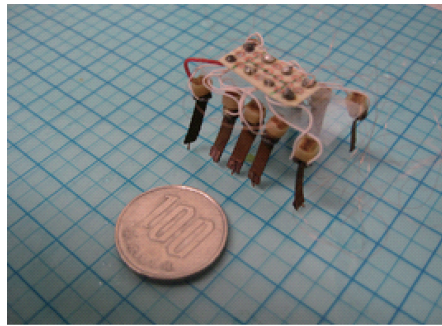


图9 水中水平方向直行、旋转运动
Fig. 9 Underwater motions (bottom view)

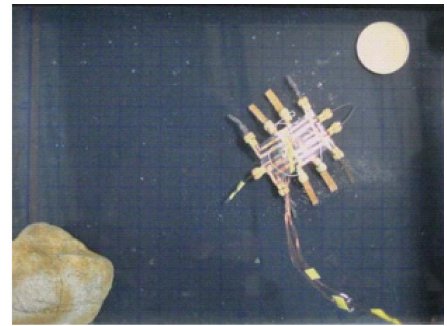
4 原型机及实验

本研究利用IPMC分别实现微型机器人的爬行、转动、上浮、下潜、游动、夹持、形态改变等动作,并通过比较各种运动的实现方法、驱动器数量、达到的位置精度等,完成具有微型结构、多运动模式、高精度等特征的微型子机器人的原型机试制。图10(a)^[29]为微型机器人尺蠖,可以实现直行、转动、夹取、上浮等动作;图10(b)^[28]为微型可变形多爪机器人,在实现直行、转动、夹取、上浮、游动等动作基础上,可以进行形态的改变,以适应不同环境需求。

对于两栖球形机器人,试制完成模式一矢量喷水复合推进的两栖机器人原型机试制,进行了基础运动实验的验证,实现了陆地各种地形的爬行、水中



(a) 微型机器人尺蠖

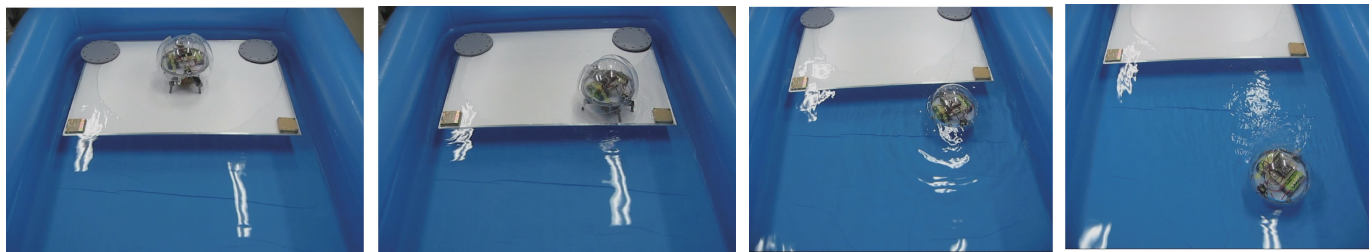


(b) 微型可变形机器人

图10 微型机器人原型机
Fig. 10 Prototype microrobots

水平直行和回转运动、水中垂直上浮下潜等基本运动^[14, 15],该两栖机器人的陆地和水下运动模式切换、姿态控制等均达到预期(图11^[4],图12^[15])。此外,完

成了无缆微型机器鱼及有缆可变形多爪鱼的搭载和释放实验^[15],利用母机器人将IPMC驱动的微型机器鱼和多爪鱼搭载到指定位置释放(图13,图14^[15])。



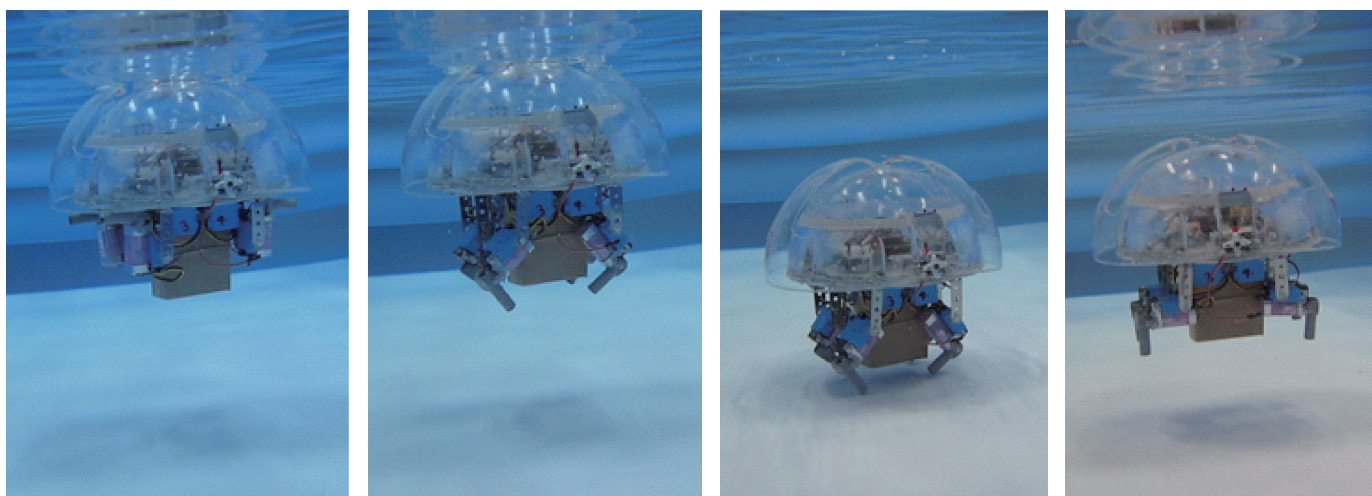
(a) 初始位置

(b) 陆上步行

(c) 跳入水中

(d) 水中水平方向直行

图11 原型机两栖运动实验
Fig. 11 Amphibious motion



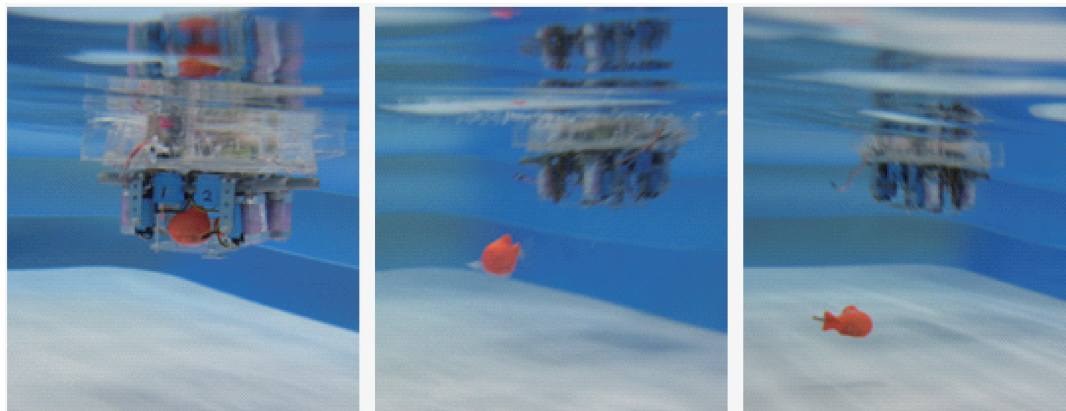
(a) 初始位置

(b) 调整喷水方向向上

(c) 机器人下潜

(d) 调整喷水方向向下实现上浮

图12 母机器人水下垂直方向运动
Fig. 12 Surfacing and diving motions



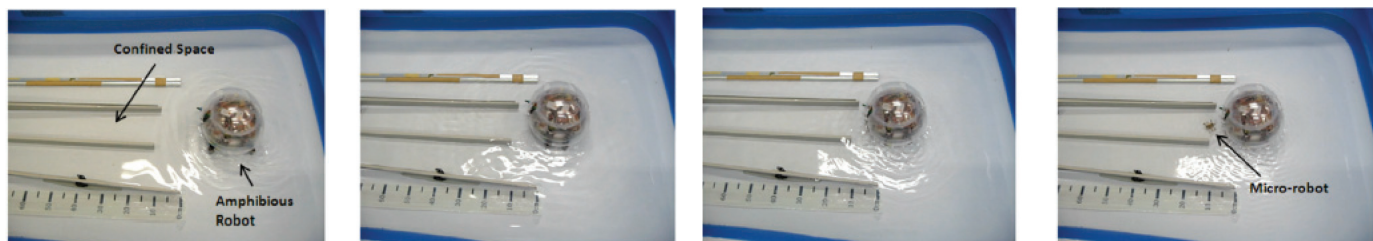
(a) 搭载微型仿生机器人

(b) 释放子机器

(c) 微型子机器人自行巡航

图 13 无线线子机器人搭载和释放试验

Fig. 13 Wireless microrobot deployment experiment



(a) 母机器人水中前行

(b) 达到指定狭小通道

(c) 调整姿势

(d) 释放子机器人

图 14 有缆多爪子机器人的释放试验

Fig. 14 Legged microrobot deployment experiment

5 结论

提出了适用于复杂两栖环境的水陆两栖子母机器人系统,通过原型机验证了其应用于狭小空间环境的可行性。

1) 利用人工离子交换聚合体膜 IPMC 分别实现微型机器人的爬行、转

动、上浮、下潜、游动、夹持、游动、形态改变等动作,以适应不同环境需求。

2) 完成腿式-矢量喷水复合推进的水陆两栖机器人原型机研发,验证了其陆地行走、水中水平直行和回转运动、水中垂直上浮下潜等基本运动,并

进行了陆地和水下运动模式转换及姿态变换控制。

3) 验证了子母机器人的协调运动,完成母机器人搭载及在制定区域释放 IPMC 驱动的无线微型机器鱼及有缆多爪鱼。

参考文献 (References)

- [1] Boxerbaum A S, Werk P, Quinn R D, et al. Design of an autonomous amphibious robot for surf zone operation: part i mechanical design for multi-mode mobility[C]//Proceedings of 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. California, USA: IEEE, 2005: 1459-1464.
- [2] Prahacs C, Saunders A, Smith M K, et al. Towards legged amphibious mobile robotics[C]//The Inaugural Canadian Design Engineering Network (CDEN/RCCI) Design Conference. Montreal, Canada, 2004.
- [3] Georgiades C, German A, Hogue A. AQUA:An aquatic walking robot[C]//Proceedings of the 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2004: 3525-3531.
- [4] Hobson B W, Kemp M, Moody R. Amphibious robot devices and related methods, USA:6974356, 2005.
- [5] Crespi A, Ijspeert A J. AmphiBotII: Anamphibious snake robot that crawls and swims using a central pattern generator[C]//Proceedings of the 9th Interna-

- tional Conference on Climbing and Walking Robots, Brussels, 2006: 19-27.
- [6] Yamada H, Chigisaki S, Mori M. Development of amphibious snake-like robot ACM-R5[C]//Proceedings of 36th International Symposium on Robotics, Japan, 2005: 433-440.
- [7] Crespi A, Badertscher A, Guignard A, et al. PhiBot I: an amphibious snake-like robot[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2005, 50(4): 163-175.
- [8] Matsuo M, Yokoyama T, Ueno D, et al. Biomimetic motion control system based on a CPG for an amphibious multi-link mobile robot[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2008, 5(Suppl): 91-97.
- [9] 王立权, 刘德峰, 陈东良, 等. 两栖多足机器人水下步态分析[J]. *机器人*, 2008, 30(4): 333-339.
- [10] 冯巍, 杨洋, 周静. 小型两栖机器人推进机构设计与水动力学分析[J]. *机械科学与技术*, 2006, 25(11): 1325-1372.
- [11] 侯康, 孙汉旭, 贾庆轩. 球-轮复合可变形机器人的结构设计与分析[J]. *机械工程学报*, 2012, 48(15): 25-31.
- [12] Yu J Z, Hu Y H, Huo J Y, et al. Dolphin-like propulsive mechanism based on an adjustable Scotch yoke[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2009, 44(3): 603-614.
- [13] Liang X, Xu M, Xu L C, et al. The amphiHex: a novel amphibious robot with transformable leg-flipper composite propulsion mechanism[C]//Proceedings of the 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2012). Vilamoura, Algarve, Portugal: IEEE, 2012.
- [14] Shi L W, Guo S X, Mao S L, et al. Development of an amphibious turtle-inspired spherical mother robot[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2013, 10(4): 446-455.
- [15] Li M X, Guo S X, Hirata H, et al. Design and performance evaluation of an amphibious spherical robot[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2015, 64: 21-34.
- [16] Pan S W, Shi L W, Guo S X. A Kinect-based real-time compressive tracking system for amphibious spherical robots[J]. *Sensors*, 2015, 15(4): 8232-8252.
- [17] Li Y X, Guo S X, Yue C F. Preliminary concept of a novel spherical underwater robot[J]. *International Journal of Mechatronics and Automation*, 2015, 5(1): 11-21.
- [18] Yue C F, Guo S X, Li M X, et al. Mechantronc system and experiments of a spherical underwater robot: SUR-II[J]. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2015, 80(2): 325-340.
- [19] Yue C F, Guo S X, Shi L W. Design and performance evaluation of a biomimetic microrobot for the father-son underwater intervention robotic system[J]. *Microsystem Technologies*, 2015. DOI: 10.1007/s00542-015-2457-z.
- [20] Zhao Z X, Guo S X. Design of an acoustic communication system based on FHMA for multiple underwater vehicles[J]. *Wireless Engineering and Technology*, 2010, 1: 27-35.
- [21] Lin X H, Guo S X. Development of a spherical underwater robot equipped with multiple vectored water-jet-based thrusters[J]. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2012, 67(3-4): 307-321.
- [22] Zhang W, Guo S X, Asaka K. Development of an underwater biomimetic microrobot with compact structure and flexible locomotion[J]. *Microsystem Technologies*, 2006, 13(8-10): 883-890.
- [23] Zhang W, Guo S X, Asaka K. Development of a novel type of an underwater microrobot with biomimetic locomotion[J]. *Journal of Applied Bionics and Biomechanics*, 2006, 3(3): 245-252.
- [24] Guo S X, Okuda Y, Zhang W, et al. The Development of a hybrid underwater micro biped robot[J]. *Journal of Applied Bionics and Biomechanics*, 2006, 3(3): 143-150.
- [25] 苏玉东, 叶秀芬, 郭书祥. 基于 IPMC 驱动的自主微型机器鱼的研究[J]. *机器人*, 2010, 32(2): 262-270.
- [26] 叶秀芬, 朱玲, 刘世超, 等. 基于 PVDF 传感器的仿生机器鱼测控系统[J]. *高技术通讯*, 2010, 20(8): 850-855.
- [27] Gao B F, Guo S X, Ye X F. Motion-control analysis of ICPF-actuated underwater biomimetic microrobots[J]. *International Journal of Mechatronics and Automation*, 2014, 1(2): 79-89.
- [28] Shi L W, Guo S X, Li M X, et al. A novel soft biomimetic microrobot with two motion attitudes[J]. *Sensors*, 2012, 12(12): 16732-16758.
- [29] Guo S X, Shi L W, Xiao N, et al. A biomimetic underwater microrobot with multifunctional locomotion[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2012, 60(12): 1472-1483.
- [30] Shi L W, Guo S X, Mao S L, et al. Development of a lobster-inspired underwater microrobot[J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2013 (DOI: 10.5772/54868), 10(44:2015) 1-15.
- [31] Shi L W, Guo S X, Asaka K. Development of a new jellyfish-type underwater microrobot[J]. *International Journal of Robotics and Automation*, 2011, 26(2): 229-241.



Study on an amphibious biomimetic father-son robot system with multi-functions

GUO Shuxiang^{1,2}, SHI Liwei^{1,2}

1. The Institute of Advanced Biomedical Engineering System, School of Life Science, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China
2. Key Laboratory of Convergence Medical Engineering System and Healthcare Technology, The Ministry of Industry and Information Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract An amphibious robot with a small size may complete the tasks in amphibious and transition environments, such as pipe detection, fishes monitoring, mineral collection, object recovery and so on, which a single propulsion mechanism robot cannot implement. So, the robots that possess the attributes of compact structure, multi-functionality, precise positioning, and attributes of long endurance are of great interest to researchers. A father-son robot system is proposed in this research that is composed of an amphibious spherical father robot and several son robots. The father robot is actuated by a leg-water jet composite propulsion mechanism. By utilizing one composite propulsion mechanism, the father robot can achieve the amphibious motion, which may increase the load capability and reduce the complexities of the mechanism and control system. It can adjust its shape and propulsion mechanism automatically according to the environment. The son robots can implement swimming, walking, rotating, floating/diving, and grasping motions, which are actuated by the smart actuators. The father robot and each son robot are connected by a smart cable, which can be used for communication between the father robot and its son robot. Also, the smart cable can be used to recover the son robot.

Keywords amphibious robot; bio-inspired microrobot; spherical robot; father-son robot system

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2006AA04Z248); 国家自然科学基金面上项目(61375094)

作者简介: 郭书祥, 千人计划国家特聘教授, 研究方向为手术机器人与仿生机器人, 电子信箱: guoshuxiang@bit.edu.cn;

石立伟(通信作者), 副教授, 研究方向为仿生机器人, 电子信箱: shiliwei@bit.edu.cn

(责任编辑 刘志远)

