

# 水陆两栖可变形机器人控制系统设计与实现\*

田冬英<sup>1,2</sup> 王明辉<sup>1</sup> 李斌<sup>1</sup>

(1 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 110016;

2 沈阳理工大学 沈阳 110016)

**摘要:** 针对一种新型水陆两栖可变形机器人 Amoeba-II 的机构和运动特性——具有变形能力和两栖多种运动步态, 设计并实现了适用于该机器人的控制系统。本文基于层次化体系以及分步式控制方法设计了模块化控制系统结构, 采用 CAN 总线技术作为模块间主要通信方式, 增强了系统的可扩展性和容错性。最后, 通过对原理样机的实验验证了该控制系统的有效性、实时性与可靠性。

**关键词:** 水陆两栖可变形机器人 层次化体系结构 模块化控制系统

## Design and implementation of the control system of an amphibian shape-shifting robot

Tian Dongying<sup>1,2</sup> Wang Minghui<sup>1</sup> Li Bin<sup>1</sup>

(1 State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

2 Shenyang Ligong University, Shenyang 110016, China)

**Abstract:** Amoeba-II, a novel amphibian shape-shifting robot with unique mechanism and kinetic characteristic has the ability of transforming and possesses multi-motion gaits, the control system of the robot is designed to realize the above functions. It adopts modular control system architecture designed based on layered architecture and distributed control method, modules of layers communicate through CAN bus, therefore, the system is expandable and tolerant. The control system is validated to be effective, real time and reliable by the experiments on the prototype.

**Key words:** the amphibian shape-shifting robot; layered architecture; modular control system

### 1 引言

水陆两栖机器人同时具备在陆地和水中的移动能力, 可执行海岸沿线巡查、搜索救援等多种任务, 具有广阔的应用前景。国内外对水陆两栖机器人进行了大量的研究, 比如美国东北大学海洋科学中心开发的机器龙虾<sup>[1]</sup>、麦吉尔大学联合约克大学等开发的一种两栖机器人AQUA<sup>[2]</sup>、哈尔滨工程大学开发的机器蟹<sup>[3]</sup>、上海交通大学开发的机器龟<sup>[4]</sup>, 以及国内外研究的蛇形机器人<sup>[5]</sup>等。这些机器人两栖推进方式不同, 各具优缺点: 轮式推进结构简单, 地形适应能力差; 腿式地形适应能力强, 结构和控制复杂; 拍动式在水中效率高, 但不适用于陆地推进; 蛇形推进普遍采用的被动轮降低了其对环境的

适应性。可见单一的推进方式不能满足各种复杂环境的要求, 而水陆采用不同的推进方式又产生体积扩大、复杂度增加、环境适应性降低等其他问题。

针对上述问题, 我们研制出水陆两栖可变形机器人 Amoeba-II<sup>[6]</sup>, 该机器人通过构型的变化以及多种步态的运用实现了较强的运动能力和对实际环境的适应性。本文主要介绍了针对这种具有变形能力和水陆两栖步态的模块化机器人, 提出的层次化模块化控制系统结构<sup>[7]</sup>, 并设计、实现了机器人控制系统。通过对原理样机的实验, 验证了控制系统的有效性、实时性与可靠性。

### 2 水陆两栖可变形机器人 Amoeba-II

机器人 Amoeba-II 由两个驱动模块、两个俯仰模块和一个连接模块组成, 如图 1 所示, 设计有五

\*基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60905058)

个可控运动关节，1、2 为履带轮驱动关节，4、5 为俯仰或摆动（水中）关节，3 变形驱动关节。在连接模块的底部装有被动轮，在陆地上起支撑作用。机器人的各部件选用轻质材料，整体进行密封防水，使其可以浮在水面上。

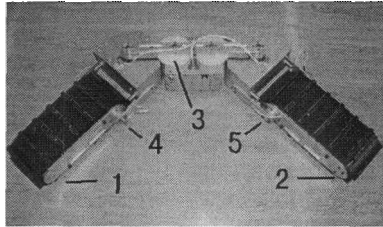
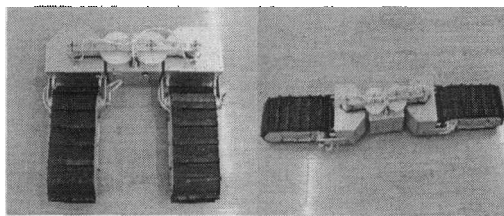


图 1 机器人 Amoeba-II

机器人具备两种基本构型和多种辅助构型。两种基本构型为并排型和直线型，如图 2 所示。并排型具有良好的转弯特性，通过调节履带的转速可以实现零半径转弯。并排型还具有较好的抗倾翻性，能够适应斜坡环境。直线型通过调整各关节角度和速度，在陆地上可以通过狭窄路面、翻越沟壑、障碍等，在水中，可以进行仿鱼式泳动。



(1) 并排型 (2) 直线型  
图 2 机器人 Amoeba-II 基本构型

### 3 控制系统体系结构

机器人在不同的构型下有着多种运动步态，这些运动姿态的灵活运用以及相互间的转换，使得机器人具有很高的环境适应性。这一特点给控制系统的设计提出了较高的要求，主要表现在以下三方面：

- 1、机器人的可操作性。机器人具有两栖多种运动姿态，并且能够变形。控制系统应当能够实现人对这些姿态的实时、灵活、完备的控制。
- 2、各运动关节的运动应当同步。机器人有五个可控运动关节，大多数的步态都要求控制两个及两个以上的关节同时运动。同步的运动控制使得机器人运动平稳，并减少了不必要的功率损耗。
- 3、机器人运动状态的监测。机器人实时的运动状态数据的反馈，为人的操作提供数据参考，也

为智能控制奠定基础。

因此，我们设计了三层的控制体系，如图 3 所示，监控层实现人机交互，规划层进行任务分解，执行层实现运动控制，各层采用模块化方法实现。

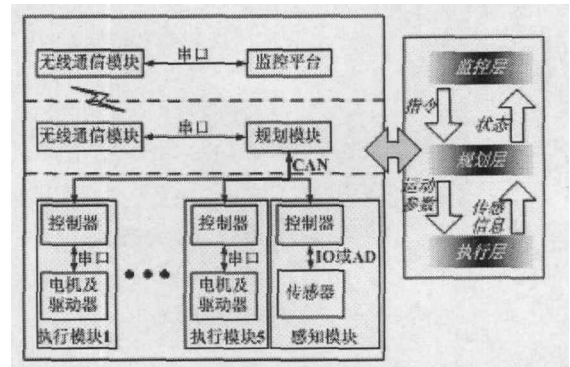


图 3 控制系统结构框图

监控层由监控平台与无线通信模块组成：监控平台发送操作指令，显示并存储机器人状态信息；无线通信模块实现监控层与规划层之间控制指令与机器人状态信息的传输。

规划层由规划模块和无线通信模块组成：规划模块根据监控平台的操作指令以及机器人当时状态进行全局的运动规划。

执行层采用分布式控制结构，增强控制系统的稳定性和可扩展性。执行层由执行模块和感知模块组成：执行模块用于控制某个关节的电机运动；感知模块用于采集传感器的信息。规划层与执行层之间选用 CAN 广播通信，确保对各节点的控制同步。

### 4 控制系统硬件设计

规划模块、执行模块与感知模块的控制器选用富士通 16 位单片机 MB90549，开发了串口通信、CAN 通信、IO、AD、定时器以及中断功能。MB90549 开发板模块如图 4 所示，具有功能全面、体积小等特点。各模块通过 CAN 总线连接，CAN 总线是广泛采用的多节点短距离通信方式，具有通信速率快、抗干扰能力强和易扩展等特点。

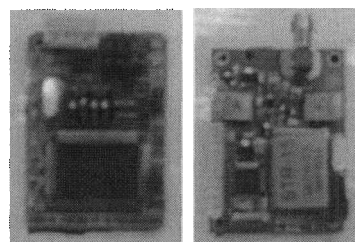


图 4 MB90549 开发板与无线数传模块

无线通信模块采用大功率无线数传模块，载频频率为 433MHz，最大发射功率为 27dbm，支持 RS232 和 TTL 电平串口。满足了监控平台与规划模块间通信距离、接口与数据量的要求。

执行模块的执行元件选用 Faulhaber 直流微电机和 MCDC-2805，满足了体积、扭矩和运动精度等方面的要求。感知模块的传感元件选用电位计和倾角传感器，电位计用于获取变形状态；倾角传感器安装在连接模块内，用于获取机器人位姿。

### 5 控制系统软件设计

控制系统的软件设计包括对执行模块、感知模块、规划模块以及监控平台的软件设计。

#### 5.1 执行模块软件设计

为满足实际需要，执行模块采用两种模式控制电机，速度模式和位置模式。关节 1、2 为速度控制模式，当关节以固定的速度运动时称为平衡态，否则为非平衡态。关节 3、4、5 为位置控制模式，当关节处于固定的位置称为平衡态，否则为非平衡态。当机器人所有关节都处于平衡态时，称机器人处于平衡态，否则为非平衡态。对机器人的控制实际上就是完成由一次状态转移的过程。

执行模块与规划模块之间采用 CAN 通信，通过广播同步帧方式实现同步。执行模块将每 200ms 从规划模块接收到的运动目标值线性规划为每 20ms 的运动目标值，发送给电机驱动器。根据模块化思想，各执行模块软件程序只有 ID 不同。

#### 5.2 感知模块软件设计

感知模块每 20ms 采集一次传感器值，当 CAN 线接收到规划模块每 200ms 发送的同步帧时，反馈 10 次采集的平均值。

#### 5.3 规划模块软件设计

规划模块根据监控平台的命令与实际需求，通过全局规划实现机器人由一种平衡态向另一种平衡态的平稳转移。

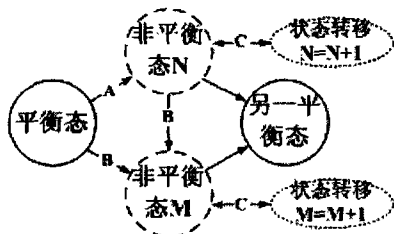


图 5 状态转移图

如图 5 所示，规划模块将串口接收到的命令分两级进行处理，对低优先级命令（A）进行 200ms 周期性监测，对高优先级命令（B）收到即执行。大多数的命令都为低优先级命令，使机器人由平衡态进入非平衡态，最后又回归到平衡态，完成一次状态转移。高优先级命令在机器人处于平衡态或非平衡态时都有效，可以用于实时控制。此外，各个传感器的值（C）的变化也可以作为状态转移的条件。规划模块软件具体实现如图 6 所示。

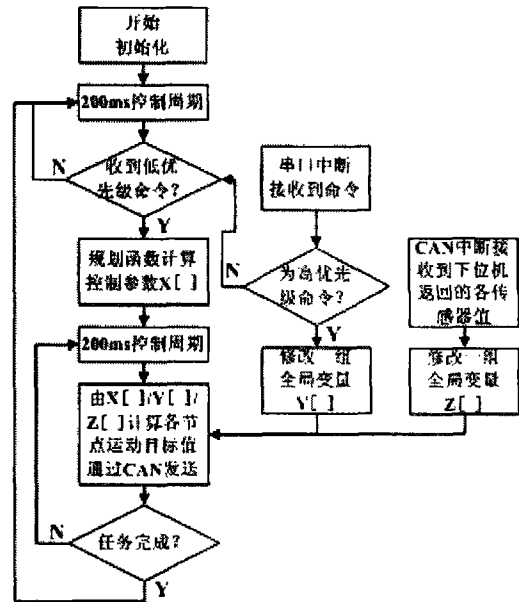


图 6 规划模块软件流程图

#### 5.4 基于 VC++ 的监控平台设计

监控平台主要负责向机器人发送控制指令，获取机器人状态信息、判断机器人的状态和任务执行情况等。监控界面设计如图 7 所示。基于 VC++ 的监控平台软件的实现主要包括串口收发，定时与文本存储等功能模块的开发。

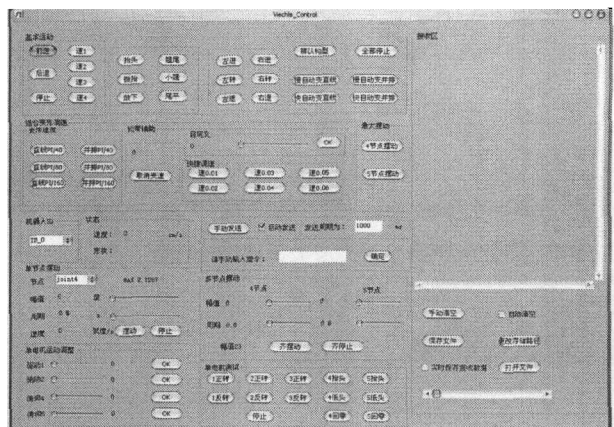


图 7 监控界面

为实现对机器人的灵活操控，设计了多个操作模块，并根据实际需要分配与主控制器控制策略相对应的高低优先级，高优先级命令可以在低优先级命令基础上对运动姿态进行部分重新规划。目前实现的操作模块与优先级分配见表 1。

表 1 操作模块与优先级

低优先级	高优先级
1 基本运动模块	
2 多节点摆动模块	5 单电机运动调整模块
3 单电机测试模块	
4 组合变形模块	6 组合变形调速模块

## 6 实验

为了验证可变形机器人 Amoeba-II 控制系统的有效性、实时性与可靠性，我们在采用了该控制系统的机器人原理样机上进行了相关实验。

如图 8 所示为机器人攀爬台阶实验，利用监控平台设置驱动关节的驱动速度  $0.03m/s$ ，再通过实时调节俯仰关节的角度，使得机器人平稳爬上台阶，台阶倾角  $30^\circ$ 。实验中俯仰关节的运动过程见表 2。

表 2 俯仰关节运动过程

时间(秒)	1	10	17	25	33	40
首俯仰关节角度(度)	45	20	20	0	0	0
尾俯仰关节角度(度)	0	0	20	20	45	0

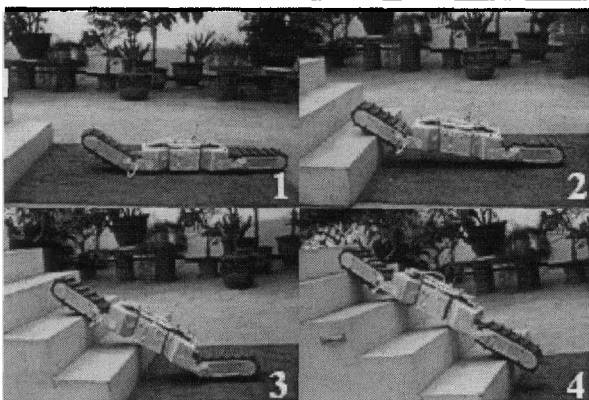


图 8 上台阶实验

如图 9 所示为机器人泳动实验，通过尾俯仰模块的摆动实现水中推进。尾俯仰关节的摆动频率和角度可以任意设置，实验中摆动速度为  $5rad/s$ 。

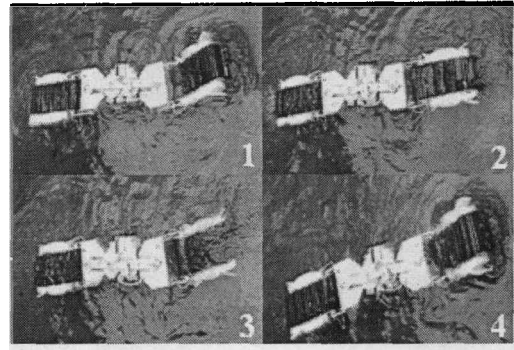


图 9 水中泳动实验

实验结果表明本文设计的控制系统满足了机器人水陆两栖运动的要求。该系统能够有效地完成水陆多种运动姿态的控制，也能够实时地调整运动姿态以满足各种运动要求，且具备很高的可靠性。

## 7 结论

可变形机器人 Amoeba-II 具有变形能力和两栖多种运动步态，具备较强的运动能力和实际环境适应性。层次化模块化的控制系统结构的设计，使得控制系统具备可扩展性和容错性。通过一系列水中 and 陆地实验，验证了控制系统的有效性、实时性与可靠性，实现了机器人的环境适应能力和较强运动能力，具有重要的理论意义和实用价值。

## 参考文献

- [1] Ayers J. Underwater walking[J]. Arthropod Structure & Development, 2004, 33(3): 347- 360.
- [2] Georgiades C, German A, Hogue A, et al. AQUA: an aquatic walking robot[A]. Proceedings of the IEEE/RSI International Conference on Intelligent Robots and Systems [C]. Piscataway, N J, USA: IEEE, 2004. 3525-3531.
- [3] 王立权, 孙磊, 陈东良, 等. 仿生机器蟹样机研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2005, 26(5): 591-595.
- [4] 孙安, 吴斌, 高雪官. 水陆两栖机器龟[P]. 中国专利: 200310108109.9, 2004-10-20.
- [5] 陈丽, 王越超, 李斌. 蛇形机器人研究现状与进展[J]. 机器人, 2002, 24(6): 559-563.
- [6] Nan Li, Shugen Ma, Bin Li, et al. A dynamic shape-shifting method for a transformable tracked robot[A]. Proceedings of the the IEEE. International Conference on Robotics and Biomimetics[C]. Tianjin, China, 2010: 466-471.
- [7] 王明辉, 马书根, 李斌, 等. 可重构机器人体系结构及模块化控制系统的实现 [J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(10): 1178-1182.