信息与控制　2020 年　第 49 卷　第 1 期：69 ~ 77

DOI：10.13976/j.cnki.xk.2020.9481　　文章编号：1002 - 0411(2020) - 01 - 0069 - 09

可重构模块化蛇形机器人研制及多运动模态研究

朱　威，郭　宪，方勇纯，张学有

南开大学人工智能学院，天津　300350

基金项目：国家自然科学基金资助项目(61603200，U1613210)

通信作者：郭宪，guoxian@nankai.edu.cn　收稿/录用/修回：2019 - 08 - 30/2019 - 10 - 12/2020 - 01 - 06

摘要

蛇形机器人通过改变自身的形状可以在复杂的地形环境中有效地运动，然而传统的一体化设计面临着任务搜救效率低、机器人本体维修困难、机体灵活性差等挑战性问题. 针对这些问题，本文研制了新一代可重构模块化蛇形机器人并研究了相应的多模态运动方法. 具体而言，新型蛇形机器人可以由任意多个模块通过连接机构重构而成，每个模块都是集成了驱动、控制、通信、电源于一体的可独立运动的单元，模块之间的连接机构采用新型的便于切换的勾爪 - 插销机构. 另外，本文针对该可重构模块化蛇形机器人进行了多模态运动方法研究，具体包括轮式机器人运动模态、平面蜿蜒模态、侧向蜿蜒模态、行波模态、攀爬模态、自主拆分模态等，并具体分析了攀爬运动及单模块转弯运动的性能. 最后，基于自主研发的可重构模块化蛇形机器人样机对每种运动模态进行了实验验证.

关键词

可重构模块化机器人

蛇形机器人

多运动模态

中图法分类号： TP24

文献标识码： A

Development of a Reconfigurable Modular Snake-like Robot and Research on Multiple Motion Modes

ZHU Wei, GUO Xian, FANG Yongchun, ZHANG Xueyou

College of Artificial Intelligence, Nankai University, Tianjin 300350, *China*

开放科学(资源服务)标识码(OSID)

Abstract

Snake-like robots can locomote effectively in complex terrains through changing boby shape. However, the traditional integrated design of snake-like robots has some challenging problems, such as low efficiency in rescue and search, difficulty in maintaining robot body, and inferior agility. In order to address these problems, a novel reconfigurable modular robot is developed and multiple motion modes are correspondingly analyzed in this paper. Specifically, the newly developed snake-like robot can be reconfigured by any number of modules through the connection mechanism, wherein each module of the robot integrates communication, power, actuator, and control units, therefore, all modules can behave independently. Besides, the novel connection mechanism between two modules is composed by hook and bolt which are helpful for free switch. Additionally, multiple motion modes are analyzed in this paper, specifically including mobile robot locomotin mode, serpentine mode, sidewinding mode, traveling wave mode, climbing mode, and auto-separation mode. Moreover, the climbing motion of the whole robot and the turning motion of a single module are thoroughly analyzed. Finally, sufficient experiments are performed to verify all motion modes using the developed snake-like robot.

Keywords

reconfigurable modular robot;

snake-like robot;

multiple motion modes

0　引言

模块化机器人是一种高自由度冗余机构，具有灵活的运动性能，适用于搜索、救援、侦查等多种复杂非结构化环境. 其中，蛇形机器人作为一种典型的模块化机器人，得到了广泛研究. 日本东京工业大学最早研制的 ACM-III[1]、瑞士洛桑联邦理工学院研制的 AmphiBot-I[2]、南开大学通过 3D 打印技术研制的 NKS1[3]、中国科学院沈阳自动化研究所搭建的蛇形机器人[4]以及北京理工大学研制的蛇形机器人[5]只有偏航关节，能够模拟生物蛇的平面蜿

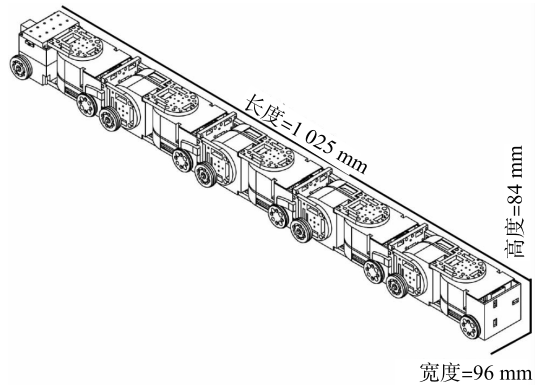
蜒运动，但是这种蛇形机器人无法在三维空间内运动. 日本东京工业大学之后研制的 ACM-R3[6]、挪威科技大学研制的 Mamba[7]、卡内基梅隆大学研制的 SEA-Snake[8]、大连理工大学搭建的蛇形机器人[9]以及中国科学院沈阳自动化研究所研制的机器人[10]通过偏航关节和俯仰关节交替连接，能够在三维空间内运动，从而提高了蛇形机器人的运动性能，但是这些机器人的运动形式单一，一般采用侧向蜿蜒模态运动，因此运动效率比较低. 为了进一步提高运动效率，日本东京工业大学研制的 ACM-R4[11]、日本电气通信大学研制的 T^2 Snake-3[12]除了具有偏航关节和俯仰关节交替连接机构，还安装了主动轮，因此这种机器人能够采用侧向蜿蜒模态的同时还能够以轮式移动机器人的形式运动，从而提高了机器人的运动效率. 但是蛇形机器人作为一种模块化机器人，模块之间的连接形式单一，一般是通过主动铰链机构连接，可重构能力比较低，模块数量固定，重构形态也局限于蛇形.

可重构模块化机器人相对于模块化蛇形机器人而言，模块之间的连接形式更加多样化，模块数量可以自由增减，重构形态也多样化，因此在功能上具有比较强的扩展能力. 瑞士洛桑联邦理工学院研制的 Roombots[13]能够重构成多种形态，比如蛇形、双足形、四足形、俄罗斯方块形等，模块之间的连接采用钩爪—挡板机构，钩爪状态由塑料齿轮传动机构主动控制，因此模块能够自主拆分和连接，但是塑料齿轮传动机构刚度比较低，负载能力低，而且钩爪啮合时没有自锁机构，比较耗能. 日本电气通信大学研制了另一种主动连接机构，模块之间通过电磁铁连接[14]，尽管连接方式更加容易操作，但是负载能力明显降低. 康奈尔大学提出了一种自焊连接机构[15]，模块之间通过焊锡连接，焊锡通电流受热后熔化，连接的模块可以分离，当焊锡凝固时，模块又能够相互连接，虽然能够增加负载能力，但是加热焊锡需要消耗大量的能量，而且产生的热量会损坏机器人.

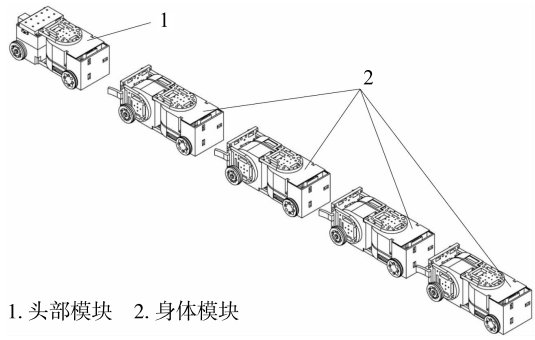
综合蛇形机器人的多种运动模态以及可重构机器人多样的连接机构，同时为了解决这两种机器人存在的问题，进一步提高模块化机器人的可重构能力和运动性能，本文研制了一种可重构模块化蛇形机器人. 和现有的模块蛇形机器人相比，主要区别在于：本文设计的蛇形机器人每个模块都是一个完整的智能体，模块之间能够协同合作也能够完全独立运动. 因为大多数现有的模块化蛇形机器人各模块之间通过总线通信[7, 8, 12]，因此单个模块不具备单独运动的能力. 除此之外，模块之间连接固定，因此可重构性差. 综合这两个主要原因，现有的模块化蛇形机器人应用能力比较受限，尽管能够适应特定的环境，但是应用的范围比较局限. 针对这两个技术难点，本文做了如下改进：每个模块集成了无线通信、电源、驱动、控制单元，因此所有模块能够独立运动的同时也能够相互协作；模块之间通过钩爪—插销机构连接，插销状态通过电机直接控制，而且插销和钩爪啮合时形成自锁，负载能力提高的同时无需消耗额外的能量，这种主动连接方式使得机器人模块能够自主分离和连接，提高了机器人的可重构能力. 完整连接的机器人具有蛇形机器人的多种运动模态，同时具有轮式机器人高效的运动形式，独立的模块能够远程控制. 综合这些优势，本文研制的可重构模块化机器人能够穿越各种复杂的环境，如矮洞、沟道、草地、窄缝、台阶、巷道等. 最后，通过多种运动模态实验验证了机器人的运动性能. 综上所述，本文的主要创新点在于：1）研制了新一代模块化蛇形机器人，进一步扩展了蛇形机器人的应用能力；2）对现有步态进一步分析的同时，提出了攀爬台阶步态，并分析了单模块的转弯模型.

1 可重构模块化机器人研制

图 1 为可重构模块化机器人(reconfigurable modular robot, RMR)的计算机辅助设计(computer aided design, CAD)模型，图 1(a)表示模块连接，图 1(b)为模块分离. RMR 由 1 个头部模块和 4 个身体模块组成，身体模块的数量可以根据需求自由增减. 在模块上设计合适的连接和断开机构，蛇形机器人即可以变形成各种形式或者组成新的机器人，还可以分开成几个可重构机器人，协同完成相应任务.



(a) 模块连接



1. 头部模块 2. 身体模块

(b) 模块分离

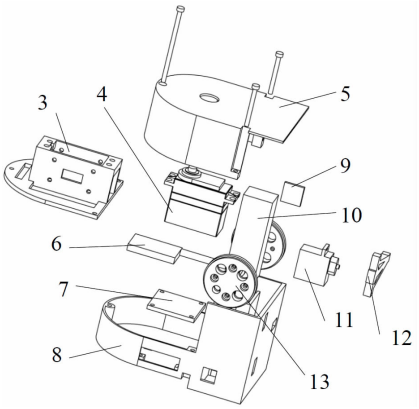
图 1 RMR 的 CAD 模型

Fig.1 CAD model of RMR

1.1 身体模块设计

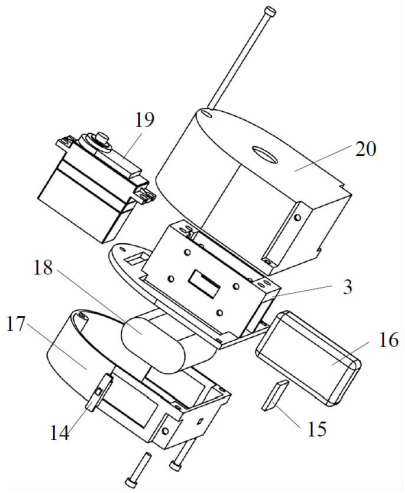
RMR 的头部模块只有一个偏航关节，身体模块同时包含偏航和俯仰关节，图 2 为身体模块的主要内部结构，图 2(a)为偏航关节内部结构，图 2(b)为俯仰关节内部结构. 因为本文目的在于研制一种轻小型化蛇形机器人，因此对于电机选择的首要标准是体积小. 因为俯仰关节处电

机需要克服机器人自身重力抬升关节，因此电机力矩相应的要比较大，对于单个模块的抬升，俯仰关节电机需要提供的力矩为 $0.76\ \text{kg}\times 10\ \text{N/kg}\times\frac{0.211}{2}\ \text{m}\approx 0.8\ \text{N}\cdot\text{m}$，因此所选电机最大力矩要大于 0.8 N·m. 同样是考虑体积限制，电池的三维尺寸也要求比较小，但是考虑续航能力和最大输出电流，尤其是对俯仰关节电机的供电，所以最终选择大电池容量为 1 500 mAh，放电倍率为 15. 同时，考虑机器人空间的利用率，进一步提高续航能力，除了使用大容量电池给偏航和俯仰关节电机供电，还增加小容量小尺寸电池为其他模块供电. 偏航舵机堵转电流 2 700 mA，俯仰舵机堵转电流 3 500 mA，因此机器人最短续航时间为 14.5 min. 除此之外，头部模块因为不包含俯仰关节舵机，因此不需要大容量电池，所以头部模块中仅仅包含一块小容量电池. 主控芯片采用 STM32F4 系列单片机，板载 IMU（Inertial Measurement Unit，惯性测量单元）（本文未使用）.



3. 舵机固定支架　4. 偏航舵机　5. 偏航上盖　6. 无线通信单元　7. 主控芯片　8. 偏航底座　9. 主动轮电机驱动器　10. 主动轮电机　11. 滚转舵机　12. 十字插销　13. 主动轮

(a) 偏航模块



14. 电源开关　15. 稳压单元　16. 小容量电池　17. 俯仰底座　18. 大容量电池　19. 俯仰舵机　20. 俯仰上盖

(b) 俯仰模块

图 2　身体模块主要内部结构

Fig.2　Main internal structure of the body module

无线通信单元通过串口和主控芯片连接，最大通信频率 50 Hz，最大通信距离超过 100 m，上位机和下位机采用广播模式通信. 偏航、俯仰、滚转舵机的角度直接由主控芯片控制，主动轮电机需要借助驱动器进行调速控制. 表 1 为机器人详细参数.

表 1　机器人详细参数

Tab.1　Specifications of the robot

参数	数值
三维尺寸 /mm	头部模块：长×宽×高 = 181×96×84
	身体模块：长×宽×高 = 211×96×84
	整体：长×宽×高 = 1025×96×84
质量 /g	头部模块：580 身体模块：760 整体：3620
电机	主动轮电机：200 r/min(6.0 V)
	滚转舵机：0.15 N·m，91 r/min(4.8 V)
	偏航舵机：1.6 N·m，70 r/min(7.4 V)
	俯仰舵机：2.9 N·m，58 r/min(7.4 V)

1.2　连接机构设计

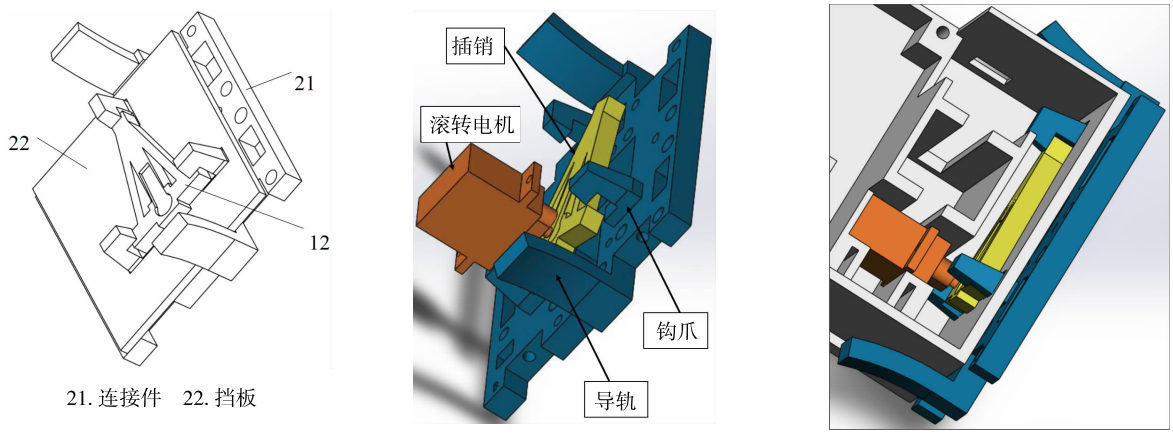
图 3 为连接机构. 图 3(a)为连接状态简图，挡板为前一个模块的尾端，连接件为后一个模块的前端，连接件的钩爪通过挡板的孔洞然后与插销啮合，前后两个模块就可以主动连接. 图 3(b)为插销—钩爪分离结构，图 3(c)为插销—钩爪啮合结构，圆弧导轨主要用于引导前后模块对接，插销的状态由滚转舵机控制，从而可以自主控制模块的连接和分离. 图 3(c)为两个模块连在一起的简图，当需要拆分模块时，滚转舵机会带动十字插销旋转一定角度，此时插销和钩爪分离，如图 3(b)所示. 紧接着，插销所在模块向前运动或者钩爪所在模块向后移动，两个模块就能够自动分离. 两个模块在到达图 3(b)前，需要人为手动对准，然后滚转舵机带动插销旋转达到如图 3(c)所示的状态，两个模块就能相互连接. 模块连接时插销处于自锁状态(插销只受到滚转舵机轴向的力，在滚转舵机轴旋转方向不受力)，因此相对于文[13]和文[16]的钩爪以及齿轮传动机构，负载能力更强，而且连接状态滚转舵机消耗能量更少.

标注：本文设计的可重构模块化蛇形机器人具有身体细长、单个模块集成度高并且能够完全独立运动、模块之间能采用钩爪—插销机构够完全自主分离等特点，使得机器人能够采用各种运动模态应用于各种不同的环境.

2　多运动模态研究

当前的蛇形机器人运动模态比较单一，二维平面蛇形机器人一般采用蜿蜒模态运动[1]，三维空间蛇形机器人一般通过侧向蜿蜒模态运动[8]，这两种运动效率比较低，添加主动轮的蛇形机器人在提高运动效率的同时还可以攀爬台阶或者采用行波模态运动[12]，但是集成这些运动模态以及扩展其他模态仍然具有挑战性. 本文除了机器人平台设计，还对多种模态进行相关研究，主要包括轮式机器人运动模态、平面蜿蜒模态、侧向蜿蜒模态、行波模态、攀爬模态和自主拆分模态，进一步增强了蛇形机器人的运动

性能. 因为机器人本体宽度和高度较小，同时安装有主动轮，因此能够以高效的轮式移动机器人运动模态穿越矮洞；同时多关节形成的冗长的身体可以穿越沟道，还能协调机器人各关节角度穿越窄缝、台阶和草地等；最后，机器人的各模块通过钩爪—插销机构连接，从而能够自主拆分成单个模块，便于穿越复杂的巷道环境.



(a) 连接状态简图 (b) 插销—钩爪分离 (c) 插销—钩爪啮合

图 3 连接机构

Fig.3 Connection mechanism

2.1 轮式机器人运动模态

在平整地面，轮式机器人相对于足式、履带式、蛇形等机器人运动效率更高. 因为 RMR 的每个模块相当于一个独立的轮式移动机器人，多个模块可以组装成多关节轮式移动机器人，因此在平整地面环境下，RMR 可以采用轮式机器人运动方式越障. 因为 RMR 高度只有 84 mm，因此可以穿越矮洞，同时 RMR 全长为 1 025 mm，因此利用自身重力可以穿越沟道.

2.2 平面蜿蜒模态

多关节轮式机器人的运动学模型比较复杂，文[17]对多关节轮式机器人的运动学建模并提出了相应的闭环路径跟踪控制算法，但是文中的机器人仅仅头部模块具有主动轮，其他身体模块都是被动轮，相当于多拖车模型，因此不适用于 RMR，虽然文[18]中机器人每个模块都具有主动轮，但是作者仅仅对机器人运动过程的稳定性和奇异性进行了分析，仿真和实验仍具有挑战性. 日本东京工业大学 Hirose 教授最早提出蛇形机器人的平面蜿蜒模态[1]，文[19]对平面蜿蜒模态的转弯运动进行了详细的分析，平面蜿蜒模态如下：

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

$\varphi_i(t)$ 表示 t 时刻第 i 个偏航关节的角度，A^+ 为模态曲线幅值，β^+ 为相位，A^+ 和 β^+ 主要用于调整蛇形机器人蜿蜒模态的形状，ω^+ 为模态曲线的角频率，用于控制蛇形机器人运动速度，γ^+ 是转弯因子，机器人转弯半径 R 为

$$R = \frac{l}{\gamma^+} \tag{2}$$

其中，l 为单个模块的长度.

通过改变平面蜿蜒模态(1)中 ω^+ 和 γ^+ 就可以控制机器人的运动速度和方向，相对于复杂的多关节轮式移动机器人的运动学模型更加简单易操作，占用计算资源更少，而且不需要考虑奇异性问题，因此能更加容易地在平面内转弯绕过障碍.

2.3 侧向蜿蜒模态

轮式机器人运动模态和平面蜿蜒模态适用于平整地面，但是因为主动轮和被动轮在松软崎岖地面会下陷、腾空、打滑而无法产生足够的推力，所以机器人采用这两种模态运动困难. 侧向蜿蜒运动不依赖主动轮和被动轮，机器人通过抬高部分身体然后利用其它身体部位的多个点与地面接触产生静摩擦力，从而推动机器人运动. 文[20]利用响尾蛇的侧向蜿蜒模态实现了野外环境探索，侧向蜿蜒模态如下：

$$\begin{cases} \varphi_i(t) = A_1 \sin(\omega t + (i-1)\beta_1) + \gamma \\ \theta_i(t) = A_2 \sin(\omega t + (i-1)\beta_2 + \delta\theta) \end{cases} \tag{3}$$

侧向蜿蜒模态在平面蜿蜒模态(1)的基础上增加了俯仰关节模态，$\theta_i(t)$ 表示 t 时刻第 i 个俯仰关节的角度，$\delta\theta$ 用于调整侧向蜿蜒模态的初始构型. 和平面蜿蜒模态相似，A_1、A_2、β_1、β_2 主要用于调整蛇形机器人侧向蜿蜒模态的形状，ω 和 γ 用于控制机器人的运动速度和方向，但转弯半径不再满足定量式(2)，研究定量关系当前仍然具有挑战性.

2.4 行波模态

侧向蜿蜒模态实际上是一种身体侧移运动，所以机器人身体越长，需要的运动空间就越大，不适用于穿越窄缝障碍，对于一些软体细长机器人，如尺蠖机器人[21]，可以利用行波模态穿越窄缝. 平面蜿蜒模态(1)控制的是偏航关节，行波模态控制的则是俯仰关节，但是不包含转弯因子，行波模态如下：

$$\theta_i(t) = A^- \sin(\omega^- t + (i-1)\beta^-) \tag{4}$$

和平面蜿蜒模态(1)类似，$\theta_i(t)$ 表示 t 时刻第 i 个俯仰关节的角度，A^- 为模态曲线幅值，β^- 为相位，A^- 和 β^- 主要

用于调整蛇形机器人行波模态的形状，ω^{-} 为模态曲线的角频率，用于控制蛇形机器人运动速度.

2.5　攀爬模态

尽管侧向蜿蜒模态具有一定的攀爬能力[22]，但是相对较高的台阶，仍然比较困难，而且相对比较低的台阶，攀爬效率也比较低[23]，文[12]机器人安装有主动轮，采用轮式机器人运动方式，因此攀爬效率更高，但是攀爬过程需要至少 3 个模块同时参与，而且主动轮是单轴的，因此导致整个机器人身体比较长. 本文设计的机器人采用同轴主动轮，并提出了一种新的攀爬模态，攀爬过程只需要两个模块，因此整体机器人模块数只需要 5 个(文[12]中模块数为 9 个)就能够实现攀爬运动.

图 4 为单个周期攀爬模态，h 为台阶高度，l_1、l_2、l_3 为模块长度，结束状态向前移动 l_1，即可回到开始状态. 中间状态 φ_1、φ_2、φ_3 为关节角度，假设中间过程台阶与第一个模块的支撑点 M 位置固定不变，地面与第 3 个模块的支撑点 N 位置会有轻微地前后移动，中间过程满足的几何关系为

$$\begin{cases} h = l_2 \sin\varphi_3 + l_1 \sin(\varphi_2 + \varphi_3) \\ \varphi_1 = -(\varphi_2 + \varphi_3) \end{cases} \tag{5}$$

通过规划关节角度 φ_3，通过攀爬模态中间过程(5)可以得到关节角度 φ_1 和 φ_2. 下台阶原理和上台阶原理一致.

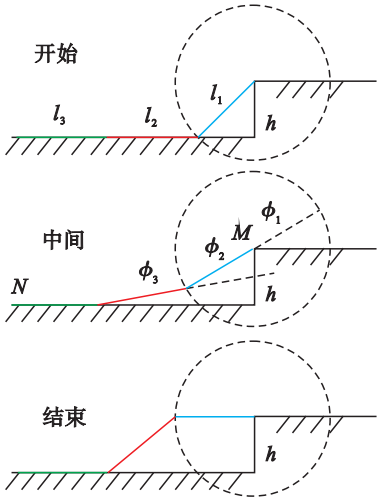


图 4　单个周期攀爬模态

Fig.4　Single period of climbing mode

2.6　自主拆分模态

尽管冗长的机构增强了机器人的越障能力，但是对于错综复杂狭窄的巷道环境，冗长机构会阻碍机器人运动. 基于铰链式多关节移动机器人运动的非完整性约束对机器人进行建模[18]，因为总共有 5 组主动轮和 5 组被动轮，因此一方面建模复杂，从而导致传统的基于非完整性约束的控制比较困难；另一方面冗长的身体也使得机器人很难通过狭窄的多拐角巷道环境. 相反地，单个模块模型简单，长度大大减小，因此更加适合于巷道环境. 除了能够拆分成单个模块，机器人还能够拆分成 2 个或 3 个模块的组合体，尽管身体长度相对于完整体有所减小，但是运动学模型还是会比较复杂，能够穿越的拐角范围也有所限制.

文[24]中多关节移动机器人能够拆解成多个单体移动机器人，从而更加容易穿越巷道，但是机器人模块采用被动连接，拆解需要人为操作，自主能力比较低. 本文机器人模块采用钩爪—插销机构连接，钩爪状态由滚转舵机主动控制，因此拆解过程完全自主，通过远程遥控，冗长机器人可以拆分为单体移动机器人，从而更加容易穿越巷道环境.

图 5 为单个模块穿越直角巷道模型，单个模块相当于铰链式移动机器人. L_d 车身宽度，包括车轮，因此图 5 中车轮宽度忽略不计；L_1 和 L_2 为车轮轮轴到铰链关节轴的公垂线段长度，且 $L_2 > L_1$；δ 为铰链关节转动角度，前后轮轴轴心的转弯半径满足：

$$\begin{cases} r_1 = \dfrac{L_1 \cos\delta + L_2}{\sin\delta} \\ r_2 = \dfrac{L_2 \cos\delta + L_1}{\sin\delta} \end{cases} \tag{6}$$

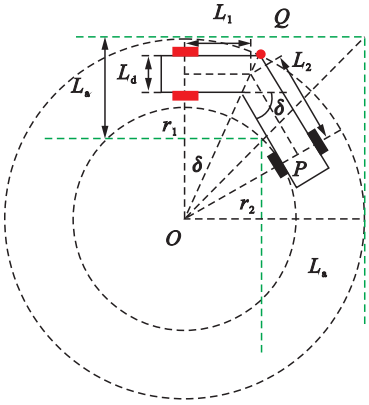


图 5　单个模块转弯模型

Fig.5　Turning model of a single module

圆心为点 O. 单个模块转弯过程中，最外侧点 Q 和最内侧点 P 扫过的圆周形成的圆环是单个模块运动的区域. 其中内圆周半径为

$$\overline{OP} = r_2 - \frac{L_d}{2} \tag{7}$$

外圆周半径为

$$\overline{OQ} = \sqrt{\left(r_1 + \frac{L_d}{2}\right)^2 + \left(L_1 + \frac{L_d}{2\tan\delta}\right)^2} \tag{8}$$

为了使单个模块安全通过直角巷道，转弯过程中车身最外侧点 Q 和最内侧点 P 不与巷道内外侧接触，因此巷道最小宽度满足：

$$L_a = \overline{OQ} - \frac{\sqrt{2}}{2}\overline{OP} \tag{9}$$

当模块数增加时，即在单个模块的前端或者尾端增加模块，会导致 Q 点向外扩散，从而导致 L_a 增大，因此针对狭窄巷道环境，单个模块更适合通过.

3 实验

机器人样机主要通过 3D 打印技术制造，加上模块化的设计方法，使得机器人样机平台的搭建更加方便快捷. 与此同时，新一代样机平台相对于现有的样机具有更加广泛的用途.

3.1 机器人样机

图 6 是可重构模块化机器人样机，左图为拆解图，右图为整体连接图，总共 5 个模块，包括 1 个头部模块和 4 个身体模块，身体模块可以根据需要自由增减，头部模块包括 1 个偏航舵机，1 个滚转舵机，1 个同轴主动轮电机，身体模块包括 1 个偏航舵机，1 个俯仰舵机，1 个滚装舵机，1 个同轴主动轮电机，总共 19 个电机. 具体参数见表 1. 相对于其他样机平台，本文样机模块数更少，运动模态更多，可重构能力更强，表 2 是本机器人样机平台与其他几种样机的性能对比.

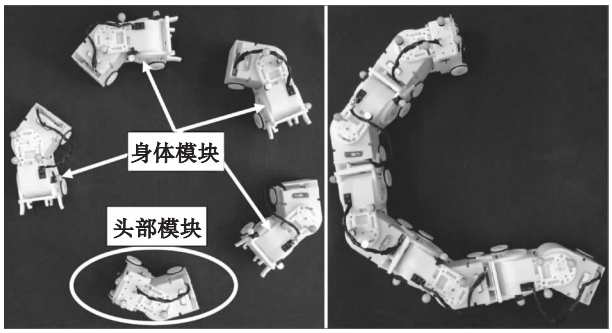


图 6 可重构模块化机器人样机

Fig.6 The prototype of the self-reconfiguration modular robot

表 2 不同样机性能对比

Tab.2 Performance comparison among different prototypes

样机	A	B	C	D	E	F	G
1	20	×	√	×	×	×	×
2	6	×	√	√	×	√	×
3	8	×	×	√	×	√	×
4	9	√	×	√	√	√	×
5	≥1	√	×	×	×	√	√
6	**5**±	√	√	√	√	√	√

1. 日本东京工业大学 ACMR-III[1]
2. 挪威科技大学 Mamba[7]
3. 卡内基梅隆大学 SEA-Snake[8]
4. 日本电气通信大学 T2 Snake-3[12]
5. 瑞士洛桑联邦理工学院 Roombots[13]
6. 本文样机 RMR

A. 模块数(1 个俯仰关节和 1 个偏航关节表示 1 个模块)
B. 轮式机器人运动模态
C. 平面蜿蜒模态
D. 侧向蜿蜒模态
E. 行波模态
F. 攀爬模态
G. 自主拆分模态

×表示无法实现该模态，√表示能够实现该模态

5± 表示在 5 个模块的基础上可自由增减模块

图 7 是控制系统，上位机 PC 端根据不同环境选择不同运动模态，同时根据不同模态输出主动轮同轴电机速度指令，偏航舵机、俯仰舵机、滚转舵机位置指令，指令通过串口发送给无线通信单元，无线单元把指令广播给所有模块的无线通信单元，模块内部的无线通信单元通过串口把广播指令发送给控制芯片，控制芯片提取属于自身的控制指令，然后输出 PWM(脉冲宽度调制)信号控制电机，对于模态(1)、(3)、(4)、(5)，指令周期为 50 ms. 因为本文的控制系统是开环的，所以指令数据流单向传播.

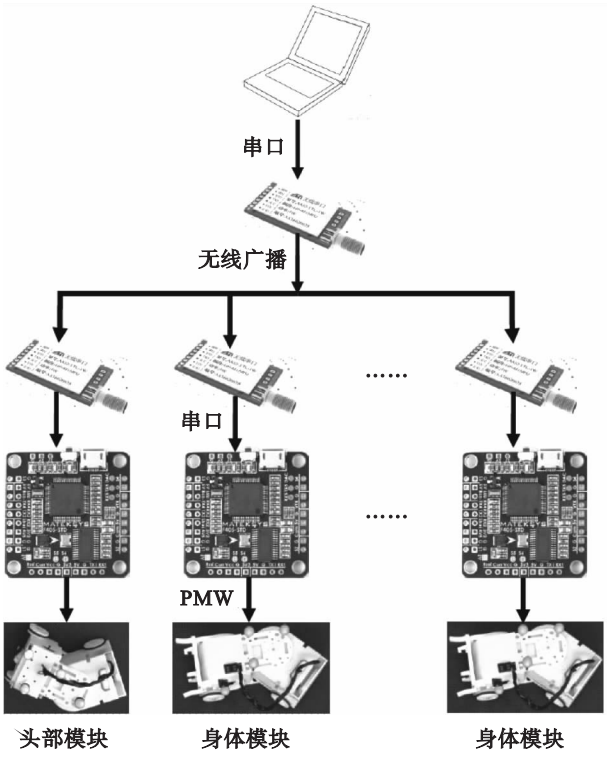


图 7 控制系统

Fig.7 Control system

3.2 多运动模态实验

针对不同的运动模态，本文设计了多种实验环境，图 8 为 7 种不同的实验环境. 图 8(a)和图 8(b)分别为矮洞和沟道环境，矮洞高度为 122 mm，沟道宽度为 210 mm，机器人可以采用轮式机器人运动模态穿越；图 8(c)为转弯环境，机器人采用平面蜿蜒模态实现多关节轮式机器人的转弯运动；图 8(d)为草地环境，机器人能够采用侧向蜿蜒模态移动；图 8(e)为窄缝环境，窄缝宽度为 145 mm，机器人能够采用行波模态穿越；图 8(f)为台阶环境，高度为 139 mm，机器人可以采用攀爬模态跨越；图 8(g)为巷道环境，巷道宽度为 155 mm，机器人能够自主拆分，然后单个模块通过远程遥控依次通过直角窄弯. 表 3 为实验中参数对应的具体数值.

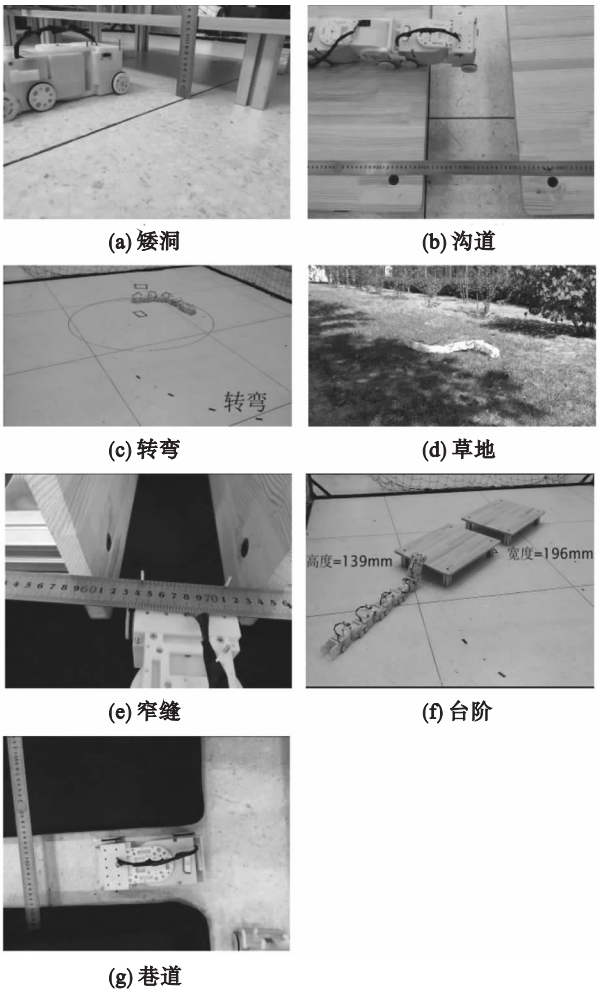
图 9 是采用轮式机器人运动模态越障的实验视频截图. 图 9(a)为穿越矮洞实验，机器人样机高度为 84 mm，头部模块顶端预留空间给传感器，因此本文设定的安全矮

洞高度为 114 mm，实验中矮洞高度为 122 mm. 图 9(b)为穿越沟道实验，考虑机器人自身长度和俯仰关节的负载能力，设定沟道的安全宽度为一个身体模块的长度(211 mm)，实验中沟道宽度为 210 mm.

表 3　参数值

Tab.3　Parameter value

参数	数值	参数	数值
A^+	0.61	A^-	0.52
ω^+	4.71	ω^-	4.71
β^+	1.41	β^-	1.41
γ^+	0.25	ω	3.14
A_1	0.69	A_2	0.64
β_1	1.26	β_2	1.26
γ	0	$\delta\theta$	0.26
l	211 mm	L_d	96 mm
L_1	53 mm	L_2	105 mm
l_1, l_2, l_3 为 181 mm(头部)或 211 mm(身体)			



(a) 矮洞　(b) 沟道　(c) 转弯　(d) 草地　(e) 窄缝　(f) 台阶　(g) 巷道

图 8　实验环境

Fig.8　Experiment environments

图 10 是采用平面蜿蜒模态转弯的实验视频截图，实验中红色椭圆虚线是根据实际机器人运动路径拟合的路径. 图 11 为机器人转弯过程中头部模块的运动路径，蓝色实线为机器人实际路径(通过外部位置传感器获取头部位置)，红色虚线为拟合的圆路径，拟合半径为 753 mm，通过半径公式(2)计算得到的理论半径为 844 mm，误差来源主要包括数据采集误差、数据拟合误差、机器人机构尺寸误差以及运动过程中车轮滑动误差. 尽管存在误差，但是采用平面蜿蜒模态不依赖于复杂的多关节轮式机器人运动学模型，因此占用计算资源更少，实时性更好.

(a) 矮洞实验　(b) 沟道实验

图 9　轮式机器人运动模态实验视频截图

Fig.9　Screenshots of experiment video using wheeled robot motion mode

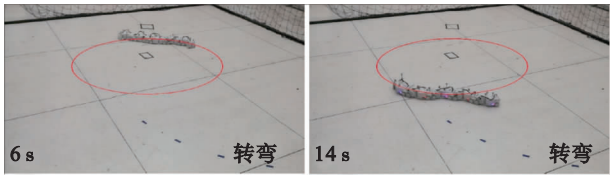


图 10　平面蜿蜒模态转弯实验视频截图

Fig.10　Screenshots of experiment video using serpentine mode to make a turn on plane

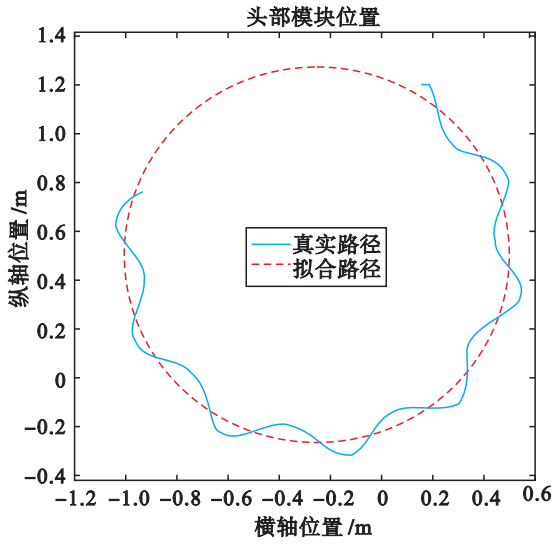


图 11　转弯过程头部模块运动路径

Fig.11　Motion path of the head module during turning process

图 12 是采用侧向蜿蜒模态穿越草地的实验视频截图. 轮式机器人在平整路面运动效率高，但是在野外松软路面因为主动轮腾空、下陷、打滑等导致运动非常困难，侧向蜿蜒模态不依赖主动轮，通过抬高部分身体，利用其他身体部位和地面的点接触产生静摩擦力，从而推动整个身体

侧向运动.

图 12 侧向蜿蜒模态穿越草地实验视频截图

Fig.12 Screenshots of experiment video using sidewinding mode to traverse grassy ground

图 13 是采用行波模态穿越窄缝的实验视频截图. 机器人宽度为 96 mm, 考虑机器人左右两侧预留传感器空间, 本文设置安全窄缝宽度为 126 mm, 实验中窄缝宽度为 145 mm, 行波模态的角频率 ω^- 和平面蜿蜒模态的角频率 ω^+ 相等, 但是对比两组实验视频可以看出, 平面蜿蜒模态运动效率更高, 因为平面蜿蜒运动是通过滚动轮产生推力, 而行波运动通过身体和地面接触产生静摩擦力, 从而推动身体缓慢蠕动.

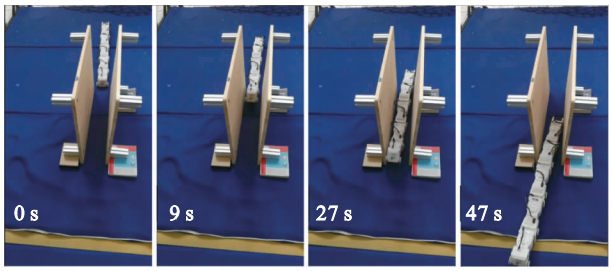


图 13 行波模态穿越窄缝实验视频截图

Fig.13 Screenshots of experiment video using traveling wave mode to traverse narrow gap

图 14 是采用攀爬模态跨越台阶的实验视频截图. 攀爬模态综合了轮式机器人运动模态以及类行波模态, 因此相对于文[22]的侧向蜿蜒攀爬台阶模态, 效率更高. 俯仰关节的角度变化范围为 ±60°, 头部模块长度为 181 mm, 因此根据式(5), 最大台阶高度为 156 mm, 实验过程台阶高度为 139 mm.

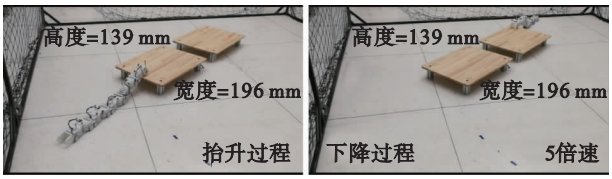


图 14 攀爬模态跨越台阶实验视频截图

Fig.14 Screenshots of experiment video using climbing mode to traverse steps

图 15 是采用自主分离模态穿越巷道的实验视频截图, 机器人能够完全自主地拆分成单个模块. 因为单个模块长度更短, 因此更加适合穿越复杂狭窄的巷道环境. 根据式(6)~式(9), 且 δ 最大值为 60°, 则 L_a 为 129 mm, 实验过程中巷道的宽度为 155 mm.

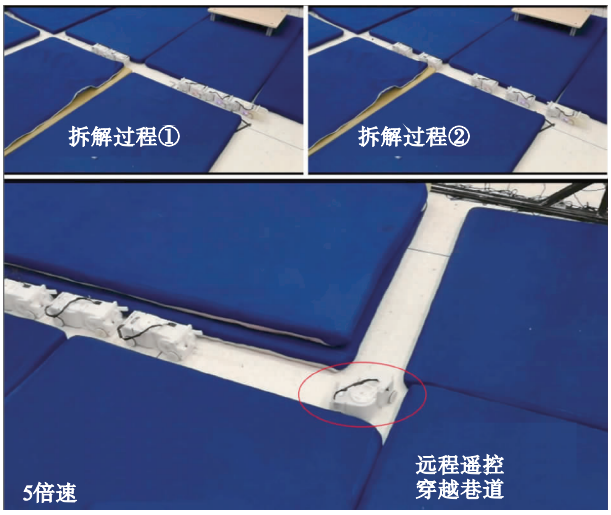


图 15 自主拆分模态穿越巷道实验视频截图

Fig.15 Screenshots of experiment video using auto-separation mode to traverse alleyways

通过对这 7 种环境下实验的分析, 进一步验证了机器人样机平台的可靠性和功能多样性, 同时也进一步验证了不同运动模态的适应能力.

4 结论

本文设计了一种可重构模块化蛇形机器人, 同时分析了多种运动模态. 机器人包括 5 个模块, 1 个头部模块, 4 个身体模块. 每个模块都集成了通信、电源、驱动和控制单元, 所以所有模块都能够独立运动并相互协作. 头部模块包括 1 个偏航舵机、1 个滚转舵机和 1 个同轴主动轮电机, 身体模块在此基础上还包含 1 个俯仰舵机, 机器人总共有 19 个自由度, 冗余的机构使得机器人能够穿越各种复杂的环境. 本文采用的 6 种运动模态, 使得机器人能够以轮式机器人的运动模态穿越矮洞、沟道等, 以平面蜿蜒模态转弯绕过障碍, 以侧向蜿蜒模态在草地沙地等崎岖松软路面运动, 以行波模态穿越狭窄缝隙, 以攀爬模态跨越台阶, 以自主拆分模态让单个模块依次通过狭窄巷道环境. 相对于现有的可重构模块化蛇形机器人样机, 本文设计的样机平台运动方式更加多样化, 能够适应更多种复杂环境, 主动控制的钩爪—插销机构提升了机器人的可重构能力.

为了进一步提高机器人的运动性能和可重构能力, 后续将改用力矩更大的舵机, 尤其是俯仰舵机, 这样可以抬起更多模块, 从而进一步提高攀爬能力. 同时, 增加距离、电流等传感器, 控制系统中数据流变成双向, 这样就能够设计反馈控制算法, 提高机器人的自主运动能力.

参考文献

[1] Hirose S. Biologically inspired robots: Snake-like locomotors and manipulators[M]. Oxford, UK: Oxford University Press, 1993.

[2] 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.

[3] 方勇纯，朱威，郭宪，等. 基于路径积分强化学习方法的蛇形机器人目标导向运动[J]. 模式识别与人工智能，2019，32(1)：1 – 9.
Fang Y C, Zhu W, Guo X, et al. Target-directed locomotion of a snake-like robot based on path integral reinforcement learning[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2019, 32(1): 1 – 9.

[4] 郭宪，王明辉，李斌，等. 基于最小无穷范数的蛇形机器人最优力矩控制[J]. 机器人，2014，36(1)：8 – 13.
Guo X, Wang M H, Li B, et al. Optimal torque control of a snake-like robot based on the minimum infinity norm[J]. Robot, 2014, 36(1): 8 – 13.

[5] 李东方，邓宏彬，潘振华，等. 基于改进蛇形曲线的蛇形机器人在流场中避障的轨迹跟踪控制律[J]. 机器人，2019，41(4)：433 – 442.
Li D F, Deng H B, Pan Z H, et al. Trajectory tracking control law for obstacle avoidance of a snake-like robot in flow field based on an improved serpentine curve[J]. Robot, 2019, 41(4): 433 – 442.

[6] Mori M, Hirose S. Development of active cord mechanism ACM-R3 with agile 3D mobility[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2001.

[7] Liljeback P, Stavdahl O, Pettersen K Y, et al. A modular and waterproof snake robot joint mechanism with a novel force/torque sensor[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012.

[8] Rollinson D, Bilgen Y, Brown B, et al. Design and architecture of a series elastic snake robot[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2014.

[9] 高琴，王哲龙，赵红宇. 基于 Hopf 振荡器实现的蛇形机器人的步态控制[J]. 机器人，2014，36(6)：688 – 696.
Gao Q, Wang Z L, Zhao H Y. Gait control for a snake robot based on Hopf oscillator model[J]. Robot, 2014, 36(6): 688 – 696.

[10] 张晓路，李斌，常健，等. 水下滑翔蛇形机器人滑翔控制的强化学习方法[J]. 机器人，2019，41(3)：334 – 342.
Zhang X L, Li B, Chang J, et al. A reinforcement learning method for gliding control of underwater gliding snake-like robot[J]. Robot, 2019, 41(3): 334 – 342.

[11] Yamada Y, Hirose S. Development of practical 3-dimensional active cord mechanism ACM-R4[J]. Journal of Robotics and Mechatronics, 2006.

[12] Tanaka M, Nakajima M, Suzuki Y, et al. Development and control of articulated mobile robot for climbing steep stairs[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2018.

[13] Sprowitz A, Mockel R, Vespignani M, et al. Roombots: A hardware perspective on 3D self-reconfiguration and locomotion with a homogeneous modular robot[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2014, 62(7): 1016 – 1033.

[14] Suzuki Y, Tsutsui Y, Yaegashi M, et al. Modular robot using helical magnet for bonding and transformation[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2017.

[15] Neubert J, Rost A, Lipson H. Self-soldering connectors for modular robots[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2014, 30(6): 1344 – 1357.

[16] Wei H, Chen Y, Tan J, et al. Sambot: A self-assembly modular robot system[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2011, 16(4): 745 – 757.

[17] Michalek M M. Cascade-like modular tracking controller for non-standard N-trailers[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2016: 1 – 9.

[18] Tanaka M, Tanaka K. Singularity analysis of a snake robot and an articulated mobile robot with unconstrained links[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2016: 1 – 12.

[19] 叶长龙. 蛇形机器人机构设计和运动控制[D]. 沈阳：中国科学院沈阳自动化所，2004.
Ye C L. Mechanism design and locomotion control of snake-like robots[D]. Shenyang: Chinese Academy of Sciences, 2004.

[20] Rollinson D, Choset H. Pipe network locomotion with a snake robot[J]. Journal of Field Robotics, 2014, 33(3): 322 – 336.

[21] Koh J S, Cho K J. Omegabot: Biomimetic inchworm robot using SMA coil actuator and smart composite microstructures (SCM)[C]//IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010.

[22] Tesch M, Lipkin K, Brown I, et al. Parameterized and scripted modes for modular snake robots[J]. Advanced Robotics, 2009, 23(9): 1131 – 1158.

[23] Tanaka M, Tanaka K. Control of a snake robot for ascending and descending steps[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2015, 31(2): 511 – 520.

[24] Turlapati S H, Srivastava A, Krishna K M, et al. Detachable modular robot capable of cooperative climbing and multi agent exploration[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2017.

作者简介

朱　威(1994 –)，男，硕士生. 研究领域为蛇形机器人，强化学习.

郭　宪(1986 –)，男，博士，讲师. 研究领域为蛇形机器人，四足机器人，强化学习.

方勇纯(1973 –)，男，博士，教授. 研究领域为非线性控制，视觉伺服，欠驱动系统，原子力显微镜微纳操作.