

Study on a Novel Link-type Shape Shifting Robot

Bin Li¹, Jing Wang¹, Jinguo Liu¹, Yuechao Wang¹, Shugen Ma^{1,2}

¹⁾ Robotics Laboratory, Shenyang Institute of Automation, CAS, 114 Nanta Street, Shenyang, 110016 China
(E-mail: libin@sia.ac.cn; wangjing@sia.ac.cn; liujingou@sia.ac.cn; yawing@sia.ac.cn)

²⁾ COE Research Institute, Ritsumeikan University, Shiga-ken 525-8577. Japan
(Email: shugen@fc.ritsumei.ac.jp)

Abstract—A novel link-type shape shifting structure has been developed. It can change its shape to adapt to the environment and the task if need. The shape shifting modular robot has a novel link type modularized structure. Each module of the robot has the components such as the driving body component, the link arm and the offset joints. The offset joints have been proposed in the novel mechanism to improve the relative motion space between the adjacent modules. A tracked link-type shape shifting robot has been designed. Metamorphic experiment and unstructured environment experiment have shown high flexibility and mobility of the robot.

Keywords—Shape shifting robot, Link-type structure, Environment adaptability

一种新型链式结构变形机器人的研究

李斌¹ 王靖¹ 刘金国¹ 王越超¹ 马书根^{1,2}

¹⁾ 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学重点实验室 沈阳 110016

²⁾ 日本立命馆大学 COE 研究机构 滋贺 525-8577

摘要 分析了一种新型链式变形机构，可以通过结构重构和自动变形来改变自身的构形以适应非结构环境中的运动和作业要求。单个标准模块由模块本体、连接臂和偏置关节等组成。偏置关节避免了变形时模块间的运动干涉，扩大了机器人模块间的相对运动空间。介绍了一种基于新型链式机构的变形机理设计的三模块变形机器人，并对该样机进行了由直线形态、三角形态到并排形态的变形实验，此外还对变形机器人不同构形的运动性能进行了实验，为进一步实现变形机器人环境自适应研究和投入到实际应用打下了基础。

关键词 变形机器人，链式结构，环境适应能力

1. 引言

自上个世纪 80 年代以来，可重构模块机器人技术研究是国内外机器人研究领域的热点[1~7]。可重构机器人是一种具有较强环境自适应能力的机器人，它可以根据环境变化和任务要求而改变自身的构形来完成不可预知的作业任务。这种构形的变化主要体现在两个方面：

(1) 由组成机器人各个部件的连接方式的重新组合而实现机器人数量和构形的相对变化，这种变化可以是手动和自动的结构重构变形。

(2) 由于可重构模块机器人通常是由多个相同或互异的模块组成的冗余结构，由连接机器人构件的关节如旋转

关节、移动关节的运动而引起机器人构形的相对变化，这种变化主要是自身的关节运动变形。

机器人的关节运动变形与机器人的结构重构变形相比，前者在可靠性、能量消耗、时间消耗、机械系统和控制系统的复杂性等方面，更便于投入到实际应用当中；但后者具有更强的灵活性，应变能力。本文在对链式结构的变形机理进行研究的基础上，融合了重构变形和关节运动变形的特点，采用基于 CAN 总线的分布式控制系统，设计了一种三模块变形机器人样机，并对其进行了变形实验和环境实验。

2. 模块化可变形链式结构

目前，各种用于非结构环境的移动机器人机构当中，

国家十五 863 计划项目（资助号：2001AA422360）

模仿生物蛇原型的链式机构由于具有多于确定空间位置和姿态所需的自由度，已被证明是拥有广泛用途的机器人模型，它能够有效、迅速，可靠地响应于许多非结构环境的作业。在“863”计划的资助下，我们对具有环境适应能力的蛇形机器人进行了研究。为进一步提高机器人的运动能力和环境适应能力，有两个方面的深入研究引起了我们的注意：

- (1) 蛇形机器人具有机构重复、易模块化的特点，研制可重构蛇形机器人。
- (2) 蛇形机构具有冗余的特点，可以利用关节的运动使机器人呈现多种构形，研制可变形蛇形机器人。

第一种情况，Shen W、Yim M 等进行了大量的研究[1,2]。考虑到非结构环境中，通常环境复杂且作业任务时间紧迫，机器人结构的自重构需要部件的连接和断开，需要耗费一定的时间和能量，同时在结构重组的控制上也较困难，因此我们对手动可重构、自动变形的模块化新型链式机构进行研究；这里之所以称之为新型链式机构，是因为它的关节结构形式上与生物蛇的关节形式存在较大的区别。

由于实际自然界中生物蛇的关节具有三维运动功能，蛇形链式机构中,类似图 1 的两种简化关节模型通常被广泛采用，相邻关节间分别存在 1 至 2 个仰俯或偏转自由度。但由于关节间的几何干涉，相邻关节的运动范围受到限制。从图 1 可以看出， θ_Y 与 θ_P 的活动范围将均小于 360° ，系统变形能力有限。

为此，本文利用关节偏置的方法提出了一种新的链接方式。该新型链式机构，避免了干涉，通过连接臂和偏置关节实现了结构的组合和变形。如图 2 所示，模块的仰俯和偏转关节分别至于模块的两侧，模块间通过连接臂来进行连接，通过模块与连接臂间相对位置的变化而实现变形。图 2 中，(a) 是两模块呈直线的情况，(c) 是两模块并排的

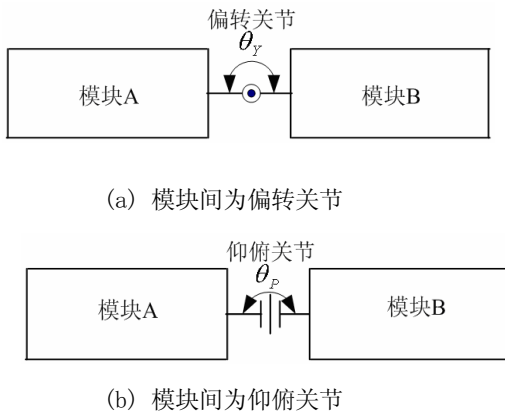


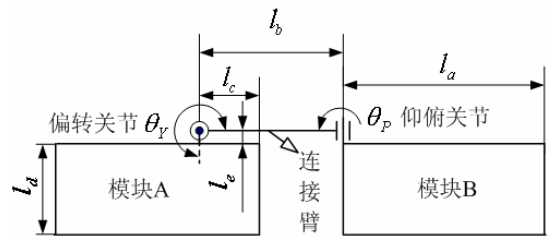
图 1 普通链式结构

情况，(b) 是中间过渡构形。从(a)到(b)的过程中，偏转关节 θ_Y 相对变化 180° ，从(b)到(c)的过程中，仰俯关节 θ_P 相对变化 180° 。这种新型链接所具有的特点是不论模块的多少，它总能够通过链接关节的运动而变形以得到多种对称的构形，特别是两种规则形：直线形、并排形。链式模块化变形机器人模块的数量可以根据实际需要进行选择，随着机器人模块数量的增加，变形机器人的构形数量将呈指数增长。

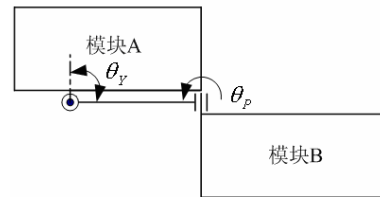
为使得机器人在变形前后结构对称、外形整齐、便于控制，对系统的有关尺寸需要进行严格的限制；如图 2，其主要尺寸关系为，

$$l_a = l_b + l_c \quad (1)$$

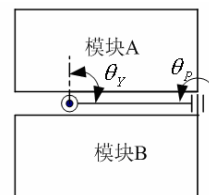
式中 l_a ——模块的接地长度
 l_b ——连接臂长度
 l_c ——偏转关节离模块近端距离



(a) 直线构形



(b) 过渡构形



(c) 并排构形

图 2 新型可变形链式结构

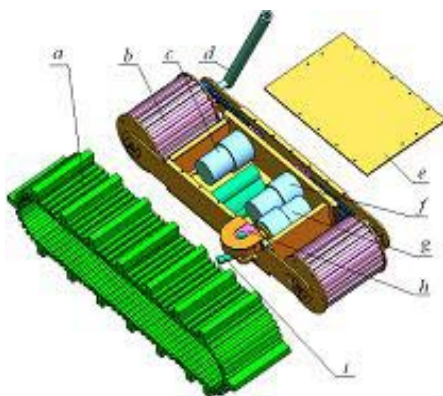
3. 三模块变形机器人的设计

根据图 2 所示的链式变形机理，我们对单个标准模块的结构进行了设计。

3.1 机构设计

单个标准模块的结构如图 3，单模块的有关特性见表 1。变形机器人的标准模块主要由中间通孔式连接手臂、履带驱动电机、模块偏转电机、模块俯仰电机、锥齿轮传动机构、带轮传动机构，以及履带驱动机构等组成。在设计时，电机和电源与有关控制器君放置在模块中部的密闭盒式结构当中，同时由该种模块组成的变形机器人还将具有如下特点：

- (1) 结构模块化 模块间互换性好、相对成本低、易产品化、维修维护方便、协调控制方便，且重构时不受模块数量的限制，变形时其对称构形外型整齐美观。
- (2) 手动可重构 可根据环境和任务的需要选择模块的数量和组合方式，手动可以轻易的实现连接手臂与其他模块的连接与断开。
- (3) 自动变形能力 三个（或三个以上）模块，它们可以组成直线型、三角型、并排型三种基本形式和其它多种形式，通过变形以适应环境与任务空间的要求：直线型可以穿过狭窄地形、过沟壑；三角型可以协同爬坡、越障碍；并排型可以便于沼泽松软地面运动、转弯、原地旋转、承载等。
- (4) 运动与作业能力 每个模块具连接手臂可以辅助转弯、进行简单的样品采集和探测作业；多个模块可以具有更好的运动灵活性和作业功能。
- (5) 中空结构的采用 连接臂的中间通孔便于控制线和电源线的通过，避免在变形过程中线路的干涉和限制；同时，



a. 高履刺履带 b. 中空带轮 c. 仰俯关节驱动电机 d. 连接臂 e. 中间盒盖 f. 履带驱动电机 g. 偏转关节驱动电机 h. 偏转关节 i. 连接柄

图 3 单模块结构

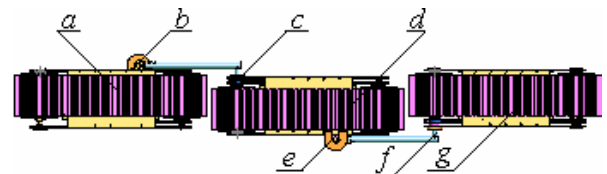
表 1 单模块特性

参数	数值
模块的接地长度 l_a /mm	276
连接臂长度 l_b /mm	193
偏转关节离模块近端距离 l_c /mm	83
模块宽度 l_d /mm	110
偏转关节偏移距离 l_e /mm	20
模块高度 h /mm	110
模块质量 M /kg	3
电机额定功率 P /W	10
电机额定电压 U /V	24
电机最大力矩 T /N·m	10
履带驱动最大速度 v /m·s ⁻¹	1
履带驱动最大加速度 a / m·s ⁻²	1

履带驱动轮为浮筒式中空密闭结构，在水中浮筒式结构可以产生足够的浮力使得模块浮于水面，该结构为该机器人的水陆两用打好基础。

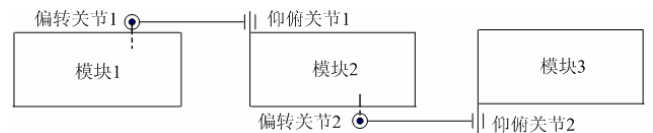
在多模块变形机器人中，为了实用，减少了首尾模块的关节数量。基于前述自动变形的原理，我们研制出了一台三模块履带驱动变形机器人样机。如图 4 所示。

该样机由三个模块组成，中间模块（模块 2）为标准模块。首模块只安装履带驱动装置、模块仰俯装置，中间模块均为标准模块，尾模块只安装有履带驱动装置、模块偏转装置。模块间通过仰俯关节、连接臂和偏转关节进行连接，由偏转关节、仰俯关节的运动实现变形。



a. 模块 1 b. 偏转关节 1 c. 仰俯关节 1 d. 模块 2
e. 偏转关节 2 f. 仰俯关节 2 g. 模块 3

(a) 实体结构



(b) 结构简图

图 4 三模块变形机器人

3.2 控制系统设计

变形机器人采用三个独立的模块，这就要求每个模块中都要具备具有独立运算能力的微控制器，而这些微控制器之间需要一种高速且布线相对简单的总线来传递数据。因此，我们基于 CAN 总线技术设计了该机器人的控制系统。

变形机器人的总体硬件结构如图 5 所示。上层的 PC 机是监控平台，它与控制系统的主控单元通过无线射频模块进行通信。监控平台不仅向控制系统发送各种指令，同时还接收控制系统向上返回的机器人状态信息（包括机器人的形状，各关节角度以及各电机消耗的电流值等等）。而主控单元通过 CAN 总线将各个分散的执行单元连接起来，形成一个有机的整体。为了实现控制系统的模块化，各执行单元构造完全相同，使整个系统具有良好的可扩展性。

主控单元是控制系统与监控平台的通信接口，同时也是整个系统中枢。其作用是规划机器人的各种运动和变形。该单元由无线通讯模块和控制器组成，其中控制器包含了型号为 MB90549G 富士通 16 位单片机以及 CAN 总线驱动器。无线通讯模块负责接受监控平台发送的命令代码，并将代码通过串口传给控制器。控制器根据码值对机器人的相应运动进行规划，然后通过 CAN 总线向各执行单元发送指令代码。为了保证监控平台与控制系统的远距离无线通信，我们选用了上海桑博公司的 STR-6 型微功率无线数传模块。该模块在保证低误码率的前提下，可以提供 300 米的无线通讯距离。同时其较低的功耗和轻巧的体积使其非常适合于在机器人中的使用。

执行单元采用模块化设计，无论从硬件还是从软件来看，它们的结构是完全一样的。其作用只是简单地接受主控单元的指令，并通过串口控制电机。这样，如果单个模块出现故障，可以将其隔离出整个控制系统，或者迅速更换。执行单元由富士通单片机、CAN 总线驱动器，电机控制器，直流电机，以及电位计构成。其中，单片机通过 CAN 总线

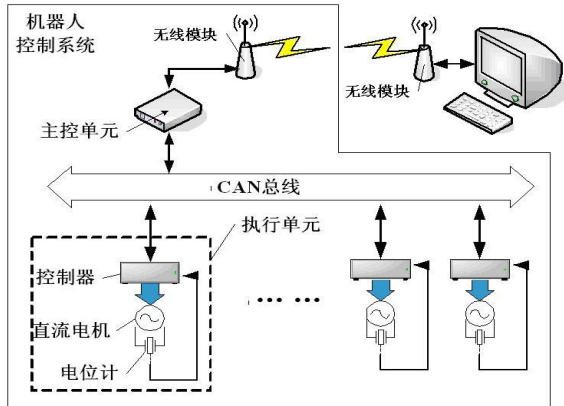


图 5 控制系统硬件结构

收取主控单元的指令，处理之后通过电机控制器，对电机进行伺服。同时，控制器能够实时地读取电机的当前状态（转速、绝对位置、电流值等），并将这些信息传递给单片机。为了获得机器人各关节的绝对位置，我们在电机的末端安装了电位计。通过单片机上的 A/D 转换模块，执行单元的单片机能够获得各关节的角度值。这样，执行单元就可以主动地掌握各个执行器的详细信息，并在必要时通过 CAN 总线传递给主控单元，以便于主控单元进行全局的规划。

控制软件采用集中式控制，这种方法具有功能集中，容易实现的特点。整体的体系结构分为两层，如图 6 所示。

上层为行为规划层，其功能是根据全局情况进行控制计算和判断，进行统一的安排和调度。下层是行为层，仅根据规划层传递的指令代码完成底层的伺服控制或者信号采集功能。采集得到的信号并不在行为层进行处理，而是交给规划层进行集中处理。

4. 三模块变形机器人样机实验

根据上面的系统设计方案，经过设计、加工、安装、调试，我们研制出了一台三模块变形机器人样机，其各个构形下的参数如表 2 所示。为测试三模块变形机器人样机的变形功能和非结构环境中运动性能指标，我们对变形机器人进行了变形实验和环境实验。

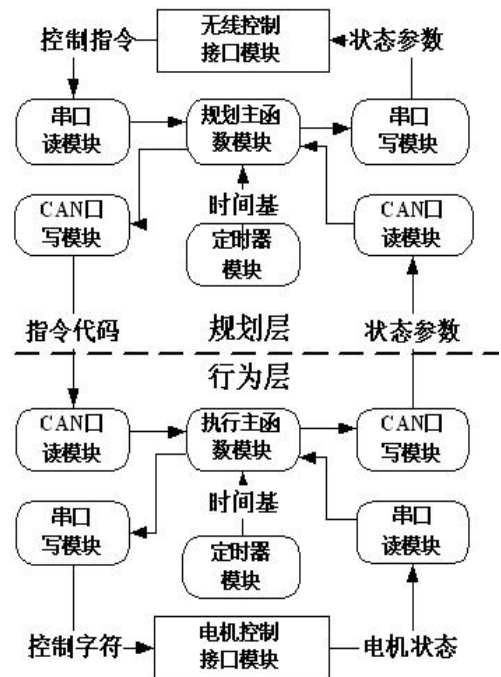


图 6 软件结构图

表 2 三模块变形机器人的外形尺寸

形态	长度(mm)	宽度(mm)	高度(mm)
直线型	1250	190	110
三角型	660	420	110
并排型	390	420	110

通过无线指令，变形机器人能够灵活地改变自己的构形，图 7 显示了图 4 中三模块变形机器人从直线状态到并排状态间各种构形相互切换的整个过程，各种构形转换十分灵巧，其逆过程亦然。

三模块履带式变形机器人的 3 种对称构形外形尺寸不尽相同，其运动能力各异，我们在一些坡度、垂直壁、坎坷障碍等典型环境中进行了实验，如图 8 所示。实验表明，直线形态因具有蛇形机构的特点而拥有较强的运动能力。但是对多种环境和任务，三种形态各有利弊，比如：并排形态与前两者相比运动能力较差，但是并排形态因为其结构紧凑，转向所需空间和能量均较少，具有最佳的转弯性能，其抗倾翻能力也较强。模块化变形机器人的变形实验和在非结构环境中的性能实验表明，模块化变形机器人具有广泛的应用背景。模块化变形机器人作为运载平台，通过装备各种不同的仪器、设备，具有广泛的应用领域。

5. 结论

本文基于关节偏置的方法提出的新型链式结构，除了具有蛇形机构的一般特点以外，还具备自动变形的功能；所设计的三模块变形机器人可以通过多种构形和步态来适应环境空间和任务空间的要求，可以应用于许多非结构环境中的作业；在壕沟、垂直壁、废墟等典型非结构环境中，变形机器人的运动性能还需要进一步进行理论分析；通过对变形机器人的变形实验和环境性能实验，为机器人投入到实际应用打下了基础。

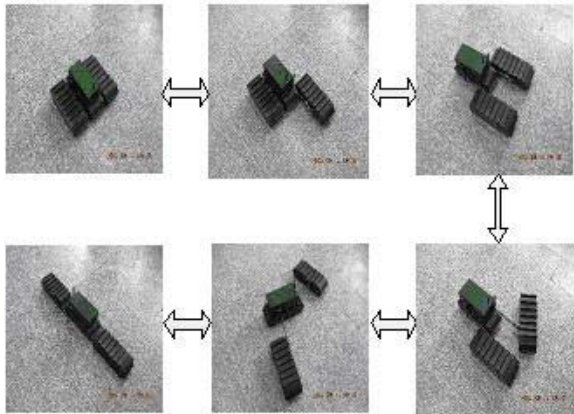


图 7 机器人变形过程



图 8 机器人越野实验

参考文献

- [1] Yim M, Zhang Y, Roufas K, et al. Connecting and disconnecting for chain self-reconfiguration with polybot. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2002, 7(4): 442~451
- [2] Shen W, Salemi B, Will P. Hormone-inspired adaptive communication and distributed control for conro self-reconfigurable robots. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2002,18(5): 700~712
- [3] Shen W, Salemi B, Will P. Hormone-inspired adaptive communication and distributed control for conro self-reconfigurable robots. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2002,18(5): 107~124
- [4] 李斌, 刘金国. 可重构模块机器人倾翻稳定性研究. 机器人, 2005, 27(3)
- [5] 费燕琼, 徐卫良. 机器人模块化的结构设计研究. 机器人, 1999, 21(3)
- [5] 赵杰, 张亮. 自重构模块机器人的研究与发展现状. 中国机械工程, 2002, 13(17)
- [6] 徐威, 姜文华, 王石刚. 自重构机器人的体系结构与分类研究. 制造业自动化, 2003, 25(7)
- [7] 刘明尧, 谈大龙, 李斌. 可重构模块化机器人现状和发展. 机器人, 2001, 23(3)
- [8] 黄祖永. 地面车辆原理. 北京: 机械工业出版社, 1985.