

# 新型模块化可重构机器人系统\*

张玉华 赵杰 张亮 齐立哲 蔡鹤皋

(哈尔滨工业大学机器人研究所 哈尔滨 150001)

摘要：研制了一种新型模块化可重构机器人系统，机器人由许多结构和功能完全相同的模块相互联接组成，通过改变各模块之间的联接状态和相互位置关系，不需任何外界辅助，自动完成重构过程和整体协调运动；设计了模块的分离联接机构和单自由度立方体结构，模块结构兼具阵列式和串联式特点，可方便的实现重构运动和整体协调运动；上位机软件系统可通过交互方式设置各机器人模块的方位，可手工编写或自动产生可重构机器人各模块的运动序列，可对机器人可重构过程和整体构型的协调运动进行规划和仿真，并通过计算机串口对机器人进行实时控制。试验验证了机器人模块的分离/联接和模块协作基本功能和蠕虫构型、四足构型、履带构型三种构型的整体协调运动功能。试验表明：模块结构设计简单合理，控制容易，可以完成重构操作功能和整体协调运动功能。

关键词：模块化机器人 可重构 协调运动

中图分类号：TP242.2

## 0 前言

模块化可重构机器人由许多具有一定自治能力和感知能力的模块组成。它利用模块之间的联接性和互换性，以及模块传感器感知到的周围环境信息，通过模块之间的联接断开操作和相互运动来自动改变整体构形，扩展运动形式，完成多种运动及操作任务。模块化可重构机器人适用在非结构化环境或未知环境中执行特殊任务，如空间及海底探索、军事侦察、核电站检修、灾难救援等。目前国外主要是日本和美国的研究小组在模块结构设计、可重构策略和运动规划方面进行了相关研究并研制成功多种模型试验系统，典型代表有MEL的YOSHIDA<sup>[1]</sup>设计的Fractum系统，LEE等<sup>[2]</sup>提出的Tetrobot系统，ZACK等<sup>[3-5]</sup>研制的Crystalline机器人，MURATA等<sup>[6]</sup>设计的M-TRAN系统。国内主要是在可重构策略和运动规划方面进行了理论研究<sup>[7-8]</sup>，尚未出现模型试验系统。

研制了一种新型模块化可重构机器人系统，可重构机器人由结构和功能完全相同的机器人模块组成，通过改变模块之间的联接状态和相互位置关系，自动改变整体构形结构，完成重构过程和整体协调运动；该系统结构简单，制造方便。试验表明：可重构机器人在结构和功能上达到了预期目标，控制容易，可重构及整体协调运动能力强。

## 1 可重构机器人硬件结构

### 1.1 机器人系统组成

Hit Modular self-reconfigurable Robot (HitMSR) 系统组成如图1所示，由上位机、中转单元、电源和可重构机器人四部分组成。上位机可以对机器人模块的重构和整体运动进行离线规划，对各模块执行指令序列后的结果进行仿真，产生控制机器人模块运动的指令序列，并可通过串口对机器人模块的运动进行实时控制；中转单元接收上位机传送来的指令序列，重新进行处理后转发给可重构机器人，机器人模块接收中转单元转发来的指令并按指令进行相应的运动动作，外部电源对所有机器人模块进行供电。



图1 HitMSR 系统组成

### 1.2 机器人模块结构

可重构机器人模块结构设计是研究可重构机器人的基础，三维可重构机器人的可重构和整体运动特性对模块设计有如下要求：有一个或几个转动自由度。质量小，三维可重构过程为有效的改

\* 黑龙江省博士后科研启动基金资助项目(LRB-KY 02029)。20051027收到初稿，20060115收到修改稿

变构型，一个模块必须具有带动一个或几个模块进行运动的能力，模块的质量直接影响模块的可重构能力。模块之间联接时可准确定位，断开容易。

在联接和断开过程中电源和通信线路必须保持连通，且线缆不被缠绕。具有一定的机械强度。提出了一种新型三维模块结构，采用正立方体形状，模块具体结构如图 2 所示。每个模块由两个 L 形半块结构构成，具有一个转动自由度和四个结构相同的联接面，两个半块之间通过电动机输出轴联接成一体，能够实现最大范围为 ±90° 的相互转动，通过多个模块的组合可以完成模块之间的位置改变和相互运动。模块的正立方体结构使模块可快捷有效的组成各种阵列网格式的整体构型，使可重构规划变得简单；同时，每个模块具有单转动自由度，解决了特定构型协调运动时模块间的相对运动问题。模块中的电动机采用 SANWA 公司的 Hyper ERG-VB 舵机，研制成的模块参数如表所示。

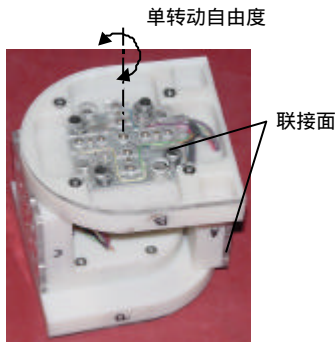


图 2 机器人模块结构

表 机器人模块参数表

参数	数值
外形尺寸	92 mm×92 mm×92 mm
质量 $m/kg$	0.30
电源 $U/V$	DC 6
电动机额定转矩 $T/(kg \cdot cm)$	13
联接面结合力 $F/N$	50

### 1.3 机器人模块分离联接机构

只有模块间进行有效的联接和分离操作，可重构机器人才能实现可重构过程，现有的可重构机器人模块的联接机构大都采用了销孔式联接方式，通过机械方法固连，以达到可靠联接的目的，这种凹凸配对的联接方式由于需要两个不同模块配对才能正常工作，降低了模块的通用性；虽然联接可靠，但在分离操作时需要额外的分离空间，模块不能够在间隙比较小甚至没有间隙的情况下分开，限制了模块运动的灵活性。设计了一种基于形状记忆合金 (Shape memory alloy, SMA) 弹簧驱动的联接分离机构，图 3 是该联接分离机构的原理示意图，采用永

磁铁作为联接驱动零件，SMA 弹簧作为分离驱动零件，当 SMA 受热产生驱动力  $F_s$ ，此时

$$F_s + F_k > F_c \quad (1)$$

式中  $F_s$ ——SMA 对活动底板的作用力  
 $F_k$ ——非线性弹簧对活动底板的作用力  
 $F_c$ ——两联接面上相互配对的磁铁之间的吸引力，即模块之间的作用力

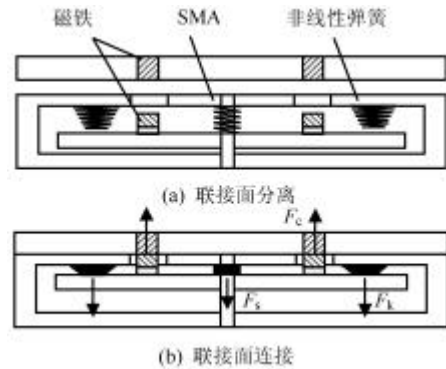


图 3 机器人模块分离联接机构原理图

活动底板受 SMA 和非线性弹簧驱动远离联接面，使得联接面上的配对磁铁之间距离变大，降低了磁铁之间的吸引力，此时两模块联接面之间可以分离。

设计过程中要求  $F_c > F_k$ ，SMA 冷却后，刚性变小， $F_s$  也随之减小，完全冷却后  $F_s$  几乎为零，所以

$$F_s + F_k < F_c \quad (2)$$

活动底板向联接面靠近，非线性弹簧被压缩，两联接面上的磁铁达到吸合状态，此时  $F_k$  相对于两模块之间的作用力  $F_c$  来说是内力，不影响模块之间的吸附力。采用此种结构，两模块之间吸附力大，断开时需要的驱动力  $F_s$  很小，可方便的联接与断开。同时，由于磁铁本身具有的对中性和模块的立方体结构，解决了联接时联接面之间的定位问题，且该联接分离机构为平面机构，模块之间不需要额外的分离空间即可完成分离操作，提高了模块运动的灵活性。

### 1.4 机器人模块电源及通信触点结构安排

由于可重构机器人模块在可重构过程中需要改变模块之间的断开联接及位置关系，为保证在可重构过程中线缆不被缠绕且模块在不同方位下仍能可靠联接并通信，HitMSR 采用了弹簧触点结构，并对称正交布置触点，触点位置分布如图 4 所示，触点材料采用导电性和耐磨性优良的磷铜。

### 1.5 控制系统结构

HitMSR 采用集中式控制，每个模块都有自己

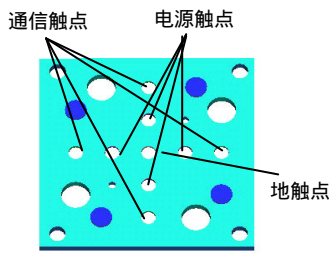


图 4 电源及通信触点位置分布示意图

的地址。上位机离线规划产生各模块的运动序列，经中转单元处理后通过信号线向所有模块进行广播。模块单元采用 PIC16F877A 作为微控制器，使用带地址检测方式接收数据，若接收到的地址与模块自身地址相同则接收随后的控制数据，否则对控制数据不予理睬。模块的控制系统结构如图 5 所示。

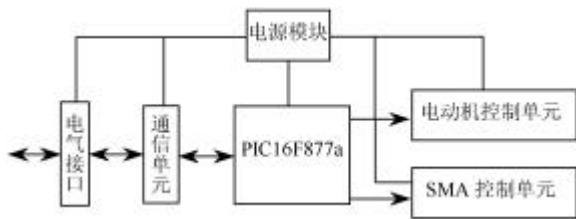


图 5 模块控制系统结构框图

## 2 软件系统结构

为对机器人模块运动进行有效的规划和控制，使用 VC 和 OpenGL 开发了上位机软件系统。该系统可以通过交互方式设置各机器人模块的方位，可手工编写或自动产生可重构机器人各模块的运动序列，可对机器人整体构型的协调运动进行规划和仿真，并通过计算机串口可对机器人进行实时控制。软件系统界面如图 6 所示，由图形显示区、运动序列显示区和菜单命令区等组成。用户可以通过菜单命令或鼠标设置机器人的初始构型和目标构型，计算机自动规划出从初始构型到目标构型的各个模块的运动序列，显示在运动序列显示区；用户也可以手工编写运动序列，在图形显示区显示运动序列执行结果的仿真；运动序列可以通过计算机串口传送到中转单元，经中转单元处理后实时控制模块机器人运动。

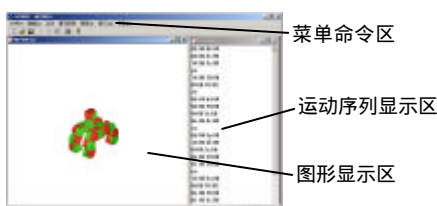


图 6 上位机系统软件界面

## 3 试验

建立了一个由 20 个机器人模块组成的机器人系统，对模块的基本功能和整体协调运动功能进行了试验验证。

### 3.1 机器人模块基本功能试验

每个机器人模块只有一个转动自由度，所以需要多个模块配合进行运动。两个模块配合时有两种运动模式，一种是在竖直平面内的翻滚运动，如图 7 所示，在底层模块的辅助下，两个模块通过翻滚向左走过一个模块的距离，底层模块对运动模块提供联接平面；另一种是在水平面内的侧翻运动，如图 8 所示，通过侧翻运动两个模块向右移动一个模块的距离。两模块运动的试验同时验证了模块之间可靠的联接、断开功能。三个模块配合运动可以实现模块的联接平面的方位变换，如图 9 所示，两个模块配合旋转，将侧面携带模块的联接面由水平方向转换到了竖直方向。通过三种基本运动形式的组合，模块机器人可以实现可重构过程。



图 7 双模块竖直平面内翻滚试验



图 8 双模块水平面内侧翻运动试验



图 9 三模块配合实现联接面方向转换试验

### 3.2 机器人模块整体协调运动

机器人模块整体协调运动也是可重构机器人研究的一个重要内容，为有效地进行运动，仅靠可重构过程中的整体移动显然并不理想。提出的可重构机器人模块除可通过可重构过程完成特定构型之间的自动转换外，对于特定的整体构型还可以实现整体协调运动。图 10 所示为蠕虫构型一个梯形波的传递过程，通过梯形波由后向前传递，蠕虫构型可以实现向前爬行；图 11 所示为四足构型四肢依次向前迈动一步的部分运动照片；图 12 为履带式构型滚动运动试验部分照片；试验得知：蠕虫构型运动的速度约为 35 cm/min，四足构型的运动速度约为 20 cm/min，履带式滚动运动的速度约为 90 cm/min。



图 10 蠕虫构型一个梯形波的传递过程试验



图 11 模块机器人四足构型运动试验



图 12 履带式构型滚动运动试验

## 4 结论

提出了一种新型模块化可重构机器人 HitMSR 系统的硬件实现方法和软件系统实现,通过试验验证了模块设计功能的有效性。试验表明,该模块化可重构机器人系统可以方便的通过模块之间的联接、断开和相互位置改变实现可重构过程,机器人模块不仅可以构成各种静态构型,针对特定的构型也可以整体协调运动,机器人由结构和功能完全相同的模块组成,制造简单,控制容易。

### 参 考 文 献

- [1] YOSHIDA E, MURATA S, TOMITA K, et al. Distributed formation control for a modular mechanical system [C]//Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Grenoble, France. c1997 : 1 090-1 097.
- [2] WOOHO L, SANDERSON A C. Distributed computation of dynamics in reconfigurable robotics[C] //Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, c1999 : 1 561-1 566.
- [3] ZACK B, ROBERT F, DANIELA R. Distributed control for unit-compressible robots : goal-recognition, locomotion and splitting[J]. IEEE/ ASME Transactions on M e c h a t r o n i c s, Vol. 7, No.4. December c2002 : 418-430.
- [4] ZACK B, ROBERT F, DANIELA R, et al. Distributed goal recognition algorithms for modular robots[C] //Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics & Automation Washington, DC. May, c2002 : 110-116.
- [5] ZACK B, KEITH K, DANIELA R, et al. Generic decentralized control for a class of self-reconfigurable r o b o t s [C]//Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics & Automation Washington, DC.

May, c2002 : 809-816.

- [6] SATOSHI M, EIICHI Y, AKIYA K, et al. M-TRAN: self-reconfigurable modular robotic system[J]. IEEE ASME Transactions on Mechatronics, 2002, 7(4) :431-441.
- [7] 徐威,汪国宝,柯晓丹,等.基于离散智能的可重构机器人变形策略[J].上海交通大学学报,2003,37(5) : 706-714.
- [8] 徐威,王高中,王石刚.模块化可重构机器人变形算法的仿真研究[J].系统仿真学报,2004,16(5) : 883-886.

## NOVEL MODULAR SELF-RECONFIGURABLE ROBOT SYSTEM

ZHANG Yuhua ZHAO Jie ZHANG Liang  
QI Lizhe CAI Hegao

(Robotics Institute of Harbin Institute of Technology,  
Harbin 150001)

**Abstract** : A novel modular self-reconfigurable robot composed of many homogeneous modules in structure and function is developed. It can complete self-reconfigurable process and harmonic locomotion by connection and detachment of modules and relative location change of modules without any assistant. Orientation and location of modules can be set by interaction with software in master computer. Detaching/connecting structure of module is designed. For its cubic shape and single degree of freedom, module has not only lattice but also string characteristics. It can easily self reconfigure and locomotion as an integer. Self-reconfiguration and harmonic locomotion in integer of robot is carried out according to modular locomotion series, which is gotten by hand-coding or automatic produce by master computer. The master computer also control motion of robot real-time. Basic modular metamorphic functions such as detachment/connection and harmonic locomotion functions in integer as snake, four-leg structure and pedrail shape of robot are verified by several experiments in self-reconfigurable robot. Results show that robot can move and reconfigure easily and its hardware structure is feasible.

**Key words** : Modular robot Self-reconfiguration  
Harmony locomotion

作者简介:张玉华,男,1977年出生,博士研究生。主要研究方向为自重构机器人。

E-mail : sd\_hawk\_zyh@163.com