

## 一种模块化可重构机器人系统的研制

潘新安<sup>1,2</sup>, 王洪光<sup>1</sup>, 姜勇<sup>1</sup>, 李正<sup>1</sup>, 高文斌<sup>1,2</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, 辽宁 沈阳 110016; 2 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 面向教育和科研领域的机器人应用, 为使机器人兼有较好的重构能力与操作性能, 研制了一种模块化可重构机器人系统 MRRES。提出了一种机器人模块划分及重构的方法, 构建出机器人模块库, 研制出集成传动、控制及传感于一体的系列化关节模块。基于 Open GL 和 VC++ 开发了具有建模、仿真和运动控制功能的应用软件 MRR-SIM。给出了一个基于任务和模块库的机器人设计实例, 进行了实验测试。实验结果表明, MRRES 系统模块划分和设计合理, 机器人在保证重构能力的同时具有较好的操作性能, 可应用于教育和科研等领域。

**关键词:** 模块化可重构机器人; 模块划分及重构; 关节模块; 应用软件; 设计实例

**中图分类号:** TP242    **文献标识码:** A    **文章编号:**

## Development of a modular reconfigurable robot system

PAN Xin'an<sup>1,2</sup>, WANG Hongguang<sup>1</sup>, JIANG Yong<sup>1</sup>, LI Zheng<sup>1</sup>, GAO Wenbin<sup>1,2</sup>

(1 State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, 110016, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** To aim at possessing both high reconfiguration ability and manipulating performance for applications in education and research areas, The MRRES (Modular Reconfigurable Robot Experimental System) was developed. A module division and reconfiguration method was proposed, a module library was established, and then a series of joint modules with integrated transmission, control, and sensing systems were developed. Based on Open GL and VC++, the software MRR-SIM incorporating the functions of modeling, simulation, and motion control was developed. A task-and-module-library based illustrative example was presented, and finally a robot was tested. The results of the experiments show that the proposed division method and the design of the MRRES are appropriate, the high reconfiguration ability and high manipulating performance are achieved, and the system is applicable to the applications in education and research.

**Key Words:** modular reconfigurable robot; module division and reconfiguration; joint module; application software; design example

<sup>1</sup>在教育与科研等领域应用机器人时, 由于任务的多样性或研究目的的不同, 对机器人的构型有着多样化的需求。传统的机器人由于其构型是固定的, 难以满足这种需求。而模块化可重构机器人 (MRR) 具有灵活地更改构型的能力, 因此可以较好地满足构型多变的需求。然而, 由于受其自身结构的局限, MRR 的刚度、精度和负载自重比等指标往往都不能令人满意。因此, 如何使机器人能兼具较好的重构能力和操作性能成为当前 MRR 研究领域的一个重要研究方向。

美国卡内基梅隆大学研制的可重构模块化机器人系统 (RMMS)<sup>[1-2]</sup>是早期有代表性的模块化机器人之一, 采用了快速接口, 重构过程方便简单,

但其构型数量较少且自重较大。德国宇航中心的 LWR-III<sup>[3]</sup>是模块化机器人中性能最为突出的代表之一, 该机器人着眼于关节的模块化设计以及机器人的轻质、高性能设计。德国 SCHUNK 公司的 PowerCube 系列模块化机器人是已成功商业化应用的典型例子<sup>[4]</sup>, 早期的版本中关节模块都是方形的且多个表面均可连接, 因此构型灵活, 但机器人的刚度和精度不足。新的 PowerCube 转动关节是回转体, 并且基于这种关节的 LWA 3 机械臂具有更好的性能, 但系统的开放性有待提高, 且其价格较贵。上海未来伙伴机器人有限公司研制的模块化机械臂<sup>[5]</sup>是国内有代表性的商业产品之一, 其设计基于 SCHUNK 的 PowerCube 模块化机器人, 具有较好的开放性, 但机器人的精度和刚度有待提高, 且电缆是外走线方式。上海英集斯自动化技术有限公司生产的模块化机械手臂<sup>[6]</sup>具有较高的刚度, 但其模块化与重构的思想尚不够彻底。其他研究者或单位

收稿日期: 2012-11-20

基金项目: 国家“863”计划资助项目 (2012AA041401); 国家自然科学基金资助项目 (60905048)。

通信作者: 潘新安. E-mail: panxinan@sia.cn.

也分别开发了各具特点的模块化可重构机器人<sup>[7-9]</sup>。

# 1 MRRES 系统简介

## 1.1 系统构成与功能

MRRES 系统主要包含 3 个部分：模块化机器人本体系统、上位机控制系统（含上位机软件一套）及直流稳压电源各一套，如图 1（a）所示。其中，模块化机器人本体系统包含一系列的模块，如表 1 所示。



(a) MRRES 的系统组成



b) 三自由度 c) 四自由度 d) 五自由度 e) 六自由度

图 1 MRRES 的系统组成

Fig. 1 System composition of the MRRES

表 1 机器人本体的模块

Table 1 Modules of the robot

序号	模块类型	代号	数量	额定负载
1	转动关节模块- <i>l</i>	$R_l$	2	140Nm
2	转动关节模块- <i>m</i>	$R_m$	3	36Nm
3	转动关节模块- <i>s</i>	$R_s$	1	6Nm
4	平移关节	$T$	1	260N
5	夹爪模块	$G$	1	4kg
6	垂直连杆 1	$L_1$	4	—
7	垂直连杆 2	$L_2$	3	—
8	直连连杆	$I$	3	—
9	平行连杆	$P$	1	—
10	基座模块	$B$	1	—

本系统可以按照指定的构型，通过模块之间的机械和电气的连接，可方便快捷地组装出机器人本体，图 1（b）~（e）所示为几种常用的典型构型。机器人本体与上位机之间连接且上电之后，系统可自主识别出机器人的当前构型<sup>[10-11]</sup>，并由上位机软件对机器人进行控制和监控，可建立机器人三维几

何模型、运动学模型，进行轨迹规划，对机器人进行伺服控制等。上位机软件还可单独运行，在仿真环境下建立机器人的虚拟样机系统，对机器人进行仿真。

## 1.2 系统特点

MRRES 具有以下特点：

- 1) 采用全开放式架构，可实现 2 自由度至 6 自由度多种构型的机械臂实验平台的快速搭建，且支持用户设计构型（需另设计连杆）；
- 2) 具有较好的操作性能（精度、刚度等）；
- 3) 具有分布式控制系统，模块化关节内部集成了机械传动、控制、传感、通讯等子系统；
- 4) 全开放式编程环境，支持用户调用 VC++ 类库对机器人进行实时或离线编程；
- 5) 上位机控制软件既可脱离实际机械臂单独运行，也可对实际机械臂进行运动控制，且支持二者之间运行程序的无缝连接；
- 6) 内部走线，外形简洁安全，拆装方便等。

# 2 MRRES 系统设计

## 2.1 机器人模块化划分与重构

对于一个模块化机器人系统，要用较少数量的模块实现较多的构型且有较好的操作性能，合理的模块划分方法是关键。模块划分需考虑以下原则：

- 1) 功能的相对独立性：划分的模块应具有明确且相对独立的功能；
- 2) 合适的粒度：适当的划分粒度使机器人既具有较多的构型和较好的操作性能，又不致模块种类过多而使系统繁杂且可靠性降低；
- 3) 模块的互换性与可重用性：模块具有标准的机械和电气接口，同类模块具有互换性，同一个模块在不同构型中可以重用；
- 4) 系统的开放性：系统的软、硬件均具有开放性，能够兼容具有标准接口的外部模块组件。

基于以上原则，从功能上把机器人大致划分为基座类、关节类、连杆类和末端执行器类等四大类部件，构建出基本的机器人模块库。关节模块提供运动自由度，集成了完备且相对独立的机械传动、控制、传感等系统，而连杆模块起到连接的作用。如图 2 所示，关节模块设计成简单的圆柱形轮廓，而连杆模块则主要分为平行连杆、垂直连杆和直连连杆，他们所代表的连接关系如图 3 所示。

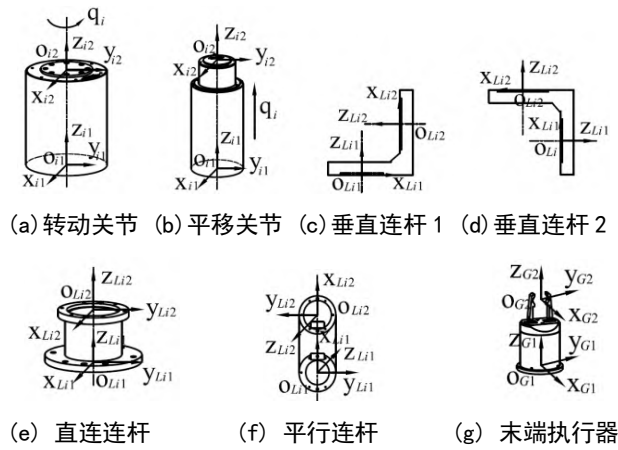


图 2 机器人模块及其坐标系

Fig. 2 Modules and their coordinate systems

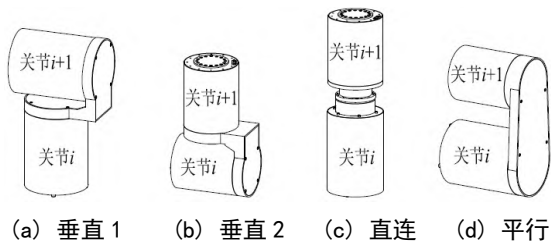


图 3 连杆的连接关系

Fig. 3 Connections of the links

模块通过系列化设计, 每一种模块可能会存在一系列的规格和数量, 这些模块组成了一个模块库, 如图 4 (a) 所示。通过对模块按照一定的规则进行排列和组合, 可以得到一系列的机器人构型, 并可以用树的形式表示<sup>[10-12]</sup>。以三自由度机械臂为例, 在不考虑单种关节的数量限制, 且不考虑与末端执行器连接的种类时, 可以组成的构型如图 4 (b) 所示, 总共有 85 种构型, 其中边上的数字表示可能的连接种类的数量。

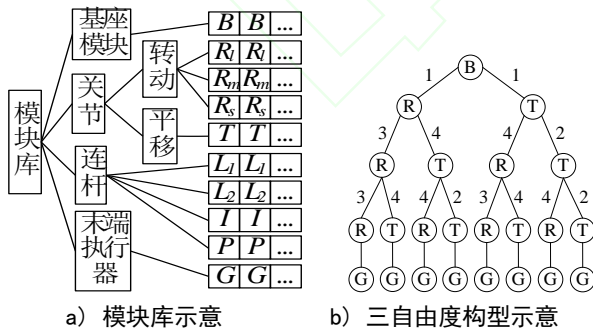


图 4 机器人模块库和构型

Fig. 4 Module library and configurations

### 2.2 关节模块的设计

这里主要介绍一个典型模块即转动关节模块的设计。转动关节整体方案如图 5 (a) 所示, 采用微型直流无刷伺服电机+行星减速器+谐波减速器的传动方式。为保证机器人在掉电时能保持当前位

姿, 关节具有电磁安全制动器。关节设有软件限位、传感器限位及机械限位三重限位机制保护关节不超过最大运动范围。关节的传感系统主要包含: 编码器、电位计及霍尔传感器等。关节的输入及输出机械接口均采用止口定位, 由螺钉紧固。

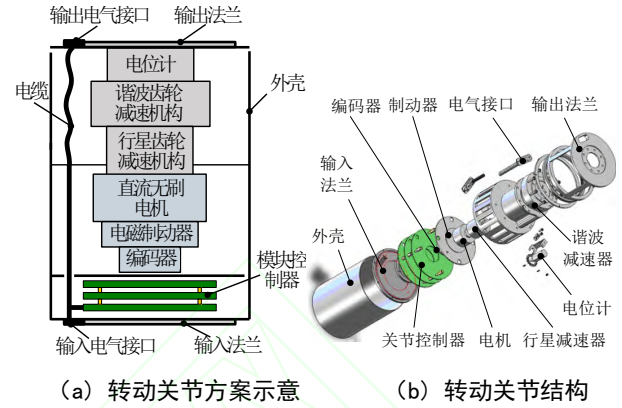


图 5 转动关节机械设计方案

Fig. 5 Mechanical design schemes of joint modules

此外, 设计的部分连杆模块如图 6 所示。

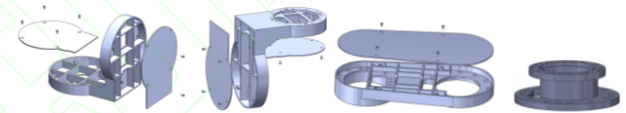


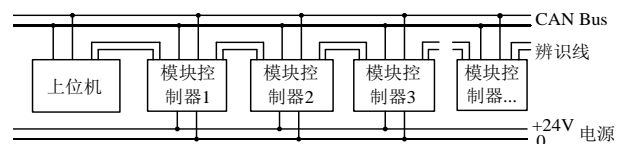
图 6 部分连杆模块

Fig. 6 Some link modules

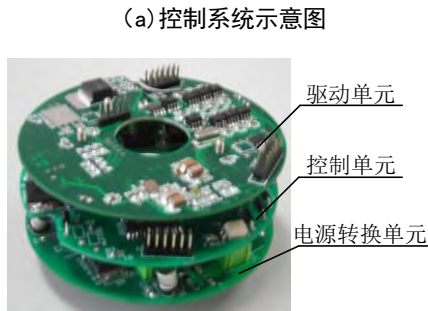
### 2.3 控制系统设计

每个关节内部都集成有一套功能完整的模块控制器, 这些模块控制器组成了基于 CAN 总线的分布式控制网络。如图 7 (a) 所示, 上位机及各个模块控制器都是 CAN 总线的节点。辨识线用于机器人上电后系统对自身构型进行自动辨识<sup>[10]</sup>。

如图 7 (b) 所示, 关节模块控制器主要由驱动单元、控制单元和电源转换单元组成, 其功能分别为电机驱动、控制、状态检测及电源转换等。控制单元采用 DSP 作为中央处理器, 包含 CAN 总线接口、位置反馈检测、电机电流检测、限位与零位检测、构型辨识等扩展电路, 实现与上位机及其他模块通讯、PWM 输出、传感器信号接收与处理、制动器控制、闭环控制算法实现等; 驱动单元实现直流无刷电动机的转速控制和换相控制, 并且控制制动器的开合; 电源转换单元通过开关电源芯片和线性降压芯片将 24V 的总线电源转换为模块控制器中各种电子元器件、芯片所需要的电压等级。







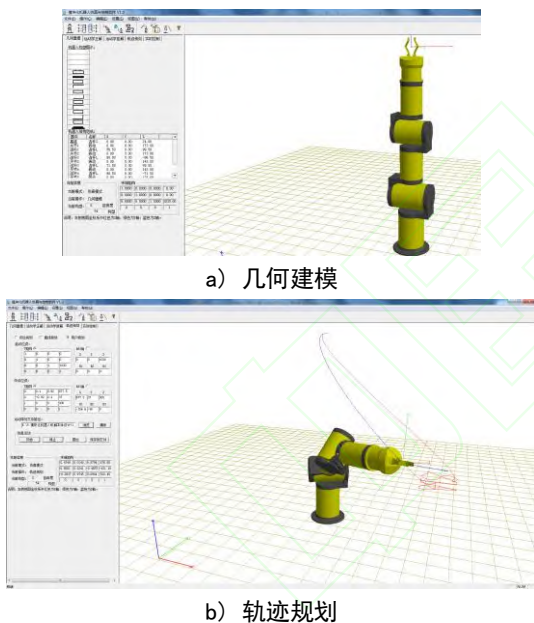
(a) 控制系统示意图

(b) 关节模块控制器

图 7 机器人控制系统设计

Fig. 7 Control system design of the robot

基于 Open GL 和 VC++，开发了上位机应用软件 MRR-SIM，可对机器人系统进行建模、仿真和运动控制等。软件主要有 5 个子功能模块：几何建模、运动学正解、运动学逆解、轨迹规划及实时控制，其中 2 项如图 8 所示。软件具有一定的独立性，既可单独运行，又可通过 CAN 总线对机器人本体进行控制和交互。



a) 几何建模

b) 轨迹规划

图 8 软件设计

Fig. 8 Software design

上位机应用软件的主要功能有：

- 1) 机械臂虚拟样机模型的建立：可建立多种典型构型的虚拟样机模型，给出机械臂的正、逆运动学模型，并且支持用户设计构型（需另外设计专用连杆模块）。
- 2) 机械臂的运动仿真：基于虚拟样机模型，根据指定的运动信息，在虚拟环境中仿真机械臂运动。软件还具有对规划好的序列点文件进行仿真验证的功能，经仿真验证之后的序列点可通过本软件直接控制实际机械臂运动。
- 3) 实际机械臂的运动控制：根据输入的运动

位置等信息，对机械臂进行运动控制。也可根据规划的序列点文件控制机械臂完成目标运动。

4) 虚拟样机与实物的关联与同步：软件的可视化仿真环境中的虚拟样机与实际机械臂直接关联，实现机器人运动信息等数据的交互传递，从而实现虚拟样机与实际机械臂的同步运动。

### 3 实例分析与实验

#### 3.1 实例分析

对于给定的作业任务，可以从众多构型中优选合适的构型，并用模块库中的模块组成对应的机械臂完成作业。这种基于任务和模块库的模块化可重构机器人的应用流程如图 9 所示。

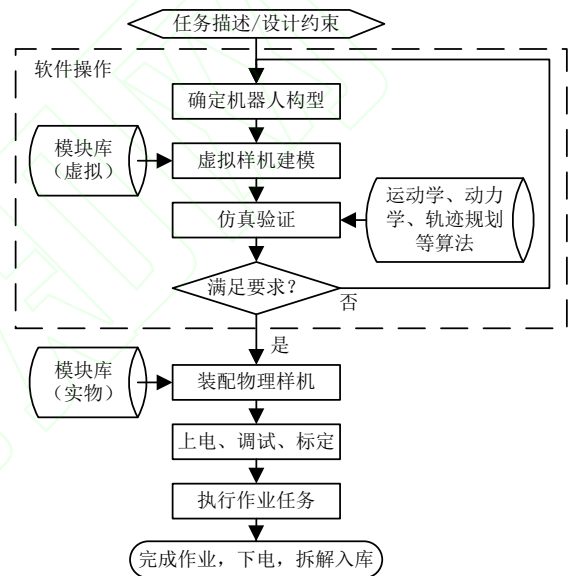
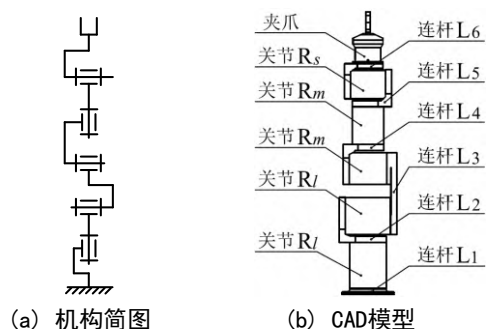


图 9 MRRES 系统的应用流程

Fig. 9 Flow chart of the application of the MRRES

基于上述流程，这里给出一个实例分析。设定任务目标是在空间中写字，作业要求机器人末端在空间上能到达任意点，并要求笔总是垂直于某一个面，但不必要求控制笔绕自身轴线的旋转自由度，因此机器人在空间上需要 5 个独立的自由度。这里选取如图 10 所示构型，该构型由五个转动关节、4 个垂直连杆、一个平行连杆、一个直连连杆及一个夹爪组成，模块尺寸如图 11 和表 2 所示。



(a) 机构简图

(b) CAD模型

图10 一种机器人构型  
Fig. 10 A configuration

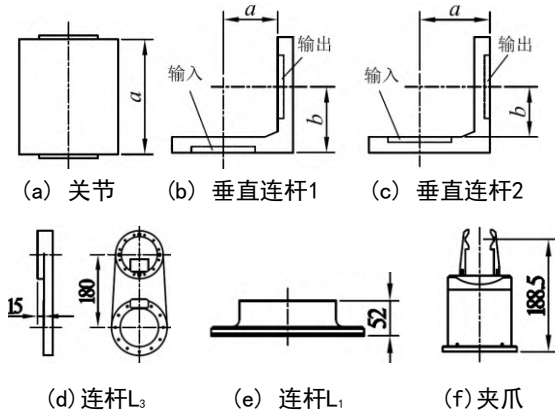


图 11 关节模块及连杆的尺寸

Fig. 11 Dimensions of the joint and link modules

表2 模块尺寸

Table 2 Dimensions of the modules

尺寸 /mm	$R_l$	$R_m$	$R_s$	$L_2$	$L_4$	$L_5$	$L_6$
$a$	170	143	133	85	90.5	66.5	79
$b$	--	--	--	99.5	71.5	84	66.5

在上位机软件中建立机器人的三维几何模型及运动学模型。规划出字符“SIA”的轨迹,并在软件 MRR-SIM 中对其进行了验证(如图 12a-b 所示)。仿真结果显示,机器人写字过程中运动平稳、无干涉现象。随后从模块库中选择相应的模块,完成机器人的装配。上电后机器人自动识别构型,并自动回零。通过 CAN 总线将序列点发送到各个模块控制器中,机器人各关节进行多轴同步运动,完成写字任务,如图 12c 所示。

### 3.2 实验测试

参照国家标准 GB/T 12642-2001 工业机器人性能规范及试验方法<sup>[13]</sup>,对机器人的精度和静态柔顺度进行了测量。如图 13 所示,机器人本体重量 24kg,末端负载 4kg,测量设备为 Leica 激光跟踪仪,在 2.5×5×10m 的空间内测量精度为 10μm+5μm/m。

根据重复定位精度的测试规范<sup>[13]</sup>,位置集群的球半径  $RP_l$  为

$$RP_l = \bar{l} + 3S_l.$$

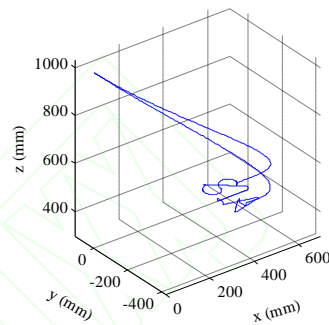
式中:

$$\bar{l} = (1/n) \sum_{j=1}^n l_j, S_l = \sqrt{1/(n-1) \sum_{j=1}^n (l_j - \bar{l})^2},$$

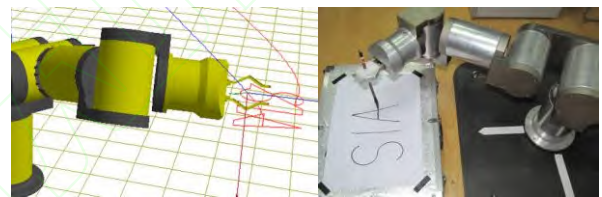
$$l_j = \sqrt{(x_j - \bar{x})^2 + (y_j - \bar{y})^2 + (z_j - \bar{z})^2},$$

$$\bar{x} = (1/n) \sum_{j=1}^n x_j, \bar{y} = (1/n) \sum_{j=1}^n y_j, \bar{z} = (1/n) \sum_{j=1}^n z_j.$$

式中:  $x_j, y_j, z_j$  为靶球坐标的测量值。由上式求得机器人末端的位置集群的球半径为  $RP_l=0.1 \text{ mm}$ ,即机器人的重复定位精度为  $\pm 0.1 \text{ mm}$ 。



a) 轨迹规划



b) 仿真实验

c) 写字过程

图 12 写字实验

Fig. 12 Writing-letter experiment



图 13 机器人和实验设备

Fig. 13 The robot and the experimental device

根据规范要求<sup>[13]</sup>,需要在定位姿的沿 3 个坐标轴的方向进行测试,由于 3 个方向的测试方法一致,这里仅对竖直方向( $z$  向)进行加载测试。所测位姿为  $q=[0 \ 60^\circ 90^\circ 82^\circ 39^\circ]^\text{T}$ 。所加负载依次为 0、1kg、1.5kg、2kg、2.5kg、3kg、3.5kg、4kg。以无负载时机器人的位姿为基准,经计算得到各个负载下的  $z$  向变形量为(单位 mm,符号表方向):  $\Delta=[-0.163 \ -0.317 \ -0.421 \ -0.476 \ -0.596 \ -0.688 \ -0.772]^\text{T}$ 。变形量与负载的关系如图 14 所示。经计算,机器人末端在此位姿下的  $z$  向静态柔顺度为

$$c_z = 0.772/40 = 0.0193 \text{ mm/N}.$$

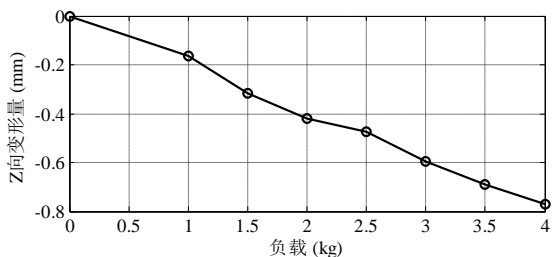


图 14 机器人末端变形量与负载的关系

Fig. 14 Relationship between deflections and payloads

上述结果表明, 与其他模块化可重构机器人相比<sup>[5-6]</sup>, 本文研究的模块化可重构机器人实验系统 MRRES 具有较好的重复定位精度和静态柔顺度。

### 4 结论

- 1) 以功能的独立性、合理的粒度、互换性、可重用性及开放性为原则, 构建出基本的机器人模块库;
- 2) 研制出集成传动、控制及传感于一体的系列化的关节模块;
- 3) 基于 Open GL 和 VC++ 开发了具有建模、仿真和运动控制等功能的应用软件 MRR-SIM;
- 4) 研制了模块化可重构机器人实验系统 MRRES, 给出了实例分析和性能测试, 结果表明该系统既有较好的重构能力, 又有较好的操作性能, 可应用于教育和科研等领域。

### 参考文献:

[1] SCHMITZ D, KHOSLA P, KANADE T. The CMU reconfigurable modular manipulator system[R]. CMU-RI-TR-88-7. Carnegie Mellon University, 1988.

[2] PAREDIS C J J. An agent-based approach to the design of rapidly deployable fault tolerant manipulators[D]. Carnegie Mellon University, 1996.

[3] ALBU-SCHAFFER A, EIBERGER O, GREBENSTEIN M, et al. Soft robotics[J]. IEEE Robotics and Automation Magazine, 2008, 15(3): 20-30.

[4] Schunk GmbH & Co. KG. Schunk modular robotics. <http://www.schunk-modular-robotics.com/>

[5] Shanghai Xpartner Robotics Co., Ltd. Research platform for industrial robots. [http://www.xpartner.cn/downloads/evox/evox\\_ino.pdf](http://www.xpartner.cn/downloads/evox/evox_ino.pdf)

[6] Shanghai Ingenious Automation Technology Co., Ltd. <http://www.ingenious.cn/product/robot>

[7] Engineering Services Inc. RT1 - Pair of modular robots. <http://www.esit.com/robotics-rt1.php>

[8] 史士财, 谢宗武, 倪风雷, 等. 高集成度空间机械臂模块化关节的研制[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(2): 162-166.  
SHI Shicai, XIE Zongwu, NI Fenglei, et al. Development of high integration modular joint for space manipulator [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(2): 162-166.

[9] 邵志宇, 孙汉旭, 贾庆轩, 等. 一种空间机械臂构造模块的研制[J]. 宇航学报, 2007, 28(1): 147-151.  
SHAO Zhiyu, SUN Hanxu, JIA Qingxuan, et al. Development of a configuration module for space manipulator[J]. Journal of Astronautics, 2007, 28(1): 147-151.

[10] PAN Xin'an, WANG Hongguang, JIANG Yong, et al. Automatic kinematic modelling of a modular reconfigurable robots [J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, to be published, doi: 10.1177/0142331212459538.

[11] 姜勇, 王洪光, 潘新安, 等. 模块化可重构机器人的构形在线自主识别[J]. 机械工程学报, 2011, 47(15): 17-24.  
JIANG Yong, WANG Hongguang, PAN Xin'an, et al. Autonomous online identification of configurations for modular reconfigurable robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(8): 17-24.

[12] 赵广志, 王洪光, 刘玉旺. 关节型模块化机器人构型及运动学研究[J]. 机械设计与制造, 2010, (4): 178-180.  
ZHAO Guangzhi, WANG Hongguang, LIU Yuwang. Research on configuration and kinematics of joint modular robots[J]. Machinery Design & Manufacture, 2010, (4): 178-180.

[13] 胡景镠, 刘桂雄, 陆际联. GB/T 12642-2001 工业机器人性能规范及试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2001: 12-15, 32.  
HU Jingliao, LIU Guixiong, LU Jilian. GB/T 12642-2001 Industrial robots -Performance criteria and related test methods[S]. Beijing: China Standard Publishing House, 2001

#### 作者简介:



潘新安, 男, 1982 年生, 博士研究生, 主要研究方向为机器人机构学。



王洪光, 男, 1965 年生, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为机器人机构学、特种机器人和机电一体化技术等。发表论文 50 余篇, 获得发明和实用新型专利 20 余项。



姜勇, 男, 1975 年生, 副研究员, 博士, 主要研究方向为机器人控制、智能控制理论与方法、嵌入式控制系统、特种机器人系统与应用等。参加编写专著 2 部, 发表学术论文 20 多篇。