

文章编号: 1002-0446(2001)03-0275-05

可重构模块化机器人现状和发展^{*}

刘明尧 谈大龙 李 斌

(中国科学院沈阳自动化研究所机器人学开放实验室 沈阳 110015)

摘 要: 由于市场全球化的竞争, 机器人的应用范围要求越来越广, 而每种机器人的构形仅能适应一定的有限范围, 因此机器人的柔性不能满足市场变化的要求, 解决这一问题的方法就是开发可重构机器人系统. 本文介绍了可重构机器人的发展状况, 分析了可重构机器人的研究内容和发展方向.

关键词: 重构性; 机器人; 模块

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

STATUS AND DEVELOPMENT OF RECONFIGURABLE MODULAR ROBOTS

LIU Ming-yao TAN Da-long LI Bin

(Robotics Laboratory, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences 110015)

Abstract: A robot must have more application range as a result of market global competition. However each robot's fixed configuration makes it well-suited for a limited application range. Hence, the flexibility of a robot cannot meet the demand in market change. A solution to this problem is to develop reconfigurable modular robot system. This paper analyses the development and design contents of reconfigurable modular robots. some research topics on reconfigurable modular robots are proposed.

Keywords: reconfiguration, robot, module

1 引言 (Introduction)

从理论上讲, 机器人是一种柔性设备, 它能够通过编程来适应新的工作, 然而实际应用中很少使用这种情况. 但传统的机器人都是根据特定的应用范围来开发的, 虽然对那些任务明确的工业应用来讲, 这种机器人已经足够满足实际需要了, 然而由于市场全球化的竞争, 机器人的应用范围要求越来越广, 而每种机器人的构形仅能适应一定的有限范围, 因此机器人的柔性不能满足市场变化的要求, 解决这一问题的方法就是开发可重构机器人系统, 它是由一套具有各种尺寸和性能特征的可交换的模块组成, 能够被装配成各种不同构形的机器人, 以适应不同的工作. 因此可重构机器人系统的研究已引起越来越多的研究者和工业应用的兴趣, 本文在分析了可重构模块化机器人的发展状况后提出了今后需要研究的方向.

2 国内外研究状况 (Literature review)

国外对可重构机器人系统已经进行了大量的研究, 目前已经开发的模块化机器人系统或可重构机器人系统主要有两类: 一类是动态可重构机器人系统, 另一类是静态可重构机器人系统.

动态可重构机器人系统有: Pamecha 和 Chirikjian^[24]的构形变化机器人系统 (Metamorphic Robotic System), 它是由一套独立的机电模块组成的, 每个模块都有连接. 脱开及越过相邻模块的功能, 每个模块没有动力, 但允许动力和信息输入且可通过它输到相邻模块, 构形改变是通过每个模块在相邻模块上的移动来实现的, 这种系统具有动态自重构的能力. Kotay^[21]等人提出了分子 (Molecule) 的概念, 自重构机器人的模块称为分子, 分子是建立自重构机器人的基础, 分子和其它分子相连接且分子能够在其它分子上运动形成任意的三维结构, 是一

种动态的自重构系统. Yim^[29]研究了一种动态可重构移动机器人, 不用轮子和履带, 而是通过称为多边形杆结构的模块从尾部移到前端, 实现重心移动, 即机器人的移动, 并能通过不同的构形适应不同的环境. Murata^[23]等人提出了一种三维自重构结构, 其模块为一种齐次结构且仅一种模块, 通过一个模块在另一个模块上的运动来动态的组成各种结构. 静态可重构机器人系统有: Benhabib^[2, 3]的模块化机器人, 提出了基于遥驱动技术的模块机器人单元, 驱动方式类似于传统的工业机器人, 认为驱动部分太重, 影响模块机器人的能力, 虽然采用该驱动方式使模块化机器人柔性降低, 但易实现, 是一个折衷的方案. Paredis, Brown 和 Khosla^[25, 26]的可重构模块化机器人系统(RMMS), 它利用一套可交换的不同尺寸和特性的连杆和关节模块, 通过组成这些通用模块, 能够装配出各种专用的机器人, 这种系统特别适用于可重构, 并且考虑了软件可重构. Chen 等人^[5-8]的模块化可重构机器人, 设计了模块库, 并研究了构形的设计及运动学和动力学的分析方法. Han^[15]等人的模块化机器人机械臂, 对模块的机械设计方面开发了一套软件来实现构形的设计. Hui^[17]等人提出了一种 IRIS 装置, 它是一种模块化、可重构和可扩展的机器人系统, 该装置具有 2 台 4-dof 转动关节机器人, 每台机器人均可重构为各种构形, 每个关节由 DC 电机谐波减速驱动, 并装有位置、力矩传感器, 它的软件也和硬件一样设计成模块化的、可扩展的和可重构的. Fujita^[11]等人开发了一个可重构机器人平台, 它是基于 Sony 公司开发的 OPEN-R 标准来建立各种软、硬件模块, 通过模块组成各种不同的机器人结构, 该平台主要用于玩具娱乐业. Matsumaru^[22]提出了 TOMMS 系统 (Toshiba Modular Manipulator System), 它是由关节模块、连杆模块和有操纵杆的控制单元组成的, 通过人工能够构成各种构形的机器人, 其运动学是在构形确定的情况下进行的. Habib^[14]等人研究了可重构液压驱动工业机器人的设计问题. 德国 AMTEC 公司生产的 POWERCUBE 产品是模块化的机器人^[32], 目的是以各种特定的机器人满足各种生产需要. Ji 和 Song^[18]提出了一种可重构平台机器人的设计, 它主要针对并联机器人的模块化设计进行了研究.

从应用范围来看, 动态可重构机器人系统主要适用于玩具行业及非制造行业, 如空间机器人、危险作业环境下的特殊机器人等, 静态可重构机器人系统主要适用于工业机器人.

3 可重构模块化机器人系统的设计 (Design of a reconfigurable modular robot system)

可重构模块化机器人系统是由一套具有不同尺寸和性能特征的模块组成的, 通过这些模块能快速装配出最适用于完成给定任务的机器人. 因此可重构模块化机器人系统应具有以下功能:

- (1) 用户应能很方便地拆散和装配各种模块组成不同的机器人构形满足特定的工作要求;
- (2) 构造的机器人构形使用的模块数和模块类型应尽可能地少;
- (3) 用户对控制软件的修改也不应做复杂的操作;
- (4) 装配的模块化机器人应能立即工作, 完成实际任务.

可重构模块化机器人系统设计的主要内容是模块的划分和模块的设计. 模块的划分既要考虑可重构模块化机器人的应用范围、工件特点和性能, 同时模块本身也要符合以下几条基本原则:

- (1) 每个模块单元应是独立的和自装的;
- (2) 每个模块单元应是可快速连接到任意其它的模块单元, 而不论其类型如何;
- (3) 每个模块单元应是最小重量和最小惯性.
- (4) 每个模块单元在运动学和动力学上应具有独立性.

可重构模块化机器人系统是由一套模块构成的, 目前对机械模块的划分主要分为基础单元模块、末端件模块、连杆模块、关节模块(移动关节模块、转动关节模块、回转关节模块)等. 目前几种典型的模块划分方法有: Benhabib^[2]等人建立的机器人模块库, 它将模块分为四类模块: 模块单元连接器、连杆模块、主关节模块、末端关节模块等, 其中连杆关节采用圆环截面的圆柱体形, 保证任意方向上的抗弯、抗扭能力, 提高构造机械手的柔性, 空心结构能保证模块的质量和转动惯量小, 将基础件也划为该类模块. 主关节模块又可分为转动关节和移动关节模块, 按其驱动方式分为 R-Actuator-M 模块(用于离基础件较近的关节, 它采用 DC 电机, 谐波减速驱动, 重量大), R-Actuator/Link-M (用于离基础件较远的关节, 动力不放在关节上, 而是放在离基础较远的地方通过传动元件传送给关节), P-Actuator-M (DC 电机驱动的移动关节). 末端件关节也分为转动关节和移动关节, R-Actuator-E 和 R-Actuator/Link-E, 其驱

动原理与主 关节模块原理相同. 同时设计了一个单元连接器, 用止口和定位销定位, 用螺栓进行联接. Paredis^[26]等人在 RMMS 系统中提出了硬件模块的划分方法, 建立了机械手的基础模块. 连杆模块. 三个转动关节模块. 一个回转关节模块. 基础模块和连杆模块是无自由度的, 关节模块有一个自由度, 模块是自封闭的, 硬件包含有 CPU、传感器、驱动器、制动器、传动装置、传感器接口、电机放大器和通讯接口等, 电器部分也根据模块化的原理设计, 采用具有基本功能的母板和特殊功能的子板, 同时设计了一个集成的快速耦合连接器, 以便模块之间的快速连接. Chen^[11-17]等人设计的模块化机器人系统中, 仅考虑连杆模块和关节模块, 关节模块有转动关节模块. 移动关节模块. 螺旋关节模块和圆柱关节模块. 连杆模块设计成立方体和长方体, 其特点是多关节联接和几何对称, 立方体的六个表面均有联接口, 长方体的二端的各表面也都有联接口. 可重构模块化机器人系统模块的基本功能应包括以下几个方面:

- (1) 模块应具有自封装的功能, 完成某一特定的功能.
- (2) 模块应具有驱动能力, 完成特定的运动和动作.
- (3) 模块应具有通讯能力, 以便各模块能协调的工作.
- (4) 模块应具有数据处理能力.

4 可重构模块化机器人的构形设计 (Configuration design of reconfigurable modular robots)

可重构模块化机器人系统是由一套各种功能的模块组成的, 通过选择不同的模块组合就可装配成不同模块化的机器人, 可重构模块化机器人构形设计的目的就是如何找到一个最优的装配构形来完成给定的工作.

可重构模块化机器人构形设计的方法主要考虑以下三个问题: 首先要确定构形的表达方法; 其次就是确定构形的评价标准; 最后采用适当的优化方法确定满足给定任务的最优构形. 目前构形的表达方法有: Chen^[5-8]等人采用图论的概念, 将模块机器人的装配关系用装配关联矩阵来表达, 建立了装配构形评价函数: $\Psi(A) = \Phi(A)\mu(A)$, $\Phi(A)$ 是模块机器人装配构形 A 的结构性能, A 是一个装配关联矩阵, $\mu(A)$ 为任务评价标准, 表达任务点集合中最差情况下模块机器人的性能测量值, 采用遗传算法来求解

该优化问题, 得到最佳的机器人构形. Paredis^[25]等人根据运动学设计任务的要求(即可达性、关节在极限范围内运动和避障的要求), 仅考虑转动关节, 在 D-H 参数表达的运动学中通过 $u = \text{tg}(\theta/2)$ 的代换, 解决了运动可达性的判断问题, 采用模拟退火法进行构形的优化. Chocron^[9]和 Han^[15]采用遗传算法进行模块化机器人的构形设计.

5 可重构模块化机器人的运动学和动力学 (Kinematics and dynamics of reconfigurable modular robots)

可重构模块化机器人的运动学和动力学的产生也与传统机器人的运动学动力学不同, 要求在构形改变后自动生成运动学和动力学. Benhabib^[2,3]等人提出了运动模块技术, 采用 D-H 参数, 每个机械模块从输入端口到输出端口之间的运动联系是通过 4×4 阶的齐次变换矩阵来转换. Chen^[6,7]等人在模块化机器人的运动学分析时采用了指数积的形式, 首先研究一个连接副(由两个连杆和一个关节模块组成)的运动学, 并表达成指数积形式, 然后根据机器人的构形采用指数形式的连积得到机器人的前向运动学.

6 可重构模块化机器人的控制系统软件 (Control software design of reconfigurable modular robots)

可重构机器人既要实现硬件的可重构, 同时实时控制软件也必须是可重构的, 这样才能适应机器人应用范围的快速变化. 为了实现软件的可重构, 必须要解决可重构软件模块库的开发和这些模块根据硬件构形和控制任务自动集成的问题. 在计算机软件工程领域, 对软件的重用进行了大量的研究, 但对可重构软件的研究并不多. 在可重构机器人控制软件可重构方面的研究也较少. Khosla^[13,28]等人使用基于端口的对象设计了一个动态可重构实时软件和基于传感器实时系统的多层人机界面, 并应用到可重构模块化机器人中.

7 可重构模块化机器人研究方向 (Research topics on reconfigurable modular robots)

综上所述, 可重构模块化机器人系统的研究已经引起了许多研究者的注意, 目前仍需进一步研究的内容主要在以下几个方面:

- (1) 可重构模块化机器人系统中模块的功能. 设计及实现方法. 包括机器人的功能分析和功能的分

配, 模块的软、硬件功能分析, 模块描述方法的研究, 软、硬件模块的设计, 软、硬件模块自动或快速连接方法的研究。

(2) 可重构模块化机器人的构形设计. 包括机器人所需完成任务描述方法的研究, 机器人构形表达方法的研究, 机器人最优构形生成方法的研究。

(3) 可重构模块化机器人的运动学和动力学研究应主要考虑软件的可重构性. 包括模块运动学和动力学的分析方法, 分布式模块机器人运动学和动力学分析方法的研究。

(4) 研究适用于可重构模块化机器人系统的可重构实时控制软件. 包括机器人控制模块的功能分析和划分方法的研究, 软件重构方法的研究。

参考文献 (References)

- 1 Anderson R. Building a Modular Robot Control System Using Passivity and Scattering Theory. *IEEE Proc of Int Conf On Robotics and Automation*, 1996: 698- 705
- 2 Benhabib B, Dai M. Mechanical Design of a Modular Robot for Industrial Applications. *Journal of Manufacturing Systems*, 1991, **10**(4): 297- 306
- 3 Benhabib B, Zak G, Lipton M. A Generalized Kinematic Modeling Method for Modular Robots. *Journal of Robotics Systems*, 1989, **6**(5): 545- 571
- 4 Chedmail P, Ramestein E. Robot Mechanism Synthesis and Genetic Algorithms. *IEEE Proc of Int Conf On Robotics and Automation*, 1996: 3466- 3471
- 5 Chen I, Burdick J. Determining Task Optimal Modular Robot Assembly Configurations. *IEEE Proc of Int Conf On Robotics and Automation*, 1995: 132- 137
- 6 Chen I, Yang G. Configuration Independent Kinematics for Modular Robots. *IEEE Proc of Int Conf On Robotics and Automation*, 1996: 1440- 1445
- 7 Chen I, Yang G. Automatic Model Generation for Modular Reconfigurable Robot Dynamics. *Transactions of the ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 1998, **120**: 346- 352
- 8 Chen I, Song H, Guang C. Kernel for Modular Robots Applications: Automatic Modeling Techniques. *The International Journal of Robotics Research*, 1999, **18**(2): 225- 242
- 9 Chocron O, Bidaud P. Genetic Design of 3D Modular Manipulators. *IEEE Proc. of Int Conf On Robotics and Automation*, 1997: 223- 228
- 10 Fryer J A, McKee G T. Resource Modelling and Combination in Modular Robotics Systems. *IEEE Proc of Int Conf On Robotics and Automation*, 1998: 3167- 3172
- 11 Fujita M, Kitano H, Kageyama K. A Reconfigurable Robot Platform. *Robotics and Autonomous Systems*, 1999, **29**: 119- 132
- 12 Fukuda T, Nakagawa S. Dynamically Reconfigurable Robotic System. *IEEE Proc of Int Conf On Robotics and Automation*, 1998: 1581- 1586
- 13 Gertz M W, Khosla P K. Onika: A Multilevel Human-Machine Interface for Real-Time Sensor-Based Systems. *ASCE/SPACE94: The 4th Int'l Conf And Expo On Engineering, Construction and Operations in Space*, 1994
- 14 Habibi S R, Goldenberg A A. Design and Control of a Reconfigurable Industrial Hydraulic Robot. *IEEE Proc of Int Conf On Robotics and Automation*, 1995: 2206- 2211
- 15 Han J, Chung W K, Youm Y, Kim S H. Task Based Design of Modular Robot Manipulator Using Efficient Genetic Algorithm. *IEEE Proc of Int Conf, On Robotics and Automation*, 1997: 507 - 512
- 16 Harrison R, Weston R H, Moore P R, Thatcher T W. A Study of Application Areas for Modular Robots. *Robotica*, 1987, **5**: 217- 221
- 17 Hui R, Kircanski N, Goldenberg A, Zhong C, Kuzan P, Wiercinski J, Gershon D, Sinha P. Design of the IRIS Facility: A Modular, Reconfigurable and Expandable Robot Test Bed. *IEEE Proc of Int Conf On Robotics and Automation*, 1993: 155- 160
- 18 Ji Z, Song P. Design of a Reconfigurable Platform Manipulator. *Journal of Robotic Systems*, 1998, **15**(6): 341- 346
- 19 Kelm L and Khosla P K. Automatic Generation of Forward and Inverse Kinematics for a Reconfigurable Modular Manipulator System. *Journal of Robotic Systems*, 1990, **7**(4): 599- 619
- 20 Kim J, Khosla P K. Design of Space Shuttle Tile Servicing Robot: An Application of Task Based Kinematic Design. *IEEE Proc of Int Conf, On Robotics and Automation*, 1993: 867- 874
- 21 Kotay K, Rus D. Locomotion Versatility Through Self-Reconfiguration. *Robotics and Autonomous Systems*, 1999, **26**: 217- 232
- 22 Matsumaru T. Design and Control of the Modular Robot System: TOMMS. *IEEE Proc of Int Conf On Robotics and Automation*, 1995: 2125- 2131
- 23 Murata S, Kurokawa H, Yoshida E, Tomita K and Kokaji S. A 3-D Self-Reconfigurable Structure. *IEEE Proc of Int Conf On Robotics and Automation*, 1998: 432- 439
- 24 Pamecha A, Chirikjian G. A Useful Metric for Modular Robot Motion Planning. *IEEE Proc of Int Conf, On Robotics and Automation*, 1996: 442- 447
- 25 Paredis C J J, Khosla P K. Kinematic Design of Serial Link Manipulators From Task Specification. *The International Journal of Robotics Research*, 1993, **12**(3): 274- 287
- 26 Paredis C J J, Brown H B, Khosla P K. A Rapidly Deployable Manipulator System. *IEEE Proc of Int Conf, On Robotics and Automation*, 1996: 1434- 1439
- 27 Poon J K, Lawrence P D. Manipulator Inverse Kinematics Based on Joint Function. *IEEE Proc of Int Conf, On Robotics and Automation*, 1998: 669- 674
- 28 Stewart D B, Khosla P K. The Chimera Methodology: Designing dynamically Reconfigurable and Reusable Real-Time Software Using Port-Based Objects. *Intl Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering*, 1996, **6**(2): 249- 277
- 29 Yim M. New Locomotion Gaits. *IEEE Proc of Int Conf On*

Robotics and Automation, 1994: 2508- 2514

- 30 Yoshida E, Murata S, Kurokawa H, Tom ita K, Kokaji S. A Distributed Method for Reconfiguration of a Three-Dimensional Homogeneous Structure. *Advanced Robotics*, 1999, **13**(4): 363- 379
- 31 Zanganeh K, Eand Angeles J. A Formalism for the Analysis and Design of Modular Kinematic Structures. *The International Journal of Robotics Research*, 1998, **17**(7): 720- 730
- 32 <http://www.amtec-robotics.com>
- 33 刘思宁, 陈永, 章文俊. 模块机器人及计算机辅助设计. *机器人*, 1999, **21**(1): 16- 22

- 34 费燕琼, 赵锡芳, 徐卫良. 基于运动学任务的模块机器人外形设计. *机器人*, 1999, **21**(7): 538- 543

作者简介:

- 刘明尧 (1964-), 博士研究生. 研究领域: 制造系统, 机器人学.
- 谈大龙 (1940-), 研究员, 博士生导师. 研究领域: 机器人学.
- 李 斌 (1963-), 副研究员. 研究领域: 机器人控制.

(上接 196 页)

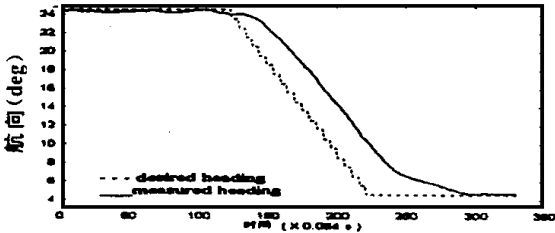


图 11 纵向速度 6m/s 时有预估量航向连续跟踪响应曲线
 Fig. 11 Step response of prediction method ($u= 6m/s$)

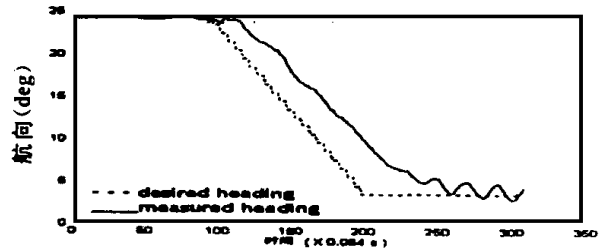


图 12 纵向速度 6m/s 时无预估量航向连续跟踪响应曲线
 Fig. 12 Step response of general PID ($u= 6m/s$)

7 结论(Conclusion)

本文提出一种轮式移动机器人航向跟踪预估控制算法, 根据机器人前轮偏角和纵向速度来计算航向的变化量作为航向预估量, 并将航向预估量与机器人实际航向之和作为控制的反馈航向, 航向预估量对机器人航向变化趋势作了预测. 由于在航向预估量中考虑了机器人纵向速度和实时前轮偏角的影响, 因而控制器对机器人纵向速度变化的适应范围较宽. 算法简单实用, 实时性非常好. 仿真实验和实车实验中, 用航向预估算法和 PID 控制算法结合进行轮式移动机器人的航向跟踪实验, 结果表明这种算法有效地改善了控制性能, 适应的速度范围较常规控制方法要宽, 对系统参数变化的敏感性较低, 减少了控制器对移动机器人模型的依赖, 提高了控制器的鲁棒性.

参考文献 (References)

- 1 Ty A Lasky, Bahram Ravani. Lateral Vehicle Control for AHS using a Laser Sensor. *Proc. Of the Second World Congress on Intelligent Transportation Systems*, 1995, Yokohama Japan: 1082 - 1087
- 2 Steven E Shladover, Charles A Desover, etc. Automatic Vehicle Control Developments in the PATH Program. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1991, **40**(1): 114- 130
- 3 王峰. 移动式机器人转向的模糊控制. (学位论文), 北京: 北京理工大学机器人中心, 1998

作者简介:

- 龚建伟 (1969-), 男, 博士研究生. 研究领域: 机电控制, 智能机器人.
- 黄文宇 (1974-), 男, 博士研究生. 研究领域: 智能机器人.
- 陆际联 (1940-), 男, 博士生导师. 研究领域: 智能机器人, 传感与控制.