

可重构模块化机器人研究

Research on Reconfigurable Modular Robot

周强强 关胜晓 (中国科学技术大学 自动化系 安徽 合肥 230027)

摘要: 可重构模块化机器人是机器人学的一个新的发展方向,其研究的核心和基础问题是可重构机器人的模块设计以及模块组合的运动规划。设计了一种新型可重构模块化机器人,该机器人具有独特的平面连接机构,实现了结构、驱动、运动和功能的模块化,能够根据需要重新构形,完成实时任务。分别介绍了模块单元的机械结构设计、连接机构以及基于 CAN 总线的控制系统结构。构建了基于 OpenGL 技术和 VC++ 开发平台的机器人仿真实验系统,仿真机器人构形和运动,验证了模块设计的正确性和整体运动构形规划方法的有效性。

关键词: 可重构 模块化机器人 通用接口 三维仿真 协调控制

1 引言

随着机器人应用在广度和深度上的发展,人们希望在简化机器人设计、减少结构部件和降低机器人成本的同时,增强机器人系统性能,增加机器人功能和结构的多样性,所以在机器人学研究领域出现了可重构机器人(Reconfigurable Robot)的研究^[1,2]。可重构机器人是由功能简单而具有一定感知能力的模块机器人有机联接而成。通常由一套具有多种尺寸和性能特征的可交换的模块组成,可以被装配成不同构形的机器人,以适应不同工作环境和任务的要求^[3]。这种组合并非简单的机械重组,还包括控制系统(电子硬件、控制算法、软件等)的重组,因为模块本身就是一种集传动、驱动、控制、通讯为一体的单元。模块化机器人系统的突出优点是:重构性好、装配方便、灵活性好、功能多样、适应性强和便于维护。可重构模块化机器人的研究的基础和核心是将机器人分解为标准化、模块化的组件,研究这些模块化组件如何有机的结合,从而达到机械系统的快速拆装、功能模块间的有效通讯、整体机器人系统的协同控制。本文将在可重构模块结构设计和控制方式上进行有益的探索和研究。

2 机器人硬件平台设计

可重构模块化机器人的研究内容十分广泛,包括接口机构研究、硬件结构设计和软件模块化研究等,如

表 1 所示。

模块化设计思想是可重构模块机器人的理论基础,模块之间的通用接口技术是其核心研究内容。接口研究包括硬件接口(机械装置的快速连接和分离)、电气连接、控制总线和软件模块的开放性。本课题研究的长远目标是,建立一种由各种功能模块构成的可重构模块化仿人机器人系统。近期研究重点围绕可重构模块化机器人的标准化通用接口,建立一种控制接口规范,以实现各功能模块的连接、分离、协同和控制。

表 1 可重构模块化机器人的研究内容

可重构模块化机器人系统的研究	接口机构研究	连接机构
		驱动机构
		电气连接
		壳体设计
	硬件结构设计(具有实现快速拆装、可重构、模块化等特性)	功能模块
		微控制器设计
		控制总线结构
		通用移动运动平台
		各种传感器模块
		可重构软件设计
	软件模块化研究(具有自动识别,协调控制,模块化分层控制等特性)	开放式机器人架构
		通信系统机制
功能身份信息的识别		

2.1 模块单元的设计

本文提出了一种兼具阵列式系统和串联式系统优点的新型三维模块结构,如图 1 所示,具有一个转到自由度和六个通用连接自由度,转动运动后形状保持不变。每个模块由

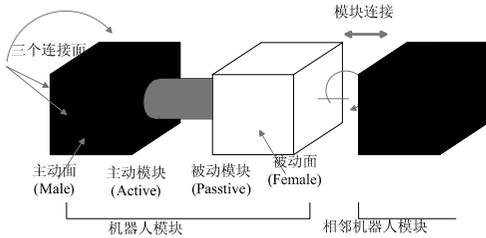


图 1 可重构机器人模块

两个立方体和中间一个圆柱体构成,两个半块之间通过电机输出轴连接成一体,能够实现范围为 360 度的相互转动。模块与模块之间通过机械的方式可以方便连接和分离。每个模块分为主动部分 (active) 和被动部分 (passive),主动部分具有三个主动连接面 (male),被动部分有三个被动连接面 (female)。任意一个主动面都可以连接到其他模块的被动面上,连接操作可以由人为手动完成,也可以由机器人系统通过模块间的配合协调自动完成。当几个模块相互连接起来,就构成了模块化机器人系统,可以协调控制整体机器人动作。每个模块具有一定智能,执行相应的动作。

2.2 机械连接机构

为了实现连接结构的通用性,使得模块在任意相互转动 90 度时都能连接,将各连接元件按照正交轴对称方式分布,连接机构如图 2 所示。主动模块上的主动连接面上安装有可以伸缩的钩子,钩子连接在被动面的沟槽里。在主动连接面上装有反射式光电传感器,可以用来检测地面明暗和颜色的变化和探测有无接近的物体。相比较其他销孔式连接方式^[4],或者电磁铁加上现状记忆合金 (SMA) 设计的连接机制,我们这种连接机构设计,能够快速、灵活、稳固的连接两个模块,同时节省了能量和空间。

3 控制系统设计

3.1 总体框架

模块有三个从控制板,用于处理外围设备,一块从控制板负责控制电机,采用 PID 控制或者继电器控制;

另一块在主动模块上,负责驱动连接面上的连接钩子;第三块用于控制红外线 (IR) 发射和接收装置。面板上有三根信号线,分别是发送端、接收端和地线。对于模块与模块之间的通讯,系统采用 CAN 总线结构^[5]。此外,每个模块都有无线通讯模块,用于模块机器人与上位机 PC 的通讯,类似 RoboCup 小型组机器人比赛中常用的方式。图 3 是控制系统结构图。

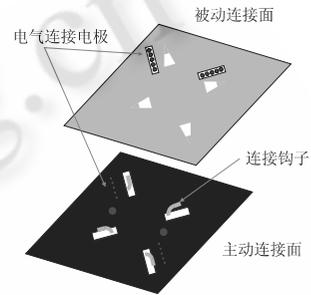


图 2 连接机构面板示意图

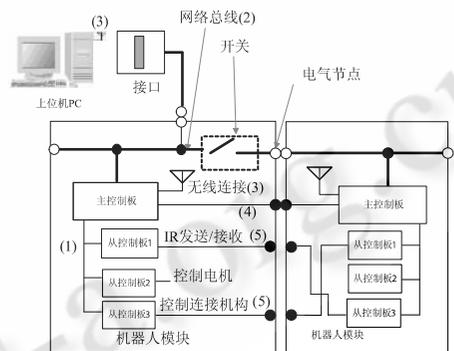


图 3 控制系统结构图

3.2 软件设计

本文提出了分布式通讯与集中式通讯相结合的方法,在分布式阶段,用于串行通讯的触点可以分别进行局部通讯,采集模块的连接及相对方位信息,然后,切换到集中式通讯方式,上位机自动获得所有模块的状态信息。由于所有的模块运动都由上位机进行决策,有助于降低单个模块控制系统的硬件要求,提高规划效率。

控制系统的整体控制流程如图 4 所示,主控子系统接到任务后进行任务规划,并且将任务分配给各模块执行子系统,同时它还记录各个模块基本信息和监视各个模块的执行状况。执行子系统接到指令及参数后,具体执行,并将本身的信息及执行结果反馈给主控子系统。图中虚箭头表示主控子系统和执行子系统间

的通信。

4 实验研究

4.1 模块机器人构形组合设计

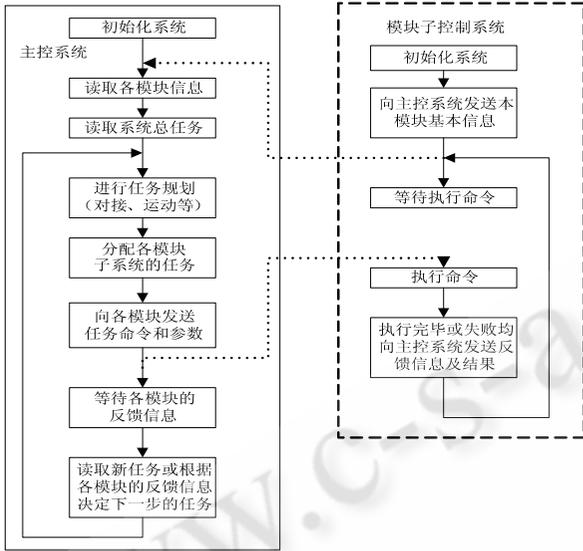


图 4 控制系统的整体控制流程框图

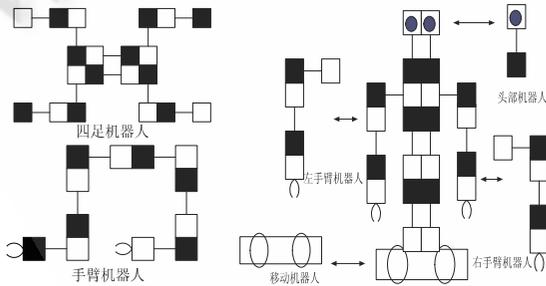


图 5 功能模块机器人 图 6 可重构模块化仿人机器人

模块化机器人的一个突出的特点就是模块本身也是一种自治机器人,各模块机器人可以相互组合搭建其他构型机器人,如同搭建积木一样,如图 5 所示。图 6 为可重构模块化仿人机器人系统^[6,7],分别由两个手臂机器人、头部机器人、两只机器人和轮式移动机器人构成,这些机器人模块本身都能够自主控制,能够相互通讯,协调动作。

4.2 建模与运动规划

为了获得整体构形信息,需要选定一个模块对象作为起始点,通过其中包含的连接信息,采用广度优先算法对连接模块进行搜索,直至所有的模块搜索完毕

为止。由于机器人结构的连接特定,所有的模块是一个连通的整体,因此,这种方法可以获得所有模块的状态信息,至此,上位机得到了建立构形的完全方位矩阵所需要的全部信息。

机器人的重构规划首先需要对构形中模块空间位置和方位以及模块之间的连接关系进行数学描述,即构形表达。

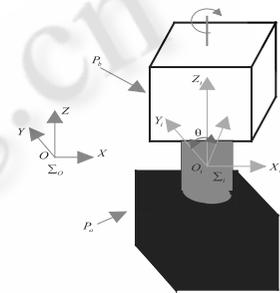


图 7

为了能够唯一的表示模块的各组成部件,将模块编号为 $i (i=1,2,\dots,N)$,将模块的两个半块编号为 P_a 和 P_b ,然后建立全局坐标系 Σ_o ,并选取一个半块如 P_a 作为模块的局部参考基准,在模块的几何中心建立局部坐标系 Σ_i ,如图 7 所示。由于两个半模块的相对方位可以通过模块的转角 θ 唯一确定,因此,只需建立一个局部坐标系 Σ_i 结合转角 θ 即可以完备的表示一个模块的各个组成部分在全局坐标系中的位置及方向关系。用 O_iP 来表示模块 i 的局部坐标系相对于全局坐标系的方位矩阵,用 ${}^iP_j (i,j=1,2,\dots,N)$ 来表示模块 i 的局部坐标系相对于模块 j 的局部坐标系的相对方位矩阵,它们都是 4×4 方阵,具体结构如下:

模块单元坐标系

$${}^oP = \begin{bmatrix} \cos\alpha \cos\beta & \sin\alpha \sin\beta & -\cos\alpha \sin\beta \cos\varphi & \cos\alpha \sin\beta \sin\varphi & P_x \\ \sin\beta & \cos\beta \cos\alpha & & -\cos\beta \sin\alpha & P_y \\ -\sin\alpha \cos\beta & \sin\alpha \sin\beta \cos\alpha + \cos\alpha \sin\alpha & \cos\alpha \cos\alpha - \sin\alpha \sin\beta \sin\alpha & & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 α, β, φ 为模块相对于全局坐标系在 X, Y, Z 轴上的转动角度; P_x, P_y, P_z 为模块的相应位置坐标。

对于由 N 个模块组成的机器人系统而言,机器人模块间的方位关系可以用完全方位矩阵 P_c 结合模块的转角向量 $\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N]^T$ 来表示。采用完全方位矩阵和模块的转角向量可以完备地描述机器人的静态构形,还可以描述机器人在重构过程中变化地动态构形,单个模块或者多个模块组合的运动可以通过对

完全方位矩阵的相应元素进行变换而得到新构形的完全方位矩阵。

$$P_C = \begin{bmatrix} 0P & 1P & 2P & \dots & NP \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1P & 1P & 1P & \dots & 1P \\ 2P & 2P & 2P & \dots & 2P \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0P & 1P & 2P & \dots & NP \end{bmatrix} \quad (2)$$

两个模块连接面在任意转动 90 度后仍然可以相互连接,即相同的两个连接面之间最多有 4 种连接方位关系,分别用编码 1、2、3、4 表示;对于没有连接模块的表面,可以用编码 0 来表示。由于每个模块具有 6 个不同的连接面能够与其他模块连接,共有 36 种连接组合,可以用一个 6 × 6 的模块连接关系矩阵 RAB 来表示,其中,行和列分别表示两个模块 A 和 B 的 6 个连接面,RAB 的结构如下:

$$R_{AB} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} & r_{15} & r_{16} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} & r_{25} & r_{26} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} & r_{35} & r_{36} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} & r_{44} & r_{45} & r_{46} \\ r_{51} & r_{52} & r_{53} & r_{54} & r_{55} & r_{56} \\ r_{61} & r_{62} & r_{63} & r_{64} & r_{65} & r_{66} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:行向量编号代表模块 A 的六个连接面;列向量编号代表模块 B 的六个连接面;rij 的值域就是连接面间连接方位关系的编码,即 rij ∈ (0, 1, 2, 3, 4)。

模块的两个组成半块之间的相对方位关系可以通过模块转角唯一确定,该转角信息可以通过模块的分布式通讯自动获得。利用模块的相对方位矩阵 TRI (i ∈ (1, 2, ..., N)) 来表示两个组成半块之间的相对方位关系。该矩阵结构形式如下:

$$TRI = \begin{bmatrix} -\text{Cos}\theta & 0 & \text{Sin}\theta & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ \text{Sin}\theta & 0 & \text{Cos}\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

4.3 仿真实验

在完成了机器人模块的连接关系和方位关系的自动识别之后,根据模块的构成半块之间的相对方位矩阵和连接半块之间的相对方位矩阵即可求得任意连接模块之间的相对方位矩阵,此时,则可以求得构形相对于该全局坐标系的完全方位矩阵,完成构形的自动重建。在实际的运动过程中,通过分布式和集中式通讯完成了模块信息的采集之后,上位机得到了所有模块的连接状态信息,为了便于计算机识别处理,我们采用了面向对象技术,将每个模块的状态信息在上位机上

表示为一个模块对象的实例 Module_i (i = 1, 2, ..., N),

Module_i {

Theta = ...; //表示该模块电机的转动角度;

FA1. MID = ...; //表示与 1 号连接面连接的模块编号,0 表示无连接;

FA1. SID = ...; //表示与 1 号连接面连接的模块的连接面编号;

FA1. State = ...; //表示与 1 号连接面连接的方位关系;

...

FA6. MID = ...; //6 号连接面;

FA6. SID = ...;

FA6. State = ...; }

并将所有的模块对象存储在特定的内存空间内,根据模块对象的地址信息进行实时的数据更新,每个模块对象包含了构形自动识别所需要的全部信息。由于机器人结构的连接特定,所有的模块是一个连通的整体,因此,这种方法可以获得所有模块的状态信息。

为了验证本文所设计的模块结构以及各种规划方法的有效性及其可行性,需要通过仿真以及实物实验对模块的基本功能、重构规划方法以及整体构形的运动规划方法进行验证。目前,已经初步建立了一套基于 VC++ 和 OpenGL 技术的可重构模块化机器人的仿真实验系统。该系统软件运行在上位机上,能够利用自动识别并构建出的机器人构形信息,进行构形的三维可视化显示及操作。系统结合了重构及整体构形的运动规划方法,当一个运动规划序列经过仿真系统验证之后,相关的模块运动及连接关系变化的序列可以通过系统的翻译程序转化成模块控制系统能够理解的控制指令,并通过与机器人的通过接口传递给相应的模块,模块执行具体的动作,实现仿真系统和机器人硬件

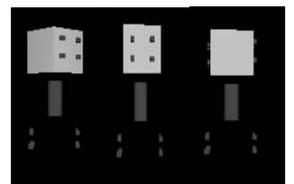


图 8 仿真程序界面 图 9 基本功能模块仿真实验

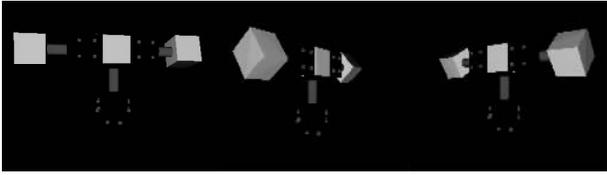


图 10 模块组合仿真实验

本体的信息交换和运动同步。仿真系统的界面如图 8 所示。图 9 显示单个模块运动的过程。图 10 显示由 3 个模块机器人组合在一起的机器人系统的运动过程。

5 结论

本文就可重构模块化机器人以及通用接口技术作了初步的研究,设计了一种新型的单转动自由度阵列式的三维机器人模块,该模块兼具阵列式和串联式机器人系统的优点,通用性高,结构简单,控制容易。设计了一种新型平面连接机构和电气连接部件;分析了机器人控制系统功能和要求,在此基础上提出控制系统总体构建;建立了机器人的实验系统,仿真机器人构形和运动,验证了模块设计的正确性和整体运动构形规划方法的有效性。

对于今后的研究工作有以下几点展望:

1. 针对具体的应用背景进行模块结构的改进设计,提高完成任务的多样性和实用性。
2. 结合人工智能领域的研究成果和多传感器信息融合技术,使其具有更高的智能。
3. 利用仿生学的研究成果,结合模块化机器人的结构特点,研制可重构模块化仿人机器人。
4. 采用蓝牙无线通讯,以适应对通讯速度和质量要求更高的应用场合。

参考文献

- 1 龙斌,毛立民,等. 国外自主变结构模块机器人发展现状. 机械设计,2005,22(5):1-3.
- 2 Jinxiang Shen, Jiangping Liu, et al. Distributed Control System for Modular Self-Reconfigurable Robots. Proc. of the 2003 IEEE, International Conference on

Robotics, Intelligent Systems and Signal Processing, Changsha, China - October 2003:932-9.

- 3 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):275-279.
- 4 K. Stoy, W. M. Shen, P. M. Will. A simple approach to the control of locomotion in self-reconfigurable robots. Robotics and Autonomous Systems, 2003:191-199.
- 5 冯金光,周华平,马宏绪. 基于 CAN 总线和 DSP 的仿人机器人运动控制系统研究. 总线与网络,2004, 5:29-33.
- 6 D. N. Ly, et al. A modular and distributed embedded control architecture for humanoid robots. Proc. of 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, September 28 - October 2, 2004, Sendai, Japan: 2775-2780.
- 7 T. Taira, et al. Design and implementation of reconfigurable modular humanoid robot architecture. 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. (IROS 2005) 3566-3571.

(上接第 104 页)

并给出了一个如何构造正则表达式的具体实例。基于 web 的应用常常需要构造正则表达式去匹配海量的数据,“较优化原则”提供了一种针对性较强的可行方法,可提高程序运行的效率。

虽然本文仅介绍了基于 Java 语言的正则表达式的构造原则,其思路对于在其他语言下构造优化的正则表达式有一定的参考作用。

参考文献

- 1 Jeffrey E. F. Friedl. Mastering Regular Expressions. Publisher: O'Reilly. 2006:146-166.
- 2 http://gceclub.sun.com.cn/Java_Docs/jdk6/html/zh_CN/api/index.html 技术文档 2007.
- 3 陈火旺编译原理. 北京:国防工业出版社,2000.