

可自修复的模块化机器人对接系统设计^①

费燕琼^② 张 鑫

(上海交通大学机器人研究所 上海 200240)

摘 要 研究了新型网格型三维运动空间自重构模块机器人 M-Cubes 的对接系统的机构设计,在此基础上,针对该机器人的自修复性能和模块连接可靠性的不足,为其设计了一个新的对接系统。该对接系统主要由可伸缩轴和可变孔组成,通过可伸缩轴和可变孔的对中、配合、锁紧和松开可实现正常模块与正常模块、正常模块与故障模块的连接和分离,从而可实现自重构,保持机器人整体构型的完整性。对相邻模块对接时垂直锁紧机构进行了受力分析和仿真和实验的结果证实,该系统能够满足自修复的要求,连接的可靠性也更高。

关键词 模块化,自重构,自修复,对接,机器人

0 引 言

自重构模块化机器人是近 20 年兴起的一种机器人,它由一定数量的具有简单功能和感知能力的模块组成。自重构模块化机器人可分为链式型和网格型,链式型包括由模块组成的机械臂等,如 Poly-Bot 机器人^[1]、Conro 机器人^[2]等,而网格型指模块在二维或三维空间内构成的各种构型的系统,如 Crystalline 机器人^[3]、ATRON^[4]以及 M-Cubes^[5]等。自重构模块化机器人的一个重要特性是具有自修复的能力,即在执行任务时,当构型中模块出现故障,它能检测到故障模块,并自主地把故障模块从整体构型中分离出去,然后用备用模块代替故障模块,以保持整体构型的完整性,实现预期的目标。在自重构模块化机器人中,对接系统是一个非常重要又难以设计的子系统。目前国内外对具有自修复特性的自重构机器人的对接系统已有研究,如文献[4]、[6]和[7]报道的研究。但总的来说研究得很有限,设计的对接机构不够完善,不能满足自修复要求和连接的可靠性。针对这种情况,本文对 M-Cubes 机器人的对接系统进行了研究,并在此基础上,为其设计了一种新的对接系统,该系统当机器人的模块出现故障时,故障模块可以独立与相邻模块连接和分离,且连接更为可靠,便于完成自修复动作。

1 对接系统设计要点

在机器人的自重构过程、运动过程、自修复过程中,需要大量模块产生连接与分离动作,因此,实现连接的便利性、可靠性和通用性至关重要。

1.1 连接方式的选择

自重构模块化机器人连接机构设计的核心是自动连接和分离方式的选择和设计。目前主要有两种连接方式:电磁式和机械式。由于机械式连接结构可以产生较大的连接力,便于传递较大的动能,连接更为可靠牢固,所以本文选择机械式连接方式。

1.2 连接机制的选择

对自重构机器人来说,模块的连接机制涉及两个问题,一是连接机构的极性,二是连接的锁紧与打开状态选择。

在模块连接过程中,主动连接结构发出动作,和被动连接机构对接在一起,而被动机构不产生任何动作。这种方式能实现两个正常模块的连接与分离。但是,假如其中有一个模块失效,正常模块就无法和故障模块连接和分离。如果采用既主动又被动的连接(无性连接),那么当有一个模块发生故障时,另一个模块仍然可以和该故障模块连接和分离,这样就可提高模块的自主性,也使得该模块具备了自修复功能的硬件基础。因此,本文的新型对接系统

^① 国家自然科学基金(50305021,50775145)和上海市自然科学基金(07ZR14050)资助项目。

^② 女,1972 年生,博士,副教授;研究方向:自重构模块化机器人,特种机器人,自动化装配等的研究;联系人, E-mail:fyq@sjtu.edu.cn.
(收稿日期:2008-05-09)

设计采用无性连接,在旋转面上既有主动对接的轴,又有被动对接的孔。根据结构设计特点,采用不耗能时对接机构保持断开,而对接时要产生一定的动作,并保持对接状态的连接形式。

2 可自修复的 M-cubes 对接系统研究

文献[5]中介绍的 M-Cubes 机器人,其对接机构能够实现模块之间的连接与分离,能够完成基本的模块运动需求。但是,该机构有一些不完善的地方:当两个对接在一起的模块中有一个出现故障时,正常工作的那个模块不能与该故障模块断开连接,而这正是自重构机器人自修复功能必须要求的条件;另外,模块间的连接不够可靠,容易发生松动。

为此,本文设计了一个新的对接系统,达到了两个设计目标:无论一个模块运行正常还是出现故障,另一个正常模块都可以与该模块连接和分离,这样就提高了模块的自主性,使两个模块间的连接更可靠,更稳定。可完成自修复动作的自重构机器人基本模块的外观如图 1 所示。

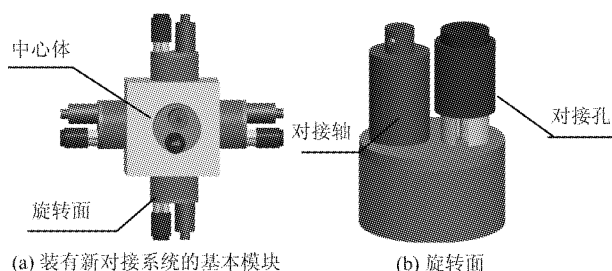


图 1 M-Cubes 模块结构

2.1 对接孔设计

文献[5]中讨论的 M-cube 基本模块,其对接机构中对接孔是固定不变的,孔里有个槽,用来固定对接轴上顶出的滚珠。由于这个孔径不能改变,所以当正常模块和故障模块连接在一起时,如果正常模块要和故障模块断开,那么故障模块的轴不一定能和正常模块的孔断开连接。对于自重构机器人,要具备自修复功能,其结构必须是正常模块可以和任意一个其他模块(正常或故障模块)连接与分离。所以,为完成自修复动作,自重构机器人对接系统必须是既主动,又被动,正常模块和故障模块断开不会破坏彼此机构的完整性。因此,本文设计了一个全新的孔和轴的对接机构,其中对接孔可以放大、缩小(见图 2),对接轴上有可与对接孔锁紧的滚珠。通常情况下,对接孔保持闭合状态,正常模块间的连

接与分离不需要对接孔张开。当正常模块试图和故障模块断开时,该正常模块上的对接孔张开,以便和对方的对接轴断开,断开之后,该对接孔又回到闭合状态。当正常模块试图和故障模块连接时,如果故障模块的连接轴上的滚珠是顶起的,则正常模块的对接孔张开,然后和对方的轴连接,连接好以后,该对接孔又保持闭合状态。

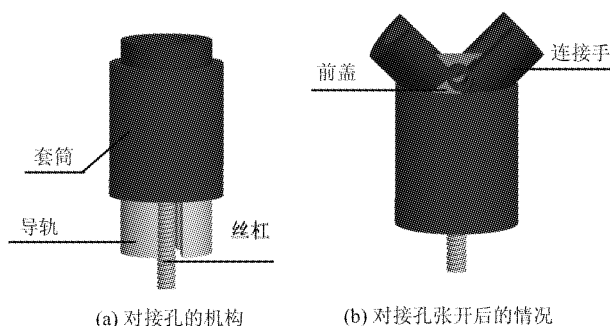


图 2 对接孔的三维结构图

该对接孔由连接手、前盖、套筒、导轨、丝杠等子机构组成。丝杠顺时针旋转时,套筒在导轨上向靠近模块中心体的方向滑动,此时,位于对接孔机构端部的连接手打开,从而使对接孔变大,和对方的对接轴断开连接;丝杠逆时针旋转时,套筒向远离模块中心体的方向滑动,此时,位于对接孔机构端部的连接手就被套筒套住、闭合,从而使对接孔变小,和对方连接轴连接。在对接孔机构的末端是两个连接手,它们闭合在一起组成一个完整的圆孔,圆孔内侧有个槽,可以和对方对接轴的滚珠配合而锁紧。连接手的一端用销和前盖连接,可以绕着销旋转,张开或者闭合圆孔。

2.2 对接轴设计

本节设计的新对接轴的三维结构如图 3 所示。该对接轴的设计思想是,通过对原对接轴[5]的销进行改进,使得当两个模块在水平方向对接时,连接更牢固稳定;而当两个模块在竖直方向对接时,气缸产生的推力能够平衡断开连接所需的力,从而可提高连接的可靠性和稳定性。

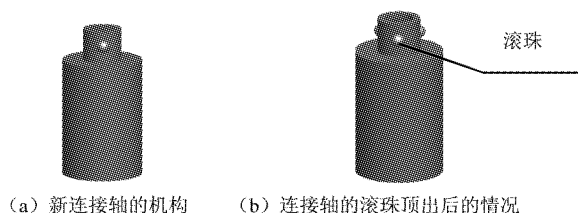


图 3 新连接轴的三维结构图

2.3 连接与分离过程仿真与实验

如上所述,新型对接系统仍是轴和孔的配合,与文献[5]不同的是,本文对接孔的大小可改变,对接轴的锁紧更牢固,图4和图5为该对接系统连接与分离仿真过程。图4显示装有新对接系统的两个模块对接后的情况。

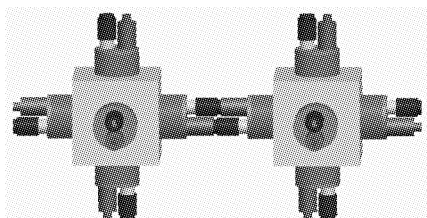


图4 装有新连接机构的两模块的对接

由于一般情况下,对接孔的两个连接手保持闭合状态,所以正常模块和正常模块的对接、分离过程与文献[5]中的原理相同。当正常模块与故障模块分离时,故障模块不能动作,此时只能正常模块的对接孔张开,对接轴的滚珠回落,故障模块的对接轴和正常模块的对接孔松开,如图5所示,为该对接系统的两个模块分离的情况。

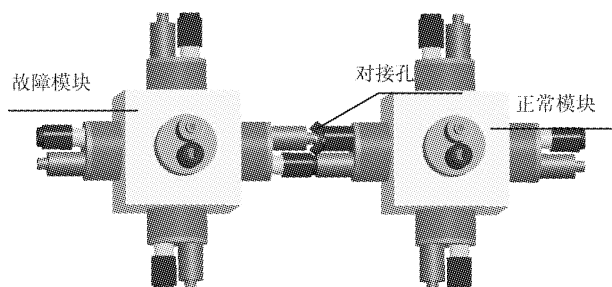


图5 正常模块与故障模块断开的过程

由3个基本模块组成的自重构机器人系统能完成可靠的对接、分离等动作,具有自修复特性,如图6所示。

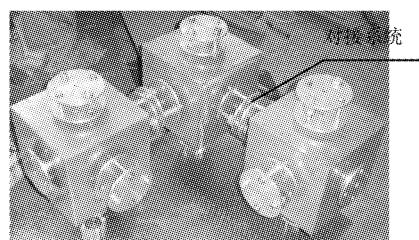


图6 3模块自重构机器人对接系统

3 受力分析和实验

两个模块对接在一起时,受力情况最差的部分

是两个对接的旋转面。对相邻两模块竖直对接时的对接系统进行受力分析,图7所示为单轴孔对接示意图。

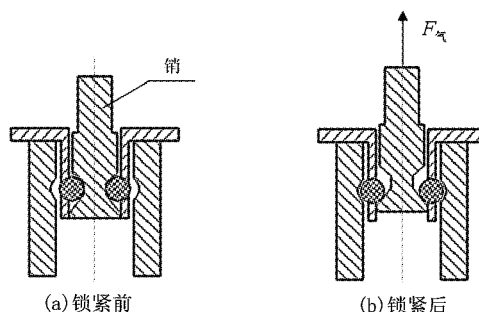


图7 单轴孔对接示意图

销、滚珠和对接孔的受力如图8所示,其中, N 是滚珠施加给销的压力, $F_{气}$ 表示气缸的推力, N' 是销施加给滚珠的压力, $F_{支}$ 是滚珠受到的支持力, $F_{珠}$ 是滚珠给对接孔内壁施加的压力, G 是模块重力, α 表示 $F_{珠}$ 与水平线的夹角, β 表示 N' 与水平线的夹角。图中只画出了一个滚珠的受力情况,销和连接孔

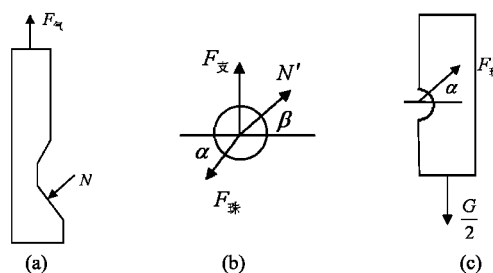


图8 销、滚珠和连接孔的受力原理图

只列出与一个滚珠作用的部分,实际有3个,因此计算时应将相应的力乘以3。经受力分析得出:

$$N' = N \quad (1)$$

$$F'_{珠} = F_{珠} \quad (2)$$

$$F_{气} = 3N\sin\beta \quad (3)$$

$$F_{支} + N'\sin\beta = F_{珠}\sin\alpha \quad (4)$$

$$F_{珠}\cos\alpha = N'\cos\beta \quad (5)$$

$$3F'_{珠}\sin\alpha = \frac{1}{2}G \quad (6)$$

联立以上方程,可得:

$$F_{气} = \frac{\tan\beta}{2\tan\alpha}G, (0 < \alpha < \frac{\pi}{2}) \quad (7)$$

式(4)表明对于本文设计的对接系统,销施加给滚珠的压力 N' 与滚珠受到的支持力 $F_{支}$ 的矢量和等于滚珠给对接孔内壁施加的压力 $F_{珠}$,这表明该对接系统把销施加给滚珠的压力 N' 也用于平衡模块重

力 G 了。对于本文所设计的对接系统,当模块的重量 G 增大时, $F_{\text{珠}}$ 也随着增大,但是由于有 $F_{\text{支}}$ 和 N' 共同来平衡,所以对接的可靠性将比文献[5]中的机构要高。

4 结 论

自重构模块化机器人的对接系统设计是一个非常重要的问题,本文首先详细分析了对接系统的功能和设计要点,针对文献中设计的对接机构不能满足自修复要求及连接可靠性也不高的问题,为 M-Cubes 机器人重新设计了一个新的对接系统。该对接系统采用可伸缩轴和可变孔的配合与锁紧实现模块的连接和分离,由于自修复要求正常模块既可以和正常模块、又可以和故障模块分离与连接,因此,设计了一个可以放大和缩小的对接孔,以及一个通过顶出滚珠来和对接孔锁紧的对接轴。然后,讨论了该对接系统的对接和分离过程,并对锁紧机构进行了受力分析,仿真和实验证实该系统能够满足自修复的要求,连接的可靠性也更高。

参考文献

- [1] Yim M, Duff D G, Roufas K D. PolyBot: a modular reconfigurable robot. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Francisco, CA, USA, 2000. 514-520
- [2] Shen W M, 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] Rus D, Vona M. A physical implementation of the self-reconfiguring crystalline robot. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics & Automation (ICRA), San Francisco, CA, USA, 2000. 1726-1733
- [4] Christensen D J. Evolution of shape-changing and self-repairing control for the ATRON self-reconfigurable robot. In: Proceedings of the 2006 International Conference on Robotic and Automation, Orlando, Florida, USA, 2006. 2539-2545
- [5] 夏平,朱新坚,费燕琼.一种新型的自重构模块机器人.上海交通大学学报,2006,40(3): 431-434
- [6] Fitch R, Rus D, Vona M. A basis for self-repair using crystalline modules. In: Proceedings of the Intelligent Autonomous Systems (IAS-6), Venice, Italy, 2000. 903-910
- [7] 王巍,张厚祥,邓志诚等.基于串并联机构的自重构移动机器人.机械工程学报,2008,44(5):92-101

Design of a novel docking system for the M-Cubes self-repair modular robot

Fei Yanqiong, Zhang Xin

(Research Institute of Robotics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240)

Abstract

The paper proposes a novel docking system of the lattice-type homogeneous self-reconfigurable modular robot, called M-Cubes, and describes its mechanical structure. It mainly consists of extension pegs and expansile holes. In order to finish its self-repairing action, each extension peg and each expansile hole are designed to perform the connection/disconnection among normal modules and normal modules, normal modules and bad modules. So they can finish the self-reconfiguration and keep the whole configuration of the robot. Then, the locked force between two neighboring modules is analyzed in vertical direction. The simulation and experiment show that the docking system can finish the self-repairing action and has a higher feasibility.

Key words: modular, self-reconfiguration, self-repair, docking, robot