

UBot 自重构机器人拓扑描述方法

赵 杰, 唐术锋, 朱延河, 崔馨丹

(哈尔滨工业大学 机器人技术与系统国家重点实验室, 150080 哈尔滨, jzhao@hit.edu.cn)

摘 要: 为准确描述重构过程中自重构机器人的拓扑关系, 提出一种基于关联矩阵的 UBot 自重构机器人拓扑描述方法. 在分析 UBot 自重构机器人系统的模块运动特性的基础上, 建立了重构过程中关节状态表; 对模块间可能存在的连接和方位关系进行分析, 建立了一种二进制数表达法; 以蠕虫构型为例, 建立了其对应的数学拓扑描述矩阵. 该矩阵不仅描述了模块的地址、模块连接状态和方位关系信息, 还准确表达了各个模块的关节角状态信息. 该拓扑描述方法为自重构机器人的构型匹配和重构算法研究提供了一定的理论基础.

关键词: UBot; 模块化; 自重构机器人; 拓扑结构; 关联矩阵

中图分类号: TP242

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2011)01-0046-04

Topological description method of UBot self-reconfigurable robot

ZHAO Jie, TANG Shu-feng, ZHU Yan-he, CUI Xin-dan

(State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, 150080 Harbin, China jzhao@hit.edu.cn)

Abstract: For describing the topology information in the reconfiguration process of self-reconfigurable robot, an UBot self-reconfigurable robot topology description method based on incidence matrix is proposed. At first, a joint state table during the reconfiguration process is built up based on the analysis of the module motion characteristic of UBot self-reconfigurable robot system; and then a binary number representation is developed by analyzing the linkage and position relation that may exist among modules; finally, taking worm configuration as example, the corresponding topology description matrix is obtained, which can describe not only the information of module address, module connection status and position relation, but also the joint angle status information of each module exactly. This topology description method is helpful to the research of configuration matching and reconfiguration algorithm of reconfigurable robot.

Key words: UBot; modular; self-reconfigurable robot; topological structure; incidence matrix

自重构机器人由许多能够与相邻模块连接、分离和通讯的标准模块组成, 能够根据环境和任务需求自主变换为适应的构型. 自 1988 年 Fukuda 等^[1]开发出第一个自重构机器人系统以来, 许多成功的原理样机被研制出来. 典型的系统如国外的 Polybot^[2]、CONRO^[3]、M-TRAN^[4] 和 Super-Bot^[5] 等, 国内上海交大研制的 M-Cube^[6] 和哈工大研制的 HITMSR^[7] 等.

对于自重构机器人系统, 无论是集中式控制还是分布式控制, 准确描述机器人的拓扑结构都

是非常必要的. 计算机网络拓扑描述通常用顶点表示计算机, 以边表示计算机间的连接关系; 但该方法不适用于自重构机器人, 不能准确描述存在 2 个以上连接面和 2 个以上连接方位的系统中模块的连接关系和方位关系. 为更准确的描述自重构机器人系统, Chen 和 Burdick^[8] 采用系统关联矩阵描述动态结构的连接关系, 但不适用于非对称系统; 费燕琼等^[9] 对动态结构的连接种类进行了详细分析; Castano 和 Will^[10] 采用图示法描述多连接面和多方位系统, 但仅能应用于只有 2 个连接面的多方位系统; Lau 等^[11] 采用平面标示图和关联矩阵描述机器人拓扑结构, 适用于多连接面和多方位连接系统; 哈工大张玉华等^[12] 采用相对方位矩阵描述三维自重构机器人模块相对关系

收稿日期: 2009-12-22.

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目 (2006AA04Z220);
国家自然科学基金资助项目 (60705027).

作者简介: 赵 杰(1968—), 男, 教授, 博士生导师.

和模块周围环境。

本文通过对 UBot 系统的模块运动特性、模块间的连接关系和方位关系进行深入分析,提出了一种基于关联矩阵的 UBot 自重构机器人拓扑描述方法。

1 UBot 自重构机器人系统

UBot 系统模块概念模型如图 1 所示,单个模块为正立方体外形,由 2 个 L 形构件(P00 和 P10)与中间直角轴连接而成。每个模块具有 2 个独立的转动自由度(关节 J00 和关节 J10)。构件 P00 和 P10 均可在 $-90^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 内绕着直角轴单独或同时转动,犹如一个万向节,因而称之为 Universal Robot(缩写 UBot)。2 个关节互相影响,单个关节的运动范围在一定条件下会缩小。每个模块具有 4 个连接面(F00, F01, F10 和 F11),均可以实现与相邻模块的连接、断开。

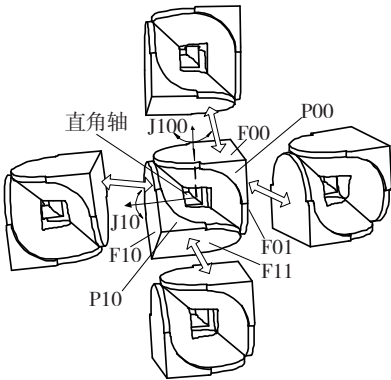


图 1 UBot 模块概念模型

为实现模块间的自动连接或分离,设计了一种主、被动相结合的钩爪式连接机构,可完全嵌入模块内部。根据连接机构的功能,将模块分为主动模块和被动模块,主、被动模块的外形尺寸均为 $80\text{ mm} \times 80\text{ mm} \times 80\text{ mm}$,主动模块的质量为 350 g ;被动模块的质量为 280 g 。图 2 所示为 UBot 主动模块和被动模块照片。



图 2 UBot 主动模块和被动模块

2 模块坐标定义及运动分析

对 UBot 模块坐标定义如下:坐标原点固定于

模块两转动轴在直角轴上的交点上,关节 J00 所在轴线为 Y 轴,关节 J10 所在轴线为 Z 轴,X 轴垂直于关节 Y 轴和 Z 轴,如图 3 所示。2 个转动关节(J00 和 J10)均定义为以关节角所在构件相对于直角轴逆时针转动为正,定义图 3 所示为 2 关节角初始状态($0^{\circ}, 0^{\circ}$),则每个关节角的最大独立运动范围为 $-90^{\circ} \sim +90^{\circ}$ 。

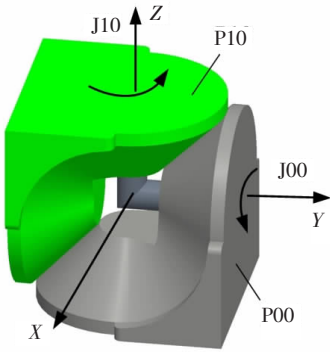


图 3 UBot 模块坐标系及关节运动定义

模块两个关节的角度分别由 A_{00} 和 A_{10} 表示。分析模块的自身结构特点可知,在任何情况 2 个构件都不能同时从零位转向模块的同侧,即模块的关节角必须满足:

$$A_{00} \times A_{10} \geq 0.$$

在机器人构型重构规划过程中,为简化计算,假设各个模块变换后仍保持规则的几何外形(正立方体),则每个关节角只存在 $\{-90^{\circ}, 0^{\circ}, 90^{\circ}\}$ 3 个状态,如果将 90° 定位为一个等级,则对应的值为 $\{-1, 0, 1\}$,为方便描述计算,将每个值均加 2 表示,采用二进制数 $\{01, 10, 11\}$ 对应表示 3 个状态,则根据模块的结构特点分析在重构过程中 2 个关节具有 7 种组合状态,如表 1 所示,其中 A 代表 2 个关节的状态组合值,则 A 应满足:

$$(\lfloor A/4 \rfloor - 2) \times (A \% 4 - 2) \geq 0,$$

其中 $\lfloor A/4 \rfloor$ 表示除后向下取整, $A \% 4$ 表示除后取余数。

表 1 重构过程中 2 个关节角的组合状态表 (°)							
A	0101	0110	1001	1010	1011	1110	1111
A_{00}	-90	-90	0	0	0	90	90
A_{10}	-90	0	-90	0	90	0	90

各状态之间变换关系如图 4 所示,从零位可以通过 2 个关节角的组合运动转换为其他任何一种状态;其中任意一种组合状态都可以直接或者经过其他几种状态间接转变为另一种状态,在实际重构过程中可根据周围环境选择不同的变换路径。

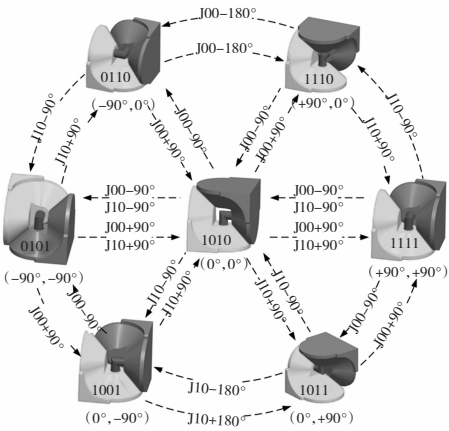


图 4 UBot 自重构机器人模块运动分析

3 模块间连接状态分析

3.1 2 个模块之间存在的连接关系

采用两位二进制数 {00, 01, 10, 11} 对应表示 UBot 模块的 4 个连接面 {F00, F01, F10, F11}. 由于模块的每个连接面都可以与相邻模块的任意连接面连接/断开, 因此 2 个模块连接面之间存在 16 种连接关系, 如图 5 所示. 图中 4 位二进制数表示 2 个模块的连接关系, 例如 1001 表示模块 F10 面与相邻模块的 F01 面连接.

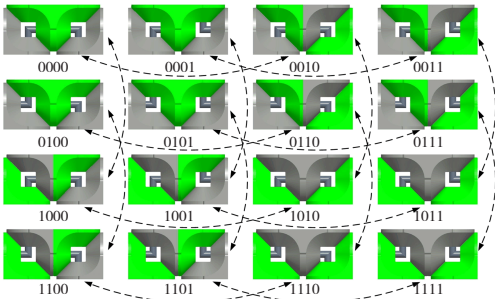


图 5 2 个模块存在的连接关系

由于 UBot 模块具有结构对称性, 根据 2 个模块连接后的功能可以对连接关系进行简化, 如图 5 中功能等价曲线所示, 不考虑 2 个面的方位关系, 可将 16 种模块连接关系简化为 4 类连接关系, 每类包含 4 种.

3.2 连接面之间的方位关系

假设在重构过程中需要保证 2 个相邻模块连接后仍能保持规则的几何外形, 即 2 个连接面所处的包络面仍为正方形. 由于 UBot 模块 4 个连接面的包络面均为正方形, 连接面旋转任意 90° 的整数倍仍为正方形, 因此 2 个连接面间存在 4 种连接方位关系, 如图 6 所示.



图 6 UBot 模块连接面连接方位关系

为能准确描述连接面的 4 种连接方位关系, 且方便计算机计算, 采用 2 位二进制数描述 4 种方位, 即 {00, 01, 10, 11}. UBot 模块采用开关量传感器识别连接面间的方位关系, 如图 7 所示, 在主动连接面和被动连接面上分布有方位识别传感器 A_1 、 A_2 、 P_1 和 P_2 .

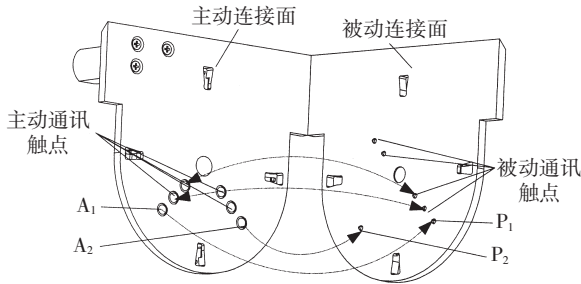


图 7 UBot 模块方位识别系统

模块 2 个连接面存在的 4 种连接方位所对应的传感器状态值如表 2 所示:

表 2 连接面间 4 种连接方位所对应传感器数值

连接方位	A_1	A_2	P_1	P_2
00	0	0	0	0
01	0	0	0	1
10	0	0	1	1
11	0	0	1	0

4 UBot 拓扑描述关系矩阵

4.1 拓扑结构描述内容

对于一个自重构机器人系统, 要准确描述其拓扑结构, 必须能够准确描述以下信息:

- 1) 在拓扑构型中都存在哪 2 个模块相连?
- 2) 相连接的 2 个模块的哪 2 个面相连?
- 3) 相连接的 2 个面以什么方位相连?
- 4) 相连接的 2 个面是相邻还是连接?

模块关节角当前状态直接影响拓扑变换能力, 因此除了上述拓扑内容以外, 还需要能够准确描述各模块的关节状态信息.

4.2 UBot 拓扑结构特点

分析 UBot 系统, 其拓扑结构具有以下特点:

- 1) UBot 模块自身不具有连接关系;
- 2) 2 个相邻模块最多只存在 1 种连接关系;
- 3) 同一模块的 2 个相邻模块不存在连接关系;
- 4) 同 1 个模块最多能同时与 4 个相邻模块具有连接关系;

4.3 UBot 系统关联矩阵的建立

根据 UBot 自重构特点, 由 1 个 $(Nu + 1) \times (Nu + 1)$ 维的关联矩阵描述有 Nu 个模块组成的

UBot 系统,为方便在计算机中描述和计算,采用 8 位二进制表示各种关系. UBot 系统通用拓扑描述关系矩阵如下:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0x01 & 0x02 & \cdots & 0x0n & \cdots & 0xNu \\ 0x01 & D_{0101} & D_{0102} & \cdots & D_{01n} & \cdots & D_{01Nu} \\ 0x02 & D_{0201} & D_{0202} & \cdots & D_{02n} & \cdots & D_{02Nu} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 0x0m & D_{m01} & D_{m02} & \cdots & D_{mn} & \cdots & D_{mNu} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 0xNu & D_{Nu01} & D_{Nu02} & \cdots & D_{Nun} & \cdots & D_{NuNu} \end{bmatrix}$$

关联矩阵中各项 D_{mn} 含义如下:

1) 当 $m = n = 0$ 时,无表达内容,置 0.

2) 当 $\begin{cases} m = 0, \\ 1 \leq n \leq Nu, \end{cases}$ 或 $\begin{cases} 1 \leq m \leq Nu, \\ n = 0, \end{cases}$ 时,表示

UBot 系统中模块的地址信息;虽然组成机器人的模块都是相同的,具有互换性,但为了使关联矩阵与实际物理样机模块对应以实现控制,引入了模块地址信息,在进行拓扑变换和构型分析时可以省略地址信息.

3) 当 $m \neq n, m \geq 1, n \geq 1$ 时,描述模块 m 与模块 n 之间的连接关系. 包括连接的模块由哪 2 个面相连,相连的 2 个面以什么方位相连,连接机构是处于连接还是断开状态,其中 D_{mn} 中各位的含义如表 3 所示.

$$\begin{bmatrix} 0 & 0x01 & 0x02 & 0x03 & 0x04 & 0x05 & 0x06 \\ 0x01 & 00001010 & 00111011 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0x02 & 11001011 & 00001010 & 00111011 & 0 & 0 & 0 \\ 0x03 & 0 & 11001011 & 00001010 & 00111011 & 0 & 0 \\ 0x04 & 0 & 0 & 11001011 & 00001010 & 00111011 & 0 \\ 0x05 & 0 & 0 & 0 & 11001011 & 00001010 & 00111011 \\ 0x06 & 0 & 0 & 0 & 0 & 11001011 & 00001010 \end{bmatrix}$$

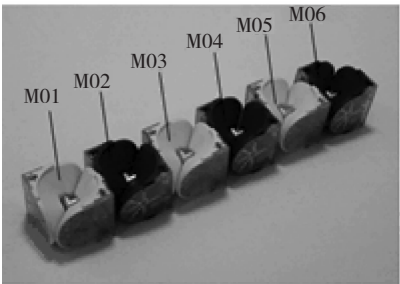


图 8 由 6 个 UBot 模块组成的蠕虫构型

5 结 论

1) 分析了 UBot 系统模块的运动特性,并建立了重构过程中模块关节状态表.

表 3 模块连接关系信息描述表

位	功能	描述
0	有无相邻连接面	0:无相邻连接面;1:有相邻连接面
1	连接机构状态	0:相邻状态;1:连接状态
2:3	连接方位关系	对应 00, 01, 10, 11 4 种状态值
4:5	模块 n 对应的连接面	对应 00, 01, 10, 11 4 种状态值
6:7	模块 m 对应的连接面	对应 00, 01, 10, 11 4 种状态值

4) 当 $m = n \geq 0$ 时, D_{mn} 描述模块 m 关节角状态;包括 2 个关节角 J00 和 J01 的关节标识和关节角度信息,其中 D_{mn} 中各位的含义如表 4 所示.

表 4 模块关节状态信息

位	功能	描述
0:1	关节角度值	对应 01, 10, 11 3 种状态
2:3	关节角度值	对应 01, 10, 11 3 种状态
4	关节标识	0:0:1 位对应关节 J10 值;
		2:3 位对应关节 J00 值;
		1:0:1 位对应关节 J00 值;
		2:3 位对应关节 J10 值;
5:7	无意义	赋 0;

4.4 UBot 机器人构型拓扑描述实例

如图 8 所示,UBot 机器人是一由 6 个模块组成的蠕虫构型,依靠模块上的方位识别系统可以判断出模块的连接方位关系,由模块间的通讯系统可以判断出模块间连接关系,最后通过无线通讯可以将模块间的连接状态、方位关系和地址信息传递给上位机,自动生成该构型的关联矩阵:

2) 分析了模块间可能存在的连接关系和方位关系,并提出相应的表达方法.

3) 提出了一种基于关联矩阵的 UBot 系统拓扑描述方法,对连接状态、方位关系和关节角状态等进行了全面描述,为 UBot 系统的构型匹配和重构算法研究提供了一定理论基础.

参考文献:

[1] FUKUDA T, NAKAGAWA S, Dynamically reconfigurable robotic system [C]//Proceedings of the 1988 IEEE international Conference on Robotics and Automation. Philadelphia: IEEE, 1988: 1581 – 1586.