

串联型模块化机器人重构策略^①

刘开元^{②*} 陈 萌^{**} 费燕琼^{③*}

(* 上海交通大学机器人研究所 上海 200240)

(** 上海宇航系统工程研究所 上海 201108)

摘 要 本文介绍了一种立方形可重构模块化机器人,针对由该模块构成的无环串联多模块机器人系统,提出了拓扑关系矩阵,实现对串联型模块化机器人的拓扑关系的描述。基于拓扑关系矩阵给出了同构构型的判定方法。基于模块的结构特点,分析了模块的运动能力,介绍了姿态调整单元和 L 型位移单元,讨论了模块在 L 型位移单元驱动下可以到达的空间。为实现不同构型的模块链之间的重构,提出了基于辅助模块组的重构策略,证明了不同构型的多模块系统之间在该重构策略下,可实现相互重构的充要条件。基于广度优先搜索算法,提出了最快深度下降法,以驱动辅助模块组不断向目标位置运动,最终实现重构的目的。最后,进行了软件仿真,实现了不同模块链之间的重构,验证了重构理论的正确性。

关键词 串联型;模块化;拓扑矩阵;重构策略;驱动方法

0 引 言

可重构模块化机器人系统由多个基本模块单元组成。由于它能够适应不同工作环境,可重构模块化机器人在行星探测、核电站维修以及危情救援等方面有着巨大的应用前景。自 1988 年第一个可重构模块化机器人问世以来,人们已经提出了 100 种以上的模块化机器人系统^[1],相应的重构策略方面的研究也取得了充分的进展。

FeiliHou 等人^[2]提出了中间构型闭链自重构算法,通过对初始构型和目标构型进行的层和步的匹配,驱动当前构型不断向目标构型改变,并在仿真环境中实现了从蛇形串联构型重构为四足构型的过程^[3]。Klidbary 等人^[4]针对一种新型模块化机器人,分析比较了自适应遗传算法、精英蚂蚁系统、Dijkstra 算法和动态加权 A * 算法、Q 学习算法等在机

器人路径规划方面的应用效果,这对模块化机器人重构过程中路径的选择有很大的帮助。上海交通大学的费燕琼等人^[5]针对 M-Cubes 机器人,根据就近填充的原则,以重心差下降为驱动,规划模块运动至合理的运动空间,实现当前构型向目标空间逐步填充逼近,并结合模块运动的特点对此算法进行了优化。杨振等人^[6]针对模块机器人在系统中由于受到过多约束而难以依靠自身实现重构的问题,将元模型引入到控制策略中,通过减少约束降低自重构的难度。哈尔滨工业大学针对 UBot^[7]模块化机器人系统,提出了基于动态子单元的集中式分层重构策略。该策略将面向特定目标构型的重构转变为面向环境约束下任务引导的自重构变形^[8,9],最终实现构型的改变。天津理工大学针对串联型模块化机器人 M2Sbot,利用模块间最小距离法确定各个单元模块间的断接位置,通过支链间的断接动作序列完成构型重构^[10]。北京航空航天大学研制的 sambot

① 航天基金(USCAST2016-30)资助项目。

② 男,1994 年生,硕士;研究方向:模块化机器人; E-mail: 395996080@sjtu.edu.cn

③ 通信作者, E-mail: fyq@sjtu.edu.cn

(收稿日期:2018-11-15)

机器人,借助模块单元自身的运动能力、模块之间的通信功能,以及模块自主对接功能,可在需要改变拓扑连接关系的地方断开连接,调整位姿,并与指定模块重新连接,从而实现快速重构^[11]。

上述重构策略在重构过程中的每一次运动变化前,均需要对当前构型与目标构型进行整体的对比计算,以确定下一步的运动方案。随模块数量增长,所需判断的运动情况呈指数增长,需要应对的特殊构型迅速增多,不利于重构策略的实际应用。亦或模块单元自身具有强大的移动、通信能力,各个模块在重构过程中,可忽略拓扑关系的制约,但这样的重构方式,无法应用于不具备运动能力的模块化机器人单元上。

针对这些问题,本文针对单个模块不具备运动能力的模块化机器人,将多模块系统的重构问题,分解为单个模块的位移问题,每一步运动规划只需考虑参与运动的模块,极大降低了重构过程的复杂度,可实现无环结构的串联型模块链之间的重构。

1 模块化机器人系统结构

1.1 模块单元

本文介绍了一种无环结构的串联型模块化机器人系统。如图 1 所示,模块为立方体结构,每个面上具有一个连接接口,相对的两个面上接口分别为公头和母头。公头由模块内部驱动机构驱动旋转,配合母头周围均布的 4 个红外定位装置,可实现 90°、180°、270°、360° 的旋转。每个模块共有 3 个自由度。

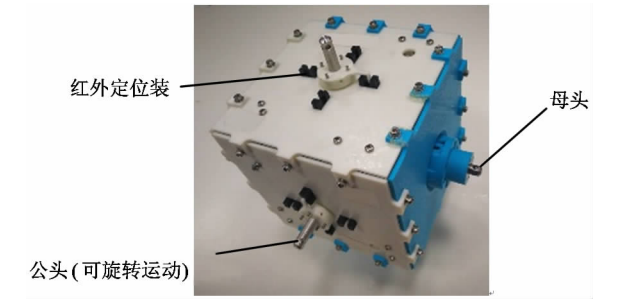


图 1 机器人模块

当两个模块的公头与母头移动到同轴的位置时,推动母头上的套筒,即可实现两个模块的连接。

连接过程见图 2。

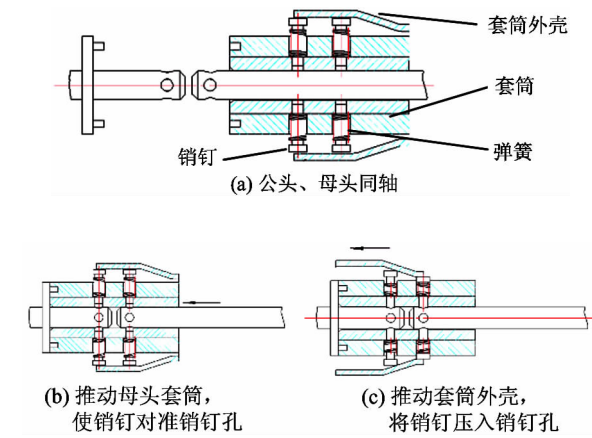


图 2 对接过程示意图

模块的每个公头,在电机驱动下,可提供 5.8 N·m 的扭矩,单个模块重 1.3 kg,模块连接后,质心间距 0.211 m。

1.2 基座装置

由于结构的特殊性,机器人模块需要安装在特殊的基座上,以保证姿态稳定,进而实现各种动作。

基座装置见图 3。基座上均布有母头接口,用于连接、支撑模块,确保模块在基座上保持稳定。为描述方便,本文将基座上的母头接口统称为支座。

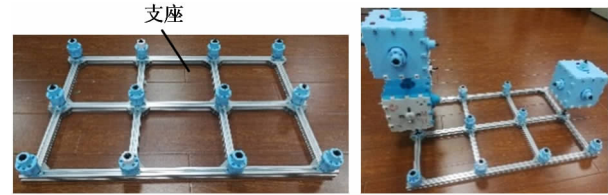


图 3 基座装置

2 模块化机器人的数学描述

2.1 单个模块的数学表达

单个模块的数学表达,是模块化机器人的拓扑关系描述及重构策略分析的基础。对于一个含有 n 个模块的多模块系统,将各个模块编号为 $i, i=0, 1, 2, \dots, n-1$ 。根据模块的结构特点,如图 4,以模块中心为原点 O_i ,母头轴线为 x, y, z 轴,母头外侧为正方向,按右手定则确定模块的局部组表系 Σ_i 。并给模块的 6 个面进行编号,其中, x 轴正、负方向所

指面分别为1号面和4号面, y 轴正、负方向所指面分别为2号面和5号面, z 轴正、负方向所指面分别为3号面和6号面。

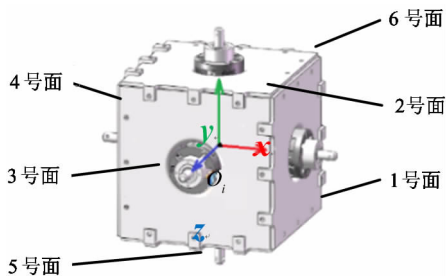


图4 模块局部坐标系

同时,建立全局坐标系 Σ 。如图5,将模块与基座左上角第一个支座相连接,则该模块质心所在点即 Σ 为原点 O ,沿基座两个邻边及基座平面的法线方向,按照右手定则建立全局坐标系 Σ 。

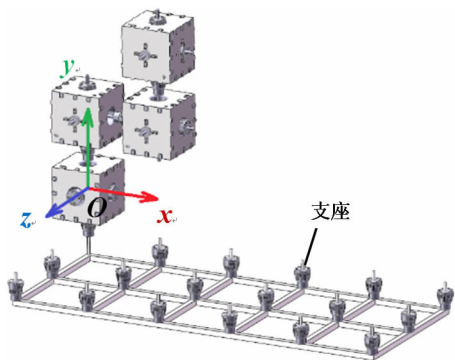


图5 全局坐标系

则多模块系统中编号为 i 的模块在全局坐标系中可用一个列向量描述

$$\mathbf{L}_i[12] = [\mathbf{L}_{i,0}, \mathbf{L}_{i,1}, \mathbf{L}_{i,2}, \dots, \mathbf{L}_{i,11}]^T \quad (1)$$

其中, $\mathbf{L}_{i,0}, \mathbf{L}_{i,1}, \mathbf{L}_{i,2}$ 为模块局部坐标系 Σ_i 在全局坐标系 Σ 中的坐标,由于各模块间距相等,可将这一长度单位化为1,以方便后续计算, $\mathbf{L}_{i,3}, \mathbf{L}_{i,4}, \mathbf{L}_{i,5}$ 为 Σ_i 在 Σ 中的欧拉角,因此,这6个量表明了模块的位姿信息; $\mathbf{L}_{i,6}, \mathbf{L}_{i,7}, \mathbf{L}_{i,8}, \mathbf{L}_{i,9}, \mathbf{L}_{i,10}, \mathbf{L}_{i,11}$ 表示 i 号模块1~6号面连接状态,取值如下:

$$\mathbf{L}_{i,j} = \begin{cases} k & i \text{ 号模块 } j \text{ 面与 } k \text{ 号模块相连} \\ -1 & i \text{ 号模块 } j \text{ 面与基座相连} \\ -2 & i \text{ 号模块 } j \text{ 面无连接} \end{cases} \quad (2)$$

由于公头为对称结构,不管处在集合 $\{90^\circ, 180^\circ, 270^\circ, 360^\circ\}$ 中的何种位置,均可实现与母头的连接。故公头的绝对位置对于模块的状态描述不是必须的。

综上,列向量 $\mathbf{L}_i[12]$ 可以完全确定 i 号模块在 Σ 中的状态信息,称该向量为 i 号模块的特征向量。

2.2 多模块系统拓扑关系表达

本文仅讨论无环结构的串联型模块化机器人系统,这样的机器人系统表现为一个一个的模块链形式。对于一个有 n 个模块的模块链结构,将各模块的特征向量按照模块编号排列,即可组成一个 $n \times 12$ 的拓扑关系矩阵 $\mathbf{C}_R$:

$$\mathbf{C}_R = [\mathbf{L}_0, \mathbf{L}_1, \mathbf{L}_2, \dots, \mathbf{L}_{n-1}] \quad (3)$$

该矩阵可以完全确定该多模块系统在全局坐标中的位姿信息及连接关系。

为方便不同模块链的信息对比,对模块编号进行如下规定:在模块链中,从与基座相连的模块到模块链末端的模块,模块编号依次为 $0, 1, \dots, n-1$ 。

则对于图5所示的模块链,可以用式(4)所示拓扑关系矩阵表示:

$$\mathbf{C}_R = \begin{bmatrix} 0, 0, 0, 0, 0, 0, -2, 1, -2, -2, -2, -1 \\ 0, 1, 0, 0, 90, 0, -2, -2, 2, -2, -2, 0 \\ 1, 1, 0, 0, 90, 0, -2, 3, -2, -2, -2, 1 \\ 1, 2, 0, 0, 180, 0, -2, -2, -2, -2, -2, 2 \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

2.3 同构构型判断

对于2个拓扑关系相同的模块链,由于公头旋转角度的不同,模块链可以呈现出不同的形态,拓扑矩阵也会随之改变。因此,在重构过程中,需要判断当前构型是否与目标构型同构,以确定重构过程是否已经完成。

根据2.1节模块特征向量中各个元素的含义,每个特征向量中的元素 $\mathbf{L}_{i,6} \sim \mathbf{L}_{i,11}$ 完全表达了模块的拓扑关系信息,且模块链中0号模块的坐标位置不会因公头旋转角度变化而变化。因此,对于两个含有 n 个模块的构型 R 与构型 L ,若同构,则满足式(5):

$$\begin{cases} \mathbf{C}_R[0][i] = \mathbf{C}_L[0][i] \\ \mathbf{C}_R[j][k] = \mathbf{C}_L[j][k] \end{cases} \quad (5)$$

式中, $i=0,1,2; j=0,1,\cdots,n-1; k=6,7,\cdots,11$ 。

3 模块基本运动

3.1 模块的运动单元

如图 6(a), 由于单个模块只能实现公头的旋转, 故一个模块无法实现位姿改变。

如图 6(b), 当 2 个模块相连, 运动模块可在固定模块的驱动下实现姿态改变, 称这种结构为姿态调整单元。同样, 基座上的每一个支座均可视为一个固定的模块单元, 其与模块可构成姿态调整单元。

如图 6(c), 当 3 个模块组成 L 型结构, 保持固定模块静止, 当传递模块自旋时, 即可实现运动模块的位移, 称这种结构为 L 型位移单元。同样, 以支座为固定模块, 1 个支座与 2 个模块也可构成 L 型位移单元。

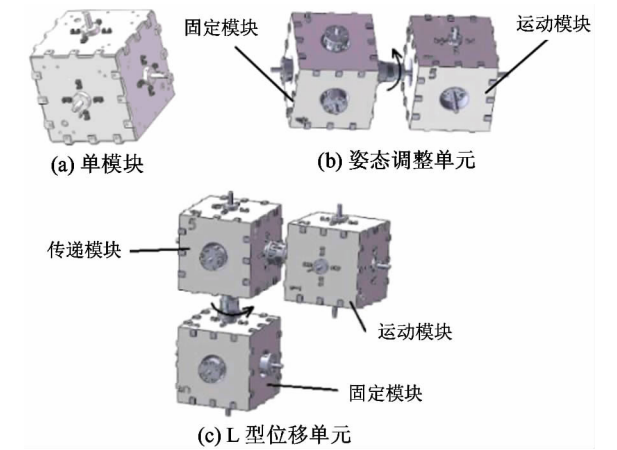


图 6 模块的运动单元

3.2 模块的运动空间

L 型位移单元是模块移动最简单的结构。故仅分析运动模块在 L 型位移单元驱动下的运动空间。

当旋转轴分别平行于 X 轴、 Y 轴、 Z 轴时, 运动模块会在 $Y-Z$ 平面、 $Z-X$ 平面、 $X-Y$ 平面实现位移。图 7 中, 以俯视图的形式对 $Z-X$ 平面中存在的运动情况进行分析, 其他平面内运动相同。其中, 障碍模块为处在运动模块运动路径上的模块, 半透明处为运动模块可到达的位置。记图 7 中运动模块的坐标为 (x, y, z) 。

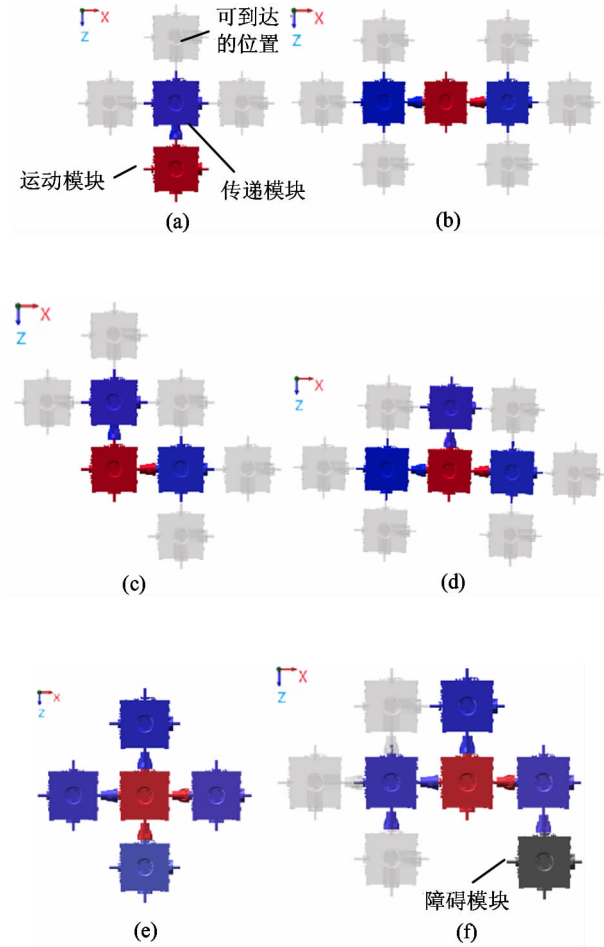


图 7 模块的运动空间

当运动模块与周围模块组成一个 L 型位移单元时, 其可达位置坐标值为 $(x-1, y, z+1), (x+1, y, z+1), (x, y, z+2)$; 见图 7(a)。

当运动模块与周围模块组成两个 L 型位移单元时, 根据传递模块的分布情况, 其可达位置坐标值为 $(x-2, y, z), (x-1, y, z+1), (x-1, y, z-1), (x+2, y, z), (x+1, y, z+1), (x+1, y, z-1)$, 见图 7(b) 或 $(x, y, z+2), (x-1, y, z+1), (x+1, y, z+1), (x+2, y, z), (x+1, y, z+1), (x+1, y, z-1)$, 见图 7(c)。

当运动模块与周围模块组成 3 个 L 形运动单元时, 其可达位置坐标值为 $(x-2, y, z), (x-1, y, z+1), (x-1, y, z-1), (x+2, y, z), (x+1, y, z+1), (x+1, y, z-1)$, 见图 7(d)。

当运动模块与周围模块组成 4 个 L 形运动单元时, 该模块失去了运动能力, 见图 7(e)。

此外, 在运动路径上的障碍物模块也会影响

运动模块的可达空间,造成可达空间的缩小,见图7(f)。

3.3 模块的运动约束

对于L型位移单元中的运动模块,位移前后的位置关系存在一定的约束关系。如图8,将运动模块所在的位移平面按照黑白相间的规律划分为棋盘形式,每个格子刚好包容下一个模块,则运动模块在位移前后始终处于相同颜色的格子内。称模块在L型位移单元的驱动下实现的位移运动符合棋盘规则。

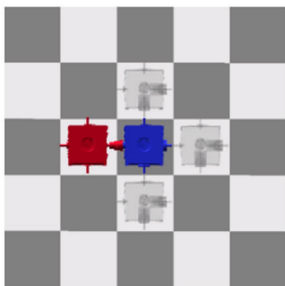


图8 模块局部坐标系

记运动模块初始位置坐标为 (x, y, z) ,运动后坐标为 (x', y', z') ,则模块在位移前后的坐标差值满足等式:

$$x - x' + y - y' + z - z' = 2d \quad (6)$$

其中, (x, y, z) 和 (x', y', z') 为模块位移前后的坐标, d 为整数。

4 重构策略的研究

4.1 基于辅助模块组的重构策略

根据第3节的分析可知,由于本文所述机器人模块自身不具有变形能力,只有当系统中存在L型位移单元时,相应的运动模块才能实现位移调整,进而实现模块化机器人的变形重构。比如,图9所示由4个模块构成的链状结构,由于缺少L型位移单元,无法实现变形,因而无法重构为其他结构或由其他结构重构为该构型。

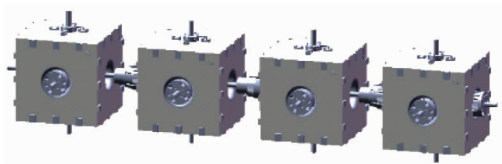


图9 无L型位移单元的模块链

为确保所有可能的串联构型均可实现重构,本文从系统的角度出发,提出了辅助模块组的概念。

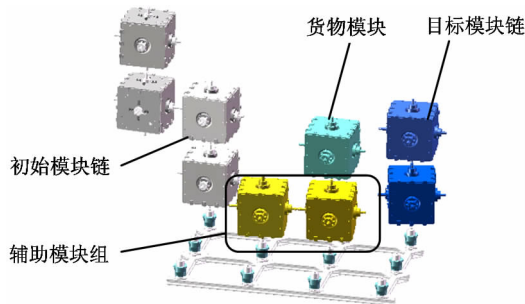


图10 辅助模块组

图10中,组成辅助模块组的2个模块单元,可交替作为运动模块和传递模块,以任意相邻的模块或是支座作为固定模块,组成L型位移单元,实现辅助模块组的移动。辅助模块组可连接1个模块作为货物模块。在辅助模块组交替移动的过程中,将货物模块运送至目标位置。当传递模块与固定模块连接接口不符时,辅助模块组可组成姿态调整单元,调整传递模块的姿态,确保传递模块与固定模块顺利连接,从而构成L型位移单元。

这样,辅助模块组就可以移动到初始模块链或目标模块链的末端,将货物模块从初始模块链上取下或安装到目标模块链末端。

当初始模块链上所有模块均被搬运到指定位置时,原构型即重构为目标构型。

由于模块转动速度慢,可仅考虑静力学问题,根据1.1节列出的模块参数:

$$N = T/(mgl) = 2.15 \quad (7)$$

在重力条件下,单个模块可驱动2个模块旋转运动,模块的驱动能力满足辅助模块组运动要求。

4.2 可重构性判断

为完成不同构型的重构,首先要判断2个构型是否能够重构。即便拥有了辅助模块组,也并不能保证2个串联构型可实现相互重构转换。对于给定的2个含有 n 个模块的串联构型的拓扑矩阵,可以得到2个构型中各模块的坐标值 (x_i, y_i, z_i) , (x'_i, y'_i, z'_i) ,其中 $i = 0, 1, 2, \dots, n-1$ 。则两构型可互相重构的充要条件是

$$\sum_0^{n-1} (x_i - x'_i + y_i - y'_i + z_i - z'_i) = 2d,$$

$$(d \text{ 为整数}) \quad (8)$$

判断方法证明如下。

必要性:

若模块链 A 与模块链 B 可相互重构,则模块链 A 中任一模块 $i(i=0,1,\dots,n-1)$ 均可经过辅助模块组转移至模块链 B 中的某一位置,记该模块链 A 中的模块 i 在模块链 B 中的编号为 $j, j=0,1,\dots,n-1$,则由式(6)知:

$$x_i - x_j + y_i - y_j + z_i - z_j = 2d_i, \\ (i, j=0,1,\dots,n-1, d_i \text{ 为整数}) \quad (9)$$

累加上式,即可得:

$$\sum_0^{n-1} (x_i + y_i + z_i) - \sum_0^{n-1} (x_j + y_j + z_j) = \\ 2 \sum_0^{n-1} d_i = \sum_0^{n-1} (x_i - x'_i + y_i - y'_i + z_i - z'_i) = 2d, \\ (d \text{ 为整数}) \quad (10)$$

充分性:

(1) 当 $n=1$ 时,

$$x_i - x'_i + y_i - y'_i + z_i - z'_i = 2d, \\ (d \text{ 为整数}) \quad (11)$$

满足式(6),故 A,B 链可重构;

(2) 设当 $n=k$ 时,若:

$$\sum_0^{k-1} (x_i - x'_i + y_i - y'_i + z_i - z'_i) = d_k, \\ (d_k \text{ 为整数}) \quad (12)$$

则 A,B 链可重构;

(3) 当 $n=k+1$ 时,有:

$$\sum_0^k (x_i - x'_i + y_i - y'_i + z_i - z'_i) = \\ 2d_{k+1} = 2d_k + 2(d_{k+1} - d_k) = \\ \sum_0^{k-1} (x_i - x'_i + y_i - y'_i + z_i - z'_i) + \\ (x_k - x'_k + y_k - y'_k + z_k - z'_k). \quad (13)$$

则可将上式拆分为 2 部分:

$$\begin{cases} \sum_0^{k-1} (x_i - x'_i + y_i - y'_i + z_i - z'_i) = d_k, \\ x_k - x'_k + y_k - y'_k + z_k - z'_k = 2(d_{k+1} - d_k) \end{cases} \\ (d_k, d_{k+1} \text{ 为整数}) \quad (14)$$

即为 $n=1$ 和 $n=k$ 的组合情况,2 部分均可通过辅助模块组实现重构,故 $n=k+1$ 时,满足上式的模块链可实现相互重构。必要性得证。

4.3 变形驱动策略

根据 4.1 节介绍,串联型模块链的重构过程可

以分解为多次单个模块的移动过程。辅助模块组移动到初始模块链末端,从初始模块链末端取下货物模块,将货物模块运送到目标模块链末端,将货物模块连接到目标模块链的末端。当所有模块完成了这一过程,初始模块链即重构为目标构型。这个重构过程中,初始模块链与目标模块链呈现此消彼长的状态。

为驱动辅助模块组向目标位置移动,本文提出了最快深度下降法驱动策略。

定义当前模块与目标模块之间连接路径上最小模块、支座数量为当前模块的深度。如图 11,以模块链末端模块为起点,标记起点处深度为 0,采用广度优先搜索算法,遍历系统中所有模块及支座。与 0 深度相连接的模块、支座,标记深度为 1,然后,与深度 1 相连接的且尚未标记深度的模块、支座,标记深度为 2,依次类推,直至所有模块、支座遍历完毕并被标记深度。

这样,任意模块、支座相对目标坐标的深度值会严格按照模块链的延伸方向递减,深度值越小,说明模块沿模块链伸展方向距离目标点越近。当深度值为 0 时,说明模块已到达目标坐标点。

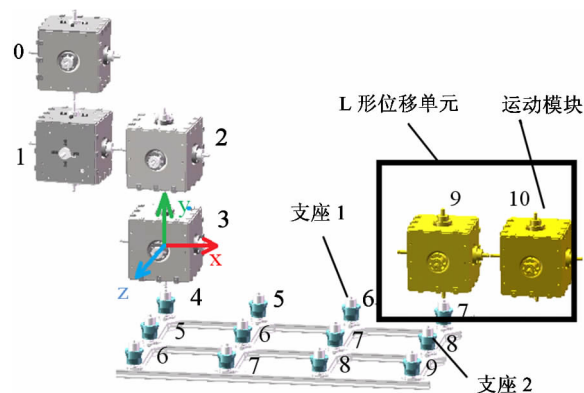


图 11 相对深度

对于 L 型位移单元,记 T 为运动模块移动后可能的坐标值集合, D_t 为与坐标 t 相邻的所有模块及支座的深度值集合,其中 $t \in T$,则运动模块移动后,距目标坐标点的最小深度值为

$$d_{\min} = \min(\min(D_t)) + 1, t \in T \quad (15)$$

$d_{\min}$ 对应的坐标值 t ,即为此次移动中,运动模块的最优目标位置。如图 11,辅助模块与支座构成

L 形位移单元,运动模块在该 L 形位移单元驱动下,可到达的坐标集合为

$$T = \{(3, 0, -1), (3, 0, 1), (2, 0, 0)\}, \quad (16)$$

$$d_{\min} = \min(\min(9), \min(9, 8), \min(9, 6)) + 1 = 7 \quad (17)$$

当取得最小值时,运动模块的目标位置坐标为(2,0,0),即为一次位移中,目标模块的最优目标位置, $d_{\min}$ 即为此次位移后,运动模块的深度值。

根据 3.2 节的分析,L 型位移单元的每一次运动,最多只有 3 种可能情况,故所需计算资源很小。

5 算法仿真实现

本文通过计算机仿真验证上述重构算法的可行性。为详尽体现模块的运动细节,借助可视化工具函数库 VTK 进行重构过程的仿真。图 12 展示了仿真环境中,从位于基座左端初始模块链(图 12(a)),重构为倒 L 形和 I 形两个目标模块链(图 12(f))的过程。

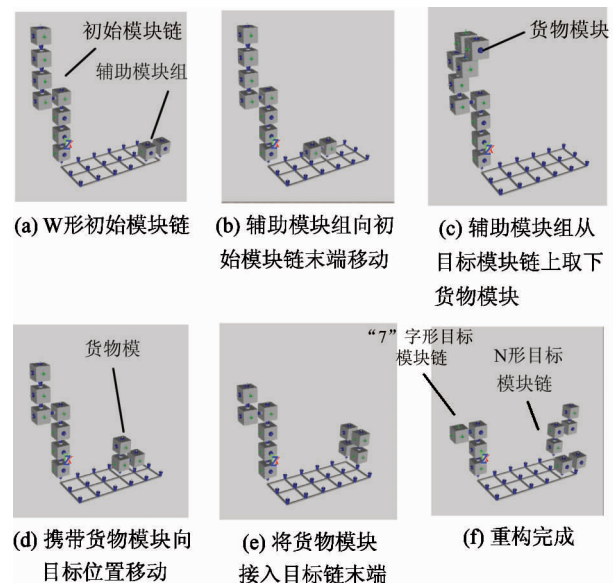


图 12 单模块链重构为两模块链

其中,图 12(b)表示了辅助模块组与固定模块或支座组成 L 型位移单元,和向初始模块链末端移动的过程;图 12(c)表示了辅助模块组从初始模块链末端取下货物模块的过程;图 12(d)表示了辅助

模块组与固定模块或支座组成 L 型位移单元,将货物模块搬运至目标模块链末端的过程;图 12(e)表示了辅助模块组向目标模块链末端连接货物模块的过程。

重复图 12(b) ~ 图 12(e)的过程,当初始模块链上所有模块均搬运至目标模块链中后,即实现了初始构型(图 12(a))向目标构型(图 12(f))的重构。

6 结 论

本文介绍了一种立方体可重构机器人,针对机器人模块的结构特点,定义了包含有多模块系统完整位姿和拓扑关系信息的拓扑矩阵。

基于机器人模块的运动能力,分析了模块化可重构机器人的基本运动单元和运动空间,定义了“棋盘规则”以表示机器人模块位移前后满足的数学关系。为实现不同构型的模块链之间的重构,提出了基于辅助模块组的重构策略。基于棋盘规则,提出并证明了不同构型可相互重构的充要条件。最后,基于广度优先搜索算法,提出了最快深度下降法,以驱动辅助模块组不断向目标位置运动,最终实现重构的目的。

基于本文所提出的理论,进行了软件仿真,实现了不同模块链之间的重构,验证了理论的正确性。

参考文献

- [1] 王晓露. 模块化机器人协调运动规划与运动能力进化研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学机电工程学院, 2016
- [2] Hou F, Shen W M. On the complexity of optimal reconfiguration planning for modular reconfigurable robots[C] // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Alaska, USA, 2010: 2791-2796
- [3] Hou F, Shen W M. Graph-based optimal reconfiguration planning for self-reconfigurable robots[J]. *Robotics & Autonomous Systems*, 2014, 62(7): 1047-1059
- [4] Klidbary S H, Shouraki S B, Kourabbaslou S S. Path planning of modular robots on various terrains using Q-learning versus optimization algorithms[J]. *Intelligent*

Service Robotics, 2017, 10(2):121-136

[5] 费燕琼, 张鑫, 夏振兴. 自重构模块化机器人的运动空间及自变形算法[J]. 机械工程学报, 2009,45(3): 197-202

[6] Yang Z, Wu Y, Fu Z, et al. A unit-compressible modular robotic system and its self-configuration strategy using meta-module[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2018, 49:39-53

[7] 任宗伟, 庞明, 朱延河. 自重构机器人重构运动规划策略研究[J]. 华中科技大学学报, 2011,39(4):10-14

[8] 任宗伟, 朱延河, 赵杰, 等. 基于“风车”形子单元的自

重构机器人运动及自重构规划[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2009, 30(4): 436-440

[9] 赵杰, 唐术锋, 朱延河, 等. UBot 自重构机器人拓扑描述方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(1): 46-49

[10] 曹彦彬, 孙雪艳, 葛为民, 等. 基于拓扑结构的自重构模块化机器人重构策略的研究[J]. 天津理工大学学报, 2015(5):24-29

[11] 魏洪兴, 李海源. 空间探测自组装群体模块化机器人[J]. 航天器工程, 2011, 20(4):72-78

Reconfiguration strategy of series modular robot

Liu Kaiyuan^{*}, Chen Meng^{**}, Fei Yanqiong^{*}

(^{*} Robotics Institute, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240)

(^{**} Institute of Aerospace System Engineering, Shanghai 201108)

Abstract

This paper briefly introduces the structural characteristics of a cubic reconfigurable modular robot. And we define eigenvector to describe a single module mathematic. Furthermore, an adjacency matrix to describe the posture information and topological relation of the multi-module chain is proposed. Because the module is not completely symmetrical, the same configuration will present different forms. That is isomorphism. For this reason, with the help of adjacency matrix, the decision method of the isomorphic configuration is proposed in this paper. Based on the structure characteristics of the module, the motion capability of the module is analyzed. The posture adjustment unit and the L-shaped unit are introduced. In order to achieve reconfiguration among different configurations, a strategy based on auxiliary module group is proposed. And it is proved what conditions that the multi-module systems with different configurations can realize mutual reconfiguration with this reconstruction strategy are required. Based on the broad-first algorithm, the fastest depth descent method is proposed to drive the auxiliary module group to move to the target position one by one, and make sure the purpose of reconfiguration will be realized. Finally, based on the theory proposed in this paper, the software simulation is carried out, and the reconfiguration between different multi-module chains is realized, which verifies the correctness of the theory.

Key words: series, modular, adjacency matrix, reconfiguration strategy, driving method