

引文格式: 郭茜, 刘金国, 冯靖凯. 多链可重构模块化机器人的构型转换[J]. 航空制造技术, 2023, 66(12): 94-102.

GUO Qian, LIU Jinguo, FENG Jingkai. Configuration transformation of multi-chain reconfigurable modular space robots[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(12): 94-102.

多链可重构模块化机器人的构型转换*

郭茜^{1,2}, 刘金国², 冯靖凯²

(1. 沈阳化工大学, 沈阳 110142;

2. 中国科学院沈阳自动化研究所, 沈阳 110016)

[摘要] 可变形指尖陀螺是一种流行的玩具, 其多链、可变形的优点为空间机器人提供了一种方案。以此玩具为启发, 结合链型机器人灵活多变的特点, 引入了多链可重构模块化机器人。以构型分析及构型转换策略为重点对多链可重构模块化机器人的拓扑构型展开研究, 使其改变拓扑构型来适应不同任务。首先, 结合整数拆分及排列组合, 建立了适用于正六边形基座的模块化机器人基本非同构构型库, 提出了一种非同构构型枚举算法, 该算法表明非同构构型数随模块数的增加呈指数型增长; 其次, 以构型转换为核心, 定义了基于结构特征的等价关系库, 设计了一种构型匹配的重构策略来完成构型间的最优匹配与转换; 最后, 通过演示与仿真, 验证了重构策略的有效性。

关键词: 可重构; 模块化机器人; 链型; 构型枚举; 构型转换

Configuration Transformation of Multi-Chain Reconfigurable Modular Space Robots

GUO Qian^{1,2}, LIU Jinguo², FENG Jingkai²

(1. Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 110142, China;

2. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

[ABSTRACT] Deformable fidget spinner is a popular toy, and its multi-chain and deformable advantages provide a solution for space robots. Inspired by this toy, this paper introduces a multi-chain reconfigurable modular robot by combining the flexible and versatile characteristics of chain robots. Topological configurations of multi-chain reconfigurable modular robots are investigated with a focus on configuration analysis and configuration transformation strategies, enabling them to change their topological configurations to suit different tasks. Firstly, combined with integer splitting and permutations, a library of basic non-isomorphic configurations for modular robots with positive hexagonal bases is established, and a non-isomorphic configuration enumeration algorithm is proposed, which shows that the number of non-isomorphic configurations grows exponentially with the number of modules. Secondly, a configuration matching reconfiguration strategy is designed to optimally match and convert between configurations by defining a library of equivalence relations based on structural features, with configuration conversion as the core. Finally, the effectiveness of the reconfiguration strategy is verified through demonstration and simulation.

Keywords: Reconfigurable; Modular robot; Chain type; Configuration enumeration; Configuration transformation

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.12.094

空间机器人技术被认为是最有前途的在轨服务任务方法之一。在轨维修、组装、救援、探测与燃料加注等任务复杂多样, 并且处于极端、恶劣太空环境中, 需要一

个能够处理难以预知情况的机器人系统, 来完成动态多样的空间在轨服务任务^[1]。与传统构型单一的机器人相比, 可重构模块化机器人能够通过单元模块间的重

* 基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1304600); 中国科学院交叉创新团队(JCTD-2018-11); 机器人学国家重点实验室项目(Y91Z0303)。

组、拆分实现构型的重构,构成功能各异的机器人,在任务适应性、功能扩展性和容错与自修复等方面具有显著的优势^[2-3]。根据可重构机器人模块的几何构型,可以将其分为三种类型:晶格型、链型和混合型^[4]。

晶格型机器人的模块在3D空间中呈规则分布,如Telecube^[5]、Molecube^[6]、M-Block^[7]、LDSBot^[8]。链型机器人以串联方式相连接,如PolyBot^[9]、AMOEBAl^[10]、NAR^[11]、ChainFORM^[12]、Rubik^[13]。混合型机器人能够形成晶格型或链型,如CoSMO^[14]、MyMod^[15]、Freebot^[16]。相比之下,链型机器人接口较少,具有改变其形态的高通用性,通过重新配置单元模块可以构成单链、双链和多链结构来完成不同种类的任务,如RBR^[17],因此链型可重构机器人更适用于空间在轨服务。由于多链模块化机器人拓扑构型多变,对构型分析及构型转换带来了更多的挑战。

链型可重构机器人的构型空间随模块数量的增加呈指数增长,非同构构型枚举是其构型分析的前提。Liu等^[18]提出了一种组合计数原理的递归算法进行非同构构型枚举,以正方体单元模块的可重构模块化机器人系统展开分析。Liu等^[13]专注于构型分析,并以链型Rubik的模块实现重构试验。Feng等^[11]以正构烷烃为灵感提出了一种链型可重构模块化机器人,基于全互联几何特征的方法进行非同构构型枚举并给出判断算法。针对链型可重构机器人的构型转换,Yim等^[9]迭代了几代PolyBot,提出了分层与分步的重构规划,完成了蛇形构型向四足构型的转换。Castano等^[19]在激素生物学概念的基础上,提出了一种自适应通信和分布式控制策略来执行CONRO可重构机器人的运动与构型转换。Hou等^[20]提出了一种有效的估计最优解上下界的方法,对链型模块化机器人的最优构型转换规划进行了深入的复杂性分析。在构型分析的基础上,链型可重构机器人的重构能力由重构策略来决定,链型模块在运动与连接上摆脱了晶格的约束,并在链运动空间范围内,通过链间简单的对接、断开即可得到多种构型,因此需要一个有效的重构策略来完成重构。

本研究以玩具——变形指尖陀螺为灵感,结合链型可重构机器人模块的特点,提出了一种构型枚举方法对构型进行分析,适用于以正六边形为基座模块的多链模块化机器人。并结合模块的结构特性,建立构型同构库,基于构型最优匹配策略完成构型转换,来解决多链模块化机器人的构型转换问题。

1 可重构机器人的拓扑描述

变形指尖陀螺有6条链,每条链由同质类模块通过正交关节轴连接而成,如图1所示,利用模块之间连接、

断开来完成初始构型到目标构型的转换。以此玩具模型为灵感,通过重新配置模块改变拓扑构型,基于正六边形基座的多链模块化机器人拓扑构型展开研究。

1.1 模块拓扑描述

可重构机器人的各个支链的模块数使其形态不同。因此,对可重构机器人系统进行全局拓扑描述是其构型分析与重构策略研究的前提条件。可重构机器人的拓扑描述必须能够清楚地表达模块的数量、模块之间连接关系和模块在构型中的相对位置。

基座模块 v_0 在平面中为正六边形,如图2(a)所示。 $L=[L_1 L_2 L_3 L_4 L_5 L_6]$ 表示基座模块各个边上的位置索引,其中, L_1 、 L_3 、 L_5 被规定为主动连接器, L_2 、 L_4 、 L_6 被规定为被动连接器。 $W=[w_1 w_2 w_3 w_4 w_5 w_6]$ 矩阵中的各列分别表示 $L_1 \sim L_6$ 各个边所连接的模块数量。单元模块 v_i ($i>0$)为同质类柱状关节,每个关节两端的连接器不同,分别为主动连接器 t_1 与被动连接器 t_2 ,在平面拓扑结构中,单元模块被表示为长方形,如图2(b)所示。

1.2 构型拓扑描述

模块之间一共具有3种连接方式,分别为:单元模块的被动连接器与基座模块的主动连接器连接;单元模块的主动连接器与基座模块的被动连接器连接;单元模块之间的相互连接。依据这3种连接方式,并结合图论的相关知识,各个模块被看作为带有连接信息的节点,模块之间的连接信息被看作为边,将基座模块看作为中心节点。

$$V=[v_0 v_1 \cdots v_{n-1}] \quad (1)$$

式中,矩阵 V 为模块所对应的逻辑地址; v_0 为基座模块;

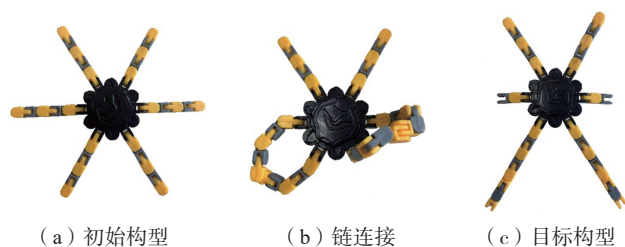


图1 玩具模型方案图

Fig.1 Schematic diagram of toy model

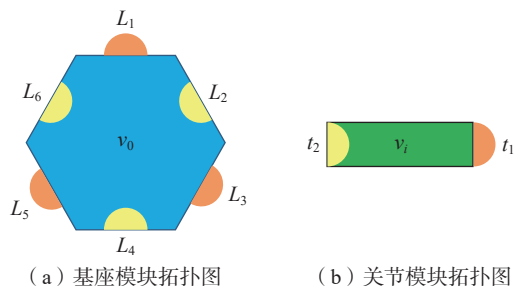


图2 模块拓扑图

Fig.2 Topology description diagram

$v_1 \sim v_{n-1}$ 为单元模块。

$$T = \begin{matrix} & e_1 & e_2 & e_3 & e_4 \\ v_0 & \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1m} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2m} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \cdots & c_{nm} \end{bmatrix} \\ v_1 & \\ \vdots & \\ v_{n-1} & \end{matrix} \quad (2)$$

式中, T 为初始构型矩阵的连接边与连接面的信息连接矩阵; e_i 为模块 i 与模块 $i-1$ 之间的矢量关系; c_{ij} 表示各个模块之间的连接状态; c_{ij} 的取值如下:

$$c_{ij} = \begin{cases} 2 & e_j \text{ 的尾与 } v_0 \text{ 的主动连接器相连} \\ -2 & e_j \text{ 的头与 } v_0 \text{ 的被动连接器相连} \\ 1 & v_{i-1} \text{ 是边 } e_j \text{ 的头, } i > 1 \\ -1 & v_{i-1} \text{ 是边 } e_j \text{ 的尾, } i > 1 \\ 0 & e_j \text{ 的头尾都与 } v_{i-1} \text{ 不相连, } i > 1 \end{cases}$$

2 构型枚举

构型枚举主要是对机器人非同构构型进行列举,在本章节中,基于图论的思想来讨论 n ($n > 0$) 个模块可以组成多少种非同构拓扑构型,分为三步来研究,第一步进行整数拆分,将 n 个模块拆分成 k ($k > 0$) 条链;第二步讨论 k 条链在正六边形的结构上有多少种不同排列组合方式,通过全排列、圆排列得到链的所有组合方式,利用正六边形的结构特性与置换群理论对所有组合方式进行去重;第三步将前两步得到的结果进行整合,得到模块数所对应的非同构构型数以及相应的算法耗时,具体讨论如下。

(1) 将 n 个模块拆分成 k 条链 ($k > 0$), 利用母函数法进行无序整数拆分。

$$G(x) = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + \cdots + a_n \cdot x^n \quad (3)$$

$$G(x) = (1 + x + x^2 + x^3 + \cdots + x^n)(1 + x^2 + x^4 + \cdots + x^n)$$

$$\cdots (1 + x^n) = \sum_{i=0}^{\infty} (a_i \cdot x^i) \quad (4)$$

$$x^a \cdot x^b = x^{a+b} \quad (5)$$

式(3)为序列 $(a_0, a_1, a_2, \cdots, a_n)$ 的母函数。对于从 1 到 n 的所有可能组合结果可以用式(4)表示,式(4)展开后,满足式(5),故 x^i 就表示了 i 的划分, a_n 表示了 i 的划分个数。

(2) 讨论 k 条链在六边形结构上的排列组合方式数量,由于基座模块为正六边形,故基座模块最多可以连接 6 条链,假设正六边形基座连接一条链,令链用 (A) 来表示;若基座连接两条链,则可能存在以下两种情况,两条模块数相等的链或两条模块数不相等的链,令为 (AA) 或者 (AB) ,以此类推 $(AABB)$ 表示基座连接四条链, (AA) 表示为两条链模块数相等, (BB) 表示为两条链模块数相等, (A) 不等于 (B) ;故令 A, B, C, D, E, F

6 个无序字母表示 6 条链可能存在的模块数,通过区分字母来建立构型链信息。 k 的取值为 1~6,下面分别讨论 k 取值为 1~6 的情况,并建立如表 1 所示的基本构型数表。当 $k=1$ 时,仅有 1 种构型。当 $k=2$ 时,由于正六边形对称性存在邻、间、对 3 种类型,故基本类型有 3 种。当 $k=3, 4, 5$ 时,利用字典排序的思想对连接的链数进行全排列,若 k 条链在基座位置相邻接时或者间隔相同时,则正逆序列相同的排列序列为重复;若 k 个链在基座位置上间隔不同且不全相邻时,将相邻的链看为一组置换群,组内元素置换,结合正六边形的对称性进行去重,分别得到基本类型为 19、66、126 种。当 $k=6$ 时,利用有重复元素的圆排列思想,得到基本类型 144 种。圆排列把一些元素按一定顺序而不论具体位置排成一圈,就叫做由这些元素排成的一个圆排列,由这些元素排成的所有圆排列的个数称为这些元素的圆排列数。多个同质类模块分配到正六边形基座的 6 条链上,即正六边形的基座连接 6 条链的情况下有多少种非同构构型可以选择用圆排列来求解。

$$Q(S) = \frac{1}{n} \sum_{d|p} \varphi(d) \frac{(n/d)!}{\prod_{i=1}^k (n_i/d)!} \quad (6)$$

式(6)为由 S 的元素组成的圆排列数,各个链上的模块数组成为集合 S , $\varphi(d)$ 为欧拉函数。

(3) 计算 n 个模块所对应的构型总数,查找表 1 得到 k 条支链的不同排列组合方式所对应的基本构型数,累加后得到 n 个模块所构成的非同构构型总数。

根据以上步骤建立构型枚举流程图,假设单元模块总数为 N ,模块数量 $\text{num}=1, \cdots, N$ ($N > 1$) 递增,在六边形基座上分别创建的非同构构型数为 sum_{num} 。为了提高算法效率,提前创建基本构型数表 1,则构型枚举流程如图 3 所示。

通过构型枚举算法,分析 20 个单元模块构建的非同构构型数及算法耗时,结果如图 4 和 5 所示,其中此方法得到的非同构构型数与 Feng^[21] 提出的结构特征法 (SFM) 枚举非同构构型结果一致,验证了本文提出的方法在可重构模块化机器人非同构构型枚举中的有效性和准确性。在此基础上分析图表得出,随着模块数量的增加,非同构构型数量呈指数型增长,虽然本章节提出的构型枚举方法有效地提高了计算效率,但是随着模块数量的增加,算法的耗时也呈指数趋势增长。

3 基于构型匹配的重构策略

基于构型数量计算的复杂性,本章节提出了基于构型匹配的重构策略,在不考虑机器人的运动规划前提下,将有效地完成构型之间的转换。

表 1 基本构型数表

Table 1 Table of the number of the fundamental configurations

1 条链		2 条链		3 条链		4 条链		5 条链		6 条链	
<i>A</i>	1	<i>AA/AB</i>	3	<i>ABC</i>	10	<i>ABCD</i>	30	<i>ABCDE</i>	60	<i>ABCDEF</i>	60
—	—	—	—	<i>AAB</i>	6	<i>AABC</i>	16	<i>AABCD</i>	30	<i>AABCDE</i>	30
—	—	—	—	<i>AAA</i>	3	<i>AABB</i>	11	<i>AABBC</i>	16	<i>AABBCD</i>	16
—	—	—	—	—	—	<i>AAAB</i>	6	<i>AAABC</i>	10	<i>AABBCC</i>	11
—	—	—	—	—	—	<i>AAAA</i>	3	<i>AAABB</i>	6	<i>AAABCD</i>	10
—	—	—	—	—	—	—	—	<i>AAAAB</i>	3	<i>AAABBC</i>	6
—	—	—	—	—	—	—	—	<i>AAAAA</i>	1	<i>AAABBB</i>	3
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	<i>AAAABC</i>	3
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	<i>AAAABB</i>	3
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	<i>AAAAAB</i>	1
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	<i>AAAAAA</i>	1

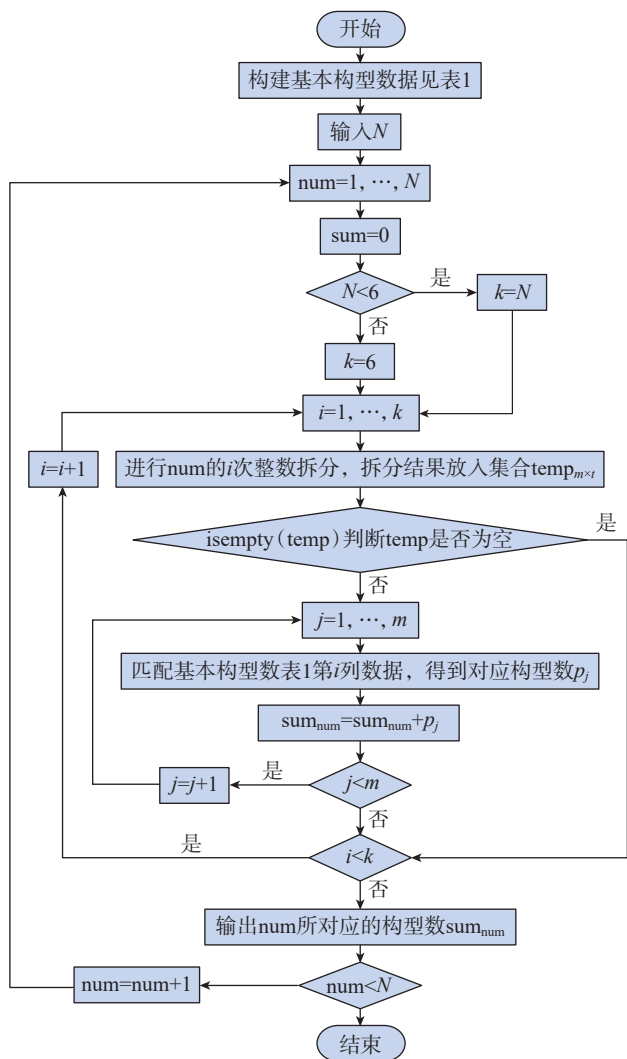


图 3 构型枚举算法流程图

Fig.3 Configuration enumeration flowchart

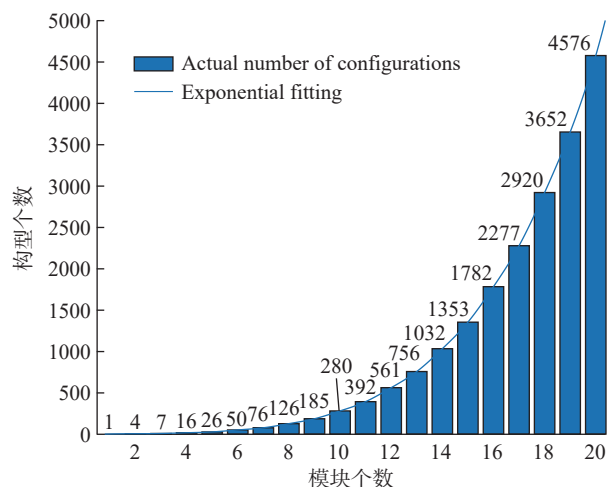


图 4 构型总数分析图

Fig.4 Analysis of total number of configurations

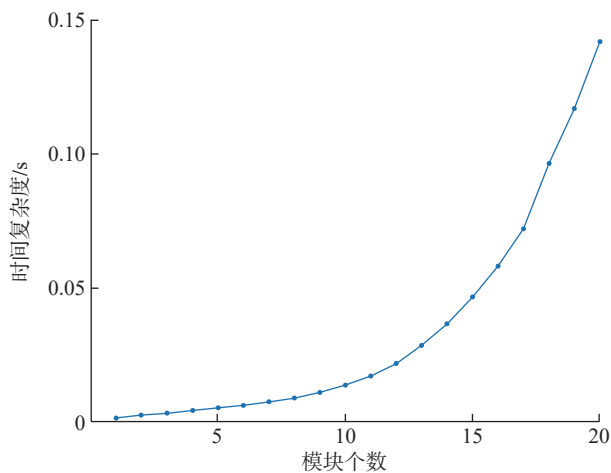


图 5 算法耗时趋势图

Fig.5 Time consuming for algorithm

基于构型匹配的重构策略是在可重构机器人的拓扑描述的基础上进行的。式(2)中的信息连接矩阵 T 作为 DFS 构型识别算法的输入矩阵,输出为 $W=[w_1 w_2 w_3 w_4 w_5 w_6]$ 矩阵, W 矩阵中的各列分别表示为 $L_1 \sim L_6$ 各个边所连接的模块数量。

首先将基座模块作为中心节点,以中心节点作为依次遍历的根节点,基于深度优先遍历算法(DFS)进行构型识别,确定中心节点各个边所连接的模块数量,得到初始构型的各个模块的连接状态矩阵 T_m 与目标构型的各个模块的连接状态矩阵 G_n 。其次根据基座的结构等价关系类建立同构构型库,找到 G_n 的同构构型 G'_n 。对比 T_m 与 G'_n 的连接信息,使得 T_m 与 G'_n 为构型最优匹配,得到最大公共拓扑节点,并对非公共拓扑部分进行重构操作。此外,本章节所提出的重构策略可扩展到异质类模块或同性连接的模块组成的多链机器人构型。

3.1 基于 DFS 的构型识别

以基座模块 v_0 为根节点,首先访问根节点,再依次访问根节点未访问过的相邻的边 $L_i (i=1 \sim 6)$,从 L_i 出发,依次遍历访问相邻节点,直到没有相邻节点,退回到根节点,再去访问 L_{i+1} 以及相邻的节点,直到所有节点都被访问过。利用栈先进后出的原理存放节点, ConfigDfs 函数(Algorithm 1)返回 re,矩阵 re 对应各个节点对应的边的关系,函数 GetW 对矩阵 re 进行识别输出各个链所对应的模块数量矩阵 W ,基于 DFS 的构型识别的算法细节如下。

Input: A % Adjacency matrix

Output: W % the number of modules on each chain

```

1: function ConfigDfs(A)
2:  $m \leftarrow \text{length}(A(1, :))$ 
3:  $top \leftarrow 1$  % top stack element
4:  $flag \leftarrow 1\%$  flag whether a node has been visited
5:  $stack(top) \leftarrow 1$ 
6:  $re \leftarrow []$ 
7: while  $top \neq 0$  do
8:    $prelen \leftarrow \text{length}(stack)$ 
9:    $i \leftarrow stack(top)$ 
10:  for  $i = 1 \rightarrow m$  do
11:    if  $A(i, j) \neq 0$  && isempty(find(flag == j, 1)) then
12:       $top \leftarrow top + 1$ 
13:       $stack(top) \leftarrow j$ 
14:       $flag \leftarrow [flag j]$ 
15:       $re \leftarrow [re; i j]$  % store edges and nodes into the result
16:    break
17:  end if

```

```

18: end for
19: if length(stack) == prelen then
20:    $stack(top) \leftarrow []$ 
21:    $top \leftarrow top - 1$ 
22: end if
23: end while
24: return re
25: end function
26: function GetW(re)
27:  $[index, j] \leftarrow \text{find}(re == 1)$ 
28: for  $i = 1 \leftarrow \text{length}(index) - 1$  do
29:   if abs(index(i) - index(i + 1)) == 1 then
30:      $W \leftarrow [W 1 1]$ 
31:      $i \leftarrow i + 1$ 
32:   else
33:      $W \leftarrow [W \text{abs}(index(i) - index(i + 1))]$ 
34:   end if
35: end for
36: return W
37: end function

```

3.2 创建同构构型库

基座模块在平面中为正六边形且满足中心对称性,其有 6 条对称轴,包括 3 条对角线和 3 条对边的中点连线。对正六边形进行旋转操作或者对称翻转操作得到的形状能与初始状态形状重合。有 6 种旋转操作,对应不同的旋转角度如图 6(a) 所示,对称翻转操作基于 6 条对称轴进行 180° 对称翻转,如图 6(b) 所示。

设 v_0 基座模块各个链所包含的模块数量为 $W_2=[w_1 w_2 w_3 w_4 w_5 w_6]$,以基座正上方为起点,顺时针依次分布。假设将 v_0 模块由初始状态,按照表 2 中的旋转角度,逆时针旋转,再分别以 $l_1 \sim l_6$ 对称轴进行对称翻转操作,共得到 12 组同构矩阵 W'_2 ,这些矩阵在 v_0 基座上形成的构型都是同构的,操作结果如表 2 所示。

3.3 确定最大公共拓扑

中心模块为基座模块是固定不变的,确定最大公共

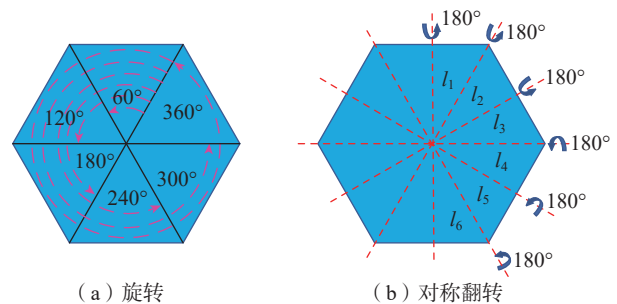


图 6 结构等价性

Fig.6 Structural equivalence class

表 2 同构构型矩阵枚举表

Table 2 Isomorphic configuration matrix enumeration table

逆时针旋转角度	W'_2 矩阵	根据轴对称	W_2 矩阵
60°	$[w_2 \ w_3 \ w_4 \ w_5 \ w_6 \ w_1]$	l_1 轴	$[w_1 \ w_6 \ w_5 \ w_4 \ w_3 \ w_2]$
120°	$[w_3 \ w_4 \ w_5 \ w_6 \ w_1 \ w_2]$	l_2 轴	$[w_2 \ w_1 \ w_6 \ w_5 \ w_4 \ w_3]$
180°	$[w_4 \ w_5 \ w_6 \ w_1 \ w_2 \ w_3]$	l_3 轴	$[w_3 \ w_2 \ w_1 \ w_6 \ w_5 \ w_4]$
240°	$[w_5 \ w_6 \ w_1 \ w_2 \ w_3 \ w_4]$	l_4 轴	$[w_4 \ w_3 \ w_2 \ w_1 \ w_6 \ w_5]$
300°	$[w_6 \ w_1 \ w_2 \ w_3 \ w_4 \ w_5]$	l_5 轴	$[w_5 \ w_4 \ w_3 \ w_2 \ w_1 \ w_6]$
360°	$[w_1 \ w_2 \ w_3 \ w_4 \ w_5 \ w_6]$	l_6 轴	$[w_6 \ w_5 \ w_4 \ w_3 \ w_2 \ w_1]$

拓扑的思路为对比初始构型与目标同构构型各个链信息,找到最大公共拓扑链。根据 DFS 对构型的识别,得到初始构型的各链连接信息矩阵 T_m 、中心模块各边的模块连接数量矩阵 W_1 以及目标构型的各链连接信息矩阵 G_n 、中心模块各边的模块连接数量矩阵 W_2 。通过查找目标构型的矩阵 W_2 得到同构构型矩阵 W'_2 , 12 组 W'_2 矩阵组成集合 P , 将 W_1 矩阵与集合 P 中的 W'_2 矩阵依次对比。

$$M = W'_2 - W_1 \quad (7)$$

$$S = \sum_{i=1}^6 |M_i| \quad (8)$$

首先判断矩阵 M 中等于 0 的列数,其次判断 S , 若 M 矩阵中等于 0 的列数越多并且 S 值越小,则 W'_2 与 W_1 两个矩阵相似度越高,初始构型与目标构型的公共拓扑越大,令此 W'_2 矩阵所对应的拓扑构型为中间构型。

3.4 初始构型转换为中间构型

通过 DFS 的构型识别对初始构型以及目标构型进行识别后,分别得到初始构型的数量 W_1 及目标构型的数量矩阵 W_2 , 查找目标构型的数量矩阵 W_2 的 12 种同构型数量矩阵 W'_2 , 即矩阵 W_2 可被 12 种矩阵 W'_2 代替, 12 个矩阵 W'_2 依次与 W_1 进行最大公共拓扑比较, 得到 12 组匹配结果, 相似性从高到低排序。下面将初始构型转换为中间构型, 即可得到初始构型到目标构型的转换。

(1) 确定最大公共拓扑链后, 保持最大公共拓扑链为连接状态不做改变, 对非公共拓扑模块进行重构。对于具有非公共拓扑的支链依次两两进行转换, 这里判定模块数量相对较少的非公共拓扑的支链进行优先转换。

(2) 进行可连接性判断, 首先, 根据构型关联矩阵判断两个待连接模块连接面是否可以相连接。其次, 根据各模块 DH 参数建立运动学方程, 并根据两链的运动学方程确定两条链是否存在相同的运动空间。

(3) 连接与断开, 为了保持机器人整个通信系统正常进行, 规定先连接后断开, 将初始构型非公共拓扑模

块所在的链模块个数大于中间构型所对应的链模块个数的链设为 Q_1 , 所在的链模块个数小于中间构型所对应的链模块个数的链设为 Q_2 。将 Q_1 中的链依次与 Q_2 中的链连接, 若两条链可以相连, 则两条链通过运动进行连接并在相应的位置断开, 使得链模块个数与中间构型对应位置链模块个数相同。

(4) 更新初始构型的数量矩阵 W_1 , 再次确定最大公共拓扑, 按照遍历顺序重复以上操作, 直至初始构型所对应的 W_1 与中间构型所对应的 W'_2 相等。

(5) 若 Q_1 中的各个链与 Q_2 中的各个链都不能相连, 则舍弃当前 W'_2 所对应的中间构型, 依次匹配次优中间构型, 重新确定最大公共拓扑部分, 再次依照以上步骤完成初始构型转换为中间构型。

为了从结构上保证构型转换的可靠性, 如基座上只有 1 条支链, 则规定单支链的自由度大于 3; 若基座上的支链大于 1, 则规定基座上任意两条支链的自由度之和大于 3, 并且至少有 1 条支链与其他支链末端连接面可连接且存在公共运动空间, 故该重构策略适用于模块数量较多的构型转换, 例如空间中六足机器人(每足为 4 自由度)转换为四足机器人每足(每足 6 自由度)。为了验证该重构策略的有效性, 在下一章给出示例与仿真。

4 示例与仿真

基于图论创建构型的拓扑结构, 为了简化拓扑图, 模块之间的连接用箭头表示, 规定主动连接器指向被动连接器。根据可重构机器人的拓扑描述, 分析图 7 中构型拓扑图各模块间的连接信息, 并给出节点矩阵 V 、构型信息连接矩阵 T , 以及通过 DFS 构型识别后的各链模块数量矩阵 W 。如图 7 所示初始构型与目标构型的顶点共 13 个节点, 其中 v_0 为基座模块记为中心节点, $v_1 \sim v_{12}$ 为单元模块节点, 生成模块所对应的逻辑地址矩阵 V 。根据初始构型与目标构型的有向拓扑连接图以及连接关系, 生成以下信息连接矩阵 T_m 和 G_n 。

$$V = [v_0 \ v_1 \ v_2 \ v_3 \ v_4 \ v_5 \ v_6 \ v_7 \ v_8 \ v_9 \ v_{10} \ v_{11} \ v_{12}]$$

$$T_m = \begin{matrix} & e_1 & e_2 & e_3 & e_4 & e_5 & e_6 & e_7 & e_8 & e_9 & e_{10} & e_{11} & e_{12} \\ v_0 & 2 & 0 & -2 & 2 & 0 & 0 & -2 & 0 & -2 & 2 & 0 & -2 \\ v_1 & -2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ v_2 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ v_3 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ v_4 & 0 & 0 & 0 & -2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ v_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ v_6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ v_7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ v_8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ v_9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ v_{10} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & 1 & 0 \\ v_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ v_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \end{matrix}$$

$$G_n = \begin{matrix} & e_1 & e_2 & e_3 & e_4 & e_5 & e_6 & e_7 & e_8 & e_9 & e_{10} & e_{11} & e_{12} \\ v_0 & 2 & 0 & 0 & 0 & -2 & 2 & 0 & -2 & 0 & 2 & 0 & -2 \\ v_1 & -2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ v_2 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ v_3 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ v_4 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ v_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ v_6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ v_7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ v_8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ v_9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ v_{10} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & 1 & 0 \\ v_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ v_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \end{matrix}$$

由图4可得12个单元模块的非同构构型数为561种,在节点数量很多的情况下,采用最优匹配来完成构型之间的转换,根据初始构型信息矩阵 T_m 与目标构型信息矩阵 G_n ,通过深度优先遍历算法,依次遍历中心模块所连接的各个链,得到各个链所包含的模块数量,分别用 W_1 与 W_2 来表示,各个链中模块间的连接关系信息在矩阵中用深色实线标记。

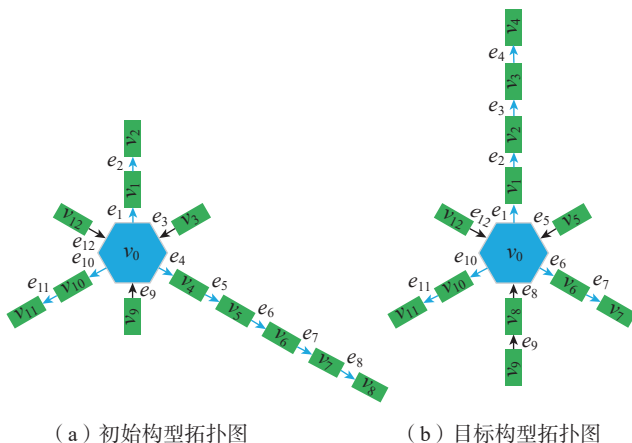


图7 构型拓扑图

Fig.7 Topology of configurations

$$W_1 = \begin{bmatrix} w_1 & w_2 & w_3 & w_4 & w_5 & w_6 \\ 2 & 1 & 5 & 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

$$W_2 = \begin{bmatrix} w_1 & w_2 & w_3 & w_4 & w_5 & w_6 \\ 4 & 1 & 2 & 2 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

列举 W_2 的同构构型库,经对比发现 $W'_2 = \begin{bmatrix} w_1 & w_2 & w_3 \\ 2 & 1 & 4 \\ w_4 & w_5 & w_6 \\ 1 & 2 & 2 \end{bmatrix}$ 与 W_2 在中心基座的位置上是同构的,且与 W_1 的公共拓扑最大。故 L_1 、 L_2 、 L_4 、 L_5 边上的模块保持不变,初始构型中 L_3 边上的链的末端与 L_6 边上的链末端相连,其中两条链可以相连并且存在公共运动空间,节点 v_8 的主动连接器与 v_{12} 的被动连接器相连,断开 e_8 边,转换为中间构型,使得 $W_1=W'_2$,由于中间构型与目标构型是同构的,故完成了初始构型到目标构型的转换(图8)。

$$T_m = \begin{matrix} & e_1 & e_2 & e_3 & e_4 & e_5 & e_6 & e_7 & e_8 & e_9 & e_{10} & e_{11} & e_{12} \\ v_0 & 2 & 0 & -2 & 2 & 0 & 0 & -2 & 0 & -2 & 2 & 0 & -2 \\ v_1 & -2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ v_2 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ v_3 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ v_4 & 0 & 0 & 0 & -2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ v_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ v_6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ v_7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ v_8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ v_9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ v_{10} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & 1 & 0 \\ v_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ v_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \end{matrix}$$

$$G_n = \begin{matrix} & e_1 & e_2 & e_3 & e_4 & e_5 & e_6 & e_7 & e_8 & e_9 & e_{10} & e_{11} & e_{12} \\ v_0 & 2 & 0 & 0 & 0 & -2 & 2 & 0 & -2 & 0 & 2 & 0 & -2 \\ v_1 & -2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ v_2 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ v_3 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ v_4 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ v_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ v_6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ v_7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ v_8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ v_9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ v_{10} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & 1 & 0 \\ v_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ v_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \end{matrix}$$

图9为六链可重构模块化机器人在MATLAB下的仿真过程。两条链在无碰撞的前提下,通过运动学完成对接,完成初始构型到中间构型的重构转换,使得初始构型与目标构型为同构构型。

5 结论

本文以正六边形为基座的多链可重构模块化机器人的拓扑构型展开研究,该拓扑构型以玩具——可变形

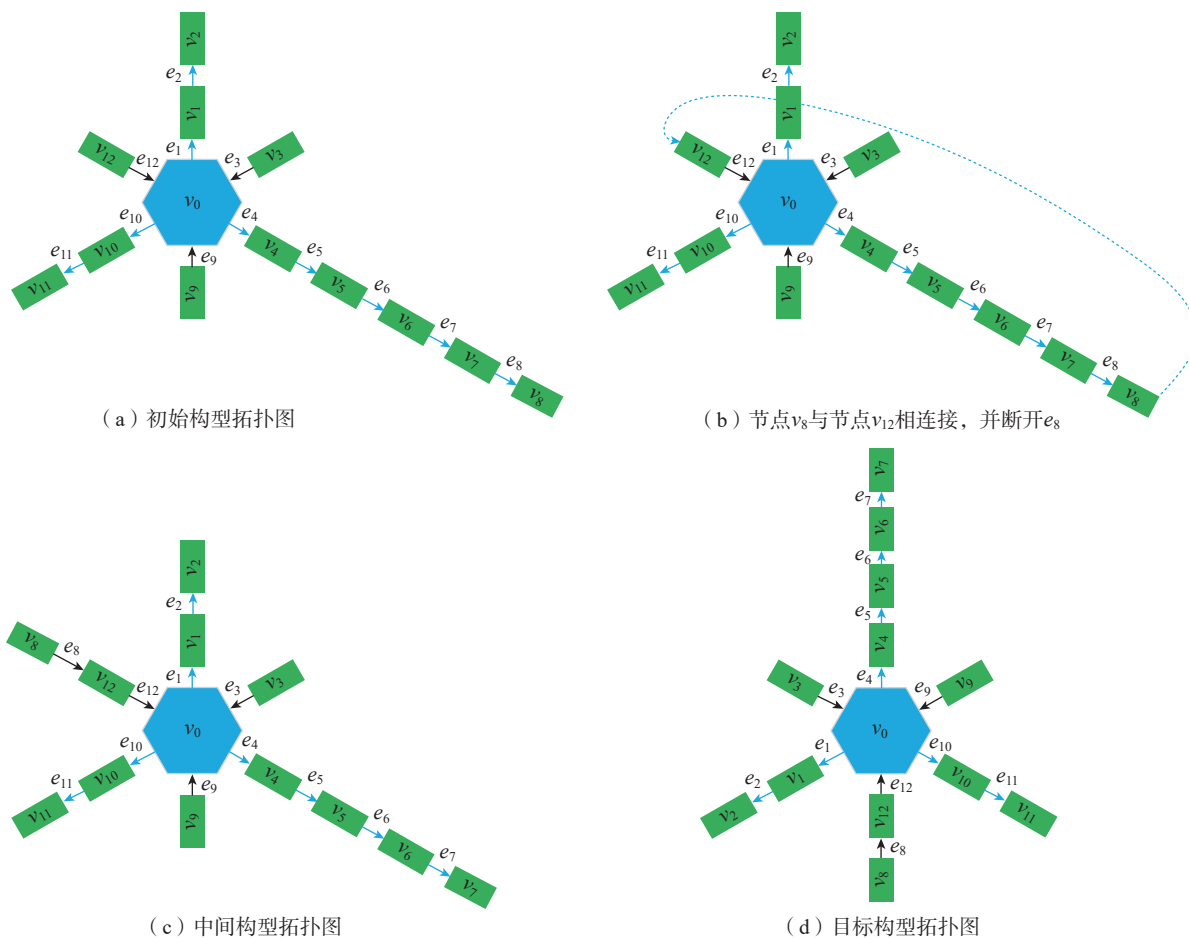


图8 拓扑构型转换示意图

Fig.8 Schematic diagram of topological configuration transformation

指尖陀螺为灵感,提出了构型重构策略来分析构型之间的转换,主要结论如下。

(1)介绍了可变形指尖陀螺模型结构特点,结合图论理论对其单元模块和基座模块进行拓扑描述,并通过信息连接矩阵来表示模块之间的连接关系。

(2)以整数拆分、全排列、圆排列、群论组合为理论依据,提出了适用于以正六边形为基座的多链模块化非同构型枚举方法,验证了该方法的正确性,结果表明非同构型数目随单元模块数目呈指数增长。

(3)利用堆栈实现深度优先遍历得到构型各链信息。基于基座的结构特性,建立等价同构型库,通过查找库中数据来缩短重构时间,并采用构型间的最优匹配策略完成构型转换。给出示例与仿真试验,结果验证了本研究提出的重构策略算法的合理性和可行性。

参考文献

- [1] YIM M, ROUFAS K, DUFF D, et al. Modular reconfigurable robots in space applications[J]. *Autonomous Robots*, 2003, 14(2): 225–237.
- [2] LIU J G, ZHANG X, HAO G B. Survey on research and development of reconfigurable modular robots[J]. *Advances in*

Mechanical Engineering, 2016, 8(8): 168781401665959.

[3] SEO J, PAIK J, YIM M. Modular reconfigurable robotics[J]. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, 2019, 2: 63–88.

[4] MOUBARAK P, BEN-TZVI P. Modular and reconfigurable mobile robotics[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2012, 60(12): 1648–1663.

[5] SUH J W, HOMANS S B, YIM M. Telecubes: mechanical design of a module for self-reconfigurable robotics[C]//*Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.02CH37292)*. Piscataway, NJ: IEEE, 2002: 4095–4101.

[6] ZYKOV V, CHAN A, LIPSON H. Molecubes: an open-source modular robotic kit[C]//*IROS Workshop on Self-Reconfigurable Robots & Systems and Applications*. San Diego, 2007.

[7] ROMANISHIN J W, GILPIN K, RUS D. M-blocks: Momentum-driven, magnetic modular robots[C]//*2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Tokyo, 2013.

[8] YIN B, LIANG Z N, DAI X, et al. Task-oriented configuration optimization of a lattice distortable reconfigurable robot[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2016, 230(9): 1532–1543.

[9] YIM M, ELDERSHAW C, ZHANG Y, et al. Self-reconfigurable robot systems: PolyBot[J]. *Journal of the Robotics Society of Japan*, 2003, 21(8): 851–854.

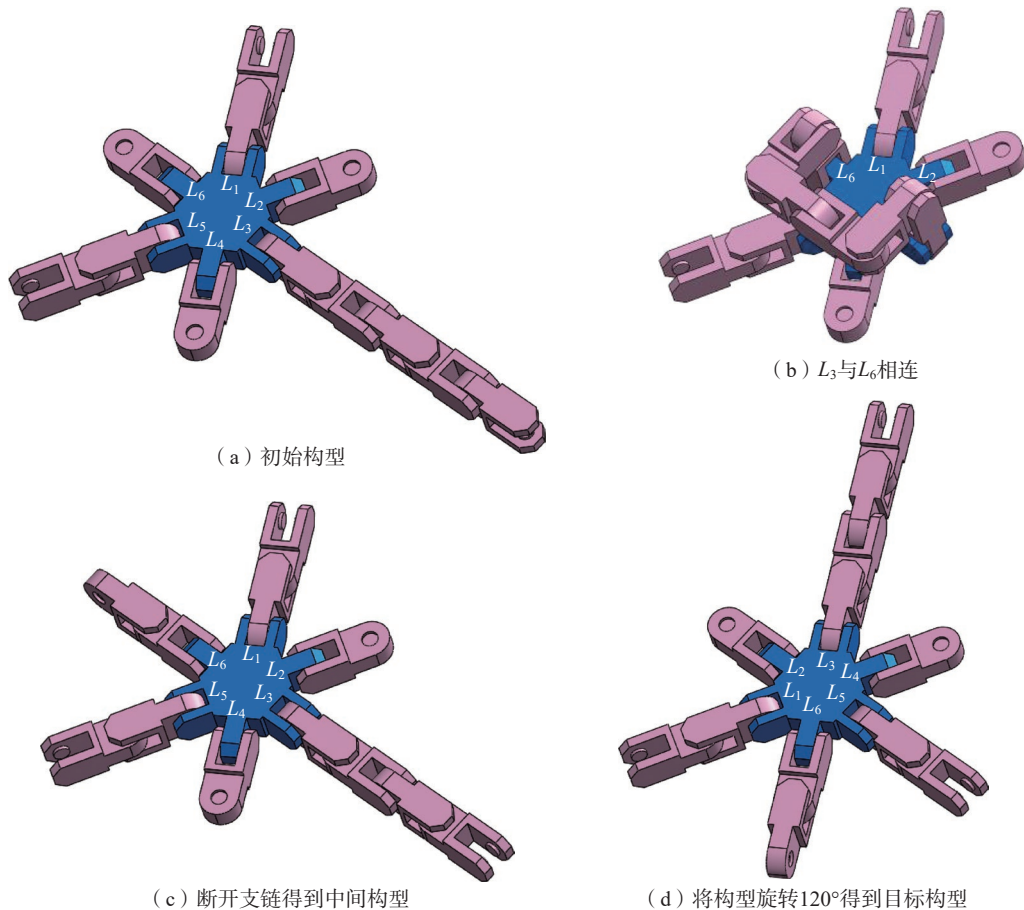


图9 MATLAB 仿真演示
Fig.9 MATLAB simulation demonstration

[10] LI B, MA S, LIU J, et al. AMOEBA-I: A shape-shifting modular robot for urban search and rescue[J]. *Advanced Robotics*, 2009, 23(9): 1057–1083.

[11] FENG J K, LIU J G. Configuration analysis of a chain-type reconfigurable modular robot inspired by normal alkane[J]. *Science China Technological Sciences*, 2021, 64(6): 1167–1176.

[12] NAKAGAKI K, DEMENTYEV A, FOLLMER S, et al. ChainFORM: A linear integrated modular hardware system for shape changing interfaces[C]//*Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*. Tokyo, 2016.

[13] LIU J G, ZHANG X, ZHANG K T, et al. Configuration analysis of a reconfigurable Rubik's snake robot[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2019, 233(9): 3137–3154.

[14] LIEDKE J, MATTHIAS R, WINKLER L, et al. The collective self-reconfigurable modular organism (CoSMO)[C]//*2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. Wollongong, 2013.

[15] PARROTT C, DODD T J, GROß R. HyMod: A 3-DOF hybrid mobile and self-reconfigurable modular robot and its extensions[J]. *Distributed Autonomous Robotic Systems*, 2018, 6: 401–414.

[16] LIANG G Q, LUO H B, LI M, et al. FreeBOT: A freeform modular self-reconfigurable robot with arbitrary connection point-design

and implementation[C]//*2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. Las Vegas, 2021.

[17] HAYASHI R, MATUNAGA S, OHKARNI Y. Experimental evaluation of reconfigurable brachiating space robot[J]. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 2001, 13(5): 548–553.

[18] LIU J G, WANG Y C, MA S G, et al. Enumeration of the non-isomorphic configurations for a reconfigurable modular robot with square-cubic-cell modules[J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2010, 7(4): 31.

[19] CASTANO A, SHEN W M, WILL P. CONRO: Towards deployable robots with inter-robots metamorphic capabilities[J]. *Autonomous Robots*, 2000, 8(3): 309–324.

[20] HOU F L, SHEN W M. On the complexity of optimal reconfiguration planning for modular reconfigurable robots[C]//*2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Anchorage, 2010.

[21] FENG J K, LIU J G. Enumerating the nonisomorphic configurations of a modular reconfigurable robot[J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2022, 14(6): 060910.

通讯作者: 刘金国, 研究员, 博士, 研究方向为空间机器人、空间结构与机构、仿生智能机器人。

(责编 大漠)