中国科学 F辑: 信息科学 2009 年 第 39 卷 第 2 期: 269～280
www.scichina.com info.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE IN CHINA PRESS

独立操作型可重构机器人群体构形表达和重构优化

王明辉①*, 马书根①②, 李斌①, 王越超①

① 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室, 沈阳 110016;
② 日本立命馆大学机器人技术系, 滋贺 525-8577, 日本
* E-mail: mhwang@sia.cn

收稿日期: 2008-01-08; 接受日期: 2008-02-28
中国高技术研究发展计划 (批准号: 2006AA04Z254) 和辽宁省博士科研启动基金 (批准号: 20071007) 资助项目

摘要 独立操作型可重构机器人的单个模块具备独立运动、操作和采样能力, 顺应从结构环境中定点作业向非结构环境中自主作业的发展要求, 能够更好地应用到环境复杂、危险性高的场合. 现有的构形研究主要针对依赖运动型、独立运动型可重构机器人, 解决独立操作型可重构机器人构形问题时具有局限性. 针对可重构机器人重构目的, 提出矢量构形, 将构形研究内容扩展到拓扑结构、运动趋势方向和各模块的姿态方位及连接关系, 提出模块状态向量和构形状态矩阵实现该类可重构机器人群体构形的表达, 对应的变换运算和操作可以表达、触发模块行为运动和构形重构. 提出以工作负荷为优化目标的构形组合重构优化方法、以姿态方位工作负荷和连接工作负荷的组合为优化目标的构形变换重构优化方法, 通过重构优化获得模块在构形重构中状态对应变换关系, 作为构形重构规划和控制的基础.

关键词
独立操作型可重构机器人
构形表达
重构优化

0 引言

单个机器人在星球表面、灾难废墟等复杂环境中执行任务时会遇到无法通过宽沟和巨大障碍等地形、局部故障引起系统全局瘫痪等问题. 通过可重构与模块化技术相结合, 可重构机器人顺应从结构环境下定点作业向非结构环境下自主作业的发展要求, 能够更好地应用到环境复杂、危险性高、人类无法进入的场合完成作业. 可重构机器人是由功能相对简单、相互间有机连接的模块组成, 可以根据变化的环境和任务动态地调整结构, 提供不同的功能和运动特性 [1,2]. 这种重新组合, 不仅是结构的组合, 而且是功能的组合; 它简化了机器人的设计结构, 增加了机器人功能的多样性; 结构方面的模块化和多样性导致功能上的鲁棒性和可替换性. 按照单个模块的运动和操作能力, 可重构机器人通常分为 3 类:

1) 依赖运动型可重构机器人: 单模块不能独立运动或具有运动约束, 只能通过模块间相对位置变化完成重构或整体构形的运动, 例如 PolyBot[3], CONRO[4] 机器人等.

2) 独立运动型可重构机器人: 单模块可以独立运动, 例如 AMOEBA-I[5] 等.

3) 独立操作型可重构机器人: 单模块除独立运动外, 还可以利用机械臂及抓手完成抓取、采样等操作, 例如 S-bots[6] 等. 由于具备单模块运动和操作、多机器人协作和可重构等特性和更强的运动能力, 因此这类机器人在星球探测、灾难救援、军事勘察等领域具有更广阔的应用前景.

可重构机器人的特点是可以动态改变群体构形的拓扑结构, 所以构形研究是区别其他机器人研究的重要和特色内容. 群体构形的表达和变换是运动控制和重构变形控制的基础, 随着模块数量的增加, 重构产生的构形数量和复杂度也随之增加, 因此有必要提出合理的构形表达方法, 对构形中模块的有效状态特征进行提取. Castano 等 [7] 利用节点线图

和邻接矩阵针对 CONRO 机器人的构形发现及构形辨识提出解决方案. Chen 等 [8] 提出装配关联矩阵 (AIM, assembly incidence matrix) 表示模块化机器人的装配构形. Chocron[9] 采用二进制编码表示关节模块的关节类型和关节连接口位置以及连杆模块的连杆长度, 提出采用三维运动学方法描述模块化串形操作臂. Xu 等 [10] 采用 $n\times6$ 特征矩阵表示理论化可重构机器人模型的拓扑结构. 刘明尧 [11] 基于图论和邻接矩阵提出采用结构构形图和结构构形矩阵表达可重构机器人的结构构形, 利用邻接矩阵描述模块间的拓扑邻接关系. 刘金国等 [12] 根据模块物理结构和邻接关系, 基于图论的方法使用矩阵描述单个模块, 注重机械部件的描述.

现有构形理论研究的主要特点是: 构形表达方法主要针对依赖运动型或独立运动型可重构机器人以及理论化的机器人模型, 在实现独立操作型可重构机器人构形表达时具有局限性; 模块和群体构形表达方法不支持变换运算或操作, 没有建立表达方法同模块行为运动和构形重构之间的关系; 多数构形重构优化研究采用图论方法计算各邻接点间的预设权值, 针对模块和构形运动特点的研究较少.

针对以上问题, 提出矢量构形概念, 将构形研究内容扩展到拓扑结构、姿态方位及连接关系. 构建模块状态向量和构形状态矩阵方法实现独立操作型可重构机器人的模块和群体构形的表达, 基于该方法的变换运算和操作可以表达、触发模块行为运动和构形重构. 并以中国科学院沈阳自动化所研制的可重构轮手一体机器人为例对该方法进行验证, 并提出群体构形的组合重构和变换重构两类重构过程的优化方法.

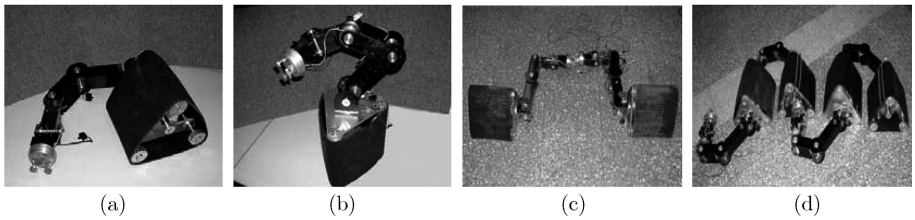
1 可重构轮手一体机器人平台

以模块化设计为原则, 我们研制了一种新型的可重构轮手一体机器人 [13,14], 基于多目标优化方法设计出当车轮形状为等边三角形时, 机器人的移动性能和操作性能较好; 将机器臂和轮式移动机器人有效结合, 利用不同约束条件下, 输出形式不同的特点, 提高了轮手机器人的运动能力 [15]. 可重构轮手一体机器人是三角形履带轮体和具有 4 个关节的机械臂的有效结合体, 末端带有三手指结构手爪. 机械臂不仅是操作机构, 同时也是运动辅助机构, 利用同地面接触的导轮的切向力控制实现转弯等运动控制. 机器人具有 2 种状态模式, 即移动模式和工作模式: 当处于移动模式时, 如图 1(a), 机器人具有在复杂地形上的高通过能力, 例如跨越障碍物等; 当处于工作模式时, 如图 1(b), 机器人利用多关节机械臂和末端手爪可以完成地质采样等任务; 并且可以在两种状态模式之间实现自主转换.

针对变化的环境和任务, 多个机器人可以利用手爪、三角形轮子的顶部和底部等连接部件实现对接 [16], 组合成不同的群体构形, 实现构形运动及复杂的作业. 这时可重构轮手一体机器人是作为群体构形中的模块, 可以从群体构形中自主脱离和连接. 图 1(c) 为两个机器人组成的并形构形, 该构形具有较大的地面覆盖面积, 适合在较松软或泥泞的地面运动; 图 1(d) 为 4 个机器人组成的串形构形, 该构形中 4 个机器人同向驱动, 具有更强的爬坡和越障能力.

2 矢量构形和模块的状态信息模型

可重构轮手一体机器人属于独立操作型可重构机器人, 单机器人模块可以独立运动, 即模块具有运动方向性; 采用非对称式轮手机构, 多关节机械臂同时作为操作、运动辅助机构和构形中的连接机构, 因此机械臂的姿态和方位对机器人和群体构形的拓扑结构、运动特性有影响, 即模块和构形都具有姿态方位性; 机器人之间可以自主连接和脱离, 在重构中具



(a) (b) (c) (d)

图 1 可重构轮手一体机器人的状态模式和群体构形

(a) 移动模式; (b) 操作模式; (c) 并形构形; (d) 串形构形

有多种连接方式; 群体构形可以根据目标任务和环境进行有针对性的运动, 即构形具有运动方向性. 因此, 可重构轮手一体机器人比依赖运动型和独立运动型可重构机器人的群体构形表达更复杂, 现有的构形理论对这类机器人并不适用, 无法解决这类机器人的群体构形表达和区分问题. 例如, 图 2 中的 4 种构形是由具有相同位置关系的两个机器人组成, 但由于姿态方位或连接关系不同, 它们具有不同的状态和运动能力 (4 种构形的爬坡能力是不同的 [17]).

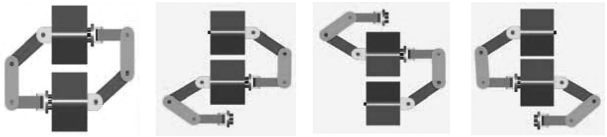


图 2 位置关系相同而姿态方位和连接关系不同的两模块组成的群体构形

针对独立操作型可重构机器人的特性, 以实现该类机器人的群体构形表达和变换等问题为目标, 提出矢量构形的概念. 矢量构形扩展了构形的研究范围, 突出了构形的矢量性 (运动方向性和姿态方位性), 研究内容不但包括构形拓扑结构, 还包括构形运动趋势方向、构形中各模块的姿态方位及运动趋势方向和连接关系 [18]. 矢量构形的适用条件和范围为:

1) 机器人模块采用非对称式机构, 在二维坐标空间中具有姿态方位性.

2) 单个机器人模块具有独立运动能力, 即模块具有运动方向性.

3) 构形作为群体中的运动单元具有运动方向性 (运动趋势方向).

4) 群体构形采用多关节机械臂 (连杆) 作为模块间的连接机构, 因此具有姿态方位性.

状态信息模型是模块和构形表达的基础, 以可重构轮手一体机器人作为研究平台, 定义包含矢量性状态信息的机器人模块的状态信息模型如图 3 所示.

状态信息模型中的状态信息定义如下:

1) 运动趋势方向 LTD(locomotion trend direction): 表示模块或群体构形保持当前姿态将要移动的方向.

2) 连接位置端口 P_C(connected port): 表示机器人可以被其他模块的手爪连接的位置端口. 每个机器人有 3 个位置端口可以被其他手爪连接, 即手爪 (p_1)、轮子底端端口 (p_2)、轮子顶端端口 (p_3). 为了描述多个端口被同时连接的情况, 元素采用二的幂指数取值, 即 $2^i(i = 0, 1, 2)$, 因此 P_C 值域为{1, 2, 4}, 赋值与连接端口的对应关系如图 3.

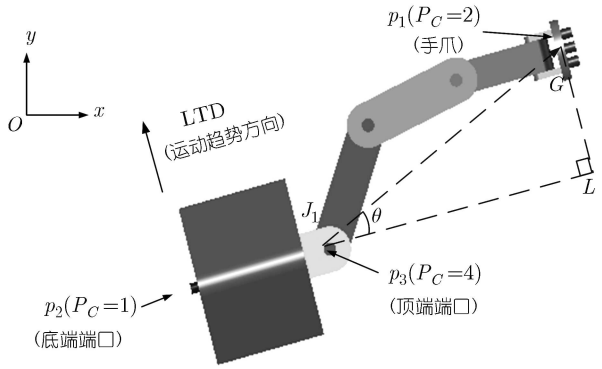


图 3 可重构轮手一体机器人的状态信息模型

3) 机械臂标定线 (J_1L): 表示当所有关节角度都为 0 时机械臂的姿态.

4) 机械臂标定角 (θ): 表示轮子顶端与手爪的连线 (J_1G) 同机械臂标定线 (J_1L) 的夹角; 为了弥补机构上的误差, 当 $\theta \leqslant 10°$, 近似认为机械臂保持完全伸直, 即各关节角度接近 0.

3 基于模块状态向量和构形状态矩阵的群体构形表达

模块表达方法是群体构形表达的基础, 基于状态信息模型, 提出模块状态向量 MSV(module state vector) 实现机器人模块的状态信息描述, 突出模块的运动方向性和姿态方位性, 采用包含 6 个元素字段的向量形式

$$\mathrm{MSV} = [V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6].$$

模块状态向量中各字段的构建规则和赋值方法如下:

1) 模块 ID(V_1): 当前机器人模块在群体中的唯一标识, 且模块 ID 是不可变的. 假设群体中有 n 个机器人, 本字段的值域为{1, 2, 3, ..., n}.

2) 机械臂位置 (V_2): 表示机器人的机械臂相对于轮体的位置. 赋值规则为: 在二维坐标系 (X-Y) 中, 沿着机器人的运动趋势方向 LTD 观察, 如果机械臂

位于轮子的左侧, 则 $V_2=-1$; 如果机械臂位于轮子的右侧, 则 $V_2=1$.

3) 机械臂姿态及手爪方位 (V_3): 表示机器人多关节机械臂姿态和手爪方位. 该字段赋值具有两个特点, 一是以 V_2“机械臂相对位置” 为基础; 二是采用图例对比式的姿态表示方法. 赋值基于机械臂姿态和手爪方位示意图 (图 4), 根据 V_2 的值将 V_3 分为两类, 即 $V_2=1$(图 4 左) 和 $V_2=-1$(图 4 右), 每类都包含 5 种情况. V_3 字段的赋值规则为:

规则 1: 如果机械臂标定角 $\theta \leqslant 10°$, 则机械臂近似为直线, 即 $V_3=0$;

规则 2: 当 $\theta > 10°$, 如果手爪方向同 J_1L 的方向相同, 则 $|V_3|=1$; 如果相反, 则 $|V_3|=2$;

规则 3: 沿着模块的运动趋势方向 LTD 观察, 如果手爪位置在 J_1L 的前方, 则字段值的符号为正, 即 $\mathrm{sign}(V_3)=+$; 如果手爪位置在 J_1L 后方, 则字段值的符号为负, 即 $\mathrm{sign}(V_3)=-$;

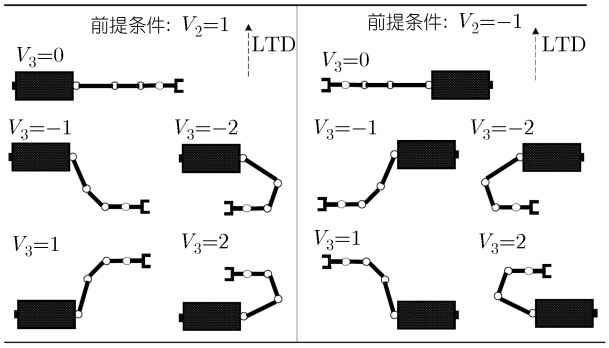


图 4　模块的机械臂姿态和手爪方位示意图

4) 主动连接模块 ID(V_4): 主动连接模块是指被当前机器人的手爪主动连接的机器人. 当 $V_4=0$ 时, 表示没有其他机器人被当前机器人的手爪主动连接.

5) 主动连接关系 (V_5): 被 V_1 表示的机器人的手爪连接的连接位置端口. 字段 V_5 的值域为被动位置端口 P_C 的值域和{0}的并集. 赋值规则为: $V_5=1$ 表示 V_1 机器人手爪的连接目标是其他机器人的轮子底端位置端口; $V_5=2$ 表示连接目标是手爪; $V_5=4$ 表示连接目标是轮子顶端位置端口; $V_5=0$ 表示 V_4 机器人的手爪没有连接其他机器人.

6) 被动连接关系 (V_6): 表示 V_1 机器人各位置端口的连接情况. 由于有 3 个位置端口 (轮子底端、手爪、轮子顶端) 可以被其他机器人的手爪连接, 如何使用一个字段值表示 3 个位置端口的连接情况是 V_6 赋值的关键问题. 通过定义被动连接关系函数 K 建立 V_6 的赋值和连接位置端口之间的对应关系, 该函数定义如下:

$$A=\{a_1,a_2,\ldots,a_n\}$$

(其中 $a_1\neq a_2\neq\cdots\neq a_n$为正整数),

$$p\in\{1,2,\ldots,n\},$$

$$K(A,p)=\underbrace{a_{i_1}+a_{i_2}+\cdots+a_{i_p}}_{p}$$

(其中 $a_{i_1}\neq a_{i_2}\neq\cdots\neq a_{i_p}\in A$).

定义约束条件 λ: 集合 A 中元素的选取要保证 K 函数不存在重复值. 因此集合 A 中元素采用 2 的幂指数取值, 即 $2^i(i=0,1,2,\ldots)$, K 函数值的个数为 $\mathrm{C}_n^1+\mathrm{C}_n^2+\cdots+\mathrm{C}_n^n$. 集合 A 的取值方式和约束条件 λ 决定函数 K 是可逆运算函数, 即已知一个 K 函数值, 能且只能分解出唯一的一组集合 A 中 p 个的元素组合相加. V_6 的赋值和连接位置端口的对应关系如表 1 所示. 其中, 集合 A 为连接端口 P_C 的值域, 即 {1, 2, 4}; $p\in\{1,2,3\}$. 当 $V_6=0$ 时, 表示当前

表 1　字段 V_6 的赋值和连接位置端口的对应关系

K 函数	赋值	连接位置端口
无	V_6=0	无
$K(A,1)$	$K=V_6$=1	轮子底端 (p_2)
	$K=V_6$=2	手爪 (p_1)
	$K=V_6$=4	轮子顶端 (p_3)
	$K=V_6$=3=1+2	轮子底端 (p_2) 和手爪 (p_1)
$K(A,2)$	$K=V_6$=5=1+4	轮子底端 (p_2) 和轮子顶端 (p_3)
	$K=V_6$=6=2+4	手爪 (p_1) 和轮子顶端 (p_3)
$K(A,3)$	$K=V_6$=7=1+2+4	轮子底端 (p_2)、手爪 (p_1) 和轮子顶端 (p_3)

机器人的任何连接位置端口都没有被其他机器人连接, 因此该字段值的个数为 $1+\mathrm{C}_3^1+\mathrm{C}_3^2+\mathrm{C}_3^3=8$.

模块状态向量作为机器人模块状态信息的数学表示方法, 既可以表示离散状态的机器人, 也可以表示处于群体构形中的机器人模块. 图 3 状态信息模型中的机器人属于离散状态, 对应的模块状态向量 MSV 为 $[m,1,1,0,0,0]$. 图 5 为两个机器人模块组成的环形构形和对应的模块状态向量. 由于运动方向性和姿态方位性, 模块相同的拓扑结构可能对应不同的机器人状态. 模块 j 与 i 的拓扑结构是相同的 (通过旋转 180°), 但在相同的运动趋势方向 LTD 下, 机械臂相对位置和手爪方位都是不同的, 对应的 V_2 和 V_3 字段的值是不同的, 因此模块状态向量实现了机器人的矢量性状态表达.

基于状态信息模型和模块状态向量, 针对具有运动方向性和姿态方位性的构形 (即矢量构形), 提出基于构形状态矩阵 CSM(configuration state matrix) 的群体构形表达方法, 采用 $n\times4$ 矩阵形式,

$$\mathrm{CSM}=\begin{bmatrix} M_{1,1} & M_{1,2} & M_{1,3} & M_{1,4} \\ M_{2,1} & M_{2,2} & M_{2,3} & M_{2,4} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{n,1} & M_{n,2} & M_{n,3} & M_{n,4} \end{bmatrix}.$$

构形状态矩阵行向量的个数为模块数量; 列向量选取的状态信息同模块状态向量中的 4 个字段相同, 构形状态矩阵的列和模块状态向量的字段间的对应关系如表 2.

构形状态矩阵行向量与构形中模块的对应规则为: 在二维坐标系 (X-Y) 中, 沿着群体构形运动趋势方向 LTD, 按照先从左到右、再从前到后的顺序, 遍历构形中各模块, 得到的模块顺序与行向量的顺序相对应. 图 6 为三模块组成的三角形构形及其对应的构形状态矩阵.

模块状态向量和构形状态矩阵不仅适用于可重构轮手一体机器人, 适用范围还可以延伸到其他独立操作型可重构机器人、模块间具有多关节连接杆的可重构机器人等 (图 7).

4 模块状态向量和构形状态矩阵的变换运算和操作

模块状态向量和构形状态矩阵支持预定义的数学变换运算和操作. 基于模块状态向量的数学变换运算可以表示、触发机器人的基础行为 [19]. 基础行为是机器人可以直接执行的简单行为运动, 多个基础行为按照时序关系可以组成复合行为. 基础行为的执行条件采用对模块状态向量的字段进行判定的方式, 按照预定义的运算规则执行的变换运算与基础行为存在一一对应的关系. 已知机器人 i 的状态 State_i 及模块状态向量 MSV_i, 基础行为 $\mathrm{Act}_q()$ 且对

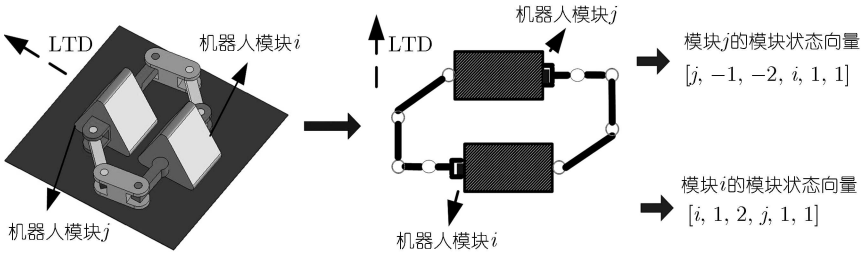


图 5 环形构形及其模块的模块状态向量

(a) 环形构形仿真模型; (b) 环形构形分析模型; (c) 模块状态向量

表 2 构形状态矩阵的列和模块状态向量的字段的对应关系

构形状态矩阵的列	$M_{i,1}$	$M_{i,2}$	$M_{i,3}$	$M_{i,4}$
模块状态向量的字段	V_2	V_3	V_5	V_6
状态信息	机械臂相对位置	机械臂姿态及手爪方位	主动连接关系	被动连接关系

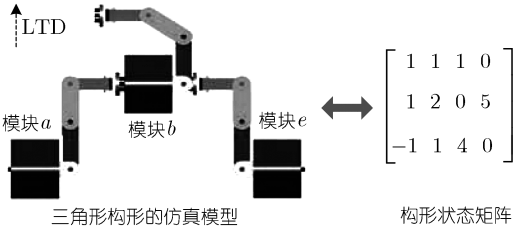


图 6　三角形构形及对应的构形状态矩阵

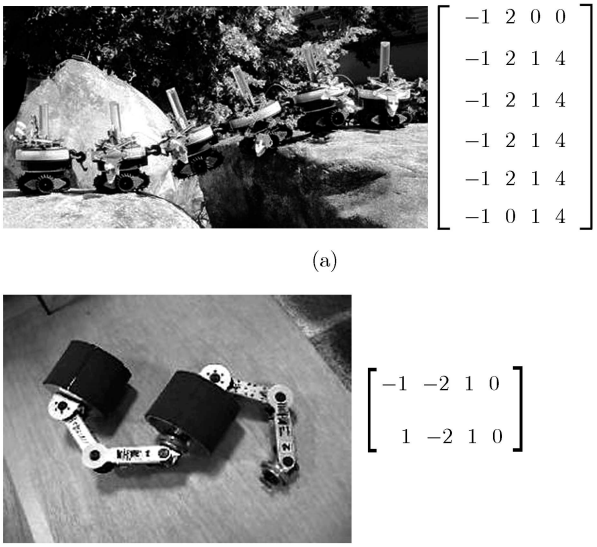


图 7　利用构形状态矩阵实现其他独立操作型可重构机器人群体构形表达

(a) S-Bots 机器人链式构形及对应构形状态矩阵; (b) SMC 机器人串形构形及对应构形状态矩阵

应的变换运算规则为 $F_q()$, 机器人的新状态 State_i^* 及模块状态向量 MSV_i^*, 存在以下对应关系:

• 机器人执行基础行为的新状态对应的模块状态向量可以通过原模块状态向量执行同基础行为对应的变换操作获得, 即 If $\text{Act}_q(\text{State}_i)=\text{State}_i^*$, then $\text{MSV}_i^* = F_q(\text{MSV}_i)$.

• 执行变换操作获得的新模块状态向量对应的机器人新状态可以通过原机器人执行同变换操作对应的基础行为来实现, 即 If $\text{MSV}_i^* = F_q(\text{MSV}_i)$, then $\text{Act}_q(\text{State}_i)=\text{State}_i^*$.

下面分别介绍机器人的基础行为和模块状态向量变换运算规则, 规则中变量定义如下:

i, j —— 分别为当前机器人 (分析目标) 和被当前机器人手爪连接的机器人的 ID;

c —— 被当前机器人的手爪连接的其他机器人的连接位置端口;

r —— 当前机器人被其他机器人的手爪连接的位置端口.

1) 基础行为: 水平旋转 180°.

变换运算规则: $[i, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6] \Leftrightarrow [i, -V_2, -V_3, V_4, V_5, V_6]$.

图 8 所示为水平旋转 180° 的基础行为与模块状态向量变换运算规则之间的对应关系.

2) 基础行为: 主动对接.

变换运算条件: $V_4 = 0 \wedge V_5 = 0$; 变换运算规则: $[i, V_2, V_3, 0, 0, V_6] \Rightarrow [i, V_2, V_3, j, c, V_6]$.

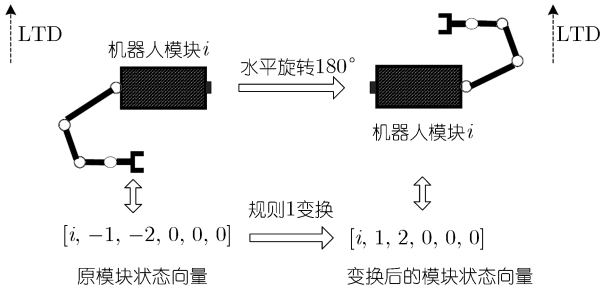


图 8　水平旋转 180° 与模块状态向量变换规则 1 的对应关系

3) 基础行为: 主动脱离.

变换运算条件: $V_4 \neq 0 \wedge V_5 \neq 0$; 变换运算规则: $[i, V_2, V_3, j, c, V_6] \Rightarrow [i, V_2, V_3, 0, 0, V_6]$.

4) 基础行为: 被动对接.

变换运算条件:$(r = 1 \wedge (V_6 \neq 1 \wedge V_6 \neq 3 \wedge V_6 \neq 5 \wedge V_6 \neq 7)) \vee (r = 2 \wedge (V_6 \neq 2 \wedge V_6 \neq 3 \wedge V_6 \neq 6 \wedge V_6 \neq 7)) \vee (r = 4 \wedge (V_6 \neq 4 \wedge V_6 \neq 5 \wedge V_6 \neq 6 \wedge V_6 \neq 7))$.

变换运算规则: $[i, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6] \Rightarrow [i, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6 + r]$.

5) 基础行为: 被动脱离.

变换运算条件: $(r = 1 \wedge (V_6 = 1 \vee V_6 = 3 \vee V_6 = 5 \vee V_6 = 7)) \vee (r = 2 \wedge (V_6 = 2 \vee V_6 = 3 \vee V_6 = 6 \vee V_6 = 7)) \vee (r = 4 \wedge (V_6 = 4 \vee V_6 = 5 \vee V_6 = 6 \vee V_6 = 7))$.

变换运算规则: $[i, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6] \Rightarrow [i, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6 - r]$.

构形状态矩阵支持变换操作, 生成的新构形状态矩阵可以表示其他构形或产生未知构形, 即基于构形状态矩阵的变换操作可以表示、触发构形的重构.

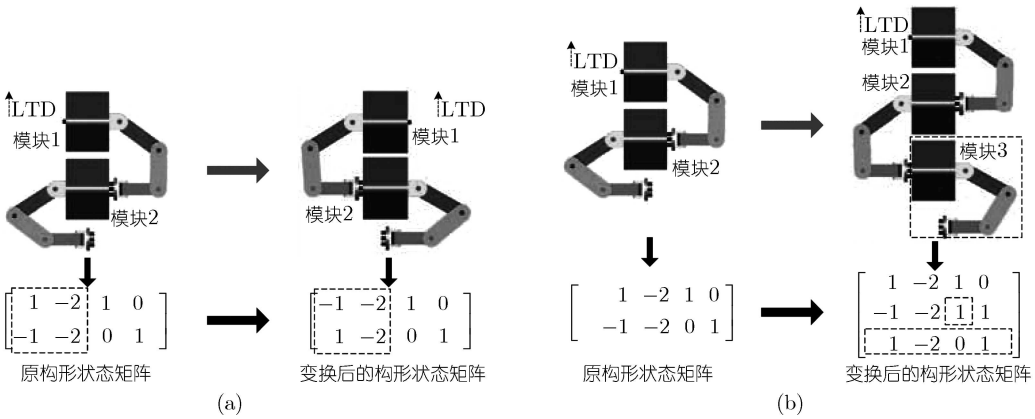


图 9 构形状态矩阵的变换操作实例

(a) 局部行向量交换; (b) 在末行后添加行向量

1) 构形状态矩阵的局部行向量交换.

局部行向量交换表示构形状态矩阵中包含部分列的两个行向量进行值的交换. 在图 9(a) 中, 包含前两列的两行 (即 $[M_{1,1}, M_{1,2}]$ 和 $[M_{2,1}, M_{2,2}]$) 进行交换, 选取的两列分别表示机械臂相对位置、姿态和手爪方位. 相对于图 9(a) 左侧的初始构形, 右侧构形 (即局部行向量交换后新构形状态矩阵表达的构形) 中两个模块的机械臂相对位置和手爪方位发生类似交换的改变. 局部行向量交换产生的新构形状态矩阵表示的构形同原构形发生状态交换, 而模块交换的状态即为局部行交换中包含的两列所表达的状态.

2) 在构形状态矩阵末行后添加行向量.

图 9(b) 为在构形状态矩阵的末行后添加行向量和对应的构形重构, 左侧为两模块组成的串形构形, 右侧为三模块组成的串形构形.

5 构形组合重构的优化

独立操作型可重构机器人的单个机器人模块可以独立运动和操作, 各模块间可以连接和脱离. 在机器人群体中, 由多个处于离散状态 (即不存在连接关系) 的模块连接组合成目标构形, 称为构形组合重构. 组合重构优化是根据离散模块与目标构形间状态关系, 针对某种优化目标制定模块选择和排列方案. 在重构优化分析中, 采用模块状态向量和构形状态矩阵表示模块和构形的状态信息, 根据字段值特点参与优化运算. 下面以可重构轮手一体机器人为例, 介绍构形组合重构的优化过程.

构形组合重构优化分析采用工作负荷作为优化指标. 工作负荷表示根据目标构形状态、各模块执行的状态变换和对接等运动的复杂程度. 约束条件如下: 所有离散机器人模块都处于移动模式且都位于某个区域内, 不考虑机器人模块的平面移动对执行构形组合重构的影响.

组合重构优化的初始条件为: 机器人群体中有 m 个离散机器人模块, 对应的模块状态向量为 $\mathrm{MSV}_z(z = 1, \ldots, m)$; 目标构形包含 n $(n \leqslant m)$ 个模块, 对应的构形状态矩阵为 CSM^*.

基于工作负荷的组合重构优化算法如下:

1) 如果离散机器人模块 s 要定位在目标构形中的第 i 个模块位置 (即目标构形状态矩阵 CSM^* 的第 i 行), 执行这个模块的状态变化对应的工作负荷分量 w_i 为

$$g_j(\mathrm{MSV}_s, \mathrm{CSM}^*_{i,j}) \to P_{i,j}, \tag{1}$$

$$w_i = \sum_{j=1}^{4} \alpha_{i,j} f(P_{i,j}). \tag{2}$$

式中 j 表示构形状态矩阵列向量的标号; $\mathrm{CSM}^*_{i,j}$ 表示目标构形状态矩阵第 i 行第 j 列的值; 状态变换差异值 $P_{i,j}$ 是产生式函数 $g_j()$ 的计算结果; 工作负荷评价函数 $f()$ 根据 $P_{i,j}$ 计算工作负荷. $\alpha_{i,j}$ 表示机器人 s 定位于目标构形中第 i 个模块位置时构形状态矩阵第 j 列的状态影响因子, $\alpha_{i,j} \in \{0, 1\}$. 其中, $\alpha_{i,j} = 0$ 表示计算中不考虑目标构形状态矩阵中第 j 列的影响; $\alpha_{i,j} = 1$ 表示考虑第 j 列的影响. $g_j()$ 为

产生式函数, 功能和特点为: 函数表达式和操作根据下标 j 具有对应的变化; 对 MSV_s 和 CSM^* 第 i 行第 j 列的值进行对比计算, 将计算结果赋于 $P_{i,j}$; 修改模块 s 的 MSV_s; 根据下标升序排列, 即列向量顺序制定 $g_j()$ 的执行时序. 构建方式如下:

$$\begin{cases} g_1(\mathrm{MSV}_s, \mathrm{CSM}^*_{i,1}) \\ \quad \{P_{i,1} = \beta_1 * |\mathrm{CSM}^*_{i,1} - \mathrm{MSV}_s[2]|; \\ \quad\quad \mathrm{if}(P_{i,1} = 0) \quad \mathrm{MSV}_s[3] = -\mathrm{MSV}_s[3];\} \\ g_2(\mathrm{MSV}_s, \mathrm{CSM}^*_{i,2}) \\ \quad \{P_{i,2} = \beta_2 * |\mathrm{CSM}^*_{i,2} - \mathrm{MSV}_s[3]|;\} \\ g_3(\mathrm{MSV}_s, \mathrm{CSM}^*_{i,3}) \\ \quad \{\mathrm{if}\ (\mathrm{CSM}^*_{i,3} != 0) \quad P_{i,3} = \beta_3 * 1;\}. \end{cases} \tag{3}$$

(3) 式中 β_j 为运动权重因子, 根据 g_j 所对应状态变化中模块运动的复杂度进行设置.

2) 从 m 个离散机器人模块中选择 n 个模块组合重构成目标构形的整体工作负荷 W 为

$$W = F(V, \mathrm{CSM}^*) = \sum_{i=1}^{n} \varepsilon_i w_i. \tag{4}$$

集合 $V = \{\mathrm{MSV}_{i_1}, \mathrm{MSV}_{i_2}, \ldots, \mathrm{MSV}_{i_n}\}$ $(i_1, i_2, \ldots, i_n \in \{1, 2, \ldots, n\})$, 按照模块状态向量在 V 中的排列顺序代入 (1) 式中作为 $g_j()$ 参数. 模块权重因子 ε_i 表示模块在组合重构成目标构形中的重要程度. V 中各模块状态向量的排列顺序表示 m 个离散机器人模块中拟选的 n 个模块在目标构形中的定位顺序. 集合 V 有序排列的数量为 $P(m,n) = m * (m-1) * \cdots * (m-n+1)$. 不同的模块状态向量排列对应不同的整体工作负荷 W, W 值越小表示这种排列下执行对应的组合重构成目标构形的整体工作负荷越小, 即 V 中离散机器人模块的排列顺序为最优的组合重构对应关系.

通过 4 个可重构轮手一体机器人组合重构成三角构形的实例, 演示基于工作负荷的组合重构优化的仿真运算和计算结果分析的过程. 4 个离散机器人模块的模块状态向量为

$$\begin{aligned} \mathrm{MSV}_1 &= [1, -1, -2, 0, 0, 0], \\ \mathrm{MSV}_2 &= [2, 1, -1, 0, 0, 0], \\ \mathrm{MSV}_3 &= [3, 1, 2, 0, 0, 0], \\ \mathrm{MSV}_4 &= [4, -1, 0, 0, 0, 0]. \end{aligned}$$

组合重构的目标构形是图 6 所示的三个模块组成的三角形构形, 构形状态矩阵为

$$\mathrm{CSM}^* = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 0 & 5 \\ -1 & 1 & 4 & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} \text{模块}a \\ \text{模块}b. \\ \text{模块}e \end{matrix}$$

连接是双向行为, 即一个模块的主动连接对应另一个模块的被动连接, 因此只考虑主动连接关系, 状态影响因子设置为: $\alpha_{i,1} = 1$, $\alpha_{i,2} = 1$, $\alpha_{i,3} = 1$, $\alpha_{i,4} = 0$ $(i = 1, 2, 3)$. 运动权重因子设置为: $\beta_1 = 1/2$, 对应平面旋转 180°(机械臂相对位置的变换); $\beta_2 = 1/6$, 对应机械臂的关节运动 (机械臂姿态和手爪方位的变换); $\beta_3 = 1/12$, 对应手爪的锁紧 (主动连接关系的变换). 假设目标构形中各模块的重要程度相同, 模块权重因子 $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \cdots = \varepsilon_n = 1$. 构建工作负荷评价函数 $f(P_{i,j}) = r_{i,j} \exp(P_{i,j})$, 如果 $P_{i,j} = 0$, 则 $r_{i,j} = 0$; 如果 $P_{i,j} \neq 0$, 则 $r_{i,j} = 1$.

在这个实例中 $(m = 4, n = 3)$, 共有 $P(4,3) = 24$ 种有序排列, 将集合 V(拟选择的 MSV 排列)、产生式函数 $g_j()$ 和前面设置的函数、参数代入公式 (1)~(3) 中, 得到 24 组与不同模块排列对应的整体工作负荷 W, 如表 3.

表 3 模块的排列和对应的整体工作负荷

模块排列	整体工作负荷	模块排列	整体工作负荷	模块排列	整体工作负荷	模块排列	整体工作负荷
(1, 2, 3)	12.0892	(2, 1, 3)	10.6547	(3, 1, 2)	8.7917	(4, 1, 2)	11.5100
(1, 2, 4)	8.9035	(2, 1, 4)	7.6910	(3, 1, 4)	7.2548	(4, 1, 3)	13.1587
(1, 3, 2)	8.7917	(2, 3, 1)	5.2181	(3, 2, 1)	6.6526	(4, 2, 1)	9.3709
(1, 3, 4)	7.2548	(2, 3, 4)	4.7508	(3, 2, 4)	6.1853	(4, 2, 3)	12.0892
(1, 4, 2)	12.9056	(2, 4, 1)	9.3320	(3, 4, 1)	9.1178	(4, 3, 1)	7.7222
(1, 4, 3)	14.5543	(2, 4, 3)	12.0503	(3, 4, 2)	10.1873	(4, 3, 2)	8.7917

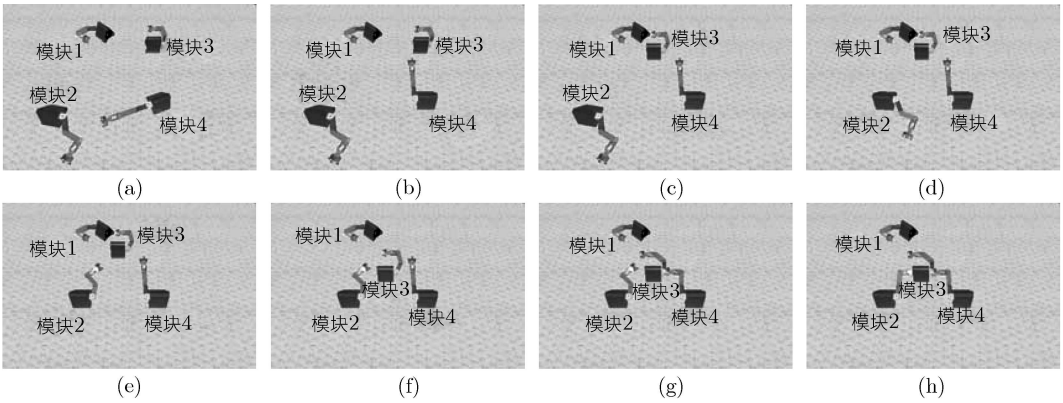


图 10 离散模块组合重构成三角构形的仿真实验

从表 3 中运算结果可以发现, 当模块排列为(2, 3, 4)时, 即以“模块 2、模块 3、模块 4” 顺序组合成目标三角形构形时(与目标三角构形中“模块 a、模块 b、模块 e”的顺序对应), 整体工作负荷最小, 以这种模块排列执行的组合重构为基于工作负荷为优化目标的最优组合重构. 图 10 为可重构轮手一体机器人仿真系统 [20] 演示最优组合重构成三角形构形的过程.

6 构形变换重构的优化

不同于组合重构, 变换重构描述了群体构形之间的重构. 存在由 m 个模块组成的初始构形, 由其中 n ($n \leqslant m$) 个模块改变姿态、方位或连接关系而形成新构形, 这种重构方式称为变换重构. 变换重构优化是指对比分析初始构形和目标构形之间的状态关系, 针对某种优化目标制定初始构形中模块在目标构形中的对应排列顺序和连接关系. 变换重构中模块间的连接关系可能发生变化, 对于重构过程可能是促进, 也可能是抑制. 因此, 构形变换重构优化采用两优化目标结合法, 即姿态方位工作负荷 W_P 和连接工作负荷 W_C 的结合: 第 1 步, 忽略初始构形中模块间连接关系, 采用与计算组合重构工作负荷相同的方法得到所有可能的模块选择和排列方式下状态变换所需的工作负荷 W_P; 第 2 步, 对于每种模块排列方式, 计算从初始构形变换到目标构形中连接关系变化所需的工作负荷 W_C; 第 3 步, 通过配置权重系数, 将两优化目标 ——W_P 和 W_C 组成整体工作负荷 W.

变换重构优化的初始条件为: 初始构形的构形状态矩阵为 CSM, 包含的 m 个模块的模块状态向量为 $\mathrm{MSV}_z = [V_{z,1}, V_{z,2}, V_{z,3}, V_{z,4}, V_{z,5}, V_{z,6}]$ ($z = 1, \ldots, m$). 其中, $V_{z,1} = z$, $V_{z,2} = M_{z,1}$, $V_{z,3} = M_{z,2}$, $V_{z,5} = M_{z,3}$, $V_{z,6} = M_{z,4}$, $V_{z,4}$ 是根据具体构形的模块遍历顺序结合 $V_{z,5}$ 和 $V_{z,5}$ 获得. 目标构形由 n ($n \leqslant m$) 个模块组成, 构形状态矩阵为 CSM^*.

基于姿态方位工作负荷和连接工作负荷两优化目标的变换重构优化算法如下:

1) 计算姿态方位工作负荷 W_P.

如果初始构形中的模块 s 要定位在目标构形中的第 i 个模块位置, 执行这个模块状态变化对应的姿态方位工作负荷分量 $w_{P(i)}$ 为

$$g_j(\mathrm{MSV}_s, \mathrm{CSM}^*_{i,j}) \to P_{i,j}, \tag{5}$$

$$w_{P(i)} = \sum_{j=1}^{2} \alpha_{i,j} f_P(P_{i,j}). \tag{6}$$

从初始构形中选择 n 个模块变换重构成目标构形的姿态方位工作负荷 W_P 为

$$W_P = F_P(V, \mathrm{CSM}^*) = \sum_{i=1}^{n} \varepsilon_i w_{P(i)}. \tag{7}$$

(5)~(7) 式中各参数的设置和函数的构建方法与组合重构优化计算中相同, 因此得到 $P(m, n)$ 组姿态方位工作负荷 W_P.

2) 计算连接工作负荷 W_C.

集合 $V = \{\mathrm{MSV}_{i_1}, \mathrm{MSV}_{i_2}, \ldots, \mathrm{MSV}_{i_n}\}$ 表示 $P(m, n)$ 种模块状态向量排列中的一组, 定义集合 V 中表示模块之间状态关系的模块状态向量对 $\langle \mathrm{MSV}_q, \mathrm{MSV}_r \rangle$ ($q, r \in \{i_1, i_2, \ldots, i_n\}$).

集合 V 中模块 q 和 r 在初始构形中的连接关系为 $C_I(\langle \mathrm{MSV}_q, \mathrm{MSV}_r \rangle) = [\mathrm{ID}_I, \mathrm{CP}_I]$. 其中, ID_I 和

CP_I 分别表示初始构形中模块 q 和 r 之间主动连接模块 ID 和被动连接位置端口.

集合 V 中模块 q 和 r 在目标构形中的连接关系为 $C_G(\langle \mathrm{MSV}_q, \mathrm{MSV}_r\rangle) = [\mathrm{ID}_G, \mathrm{CP}_G]$. 其中, ID_G 和 CP_G 分别表示目标构形中模块 q 和 r 之间主动连接模块 ID 和被动连接位置端口.

集合 V 中模块 q 和 r 之间连接关系变化在变换重构中对应的连接工作负荷分量 $w_{C(q,r)}$ 为

$$\begin{aligned} w_{C(q,r)} = f_C(C_I(\langle \mathrm{MSV}_q, \mathrm{MSV}_r\rangle),\\ C_G(\langle \mathrm{MSV}_q, \mathrm{MSV}_r\rangle)). \end{aligned} \tag{8}$$

连接变换工作负荷评价函数 $f_C()$ 通过对比 $[\mathrm{ID}_I, \mathrm{CP}_I]$ 和 $[\mathrm{ID}_G, \mathrm{CP}_G]$ 之间的差异, 即根据变换重构前后两模块连接关系和连接位置端口的变化计算连接工作负荷分量. $w_{C(q,r)}$ 计算规则为: 如果两模块在初始构形中的连接关系与在目标构形中相同, 即如果 $\mathrm{ID}_I = \mathrm{ID}_G$ 且 $\mathrm{CP}_I = \mathrm{CP}_G$, 则 $w_{C(q,r)} = 0$; 如果在初始构形中无连接, 则重构中只需执行连接动作, 即如果 $\mathrm{ID}_I = 0$, 则 $w_{C(q,r)} = \exp(\beta_3)$; 如果连接身份没有改变, 但连接位置端口变化, 则需先断开再连接, 即如果 ID_I=ID_G 且 $\mathrm{CP}_I \neq \mathrm{CP}_G$, 则 $w_{C(q,r)} = 2\exp(\beta_3)$; 如果连接身份变化, 则需先断开再连接, 即如果 $\mathrm{ID}_I \neq \mathrm{ID}_G$ 且 $\mathrm{ID}_I \neq 0$, 则 $w_{C(q,r)} = 2\exp(\beta_3)$. 其中, β_3 为连接动作权重参数.

连接工作负荷 W_C 是集合 V 中所有模块对的连接工作负荷分量之和,

$$\begin{cases} W_C = \displaystyle\sum_{q=1}^{n}\sum_{r=1,r\neq q}^{n} f_C(C_I(\langle \mathrm{MSV}_q, \mathrm{MSV}_r\rangle),\\ C_G(\langle \mathrm{MSV}_q, \mathrm{MSV}_r\rangle))/2. \end{cases} \tag{9}$$

3) 计算整体工作负荷 W,

$$W = \lambda_P W_p + \lambda_C W_C. \tag{10}$$

姿态方位权系数 λ_P 和连接权系数 λ_C 分别表示姿态方位变换和连接关系变换在变换重构中的重要程度; 且 $\lambda_P + \lambda_C = 1$. 按照 W 值最小时对应的模块排列顺序进行的变换重构即为基于姿态方位工作负荷和连接工作负荷两优化目标的从初始构形到目标构形的最优变换重构.

通过从串形构形到三角形构形的变换重构实例演示基于姿态方位工作负荷和连接工作负荷两优化目标的构形变换重构优化过程. 初始构形为三模块组成的串形构形, 构形状态矩阵为 CSM; 目标构形为三模块组成的三角形构形, 构形状态矩阵为 CSM*:

$$\mathrm{CSM} = \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 & 0 \\ -1 & -2 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{matrix} \text{模块1} \\ \text{模块2} \\ \text{模块3} \end{matrix},$$

$$\mathrm{CSM}^* = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 0 & 5 \\ -1 & 1 & 4 & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} \text{模块}a \\ \text{模块}b \\ \text{模块}e \end{matrix}.$$

步骤 1: 计算姿态方位工作负荷 W_P. 将由 CSM 转换的集合 V 和 CSM* 代入 $g_1()$ 和 $g_2()$, 得到 $P_{i,j}$; 将 $P_{i,j}$, $\alpha_{i,j}$ 和 $f_C()$ 代入 (6) 式, 得到 $w_{P(i)}$; 将 $w_{P(i)}$ 和 ε_i 代入 (7) 式中, 得到 W_P. 对于这个变换重构实例 ($m = 3$, $n = 3$), 共有 $\mathrm{P}_3^3 = 6$ 种有序排列和对应的 W_P, 如表 4 所示.

步骤 2: 计算连接工作负荷 W_C. 根据 CSM 和 CSM*, 利用模块对的定义得到 6 组排列中各模块对的连接关系, 如表 5. 将表 5 中的连接关系代入 (8) 式, 根据 $w_{C(q,r)}$ 计算规则和 (9) 式, 得到每组模块排列对应的连接工作负荷 W_C, 如表 6.

步骤 3: 整体工作负荷 W 的运算. 在这个实例中, 要求在运动过程中尽量保持原有模块间的连接关系, 即连接关系变化比模块姿态方位的重要程度高, 设置 $\lambda_P = 1/3$ 和 $\lambda_C = 2/3$, 将表 4 和表 6 中的 W_P 和 W_C 代入 (10) 式中得到 6 组模块排列对应的整体工作负荷 W, 如表 7.

在所有的模块排列中, 按照整体工作负荷 W 值最小时对应的模块顺序, 即初始构形中按照 "模块 1、模块 2、模块 3" 的排列顺序对应目标构形中 "模块 a、模块 b、模块 e" 进行的变换重构为基于姿态方位工作负荷和连接工作负荷两优化目标的最优变换重构. 图 11 为仿真系统 [20] 演示实例中串形构形按照优化结果变换重构成三角形构形的过程.

7 结论

提出基于矢量构形的模块状态向量和构形状态矩阵方法, 解决了可重构轮手一体机器人以及其他独立操作模块型可重构机器人的群体构形表达和变换问题. 该方法的主要特点如下:

表 4 模块的排列和对应的姿态方位工作负荷

模块排列	姿态方位工作负荷	模块排列	姿态方位工作负荷	模块排列	姿态方位工作负荷
(1, 2, 3)	8.2666	(2, 1, 3)	9.7470	(3, 1, 2)	5.2452
(1, 3, 2)	5.2452	(2, 3, 1)	9.7470	(3, 2, 1)	8.2666

表 5 变换重构实例中模块对的连接关系

模块排列	模块状态向量对	初始构形中连接关系	目标构形中连接关系	模块排列	模块状态向量对	初始构形中连接关系	目标构形中连接关系
	$\langle MSV_1, MSV_2\rangle$	[1, 1]	[1, 1]		$\langle MSV_2, MSV_3\rangle$	[2, 1]	[2, 1]
(1, 2, 3)	$\langle MSV_2, MSV_3\rangle$	[2, 1]	[3, 4]	(2, 3, 1)	$\langle MSV_3, MSV_1\rangle$	[0, 0]	[1, 4]
	$\langle MSV_3, MSV_1\rangle$	[0, 0]	[0, 0]		$\langle MSV_1, MSV_2\rangle$	[1, 1]	[0, 0]
	$\langle MSV_1, MSV_3\rangle$	[0, 0]	[1, 1]		$\langle MSV_3, MSV_1\rangle$	[0, 0]	[3, 1]
(1, 3, 2)	$\langle MSV_3, MSV_2\rangle$	[2, 1]	[2, 4]	(3, 1, 2)	$\langle MSV_1, MSV_2\rangle$	[1, 1]	[2, 4]
	$\langle MSV_2, MSV_1\rangle$	[1, 1]	[0, 0]		$\langle MSV_2, MSV_3\rangle$	[2, 1]	[0, 0]
	$\langle MSV_2, MSV_1\rangle$	[1, 1]	[2, 1]		$\langle MSV_3, MSV_2\rangle$	[2, 1]	[3, 1]
(2, 1, 3)	$\langle MSV_1, MSV_3\rangle$	[0, 0]	[3, 4]	(3, 2, 1)	$\langle MSV_2, MSV_1\rangle$	[1, 1]	[1, 4]
	$\langle MSV_3, MSV_2\rangle$	[2, 1]	[0, 0]		$\langle MSV_1, MSV_3\rangle$	[0, 0]	[0, 0]

表 6 模块的排列和对应的连接工作负荷

模块排列	连接工作负荷	模块排列	连接工作负荷	模块排列	连接工作负荷
(1, 2, 3)	2.1738	(2, 1, 3)	4.3476	(3, 1, 2)	4.3476
(1, 3, 2)	4.3476	(2, 3, 1)	2.1738	(3, 2, 1)	4.3476

表 7 模块的排列和对应的整体工作负荷

模块排列	整体工作负荷	模块排列	整体工作负荷	模块排列	整体工作负荷
(1, 2, 3)	4.2047	(2, 1, 3)	6.1474	(3, 1, 2)	4.6468
(1, 3, 2)	4.6468	(2, 3, 1)	4.6982	(3, 2, 1)	5.6539

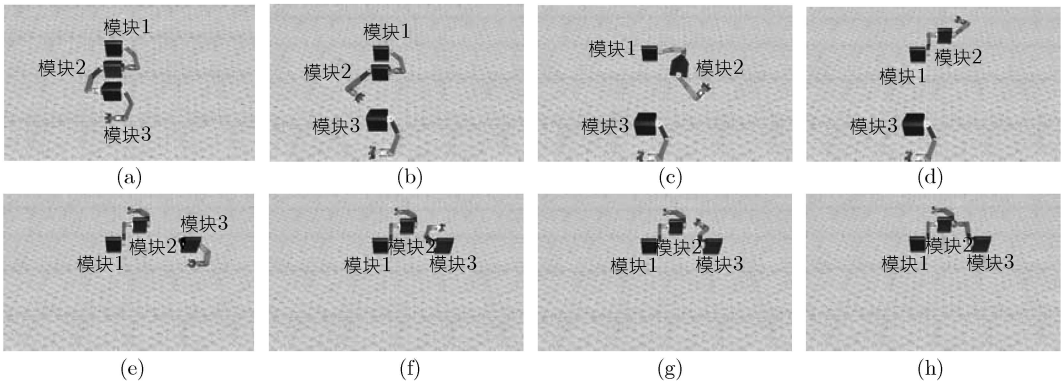


图 11 串形构形变换重构成三角构形的仿真实验

1) 构形状态矩阵同矢量构形存在对应的关系, 即已知一个矢量构形, 有且只有唯一的构形状态矩阵与之对应.

2) 该表达方法没有冗余数据, 所需存储空间较小.

3) 模块状态向量和构形状态矩阵支持变换运算和操作, 同模块的行为运动和构形的重构相对应; 支持对应状态信息的数学计算, 适于模块控制、构成组合及重构的控制和优化等.

根据重构对象的形式, 将群体构形重构分为组合重构和变换重构. 将模块状态向量和构形状态矩阵引入构形重构优化中, 提出以工作负荷为优化目标的构形组合重构优化方法; 以姿态方位工作负荷和连接工作负荷两优化目标的构形变换重构优化方法. 通过优化结果得到模块在构形重构中的状态变换关系, 作为构形重构规划的基础. 利用仿真运算实例演示了构形重构优化分析方法, 验证了优化分析结果, 并通过仿真系统演示构形重构的过程.

参考文献

1 Mark Y, Ying Z, Duff D. Modular robots. IEEE Spectrum Robot, 2002, 39(2): 30–34

2 Yim M, Roufas K, Duff D. Modular reconfigurable robots in space applications. Auton Robot, 2003, 14(2): 225–237

3 Yim M, Duff D, Roufas K. PolyBot: a modular reconfigurable robot. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. San Francisco: IEEE, 2000. 514–520

4 Castano A, Shen W M, Will P. CONRO: towards deployable robots with inter-robot metamorphic capabilities. Auton Robot, 2000, 8(3): 309–324

5 Liu J G, Wang Y C, Li B, et al. Center-configuration selection technique for the reconfigurable modular robot. Sci China Ser F-Inf Sci, 2007, 50(5): 697–910

6 Mondada F, Pettinaro G C, Guignard A, et al. SWARM-BOT: a new distributed robotic concept. Auton Robot, 2004, 17(2-3): 193–221

7 Castano A, Will P. Representing and discovering the configuration of CONRO robots. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Seoul: IEEE, 2001. 3503–3509

8 Chen I M, Burdick J W. Enumerating the non-isomorphic assembly configuration of modular robotic systems. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. Yokohama: IEEE, 1993. 1985–1992

9 Chocron P B. Genetic design of 3D modular manipulators. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Albuquerque: IEEE, 1997. 223–228

10 Xu W, Wang S G, Wang A L, et al. Towards an efficient self-organizing reconfiguration method for self-reconfigurable robots. J Intell Robot Syst, 2003, (37): 415–425

11 刘明尧. 可重构机器人的构形设计及分布式控制算法研究. 博士学位论文. 沈阳: 中国科学院沈阳自动化研究所, 2002. 40–41

12 刘金国, 王越超, 李斌, 等. 模块化变形机器人非同构构形表达与计数. 机械工程学报, 2006, 42(1): 98–105

13 贺鑫元, 马书根, 李斌, 等. 可重构星球探测机器人的机构设计. 机械工程学报, 2005, 12(12): 190–195

14 王明辉, 马书根, 李斌, 等. 可重构机器人体系结构及模块化控制系统的实现. 仪器仪表学报, 2006, 27(10): 1178–1182

15 Wang M H, Ma S G, He X Y, et al. Motion planning for a reconfigurable robot to cross an obstacle. In: IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Luoyang: IEEE, 2006. 1291–1296

16 张力平, 马书根, 李斌, 等. 可重构星球探测机器人的空间对接研究. 中国机械工程, 2005, 16(8): 659–663

17 Zhang L P, Ma S G, Li B, et al. Locomotion analysis and experiment for climbing motion of RPRS. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Barcelona: IEEE, 2005. 2093–2098

18 Wang M H, Ma S G, Li B, et al. Configuration analysis for reconfigurable modular planetary robots based on MSV and CSM. In: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System(IROS). Beijing: IEEE, 2006. 3191–3196

19 Wang M H, Ma S G, Li B, et al. Task planning and behavior scheduling for a reconfigurable planetary robot system. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Niagara Falls: IEEE, 2005. 729–734

20 张政, 马书根, 李斌, 等. 可重构星球探测机器人的 OpenGL 仿真实验平台研究. 系统仿真学报, 2004, 17(4): 885–888