

一种模块化机器人的拓扑构型优化

高文斌^{1,2} 王洪光¹ 姜勇¹ 潘新安^{1,2}

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. 中国科学院大学,北京,100049

摘要:采用遗传算法对一种关节型模块化机器人系统面向任务的拓扑构型优化设计问题进行了研究。对任意机械臂拓扑构型组成模块的类型、参数、数量及模块间连接顺序和装配方位等信息进行了二进制编码。按照性质不同将设计要求划分为刚性要求、柔性要求及刚性+柔性要求,对不满足刚性要求的拓扑结构通过过滤器处理以提高效率,对其他拓扑结构进行构型评价并以评价结果的加权的形式建立构型评价函数。以自由度最小为主要优化目标,结合遍历法和遗传算法给出一种拓扑构型优化设计方法。构型优化实验验证了该方法的有效性。

关键词:模块化机器人;可重构;构型优化;遗传算法

中图分类号:TP24

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2014.12.003

Topology Configuration Optimization for a Modular Robot

Gao Wenbin^{1,2} Wang Hongguang¹ Jiang Yong¹ Pan Xin'an^{1,2}

1. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation,
Chinese Academy of Sciences, Shenyang, 110016

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049

Abstract: A study of task-oriented topology configuration optimization for a joint type modular robot system was carried out based on genetic algorithm. The topology configuration information such as the module types, parameters, quantity, assembling sequence and orientations of any given manipulator were represented by binary coding. Design requirements were divided into hard ones, soft ones and hard+soft ones according to their properties. The topology structure which did not meet the "hard" requirements would be processed by filters to improve the computational efficiency. Meanwhile, the others were evaluated and the configuration evaluation function was constructed based on the weighted sum of the evaluation results. Taking the minimized degree-of-freedom as the main optimization objective, a topology architecture optimization design method was given based on the combination of traversal method and genetic algorithm. The effectiveness of the method was verified through an architecture optimization experiment.

Key words: modular robot; reconfigurable; configuration optimization; genetic algorithm

0 引言

模块化机器人的设计目的是通过模块间组合的多样性来解决机器人面临任务多样性、复杂性的问题^[1-3]。模块化机器人系统可组成的机械臂数量可能是巨大的,选择合理的构型来完成给定工作任务是一个复杂的多目标优化问题,可描述如下:从模块库中选择模块类型、参数、数量,确定模块间的安装顺序和装配方位,给出可满足设计要求的构型。全局优化方法可同时考虑多种设计要求,具有较好的鲁棒性,可有效避免局部最优解,在机器人的构型优化中应用广泛^[4-5]。构型评价函数是优化算法实现的关键,模块化机器人构型评价函数的构建方法有两种:①根据重要程度

为各个设计要求指定相应的权重系数,以评价结果加权的形式建立评价函数^[6-8]。②选定一个或多个设计要求构建评价构型,将其他设计要求看作设计约束,当构型与设计约束冲突时,将不经评价计算直接剔除以提高效率^[9-11]。

目前评价函数构建过程中对设计要求的划分不尽合理,某些设计要求同时具有设计约束和优化目标的性质,仅作为设计约束则该项指标得不到优化;仅作为优化目标,会增加不必要的计算量,降低构型综合的计算效率。在机械臂的优化设计中很难找到合适的评价指标来评价不同自由度机械臂的性能,例如通常来说具有较多自由度的机械臂容易获得较高的灵巧性,而提供相应自由度的关节模块是一个集成通信、控制及驱动系统的结构复杂且价格昂贵的机械电子模块。增加自由度意味着增加模块,而模块的自重会增加机

收稿日期:2013-01-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60905048);机器人学国家重点实验室自主课题(RLZ200802)

械臂的负载。从提高负载能力和减少成本的角度考虑,应该根据任务要求搭建所需自由度最少的机械臂^[11-13]。本文以笔者所在课题组研制的一套模块化可重构机器人实验系统(modular reconfigurable robot experiment system, MRRES)为研究对象,基于对设计要求的重新划分,以自由度最少为优化目标,结合遍历法和遗传算法给出了一种用于 MRRES 的拓扑构型优化设计方法。

1 MRRES 的系统构成

MRRES(图 1)是一个基于 CAN 总线的分布式控制系统,由上位机、24 V 直流电源和模块库组成。上位机完成关节空间的轨迹规划并控制机器人完成动作。模块库(图 2)由夹爪模块(G)、转



图 1 模块化机器人实验系统

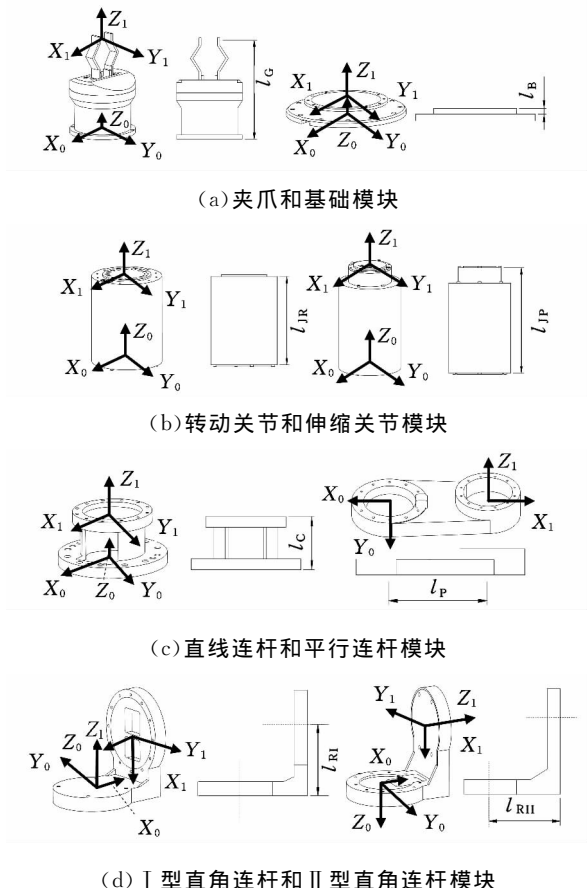


图 2 MRRES 的组成模块

动关节模块(J_R)、伸缩关节模块(J_P)、直线连杆模块(L_C)、平行连杆模块(L_P)、I 型直角连杆模块($^I L_R$)、II 型直角连杆模块($^{II} L_R$)以及基础模块(L_B)组成^[14]。

2 构型编码及运动学分析

模块化机器人构型综合的设计变量包括模块类型、参数、数量、模块间的安装顺序及装配方位等。对拓扑构型的合理编码是通过遗传算法实现拓扑构型综合优化的基础。

2.1 构型编码

机械臂的拓扑结构信息是离散数据,可用二进制编码表示。关节模块有 2 种编码,可用 1 位二进制数表示;连杆模块有 4 种编码,可用 2 位二进制数表示,编码方式见表 1。

表 1 模块类型编码

J_R	J_P	L_C		L_P		$^I L_R$		$^{II} L_R$	
0	1	0	0	0	1	1	0	1	1

如图 2 所示,在每个模块的输入和输出接口分别建立输入坐标系(下标 0)和输出坐标系(下标 1)。按照右手螺旋法则,近夹爪端模块绕近基础端模块 Z 轴的正向转动的角度为装配方位角。模块间可选择的装配方位角有 4 种: 0° 、 90° 、 180° 、 270° ,可用 2 位二进制数表示,见表 2。

表 2 装配方位编码

0°		90°		180°		270°	
0	0	0	1	1	0	1	1

每种连杆模块有 8 种长度,可用 3 位二进制数表示,见表 3。其中, n 是二进制编码的十进制形式。

表 3 模块长度编码

	l_B	l_C	l_P	l_{RI}	l_{RII}
长度 (mm)	$0+5n$	$40+5n$	$180+5n$	$89.5+5n$	$89.5+5n$

2.2 编码示例

由基础模块和关节模块组成的子装配体的拓扑结构如图 3a 所示。基础模块的高度为 5 mm, 关节模块相对于基础模块的安装角度为 90° , 图 3b 所示为对应的二进制编码。

关节模块与连杆模块组成的子装配体的拓扑结构如图 4a 所示。子装配体的拓扑结构信息如下: 关节模块 i 为转动关节; 连杆模块 i 为 I 型直角连杆, 长度为 $89.5+5n=94.5$ mm, 相对关节模块 i 的装配方位为 90° ; 关节模块 $i+1$ 相对连杆

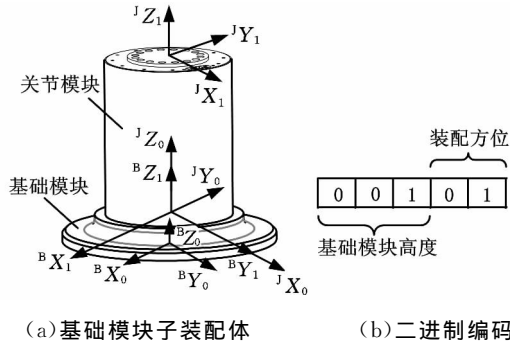


图 3 基础模块子装配体编码

模块 i 的装配方位为 180° 。该子装配体的二进制编码如图 4b 所示。

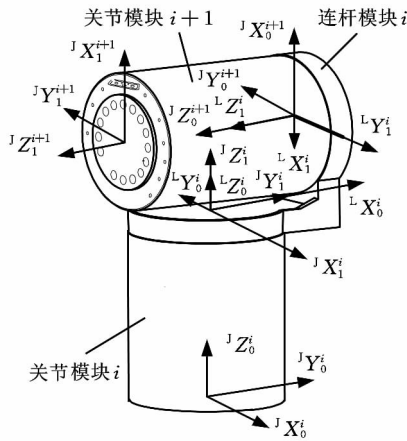


图 4 子装配体编码

对于一个 n 自由度模块化机械臂,其拓扑结构的二进制编码如图 5 所示。

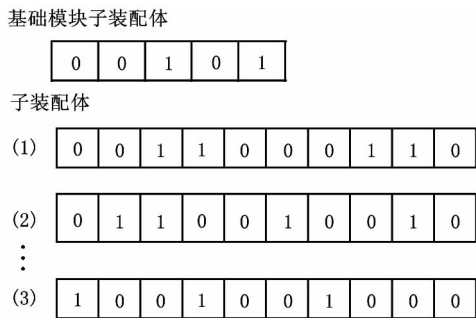


图 5 构型的二进制编码

2.3 运动学分析

一个 n 自由度机械臂的拓扑结构信息(模块的种类、参数及装配顺序和方位)可以通过对构型进行编码解码获得。当所有关节都处于零位时, i 号关节的输入坐标系相对基础模块输入坐标系位

姿的齐次变换矩阵为

$$T_i = \begin{cases} T_B \cdot T_i^J & i = 1 \\ T_{i-1}^J \cdot T_{i-1}^L \cdot T_{i-1}^G & i = 2, 3, \dots, n \\ T_n^J \cdot T_n^L \cdot T_n^G & i = n + 1 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} R_i & p_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_i & o_i & \omega_i & p_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式中, T_i 为位姿矩阵; R_i 为 3×3 姿态矩阵; n_i, o_i, ω_i 为 R_i 的各列; p_i 为位置矢量; T_B, T_i^J, T_i^L, T_i^G 分别为基础模块、 i 号关节模块(处于零位)、 i 号连杆模块、夹爪模块的输出坐标系相对于各自输入坐标系的齐次变换矩阵; $T_{i-1}^J, T_{i-1}^L, T_{i-1}^G$ 分别为关节模块、连杆模块和夹爪模块相对于其前一个模块的装配方位; T_{n+1} 为夹爪模块的输出坐标系相对于基础模块位姿的齐次变换矩阵^[14]。

由式(1)可知,对于转动关节模块,关节旋量坐标为^[15]

$$\xi_i = \begin{bmatrix} v_i \\ \omega_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\omega_i \times p_i \\ \omega_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, v_i 为矢量,具有速度的量纲。

对于伸缩关节,关节旋量坐标为

$$\xi_i = [\omega_i \ 0]^T \quad (3)$$

对于任意给定的 n 自由度模块化机械臂,运动学模型为

$$f_{BG}(\theta) = e^{\xi_1 \theta_1} e^{\xi_2 \theta_2} \dots e^{\xi_n \theta_n} T_{n+1} \quad (4)$$

式中, θ_i 为单个关节变量; θ 为各个关节变量组成的关节运动矢量。

3 构型综合

3.1 设计要求

如图 6 所示,构型综合的设计要求可以划分为模块层次的设计要求和机械臂层次的设计要求。设计要求可以分为 3 种:“刚性要求”、“柔性要求”、“刚性+柔性要求”。“刚性要求”是必须满足的要求。“柔性要求”没有给出必须满足的刚性

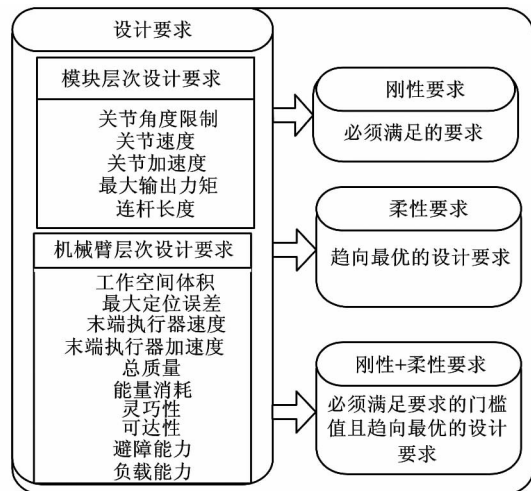


图 6 设计要求

目标,优化设计的目的是找到一个优化解。“刚性+柔性要求”即在满足给定的刚性目标的同时,要求结果尽可能的优化。一个设计要求属于“刚性要求”、“柔性要求”还是“刚性+柔性要求”取决于设计目的。以能量消耗为例,如果仅给定一个必须满足的能耗极限值,则为“刚性要求”。如果仅要求能耗值尽可能地小,则为“柔性要求”。如果既给定能耗的极限值又希望能耗值越小越好,则为“刚性+柔性要求”。

在构型综合设计过程中考虑的设计要求越多,优化得到的机械臂的整体性能就越优越,同时计算复杂性越高,计算耗时也越长。可根据使用情况选择设计要求,在本文中考虑了以下 5 个设计要求。

(1) 关节角度要求。关节角度要求属于模块层次的“刚性+柔性要求”。在使用过程中,关节的运行角度不能超过其极限位,体现为“刚性”。对不满足“刚性”要求的拓扑结构直接用过滤器处理,以提高优化效率,即

$$\theta_i^{\min} \leq \theta_i \leq \theta_i^{\max} \quad (5)$$

如果关节的移动量在极限位置和给定的门槛值之间时,体现为“柔性”。如果小于门槛值,则去除柔性约束,即

$$E_{\theta_i} = \begin{cases} e^{K_i} - 1 & 0.5 \leq K_i < 1 \\ 0 & K_i < 0.5 \end{cases} \quad (6)$$

$$K_i = 1 - \frac{|\theta - (\theta_i^{\max} + \theta_i^{\min})/2|}{(\theta_i^{\max} - \theta_i^{\min})/2}$$

式中, K_i 为关节变量的归一化处理结果。

当 $0.5 \leq K_i < 1$ 时,体现为“柔性”约束, E_{θ_i} 将经历一个指数形式的增长,这样可以保证关节变量快速远离关节极限位置。

关节运动范围子惩罚函数为

$$E_{\theta} = \sum_{i=1}^n E_{\theta_i} \quad (7)$$

(2) 拓扑结构要求。拓扑结构要求属于机械臂层次的设计要求。在某些情况下 MRRES 组成的机械臂会由于冗余自由度的存在而丧失一个或多个自由度。除非冗余自由度为设计要求,否则这种情况是应该避免的。为了避免自由度的丧失,一个 n 自由度机械臂应该满足以下 3 个设计要求:

① 两个转动关节不能被一个直线连杆连接。其数学描述为

$$E_R = \sum_{i=1}^{n-1} J_i L_i J_{i+1} \quad (8)$$

$$J_i = \begin{cases} 1 & \text{伸缩关节} \\ 0 & \text{转动关节} \end{cases} \quad L_i = \begin{cases} 1 & \text{直线连杆} \\ 0 & \text{其他连杆} \end{cases}$$

② 两个伸缩关节不能被一个直线连杆连接。其数学描述为

$$E_P = \sum_{i=1}^{n-1} (1 - J_i) L_i (1 - J_{i+1}) \quad (9)$$

③ 除最末端关节,其余各关节只允许一个接口与直线连杆相连接,即输入接口或输出接口。其数学描述为

$$E_J = \sum_{i=1}^{n-2} L_i L_{i+1} \quad (10)$$

拓扑结构要求为“刚性要求”,当 $E_R + E_J + E_P \geq 1$ 时,对应的拓扑结构用过滤器处理。

(3) 可达性要求。可达性要求属于机械臂层次的设计要求,被认为是“刚性要求”。设夹爪的目的位姿为

$$T_O = \begin{bmatrix} n_o o_o a_o & p_o \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中, T_O 为 4×4 位姿矩阵。

夹爪的可达位姿为

$$T_G = \begin{bmatrix} n_g o_g a_g & p_g \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \quad (12)$$

可达位姿可通过 Newton-Raphson 迭代法求解,目的位姿和可达位姿之间的误差为^[16]

$$e = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(n_o \times n_g + o_o \times o_g + a_o \times a_g) \\ p_o - p_g \end{bmatrix} \quad (13)$$

当目的位姿的个数为 k 时,可达性要求可写成

$$E_e = \max\{\text{norm}(e_i \cdot m_i)\} \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (14)$$

其中, m 为 6 位掩码向量,前 3 位为姿态掩码,后 3 位为位置掩码,当目的位姿对应分量不作要求时,对应的掩码值为 0,否则为 1。

当 $\|E_e\| > 0.01$ 时,对应的拓扑结构用过滤器处理。

(4) 灵巧性要求。灵巧性要求为机械臂层次的“柔性要求”。评价机械臂灵巧性的指标有很多,从计算方便提高优化效率的角度考虑,本文选择 Yoshikawa^[17] 提出的由雅可比矩阵与其转置乘积的行列式定义的可操作性作为评价指标:

$$M = \sqrt{\det(J(\theta)J^T(\theta))} \quad (15)$$

灵巧性要求的子评价函数为

$$E_{\text{Dexterity}} = \min(M_i) \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (16)$$

(5) 零位要求。零位要求属于机械臂层次设计要求。当机械臂处于非工作状态(零位)时应该保持直立状态以减少重力的影响。零位要求可视为“柔性要求”,可简单地表示为

$$E_z = \sqrt{p_x^2 + p_y^2} \quad (17)$$

式中, p_x 、 p_y 分别为夹爪坐标系原点在基础坐标系坐标值的 x 、 y 分量。

3.2 构型评价函数

模块化机器人构型综合的设计要求往往不是单一的。如图 7 所示,当给定构型与“刚性要求”或“刚性+柔性要求”的“刚性部分”相冲突时,该构型将不进行构型评价计算,直接用过滤器处理以提高构型优化设计的效率。对于满足“刚性要求”的个体,可以根据不同的设计要求逐项对构型进行评价综合,并按照设计要求的重要程度为不同的设计要求指定相应的权重系数。构型评价函数以各个子设计要求评价结果的加权之和的形式给出:

$$f(\text{Chrom}) = w_1 E_1 + w_2 E_2 + \dots + w_n E_n \quad (18)$$

式中, w_n 为第 n 个设计要求的权重系数; E_n 为第 n 个设计要求的评价结果; Chrom 为图 5 中的二进制编码。

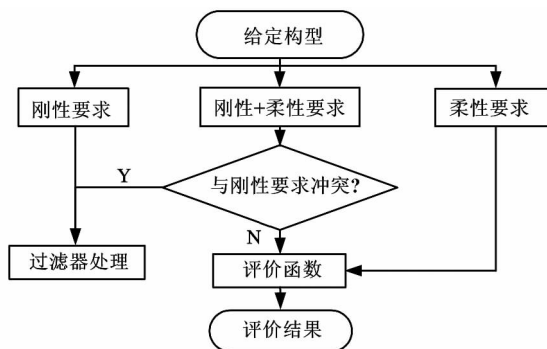


图 7 构型评价流程

3.3 拓扑构型优化

本文拓扑构型优化设计的目标是得到满足设计要求的具有最少自由度的模块化机械臂。任务用离散的夹爪位姿点来表示,机械臂自由度 n 应满足: $n = k, \text{sum}(m) \leq k \leq 7, m$ 为位姿要求掩码。结合遍历法和遗传算法的构型综合流程如图 8 所示。

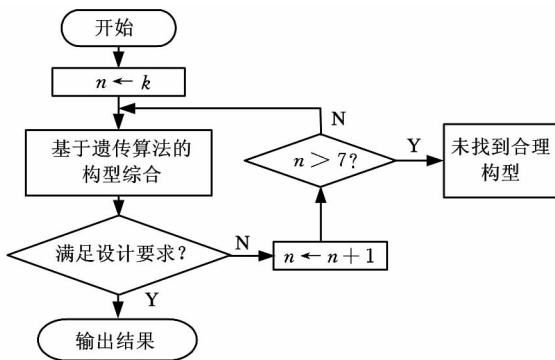


图 8 拓扑构型优化流程

在图 8 所示构型综合过程中,对于给定的自由度基于遗传算法的构型综合流程如图 9 所示。构型评价函数为惩罚函数,将评价结果从大到小排序,按照顺序为每个个体在给定区间内线性地指定适应度,评价结果较小者指定较大的适应度

值对应的拓扑结构信息能以较大的可能性遗传到下一代。通过选择、交叉和变异的过程完成拓扑结构的构型综合。与刚性要求或刚性+柔性要求的“刚性部分”冲突的个体直接用过滤器处理,过滤器不直接将个体去除,而是指定一个足够大的平均值,停止进一步的计算评价。在实际的遗传操作中该个体的基因信息几乎没有机会被遗传到下一代,换言之被过滤器处理。在优化过程中,新种群将保留旧种群中适应度较高的个体,保证已得到的优秀个体不被破坏^[18]。

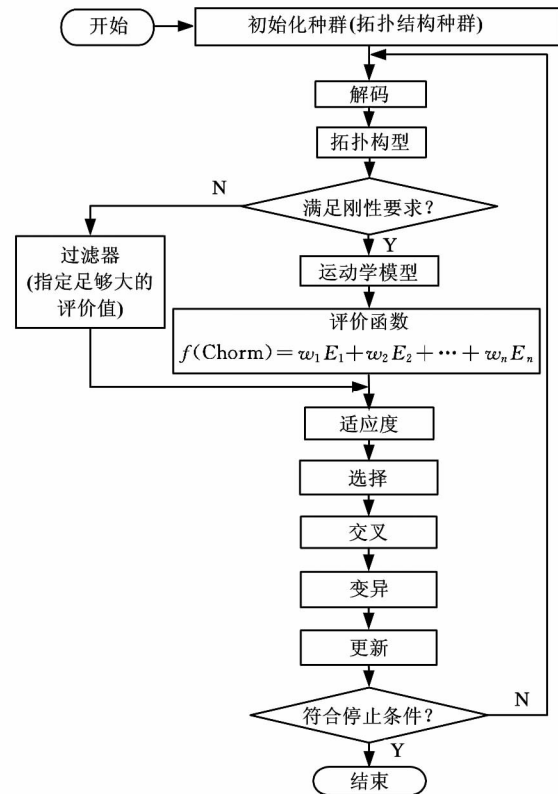


图 9 基于遗传算法的构型综合

4 构型优化实验

机器人任务通常可以描述为一系列末端执行器必须达到的工作点,可以从中选出一组关键点作为构型优化的设计目标^[12-13]。在本实验中,机器人的工作任务描述为 2 个空间位姿点(表 4)。夹爪坐标系 O_G 与目的坐标系 O_0 的原点重合,绕目的坐标系 Z 轴的旋转不作约束(图 10),即位姿要求掩码为 $m = [1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1]$ 。将 m 各项求和可得: $\text{sum}(m) = 5$,故机械臂最少应具有 5 个自由度。

表 4 夹爪目的位姿

目的位姿 1				目的位姿 2			
0.1481	0.9735	-0.1743	-330	-0.1026	0.8647	0.4918	200
-0.9020	0.2052	0.3799	250	-0.9777	0.0033	-0.2098	650
0.4056	0.1010	0.9085	830	-0.1830	-0.5023	0.8451	650
0	0	0	1	0	0	0	1

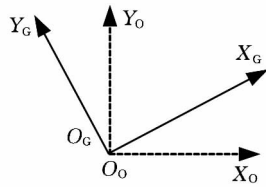


图 10 绕 Z 轴转动

根据图 8 所示流程,完成 MRRES 的拓扑构型优化设计。计算过程中,对不满足刚性要求或刚性+柔性要求中“刚性部分”的拓扑构型直接用过滤器处理,即指定一个较大的评价价值 10 000。种群中个体评价结果的最优值和平均值与进化代数的关系如图 11 所示。由“最优值”曲线可知,从第 4 代起开始出现满足“刚性”要求的个体。由“平均值”曲线可知,随着进化代数的增加,平均值逐渐下降到一个比较稳定的范围,说明满足设计要求的个体逐渐增加。由于变异等操作的作用,与“刚性”要求冲突的个体还维持在一定的数量,因此评价结果的平均值没有达到一个极小值,这说明算法具有一定的避免陷入局部最优解的能力。

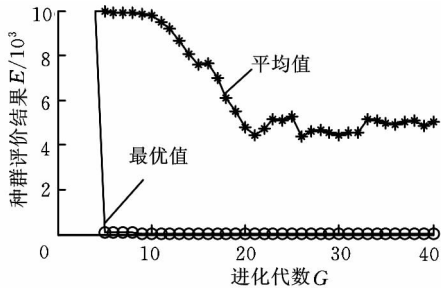


图 11 种群评价结果

计算过程中每代耗时及总耗时如图 12 所示。可知初始时代际间的时间间隔较小,原因是初始种群中大量个体与“刚性”要求冲突,这些个体不经评价计算直接由过滤器处理,缩短了计算时间,提高了寻优计算的效率。随着进化代数的增加,不满足“刚性”要求的个体开始减少,需要评价计算的个体的比例逐渐增加,因此代际间的时间间隔增加到较大值。

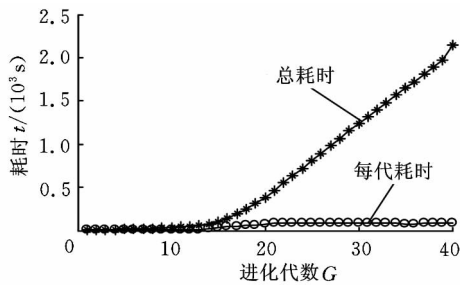


图 12 计算耗时

拓扑结构优化设计结果的二进制编码和解码见表 5。表 6 所示为夹爪实际到达位姿。由式 (13) 可得目的位姿(表 4)和可达位姿(表 6)之间的偏差:

$$\left. \begin{aligned} e_1 &= [0 \ 0 \ -0.96 \ 0 \ 0 \ 0] \\ e_2 &= [0 \ 0 \ -0.9945 \ 0 \ 0 \ 0] \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

由式(19)可知,绕 Z 轴的转动未作约束,为随机值,其他位姿分量均可满足设计要求。

表 5 拓扑结构综合结果

基础模块	关节类型	方位			连杆长度			方位		
	编码	解码	方位	方位	长度	长度	长度	方位		
基础模块	J _R	0	0	1	1	0	0	0	0	1
装配体(1)	J _R	0	0	1	1	0	1	0	0	0
装配体(2)	J _R	0	0	0	0	1	1	1	1	0
装配体(3)	J _R	0	0	0	0	1	1	1	1	0
装配体(4)	J _R	0	1	0	1	1	1	1	1	0
装配体(5)	J _R	0	0	1	0	0	1	1	0	0

表 6 夹爪的可达位姿

目的位姿 1				目的位姿 2			
0.5568	0.7609	-0.3332	-330	0.9831	-0.0937	0.1572	200
-0.7249	0.6410	0.2524	250	0.0002	0.8596	0.5110	650
0.4056	0.1010	0.9085	830	-0.1831	-0.5023	0.8451	650
0	0	0	1	0	0	0	1

图 13a 为对应的 5 自由度机械臂,图 13b、图 13c 分别为机械臂到达 2 个工作点时的位姿。

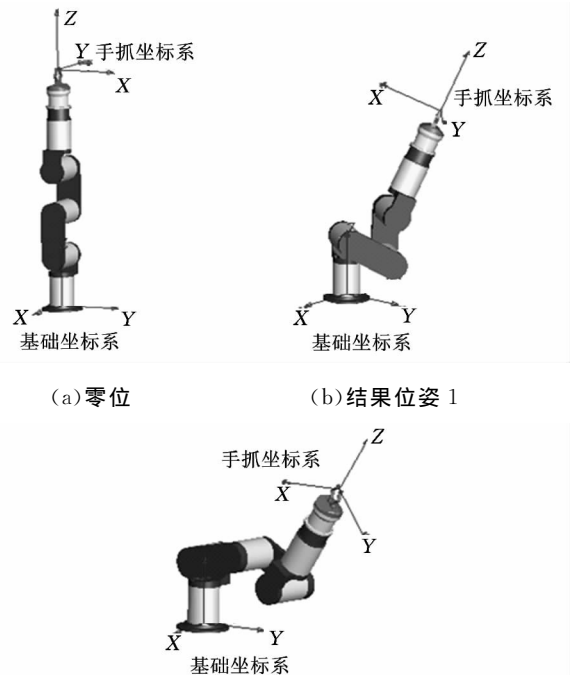


图 13 机械臂的结果位姿

5 结语

根据任务选择合理的机械臂拓扑结构是通过模块化机器人模块间组合的多样性解决机器人面临任务多样性的一项关键技术。按照性质的不同将机械臂层次和模块层次的设计要求划分为“刚性要求”、“柔性要求”、“刚性+柔性要求”。根据划分结果对不满足“刚性要求”和“刚性+柔性要求”中“刚性”部分的拓扑结构不进行评价计算,而直接由过滤器处理以提高效率。构型评价函数以各个子设计要求评价结果的加权的形式给出。以自由度最少且能满足设计要求为研究目标结合遍历法和遗传算法给出了一种用于MRRES的拓扑构型优化设计方法。构型优化实验表明该优化方法可以很好地实现MRRES的拓扑结构优化设计。

参考文献:

- [1] Paredis C J J, Brown H B, Khosla P K. A Rapidly Deployable Manipulator System[C]//IEEE International Conference on Robotics and Autonomous Systems. Minneapolis, 1996:1434-1439.
- [2] Zhu Wenhong, Lamarche T, Barnard P. Modular Robot Manipulators with Preloadable Modules[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Harbin, 2007:7-12.
- [3] 魏延辉, 朱延和, 赵杰, 等. 基于柔性化工作的可重构机器人系统设计[J]. 吉林大学学报(工学版), 2009, 38(2):449-453.
- Wei Yanhui, Zhu Yanhe, Zhao Jie, et al. Reconfigurable Robot System Design Based on Flexible Work[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2009, 38(2):449-453.
- [4] Ceccarelli M, Carbone G, Ottaviano E. Multi Criteria Optimum Design of Manipulators[J]. Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences, 2005, 53(1):9-18.
- [5] Chocron O. Evolutionary Design of Modular Robotic Arms[J]. Robotica, 2008, 26(3):323-330.
- [6] Chocron O, Bidaud P. Genetic Design of 3D Modular Manipulators[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Albuquerque, 1997:223-228.
- [7] Chocron O, Bidaud P. Evolutionary Algorithms in Kinematic Design of Robotic Systems[C]//Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Grenoble, 1997:1111-1117.
- [8] 魏延辉, 赵杰, 蔡鹤皋. 基于任务的模块机器人构形确定方法[J]. 机械工程学报, 2006, 42(5):

93-97.

Wei Yanhui, Zhao Jie, Cai Hegao. Task-based Method for Determining Topology of Reconfigurable Modular Robot[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 5(42):93-97.

- [9] Chen I M, Burdick J W. Determining Task Optimal Modular Robot Assembly Configurations[C]//Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Nagoya, 1995:132-137.
- [10] Chen I M, Yang G L. An Evolutionary Algorithm for the Reduction of DOFs in Modular Reconfigurable Robots[C]//Proceeding of the ASME Dynamic System and Control Division. Anaheim, 1998:759-766.
- [11] Chung W K, Han J, Youm Y, et al. Task Based Design of Modular Robot Manipulator Using Efficient Genetic Algorithm[C]//Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Albuquerque, 1997:507-512.
- [12] Bo Dong, Li Yuanchun. Multi-objective-based Configuration Generation and Optimization for Reconfigurable Modular Robot[C]//Proceeding of the IEEE International Conference on Information Science and Technology. Nanjing, 2011:1006-1010.
- [13] Yang Guilin, Chen I M. Task-based Optimization of Modular Robot Configurations: Minimized Degree-of-freedom Approach[J]. Mechanism and Machine Theory, 2000, 35(4):517-540.
- [14] Gao Wenbin, Wang Hongguang, Jiang Yong, et al. Task-based Configuration Synthesis for Modular Robot[C]//Proceeding of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Chengdu, 2012:789-794.
- [15] Murray R M, Li Z, Sastry S S, et al. A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation[M]. Boca Raton: CRC Press, 1994.
- [16] Paul R P. Robot Manipulators: Mathematics, Programming and Control [M]. Cambridge: MIT Press, 1981.
- [17] Yoshikawa T. Foundations of Robotics: Analysis and Control[M]. Cambridge: MIT Press, 1990.
- [18] 雷英杰, 张善文, 李续武, 等. MATLAB 遗传算法工具箱及应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005. (编辑 陈勇)

作者简介: 高文斌, 男, 1983年生。中国科学院沈阳自动化研究所博士研究生。主要研究方向为机器人学和机电一体化技术。发表论文10余篇。王洪光, 男, 1965年生。中国科学院沈阳自动化研究所研究员、博士研究生导师。姜勇, 男, 1975年生。中国科学院沈阳自动化研究所副研究员、博士。潘新安, 男, 1982年生。中国科学院沈阳自动化研究所博士研究生。