中国科学 E 辑: 信息科学
2007 年 第 37 卷 第 10 期: 1316~1328
http://www.scichina.com

《中国科学》杂志社
SCIENCE IN CHINA PRESS

一种可重构模块机器人中心构形的选择方法

刘金国[1,2*] 王越超[1] 李 斌[1] 马书根[1,3] 谈大龙[1]

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学重点实验室, 沈阳 110016; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039; 3. 日本立命馆大学 COE 推进机构, 滋贺 525-8577 日本)

摘要 可重构模块机器人具有多种构形以适应不同环境和任务的要求, 构形的多变增加了构形研究的难度. 在可重构模块机器人的众多构形中, 中心构形作为可重构模块机器人的首选构形或基准构形, 对系统的实际应用有重要参考价值. 文中提出了一种在所有构形中选择一个中心构形的方法. 根据构形之间可以相互转化的拓扑特征, 利用网络图中的基本思想和原理对可重构模块机器人的构形进行建模; 相应定义了构形转换耗值矩阵和构形中心因子, 根据最大构形中心因子可以对中心构形进行选择. 以中国科学院沈阳自动化研究所研制的三模块可重构机器人 AMOEBA-I 为例, 利用仿真计算的结果对机器人 9 种构形的中心因子进行计算和比较, 验证了该方法的可行性. 最后根据构形邻接数, 给出了中心构形选择方法的应用举例. 此方法还可以适用于其他可重构模块机器人系统中心构形的选择.

关键词 可重构机器人 模块机器人 中心构形 构形网络 构形转换耗值矩阵 构形中心因子

0 引言

随着机器人技术的不断发展, 机器人从定点作业逐步转向非结构环境或危险环境中的移动作业, 人们越来越希望机器人能完成更加复杂的任务. 然而, 单台机器人受其自身结构和系统功能的限制, 不具备足够的灵活机动性, 机器人需要通过“以变应变”才能够适应复杂的环境和任务——可重构模块机器人的研究正是针对此类背景开始的. 可重构模块机器人是一种由各种功能模块组成, 能根据任务需要改变自身构形的机器人; 它集应变功能、运动功能、自主

收稿日期: 2006-12-14; 接受日期: 2007-03-22
国家“八六三”高科技计划(批准号: 2001AA422360)、中国科学院创新基金(批准号: A050104, F050108)和中国科学院研究生院 BHP Billiton 奖学金资助项目
*联系人, E-mail: liujinguo@sia.cn

功能和协作功能于一体, 能够根据环境和任务改变和优化自身的结构, 快速、有效地响应和完成指定任务, 在国防军事、城市安全、航空航天和核工业等领域具有广泛的应用前景. 因此, 自20 世纪 80 年代以来, 基于可重构、模块化等思想的机器人技术研究一直是机器人研究领域的热点, 是当前机器人技术发展的一个重要方向 [1~34]. 国际上有许多研究室和研究者开展了可重构模块机器人技术的研究, 其中国外主要的研究机构和他们相应研制出的有代表性的平台有: 1) 美国USC-ISI(CONRO, SupBot, MORPHOS, SeRes)[3,4]; 2) 美国PARC(PolyBot, PolyPod, Telecube, digital clay)[5,6]; 3) 美国CMU(reconfigurable modular manipulator system, I-Cubes)[7,8]; 4) 日本AIST(MTRAN-III reconfigurable robots, M-TRAN)[9~11]; 5) 日本Fukuda Laboratory (CEBOT)[12]; 6) 英国Dartmouth Robotics Laboratory(Crystaline, molecular robots)[13,14]等. 国内上海交通大学 [15~17]、中国科学院沈阳自动化研究所 [18~23]、北京航空航天大学 [24,25]、哈尔滨工业大学 [26,27]和清华大学 [28]等单位也对可重构模块机器人进行了相应的理论和实验研究, 并逐渐得到国际同行的关注和认可.

可重构模块机器人的环境适应能力反映到系统的软、硬件设计当中, 构形研究是系统设计的核心内容. 因为构形不仅反映了机器人的拓扑结构, 还包含机器人的可控性、运动学性能和动力学性能等特征. 现有文献对可重构机器人构形研究的内容主要包括: 系统构形设计 [1,2,5~7,11~14,18,21,24,27,28,31]、构形综合研究 [19,25,26,28~30,33]、构形运动控制 [3,4,8,15,17,20,24,34]和重构变形方法 [9,10,16,22,32]等, 但对中心构形的研究鲜见报道. 中心构形作为可重构模块机器人的首选构形或基准构形, 对系统的实际应用有重要参考价值. 可重构机器人的构形随着组成机器人的模块的数量增加而呈指数增长 [9,19,33,34], 在数量众多的构形中, 中心构形的选择依据可以参照两个方面: 1) 构形物理特性——具有最佳的运动学和动力学性能; 2) 构形拓扑特征——具有最佳的灵活性和应变能力. 本文将根据后者来选择可重构模块机器人的中心构形, 主要出于以下几点考虑:

(ⅰ) 中心构形要具有基准作用, 是机器人初始化时所选择的构形, 是机器人系统构形的“原点”; 中心构形的设置将为构形控制提供参考.

(ⅱ) 中心构形具有衔接和辐射作用, 是机器人构形互相转换的枢纽; 一旦中心构形出现故障, 构形间的互相转换将受到影响, 因此实际应用中尽可能保证中心构形的可靠性和稳定性.

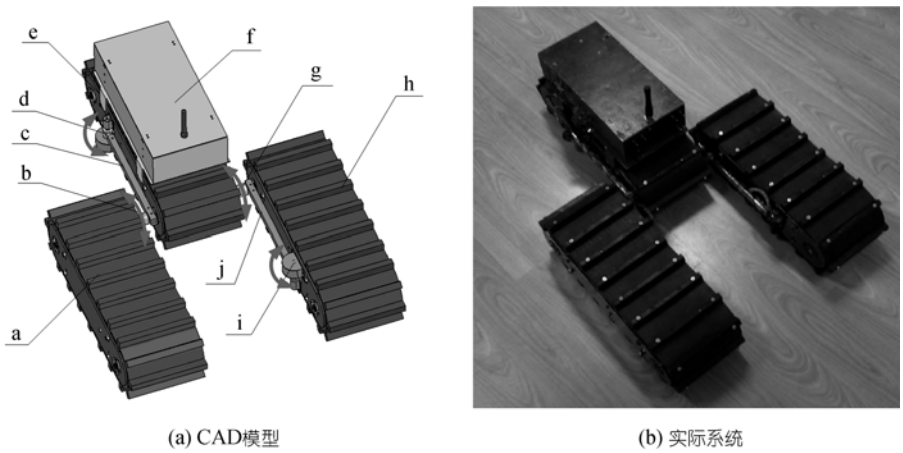
(ⅲ) 中心构形具有最大的灵活机动性, 尽可能具有最大转化成其他构形的可能性和其他构形转化到该构形的可能性; 一旦机器人在中心构形时不能完成指定任务或者陷入困境, 机器人系统将具有最大的“逃生”可能, 亦即机器人将迅速选择性地转化成其他构形而完成作业任务.

在可重构模块机器人的众多构形中, 人工的手段难以完备、准确地对这些构形优化选择, 因此本文将提出一种选择中心构形的方法: 首先根据构形之间可以相互转化的拓扑特征, 利用网络图中的基本思想和原理对可重构模块机器人的构形进行了建模; 然后以中国科学院沈阳自动化研究所研制的可重构模块机器人 [18~23]为例, 通过仿真计算来验证该方法的可行性.

1　可重构模块机器人平台

在非结构环境中, 移动机器人平台的运动能力和适应能力十分关键. 目前, 各种用于非结构环境的移动机器人机构当中, 链式机构由于具有多于确定空间位置和姿态所需的自由度,

已被证明是拥有广泛用途的机器人模型; 但是链式结构也具有转向半径大、侧向稳定性差等缺点[18]. 在现有的机器人链式机构中, 相邻关节通常具有 1~3 个自由度, 但是这些自由度由于模块之间的物体位置的限制和干涉, 相邻关节的运动角度受到限制. 为此, 我们利用关节偏置的方法提出了一种新的可变形的链式结构, 并先后研制了三轮样机, 进行了变形实验和环境性能实验, 对系统的变形机理、非同构构形和倾翻稳定性等进行了一系列的研究[18~23]. 如图 1 所示, 模块的仰俯和偏转关节分别置于模块的两侧, 模块间通过连接臂来进行连接, 通过模块与连接臂的相互位置变化而实现自动变形的功能; 图示的三模块可重构机器人平台是我们研制的第三轮样机.



(a) CAD模型 (b) 实际系统

图 1 三模块可重构机器人平台 AMOEBA-I

a. 模块 A; b. 模块 A 的仰俯关节; c. 模块 A 和模块 B 之间的连接臂; d. 模块 B 的偏转关节; e. 模块 B; f. 无线监控系统云台; g. 模块 B 的仰俯关节; h. 模块 C; i. 模块 C 的偏转关节; j. 模块 B 和模块 C 之间的连接臂

三模块可重构机器人采用了一种可变形的链式结构, 这种链式结构的特点是: 不论组成模块的多少, 它总能够通过偏转关节和仰俯关节的组合运动而变形以得到多种不同的构形, 特别是两种规则的对称构形: 直线构形和并排构形, 此外还有多种中间构形. 文献[19]根据模块的物理结构和邻接关系用构形矩阵来表达机器人结构的拓扑信息, 提出了基于组合计数原理的递归算法, 用于多模块机器人非同构构形的计数和评价. 根据文献[19]的计数结果, 三模块的可重构机器人具有 9 种非同构构形, 其中有 3 种为对称构形. 如图 2 所示, 三模块可重构机器人有 9 种构形: 3 种对称构形和 6 种中间构形. 其中, 3 种对称构形为直线形态、三角形态和并排形态, 分别记为L, T和R; 6 种中间构形分别记为j, d, g, h, q和p. 文献[22]进一步对机器人系统构形之间的互相转换方法进行了研究.

在文献[18]中, 我们对可重构模块机器人的不同构形进行了运动性能实验, 实验表明, 几种形态的运动能力各有利弊, 难以统一评价; 因此, 本文在中心构形的选择方面, 主要考虑机器人构形转换之间的拓扑关系.

2 基于图论的构形网络建模

图论是数学的一个分支, 它已经广泛地应用于物理学、控制论、信息论、工程技术、交通运输、经济管理和电子计算机等领域[35~37]. 图论中的网络是由若干给定的点(称为“节点”)及连

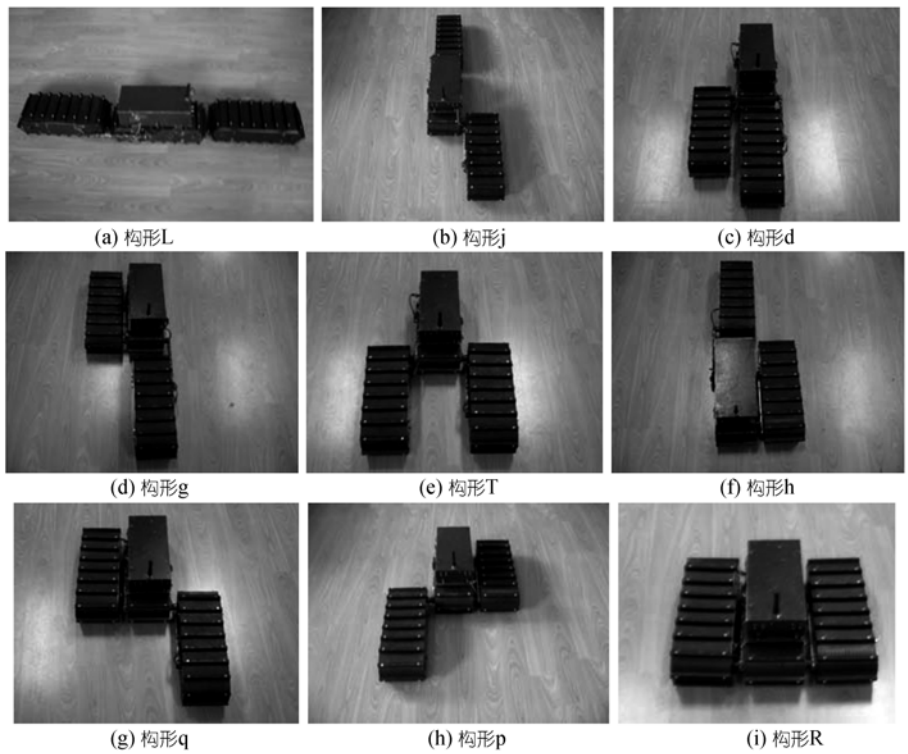


图 2　可重构模块机器人 AMOEBA-I 的 9 种构形

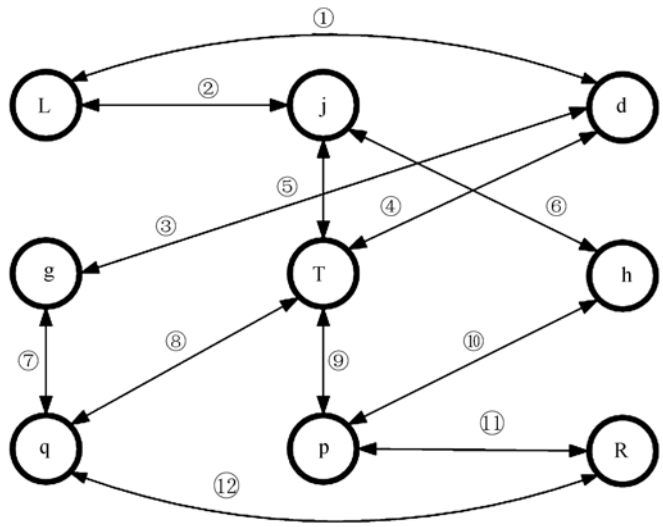


图 3　可重构模块机器人 AMOEBA-I 的构形变化网络关系

接两点的线(称为“边”)所构成的图形. 这种图形通常用来描述某些事物之间的某种特定关系, 用节点代表事物, 用边表示相应两个事物间具有的关系. 在可重构模块机器人构形研究中, 可

重构模块机器人具有多种构形. 相近的构形可以互相变换, 不相近的构形有多种转换方式. 构形之间相互存在着密切的转换关系, 这种联系正好与图论中的网络结构形式形成对应关系, 每种构形对应图中的顶点, 构形变换关系对应图的边, 构形相互变化的难易程度可以对应于顶点间的路径的长度. 因此, 本文将以三模块可重构机器人构形间的关系为例, 利用构形和网络图的相似性, 对构形进行建模, 根据图论中的有关算法, 对构形之间的关系进行分析. 如图 3 所示, 9 种构形间有 12 种邻接转换关系. 每种邻接关系表示一种构形变成另一种构形, 由机器人的偏转关节或者仰俯关节运动 180°而实现. 我们参照图 1 的 CAD 模型, 设定俯视时偏转关节的顺时针方向运动为正, 设定左视时仰俯关节的顺时针方向运动为正; 图 3 的构形转换关系中, 机器人对应的变形过程如表 1 所示.

表 1 可重构机器人 AMOEBA-I 的构形转换关系

	变形 I	变形 I 的关节运动	变形 II	变形 II 的关节运动
(1)	L→d	模块 B 的偏转关节运动+180°	d→L	模块 B 的偏转关节运动–180°
(2)	L→j	模块 C 的偏转关节运动+180°	j→L	模块 C 的偏转关节运动–180°
(3)	d→g	模块 A 的仰俯关节运动+180°	g→d	模块 A 的仰俯关节运动–180°
(4)	d→T	模块 C 的偏转关节运动+180°	T→d	模块 C 的偏转关节运动–180°
(5)	j→T	模块 B 的偏转关节运动+180°	T→j	模块 B 的偏转关节运动–180°
(6)	j→h	模块 B 的仰俯关节运动+180°	h→j	模块 B 的仰俯关节运动–180°
(7)	g→q	模块 C 的偏转关节运动+180°	q→g	模块 C 的偏转关节运动–180°
(8)	T→q	模块 A 的仰俯关节运动+180°	q→T	模块 A 的仰俯关节运动–180°
(9)	T→p	模块 B 的仰俯关节运动+180°	p→T	模块 B 的仰俯关节运动–180°
(10)	h→p	模块 B 的偏转关节运动+180°	p→h	模块 B 的偏转关节运动–180°
(11)	p→R	模块 A 的仰俯关节运动+180°	R→p	模块 A 的仰俯关节运动–180°
(12)	q→R	模块 B 的仰俯关节运动+180°	R→q	模块 B 的仰俯关节运动–180°

根据网络图的性质, 图 3 的构形变化图可以由它的邻接性和关联性所确定, 这种信息可以很方便地用邻接矩阵表示出来. 根据图论中关于邻接矩阵的描述, 图 3 中 9 种构形和 12 种邻接关系所对应的构形邻接矩阵 A 可表示为

$$A=\begin{array}{c} \\ \mathrm{L} \\ \mathrm{d} \\ \mathrm{j} \\ \mathrm{g} \\ \mathrm{T} \\ \mathrm{h} \\ \mathrm{q} \\ \mathrm{p} \\ \mathrm{R} \end{array}\begin{array}{c}\begin{array}{ccccccccc} \mathrm{L} & \mathrm{d} & \mathrm{j} & \mathrm{g} & \mathrm{T} & \mathrm{h} & \mathrm{q} & \mathrm{p} & \mathrm{R} \end{array}\\ \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \end{array}.$$

3 构形转换耗值和构形中心因子

3.1 构形转化耗值矩阵

在网络和图论中, 大量的优化问题均可以等价为图论中最佳路径和中心选址的问题. 最佳路径的评价可以有很多方法, 比如, 在运输传送网络中的费用最少的路径; 在通讯网络中,

信息传递的最大可靠性的路径; 邮递员送信取信的最短路径等. 根据实际情形的需要, 评价构形转化时机器人系统的消耗, 其指标是不同的, 本文主要考虑以下因素.

(ⅰ) 构形转化时间. 在作业过程中, 通常时间紧迫, 为能够迅速响应作业指令和完成作业任务, 尽可能在最少的时间完成构形转化.

(ⅱ) 构形转化能量. 完成一个构形到另外一个构形转换, 机器人的各个关节可以独立作业也可以协调作业, 尽可能以最小的能量来完成构形的转化.

(iii) 构形转换空间. 在构形转换过程中, 在机器人关节运动过程中, 构形变化需要一定的空间, 在执行隐蔽作业, 或在狭小空间中作业时, 构形转换空间尽可能小.

(iv) 构形转化可靠性. 机器人在构形转换时, 机械系统和控制系统的可靠性也应该适当考虑, 比如系统最大电流, 机械系统所能承受的最大作用力, 电机最大输出力矩等等.

机器人在构形转换过程中, 受地面条件、环境限制、外载荷作用和作业任务要求等条件的影响, 以上 4 个方面的要求有不同的侧重. 综合以上 4 个方面, 下面对构形转化的耗值矩阵进行定义. 在计算耗值矩阵时, 我们采用了简化考虑影响因素的方法.

定义 1　在有 k 种构形的构形变化图 G 中, 其构形转化耗值矩阵 $C(G)=[c_{ij}]_{k\times k}$ 是一个 $k\times k$ 阶的矩阵. c_{ij} 为构形 a_i 转化到构形 a_j 所需要的耗值, 通常综合考虑时间、能量、空间和可靠性等因素.

c_{ij} 的数值有以下 3 种情形:

(ⅰ) $c_{ij}>0$, 当构形 a_i 可以直接转化到构形 a_j 时, 所需要的耗值为

$$c_{ij}=Ti_{ij}\cdot\sqrt{To_{ij}Mt_{ij}}\sqrt[3]{Sp_{ij}}, \tag{1}$$

式中 Ti_{ij}, To_{ij}, Sp_{ij} 和 Mt_{ij} 分别为构形转化的时间、平均力矩、空间和最大力矩等值. 对应的矩阵 Ti, To, Sp 和 Mt 分别为构形转换的时间矩阵、平均力矩矩阵、空间矩阵和最大力矩矩阵.

(ⅱ) $c_{ij}=0$, 当 $i=j$ 时.

(iii) $c_{ij}=\infty$, 当构形 a_i 不能直接转化到构形 a_j.

构形耗值矩阵表征了邻接构形之间相互转化时的时间、能量、空间和可靠性 4 方面的因素, 根据实际需要, 我们可以增加考虑其他一些因素, 也可以忽略其中某些因素. 由于实际情形中构形 a_i 转化到构形 a_j 的耗值与构形 a_j 转化到构形 a_i 的耗值不一定相同, 所以构形转化耗值矩阵不一定是一个对称矩阵.

在一个连通的构形转化网络图中, 从一个构形, 总可能转化到另外一个构形; 构形之间的互相转化所需要的最小耗值, 可以通过求解图论中两点之间最短路径的方法求得. 下面对构形转化的最小耗值矩阵进行定义.

定义 2　在有 k 种构形的构形变化图 G 中, 其构形转化最小耗值矩阵 $D(G)=[d_{ij}]_{k\times k}$ 是一个 $k\times k$ 阶的矩阵, 其中 d_{ij} 为构形 a_i 转化到构形 a_j 所需要的最小耗值.

d_{ij} 的数值有以下两种情形:

(ⅰ) $d_{ij}>0$, 构形 a_i 可以转化到构形 a_j 时;

(ⅱ) $d_{ij}=0$, 当 $i=j$ 时.

最小耗值矩阵反映了所有构形之间互相转化的难易程度, 其值将为构形中心的选择提供重要依据.

3.2 构形中心因子

网络的中心选址类型和方法有很多 [37~41], 选址问题主要讨论网络中心和网络重心. 所谓网络中心指的是网络上该顶点到其他顶点的最大距离最小的点, 而网络重心指的是该顶点到网络上其他顶点的距离和最小的点 [37]. 中心构形的选择与之有很大的相似性和密切联系. 在可重构模块机器人的控制系统中和执行作业任务时, 有一个初始构形和基准构形的设置问题, 我们称这种构形为中心构形, 中心构形的选择对系统投入实际应用有着重要的参考意义. 在中心构形的选择中, 我们根据实际场合需要, 主要考虑构形转化时所涉及到的以下因素:

(ⅰ) 构形邻接数. 尽可能选定具有最多邻接关系的构形为初始构形和基准构形, 在机器人遇到危险或困难时, 机器人此时具有最大的逃逸困境的可能. 在可重构模块机器人系统中, 我们对构形邻接矩阵进行求列或行的和, 对任意构形 a_i (i=1,⋯, k), 因为构形邻接矩阵为对称矩阵, 所以列和与行和相等. 构形邻接数为

$$Ca_i = \sqrt{\sum_{l=1}^{n} a_{il} \cdot \sum_{l=1}^{n} a_{li}}. \tag{2}$$

(ⅱ) 构形转化耗值半径. 根据构形转换最小耗值矩阵, 完成一个构形到另外一个构形能够以最小耗值转换, 对任意构形 a_i (i=1,⋯, k), 构形转换耗值半径为该构形转化到任意构形的最大耗值和任意构形转化到该构形的最大耗值两者乘积的平方根

$$Cr_i = \sqrt{\max_{1\leqslant i\leqslant k}(d_{ij}) \cdot \max_{1\leqslant j\leqslant k}(d_{ij})}. \tag{3}$$

(ⅲ) 构形转化耗值距离. 根据构形转换最小耗值矩阵, 任何一个构形均能够转换到另外一个构形, 对任意构形 a_i (i=1,⋯, k), 构形转换耗值距离为该构形转化到其他任意构形的耗值总和和任意构形转化到该构形的耗值总和两者乘积的平方根

$$Cd_i = \sqrt{\sum_{i=1}^{k} d_{ij} \cdot \sum_{j=1}^{k} d_{ij}}. \tag{4}$$

在中心构形的选择中, 我们综合上述因素, 构形中心因子的计算表达式初步设定为

$$Ce_i = \frac{Ca_i}{\sqrt{Cr_i Cd_i}}. \tag{5}$$

为了便于分析和比较, 我们利用(5)式计算的结果进行归一化, 经过如下变换转化为无量纲的纯量, 构形中心因子为

$$Cc_i = \frac{Ce_i}{\left(\sum_{j=1}^{k} Ce_j\right)\Big/k} (i = 1,\cdots,k). \tag{6}$$

在实际应用中, 我们选择具有最大中心因子的构形为中心构形.

4　仿真计算

如图 4 所示, 下面利用动力学仿真软件COSMOSMotion[1)]对三模块可重构机器人在不平地面进行构形转换时的耗值进行计算, 以便对构形最佳转换耗值仿真分析. 在计算耗值矩阵时, 所需要考虑的因素太多, 难以面面俱到, 这里我们采用了前面简化的方法. 分别计算构形转换的时间矩阵、平均力矩矩阵、空间矩阵和最大力矩矩阵.

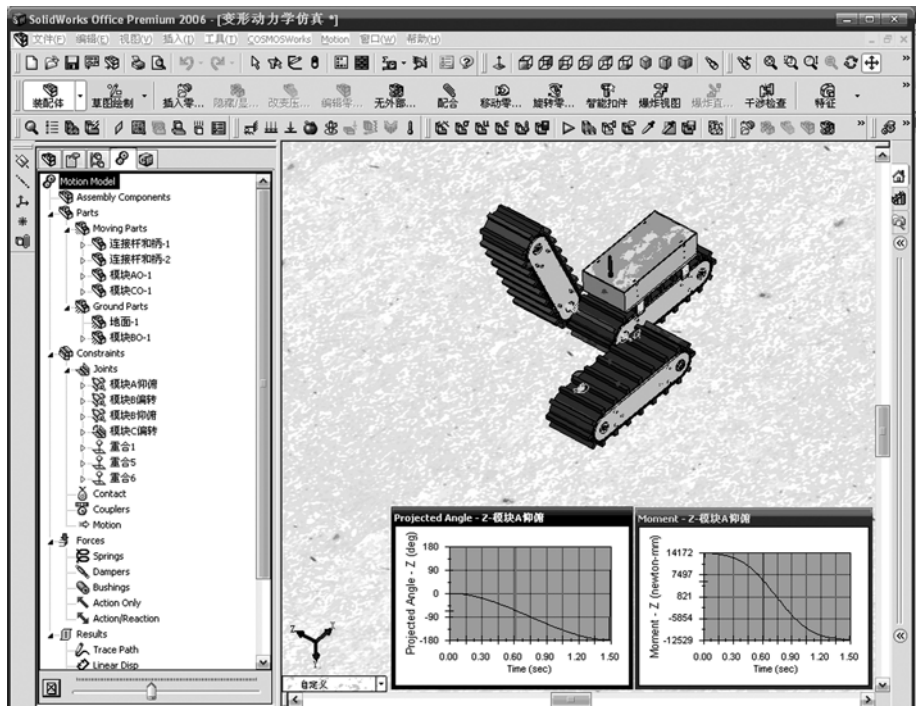


图 4　COSMOSMotion 中构形变换的仿真环境

仿真时, 将履带与地面的静摩擦设置为 0.3, 动摩擦设置为 0.25, 变形过程中关节的运动调用软件中的渐近阶跃函数, 仿真时间设置如下(单位: s):

$$Ti=\begin{pmatrix} 0 & 2 & 1 & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty \\ 2 & 0 & \infty & 1.5 & 1 & \infty & \infty & \infty & \infty \\ 1 & \infty & 0 & \infty & 2 & 1.5 & \infty & \infty & \infty \\ \infty & 1.5 & \infty & 0 & \infty & \infty & 1 & \infty & \infty \\ \infty & 1 & 2 & \infty & 0 & \infty & 1.5 & 1.5 & \infty \\ \infty & \infty & 1.5 & \infty & \infty & 0 & \infty & 2 & \infty \\ \infty & \infty & \infty & 1 & 1.5 & \infty & 0 & \infty & 1.5 \\ \infty & \infty & \infty & \infty & 1.5 & 2 & \infty & 0 & 1.5 \\ \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & 1.5 & 1.5 & 0 \end{pmatrix}.$$

1) COSMOSMotion™ provides the following features and benefits [2006-05-1]. http://www.solidworks.com/pages/products/cosmos/cosmosmotion/cmfeatures.html

构形转换过程中的空间矩阵为(单位: 10^6 mm^3):

$$Sp=\begin{pmatrix} 0 & 109 & 29 & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty \\ 109 & 0 & \infty & 64 & 29 & \infty & \infty & \infty & \infty \\ 29 & \infty & 0 & \infty & 109 & 64 & \infty & \infty & \infty \\ \infty\infty & 64 & \infty & 0 & \infty & \infty & 29 & \infty & \infty \\ \infty & 29 & 109 & \infty & 0 & \infty & 64 & 64 & \infty \\ \infty & \infty & 64 & \infty & \infty & 0 & \infty & 109 & \infty \\ \infty & \infty & \infty & 29 & 64 & \infty & 0 & \infty & 64 \\ \infty & \infty & \infty & \infty & 64 & 109 & \infty & 0 & 64 \\ \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & 64 & 64 & 0 \end{pmatrix}.$$

构形转换过程中的平均力矩矩阵为(单位: N·m)

$$To=\begin{pmatrix} 0 & 3.0926 & 0.5299 & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty \\ 3.2888 & 0 & \infty & 12.046 & 0.5194 & \infty & \infty & \infty & \infty \\ 0.4925 & \infty & 0 & \infty & 3.4506 & 11.348 & \infty & \infty & \infty \\ \infty & 10.198 & \infty & 0 & \infty & \infty & 0.5410 & \infty & \infty \\ \infty & 0.5298 & 3.3829 & \infty & 0 & \infty & 11.471 & 10.945 & \infty \\ \infty & \infty & 11.167 & \infty & \infty & 0 & \infty & 3.5873 & \infty \\ \infty & \infty & \infty & 0.5927 & 10.255 & \infty & 0 & \infty & 11.706 \\ \infty & \infty & \infty & \infty & 11.160 & 3.3593 & \infty & 0 & 12.522 \\ \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & 10.167 & 10.437 & 0 \end{pmatrix}.$$

构形转换过程中的最大力矩矩阵为(单位: N·m)

$$Mt=\begin{pmatrix} 0 & 7.0293 & 1.0600 & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty \\ 7.3265 & 0 & \infty & 18.749 & 1.0483 & \infty & \infty & \infty & \infty \\ 1.0048 & \infty & 0 & \infty & 6.9123 & 17.328 & \infty & \infty & \infty \\ \infty & 9.79 & \infty & 0 & \infty & \infty & 1.0821 & \infty & \infty \\ \infty & 1.0596 & 6.9012 & \infty & 0 & \infty & 17.336 & 16.707 & \infty \\ \infty & \infty & 16.711 & \infty & \infty & 0 & \infty & 7.3180 & \infty \\ \infty & \infty & \infty & 1.2090 & 15.444 & \infty & 0 & \infty & 17.862 \\ \infty & \infty & \infty & \infty & 16.707 & 6.7186 & \infty & 0 & 18.925 \\ \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & 15.215 & 15.719 & 0 \end{pmatrix}.$$

根据(1)式, 可以求出仿真环境下, 构形转换过程中的耗值矩阵为(单位: s·N·m^2)

$$C=\begin{pmatrix} 0 & 4.4544 & 0.2303 & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty \\ 4.6896 & 0 & \infty & 9.0170 & 0.2267 & \infty & \infty & \infty & \infty \\ 0.2161 & \infty & 0 & \infty & 4.6658 & 8.4137 & \infty & \infty & \infty \\ \infty & 5.9952 & \infty & 0 & \infty & \infty & 0.2351 & \infty & \infty \\ \infty & 0.2302 & 4.6161 & \infty & 0 & \infty & 8.4611 & 7.9450 & \infty \\ \infty & \infty & 8.1964 & \infty & \infty & 0 & \infty & 4.8950 & \infty \\ \infty & \infty & \infty & 0.2601 & 7.5509 & \infty & 0 & \infty & 8.6760 \\ \infty & \infty & \infty & \infty & 8.1928 & 4.5387 & \infty & 0 & 9.2365 \\ \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & 7.4625 & 7.6851 & 0 \end{pmatrix}.$$

在图论的优化算法中, Dijkstra算法可以求出起点到其他任何一个顶点的最短路径, Floyd-Warshall算法可以求出任何一对顶点之间的最短路径 [36,37]. 由定义 2, 对三模块可重构机器人的最小耗值矩阵进行计算, 根据上面得到的构形耗值矩阵C, 利用Floyd-Warshall算法, 求得最小耗值矩阵如下(单位: s·N·m^2):

$$D=\begin{pmatrix} 0 & 4.4544 & 0.2303 & 13.4023 & 4.6811 & 8.6440 & 13.1422 & 12.6261 & 21.8182 \\ 4.6896 & 0 & 4.8428 & 8.9479 & 0.2267 & 12.7104 & 8.6878 & 8.1717 & 17.3638 \\ 0.2161 & 4.6705 & 0 & 13.3870 & 4.6658 & 8.4137 & 13.1269 & 12.6108 & 21.8029 \\ 10.6848 & 5.9952 & 10.8380 & 0 & 6.2219 & 18.7056 & 0.2351 & 14.1669 & 8.9111 \\ 4.8322 & 0.2302 & 4.6161 & 8.7212 & 0 & 12.4837 & 8.4611 & 7.9450 & 17.1371 \\ 8.4125 & 12.8669 & 8.1964 & 21.5834 & 12.8622 & 0 & 21.3233 & 4.8950 & 14.1315 \\ 10.9449 & 6.2553 & 11.0981 & 0.2601 & 6.4580 & 18.9657 & 0 & 14.4270 & 8.6760 \\ 12.9512 & 8.4230 & 12.7351 & 16.9140 & 8.1928 & 4.5387 & 16.6539 & 0 & 9.2365 \\ 18.4074 & 13.7178 & 18.5606 & 7.7226 & 13.9445 & 12.2238 & 7.4625 & 7.6851 & 0 \end{pmatrix}.$$

在三模块可重构机器人系统中, 我们根据构形邻接矩阵和构形最小耗值矩阵, 由公式(1)~(6)可以分别求得对应构形 L, d, j, g, T, h, q, p 和 R 的构形邻接数、构形转化耗值半径、构形转化耗值距离和构形中心因子, 其计算结果如表 2 所示.

表 2　不同构形的构形中心因子

	L	d	j	g	T	h	q	p	R
Ca_i	2	3	3	2	4	2	3	3	2
Cr_i	20.0404	15.4335	20.1165	20.0930	15.4586	20.2323	20.1100	15.6211	20.1236
Cd_i	74.9657	60.9601	74.9047	83.0022	60.7467	100.4068	82.8847	86.0128	108.9719
Ce_i	0.0516	0.0978	0.0773	0.0490	0.1305	0.0444	0.0735	0.0818	0.0427
Cc_i	0.7160	1.3572	1.0724	0.6796	1.8112	0.6157	1.0196	1.1357	0.5926

在图 4 所示的仿真环境中, 在考虑构形转换的邻接数和构形转换耗值等因素下, 9 种构形中, 构形 T 的中心因子最大, 构形 R 的中心因子最小, 因此我们可以选择构形 T 为中心构形.

5　应用举例

前面提到, 中心构形应该尽可能具有最大的灵活机动性, 有最大转化成其他构形的可能性和其他构形转化到该构形的可能性; 一旦机器人在中心构形时不能完成指定任务或者陷入困境, 机器人系统将具有最大的“逃生”可能, 亦即机器人将迅速选择性地转化成其他构形而完

成作业任务. 构形邻接数是中心构形选择的主要因素之一, 它比较明晰地反映了单个构形与邻接构形之间的转换可能性和灵活性. 在可重构模块机器人的运动控制过程中, 如果在当前构形状态下, 机器人不能够继续运动、出现故障或不能够完成作业任务时, 构形邻接关系可以为构形的迅速转换提供依据.

因此, 这里我们以构形邻接数为例来说明中心构形的选择, 假定构形中心因子等同于构形邻接数, 忽略其他因素的影响. 表 2 的计算结果表明, 根据(2)式可以计算得出构形 L, d, j, g, T, h, q, p 和 R 的构形邻接数分别为: 2, 3, 3, 2, 4, 2, 3, 3 和 2, 其中构形 T 的构形中心因子最大, 构形 d, j, q, p 的构形中心因子次之, 构形 L 和 R 的构形中心因子最小. 根据构形中心因子, 可以对图 3 进行调整. 图 5(a)给出了各构形(2 维投影简图)在调整后的构形网络中的相互关系, 中心构形 T 的位置一定程度上也反映了它在构形网络中的中心位置, 具有连接和枢纽作用. 因此, 在现有的平台中, 将中心构形 T 设置为基准构形和初始构形, 作为系统控制时所设置的原点. 此外, 中心构形也是构形网络中最重要的构形, 应尽可能保证该构形的可靠性, 从图 5(b)可以看出, 一旦中心构形 T 出现故障, 构形网络中其他构形的转换关系变得单一, 构形转换的灵活性也将极大地受到影响.

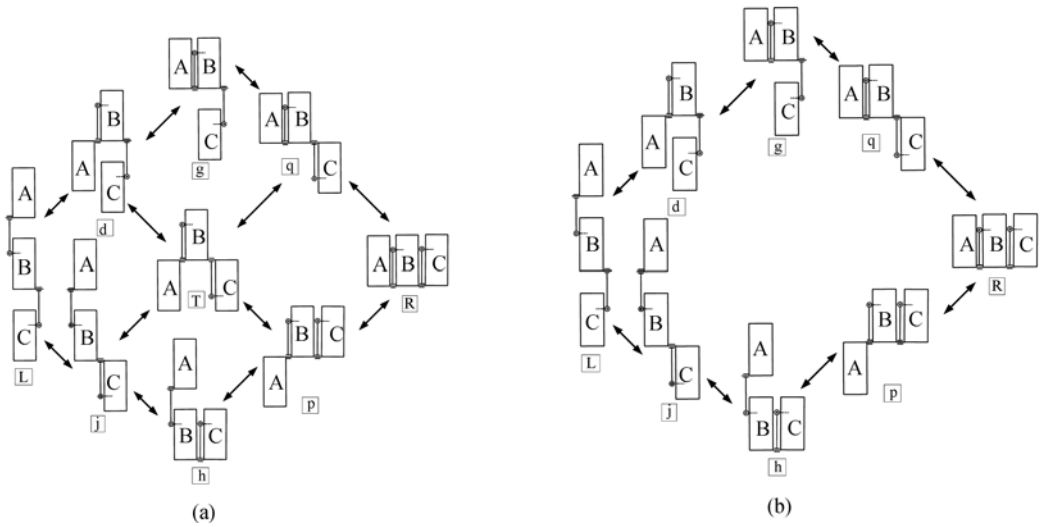


图 5 调整后的构形网络图

6 结论

可重构机器人的构形随着组成机器人的模块的数量增加而呈指数增长, 在数量众多的构形中, 中心构形作为可重构模块机器人的首选构形, 其选择和选用对机器人系统而言十分关键. 本文利用图论中的基本思想和原理对机器人的构形和构形网络进行了建模, 从构形转换的角度提出了一种中心构形的选择方法. 中心构形取决于构形网络本身的拓扑特性, 其中考虑到的因素有: 构形邻接数、构形转化耗值半径和构形转化耗值距离等; 中心构形的设置和选择对构形的运动、构形的控制和构形网络的安全性有着重要的参考意义. 在以后的工作中, 可以根据情形的需要, 通过综合考虑构形本身的物理特性和构形之间的拓扑关系对可重构机器人中心构形进行评价选择; 另一方面, 需要改进现有的机器人平台, 增加机器人对环境的感知系统, 并将传感器信息反馈到控制系统中, 以便实现机器人在不同环境中对中心构形进行自

动地、实时地选择.

参　考　文　献

1 Zykov V, Mytilinaios E, Adams B, et al. Self-reproducing machines. Nature, 2005, 435(7038): 163—164 [DOI]

2 Mackenzie D. Shape shifters tread a daunting path toward reality. Science, 2003, 301(5634): 754—756 [DOI]

3 Shen W M, Salemi B, Will P. Hormone-inspired adaptive communication and distributed control for CONRO self-reconfigurable robots. IEEE Robot Autom Mag, 2002, 18(5): 700—712 [DOI]

4 Stoy K, Shen W M, Will P. Using role based control to produce locomotion in chain-type self-reconfigurable robot. IEEE-ASME Trans Mechatron, 2002, 7(4): 410—417 [DOI]

5 Yim M. A reconfigurable modular robot with many modes of locomotion. In: Proceedings of JSME International Conference on Advanced Mechatronics. Tokyo: IEEE, 1993. 283—288

6 Yim M, Duff D, Roufas K. Polybot: A modular reconfigurable robot. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. San Francisco: IEEE, 2000. 514—520

7 Paredis C J, Brown H B, Khosla P K. A rapidly deployable manipulator system. Robot Auton Syst, 1997, 21(3): 289—304 [DOI]

8 Ünsal C, Khosla P. A multi-layered planner for self-reconfiguration of a uniform group of I-cube modules. In: Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Hawaii: IEEE, 2001. 598—605

9 Yoshida E, Murata S, Kamimura A, et al. A self-reconfigurable modular robot: Reconfiguration planning and experiments. Int J Robot Res, 2002, 21(10): 903—916 [DOI]

10 Yoshida E, Murata S, Kamimura A, et al. Evolutionary synthesis of dynamic motion and reconfiguration process for a modular robot M-TRAN. In: Proceedings of IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation. Kobe: IEEE, 2003. 1004—1010

11 Kamimura A, Kurokawa H, Yoshida E, et al. Automatic locomotion design and experiments for a modular robotic system. IEEE-ASME Trans Mechatron, 2005, 10(3): 314—325 [DOI]

12 Fukuda T, Nakagawa S. Dynamically reconfigurable robot system. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. Los Alamitos: IEEE, 1988. 1581—1586

13 Rus D, Vona M. Crystalline robots: Self-reconfiguration with compressible unit modules. Auton Robot, 2001,10(1):107—124 [DOI]

14 Kotay K, Rus D, Vona M, et al. The self-reconfiguring robotic molecule. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. Leuven: IEEE, 1998. 424—431

15 Fei Y Q, Zhao X F. Modules classification and automatic generation of kinematics on self-reconfigurable modular machines. J Intell Robot Syst, 2005, 43(2-4): 147—159 [DOI]

16 Xu W, Wang S G, Wang A L. Towards an efficient self-organizing reconfiguration method for self-reconfigurable robots. J Intell Robot Syst, 2003, 37(4): 415—425. [DOI]

17 Wu Q X, Cao G Y, Fei Y Q. Motion simulation and experiment of a novel modular self-reconfigurable robot. J Southeast Univ, 2006, 22(2): 185—190

18 Liu J G, Wang Y C, Li B, et al. Link-type shape shifting modular robot for search and rescue. High Technol Lett, 2004, 10(Suppl): 179—183

19 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

20 Liu J G, Wang Y C, Ma S G, et al. Analysis of tipover stability for novel shape shifting modular robot. Chin J Mech Eng, 2006, 19(2): 187—192

21 Liu J G, Ma S G, Lu Z L, et al. Design and experiment of a novel link-type shape shifting modular robot series. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Hongkong: IEEE, 2005. 318—323

22 Liu J G, Wang Y C, Li B, et al. Transformation technique research of the improved link-type shape shifting modular robot. In: Proceedings of IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Luoyang: IEEE, 2006. 295—300

23 李斌, 王越超, 刘金国, 等. 一种可变形履带式行走机构: 中国, 200420012106.9. 2004-03-31

24 王田苗, 邹丹, 陈殿生. 可重构履带机器人的机构设计与控制方法实现. 北京航空航天大学学报, 2005, 31(7):705—708

25 于海波, 于靖军, 毕树生, 等. 基于图论的可重构机器人构型综合. 机械工程学报, 2005, 41(8): 79—83

26 魏延辉, 赵杰, 蔡鹤皋. 基于任务的可重构模块机器人构形确定方法. 机械工程学报, 2006, 42(B05): 93—97

27 李满天, 黄博, 刘国才, 等. 模块化可重构履带式微小型机器人的研究. 机器人, 2006, 28(5): 548—552
28 郑浩峻, 汪劲松, 李铁民. 可重构机器人单元结构设计及组合特性分析. 机械工程学报, 2003, 39(7): 34—37
29 Chen I M, Burdick J W. Enumerating the non-isomorphic assembly configuration of modular robotic systems. In: Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Yokahama: IEEE, 1993. 1985—1992
30 Castano A, Will P. Representing and discovering the configuration of CONRO Robots. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. Seoul: IEEE, 2001. 3503—3509
31 Bi Z M, Zhang W J. Concurrent optimal design of modular robotic configuration. J Robot Syst, 2001, 18(2): 77—87 [DOI]
32 Yim M, Goldberg D, Casal A. Connectivity planning for closed-chain reconfiguration. In: Proceedings of SPIE 4196, Sensor Fusion and Decentralized Control in Robotic Systems III. Boston: SPIE, 2000. 402—412
33 Chen I M. Theory and applications of modular reconfigurable robotic systems. Dissertation for the Doctoral Degree. California: California Institute of Technology, 1994
34 Butler Z, Kotay K, Rus D. Generic decentralized locomotion control for lattice-based self-reconfigurable robots. Int J Robot Res, 2004, 23(9): 919—938 [DOI]
35 卢开澄. 图论及其应用. 北京: 清华大学出版社, 1981
36 Jungnickel D. Graphs, Networks and Algorithms. Berlin: Springer-Verlag, 1999
37 Edward M. 网络和图的最优化算法. 李家滢, 赵关旗, 译. 北京: 中国铁道出版社, 1984
38 杨丰梅, 华国伟, 邓猛, 等. 选址问题研究的若干进展. 运筹与管理, 2005, 14(6): 1—7
39 Foul A. A 1-center problem on the plane with uniformly distributed demand points. Oper Res Lett, 2006, 34: 264—268 [DOI]
40 Pan S, Li X. An efficient algorithm for the Euclidean r-centrum location problem. Appl Math Comput, 2005, 167(1): 716—728 [DOI]
41 Wuchty S, Stadle P F. Centers of complex networks. J Theor Biol, 2003, 223(1): 45—53 [DOI]