

一种可重构机器人运动学求解方法

魏延辉¹, 赵杰², 高延滨¹, 蔡鹤皋²

(1. 哈尔滨工程大学 自动化学院, 哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨工业大学 机器人研究所, 哈尔滨 150001, wyhhit@163.com)

摘要: 针对可重构机器人没有统一的运动学求解形式问题, 提出通过构形平面匹配方法求解可重构机器人的运动学. 采用改进形式的 D-H 建模方法, 可自动形成可重构机器人运动学模型; 将机器人在目标点的位形分解成若干个构形平面, 通过三级构形平面的匹配, 可求得具有单一串连形式可重构机器人运动学逆解; 对搭建的 6 自由度机器人和 8 自由度机器人构形的运动学进行实例仿真. 仿真结果表明, 采用有限个构形平面匹配方法能够求解出可重构机器人运动学, 验证了算法的正确性和实用性.

关键词: 可重构机器人; 运动学; 构形平面

中图分类号: TP242.2

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)01-0133-05

A solution method for kinematics of reconfigurable modular robots

WEI Yan-hui¹, ZHAO Jie², GAO Yan-bin¹, CAI He-gao²

(1. College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. Robotics Institutes, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China, wyhhit@163.com)

Abstract: Aiming at the problem that there are no unified methods for solving kinematics of reconfigurable modular robots, a way of matching configuration plane is presented. Based on the improved modeling method of D-H, kinematics models of reconfigurable modular robots can be formed automatically. Then, inverse kinematics solutions to the reconfigurable modular robots can be obtained in single tandem form through matching tertiary configurable planes after dividing the configurations of robots at objective points into a few configuration planes. Finally, simulation on robots with 6-DOF and 8-DOF are carried out, and the result validates the reliability and practicality of this method.

Key words: reconfigurable modular robots; kinematics; configuration plane

早在 1988 年, 卡内基梅隆大学就研制出了第一台可重构机器人^[1], 多伦多大学^[2] 和日本 TOSHIBA 公司^[3] 也相继研制出可重构机器人. 哈工大对可重构机器人研究较晚, 但也取得一些成绩^[4]. 然而, 没有统一形式的可重构机器人运动学求解成为其控制的难题. 国内外学者对此作了很多研究, 比较典型的方法有以下几种: 迭代算法^[5-6] 能够有效求解出机器人的数值解, 但需要更多的计算量和计算时间, 而且不能保证解的收

敛性, 不能保证实时控制; CHAPELLE^[7] 用遗传算法计算封闭形式的近似符号解, TEJOMURTULA 等^[8] 研究用神经网络计算机器人逆解; 运用旋量和指数积公式^[9-10] 提供了与关节类型无关的, 形式简洁统一的运动学正解形式, 但是运动学逆解求解过程比较复杂, 难以实现运动学的自动求解, 而且这种求解方法不具有通用性, 仅适用于某些形式的构形; 采用常规的方法对每种机器人构形都进行运动学求解, 工作量庞大. 因此, 需要一种可重构机器人运动学求解统一方法, 解决可重构机器人实时控制问题.

1 模块运动学建模方法

1.1 模块结构

可重构模块化机器人系统是由各功能模块根

收稿日期: 2008-05-26.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60705027);

中国博士后基金资助项目(20090450951);

黑龙江省博士后基金(LBH-Z082327);

高等学校博士学科点专项科研基金.

作者简介: 魏延辉(1978—), 男, 博士, 讲师;

赵杰(1968—), 男, 教授, 博士生导师;

蔡鹤皋(1933—), 男, 教授, 工程院院士.

据工作环境和任务要求经快速装配而成,机器人模块应具有如下特性:① 每个模块单元应能独立地完成某一特定的功能;② 每一模块应具有独立的驱动系统,重量和惯性应尽量小,从而获得最佳的运动和动作特性;③ 各模块具有良好的装配性和通信能力,以利于各模块协调工作;④ 各模块应具有一定的数据处理能力,一方面控制软件要有适应机器人重构后的能力,同时还应有一定的信息容错能力. 模块结构见图1. 搭建的几种机器人构形如图2.

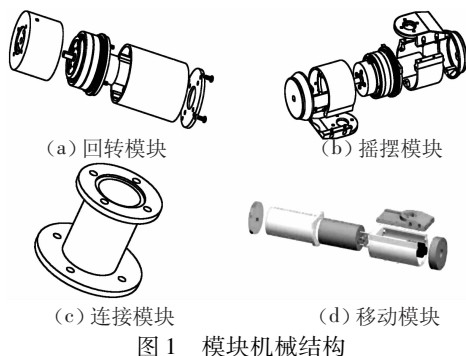


图1 模块机械结构



图2 可重构机器人构形

1.2 模块运动学建模

传统的 D-H 建模方法需要 4 个参数构建运动学模型,而且不具有模块性,机器人构形建立后不能形成运动模型. 基于可重构机器人模块化思想,为每个基本模块建立运动学模型,运动模块仅有一个变量,而连接模块无变量,模块间的连接定位用连接机构保证. 为了方便表达,建立可重构机器人模块的统一表达方式:

$$\begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \sin \beta & -\sin \theta \cos \beta & -h \sin \theta \sin \beta \\ 0 & \cos \beta & -\sin \beta & h \cos \beta + l + w \\ \sin \theta & \cos \theta \sin \beta & \cos \theta \cos \beta & h \cos \theta \sin \beta \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式中: θ 为该模块是回转模块时的回转角度,若为其他模块时为零; β 为该模块是摇摆模块时的摆动角度,若为其他模块时为零; h 为该模块是摇摆

模块时的连接长度,若为其他模块时为零; l 为该模块是回转模块或连接模块时的连接长度,若为其他模块时为零; w 为该模块是移动模块时的移动量,若为其他模块时为零.

通过基本模块的统一表达方式,在已知模块类型时,可建立机器人正运动学形式为

$$T_{\text{total}} = T_1 * T_2 \cdots T_n.$$

2 可重构机器人逆运动学求解方法

根据基本模块的统一表达方式,通过位姿矩阵相乘表达式,可以发现摇摆模块、移动模块和连接模块单独或任意组合组成机器人构形,无论运动模块如何运动,所得到的机器人末端的三维位置点仅有两个值变化,说明机器人末端仅能在二维平面内运动;而机器人构形中含有摇摆模块和回转模块,并同时有转动量时,机器人的三维坐标值发生变化,其末端可在三维空间运动. 可以认为可重构机器人在某一时刻的位形可由有限个平面依次连接组成.

定义 1 构形平面: 若干个依次连接的可重构机器人模块的中心线所形成的平面称为构形平面. 如图3所示.

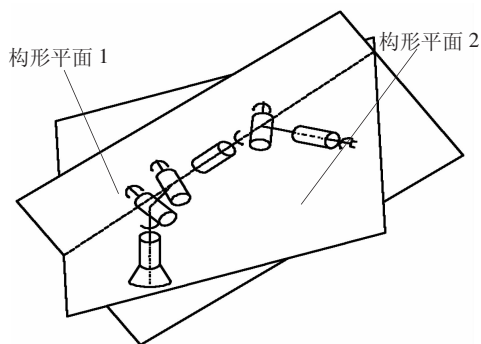


图3 机器人的构形平面示意图

构形平面具有如下的特点: 机器人某时刻位形由一个或多个构形平面组成, 相邻两个构形平面的交线必是回转模块的中心线.

2.1 构形平面的划分

按照构形平面的特点, 以回转模块在机器人构形中的位置作为划分构形平面依据. 可将机器人构形用若干个构形平面组成, 其最大数量取决于构形中回转模块的数量.

定义 2 构形平面中心: 在构形平面内, 在与该构形平面相邻的上一个构形平面相交的回转轴线上, 与上一个相邻构形平面最近的摇摆中心定义为构形平面中心.

由于第一个构形平面没有与之相邻的上一个构形平面, 因此它的平面构形中心就是基座标原点.

定义3 构形平面末端:在构形平面内,在与该构形平面相邻的下一个构形平面相交的回转轴中心线上,与本构形平面最近的摇摆中心定义为构形平面末端。

由于最后一个构形平面没有与之相邻的下一个构形平面,因此它的平面构形末端就是机器人的末端点。

$$\begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ -\sin \theta \sin(\beta_1 + \cdots + \beta_n) & \cos(\beta_1 + \cdots + \beta_n) & -\cos \theta \sin(\beta_1 + \cdots + \beta_n) \\ \sin \theta \cos(\beta_1 + \cdots + \beta_n) & \sin(\beta_1 + \cdots + \beta_n) & \cos \theta \cos(\beta_1 + \cdots + \beta_n) \end{bmatrix}. \quad (1)$$

按照姿态匹配的要求,所有姿态矩阵相乘的结果等于目标点的姿态矩阵,可建立起9个等式,将式(1)中的 $\beta_1 + \cdots + \beta_n$ 看作一个变量,这样理论上4个以内构形平面组合都可求得精确解。但实际上两个构形平面就可满足任意三维空间的姿态要求。考虑到摇摆关节的运动空间问题,以及冗余度机器人构形的控制问题,本文以3个构形平面为最大构形平面数。

2.2.2 位置匹配

采用单个构形平面和两个构形平面求解运动学时,位置匹配是在姿态匹配后进行的,这时的每个构形平面的 $\beta_1 + \cdots + \beta_n$ 为已知的,这意味着每个构形平面的最后一个摇摆模块中心到构形平面末端这一段模块中心线的姿态为已知,部分关节的活动空间被限定,因而每个构形平面的构形平面末端的活动范围变小,需重新计算构形平面的工作空间。

如果构形平面内存在移动模块,则其移动变量包含在相应的 h_i 中,在构形平面内,设

$$\begin{cases} H \cos \varphi = (h_n + l) \cos(\beta_1 + \cdots + \beta_n) + h_{n-1} \cos(\beta_1 + \cdots + \beta_{n-1}) + \cdots + h_1 \cos \beta_1, \\ H \sin \varphi = (h_n + l) \sin(\beta_1 + \cdots + \beta_n) + h_{n-1} \sin(\beta_1 + \cdots + \beta_{n-1}) + \cdots + h_1 \sin \beta_1, \end{cases}$$

式中: H 为构形平面中心到构形平面末端的距离, φ 为构形平面末端在构形平面中心姿态角。得到 H ,即找到构形平面在姿态匹配后的工作空间。

2.3 平面构形逆运动学的求解

平面构形中回转模块对构形末端和构形中心之间的距离关系无影响,与连杆模块作用相同,只有摇摆模块和移动模块会改变构形末端和构形中心位置关系,因此,摇摆模块和移动模块的数量是构形平面中的自由度数目。

图4中 $D_n D_{n-1}$ 姿态和 D_n 点位置已知,所以 D_{n-1} 位置也是已知的,则 OD_{n-1} 线段距离也是已知的。以求解摇摆中心为 D_{n-1} 的关节为例,在

2.2 构形平面的匹配

2.2.1 姿态匹配

按照构形平面的定义,每个构形平面由若干个摇摆模块、若干个移动模块、若干个连接模块与一个回转模块组成,其姿态主要由摇摆模块和回转模块完成。姿态变换矩阵的表达形式如下:

$\triangle OD_n D_{n-1}$ 中,由余弦定理可求得 $\angle OD_n D_{n-1}$ 的值,若所求的值在该关节的运动范围内,则其他关节不用计算,可认为其没有进行转动,关节角为零。否则,使该关节的关节角等于其极限角,求解下一个关节的关节角,直到除了第一个关节和第 n 个关节以外,构形平面内所有的关节角都用采用这种方法求解。这样 D_1 点的位置已知,在构形平面内, OD_{n-1} 和 OD_1 两端的矢量也就已知,从而可求得第一个关节的关节角,由于 $\beta_1 + \cdots + \beta_n$ 是已知的,则可求得 β_n 。

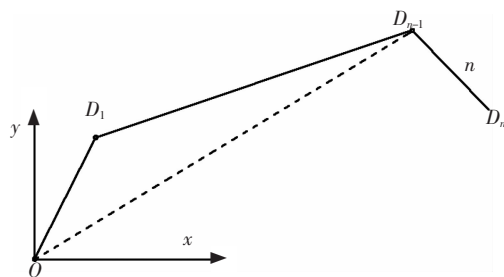


图4 平面构形求解示意图

对于求解移动模块的移动量,当求解到含有移动模块关节的关节角时,要判断能否通过移动模块解决位置匹配。若能,则不用进行剩余关节角的求解,将移动模块置于相应的移动量处;否则,将其移动量放在最短处和最长处(由该关节中心到 $n-1$ 关节中心距离决定),进行下一个摇摆关节的求解。

2.4 平面构形逆运动学求解过程

组成机器人的构形平面可能很多,将所有的构形平面进行姿态和位置匹配,计算量较大且对实际机器人控制也容易产生时滞问题。对于无空间障碍的条件,机器人3个构形平面匹配就可满足空间目标点的姿态要求。为此,提出3级构形平面求解的方法。

2.4.1 单个构形平面求解

首先试将整个机器人构形在目标点的位形看作单个构形平面。单个构形平面在目标姿态矩阵的等式上可建立7个等式,而构形平面的姿态矩

阵中仅有2个变量,这样可求得多个解,进而判断单个构形平面是否满足目标点的姿态要求.如果满足要求,则进行平面构形逆运动学求解.否则,进行2构形平面的匹配求解.

2.4.2 2 构形平面匹配求解

当机器人进行2个构形平面匹配时,姿态匹配矩阵与目标姿态矩阵等式中有4个变量,通过推导可得到具体表达式,如果每个构形平面能够满足所求得变量值,则进行位置匹配.

2.4.3 3 构形平面匹配求解

在3个构形平面匹配时,包含机器人末端中心的构形平面的法线为末端姿态的 x 轴方向,这样该构形平面的姿态是确定的.而包含基座标的构形平面第一个关节不是回转关节,那么该构形平面的姿态也是确定的.只有中间的构形平面的姿态是不确定的,其为满足位置匹配进行调整.此时,位置的匹配就成为构形平面匹配的关键.

在多构形平面的位置匹配上,关键是在各关节的运动范围内找到构形平面间的位置匹配点.按照构形平面的工作空间的表示方法,在目标点和基坐标原点建立的连线矢量上找到构形平面间的匹配点,构形平面的位置匹配即可确定,中间的构形平面的姿态也就确定,从而完成了机器人的构形匹配.匹配后的构形平面进行平面构形的逆运动学求解.

3 实例验证

实例1.

搭建6自由度机器人如图5所示.

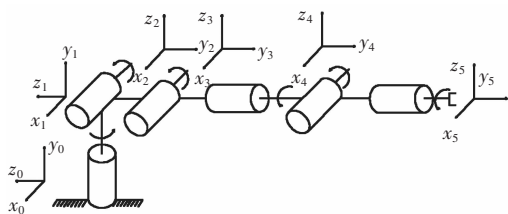


图5 6自由度串联机器人构形

整个机器人构形最多可划分成两个构形平面:关节1、关节2、关节3、关节4划分为一个平面,作为构形平面1,平面内构形的中心点为基坐标点,末端点为关节5的中心点;关节5、关节6划分为一个构形平面,作为构形平面2,平面内构形的中心点为关节5的中心点,末端点为关节6的中心点.任取其工作空间的工作点,该工作点的位姿矩阵为

$$TD = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 175 \\ 0 & -1 & 0 & 300 \\ 0 & 0 & -1 & 31 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

按照3级构形平面的匹配方法,首先用单个构形平面求解,经过姿态验证,单个构形平面能够满足要求,再用平面构形运动学求解得到表1的运动学逆解.

表1 6自由度机器人的逆解

关节(类型)	逆解/(°)
关节1(回转)	30.256 4
关节2(摇摆)	56.860 2
关节3(摇摆)	59.745 8
关节4(回转)	0
关节5(摇摆)	63.394 0
关节6(回转)	30.256 4

实例2.

搭建8自由度串联机器人,如图6.

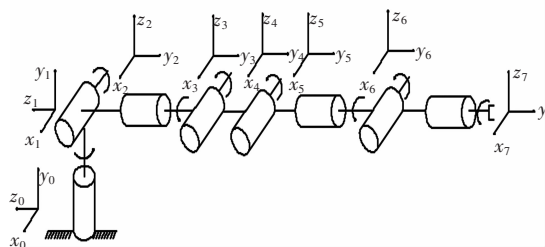


图6 8自由度的串联机器人构形

目标点位姿矩阵为

$$TD = \begin{bmatrix} 0.611 5 & -0.334 5 & 0.717 1 & 442.79 \\ 0.146 0 & 0.938 4 & 0.313 3 & 937.85 \\ -0.777 7 & -0.086 8 & 0.622 6 & -17.36 \\ 0 & 0 & 0 & 1.00 \end{bmatrix}$$

首先,将整个机器人构形划分为3个构形平面:关节1、关节2、关节3划分为一个平面,作为构形平面1,平面内构形的中心点为基坐标点,末端点为关节4的中心点;关节4、关节5、关节6和关节7划分为一个构形平面,作为构形平面2,平面内构形的中心点为关节4的中心点,末端点为关节7的中心点;关节7和关节8作为最后一个平面,作为构形平面3,平面内构形的中心点为关节7的中心点,末端点为机器人的末端点.

经过计算,采用单个构形平面不能满足目标点位姿要求,因此,采用两个构形平面匹配进行求解.将前两个构形平面合成一个构形平面,构形平面的中心点变为关节2的中心点.关节1的关节变量可由关节7的中心点的位置坐标求得.

两个构形平面首先进行姿态匹配,则有

$$\begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & -\sin \theta_1 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_1 & 0 & \cos \theta_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta' & 0 & -\sin \theta' \\ -\sin \theta' \sin \beta' & \cos \beta' & -\cos \theta' \sin \beta' \\ \sin \theta' \cos \beta' & \sin \beta' & \cos \theta' \cos \beta' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.6115 & -0.3345 & 0.7171 \\ 0.1460 & 0.9384 & 0.3133 \\ -0.7777 & -0.0868 & 0.6226 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta'' & 0 & -\sin \theta'' \\ -\sin \theta'' \sin \beta'' & \cos \beta'' & -\cos \theta'' \sin \beta'' \\ \sin \theta'' \cos \beta'' & \sin \beta'' & \cos \theta'' \cos \beta'' \end{bmatrix}^{-1}$$

式中: θ' 为构形平面1的回转关节角度, β' 为构形平面1的摇摆关节角度和, θ'' 为构形平面2的回转关节角度, β'' 为构形平面2的摇摆关节角度和。

θ_1 已经求解,按照矩阵对应元素相等关系,可求出 θ' 、 β' 、 θ'' 和 β'' 。

由于构形平面1中的关节3是回转关节,为保证构形平面的平面性,其转动角度为零;关节6的转动角度为 θ'' ;而关节7的中心点和关节2的中心点的位置坐标为已知,因此,关节2、关节4和关节5的转动角度求解就变成构形平面内的关节求解,按照前面的求解方法容易求得各关节的转动量。

构形平面2由一个摇摆关节和回转关节组成,因此其值分别为 θ'' 和 β'' 。

所求得各关节角见表2。

表2 8自由度机器人的逆解

关节(类型)	逆解/(°)
关节1(回转)	-90.0000
关节2(摇摆)	45.8467
关节3(回转)	0
关节4(摇摆)	22.1132
关节5(摇摆)	-57.2049
关节6(回转)	0
关节7(摇摆)	-30.7437
关节8(回转)	30.2564

4 结 论

1) 采用改进 D-H 方法建模,避免传统的 D-H 法变量过多,不易建立机器人模型的缺点,实现了机器人关节的模块化建模。

2) 将机器人在目标点的位形分解成若干个构形平面,通过3级构形平面匹配的方法可求解出在无空间障碍条件下的可重构机器人逆解。

3) 基于构形平面的可重构机器人运动学求解方法适用于单一连接方式,且摆动模块为非偏置模块的条件下,对非模块化串联型的机器人也有一定的借鉴作用。

4) 两个实例表明,该方法极大减少了求解过程中的计算量,解决了可重构机器人不易实时求解的问题,满足可重构机器人的实时控制要求。

参考文献:

- [1] SCHMITZ D, KHOSLA P, KANADE T. The CMU Reconfigurable Modular Manipulator System[C]//Proceedings of the International Symposium and Exposition on Robots. Sydney:[s. n.], 1988: 473-488.
- [2] COHEN R, LIPTON M G, DAI M Q, *et al.* Conceptual design of a modular robot[J]. ASME Journal of Mechanical Design, 1992, 114: 117-125.
- [3] MATSUMARU T. Design and Control of the Modular Robot System: Tomms[C]//Proceedings of IEEE Conference on Robotics and Automation. Nagoya, Japan:[s. n.], 1995: 2125-2141.
- [4] ZHAO Jie, WEI Yan-hui, WANG Wei-da, *et al.* Research of the finalized task-based reconfigurable modular robot topology[C]//Proceedings of the international conference on Advanced Design and manufacture. Harbin:[s. n.], 2006: 828-832.
- [5] KELMAR L, KHOSLA P. Automatic generation of kinematics for a reconfigurable modular manipulator system[C]//Proceeding of IEEE Conference on Robotics and Automation. Philadelphia:[s. n.], 1998: 663-668.
- [6] CHEN I-ming, YANG Gui-lin. Inverse Kinematics for Modular Reconfigurable Robots[C]//Proceedings of the 1998 IEEE International conference on Robotics & Automation. Leuven, Belgium: IEEE, 1998: 1674-1652.
- [7] CHAPPELLE F, BIDAUP P, PHILIPPE B. Closed form solutions for inverse kinematics approximation of general 6R manipulators[J]. Mechanism and Machine Theory, 2004, 39(3): 323-338.
- [8] TEJOMURTULA S, KAK S. Inverse Kinematics in Robotics Using Neural Networks[J]. Information Sciences, 1999, 116(2-4): 147-164.
- [9] CHEN I-ming, GAO Yan. Closed-Form Inverse Kinematics Solver for Reconfigurable Robots[C]//Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics & Automation. Seoul, Korea:[s. n.], 2001: 2395-2400.
- [10] 赵杰,王卫忠,蔡鹤皋. 可重构机器人封闭形式的运动学逆解计算[J]. 机械工程学报, 2006, 42(8): 210-214.

(编辑 杨 波)