

机器人坐标系建立的改进 DH 方法^{*}

黄晓辰 张明路 张小俊 李欣业 张建华

(河北工业大学机械工程学院, 天津 300130)

摘要: 针对 DH 法则建立机器人坐标系的局限性, 提出一种建立在 DH 法则基础上的辅助方法——辅助坐标法。阐述辅助坐标法的构建方法, 对其使用方法进行描述。通过实例, 利用基于这种方法得到的解析解与数值仿真结果的对比, 对这种方法的可行性进行了验证。研究表明, 辅助坐标法可以解决复杂机械结构中使用 DH 法则构建坐标系易出错的问题, 同时能够解决使用 DH 法则构建坐标系不够灵活的问题。

关键词: 机器人 运动学 数值仿真 DH 法则 辅助坐标法

中图分类号: TH112 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)10-0313-06

引言

对机器人进行运动学分析, 首先需要在机器人各关节处建立坐标系, 进而推导出基坐标系与末端坐标系之间的位姿关系, 在此基础上, 根据所建立的全局坐标系分析机器人运动学的正逆解。机器人的机械本体是机器人各系统的载体, 是决定机器人性能的最主要因素, 其结构特征决定了机器人的运动特性^[1], 一旦产生错误将会直接影响后续运动学分析^[2]。因此, 在机器人本体上合理地建立机器人坐标系, 正确推导出位姿关系十分必要。

建立机器人坐标系有两种方法最常用, DH 法则和旋量理论, DH 法则应用广泛^[3-13], 旋量理论应用较少^[14-18]。随着机器人机械结构的日趋复杂, 使用 DH 法则^[19]建立机器人坐标系可能会十分复杂甚至产生错误, 直接对运动学分析产生影响, 甚至会出现机构与模型不一致的问题^[20]。DH 法则的本质是坐标变换, 是将坐标系建立在机器人的移动或转动关节处, 然后进行相应的坐标变换, 得到关节变量参数表, 代入运动方程获得解析解。使用 DH 法则对简单的机器人结构十分有效, 但对复杂的机械结构可能会较复杂甚至产生错误。

为解决上述问题, 本文提出一种建立在 DH 法则基础上的改进方法——辅助坐标法, 使用这种方法以期可以弥补复杂机械结构对建立坐标的影响, 并且能够根据实际需求灵活地建立机器人坐标系, 有效降低推导难度, 提高坐标系建立的准确性。

1 辅助坐标法

机器人运动学描述的是组成机器人各连杆与机器人关节之间的运动关系。建立机器人的运动学模型, 需要建立一种对机器人结构的描述方法, 机器人可以看作是一组连杆的集合, 连杆之间通过运动副相连接。连接连杆的关节, 约束它们之间的相对运动。以串联的机械臂为例进行解释, 一般来说, 串联机器人机械臂的运动链由两类连杆组成: 中间连杆和终端连杆。将一个终端连杆作为基础连杆, 然后连接关节, 关节再连接中间连杆, 然后连接关节, 以此类推, 最后关节连接另外一个终端连杆(一般称为末端执行器)。连杆从基础连杆到末端执行器依次编号为 0, 1, 2, $\dots$, n , 连接第 $i-1$ 个连杆和第 i 个连杆的运动副记作第 i 个关节, 这样机械臂可以看作是由 $n+1$ 个连杆和 n 个关节组成。根据坐标系在关节建立位置的不同, DH 法则中坐标系的建立通常可分为坐标系前置法和坐标系后置法。坐标系前置法是指将第 i 个坐标系建立在第 i 个关节处, 而坐标系后置法是指将第 i 个坐标系建立在第 $i+1$ 个关节处^[21]。在本研究中, 采用坐标系前置法。

在上述前提条件下, 为解决 DH 法则的局限性, 提出一种建立在 DH 法则基础上的辅助坐标法, 使用这种方法可以解决上述问题, 其建立步骤如下:

- (1) 按照 DH 法则建立全局坐标系。
- (2) 在按照 DH 法则建立坐标系较困难或需要额外建立坐标系的位置建立坐标系原点。

收稿日期: 2014-05-23 修回日期: 2014-06-20

^{*} 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011AA040201)

作者简介: 黄晓辰, 博士生, 主要从事机器人动力学分析和控制系统研究, E-mail: hxc_tj@hotmail.com

通讯作者: 张明路, 教授, 博士生导师, 主要从事特种机器人机构与应用技术和多智能体技术研究, E-mail: zhangml@hebut.edu.cn

(3) 在每个额外建立的坐标系原点位置插入两个新的坐标系,第 1 个新坐标系坐标轴的方向与将要插入辅助坐标系的上一个关节坐标轴方向保持相同,第 2 个新坐标系坐标轴的方向与将要插入辅助坐标系的下一个关节坐标轴方向保持相同。

(4) 根据新的全局坐标系建立新的关节变量参数表。在额外添加平移变换时,沿 X 、 Y 、 Z 轴移动的两坐标系间的变换因子分别为

$$T_{tra}(X,a_i)=\begin{bmatrix}1&0&0&a_i\\0&1&0&0\\0&0&1&0\\0&0&0&1\end{bmatrix}\tag{1}$$

$$T_{tra}(Y,b_i)=\begin{bmatrix}1&0&0&0\\0&1&0&b_i\\0&0&1&0\\0&0&0&1\end{bmatrix}\tag{2}$$

$$T_{tra}(Z,c_i)=\begin{bmatrix}1&0&0&0\\0&1&0&0\\0&0&1&c_i\\0&0&0&1\end{bmatrix}\tag{3}$$

(5) 按照新建立的关节变量参数表计算机器人末端执行器位姿矩阵,获得末端位姿解析解。

2 基于复杂机械结构的辅助坐标法

对于一些复杂的机械结构,使用 DH 法则建立全局坐标系容易产生错误,直接影响后续的运动学分析,使用辅助坐标法能够解决复杂机械结构全局坐标系的建立问题。

2.1 问题引出

引入需要分析的机器人模型,该机器人底盘实物模型如图 1 所示。

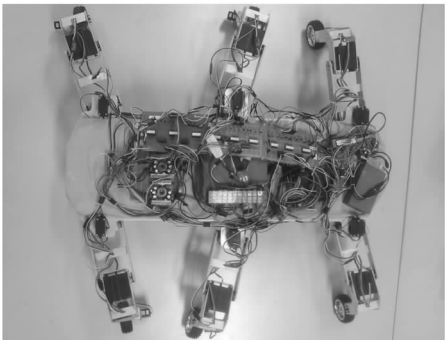


图 1 机器人底盘实物模型

Fig. 1 Robot chassis physical model

机器人底盘采用仿生学设计,主要由 6 条相同的串联机械腿组成,建立与机器人底盘相等比例的三维模型,其整体虚拟三维模型如图 2 所示,单腿虚拟三维模型如图 3 所示。

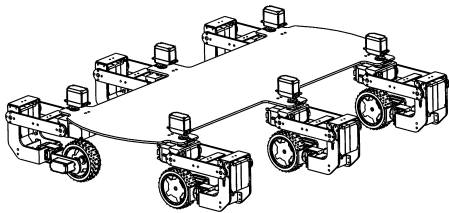


图 2 机器人底盘三维模型

Fig. 2 Three-dimensional model of robot chassis

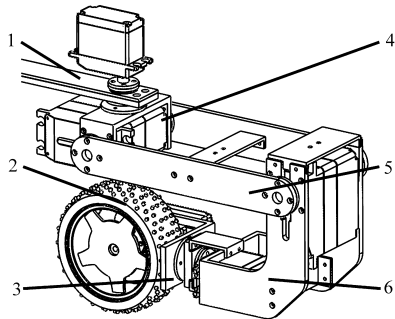


图 3 机器人底盘单腿三维模型

Fig. 3 Three-dimensional model of one leg of robot chassis

1. 基座 2. 车轮 3. 车轮支撑架 4. 大腿转动轴 5. 大腿 6. 小腿

由于机器人底盘六腿结构均相同,以机器人底盘单腿结构为研究对象进行分析。考虑使用 DH 法则对机器人单腿(图 3)建立全局坐标系的问题。

在这个机构中,基座固定不动,大腿转动轴是虎克铰结构,可以绕基座旋转,大腿可以绕大腿转动轴旋转,小腿可以绕大腿旋转,车轮支撑架可以绕小腿旋转,车轮绕车轮支撑架旋转。在这个机械结构中,要求跟踪车轮支撑架和车轮的轨迹,严格按照 DH 法则对这一结构构建全局坐标系,如图 4 所示(注:坐标系 6 为了与仿真结果对照,可以不建立)。

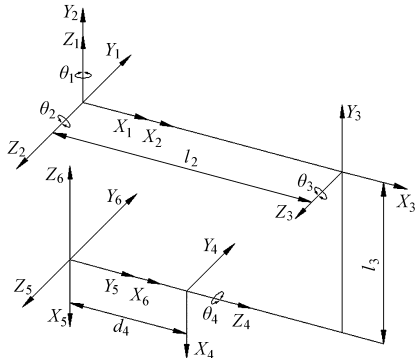


图 4 机器人腿部全局坐标系

Fig. 4 Robot legs global coordinate system

建立好坐标系后,按照旋转变换关系得到各关节变量参数,如表 1 所示。

依据关节变量参数可以求得运动学方程,通过与运动学仿真结果获得的数值解对比发现解析解与数值解不吻合,即建立全局坐标系或者构建关节变量参数表时发生错误。经分步计算分析后,发现错

表 1 机器人腿部关节变量参数

Tab.1 Robot leg's joint variable parameter

序号 i	转角	连杆间距 d/mm	杆长 l/mm	扭角 $\alpha/(\text{^\circ})$
1	θ_1	0	0	90
2	θ_2	0	l_2	0
3	$\theta_3 + 90^\circ$	0	l_3	90
4	$\theta_4 + 180^\circ$	$-d_4$	0	90
5	90°	0	0	-90

注:负号“ $-$ ”表示与矢量轴方向相反,其中常量 $l_2 = 100\text{ mm}$, $l_3 = 50\text{ mm}$, $d_4 = 30\text{ mm}$ 。

误出现在第 4 个坐标系的建立,在 DH 法则中,没有明确说明当 Z_{i-1} 与 Z_i 存在空间关系时, X_i 应该建立在什么地方, X_i 的方向指向哪里,这样就产生歧义,影响坐标系的建立。对于这种复杂的机械结构,坐标系建立必须准确,否则会导致机器人运动学求解错误,直接影响后续的一系列分析。

2.2 采用辅助坐标法重建坐标系

对 2.1 节中提出的机器人腿部结构采用辅助坐标法建立全局坐标系。在“小腿”弯曲处作为插入的辅助坐标系原点,建立 2 个辅助坐标,使用辅助坐标法建立的全局坐标系如图 5 所示。

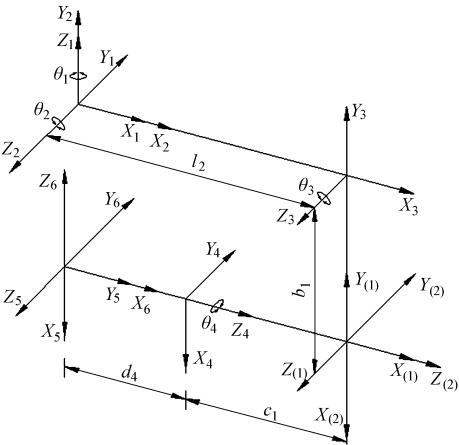


图 5 采用辅助坐标法建立机器人腿部全局坐标系
Fig.5 Using auxiliary coordinate method to establish global coordinate system of robot leg

建立坐标系后,按照旋转变换关系并结合辅助坐标法建立步骤(4),得到各关节变量参数,如表 2 所示。

为验证辅助坐标法建立的全局坐标系是否正确,根据运动学求解公式求出末端坐标系相对于基坐标系的位姿矩阵。利用表 2 中求得的各个变换矩阵 $T_1 \sim T_8$,可以得到运动学方程

$$T_{1,8} = T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 \tag{4}$$

其末端位姿矩阵求解结果如表 3 所示。

该机器人单腿工作空间为 $\theta_1: 0 \sim 90^\circ$ 、 $\theta_2: 0 \sim 30^\circ$ 、 $\theta_3: 0 \sim 60^\circ$ 、 $\theta_4: 0 \sim 90^\circ$,使用 Matlab 结合表 3 中

表 2 采用辅助坐标法的机器人腿部关节变量参数

Tab.2 Using auxiliary coordinate method to establish robot legs' joint variable parameter

序号 i	转角	连杆间距 d/mm	杆长 l/mm	扭角 $\alpha/(\text{^\circ})$
1	θ_1	0	0	90
2	θ_2	0	l_2	0
3	θ_3	0	0	0
4		$T_{tra}(Y, b_1)$		
5	-90°	0	0	-90
6		$T_{tra}(Z, c_1)$		
7	θ_4	$-d_4$	0	90
8	90°	0	0	-90

注:负号“ $-$ ”表示与矢量轴方向相反,其中常量 $l_2 = 100\text{ mm}$, $d_4 = 30\text{ mm}$, $b_1 = -50\text{ mm}$, $c_1 = -70\text{ mm}$ 。

表 3 采用辅助坐标法的机器人腿部末端位姿矩阵

Tab.3 Using auxiliary coordinate method to establish position and orientation matrix of end of robot leg

姿态						位置
n		o	a			P
n_x	$c_{23}c_1$	o_x	$-c_1s_{23}s_4$	a_x	$-c_1s_{23}c_4$	$-d_4c_1c_{23}$
			$-s_1c_4$		$+s_1s_4$	$+c_1c_1c_{23}$
						$-b_1c_1s_{23}$
n_y	$c_{23}s_1$	o_y	$-s_1s_{23}s_4$	a_y	$-s_1s_{23}c_4$	$+l_2c_1c_2$
			$+c_1c_4$		$-c_1s_4$	$-d_4s_1c_{23}$
						$+c_1s_1c_{23}$
n_z	s_{23}	o_z	$c_{23}s_4$	a_z	$c_{23}c_4$	$-b_1s_1s_{23}$
						$+l_2s_1c_2$
						$-d_4s_{23}$
						$+c_1s_{23}$
						$+b_1c_{23}$
						$+l_2s_2$

注:符号 s_1 表示 $\sin\theta_1$, c_1 表示 $\cos\theta_1$, s_{12} 表示 $\sin(\theta_1 + \theta_2)$, c_{12} 表示 $\cos(\theta_1 + \theta_2)$, 其余以此类推,本文中其他表格中出现类似符号代表意义相同。

计算出的单腿末端位置解析解,作出该机器人腿部工作空间上的末端位置轨迹曲线,如图 6 所示。

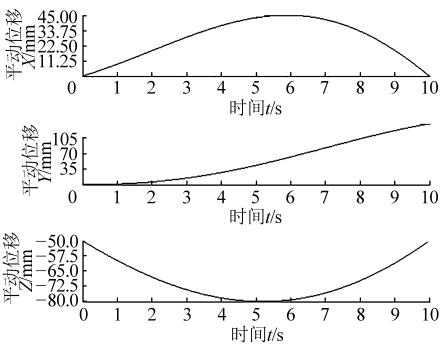


图 6 机器人腿部工作空间轨迹曲线
Fig.6 Workspace trajectory curve of robot legs

为此解析解与仿真结果得到的数值解相对

照,验证辅助坐标法是否正确,使用 SolidWorks 软件对该机器人腿部模型建模,进行数值解仿真验证,令对应的 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 、 θ_4 与上面的赋值相等,得到机器人腿部末端坐标系空间运动轨迹点的 X 、 Y 、 Z 坐标在平面的投影结果,如图 7 所示。

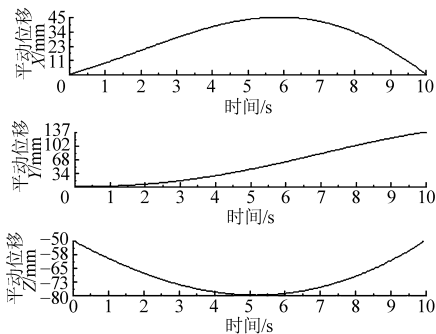


图 7 机器人腿部末端位置仿真曲线

Fig. 7 Position simulation curve of end of robot leg

从仿真结果看出,机器人腿部末端位姿解析解与仿真得到的数值解结果吻合。此外,对机器人实物下发电机控制指令,使实物各关节转动角度与仿真时各关节转动角度相一致。由实物运动结果与仿真曲线对比可知,机器人实物运动结果与仿真结果吻合。从而验证使用辅助坐标法正确地建立了全局坐标系及关节变量参数。

3 基于任意位置的辅助坐标法

采用辅助坐标法不仅可以解决复杂机械结构的全局坐标系建立问题,还能够按照机器人分析的需要灵活构建机器人全局坐标系。

3.1 问题引出

考虑使用 DH 法则对如图 8 所示的机械手建立全局坐标系的问题。

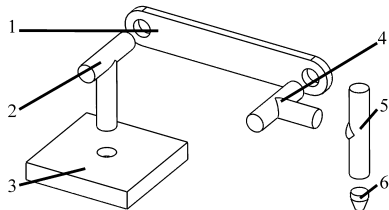


图 8 机械手模型简图

Fig. 8 Manipulator model diagram

1. 大臂 2. 大臂转动轴 3. 基座 4. 小臂转动轴 5. 小臂 6. 手爪

在这个结构中只有转动副,没有移动副。基座固定不动,大臂转动轴可以绕基座旋转,大臂可以绕大臂转动轴旋转,小臂转动轴可以绕大臂旋转,小臂可以绕小臂转动轴旋转,旋转手爪连接在小臂上。严格的按照 DH 法则对这一结构构建全局坐标系,如图 9 所示(注:坐标系 6 为了与仿真结果对照,可以不建立)。

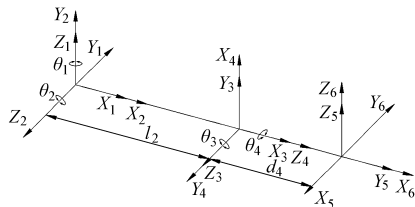


图 9 机械手全局坐标系

Fig. 9 Manipulator global coordinate system

建立好坐标系后,按照旋转变换关系得到各关节变量参数,如表 4 所示。

表 4 机械手关节变量参数

Tab. 4 Manipulator joint variable parameter

序号 <i>i</i>	转角	连杆间距 <i>d</i> /mm	杆长 <i>l</i> /mm	扭角 $\alpha/(^{\circ})$
1	θ_1	0	0	90
2	θ_2	0	l_2	0
3	$\theta_3 + 90^{\circ}$	0	0	90
4	$\theta_4 + 90^{\circ}$	d_4	0	90
5	90°	0	0	0

注:常量 $l_2 = 100\text{ mm}$, $d_4 = 30\text{ mm}$ 。

通过计算,根据运动学方程求解出的解析解与 SolidWorks 软件仿真得到的数值解结果吻合,证明针对这一结构,严格按照 DH 法则建立的坐标系是正确的。但是按照上述方法确立的末端坐标系并不是真正希望得到的。机器人运动学研究机器人末端执行器相对于参考坐标系的位置、姿态和速度的关系^[22]。对于机器人运动学分析,通常情况下希望得到末端执行器的位姿,具体到这个例子中,希望得到末端“手爪”的位姿,而不是得到“小臂”质心的位姿,使用 DH 法则无法建立末端“手爪”的位姿。为解决这个问题,使用辅助坐标法可以容易地得到需要的结果。

3.2 采用辅助坐标法重建坐标系

对机械手机构重新分析,将“手爪”与“小臂”连接处作为插入的辅助坐标系原点,建立辅助坐标系(由于处在末端执行器,所以只需要建立一个辅助坐标系),建立新的全局坐标系如图 10 所示。

建立新的全局坐标系后,按照旋转变换关系并结合辅助坐标法建立步骤(4)得到新的关节变量参数,如表 5 所示。

为验证建立的全局坐标系是否正确,根据运动学求解公式求出末端坐标系相对于基坐标系的位姿矩阵。利用表 5 中已经求得的各个变换矩阵 $T_1 \sim T_6$,可以得到运动学方程

$$T_{1,6} = T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 \tag{5}$$

其末端位姿矩阵求解结果如表 6 所示。

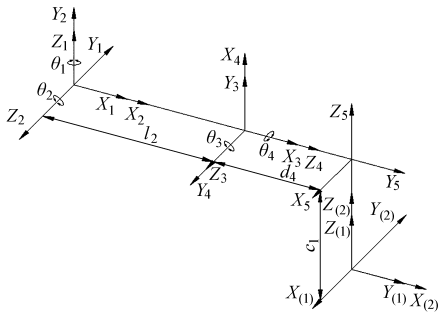


图 10 采用辅助坐标法的机械手全局坐标系
Fig. 10 Using auxiliary coordinate method to establish global coordinate system of manipulator

表 5 采用辅助坐标法的机械手关节变量参数
Tab.5 Using auxiliary coordinate method to establish manipulator joint variable parameter

序号 <i>i</i>	转角	连杆间距 <i>d</i> /mm	杆长 <i>l</i> /mm	扭角 $\alpha/(^{\circ})$
1	θ_1	0	0	90
2	θ_2	0	l_2	0
3	$\theta_3 + 90^{\circ}$	0	0	90
4	$\theta_4 + 90^{\circ}$	d_4	0	90
5	$T_{tra}(Z, c_1)$			
6	90°	0	0	0

注：常量 $l_2 = 100\text{ mm}$, $d_4 = 30\text{ mm}$, $c_1 = -25\text{ mm}$ 。

表 6 机械手末端位姿矩阵
Tab.6 Position and orientation matrix of end of robot leg

姿态			位置
<i>n</i>	<i>o</i>	<i>a</i>	<i>P</i>
n_x	$c_{23}c_1$	o_x	$d_4c_1c_{23}$
			$-c_1s_{23}s_4$
			$-s_1c_4$
n_y	$c_{23}s_1$	o_y	$-c_1s_{23}c_4$
			$+s_1s_4$
			$+c_1s_1s_4$
n_z	s_{23}	o_z	$-c_1c_1s_{23}c_4$
			$d_4s_1c_{23}$
			$+l_2s_1c_2$
			$-c_1c_1s_4$
			$-c_1s_{23}c_4$
			d_4s_{23}
			$+l_2s_2$
			$+c_1c_{23}c_4$

该机械手工作空间为 $\theta_1:0 \sim 90^{\circ}$ 、 $\theta_2:0 \sim 60^{\circ}$ 、 $\theta_3:0 \sim 30^{\circ}$ 、 $\theta_4:0 \sim 45^{\circ}$,使用 Matlab 软件结合表 6 中计算出的机械手末端位置解析解,作出该机械手工作空间上的末端位置轨迹曲线,如图 11 所示。

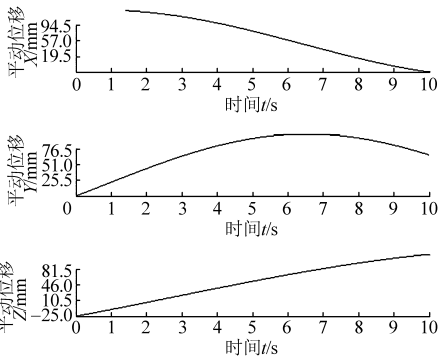


图 11 机械手工作空间轨迹曲线
Fig. 11 Workspace trajectory curve of manipulator

为此解析解与仿真结果得到的数值解相对照,验证辅助坐标法是否正确,使用 SolidWorks 软件对该机械手模型建模,进行数值解仿真验证,令对应的 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 、 θ_4 与上面的赋值相等,得到机械手末端坐标系空间运动轨迹点的 X 、 Y 、 Z 坐标在平面的投影结果,如图 12 所示。

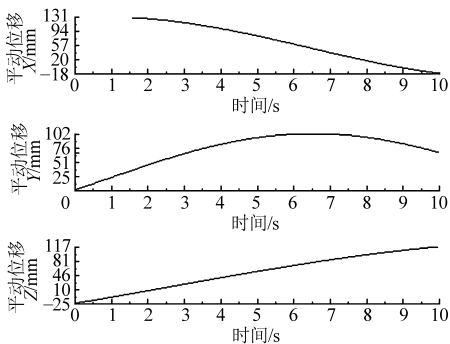


图 12 采用辅助坐标法的机械手末端位姿仿真
Fig. 12 Using auxiliary coordinate method to simulate position and orientation of end of manipulator

从仿真结果看出,机械手末端位姿解析解与仿真得到的数值解结果吻合,从而验证使用辅助坐标法正确的建立了全局坐标系及关节变量参数。

4 结束语

针对 DH 法则建立坐标系的局限性,提出建立在其基础上的辅助坐标法。这种方法是对 DH 法则的延伸,使 DH 法则的适用范围更广,坐标系的建立更加灵活,有利于正确快速地建立全局坐标系,为构建具有复杂关节变换关系的坐标系统提供了良好的解决方案。研究表明,使用辅助坐标法有利于在复杂结构下建立所需要的全局坐标系,可以根据需求灵活地建立坐标系,能够为运动学求解提供准确的运动学模型。

参 考 文 献

1 许俊伟. 八足机器人步行机制及稳定性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.
Xu Junwei. Study on walking mechanism and stability of the eight-legged robot[D]. Harbin: Harbin Engineering University,

2011. (in Chinese)
- 2 李诚, 谢志江, 倪卫, 等. 六自由度装校机器人雅可比矩阵的建立及奇异性分析[J]. 中国机械工程, 2012, 23(10): 1165 – 1169.
Li Cheng, Xie Zhijiang, Ni Wei, et al. Establishment of Jacobian matrix and singularity analysis of a 6-DOF installing-calibrating robot[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(10): 1165 – 1169. (in Chinese)
- 3 华瑾, 秦刚, 陈中孝. 五自由度操作臂笛卡尔空间内运动控制的实现[J]. 西北工业大学学报, 2013, 33(8): 633 – 637.
Hua Jin, Qin Gang, Chen Zhongxiao. Motion control of manipulator with 5-DOF in cartesian space [J]. Journal of Xi'an Technological University, 2013, 33(8): 633 – 637. (in Chinese)
- 4 杨新刚, 黄玉美, 杨文栋, 等. 基于可操作性的串联机器人相对传动比优化[J]. 农业机械学报, 2009, 40(8): 209 – 218.
Yang Xingang, Huang Yumei, Yang Wendong, et al. Relative proportion of serial robot transmission ratios optimization based on manipulability[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(8): 209 – 218. (in Chinese)
- 5 Rajesh Kumar, Parveen Kalra, Neelam R Prakash. A virtual RV-M1 robot system [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2011, 27(6): 994 – 1000.
- 6 Zhang Dan, Gao Zhen. Hybrid head mechanism of the groundhog-like mine rescue robot[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2011, 27(2): 460 – 470.
- 7 李宪华, 郭永存, 张军, 等. 模块化六自由度机械臂逆运动学解算与验证[J]. 农业机械学报, 2013, 44(4): 246 – 251.
Li Xianhua, Guo Yongcun, Zhang Jun, et al. Inverse kinematics solution and verification of modular 6-DOF manipulator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4): 246 – 251. (in Chinese)
- 8 Mahmoud Tarokh, Huy Dang Ho, Antonios Bouloubasis. Systematic kinematics analysis and balance control of high mobility rovers over rough terrain[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2013, 61(1): 13 – 24.
- 9 张永贵, 黄玉美, 高峰. 基于遗传算法的机器人运动学参数误差识别[J]. 农业机械学报, 2008, 39(9): 153 – 157.
Zhang Yonggui, Huang Yumei, Gao Feng. Robotic kinematics parameters error identification based on genetic algorithm [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(9): 153 – 157. (in Chinese)
- 10 Rong Shean Lee, Yan Honglin. Development of universal environment for constructing 5-axis virtual machine tool based on modified D-H notation and OpenGL[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2010, 26(3): 253 – 262.
- 11 李宪华, 郭永存, 宋韬. 六自由度工业机器人手臂正运动学分析与仿真[J]. 安徽理工大学学报: 自然科学版, 2013, 33(2): 34 – 38.
Li Xianhua, Guo Yongcun, Song Tao. Forward kinematics analysis and motion simulation platform of a six-DOF industrial manipulator[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology: Natural Science, 2013, 33(2): 34 – 38. (in Chinese)
- 12 陈钢, 贾庆轩, 李彤, 等. 基于误差模型的机器人运动学参数标定方法与实验[J]. 机器人, 2012, 34(6): 680 – 688.
Chen Gang, Jia Qingxuan, Li Tong, et al. Calibration method and experiments of robot kinematics parameters based on error model[J]. Robot, 2012, 34(6): 680 – 688. (in Chinese)
- 13 张永贵, 高金刚, 刘文洲, 等. 切削加工机器人系统综合误差解耦补偿[J]. 农业机械学报, 2013, 44(12): 326 – 331.
Zhang Yonggui, Gao Jin'gang, Liu Wenzhou, et al. Decoupling and compensation of synthesis errors for machining robot system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(12): 326 – 331. (in Chinese)
- 14 Khalid Al-Widyan, Ma Xiaoqing, Jorge Angeles. The robust design of parallel spherical robots[J]. Mechanism and Machine Theory, 2011, 46(3): 335 – 343.
- 15 赵杰, 王卫忠, 蔡鹤皋. 可重构机器人工作空间的自动计算方法[J]. 天津大学学报, 2006, 39(9): 1082 – 1087.
Zhao Jie, Wang Weizhong, Cai Hegao. Algorithms for automatically determining workspace of reconfigurable robots[J]. Journal of Tianjin University, 2006, 39(9): 1082 – 1087. (in Chinese)
- 16 张为民, 李国伟, 陈灿. 基于雅可比旋量理论的公差优化分配[J]. 农业机械学报, 2011, 42(4): 216 – 219.
Zhang Weimin, Li Guowei, Chen Can. Optimal allocation of tolerance based on Jacobian-torsor theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(4): 216 – 219. (in Chinese)
- 17 王汝贵, 戴建生. 一种新型平面-空间多面体可重构变胞机构的设计与分析[J]. 机械工程学报, 2013, 49(11): 29 – 35.
Wang Rugui, Dai Jiansheng. Design and analyses of a novel plane-space polyhedral reconfigurable metamorphic mechanism[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(11): 29 – 35. (in Chinese)
- 18 焦有宙, 丁攀, 赵大旭. 温室 3P3R 机械臂系统动力学建模与分析[J]. 农业机械学报, 2012, 43(5): 179 – 183.
Jiao Youzhou, Ding Pan, Zhao Daxu. Dynamic modeling and analysis for 3P3R universal manipulator in greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(5): 179 – 183. (in Chinese)
- 19 Denavit J, Hartenberg R S. A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices[J]. ASME Journal of Applied Mechanics, 1955, 22: 215 – 221.
- 20 Rocha C R, Tonetto C P, Dias A. A comparison between the Denavit-Hartenberg and the screw-based methods used in kinematic modeling of robot manipulators[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2011, 27(4): 723 – 728.
- 21 蔡自兴. 机器人学[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- 22 伍文伟. 六自由度开放式机器人控制系统的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2007.
Wu Wenwei. The research of 6-DOF open robot control system[D]. Changsha: Hunan University, 2007. (in Chinese)

Analysis of Torque Pulsation for Multi-acting Double-stators Couple Hydraulic Motor

Wen Desheng Gao Junfeng Zhou Ruibin Liu Zhongxun Liu Qiaoyan Yang Xiaoyong
(College of Mechanical Engineering , Yanshan University , Qinhuangdao 066004 , China)

Abstract: The concept of the couple hydraulic motor is put forward, which is different from the traditional hydraulic motor. Based on the principle of the multi-acting double-stators couple hydraulic motor, the theoretical torque is studied. Through analyzing the pulsating characterize and the influencing factors of the motor, the relationship between the pulsation and the numbers of sliders is obtained. When the number of the rollers and connecting rods equals to 8 or less, the torque pulsation of the hydraulic motor consisted of the even number of the rollers and connecting rods is lower than what number is odd. When the number of the rollers and connecting rods equals to 9 or more, the torque pulsation of the hydraulic motor consisted of the odd number of the rollers and connecting rods is lower than what number is even. Finally, a theoretical basis is provided for the design and experiment of the hydraulic motor.

Key words: Couple hydraulic motor Double-stators Multi-acting Differential connection Torque pulsation

(上接第 318 页)

Improved DH Method to Build Robot Coordinate System

Huang Xiaochen Zhang Minglu Zhang Xiaojun Li Xinye Zhang Jianhua
(School of Mechanical Engineering , Hebei University of Technology , Tianjin 300130 , China)

Abstract: Considering the limitation of the DH rule when using it to establish coordinate systems for robots, an auxiliary coordinate method was proposed as the extension of the traditional DH rule. The details about how to construct the auxiliary coordinate and how to use the auxiliary coordinate method were stated comprehensively. By the proposed method, any point of a link, not exactly in the joint of two links as usual, can be chosen as the original point of the auxiliary coordinates. The analytical results based on the auxiliary coordinate method were compared with the numerical simulation and it was found that they were in good agreement. It is shown that the method presented is more accurate and flexible when applied to complex robot systems while one or more components are not straight link, for example in L-shape, or t a relative rotation of one link about the axis of the connected previous one.

Key words: Robots Kinematics Numerical simulation DH rule Auxiliary coordinate method