

DOI: 10.11992/tis.201806044

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1538.TP.20181214.1001.004.html>

协作机器人的构型分析研究

田勇^{1,2}, 王洪光¹, 潘新安¹, 胡明伟^{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, 辽宁 沈阳 110016; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 针对协作机器人的构型分析研究, 得出了偏置是影响机器人构型的一个重要因素。首先, 对现有典型协作机器人的构型进行分析, 通过构型间的内在联系与演化过程得到构型之间的差异。然后利用构型之间的差异引出了偏置的定义, 并通过偏置对关节运动范围的影响将其分为 S 型偏置和 Y 型偏置。最后以全局性能指标、工作空间体积指标和灵活工作空间指标为性能评价标准, 对 iiwa、Sawyer、Yumi 三种典型构型的性能进行了仿真。通过对比分析可知, 偏置的存在使构型的全局性能和工作空间体积性能降低, 但对灵活工作空间性能有提高作用。结果表明偏置是影响机器人性能的重要因素, 该分析研究为协作机器人的构型设计提供了理论依据。

关键词: 协作机器人; 构型; 演化; 偏置; 性能指标

中图分类号: TP241 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4785(2019)02-0217-07

中文引用格式: 田勇, 王洪光, 潘新安, 等. 协作机器人的构型分析研究[J]. 智能系统学报, 2019, 14(2): 217-223.

英文引用格式: TIAN Yong, WANG Hongguang, PAN Xinan, et al. Research on configuration analysis of collaborative robots[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2019, 14(2): 217-223.

Research on configuration analysis of collaborative robots

TIAN Yong^{1,2}, WANG Hongguang¹, PAN Xinan¹, HU Mingwei^{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: In this study, by analyzing the configurations of collaborative robots, it is concluded that offset is an important factor affecting the configuration. First, the configurations of existing typical collaborative robots were analyzed to obtain the difference of configurations through the evolutionary process between the configurations. Then, the offset was defined using the difference between configurations and was divided into S-type and Y-type according to the influence on the range of motion of the joint. Finally, the global performance index, the workspace volume index, and the flexible workspace index were used as performance evaluation criteria to simulate the performance of collaborative robots, namely iiwa, Sawyer, and Yumi. Through comparative analysis, it was seen that the existence of offset reduced the global performance of configuration and the volumetric performance of workspace, but improved the performance of flexible workspace. The results show that offset is an important factor influencing robot performance. This analysis provides a theoretical basis for the configuration design of collaborative robots.

Keywords: collaborative robots; configuration; evolutionary; offset; performance Index

近年来随着市场的需求从大批量、单一模式向小批量、多样化方向的转变, 企业对机器的要

求不仅仅局限于重复性的作业任务, 对成本和收益效率要求有了很大的提高, 希望机器人能够在多项工作任务中快速的转化, 这就要求机器人编程简单, 易于使用。因此, 协作机器人逐渐受到世界各国的重视。根据 ISO10218-2 中的定义, 协作机器人是指能够在指定的协作区域内与人进行

收稿日期: 2018-06-25. 网络出版日期: 2018-12-18.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51405482); 中国科学院重点部署项目 (KGZD-EW-608-1); 机器人学国家重点实验室自主课题 (2014-Z09).

通信作者: 王洪光. E-mail: hgwang@sia.cn.

直接交互的机器人^[1-3]。与传统的工业机器人相比,协作机器人具有安全性高、通用性好、灵敏精准、易于使用和便于人机协作等优点。上述优点不仅使协作机器人在制造领域中得到应用,而且在家庭服务和康复医疗等领域有潜在的应用价值。目前,典型的协作机器人主要有 iiwa、Yumi、Sawyer 以及 UR 等^[4-5],国内主要有新松的柔性多关节机器人 SCR5,山思跃立研发的协作机器人“WEE”等产品^[6]。

协作机器人的构型变化较多,差异较大。而机器人的构型设计是机器人设计的基础和关键,对机器人的性能有重要影响。现有的协作机器人采用了不同的构型,大多数采用了七自由度冗余机器人的构型。

对于 7R 构型的研究比较有成效的是美国 Hollerbach^[7]于 1985 年提出的一种机构按运动学最佳设计观点,在 6R 最佳配置机构的肩、肘、腕分别各加一个转动副,除去自由度退化和重复等效的形式,最终得到一系列的机械臂构型,并推荐了 7R 机器人的最佳配置;对于冗余机器人机构设计的研究,国内沈阳自动化所^[8]研究了 7-DOF 机器人的图谱问题,使用位置空间和奇异空间同时评价机构选型,从 2 187 种构型中选出了 64 种配置形式并绘制成图谱;赵占芳^[9]等给出了七自由度机器人的选型原则并选出了机器人的理想形式。而目前对七自由度冗余机器人的构型分析研究很少考虑机器人的偏置。文献[10-12]中分别说明了偏置对机器人的灵活性、工作空间、动力学性能以及运动学的解析式的影响,但没有明确偏置的定义及研究偏置对机器人性能的具体影响。

针对以上问题,本文以现有的协作机器人为研究对象,对现有的协作机器人构型进行了对比分析,得到偏置的存在是导致构型差异的重要因素。然后对偏置进行了定义与分类,最后通过典型的协作机器人的运动性能进行分析对比,得出了机器人的偏置对性能指标的影响。

1 构型对比分析

如图 1 所示。其中,iiwa 采用了目前常用的构型 SRS(肩关节和腕关节中的关节分别相交于一点),而 Yumi、Sawyer、Franka 构型不满足 SRS 构型,定义这些构型存在偏置。

目前典型的协作机器人采用了转动关节 R,连杆中两端关节的位置关系如图 2 所示,其中 z_{i-1} 、 z_i 表示相邻关节的轴线, a_{i-1} 表示相邻轴线间的公垂线长度, d_i 表示轴长, θ_i 表示关节的转角, α_{i-1} 表示连杆的扭角。

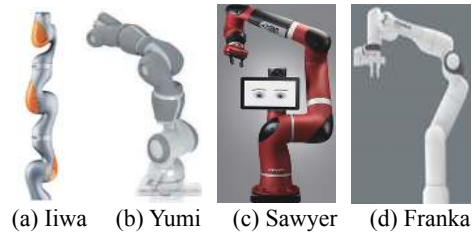


图 1 现有的典型的协作机器人

Fig. 1 Existing typical collaborative robots

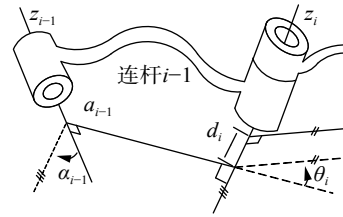


图 2 相邻关节间的位置关系

Fig. 2 The positional relationship between adjacent joints

为了更清楚地描述相邻两个关节之间的位置关系, Gogu^[13]利用 4 位二进制数据表示运动副的种类及在空间中的连接位姿,并作为杆件的基因码进行结构综合。本文采用 3 位二进制表示相邻关节的位置关系,如表 1 所示。其中 $\text{bit}_1=0$ 时,关节平行,反之关节垂直; $\text{bit}_2=0$ 表示轴线间的公垂线长度为零, $\text{bit}_3=0$ 表示轴长为零,且当 $\text{bit}_1=0$ 时,此时 $\text{bit}_2=1$, $\text{bit}_3=0$ 。

表 1 位置关系编码

Table 1 Positional relationship and coding

bit	1	2	3
编码	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i

则相邻关节之间的位置关系如图 3 所示。

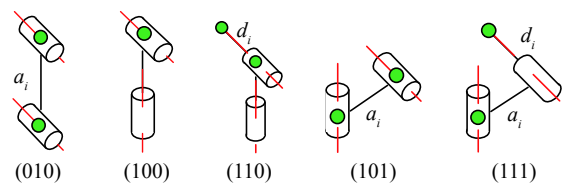


图 3 5 种位置关系及编码

Fig. 3 Five kinds of positional relationship and coding

图 4 为 7DOF 机器人的构型,图 5 所示为 9 种典型的协作机器人构型,通过上述的编码方式对机器人进行编码,并通过自由度及关节之间的位置关系进行对比,分析协作机器人构型的演化过程。

1) 根据协作机器人的自由度数可分为 6DOF 和 7DOF 协作机器人。通过机器人机构简图可以看出:构型①、②、③属于 6DOF 机器人;其余构型属于 7DOF 机器人。

2) 对于 6DOF 构型,其中构型①为传统机器

人构型,其编码为100010110100100,构型②、③是在①的基础上进行了变化,其编码分别为110010010110100、100010110110100,构型③是在关节4、5间发生了变化,构型②变化较大。

3) 7DOF 协作机器人的机构设计一般是在6DOF 机器人机构设计的基础上,增加一个关节,得到五种构型。冗余构型所具有的自运动特性,能够改善机器人在工作空间中的避障能力、增加其几何灵活性、避免内部奇异构型等^[14],如图4所示。而构型(d)不具有自运动特性,没有起到冗余自由度的作用,因此该构型不能采用。目前的协作机器人都采用(a)的构型,且相邻关节采用垂

直的位置关系, $\text{bit}_1=1$ 。

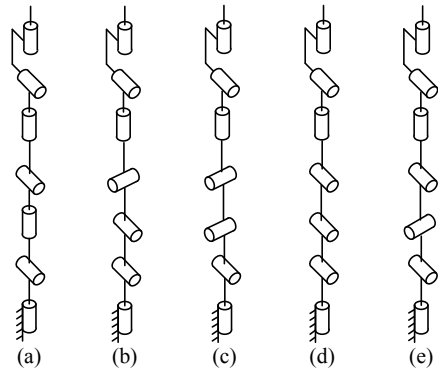


图4 7DOF 机器人的5种构型

Fig. 4 The five configurations of 7DOF robot

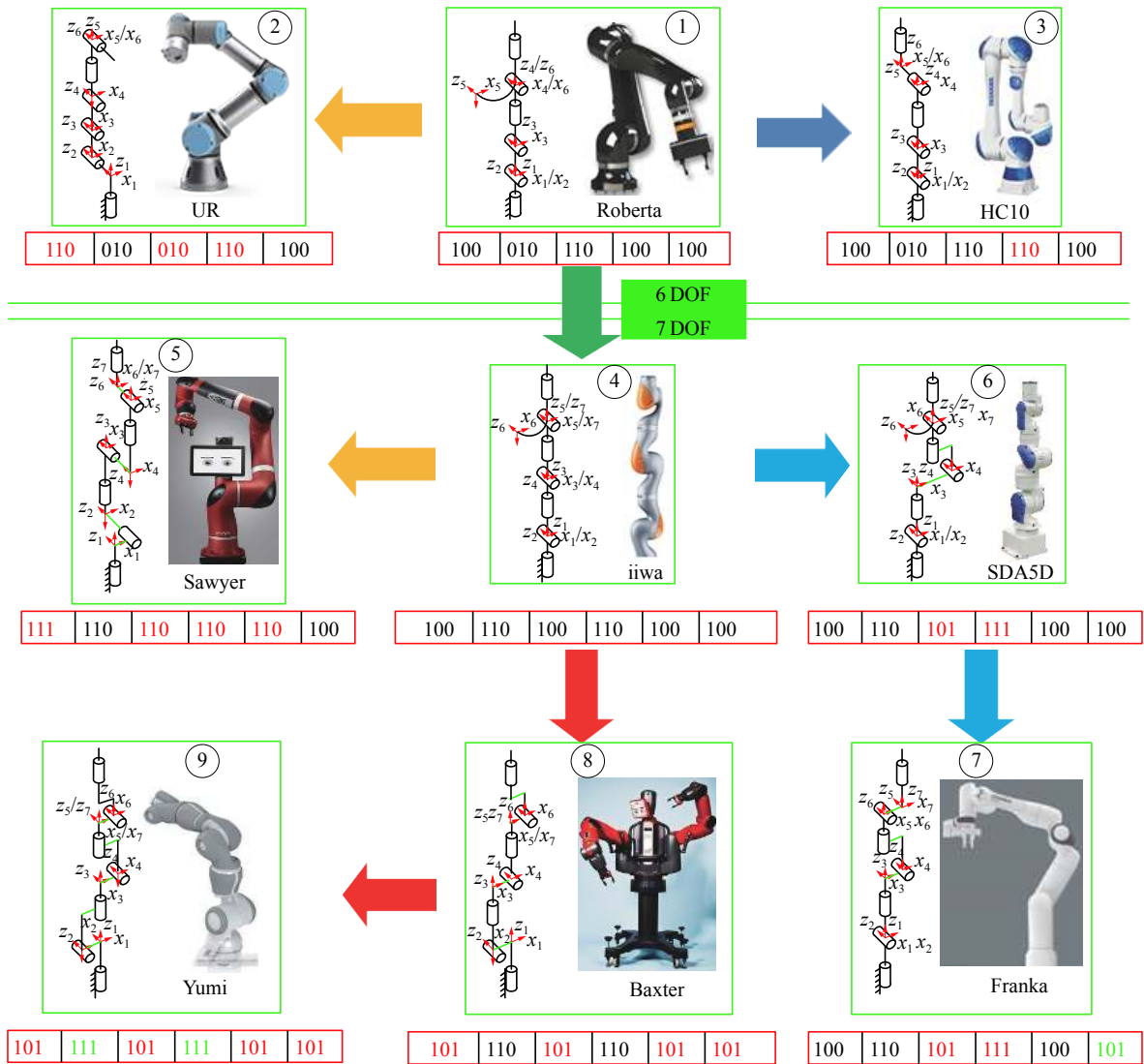


图5 典型协作机器人的演化及编码

Fig. 5 Evolution and coding of typical collaborative robots

4) 对于7DOF 协作机器人,其构型在构型④的基础上进行了变化,且构型④是目前采用最为广泛的构型,其编码为100|110|100|110|100|100。

5) 构型⑤的编码为111|110|110|110|110|100,与构型④对比可以看出,主要差别体现在 bit_2 。

6) 对于构型⑥、⑦,其编码分别为100|110|101|111|100|100、100|110|101|111|100|101,其中构型⑥在构型④的基础上变化了关节3、4及4、5之间的关系,构型⑦在构型⑥的基础上改变了关节6、7之间的关系,与构型④的主要差别体现在 bit_3 。

7) 对于构型⑧、⑨, 其编码分别为 101|110|101|100|101|101、101|111|101|111|101|101, 其中构型⑧在构型④的基础上变化了关节 1-2, 3-4, 5-6, 6-7 之间的关系, 构型⑨在构型⑧的基础上改变了关节 2-3, 4-5 之间的关系, 与构型④的主要差别体现在 bit_3 。

2 偏置的定义与分类

目前协作机器人构型大多采用 7DOF 构型, 因此本文主要针对 7DOF 构型进行分析。通过图 5 演化过程和编码差异可以看出: 目前协作机器人主要以 $R \perp R \perp R \perp R \perp R \perp R$ 为基础构型, 则各构型编码中的 $\text{bit}_1=1$, 主要不同体现在 bit_2 、 bit_3 上。

本文中以构型④的编码为基础编码, 对比机器人各构型对应的编码, 如果有编码与基础编码存在不同, 则定义该编码对应的机器人参数为偏置。偏置参数如表 2 中所示。

表 2 构型编码及对应偏置参数

Table 2 Configuration code and offset parameters

构型	编码	偏置
(4)	100 110 100 110 100 100	—
(5)	111 110 110 110 110 100	a_1, d_2, a_3, a_5
(6)	100 110 101 111 100 100	d_4, d_5
(7)	100 110 101 111 100 101	d_4, d_5, d_7
(8)	101 110 101 110 101 101	d_2, d_4, d_6, d_7
(9)	101 111 101 111 101 101	$d_2, d_3, d_4, d_5, d_6, d_7$

通过对构型偏置的定义可以看出:

1) 相邻两关节轴线平行。该相邻关节之间不存在偏置, 此时定义两相邻关节的轴线距离为机器人连杆长度。

2) 相邻两关节轴线垂直。当相邻关节轴线异面时, 其中一个偏置参数为两轴线的距离, 另一个偏置参数受后一关节坐标系原点的位置影响; 当相邻两关节轴线相交时, 偏置参数受后一关节坐标系原点的位置影响。通过上述分析, 最终得到的协作机器人的构型如图 6 所示。其中, a_{i-1} 表示相邻轴线间的公垂线长度, d_i 表示轴长。并将偏置类型分为 S 型与 Y 型, D-H 参数如表 3、表 4 所示。通过分析可以看出, 构型偏置的存在对机器人关节运动范围有很大的影响。其中, 偏置 d_2, d_4, d_6 的存在使得关节 J_2, J_4, J_6 的运动角度增加, 本文称此类偏置为 S 型偏置, 如图 5 中的 Sawyer 构型; 而偏置 $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$ 的存在使得关节 J_2, J_4, J_6 的运动角度范围基本保持不变,

但是关节角度上下限发生变化, 本文称此类偏置为 Y 型偏置, 如图 5 中的 SDA5D、Yumi、Franka、Baxter 构型。

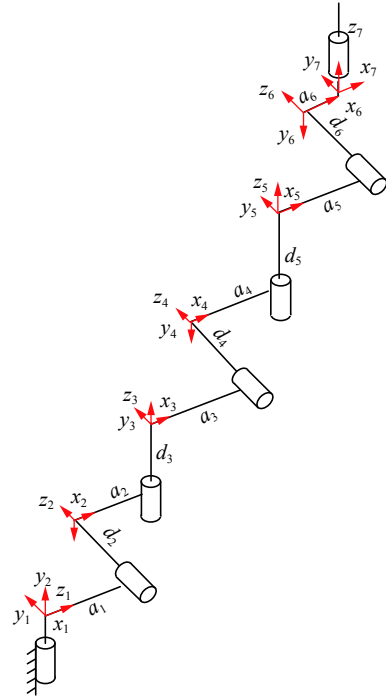


图 6 带有偏置的协作机器人 D-H 坐标系

Fig. 6 Coordinated robot D-H coordinate system with offset

表 3 S 型偏置的 D-H 参数

Table 3 D-H parameters of S offset

i	a_{i-1}	α_{i-1}	d_i	θ_i	关节角范围
1	0	0	0	0	$-170^\circ \sim 170^\circ$
2	0	-90°	d_2	0	$-170^\circ \sim 170^\circ$
3	0	90°	d_3	0	$-170^\circ \sim 170^\circ$
4	0	-90°	d_4	0	$-170^\circ \sim 170^\circ$
5	0	90°	d_5	0	$-170^\circ \sim 170^\circ$
6	0	-90°	d_6	0	$-170^\circ \sim 170^\circ$
7	0	90°	0	0	$-170^\circ \sim 170^\circ$

表 4 Y 型偏置的 D-H 参数

Table 4 D-H parameters of Y offset

i	a_{i-1}	α_{i-1}	d_i	θ_i	关节角范围
1	0	0	0	0	$-170^\circ \sim 170^\circ$
2	a_1	-90°	0	0	$-40^\circ \sim 180^\circ$
3	a_2	90°	d_3	0	$-170^\circ \sim 170^\circ$
4	a_3	-90°	0	0	$-40^\circ \sim 180^\circ$
5	a_4	90°	d_5	0	$-170^\circ \sim 170^\circ$
6	a_5	-90°	0	0	$-40^\circ \sim 180^\circ$
7	a_6	90°	0	0	$-170^\circ \sim 170^\circ$

3 仿真算例

为了研究偏置对构型的影响, 本文通过对 iiwa、Sawyer、Yumi 三种机器人构型的分析进行验证。

3.1 性能评价指标

评价机器人构型的优劣主要是通过性能评价指标来评价。国内外学者已提出许多性能指标来评价机器人的构型优劣。主要包括条件数、可操作度、方向可操作度、各项同性指标等评价指标。本节主要采用全局性能指标 η 、工作空间体积指标 Q_L 以及灵活工作空间指标 λ 。

1) 全局性能指标如公式 (1) 所示, 机器人的运动灵活性能反映了机器人在整个工作空间中向各个方向的运动和力的转化能力^[16]。

$$\eta = \frac{\int_w \left(\frac{1}{k} \right) dw}{\int_w dw} \quad (1)$$

式中: w 为工作空间范围, k 为机器人工作空间中每个位姿对应的条件数。根据上述性能指标的定义可知: η 越大, 机器人的运动灵活性能越好。

2) 工作空间体积指标反映了在机器人连杆总长度一定的情况下, 该机器人所能达到的工作空间体积的大小。

$$Q_L = \frac{\sqrt[n]{V}}{\sum_{i=1}^n (a_i + b_i)} \quad (2)$$

式中: a_i 、 b_i 分别为机器人偏置参数和连杆尺寸参数; V 为机器人的工作空间体积。

3) 灵活工作空间指标反映了机器人的末端执行器能以任意姿态到达的点的灵活程度^[15]。

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^m D_i}{m} \quad (3)$$

式中: m 为工作空间中末端点的个数, D_i 为机器人每个末端点的灵活度。

上述 3 个指标越大, 说明机器人的运动灵活性、工作空间体积性能、灵活工作空间性能越好。

3.2 典型构型的指标对比

通过 3.1 节的性能指标对 iiwa、Sawyer、Yumi 进行分析并对比, 结果如表 5 所示。

通过对比分析可以看出:

1) 由于偏置的存在, 机器人关节的运动范围发生变化。相对于 iiwa 构型, Sawyer 构型的偏置导致了关节 J_2 、 J_4 、 J_6 的运动范围增加; 而 Yumi 构型的偏置没有增加关节运动范围, 但是使得关节运动范围在某一方向增加, 另一方向减小。

2) 对于工作空间截面, 由于 Yumi 构型的偏置使得关节运动范围在某一方向上增加, 另一方向上减小, 因此导致空间截面不对称, 使得一边的工作空间增大, 另一边的工作空间减小; 而对于 Sawyer 构型的偏置没有出现这一现象, 只是工

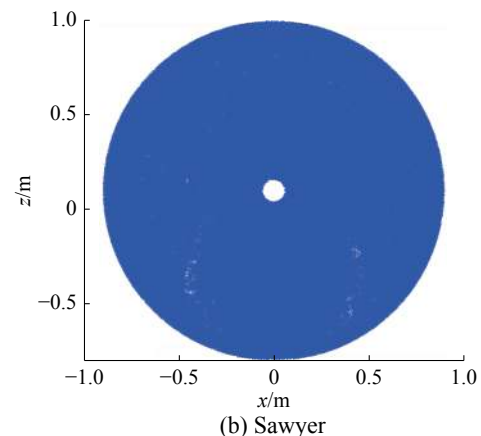
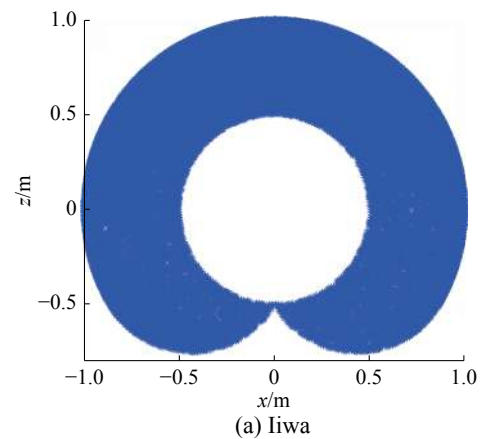
作空间体积增加了。图 7 为工作空间截面分布图。

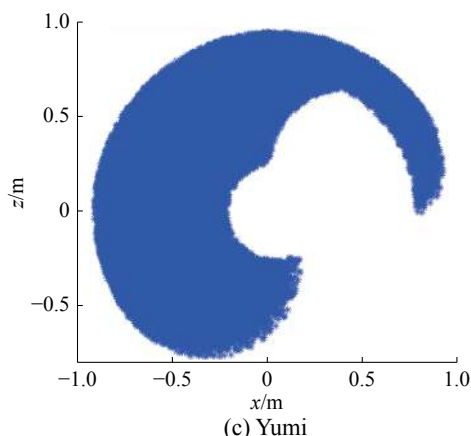
3) 两种偏置对工作空间体积指标都有一定的降低, Sawyer 构型对性能指标降低的较明显; 两种偏置对全局性能指标都有一定的降低, Yumi 构型对性能指标降低的较明显; 两种偏置对灵活工作空间指标都有一定的提高, Sawyer 构型对性能指标提高的非常明显。

表 5 Iiwa、Sawyer、Yumi 构型分析对比

Table 5 Configuration analysis and comparison of Iiwa, Sawyer, Yumi

构型	Iiwa	Sawyer	Yumi
关节角度范围	-170°~170°	-175°~175°	-168.5°~168.5°
	-120°~120°	-175°~175°	-143.5°~43.5°
	-170°~170°	-175°~175°	-168.5°~168.5°
	-120°~120°	-170.5°~170.5°	-123.5°~80°
	-170°~170°	-170.5°~170.5°	-290°~290°
	-120°~120°	-175°~175°	-88°~138°
	-170°~170°	-270°~270°	-229°~229°
	-120°~120°	-175°~175°	-88°~138°
Q_L	1.51	1.12	1.23
η	0.081	0.078	0.062
λ	0.713 4	0.825	0.745



图7 工作空间 x - z 截面分布Fig. 7 Working space x - z cross section distribution

4 结束语

本文以协作机器人构型为研究目标,首先通过对现有的典型协作机器人的构型进行了对比分析,通过构型间的演化过程发现偏置的存在是导致协作机器人构型差异的重要因素。然后对偏置进行了定义,并将其分为S型和Y型,最终得到了含有偏置的协作机器人基本构型。最后对iiwa、Sawyer、Yumi3种构型进行对比分析,得到不同的偏置对性能指标的影响不同。其中,偏置降低机器人的全局性能、工作空间体积性能,但能够提高机器人的灵活工作空间性能,该分析研究对后续的协作机器人的构型设计提供了一定的参考。

本文仅在构型的型综合方面进行了分析研究,没有通过尺度综合得到构型偏置对性能指标的具体影响,下一步的研究会通过相应的性能指标对机器人的构型进行尺度综合,研究偏置对性能指标的具体影响。

参考文献:

- [1] International Organization for Standardization (ISO). Robots and robotic devices-Collaborative robots[EB/OL]. (2016-02-04)[2017-03-15]. <https://www.iso.org/standard/62996.html>.
- [2] 胡明伟,王洪光,潘新安,等.一种协作型机器人运动性能分析与仿真[J].智能系统学报,2017,12(1):75-81.
HU Mingwei, WANG Hongguang, PAN Xin'an, et al. Analysis and simulation on kinematics performance of a collaborative robot[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2017, 12(1): 75-81.
- [3] 侯澈,王争,赵忆文,等.面向直接示教的机器人负载自适应零力控制[J].机器人,2017,39(4):439-448.
HOU Che, WANG Zheng, ZHAO Yiwen, et al. Load adaptive force-free control for the direct teaching of robots[J]. Robot, 2017, 39(4): 439-448.
- [4] STOLT A, LINDEROTH M, ROBERTSON A, et al. Robotic assembly of emergency stop buttons[C]//Proceedings of 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Tokyo, Japan, 2013.
- [5] GUIZZO E, ACKERMAN E. How rethink robotics built its new Baxter robot worker[R]. IEEE Spectrum, 2012.
- [6] WANG Kesheng, LIEN T K. The structure design and kinematics of a robot manipulator-I. Theory[J]. Robotics and computer-integrated manufacturing, 1989, 5(2/3): 153-158.
- [7] HOLLERBACH J M. Optimum kinematic design for a seven degree of freedom manipulator[C]//Proceedings of the Robotics Research: The Second International Symposium. Cambridge, USA, 1985: 215-222.
- [8] 归彤,原培章.7自由度机器人的图谱问题[J].机器人,1991,13(4):27-30.
GUI Tong, YUAN Peizhang. An atlas of 7-DOF robot manipulators[J]. Robot, 1991, 13(4): 27-30.
- [9] 赵占芳.七自由度机器人机构的选型[J].机器人,1989,3(1):53-56.
ZHAO Zhanfang. The selection of seven degrees of freedom robot mechanism[J]. Robot, 1989, 3(1): 53-56.
- [10] STEVENSON R, SHIRINZADEH B, ALICI G. Singularity avoidance and aspect maintenance in redundant manipulators[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision. Singapore, Singapore, 2002: 857-862.
- [11] YU Chao, JIN Minghe, LIU Hong. An analytical solution for inverse kinematic of 7-DOF redundant manipulators with offset-wrist[C]//Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Chengdu, China, 2012: 92-97.
- [12] SINGH G K, CLAASSENS J. An analytical solution for the inverse kinematics of a redundant 7DoF manipulator with link offsets[C]//Proceedings of 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Taipei, Taiwan, China, 2010: 2976-2982.
- [13] GOGU G. Structural synthesis of fully-isotropic parallel robots with Schönflies motions via theory of linear transformations and evolutionary morphology[J]. European journal of mechanics-A/solids, 2007, 26(2): 242-269.
- [14] TSAI Y C, SONI A H. The effect of link parameter on the working space of general 3R robot arms[J]. Mechanism and machine theory, 1984, 19(1): 9-16.
- [15] VAHRENKAMP N, ASFOUR T, METTA G, et al. Manipulability analysis[C]//Proceedings of the 12th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots. Osaka, Japan, 2012: 568-573.

- [16] PORGES O, STOURAITIS T, BORST C, et al. Reachability and capability analysis for manipulation tasks[M]// ARMADA M A, SANFELIU A, FERRE M. ROBOT2013: First Iberian Robotics Conference. Cham: Springer, 2014: 703–718.

作者简介:



田勇, 男, 1988 年, 博士研究生, 主要研究方向为机械电子。



王洪光, 男, 1965 年, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为机器人机构学、特种机器人和机电一体化技术。发表学术论文 170 余篇。获得发明和实用新型专利 40 余项。主持多项基金项目。



潘新安, 男, 1982 年, 副研究员, 博士, 主要研究方向为机器人机构学。发表学术论文 10 余篇。获得发明和实用新型专利 6 项。主持国家自然科学基金项目 1 项, 机器人学国家重点实验室自主课题 1 项。

2019 年第五届 IEEE 控制、自动化和机器人技术大会 (ICCAR 2019)

2019 The 5th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR 2019)

Over the past five years, we witnessed the world we live in entirely disrupted by improvements in artificial intelligence (AI), machine learning and control engineering. Algorithms and machine learning are trading millions of dollars in financial markets; they are predicting what people want to search for online; facial recognition helps police identify criminals. Soon, AI could be driving our cars and trains even airplanes, Intelligent Robotic and Control Engineering will have a fundamental impact on the society in the next few years.

2019 The 5th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR 2019) will take place at Beijing, China during April 19—22, 2019. On the theoretical side, this conference features papers focusing on intelligent systems engineering, distributed intelligence systems, multi-level systems, intelligent control, multi-robot systems, cooperation and coordination of unmanned vehicle systems, etc. On the application side, it emphasizes autonomous systems, industrial robotic systems, multi-robot systems, aerial vehicles, underwater robots and sensor-based control.

Under the background of China's National strategies, such as "Made in China 2025" and "A New Generation of Artificial Intelligence Development Plan", we believe ICCAR 2019 would be the platform for academic exchanges, thought collisions, inspiration, and results sharing, we do wish all the participants take this opportunity to have future international collaborations.

会议官网: <http://www.iccar.org/>

会议日期: 2019 年 4 月 19—22 日

会议地点: 中国北京