

DOI:10.11992/tis.201604018

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1538.TP.20170227.1801.012.html>

一种协作型机器人运动性能分析与仿真

胡明伟^{1,2}, 王洪光¹, 潘新安¹, 田勇^{1,2}, 常勇¹

(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:随着制造模式的变革,协作型机器人在工业领域的应用日益广泛。本文介绍了协作型机器人的特性,并且以 KUKA LBR iiwa 机器人为例,进行运动性能分析,旨在为研发此类机器人提供设计理论依据。利用 Denavit-Hartenberg 法建立了该机器人运动学模型。基于蒙特卡洛法在 MATLAB 环境下对机器人灵活性和可操作性进行分析,并对其在狭小空间内作业进行轨迹规划,仿真结果表明 LBR iiwa 机器人具有良好的灵活性、可操作性及避障能力。

关键词:LBR iiwa; 协作型机器人; 灵活性; 可操作性; 狭小空间; 轨迹规划

中图分类号:TP241 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-4785(2017)01-0075-07

中文引用格式: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.

英文引用格式: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.

Analysis and simulation on kinematics performance of a collaborative robot

HU Mingwei^{1,2}, WANG Hongguang¹, PAN Xin'an¹, TIAN Yong^{1,2}, CHANG Yong¹

(1. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 110049, China)

Abstract: With the revolution of manufacturing mode, the application of collaborative robot in industry is becoming increasingly widespread. This paper introduces the characteristics of collaborative robot and analyzes the kinematics performance of KUKA LBR iiwa which is the typical representative of collaborative robots. The aim of this work is to provide design theory basis for developing this kind of robot. The robot kinematic model is established by Denavit-Hartenberg method. Based on Monte-Carlo method, the flexibility and manipulability of robot are analyzed in MATLAB environment. The trajectory of robot working in narrow workspace is planned, simulation results show that LBR iiwa has good flexibility, manipulability and obstacle avoidance ability.

Keywords: LBR iiwa; collaborative Robots; flexibility; manipulability; narrow workspace; trajectory planning

传统的工业机器人适应结构化生产环境、大批量的制造模式,已经在汽车、电子电气、橡胶及塑料等行业得到了广泛的应用。近年来,随着市场需求向用户定制、多品种、中小批量生产的转变,对机器人的应用需求也发生了变化。就制造模式而言,机器人不仅要适应大型企业的刚性生产线要求,也要

适应中小企业的柔性制造场合。其工作环境由封闭的结构化作业环境转变为与人共存的半结构化作业环境。就性能要求而言,传统的制造模式要求机器人具有较高的重复定位精度,当前的一些作业任务对机器人的绝对定位精度也提出了很高要求。显然,传统的工业机器人已不能适应上述生产制造模式的变化,难以满足新的市场需求^[1-2]。

近年来,协作型机器人日益受到人们的重视,已经有多家机器人制造商开发出这种可以与人协同工作,更加安全且灵活的新型机器人,这种机器

收稿日期:2016-04-14 网络出版日期:2017-02-27

基金项目:国家自然科学基金项目(51405482);辽宁省自然科学基金计划项目(2013020054);中国科学院重点部署项目(KGZD-EW-608-1);辽宁省产业共性技术创新平台计划项目(2015106014)。

通信作者:王洪光. E-mail: hgwang@sia.cn

人已应用于精密装配、包装、打磨、检测及机床上下料等生产制造领域。协作型机器人具有轻质、大负载自重比、灵活易用、安全性高、能够与人协同作业等特点。此项技术不仅有益于提高大型企业的生产效率,也为中小型企业提高自动化作业水平提供了技术支撑。传统工业机器人与协作型机器人应用领域比较如表1所示。

表1 传统工业机器人与协作型机器人应用领域比较

Table 1 Comparison of traditional robots and collaborative robots in applications

	传统工业机器人	协作型机器人
制造模式	单一品种、大批量	用户定制、多品种、中小批量
工作环境	封闭、结构化、与人隔离	半结构化、与人协作
应用领域	焊接、物料搬运、装配、喷涂等	精密装配、检测、产品包装、打磨等

目前,协作型机器人已成为机器人领域的研究热点,并且已有部分厂商开发出了相应的产品,具有代表性的有 Universal Robots 公司的 UR3 \ 5 \ 10^[3]、KUKA 公司的 LBR iiwa、Rethink Robotics 公司的 Baxter 和 Sawyer、ABB 公司的 YuMi、沈阳新松的柔性多关节机器人以及 Smokie Robotics 公司的 OUR 等^[4]。这些机器人都具有灵活易用、安全性高、能与人协同作业等特点。

目前协作型机器人尚无统一的定义。KUKA 公司将 LBR iiwa 机器人定义为可与人并肩作业的“智能型工业助手”^[4]。Universal Robots 公司对协作型机器人的定义是一种易于安装和使用的能够与工人合作生产的轻型机器人^[3]。ABB 公司则将协作型机器人 YuMi 定义为能够满足电子消费品行业对柔性和灵活制造的需求,可应用于小件装配作业(尤其是 3C 产品)的能与人协同作业的机器人^[4]。国际标准化组织(ISO)于 2016 年制定的 ISO/TS 15066 标准对“协同操作”(collaborative operation)的定义为:特殊设计的机器人系统与操作人员在协同作业空间内进行的工作^[5-6]。综上所述,协作型机器人可描述为:一种能够与人协同作业,具有大负载自重比、安全性高、灵活易用、用户友好等特点的智能轻型工业机器人。

本文介绍了协作型机器人的特性并以 KUKA 开发的 LBR iiwa 协作型机器人为研究对象,对其构型进行分析并利用 Denavit-Hartenberg 法建立了相应的运动学模型。在 MATLAB 环境下,利用 Robotics Toolbox 工具箱对机器人灵活性和可操作性指标进行分析,给出了机器人条件数和可操作度在工作空间内的分布图,分析了该机器人的灵活性和可操作性,最后对其在狭小空间内作业进行轨迹规

划,分析结果表明该机器人具有良好的灵活性、可操作性和避障能力,为研发七自由度协作型机器人提供了设计理论依据。

1 机器人构型分析

因协作型机器人与共享工作空间,为保障操作人员的安全,防止安全事故的发生,机器人就必须具有安全性,而实现安全性的基本保障就是机构设计^[7]。

根据自由度的不同,工业机器人可以分为非冗余自由度机器人和冗余自由度机器人。非冗余自由度机器人的缺点是运动不灵活,无法躲避运动灵活性差的区域,不能躲避任务空间中的障碍等^[8]。如六自由度机器人由于不具有冗余自由度,因此在每个位姿仅有一组关节值(或有多组关节值,但考虑到位姿运行的连续性,一般仅有一组是可行的),因此机器人在指定位姿必须以特定的位形实现,无避障能力。如图1所示,对于 UR5 机器人,其大臂和小臂一直形成一个竖直平面内的三角形,因此,机器人肘部总是处在较高位置,妨碍机器人在高度方向上对障碍物的避障。

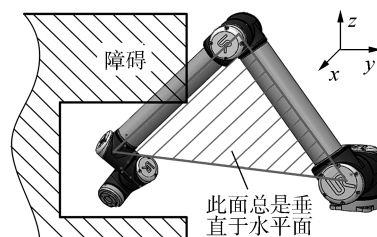


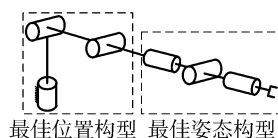
图1 UR5 机器人与障碍物干涉示意图

Fig.1 Demonstration of the UR5 manipulator interfere with obstacles

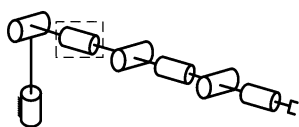
冗余自由度机器人克服了非冗余自由度机器人的缺点,对于任务空间中的点,关节空间可以有无穷多个解,或者说有无穷多个位形与之对应。另外,冗余自由度构型具有良好的柔顺性,即机械臂在空间六个自由度方向都具有良好的运动能力,故其灵活性高、避障能力强,但其缺点是运动学逆解较为复杂^[9-10]。

许多学者对七自由度机器人构型问题做了大量的研究^[9-11],如 Tsai 等^[8]对机器人位置和姿态构型进行了综合,提出了最佳位置构型和最佳姿态构型;原培章等^[11]采用位置空间和奇异空间同时评价七自由度机器人的机构选型并制作了机器人的选型图谱。目前,七自由度机器人中有两种公认的最佳构型设计,如图2(b)、(c)所示。这两种构型都是在具有最优灵活工作空间的六自由度机器人构型(见图2(a))中添加了一个转动副。这两种构型都能产生自运动而不改变手部的位姿,从而完全消除肩部和腕部出现的奇异情况,而且有利于避开障碍物。而图2(b)所示构型在各方向上的灵活性基

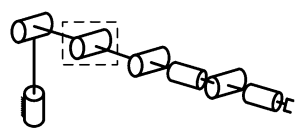
本相同,具有类似“各向同性”的特点,较多被采用。七自由度协作型机器人也大多采用此种构型,如 LBR iiwa、YuMi 等。



(a) 六自由度最佳构型



(b) 七自由度构型 1

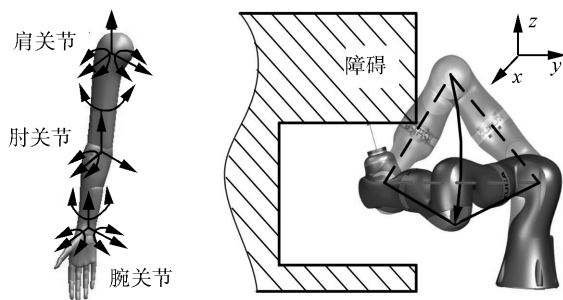


(c) 七自由度构型 2

图2 七自由度机器人构型图谱

Fig.2 Atlas of 7-DOF robot manipulators

这种构型具有和人的手臂相似的结构,如图 3(a)^[12]所示,可以将前 3 个关节看作一个球副的肩关节,将后 3 个关节看作球副的腕关节,中间的关节看作肘关节。这种构型的机器人可以绕连接肩腕两球副之间的直线做自运动,如图 3(b)所示。利用这种特性可以灵活地避开任务空间中的一些障碍物,而且可以完全消除手腕和肩部的奇异,所以采用此种构型的协作型机器人的灵活性和避障能力要优于六自由度机器人,非常适合于精密装配和狭小工作空间作业任务。



(a) 人体手臂结构 (b) 拟人机械臂避障示意图

图3 拟人机械臂

Fig.3 Humanoid robot arm

2 机器人运动学模型

本文以七自由度协作型机器人 KUKA LBR iiwa 为例,根据其构型和结构参数(如图 4 和表 2),通过 Denavit-Hartenberg 法^[13]建立各杆件的坐标系并推

导相应的运动学方程。

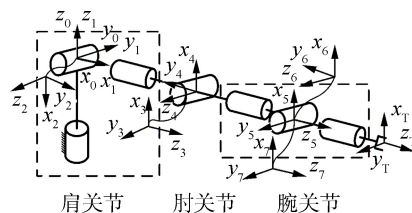


图4 KUKA LBR iiwa 构型

Fig.4 The configuration of KUKA LBR iiwa

表2 KUKA LBR iiwa 机器人 D-H 参数

Table 2 D-H parameters of the KUKA LBR iiwa robot

i	a_{i-1}/mm	$\alpha_{i-1}/(^{\circ})$	d_i/mm	$\theta_i/(^{\circ})$	关节范围
1	0	0	0	0	$\pm 170^{\circ}$
2	0	90°	0	-90°	$\pm 120^{\circ}$
3	0	-90°	400	180°	$\pm 170^{\circ}$
4	0	-90°	0	0	$\pm 120^{\circ}$
5	0	90°	400	0	$\pm 170^{\circ}$
6	0	-90°	0	0	$\pm 120^{\circ}$
7	0	90°	0	0	$\pm 175^{\circ}$

运动学方程可以表示为

$${}^0_n T = {}^0_1 T {}^1_2 T {}^2_3 T \cdots {}^{n-2}_{n-1} T {}^{n-1}_n T$$

式中:

$${}^{i-1}_i T = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1}d_i \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1}d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

方程左端为末端位姿,可以表达为

$${}^0_n T = [n \quad o \quad a \quad p] = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

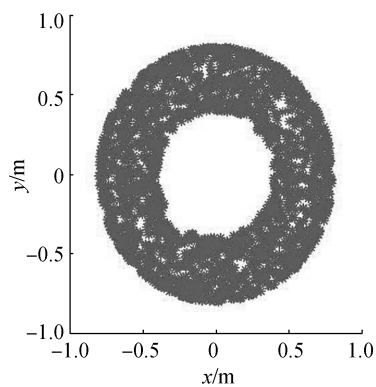
3 机器人运动性能分析

灵活性和可操作性是表征机器人运动性能的重要指标,灵活性能反映机器人在工作空间位置的灵巧性,而对可操作性的研究能够得到机器人的奇异空间。

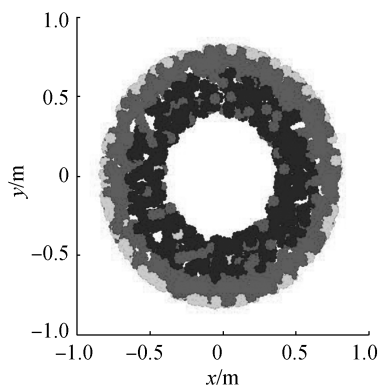
本文分别使用雅可比矩阵的条件数和与其转置之积的行列式作为灵活性和可操作性的度量指标。Salisbury 和 Craig^[13]利用雅可比矩阵 $J(q)$ 的条件数即 $k = \|J\| \|J^{-1}\|$ 作为评价机械臂灵活性的度量指标。当 $k=1$ 时,机械臂所具有的位形称为各向同性,即灵活性最高。设计机器人机械结构时应尽量使其最小条件数为 1,这时灵活性最高,各奇异值相等。Yoshikawa^[14]将雅可比矩阵与其转置之积的行列式 $w = \sigma_1 \sigma_2 \cdots \sigma_m$ 定义为可操作性的度量指标,当机械臂处于奇异位形时,此时操作臂的可操作性为 0,即

$w=0$ 。所以利用可操作性可以直接判别奇异位形。

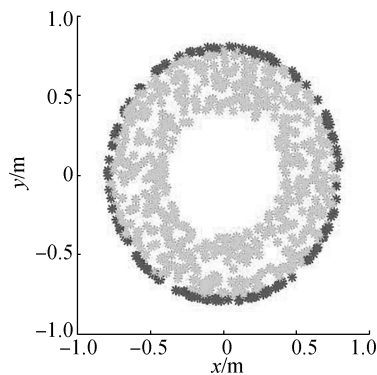
本文利用 MATLAB Robotics Toolbox 工具箱,基于蒙特卡洛法对协作型机器人 KUKA LBR iiwa 灵活性和可操作性在工作空间中的分布情况进行了研究^[15-16],分析结果如图 5 所示。图 5(a)和 5(d)为机器人工作空间 XY 和 XZ 截面图,截面图表明仿真工作空间符合各关节实际转角范围,与实际工作空间相符;该分析结果验证了运动模型的正确性;由于工作空间内不存在空洞和空腔,所以在工作空间内部没有臂端不能到达的区域。图 5(b)和 5(e)为机器人在工作空间 XY 和 XZ 截面的灵活性图,灰度值越小代表条件数越小,即灵活性越好,可以看出在工作空间中越接近基坐标灵活性越好,通过条件数在工作空间内的分布情况可知,在工作范围 450~600 mm 的区域机械臂的灵活性最高,随着工作距离的增加机械臂的灵活性逐渐下降,工作空间最外部灵活性最差。图 5(c)和 5(f)为机器人在工作空间 XY 和 XZ 截面的可操作性图,灰度值越小代表可操作性越小,通过可操作性在工作空间内的分布情况可知,机械臂工作空间最外部为奇异空间,奇异空间占工作空间的很小部分,而工作空间的大部分区域灵活性较高。为充分利用机器人的灵活性,其作业对象应放置于 450~600 mm 工作范围内,保证机器人在作业时具有高灵活性和可操作性。



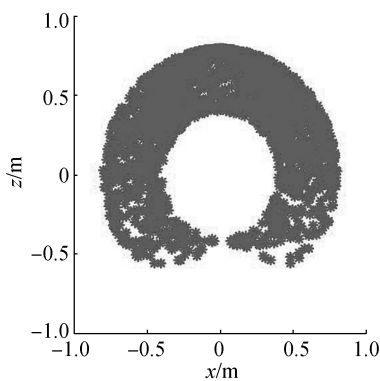
(a) 工作空间 XY 截面



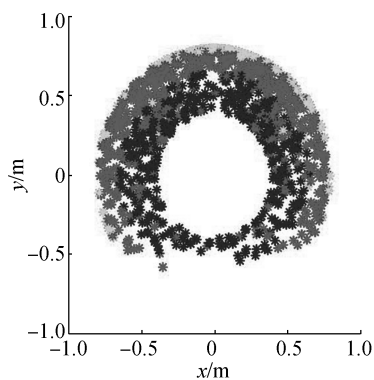
(b) 灵活性 XY 截面



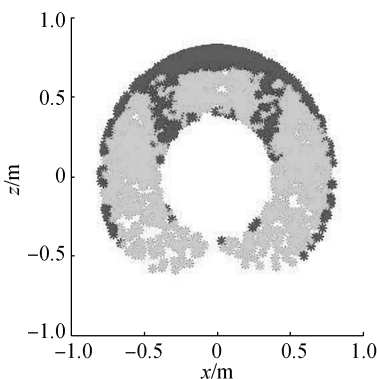
(c) 可操作性 XY 截面



(d) 工作空间 XZ 截面



(e) 灵活性 XZ 截面



(f) 可操作性 XZ 截面

图 5 机器人运动性能

Fig.5 Robot motion performance

4 狭小空间轨迹规划与仿真

4.1 狭小空间轨迹规划

为验证该机器人在狭小空间内的作业能力,本文设定了一个狭小作业空间,对机器人进行了避障规划。因为在复杂作业环境中,机器人易与障碍产生干涉,所以对于路径、姿态两者的瞬时变化规律要求严格,必须在笛卡尔空间进行轨迹规划^[10]。

机器人的作业环境为被障碍物所包围的狭小空间,如图6所示。机器人需到达A点进行作业,在 $X=600\text{ mm}$ 平面内完成“Z”字形的书写。

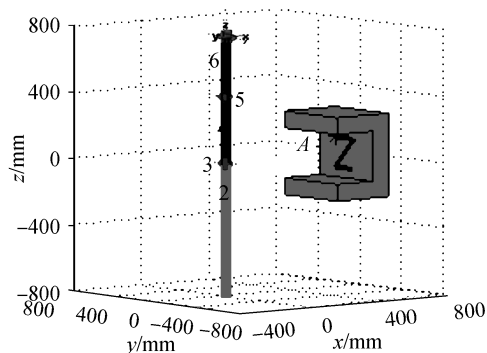


图6 机器人工作场景

Fig.6 Working condition of robot

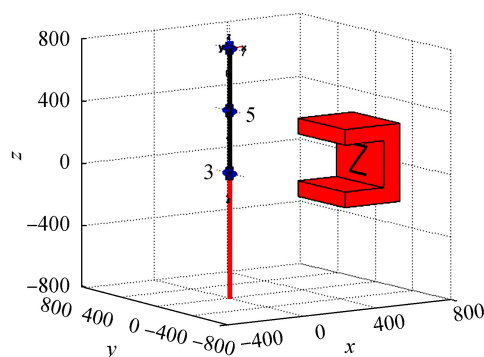
显然,若机器人灵活性较差、无避障能力,例如采用六自由度构型,则机器人必然会与障碍物发生干涉,无法继续作业。而七自由度协作型机器人能够通过绕连接肩腕两球副之间的直线做自运动,调整肘部的位置,避开障碍物进入狭小空间作业,如图3(b)所示。

机器人进入狭小空间作业运动过程如图7所示,机器人从图7(a)状态运动到图7(b)状态过程中不会与障碍物发生碰撞。但如果机器人保持肘部在上的位姿进入作业空间,则一定会与障碍物发生碰撞。此时机器人在保证腕关节位置不动的情况下调整肘部位置,改变肘部的位形,如图7(c)所示。机器人以图7(c)状态进入工作空间,则不会与障碍物发生碰撞。最终以规定末端执行器姿态到达A点进行作业。

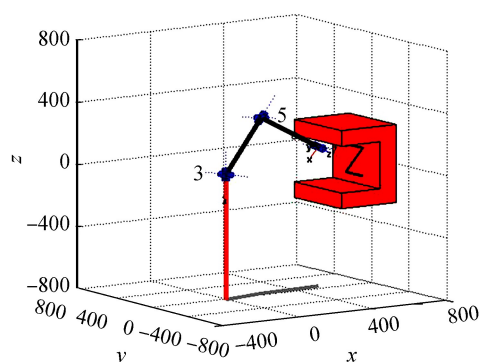
4.2 狭小空间轨迹仿真

基于 MATLAB Robotics Toolbox 工具箱对机器人进行轨迹仿真,从初始状态到达最终状态运动时间为31.83 s。机器人各关节位移曲线和速度曲线如图8和图9所示,由曲线图可看出该机器人的关节位移曲线平滑连续、无尖角,其关节角速度曲线无突变。这说明运动过程中机器人工作平稳,在进入狭小空间作业过程中没有产生较大的振动,能够取得良好的效果。仿真结果表明,七自由度协作型机器人具有良好的灵活

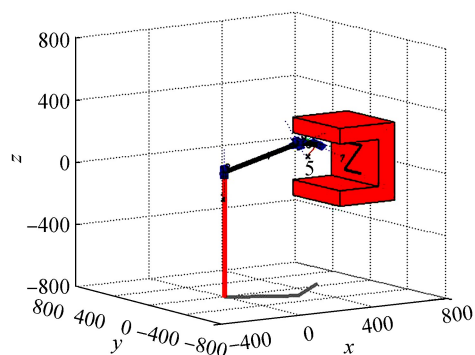
性和避障能力,能够进入狭小空间内进行作业。



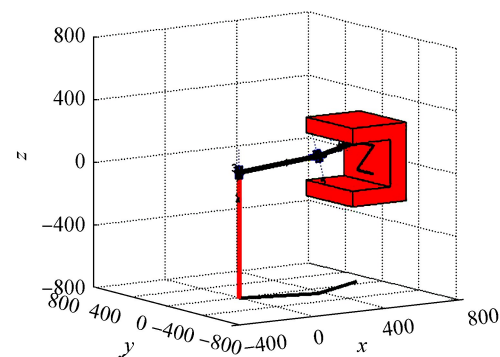
(a) 初始状态



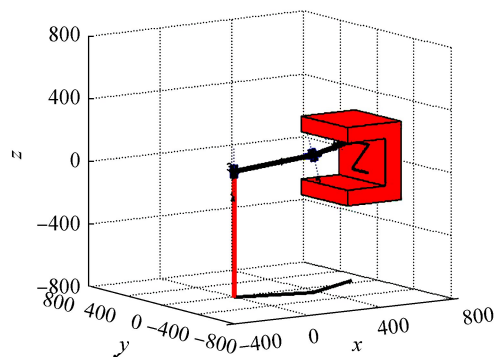
(b) 避障过程 1



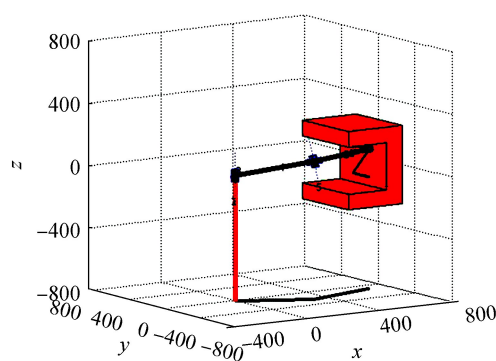
(c) 避障过程 2



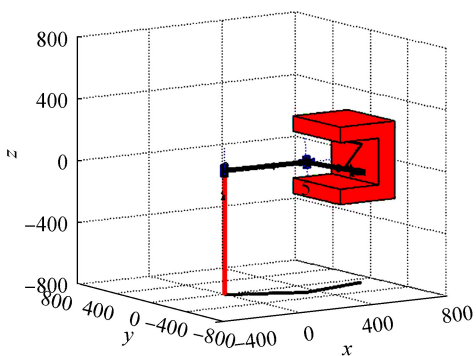
(d) 工作过程 1



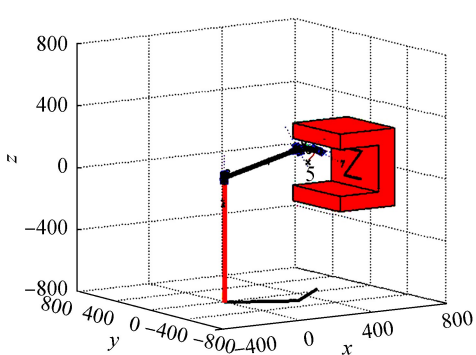
(e) 工作过程 2



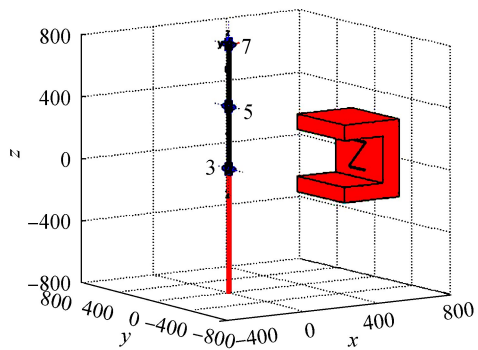
(f) 工作过程 3



(g) 工作过程 4



(h) 工作过程 5



(i) 最终状态

图7 机器人轨迹规划

Fig.7 Trajectory planning of robot

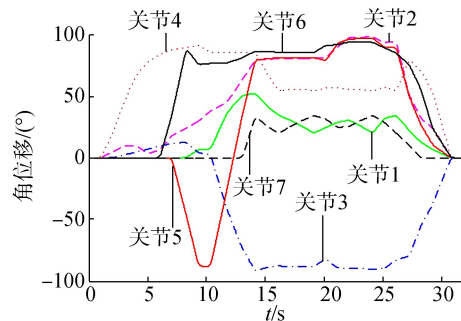


图8 机器人关节位移曲线

Fig.8 Curves of robot joint displacement

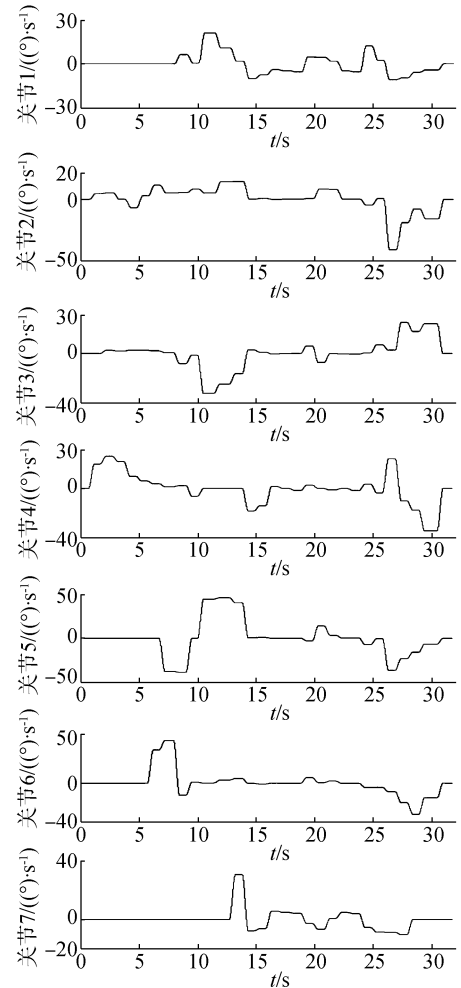


图9 机器人关节速度曲线

Fig.9 Curves of robot joint velocity

5 结论

1) 本文介绍了协作型机器人的特性,对其机构构型进行了比较分析。

2) 利用 Denavit-Hartenberg 法建立了 KUKA LBR iiwa 机器人的运动学模型。在 MATLAB 环境下对机器人运动性能进行分析,分析结果表明其具有良好的灵活性和可操作性。

3) 运用 MATLAB Robotics Toolbox 工具箱对 KUKA LBR iiwa 机器人进行狭小空间作业轨迹规划,验证机器人具有良好的灵活性和避障能力,能够进入狭小空间内进行作业。为研发七自由度协作型机器人提供了理论依据。

参考文献:

- [1] IFR Statistical Department. Global survey: human-robot teams capturing new sectors [EB/OL]. Germany: IFR, (2014-12-02) [2015-10-18]. <http://www.ifr.org/news/ifr-press-release/global-survey-human-robot-teams-capturing-new-sectors-670/>.
- [2] HANSON K. Collaborative robots lend a helping hand [EB/OL]. USA: CTE Publications, (2015-01-01) [2015-10-18]. <https://www.ctemag.com/news-videos/articles/collaborative-robots-lend-helping-hand>.
- [3] OSTERGAARD E. Lightweight robot for everybody [J]. IEEE robotics & automation magazine, 2012, 19(4): 17-18.
- [4] BARRETTE M B. Collaborative robot ebook [EB/OL]. Canada: Robotiq, (2015-04-09) [2015-10-18]. <http://robotiq.com/resource-c-enter/ebooks/>.
- [5] American National Standards Institute. ANSI/RIA R15.06-2012, Industrial robots and robot systems-safety requirements [S]. American: ANSI, 2012.
- [6] PILZ T. Guide to industry acceptance with the new "ISO TS 15066-collaborative robots" standard [C]//Proceedings of 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Hamburg, Germany: IEEE, 2015.
- [7] MATTHIAS B. New safety standards for collaborative robots, ABB YuMi dual-arm robot [C]//Proceedings of 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Hamburg, Germany: IEEE, 2015.
- [8] TSAI Y C, SONI A H. Workspace synthesis of 3R, 4R, 5R and 6R robots [J]. Mechanism and machine theory, 1985, 20(6): 555-563.
- [9] 周东辉. 冗余度机器人机构学研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学机器人研究所, 1994.
ZHOU Donghui. On the mechanism study of redundant robots [D]. Beijing: Graduate School of Beihang University, 1994.

[10] 赵占芳. 机器人冗余特性和力控制研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学研究生院, 1991.

ZHAO Zhanfang. Redundancy and force control of robot manipulators [D]. Beijing: Graduate School of Beihang University, 1991.

[11] 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.

[12] HUO Xijian, LIU Yiwei, JIANG Li, et al. Design and development of a 7-DOF humanoid arm [C]//Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Guangzhou, China, 2012: 277-282.

[13] SALISBURY J K, CRAIG J J. Articulated hands: force control and kinematic issues [J]. The international journal of robotics research, 1982, 1(1): 4-17.

[14] YOSHIKAWA T. Manipulability of robotic mechanisms [J]. The international journal of robotics research, 1985, 4(2): 3-9.

[15] 蔡蒂, 谢存禧, 张铁, 等. 基于蒙特卡洛法的喷涂机器人工作空间分析及仿真 [J]. 机械设计与制造, 2009(3): 161-162.

CAI Di, XIE Cunxi, ZHANG Tie, et al. Study on workspace analysis and simulation of 6-DOF painting robot based on Monte-Carlo method [J]. Machinery design & manufacture, 2009(3): 161-162.

[16] CORKE P. Robotics, vision and control: fundamental algorithms in MATLAB [M]. Berlin Heidelberg, Germany: Springer, 2011: 135-160.

作者简介:



胡明伟,男,1990 年生,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等。发表学术论文 170 余篇,授权发明和实用新型专利 40 余项。



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等。发表学术论文 10 余篇,授权发明和实用新型专利 6 项。