

码垛机器人的工作空间分析

杨传民¹, 田少龙², 杨锰², 刘铭宇²

(1. 天津商业大学, 天津 300134; 2. 河北工业大学, 天津 300131)

摘要: **目的** 分析在机器人设计和托盘码垛布局规划过程中码垛机器人的工作空间。**方法** 用 D-H 法则建立运动学方程, 根据运动学方程对四轴型的码垛机器人进行分析, 最后利用矩阵变换法建立码垛机器人位姿变化关系, 求解运动学的正逆解, 并用 Matlab 软件的图形用户界面 (GUI) 对求解结果进行仿真。**结果** 得到了机器人的可达工作空间图, 工作空间在 $x-y$ 平面投影图和工作空间在 $x-z$ 上的平面投影图。**结论** 通过分析 Matlab 软件的仿真结果, 可以直观地得到该码垛机器人的工作空间。

关键词: 码垛机器人; 工作空间; 布局规划

中图分类号: TP242

文献标识码: A

文章编号: 1001-3563(2014)07-0086-04

Workspace Analysis of the Palletizing Robot

YANG Chuan-min¹, TIAN Shao-long², YANG Meng², LIU Ming-yu²

(1. Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China; 2. Hebei University of Technology, Tianjin 300131, China)

ABSTRACT: **Objective** To analyze the robot working-space in the whole robot design process and the pallet packing layout planning process. **Methods** The kinematics equation was established by using the D-H method and then a four-axis stacking robot was analyzed according to this kinematics equation. At the end, the matrix approach was used to establish the position and pose transformation relationship of palletizing robot. Its positive and inverse kinematics were presented. The calculated results were simulated using the Graphical user interface of software Matlab. **Results** The work space diagram of the robot, the projection of the workspace in the $x-y$ plane and the projection of the workspace in the $x-z$ plane were obtained. **Conclusion** The workspace of palletizing robot is displayed in a very intuitive form through the analysis of simulation result attained by the software Matlab.

KEY WORDS: palletizing robot; workspace; packing problem

机器人码垛技术在物流自动化领域应用得越来越广泛, 由于目前中国还是一个劳动密集型国家, 很多工作都要靠人工来完成, 效率低下, 所以对码垛机器人的研究具有很大的应用价值^[1-2]。目前国外码垛机器人的市场占有率已经超过了 90%, 而且负载能力大, 精度高, 工作周期长。与此相比, 国内的码垛技术在处理速度、载荷能力和系统可靠性等方面还存在较大的差距。由此开发高性能、低成本、人性化的码垛机器人将有广阔的市场前景^[3-4]。

1 码垛机器人数学模型的建立

该码垛机器人为四自由度码垛机器人。它由基座、腰部、大臂和小臂等部分组成。每个关节都是转动关节, 关节 1 和关节 4 的轴线为铅直方向, 其余 2 个关节轴线相互平行, 与关节 1 的轴向垂直相交。每个关节分别由 4 个不同的伺服电机驱动, 并且各关节都有限定的转动范围。根据 D-H 法则^[5]建立该机器

收稿日期: 2013-12-22

基金项目: “十二五”科技支撑计划项目(2011BAD24B01)

作者简介: 杨传民(1959—), 男, 博士, 天津商业大学教授, 主要研究方向为包装工程、机械设计及理论。

人的连杆坐标系,并标注各轴转向和相关参数,见图1。

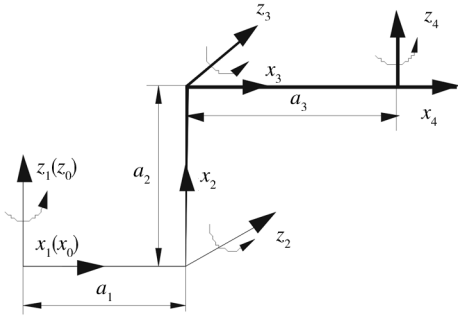


图1 机器人的连杆坐标系

Fig.1 The connecting rod coordinate system of the robot

机器人连杆坐标系各参数见表1。其中, θ_i 为关节变量,即连杆转角; α_{i-1} 为连杆的扭角; a_{i-1} 为连杆 $i-1$ 的长度; d_i 为两连杆的偏距。

表1 机器人连杆参数

Tab.1 The link parameter of the robot

连杆 i	变量 θ_i	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	变量范围
1	θ_1	0°	0	0	$-155^\circ \sim +155^\circ$
2	θ_2	-90°	α_1	0	$-120^\circ \sim +15^\circ$
3	θ_3	0°	α_2	0	$-145^\circ \sim +15^\circ$
4	θ_4	90°	α_3	0	$-180^\circ \sim +180^\circ$

2 码垛机器人正运动求解

机器人的正运动求解就是机器人运动学的正解,即求解运动学方程的过程^[6-7]。机器人运动学的正解就是给定机器人各个关节变量参数,去推导计算机器人各连杆上任意一个点的位置和姿态。求解运动学方程就需求得机器人各关节坐标和它们之间的关系式,它是研究机器人最基础、最重要的部分。

求解过程主要运用相邻杆件坐标系的齐次变换矩阵,将各个连杆变化矩阵相乘,得到机器人总变换矩阵,即末端执行器连杆坐标系相对于机座坐标系的变换矩阵:

$${}^0T_4 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 {}^3A_4 \quad (1)$$

式中: ${}^NA_{N+1}$ 表示坐标系 $N+1$ 对于坐标系 N 的矩阵变换,矩阵行列式各元素的表达式见式(2)。

$$\begin{cases} n_x = c_4 c_1 c_{23} - s_1 s_4 & n_y = c_4 s_1 c_{23} + c_1 s_4 & n_z = -c_4 s_{23} \\ o_x = -c_4 s_1 - s_4 c_1 c_{23} & o_y = c_1 c_4 - s_4 s_1 c_{23} & o_z = s_4 s_{23} \\ a_x = c_1 s_{23} & a_y = s_1 s_{23} & a_z = c_{23} \\ p_x = a_1 c_1 + a_3 c_1 c_{23} + a_2 c_1 c_2 \\ p_y = a_1 s_1 + a_3 s_1 c_{23} + a_2 c_2 s_1 \\ p_z = -a_3 s_{23} - a_2 s_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中, $s_1, s_2, s_4, c_1, c_2, c_4$ 分别表示 $\sin \theta_1, \sin \theta_2, \sin \theta_4, \cos \theta_1, \cos \theta_2, \cos \theta_4$; $c_{23} = \cos(\theta_2 + \theta_3) = c_2 c_3 - s_2 s_3$; $s_{23} = c_2 s_3 + s_2 c_3$ 。

3 码垛机器人逆运动学求解

对于大多数串联机器人而言,用某个笛卡儿坐标系来制定末端执行器的位置。根据pieper原则^[8-9],假设一个机器人最后一个连杆的姿态是 0T_4 ,在求解运动学逆解时,从 0T_4 开始求解关节位置。将 $({}^0A_1 {}^{-10}T_4)$ 矩阵中各元素等于 1A_4 ,据此原则确定 θ_1 。其他3个参数可由其他 T 变换矩阵来求解。求解 θ_1 ,由 ${}^0A_1 {}^{-1}$ 左乘 0T_4 的一般形式为:

$${}^0A_1 {}^{-10}T_4 = {}^1A_2 {}^2A_3 {}^3A_4 = {}^1A_4 \quad (3)$$

其中码垛机器人的运动方程为:

$${}^0T_4 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 {}^3A_4 \quad (4)$$

1) 求解 θ_1

由式(3)的 $(2,4)_L = (2,4)_R$,可得:

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{p_y}{p_x}\right) \quad (5)$$

其中: $(i,j)_{L(R)}$ 为左(右)矩阵第 i 行第 j 列元素。

2) 求解 θ_2

令 ${}^1A_2 {}^{-1}$ 同乘式(3)之后,由 $(1,3)_L = (1,3)_R$ 和 $(2,4)_L = (2,4)_R$ 可得:

$$\theta_2 = \arctan\left(\frac{p_z - a_3 m}{k + a_3 a_z}\right) \quad (6)$$

其中 $k = a_1 - p_x c_1 - p_y s_1, m = a_x c_1 + a_y s_1$

3) 求解 θ_3

令 ${}^1A_2 {}^{-1}$ 和 ${}^2A_3 {}^{-1}$ 依次同乘式(3)之后,由 $(1,4)_L = (1,4)_R$ 化简后可得:

$$c_3 n - s_3 p = a_3 \quad (7)$$

其中 $n = -c_2 \cdot k - p_z s_2 - a_2$, $p = -s_2 \cdot k - p_z c_2$ 。

此时令 $p = \sqrt{n^2 + p^2} \cos \psi$, $n = \sqrt{n^2 + p^2} \sin \psi$

可得:

$$\theta_3 = \arctan \frac{n}{p} - \arctan \left(\frac{a_3}{\pm \sqrt{n^2 + p^2 - a_3^2}} \right) \quad (8)$$

4) 求解 θ_4

令 ${}^1A_2^{-1}$, ${}^2A_3^{-1}$ 和 ${}^3A_4^{-1}$ 依次同乘式 (3) 之后, 由 $(1, 4)_L = (1, 4)_R$ 和 $(2, 4)_L = (2, 4)_R$ 化简后可得:

$$\theta_4 = \pm \arcsin \frac{\sqrt{p_y c_1}}{\sqrt{p_x s_1}} \quad (9)$$

由以上结果可知, 该机器人的运动学逆解存在多种解。由于结构的限制, 各个关节变量不能全部在 360° 范围内运动, 有些解是不能实现的。在机器人存在多种解的情况下, 应该选取最满意的一组, 以满足机器人的工作要求。

4 码垛机器人的工作空间分析

工作空间是通过几何方面的知识对机器人的工作性能进行讨论。工作空间的分析是确定机器人手臂构形和参数的必要准备过程, 在对机器人后期控制和规划时需要的约束信息也可以从工作空间中得到。分析各机械臂之间的相互干涉, 以及进行机械臂回避障碍物的动作规划都要根据工作空间来确定。机器人的可操作性、灵活性、结构的合理性等性能, 都要讨论机器人的工作空间, 通过对工作空间的分析能够得到合理的结论^[10-14]。

由前面求解机器人数学模型的正解过程中, 得到了该机器人的机械手末端坐标:

$$\begin{cases} p_x = a_1 c_1 + a_3 c_1 c_{23} + a_2 c_1 c_2 \\ p_y = a_1 s_1 + a_3 s_1 c_{23} + a_2 c_2 s_1 \\ p_z = -a_3 s_{23} - a_2 s_2 \end{cases} \quad (10)$$

使用 Matlab^[15] 的图形用户界面 GUI 来设计一个小的功能窗口, 利用 Matlab 的 C 语言接口程序, 根据机械手末端坐标方程编写 C 语言, 并使用它的绘制图形功能^[16-17], 实现机器人工作空间的显示和它在 x - y 平面、 x - z 平面投影之间自由的相互转换。

在 GUI 上的仿真结果见图 2。 x - y 平面投影见图 3。 x - z 平面投影见图 4。

通过建立 GUI 窗口界面, 实现了工作空间的三维显示, 可行性、直观效果好。它能使机器人在教学实验过程中, 让人更容易理解工作空间的概念。

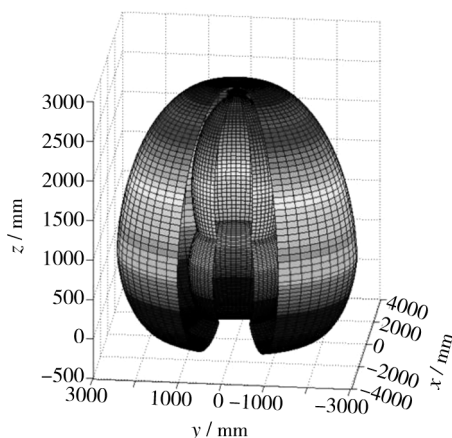


图 2 机器人的工作空间

Fig. 2 Robot working space

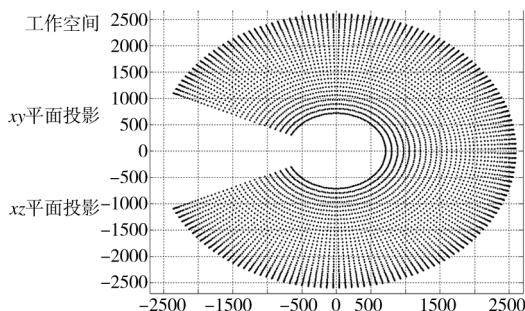


图 3 机器人的工作空间在 x - y 平面投影

Fig. 3 The projection of robot working space in the x - y plane

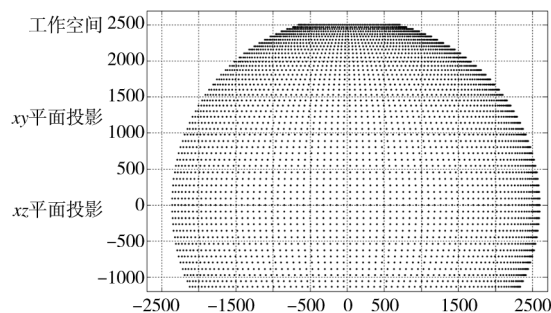


图 4 机器人的工作空间在 x - z 平面投影

Fig. 4 The projection of robot working space in the x - z plane

求得该机器人工作空间最主要的目的是考察机器人本体、输送台和托盘的摆放位置在作业要求下是否在机器人的操作范围内。码垛机器人最基本的工作形式将是机器人本体固定于工作空间中心位置, 末端执行器从输送台上抓取包装件旋转 90° 后, 按照一定码放规律自动将所有包装件堆码在托盘上。机器

人本体、输送台和托盘的基本摆放位置,其基本尺寸见图5。由图5可以看出,各构件都在机器人的工作空间内。

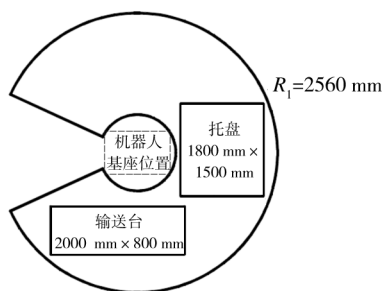


图5 放置示意

Fig. 5 Place schematic diagram

5 结语

对码垛机器人的运动学分析进行了研究与探讨,采用D-H法推导出该机器人的运动学正逆解,根据推导结果,利用Matlab对机器人的工作空间进行了仿真分析。所得的结果对于开展码垛机器人的理论研究与工程探索具有重要意义,为进一步布局规划托盘码垛奠定了基础。

参考文献:

- [1] 李晓刚,刘晋浩. 码垛机器人的研究与应用现状、问题及对策[J]. 包装工程,2011,32(3):96—102.
LI Xiao-gang, LIU Jin-hao. Research and Application Situation, Problems and Solutions of Palletizing Robots[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(3): 96—102.
- [2] 胡洪国,高建华,杨汝清. 码垛技术综述[J]. 组合机床与自动化加工技术,2000(6):7—9.
HU Hong-guo, GAO Jian-hua, YANG Ru-qing. The Development of Palletizing Technology[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2000(6): 7—9.
- [3] 付铁,李金泉,陈恩,等. 一种新型高速码垛机械手的设计与实现[J]. 北京理工大学学报,2007,27(1):17—20.
FU Tie, LI Jin-quan, CHEN En, et al. Novel Design and Implementation of a High-speed Palletizing Manipulator[J]. Transaction of Beijing Institute of Technology, 2007, 27(1): 17—20.
- [4] 杨汝清,高建国,胡洪国. 高速码垛关键技术研究[J]. 高技术通讯,2004,14(1):67—70.
YANG Ru-qing, GAO Jian-guo, HU Hong-guo. Research on the High-speed Palletizing Technology[J]. High Technology Letters, 2004, 14(1): 67—70.
- [5] 李金泉,段冰蕾,李忠明. 新型码垛机器人工作空间及影响系数分析[J]. 北京邮电大学学报,2011,34(6):78—81.
LI Jin-quan, DUAN Bing-lei, LI Zhong-ming. Analysis on Workspace and Influence Coefficients of a Proposed Palletizing Robot[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2011, 34(6): 78—81.
- [6] 姜宏超,刘士荣,张波涛. 六自由度模块化机械臂的逆运动学分析[J]. 浙江大学学报(工学版),2010,44(7):1348—1354.
JIANG Hong-chao, LIU Shi-rong, ZHANG Bo-tao. Inverse Kinematics Analysis for 6 Degree-of-freedom Modular Manipulator[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2010, 44(7): 1348—1354.
- [7] 张明,何庆中,郭帅. 酒箱码垛机器人机构设计与运动仿真分析[J]. 包装工程,2013,34(1):83—87.
ZHANG Ming, HE Qing-zhong, GUO Shuai. Mechanical Design and Motion Simulation Analysis of Liquor Automated Production Line Palletizing Robot[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(1): 83—87.
- [8] 刘松国,朱世强,李江波,等. 6R机器人实时逆运动学算法研究[J]. 控制理论与应用,2008,25(6):1037—1041.
LIU Song-guo, ZHU Shi-qiang, LI Jiang-bo, et al. Research on Real-time Inverse Kinematics Algorithms for 6R Robots[J]. Control Theory & Applications, 2008, 25(6): 1037—1041.
- [9] CALDERON C A A, GAN J Q. An Analysis of the Inverse Kinematics for a 5-DOF Manipulator[J]. International Journal of Automation and Computing, 2005(2):114—124.
- [10] 田海波,马宏伟,魏娟. 串联机器人机械臂工作空间与结构参数研究[J]. 农业机械学报,2013,44(4):196—201.
TIAN Hai-bo, MA Hong-wei, WEI Juan. Workspace and Structural Parameters Analysis for Manipulator of Serial Robot[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2013, 44(4): 196—201.
- [11] CAO Yi, QI Sui-ping, LU Ke, et al. Shape and Size Computation of Planar Robot Workspace[C]//2009 WRI Word Congress on Computer Science and Information Engineering, Los Angeles, USA: IEEE, 2009, 2: 126—130.
- [12] DUAN Bin-lei, SHI Liang-ping, LI Jin-quan. Analysis on the Influence of Structure Parameters on Workspace of a Novel Palletizing Robot[C]//2011 Second International Conference on Digital Manufacturing & Automation, Hunan, China: IEEE, 2011: 199—202.

- 2013(11):61—62.
- WANG Rui. Application of UVLED Technology in Printing [J]. Print Today, 2013(11):61—62.
- [5] STEPHEN B S. UV Commercialization of LED Curing [A]. Proceedings of RadTech Asia 2005, 2005:339—356.
- [6] HYO-SOOK J, YOUNG-JUN P, HYUN-SUNG D, et al. The Curing Performance of UV-curable Semi-interpenetrating Polymer Network Structured Acrylic Pressure-sensitive Adhesives [J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2007(7):575—588.
- [7] 包容, NISSON S J. UV 固化膜中逐层双键转化率分析的新方法 [C]//全国辐射固化研讨会 2006 论文集. 广州, 2006:132—147.
- BAO Rong, NISSON S J. A New Approach in Analyzing the Double Bond Conversion Using "Layer by Layer" Conversion in UV Cured Films [C]//Proceeding of 2006 National Radiation Curing Forum. Guangzhou, 2006:132—147.
- [8] 王海龙. 光固化过程控制及其膜性能评估 [EB/OL]. <http://wenku.baidu.com/view/8d78b359be23482fb4da4ca6>, 2009.09.
- WANG Hai-long. Light-curing Process Control and Membrane Performance Evaluation [EB/OL]. <http://wenku.baidu.com/view/8d78b359be23482fb4da4ca6>, 2009.09.
- [9] 魏先福, 王娜, 黄蓓青, 等. 用紫外吸收光谱评价 UV 喷墨油墨颜料分散性 [J]. 北京印刷学院学报, 2010, 18(2):9—12.
- WEI Xian-fu, WANG Na, HUANG Bei-qing, et al. Evaluation of the Pigment Dispersion of UV-curable Inkjet Ink Using UV Absorption Spectrum [J]. Journal of Beijing Institute of Graphic Communication, 2010, 18(2):9—12.
- [10] 王娜. UV 喷墨油墨分散性及流变性能的研究 [D]. 北京:北京印刷学院, 2008.
- WANG Na. Study on Dispersion and Rheological Behavior of the UV Inkjet Ink [D]. Beijing: Beijing Institute of Graphic Communication, 2008.
- [11] 孙青梅, 魏先福, 黄蓓青. 可食性喷墨油墨性能对印刷品质量的影响 [J]. 北京印刷学院学报, 2011, 20(4):6—8.
- SUN Jing-mei, WEI Xian-fu, HUANG Bei-qing. Influence of the Viscosity of Edible Ink for Inkjet Printing on Drop State [J]. Journal of Beijing Institute of Graphic Communication, 2011, 20(4):6—8.
- [12] 李小东, 龚修端, 陈路, 等. 胶印油墨粘度对印刷质量的影响研究 [J]. 包装工程, 2009, 30(5):60—62.
- LI Xiao-dong, GONG Xiu-duan, CHEN Lu. Analysis of the Influence of Ink Viscosity on Offset Print Quality [J]. Packaging Engineering, 2009, 30(5):60—62.
- [13] 张婉. UV 喷墨油墨的研究 [D]. 北京:北京印刷学院, 2008.
- ZHANG Wan. Study on UV Inkjet Ink [D]. Beijing: Beijing Institute of Graphic Communication, 2008.
- [14] 杜晶晶, 陈洪, 汤建新. 紫外光固化油墨的应用现状和发展 [J]. 株洲工学院学报, 2006, 20(4):1—4.
- DU Jing-jing, CHEN Hong, TANG Jian-xin. Application and Development of UV Curable Ink [J]. Journal of Zhuzhou Institute of Technology, 2006, 20(4):1—4.
- [15] 韩玄武. UV 油墨光引发剂与颜料匹配的研究 [J]. 包装工程, 2009, 30(4):48—50.
- HAN Xuan-wu. Research on Matching between Photoinitiator and Pigment of UV Ink [J]. Packaging Engineering, 2009, 30(4):48—50.
- [13] LI Jin-quan, ZHU Su-xia, LEI Quan-sheng. Analysis on Influence Coefficient of Workspace of a Configuration Palletizing Robot [J]. Advanced Materials Research, 2012:2389—2392.
- [14] 商记中, 陈安平. 基于几何法的 3-PCR 平移并联合分拣机器人工作空间研究 [J]. 包装工程, 2011, 32(17):80—83.
- SHANG Ji-zhong, CHEN An-ping. Research on the Workspace of 3-PCR Translational Sorting Parallel Robot Based on Geometrical Method [J]. Packaging Engineering, 2011, 32(17):80—83.
- [15] 陈光. 精通 MATLABGUI 设计 [M]. 北京:电子工业出版社, 2011.
- CHEN Guang. Proficient In MATLABGUI Design [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011.
- [16] 郭勇, 王振林. 基于 MATLAB/GUI 的非线性包装系统破损边界计算软件设计 [J]. 包装工程, 2012, 33(17):57—59.
- GUO Yong, WANG Zhen-lin. Development of Damage Boundary Computation Software for Nonlinear Packaging System Based on MATLAB/GUI [J]. Packaging Engineering, 2012, 33(17):57—59.
- [17] 侯和平, 李莎, 刘澎, 等. 基于 Matlab 软件的递纸机构运动特性分析软件的设计 [J]. 包装工程, 2008, 29(2):105—106.
- HOU He-ping, LI Sha, LIU Peng, et al. Design of Motion Properties Analysis Software for Paper Gripper Mechanism Based on Matlab [J]. Packaging Engineering, 2008, 29(2):105—106.

(上接第 88 页)