

机器人纸箱套装系统的轨迹规划与分析验证

曹冲振, 徐杰, 姜鹏, 许彤然, 阚常凯
(山东科技大学, 青岛 266590)

摘要: **目的** 保证机器人纸箱套装系统稳定工作, 提高包装质量与效率。**方法** 对系统进行整体规划后, 确定纸箱套装系统的轨迹点, 对不同的运动过程分别在关节空间和笛卡尔空间中进行轨迹规划, 并生成各关节插值曲线。借助 Matlab 对机器人进行仿真实验, 得出各关节角度规划曲线, 并将之与轨迹规划所得结果进行比较。利用机器人实物对轨迹规划进行验证。**结果** 各关节插值曲线与角度规划曲线吻合, 角度规划曲线平滑。**结论** 选用的套箱机器人轨迹规划方法可行, 结果正确。

关键词: 机器人纸箱套装系统; 工业机器人; 整体规划; 轨迹规划; Matlab; 方案验证

中图分类号: TB486⁺.3; TB487 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)21-0120-06

Trajectory Planning and Analysis Verification of Robotic Carton Packaging System

CAO Chong-zhen, XU Jie, JIANG Peng, XU Tong-ran, KAN Chang-kai
(Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

ABSTRACT: The work aims to ensure the stable working of robotic carton packaging system and improve the packaging quality and efficiency. After the overall planning of the system, the trajectory points of carton packaging system were determined. The trajectory planning of different motion processes respectively in the joint space and Cartesian space was carried out and the interpolation curves of each joint were generated. The simulation experiment on the robot was conducted by virtue of Matlab to generate the angle planning curve of each joint and compare it with the results of trajectory planning. The trajectory planning was verified by the real robot. The interpolation curve of each joint coincided with that of the angle programming. The angle planning curve was smooth. The method for the box robot trajectory planning is feasible, and the results are correct.

KEY WORDS: robotic carton packaging system; industrial robot; overall planning; trajectory planning; Matlab; program verification

纸箱套装是生产的重要流程之一, 其质量的好坏、速度的快慢是影响生产效率的重要因素。随着生产要求的不断提高, 传统装箱过程中资源浪费严重、工作效率低下等问题日益凸显, 机器人纸箱套装系统应运而生。

套装机器人是典型的机电一体化产品^[1]。在实际工作中, 为了有效延长机器人寿命, 要尽可能避免机器人速度、加速度、位移的突变, 保证运动轨迹曲线的平滑^[2-3], 因此要对机器人进行轨迹规划, 即对机器人运动路径、轨迹进行描述, 实时求解出机器人运动的速度、加速度和位移, 从而生成运动轨迹^[4]。这

里拟基于以上要求和实际情况, 确定机器人纸箱套装系统轨迹点, 在此基础上对机器人进行轨迹规划; 借助 Matlab 对机器人进行轨迹仿真实验, 将生成的曲线图与轨迹规划插值曲线图进行对比; 用工业机器人实体进行试验, 验证轨迹规划的正确性。

1 机器人纸箱套装系统介绍

机器人纸箱套装系统主要由套箱机器人、辊筒输送机、定位液压缸、PLC 控制柜等部分组成, 机器人纸箱套装系统见图 1。纸箱套装机器人是纸箱套装系

收稿日期: 2017-05-09

基金项目: 山东省高等学校科技计划 (J16LB05)

作者简介: 曹冲振 (1975—), 男, 博士, 山东科技大学副教授, 主要研究方向为移动机器人技术。

统的核心部分,由工业机器人和安装在其末端的吸附式纸箱夹持机构组成。它的主要作用是在接收到套箱工作指令后,机器人各部分协同运动到达指定的位置,由纸箱夹持装置夹持纸箱,运动到待套装商品的上方,放下纸箱,完成套装工作。辊筒输送机上装有精确定位装置,利用红外线传感器监测待套装商品的位置,并与定位液压缸协同作业,确保待套装商品始终处于同一位置,方便机器人的重复定位^[5],提高工作效率。机器人纸箱套装系统的工作流程为:系统开始运行→机器人运动至指定位置,夹起纸箱→待套装商品运输至指定位置→机器人运动至商品上方,开始套箱→完成一次套箱工作。

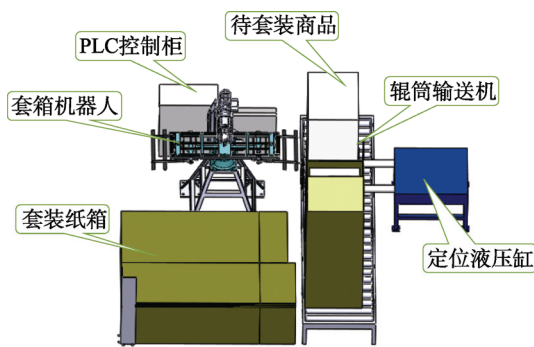


图 1 纸箱套装系统
Fig.1 Carton packaging system

2 纸箱套装系统的规划设计

2.1 系统轨迹规划方法的确定

在确定轨迹方法时,应首先定义不同的坐标系以体现在空间中的机器人的位姿^[6]。纸箱套装系统中定义的坐标系见图 2,其中 $\{B\}$ 为基坐标系, $\{S\}$ 为工作台坐标系, $\{T\}$ 为工具坐标系, $\{G\}$ 为目标坐标系。为了进行轨迹规划,需要将轨迹点位姿转换到机器人基坐标系 $\{B\}$ 下,再通过工具坐标系 $\{T\}$ 与各关节的变换关系,求出各关节旋转角度。其中 ${}^B_T = {}^B_G {}^G_S {}^S_T$ 。

在纸箱套装系统中,完成轨迹规划的前提是确定

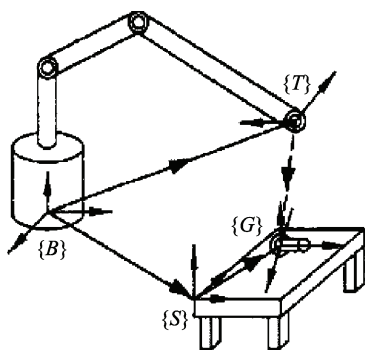


图 2 机器人坐标系
Fig.2 Robot's coordinate system

轨迹点的位姿。迹点的位姿是通过各位置的校核进行确定的,经过实际测量和机器人运动学计算,其轨迹点、坐标系的位置及运动流程见图 3。 $c_0 \rightarrow c_1$ 和 $c_1 \rightarrow c_2$ 这 2 段是从起点运动到待吸附状态再到吸附状态; $c_2 \rightarrow c_3$ 和 $c_3 \rightarrow c_4$ 这 2 段是从吸附状态运动到待夹持状态再到夹持状态; $c_4 \rightarrow c_5$ 和 $c_5 \rightarrow c_6$ 这 2 段是从夹持状态运动到待套箱状态再到套箱状态; $c_6 \rightarrow c_0$ 段是从套箱状态运动到终点结束状态。

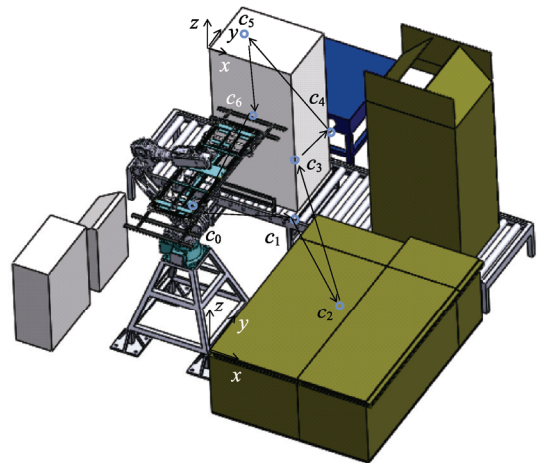


图 3 系统轨迹点位置及流程
Fig.3 Position and flow chart of system trajectory point

在 $c_0 \rightarrow c_1$, $c_1 \rightarrow c_2$, $c_6 \rightarrow c_0$ 这 3 段中,纸箱套装机器人的动作是典型的 PTP 运动,系统内不存在干涉也不需考虑 2 点之间的具体运动,采用关节空间轨迹规划。在 $c_2 \rightarrow c_3$, $c_3 \rightarrow c_4$, $c_4 \rightarrow c_5$, $c_5 \rightarrow c_6$ 这 4 段中,系统在工作过程中可能存在纸箱与纸箱夹持机构干涉的现象,为了安全起见,采用笛卡尔空间轨迹规划。由于篇幅有限,这里选取 $c_0 \rightarrow c_1$ 段,同时整合 $c_2 \rightarrow c_3$, $c_3 \rightarrow c_4$ 为一段作为示例进行轨迹规划。

2.2 $c_0 \rightarrow c_1$ 段轨迹规划

由于 $c_0 \rightarrow c_1$ 段不需严格要求末端执行器在两点之间的几何路径,且两点间路径的各关节运动形式简单,故选择三次多项式进行插值计算^[7-10]。其拟合的三次多项式定义为:

$$\theta(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 \quad (1)$$

式中: t 为运动时间,范围为 $[0, t_1]$; a_0, a_1, a_2, a_3 为待求系数。

该三次多项式存在 4 个未知数,因此至少需要 4 个约束条件,其中 2 个约束条件是起点和终点对应的关节角度,即 $\theta(0) = \theta_0$, $\theta(t_1) = \theta_1$ 。另外 2 个约束条件是起点和终点的关节速度要求,即 $\dot{\theta}(0) = 0$, $\dot{\theta}(t_1) = \dot{\theta}_1$ 。

对式(1)求一阶导数 $\dot{\theta}(t) = a_1 + 2a_2 t + 3a_3 t^2$, 继

而可以求得: $a_0 = \theta_0$, $a_1 = 0$, $a_2 = \frac{3}{t_1^2}(\theta_1 - \theta_0) - \frac{\dot{\theta}}{t_1}$,

$$a_3 = -\frac{2}{t_1^3}(\theta_1 - \theta_0) + \frac{\dot{\theta}_1}{t_1^2}.$$

在关节空间轨迹规划中,需要通过各位置的校核得到关键估计点的坐标值,然后通过逆解求出端点的关节角度值,才能得出轨迹规划算法的具体表达式。通过逆解求出的关节角度值有若干个,其中, c_0 处关节角度值是通过与实际位姿的比较确定的,其他各点一般依据各关节运动距离最短、消耗最少的原则确定。最终确定 c_0 处关节角度值为: $\theta_1 = -91.98^\circ$, $\theta_2 = -45.85^\circ$, $\theta_3 = -50.28^\circ$, $\theta_4 = -0^\circ$, $\theta_5 = 96.13^\circ$, $\theta_6 = 178.02^\circ$ 。

同理,最终确定 c_1 处的各关节角度为: $\theta_1 = -1.98^\circ$, $\theta_2 = -45.85^\circ$, $\theta_3 = -50.28^\circ$, $\theta_4 = -0^\circ$, $\theta_5 = 96.13^\circ$, $\theta_6 = -1.98^\circ$ 。

根据各关节角度值等条件,求各关节变换时间的最大值,可以产生离散的时间点和关节角度。设定各关节运行时间为 0.6 s。由于 $c_1 \rightarrow c_2$ 段关节 1, 4, 6 不发生转动,即 $c_0 \rightarrow c_1$ 段关节 1, 6 结束速度为 0,再根据机器人各关节的最大运行速度,可以通过计算得出各关节的三次多项式:

$$\begin{aligned}\theta_1(t) &= -91.98^\circ + 750^\circ t^2 - \frac{2500^\circ}{3} t^3 \\ \theta_6(t) &= 178.02^\circ - 1500^\circ t^2 + \frac{5000^\circ}{3} t^3\end{aligned}\quad (2)$$

其余关节角度不变。

2.3 $c_2 \rightarrow c_3 \rightarrow c_4$ 段轨迹规划

通过观察发现,该段中 c_2 , c_3 , c_4 这 3 点在 y 轴方向坐标值相等,可以选用笛卡尔平面圆弧插值的方法计算^[11-12],计算过程如下所述。

已知同一平面上不在一条直线上的 3 点 p_2 , p_3 , p_4 在基坐标系下的坐标分别为 (1435, -6.5, 160), (1402.5, -6.5, 1160), (908.5, -6.5, 1913.5), 设定插补次数 $N=30$, 3 点确定的圆弧见图 4。

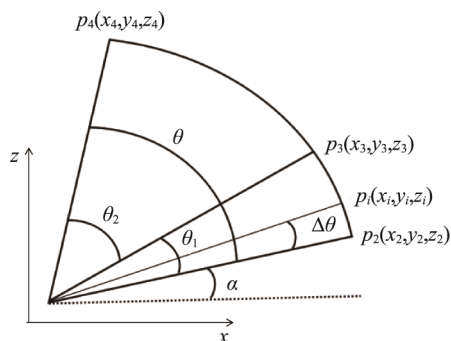


图 4 3 点确定的圆弧

Fig.4 Arc determined by three points

起点 p_2 与 x 轴的夹角 $\alpha = \arctan \frac{|z_2 - z_0|}{|x_2 - x_0|} = 28.8^\circ$,

圆心角 $\theta = \theta_1 + \theta_2 = 101.1^\circ$ 。对于圆弧上任一点 $p_i(x_i, y_i, z_i)$ (i 为 1~30) 的坐标可以表示为:

$$\begin{cases} x_i = x_0 + R \cos(\alpha + i\Delta\theta) \\ z_i = z_0 + R \sin(\alpha + i\Delta\theta) \\ y_i = y_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: R 为 p_2 , p_3 , p_4 确定的圆弧半径。

将 α 和 θ 的值代入式 (3), 可以得到:

$$\begin{cases} x_i = 510.76 + 1054.9 \cos(28.8^\circ - 3.26^\circ i) \\ z_i = 668.3 - 1054.9 \sin(28.8^\circ - 3.26^\circ i) & i < 9 \\ y_i = -6.5 \\ x_i = 510.76 + 1054.9 \cos(3.26^\circ i - 28.8^\circ) \\ z_i = 668.3 + 1054.9 \sin(3.26^\circ i - 28.8^\circ) & i \geq 9 \\ y_i = -6.5 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\Delta\theta = \theta/N + 1 = 3.26^\circ$ 。

3 轨迹规划的分析验证

3.1 基于 Matlab 的轨迹规划合理性验证

3.1.1 运动学建模

根据机器人的相关参数,调用 Robotics Toolbox 工具箱^[13-14]中的 link 和 robot 函数分别创建机器人运动模型,编写程序如下^[15-16]:

```
>> L1=link([-pi/2 170 0 504 0],'standard');
>> L2=link([0 780 -pi/2 0 0],'standard');
>> L3=link([-pi/2 140 0 43 0],'standard');
>> L4=link([pi/2 0 0 760 0],'standard');
>> L5=link([-pi/2 0 0 0 0],'standard');
>> L6=link([0 0 0 0 0],'standard');
>> r=robot({L1 L2 L3 L4 L5 L6},'6R');
>> plot(r,[0 0 0 0 0 0])
```

已知机器人初始位置各关节角度 $\theta_1 = \theta_3 = \theta_4 = \theta_5 = \theta_6 = 0$, $\theta_2 = -90^\circ$, 调用 fkine 函数,程序如下:

```
>> qz=[0 -pi/2 0 0 0 0];
>> fkine(r,qz)
```

得到初始位置纸箱夹持装置的位姿为:

```
ans=
1.0e+003*
0.0000    0.0000    0.0010    0.9300
-0.0000   -0.0010    0.0000    0.0430
0.0010   -0.0000   -0.0000    1.4240
0         0         0         0.0010
```

由此可以确定生成运动模型的正确性。

3.1.2 $c_0 \rightarrow c_1$ 段轨迹规划分析验证

已知 $c_0 \rightarrow c_1$ 这段轨迹的机器人各关节角度表达式如式 (2), 其插值曲线见图 5。

通过 Matlab 建立的机器人模型对关节角度进行规划仿真,仿真程序如下:

```
q1=[-0.511*pi -0.2545*pi -0.2795*pi 0 0.534*pi
0.9935*pi];
```

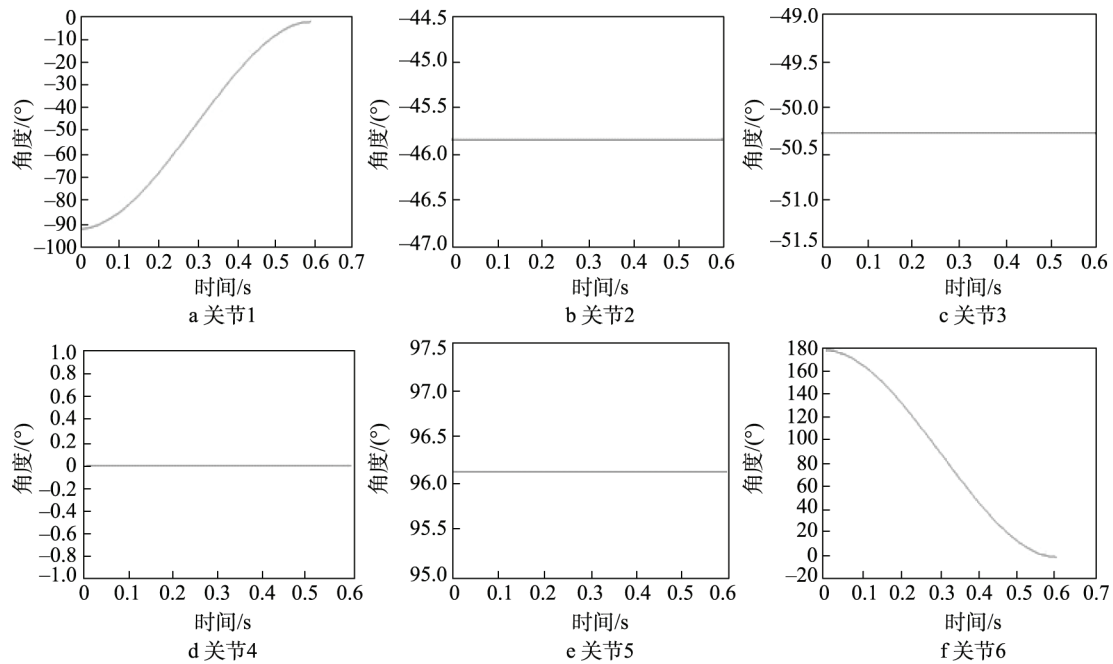


图 5 各关节插值曲线

Fig.5 Interpolation curves of each joint

```
q2=[-0.011*pi -0.2545*pi -0.2795*pi 0 0.534*pi
-0.011*pi];
t=0:0.02:0.6;
[q,qd,qdd]=jtraj(q1,q2,t);
subplot(2,3,1);plot(t,q(:,1));xlabel('时间(s)');ylabel
('关节 1(rad)');
subplot(2,3,2);plot(t,q(:,2));xlabel('时间(s)');ylabel
('关节 2(rad)');
subplot(2,3,3);plot(t,q(:,3));xlabel('时间(s)');ylabel
('关节 3(rad)');
```

```
subplot(2,3,4);plot(t,q(:,4));xlabel('时间(s)');ylabel
('关节 4(rad)');
```

```
subplot(2,3,5);plot(t,q(:,5));xlabel('时间(s)');ylabel
('关节 5(rad)');
```

```
subplot(2,3,6);plot(t,q(:,6));xlabel('时间(s)');ylabel
('关节 6(rad)');
```

生成的机器人各关节角度随时间变化的仿真曲线见图 6。

通过对比图 5—6 可以发现，轨迹规划和仿真实验

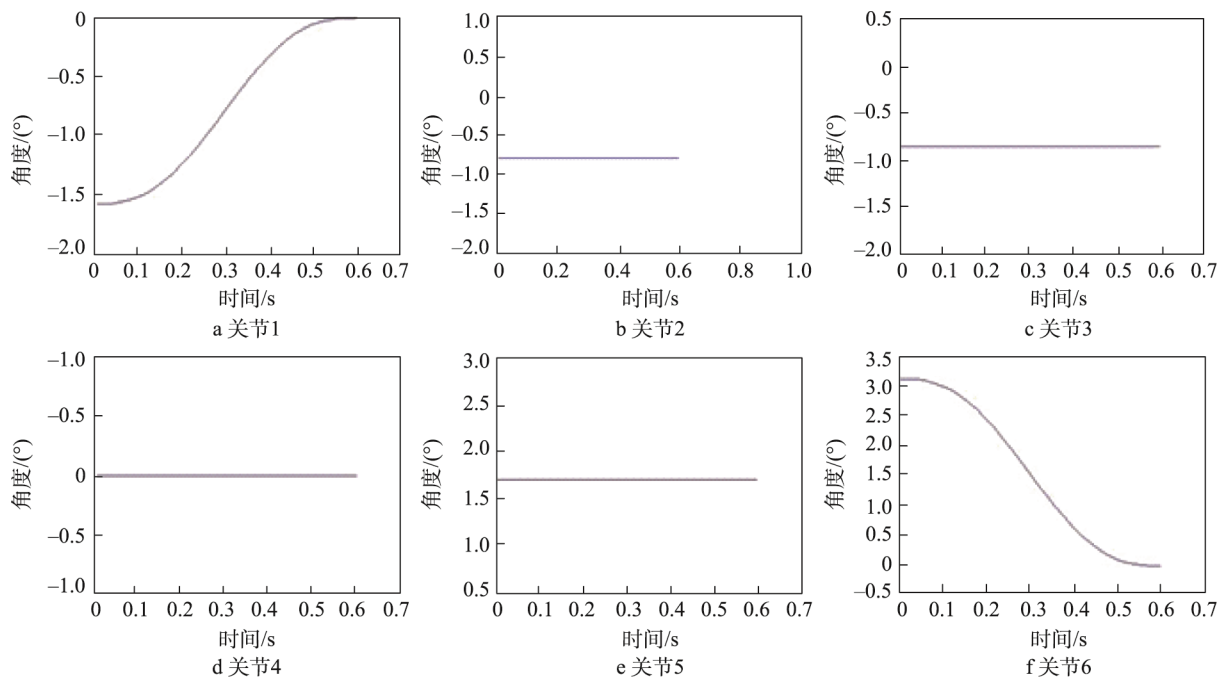


图 6 各关节角度规划曲线

Fig.6 Angle planning curve of each joint

得到的机器人工作过程中各关节角度随时间变化的趋势及变化幅度都相同,从而验证了关节空间插值算法的正确性。

3.1.3 $c_2 \rightarrow c_3 \rightarrow c_4$ 段轨迹规划分析验证

该段采用圆弧插补算法进行笛卡尔空间轨迹的插补,在验证算法的正确性时,不仅需要对机器人末端的位置、姿态进行仿真,还需要对各关节角度进行仿真。

对整段圆弧曲线的关节角度及姿态进行仿真时,需要分成 $c_2 \rightarrow c_3$, $c_3 \rightarrow c_4$ 2 段进行,已知 c_2 , c_3 , c_4 各关节的角度值,根据速度限制及各关节变化量,求各关节变换时间,取最大值。设定 $c_2 \rightarrow c_3$ 和 $c_3 \rightarrow c_4$ 这 2 段轨迹的运行时间分别为 0.2 和 0.4 s。其中 $c_2 \rightarrow c_3$ 段仿真程序如下:

```
>>T1=transl(1435,-6.5,160)*trotx(pi);
>>T2=transl(1402.5,-6.5,1160)*troty(-pi/3)*trotx(pi);
>>t=[0:0.01:0.2];
>>T=ctrj(T1,T2,length(t));
>>q=ikine(r,T)
```

对比生成的 $c_2 \rightarrow c_3$, $c_3 \rightarrow c_4$ 段机器人各关节角度随时间变化的仿真曲线图,机器人在 $c_2 \rightarrow c_3$, $c_3 \rightarrow c_4$ 段进行圆弧插补时,各关节运行平稳,位移和速度变化稳定,从而验证了圆弧插补算法的正确性。

3.2 基于 ER20-C10 机器人的轨迹规划合理性验证

这里通过机器人的实际运动来验证夹持装置轨迹规划的合理性,其运动通过运行预先编制的程序来进行。选取套箱过程的几个关键点,对机器人进行手动操作,使夹持中心到达预先设定的位置。在手动运行程序的情况下,机器人在各关键点的状态见图 7。



图 7 套箱机器人运动状态

Fig.7 Motion state of box robot

通过程序的反复手动运行来调试示教点位置,保证与设定夹持中心轨迹的位置一致,同时确定机器人的正常运行,不存在相互干涉的情况,随后选择自动模式来运行程序。自动模式下的正常运行最终验证了夹持中心轨迹规划的合理性。

4 结语

设计了一套机器人纸箱套装系统,该系统对比传统人工套箱方式,能够大幅度提高工作效率,降低资源浪费和人工成本,有广泛的应用空间。这里以纸箱套装系统整体规划为前提,在确定了系统轨迹点后,针对不同的运动过程,实现了机器人在关节空间和笛卡尔空间的轨迹规划。借助 Matlab 中的 Robotics Toolbox 工具箱,构建了套箱机器人的模型,在此基础上对机器人进行仿真实验,并将结果与轨迹规划结果进行对比。另外,借助机器人实体进行了轨迹规划合理性验证。相关结果表明,机器人轨迹规划方法的选用合理,结果正确,该方法对工业机器人轨迹规划具有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] 刘亚军, 黄田. 6R 操作臂逆运动学分析与轨迹规划[J]. 机械工程学报, 2012(2): 9—15.
LIU Ya-jun, HUANG Tian. Inverse Kinematics and Trajectory Planning of 6R Serial Manipulators[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012(2): 9—15.
- [2] 沈雅琼, 叶伯生, 熊烁. 基于齐次变换矩阵的机器人轨迹规划方法[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2014(1): 5—9.
SHEN Ya-qiong, YE Bo-sheng, XIONG Shuo. A Method of Robot's Trajectory Planning Based on Homogeneous Transformation Matrix[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2014(1): 5—9.
- [3] 刘鹏, 宋涛, 负超, 等. 焊接机器人运动学分析及轨迹规划研究[J]. 机电工程, 2013(4): 390—394.
LIU Peng, SONG Tao, YUN Chao, et al. Study of Kinematics Analysis and Trajectory Planning for Welding Robot[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2013(4): 390—394.
- [4] 孙瑛, 程文韬, 李公法, 等. 关节型机器人轨迹规划算法及轨迹规划研究现状[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2016, 13(28): 32—38.
SUN Ying, CHENG Wen-tao, LI Gong-fa, et al. Research on Trajectory Planning and Trajectory Planning of Articulated Robot[J]. Journal of Yangtze University(Natural Science Edition), 2016, 13(28): 32—38.
- [5] 周炜, 廖文和, 田威. 基于空间插值的工业机器人精度补偿方法理论与试验[J]. 机械工程学报, 2013(3): 42—48.
ZHOU Wei, LIAO Wen-he, TIAN Wei. Theory and

- Experiment of Industrial Robot Accuracy Compensation Method Based on Spatial Interpolation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013(3): 42—48.
- [6] 陈刚, 金波, 陈鹰. 基于速度逆运动学的六足步行机器人位姿闭环控制[J]. 农业机械学报, 2014(5): 265—270.
- CHEN Gang, JIN Bo, CHEN Ying. Position-posture Closed-loop Control of Six-legged Walking Robot Based on Inverse Velocity Kinematics[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2014(5): 265—270.
- [7] 尹媛媛. 6R工业机器人运动仿真与轨迹规划[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.
- YIN Yuan-yuan. Motion Simulation and Trajectory Planning of 6R Industrial Robot[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015.
- [8] 高岩. 工业机器人轨迹规划算法的研究与实现[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- GAO Yan. Research and Implementation of Industrial Robot Trajectory Planning Algorithm[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014.
- [9] 沈陆. 六自由度机器人的轨迹规划及仿真研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- SHEN Lu. Trajectory Planning and Simulation of Six Degree of Freedom Robot[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [10] LLOYD J E, HAYWARD V. Singularity-Robust Trajectory Generation[J]. International Journal of Robotics Research, 2001, 20(1): 3—56.
- [11] 万传恒. 六自由度工业机器人轨迹规划算法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- WAN Chuan-heng. Research on Trajectory Planning Algorithm for Six Degree of Freedom Industrial Robot[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
- [12] 叶辰雷. 码垛机器人的结构优化及轨迹规划研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2014.
- YE Chen-lei. Research on Structure Optimization and Trajectory Planning of Palletizing Robot[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014.
- [13] KANE T R, LEVINSON D A. The Use of Kane's Dynamical Equation in Robotics[J]. The International Journal of Robotics Research, 1983, 2(3): 3—21.
- [14] GASPARETTO A, ZANATTO V. A New Method for Smooth Trajectory Planning of Robot Manipulators[J]. Mechanism and Machine Theory, 2007, 42(4): 455—471.
- [15] VAZ A I F, FERNANDES E M G P, GOMES M P S F. Robot Trajectory Planning with Semi-infinite Programming[J]. European Journal of Operational Research, 2004, 153(3): 607—617.
- [16] LEWIS F L, ABCLALLAH C T, DAWSON D M. Control of Robot Manipulators[J]. Mobile Robotics Moving Intelligence, 1993, 27(2): 47—62.