

食品搬运机器人工作空间仿真与轨迹规划

Workspace simulation and trajectory planning of food handling robot

蔡国庆^{1,2,3}郝瑞林^{1,2,3}周利杰^{1,2,3}石 岩^{1,2,3}CAI Guo-qing^{1,2,3}HAO Rui-lin^{1,2,3}ZHOU Li-jie^{1,2,3}SHI Yan^{1,2,3}

(1. 河北省工业机械手控制与可靠性技术创新中心, 河北 沧州 061001;

2. 沧州市工业机械手控制与可靠性技术创新中心, 河北 沧州 061001;

3. 河北水利电力学院机械工程系, 河北 沧州 061001)

(1. *Industrial Manipulator Control and Reliability Technology Innovation Center of Hebei, Cangzhou, Hebei 061001, China*; 2. *Industrial Manipulator Control and Reliability Technology Innovation Center of Cangzhou, Cangzhou, Hebei 061001, China*; 3. *School of Electrical Engineering, Hebei University of Water Resources and Electric Engineering, Cangzhou, Hebei 061001, China*)

摘要:目的:提高食品搬运机器人连续平稳运动时对轨迹插值点位的追踪控制能力。方法:分析食品搬运机器人的组成结构,建立运动学模型并通过 MATLAB 进行验证,对机器人工作空间进行建模求解,给出食品搬运台的合理布置位置;结合食品搬运任务要求,提出 3 段五次多项式插值方法对机器人末端轨迹进行规划,通过 MATLAB 仿真计算与采集试验数据进行验证。结果:食品搬运台的合理布置空间为 $z > 0$ mm 且 200 mm $< r < 500$ mm 的区域,3 段五次多项式轨迹规划的方法可以使机器人平稳地执行食品搬运任务,提高了对机器人运动过程中的点位、速度、加速度的准确控制。结论:3 段五次多项式轨迹规划的方法对于机器人执行食品搬运任务是有效的。

关键词:食品;搬运机器人;运动学;工作空间;轨迹规划

Abstract: Objective: Analyzed the workspace of 6-DOF food handling robot and planned the motion trajectory, so as to provide basis for the layout of food handling platform in workstation and the motion control of robot. Methods: Composition and structure of the robot were analyzed, the kinematics model was established, and the kinematics model was verified by MATLAB. Based on this, the workspace of the robot was modeled and solved, the working area of the robot was obtained, and the reasonable

layout position of the food handling table was given; combined with the requirements of food handling task, a three-stage quintic polynomial interpolation method was proposed for robot end trajectory planning. The effectiveness of this method was verified by MATLAB simulation and experiment. Results: The reasonable layout space of the food handling table was the area of $z > 0$ mm and 200 mm $< r < 500$ mm. The method of three-stage quintic polynomial trajectory planning can make the robot perform the food handling task smoothly, and increase the accurate control of the point position, speed and acceleration of the robot. Conclusion: The method of three-stage quintic polynomial trajectory planning is effective for the robot to perform the food handling task.

Keywords: food; handling robot; kinematics; workspace; trajectory planning

基金项目:河北省“三三三人才工程”资助项目(编号:A202101026);河北省高等学校科学技术研究青年基金项目(编号:QN2021226);省属高等学校基本科研业务费研究项目(编号:SYKY2002)

作者简介:蔡国庆,男,河北水利电力学院讲师,硕士。

通信作者:周利杰(1989—),男,河北水利电力学院讲师,硕士。

E-mail: 2414524076@qq.com

收稿日期:2021-10-31 **改回日期:**2022-03-23

随着自动化技术的进步,智能制造产业迅速发展,工业机器人被广泛应用于食品加工生产线中,执行搬运、码垛、包装等作业任务^[1-3],且在提高经济效益、生产效率、产品质量及改善工人劳动强度等方面发挥了重要作用^[4]。王曦鸣^[5]通过机器人离线编程软件对生产线进行了仿真设计,完成了工作站的布置工作,但仿真软件中只有限定参数的机器人模型,其与工况不匹配且仿真结果不够准确;杨世明等^[6]对并联烹饪机器人的位置进行了分析求解和工作空间的仿真计算,为后续轨迹规划提供了依据;王君等^[7]利用三次多项式插值的方法对 UR5 机器人进行了轨迹规划,得到了连续的轨迹曲线,但未考虑加速度的影响;李璐陈等^[8]通过求解曲面族包络得到机器人的工作空间,并采用了五次多项式插值对机器人进

行轨迹规划,得到了关节连续的角度、角速度和角加速度曲线,但未考虑运动过程点位的控制;张蕾等^[9]采用七次多项式对4自由度机器人进行运动规划,提高了轨迹精度,但在插值区边缘发生振动,出现龙格现象。

基于上述问题,研究拟以遨博公司生产的6自由度串联机器人作为研究对象,对机器人进行运动学建模、验证,采用随机抽样的方法对机器人工作空间进行仿真求解;提出一种3段五次多项式插值的轨迹规划方法,并通过MATLAB仿真分析验证其有效性,旨在使机器人在运动连续平稳的前提下,提高对轨迹插值点位的追踪控制能力,为食品搬运台在生产线的布局提供依据。

1 机器人本体结构

食品搬运任务选用遨博公司生产的AUBO-i3型小自重串联机器人,共6个旋转自由度。其本体结构由机身、臂部、腕部和手部组成,末端装置视食品特点可以选择为吸盘或夹爪(见图1),各关节运动范围均为 $\pm 170^\circ$,最大速度为 $210^\circ/\text{s}$ 。

2 运动学分析

2.1 运动学建模

参照D-H规则,根据AUBO-i3机器人本体结构与尺寸参数建立连杆坐标系(见图2),得到机器人连杆长度 a_{i-1} 、连杆转角 α_{i-1} 、连杆偏距 d_i 、关节角 θ_i 如表1所示。



图1 机器人本体结构

Figure 1 Structure of the robot

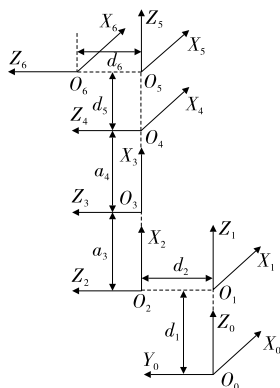


图2 D-H 连杆坐标系

Figure 2 Coordinate system of connecting rod

表1 D-H 连杆参数表

Table 1 Parameter of connecting rod

连杆 i	a_{i-1}/mm	$\alpha_{i-1}/(^{\circ})$	d_i/mm	$\theta_i/(^{\circ})$	关节变量
1	0	0	d_1	θ_1	θ_1
2	0	-90	d_2	θ_2	θ_2
3	a_3	0	0	θ_3	θ_3
4	a_4	0	0	θ_4	θ_4
5	0	90	d_5	θ_5	θ_5
6	0	-90	d_6	θ_6	θ_6

根据D-H连杆坐标系的建立法则,可求得两相邻连杆坐标系的坐标变换矩阵 ${}^{i-1}_i\mathbf{A}$:

$${}^{i-1}_i\mathbf{A} = \text{Rot}(x, \alpha_{i-1}) \text{Trans}(a_{i-1}, 0, 0) \text{Rot}(z, \theta_i) \text{Trans}(0, 0, d_i) = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin\theta_i \cos\alpha_{i-1} & \cos\theta_i \cos\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1} & -d_i \sin\alpha_{i-1} \\ \sin\theta_i \sin\alpha_{i-1} & \cos\theta_i \sin\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} & d_i \cos\alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

将各连杆间的坐标变换矩阵 ${}^{i-1}_i\mathbf{A}$ 依次相乘,可求得末端关节相对基坐标系的齐次变换矩阵,即机器人运动学正解:

$${}^0_6\mathbf{T} = {}^0_1\mathbf{A} \cdot {}^1_2\mathbf{A} \cdot {}^2_3\mathbf{A} \cdot {}^3_4\mathbf{A} \cdot {}^4_5\mathbf{A} \cdot {}^5_6\mathbf{A} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中:

$[n \ o \ a]_{3 \times 3}$ ——机器人姿态变换矩阵;

$[p_x \ p_y \ p_z]^T$ ——机器人位置变换矩阵。

逆运动学问题是求机器人的逆解,即已知机器人末端在基坐标系中的表达,求解各关节角度,可以通过式(3)解析求解,限于篇幅限制将不再展开。而逆运动学的解与机器人的位置姿态有关,一般存在多解的情况,应根据关节角度的运动范围及具体条件寻找最优解。

$$\begin{cases} {}^0_1\mathbf{T}^{-1} \cdot {}^0_6\mathbf{T} = {}^1_2\mathbf{T} \cdot {}^2_3\mathbf{T} \cdot {}^3_4\mathbf{T} \cdot {}^4_5\mathbf{T} \cdot {}^5_6\mathbf{T} \\ {}^1_2\mathbf{T}^{-1} \cdot {}^0_1\mathbf{T}^{-1} \cdot {}^0_6\mathbf{T} = {}^2_3\mathbf{T} \cdot {}^3_4\mathbf{T} \cdot {}^4_5\mathbf{T} \cdot {}^5_6\mathbf{T} \\ {}^2_3\mathbf{T}^{-1} \cdot {}^1_2\mathbf{T}^{-1} \cdot {}^0_1\mathbf{T}^{-1} \cdot {}^0_6\mathbf{T} = {}^3_4\mathbf{T} \cdot {}^4_5\mathbf{T} \cdot {}^5_6\mathbf{T} \\ {}^3_4\mathbf{T}^{-1} \cdot {}^2_3\mathbf{T}^{-1} \cdot {}^1_2\mathbf{T}^{-1} \cdot {}^0_1\mathbf{T}^{-1} \cdot {}^0_6\mathbf{T} = {}^4_5\mathbf{T} \cdot {}^5_6\mathbf{T} \\ {}^4_5\mathbf{T}^{-1} \cdot {}^3_4\mathbf{T}^{-1} \cdot {}^2_3\mathbf{T}^{-1} \cdot {}^1_2\mathbf{T}^{-1} \cdot {}^0_1\mathbf{T}^{-1} \cdot {}^0_6\mathbf{T} = {}^5_6\mathbf{T} \end{cases} \quad (3)$$

应用MATLAB中机器人工具箱,根据表1的连杆参数对机器人进行示教仿真,结果如图3所示。当在 $\theta_2 = -90^\circ$ 、 $\theta_4 = 90^\circ$ 、 $\theta_1 = \theta_3 = \theta_5 = \theta_6 = 0^\circ$ 的配置下,机器人的位置和姿态与实际情况是完全一致的,验证了机器人运动学模型的正确性。

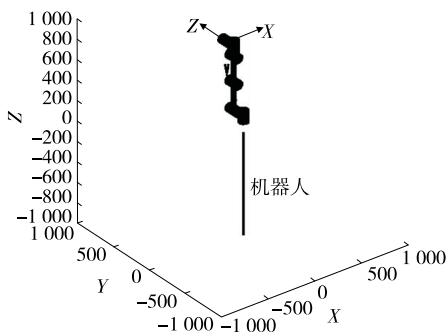


图 3 机器人示教模型

Figure 3 Teaching model of robot

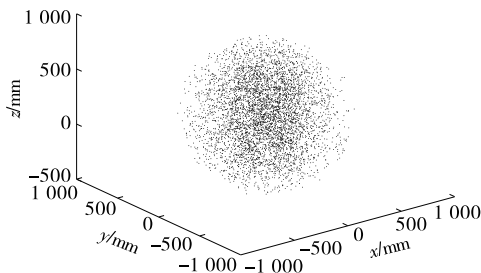
2.2 工作空间仿真分析

通过对机器人运动学建模,得到机器人运动学正解,建立机器人末端坐标相对于基坐标的位置姿态变换关系,机器人工作空间可以根据变换关系求解获得。基于随机抽样的方法,可将 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6$ 在其取值范围内随机取值,通过式(2)可得到当前关节配置下的末端位置。当关节取样足够多时,可以得到机器人末端位置的集合,即机器人的工作空间,其计算模型表达为:

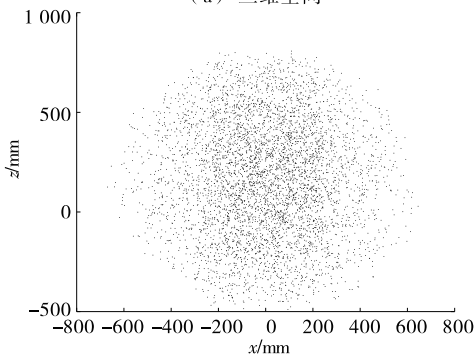
$$\begin{cases} \tau w = p_x \\ \tau w = p_y, \theta_{i\min} \leq \theta_i \leq \theta_{i\max}, i=1,2,3,4,5,6, \\ \tau w = p_z \end{cases} \quad (4)$$

式中:

τw ——工作空间;



(a) 三维空间



(c) xoz面

$[p_x \ p_y \ p_z]^T$ ——机器人位置变换矩阵;

θ_i ——关节角,rad;

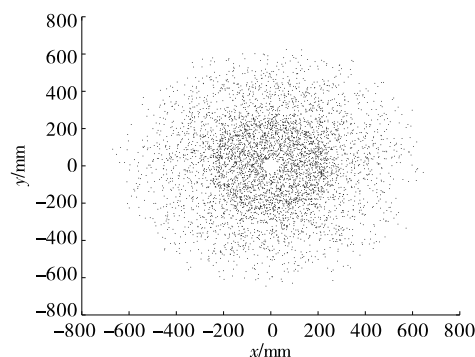
$\theta_{i\min}, \theta_{i\max}$ ——关节 i 角度取值的下限与上限。

通过 MATLAB 中 rand() 函数对模型编程,每个关节角均随机采样 5 000 个点,求解机器人工作空间,结果如图 4 所示。由图 4 可知,机器人的工作空间近似于一个原点为 $(0,0,160)$,半径为 $r=600$ mm 的球形空间。机器人的基座一般固定于工作台或者地面,基座下方的区域是不可到达的,即待搬运的食品位置尽量避免放置在 $z < 0$ mm 的区域。在半径 500~600 mm 区域内,点位较稀疏,说明此空间内所对应的关节配置少,且该区域处于工作空间的边界容易产生奇异配置,使得机器人控制困难。因此食品位置应置于球形工作空间半径 $r < 500$ mm 的空间内,以保证有优选的关节配置抓取食品。此外,工作空间计算模型并未考虑机器人本体结构,当末端处于工作空间中心附近区域时,机器人本体机构之间很可能发生干涉,因此设置一个阈值 $r > 200$ mm,避免干涉的发生。故较优的搬运台布置空间为 $z > 0$ mm 且 $200 \text{ mm} < r < 500$ mm 的区域。

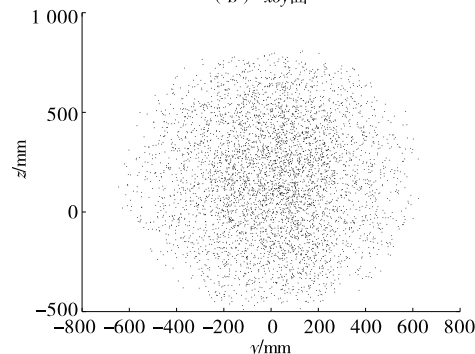
3 轨迹规划

3.1 轨迹函数构造

轨迹规划是为了控制机器人的运动过程,通过良好的关节运动约束,得到平稳的运动^[10]。根据作业任务选择规划方式^[11],当进行连续路径作业时,通常采用笛卡尔



(b) xoy面



(d) yoz面

图 4 机器人工作空间云图

Figure 4 Cloud image of robot workspace

空间进行规划,如弧焊、喷涂等^[12]。当执行对末端轨迹无特殊要求的任务时,往往采用关节空间进行规划,如点焊、搬运等^[13]。

机器人执行搬运任务时,运动过程中应保持平稳,避开空间中的障碍。研究提出一种3段五次多项式插值方法,将机器人的整个运动轨迹分为3个五次多项式部分,一方面保证了运动的连续性,另一方面增加了对轨迹上两个过程点的控制,利于避障和控制运动过程。其表达式为:

$$\begin{cases} \theta_1(t) = a_{10} + a_{11}t + a_{12}t^2 + a_{13}t^3 + a_{14}t^4 + a_{15}t^5 \\ \dot{\theta}_1(t) = a_{11} + 2a_{12}t + 3a_{13}t^2 + 4a_{14}t^3 + 5a_{15}t^4 \\ \ddot{\theta}_1(t) = 2a_{12} + 6a_{13}t + 12a_{14}t^2 + 20a_{15}t^3 \\ \theta_2(t) = a_{20} + a_{21}t + a_{22}t^2 + a_{23}t^3 + a_{24}t^4 + a_{25}t^5 \\ \dot{\theta}_2(t) = a_{21} + 2a_{22}t + 3a_{23}t^2 + 4a_{24}t^3 + 5a_{25}t^4 \\ \ddot{\theta}_2(t) = 2a_{22} + 6a_{23}t + 12a_{24}t^2 + 20a_{25}t^3 \\ \theta_3(t) = a_{30} + a_{31}t + a_{32}t^2 + a_{33}t^3 + a_{34}t^4 + a_{35}t^5 \\ \dot{\theta}_3(t) = a_{31} + 2a_{32}t + 3a_{33}t^2 + 4a_{34}t^3 + 5a_{35}t^4 \\ \ddot{\theta}_3(t) = 2a_{32} + 6a_{33}t + 12a_{34}t^2 + 20a_{35}t^3 \end{cases}, \quad (5)$$

式中:

θ_i ——第*i*段多项式插值函数;

$\dot{\theta}_i$ 、 $\ddot{\theta}_i$ ——对应的速度加速度函数;

a_{ij} ——第*i*段多项式第*j*次项的系数,为待确定的常量。

其已知条件即可控参数为3段五次多项式函数始末点与中间两个控制点的时间、位置、速度及加速度,为了保证3段五次多项式轨迹整体连续平稳,要求每段多项式的连接点处的速度、加速度相等。因此,常量 a_{ij} 可由起始点 P_1 、第1个过程控制点 P_2 、第2个过程控制点 P_3 和终止点 P_4 获得:

$$\begin{bmatrix} a_{10} \\ a_{11} \\ a_{12} \\ a_{13} \\ a_{14} \\ a_{15} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & t_1 & t_1^2 & t_1^3 & t_1^4 & t_1^5 \\ 0 & 1 & 2t_1 & 3t_1^2 & 4t_1^3 & 5t_1^4 \\ 0 & 0 & 1 & 6t_1 & 12t_1^2 & 20t_1^3 \\ 1 & t_2 & t_2^2 & t_2^3 & t_2^4 & t_2^5 \\ 0 & 1 & 2t_2 & 3t_2^2 & 4t_2^3 & 5t_2^4 \\ 0 & 0 & 1 & 6t_2 & 12t_2^2 & 20t_2^3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \theta_1(t_1) \\ \dot{\theta}_1(t_1) \\ \ddot{\theta}_1(t_1) \\ \theta_2(t_2) \\ \dot{\theta}_2(t_2) \\ \ddot{\theta}_2(t_2) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} a_{20} \\ a_{21} \\ a_{22} \\ a_{23} \\ a_{24} \\ a_{25} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & t_2 & t_2^2 & t_2^3 & t_2^4 & t_2^5 \\ 0 & 1 & 2t_2 & 3t_2^2 & 4t_2^3 & 5t_2^4 \\ 0 & 0 & 1 & 6t_2 & 12t_2^2 & 20t_2^3 \\ 1 & t_3 & t_3^2 & t_3^3 & t_3^4 & t_3^5 \\ 0 & 1 & 2t_3 & 3t_3^2 & 4t_3^3 & 5t_3^4 \\ 0 & 0 & 1 & 6t_3 & 12t_3^2 & 20t_3^3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \theta_2(t_2) \\ \dot{\theta}_2(t_2) \\ \ddot{\theta}_2(t_2) \\ \theta_3(t_3) \\ \dot{\theta}_3(t_3) \\ \ddot{\theta}_3(t_3) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} a_{30} \\ a_{31} \\ a_{32} \\ a_{33} \\ a_{34} \\ a_{35} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & t_3 & t_3^2 & t_3^3 & t_3^4 & t_3^5 \\ 0 & 1 & 2t_3 & 3t_3^2 & 4t_3^3 & 5t_3^4 \\ 0 & 0 & 1 & 6t_3 & 12t_3^2 & 20t_3^3 \\ 1 & t_4 & t_4^2 & t_4^3 & t_4^4 & t_4^5 \\ 0 & 1 & 2t_4 & 3t_4^2 & 4t_4^3 & 5t_4^4 \\ 0 & 0 & 1 & 6t_4 & 12t_4^2 & 20t_4^3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \theta_3(t_3) \\ \dot{\theta}_3(t_3) \\ \ddot{\theta}_3(t_3) \\ \theta_4(t_4) \\ \dot{\theta}_4(t_4) \\ \ddot{\theta}_4(t_4) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中:

t_i ——轨迹经过 P_i 点的时间,s;

$\theta_i(t_i)$ ——轨迹经过 P_i 点的角位移,rad;

$\dot{\theta}_i(t_i)$ ——轨迹经过 P_i 点的角速度,rad/s;

$\ddot{\theta}_i(t_i)$ ——轨迹经过 P_i 点的角加速度,rad/s²。

将 a_{ij} 代入式(5),得到3段五次多项式的运动轨迹函数、速度函数及加速度函数。

3.2 仿真分析

在机器人工作空间中,根据产线布局及食品搬运要求,选取机器人夹爪运动中的4个位置点 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 规划运动轨迹,分别代表运动起始点、抬起点、下降点、终止点,其相关数据参数见表2。

根据3段五次多项式插补算法,对表2中4个点位进行插补规划,考虑食品搬运机器人在启停阶段应当稳定的要求,设置起始点和终止点的关节角速度及角加速度均为0,为便于分析计算,设定两个控制点 P_2 、 P_3 的角速度及角加速度也为0,运动总时间为4s,第1s经过 P_2 点,第3s经过 P_3 点。为便于比较分析,同样的数据采用五次多项式和七次多项式进行插补规划。前3个关节的角度、角速度及角加速度的运行曲线分别见图5~图7。

由图5可知,3段五次多项式与七次多项式插值均经过了过程点 P_2 、 P_3 ,达到了期望位置,而五次多项式则偏离了过程点 P_2 、 P_3 ,难以精确地经过既定的过程点。此外,七次多项式插值虽然能准确经过 P_2 、 P_3 ,但是在运动的始末阶段易产生波动及无效运动,尤其是在图5(a)和图5(b)中的第0~1,3~4s表现明显。由图6可知,3段五次多项式插值方法不仅能够准确追踪过程点 P_2 、 P_3 的位置,同样可以准确控制过程点 P_2 、 P_3 的速度,在第1,3s时达到速度为0的要求,而其他两种插值方法都难以满足对过程点速度控制的要求,并且3段五次多项式插值与五次多项式插值在始末阶段对关节角度的控制上要比七次多项式更稳定。由图7可知,3种插值方法均获得了连续的加速度曲线,说明3种方法都可以获得平稳的运动轨迹,不会在运动过程中产生振动冲击,但3段五次多项式能准确控制过程点 P_2 、 P_3 的加速度。综上,3种插补算法虽然可以获得连续的运动轨迹,但3段五次多项式的轨迹规划方法对机器人运动的过程控制更具优势。

表 2 点位数据参数

Table 2 Parameters of point

轨迹点位	笛卡尔 坐标/mm	角度/rad					
		关节 1	关节 2	关节 3	关节 4	关节 5	关节 6
P_1	(395 347 244)	-2.618 0	-0.872 7	0.959 9	1.483 5	-1.570 8	0.000 0
P_2	(395 347 289)	-2.618 0	-0.872 7	0.785 4	1.658 1	-1.570 8	0.000 0
P_3	(42 222 289)	0.785 4	2.268 9	2.181 7	1.658 1	-1.570 8	-0.785 4
P_4	(42 222 244)	0.785 4	2.268 9	2.356 2	1.483 5	-1.570 8	-0.785 4

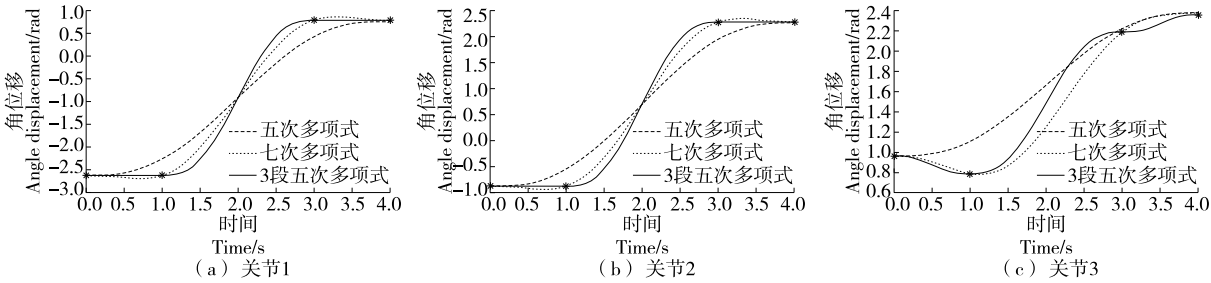


图 5 关节角位移—时间曲线

Figure 5 Time curve of angle displacement

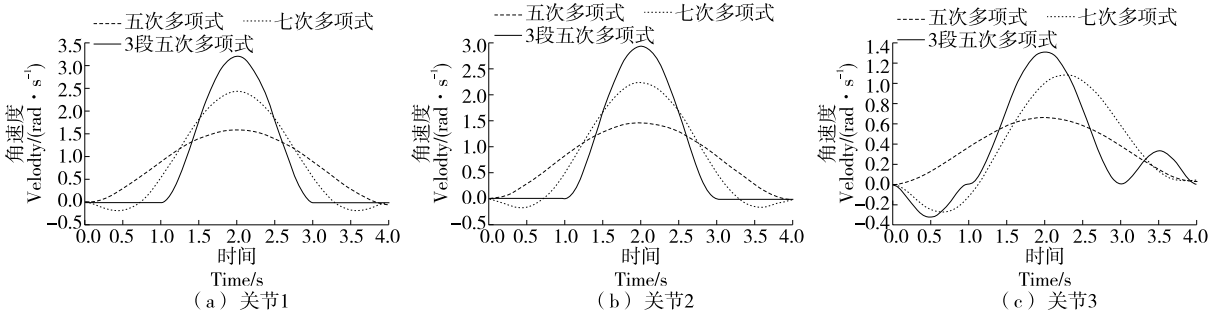


图 6 关节角速度—时间曲线

Figure 6 Time curve of angular velocity

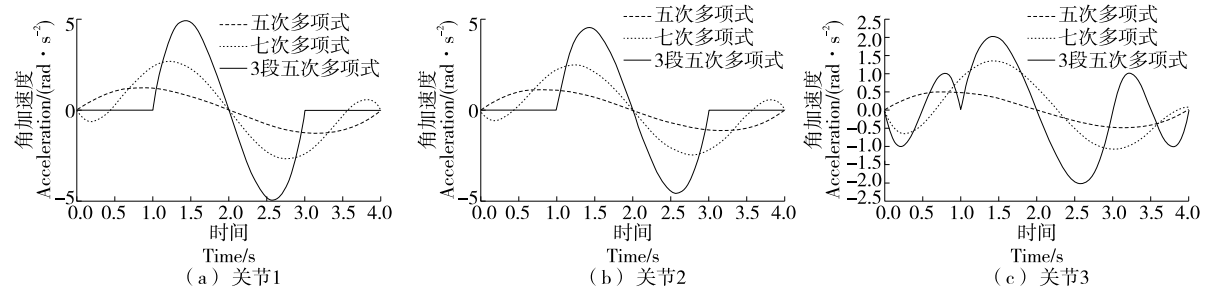


图 7 关节角加速度—时间曲线

Figure 7 Time curve of angular acceleration

3.3 实验验证

设定 4 个过程控制点的参数与仿真条件一致,采用 3 段五次多项式的插值方法规划机器人运动轨迹,并对关节 1、关节 2、关节 3 的角度参数进行采样,采样间隔 0.2 s,采样数据见表 3。通过采样点数据与规划曲线对比发现,

机器人运动轨迹与规划轨迹是吻合的,验证了仿真结论。

4 结论

针对食品搬运机器人的布局及轨迹规划问题,根据 AUBO-i3 机器人本体参数进行了运动学建模,并通过 MATLAB 示教仿真验证了模型的正确性。结果表明,食

表 3 采样点数据

Table 3 Data of sampling point

运行时间/s	角度/rad		
	关节 1	关节 2	关节 3
0.0	-2.618 0	-0.872 7	0.959 9
0.2	-2.618 0	-0.872 7	0.949 8
0.4	-2.618 0	-0.872 7	0.904 5
0.6	-2.618 0	-0.872 7	0.840 8
0.8	-2.618 0	-0.872 7	0.795 5
1.0	-2.618 0	-0.872 7	0.785 4
1.2	-2.588 9	-0.845 8	0.797 4
1.4	-2.420 9	-0.690 7	0.866 3
1.6	-2.063 0	-0.360 4	1.013 1
1.8	-1.537 6	0.124 6	1.228 7
2.0	-0.916 3	0.698 1	1.483 6
2.2	-0.295 0	1.271 6	1.738 6
2.4	0.230 4	1.756 5	1.954 1
2.6	0.588 3	2.086 7	2.101 1
2.8	0.756 3	2.241 6	2.170 1
3.0	0.785 4	2.268 1	2.182 2
3.2	0.785 4	2.268 9	2.191 8
3.4	0.785 4	2.268 9	2.237 1
3.6	0.785 4	2.268 9	2.300 8
3.8	0.785 4	2.268 9	2.346 1
4.0	0.785 4	2.268 9	2.356 2

品搬运台的合理布置空间为 $z > 0$ mm 且 $200 \text{ mm} < r < 500 \text{ mm}$ 的区域。提出的 3 段五次多项式插值的轨迹规划方法可以获得连续平稳的运动轨迹,实现了对运动过程点位的准确控制,并通过仿真实验验证了该方法的有效性。但该轨迹规划方法并未考虑到时间优化问题,后续将从时间优化角度着手,争取在保证轨迹准确、平稳的同时,实现时间最优,提高机器人的作业效率。

参考文献

- [1] XIONG G, DING Y, ZHU L M. A feed-direction stiffness based trajectory optimization method for a milling robot[C]// Proceedings of the 10th International Conference. Wuhan: Springer, 2017: 184-195.
- [2] 赵相博, 潘松峰, 吴贺荣, 等. 食品包装行业的码垛机器人轨迹规划仿真[J]. 包装与食品机械, 2020, 38(4): 61-65.
ZHAO X B, PAN S F, WU H R, et al. Trajectory planning simulation of palletizing robot in food packaging industry[J]. Packaging and Food Machinery, 2020, 38(4): 61-65.
- [3] 贺莹, 梅江平, 孙玉德, 等. MD-1200YJ 码垛机器人腰部支架的多目标结构优化设计[J]. 食品与机械, 2018, 34(11): 89-95.
HE Y, MEI J P, SUN Y D, et al. Multi-objective structural optimization design for the waist mounting bracket of MD-1200YJ palletizing robot[J]. Food & Machinery, 2018, 34(11): 89-95.

- [4] 杨光, 侯钰. 工业机器人的使用, 技术升级与经济增长[J]. 中国工业经济, 2020(10): 138-156.
YANG G, HOU Y. The usage of industry robots, technology upgrade and economic growth[J]. China Industrial Economics, 2020(10): 138-156.
- [5] 王曦鸣. 基于 Robotstudio 的巧克力装盒生产线仿真[J]. 包装与食品机械, 2020, 38(5): 55-59.
WANG X M. Simulation of chocolate boxing production line based on Robotstudio[J]. Packaging and Food Machinery, 2020, 38(5): 55-59.
- [6] 杨世明, 马庆国, 郭翠敏. 一种新型烹饪并联机器人位置与工作空间分析[J]. 食品与机械, 2018, 34(11): 96-100, 125.
YANG S M, MA Q G, GUO C M. Position and workspace analysis of a novel parallel cooking robot[J]. Food & Machinery, 2018, 34(11): 96-100, 125.
- [7] 王君, 陈迪, 陈红杰, 等. 基于 MATLAB Robotics Toolbox 的 UR5 机器人轨迹规划与仿真[J]. 机床与液压, 2018, 46(23): 11-15.
WANG J, CHEN D, CHEN H J, et al. Trajectory planning and simulation of UR5 manipulator based on MATLAB Robotics Toolbox[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2018, 46(23): 11-15.
- [8] 李珺陈, 曾谊晖. 六关节工业机器人工作空间及轨迹规划仿真[J]. 食品与机械, 2017, 33(10): 98-103.
LI J C, ZENG Y H. Simulation of workspace and path design of industrial robot with six joints[J]. Food & Machinery, 2017, 33(10): 98-103.
- [9] 张蕾, 田瑜, 李鹏飞, 等. 四自由度机器人抓取运动目标建模与轨迹规划[J]. 制造业自动化, 2017, 39(12): 44-48.
ZHANG L, TIAN Y, LI P F, et al. Modeling and trajectory planning of four-DOF robot grasping moving target[J]. Manufacturing Automation, 2017, 39(12): 44-48.
- [10] 韩江, 谷涛涛, 夏链, 等. 基于混合插值的工业机器人关节轨迹规划算法[J]. 中国机械工程, 2018, 29(12): 1 460-1 466.
HAN J, GU T T, XIA L, et al. Joint trajectory planning algorithm for industrial robots based on mixed interpolation[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(12): 1 460-1 466.
- [11] WANG X W, YAN Y X, GU X S. Spot welding robot path planning using intelligent algorithm[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 42: 1-10.
- [12] 龙樟, 李显涛, 帅涛, 等. 工业机器人轨迹规划研究现状综述[J]. 机械科学与技术, 2021, 40(6): 853-862.
LONG Z, LI X T, SHUAI T, et al. Review of research state of trajectory planning for industrial robots[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2021, 40(6): 853-862.
- [13] CHEMBULY V V M J S, VORUGANTI H K. Trajectory planning of redundant manipulators moving along constrained path and avoiding obstacles [J]. Procedia Computer Science, 2018, 133: 627-634.