

基于改进门字形轨迹的番茄生产线 DELTA 分选机器人轨迹规划

A trajectory planning method for DELTA sorting robot in tomato production line based on improved gate shaped trajectory

封燕芳¹ 吴必瑞² 赵倩³

FENG Yanfang¹ WU Birui² ZHAO Qian³

(1. 浙江机电职业技术学院, 浙江 杭州 310053; 2. 宁德师范学院, 福建 宁德 352100;

3. 福州大学, 福建 福州 350108)

(1. Zhejiang Institute of Mechanical & Electrical Engineering, Hangzhou, Zhejiang 310053, China; 2. Ningde Normal University, Ningde, Fujian 352100, China; 3. Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China)

摘要:目的:解决现有番茄加工生产线 DELTA 机器人在番茄分选过程中存在的效率低和运动稳定性差等问题。方法:在对 DELTA 机器人分选系统进行分析的基础上,将回旋线优化的门字形轨迹用于 DELTA 机器人轨迹规划。利用回旋线替换门字形轨迹的直角部分,建立以时间最优为目标的优化模型,通过改进的蚁群优化算法求解优化后门字形轨迹参数。通过试验对其性能进行分析。结果:所提方法相比于门字形轨迹和文献[20]方法具有更优的平均分选时间和分选成功率,平均分选时间分别降低了 11.61% 和 1.63%,分选成功率提高了 2.05% 和 0.56%。结论:所提规划方法有效提高了 DELTA 机器人分选精度和效率。

关键词:DELTA 机器人;番茄分选;加工生产线;门字形轨迹;蚁群优化算法;时间最优

Abstract: **Objective:** To solve the problems of low efficiency and poor motion stability of DELTA robots in the tomato sorting process of existing tomato processing production lines. **Methods:** Based on the analysis of the DELTA robot sorting system, the optimized gate shaped trajectory of the cyclotron was used for DELTA robot trajectory planning. By replacing the right angle part of the gate shaped trajectory with a convolutional line, an optimization model with the goal of time optimization was established. The optimized parameters of the gate shaped trajectory were solved using an improved ant colony optimization

algorithm. Analyzed its performance through experiments. **Results:** The proposed method had better average sorting time and sorting success rate compared to the gate shaped trajectory and other methods, with an average sorting time reduction of 11.61% and 1.63%, respectively, and a sorting success rate increase of 2.05% and 0.56%. **Conclusion:** The proposed planning method effectively improves the sorting accuracy and efficiency of DELTA robots.

Keywords: DELTA robot; tomato sorting; processing production line; gate shaped trajectory; ant colony optimization algorithm; time optimal

番茄为全球最受欢迎蔬菜之一,在世界上占有重要地位。中国番茄产量世界第一,但在番茄生产加工方面还处于较低水平^[1]。随着工业和制造业的快速发展,机器人发展迅速。DELTA 机器人凭借自身快速、准确、稳定的特点,在产品分选环节具有非常重要的作用,被广泛应用于食品领域^[2]。在实际应用中,为了降低冲击和提高稳定性,需要合理规划 DELTA 机器人的运动轨迹。

目前,国内外已有不少研究人员对 DELTA 机器人的规划方法进行了研究,也有一些较为突出的成果,主要集中在 PH 曲线、门字形轨迹等方法上。苏婷婷等^[3]提出了一种 PH 曲线用于 DELTA 机器人轨迹规划,该法在分选中具有较高的效率,运行比较稳定,DELTA 机器人可以以 90 次/min 的速度进行分选。梁旭等^[4]对 DELTA 机器人轨迹规划方法进行研究,通过合理有效的轨迹规划实现了机器人系统更短的运动周期和更高的生产吞吐量等。刘现伟等^[5]将改进的圆弧轨迹规划方法用于 DELTA 机器人轨迹规划,该法的运动特性曲线比常规门

基金项目:福建省自然科学基金项目(编号:2020J01429);宁德师范学院专项科研基金(编号:2019ZX402)

作者简介:封燕芳(1979—),女,浙江机电职业技术学院讲师,硕士。E-mail: fengyanfang0220@163.com

收稿日期:2023-03-12 **改回日期:**2023-08-09

型轨迹更平滑自然,其角加速度和末端加速度峰值分别降低 60%,80%。姚学峰等^[6]提出了一种改进的 NURBS 曲线插值算法用于食品 DELTA 分选机器人轨迹规划,与常规方法相比,该法具有更快的运行效率,规划曲线也更平滑,能充分发挥了 DELTA 机器人的性能。上述方法虽然可以生成 DELTA 机器人的运动轨迹,但在实际应用中,番茄生成线的分选存在效率低、稳定性差等问题,适应性有待进一步提高。

在此基础上,研究拟提出一种用于 DELTA 机器人轨迹规划的回旋线优化门字形轨迹。利用回旋线替换门字形轨迹的直角部分,建立以时间最优为目标的优化模型,通过改进的蚁群算法求解优化后门字形轨迹参数。通过试验对所提方法的优越性进行验证,旨在为 DELTA 机器人轨迹规划方法的发展提供参考。

1 系统概述

DELTA 机器人食品分选系统的结构如图 1 所示,主要由图像收集系统、控制系统、机器人主体、输送机构四部分构成^[7]。图像采集系统安装视觉传感器,在传送带上采集番茄图像,并将采集图像发送给控制系统。控制系统处理采集图像,确定抓取路径和位置,控制机器人抓取指定目标。传送装置以恒定转速运行。

图 2 为食品分选 DELTA 机器人结构,主要由静态平台、主动臂、从动臂、动态平台、减速器及电机五部分组成^[8]。主动臂和从动臂构成运动支链连接动、静平台,减速器和电机固定在静平台上,动平台完成分选操作。

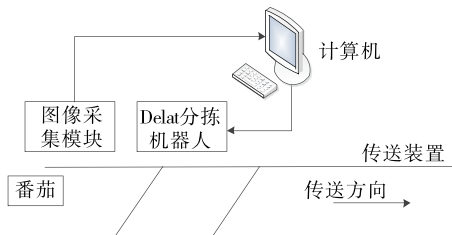
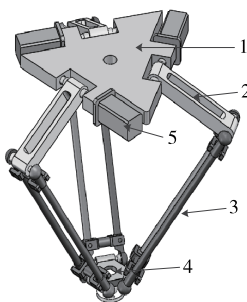


图 1 系统结构

Figure 1 System structure



1. 静平台 2. 主动臂 3. 从动臂 4. 动平台 5. 减速器及电机

图 2 并联机器人结构

Figure 2 Parallel robot body

2 轨迹优化方法

利用回旋线替换门字形轨迹的直角部分,建立了以最优运行时间为目标的优化模型,并通过改进的蚁群算法求解了优化后门字形轨迹参数。

2.1 轨迹规划

门字形轨迹如图 3 所示,为降低复杂度将其划分为 9 段,AB、IJ、BC、HI、CD、HG、DE、FG、EF 段长度分别为 h_1 、 h_2 、 l_1 、 l_7 、 l_2 、 l_6 、 l_3 、 l_5 、 l_4 。其中 BC 和 HI 段回旋线常数 A_1 ,DE 和 FG 段回旋线常数 A_2 ,圆弧半径为 R 。

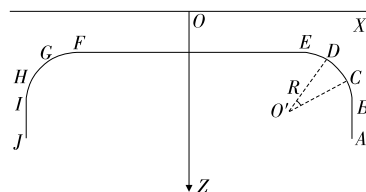


图 3 门字形轨迹

Figure 3 Gate shaped trajectory

采用正弦修正梯形加速度曲线,修正梯形运动规律的加速度 a 如式(1)所示^[9]。

$$a = \begin{cases} a_{\max} \sin\left(\frac{4\pi}{T}t\right), 0 \leq t \leq \frac{1}{8}T \\ a_{\max}, \frac{1}{8}T < t \leq \frac{3}{8}T \\ a_{\max} \cos\left[\frac{4\pi}{T}\left(t - \frac{3}{8}T\right)\right], \frac{3}{8}T < t \leq \frac{5}{8}T \\ -a_{\max}, \frac{5}{8}T < t \leq \frac{7}{8}T \\ -a_{\max} \cos\left[\frac{4\pi}{T}\left(t - \frac{7}{8}T\right)\right], \frac{7}{8}T < t \leq T \end{cases} \quad (1)$$

式中:

$a_{\max}$ ——运行最大加速度, mm/s^2 ;

t ——当前时刻, s ;

T ——运行时间, s 。

对式(1)进行时间积分可以得到修正梯形运动规律的速度函数,修正梯形运动规律的速度 v 如式(2)所示^[10]。

$$v = \begin{cases} -\frac{T}{4\pi}a_{\max} \cos\left(\frac{4\pi}{T}t\right) + \frac{T}{4\pi}a_{\max}, 0 \leq t \leq \frac{1}{8}T \\ a_{\max}t + \left(\frac{1}{4\pi} - \frac{1}{8}\right)a_{\max}T, \frac{1}{8}T < t \leq \frac{3}{8}T \\ \frac{T}{4\pi}a_{\max} \sin\left[\frac{4\pi}{T}\left(t - \frac{3}{8}T\right)\right] + \left(\frac{1}{4} + \frac{1}{4\pi}\right)a_{\max}T, \frac{3}{8}T < t \leq \frac{5}{8}T \\ -a_{\max}t + \left(\frac{7}{8} + \frac{1}{4\pi}\right)a_{\max}T, \frac{5}{8}T < t \leq \frac{7}{8}T \\ -\frac{T}{4\pi}a_{\max} \sin\left[\frac{4\pi}{T}\left(t - \frac{7}{8}T\right)\right] + \frac{1}{4\pi}a_{\max}T + \frac{7}{8}a_{\max}T, \frac{7}{8}T < t \leq T \end{cases} \quad (2)$$

对式(2)进行时间积分可以得到修正梯形运动规律的位移函数,修正梯形运动规律的位移 s 如式(3)所示^[11]。

$$s = \begin{cases} -\left(\frac{T}{4\pi}\right)^2 a_{\max} \sin\left(\frac{4\pi}{T}t\right) + \frac{Tt}{4\pi} a_{\max}, & 0 \leq t \leq \frac{1}{8}T \\ \frac{1}{2} a_{\max} t^2 + \left(\frac{1}{4\pi} - \frac{1}{8}\right) a_{\max} Tt + \left(\frac{1}{128} - \frac{1}{16\pi^2}\right) a_{\max} T^2, & \frac{1}{8}T < t \leq \frac{3}{8}T \\ -\left(\frac{T}{4\pi}\right)^2 a_{\max} \cos\left[\frac{4\pi}{T}\left(t - \frac{3}{8}T\right)\right] + \left(\frac{1}{4} + \frac{1}{4\pi}\right) a_{\max} Tt - \frac{1}{16} a_{\max} T^2, & \frac{3}{8}T < t \leq \frac{5}{8}T \\ -\frac{1}{2} a_{\max} t^2 + \left(\frac{7}{8} + \frac{1}{4\pi}\right) a_{\max} Tt + \left(\frac{1}{16\pi^2} - \frac{33}{128}\right) a_{\max} T^2, & \frac{5}{8}T < t \leq \frac{7}{8}T \\ \left(\frac{T}{4\pi}\right)^2 a_{\max} \cos\left[\frac{4\pi}{T}\left(t - \frac{7}{8}T\right)\right] + \frac{1}{4\pi} a_{\max} Tt + \frac{1}{8} a_{\max} T^2, & \frac{7}{8}T < t \leq T \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可知,当 $t=T$ 时, s 取最大值,位移 s 最大值如式(4)所示。

$$s = \left(\frac{1}{8} + \frac{1}{4\pi}\right) a_{\max} T^2. \quad (4)$$

由式(4)可知,在轨迹规划,给定位移动 s 和加速度 $a_{\max}$ 时,该段路径的执行周期如式(5)所示^[12]。

$$T = \sqrt{\frac{s}{\left(\frac{1}{8} + \frac{1}{4\pi}\right) a_{\max}}} = \sqrt{\frac{4.887 \cdot 2s}{a_{\max}}}. \quad (5)$$

根据式(1)~式(5),可以得到位移、速度、加速度曲线。

2.2 优化模型

2.2.1 目标函数 采用回旋线优化门形轨迹的直角部分,以时间最优为优化目标,在给定最大允许加速度情况下,门字形轨迹路径最短。目标函数如式(6)所示^[13]。

$$\min f(D, R, A_1, A_2, h_1, h_2) = D - 2\left(R + \frac{A_1^4}{24R^3} - \frac{A_1^8}{2 \cdot 688R^7} - R \sin \frac{A_2^2}{2R^2} + \frac{A_2^2}{R}\right) + h_1 + h_2 + \pi R + \frac{A_1^2 + A_2^2}{R}, \quad (6)$$

式中:

D ——抓取距离,mm;

h_1 ——AB 段长度,mm;

h_2 ——IJ 段长度,mm;

A_1 ——BC 和 HI 段回旋线常数,mm;

A_2 ——DE 和 FG 段回旋线常数,mm;

R ——圆弧半径,mm。

2.2.2 约束条件 通过标准门字形分选轨迹给出约束条件,如式(7)所示^[14]。

$$s.t. \begin{cases} 0 < D \leq 305 \\ 0 < R \leq 25 \\ 0 \leq A_1 < 50 \\ 0 \leq A_2 < 50^\circ \\ 0 \leq h_1 < 25 \\ 0 \leq h_2 < 25 \end{cases} \quad (7)$$

2.3 求解算法

在诸多优化问题解决方法中,蚁群算法能够快速找到可行的解。因此,对蚁群算法进行适当优化并求解,求解步骤:

步骤 1:初始化蚂蚁参数,根据目标函数中各变量的可执行解范围以等间隔的方式分割可执行解,将其分割成 $(m+1)$ 部分,初始化各蚂蚁的初始位置^[15]。

步骤 2:确定信息素,信息素 τ 如式(8)所示。

$$\tau = \frac{1}{f(D, R, A_1, A_2, h_1, h_2)}. \quad (8)$$

根据式(5)对信息素进行计算,并记录最大值 τ_b 。

步骤 3:通过设置转移概率常数与转移概率进行比较,判断是全局搜索还是局部搜索,每只蚂蚁转移概率计算如式(9)所示^[16]。

$$P_{ij}^k(n) = \frac{\tau_b - \tau_{ij}^k}{\tau_b}, \quad (9)$$

式中:

$P_{ij}^k(n)$ ——蚂蚁 k 从位置 i 转到 j 的概率(n 次迭代);

τ_b ——蚂蚁信息素最优值(n 次迭代);

τ_{ij}^k ——蚂蚁 k 的信息素(n 次迭代)。

将 $P_{ij}^k(n)$ 与转移概率常数 P_0 进行比较,小于则进行局部搜索(邻域内),大于则进行全局搜索。

在进行局部搜索时, $(n+1)$ 次子代解如式(10)所示^[17]。

$$X^k(n+1) = X^k(n) + e^{-\frac{n}{N}} U, \quad (10)$$

式中:

X_n^k ——第 k 只蚂蚁的解(n 次迭代);

U ——邻域空间;

N ——最大迭代次数。

在进行全局搜索时,子代解如式(11)所示^[18]。

$$X^k(n+1) = X^k(n) + \text{rand}(-1, 1) \times l, \quad (11)$$

式中:

l ——解空间划分区段长度,mm。

步骤 4:更新信息素:蚂蚁搜索后,需要重新计算信息素值,与当前值比较,如果更好则更新,反之不更新^[19]。

步骤 5:对是否达到最大迭代次数进行判断,达到则输出最优解,否则转到步骤 2。

求解步骤如图 4 所示。

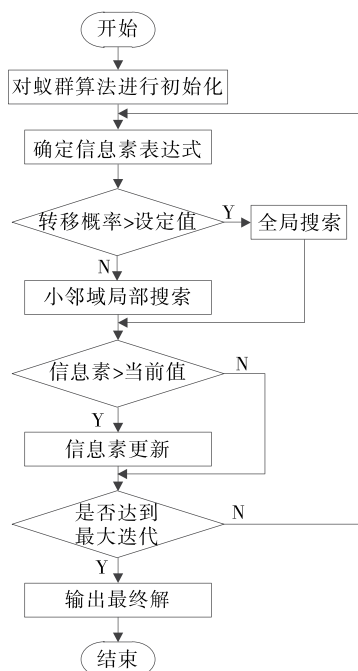


图 4 求解流程图

Figure 4 Solution flowchart

3 试验结果与分析

3.1 试验参数

为验证所提方法的可行性和优越性,试验 PC 选择 13 代酷睿 i5CPU,主频 4.6 GHz,系统 Windows 11, DELTA 机器人为 PMAC 运动控制器,驱动器松下 MADHT-1505,伺服电机松下 MSMJ042S,减速机哈默纳科(HD),相机华用 HV030GM,传送带编码器欧姆龙 E6B2,使用番茄作为分选目标。为了提高结果的精度,取 20 次平均值。表 1 为 DELTA 机器人参数。

DELTA 机器人分选路径为高度 25 mm、长度 305 mm 的类门字型路径。最大角速度 $V_{\max}=10 \text{ rad/s}$,最大角加速度 $a_{\max}=400 \text{ rad/s}^2$ 。

表 1 机器人基本参数

Table 1 Robot basic parameters

参数	单位	数值
静平台半径	mm	290
动平台半径	mm	50
关节角范围	(°)	2.9~112.8
主动臂长度	mm	260
从动臂长度	mm	850

3.2 仿真分析

为了验证所提方法的可行性,对优化前后门形轨迹进行了比较分析。完成一次分选获得动平台加速度变化曲线,优化后动平台加速度变化如图 5 所示,优化前动平台加速度变化如图 6 所示。

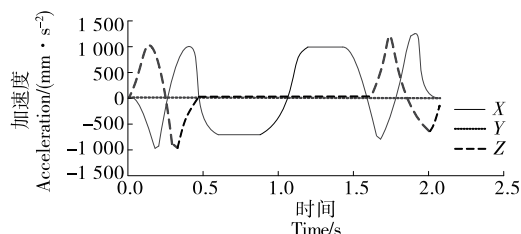


图 5 优化后动平台加速度变化

Figure 5 Acceleration change of dynamic platform after optimization

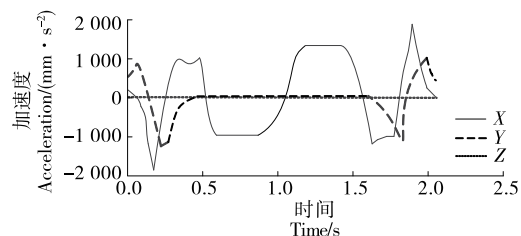


图 6 优化前动平台加速度变化

Figure 6 Optimize the acceleration change of the front moving platform

由图 5 和图 6 可知,优化后动平台加速度曲线随时间连续变化,过渡平滑,且加速度变化范围为 $0 \sim 1250 \text{ mm/s}^2$,无突变无冲击,运行相对稳定。优化前动平台加速度曲线随时间连续变化,但在 0.2、1.8 s 左右出现比较明显的突变,存在明显的抖动现象,运行不稳定,加速度变化范围为 $0 \sim 1980 \text{ mm/s}^2$ 。说明优化后 DELTA 机器人运行更加稳定,振动更小,提高了抓取控制的稳定性。

为了验证所提方法的优越性,将 DELTA 机器人以不同速度在设定轨迹上连续循环 1 000 次,通过比较实际位置与理论位置之差,测试其重复精度。番茄的分选速度设定为 40、60、80、100 次/min,不同速度的位置误差如表 2 所示。

由表 2 可知,所示方法在速度为 40~60 次/min 时的位置误差均在 0.5 mm 以内,有较好的分选效果,速度为 80~100 次/min 时的位置误差均在 1.0 mm 以内,误差有所提高,但均控制在 1.0 mm 以内,可满足番茄分选要求,具有较好的重复精度。

为了进一步验证所提方法的优越性,将所提方法、优化前门字形轨迹和文献[20]的轨迹方法进行比较分析,结果如表 3 所示。

表 2 不同速度循环位置误差

Table 2 Position error of different speed cycles

速度/ (次·min ⁻¹)	坐标轴	误差/ mm	速度/ (次·min ⁻¹)	坐标轴	误差/ mm
40	X	0.3	80	X	0.5
	Y	0.4		Y	0.6
	Z	0.4		Z	0.8
60	X	0.5	100	X	1.0
	Y	0.6		Y	0.8
	Z	0.4		Z	0.9

表 3 不同轨迹规划方法分选结果

Table 3 Sorting results with different trajectory planning methods

方法	传送带速度/ (mm·s ⁻¹)	番茄 数量	分选 个数	平均分选 时间/s	分选成 功率/%
所提方法	50	4 000	3 980	0.800	99.50
门字形轨迹	50	4 000	3 900	0.893	97.50
文献[20]方法	50	4 000	3 958	0.813	98.95

由表 3 可以看出,所提方法相比于门字形轨迹和文献[20]方法具有较好的平均分选时间和分选成功率,平均分选时间为 0.800 s,分选成功率为 99.50%。相比于门字形轨迹和文献[20]方法的平均分选时间分别减少了 11.61%和 1.63%,而分选成功率提高了 2.05%和 0.56%。这是因为利用回旋线优化门字形轨迹的直角部分,以时间最优为目标建立模型,改进蚁群算法进行求解,从而降低加速度突变的发生概率,规划路径更优。试验结果表明,所提方法能有效提高 DELTA 机器人的分选效率和成功率。

4 结论

研究将回旋线优化的门字形轨迹用于 DELTA 机器人轨迹规划,建立了以最优运行时间为目标的优化模型,并通过改进的蚁群算法求解优化后门字形轨迹参数。结果表明,所提方法具有较优的分选成功率和分选效率,且位置误差均在 1 mm 以内。相比于门字形轨迹和文献[20]方法平均分选时间分别降低了 11.61%,1.63%,分选成功率提高了 2.05%,0.56%。虽然研究做了很多工作,但仍有需要改进和深入研究的地方。例如,目标函数仅考虑时间最优,未考虑能量消耗、加速度等。在后期阶段,应不断完善轨迹规划方法,进一步提高其性能。

参考文献

[1] 严培培. 面向非典型食品生产的高速机器人分拣系统设计[J]. 食品与机械, 2016, 32(2): 94-97.
YAN P P. High speed sorting robot for non-typical food production systems[J]. Food & Machinery, 2016, 32(2): 94-97.

[2] 胡国喜,王超,刘宇珩. 基于改进光滑滑模阻抗控制的水果分拣机械人夹持机构控制方法[J]. 食品与机械, 2021, 37(2): 123-126.
HU G X, WANG C, LIU Y H. A control technique for clamping mechanism of fruit sorting robot based on improved smooth sliding mode impedance control [J]. Food & Machinery, 2021, 37(2): 123-126.
[3] 苏婷婷,张好剑,王云宽,等. 基于 PH 曲线的 Delta 机器人轨迹规划方法[J]. 机器人, 2018, 40(1): 46-55.
SU T T, ZHANG H J, WANG Y K, et al. Trajectory planning for a delta robot based on PH curve[J]. Robotics, 2018, 40(1): 46-55.
[4] 梁旭,苏婷婷,贾智琪,等. 并联 Delta 机器人及其轨迹规划方法综述[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(11): 4 271-4 279.
LIANG X, SU T T, JIA Z Q, et al. Review of delta parallel robot and its trajectory planning method [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(11): 4 271-4 279.
[5] 刘现伟,颜潭成,徐彦伟,等. 基于合成运动的 Delta 机器人轨迹规划[J]. 制造业自动化, 2021, 43(7): 19-23, 47.
LIU X W, JIE T C, XU Y W, et al. Delta robot trajectory planning based on synthetic motion[J]. Manufacturing Automation, 2021, 43(7): 19-23, 47.
[6] 姚学峰,李超. 基于改进 NURBS 曲线插补算法的食品分拣机器人轨迹规划[J]. 食品与机械, 2022, 38(3): 80-85.
YAO X F, LI C. Trajectory planning method of food sorting robot based on improved NURBS curve interpolation algorithm[J]. Food & Machinery, 2022, 38(3): 80-85.
[7] MA W P, LI W X, SUN J C, et al. Binocular vision target location method based on coarse fine stereo matching [J]. Computer Applications, 2020, 40(1): 227-232.
[8] 宋海涛,何文浩,原魁. 一种基于 SIFT 特征的机器人环境感知双目立体视觉系统[J]. 控制与决策, 2019, 34(7): 1 545-1 552.
SONG H T, HE W H, YUAN K. A stereo vision system based on SIFT feature for robot environment perception [J]. Control and Decision, 2019, 34(7): 1 545-1 552.
[9] 伍纪纹,徐世许,王鹏,等. 基于 Adams 的三自由度 Delta 机械手的运动学仿真分析[J]. 软件, 2017, 38(6): 108-112.
WU J W, XU S X, WANG P, et al. Kinematics simulation analysis of three-degree-of-freedom delta robot based on Adams [J]. Software, 2017, 38(6): 108-112.
[10] 张皓宇,刘晓伟,任川,等. 并联机器人正运动学与 NURBS 轨迹规划[J]. 机械设计与制造, 2021, 12(4): 282-292.
ZHANG H Y, LIU X W, REN C, et al. Forward kinematics control and NURBS trajectory planning for parallel robots[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2021, 12(4): 282-292.
[11] 朱向楠,韦源源. 基于位置姿势控制的并联机械手运动误差仿真分析[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021, 12(3): 49-56.
ZHU X N, WEI Y Y. Motion error simulation analysis of parallel manipulator based on position and pose control [J]. Modular Machine Tool and Automatic Machining Technology, 2021, 12(3): 49-56.

(下转第 154 页)

- Effect of omega3 fatty acids on lipid peroxidation and antioxidant enzyme status in type 2 diabetic patients [J]. *Diabetes and Metabolism*, 2002, 28(1): 20-26.
- [20] MUSAZADEH V, DEHGHAN P, SALEH-GHADIMI S, et al. Omega 3 - rich Camelina sativa oil in the context of a weight loss program improves glucose homeostasis, inflammation and oxidative stress in patients with NAFLD: A randomised placebo-controlled clinical trial [J]. *International Journal of Clinical Practice*, 2021, 75(11): e14744.
- [21] TABAS I. Macrophage death and defective inflammation resolution in atherosclerosis [J]. *Nature Reviews Immunology*, 2010, 10(1): 36-46.
- [22] SERHAN C N. Pro-resolving lipid mediators are leads for resolution physiology[J]. *Nature*, 2014, 510(7 503): 92-101.
- [23] CALDER P C. The role of marine omega-3 (n-3) fatty acids in inflammatory processes, atherosclerosis and plaque stability [J]. *Molecular Nutrition & Food Research*, 2012, 56(7): 1 073-1 080.
- [24] PATTERSON C C, SMITH A E, YARNELL J W G, et al. The associations of interleukin-6 (IL-6) and downstream inflammatory markers with risk of cardiovascular disease: The caerphilly study [J]. *Atherosclerosis*, 2010, 209(2): 551-557.
- [25] HOTAMISLIGIL G S. Inflammation and metabolic disorders[J]. *Nature*, 2006, 444(7 121): 860-867.
- [26] LINDMARK E, DIDERHOLM E, WALLENTIN L, et al. Relationship between interleukin 6 and mortality in patients with unstable coronary artery disease: Effects of an early invasive or noninvasive strategy[J]. *Jama*, 2001, 286(17): 2 107-2 113.
- [27] MIRALLES-PÉREZ B, NOGUÉS M R, SÁNCHEZ-MARTOS V, et al. The effects of the combination of buckwheat D-fagomine and fish omega-3 fatty acids on oxidative stress and related risk factors in pre-obese rats[J]. *Foods*, 2021, 10(2): 332.
- [28] WANG D D, NGUYEN L H, LI Y, et al. The gut microbiome modulates the protective association between a Mediterranean diet and cardiometabolic disease risk[J]. *Nature Medicine*, 2021, 27(2): 333-343.
- [29] SATTAR N, PREISS D, MURRAY H M, et al. Statins and risk of incident diabetes: A collaborative meta-analysis of randomised statin trials[J]. *The Lancet*, 2010, 375(9 716): 735-742.
- [30] CULVER A L, OCKENE I S, BALASUBRAMANIAN R, et al. Statin use and risk of diabetes mellitus in postmenopausal women in the Women's Health Initiative[J]. *Archives of Internal Medicine*, 2012, 172(2): 144-152.
- [31] 纪孝联. 不同他汀类药物对冠心病患者血糖影响的临床观察 [J]. *河南职工医学院学报*, 2013, 25(3): 275-277.
- JI X L. Clinical observation of the effect of different statins on blood glucose in patients with coronary heart disease[J]. *Journal of Henan Medical College for Staff and Workers*, 2013, 25(3): 275-277.
- [32] DELARUE J, LEFOLL C, CORPOREAU C, et al. N-3 long chain polyunsaturated fatty acids: A nutritional tool to prevent insulin resistance associated to type 2 diabetes and obesity? [J]. *Reproduction Nutrition Development*, 2004, 44(3): 289-299.
- [33] NETTLETON J A, KATZ R. n-3 long-chain polyunsaturated fatty acids in type 2 diabetes: A review [J]. *Journal of the American Dietetic Association*, 2005, 105(3): 428-440.
- [34] NAYLOR J L, SCHRAER C D, MAYER A M, et al. Diabetes among alaska natives: A review [J]. *International Journal of Circumpolar Health*, 2003, 62(4): 363-387.
-
- (上接第 75 页)
- [12] AHANDANI M A, ALAVIRAD H. Opposition-based learning in the shuffled differential evolution algorithm[J]. *Soft Computing*, 2016, 26: 64-85.
- [13] GAUTAM J V, PRAJAPATI H B, DABHI V K, et al. Empirical study of job scheduling algorithms in hadoop map reduce [J]. *Cybernetics and Information Technologies*, 2017, 21(1): 146-163.
- [14] 赵利平, 吴德刚. 基于小波与模糊相融合苹果分级算法 [J]. *食品与机械*, 2020, 36(4): 142-145.
- ZHAO L P, WU D G. Research on apple classification algorithm based on wavelet and fuzzy[J]. *Food & Machinery*, 2020, 36(4): 142-145.
- [15] AZUMAYA C M, DAYS E L, VINSON P N, et al. Screening for AMPA receptor auxiliary subunit specific modulators [J]. *PLoS One*, 2017, 12(3): 1 523-1 538.
- [16] 贺禹强, 刘故帅, 肖异瑶, 等. 基于改进 GA-PSO 混合算法的变电站选址优化 [J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(23): 143-150.
- HE Y Q, LIU G S, XIAO Y Y, et al. Locating optimization for substation based on refined GA-PSO hybrid algorithm[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(23): 143-150.
- [17] 朱光耀. 基于无标定视觉伺服的全向移动机械臂跟踪控制 [J]. *电子测量技术*, 2020, 43(23): 23-29.
- ZHU G Y. Tracking control of uncalibrated visual servo omnidirectional mobile manipulator [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2020, 43(23): 23-29.
- [18] 王志中. 基于改进蚁群算法的移动机器人路径规划研究 [J]. *机械设计与制造*, 2018, 12(1): 242-244.
- WANG Z Z. Path planning for mobile robot based on improved ant colony algorithm[J]. *Mechanical Design and Manufacturing*, 2018, 12(1): 242-244.
- [19] 于文妍, 杨坤林. 四旋翼无人机串级模糊自适应 PID 控制系统设计 [J]. *机械设计与制造*, 2019, 12(1): 227-231.
- YU W Y, YANG K L. Design of cascade fuzzy self-adaptive PID control system for four-rotor unmanned aerial vehicle [J]. *Mechanical Design and Manufacturing*, 2019, 12(1): 227-231.
- [20] 徐岩. 基于改进引力搜索算法的高速并联机器人轨迹优化 [J]. *食品与机械*, 2022, 38(5): 82-86.
- XU Y. Trajectory optimization of high speed parallel robot based on improved gravity search algorithm[J]. *Food & Machinery*, 2022, 38(5): 82-86.