

Delta 并联机器人轨迹规划的研究与分析

赵鹏宇^{1,2}, 王宗彦^{1,2}, 闫旺星^{1,2}, 丁培燎^{1,2}

(1. 中北大学机械工程学院, 山西 太原 030051)

(2. 山西省起重机数字化设计工程技术研究中心, 山西 太原 030051)

摘要: 针对传统的直线插补轨迹规划方法使得并联机器人产生较大的刚性冲击与振动冲击, 导致机器人运行不稳定的问题, 运用修正梯形轨迹规划算法对并联机器人轨迹进行平滑处理, 提高了并联机器人的运行稳定性。首先建立并联机器人三维模型, 之后通过 MATLAB 模拟运行轨迹并求解其工作空间, 再利用 ADAMS 软件进行轨迹仿真, 并对比两种轨迹规划算法的仿真结果。仿真结果表明, 修正梯形轨迹规划算法具有更好的速度连续性, 有效减少了并联机器人的刚性冲击。

关键词: 并联机器人; 轨迹规划; 修正梯形; 运动仿真

中图分类号: TP242

文献标识码: A

文章编号: 2095-509X(2022)01-0048-05

随着我国工业水平不断提高, 企业的生产效率将会是占据市场的主要因素之一。传统的人工分拣装箱速度已无法满足当下企业的需求, 同时生产过程中也存在人身安全问题, 且目前我国人口老龄化问题凸显, 传统行业开始面临招工难的难题, 因此工业自动化设备的市场需求逐年上升^[1]。Delta 并联机器人是工业分拣机器人中的代表之一, 其相比于串联机器人具有结构简单、定位精度高、运行速度快、加速度大等特点, 它解决了传统的人工分拣方式机械、重复的问题, 目前已被应用在食品分拣、工件分类等工业场景中^[2-4]。

Delta 并联机器人的轨迹规划对其运行稳定性有重要影响, 本文对 Delta 并联机器人进行建模, 求取其工作空间, 对比直线插补轨迹规划算法与修正梯形轨迹规划算法, 证明修正梯形轨迹规划算法的优越性。

以及主动臂与从动臂。从动臂由 4 个球面副组成平行四边形机构, 动平台连接末端执行器, 负责物体的抓取, 通过 3 条支链的驱动可以实现机器人在 X, Y, Z 3 个方向上的移动。其具体参数见表 1。

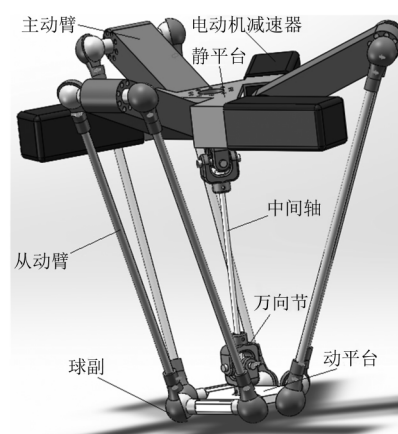


图 1 并联机器人模型

表 1 并联机器人尺寸参数 单位: mm

参数	数值
静平台半径	97.74
动平台半径	92.00
主动臂长度	260.02
从动臂长度	693.72

1 Delta 并联机器人建模

Delta 并联机器人模型如图 1 所示, 主要由静平台和动平台、主动臂和从动臂、万向节、球副、电机减速器等组成。静平台承载机器人的全部质量, 需要固定, 其上面安装有 3 个伺服电机, 以驱动 3 条完全相同的支链, 通过转动副连接电机与主动臂

收稿日期: 2021-06-08

基金项目: 山西省重点国际科技合作项目(201903D421015)

作者简介: 赵鹏宇(1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为并联机器人与机器视觉, 506719860@qq.com。

通讯作者: 王宗彦, 男, 教授, 22294472@qq.com。

2 运动学分析及工作空间

工作空间是机器人末端执行器可触及的所有位置点的集合。本文是在正运动学基础上进行的^[5], 所以要对并联机器人进行正运动学分析, 在此之前需要对并联机器人进行机构简化。简化后的机构简图如图 2 所示, 动平台与静平台 3 条支链位置夹角为 120° , 即将两个平台简化为两个相似的等边三角形, 主动臂、从动臂用线段表示^[6-7]。

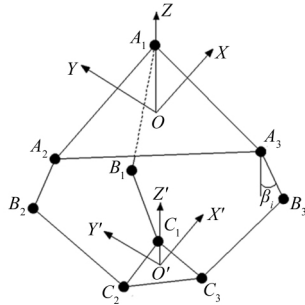


图2 并联机器人机构简图

图中 $A_1A_2A_3$ 为机器人静平台, $C_1C_2C_3$ 为动平台, A_1B_1, A_2B_2, A_3B_3 为 3 个主动臂, 长度均为 L_1 , 它们负责连接静平台与从动臂 B_1C_1, B_2C_2, B_3C_3 , 从动臂长度均为 L_2 。以静平台中心点建立的静坐标系为 $O-XYZ$, 以动平台中心建立的动坐标系为 $O'-X'Y'Z'$ 。 β_i 为主动臂运动过程中与静平台的夹角, ρA_i 为静平台外接半径, 用 R 表示, ρC_i 为动平台外接圆半径, 用 r 表示, $OO' = [x \ y \ z]^T$, 记为静坐标系原点与动坐标系原点之间的位置矢量。

静平台坐标系如图 3 所示, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 表示 3 个主动臂与坐标轴的夹角。

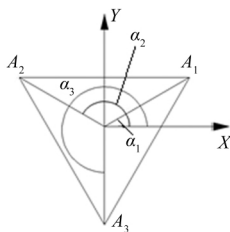


图3 静平台坐标系

对并联机器人进行运动学建模的目的就是为了建立 3 个主动臂与静平台的夹角和静平台中心到动平台的位置矢量关系。

运动学正解是通过已知的各关节矢量, 求末端执行器既动平台中心相对于静坐标系的位姿。根据空间关系可推导出具体方程式:

$$\begin{cases} \left[\frac{\sqrt{3}}{2}(R+L_1\sin\beta_1-r)-x \right]^2 + \left[\frac{1}{2}(R+L_1\sin\beta_1-r)-y \right]^2 + (L_1\sin\beta_1+z)^2 = L_2^2 \\ \left[\frac{-\sqrt{3}}{2}(R+L_1\sin\beta_2-r)-x \right]^2 + \left[\frac{1}{2}(R+L_1\sin\beta_2-r)-y \right]^2 + (L_1\sin\beta_2+z)^2 = L_2^2 \\ x^2 + [(R+L_1\sin\beta_3-r)+y]^2 + (L_1\cos\beta_3+z)^2 = L_2^2 \end{cases} \quad (1)$$

根据并联机器人主动臂、从动臂的长度, 给定主动臂的运动范围, 并根据实际应用中的工作场合确定最大与最小转角, 将转角离散化并确定中心坐标, 通过正解求解出每个转角对应的点, 将这些点的集合绘制出来就可以求得并联机器人的工作空间。在进行轨迹规划时并联机器人的工作空间是重要的参数。利用 MATLAB 计算工作空间, 结果如图 4 所示。

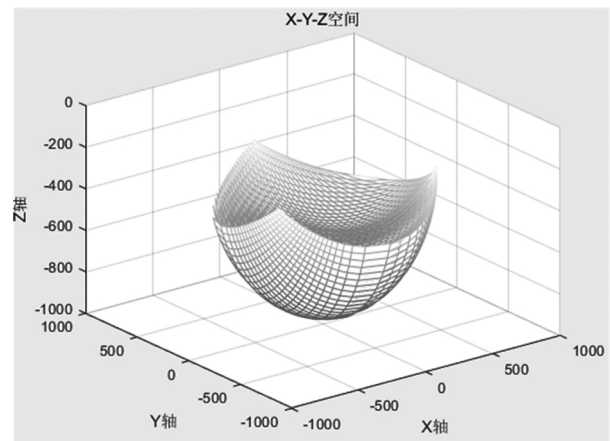


图4 机器人工作空间

在实际生产中, 考虑到障碍物的高度或者取放时的高度差, 通常将工作空间设置为圆柱形。根据工作空间可知 X, Y, Z 3 个方向上的最值如下:

$$x_{\max} = 658.4 \text{ mm}, x_{\min} = -659.2 \text{ mm}, y_{\max} = 648.3 \text{ mm}, y_{\min} = -654.3 \text{ mm}, z_{\max} = -263.7 \text{ mm}, z_{\min} = -943.2 \text{ mm}.$$

3 轨迹规划

对于 Delta 并联机器人来说, 其在工作中都是从起始点开始加速, 到一定位置后开始减速最后停在指定位置, 起始点与目标点的速度和加速度都为

0。轨迹规划是在实际生产中对末端执行器进行路径规划,根据机器人的工作空间确定起始点与目标点,确保两点均落在工作空间内,并根据两点之间是否有障碍物来确定末端执行器的路线,以保证安全的工业生产环境。在进行轨迹规划时还要尽可能减少速度与加速度的突变,以减少电机的刚性冲击,提高机器人的重复定位精度和使用寿命。根据第2节求得的并联机器人工作空间,本文将并联机器人的起始点设置为 $(-180, 0, -700)$,目标点设置为 $(180, 0, -700)$,障碍高度为50 mm,单次轨迹运行时间为0.3 s。

目前常用的轨迹规划方法有直线插补轨迹规划算法和修正梯形轨迹规划算法^[8-10]。直线插补轨迹规划算法会使机器人在位移方向产生速度与加速度突变,导致并联机器人刚性冲击较大。其运行轨迹如图5所示。

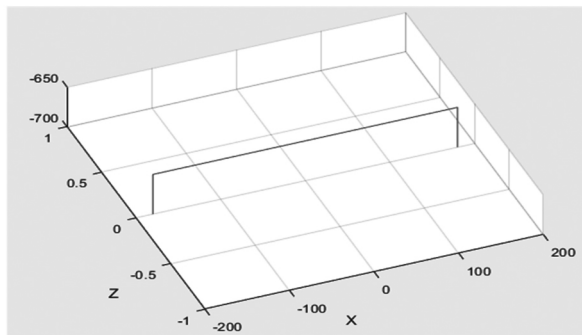


图5 直线插补轨迹规划算法的门型轨迹

为了保证并联机器人平稳运行,其运行轨迹函数关于时间 t 的一二阶导数应是连续函数。本文将Delta并联机器人末端执行器在工作中的轨迹分为5段,具体如图6所示。

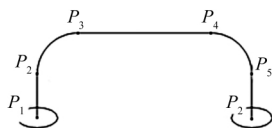


图6 改进的并联机器人轨迹

$P_2 - P_3$ 、 $P_4 - P_5$ 段采用圆弧插值法对之前的直角部分进行过渡,其余部分采用直线插值法。

根据图6的分段轨迹,沿路线采样得到各个段点的速度以及加速度,为了使机器人加减速快速平稳并方便计算,采用修正梯形轨迹规划算法。

设 T 为一次运行的时间, s 为位移, a 为加速度。首先采用修正梯形算法将加速度曲线分成5

个周期,用公式表达如下:

$$a = \begin{cases} a_{\max} \sin[\pi t / (2T_1)] & (0 \leq t < T_1) \\ a_{\max} & (T_1 \leq t < T_2) \\ a_{\max} \cos[\pi(t - T_2) / (2T_2)] & (T_2 \leq t < T_3) \\ -a_{\max} & (T_3 \leq t < T_4) \\ -a_{\max} \cos[\pi(t - T_4) / (2T_1)] & (T_4 \leq t < T) \end{cases} \quad (2)$$

式中: a_{\max} 为最大加速度。对式(2)进行二次积分得到位移公式:

$$s = \begin{cases} -\frac{2T_1}{\pi} a_{\max} \sin \frac{\pi t}{2T_1} + \frac{2a_{\max} T_1}{\pi} & (0 \leq t < T_1) \\ \frac{a_{\max} t^2}{2} + a_{\max} T_1 \left[\left(\frac{2}{\pi} \right) - 1 \right] t + A & (T_1 \leq t < T_2) \\ -\left(\frac{2T_1}{\pi} \right)^2 a_{\max} \cos \frac{\pi(t - T_2)}{2T_1} + a_{\max} T_2 t + a_{\max} T_1 \left(\frac{\pi}{2} - 1 \right) t + B & (T_2 \leq t < T_3) \\ -\frac{a_{\max} t^2}{2} + a_{\max} (T_2 + T_3) t + a_{\max} T_1 \left(\frac{\pi}{2} - 1 \right) t + C & (T_3 \leq t < T_4) \\ \left(\frac{2T_1}{\pi} \right)^2 a_{\max} \cos \frac{\pi(t - T_4)}{2T_1} + \frac{2a_{\max} T_1}{\pi} + D & (T_4 \leq t < T) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $A = a_{\max} T_1^2 \left(\frac{1}{2} - \frac{4}{\pi^2} \right)$; $B = \frac{1}{2} a_{\max} T_1^2 (T_1^2 - T_2^2)$; $C = a_{\max} \left[\frac{4T_1^2}{\pi^2} + \frac{1}{2} (T_1^2 - T_2^2 - T_3^2) \right]$; $D = a_{\max} T_4 (T_2 + T_3 - T_1) + \frac{1}{2} a_{\max} (T_1^2 - T_2^2 - T_3^2 - T_4^2)$ 。

为了方便找到加速度与位移的关系,令 $T_1 = \frac{1}{8}T$, $T_2 = \frac{3}{8}T$, $T_3 = \frac{5}{8}T$, $T_4 = \frac{7}{8}T$,代入式(3)中可得位移、加速度、时间之间的关系:

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

$$T = \sqrt{\frac{s}{(1/4\pi + 0.25) a_{\max}}} \quad (5)$$

利用MATLAB2019b进行修正梯形轨迹模拟,利用工作空间所确定的起始点与目标点得到修正梯形的轨迹,如图7所示。

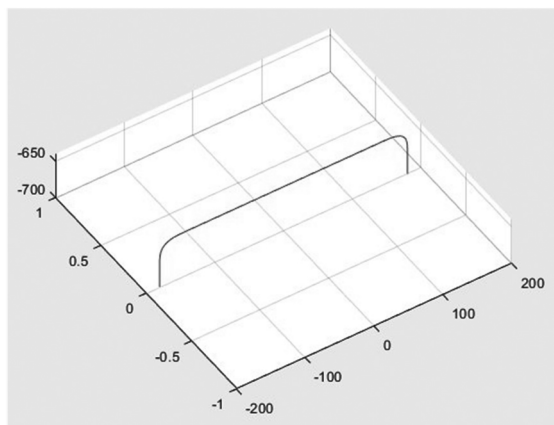


图 7 修正梯形轨迹

4 实验仿真

在 MATLAB2019b 中通过运动学逆解求解出直线插补轨迹算法的轨迹对应的 3 个电机转动数据,再计算利用修正梯形轨迹规划算法优化后的轨迹对应的 3 个电机转动数据,设置每隔 0.005 s 进行一次对应电机转角的求解。将 Delta 并联机器人模型与电机转角数据导入 ADAMS2019 中进行仿真,得到 X 轴方向上的速度、加速度、位移的变化曲线,如图 8~13 所示。

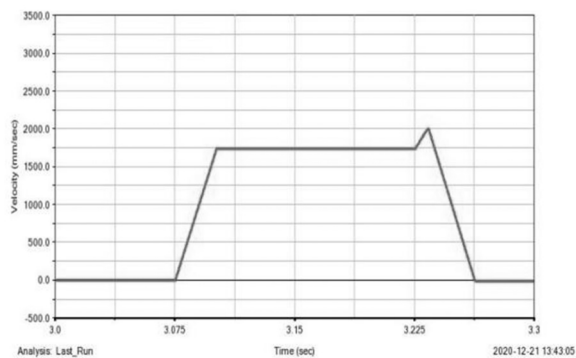


图 8 直线插补轨迹规划算法速度变化

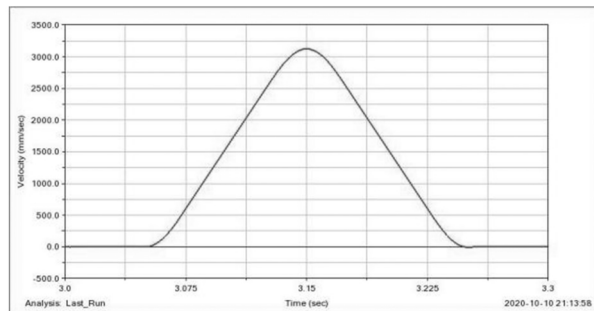


图 9 修正梯形轨迹规划算法速度变化

图 8 为并联机器人在直线插补轨迹运行时的速度变化情况,其中有 5 个明显的变化拐点,表明这 5 个部分的速度发生了突变,造成机器人的位移

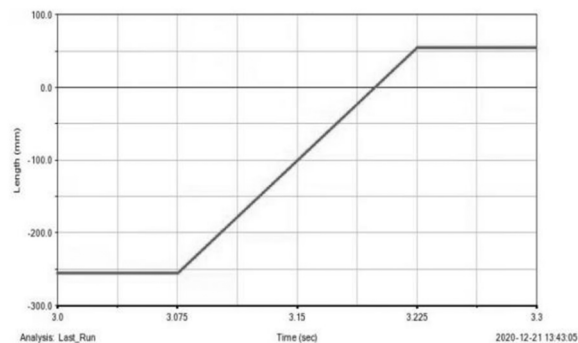


图 10 直线插补轨迹规划算法位移变化

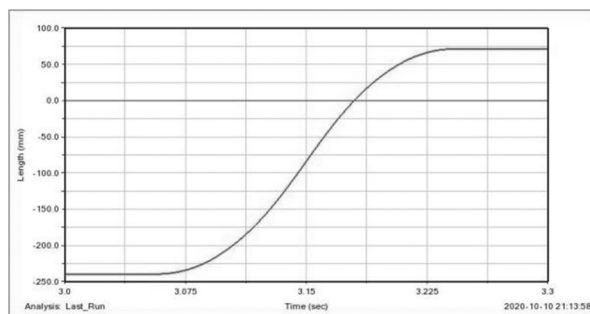


图 11 修正梯形轨迹规划算法位移变化

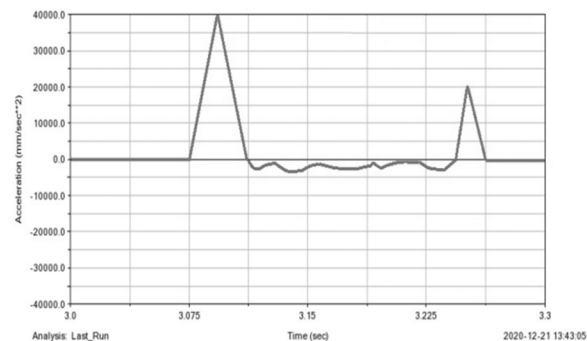


图 12 直线插补轨迹规划算法加速度变化

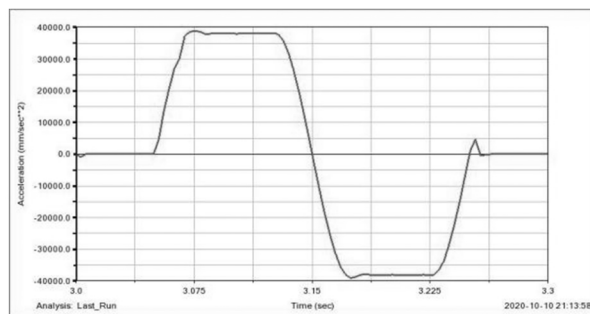


图 13 修正梯形轨迹规划算法加速度变化

曲线也产生了突变,如图 10 所示,从而造成图 12 所示的机器人加速度瞬间增加又瞬间下降,导致机器人运行时刚性冲击大,震动剧烈。而并联机器人轨迹经过修正梯形轨迹规划算法优化后,速度曲线没有出现突变的拐点,如图 9 所示,位移曲线也更加平稳,如图 11 所示,优化后加速度曲线也较为平

缓,如图 13 所示。由此表明,经过修正梯形轨迹规划算法优化后的并联机器人运动学和动力学性能更好,减少了运动中的刚性冲击。

5 结束语

本文首先对并联机器人进行实体建模,利用运动学正解求解出了所建并联机器人模型的工作空间,根据工作空间选取实验仿真需要用到的起始点与目标点。然后通过轨迹规划分析对比了并联机器人在直线插补轨迹和修正梯形轨迹运行时的区别,证明了利用修正梯形轨迹规划算法进行优化后,并联机器人在速度、加速度方面更加平滑,可以有效提高并联机器人连续运行的平稳性。本文对并联机器人进行了仿真分析,实际的应用中还应该考虑工业生产环境、电机型号等因素,使 Delta 并联机器人更加稳定、高效。

参考文献:

[1] 王哲禄. “中国制造 2025”战略下的工业机器人技术人才分

析及培养路径创新研究[J]. 生产力研究, 2019(1): 119 - 122, 149.

[2] 吴萍. 食品自动装箱并联机器人的设计及仿真分析[J]. 食品工业, 2020, 41(4): 198 - 201.

[3] 韩基伟, 孟钢钊. Delta 机构的装箱机器人的工作空间及轨迹规划[J]. 食品工业, 2021, 42(3): 216 - 219.

[4] 杨宇飞. 袋装食品装箱并联拾放机器人关键技术研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2015.

[5] 彭煜, 高洪, 陈啸, 等. 基于正位移解的 Delta 机器人工作空间分析[J]. 井冈山大学学报(自然科学版), 2013, 34(5): 60 - 64.

[6] 徐官南, 张中辉, 夏庆观. Delta 并联机器人运动学分析[J]. 机械制造与自动化, 2015, 44(6): 160 - 162, 192.

[7] LIU C, CAO G, QU Y. Safety analysis via forward kinematics of delta parallel robot using machine learning[J]. Safety Science, 2019, 117: 243 - 249.

[8] 张续冲, 张瑞秋, 陈亮, 等. Delta 机器人产品分拣轨迹规划仿真[J]. 计算机仿真, 2019, 36(11): 295 - 299, 364.

[9] 覃秀凤. 用于装箱生产线的机器人运动轨迹规划[J]. 机床与液压, 2020, 48(21): 65 - 67, 5.

[10] 王云飞, 郎需林, 张承瑞, 等. 高速并联机械手最优加减速控制算法研究[J]. 机械设计与制造, 2014(11): 85 - 88.

Trajectory planning analysis of Delta parallel robot

Zhao Pengyu^{1,2}, Wang Zongyan^{1,2}, Yan Wangxing^{1,2}, Ding Peiliao^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, North University of China, Shanxi Taiyuan, 030051, China)

(2. Crane Digital Design Engineering Technology Research

Center of Shanxi Province, Shanxi Taiyuan, 030051, China)

Abstract: Aiming at the problem that the traditional linear interpolation trajectory planning method makes the parallel robot produce large rigid impact and vibration impact, which leads to the unstable operation of the robot, the modified trapezoidal trajectory planning algorithm is used to smooth the trajectory of the parallel robot, which improves the operation stability of the parallel robot. Firstly, a three-dimensional model of the parallel robot is established, and then the trajectory is simulated by MATLAB and its workspace is solved. Then, ADAMS software is used for trajectory simulation, and the simulation results of the two trajectory planning algorithms are compared. Simulation results show that the modified trapezoidal trajectory planning algorithm has better velocity continuity and effectively reduces the rigid impact of the parallel robot.

Key words: Delta parallel robot; trajectory planning; modified trapezoid; motion simulation