

文章编号 1004-924X(2021)02-0305-11

大范围平动并联机器人运动学解耦与 速度自适应规划

赵新华^{1,2,3}, 刘培昌³, 赵磊^{1,2,3*}, 李彬^{1,2,3}

- (1. 天津理工大学 天津市先进机电系统设计与智能控制重点实验室, 天津 300384;
2. 天津理工大学机电工程国家级实验教学示范中心, 天津 300384;
3. 天津理工大学 机械工程学院, 天津 300384)

摘要: 并联机器人是一种多支链、多关节、强耦合非线性系统, 具有高速、高刚度和大负载等明显优势而被广泛应用到工业领域。然而, 随着关节数量的增加导致该类机器人运动学解耦和高精度平稳控制的难度较大。为实现大范围平动 3-RRRU 并联机器人自动化轨迹跟踪和控制的平稳性, 针对运动学解耦和速度自适应规划方法展开了系统、深入地研究。首先, 应用 DH 法建立了机器人运动学模型, 基于结构约束条件完成运动学解耦计算, 并在 S 型控制策略中加入速度自适应修正机制, 依据不同轨迹可自动计算并修正最大速度参数, 实现自适应优化; 其次, 采用激光跟踪仪对机器人轨迹进行动态跟踪, 对比分析了 S 型速度和梯型速度控制策略下的跟踪精度, 梯型速度规划下其最大误差高达 4.513 mm, 是 S 型控制策略的 3 倍, 且位置误差曲线出现多个尖峰值, 说明因速度突变导致运动平稳性较差; 最后, 测试 S 型速度规划下采用自适应修正机制前、后机器人的平稳性以及轨迹跟踪精度。实验结果表明: 当规划路径难以实现机器人加速到原预设最大速度时, 在轨迹末端存在较大的惯性速度, 产生位置尖峰误差为 2.676 mm, 是修正后最大误差的 2.4 倍, 且伴随着明显的冲击效应。引入自适应修正机制后圆轨迹的起点和终点位置误差分别为 0.722 mm 和 0.382 mm, 二者相对位置偏差仅为 0.34 mm, 且末端定位误差相比修正前降低了一个数量级, 有效解决了机器人存在惯性冲击效应的难题, 大幅提高了机器人整体轨迹跟踪的精度和控制的平稳性。

关键词: 大范围平动; 并联机器人; 运动学解耦; 自适应控制; 精度

中图分类号: TP242; TP202.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20212902.0305

Kinematic decoupling and velocity adaptive planning of parallel robot in large overall translation

ZHAO Xin-hua^{1,2,3}, LIU Pei-chang³, ZHAO Lei^{1,2,3*}, LI Bin^{1,2,3}

- (1. Tianjin Key Laboratory for Advanced Mechatronic System Design and Intelligent Control, School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China;
2. National Demonstration Center for Experimental Mechanical and Electrical Engineering Education Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China;
3. School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China;)

* Corresponding author, E-mail: leizhaotjut@163.com

收稿日期: 2020-05-13; 修订日期: 2020-12-30.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(No. 2017YFB1303502); 国家自然科学基金面上项目资助(No. 51975412)和天津市自然科学基金资助项目(No. 18JCYBJC87900).

Abstract: Parallel robot is a kind of nonlinear strong coupling system with many branches and joints. It has obvious advantages of high speed, high stiffness and large load. So, it is widely used to industrial field. However, with the number of joints increasing, it becomes more difficult to finish kinematic decoupling and precision control. In order to realize automatic trajectory tracking and stable control of 3-RRRU parallel robot, kinematic decoupling and velocity adaptive planning method are systematically and deeply researched. The kinematic equations are derived by DH theory and space vector method. Inverse kinematics calculation is completed based on structural constraints. The velocity correction mechanism is added to the S-type control strategy, and the maximum speed parameters can be calculated and revised automatically according to different trajectories. It realizes the adaptive optimization of the speed control strategy. The laser tracker is used to track the robot's path, and the accuracy is compared and analyzed under control of standard S-type and ladder type. The maximum error reaches to 4.513 mm, which is 3 times of the S-type control strategy. There are several error peaks on the position curve which shows that the motion stability is poorer due to the sudden change of speed. On this basis, the second experiment is carried out. We test the stability and tracking error of the robot before and after adopting correction mechanism for the S-type speed control under the circular trajectory. The experimental results have shown that when robot can't achieve the maximum speed on the preset path, the original max speed is still control parameter which cause the asymmetric distribution of the speed control curve. Therefore, when the robot reaches the end of the trajectory, it also owns a large inertia speed and results in a peak error of 2.676 mm which is 2.4 times of the after correction. Robot stops accompanied by obvious shaking. After adaptive correction, the position errors of the starting point and the ending point are 0.722 mm and 0.382 mm respectively, and the relative position errors of the two position are only 0.34 mm. It effectively solves the inertia speed problem when the robot reaches the end of the trajectory, and greatly improves the overall tracking accuracy and motion stability of the robot.

Key words: large overall translation; parallel robot; kinematic decoupling; adaptive control; accuracy

1 引言

机器人技术的发展在对提高先进生产竞争力、促进国民经济以及提高战略地位具有重要深远的意义。在机器人应用中,串联机器人具有结构简单和易操作的特点,最早被运用到工业生产领域^[1]。但由于仅拥有一条控制链,存在误差积累效应,工作速度相对较低。并联机构具有负载能力强、刚度大和误差不累积等优势,但由于存在多条控制链,关节数量多,导致运动学解耦难度较大^[2-4]。从力学角度分析,对于高速并联机构而言,随着机构原动构件转速的提高,惯性负荷会成为激振力的主要组成部分,而且激振力的频率也随之提高^[5]。由于连杆机构的各构件的惯性负荷与原动构件转速的平方成正比,故随着机械速度的增加,并联机器人拥有的多个关节的弹性变形以及内部惯性力的耦合作用越加明显,导致

轨迹动态跟踪时机器人伴随着不同程度的振动^[6-8]。虽然具有多支链、大范围运动工业并联机器人的控制精度相对较低,但其拥有的高速和高负载等明显优势使其仍在工业领域得到广泛应用^[9]。

并联机器人具有良好的高速运动特性,但也存在精度和平稳性相对较差的难题。通常采用误差补偿来提高工作精度,选取合理的控制策略实现机器人的高速平稳控制。各种数值算法如改进蚁群算法、遗传算法和神经网络算法被应用到机器人路径规划^[10-12]。现阶段,工业机器人在进行实际轨迹跟踪时,在轨迹末端存在一定的惯性速度导致不同程度的冲击晃动,末端控制精度和平稳性较差^[13-14]。目前,机器人系统中常用的速度规划算法有梯型速度规划算法和S型速度规划算法。Hu等^[15]通过梯型速度规划方法控制机床,验证加速度的不连续变化会引起振动和冲

击。史步海等^[16-18]提出一种等价梯型的新型 S 型速度规划算法,算法简单,一定程度上降低机械冲击,但实质上仍属于梯型速度规划。文献[17-18]研究表明:S 型速度规划虽然控制算法比梯型控制更为复杂,但速度过渡更为平滑,有效缓解或消除梯型控制存在的因速度突变产生的误差尖峰。然而,在实际应用中,采用 S 型速度规划算法仍然无法消除或缓解在轨迹末端呈现的冲击效应。

针对 3-RRRU 大范围平动并联机器人的运动学解耦和速度自适应规划方法展开系统、深入地研究。应用 DH 法建立机器人的运动学解耦模型,实现了机器人的自动化控制;在 S 型速度规划策略中引入自适应修正机制,实现了不同轨迹下最大速度的自适应优化,避免了由于速度参数设置不合理导致 S 型速度曲线的不对称分布,实现了机器人轨迹跟踪过程中速度过渡的平滑性和平稳控制。开展轨迹跟踪实验,验证了所采用速度自适应规划方法的有效性和可行性。

2 并联机器人运动学解耦

2.1 并联机器人结构

图 1 是本文所研究的 3-RRRU 并联机器人,由静平台、动平台和三条支链构成。图 2 是其对应的结构示意图,静平台固定在上方,动平台则位于下方,且静、动平台均为正三角。三条支链结构相同,每条支链由三个转动副和一个虎克铰连接而成。靠近静平台的均为驱动副,其余为被动副; A_{ij} 为第 i 支链第 j 的运动副,三个驱动副的轴线均平行于三个相邻被动副的轴线,同时平行于静平台所在平面,又分别垂直于第三个转动副(即第二组被动副)的轴线,三个虎克铰与动平台连接。

2.2 机器人运动学坐标系的建立

以第一条支链为例建立运动学坐标系, O 是静平台的几何中心,也是基坐标系 $O-x_0y_0z_0$ 的原点, OZ_0 垂直于静平台,设 OX_0 的方向为 X 轴方向,如图 3 所示。 θ_{ij} 为第 i 支链第 j 关节的角位移,旋转轴 z_{i1} 垂直于轴 z_{i2} 和 z_{i3} , z_{i3} 平行于轴 z_{i4} ;动平台的几何中心为 P ,其坐标系 $O'-x'_0y'_0z'_0$ 三个坐标轴的方向与静平台坐标系 $O-x_0y_0z_0$ 的坐标轴方



图 1 3-RRRU 并联机器人
Fig. 1 3-RRRU parallel robot

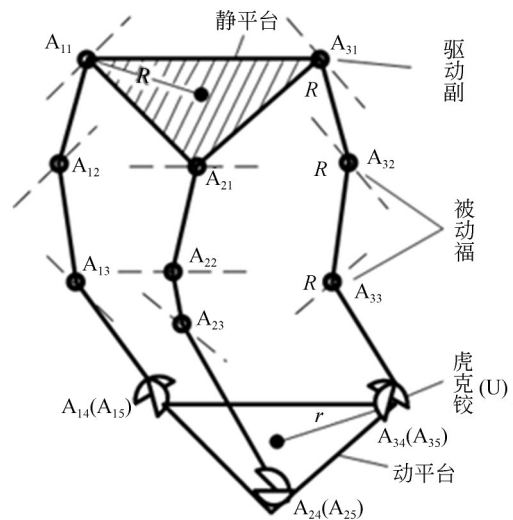


图 2 3-RRRU 并联机器人结构示意图
Fig. 2 Structure diagram of 3-RRRU parallel robot

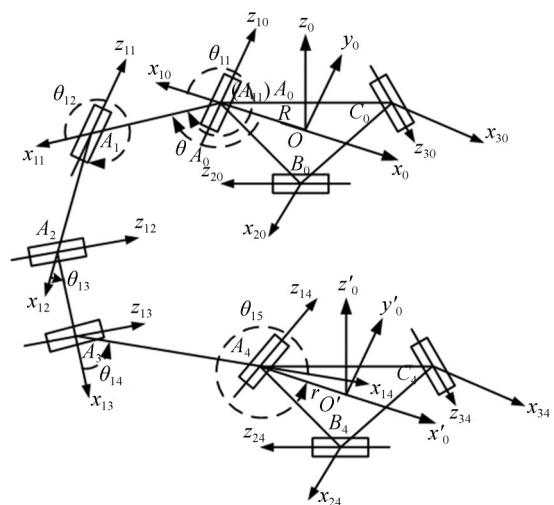


图 3 第一支链运动学坐标系
Fig. 3 Kinematic coordinate system of the first branch chain

向相同。设机器人支链中各杆件长度为 L_{ij} (第 i 条支链中第 j 个杆件), R 和 r 分别为静平台和动平台的外接圆半径。

2.3 运动学反解

为了实现 3-RRRU 并联机器人的自动化控制,应用 DH 法建立其运动学模型。第一支链齐次传递矩阵 T 可表示为:

$$T = A_R A_{11} A_{12} A_{13} A_{14} A_{15}, \quad (1)$$

其中: A_R 为静平台几何中心到第一关节的齐次变换矩阵, A_{ij} 为第 i 支链第 j 的运动副。

相关矩阵参数如表 1 所示,对式(1)作如式(2)般变换:

$$\begin{bmatrix} -c\theta_{15} & -s\theta_{15} & 0 & r - P_x - R \\ s\theta_{15} & -c\theta_{15} & 0 & P_z \\ 0 & 0 & 1 & P_y \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c(\theta_{11} + \theta_{12})c(\theta_{13} + \theta_{14}) & s(\theta_{11} + \theta_{12}) & -c(\theta_{11} + \theta_{12})s(\theta_{13} + \theta_{14}) & L_{11}c\theta_{11} + (L_{12} + L_{13}c\theta_{13})c(\theta_{11} + \theta_{12}) \\ s(\theta_{11} + \theta_{12})c(\theta_{13} + \theta_{14}) & c(\theta_{11} + \theta_{12}) & -s(\theta_{11} + \theta_{12})s(\theta_{13} + \theta_{14}) & L_{11}s\theta_{11} + (L_{12} + L_{13}c\theta_{13})s(\theta_{11} + \theta_{12}) \\ s(\theta_{13} + \theta_{14}) & 0 & c(\theta_{13} + \theta_{14}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

基于机器人结构约束,关节 $\theta_{13} \in [-\pi/2, \pi/2]$, 故由式(3)可得:

$$\cos \theta_{13} = \sqrt{L_{13}^2 - P_y^2} / L_{13}. \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)矩阵方程进而可求得剩余转角 θ_{11} 和 θ_{12} 。同理,将坐标系 A_R 分别旋转 60° 和 120° ,亦可完成其他两条支链关节角的计算。结合表 2 中机器人各构件参数可实现运动学解耦计算,具体计算过程这里不做过多赘述,详见参考文献[19]。

表 2 各构件参数

Tab. 2 Parameters of each component (mm)

| 支链号 | L_{i1} | L_{i2} | L_{i3} | R | r |
|-------|----------|----------|----------|-----|-----|
| $i=1$ | 400 | 100 | 800 | 400 | 400 |
| $i=2$ | 400 | 100 | 800 | 400 | 400 |
| $i=3$ | 400 | 100 | 800 | 400 | 400 |

表 1 第一支链 DH 矩阵参数

Tab. 1 DH matrix parameters of the first chain

| 关节 | θ_{ij} | α_{ij} | L_{ij} | d_{ij} | $s\theta_{ij}$ | $c\theta_{ij}$ |
|----|---------------|---------------|----------|----------|----------------|----------------|
| 1 | θ_{11} | 0 | L_{11} | 0 | 0 | 1 |
| 2 | θ_{12} | $\pi/2$ | L_{12} | 0 | 1 | 0 |
| 3 | θ_{13} | 0 | L_{13} | 0 | 0 | 1 |
| 4 | θ_{14} | $-\pi/2$ | 0 | 0 | -1 | 0 |
| 5 | θ_{15} | $\pi/2$ | 0 | 0 | 1 | 0 |

$$A_R^{-1} T A_{15}^{-1} = A_{11} A_{12} A_{13} A_{14}. \quad (2)$$

代入矩阵参数可得到第一支链运动学方程如式(3)所示:

3 速度控制策略优化

3.1 速度自适应修正方法

轨迹规划是机器人运动控制的核心,旨在确定机器人末端执行器在其工作空间的轨迹^[19-21]。关于梯型控制原理在文献[16]已详细说明,此处不做赘述,标准 S 型加减速控制过程共由 7 个阶段组成,分别为加加速、匀加速、减加速、匀速、加减速、匀减速和减减速,文献[17]给出了位移、速度和加减速过程曲线如图 4 所示。图 4 中每个控制阶段的加速度和速度均可通过下式(5)中的加速度和速度函数计算获取。S 型控制过程相比梯型复杂很多,设最大速度 v_m 即匀速阶段速度,最大加速度 a_m ,加加速度 J ,轨迹长度为 s , s_{123} 表示经过加加速阶段 s_1 、匀加速阶段 s_2 、减加速阶段 s_3 达到最大速度时完成的位移; s_{13} 表示仅经过加加速段 s_1 和减加速阶段 s_3 达到最大速度时完成的位移,对 s_{123} 和 s_{13} 可由式(5)中的速度和加速度函数计算得到。

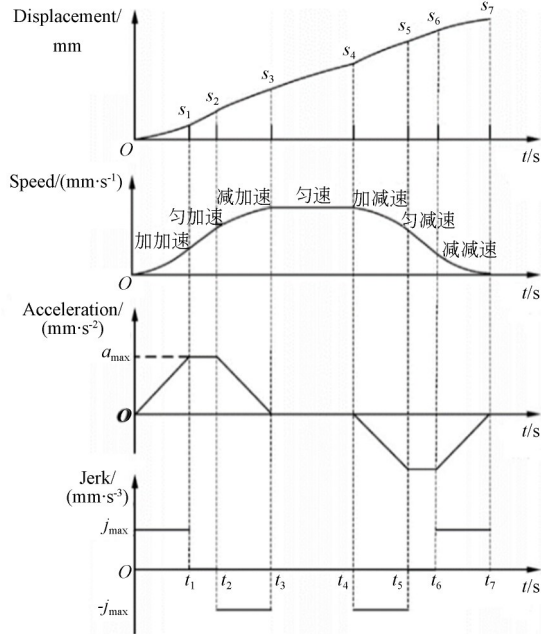


图 4 S型加减速控制过程

Fig. 4 Acceleration and deceleration of S-type control

$$a(t) = \begin{cases} Jt, & 0 \leq t < t_1 \\ a, & t_1 \leq t < t_2 \\ a - Jt, & t_2 \leq t < t_3 \\ 0, & t_3 \leq t < t_4 \\ -Jt, & t_4 \leq t < t_5 \\ -a, & t_5 \leq t < t_6 \\ -a + Jt, & t_6 \leq t < t_7 \end{cases}$$

$$v(t) = \begin{cases} v_s + \frac{1}{2} Jt^2, & 0 \leq t < t_1 \\ v_1 + at, & t_1 \leq t < t_2 \\ v_2 + at - \frac{1}{2} Jt^2, & t_2 \leq t < t_3 \\ v_3, & t_3 \leq t < t_4 \\ v_4 - \frac{1}{2} Jt^2, & t_4 \leq t < t_5 \\ v_5 - at, & t_5 \leq t < t_6 \\ v_6 - at + \frac{1}{2} Jt^2, & t_6 \leq t < t_7 \end{cases} \quad (5)$$

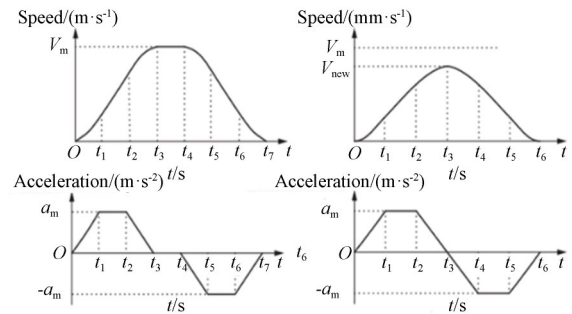
S型速度规划策略中,常采用参数定值控制方式,当轨迹较短时致使预设最大速度值不合理,引起速度曲线呈现不对称分布,此时机器人产生冲击效应即出现明显的晃动。基于上述分析,引入最大速度自适应修正机制如下:

(1)若 $2s_{123} \leq s$,仍采用标准 S 型定值速度控制策略驱动机器人进行预设轨迹的动态跟踪;

(2)当 $2s_{13} \leq s < 2s_{123}$,由式(5)可知在给定路径内可以达到最大加速度 a_m ,但无法加速到最大速度 v_m 而进入匀速阶段,故 S 型最大速度 v_m 修正为 v_{new} 如下:

$$v_{new} = \frac{-\frac{a_m^2}{J} + \sqrt{(\frac{a_m^2}{J})^2 + 4a_m s}}{2} \quad (6)$$

则修正前、后速度曲线如图 5 所示。



(a) Standard S-type speed curve (b) Corrected curve

图 5 修正前后 S 型控制速度曲线

Fig. 5 S-type speed curve before and after correction

基于上述修正机制,速度自适应规划步骤如下:

Step1:在预设路径轨迹上共采样 n 个位置点, $P_o(x_o, y_o, z_o)$ 和 $P_i(x_i, y_i, z_i)$ 分别为机器人初始位置原点和路径轨迹上第 $i(i=1, 2, \dots, n)$ 点得空间理论坐标,基于运动学反解控制机器人进行轨迹跟踪;

Step2:依据机器人系统设定的最大速度 v_m ,最大加速度 a_m 和加加速度 J 等参数值进行快速判定,是否修正最大速度参数,修正后最大速度为 v_{new} ;

Step3:设采样时间为 T_c , n 为采样点个数,则可获取第 i 个采样点在 $t = iT_c$ 时刻的速度和加速度,进而可计算出该位置点坐标;

Step4:依据 Step2 中确定的控制参数应用激光跟踪仪对机器人终端进行动态跟踪,并记录 Step1 中轨迹上各理论采样位置点所对应的实际空间坐标 $P_i^e(x_i^e, y_i^e, z_i^e)$,则第 i 点跟踪误差为:

$$\Delta P_i = \sqrt{(x_i^e - x_i)^2 + (y_i^e - y_i)^2 + (z_i^e - z_i)^2} \quad (7)$$

Step5:机器人实际速度 $v_e(t)$ 可由传感器反馈数据获得,则任意时刻 t 的速度误差 $\Delta v(t) =$

$v_c(t) - v(t)$;

Step6: 采用梯型控制策略进行上述轨迹跟踪, 并记录对应采样点数据。

3.2 实验

机器人初始位置为 $P_0(0, 0, -0.4)$, 相关控制参数如表 3 所示, 直线轨迹跟踪在相关文献已做了大量研究, 这里不再重复。对 xoy 平面上两个不同半径的圆轨迹进行动态跟踪实验, 圆心均为初始位置点 P_0 , 圆半径分别为 0.4 m 和 0.1 m, 其对应轨迹长度 s 分别为 2.512 m 和 1.256 m。

基于预设轨迹通过快速计算和判定, 机器人可以加速到最大速度且能够保持速度控制曲线的对称分布。图 7 是第一条轨迹即半径为 0.4 m 圆形路径的跟踪情况, 基于激光跟踪仪获取的空间采样点位置如图 7(a), 拟合给出了梯型和常规 S 型控制策略下机器人实际与理论采样点分布。

图 7(b) 实际跟踪轨迹可以看出: S 型控制策略对于曲线轨迹跟踪精度明显优于梯型控制策略。采用梯型控制机器人的跟踪轨迹反映出由于加减速引起的速度突变导致跟踪精度较差且轨迹整体平滑性不如 S 型速度算法; 图 8 是机器人跟踪误差曲线, 从误差曲线可知: S 型控制下机

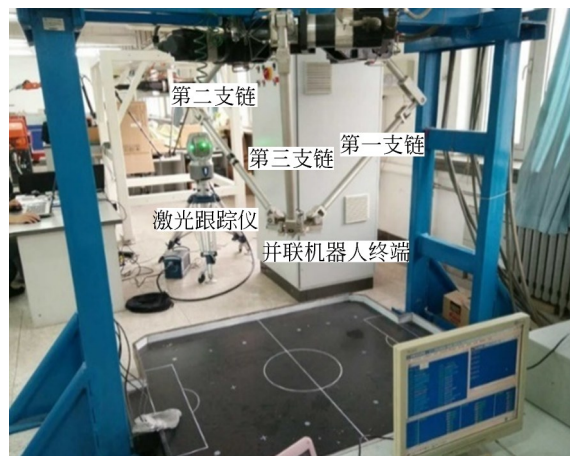


图 6 3-RRRU 并联机器人轨迹跟踪实验

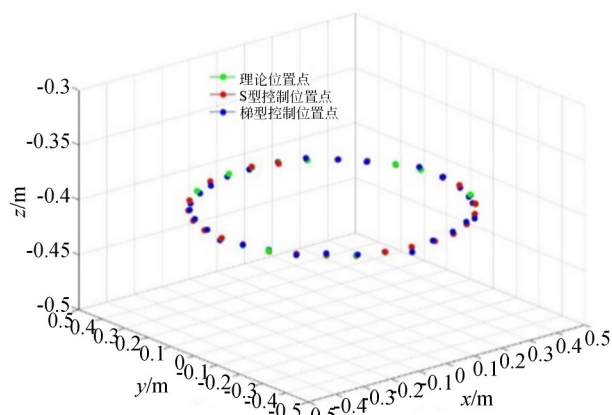
Fig. 6 Trajectory tracking experiment of 3-RRRU parallel robot

器人的位置误差跟踪曲线不存在尖峰值, 表明整个路径下机器人运动的平稳性良好, 梯型控制由于速度突变产生的最大位置误差达到 4.513 mm, 是 S 型控制策略的 3 倍; 此外, 从 x, y 和 z 方向误差曲线反映机器人在 z 向误差明显小于 x 和 y 方向, S 型 z 向误差分布在 $-1 \sim 1$ mm, 梯型最大误差约是 S 型控制策略的 2 倍; 由于并联机器人

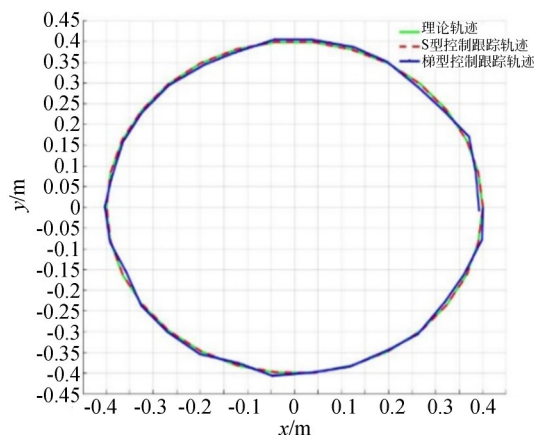
表 3 机器人控制参数

Tab. 3 Control parameters of robot

| S 型速度规划控制参数 | 加加速度 $J/(m \cdot s^{-3})$ | 最大加速度 $a_m/(m \cdot s^{-2})$ | 最大速度 $v_m/(m \cdot s^{-1})$ | 采样时间 T_c/s |
|-------------|---------------------------|------------------------------|-----------------------------|--------------|
| 设定值 | 100.000 | 8.000 | 2.000 | 0.01 |



(a) 空间位置点分布
(a) Distribution of space points



(a) 机器人轨迹
(a) Trajectory of robot

图 7 空间位置点分布和轨迹跟踪

Fig. 7 Distribution of space points and trajectory tracking

采用三支链对称设计,存在多支链闭环约束效应,故两种控制策略下 x 和 y 向跟踪误差分布也

基本一致;若单向误差极大表明机器人结构组装存在很大的误差,需要对支链重新定位和安装。



图 8 S型和梯型速度规划下的位置跟踪误差

Fig. 8 Position tracking error under S-type and ladder type velocity planning

图 8 表明:S型速度规划策略对轨迹跟踪时具有良好的平稳性,加、减速转变时速度过渡平滑,整体误差分布在 0.225~1.615 mm,且没有明显尖峰。

为了测试S型控制策略加入自适应修正机制

后控制策略的有效性和可行性,设计第二次路径规划即半径为 0.1 m 的圆形轨迹,通过修正计算公式,获得优化后的最大速度为 1.944 m/s,如表 4 所示,与预设 2 m/s 最大速度很接近,故下面测试了最大速度修正前、后机器人的动态跟踪误差。

表 4 不同轨迹下速度修正

Tab. 4 Velocity correction under different trajectories

| 序号 | 圆轨迹半径/m | 轨迹长度 s /m | s_{123} /m | s_{13} /m | $v_m/(m \cdot s^{-1})$ | $v_{new}/(m \cdot s^{-1})$ | 圆心坐标/m |
|----|---------|-------------|--------------|-------------|------------------------|----------------------------|--------------|
| 1 | 0.4 | 2.512 | 0.330 | 0.051 | 2.000 | × | (0, 0, -0.4) |
| 2 | 0.1 | 1.256 | 0.330 | 0.051 | × | 1.944 | (0, 0, -0.4) |

从图 9(a)中实际跟踪位置点分布情况发现,最大速度修正后采样点整体跟踪精度优于修正前,而通过拟合后的跟踪轨迹不难看出,修正前的跟踪轨迹起始点和终点位置误差明显较大;虽

然修正后在最大速度位置点与修正前跟踪误差并不明显,但是在轨迹终点机器人速度未减速到零而具有一定的惯性速度,产生冲击效应导致起始点和终点位置偏差很大。

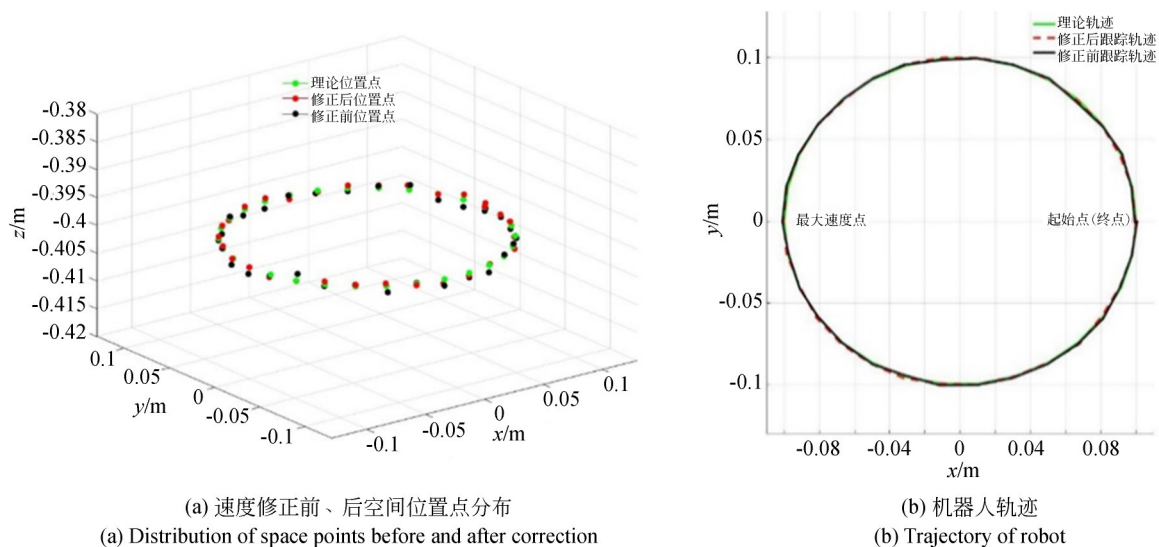


图 9 速度修正前后空间位置点分布和轨迹跟踪

Fig. 9 Distribution of position points and trajectory tracking before and after velocity correction

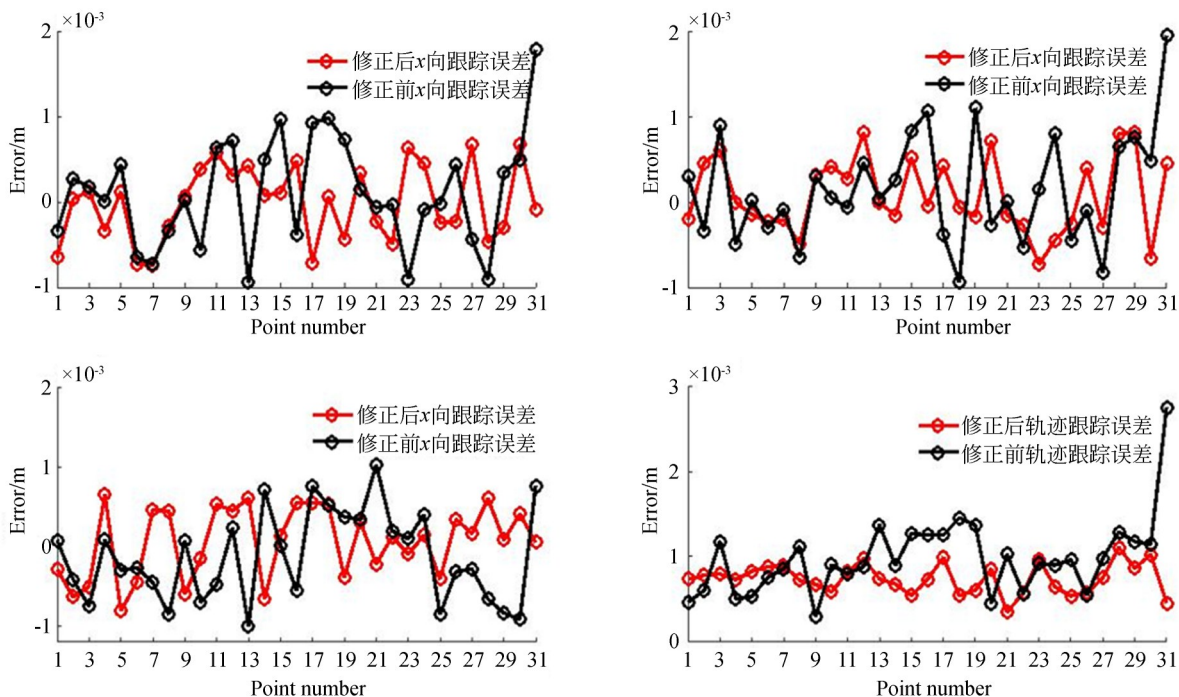


图 10 S型控制速度修正前后位置跟踪误差

Fig. 10 Tracking error before and after speed correction by S-type control

由图 10 和表 5 数据可知:速度修正后机器人整体路径的跟踪精度优于修正前,二者误差曲线中误差尖峰很少,表明速度过渡平滑性良好;但修正前机器人在轨迹终点处产生最大误差,表明机器人停止时因具有较大惯性速度而呈现明显

的冲击晃动即冲击效应,势必产生误差尖峰,对于航空航天和船舶制造等高精度领域而言是非常危险的;第二次实验预设轨迹是周长为 0.628 m 的圆,修正前机器人加速到最大速度时其运动距离达到 0.330 m,由于 S 型速度控制曲线是呈

表5 修正前后位置误差

Tab. 5 Error before and after correction

| 参数 | 最大速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) | 轨迹跟踪最大 误差/mm | 轨迹跟踪最小 误差/mm | 终点位置 误差/mm | 加速段 距离/m |
|-----|---|-----------------|-----------------|---------------|-------------|
| 修正前 | 2.000 | 2.676 | 0.215 | 2.676 | 0.330 |
| 修正后 | 1.944 | 1.125 | 0.222 | 0.382 | 0.314 |

对称分布,故在机器人达到终点时,速度并未由减减速阶段平滑过渡为零,产生明显的位置尖峰误差,高达2.676 mm;修正后其位置最大误差仅为1.125 mm,起点和终点位置跟踪误差分别为0.722 mm和0.382 mm,位置相对误差为0.34 mm,表明机器人有效消除了上述尖峰误差。

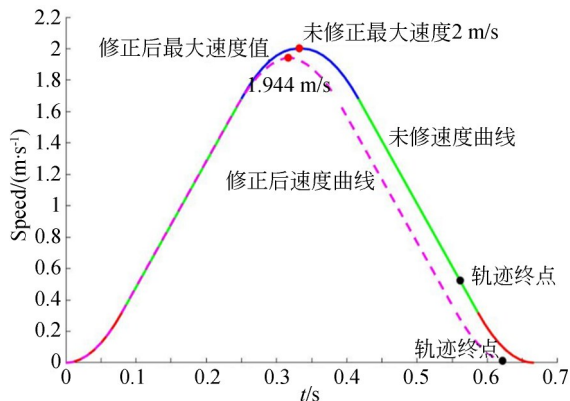


图11修正前、后速度曲线

Fig. 11 Velocity curve before and after correction

图11是机器人最大速度修正后速度控制曲线,机器人控制仍采用预设最大速度值,虽然速度增加到了2 m/s,但是按原有加加速度和加速度进行减速时,在匀减速阶段已到达预设轨迹终点,此时具有一定的惯性速度,停止时势必出现

误差尖峰,这与图10所得结论一致;

不难发现,修正后的最大速度为1.944 m/s。虽然略小于预设值2 m/s,但终点位置误差降低了一个数量级,末端控制平稳性大幅提高,有效解决定值控制方式下因速度参数设定不合理而导致机器人末端常出现冲击效应的问题。

4 结论

S型速度控制策略相比梯型控制具有良好的跟踪精度和平稳性。梯型速度控制下位置跟踪曲线存在多个误差尖峰,其最大误差达到4.513 mm;S型速度规划策略下的位置和速度曲线更为平滑,最大位置误差仅为梯型控制的1/3;

在较短轨迹下,修正前机器人在轨迹末端存在明显的冲击效应,其最大位置误差高达2.676 mm;修正后最大误差为1.125 mm,且机器人终点位置误差仅为0.382 mm,相比修正前降低了一个数量级;

机器人路径变化时,较短轨迹下仍采用常规定值控制,使得预设最大速度值过大进而导致机器人产生末端冲击效应;

引入速度自适应修正机制,有效解决了机器人的冲击效应问题,大幅提高了机器人的动态跟踪精度和平稳性。

参考文献:

- [1] 田小玲. 基于末端圆周标定的软体机器人刚度独立控制研究[J]. 电子测量技术, 2019(6):105-109. TIAN X L. Research on independent stiffness control of soft robot based on end cylindrical calibration [J]. *Electronic measurement technology*, 2019(6): 105-109. (in Chinese)
- [2] NGUYEN H N, ZHOU J, KANG H J. A calibration method for enhancing robot accuracy through integration of an extended Kalman filter algorithm and

- an artificial neural network [J]. *Neurocomputing*, 2015, 151:996-1005.
- [3] JOUBAIR A, BONEV I A. Kinematic calibration of a six-axis serial robot using distance and sphere constraints [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 77(1):515-523.
- [4] 许允斗, 王超, 赵春霖, 等. 2RPU/UPR+RP五自由度混联机器人参数标定研究[J]. 光学精密工程, 2020, 28(1):119-129. XU Y D, WANG CH, ZHAO CH L, et al. Pa-

- parameter calibration of five degree of freedom hybrid robot 2RPU/UPR+RP[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(1):119-129. (in Chinese)
- [5] 余跃庆, 田浩. 运动副间隙引起的并联机器人误差及其补偿[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(5):1331-1339.
- YU Y Q, TIAN H. Error and compensation of parallel robot with joint clearances[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(5):1331-1339. (in Chinese)
- [6] HU J, XIAO L J, WANG Y H, *et al.*. An optimal feedrate model and solution algorithm for a high-speed machine of small line blocks with look-ahead[J]. *The international journal of advanced manufacturing technology*, 2006, 28(10): 930 - 935.
- [7] 赵磊, 赵新华, 周海波, 等. 并联测量机柔性动力学建模与误差耦合[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(10):2471-2479.
- ZHAO L, ZHAO X H, ZHOU H B, *et al.*. Flexible dynamic modeling and error coupling of parallel measuring machine [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(10):2471-2479. (in Chinese)
- [8] 陆艺, 于丽梅, 郭斌. 基于封闭尺寸链的工业机器人结构参数标定[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(2): 38-46.
- LU Y, YU L M, GUO B. Calibration of industrial robot structure parameters based on closed dimensional chain[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(2): 38-46. (in Chinese)
- [9] 赵新华, 栾倩倩, 赵磊, 等. 3-RRRU 并联机器人运动学建模与误差分析[J]. *机械设计与制造*, 2020(1):274-280.
- ZHAO X H, LUAN Q Q, ZHAO L, *et al.*. Kinematics modeling and error analysis of 3-RRRU parallel manipulator[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2020(1):274-280. (in Chinese)
- [10] 王雷, 石鑫. 基于改进蚁群算法的移动机器人动态路径规划[J]. *南京理工大学学报*, 2019, 43(6):700-707.
- WANG L, SHI X. Dynamic path planning of mobile robot based on improved ant colony algorithm [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2019, 43(6):700-707. (in Chinese)
- [11] 孙波, 姜平, 周根荣, 等. 改进遗传算法在移动机器人路径规划中的应用[J]. *计算机工程与应用*, 2019, 55(17):162-168.
- SONG B, JIANG P, ZHOU G R, *et al.*. Application of improved genetic algorithm in path planning of mobile robots[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2019, 55(17):162-168. (in Chinese)
- [12] JH HAN, DJ CHOI, SU PARK, *et al.*. Hyperparameter optimization using a genetic algorithm considering verification time in a convolutional neural network[J]. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2020, 15(2):721-726.
- [13] GIBERTI H, SBAGLIA L, URGIO M. A path planning algorithm for industrial processes under velocity constraints with an application to additive manufacturing [J]. *Journal of manufacturing systems*, 2017, 43: 160-167.
- [14] ABU-DAKKA F J, ASSAD I F, ALKHDOUR R M, *et al.*. Statistical evaluation of an evolutionary algorithm for minimum time trajectory planning problem for industrial robots[J]. *The international journal of advanced manufacturing technology*, 2017, 89(1-4): 389-406.
- [15] 李振娜, 王涛, 王斌锐, 等. 基于带约束 S 型速度曲线的机械手笛卡尔空间轨迹规划[J]. *智能系统学报*, 2019, 14(4): 655 - 661.
- LI ZH N, WANG T, WANG B R, *et al.*. Trajectory planning for manipulator in Cartesian space based on constrained S-curve velocity[J]. *CAAI transactions on intelligent systems*, 2019, 14(4): 655-661. (in Chinese)
- [16] 史步海, 孙会会. 基于新 S 型速度规划的 B 样条曲线算法研究[J]. *机床与液压*, 2016, 2016, 44(15): 72-79.
- SHI B H, SUN H H. B-spline curve algorithm research based on new S velocity planning[J]. *Machine tool and hydraulics*, 2016, 2016, 44(15): 72-79. (in Chinese)
- [17] 张娜, 李娟霞, 王欢. NURBS 曲线 S 型加减速反向修正插补算法研究[J]. *数控技术*, 2019, (9): 162-167.
- ZHANG N, LI J X, WANG H. Research on the algorithm of NURBS curve reverse correction interpolation with S-type acceleration and deceleration control[J]. *NC Technology*, 2019, (9): 162-167. (in Chinese)
- [18] 龚兰芳, 曹成涛, 许伦辉. 下肢康复训练机器人协作控制与 S 型规划算法研究[J]. *中国机械工程学报*, 2019, 17(6):482-487.
- GONG L F, CAO CH T, XU L H. Research on collaborative control of lower limb rehabilitation

- training robot and S-type programming algorithm [J]. *Chinese Journal of Construction Machinery*, 2019, 17(6):482-487. (in Chinese)
- [19] 栾倩倩. 3-RRRU 并联机器人运动学误差建模及自标定方法研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2018. LUAN Q Q. Research on Kinematics Error Modeling and Self - Calibration Technology of 3-RRRU Parallel Manipulator[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [20] 王文瑞, 刘克俭, 顾金麟, 等. 有关节约束超冗余机械臂的增益优化轨迹规划[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(5):1075-1086.
- WANG W R, LIU K J, GU J L, *et al.*. Gain-optimization trajectory planning method for hyper-redundant manipulator with joint constraints [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(5): 1075-1086. (in Chinese)
- [21] 张旭, 曾祥鑫, 郎博. 基于控制变量参数化方法的自由漂浮空间机器人路径规划研究[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(2): 372-378. ZHANG X, ZENG X X, LANG B. Path planning of free-floating space robot based on control variable parameterization method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(2): 372-378. (in Chinese)

作者简介:



赵新华(1962—),男,博士,吉林辽源人,教授,博士生导师,2000年于天津大学获得博士学位,主要研究方向为机器人技术和机电一体化技术。E-mail: xinhua Zhao@tjut. edu. cn



赵磊(1983—),男,吉林辽源人,博士,副教授,2012年毕业于天津大学获得博士学位,主要研究方向为机器人和机电一体化技术研究。E-mail: lei-zhao@tjut@163. com