

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.07.002

柔索驱动混联机器人的结构设计与研究

王姝舒¹, 许的兵²

(1. 合肥工业大学 工程素质教育中心, 安徽 宣城 242000; 2. 安徽合力股份有限公司 工业车辆研究院, 安徽 合肥 230601)

摘要:文章针对传统串联机器人转动惯量大、刚度小等问题提出并设计了一款柔索驱动混联机器人。利用共轴球面并联机构通过走线设计将驱动单元安装在基座实现柔索驱动, 模块化设计实现串、并联机器人的构型; 然后根据机械结构和运动特性, 利用 SD-H 法和矢量法对混联机器人进行运动学建模并分析验证; 仿真实验采用 B 样条曲线进行轨迹规划, 研究机器人关节柔顺性。实验结果表明, 柔索驱动混联机器人具有较小的转动惯量、较好的柔顺性和较大的刚度。

关键词:混联机器人; 柔索驱动; 运动学; 轨迹规划

中图分类号: TP242.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2023)07-0873-07

Structure design and research of flexible cable-driven hybrid robot

WANG Shushu¹, XU Debing²

(1. Engineering Quality Education Center, Hefei University of Technology, Xuancheng 242000, China; 2. Institute of Industrial Vehicles, Anhui Heli Co., Ltd., Hefei 230601, China)

Abstract: In this paper, a flexible cable-driven hybrid robot is proposed and designed to solve the problems of large moment of inertia and small stiffness of traditional series robots. Firstly, the coaxial spherical parallel mechanism is designed by installing the driving unit on the base to realize the flexible cable drive, and the configuration of the series-parallel robot is realized by modular design. Then, according to the mechanical structure and motion characteristics, the kinematic modeling of the hybrid robot is carried out by using SD-H method and vector method. Finally, B-spline curve is used for trajectory planning to study the flexibility of robot joints. Experiments show that the flexible cable-driven hybrid robot has smaller moment of inertia, better flexibility and larger stiffness.

Key words: hybrid robot; flexible cable-driven; kinematics; trajectory planning

0 引言

随着机器人技术的快速发展, 机器人被广泛地应用于工业、服务业、家庭等领域^[1]。应用于这些领域的刚性机器人一般将电机安装在关节处直接驱动关节转动, 导致存在转动惯量大的缺点^[2], 为了解决这个问题, 人们将关注点转移到柔索驱动方式。从 20 世纪 90 年代日本学者在国际机器人与自动化会上提出使用柔索驱动方式的并联机器人 FALCON-7 之后, 柔索驱动的机器人得到了

广泛关注与发展^[3-6]。文献[3]研制了一款绳驱动混联机器人, 该团队在机器人控制策略、张力分析、结构设计、动力学分析等方面开展了诸多研究; 实验证明该款混联机器人的各项性能效果好, 但由于结构和走线方式比较复杂等缺点, 使其应用范围受到限制。文献[4]研制了一款新型的四自由度并联机器人, 对并联机器人的运动学采用螺旋理论分析, 该研究成果对于推动并联机器人应用具有重要意义。文献[5]利用球面解析理论分析机构空间位形, 得到机构多个转动关节的

收稿日期: 2023-05-05; 修回日期: 2023-06-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52175013)

作者简介: 王姝舒(1994—), 女, 安徽岳西人, 合肥工业大学助理工程师。

位置矢量,分析了球面并联机构动力学的性能指标。文献[6]研制了一款根据球面并联机构设计的数控回转台,该回转台设计可以实现较高精度的运转。

针对串联机器人存在刚度小、转动惯量大的问题,本文提出将共轴球面并联机构用做机械臂的腕部部位,并将共轴球面并联机构与串联机器人组合成串、并混联的结构形式和采用柔索驱动的方式,使柔索驱动混联机器人具有转动惯量小、工作空间大、累积误差较小、刚度较大的优点。针对球面并联机构结构设计和运动学复杂问题,提出共轴球面并联机构的柔索驱动设计方案和基于多支链几何约束的运动学数值解法。

1 混联机器人结构设计

本文柔索驱动混联机器人本体组成包括腰部关节、大臂、小臂、末端共轴球面并联机构、张紧器、驱动机构、导向滑轮等。其中:串联机器人作为混联机器人的一部分具有十分重要的作用,本文串联机器人决定整个混联机器人的有效工作空间;共轴球面并联机构为混联机器人的腕部关节,可以实现混联机器人末端姿态的改变。

1.1 串联结构设计

本文串联机器人具有三自由度^[7],采用模块化设计方案。串联机器人通过柔索驱动的方式,将电机和滚珠丝杠等传动机构安装在基座,以此来降低机器人的转动惯量和提高机器人人机交互安全性。

串联机器人驱动方式为:电机与滚珠丝杠传动机构的输入轴相连,通过在腰部关节、大臂、小臂侧板位置设计并安装滑轮对绳索进行导向。由于绳索是柔性介质,只能承受单向力,为了实现单电机带动串联机器人单个关节的正反转,采用类似于带传动的闭环绳驱动方案。同时为了防止绳索在传动过程中出现松动现象,采用S型安装和在闭环绳索中采用鱼眼螺钉的张紧装置。具体的三自由度串联机器人三维模型设计如图1所示,其中关节3走线示意图如图2所示,关节2和关节1走线方案与关节3类似。

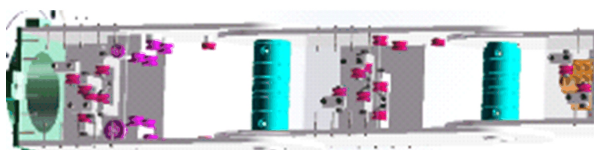


图1 三自由度串联机器人

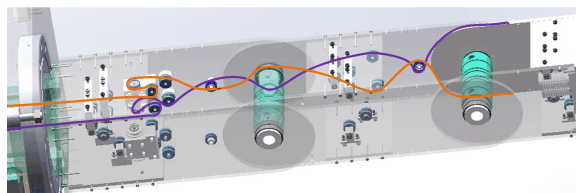
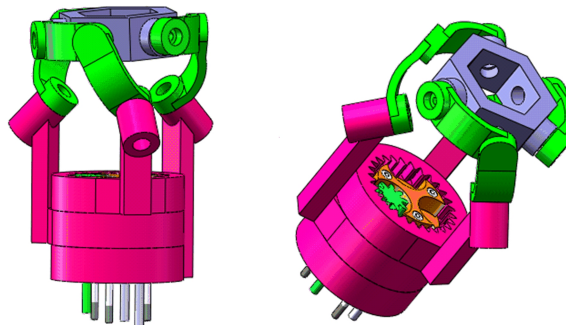


图2 串联机器人关节3走线

1.2 共轴球面并联机构结构设计

球面并联机构是一种特殊的并联机构,可以作为串联机器人的腕关节。本文混联机器人的球面并联机构是共轴球面并联机构,即3条支链近端杆的转动副中心轴线共线,由静平台、动平台和3条均匀分布支链共同组成,具体设计结构如图3所示。



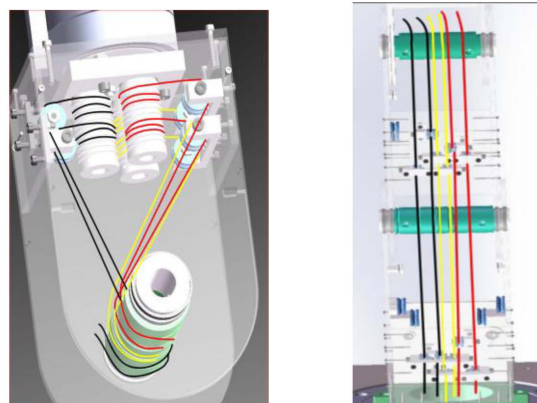
(a) 正视图

(b) 斜视图

图3 共轴球面并联机构

共轴球面并联机构采用的柔索驱动方式如图4所示。

安装在基座的电机与滚珠丝杠驱动机构的输入轴相连,通过关节1、关节2、关节3内部走线设计和滑轮导向作用,带动共轴球面并联机构的齿轮轴转动,进而齿轮轴与共轴球面并联机构近端杆发生内齿轮啮合驱动。



(a) 关节3走线

(b) 关节1、关节2走线

图4 共轴球面并联机构在关节1、关节2、关节3走线示意图

由于绳索具有单向受力的特性,为实现单电机带动共轴球面并联机构单个关节正反转,采取类似于带传动的闭环绳驱动的布线方案,该方案具有各根绳索之间相互独立、传动稳定的优点。因为绳索是柔性介质,只能单向受力,所以共轴球面并联机构采用 S 型闭环走线,并且在闭环绳索中间安装鱼眼螺钉进行张紧,通过螺钉的旋转维持绳索的张紧。

1.3 整体设计

本文柔索驱动混联机器人由串联机器人和共轴球面并联机构共同组成,其组成方案有 2 种,即上串下并形式和上并下串形式。上串下并方案是指将共轴球面并联机构作为基座,串联机器人连接在共轴球面并联机构之上形成混联机器人。本文采用的是上并下串的方案,该方案是将共轴球面并联机构作为腕部连接在串联机器人上形成混联机器人,这种组成方案具有结构稳定性好、工作空间大以及串联累积误差可以得到共轴球面并联机构的补偿等优点。

混联机器人采用增材制造实现机器人的轻量化,具体实物效果图如图 5 所示。机器人各个关节均采用模块化设计,使零部件实际装卸和绳索的安装、更换更加简单方便。



图 5 混联机器人实物图

2 运动学分析

2.1 串联机器人运动学分析

运动学建模是分析混联机器人工作空间、奇异性的前提,对于混联机器人的研究十分重要。因为本文串联机器人关节 3 末端与共轴球面并联机构输入端安装是重合的,所以本文柔索驱动混联机器人的运动学建模采取分开分析的方法。

串联机器人采用 SD-H 法进行运动学分析。首先,根据转动关节连杆 SD-H 坐标系建立规则建立串联机器人坐标系,具体如图 6 所示。图 6 中:Z 轴位于转动关节轴线上;X 轴为 Z 轴的公垂线;Y 轴由 X 轴与 Z 轴确定。

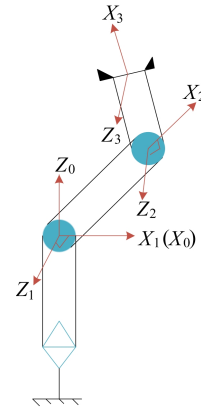


图 6 串联机器人 SD-H 坐标系简图

根据 SD-H 法得到串联机器人连杆参数,见表 1 所列。表 1 中: θ 表示关节角; α 表示连杆扭转角; d 表示连杆偏距; a 表示连杆长度,根据本文串联机器人结构设计参数, a_2 、 a_3 分别为 272、284 mm。

表 1 串联机器人连杆参数

连杆编号	θ	α	a	d
1	θ_1	$\pi/2$	0	0
2	θ_2	0	a_2	0
3	θ_3	0	a_3	0

由 SD-H 法可知相邻连杆坐标系之间的齐次变换矩阵表达式为:

$${}^i T = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

因此 3-DOF 串联机器人的末端姿态 ${}^0 T$ 根据式(1)可得:

$${}^0 T = \begin{bmatrix} c_1 c_{23} & -c_1 s_{23} & s_1 & c_1 (a_2 c_2 + a_3 c_{23}) \\ s_1 c_{23} & -s_1 s_{23} & -c_1 & s_1 (a_2 c_2 + a_3 c_{23}) \\ s_{23} & c_{23} & 0 & a_2 s_2 + a_3 s_{23} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中: $c_1 = \cos \theta_1$; $c_{23} = \cos(\theta_2 + \theta_3)$; $s_1 = \sin \theta_1$;

$s_2 = \sin \theta_2$; $s_{23} = \sin(\theta_2 + \theta_3)$ 。其他三角函数缩写类似表示。

对于串联机器人逆运动学的求解存在多解形式,实际中一般选择最优解。本文采用解析法求解串联机器人逆运动学。其中对于关节角 3、关节角 2,由式(2)可得:

$$\begin{cases} p_x = c_1(a_2c_2 + a_3c_{23}), \\ p_y = s_1(a_2c_2 + a_3c_{23}), \\ p_z = a_2s_2 + a_3s_{23} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} p_z = a_2s_2 + a_3s_{23}, \\ p_x^2 + p_y^2 = (a_2c_2 + a_3c_{23})^2 \end{cases} \quad (4)$$

其中, p_x 、 p_y 、 p_z 为关节末端位置矢量在 3 个坐标轴方向上的分量。

令式(3)进行平方和运算,等式左边等于右边可得:

$$\begin{cases} \theta_{3,1} = \operatorname{atan} 2(\sqrt{1-c_3^2}, c_3), \\ \theta_{3,2} = -\operatorname{atan} 2(\sqrt{1-c_3^2}, c_3) \end{cases} \quad (5)$$

利用消元法,由式(4)可得:

$$\begin{cases} c_2 = \frac{\pm \sqrt{p_x^2 + p_y^2}(a_2 + a_3c_3) + p_z a_3 s_3}{a_2^2 + a_3^2 + 2a_2 a_3 c_3}, \\ s_2 = \frac{\pm \sqrt{p_x^2 + p_y^2} a_3 s_3 + p_z (a_3 c_3 + a_2)}{a_2^2 + a_3^2 + 2a_2 a_3 c_3} \end{cases} \quad (6)$$

关节角 2 是在关节角 3 的基础上得到的,而关节角 3 具有 2 组解,理论上会导致关节角 2、关节角 3 的解有 8 种不同的组合情况,但满足式(6)中最后一个方程的情况只有 4 种,即

$$\begin{cases} \theta_{2,1} = \operatorname{atan} \frac{p_z(a_2 + a_3c_3) - a_3 s_{3,1} \sqrt{p_x^2 + p_y^2}}{(a_2 + a_3c_3) \sqrt{p_x^2 + p_y^2} + p_z a_3 s_3}, \\ \theta_{2,2} = \operatorname{atan} \frac{p_z(a_2 + a_3c_3) + a_3 s_{3,1} \sqrt{p_x^2 + p_y^2}}{-(a_2 + a_3c_3) \sqrt{p_x^2 + p_y^2} + p_z a_3 s_3}, \\ \theta_{2,3} = \operatorname{atan} \frac{p_z(a_2 + a_3c_3) - a_3 s_{3,2} \sqrt{p_x^2 + p_y^2}}{(a_2 + a_3c_3) \sqrt{p_x^2 + p_y^2} + p_z a_3 s_3}, \\ \theta_{2,4} = \operatorname{atan} \frac{p_z(a_2 + a_3c_3) + a_3 s_{3,2} \sqrt{p_x^2 + p_y^2}}{-(a_2 + a_3c_3) \sqrt{p_x^2 + p_y^2} + p_z a_3 s_3} \end{cases} \quad (7)$$

其中: $s_{3,1} = \theta_{3,1}$; $s_{3,2} = \theta_{3,2}$ 。关节角 1 的求解由式(3)可得:

$$\begin{cases} \theta_{1,1} = \operatorname{atan} 2(p_y, p_x), \\ \theta_{1,2} = \operatorname{atan} 2(-p_y, -p_x) \end{cases} \quad (8)$$

2.2 共轴球面并联机构运动学分析

在动平台初始姿态下建立共轴球面并联机构坐标系^[8]。机构坐标系原点 O 定义在多个转动关节轴线的交点处; Z 轴垂直于基底,方向向上; X 轴与 Z 轴相互垂直,方向指向动平台的对称中

线; Y 轴可由右手定则确定。球面并联机构坐标系简图如图 7 所示,各个转动关节回转轴线上的单位向量用 W 、 V 、 U 表示。

定义 α_1 表示向量夹角 $\langle W, U \rangle$, α_2 表示向量夹角 $\langle W, V \rangle$, α_3 表示单位向量 V_i ($i=1, 2, 3$) 中任意两者之间的夹角, β 表示向量夹角 $\langle V, U \rangle$, γ 为 U_i ($i=1, 2, 3$) 中任意两者之间的夹角。已知本文设计的共轴 3-RRR 球面并联机构的几何参数主要有 $\alpha_1 = 45^\circ$ 、 $\alpha_2 = 90^\circ$ 、 $\alpha_3 = 120^\circ$ 、 $\beta = 90^\circ$ 、 $\gamma = 0^\circ$, 输入轴的转动关节角为 θ_i ($i=1, 2, 3$)。当输入轴的输入角度为 θ_i 时, W_i 的坐标如下:

$$W_i = \begin{bmatrix} \sin \alpha_1 \cos(\zeta_i - \theta_i) \\ \sin \alpha_1 \sin(\zeta_i - \theta_i) \\ -\cos \alpha_1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中, $\zeta_i = 2(i-1)\pi/3$, $i=1, 2, 3$ 。

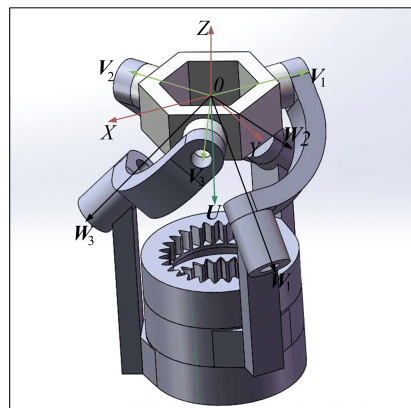


图 7 球面并联机构坐标系简图

共轴球面并联机构正运动学根据几何约束关系可得 9 个独立的约束方程如下:

$$\begin{cases} W_i \cdot V_i = \cos \alpha_2, & i=1, 2, 3; \\ V_i \cdot V_j = \cos \alpha_3, & j=1, 2, 3 \text{ 且 } i \neq j; \\ \|V_i\| = 1, & i=1, 2, 3 \end{cases} \quad (10)$$

非线性方程组可以采用数值求解方法通过 MATLAB 软件中的 `fsolve()` 函数进行求解。为了提高函数的计算精度,通过迭代法求得驻点的一个近似点,需要给定一个初始值。罗德里格斯旋转公式可以通过初始猜测值优化数值求解结果,初始值假设单位向量绕 Z 轴旋转了 $\phi = 10^\circ$, 可得罗德里格斯旋转公式如下:

$$W_{i,\text{rot}} = W_i \cos \phi + (W_i \times k) \sin \phi + k(k \cdot W_i)(1 - \cos \phi) \quad (11)$$

其中, $k = (0, 0, 1)$ 。

对于共轴球面并联机构逆解,根据式(10)中 1 个约束方程,通过万能公式化简可得:

$$A_i T_i^2 + 2B_i T_i + C_i = 0 \quad (12)$$

其中

$$\begin{cases} T_i = \tan \frac{\theta_i}{2}, \\ A_i = -v_{ix} \cos \zeta_i \sin \alpha_1 - v_{iy} \sin \zeta_i \sin \alpha_1 - \\ \quad v_{iz} \cos \alpha_i - \cos \alpha_2, \\ B_i = -v_{ix} \sin \zeta_i \sin \alpha_1 - v_{iy} \cos \zeta_i \sin \alpha_1, \\ C_i = v_{ix} \cos \zeta_i \sin \alpha_1 + v_{iy} \sin \zeta_i \sin \alpha_1 - \\ \quad v_{iz} \cos \alpha_i - \cos \alpha_2 \end{cases} \quad (13)$$

通过共轴球面并联机构正逆运动学模型可以编写 m 文件验证运动学模型的正确性。本文共轴球面并联机构采用 1-1-1 装配方式,即 3 条支链的远端杆都安装在近端杆的左侧,该安装类型的特点是逆解只能取正值这唯一解,在球面并联机构关节角度范围内随机取值可以验证正逆运动学存在唯一解,具体见表 2 所列。

表 2 球面并联机构逆运动学求解表

$[\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]$	$[5^\circ \ 10^\circ \ 25^\circ]$	$[15^\circ \ 25^\circ \ 35^\circ]$
n	$\begin{bmatrix} 0.093 \ 9 \\ -0.158 \ 2 \\ 0.846 \ 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.015 \ 5 \\ -0.178 \ 9 \\ 0.847 \ 2 \end{bmatrix}$
\mathbf{v}_1	$\begin{bmatrix} -0.237 \ 6 \\ -0.959 \ 2 \\ -0.153 \ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.423 \ 9 \\ -0.887 \ 7 \\ -0.179 \ 7 \end{bmatrix}$
\mathbf{v}_2	$\begin{bmatrix} 0.954 \ 7 \\ 0.293 \ 0 \\ -0.051 \ 2 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.996 \ 2 \\ 0.087 \ 5 \\ 0.000 \ 3 \end{bmatrix}$
\mathbf{v}_3	$\begin{bmatrix} -0.717 \ 1 \\ 0.666 \ 1 \\ 0.205 \ 4 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.572 \ 2 \\ 0.800 \ 0 \\ 0.180 \ 5 \end{bmatrix}$

2.3 整体运动学分析

因为第 3 关节末端坐标系与共轴球面并联机构的坐标系原点重合,并且两者坐标系的关系为串联机器人末端坐标系绕 Y 轴旋转 90° ,所以根据 2.1 节和 2.2 节,可得混联机器人的整体运动学模型为:

$$\mathbf{T} = {}^0_3\mathbf{T} \begin{bmatrix} \text{Rot}(y, 90^\circ) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

3 B 样条轨迹规划

3.1 轨迹规划

轨迹规划是机械臂运动控制的前提,对于机械臂的实际场景应用具有重要作用。轨迹规划分为 2 种,即在笛卡尔空间和关节空间下的规划。

由于在笛卡尔空间下轨迹规划的计算量大且实时控制不强,本文选择在关节空间下的轨迹规划。在关节空间下传统三次多项式插值轨迹规划方法虽然可以使机械臂满足位置和速度要求,但其加速度具有突变,会产生冲击和振动。为了使机械臂运动轨迹连续、光滑、无冲击,本文选择能够满足绝大多数使用场景且计算量不大的三次 B 样条曲线对本文机器人进行轨迹规划^[9-11]。由于 B 样条曲线具有分段处理能力,当机械臂轨迹规划需要修改其中一段轨迹时,该方法可以实现只需计算该段轨迹的控制点而不需要重新对整体轨迹进行规划计算。

B 样条曲线的 k 次($k+1$ 阶)递推表达式为:

$$C(t) = \sum_{i=0}^n D_i f_{i,k}(t) \quad (15)$$

其中: D_i ($i=0,1,\dots,n$)表示控制点且个数为 $n+1$,其共同组成特征多边形的顶点; $t_k \leq t \leq t_{k+1}$,表示函数的定义域; $f_{i,k}(t)$ 表示 B 样条曲线的基函数; k 为次数。

基函数的定义被更广泛接受的是 Cox-de Boor 递推公式,基于 Cox-de Boor 基函数的递推公式为:

$$f_{i,0} = \begin{cases} 0, & t_i \leq t \leq t_{i+1}; \\ 1, & \text{其他}; \end{cases}$$

$$f_{i,k} = \frac{t-t_i}{t_{i+k}-t_i} f_{i,k-1}(t) + \frac{t_{i+k+1}-t}{t_{i+k+1}-t_{i+1}} f_{i+1,k-1}(t) \quad (16)$$

式(16)递推中若出现 $0/0$ 的情况,则根据规定令 $0/0=0$ 。

3.2 轨迹规划仿真分析

本文选择三次 B 样条曲线进行混联机器人轨迹规划仿真实验,验证本文混联机器人位姿在关节空间下的灵活性和关节运动的柔顺性。

混联机器人要求轨迹规划经过 6 个路径点,相邻路径点之间的时间间隔为 4 s。根据混联机器人逆运动学分析可得 6 个关节转角在 6 个路径点的逆解,见表 3 所列。

表 3 混联机器人轨迹规划关节变量 单位:($^\circ$)

关节角	关节 1	关节 2	关节 3	关节 4	关节 5	关节 6
θ_1	0	10	30	70	40	20
θ_2	0	20	50	100	40	80
θ_3	0	10	40	80	50	20
θ_4	0	30	120	80	-40	-20
θ_5	0	40	150	90	40	-20
θ_6	0	30	60	150	70	10

本文机械臂轨迹规划总共形成 5 段轨迹,根据 B 样条曲线递推表达式和 6 个关节变量在路径点处逆解得到型值点,在 MATLAB 中编写 m 文件求得 B 样条曲线控制点,进而求得机械臂

各个关节 B 样条曲线轨迹表达式。

将数据导入 Origin 软件分析,可得 6 个关节的角度、角速度、角加速度等运动特性曲线,如图 8 所示。

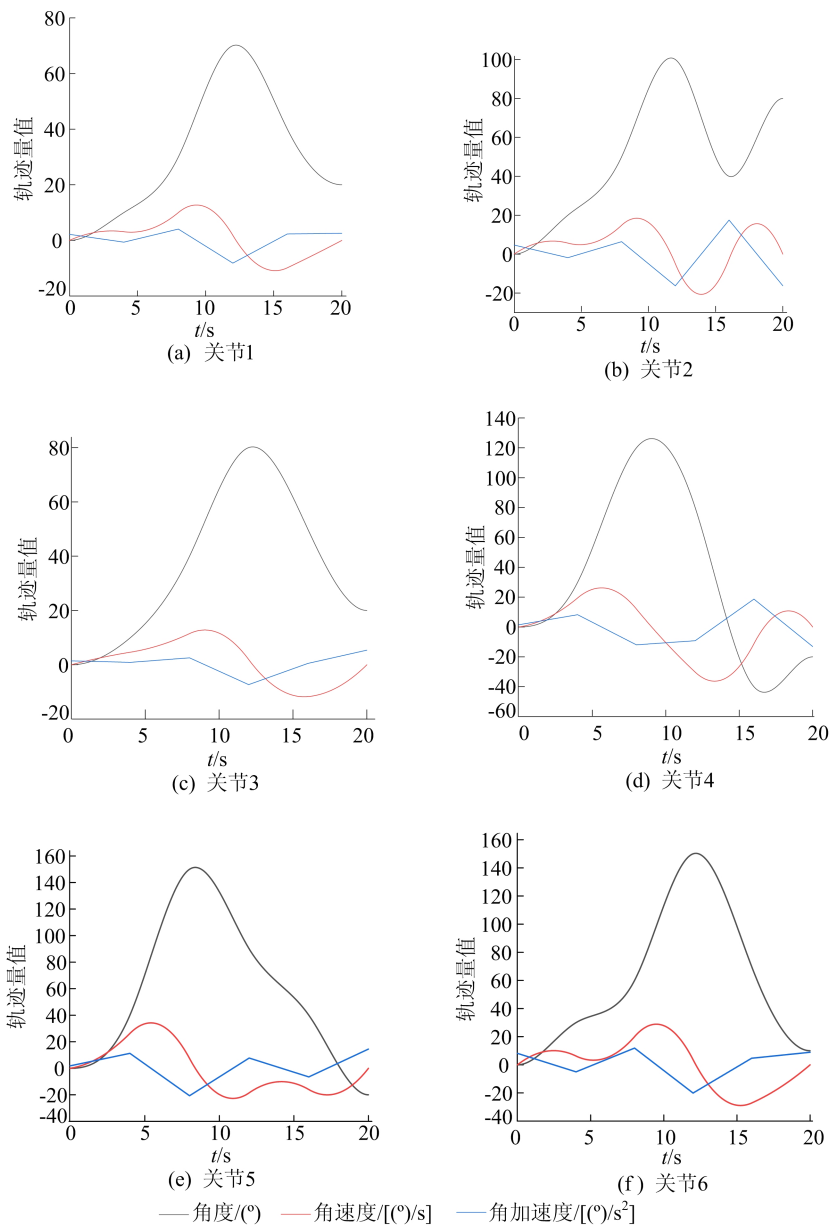


图 8 混联机器人运动特性曲线

柔索驱动混联机器人采用 B 样条曲线在经过 6 个路径点后得到的轨迹规划运动特性表明: 6 个关节角速度连续可导且角加速度无突变,有效避免了机械臂产生振动和冲击;6 个关节运动具有较好的柔顺性,在工作空间内混联机械臂具有良好的灵活性。

4 结 论

为了解决传统机械臂转动惯量大、刚度小、负载自重比小的问题,本文开展了以下研究工作:

1) 提出并设计了一款用共轴球面并联机构作为机械臂腕部关节的新型柔索驱动混联机器人,柔索驱动作为一种柔性介质,可以扩展新的驱动方式。增材制造的混联机械臂本体质量仅为 4.7 kg,实现了机械臂轻量化和低转动惯量,提高了机械臂人机交互的安全性。

2) 根据共轴球面并联机构几何约束关系和运动特性,采用矢量法对其正逆运动学进行了分析。

(下转第 885 页)

从表 3 可以看出,在仿真环境中,IWPA 规划的最优路径距离比 WPA 的短 1.7 m 左右,总转角度数小 45° ,从平均值和方差上可以看出 IWPA 寻优更加稳定、鲁棒性更好。从图 7 和图 8 可以看出 IWPA 规划的路径更加平滑,充分说明了 IWPA 在 AGV 路径规划上的有效性和稳定性。

4 结 论

本文在栅格法环境建模的基础上,针对 AGV 路径规划问题,提出了一种改进的狼群算法。该算法利用改进的 Sine 混沌映射进行种群的初始化和更新,提高了种群的多样性;探狼的随机游走策略,增强了算法搜索的随机性;在头狼的选择上引入 Metropolis 准则,提高了算法跳出局部最优解的能力;猛狼奔袭策略的改进有利于加快算法收敛。仿真实验表明,在 AGV 路径规划的问题上,IWPA 比 WPA 更加有效,具备一定的实用价值。

[参 考 文 献]

- [1] 魏彤,龙琛. 基于改进遗传算法的移动机器人路径规划[J]. 北京航空航天大学学报,2020,46(4):703-711.
- [2] 鲁飞. 基于改进蚁群算法的机械臂路径规划研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2021.
- [3] 王东风,孟丽. 粒子群优化算法的性能分析和参数选择[J]. 自动化学报,2016,42(10):1552-1561.
- [4] LI H, YANG S X, SETO M L. Neural-network-based path planning for a multirobot system with moving obstacles[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, 2009, 39(4): 410-419.
- [5] 吴虎胜,张凤鸣,吴庐山. 一种新的群体智能算法—狼群算法[J]. 系统工程与电子技术,2013,35(11):2430-2438.
- [6] 刘永兰,李为民,吴虎胜,等. 基于狼群算法的无人机航迹规划[J]. 系统仿真学报,2015,27(8):1838-1843.
- [7] 陈杰,薛雅丽,叶金泽. 基于改进狼群算法的多机协同目标分配研究[J]. 吉林大学学报(信息科学版),2022,40(1): 20-29.
- [8] 郭立婷. 基于自适应和变游走方向的改进狼群算法[J]. 浙江大学学报(理学版),2018,45(3):284-293.
- [9] 刘恺文,曹政才. 基于改进灰狼优化算法的自动化立体仓库作业能量优化调度[J]. 计算机集成制造系统,2020,26(2): 376-383.
- [10] ZHU X, CHEN L, TANG B, et al. Dynamic path planning for autonomous driving on various roads with avoidance of static and moving obstacles [J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2018, 100: 482-500.
- [11] 严周莉. AGV 的路径规划及运动控制研究[D]. 武汉:武汉大学,2018.
- [12] 刘金源,葛继科,唐籍涛. 一种基于改进型 Sine 映射的快速混沌图像加密算法[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版),2020,22(5):75-80.
- [13] 惠晓滨,郭庆,吴娉娉,等. 一种改进的狼群算法[J]. 控制与决策,2017,32(7):1163-1172.
- [14] 何庆,吴意乐,徐同伟. 改进遗传模拟退火算法在 TSP 优化中的应用[J]. 控制与决策,2018,33(2):219-225.

(责任编辑 李 凯)

(上接第 878 页)

3) 通过 B 样条轨迹规划算法实验验证了混联机器人在工作空间内具有较好的灵活性和各个关节运动的柔顺性。

实验研究表明,本文对于柔索驱动混联机器人的设计和广泛应用具有一定的参考和推动作用。

[参 考 文 献]

- [1] 张波,战红春,赵明扬,等. 柔索驱动三自由度球面并联机构运动学与静力学研究[J]. 机器人,2003,25(3):198-200,204.
- [2] 赵宏宇. 一种串并混联机械臂结构设计及运动学研究[D]. 成都:成都理工大学,2017.
- [3] 陈伟海,游贤强,崔翔,等. 绳驱动拟人臂机器人的动力学建模及张力分析[J]. 北京航空航天大学学报,2013,39(3): 335-339.
- [4] 李艳文,黄真,王鲁敏,等. 新型 4 自由度并联机器人运动学分析[J]. 机械工程学报,2008,44(10):66-71,76.
- [5] 沈寂. 一种球面并联机构的动力学性能分析及仿真[D]. 南昌:华东交通大学,2013.
- [6] 曾宪菁,黄田,曾子平,等. 基于三自由度球面并联机构数控回转台的机械设计[J]. 机器人技术与应用,2000(4): 23-26.
- [7] 王杰. 六自由度机器人本体设计及轨迹规划与虚拟仿真[D]. 合肥:合肥工业大学,2015.
- [8] TURSUNBEK I, SHINTEMIROV A. Infinite rotational motion generation and analysis of a spherical parallel manipulator with coaxial input axes[J]. Mechatronics: The Science of Intelligent Machines, 2021(78):9-24.
- [9] 李国洪,王远亮. 基于 B 样条和改进遗传算法的机器人时间最优轨迹规划[J]. 计算机应用与软件,2020,37(11):215-223,279.
- [10] 李朋阳,高建设,顾昌利. 一种串并混联的上肢康复机器人轨迹规划研究[J]. 机械设计与制造,2022(6):265-269,273.
- [11] 赵东捷,杜兆才,刘李明. 一种柔索驱动超冗余度机器人结构及驱动机构设计[J]. 装备制造技术,2021(12):1-5,19.

(责任编辑 胡亚敏)