文章编号:1674-2869(2024)02-0203-06

绳驱并联机器人的滑轮运动学研究

李 梦,叶 姣*,孙 诚,张家琛
武汉工程大学机电工程学院,湖北 武汉 430205

摘 要:绳驱并联机器人末端执行器的高精度运行需要精确的运动学模型提供指导。但传统的绳驱并联机器人运动学模型忽略了滑轮对末端位姿的影响,存在着精度偏低、稳定性较差等问题。为了减小滑轮在运动过程中对于运动学反解造成的影响,提出了一种耦合滑轮运动学的扩展运动学模型。基于八绳六自由度绳驱并联机器人平台,对扩展的运动学模型进行了系列仿真,探究了不同滑轮半径下末端执行器的控制误差。结果表明扩展的运动学模型的绳索的绳长变化量误差、末端执行器的姿态角误差和位移量误差分别减少了2.0%、3.6%、2.2%。滑轮模型的引入有效地提高了绳驱并联机器人的运动稳定性,进一步推动了末端执行器高精度控制的发展。

关键词:绳驱并联机器人;滑轮;运动学;静力学
中图分类号:TP242 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202309009

Pulley kinematics of cable-driven parallel robots

LI Meng, *YE Jiao**, *SUN Cheng*, *ZHANG Jiachen*
School of Mechanical & Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China

Abstract: The high-precision operation of the end-effectors of cable-driven parallel robots requires the guidance of accurate kinematic models. However, traditional kinematic models of cable-driven parallel robots neglect the influence of pulleys on the poses of the end-effectors, resulting in low precision and poor stability. By coupling the kinematics of pulleys, an extended kinematic model was proposed to minimize the influence caused by the pulleys on the kinematic inverse solutions during movements. A series of simulations of the extended kinematic model were carried out on the platform of a 6-degree-of-freedom cable-driven parallel robot constrained by 8 cables, and the control errors of the end-effector with different pulley radius were investigated. The results indicate that the errors of the cable length variation, the attitude angle, and the displacement of the extended kinematics model decrease by 2.0%, 3.6% and 2.2%, respectively. The introduction of the pulley model effectively improves the motion stability of cable-driven parallel robots, which further promotes the development of high-precision control of the end-effectors.

Keywords: cable-driven parallel robot; pulley; kinematics; statics

传统的工业机器人具有速度快、力量大的特点,但是由于刚性串联结构,存在着标准有效载荷受限、工作空间受限、驱动力受限等问题。因此,在大中型搬运和组装领域,鲜少使用此类机器人[1-2]。绳驱并联机器人是一种特殊类型的并联机器人[3],其使用绳索作为传动元件,将力并行传递到末端执行器[4]。与工业机器人相比,绳驱并联机器人有望将这3项性能(标准有效载荷、工作空间范围、驱动力)提高1到2个数量级[2]。传统的并联机器人通常采用刚性支杆作为传动元件连

收稿日期:2023-09-13
基金项目:武汉工程大学第十四届研究生教育创新基金(CX2022110)
作者简介:李 梦,硕士研究生。Email:2822393922@qq.com
***通信作者**:叶 姣,博士,讲师。Email:yejiao@wit.edu.cn
引文格式:李梦,叶姣,孙诚,等.绳驱并联机器人的滑轮运动学研究[J].武汉工程大学学报,2024,46(2):203-208.

接基座与末端执行器，而绳驱并联机器人用轻质的绳索取代了质量较大的刚性支杆[5]。相比于刚性支撑的机器人，绳驱并联机器人具有承载能力强、速度和加速度高、尺度可调、易重构等优点[6]。因此，绳驱并联机器人在低速风洞试验[7]、大中型搬运吊装[8]、康复机器人[9-11]等领域得到了良好的应用，是当前机器人领域的研究热点之一[12]。

根据绳索数目 m 和末端执行器的自由度数 n 之间的关系，绳驱并联机器人可分为欠约束（$m<n+1$）、完全约束（$m=n+1$）和冗余约束（$m>n+1$）[12]。绳索是其中非常灵活且重要的结构元件[13-15]，为了确保绳索在应用过程中的耐久性和安全性[5]，必须集成滑轮等元件。在研究绳驱并联机器人的运动控制时，需要对其进行运动学建模分析，然而，目前大部分的运动学建模都是将滑轮简化为理想点，导致建立的机器人运动学模型不够完整，一定程度上影响了末端执行器的运动精度以及稳定性。例如，哈尔滨工业大学的秦志伟等[16]对绳驱并联机器人的绳索力分布特性的分析中并未考虑滑轮的影响，导致分析结果不够精确。Pott等[17]对绳驱并联机器人的正运动学分析也未考虑滑轮的影响，导致正解出的末端执行器的位姿不够精确。

本文以八绳六自由度绳驱并联机器人为研究对象，通过引入滑轮的运动学模型，研究了扩展的运动学模型对绳驱并联机器人末端执行器运动精度的影响。机器人运动学模型的改进不仅提高了机器人运动学反解的精度，也提高了末端执行器的轨迹跟踪精度和运动稳定性，为后续实现绳驱并联机器人更精确的位姿控制反馈提供了理论依据。

1 系统描述

首先，对绳驱并联机器人进行系统描述，建立如图1所示的运动学模型。以固定机架底部平面中心为原点建立静坐标系 $O-xyz$，以运动平台的质心为原点建立动坐标系 $O'-x'y'z'$。其中，静坐标系固定不动，动坐标系跟随末端执行器运动。

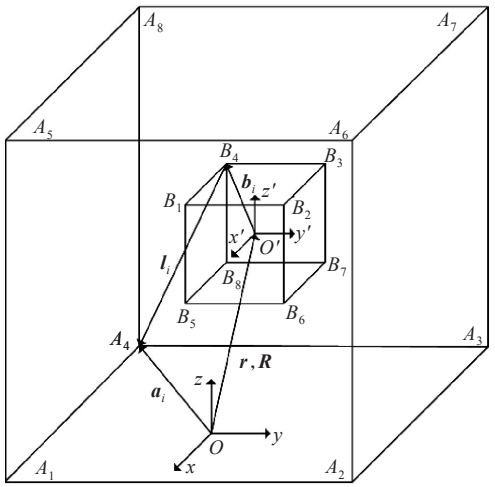

图1 绳驱并联机器人运动学模型

Fig. 1 Kinematic model of cable-driven parallel robot

如图1所示，固定机架的顶点为8个定滑轮的出绳点 $A_i(i=1,2,\cdots,8)$，末端动平台的8个铰点为 B_i。

根据矢量封闭原理，得到绳索向量 $\boldsymbol{l}_i$ 为

$$\boldsymbol{l}_i=\boldsymbol{a}_i-\boldsymbol{r}-\boldsymbol{R}\boldsymbol{b}_i \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{a}_i$ 为定滑轮的出绳点到静坐标系原点的向量；$\boldsymbol{b}_i$ 为末端执行器的铰点到动坐标系原点的向量；$\boldsymbol{r}$ 为动坐标系到静坐标系的位置变换向量（初始时两坐标系重合）；$\boldsymbol{R}$ 为动坐标系到静坐标系的旋转变换矩阵。

设末端执行器的位姿为 $\boldsymbol{Q}$，末端执行器的运行速度为 $\dot{\boldsymbol{Q}}$。

$$\boldsymbol{Q}=[q_1,q_2,q_3,q_4,q_5,q_6]^{\mathrm{T}} \tag{2}$$

$$\dot{\boldsymbol{Q}}=[\dot{q}_1,\dot{q}_2,\dot{q}_3,\dot{q}_4,\dot{q}_5,\dot{q}_6]^{\mathrm{T}} \tag{3}$$

式中：q_1,q_2,q_3 为3个姿态角；q_4,q_5,q_6 为3个位置量；$\dot{q}_1,\dot{q}_2,\dot{q}_3$ 为运动速度；$\dot{q}_4,\dot{q}_5,\dot{q}_6$ 为角速度。

规定末端执行器的旋转顺序为先绕 z 轴旋转 q_3 角度，再绕 y 轴旋转 q_2 角度，最后绕 x 轴旋转 q_1 角度。

则旋转变换矩阵 $\boldsymbol{R}$ 为

$$\begin{pmatrix}\cos q_2\cos q_3 & -\cos q_1\sin q_3+\sin q_1\sin q_2\cos q_3 & \sin q_1\sin q_3+\cos q_1\sin q_2\cos q_3\\ \cos q_2\sin q_3 & \cos q_1\cos q_3+\sin q_1\sin q_2\sin q_3 & -\sin q_1\cos q_3+\cos q_1\sin q_2\sin q_3\\ -\sin q_2 & \sin q_1\cos q_2 & \cos q_1\cos q_2\end{pmatrix} \tag{4}$$

由式(1)得到机器人运动学反解，绳索长度 l_i 为

$$l_i=\left|\boldsymbol{l}_i\right| \tag{5}$$

式中：$\left|\boldsymbol{l}_i\right|$ 表示 $\boldsymbol{l}_i$ 的模。

对式(5)两边进行微分并化简得到

$$\dot{l}_i=\left[\boldsymbol{u}_i^{\mathrm{T}}\quad(\boldsymbol{R}\boldsymbol{a}_i\times\boldsymbol{u}_i)^{\mathrm{T}}\right]\left[\dot{\boldsymbol{t}}\quad\boldsymbol{\omega}\right]^{\mathrm{T}} \tag{6}$$

式中：$\boldsymbol{u}_i$ 为八根绳索单位方向向量的矩阵；$\dot{\boldsymbol{t}}$ 为末端执行器的运动速度矢量；$\boldsymbol{\omega}$ 为角速度矢量。

$$\boldsymbol{u}_i^{\mathrm{T}} = \boldsymbol{l}_i \big/ \left|\boldsymbol{l}_i\right| \tag{7}$$

$$\dot{\boldsymbol{t}} = \left[\dot{q}_4, \dot{q}_5, \dot{q}_6\right]^{\mathrm{T}} \tag{8}$$

$$\boldsymbol{\omega} = \left[\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dot{q}_3\right]^{\mathrm{T}} \tag{9}$$

令绳索收放速度矢量$\dot{\boldsymbol{l}}$为

$$\dot{\boldsymbol{l}} = \left[\dot{l}_1, \dot{l}_2, \dot{l}_3, \dot{l}_4, \dot{l}_5, \dot{l}_6, \dot{l}_7, \dot{l}_8\right]^{\mathrm{T}} \tag{10}$$

$$\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}} = \left[\boldsymbol{u}_i^{\mathrm{T}} \quad (\boldsymbol{R}\boldsymbol{a}_i \times \boldsymbol{u}_i)^{\mathrm{T}}\right] \tag{11}$$

其中，$\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}$为机器人系统的速度雅克比矩阵。

则绳驱并联机器人运动学速度反解为

$$\dot{\boldsymbol{l}} = \boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\dot{\boldsymbol{Q}} \tag{12}$$

2　滑轮运动学

为了对滑轮运动学进行数学描述，引入了第三个坐标系$O''-x''y''z''$，相对于静坐标系$O-xyz$，位置变换向量为$\boldsymbol{r}_{\mathrm{a}}$，旋转变换矩阵为$\boldsymbol{R}_{\mathrm{a}}$。

滑轮运动学模型如图2所示，r_p为滑轮半径，柔性绳索连接末端动平台的铰点，并与滑轮相切于点M_i，β为柔性绳索与滑轮的包角且$\beta\in(0°,180°)$，p为滑轮圆心点，d_i为末端执行器的铰点B_i到p的距离，b_z为B_i点在第三坐标系下z轴方向坐标，b_{xy}为B_i垂直投影到第三坐标系中的点到坐标轴原点的距离。

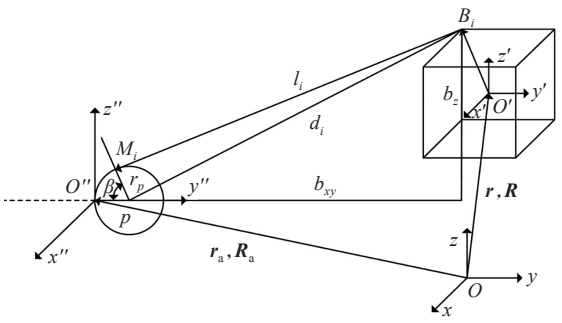

图2　滑轮运动学模型

Fig. 2　Kinematic model of pulley

根据勾股定理，由图2可知

$$d_i = \sqrt{{b_z}^2 + (b_{xy} - r_p)^2} \tag{13}$$

$$l_i = \sqrt{{d_i}^2 - {r_p}^2} \tag{14}$$

$$\beta = \arccos\left(l_i / d_i\right) + \arccos\left(b_z / d_i\right) \tag{15}$$

因此，柔性绳索与滑轮接触的绳长为βr_p，则考虑滑轮运动学之后的机器人运动学反解的绳长为

$$l_i' = \left|\boldsymbol{l}_i\right| + \beta r_p \tag{16}$$

第三坐标系$O''-x''y''z''$的俯视图如图3所示，γ表示滑轮绕z''轴的旋转角度，b_x表示B_i点在第三坐标系下x轴方向坐标，b_y表示B_i点在第三坐标系下y轴方向坐标。

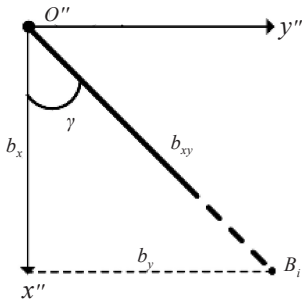

图3　第三坐标系的俯视图

Fig. 3　Top view of the third coordinate system

根据数学三角关系得到

$$b_{xy} = \sqrt{{b_x}^2 + {b_y}^2} \tag{17}$$

$$\gamma = \arctan\left(b_y / b_x\right) \tag{18}$$

根据式(15)和式(18)，由图2可得到八根绳索与滑轮的切点到静坐标系的矢量$\boldsymbol{m}_i$为

$$\boldsymbol{m}_i = \boldsymbol{a}_i + \boldsymbol{R}_{\mathrm{a}}\left(\boldsymbol{R}_z(\gamma)\left(\boldsymbol{I} - \boldsymbol{R}_y(\beta)\right)\begin{bmatrix} r_p \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}\right) \tag{19}$$

式中：$\boldsymbol{R}_z(\gamma)$表示8个滑轮分别绕各自所在坐标系的z轴旋转γ角的矩阵；$\boldsymbol{R}_y(\beta)$表示8个滑轮分别绕各自所在坐标系的y轴旋转β角的矩阵；$\boldsymbol{I}$表示单位矩阵。

则考虑滑轮运动学之后的机器人运动学反解绳向量$\boldsymbol{l}_i'$为

$$\boldsymbol{l}_i' = \boldsymbol{m}_i - \boldsymbol{r} - \boldsymbol{R}\boldsymbol{b}_i \tag{20}$$

设末端平台质量为1 kg，绳索拉力在5 N到70 N之间，由于拉力较小，绳索产生的形变量也很小，因此不考虑绳索形变量。在静坐标系中，考虑滑轮后绳索的单位方向向量$\boldsymbol{u}_p$为

$$\boldsymbol{u}_p = -\boldsymbol{R}_{\mathrm{a}}\boldsymbol{R}_z(\gamma)\boldsymbol{R}_y(\beta)\boldsymbol{e}_z \tag{21}$$

式中：$\boldsymbol{e}_z$为静坐标系下z轴单位向量。

则扩展后的运动学结构矩阵$\boldsymbol{A}_p$为

$$\boldsymbol{A}_p^{\mathrm{T}} = \left[\boldsymbol{u}_{p_i}^{\mathrm{T}} \quad (\boldsymbol{R}\boldsymbol{a}_i \times \boldsymbol{u}_{p_i})^{\mathrm{T}}\right] \tag{22}$$

其中，$\boldsymbol{u}_{p_i}$表示扩展之后八根绳索单位方向向量的矩阵。

令扩展后的运动学绳索收放速度矢量$\dot{\boldsymbol{l}}'$为

$$\dot{\boldsymbol{l}}' = \left[\dot{l}_1', \dot{l}_2', \dot{l}_3', \dot{l}_4', \dot{l}_5', \dot{l}_6', \dot{l}_7', \dot{l}_8'\right]^{\mathrm{T}} \tag{23}$$

则由式(12)，可得到机器人运动学速度反解方程为

$$\dot{\boldsymbol{l}}' = \boldsymbol{A}_p^{\mathrm{T}}\dot{\boldsymbol{Q}} \tag{24}$$

绳索具有单向受力特性并考虑末端平台的力

和力矩平衡问题，得到考虑滑轮运动学后的静力学平衡方程为

$$\boldsymbol{A}_p^{\mathrm{T}}\boldsymbol{f} + \boldsymbol{w} = 0 \tag{25}$$

式中：$\boldsymbol{f}$为八根绳索的正拉力矢量矩阵；$\boldsymbol{w}$为末端平台所受到的外力旋量。

其中，滑轮对于力控制的影响并不是很重要，这是由于绳索力的误差主要来源于力传感器引起的测量误差。

3 仿真分析

根据上述绳驱并联机器人的运动学建模，在MATLAB/Simulink/xPC实时仿真平台，进行仿真实验，并根据实验结果进行理论分析。

3.1 仿真参数

八绳六自由度绳驱并联机器人实验样机如图4所示，其主要元件包括固定机架、柔性绳索、电机、绕绳装置、滑轮以及末端执行器等。

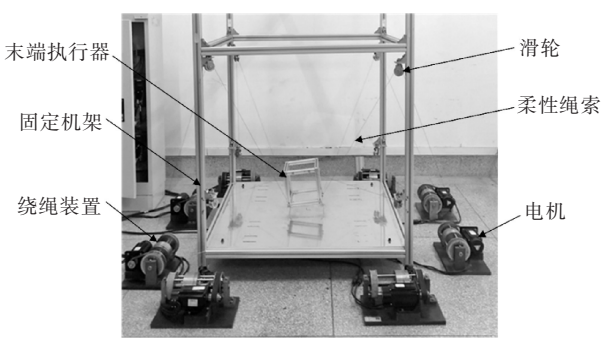

图4 八绳六自由度绳驱并联机器人实验样机

Fig. 4 Experimental prototype of 6-Degree-of-freedom cable-driven parallel robot constrained by 8 cables

八绳六自由度绳驱并联机器人的几何参数如表1所示，绳索号为i，设定滑轮半径r_p为0.01、0.025或0.05 m。

表1 实验平台机器人的几何参数

Tab. 1 Geometric parameters of experimental platform

i	a_i / m	b_i / m
1	$[-0.472,-0.472,0.890]^{\mathrm{T}}$	$[-0.027,-0.103,0.190]^{\mathrm{T}}$
2	$[0.472,-0.472,0.880]^{\mathrm{T}}$	$[0.019,-0.103,0.190]^{\mathrm{T}}$
3	$[0.472,0.472,0.860]^{\mathrm{T}}$	$[0.049,0.103,0.190]^{\mathrm{T}}$
4	$[-0.472,0.472,0.850]^{\mathrm{T}}$	$[-0.029,0.103,0.190]^{\mathrm{T}}$
5	$[-0.472,-0.472,0.186]^{\mathrm{T}}$	$[-0.103,-0.038,0.010]^{\mathrm{T}}$
6	$[0.472,-0.472,0.185]^{\mathrm{T}}$	$[0.103,-0.020,0.010]^{\mathrm{T}}$
7	$[0.472,0.472,0.190]^{\mathrm{T}}$	$[0.103,0.024,0.010]^{\mathrm{T}}$
8	$[-0.472,0.472,0.189]^{\mathrm{T}}$	$[-0.103,0.024,0.010]^{\mathrm{T}}$

在本次仿真实验中，规划末端执行器先进行直线运动，设末端执行器的初始位姿为$\boldsymbol{Q}_0$，期望位姿为$\boldsymbol{Q}_1$。

$$\boldsymbol{Q}_0 = [0,0,0,0,0,0]^{\mathrm{T}}$$

$$\boldsymbol{Q}_1 = [0.25,0.15,0,0.25,-0.20,0.30]^{\mathrm{T}}$$

当末端执行器运行到位姿$\boldsymbol{Q}_1$，即圆周轨迹切入点$[0.25,-0.2,0.3]^{\mathrm{T}}$时，末端执行器再以$R$为半径，以$[0,0,0.3]^{\mathrm{T}}$为圆心，$\omega = 0.7$ rad/s为角速度进行圆形轨迹运动。

$$R = \sqrt{0.25^2 + 0.2^2}$$

设定仿真时间为20 s，采样时间为1 ms。

3.2 滑轮对反解的影响

将上述仿真参数代入MATLAB/Simulink建立的八绳六自由度绳驱并联机器人运动学位姿反解模型中。考虑滑轮的影响且当滑轮半径为0.01 m时，得到了8根绳索1~8的绳长变化量δ，结果如图5所示。

由图5可知，末端执行器按照规划的轨迹运行时，八根绳索的变化量曲线连续平稳，可知在整个运行过程中未出现跳动或振动现象，从而保证末端执行器平稳运行。

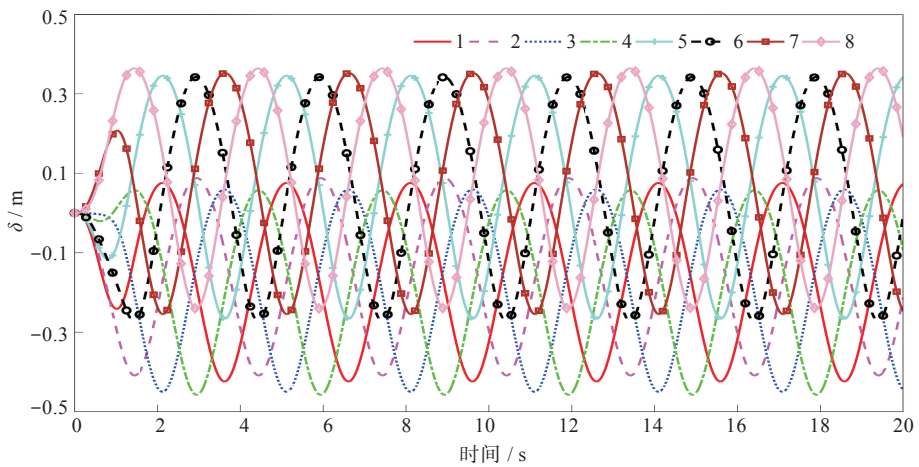

图5 八根绳索的绳长变化量曲线

Fig. 5 Curves of length variation of eight cables

为了研究滑轮运动学对绳驱并联机器人运动学的影响，将扩展的运动学模型和未扩展的运动学模型绳索的绳长变化量作差，获得绳索的绳长变化量的绝对误差e，如图6所示。

由图6可知，滑轮半径为0.01 m时，将不考虑滑轮运动学（滑轮作为理想点）和考虑滑轮运动学相比，e降低了7.2 mm。所述绳长变化量的绝对误差与上述扩展运动学模型的绳长变化量相比，扩展运动学模型使运动学反解即绳长变化量减少了2.0%。因此，滑轮运动学对机器人运动学位置反解的绳长变化量的影响不容忽视。

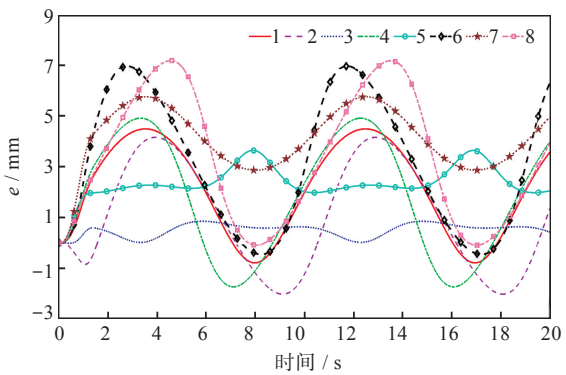

图6　八根绳索的绳长变化量的绝对误差曲线

Fig. 6　Absolute error curves of length variation of eight cables

3.3　滑轮对位姿的影响

将仿真参数带入MATLAB/Simulink建立的八绳六自由度绳驱并联机器人模型中，获得滑轮半径为0.01 m时末端执行器的姿态角绝对误差和位移量绝对误差，如图7所示。由图7可知，考虑滑轮运动学之后，末端执行器的位移量绝对误差e_d在2.5 mm以内；进行直线轨迹运动时末端执行器姿态角绝对误差e_p在1.1×10^{-3} rad以内，进行圆形轨迹运动时末端执行器姿态角误差近乎为0。结果表明，考虑滑轮运动学使末端执行器的运动精度得到了提高。

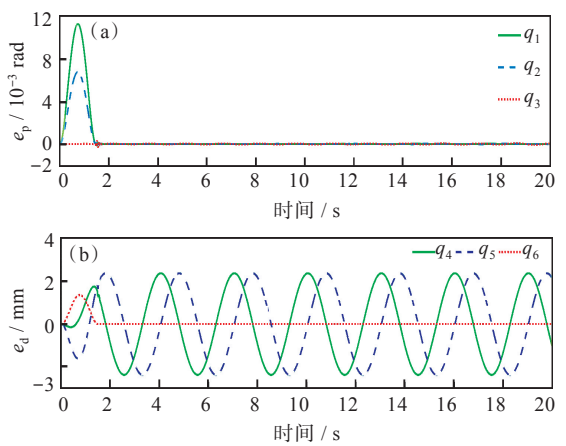

图7　末端执行器位姿的绝对误差曲线：(a)姿态角，(b)位移量

Fig. 7　Absolute error curves of end-actuator pose: (a) attitude angle, (b) displacement

将考虑滑轮影响与不考虑滑轮影响（滑轮作为理想点）的机器人末端执行器的位姿精度作差，得到末端执行器位移量的绝对误差的变化量δ_d和姿态角的绝对误差的变化量δ_p，如图8所示。

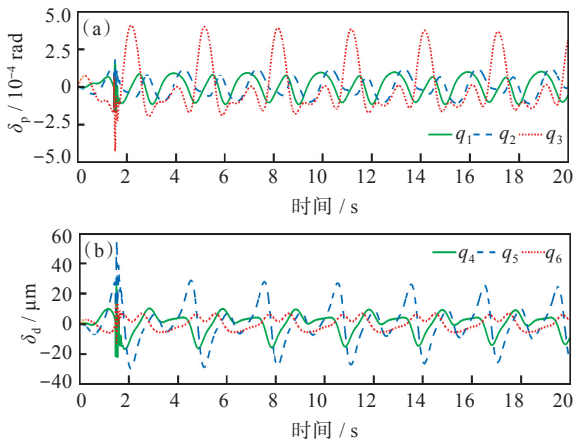

图8　末端执行器位姿绝对误差的变化量曲线：(a)姿态角，(b)位移量

Fig. 8　Variation curves of absolute error of end-actuator pose: (a) attitude angle, (b) displacement

由图8可知，滑轮半径为0.01 m时，将不考虑滑轮运动学（滑轮作为理想点）和考虑滑轮运动学相比，末端执行器的姿态角存在4×10^{-4} rad的绝对误差，末端执行器的位移量存在55 μm的绝对误差。因此，所述位姿误差的变化量与上文所述耦合滑轮运动学后末端执行器的位姿误差相比，末端执行器的姿态角误差减少了3.6%，位移量误差减少了2.2%。进一步说明耦合滑轮运动有助于提高末端执行器的运动精度。

3.3　不同半径的滑轮对反解的影响

为了进一步研究滑轮运动学对绳驱机器人的影响，选取了不同半径的滑轮进行仿真实验。在不同的滑轮半径r_p下，若将滑轮作为理想点，绳索1的绳长变化量的绝对误差结果如图9所示。由于绳驱并联机器人的运动是并行传递到末端平台的结构形式，因此，绳索1的误差结果对其他绳索同样适用。

由图9可知，若将滑轮作为理想点，滑轮的半径越大，绳索1的绳长变化量误差就越大。由于绳驱并联机器人的尺寸可大可小，那么在大尺寸的机器人中必然要求更大直径的滑轮。此时，要想保证机器人的末端执行器具有更高的运动精度，

在建模过程中，应考虑滑轮运动学的影响。

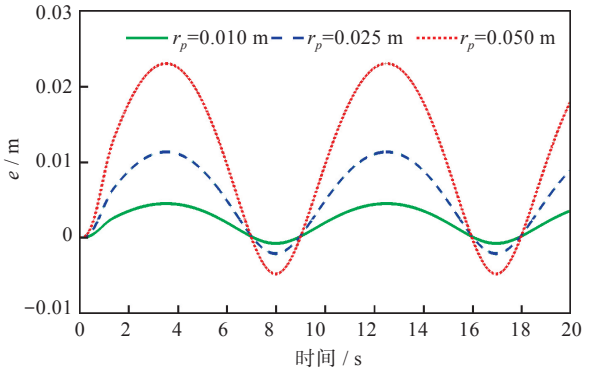

图9 绳索1绳长变化量的绝对误差曲线

Fig. 9 Absolute error curves of cable length variation of cable 1

4 结 论

为了提高绳驱并联机器人末端执行器的位姿跟踪精度和运动稳定性，在建模过程中考虑滑轮包角的影响，提出了一种扩展的绳驱并联机器人运动学模型，并以绳驱并联机器人为平台，进行了MATLAB仿真实验。结果表明扩展的运动学模型使绳驱并联机器人的运动学反解误差降低2.0%，在控制机器人进行直线和圆形轨迹运动时末端执行器的位移量和姿态角的误差分别降低3.6%和2.2%。此外，滑轮半径越大，绳索接触的包角就越大，扩展的运动学模型对末端执行器运动精度的提高也更为显著，这将更有利于大空间内绳驱并联机器人的高精度运行。因此，耦合滑轮运动学扩展的运动学模型对大规模的绳驱并联机器人运行精度的提高具有重要的指导意义。

参考文献

[1] 彭煜祺，魏巍，陈灯，等.基于视觉的工业机器人异常动作检测方法研究[J].武汉工程大学学报，2021，43(4)：462-467.

[2] POTT A, MÜTHERICH H, KRAUS W, et al. IPAnema: a family of cable-driven parallel robots for industrial applications[C]//Mechanisms and Machine Science. Berlin: Springer, 2013: 119-134.

[3] 于兰，郑亚青.3种构型的6自由度绳牵引门式起重机器人的运动学位置逆解分析[J].华侨大学学报(自然科学版)，2012，33(2)：125-128.

[4] 朱冠亚，张尚盈，黄元峰，等.三自由度绳驱并联机器人运动学分析与仿真[J].现代制造技术与装备，2018(12)：25-26，28.

[5] POTT A. Influence of pulley kinematics on cable-driven parallel robots[C]//Latest Advances in Robot Kinematics. Dordrecht: Springer, 2012: 197-204.

[6] 陈科举，张尚盈，张继磊，等.基于绳驱并联机器人系统刚度的力/位混合控制[J].机械传动，2023，47(8)：130-134.

[7] 吴惠松，林麒，彭苗娇，等.低速风洞飞行器模型编队飞行绳系并联支撑机构[J].航空学报，2019，40(11)：123144.

[8] GOUTTEFARDE M, COLLARD J F, RIEHL N, et al. Geometry selection of a redundantly actuated cable-suspended parallel robot[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2015, 31(2): 501-510.

[9] 王志军，王俊鹏.1R2T-1R型绳索驱动下肢康复机器人运动学及其工作空间[J].机械传动，2023，47(10)：110-116.

[10] 廖斌，陆佳琪，李煜，等.基于绳牵引并联机构的上肢康复机器人设计[J].科学技术与工程，2022，22(32)：14229-14236.

[11] 徐晨阳，张建斌，陈伟海，等.绳驱动上肢外骨骼康复机器人穿戴机构设计[J].机器人，2021，43(4)：463-471.

[12] 张傲杰，张尚盈，陈皓晖.绳驱并联机器人实时正解数值算法[J].机床与液压，2021，49(18)：1-4.

[13] 梁任新.缆索吊装系统在特大型桥梁施工中应用[J].建材与装饰，2016(43)：224-225.

[14] 潘洪涛，党海霞.矿用卷缆车自动跟车系统[J].露天采矿技术，2022，37(6)：96-99.

[15] 刘映楼.一种电梯地坎防夹绳装置的设计[J].中国特种设备安全，2023，39(6)：80-83，97.

[16] 秦志伟，刘振，高海波，等.关节混合空间控制下的冗余绳驱并联机器人绳力分布特性分析[J].力学学报，2023，55(2)：497-510.

[17] POTT A, SCHMIDT V. On the forward kinematics of cable-driven parallel robots[C]//2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway: IEEE, 2015: 3182-3187.

本文编辑：霍淑利