

模块化多关节绳驱动并联机器人设计

李子含, 李跃松, 郑 帅, 李泓葳

河南科技大学机电工程学院, 河南 洛阳

收稿日期: 2024年4月12日; 录用日期: 2024年5月24日; 发布日期: 2024年5月31日

摘 要

绳驱动并联机器人具有惯性低、容易调整、质量轻、出现损耗容易更换等优点, 应用前景广泛。但是绳子的柔性特点造成其运动时所需的控制电机数量要大于其运动自由度的数量且执行机构刚度不够, 这样造成控制困难, 控制精度低、环境适应性差等问题。为了解决这些问题, 需要降低电机数量和提升机器人的刚度, 本文基于标准万向节铰链, 通过刚柔结合原理, 实现了并联机器人的少电机、模块化、多关节绳驱动, 并通过求解其运动学和轨迹规划, 使其末端能够实现圆形轨迹。

关键词

绳驱动机器人, 并联机器人, 轨迹规划, 刚柔结合

Design of Modular Multi Joint Rope Driven Parallel Robot

Zihan Li, Yuesong Li, Shuai Zheng, Hongwei Li

School of Mechatronics Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang Henan

Received: Apr. 12th, 2024; accepted: May 24th, 2024; published: May 31st, 2024

Abstract

Rope driven parallel robots have the advantages of low inertia, easy adjustment, light weight, and easy replacement in case of wear and tear, and have a wide range of application prospects. However, the flexible nature of the rope results in a greater number of control motors required for its movement than its degrees of freedom, and insufficient stiffness of the actuator, which leads to control difficulties, low control accuracy, and poor environmental adaptability. In order to solve

these problems, it is necessary to reduce the number of motors and improve the stiffness of the robot. Based on the standard universal joint hinge and the principle of rigid flexible combination, this paper realizes the small motor, modular, and multi joint rope drive of the parallel robot. By solving its kinematics and trajectory planning, the end can achieve a circular trajectory.

Keywords

Rope Driven Robot, Parallel Robot, Trajectory Planning, Combination of Rigidity and Flexibility

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

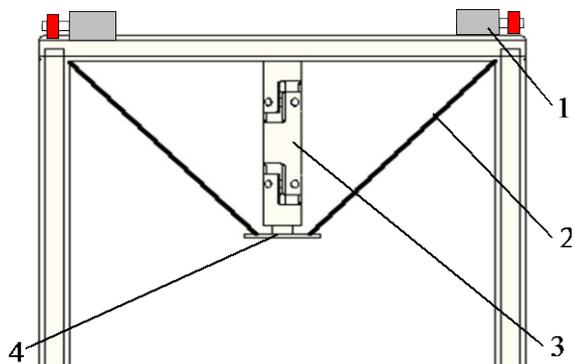
绳驱动并联机构就是通过使用绳索来进行传动的一种并联机构,相比传统的机械结构绳驱动损耗小,结构相对简单,有很好的韧性,运动机构质量小,同时具备并联结构承载能力强的优点[1] [2] [3]。在航空领域、先进医疗设备、空间操作等领域都有着广泛的应用[4] [5] [6] [7] [8]。较为突出的就是在医疗行业的使用,国内针对腰部康复训练过程中如何协调控制患者骨盆运动轨迹的问题,设计了由六根绳索牵引的四自由度并联机器人,并取得良好的反响[6]。绳驱动并联机构被应用于飞行器的驾驶模拟,代替了之前飞行员试飞的方式,大大降低了危险性[7] [8]。绳驱动并联机构在康复救援方向上也得到了大量应用,如法国 INRIA 公司的 Merlet 和 D.Daney 提出了一种用在救援行动中的全尺寸、便携式、模块化、完全自主的平行绳索起重机,可以通过热成像定位受害者,并在受害者静止时将他们移动到安全的位置,降低了搬运过程中对伤员的二次伤害[3] [4] [5]。绳驱动并联机构也被应用到大空间、全方位的摄像中,如美国的 August Design 公司早在 1984 年便研发了 Skycam 系统摄像系统。通过将绳驱动并联机构与摄像技术相结合,有着传统拍摄系统不可比拟的优势,绳驱动并联摄像系统的视野范围更加开阔,不仅可以在开放空间内对任意位置进行全方位拍摄,而且摄像的灵活性也比传统的摄像系统有着很大的提高,工作空间也更大[5] [9] [10]。我国在绳驱动并联机器人上的研究相对较晚,但发展迅速。最近几年,我国各大高校学者在绳驱动并联机器人的研究工作上取得了较大进步,越来越多的学者对绳驱动并联机器人进行研究,并取得了较大的成果。500 米口径球面射电望远镜(FAST)的绳索驱动支撑馈源系统是其中最令人瞩目的成果,FAST 的绳索驱动馈源小车就是一种绳牵引并联机构[11] [12]。

虽然绳驱动并联机器人具有惯性低、容易调整、质量轻、出现损耗容易更换等优点,但是绳子的柔性特点造成其运动时所需的控制电机数量要大于其运动自由度的数量且执行机构刚度不够,这样造成控制困难,控制精度低、环境适应性差等问题。为了提升应用范围,降低电机数量和提升机器人的刚度,本文基于标准万向节,设计了一种少电机、模块化、多关节绳驱动并联机器人。本文将对此机器人的结构、工作原理以及运行情况进行论述,为此类绳驱动并联机器人的应用奠定基础。

2. 模块化多关节绳驱动并联机器人结构与工作原理

2.1. 结构

模块化多关节绳驱动并联机器人的结构示意图,如图 1 所示,其主要组成部分包括末端执行器、绳索、步进电机、万向节等组成,其三维结构如图 2 所示,实物如图 3 所示。



1. 步进电机；2. 钢丝绳；3. 万向节铰链；4. 末端执行部件

Figure 1. Schematic diagram of the structure of a rope driven parallel robot

图 1. 绳驱动并联机器人的结构示意图

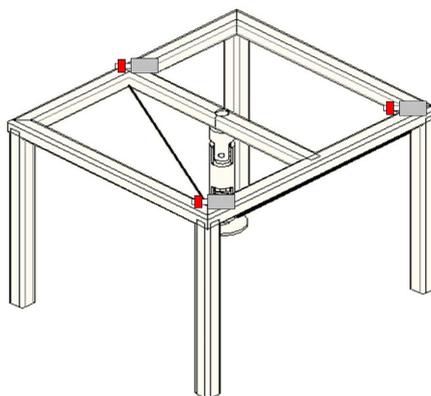


Figure 2. 3D view of rope driven parallel robot

图 2. 绳驱动并联机器人的三维视图

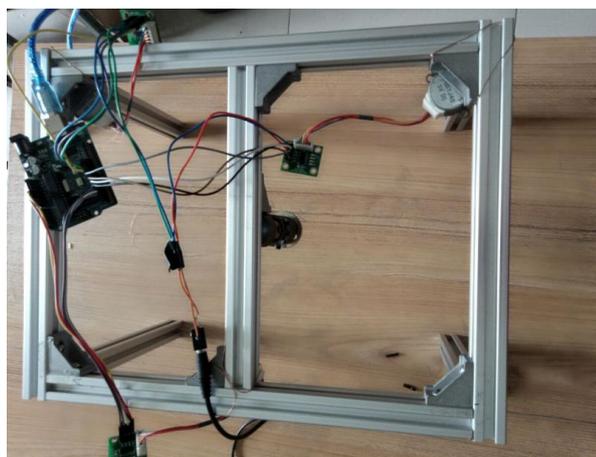


Figure 3. Prototype of rope driven parallel robot

图 3. 绳驱动并联机器人实物图

2.2. 工作原理

由图 1~3 可知,模块化多关节绳驱动并联机器人的运动由三个步进电机控制,步进电机上有绕线轮,

绕线轮上缠着钢丝绳，可以控制钢丝绳的长短。钢丝绳与末端执行器相连，末端执行器部件与万向节铰链相连，万向节铰链固定在支架上，末端执行部件可以带动万向节铰链产生旋转。通过步进电机旋转可以实现三根钢丝绳的长度控制，由于钢丝绳与末端执行部件相连，可以控制末端执行部件的 X 和 Y 的位置，通过万向节铰链的旋转可以实现末端执行部件 Z 方向(即高度方向)的控制。从而实现三个电机控制末端执行部件坐标位置(X, Y, Z)。由于万向节铰链的存在，Z 方向的重力不仅仅依靠绳子拉力克服，因此绳子上受力较小，其弹性伸缩带来的误差能够减少。

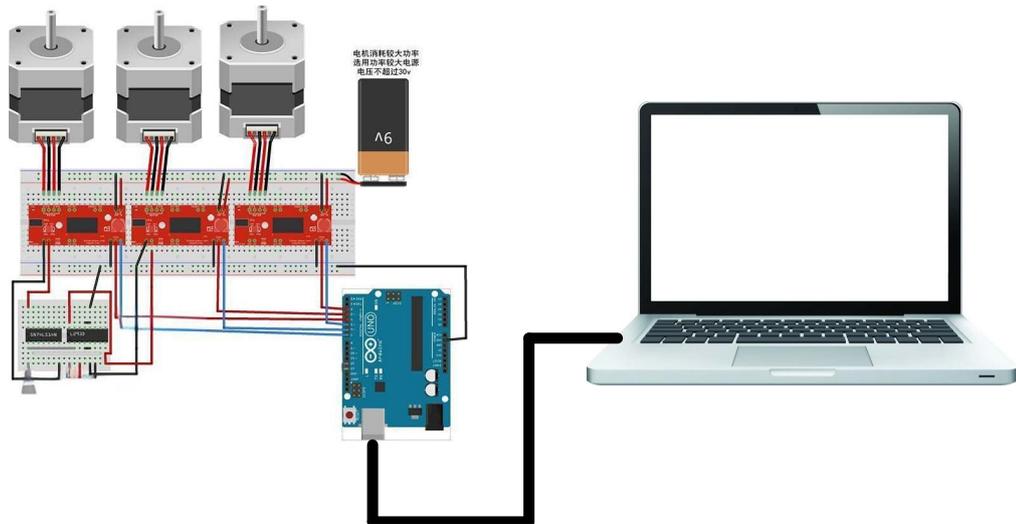


Figure 4. Control system schematic diagram
图 4. 控制系统原理图

3. 控制系统设计

模块化多关节绳驱动并联机器人的控制系统由图 4 所示，其由上位机电脑、Arduino 控制板、步进电机驱动器和三个步进电机构成，电脑发送指令到 Arduino 控制板使其产生脉冲，控制步进电机驱动器输出电流驱动各自步进电机运动角度。步进电机带动绕线轮旋转，控制绳索的长短，实现末端执行部件的位置控制。实物的控制系统如图 5 所示。

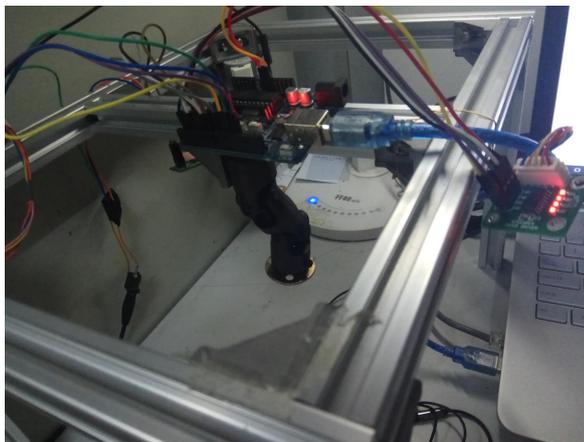


Figure 5. Control system of Rope driven robot
图 5. 控制系统实物

4. 轨迹规划

运动学的位置分析需要确定关节位置、重心位置和绳索与步进电机水平轴的角度。图 1 中考虑了步进电机端节点 B 和万向节法兰盘端点 A 的平面分析。因为绳索在万向节重力的拉扯下始终保持绷紧状态可以近似看作不具有刚性的连杆机构。设 (X_A, Y_A) 为相对于参考框架 xOy 的端点 A 的坐标, (X_B, Y_B) 为具有相同参考框架的端点 B 的坐标。使用方程组可以编写以下关系

$$(X_B - X_A)^2 + (Y_B - Y_A)^2 = AB^2 = L_{AB}^2 \quad (1)$$

L_{AB} 连接 AB 的长度。设 φ 是连杆 AB 与水平轴 Ox 的角度。然后, 将链接 AB 的斜率 m 定义为:

$$m = \tan \varphi = \frac{Y_B - Y_A}{X_B - X_A} \quad (2)$$

设 n 为 AB 与垂直轴 Oy 的截距。利用斜率 m 和截距 n , 平面上直线连杆的方程是: $y = mX + n$ 其中 x 和 y 是这个链接上任意点的坐标。

L_{AB} 的长度取决于步进电机运动的步数, 28BYJ-48 步进电机的齿轮减速比为 64:1, 在 4 细分模式下, 步进电机 32 步旋转一周, 步进角 $11.25^\circ/\text{步}$ 。由于存在齿轮减速, 每个步进角对应输出轴的输出角度为 $11.25^\circ/64$ 。步进电机上的法兰盘外径为 10 mm 周长为 7.85 mm, 即步进电机每逆时针(或顺时针主要取决于程序的编写和电机的安装位置)转动一周 L_{AB} 长度减少 7.85 mm, 顺时针(或逆时针主要取决于程序的编写和电机的安装位置)转动一周 L_{AB} 长度增加 7.85 mm。那么利用公式(1)可知因为 B 点坐标始终不变就可以通过控制 L_{AB} 的长度来实现 A 点坐标的变动, 从而实现位置控制。

本次设计要实现万向节下端作为平台的法兰盘的运动轨迹为一个直径 4 cm 圆, 首先通过预先模拟的方式, 采用描点法, 进行预演。因为要画出一个圆可分解为两个圆弧, 根据描点法一个圆弧需要选定三个点作为运动规划, 因此选取六个点作为机器人的运动规划。

运用描点法时需要进行相关数据的测量, 由于在方程的分析中假定绳索的角度不变, 但是在实际过程中绳索的角度会有一些的变化因此存在一定的误差。

在机械机构运动到第一个测定点时, 图中右侧步进电机的运动应当是收缩绳索的状态, 此时绳索的长度为 7.8 厘米, 图中上侧边角的步进电机的运动应当是收缩状态, 此时绳索的长度为 11.6 厘米, 图中左侧下方电机运动状态应当是释放状态, 此时绳索长度为 14.2 厘米。

在机械机构运动到第二个测定点时, 图中右侧步进电机的运动应当是释放绳索的状态, 此时绳索的长度为 10.3 厘米, 图中上侧边角的步进电机的运动应当是收缩状态, 此时绳索的长度为 9.6 厘米, 图中左侧下方电机运动状态应当是收缩状态, 此时绳索长度为 10.5 厘米。

在机械机构运动到第三个测定点时, 图中右侧步进电机的运动应当是释放绳索的状态, 此时绳索的长度为 11.2 厘米, 图中上侧边角的步进电机的运动应当是收缩状态, 此时绳索的长度为 9.1 厘米, 图中左侧下方电机运动状态应当是收缩状态, 此时绳索长度为 8.4 厘米。

在机械机构运动到第四个测定点时, 图中右侧步进电机的运动应当是收缩绳索的状态, 此时绳索的长度为 7.6 厘米, 图中上侧边角的步进电机的运动应当是收缩状态, 此时绳索的长度为 13.6 厘米, 图中左侧下方电机运动状态应当是收缩状态, 此时绳索长度为 8.8 厘米。

在机械机构运动到第五个测定点时, 图中右侧步进电机的运动应当是收缩绳索的状态, 此时绳索的长度为 7.9 厘米, 图中上侧边角的步进电机的运动应当是收缩状态, 此时绳索的长度为 11.6 厘米, 图中左侧下方电机运动状态应当是释放状态, 此时绳索长度为 14.2 厘米。

在机械机构运动到第六个测定点时, 图中右侧步进电机的运动应当是收缩绳索的状态, 此时绳索的

长度为 7.8 厘米，图中上侧边角的步进电机的运动应当是收缩状态，此时绳索的长度为 10.8 厘米，图中左侧下方电机运动状态应当是释放状态，此时绳索长度为 13.8 厘米。

规划完成后，导入计算机，通过运行可得绳驱动机器人圆形轨迹运动如图 6 所示。



Figure 6. Rope driven robot circular trajectory motion
图 6. 绳驱动机器人圆形轨迹运动

5. 结论

针对绳子的柔性造成绳驱动并联机器人运动时所需的控制电机数量要大于其运动自由度的数量以及其执行机构刚度不够造成控制精度低、环境适应性差等问题，本文提出了一种基于万向节铰链的多关节、模块化绳驱动机器人，每个机器人有三个电机控制，分别实现三自由度运动，通过对三自由度绳驱动机器人的结构分析、轨迹规划和控制系统设计，达到其末端机构能够实现圆形轨迹。

基金项目

本项目获得河南省大学生创新创业训练计划项目(202310464002)资助。

参考文献

- [1] 许泽华, 杨凯盛, 陈特欢, 等. 绳驱动刚-柔-软耦合机器人的设计与分析[J]. 机械制造, 2024, 62(2): 1-7.
- [2] 王爽, 任晗, 李楨, 等. 基于绳驱动的多段柔性连续体机械臂的运动学与实验研究[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(19): 8249-8255.
- [3] 刘将, 王生海, 李建, 等. 绳驱动并联吊装机器人绳索张力优化[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(19): 8256-8263.
- [4] 王熙杰, 蔡慧林. 绳索驱动机器人的刚度分析[J]. 机械设计与研究, 2023, 39(3): 65-68.
- [5] 刘将, 王生海, 李建, 等. 绳驱动并联吊装机器人绳索张力优化[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(19): 8256-8263.
- [6] 宋耀威. 绳驱动仿人臂肘关节中仿骨肌系统变刚度的研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广东工业大学, 2022.
- [7] 彭嘉伟. 绳驱动飞行机械臂运动规划及控制研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2022.
- [8] 赵锦波. 面向旋翼飞行器的绳驱动机械臂运动规划及控制研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
- [9] 王博文. 绳驱七自由度仿人机械臂设计及其运动控制方法研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- [10] 赵志启. 三自由度绳驱动摄像稳定并联平台的建模与运动控制[D]: [硕士学位论文]. 开封: 湖南大学, 2022.
- [11] 陈建国. 绳驱动机械臂的结构设计与分析[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江理工大学, 2021.
- [12] 朱丽春. 500 米口径球面射电望远镜(FAST)主动反射面整网变形控制[J]. 科研信息化技术与应用(中英文), 2012, 3(4): 67-75.