

绳驱动下肢坐式外骨骼结构设计与运动学分析

朱飞飞¹ 肖海波²

1 湖北汽车工业学院 2 华中科技大学

DOI:10.12238/pe.v2i5.9891

[摘要] 传统的下肢外骨骼结构设计多采用通过气动式、液压式、电缸式,体型笨重,结构复杂,本文提出了一种电机-绳索辅助康复外骨骼,采用并联坐式结构,具有简单、运动平滑、力量传递稳定等优势。通过三维建模软件构造模型,对电机支撑板、端轴套、拉线轮进行静力学分析;通过运动学D-H表示法确定参数,用封闭法求解逆运动学末端旋转角度,并在matlab软件机器人工具箱验证正运动学合理性;在adams软件,利用step函数定义下肢外骨骼三种运动形式,比较三种运动形式的质心速度和质心位置曲线,得出结论:三种曲线没有明显峰值,曲线面积偏差小,证明结构设计不干涉人体,符合人因工程学。

[关键词] 下肢绳驱动; 静力学; D-H; 运动学

中图分类号: O311 文献标识码: A

Structural design and kinematic simulation analysis of rope-driven lower limb sitting exoskeleton

Feifei Zhu¹ Haibo Xiao²

1 Hubei Institute of Automotive Industry 2 Huazhong University of Science and Technology

[Abstract] The traditional lower limb exoskeleton is mostly pneumatic, hydraulic, electric cylinder, bulky, complex structure. This paper proposes a kind of motor-rope assisted rehabilitation exoskeleton, using parallel sitting structure, which has the advantages of simple, smooth movement, power transmission and stable. Motor support plate, end shaft sleeve and pull wheel by kinematic D-H representation, solve the rotation angle of the inverse kinematics, and verify the rationality of positive kinematics in matlab software, use the step function to define the motion speed of the three forms, and compare the conclusion that the three curves have no obvious peak, and the curve area deviation is small, which proves that the structural design does not interfere with human body and conforms to human cause engineering.

[Key words] lower limb rope drive; statics; D-H; kinematics

引言

绳驱动下肢^[1]外骨骼是一种通过外部力量辅助下肢运动的设备,用于帮助患有下肢功能障碍的人恢复行走能力。随着人口老龄化和事故伤残人数的增加,下肢功能障碍的患者数量也在不断增加,因此研究和设计一种高效、安全、便捷^[2]的下肢坐式外骨骼具有重要意义。

然而,目前绳驱动下肢外骨骼研究还较为有限,因此,本文提出了一种基于绳驱动技术的下肢坐式外骨骼结构,有助于患者恢复肌肉力量、提高关节稳定性以及改善功能性运动能力。

1 绳驱动下肢外骨骼结构设计

1.1 下肢外骨骼整体结构设计方案

本文提出一种绳驱动下肢坐式外骨骼结构设计,结构方案如图1所示。

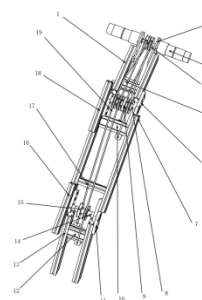


图1 绳驱动下肢康复外骨骼整体机构

1髋关节、2电机支撑板、3电机、4拉线轮、5腰部支撑、6髋部铰链盘、7大腿、8髋关节端轴套、9, 15轴承、10大腿支撑、11膝部铰链盘、12小腿支撑、13小腿、14膝关节端轴套、16膝关节限位、17固定支撑、18髋关节限位、19绳索

由图1, 本文提出的机构属于并联结构, 髋关节及膝关节的结构连接方式是通过角码固定连接, 包括铰链盘上不同型号的螺钉和螺栓。大腿和小腿组件部分有护板和绑带固定。膝关节和髋关节的设置距离为20cm, 包括六轴联动和固定支撑铝型材。

1.2 绳驱动原理

本文主要分析了绳驱动下肢外骨骼在矢状面^[3]内的运动。在该运动面内, 膝关节和髋关节的自由度分别是1。在矢状面运动过程中, 绳索只受拉力, 绳索需比自由度更好的数目来实现约束, 本文膝关节和髋关节通过四根绳索进行相互拮抗来完成驱动。

绳驱动下肢坐式外骨骼由三个坐标系组成, 分别为基准坐标{0}, 膝关节处局部坐标系{1}, 髋关节坐标系{2}。由四根绳索牵引11、12、13、14, 髋关节电机和膝关节电机拉动绳索收放, 从而实现髋关节与膝关节在矢状面内的运动。两个旋转角, 1为髋关节转角, 2为膝关节转角, 六个切点, 绳索与固定滑轮六个切点记为N1、N2、N3、N4、N5、N6, 固定滑轮中心点: B1、B2、B3、B4、B5、B6, 固定滑轮中心到原点的距离: b_1 、 b_2 、 b_3 、 b_4 、 b_5 、 b_6 。绳索与腰部、髋关节、膝关节三者之间连线的端点分别是P点、K点、M点, 将O1点到大腿连接点K点之间的距离设为 L_0 ; O_1 点到 O_2 点的距离设为 L_1 , 即大腿杆长; O_2 点到P点之间的距离设为 L_2 , 即小腿杆长; O_2 点到小腿连接点M到之间的距离设为 L_3 。考虑到滑轮和电机固定在电机架上, 两者之间的距离是固定的。

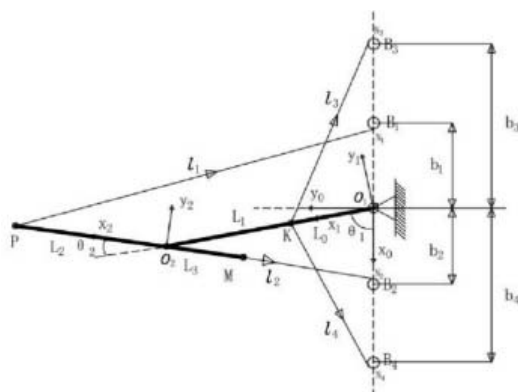


图2 绳驱动下肢坐式整体结果简图

膝关节和髋关节的自由度已知分别是1自由度, 电机分别控制膝关节和髋关节, 属于独立且相关的两个系统。髋关节膝关节运动原理: 髋关节机构利用输出电机的正、反转, 可以带动输出传动轴进行转动, 再通过减速器减速传递至髋关节固定支撑, 输出轴转动带动绳索, 绳索拉动髋关节固定滑轮, 四轴端轴套向上/下旋转, 髋关节进行伸展/屈曲运动; 膝关节机构利用输出电机的正、反转, 可以带动输出传动轴进行转动, 再通过减速器减速传递至膝关节输出端轴套, 输出轴转动带动绳索, 绳索拉动膝关节固定滑轮, 四轴端轴套向上/下旋转, 膝关节进行伸展/屈曲运动, 完成下肢髋关节和膝关节运动的目的。

图3是髋关节和膝关节屈曲时动作角度变化。

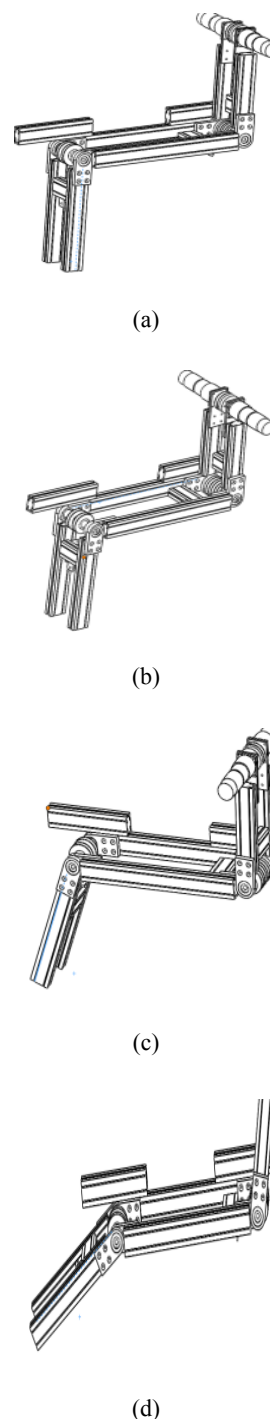


图3 髋关节和膝关节屈曲

图中a大腿水平与腰部垂直, 小腿自然垂直; b大腿上抬10°, 小腿斜上抬20°, c大腿上抬20°, 小腿斜上抬30°; d大腿下落-5°, 小腿向前延伸, 伸展到70°。

1.3 绳驱动下肢坐式外骨骼有限元分析

绳驱动下肢坐式外骨骼结构中支撑部分和传动机构是必备的部分, 本文分析端轴套、拉线轮、电机支撑板等受力较大机构进行静力学分析。

表1 三种材料的属性

材料名称	弹性模量	泊松比	屈服强度	密度
端轴套	2636	0.4	85.1	1.17
拉线轮	8900	0.4203	42-56	0.89-0.91
电机支撑板	8900	0.4203	42-56	0.89-0.91

表2 D-H参数表

i	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	0	0
2	0	220	0	10°
3	0	180	0	30°

表中: α_{i-1} 表示连杆转角, a_{i-1} 表示连杆长度, d_i 表示连

杆偏距, θ_i 连杆夹角。

2.2运动学求解

定义腰部杆件i-1, 大腿杆件为i, 小腿杆件i+1, 由变换矩阵式^[3]可以得到小腿在矢状面内的位置。

求出由第i-1杆件到第i+1杆件的变换矩阵,

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{式2-1}$$

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & l_1 \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & l_1 \sin \theta_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{式2-2}$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & l_2 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & l_2 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{式2-3}$$

根据前两杆的变换矩阵得到末端坐标矩阵

$${}^0T_3 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 = \begin{bmatrix} c_{12} & -s_{12} & 0 & l_1 c_1 + l_2 c_2 \\ s_{12} & c_{12} & 0 & l_1 s_1 + l_2 s_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{式2-4}$$

下肢外骨骼大腿相对于基坐标腰部中心的表达式:

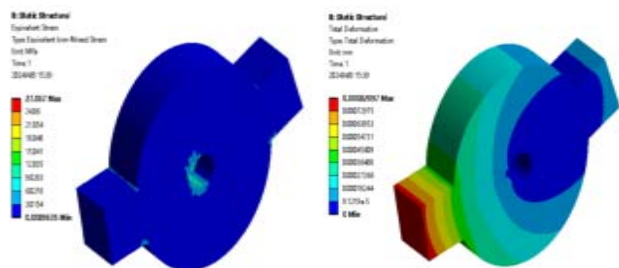
$$\begin{cases} x = l_1 c_1 \\ y = l_1 s_1 \end{cases} \quad \text{式2-5}$$

下肢外骨骼小腿相对于基坐标腰部中心的表达式为:

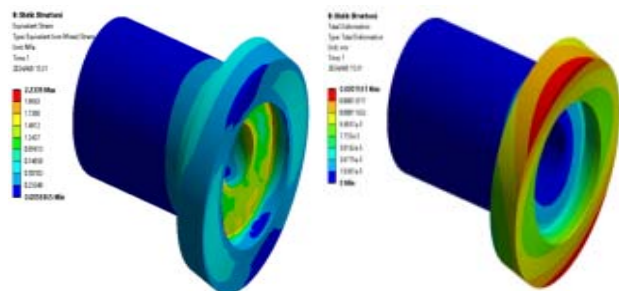
$$\begin{cases} x = l_1 c_1 + l_2 c_{12} \\ y = l_1 s_1 + l_2 s_{12} \end{cases} \quad \text{式2-6}$$

上式中: c_{12} 表示 $\cos(\theta_1 + \theta_2)$, s_{12} 表示 $\sin(\theta_1 + \theta_2)$,

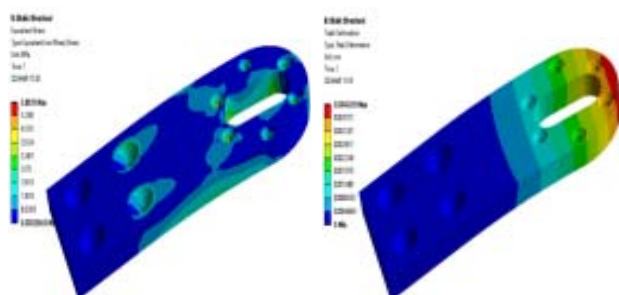
c_1 表示 $\cos \theta_1$, s_1 表示 $\sin \theta_1$



(a) 拉线轮应力分析 (b) 拉线轮应变分析



(c) 端轴套应力分析 (d) 端轴套应变分析



(e) 电机支撑板应力分析 (f) 电机支撑板端轴套应变分析

图4 关键零件的静力学分析

2 下肢运动学理论基础

2.1绳驱动下肢坐式外骨骼D-H参数

以腰部为中心点, 建立基本坐标。下肢绳驱动坐式外骨骼的自由度为2, 建立坐标系, 以髋关节旋转方向点作 z_1 轴, 大腿连杆方向作 x_1 轴, 根据右手定则建立 y_1 轴, 以膝关节旋转点作为 z_2 轴, 小腿连杆方向作为 x_2 轴, 根据右手定则建立 y_2 轴。

c_2 表示 $\cos \theta_2$, s_2 表示 $\sin \theta_2$, 将 a_{i-1} , θ_i , 分别代入

到式2-7、2-8得大腿的末端坐标: $\begin{bmatrix} 215.6 \\ 138.6 \\ 0 \end{bmatrix}$, 小腿的末端坐标:

$$\begin{bmatrix} 354.2 \\ 252 \\ 0 \end{bmatrix}$$

3 人机耦合验证

对于绳驱动下肢坐式外骨骼机构是否会与人体产生干涉, 进行人机耦合仿真。将机构简化模型保存为x_t格式, 导入Adams中, 在软件中添加转动副, 固定副, 旋转副约束, 如图5所示。

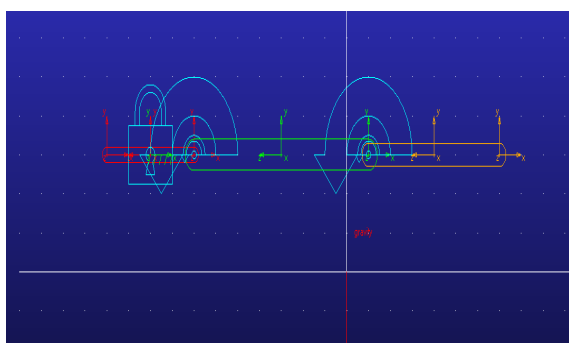
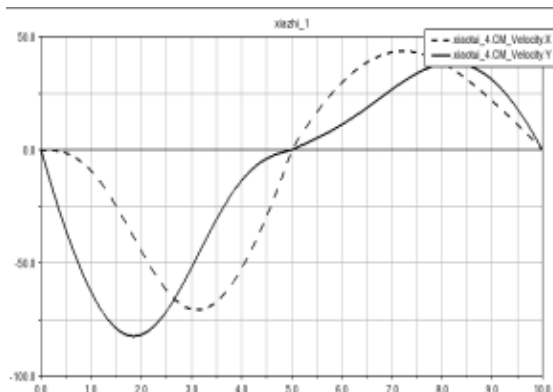
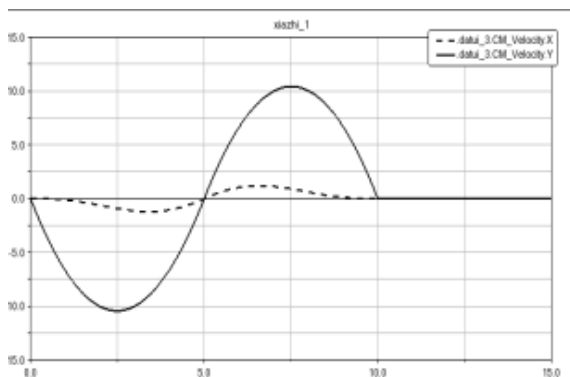


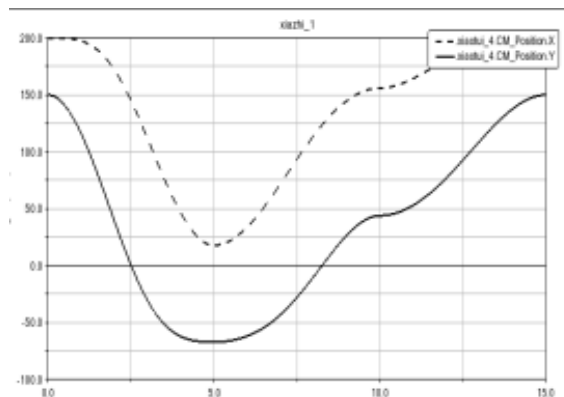
图5 下肢结构简图



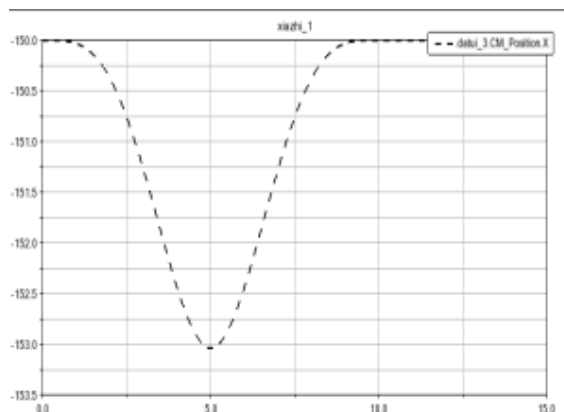
(a) 小腿质心速度



(b) 大腿质心速度



(a) 小腿质心位置



(b) 大腿质心位置

图6 穿戴绑缚时质心速度曲线

对图5结构简化模型进行step函数角位移约束, 图6中纵坐标为速度, 横坐标为时间, 曲线表示的是大腿和小腿的质心在某一时刻的速度和位置的大小。图中数据表明下肢外骨骼带动大腿和小腿或者外骨骼被带动时, 速度可以较好的匹配人体协同运动。

曲线导入到matlab中, 利用傅里叶级数展开的形式进行拟合, 表达式为: $\theta_t = \sum_{n=1}^i a_n \sin(b_n t + c_n)$

并使用matlab-cftool工具箱拟合, 髋关节, 膝关节拟合曲线如图7所示:

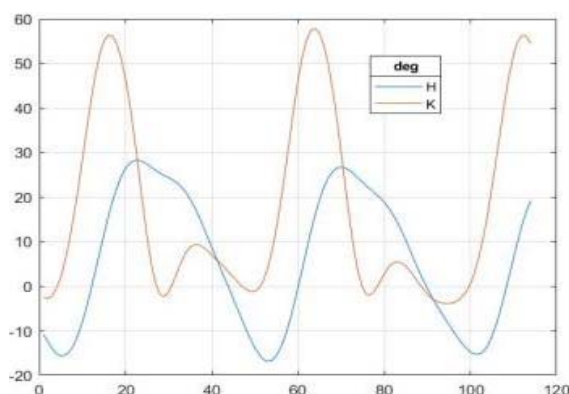


图7 关节角度拟合曲线

因为髋关节、膝关节运动状态形式不同,标准数据复杂程度不同,当膝关节级数 $i=5$,髋关节级数 $i=4$,从图中可以得知拟合曲线和计算仿真曲线误差小,说明下肢各关节角度变化与机构不产生冲突,结构设计合理化。

4 结语

对于刚性外骨骼,本文所设计的基于绳驱动的下肢外骨骼,能降低整个机器人的重量,减少穿戴者的能量消耗;并且配备有辅助支撑装置以及调节装置,适用于大多数人群。本文对其驱动原理作了描述,给出其结构矩阵,能为控制理论提供基础,并且对其进行运动学分析,提供了数学模型。通过运动学仿真,其角度变化平稳,无干涉现象,表明本文所设计的下肢外骨骼应用效

果良好,设计具有可行性。

[参考文献]

[1]林硕,刘庆.绳驱动下肢外骨骼结构设计及运动学分析[J].技术与市场.2022,29(10):23-26.

[2]张明路,钟道方,田颖,等.穿戴式下肢外骨骼机器人研究现状[J].科学技术与工程,2021(19):7856-7862.

[3]曹慧林,于随然.下肢康复外骨骼机器人结构拟人设计与运动学分析[J].机械设计与研究,2020(04):12-17.

作者简介:

朱飞飞(1997--),男,汉族,河南商丘人,在读硕士研究生,研究方向为机械工程。