

虚拟外骨骼机构的仿真研究

宋歌 张先锋 吴榕

(厦门大学 航空航天学院,福建 厦门 361005)

摘要:可穿戴型下肢外骨骼机器人,也简称为助力腿,可以用来完成依靠人的自身能力无法单独完成的远行、负重、爬楼等任务。通过对人体下肢的骨骼结构和运动情况进行分析,设计了一套助力腿机构;通过建立三维立体模型,对机构运动情况进行模拟仿真研究,并与人体运动的实际情况进行对比。

关键词:外骨骼;机构设计;助力腿;运动仿真

中图分类号: O539 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-4801(2016)02-032-04

轮式交通工具是重物的主要运输方式,然而在某些情况下,例如岩石和阶梯,轮式交通工具就无法实现行走和运输功能。而人腿能适应各种极端地形,因此在这些环境下,步行成为一种更加便捷的运输方式。在伊拉克战争时,美军已使用外骨骼机器人提高了士兵的负载能力,并且提高了整支部队的机动性与灵活性。此外,将外骨骼作为康复医疗器械使用,可以帮助病人恢复直立行走甚至直接行走。目前很多国家都投入了大量人力和财力研究外骨骼。研究外骨骼机构在军事和医疗上都具有重要意义。

1 外骨骼的定义及分类

外骨骼是一种能够保护生物柔软内部器官从而进行构型和建筑的坚硬外部结构,主要分为无辅助能源型外骨骼和有辅助能源型外骨骼。无辅助能源型外骨骼是指利用材料特性和机械结构设计,在无辅助能源的前提下,以原有的生物机能来完成更高的功能要求^[1]。有辅助能源型外骨骼也称为能力增强型外骨骼,或称为外骨骼机器人,它是指通过外界辅助能源,能够比无辅助能源型外骨骼以更大幅度提升现有人体机能的人类外骨骼。由于有辅助能源,所以这类外骨骼机器人结构精细、功能丰富,能够实现多种用户要求。

2 基本机械结构设计

2.1 人体下肢解剖结构

根据人体骨骼机理研究^[2],下肢骨骼由大腿骨、小腿骨、足骨组成,包括人体最大的3个关节:髋关节、膝关节和踝关节。

髋关节是典型的球臼关节,由髋骨的髋臼、股骨头和股骨颈形成关节,下方与股骨相连,颈干交界处内外侧有大小转子。髋关节运动稳定、灵活,具有很大的活动能力。膝关节是人体最完善最复杂的关节,负重多且运动量大,是下肢活动的枢纽。踝关节属屈戌关节,主要功能是负重,其骨性结构包括胫骨下端、腓骨下端和距骨^[3]。通过简化,可以将其看作图1所示的机构。

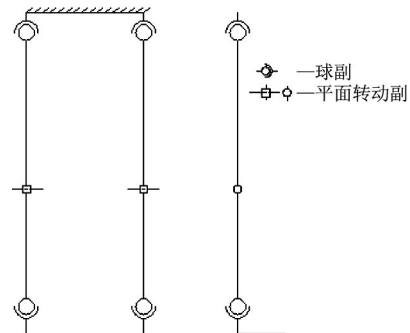


图1 模拟人体下肢运动的简化机构

2.2 下肢外骨骼机器人的基本结构设计

从机械结构的角度上看,人体腿部股骨和骨盆的连接相当于2根杆用球铰链连接于机架,所以为了便于跟随股骨绕髋关节做旋转运动,可将下肢外骨骼的髋关节设计为球铰链。由于球铰链不便于加工和驱动,须将其进行分解。为了满足跟随人体髋关节运动的需求,将下肢外骨骼的髋关节部分设计为由1个绕轴向转动的铰链和1个万向联轴器连接的类球铰链,其3个转动轴正交,转动中心为万向联轴器的十字轴轴心。穿戴时,十字轴轴心的位置处于人体髋关节连线的延长线上,距离都为 L ,与膝关节的距离和人体股骨长度

作者简介:宋歌(1990-),男,硕士研究生,研究方向:机电一体化。

通讯作者:吴榕(1961-),男,副教授,研究方向:机械工程及其自动化技术、机电一体化技术、航空机电技术。

相同。髌关节部分机构简图如图2所示。

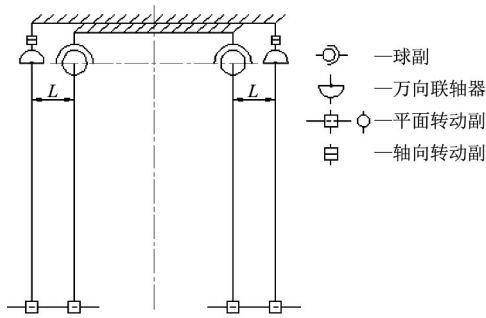


图2 髌关节部分机构图

下肢外骨骼机器人的膝关节经简化设计为平面铰链连接。

人体踝关节简化为球铰链,脚掌绕球铰链做旋转运动。人体腿部和下肢外骨骼机器人的机构简图如图3所示,其中A点代表下肢外骨骼机器人胫骨的末端,B点代表人体脚掌上的一点。考虑到人体脚掌绕踝关节的转动范围较小,再参考髌关节部分的机构,对类球铰链进行结构变形。

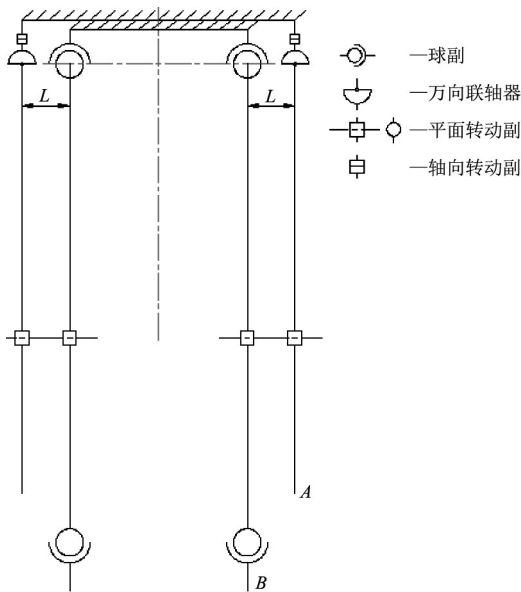


图3 髌关节和膝关节部分机构简图

综合考虑,该整体下肢外骨骼机器人的三维机构已基本满足人体脚掌的运动需求。

3 SOLIDWORKS 三维建模

首先利用CAD Drawing进行单个零件的绘制,然后生成三维实体模型。

在SOLIDWORKS里面将建好的零部件进行组装,按照CAD图纸进行装配。装配图主要由3个部分组成:腰部的髌关节、膝关节和踝关节。

下肢外骨骼机器人的膝关节和人体膝关节一

样,是一个平面铰链,两者在Y、Z轴上的空间坐标相同,X轴方向上外骨骼的坐标比人体膝关节的坐标少L,两个平面铰链对应的转轴相平行,初始时方向与X轴负方向相同,两杆夹角为 ϕ ,初始时 ϕ 为 180° 。

对于踝关节,要保证3个自由度。其中,环形移动部件保证了脚可以在XY平面内的转动;单轴转动部件使得脚可以前后运动,即在YZ面内的运动;同时另外1个单轴转动部件使得脚踝可以侧转,即在平面XZ方向的运动。

最终,整体单腿的三维立体模型如图4所示。



图4 左腿SOLIDWORKS模型实际情况

4 ADAMS 软件建模

根据SOLIDWORKS模型,将下肢外骨骼进行简化,以便在ADAMS软件里进行分析。

然后,对其零件材料进行设置。考虑到经济适用性,选择铝合金材料,密度为 $\rho=2.74 \text{ kg/m}^3$,其他部分按照标准件的密度进行定义。设置重力为Y方向向下, $g=9.80665 \text{ m/s}^2$ 。经过定义,每个零部件都有质量,并受到重力作用。

在进行膝关节和踝关节建模时,为了便于分析,也省略了一些标准件。

显然,在ADAMS中要与在SOLIDWORKS中一样,即分别在3个平面内保证3个自由度。

建模完成后,对各个零部件进行约束。约束用到了以下几种:Fixed Joint、Revolute Joint、Translational Joint、Cylindrical Joint、Spherical Joint、Hooke Joint。

对腰部和大腿部分进行约束。首先将腰部支架与腰部进行固定连接,再将髌关节与大腿进行旋转约束,并与大腿部分进行移动和旋转连接约束。这样可以仿真大腿与腰部、髌关节的相连。

同样,为保证走路时膝关节的前后伸屈,要用旋转约束。在处理膝关节的连接时,首先将小的

零部件如螺栓等固定在大腿这个部件上,然后将大腿与小腿进行旋转连接。除此之外,还要考虑小腿在Z方向上的位移,所以还要加上移动连接。

在处理踝关节时,为保证踝关节处有3个自由度,旋转约束要有3个。同时,将不重要的零部件(如螺母等)和其中的大部件进行固定约束,以减少运动时的干扰。

其中,为了保证踝关节运动时小腿的正常运动,对小腿部分还采用了移动约束。对脚踝的3个自由度方向分别采用了3个方向的旋转约束,对不重要的零部件进行了固定约束,约束在小腿或者脚掌上。

对于两条腿而言,约束情况是相同的,只是在运动函数上有所不同。

5 函数构造及运动仿真

5.1 左腿函数构造

5.1.1 髋关节函数构造

根据人体运动的真实情况,对腰部髋关节处加驱动。驱动器的设置依附于运动副的设计。仿真分析的方案首先为穿戴者主动、外骨骼被动,可选择的驱动关节分别为髋关节、膝关节和踝关节,并在相应运动副上添加了驱动器^[4]。本文采用最直观的步行运动关节数据信息作为驱动信息。

在对髋关节进行运动仿真时,选用了具有循环效果的三角函数,而关节角度则随时间序列变化,从而实现了运动。本文主要采用美国 Motion Analysis 公司所测量得到的数据^[5],即用真人在跑步机上的步行数据作为助行腿动力学模型的研究基础。

根据数据可以得到髋关节的角度峰值约为 35° ,并且半周期($T/2$)的时间为 0.6 s 。根据公式 $\omega = \frac{2\pi}{T}$ 可以计算出值为 $\omega = 1.67\pi$ 。

根据人体迈步的特点来进行函数选择,选中所需要的约束,modify后在(Function(time))里输入函数,类型为Displacement,如式(1)所示。

$$35d \times \sin(1.67 \times \pi \times \text{time}) \quad (1)$$

利用三角函数和时间相连,就可以对髋关节运动进行约束,并且循环运动。

5.1.2 膝关节函数构造

膝关节要实现的运动是屈和伸。根据数据可以得到膝关节的幅值是 60° ,而周期是不定周期,

说明人体在运动的时候并不是完美的周期运动。为了探究实际情况与实验数据的差距,选择幅值为 60° 、周期约为 1.1 s ,所以 $\omega = 1.8\pi$ 。考虑到走路时同条腿上的相位差,所以在时间上相差 0.3 s ,输入运动约束副,具体公式如式(2)所示。

$$60d \times \sin(1.8 \times \pi \times (\text{time} - 0.3)) \quad (2)$$

5.1.3 踝关节函数构造

踝关节运动要实现3个方向的自由度,由于只能计算出1个自由度方向上的运动情况,根据测量数据得到踝关节运动的幅值约是 20° 、周期约为 1.4 s ,所以 $\omega = 1.43\pi$,输入约束副,如式(3)所示。

$$20d \times \sin(1.43 \times \pi \times \text{time}) \quad (3)$$

5.2 左右腿函数构造

假设人体在运动时,先抬左腿再抬右腿,则髋关节的设置时间上相差半个周期,即 0.6 s ,而两条腿的运动情况及约束副是类似的,于是右腿髋关节的函数设置为公式(4)所示。

$$35d \times \sin(1.67 \times \pi \times (\text{time} - 0.6)) \quad (4)$$

而左腿在迈步的时候右腿的动作是相反的,所以在进行函数约束的时候,时间要较左腿的膝关节延迟约 1.2 s ,这样,得到函数公式为式(5)所示。

$$60d \times \sin(1.8 \times \pi \times (\text{time} - 1.2)) \quad (5)$$

左右腿的踝关节运动类似,因此公式如式(3)所示。

函数构造完成后进行仿真,得到仿真运动的情况。上述各函数的计算,是水平面与各部件的相对运动情况。

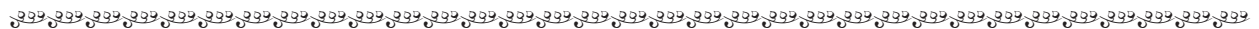
5.3 初次仿真情况与实际情况对比

运用基本模块/用户界面模块(ADAMS/View)可以得出仿真结果曲线,包括各关节位置、速度、角速度变化情况,这些曲线很好地反映了运动过程中各关节的变化规律。由于本文篇幅有限,所得到的曲线图不再展示。

6 研究结果

通过对运动仿真的情况进行分析,发现追踪到的情况并不全是完美的正弦或者余弦函数,反倒是有干扰存在,即模拟运动和人走路时的真实情况并不完全相同。产生此种情况的原因是最开始得到的原始数据并不是完美的(下转第37页)

- [4] 庞皎晓,刘伟.无线通讯技术在PLC控制系统中的应用[J].军民两用技术与产品,2014(7):39-40.
- [5] 洪成华,曹娟,赵旭阳,等.基于无线通信实现方式的PLC网络研究[J].计算机与网络,2011(10):70-72.
- [6] 叶建平,郑萍,李建平,等.基于多模式无线控制的PLC设计与研究[J].化工自动化及仪表,2011(8):978-981,1015.
- [7] 李晓勉,于胜旺,华大鹏.基于PLC无线通讯并车技术的群吊控制[J].河南机电高等专科学校学报,2010(3):7-9.
- [8] 张倩,王尚宏,武云鹏.基于PLC与GPRS、ZigBee的路灯无线控制系统[J].电子设计工程,2012(3):119-120,123.
- [9] 贾辽川,高攀.基于PLC、无线和工控计算机的实时控制与监视系统[J].机电工程技术,2011(8):50,125,202.
- [10] 刘利群.无线局域网技术在PLC通讯中的应用[J].科技创新导报,2013(8):58,60.



(上接第34页)

周期函数,所以在设置运动驱动函数的时候,形成了一定的误差。而将这种运动再赋予到机构的时候,就不能使其准确地运动,所以要对运动函数进行调整。

理想的人机膝关节的运动关系是同轴、同步的屈伸转动,但是由于髌关节旋转的不同轴和穿戴等因素可能造成在行走的时序上出现某些时刻人机膝关节处于不同轴线,因此会对运动协调性造成影响。这也意味着仅仅使用运动函数不能使

机械外骨骼完全模仿人类行走的真实状态。

通过对驱动函数加上一定的接触力和改变函数的幅值周期与相位,进行再调整,如在左腿上,对小腿和小腿上实现直线运动的零件进行添加阻尼^[6]。增加了接触力之后,通过仿真动画可以看出,运动效果明显更加接近真实的运动情况。

本文通过对系统仿真分析得出的一些结论,可以为外骨骼机构设计提供有效的参考。

参考文献:

- [1] Herr H. Journal of Neuro Engineering and Rehabilitation[J]. Journal of neuro engineering and rehabilitation, 2009(6):21.
- [2] 冯治国. 步行康复训练助行腿机器人系统[D]. 上海:上海大学, 2009.
- [3] Abrahams P H, Hutchings R T, Marks Jr Sc. McMinn's colour atlas of human anatomy[M]. 4th edn. London: Mosby, 1998.
- [4] 唐志勇,谭振中,裴忠才. 下肢外骨骼机器人动力学分析与设计[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(6):1338-1344.
- [5] 冯治国,钱晋武,王企远,等. 下肢外骨骼矫形器的协同仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2009(19): 6114-6117.
- [6] 尹军茂. 穿戴式下肢外骨骼机构分析与设计[D]. 北京:北京工业大学, 2010.