

文章编号: 1004-4353(2022)01-0090-05

一种辅助踝髋关节的柔性可穿戴步行 辅助机器人的设计与分析

徐继东, 金山海

(延边大学 工学院, 吉林 延吉 133002)

摘要: 针对传统的外骨骼机器人存在的柔顺性差、穿戴舒适性差等问题, 设计了一种可以为踝髋关节提供辅助的可穿戴机器人. 该机器人由踝关节驱动系统、髋关节驱动系统、传递系统和绑带系统组成. 通过对踝髋关节的受力分析表明, 在穿戴者步态周期的 0%~60% 范围内该机器人可以为踝关节和髋关节提供约 200 N 和 222 N 的峰值力, 进而可以为穿戴者的脚踝弯曲和髋关节伸展提供帮助. 该研究成果可为外骨骼步行辅助机器人的设计提供理论依据.

关键词: 下肢外骨骼机器人; 踝髋关节; 步行辅助机器人; 步态周期

中图分类号: TP242

文献标识码: A

Design and analysis of a soft wearable walking assistance robot for ankle and hip joint

XU Jidong, JIN Shanhai

(College of Engineering, Yanbian University, Yanji 133002, China)

Abstract: Aiming at the problems of poor flexibility and wearing comfort of traditional exoskeleton robots, a wearable robot that can provide assistance to the ankle and hip joints is designed. The robot consists of an ankle joint drive system, a hip joint drive system, a transmission system and a strap system. The analysis of the force on the ankle and hip joints shows that the robot can provide the ankle and hip joints with peak forces of up to 200 N and 222 N during the first 60% of the wearer's gait cycle, thereby providing the wearer's ankle flexion and hip extension provide help. The research results can provide a theoretical basis for the design of exoskeleton walking assistance robots.

Keywords: lower limb exoskeleton robot; ankle and hip joint; walking assistance robot; gait cycle

外骨骼是一种可以提高人的运动能力的可穿戴机器人, 目前被广泛应用于军事、医学康复等领域^[1-3]. 传统刚性外骨骼虽然可以为穿戴者的下肢提供足够大的辅助力, 但其存在重量大、穿戴过程复杂以及轴与穿戴者的关节连接位置容易发生错位等问题^[4-5]. 为了克服上述传统刚性外骨骼存在

的问题, 一些学者研究并设计了多种下肢步行辅助机器人. 例如: Jin 等^[6]开发了一种柔性可穿戴下肢助力机器人, 该机器人可以为髋关节提供合理有效的辅助力, 但无法为其他关节提供辅助; 王东海^[7]设计了一种被动式柔性下肢外骨骼机器人, 该机器人可以减轻膝关节负载, 但辅助力较

收稿日期: 2021-08-07

基金项目: 吉林省发改委产业技术与开发专项(2019C048-2)

第一作者: 徐继东(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为外骨骼机器人.

通信作者: 金山海(1982—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为外骨骼机器人、滑模控制.

小; Asbeck 等^[8]设计了一种可以为穿戴者的踝关节和髌关节提供辅助的柔性可穿戴机器人,该机器人虽然可以通过主被动相结合的方式产生辅助力,但对穿戴者髌关节提供的辅助力较小; Collins 等^[9]设计了一种轻便的被动助力机器人,该机器人可以根据穿戴者脚踝的运动状态提供合适的辅助力,但由于该机器人无动力源,因此只能提供很小的辅助力。上述学者们设计的机器人虽然较好地解决了装置笨重、外骨骼的轴与穿戴者关节的连接位置易发生错位等问题,但仍存在机器人提供的辅助力较小,以及无法同时为下肢多个关节提供辅助力等缺点。为此本文设计了一种辅助踝关节的柔性可穿戴步行辅助机器人,并通过穿戴者踝关节的受力分析验证了该机器人的有效性。

1 结构设计

本文设计的柔性踝关节辅助机器人主要由驱动系统、传递系统和绑带系统组成(见图 1)。

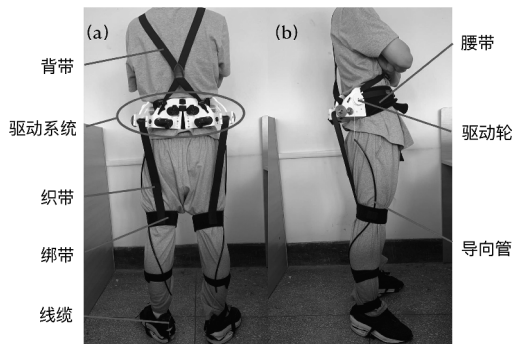


图 1 机器人的正视图(a)和侧视图(b)

1) 驱动系统。整体驱动系统由髌关节驱动系统和踝关节驱动系统两部分组成,主要包含电机、驱动轮、滚轮、齿轮组、滚筒等部件,如图 2 所示。考虑到在腰部增加 8 kg 的质量不会显著增加穿戴者的能量消耗^[10],所以将占机器人重量绝大部分的驱动系统通过腰带固定在腰部,如图 1 所示。在髌关节驱动系统中,固定在电机轴上的小齿轮驱动大齿轮和滚筒旋转,以此使两端分别固定在滚筒和穿戴者大腿后侧绑带的弹性带卷起,进而产生拉力以辅助髌关节伸展。在踝关节驱动系统中,固定在电机轴上的驱动轮使两端分别固定在驱动轮和脚踝处的线缆卷起,从而产生拉力以辅

助踝关节进行跖屈运动。

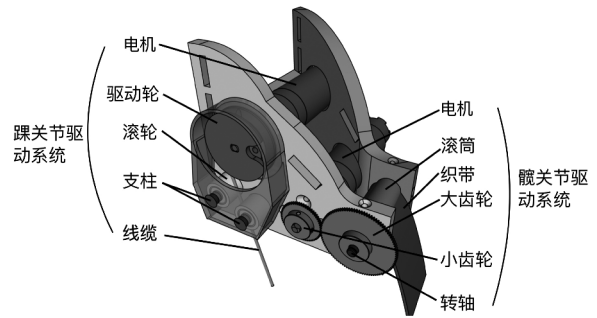


图 2 驱动系统结构图

2) 传递系统。传递系统由可以承受高力矩的线缆和弹性带组成,如图 3 所示。由图 3 可以看出,线缆与弹性带从穿戴者腰部的驱动系统分别延伸到脚跟和大腿,并在辅助过程中将辅助力传递到踝关节。



图 3 传递系统示意图

3) 绑带系统。绑带系统由绑缚在穿戴者腰部、大腿、小腿和脚踝的绑带组成,如图 1 所示。其中腰部的绑带用来固定驱动系统,大腿和小腿的绑带用来固定导向管,脚部的绑带用来固定脚踝和连接线缆。

2 助力策略

图 4 为本文设计的机器人的助力策略,该策略将一侧脚脚尖从接触地面开始到再次接触地面定义为一个步态周期。

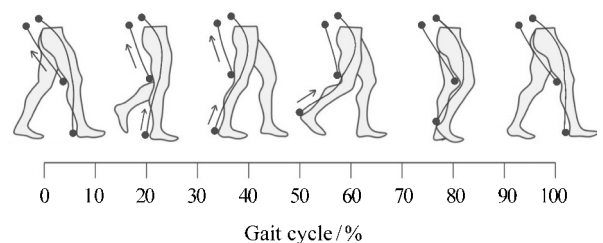


图 4 机器人辅助策略示意图

机器人在穿戴者步态周期的 0%~60% 范围内为踝关节提供辅助力矩. 其中: 在步态周期的 0%~40% 范围内, 滚筒卷起髌关节驱动系统中的弹性带, 以此给大腿施加一个沿弹性带运动方向的拉力, 驱动穿戴者的大腿向前摆动; 在步态周期的 20%~60% 范围内, 踝关节驱动系统收紧线缆, 使穿戴者的脚跟处产生一个沿线缆向上的拉力, 以此驱动穿戴者的踝关节弯曲.

3 受力分析

3.1 踝关节的受力分析

在踝关节驱动系统中, 电机的最大持续扭矩为 $2 \text{ N} \cdot \text{m}$, 旋转半径为 0.008 m , 为脚踝提供的最大辅助力为 200 N .

图 5 为踝关节的受力示意图, 其中图(a)是穿戴者脚踝的示意图, 图(b)和(c)分别为穿戴者在站立时刻和步行期间某一时刻的踝关节受力示意图. 图中 O_1 为踝关节矢状面上的枢轴点, r_1 为踝关节力臂, l_1 为枢轴点 O_1 到线缆在踝关节作用点的距离. 在辅助过程中, 由于线缆与穿戴者小腿是平行的, 所以踝关节力臂 r_1 的旋转角度与穿戴者的踝关节角度 θ_1 相等. 因此, 踝关节的力臂 r_1 可表示为:

$$r_1 = l_1 \cos \theta_2. \quad (1)$$

由式(1)可得踝关节辅助力矩 T_1 的计算公式:

$$T_1 = f_1 r_1, \quad (2)$$

其中 f_1 为踝关节的目标辅助力.

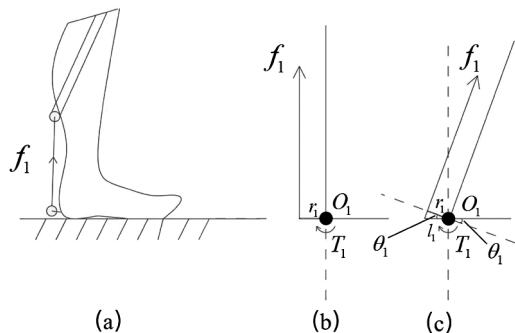


图 5 踝关节受力示意图

对踝关节驱动系统在步态周期的 20%~60% 范围内提供的目标辅助力 f_1 进行了模拟, 如图 6 所示. 由图 6 可以看出, 在步态周期的 20%~60% 范围内, f_1 呈增加趋势, 并在 60% 时达到峰

值. 另外, 在此期间机器人对穿戴者踝关节进行辅助的最大辅助力矩 T_1 为 $4 \text{ N} \cdot \text{m}$ 左右.

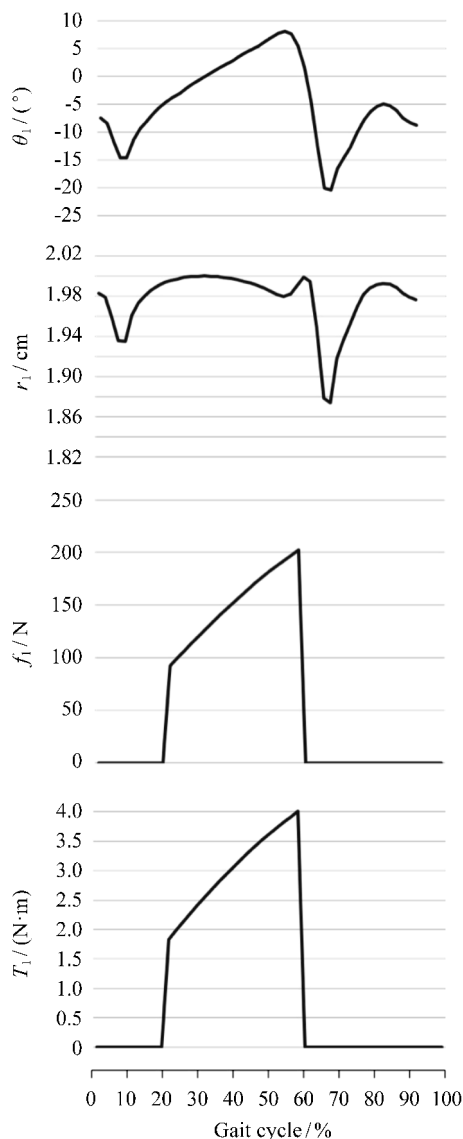


图 6 踝关节角度 θ_1 、踝关节力臂 r_1 、踝关节目标辅助力 f_1 以及踝关节所受辅助力矩 T_1 在一个步态周期内的波形图

3.2 髌关节的受力分析

图 7 为髌关节的受力示意图, 其中图(a)表示穿戴者大腿的示意图, 图(b)和(c)分别为穿戴者大腿向前摆动和向后摆动时的髌关节受力示意图. 图中 O_2 为髌关节矢状面上的枢轴点, r_2 为髌关节力臂, l_3 为大腿长度 ($l_3 \approx 0.5 \text{ m}$), x_1 为髌关节驱动系统到髌关节的距离 ($x_1 \approx 0.1 \text{ m}$), θ_2 为髌关节角度, l_2 为驱动系统与大腿末端的弹性带长度 ($l_2 = \sqrt{l_3^2 + x_1^2 - 2l_3x_1\cos(\frac{\pi}{2} + \theta_2)}$).

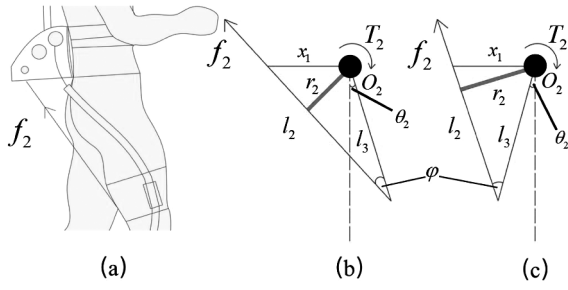


图 7 踝关节受力示意图

在踝关节驱动系统中,电机的最大持续扭矩为 $2 \text{ N} \cdot \text{m}$, 齿轮传动比 i 为 1.67, 滚筒外径为 0.005 m , 踝关节的最大辅助力为 222 N . 大腿与弹性带之间的角度 φ 的计算公式为:

$$\varphi = \arccos\left(\frac{l_2^2 + l_3^2 - x_1^2}{2l_2l_3}\right). \quad (3)$$

根据 φ 可得踝关节力臂 r_2 为:

$$r_2 = l_3 \sin \varphi. \quad (4)$$

由公式(4)即可得到计算踝关节的辅助力矩 T_2 的公式,为:

$$T_2 = f_2 r_2, \quad (5)$$

其中 f_2 为踝关节目标辅助力.

为了验证机器人对穿戴者踝关节的辅助效果,在步态周期的 $0\% \sim 40\%$ 范围内对踝关节驱动系统所提供的目标辅助力 f_2 进行模拟,结果如图 8 所示. 由图 8 可以看出,在步态周期的 $0\% \sim 20\%$ 范围内, f_2 呈增加趋势,并在 20% 时达到峰值;在步态周期的 $20\% \sim 40\%$ 范围内, f_2 呈减小趋势,并在 40% 时减小为 0. 在该期间穿戴者踝关节受到的最大力矩约为 $20 \text{ N} \cdot \text{m}$. 上述结果说明,机器人对穿戴者踝关节的运动能够起到有效的辅助作用.

4 结论

研究表明,本文设计的辅助踝关节的可穿戴步行辅助机器人可以在步态周期的 $0\% \sim 60\%$ 范围内为穿戴者的踝关节提供高达约 200 N 和 222 N 的峰值力,以帮助脚踝弯屈和踝关节伸展,而且其结构简单,穿戴方便;因此本文研究结果可为外骨骼步行辅助机器人的设计提供参考. 在今后的研究中,我们将继续探讨机器人的轻便性,并通过实验探索如何在不同行走模式下为穿戴者的

踝关节提供最佳的辅助力,以进一步增强穿戴者的下肢活动效果.

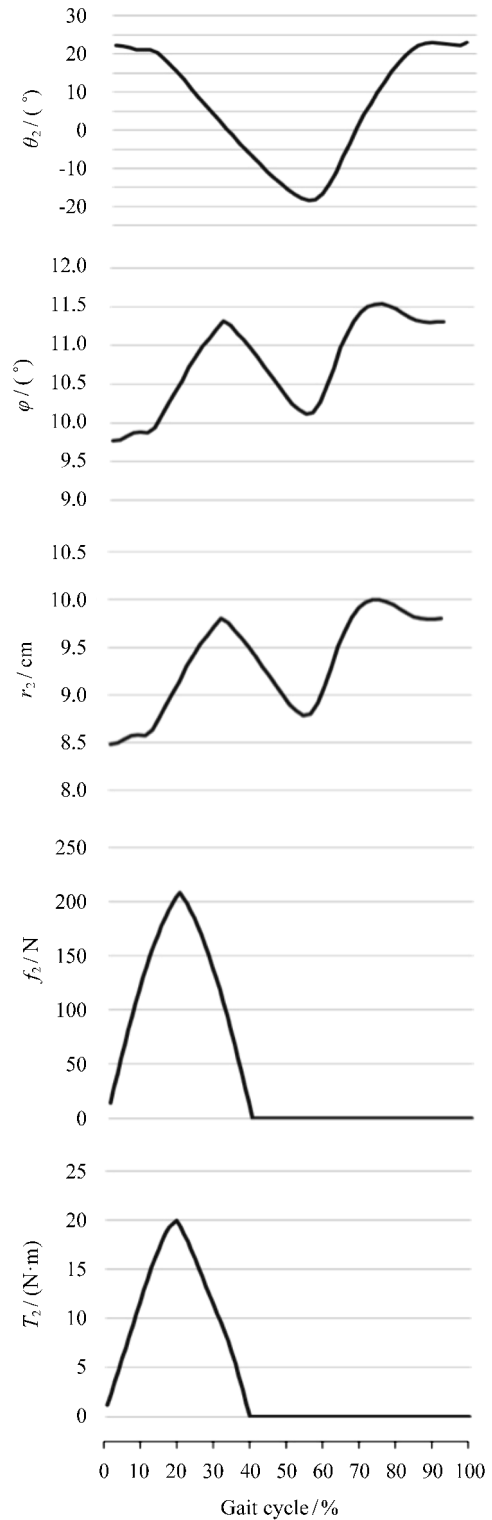


图 8 踝关节角度 θ_2 、大腿与弹性带之间的角度 φ 、踝关节力臂 r_2 、踝关节目标辅助力 f_2 以及踝关节所受辅助力矩 T_2 在一个步态周期内的波形图

参考文献:

- [1] 李会营,王惠源,张鹏军,等. 外骨骼装备在未来单兵系统中的应用前景[J]. 机械设计与制造, 2012(3):275-276.
- [2] KAWAMOTO H, HAYASHI T, SAKURAI T, et al. Development of single leg version of HAL for hemiplegia[C]//Conference Proceedings: 2009 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Minneapolis: IEEE, 2009:5038-5043.
- [3] 周振. 基于人体助力外骨骼的老年人家用医疗产品设计研究[D]. 重庆:重庆大学, 2016.
- [4] SHORTER K A, KOGLER G F, LOTH E, et al. A portable powered ankle-Foot orthosis for rehabilitation[J]. Journal of Rehabilitation Research & Development, 2011,48(4):459-472.
- [5] SHAMAEI K, ADAMS A A, CENCIARINI M, et al. Preliminary investigation of effects of a quasi-passive knee exoskeleton on gait energetics[J]. Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc, 2014,2014(1):3061-3064.
- [6] JIN S, IWAMOTO N, HASHIMOTO K, et al. Experimental evaluation of energy efficiency for a soft wearable robotic suit[J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2016,25(8):1192-1201.
- [7] 王东海. 基于行走步态的被动式重力支撑柔性下肢外骨骼系统[D]. 杭州:浙江大学, 2016.
- [8] ASBECK A T, ROSSI S M M D, HOLT K G, et al. A biologically inspired soft exosuit for walking assistance[J]. The International Journal of Robotics Research, 2015,34(6):744-762.
- [9] COLLINS S H, WIGGIN M B, SAWICKI G S. Reducing the energy cost of human walking using an unpowered exoskeleton[J]. Nature, 2015,522:212-215.
- [10] BROWNING R C, MODICA J R, KRAM R, et al. The effects of adding mass to the legs on the energetics and biomechanics of walking[J]. Medicine & Science in Sports & Exercise, 2007,39(3):515-525.

~~~~~

(上接第 75 页)

- [3] BOIVIN M, BOURDEAU N, BARNABÉ S, et al. Black spruce extracts reveal antimicrobial and sprout suppressive potentials to prevent potato (*Solanum tuberosum* L.) losses during storage[J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2021,5:100187.
- [4] 潘存德,王强,阮晓,等. 天山云杉针叶水提取物自毒效应及自毒物质的分离鉴定[J]. 植物生态学报, 2009,33(1):186-196.
- [5] LEE J H, YANG H Y, LEE H S, et al. Chemical composition and antimicrobial activity of essential oil from cones of *Pinus koraiensis*[J]. J Microbiol Biotechnol, 2008,18(3):497-502.
- [6] 秦特夫,陆熙娴. 长白鱼鳞云杉、臭冷杉木材溶剂抽出物中弱酸性物质组成的研究[J]. 林产化学与工业, 1993(1):65-70.
- [7] 陈群,张兴,王杰. 罗勒挥发油提取工艺及其应用研究进展[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2018,15(4):9-11.
- [8] 陆熙娴,秦特夫. 长白鱼鳞云杉和臭冷杉的木材及其抽出物化学组成的研究[J]. 林产化学与工业, 1993(4):331-337.
- [9] TOUDERT N, ZAKKAD F, DADDA N, et al. Phytochemical analysis of bioactive extracts and seed oil of three Euphorbia species from Algerian flora by LC-MS and GC-MS[J]. Indonesian Journal of Chemistry, 2021,21(3):546.
- [10] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典:四部[S]. 北京:中国医药科技出版社, 2020:233.
- [11] 赵宏博,于淼,孟繁颖,等. 红皮云杉针叶挥发油气相色谱-质谱指纹图谱及多成分定量分析[J]. 中国执业药师, 2013,10(11):23-27.
- [12] 赵宏博,沈宇,方洪壮. GC-MS 法分析红皮云杉针叶挥发油成分[J]. 黑龙江医药科学, 2017,40(3):89-91.
- [13] 宋小双,斯琴毕力格,马晓乾,等. 鱼鳞云杉干部挥发性成分与云杉大黑天牛危害的关系研究[J]. 安徽农业科学, 2009,37(26):12595-12597.