

· 康复工程 ·

功能性电刺激与机械外骨骼融合的膝关节康复装置的设计与实现*

任 勇¹ 张定国^{1,2}

摘要

目的:设计一种新型的膝关节康复装置,融合了功能性电刺激和机械外骨骼,使其能够发挥两种康复技术的优点,同时弥补各自的缺陷,实现一种更加优化的康复辅助模式。

方法:该康复装置采用串联弹性驱动器作为膝关节外骨骼的动力驱动装置,并设计了相应的人机交互机构保证良好的力矩传递。驱动电机采用交流伺服电机,并与减速器相连保证足够的转矩。减速器输出轴和腿部支撑件之间通过弹性元件相连。与刚性驱动器相比,串联弹性驱动器具有防止过大的力冲激、可以实现稳定的力矩控制、储存和释放能量等优点,适用于人机交互领域。膝关节外骨骼还融合了模拟编码器、接触力传感器等便于进行反馈控制。

结果:制作了原型机并进行了初步的实验验证,结果显示该膝关节康复装置能够实现较为精确的轨迹追踪,并且能够平衡电刺激和机械外骨骼的辅助力矩。

结论:本文设计的混合式膝关节康复装置能够使两种康复技术无干扰地结合,为康复工程提供了一种新的思路。

关键词 功能性电刺激;外骨骼;串联弹性驱动器

中图分类号:R496 **文献标识码:**B **文章编号:**1001-1242(2016)-03-0330-03

功能性电刺激(functional electrical stimulation, FES)已被证明是一种辅助瘫痪或脊髓损伤患者恢复其运动功能的有效手段^[1]。FES通过对人体骨骼肌施加低频电脉冲,使肌肉收缩从而实现恢复患者运动功能的目的。虽然国内外针对FES已经进行了很多的研究,然而由于人体肌肉模型的高度非线性和时变特性,目前控制FES实现复杂的运动模式仍然是非常困难的。FES的一些缺陷诸如产生的力矩不足、连续刺激产生的肌肉疲劳等都影响了其进一步的发展。下肢外骨骼机器人是另一种帮助瘫痪或脊髓损伤患者实现下肢运动康复的辅助技术,其利用机械式的驱动器为患者下肢提供必要的力矩。与FES相比,下肢外骨骼康复机器人便于实现复杂稳定的运动控制,但是一般只能实现被动的辅助作用,无法为患者带来FES所能带来的诸如提高肌肉活性等生理学意义上的益处。融合功能性电刺激和外骨骼机器人的联合辅助成为一种新的康复技术,既可以弥补两者的缺陷,又可以发挥各自所长^[2]。这种混合式康复辅助系统国内外已有一些相关的研究开展。有研究者通过对穿戴下肢外骨骼的脊髓损伤患者的下肢腿后腱施加电刺激,可以减少机械外骨骼的功耗^[3]。另有研究者研发的WalkTrainer混合外骨骼系统利用估计穿戴者和外骨骼之间的交互力来实现FES的闭环控制^[2]。但融合功能性电刺激的下肢外骨骼康复系统相

关的研究还处在初级阶段,没有对于人机交互以及协调控制有深入的分析。

本文针对为功能性电刺激提供力矩辅助的要求,设计并制作了一种新型的膝关节外骨骼康复装置。该膝关节外骨骼采用弹性驱动器,能够实现稳定的力矩控制,同时便于实现人机交互。通过对实验样机的初步测试,验证了该膝关节外骨骼设计的可行性,为后续的研究提供了可靠的实验平台。

1 膝关节外骨骼设计

膝关节外骨骼平台包括机械本体和传感器两部分。机械本体采用交流伺服电机作为动力源,并通过弹性元件传递力矩,驱动腿部支撑机构运动。膝关节外骨骼还融合了模拟编码器和接触力传感器分别用于测量关节角度和交互力矩。整体的膝关节外骨骼平台的三维设计模型如图1(a)所示,原型机实物如图1(b)所示,使用者穿戴方式如图1(c)所示。

1.1 机械本体

膝关节外骨骼必须能够驱动人体膝关节运动,同时也要能够支撑其机械结构的重量。因此我们选用松下A5交流伺服电机,型号为MHMJ042G1U,该交流伺服电机的额定输出功率为400W,额定转矩为1.3Nm,额定转速为3000r/min。该交流伺服电机配套的驱动器型号为MBDKT2510CA1,可

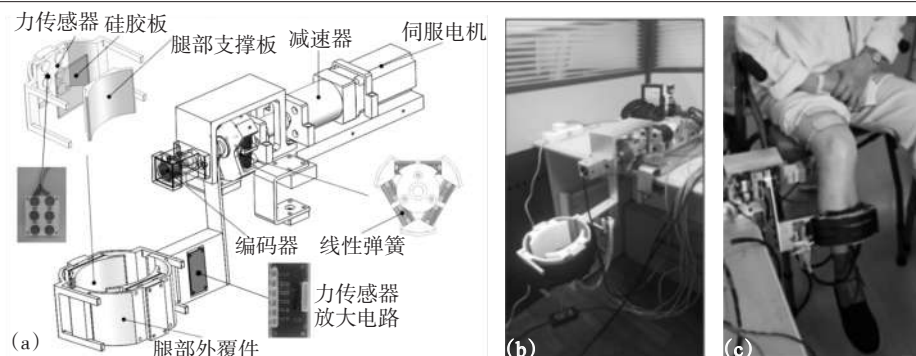
DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2016.03.016

*基金项目:国家自然科学基金(51475292);上海市自然科学基金(14ZR1421300)

1 上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室,200240; 2 通讯作者

作者简介:任勇,男,硕士研究生;收稿日期:2014-11-11

图1 膝关节外骨骼平台



以实现多种模式的运动控制。交流伺服电机的输出轴和减速器相连,我们选用的为减速比为15的行星轮减速器,这样减速器的输出轴端就可以输出19.5Nm的额定转矩。

减速器输出轴通过联轴器和弹性部件相连,该弹性部件的设计参考了文献^[4],整体成轮辐状。该弹性部件一端和减速器输出轴固定,另一端和腿部结构固定,之间通过6个线性模具弹簧传递动力。当减速器输出轴端转动并压缩其中的3个弹簧传递动力时,另外3个弹簧一般处于松弛状态。每个线性模具弹簧的刚度系数为16464N/m。对于整个弹性元件而言,在运动过程中其刚度系数可以通过下式计算^[4]:

$$K_s = 6 \cdot K_A \cdot \left(R^2 + \frac{r_s^2}{3} \right) \cdot (2 \cos \theta_s^2 - 1) \quad (1)$$

式中, K_s 为整体弹性元件的刚度系数, K_A 为单个线性弹簧的刚度系数, R 为弹性元件轮辐的半径, r_s 为线性弹簧的外周半径, θ_s 为转动角度。在实际控制系统中,计算该弹性元件的实际刚度系数,需要代入设计尺寸和相关参数, $R=0.027\text{m}$, $r_s=0.008\text{m}$ 。

在膝关节外骨骼的执行端,用于固定人体下肢小腿的机构和一个模拟编码器固定在同一根轴上。腿部外覆件用于绑缚和固定小腿,包括前后两部分,之前可以移动以调节绑缚的预紧力。前后腿部的支撑板为用户提供较为合适的接触面,为了增加穿戴的舒适性,在腿部支撑板和人体小腿之间我们还增加了一层海绵垫。当人体小腿穿戴好并调整好预紧力后,外部用粘带固定以防止运动过程中的松动。

该膝关节外骨骼平台在使用时是固定在桌上,因此,我们还设计了相应的底板和辅助固定的元件。在膝关节外骨骼的机械结构中,腿部支撑板是使用3D打印机制作的元件,其他各个部件均是机加工铝件。

1.2 传感器

膝关节外骨骼反馈控制必须采集所需的传感器信息,本系统中融合了两种传感器,分别是模拟编码器用于测量关节角度,和接触力传感器用于测量交互力矩。

本研究选用的编码器为Angtron-RE-25系列智能旋转编

码器,为绝对式编码器,该编码器最高可提供11位/周分辨率,及12位/周准确度。不同于一般的伺服电机用编码器,该旋转编码器的输出信号为电压信号,可以采用AD直接采样,非常便于进行快速开发。该编码器在0—360°的测量范围内输出电压信号和实际角度值为线性对应关系,输出的电压信号为0—5V。此外,该编码器在有效的测量范围内提供0.1%线性精度的绝对角度输出,可以充分利用0—5V的采样区间。

对于接触力传感器而言,我们采用的基本部件是FSR402电阻式薄膜压力传感器。该传感器是由Interlink Electronics公司生产的一款超薄型电阻式压力传感器,其原理是将施加在FSR传感器薄膜区域的压力转换成电阻值的变化,压力愈大,电阻越低。虽然该FSR压力传感器允许的测量范围在0—10kg,但是该压力传感器的测量不够精确,且呈现一定的非线性。经测试,该传感器在0—2kg可以达到较为理想的测量效果。针对膝关节外骨骼的接触力测量要求,增加了其测量范围。因此,我们采取的方式是使用6个FSR压力传感器并行测量,其分布方式如图1(a)所示。接触力传感器就可测量约0—120N的压力。FSR传感器还需要将电阻值的变化转化为标准电压值的变化用于测量,因此,需要放大电路。基于MCP6004和MCP6002运算放大器设计了电路,MCP6004有4个通道,MCP6002有2个通道,这样每块电路板上就可以提供6个通道连接6个FSR传感器。在膝关节外骨骼中,前后各有一块接触力传感器用于完整地测量机械外骨骼和人体小腿之间的交互力矩。在使用前,还用标准砝码对FSR传感器进行了压力值的标定。

由于编码器和接触力传感器输出的均是标准的0—5V电压信号值,所以,我们采用NI 6343数据采集板卡进行传感器信息的测量。

2 膝关节外骨骼控制与测试

2.1 串联弹性驱动器的控制

刚性驱动器通常用于工业机器人等对运动轨迹精度要求非常高的领域,然而外骨骼机器人对驱动器的要求则是保证安全性、能够实现稳定的力矩控制、对过大的力冲激具有鲁棒性等。串联弹性驱动器(SEA)恰好满足这些要求。SEA驱动器已经在机器人学和外骨骼领域有广泛的应用^[5]。

SEA驱动器的控制框图如图2(a)所示,其输入为参考力值,运行过程中电机的位置可以由内部的编码器测得,负载

端的实际角度值由上述的模拟量编码器测定,两者之差再乘以弹性元件的刚度系数就是负载的力值。SEA驱动器的相关性能由控制器调节,这里采用的是PID控制器。

NI数据采集板卡提供了完整的基于.NET平台的类库,非常方便调用来采集数据或输出信号,因此膝关节外骨骼的控制系统在Visual Studio平台下由C#编写成。

2.2 初步测试实验

为了验证膝关节外骨骼设计的可行性,我们进行了初步的实验测试。一位男性健康受试者参加了测试,该受试者的身高为1.70m,体重为65kg。为了使膝关节外骨骼能够提供合适的力矩辅助,必须对人体小腿摆动所需的力矩进行估算。根据人体生物力学的数据^[6],小腿(包括足部)的质量约占整体体重的6.1%,长度约占身高的28.5%,其转动惯量由 $I = m(0.735l)^2 [Nms^2/rad]$ 计算,其中 m 为身体质量, l 为小腿长度。人体小腿的动力学模型可以简化作一个摆杆,其方程可用下式表示:

$$\tau(t) = I\ddot{\theta}(t) + B\dot{\theta}(t) + K\theta(t) + mgl_c \sin \theta(t) \quad (2)$$

其中, τ 为转矩, I 、 B 、 K 分别为小腿的转动惯量、阻尼系数和刚度系数。刚度系数和阻尼系数由下式表示: $K = \omega^2 I - mgl_c/2 [Nm/rad]$, $B = 2\eta\omega I [Nms/rad]$ 。在实验中, η 和 ω 分别设定在0.5和6Hz。

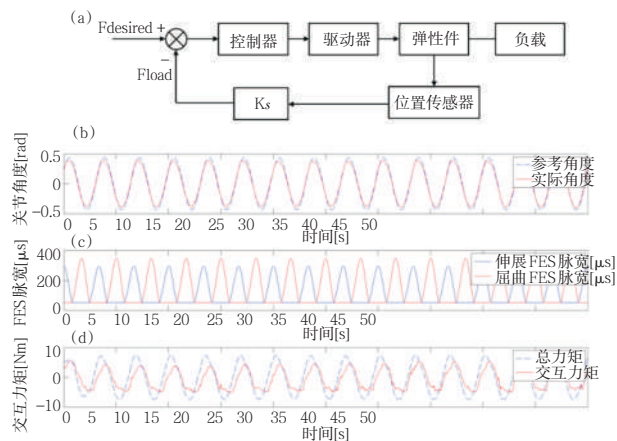
测试实验中,受试者坐在椅子上,小腿穿戴上膝关节外骨骼,股直肌和腓绳肌上贴上电刺激电极片。电刺激器为德国Hasomed开发的RehaStim,我们根据其通信协议用C#编写了相应的程序以使PC可以控制FES的强度。受试者测试过程中被要求不做任何主动运动,其小腿运动动力由FES和膝关节外骨骼共同提供,理想状态下两者各提供50%的辅助力矩。受试者膝关节做周期性摆动,摆动的频率为0.3Hz,最大幅度为向前向后25°。FES的脉冲频率设定为50Hz,电流幅值设定为30 mA,脉宽调制波形如图2(c)所示。

图2(b)示,虽然膝关节实际角度和参考角度之间存在一些误差,但是并不大,实际的关节运动基本达到了理想的摆动幅度。从图2(d)示,膝关节外骨骼能够实现期望的部分力矩辅助的作用,当然其提供的辅助力矩并不是严格地占小腿摆动总力矩的50%,这与人体肌肉模型的非线性性和模型与真实情况的误差等因素都有关系。初步测试实验的结果基本验证了上述膝关节外骨骼设计和控制的可行性。

3 结论

本文针对混合式康复辅助系统的要求,设计并实现了一种新型的膝关节外骨骼,能够为FES提供额外的辅助力矩。该膝关节外骨骼采用串联弹性驱动器,并设计了相应的机构来实现。我们制作了一台实验样机并设计了一个初步测试

图2 膝关节外骨骼的控制框图与测试实验结果



实验来检验膝关节外骨骼的性能。从初步测试的数据结果看,该膝关节外骨骼基本实现了其应有的功能。该膝关节外骨骼设计的目的是融合功能性电刺激,构成一种混合式康复辅助系统,既能为瘫痪患者提供稳定有效的运动康复辅助,也能激发肌肉的活性。因此,未来的工作将基于该膝关节外骨骼平台,设计有效的控制策略,使得FES和外骨骼机器人能够协同工作,彼此不产生冲突。此外,目前该膝关节康复平台是固定式的,因此,其小型化和便携化也是未来的研究目标之一。

参考文献

- [1] 蓝宁,肖志雄,聂开宝,等. 功能性电刺激的原理、设计与应用(一)[J]. 中国康复理论与实践,1997,3(4):151—154.
- [2] del-Ama AJ, Koutsou AD, Moreno JC, et al. Review of hybrid exoskeletons to restore gait following spinal cord injury [J]. Journal of Rehabilitation Research & Development, 2012, 49(4): 497—514.
- [3] Ha KH, Quintero HA, Farris RJ, et al. Enhancing stance phase propulsion during level walking by combining fes with a powered exoskeleton for persons with paraplegia [C]. 34th Annual International Conference of the IEEE EMBS, 2012, 344—347.
- [4] Tsagarakis NG, Laffranchi M, Vanderborght B, et al. A compact soft actuator unit for small scale human friendly robots [C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2009: 4356—4362.
- [5] Pratt J, Krupp B, Morse C. Series elastic actuators for high fidelity force control [J]. Industrial Robot: An International Journal, 2002, 29(3): 234—241.
- [6] Winter DA. Biomechanics and Motor Control of Human Movement [M]. 4th ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2009.