

面向航空防护救生的软质外骨骼助力控制策略研究



徐大文, 吴青聪*, 陆龙海

南京航空航天大学, 江苏 南京 210016

摘要: 本文设计了一种面向航空防护救生领域的可穿戴软质外骨骼系统, 该系统包含软质外骨骼服、数据采集系统、传感检测模块以及控制模块。提出了基于关节力矩估计的助力控制策略, 主要包括对肌电信号的采集、滤波和非线性映射。最后通过试验验证了此系统在轻度、中度以及重度负载下都有一定的助力效果, 满足航空防护救生系统减轻飞行员肌肉疲劳, 增强其自然作业能力, 保证飞行员安全的需求。

关键词: 可穿戴软质外骨骼; 航空防护救生; 关节力矩估计; 助力控制策略

中图分类号: V19

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2020.08.011

航空防护救生系统是保障飞行员执行作战训练任务中的作战效能和安全救生的关键^[1-2]。然而, 沉重的个体防护设备严重影响了飞行员在执行任务过程中的舒适性和协调性, 并且长时间的高过载环境作业极易造成飞行员的生理和心理疲劳, 导致作战效能的降低。此外, 在弹射救生过程中, 飞行员有可能会落入荒原、深林、海洋等恶劣环境中, 易造成四肢损伤, 从而失去自我营救的能力^[3]。专家们已经针对弹射救生中遇到的问题展开了相关研究^[4]。可穿戴式软质外骨骼机器人是解决这些难题的有效工具^[5-7], 飞行员穿戴外骨骼, 形成人机协调的智能混合体, 并基于飞行员的运动意图, 辅助其执行飞行作业和救生任务。外骨骼机器人实现了人的“智力”与机器人的“体力”的有效结合^[8], 在国防安全和医疗康复等领域具有广阔的应用前景与重要的研究意义。

飞行员在航空作业中穿戴的个体防护救生装备需具有结构轻柔、穿戴舒适、质量可靠的特点。为了满足上述要求, 本文依据相关理论设计了一种面向航空防护救生领域的上肢软质外骨骼系统, 并且提出基于估计扭矩的助力控制策略, 通过试验验证了其助力效果, 适用于航空防护救生领域。

1 软质外骨骼方案设计

图1为助力软质外骨骼设计方案。系统的机械部分整合在外骨骼服上, 由伺服电机驱动; 执行机构采用套索(钢丝绳+套管)传动的形式, 实现驱动电机与执行机构的分离; 将肌电传感器贴在肱二头肌中束, 检测肌电信号; 拉力传感器的一端与钢丝绳相连, 一端与套管支撑件相连, 用来测量绳上的拉力; 最后使用惯性测量单元测量飞行员的肘关节

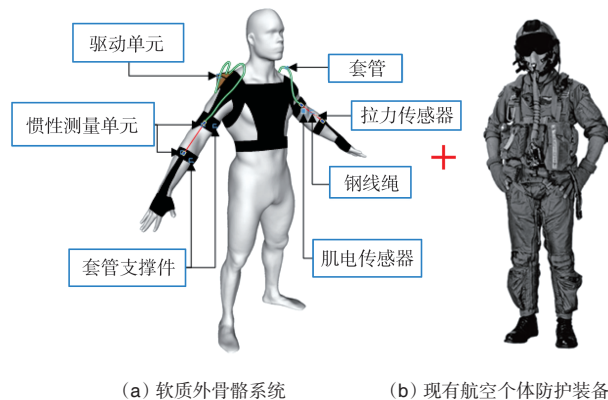


图1 航空防护救生软质外骨骼设计方案示意图

Fig.1 Schematic diagram of design scheme of soft exoskeleton for aviation protection and lifesaving

收稿日期: 2020-06-27; 退修日期: 2020-07-09; 录用日期: 2020-07-25

基金项目: 航空科学基金 (2017ZC52037)

*通信作者: Tel: 15850608592 E-mail: wuqc@nuaa.edu.cn

引用格式: Xu Dawen, Wu Qingcong, Lu Longhai. Research on assistance control strategy of soft exoskeleton for aviation protection and lifesaving[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(08): 68-72. 徐大文, 吴青聪, 陆龙海. 面向航空防护救生的软质外骨骼助力控制策略研究[J]. 航空科学技术, 2020, 31(08): 68-72.

角度。图1(a)中的黑色部分为人体穿戴的外骨骼服,它贴合飞行员上半身,并提供驱动力,同时不会阻碍现有个体防护装备(图1(b)中的头盔、面罩、抗荷服、代偿服、防寒服等)的工作。套管支撑件的材料是低温热塑板,密度小,耐老化。它受热易变形,冷却后形状固定,能和肢体形状高度匹配,与飞行员接触处压强较小,保证外骨骼的穿戴舒适性。

1.1 基于肌电传感器的扭矩估计策略

本文提出了一种基于肌电传感器的关节扭矩估计算法^[9],该算法简单易操作,并且可以获得飞行员的实时连续的关节扭矩估计值。在10~500Hz带通滤波和50Hz陷波滤波的基础之上,再使用频率为410Hz的一阶巴特沃斯高通滤波器,去除肌电信号中的能量^[10],通过全波整流以及1Hz的一阶巴特沃斯低通滤波器,获得原始肌电信号的包络。包络代表的是肌肉发力的趋势,为了将其具体化、数字化,对肌电信号进行归一化和非线性映射,最终估计的扭矩在0~100N·m内^[8],其公式为:

$$EMG_N = 100(e^{-EMG_L \xi + 100\xi + 1} - e^{100\xi + 1}) \quad (1)$$

式中: EMG_L 为经过归一化的肌电值; EMG_N 为非线性映射的肌电值; ξ 为预先定义的指数曲线参数,它代表了非线性映射中曲线的曲率。最后,使用卡尔曼滤波去除高斯白噪声,并且平滑曲线。根据经典卡尔曼公式,将处理后的肌电信号代入,得到如式(2)的卡尔曼滤波的预测和更新方程:

$$\begin{aligned} N(t|t-1) &= N(t-1|t-1) \\ J(t|t-1) &= J(t-1|t-1) + Q \\ F(t) &= J(t|t-1)(J(t|t-1) + R)^{-1} \\ N(t|t) &= N(t|t-1) + F(t)^* \\ (EMG_N(t) - N(t|t-1)) \\ J(t|t) &= (1 - F(t))J(t|t-1) \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $N(t-1|t-1)$, $N(t|t-1)$ 和 $N(t|t)$ 分别是上一时刻的值、先验和后验状态估计。 $F(t)$ 为卡尔曼增益, Q 和 R 分别为过程噪声和测量噪声的协方差,按经验取值^[9]。 $EMG_N(t)$ 为 t 时刻的测量值。 $J(t-1|t-1)$, $J(t|t-1)$ 和 $J(t|t)$ 是上一时刻的值、先验和后验协方差误差。本文中的系统为一阶线性系统,因此当前时刻的状态估计就等于上一时刻的状态估计,当前的状态真值可由测量值和当前时刻的状态估计结合求得。经过不间断的公式迭代,得到每一时刻的关节扭矩估计值。

1.2 基于估计扭矩的PID助力控制策略

控制策略以PID控制器为基础,省略了复杂的套索模型。控制器的输入是估计得到的关节扭矩,闭环反馈是基于拉力传感器和关节的数学模型计算得到的实际扭矩。以实际扭矩来跟踪估计的扭矩,从而实现关节的运动。上肢

外骨骼助力系统需要融合飞行员的智力与机器人的体力,根据飞行员的需求,实现力量增强和运动辅助。控制器得到飞行员的运动意图,通过电机驱动外骨骼,带动飞行员的上肢运动,进而达到助力效果。控制策略框图如图2所示。

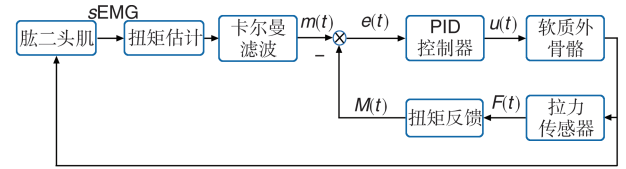


图2 基于估计扭矩的PID力控制框图

Fig.2 PID force control block diagram based on estimated torque

2 试验验证

2.1 平台搭建

为了验证该系统在面对航空救生领域的有效性,我们安排了受试者代替飞行员进行有效性试验。控制系统和试验平台如图3和图4所示。系统主要包括软质外骨骼服、数据采集系统、传感检测模块以及控制模块。xPC Target 目标环境是宿主机和目标机配合工作的方式。宿主机主要负责代码的撰写、编译、调试以及运行,而后通过RS232串口线将编译生成的可执行控制代码下载到目标机中,最后控制系统物理硬件部分实现控制代码指令。试验时,受试者将软质外骨骼服穿戴在身上,惯性测量单元记录肘关节的运动情况,STM32中运行角度转换算法,后经RS232串口通信的方式将计算得到的角度传送到目标机中。编码器记录电机的信息。目标机中装有PCL-818数据采集卡和PCL-727输出卡,前者用于实时采集拉力传感器、肌电传感器与编码器的信号,后者将控制信号发送给伺服驱动器,驱动电机,通过上肢外骨骼驱动装置、套索传动系统和软质外骨骼向飞行员提供辅助力。为了保证受试者在试验过程中的安全,从以下两方面进行考虑。(1)硬件上,在小臂和大臂的正面分别设置了锚点,使得大臂和小臂的运动夹角在安全范围内。(2)软件上,为电机的输出扭矩设置了饱和函数,设置驱动器的模拟输入电压的阈值为3V(电机处于力矩模式下的额定扭矩对应的模拟电压为5V),使套索的输出拉力不超过100N,进一步保证了受试者的安全。

2.2 试验过程

飞行员在执行机动飞行或营救任务过程中,上肢常常需要承担一定的负载。因此,在本次试验中,受试者需要模拟飞行员的作业环境,进行负载训练。为了验证助力控制

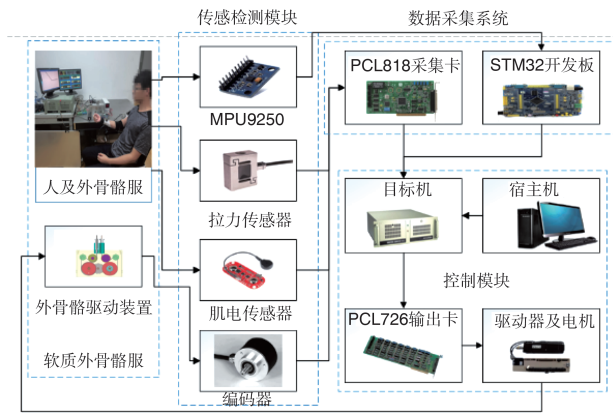


图3 基于 Matlab/RTW/xPC 环境的半物理实时控制系统
Fig.3 Semi-physical real-time control system based on Matlab/RTW/xPC environment

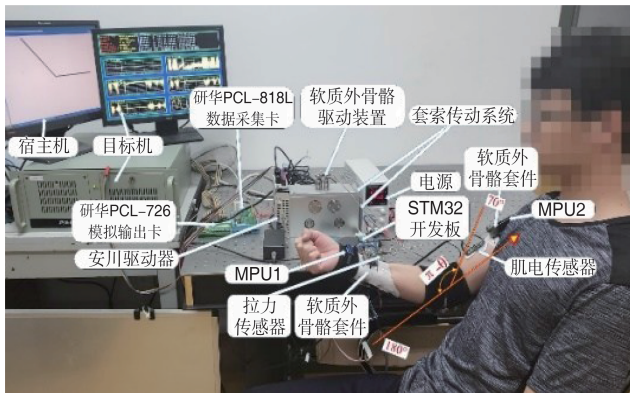


图4 基于估计扭矩的PID力控制策略试验平台
Fig.4 Experimental platform of PID force control strategy based on estimated torque

策略的助力效果,受试验人员分别在有助力和无助力情况下弯举2.5kg、5kg和7.5kg三种重量(质量)的杠铃,即承担轻度、中度和重度负载。每组试验尽量以相同姿势和相同速度进行。在不使用外骨骼的情况下,抬起和放下三组负载各一次。每组负载下,杠铃被抬起和放下6~8次,同时记录表面肌电信号值与关节估计扭矩值。在有外骨骼助力的情况下,重复上述操作。注意,每组运动结束后休息5min以消除肌肉疲劳。为了考察该系统在不同工作频率下的助力效果,弯举频率被分别设置为1/12Hz、1/8Hz、1/6Hz、1/4Hz、1/2Hz,即完成一次抬起和放下杠铃的动作所需的时间分别为12s、8s、6s、4s和2s。不同频率下的训练也符合飞行员不同的工作状态,在每个频率下分别验证其助力效果。

基于上述记录的有助力和无助力情况下的肌电信号,可以对助力效果进行评价。本文使用肌电信号的积分值来衡量在一段时间内运动所消耗的能量,如式(3)所示:

$$J = \int |U| \quad (3)$$

式中: U 为记录的原始肌电信号, J 为在一段时间内肌肉运动所消耗的能量值。然后通过有助力和无助力之间的比值来衡量助力效果,其公式为:

$$\eta = (1 - J_y / J_w) \times 100\% \quad (4)$$

式中: J_y 、 J_w 分别为有助力和无助力情况下的运动消耗的能量值, η 表示该次运动助力效果。

2.3 试验结果和讨论

试验结果如图5~图7所示。图中表示的是1/12Hz频率下不同负载条件的助力效果,其中 M_{ex} 、 M_t 分别为有助力和无助力情况下的关节估计扭矩值。 U_{ex} 、 U_t 分别为有助力和无助力情况下的原始肌电信号值。图5~图7分别展示了在轻度、中度和重度负载下关节估计扭矩的有助力和无助力对比图。在这个面向飞行员肘关节助力的外骨骼系统中,在保证系统结构轻质柔软、穿戴舒适美观的同时,也要满足驱动柔顺安全、控制准确协调等人机共融协作需求。在关节估计扭矩的曲线上,局部有尖峰值,这是因为当外骨骼提供助力后,在相同负载下,受试者消耗的能量减小,关节估计扭矩变小,反过来又使得外骨骼提供的力变少。而当外骨骼助力变小后,关节估计扭矩又会增大。这个重复的过程导致了局部尖峰的出现,但局部尖峰的幅值都很小,结合试验过程和结果可看出,该现象不影响外骨骼的整体助力效果。

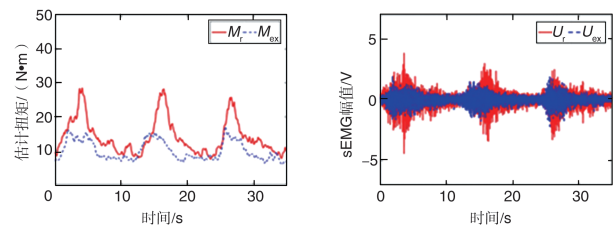


图5 基于估计扭矩的PID力控制2.5kg试验结果
Fig.5 2.5kg experimental results of PID force control strategy based on estimated torque

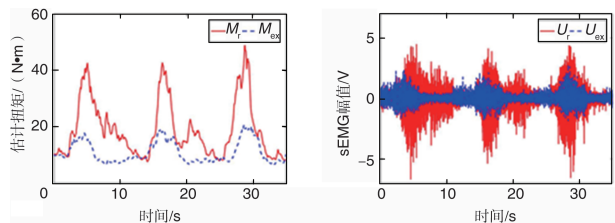


图6 基于估计扭矩的PID力控制5kg试验结果
Fig.6 5kg experimental results of PID force control strategy based on estimated torque

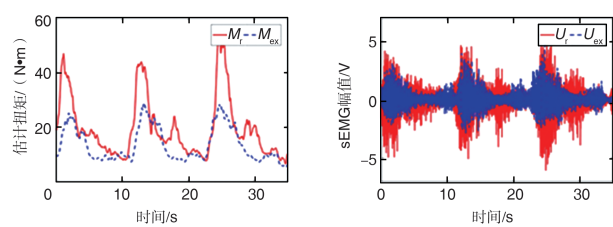


图7 基于估计扭矩的PID力控制7.5kg试验结果

Fig.7 7.5kg experimental results of PID force control strategy based on estimated torque

轻度、中度和重度负载下的助力效果见表1。工况为轻度负载的助力效果不如中度负载与重度负载条件下,其原因是在轻负载条件下,肱二头肌消耗的能量不高,关节估计扭矩不大,外骨骼的助力也不大,使得助力效果不够好。重度负载的助力效果又稍微低于中度负载,原因大致有两个:一是伺服电机的输出扭矩和速度被限制在一定范围之内,影响了重度负载下的效果。在控制算法中,电机的输出受到饱和函数的限制,其目的是为了保证外骨骼和人在交互过程中的安全性和舒适性。过大的输出扭矩和速度都可能会对试验者造成人身伤害。二是在重度负载下肌肉抖动程度大,导致估计扭矩变化大,与试验扭矩误差变大。试验结果证明,在轻、中和重度负载下,该系统都能实现一定的助力效果,因此在航空航天应用领域中,该系统一方面能够缓解飞行员长时间工作带来的肌肉疲劳,另一方面还能增强弹射救生着陆后飞行员的自我营救能力。

表1 基于估计扭矩的助力控制策略在1/12Hz频率下不同负载的试验结果

Table 1 Experimental results of power assisted control strategy based on estimated torque at 1/12Hz for different loads

负载/kg	助力效果/%
2.5	29.81
5	35.01
7.5	33.18

各个试验频率下的试验数据见表2。由表2可知,随着试验频率的提高,肌肉需要在短时间内进行多次伸缩,这导致肌肉异常活动的情况(抽搐、抖动)增加;此外,系统硬件的反应时间也缩短。上述两个原因使得低频条件下的助力的效果在总体上略好于高频下的助力效果。

由试验结果可知,本文提出的扭矩估计策略和控制方法在不同负载不同频率下都有一定的助力效果,这验证了系统能够实现助力。虽然在不同频率下的表现不尽如人意,但是基本符合飞行员执行任务时候的状态,能够减轻飞行员负担,保证其安全。

表2 基于估计扭矩的助力控制策略在5kg负载下不同频率的试验结果

Table 2 Experimental results of the power assisted control strategy based on estimated torque at different frequencies under 5kg load

频率/Hz	助力效果/%
1/2	16.45
1/4	26.98
1/6	16.98
1/8	15.95
1/12	35.01

3 结论

本文开发了一套面向航空防护救生领域的上肢外骨骼助力系统,阐述了关节扭矩估计算法,提出了助力控制策略,并通过试验验证了软质外骨骼在不同工况下的助力效果。试验结果表明,在本次搭建的试验环境中,助力效果最佳时负载为5kg,频率为1/12Hz。该外骨骼系统可穿戴在飞行员身上,可以准确快捷地识别飞行员的运动意图并实现运动助力,减轻飞行员的负担,增强飞行员的自救能力,保证飞行员的安全。

AST

参考文献

[1] 姜涛, 王伟, 谭率, 等. 航空防护救生系统舒适性设计和标准现状分析[J]. 航空标准化与质量, 2014 (3): 3-6.
Jiang Tao, Wang Wei, Tan Shuai, et al. Comfort design and standard status analysis of aviation protection and life-saving system[J]. Aviation Standardization and Quality, 2014 (3): 3-6. (in Chinese)
[2] 韩梦珍. 国外航空救生技术现状及展望[J]. 航空科学技术, 2003(2):23-25.
Han Mengzhen. The present situation and prospect of aviation lifesaving technology abroad[J]. Aeronautical Science & Technology, 2003(2):23-25. (in Chinese)
[3] 刘峰. 航空个体防护技术与装备[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
Liu Feng. Aviation individual protection technology and equipment[M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese)
[4] 余书山, 周方. 装备自动化: 海上弹射救生成功的关键[J]. 航空科学技术, 2005(3):27-30.
Yu Shushan, Zhou Fang. Equipment automation: the key to the success of sea ejection rescue[J]. Aeronautical Science &

- Technology, 2005(3): 27-30. (in Chinese)
- [5] Asbeck A T, Kai S, Walsh C J. Soft exosuit for hip assistance [J]. Robot Auton System, 2014, 73: 102-110.
- [6] Ye D, Kim M, Kuindersma S S, et al. Human-in-the-loop optimization of hip assistance with a soft exosuit during walking[J]. Science Robotics, 2018, 15(3): 1-8.
- [7] Stirling L, Yu C H, Miller J, et al. Applicability of shape memory alloy wire for an active, soft orthotic[J]. Journal of Materials Engineering & Performance, 2011, 20(4): 658-662.
- [8] 杨金江. 助力型下肢外骨骼机器人多信号融合感知系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- Yang Jinjiang. Study on multi-signal fusion perception system of the lower extremity exoskeleton robot[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017. (in Chinese)
- [9] Li Z, Wang B, Sun F, et al. sEMG-based joint force control for an upper-limb power-assist exoskeleton robot[J]. IEEE Journal of biomedical and health informatics, 2014, 18(3): 1043-1050.
- [10] Potvin J R, Brown S H M. Less is more: high pass filtering, to remove up to 99% of the surface EMG signal power, improves EMG-based biceps brachii muscle force estimates[J]. Journal of Electromyography and Kinesiology, 2004, 14(3): 389-399. (责任编辑 王为)

作者简介

徐大文(1995-)男, 硕士研究生。主要研究方向: 智能机器人技术、先进医疗器械。

Tel: 19852830079

E-mail: xudawen@nuaa.edu.cn

吴青聪(1988-)男, 博士, 讲师。主要研究方向: 机器人动力学及其控制、康复机器人、先进医疗器械等。

Tel: 15850608592

E-mail: wuqc@nuaa.edu.cn

陆龙海(1993-)男, 硕士研究生。主要研究方向: 康复器械、智能机器人。

E-mail: lu_longhai@foxmail.com

Research on Assistance Control Strategy of Soft Exoskeleton for Aviation Protection and Lifesaving

Xu Dawen, Wu Qingcong*, Lu Longhai

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

Abstract: A wearable soft exoskeleton system for aviation protection and lifesaving was designed in this paper, which includes soft exoskeleton suit, data acquisition system, sensing detection module and control module. A power-assisted control strategy based on joint torque estimation was proposed to drive the system, which includes the acquisition, filtering and nonlinear mapping of sEMG signals. Finally, the experiments were conducted to verify that this system can save power effect under light, medium and heavy loads, which can meet the requirements of aviation protection and lifesaving system to reduce muscle fatigue of pilots, enhance their natural operation ability, and ensure the safety of pilots.

Key Words: wearable soft exoskeleton; aviation protection and lifesaving; joint torque estimation; assistance control strategy

Received: 2020-06-27; Revised: 2020-07-09; Accepted: 2020-07-25

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China(2017ZC52037)

*Corresponding author. Tel.: 15850608592 E-mail: wuqc@nuaa.edu.cn