A New-Super-Twisting Sliding Mode for Flexible Upper-Limb Exoskeleton

针对柔性上肢外骨骼的非线性、强耦合等特点，提出了一种改进型超螺旋二阶滑模控制器。与传统的超螺旋相比，该方法能把在积分项下的开关函数用非光滑项替代，可以提高系统的整体性能。利用拉格朗日方程对柔性上肢外骨骼建立动力学模型，并根据模型设计改进型超螺旋控制律。利用该控制器对外骨骼进行轨迹跟踪控制，通过与传统超螺旋控制律作对比实验，验证所提出控制算法的有效性与可行性。

关键词：柔性上肢外骨骼；滑模控制；改进超螺旋控制律

INTRODUCTION

随着我国人口老龄化的加剧和老年人疏于锻炼等情况，他们的身体机能出现各种问题，面临运动功能障碍等问题，严重影响着他们的日常生活。再加上一些因为车祸导致的脊柱轻度损伤人群也会产生上肢运动障碍，而人们在生活中的大部分运动都和上肢有关，所以上肢的运动机能恢复研究就很有必要。目前的康复训练都是由医护人员进行陪同的，这消耗了大量的人力和时间。而外骨骼机器人随着近几十年的发展，已经在军事、医疗和康复等领域取得了巨大的进步和发展，其中作为康复用的机器人可以减少传统康复训练中的成本。在康复训练中，外骨骼机器人分为了主动训练和被动训练两种模式。其中被动训练模式是由外骨骼带动上肢按照设计好的轨迹进行重复训练；主动训练模式是在被动训练到一定程度后，上肢能进行有限的运动后，此时外骨骼会辅助上肢进行运动训练。柔性上肢外骨骼是一种刚柔耦合的非线性系统，并且在康复训练中易受到外部扰动和结构参数等影响，因此设计一个合适的控制器来进行轨迹跟踪是研究的重点。

为了设计能使外骨骼进行精确轨迹跟踪的控制器，国内外学者做了很多研究。文献【1】研究了一种基于模糊神经网络补偿器的分数阶lyapunov鲁棒控制器，仿真结果表明该方法具有良好的跟踪效果。文献【2】设计了一种自适应积分终端滑模控制，实验表明该方法具有良好的鲁棒性。文献【3-5】介绍了一些滑模控制对机器人系统进行有效控制的方法。文献【6-9】利用分数阶滑模控制来提高系统的性能，在闭环系统中增加了调节参数，使得控制精度得到提高。文献[10，11]分别针对2自由度下肢外骨骼机器人提出了一种基于分数阶TSMC (FOTSMC)方法的无模型自适应控制器和鲁棒自适应控制器。在[12]中，设计了一种基于神经网络的7自由度上肢外骨骼机器人分式SMC。首先提出了一个TSMC，然后设计了一个自适应神经网络TSMC来处理不确定性和减少抖振。

文献 [12] 采用线性 PID 控制方法通过上肢外骨骼主手对 MARSE-4外骨骼机器人进行遥操作，规定其沿预定轨迹运动。实验表明，MARSE-4 能有效跟踪期望轨迹并对患者的腕部、肘部及前臂的运动进行被动治疗，达到满意的训练效果。与 PID 控制方法不同，滑模控制可以在动态过程中，按系统当前状 态有目的地发生变化，迫使系统按照预定滑动模态 的状态轨迹运动。文献 [16] 设计出一种模块化控制体系，采用 快速终端滑模方法驱动外骨骼执行康复任务。该控制器已经应用于实时驱动 具有三自由度的上肢外骨骼。文献 [18] 针对机器人系统出现的由于建模不 确定性以及受到未知扰动的问题，设计了基于有限 时间扰动观测器的非奇异快速终端滑模控制的五自由度上肢康复外骨骼。通过有限时间扰动观测器估 计未知扰动同时进行补偿，该观测器可在小于 0.05 s 的时间内估计出扰动且误差为零。相较于此前其他传统方案大大提高了快速性。

基于上述研究，本文基于柔性上肢外骨骼，提出了一种改进型超螺旋二阶滑模控制器。和传统的超螺旋算法相比，把切换函数用非光滑项代替。减小了系统在控制中的误差和抖振，并且选取合适的参数能提高系统的抗扰动能力。通过在柔性上肢外骨骼平台上进行实验与传统超螺旋控制算法相比，验证了算法的有效性。

2系统建模

2.1柔性上肢外骨骼是利用电机通过弹簧来带动外骨骼关节进行转动，结合电机运动方程和扭簧传递力矩，通过拉格朗日函数建立其动力学方程为：



是关节处转动角度，是电机侧转动角度。分别表示电机侧转子转动惯量、阻尼和扭簧弹性系数。 为外骨骼的转动惯量矩阵，为哥氏力和向心力矩阵， 为外骨骼机器人的重力矩阵，为控制力矩向量。

为了便于控制器的设计，将动力学方程转为如下的状态方程：











为电机侧和关节侧所受的外部扰动，为系统所受的非匹配扰动和匹配扰动。包含了系统的未建模动态模型参数不确定和和外部负载扰动。

2.2设计stlf控制器

首先定义系统的滑模面如下：



其中

对滑模面进行求导



结合上面2式，并根据文献[]提出的stlf超螺旋控制律，可以得到系统的具体控制律为：



其中，为大于0的控制器增益，是在-0.5到0之间的可调参数。

3稳定性证明

假设1：柔性下肢外骨骼系统中的所有扰动及其各阶导数值都是有界的，即满足，其中为正数。

定义1:[27]给定实数τi > 0, i = 1,2，…， n和固定坐标(x1, x2，…， xn)∈Rn。如果存在一个实数p∈R，使得对于∀e > 0和∀x∈Rn\{0}，有ψ(eτ1x1, eτ2x2，…， eτnxn) = epψ(x1, x2，…， xn)，则函数ψ: Rn→R称为p次齐次，其中(τ1， τ2，…， τn)为坐标的权值。那么，存在一个正常数¯κ，使得φ(x)≤¯κψ(x)。另外，如果φ(x)是正定的，那么κψ(x)≤φ(x)，其中κ是一个正常数

引理1:[28]设正定函数ψ(x): Rn→R和函数φ(x): Rn→R在相同的膨胀权值下具有相同的齐次度。

引理2:假设0 < a≤1，那么对于∀x, y∈R，

引理3:令m > 0, n > 0。那么对于∀x, y∈R, 1得到

引理4:令b≥1。对∀x, y∈R成立。

。



其中，，可把上式改写为



令，上式可写为



为了计算的方便



根据引理2和，可以得到



根据引理4.1可以得到





设计李雅普诺夫函数







对求导





根据引理3和



其中结合上面两式



同理可证



其中

综上3式



在选择时，令

将带入上式可以得到：



其中是正常数，，再根据假设1：



定义

其中是一个足够小的常数

如果，则



根据定义1，可以得到和是次齐次的

根据引理1，得到



将上式代入



结合上上式



为了保证系统能在任意初始时刻都存在一个时间,使得



根据定义1，可以得到和是次齐次的

根据引理1，得到



由上式可知，存在一个时间，使得

当时，存在





当时



因为，可以得到



由上面两式可得，再有限时间内和会收敛到无穷小范围。

4.实验分析

4.1实验平台

为了验证所提出的控制器的有效性，使用二自由度的上肢柔性外骨骼实验装置，搭建的平台如图1所示。该平台由肩关节和肘关节组成，每个关节是一个自由度，在关节和电机之间通过扭簧连接，使其易于处理外部冲击造成的影响。工作流程如下：运动控制板卡采集电机侧和关节侧的编码器数据，通过电脑进行计算，输出控制信号经由运动控制板卡将信号传递给直流电机驱动器，由驱动器驱动电机，再经过弹簧带动外骨骼关节转动。

4.2实验数据

实验开始前大臂和小臂之间呈160度夹角，设定轨迹是两个正弦函数，可以模拟上肢的屈伸。在实验开始前两个关节的初始角度是0度，设定的大臂轨迹为小臂轨迹为。

Pid在初始阶段的响应时间为0.1秒，而stmt和stlf的响应时间是0.05秒。在稳定阶段关节1的误差pid在0.5度左右，stmt在0.3左右，stlf在0.2左右。换向的是时候由于弹簧的迟滞影响stmt的最高误差达到1度以上

图2和图4中分别是pid控制，stmt控制和stlf控制的大小臂轨迹跟踪图。相比于传统pid控制，stmt和stlf在开始时比pid有更快的控制响应；在稳定阶段也比pid有更小的控制误差，在换向的时候由于扭簧的柔性结构导致系统的控制具有一定的迟滞效果。Stlf和stmt相比，在跟踪效果上减弱了抖振的效果，并且根据图3和图5的大小臂跟踪误差图可以看出Stlf比stmt的跟踪误差更小。总体而言，在设计的stlf控制器下，柔性上肢外骨骼运行起来更稳定，跟踪效果更好。

5.结论

本文针对柔性上肢外骨骼的轨迹跟踪控制问题设计了一种stlf控制器，该方法保证了系统是有限时间收敛的，还降低了传统stmt积分项中切换函数导致的系统抖振问题，通过实验结果验证了本文设计的控制器具有良好的跟踪和降低抖振的效果。

6.参考文献

1，Mashhad，“A fuzzy neural network-based fractional-order Lyapunov-based robust control strategy for exoskeleton robots: Application in upper-limb rehabilitation Amir Razzaghian” Mathematics and Computers in Simulation 193 (2022) 567–583

2，A. Riani, T. Madani , A. Benallegue , K. Djouani，“Adaptive integral terminal sliding mode control for upper-limb rehabilitation exoskeleton” Control Engineering Practice 75 (2018) 108–117

3. M.S. Amiri, R. Ramli, M.F. Ibrahim, Initialized model reference adaptive control for lower limb exoskeleton, IEEE Access 7 (2019) 167210-167220.

4，W. He, Z. Li, Y . Dong, T. Zhao, Design and adaptive control for an upper limb robotic exoskeleton in presence of input saturation, IEEE Trans. Neural Netw. Learn. Syst. 30 (1) (2018) 97–108.

5，H.B. Kang, J.H. Wang, Adaptive control of 5 DOF upper-limb exoskeleton robot with improved safety, ISA Trans. 52 (6) (2013) 844–852.

6，J. Fei, Z. Wang, X. Liang, Z. Feng, Y . Xue, Fractional sliding mode control for micro gyroscope based on multilayer recurrent fuzzy neural network, IEEE Trans. Fuzzy Syst. (2021) <http://dx.doi.org/10.1109/TFUZZ.2021.3064704>.

7，A. Razzaghian, R. Kardehi Moghaddam, N. Pariz, Fractional-order nonsingular terminal sliding mode control via a disturbance observer for a class of nonlinear systems with mismatched disturbances, J. Vib. Control 27 (1–2) (2021) 140–151.

8，A. Razzaghian, R.K. Moghaddam, N. Pariz, Disturbance observer-based fractional-order nonlinear sliding mode control for a class of fractional-order systems with matched and mismatched disturbances, Int. J. Dyn. Control 9 (2) (2021) 671–678.

9，S. Song, B. Zhang, J. Xia, Z. Zhang, Adaptive backstepping hybrid fuzzy sliding mode control for uncertain fractional-order nonlinear systems based on finite-time scheme, IEEE Trans. Syst. Man Cybern.: Syst. 50 (4) (2020) 1559–1569.

10，S. Ahmed, H. Wang, Y . Tian, Model-free control using time delay estimation and fractional-order nonsingular fast terminal sliding mode for uncertain lower-limb exoskeleton, J. Vib. Control 24 (22) (2018) 5273–5290.

11，S. Ahmed, H. Wang, Y . Tian, Robust adaptive fractional-order terminal sliding mode control for lower-limb exoskeleton, Asian J. Control 21 (1) (2019) 473–482.

12. M. Rahmani, M.H. Rahman, Adaptive neural network fast fractional sliding mode control of a 7-DOF exoskeleton robot, Int. J. Control Autom. Syst. 18 (1) (2020) 124–133.

13. L. Rosier, “Homogeneous Lyapunov function for homogeneous continuous vector field,” Syst. Control Lett., vol. 19, no. 6, pp. 467–473, 1992.

14. C. J. Qian and J. Li, “Global output feedback stabilization of uppertriangular nonlinear systems using a homogeneous domination approach,” Int. J. Robust Nonlinear Control, vol. 16, no. 9, pp. Jun. 2006.

15. S. H. Ding, J. H. Park, and C. C. Chen, “Second-order sliding mode controller design with output constraint,” Automatica, vol. Art. no. 108704.

16. K. Q. Mei and S. H. Ding, “HOSM controller design with asymmetric output constraints,” Sci. China Inf. Sci., vol. 65, no. Aug. Art. no. 189202.

为了验证所提出的控制器的有效性，使用二自由度的上肢柔性外骨骼实验装置，搭建的平台如图1所示。该平台主体由两个maxon直流电机、两个减速器组成和两节刚性连杆组成。第一个关节通过弹簧连接到电机1，关节末端是电机2，再经过弹簧连接第二个关节。每个电机的底部和关节侧都有一个正交编码器。在两个关节处的弹簧是可以更换的，用来调节关节的柔性程度。

Pid存在11%的超调，调节时间是2.3s。stsmc和istsmc都没有超调，但是Istsmc的调节时间比stsmc快了0.5s。在1.1s时由于微分项的作用，导致stsmc有一个抖动现象。