

下肢外骨骼膝关节模糊滑模位置控制器设计

李鹏杰[†] 王新蕊 李小奇 许国强 司访 张煜 叶冬雨

(中国兵器工业第二〇八所,北京,102202)

摘要 针对下肢助力外骨骼膝关节位置伺服系统运动过程中伺服精度要求高、冲击力矩大、负载变化范围广等特点,提出了一种运用模糊规则调节的位置伺服系统滑模控制策略.该策略设计了一种新型带有积分项的滑模面模糊调节部分的结构为单输入双输出,选用模糊规则调节新型终端滑模型趋近率来抑制滑模抖振.仿真及实验表明,该控制策略稳定性和伺服跟踪性好,对负载干扰的鲁棒性强.

关键词 下肢外骨骼, 膝关节, 伺服系统, 自适应滑模, 位置控制

DOI: 10.6052/1672-6553-2020-101

引言

下肢助力型外骨骼系统是一种穿戴于人体的助力装置,目前主要运用于单兵,以提高士兵的物资搬运行及快速机动能力.为贴合实战提高穿戴舒适性,下肢助力外骨骼膝关节需具有贴合人体、结构简单等特点,无法安装力矩传感器,因此大多采用位置环控制.在人机系统行走步态周期内,外骨骼膝关节面临负载冲击大、变化范围广等困难,一般控制算法难以达到理想的控制效果.滑模控制是一种变结构控制,拥有随时开关的特点,可以进行设计且对象与扰动无关,响应速度快、对参数变化及扰动不灵敏、物理实现简单,从而为复杂机电系统控制提供了一种较好的解决方案.但是当系统阶数较大或者结构参数不确定时,很难直接获取控制率,同时抖振问题一直制约着滑模控制的工程化运用.针对上述问题,国内外专家学者提出了很多解决方案,主要有趋近率法、边界层法、观测器法和与智能算法结合等.胡飞等^[1]设计了一种模糊 PID 滑模控制系统,有效解决了下肢外骨骼步态控制过程中电液伺服系统存在的非线性、外在干扰等问题.宋胜利等^[2]提出一种快速二阶终端滑模控制策略,将绝对值函数隐藏在积分项里,提高了传统二阶终端滑模控制的全局收敛性.熊少峰等^[3]提出一种非奇异终端滑模方法,有效克服了奇异问题. Utkin V I 等^[4]在控制率中引入等效控制来预估外

界干扰. Elmokadem T 等^[5]基于 super twisting 算法设计的二阶滑模观测器能够快速稳定估计出外界干扰,从而削弱抖振.上述研究大多采用传统趋近率和滑模面,很难实现系统快速性和稳定性的统一.

本文针对下肢助力外骨骼膝关节,设计了一种自适应滑模位置控制器,采用单输入双输出的结构形态,被控对象的输入量应用快速终端趋近率求取,选择滑模函数 S 作为模糊控制器的输入项,分别选择幂级趋近项系数 k_1 和指数趋近项系数 k_2 作为模糊控制器的两个输出项,依据系统运动动态特性与两个输出项之间的关系,制定模糊规则,使得系统状态点远离滑模面时,趋近率大,离滑模面近时,趋近率小,保证系统最大程度抑制抖振的同时快速趋近滑模面.

1 下肢助力外骨骼膝关节结构及数学模型

1.1 膝关节结构及永磁同步电机数学模型

图 1 给出了下肢助力外骨骼膝关节结构图,系统主要由永磁同步电机、减速器、编码器、驱动器等部件组成.为提高控制精度,系统采用三闭环控制,其中电流环和速度环采用数字控制,位置环的反馈值取执行机构轴端编码器值.

在不影响控制性能的情况下,假设:涡流和磁滞损耗几乎为零,电机铁芯饱和忽略不计,电机气隙磁场皆均匀分布,三相绕组的感应电流均以正弦波形式作用.依据假设的情况,采用 $i_d = 0$ 的控制

2020-08-28 收到第 1 稿,2020-11-06 收到修改稿.

[†] 通讯作者 E-mail: 18201013816@163.com

策略实现对转矩控制的线性化和解耦控制.基于旋转坐标轴(d_q 轴坐标系),可以得出系统线性状态方程^[6-8]:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_q}{dt} \\ \frac{d\omega_r}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R/L & -P_n/L \\ 1.5P_n\psi_f/J & -B/J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ \omega_r \end{bmatrix} \quad (1)$$

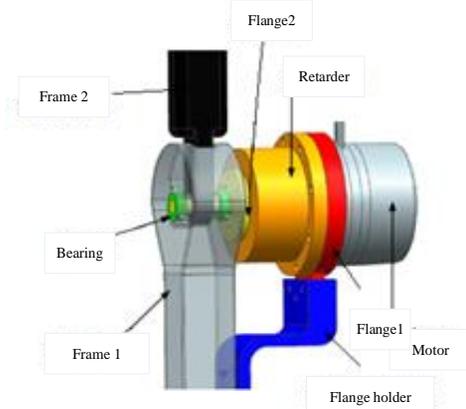


图1 膝关节系统结构图

Fig.1 An illustration of knee joint system

机械运动方程

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = T_e - T_L - B\omega_r \quad (2)$$

电磁转矩方程

$$T_e = 1.5P_n\psi_f i_q \quad (3)$$

式中, L 为等效 d_q 轴产生的电感; i_q 为 q 轴上的电流; T_L 为折算到电机轴上的总负载转矩; R 为定子相电阻; ω_r 为转子的机械角速度; B 为黏滞摩擦系数; ψ_f 为转子上的磁势; T_e 为电机轴输出转矩; J 为折算到电机轴上的总转动惯量; P_n 为极对个数.

1.2 膝关节伺服系统状态空间模型

膝关节伺服系统采用三闭环控制,其中位置环选用模糊滑模控制器,速度环简化为PI控制,电流环简化为P控制.由于模糊滑模控制对系统参数精度要求低,故将机械部分假设成刚性体,电气部分处于理想状态,可得速度环的传递函数为^[9]:

$$G_{(s)} = K/(1 + \tau_m s) \quad (4)$$

式中, $\tau_m = L/R$ 是速度环时间常数, K 是速度环增益.将减速器考虑成积分环节 $1/(is)$, i 为减速比,可得膝关节伺服系统开环传递函数为^[10]:

$$G_{(s)} = \frac{K}{1 + \tau_m s} \frac{1}{is} = \frac{K}{i(1 + \tau_m s)s} \quad (5)$$

可得下肢助力外骨骼膝关节伺服系统结构图如图2所示.其中, θ 为实际位置并作为反馈量, θ_{ref} 为指

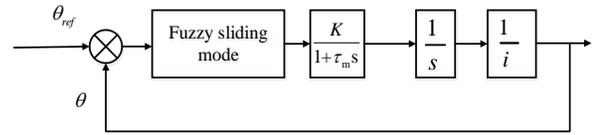


图2 下肢助力外骨骼膝关节位置伺服系统结构简图

Fig.2 Structure diagram of knee joint position servo system of lower limb assist exoskeleton

令位置,位置控制器的输出量 ω_{ref} 是被控对象的输入量,设 $u = \omega_{ref}$,系统的状态向量为 $X = [x_1 \ x_2]$,其中 $x_1 = \theta, x_2 = \dot{\theta}$,则系统状态空间方程为^[11-13]:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x) + g(x)u \end{cases} \quad (6)$$

式中, $f(x) = -1/\tau_m x_2; g(x) = K/i\tau_m$ 考虑系统经常受到不确定因素的影响,为提高状态空间方程精度,需增加不确定项:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \dot{x}_2 \\ \dot{x}_2 = f(x) + \Delta f + [g(x) + \Delta g]u \end{cases} \quad (7)$$

式中 $\Delta f, \Delta g$ 为添加的不确定部分,假使系统满足条件

$$|\Delta f| \leq F \quad \frac{1}{\beta} \leq \frac{g + \Delta g}{g} \leq \beta \quad (8)$$

式中, $\beta \geq 1$ 且为常数, F 为标量值.

2 模糊自适应滑模控制器设计

2.1 滑模控制器设计

系统位置跟踪误差向量为:

$$\begin{aligned} E &= X_d - X \\ &= [x_{1d} - x_1 \quad x_{2d} - x_2]^T \\ &= [e \quad \dot{e}]^T, \end{aligned}$$

式中, $X_d = [x_{1d} \ x_{2d}]^T, x_{1d} = \theta_{ref}, x_{2d} = \dot{\theta}_{ref}$.可得:

$$\ddot{e} = \dot{x}_{2d} - \dot{x}_2 = f(x) + \Delta f + [g(x) + \Delta g]u - \ddot{\theta} \quad (9)$$

设计带积分滑模面:

$$s = \dot{e} + k_3 e + k_4 \int_0^t e dt \quad (10)$$

式中, k_3, k_4 为大于零的常数.可得:

$$\begin{aligned} \dot{s} &= \ddot{e} + k_3 \dot{e} + k_4 e = k_3 \dot{e} + k_4 e + f + \Delta f + \\ &\quad (g + \Delta g)u - \ddot{\theta} \end{aligned} \quad (11)$$

滑模面选用一种快速终端滑模型趋近率:

$$\dot{s} = -k_1 |s|^\alpha \text{sgn}(s) - k_2 s \quad (12)$$

式中, k_1, k_2 为正常数, $\alpha \in (0, 1)$.由于现实系统存在空间和时间上的滞后,因此假设一种等效的平均滑模位置控制器 u_{equ} (不确定性为0),根据式(9)、式(10)可得:

$$\dot{s} = -k_1 |s|^\alpha \operatorname{sgn}(s) - k_2 s = k_3 \dot{e} + k_4 e + f + g u_{equ} - \ddot{\theta} \quad (13)$$

$$u_{equ} = -\frac{1}{g} [k_1 |s|^\alpha \operatorname{sgn}(s) - k_2 s + f + k_3 \dot{e} + k_4 e - \ddot{\theta}] \quad (14)$$

将切换位置控制器设计为:

$$u_q = -K \operatorname{sgn}(s)/g \quad (15)$$

式中, $K > 0$. 可得总控制器为:

$$u = u_{equ} + u_q = \frac{k_1 |s|^\alpha \operatorname{sgn}(s) - k_2 s + f + k_3 \dot{e} + k_4 e - \ddot{\theta} + K \operatorname{sgn}(s)/g}{g} \quad (16)$$

将增益项设计为:

$$K = \beta [F + \xi + (\beta - 1)g u_{equ}] \quad (17)$$

式中, $\xi > 0$. 取李雅普诺夫函数为 $V = 0.5s^2$, 则有:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s\dot{s} = s[k_3 \dot{e} + k_4 e + f + \Delta f + (g + \Delta g)u - \ddot{\theta}] \\ &= s[k_3 \dot{e} + k_4 e + f + \Delta f + (g + \Delta g)u_{equ} - \\ &\quad (g + \Delta g)K \operatorname{sgn}(s)/g - \ddot{\theta}] \end{aligned} \quad (18)$$

由式(11)可知:

$$k_3 \dot{e} + k_4 e = -k_1 |s|^\alpha \operatorname{sgn}(s) - k_2 s - f - g u_{equ} + \ddot{\theta} \quad (19)$$

将式(19)带入式(18)可知:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s[-k_1 |s|^\alpha \operatorname{sgn}(s) - k_2 s + \Delta g u_{equ} + \Delta f - \\ &\quad \frac{g + \Delta g}{g} K \operatorname{sgn}(s)] = -k_1 |s|^{\alpha+1} - k_2 s^2 + \\ &\quad \Delta g u_{equ} s + \Delta f s - \frac{g + \Delta g}{g} K |s| \\ \dot{V} &\leq \Delta g u_{equ} s + \Delta f s - \frac{g + \Delta g}{g} K |s|, \\ \dot{V} &\leq |\Delta g| |u_{equ}| |s| + F |s| - \frac{1}{\beta} K |s|. \end{aligned} \quad (20)$$

带入 K , 可得:

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq |\Delta g| |u_{equ}| |s| + F |s| - \frac{1}{\beta} \beta [F + \xi + \\ &\quad (\beta - 1)g u_{equ}] |s|, \\ \dot{V} &\leq |\Delta g| |u_{equ}| |s| - \xi |s| - (\beta - 1)g u_{equ} |s|, \\ \dot{V} &\leq -\xi |s| < 0. \end{aligned} \quad (21)$$

根据李雅普诺夫稳定性理论判据可知, 系统能够在全局意义下趋近渐进稳定^[14,15].

2.2 趋近率系数与滑模运动特性关系分析

将式(12)两边同时乘上 $e^{k_2 t}$, 可得:

$$\frac{d(e^{k_2 t} s)}{dt} = -k_1 e^{(1-\alpha)k_2 t} |e^{k_2 t} s|^\alpha \operatorname{sgn}(s) \quad (22)$$

对式(22)两边积分, 可得式(12)的解:

$$s(t) = \begin{cases} \operatorname{sgn}(s(0)) e^{-k_2 t} \left[|s(0)|^{1-\alpha} - \frac{k_1}{k_2} e^{(1-\alpha)k_2 t} + \frac{k_1}{k_2} \right]^{\frac{1}{1-\alpha}} \\ t < \frac{\ln\left(\frac{k_1}{k_2} |s(0)|^{1-\alpha} + 1\right)}{k_2(1-\alpha)}, s(0) \neq 0 \\ 0, t \geq \frac{\ln\left(\frac{k_1}{k_2} |s(0)|^{1-\alpha} + 1\right)}{k_2(1-\alpha)} \\ 0, t \geq 0, s(0) = 0 \end{cases} \quad (23)$$

其中, $s(0)$ 是 $s(t)$ 的 $t = 0$ 时的初始值. 由式(23)可以得出, $s(t)$ 能够在有限的时间 T 内收敛到 0, 并且调节时间 T 满足下式

$$T(s(0)) = \frac{\ln\left(\frac{k_1}{k_2} |s(0)|^{1-\alpha} + 1\right)}{k_2(1-\alpha)} \quad (24)$$

式中, 当 $k_2 = 0$ 时, 式(12)将变为传统幂次趋近率:

$$\dot{s} = -k_1 |s|^\alpha \operatorname{sgn}(s) \quad (25)$$

对式(25)两边积分, 可得:

$$s(t) = \begin{cases} \operatorname{sgn}(s(0)) [k_1(1-\alpha) + |s(0)|^{1-\alpha}]^{\frac{1}{1-\alpha}} \\ t < \frac{|s(0)|^{1-\alpha}}{k_1(1-\alpha)}, s(0) \neq 0 \\ 0, t \geq \frac{|s(0)|^{1-\alpha}}{k_1(1-\alpha)} \\ 0, t \geq 0, s(0) = 0 \end{cases} \quad (26)$$

由式(26)可得:

$$T(s(0)) = \frac{|s(0)|^{1-\alpha}}{k_1(1-\alpha)} \quad (27)$$

比较式(24)和式(27), 可得:

$$\frac{\ln\left(\frac{k_1}{k_2} |s(0)|^{1-\alpha} + 1\right)}{k_2(1-\alpha)} < \frac{|s(0)|^{1-\alpha}}{k_1(1-\alpha)} \quad (28)$$

可知式(12)中的“ $-k_2 s$ ”项具有加速收敛的作用. 结合传统幂次趋近率特性, 可知当远离滑模面时, k_1, k_2 均应取较大值; 当接近切换面时, 为抑制抖振, k_1, k_2 应取相对较小值, 整个过程中应保证 $k_1 < k_2$, 设 $k_2 = m \cdot k_1$, 其中 $m > 1$.

2.3 模糊自适应滑模控制器设计

根据上述趋近率系数与滑模运动特性关系, 将模糊控制器设计成单输入双输出结构形式. 即: 运用模糊规则, 根据滑模函数 s 的值, 自适应调整 k_1

和 k_2 的值.将 s 的值归一化到区间 $[-1,1]$ 上,并将 s 分为正大、正中、正小、几为零、负小、负中、负大等7种情况,模糊子集为 $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$;将系数 k_1 和 k_2 的值归一化到区间 $[0,1]$ 上,分为几为零、正小、正中、正大等4种情况,模糊子集为 $\{ZO, PS, PM, PB\}$;隶属度函数均选用三角函数.根据上述滑模动态特性与趋近率系数之间的关系分析结果,制定14条模糊规则,如表1所示.

表1 模糊控制器规则表

Table 1 Rule table of fuzzy controller

s	k_1	k_2
NB	PM	PB
NM	PS	PB
NS	PS	PM
ZO	ZO	ZO
PS	PS	PM
PM	PS	PB
PB	PM	PB

采用重心法解模糊,可得:

$$uf(k) = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \mu(i)}{\sum_{i=1}^n \mu(i)} \quad (29)$$

则被控对象的输入为

$$u = \frac{k_1 |s|^\alpha \operatorname{sgn}(s) - k_2 s + f + k_3 \dot{e} + k_4 e - \ddot{\theta} + K \operatorname{sgn}(s)/g}{g} \quad (30)$$

膝关节模糊自适应滑模控制系统机理如图3所示.

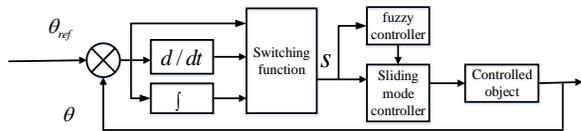


图3 模糊自适应滑模控制器控制机理图

Fig.3 Control mechanism of fuzzy adaptive sliding mode controller

3 仿真结果及分析

为验证控制策略的正确性,运用 Matlab/Simulink 进行仿真实验,并与经典PID和经典模糊自适应滑模控制策略(即:滑模面选取 $s = e + c\dot{e}$,其中 c 为常数,趋近率选取指数趋近率)相比较.仿真模型具体参数如下:模糊滑模控制器参数为 $c = 126, m = 11, k_3 = 15, k_4 = 1200$;电机转子惯量 $J = 2.627 \text{g} \cdot \text{m}^2$,等效电感 $L = 50 \text{mL}$,永磁体 $\Psi_f = 0.056 \text{Wb}$,电机磁极对数 $P_n = 4$,相间电阻 $R = 1.38 \Omega$,额定电流 $I_c = 21 \text{A}$,摩擦黏滞系数 $B = 1.26 \times 10^{-4} \text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$;谐波减速器减速比1:120,速度

增益 $K=120$,电流环参数为 $[P, I, D]=[0.715, 0, 0]$,速度环参数为 $[P, I, D]=[5.2 \times 10^{-5}, 0.2884, 0]$,位置环参数为 $[P, I, D]=[10000, 0, 0]$.仿真时间设置为2s,求解器选择ode45.

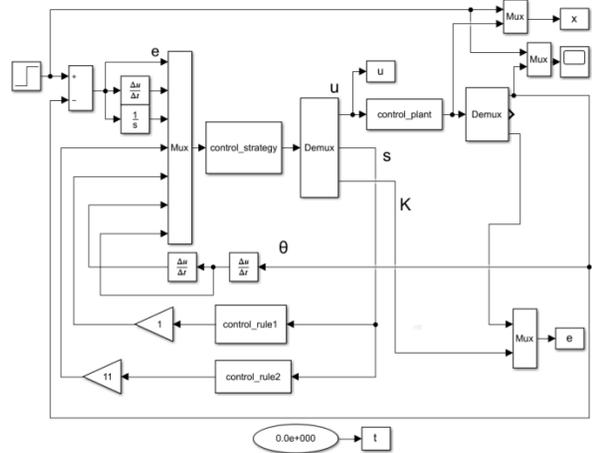


图4 新型滑模控制策略仿真模型

Fig.4 Simulation model of new sliding mode control strategy

3.1 常值负载干扰

为验证下肢助力外骨骼膝关节位置控制器抗干扰能力,在1s时突加一个值为 $10 \text{N} \cdot \text{m}$ 的阶跃信号,如图5所示,经典PID和滑模控制器出现很大

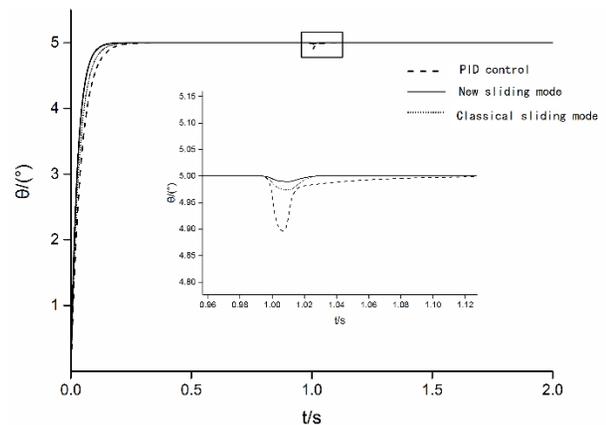


图5 阶跃响应曲线

Fig.5 Step response curve

位置偏移,很长时间才恢复到平衡位置,且初始位置响应较慢;新型滑模控制器系统基本不受影响,且初始位置响应较快.

3.2 位置跟踪误差

为验证控制系统的跟踪性能,选取 $r = 20 \sin(1.24t)$ 做为系统的跟踪曲线,如图6所示,新型滑模控制器的跟踪误差远小于经典滑模、PID控制器的跟踪误差.

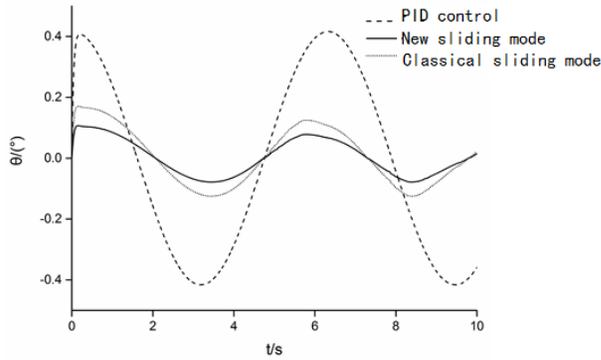


图6 跟踪误差曲线

Fig.6 Tracking error curve

4 实验验证

实验系统选用STM32F407ZGT6作为位置控制核心板,电机选用J56ZWX02无刷直流电机,额定转速3058r/min~3258r/min,额定扭矩1.5N·m,谐波减速器减速比1:120,电流环为P控制,采样频率20kHz,速度环为PI控制,执行频率10kHz,位置环依次选用经典PID控制器、经典滑模和新型滑模控制器,执行频率1kHz。系统输入选用正弦信号 $r = 20\sin(1.24t)$,修正参数如下: $c = 126, m = 11, k_3 = 15, k_4 = 1200$ 。角度初值为0.08,自变量 s 的量化因子为0.3,变量 s 和 \dot{s} 的输出量化因子为 6.3×10^{-7} 和 3×10^{-7} 。实验结果如图7所示,与经典滑模和PID控制策略相比,新型滑模控制策略的毛刺和误差峰值明显减小。

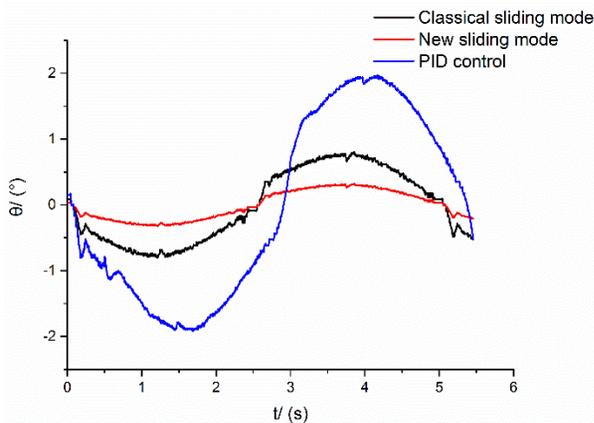


图7 实验控制跟踪误差对比

Fig.7 Comparison of tracking error with experimental control

5 结论

针对下肢助力外骨骼膝关节位置伺服系统,设计了一种模糊自适应滑模控制策略。仿真及实验结果均表明,该控制策略与经典滑模、PID控制策略

相比,跟踪误差更小、响应速度更快、鲁棒性更强,该控制策略完全能够满足下肢助力外骨骼膝关节位置环主从伺服跟踪工作要求。

参 考 文 献

- 胡飞,许德章,王毓.基于模糊PID滑模控制的外骨骼控制系统设计.安徽工程大学学报,2017,32(4):56~61 (Hu F, Xu D Z, Wang Y. Design of exoskeleton control system based on fuzzy PID sliding mode control. *Journal of Anhui University of Engineering*, 2017, 32(4): 56~61 (in Chinese))
- 宋胜利,陈文浩,张兴龙,等.快速二阶终端滑模控制及其在下肢外骨骼的应用.控制与决策,2019,34(1):162~166(Song S L, Chen W H, Zhang X L, et al. Fast second-order terminal sliding mode control and its application in lower limb exoskeleton. *Control and Decision*, 2019, 34(1): 162~166(in Chinese))
- 熊少锋,王卫红,王森.带攻击角度约束的非奇异快速终端滑模制导律.控制理论与应用,2014,31(3):269~278 (Xiong S F, Wang W H, Wang S. Non-singular fast terminal sliding mode guidance law with attack angle constraint. *Control Theory and Applications*, 2014, 31(3): 269~278 (in Chinese))
- Utkin V I, Poznyak A S. Adaptive sliding mode control with application to super-twist algorithm: Equivalent control method. *Automatica*, 2013, 49(1): 39~47
- Elmokadem T, Zribi M, Youcef-Toumi K. Trajectory tracking sliding mode control of underactuated AUVs. *Nonlinear Dynamics*, 2016, 84(2): 1079~1091
- 李杨,管小荣,徐诚.基于人体步态的下肢外骨骼动力学仿真研究.南京理工大学学报(自然科学版),2015,39(3):353~57(Li Y, Guan X R, Xu C. Simulation of lower limb exoskeleton dynamics based on human gait. *Journal of Nanjing University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2015, 39(3): 353~357 (in Chinese))
- 刘金琨.先进PID控制MATLAB仿真.北京:电子工业出版社,2004(Liu J K. Advanced PID control MATLAB simulation. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004 (in Chinese))
- 诸静.模糊控制理论与系统原理.北京:机械工业出版社,2005(Zhu J. Fuzzy control theory and system principle. Beijing: China Machinery Industry Press, 2005 (in Chinese))
- 朱蒙,管小荣,李杨,等.偏瘫下肢外骨骼结构设计及仿真分析.兵器装备工程学报,2019,40(11):160~165 (Zhu M, Guan X R, Li Y, et al. Design and simulation

- analysis of exoskeleton structure of lower limbs in hemiplegia. *Ordnance Equipment Engineering Journal*, 2019, 40(11): 160~165 (in Chinese))
- 10 王险峰, 李建平, 王辉. 基于ZMP的仿人机器人跑步运动模式. *计算机研究与发展*, 2013, 50(10): 2206~2211 (Wang X F, Li J P, Wang H. Running motion mode of humanoid robot based on ZMP. *Computer Research and Development*, 2013, 50(10): 2206~2211 (in Chinese))
 - 11 牛建凯. 外骨骼机器人助力控制技术研究[硕士学位论文]. 北京: 北京理工大学, 2014 (Niu J K. Research on the control technology of exoskeleton robot [Master Thesis]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2014 (in Chinese))
 - 12 刘宁宁. 外骨骼机器人的人-机系统平衡稳定性研究[硕士学位论文]. 北京: 北京理工大学, 2015 (Liu N N. Research on the balance and stability of human-machine system of exoskeleton robot [Master Thesis]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015 (in Chinese))
 - 13 宋迺志, 王晓光, 王鑫, 等. 多关节外骨骼助力机器人发展现状及关键技术分析. *兵工学报*, 2016, 37(1): 172~185 (Song Q Z, Wang X G, Wang X, et al. Development status and key technology analysis of multi-joint exoskeleton assisted robots. *Acta Armamentarii*, 2016, 37(1): 172~185 (in Chinese))
 - 14 王峰, 吴志强, 李亚杰, 等. 多物理场仿真开关磁阻电机定子的径向电磁振动. *动力学与控制学报*, 2020, 18(4): 61~69 (Wang F, Wu Z Q, Li Y J, et al. Radial Vibration simulation of the stator in switched reluctance motor by multiphysics method. *Journal of Dynamics and Control*, 2020, 18(4): 61~69 (in Chinese))
 - 15 张程, 金涛. 永磁同步机变频调速系统 MATLAB 建模与仿真. *动力学与控制学报*, 2014, 12(2): 183~187 (Zhang C, Jin T. Research on modeling and simulation of PMSM variable frequency speed regulating system. *Journal of Dynamics and Control*, 2014, 12(2): 183~187 (in Chinese))

DESIGN OF FUZZY SLIDING MODE POSITION CONTROLLER FOR EXOSKELETON KNEE JOINT WITH LOWER LIMBS

Li Pengjie Wang Xinrui Li Xiaoqi Xu Guoqiang Si Fang Zhang Yu Ye Dongyu[†]
(No.208 Research Institute of China Ordnance Industries, Beijing 102202, China)

Abstract Aiming at characteristics of the lower limb assisted exoskeleton knee joint position servo systems, such as high servo accuracy, large impact torque and wide load range, a sliding mode control strategy of position servo system based on fuzzy rules is proposed. This strategy designs a new type of sliding mode surface with integral terms. The structure of the fuzzy adjustment part is of single input and double output. Fuzzy rules are used to adjust the new terminal sliding mode approach rate to suppress sliding mode chattering. Both experiments and simulations demonstrate that the control strategy has good stability and servo tracking performances, and strong robustness with respect to load disturbances.

Key words lower extremity exoskeleton, knee, servo system, adaptive sliding mode, position control