

DOI: 10.3901/JME.2022.13.081

机器人柔性踝横滚的快慢变切换控制方法^{*}

窦昆鸿 潘晟 罗翔

(东南大学机械工程学院 南京 211189)

摘要: 机器人足踝处采取柔性设计可以降低在步行过程中受到地面的着地冲击力的影响,但柔性环节不仅升高了控制系统的阶数,且易引起系统内部振荡,稳定时间增长,不满足控制过程中快速性和稳定性的要求。针对弹簧-套索传动的机器人柔性踝关节,采用奇异摄动理论对其进行降阶简化处理,根据末端角度误差分别采用快、慢变控制器进行切换控制。其中,慢变控制器采用基于比例切换的滑模控制器,使末端快速稳定地到达期望位置,快变控制器采用状态反馈控制器,使得弹簧形变量迅速收敛至零。最后,通过 Simulink 仿真和样机实验将切换控制与单一采用 PID 控制或者滑模控制进行对比,实验结果表明,虽然三种控制器均满足快速性的要求,但只有切换控制可以保证多步位置控制时末端的稳定性,达到完整的控制目标要求。

关键词: 柔性关节; 奇异摄动; 滑模控制; 模型降阶; 切换控制

中图分类号: TP273

Fast-slow Switching Control Method for Flexible Ankle Roll of Robot

DOU Kunhong PAN Sheng LUO Xiang

(School of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189)

Abstract: The flexible ankle of the robot can reduce the impact of the ground force during walking. However, the flexible link not only increases the order of the control system, but also causes the internal oscillation of the system easily and increases the stability time, which can't satisfy the requirement of the rapidity and stability during the process of control. In this paper, the flexible ankle joint of the robot adopts a spring-lasso transmission method. On the basis of the singular perturbation theory, the order of the system is reduced. As a result, the system is more concise. According to the terminal angle error, the fast and slow controllers are both used for switching control. Herein, a sliding mode controller based on proportional switching is used in the slow controller which makes the terminal of the joint reach the desired position quickly and stably. The fast controller uses the state feedback controller to make the variable of spring converge to zero rapidly. Finally, the switching control is compared with the single PID control and the sliding mode control through Simulink simulation and prototype experiment. The experimental results show that although the three controllers all meet the need of rapidity, only the switching control can guarantee the stability of the terminal during multiple position controls, which meets the requirements of complete control objectives.

Key words: flexible joint; singular perturbation; sliding mode control; model order reduction; switching control

0 前言

相对于轮式机器人、履带式机器人,足式机器人对地面的适应性更好^[1]。机器人步行过程中,踝关节发挥着巨大作用。踝关节通常具有两个自由度,横滚和俯仰^[2]。机器人通过俯仰完成主动足踝蹬地,

蹬地为步行提供能量,有助于提高行走速度^[3];同时三维机器人在步行中为了保持侧向平衡以及对崎岖路面的适应性,横滚自由度必不可少。横滚自由度需要位置控制和力控制,单支撑期摆腿过程中位置控制决定机器人足姿态;当足与地面接触时,力控制保证机器人足着地时保持一定的硬度。机构设计中加入柔性环节让踝具有一定的硬度,同时还可以减缓冲击,以防过大的冲击力损害机械结构和驱动装置^[4]。

^{*} 国家自然科学基金(51375085)资助项目。20210706 收到初稿,20211214 收到修改稿

柔性机构虽然可以减轻冲击造成的影响,但在机器人系统中加入柔性环节会升高系统阶次,引起震荡,降低系统的稳定性,还会引起一定的滞后,从而影响位置控制精度^[5]。为了抑制系统中的振动和时滞也衍生了许多的控制方法,鲁棒轨迹控制、前馈控制、模糊控制也都用于柔性关节控制^[6]。吴昊^[7]针对典型时滞柔性机械臂,提出一种新的自适应滑模控制器,实现了对机械臂的有效控制。JU^[8]在对柔性关节机器人建模过程中,考虑了柔性关节的传动环节,设计出新型的模糊 PID 控制器,有效抑制了柔性关节机器人系统的弹性扭转振动,优化了控制质量。

以上的控制方法均为通过一种控制器或者控制器与观测器的组合完成伺服控制。通过奇异摄动理论^[9]的观点可以将系统分解为快、慢子系统,运用两种控制器控制系统,可以使得被控对象沿着参考轨迹运动,同时进行振动抑制^[10]。刘华山^[11]针对机器人柔性关节,在快变系统中通过滤波处理加快快变系统收敛,慢变系统中引入平滑饱和函数以及神经网络加快非线性逼近期望轨迹,通过仿真验证了控制方法的合理性。

在机器人关节设计中,为了解决远距离传动的问题,双套索也广泛应用于机器人系统当中,文献[12-14]主要研究了套索的传动特性,同时采用模糊滑模控制、力矩控制等实现了位置控制和力控制。文献[15]中关节末端加入了弹性环节,通过鲁棒控制策略也达到了良好的控制效果。

综上所述,由于柔性环节使得系统阶次升高,控制器设计也较为复杂。本文针对双弹簧-套索传动的机器人柔性踝关节横滚进行位置控制,依据奇异摄动理论,将模型降阶为两个二阶系统,用两个控制器对机器人横滚关节进行切换控制。采用滑模控制器使得被控对象末端快速并稳定到达期望位置,同时利用状态反馈迅速消除柔性环节所引起的系统内部振动。仿真和实验结果证明本文所采用的切换控制方法在保证系统快速性的前提下,提升了多步位置控制时的重复精度,在保持多步位置控制时的稳定性以及振动抑制层面均具有明显效果,削弱了柔性环节引起的系统内部拉力。

1 系统模型与分析

机器人踝关节机构设计通常具有两个自由度,横滚以及俯仰。本节主要介绍踝关节横滚机构及动力学分析建模,同时依据奇异摄动理论对模型进行

降阶分解。

1.1 系统模型介绍

图 1 为机器人横滚机构实物图,均安装于机器人小腿之中。机构的工作原理为通过滚珠丝杠,将电机的旋转运动转换为直线运动,并采用弹簧套索机构传递力和运动。设计时亦须考虑机器人质量分配的合理性,保证关节轻量化。

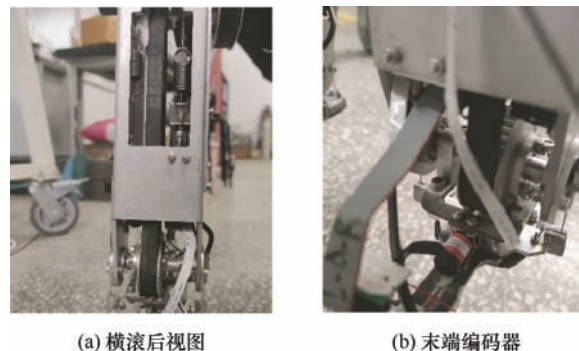


图 1 踝关节样机图

机构简图如图 2 所示,电机通过滚珠丝杠实现运动形式转变,弹簧的一端通过钢丝绳连接丝杠滑块,另一端通过钢丝绳与机器人弧形脚底相连,利用套索穿过俯仰关节,在不影响俯仰运动情况下传递横滚运动至机器人足。为了保持运动过程中的线性化,需保证钢丝绳与脚的接触点始终为脚横滚运动的圆弧切点,保证机构安装的合理。因钢丝绳只能受拉不能受压的特性,弹簧在踝关节运动时始终处于拉伸状态。机构内共装有两个编码器,关节运动末端装有角度编码器,用于控制系统闭环。同时根据 Maxon 电机后端的编码器可以读取电机转动的角度,通过两个编码器角度可以间接计算出弹簧形变量。

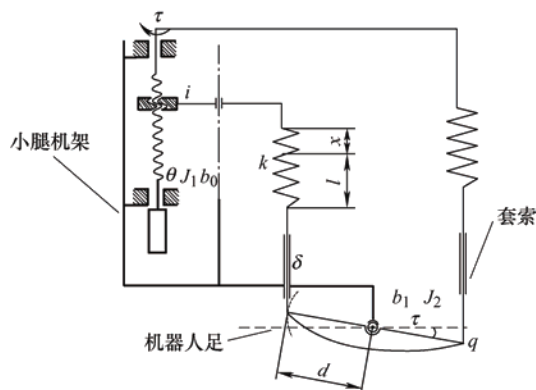


图 2 踝关节机构简图

为了保证多步位置控制的精度,在对踝关节横滚位置控制时,控制目标为:末端快速且稳定到达期望位置,弹簧的形变量迅速收敛至 0。如果弹簧

形变量不收敛至 0, 机构内仍然存在残余的弹簧拉力, 每一次位置控制时系统的初始条件不一样, 影响下一次位置控制的精度, 引起累计误差。

1.2 动力学建模

根据图 2 的踝关节机构系统进行动力学建模, 其中各个变量的符号、含义以及数值的对应关系如表 1 所示。在建模过程中考虑滚珠丝杠的阻尼, 横滚轴运动时摩擦力, 运动过程中钢丝绳中的力在套索中的损失, 因为套索摩擦精确建模十分复杂, 为了简化计算, 将其考虑为输出力与输入力比值为 $(1-\delta)$ 的线性环节。钢丝绳转弯处采用轴承导轮, 因轴承导轮阻尼较小, 不考虑其在运动过程中的摩擦。

表 1 动力学仿真参数

参数	数值
电机输出力矩 τ	输入
丝杠转角 θ	输出
丝杠阻尼 $b_0/(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s})$	1×10^{-3}
丝杠传动比 $i/(\text{rad}/\text{m})$	$2\pi \times 10^3$
弹簧刚度系数 $k/(\text{N}/\text{mm})$	25×10^3
弹簧原始长度 l/m	0.052
弹簧伸长量 x/m	输出
套索阻力系数 δ	0.3
横滚轴阻尼 $b_1/(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s})$	1×10^{-3}
横滚轴阻力 $f/(\text{N} \cdot \text{m})$	1.125
横滚末端转角 q/rad	输出
滚珠丝杠转动惯量 $J_1/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	2.96×10^{-7}
横滚轴转动惯量 $J_2/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	2.96×10^{-7}
套索拉力力臂 d/m	0.045 5

基于 Coulomb 摩擦模型, 可以得到套索的输出力与输入力的关系^[16-17]为

$$F_{out} = F_{in} \exp(-\mu \xi \alpha) \quad (1)$$

式中, μ 为摩擦因数, ξ 为绳索的局部位移, α 为套管累计的弯曲角度, 为了简化计算, 假设套管在运动过程中曲率的变化为恒定值, 即

$$F_{out} = F_{in}(1-\delta) \quad (2)$$

以丝杠和横滚轴为研究对象, 可建立动力学方程为

$$\begin{cases} J_1 \ddot{\theta} + b_0 \dot{\theta} + \frac{kx}{i} = \tau \\ J_2 \ddot{q} + b_1 \dot{q} + \tau_r = kxd(1-\delta) \end{cases} \quad (3)$$

式中, τ_r 为横滚轴的阻力, 因为实际机构中为了增加阻尼以及阻力, 机器人足与横滚轴之间采用键连接, 因此对横滚轴阻力进行库伦摩擦建模, 其表达

式为

$$\begin{cases} \tau_r = -F_{in} & \dot{q} < 0.001 \text{ rad/s} \\ \tau_r = -\text{sgn}(\dot{q})f & \dot{q} \geq 0.001 \text{ rad/s} \end{cases} \quad (4)$$

式中, F_{in} 为横滚轴所受输入力的大小, 当踝关节速度小于门限值时摩擦力与输入力大小相等, 当速度大于门限值时, 摩擦力为与运动方向相反的固定值。

由于钢丝绳的不可伸长性, 左侧弹簧的形变量与右侧弹簧相等, 因此可以得到电机转角、弹簧伸长量以及踝关节转角的关系为

$$x = \frac{\theta}{i} - qd \quad (5)$$

将式(5)求导, 同理可以得到

$$\begin{cases} \dot{x} = \frac{\dot{\theta}}{i} - \dot{q}d \\ \ddot{x} = \frac{\ddot{\theta}}{i} - \ddot{q}d \end{cases} \quad (6)$$

将式(5)和式(6)代入式(3)可得

$$\begin{cases} \ddot{q} = \frac{kd(1-\delta)}{J_2}x - \frac{b_1}{J_2}\dot{q} - \frac{\tau_r}{J_2} \\ \ddot{x} = \left(\frac{b_1d}{J_2} - \frac{b_0d}{J_1}\right)\dot{q} - \left(\frac{kd^2(1-\delta)}{J_2} + \frac{k}{J_1i^2}\right)x - \frac{b_0}{J_1}\dot{x} + \frac{\tau_r d}{J_2} + \frac{1}{J_1i}\tau \end{cases} \quad (7)$$

1.3 模型分解

从式(7)以及系统简图可以分析出, 系统为四阶系统, 采用奇异摄动理论对式(7)进行模型降阶分解, 其中, 慢变系统变量为关节末端转角 q , 快变系统变量为弹簧的形变量 x 。令 $\varepsilon = \frac{1}{k}$, $z = \frac{1}{\varepsilon}x$, 可将模型完成奇异摄动转换为

$$\begin{cases} \ddot{q} = \frac{d(1-\delta)}{J_2}z - \frac{b_1}{J_2}\dot{q} - \frac{\tau_r}{J_2} \\ \varepsilon \ddot{z} = \left(\frac{b_1d}{J_2} - \frac{b_0d}{J_1}\right)\dot{q} - \left(\frac{d^2(1-\delta)}{J_2} + \frac{1}{J_1i^2}\right)z - \frac{b_0}{J_1}\varepsilon \dot{z} + \frac{\tau_r d}{J_2} + \frac{1}{J_1i}\tau \end{cases} \quad (8)$$

当 $\varepsilon = 0$ 时, 可得到快变系统收敛至准稳态的状态为

$$z_s = \left(\frac{d^2(1-\delta)}{J_2} + \frac{1}{J_1i^2}\right)^{-1} \left[\left(\frac{b_1d}{J_2} - \frac{b_0d}{J_1}\right)\dot{q} + \frac{\tau_r d}{J_2} + \frac{1}{J_1i}\tau \right] \quad (9)$$

慢变系统在变化过程中,当快变系统渐进稳定时,才能收敛至准稳态 z_s 。因此慢变系统的降阶模型为

$$\begin{cases} \ddot{q} = \frac{d(1-\delta)}{J_2} z_s - \frac{b_1}{J_2} \dot{q} - \frac{\tau_r}{J_2} \\ z_s = \left(\frac{d^2(1-\delta)}{J_2} + \frac{1}{J_1 i^2} \right)^{-1} \left[\left(\frac{b_1 d}{J_2} - \frac{b_0 d}{J_1} \right) \dot{q} + \right. \\ \left. \frac{\tau_r d}{J_2} + \frac{1}{J_1 i} \tau \right] \end{cases} \quad (10)$$

在建立快变系统降阶模型时,需要建立快变系统时变指标, $t_f = \frac{t_s}{\sqrt{\varepsilon}}$, t_s 为系统的慢变指标。当系统接近边界层时,可认为慢变系统变量值保持为 q_s ,快变系统迅速趋于收敛,得到快变系统模型为

$$\begin{aligned} \frac{d^2 z}{dt_f^2} = & - \left(\frac{d^2(1-\delta)}{J_2} + \frac{1}{J_1 i^2} \right) z - \frac{b_0 \sqrt{\varepsilon}}{J_1} \frac{dz}{dt_f} + \\ & \frac{\tau_r d}{J_2} + \frac{1}{J_1 i} \tau \end{aligned} \quad (11)$$

通过奇异摄动理论的思想可以将四阶机械系统变为两个二阶系统,分别设计不同的控制器使得快变系统与慢变系统分别趋于稳定。

2 控制器设计

经过上述小节已经完成了系统动力学建模,并依据奇异摄动理论对系统进行模型降阶分解。对慢变系统而言,需要快速收敛至期望目标位置并保持稳定,选择使用基于比例切换函数的滑模控制,滑模控制具有鲁棒性强、响应快速等优点,可以提高系统的稳定性,对于干扰也有着一定的抑制作用。快变控制器则要求系统的快变状态迅速收敛至零状态,采用状态反馈控制器,通过配置极点的方法加快系统稳定速度。

切换控制逻辑框图如图 3 所示,切换函数根据末端角度误差的绝对值 $|e|$ 选择控制器,当角度进入设定误差带范围内,完成慢变控制器与快变控制器之间的切换。具体逻辑为

$$\begin{cases} T = T_f & |e| < 0.01 \text{ rad} \\ T = T_s & |e| \geq 0.01 \text{ rad} \end{cases} \quad (12)$$

式中, T 为关节输入力矩, T_s 为慢变控制器输出力矩, T_f 为快变控制器输出力矩,误差带范围由仿真和实验共同确定为 0.01 rad。

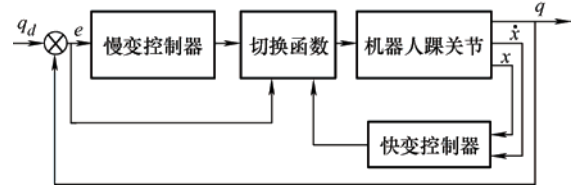


图 3 切换控制

在设计慢变控制器时,选取滑模控制的切换函数为

$$s = ce + \dot{e} \quad (13)$$

式中, $e = q_d - q$, c 为常数, $c > 0$, 且 c 满足 Hurwitz 稳定性要求。

根据比例切换的滑模控制方法,选取控制率为

$$u = (\alpha |e| + \beta |\dot{e}|) \text{sgn}(s) \quad (14)$$

式中, α , β 均为常数。根据符号函数 $\text{sgn}(s)$ 的正负确定整个控制率的正负,完成滑模面上的切换控制。选取李亚普诺夫函数为

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (15)$$

将式(15)求导,依据奇异摄动理论,在慢变系统变量 q 变化的过程中,快变系统变量 x 收敛至定值 x_s ,将式(13)与式(14)代入,同时根据式(3)、(6),可得

$$\dot{V} = s [c\dot{e} + \mu\dot{q} + \gamma - \rho(\alpha|e| + \beta|\dot{e}|)\text{sgn}(s)] \quad (16)$$

其中各个常数的含义为: $\mu = \frac{b_0}{J_1}$, $\gamma = \frac{k}{J_1 i d^2} x_s$, $\rho = \frac{1}{J_1 i d}$, 可见 $\mu > 0$, $\gamma > 0$, $\rho > 0$, 当 $s > 0$ 时,

$\text{sgn}(s) = 1$, 由式(16)可得,存在正数 $\alpha_0 > 0$, $\beta_0 > 0$, 使得 $\dot{V} < 0$ 。同理当 $s < 0$ 时, $\dot{V} < 0$ 依然成立。因此在施加滑模控制后,慢变系统是一个稳定的系统。

快变控制器要求弹簧形变量迅速收敛至 0, 采用状态反馈控制器,根据式(10)可计算出快变系统的极点处于 (-0.11) 和 $(-4895.80, 0)$, 其中 $(-0.11, 0)$ 起主导作用,综合考虑仿真和实验的效果,选择增益矩阵 $K = [-800, -500]$, 在加入状态反馈后,主导极点的位置更新为 $(-1.57, 0)$, 加快了快变系统收敛至 0 的速度,保持每一次位置控制时起始状态弹簧均处于形变量约为 0 的状态。在施加快变控制器后,快变系统也是一个稳定的系统。

3 控制仿真

为了验证切换控制的作用效果,仿真与实验分别对比当控制器为 PID 控制器,滑模控制器及切换控制器时,输出电机角度、踝关节末端角度以及弹簧形变量,通过三类输出之间的比较,显示切换控

制在位置控制时的优势。

本文中仿真均在 Matlab 中完成, 通过在 Simulink 中搭建系统动力学模型以及三种控制器, 给定踝关节的期望输入角度为 10° 的阶跃信号, 得到的仿真结果如图 4 所示。

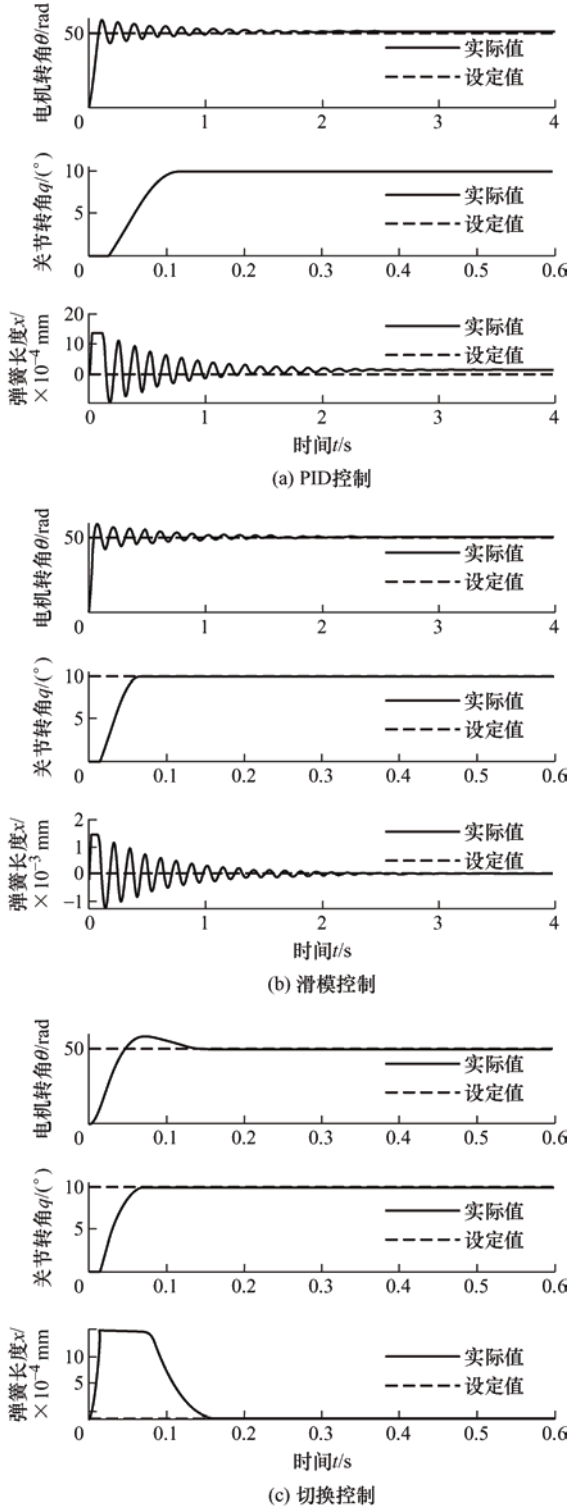


图4 Simulink 仿真结果

针对关节转角响应, 各个控制器的性能如表 2 所示, 通过对比分析以上三种控制器仿真, 可以得到相

同点: 由于摩擦力以及弹性环节的存在, 弹簧均需拉伸一段克服系统的最大静摩擦力才能使得关节末端运动, 系统存在一定延时, 三种控制方法均可以使关节末端快速且无超调到达期望位置, 稳态误差均较小, 上升时间较短。踝关节末端的位置调整时间也均在 0.2 s 内, 可以满足在跨步过程中的位置控制。

表 2 控制器性能-单步

控制器	上升时间/s	调整时间/s	稳态误差/(°)
PID	0.115 6	0.116 6	0.005
滑模	0.072 7	0.073 0	0.006
切换	0.071 3	0.073 5	0.008

通过对比电机转角以及弹簧伸长量图可见, PID 和滑模控制虽然使得关节末端转角快速无超调到达期望值, 但是电机以及弹簧之间仍存在着较长时间的震荡, 整个过程的调整时间约为 3 s。当震荡逐步消失, 系统趋向稳定, 采用 PID 控制时, 弹簧仍有残余伸长量, 导致系统内仍存在残余拉力, 电机仍需处于工作状态克服残余拉力, 每次位置控制时弹簧均不收敛至零, 形成累计误差影响位置控制精度。滑模控制可以使得弹簧最终形变量趋近于零, 但是调整时间仍然较长, 不满足快速性要求。

针对此种柔性机构的特点, 采用快慢变控制器切换的方法得到的仿真效果如图 4c 所示, 关节末端同样快速无超调到达了期望位置。与前面二者相对比, 慢变控制器使得末端到达期望位置后切换为快变控制器, 通过快变控制器的作用将弹簧形变量迅速收敛至零。在 0.18 s 时整个系统趋于稳定, 与提出的末端快速到达期望位置、弹簧形变量收敛至零的目标相符合。

这也与奇异摄动理论提出的模型降阶方法一致。首先采用慢变控制器, 使得慢变系统迅速到达指定位置, 弹簧形变量 x 迅速收敛至准稳态 x_s , 当控制角度到达误差带范围之内之后, 即 $|e| < 0.01$ rad, 切换为快变控制器, 此时慢变系统变量 q 被冻结成 q_s , 快变系统 x 迅速收敛至 0, 与控制目标一致。以上仿真参数均根据控制效果进行调整获得。

4 样机实验

本实验是基于实验室 23 自由度机器人踝横滚自由度进行位置控制实验, 本文着重于摆腿过程中的位置控制, 因此我们将机器人足踝处于悬空状态。将当期望的角度为 10° 时, 对比分析不同控制器下的输出。

如图 5 所示, 实验结果表明, 三种控制方法均可以使得末端快速且无超调的到达期望轨迹, 由于末端摩擦力较大, 刚开始在电机转动时末端并无响

应,与仿真结果一致。

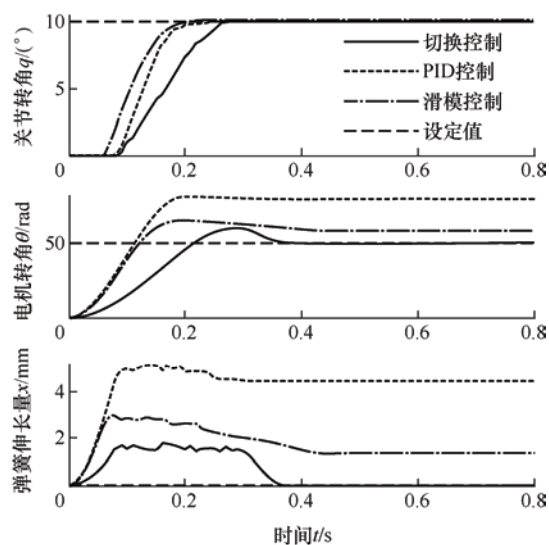


图5 位置控制-单步

与仿真相比,滑模控制以及切换控制的速度没有PID控制速度快,但是最后关节末端稳定的时间几乎相同,PID控制约为0.23 s,滑模控制约为0.25 s,切换控制约为0.28 s。满足控制过程中快速性的要求。且三者最后到达的最终稳态值均为 10.1° ,满足稳定性的要求。

分析电机转角可以看出,在控制过程中,末端稳定后,三者电机均有回调使得弹簧的形变量缩短,控制效果却大有不同。在电机正转到达峰值后,滑模控制及PID控制使得电机回调不大,但是滑模控制可以降低过程中电机的超调量,因此在切换控制时,慢变控制器采取滑模控制器。切换控制可以使得电机回调几乎与设定值相同,稳态误差约为0.01 rad,控制效果明显好于PID控制和滑模控制。

从弹簧伸长量中可以分析出,PID控制在末端收敛时电机只进行部分回调,最终稳定时弹簧形变量约为4.5 mm。滑模控制与PID控制相比效果有了部分的提升,形变量稳定时约为1.35 mm。而在运用切换控制时,在慢变系统变量到达误差带范围内后切换控制器,从实验效果得知,弹簧伸长量迅速收敛至0附近,最后形变量约为-0.05 mm,同PID控制以及滑模控制相比,切换控制有着明显的作用效果,可以使得弹簧迅速返回至初始状态。

从实验过程中也可以得出,针对此系统,采取奇异摄动理论对系统模型降阶分解是有意义的。整体实验效果与仿真类似,实验过程中与仿真过程中上升时间不同、峰值时间存在差异及电机伸长量数量级不同的主要原因为,实验过程中受到的阻尼和阻力更大。仿真中将套所处摩擦力考虑为 $0.3F_{in}$ 即

与输入力成比例的固定值,实际过程中受制于套索的曲率、局部伸长量等,摩擦更为复杂,难于精准建模;关节末端摩擦模型简化为库伦摩擦模型,实际应为更复杂的非线性关系。但就切换控制的效果而言,控制系统调整时间约为0.35 s,满足跨步过程中的位置控制的快速性、稳定性要求。

在完成单步的运动控制后,为了验证弹簧残余形变量对位置控制精度的影响,采取连续3组多步位置控制,期望位置从在 0° 和 10° 两个值中间进行切换。得到的实验结果如图6所示。

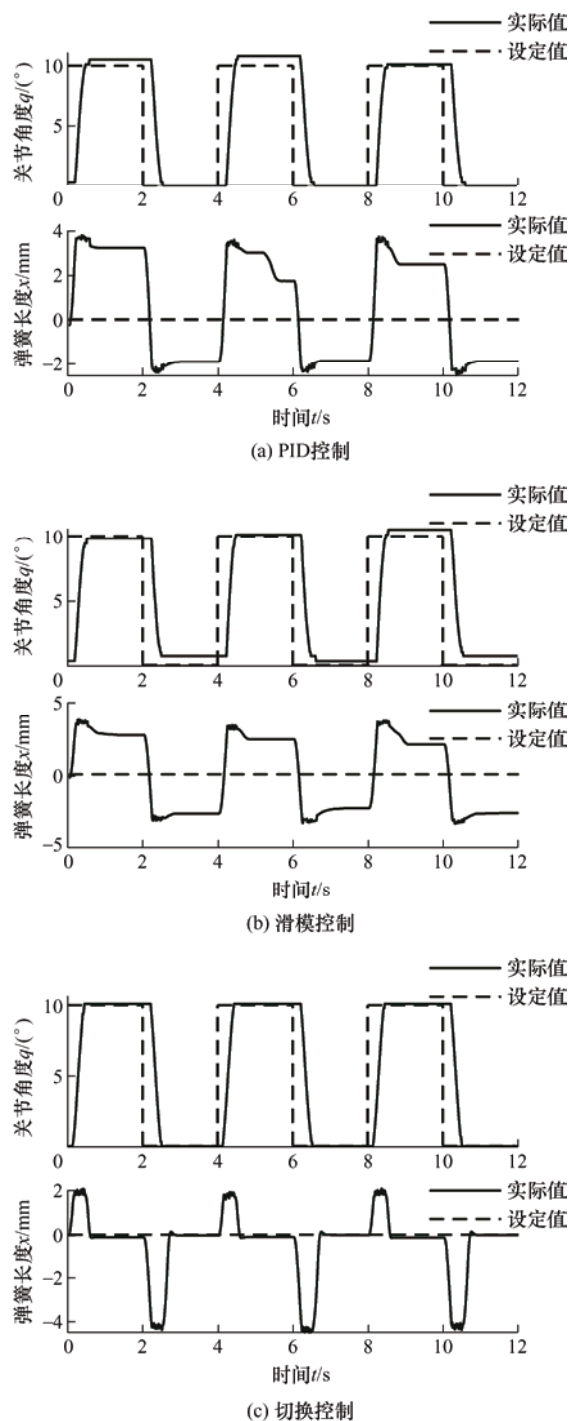


图6 位置控制-多步

当期望角度切换时, 末端所能达到的位置如表 3 所示, 分析表 3 及图 6 可知, 由于 PID 控制和滑模控制不能使得弹簧的伸长量 x 趋向于 0, 在每次位置控制时弹簧的初始状态均不同, 因此在进行多步位置时, 末端响应到达的角度均不相同且差别较大, 累计误差过大会影响运动过程中的稳定性。当采取切换控制时, 每一次在切换期望位置后, 弹簧伸长量均会收敛至 0 附近, 对下一次影响较小, 末端轨迹比较稳定。由此可见, 针对此种模型, 采用根据奇异摄动理论而采取的切换控制具有良好的控制特性。

表 3 控制器性能-多步 (°)

控制器	10°(期望)	0°(期望)
PID 控制	10.5, 10.8, 10.1	0, 0, 0
滑模控制	9.8, 10.1, 10.5	0.7, 0.3, 0.7
切换控制	10.1, 10.1, 10.1	0, 0, 0

系统中加入弹性环节有两个优点、第一弹簧可以作为滤波器抑制掉高频扰动对于末端运动的影响, 二是加入了线性环节使得内部拉力更加柔顺, 便于进行力控制。文献[15]中通过双套索对系列弹性驱动末端进行控制, 关节末端加入扭簧, 使得末端也具有一定柔性, 通过鲁棒控制策略抑制掉了高度不可预测的套索中的非线性摩擦力对于关节末端运动的影响, 虽然本文的研究对象关节末端未加入轴承阻力较大, 之后也将考虑在滑模控制中加入鲁棒控制项^[18], 以及加入前馈摩擦补偿来抑制由摩擦引起的时延, 更好地完成位置控制。

5 结论

本文主要对机器人柔性踝关节进行位置控制研究, 通过探究机器人踝的结构并分析其动力学, 对高阶系统采取奇异摄动理论对系统进行模型降阶分解, 通过快慢变控制器切换完成控制过程。其中, 慢变控制器使得关节末端迅速并稳定到达关节期望位置, 快变控制器使得弹簧形变量迅速收敛至零, 保证每次位置控制时弹簧的初始状态。Simulink 仿真及样机实验的数据表明, 当快慢变系统均为稳定系统时, 位置控制采用切换控制可以满足控制目标要求。单独采用 PID 控制或滑模控制不能保证多步位置控制时的稳定性和重复精度。这也印证了奇异摄动理论在对模型降阶分解时的可靠性, 针对模型的特点可以采用该理论的思想对模型降阶, 优化控制效果。

参 考 文 献

- [1] 赵江波, 陈颖慧, 王军政. 基于分数阶的电动轮足式机器人腿部阻抗控制研究[J]. 北京理工大学学报, 2019, 39(2): 187-192.
ZHAO Jiangbo, CHEN Yinghui, WANG Junzheng. Research on leg impedance control for electronic wheel-legged robot based on fractional order[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2019, 39(2): 187-192.
- [2] HASHIMOTO K. Mechanics of humanoid robot[J]. Advanced Robotics, 2020, 34(21-22): 1390-1397.
- [3] 吉巧丽, 钱志辉, 任雷, 等. 基于遗传算法的双足机器人足踝蹬地参数优化[J]. 农业机械学报, 2020, 51(S1): 584-591.
JI Qiaoli, QIAN Zhihui, REN Lei, et al. Parameters optimization of ankle push-off of planar bipedal robot based on genetic algorithm[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery, 2020, 51(S1): 584-591.
- [4] 陈志伟, 金波, 朱世强, 等. 液压驱动单腿跳跃机器人柔顺着地分析与控制[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(3): 537-544.
CHEN Zhiwei, JIN Bo, ZHU Shiqiang, et al. Compliant touch-down analysis and control for the hydraulically actuated single-legged hopping robot[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(3): 537-544.
- [5] 李小彭, 尚东阳, 陈仁帧, 等. 基于机械臂位姿变换的柔性负载伺服驱动系统控制策略[J]. 机械工程学报, 2020, 56(21): 56-69.
LI Xiaopeng, SHANG Dongyang, CHEN Renzhen, et al. Control strategy of flexible load servo drive system based on manipulator position and position transformation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(21): 56-69.
- [6] SUN Haining, TANG Xiaoqiang, HOU Senhao, et al. Vibration suppression for large-scale flexible structures based on cable-driven parallel robots[J]. Journal of Vibration and Control, 2019, 55(11): 53-60.
- [7] 吴昊, 毛新涛, 刘鹭航, 等. 柔性关节空间机械臂的自适应滑模控制[J]. 宇航学报, 2019, 40(6): 703-710.
WU Hao, MAO Xintao, LIU Luhang, et al. Adaptive sliding-mode control for elastic joint space manipulators[J]. Journal of Astronautics, 2019, 40(6): 703-710.
- [8] JU Jinyong, ZHAO Yongrui, ZHANG Chunrui, et al. Vibration suppression of a flexible-joint robot based on

- parameter identification and fuzzy PID control[J]. Algorithms, 2018, 11(11): 189-203.
- [9] KIM J, CROFT E A. Full-state tracking control for flexible joint robots with singular perturbation techniques[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2019, 27(1): 63-73.
- [10] SUN Tao, LIANG Dong, SONG Yinmin. Singular-perturbation-based nonlinear hybrid control of redundant parallel robot[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(4): 3326-3336.
- [11] 刘华山, 金元林, 程新, 等. 力矩输入有界的柔性关节机器人轨迹跟踪控制[J]. 控制理论与应用, 2019, 36(6): 983-992.
- LIU Huashan, JIN Yuanlin, CHENG Xin, et al. Trajectory tracking control for flexible-joint robot manipulators with bounded torque inputs[J]. Control Theory & Applications, 2019, 36(6): 983-992.
- [12] JUNG Y, BAE J. Torque control of a series elastic tendon-sheath actuation mechanism[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2020, 25(6): 2915-2926.
- [13] WU Haoting, YIN Meng, XU Zhigang, et al. Transmission characteristics analysis and compensation control of double tendon-sheath driven manipulator[J]. Sensors, 2020, 20(5): 1301-1316.
- [14] WU Qingcong, WANG Xingsong, CHEN Lin, et al. Transmission model and compensation control of double-tendon-sheath actuation system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(3): 1599-1609.
- [15] SENTURK Y M, PATOGLU V. MRI-VisAct: A bowden-cable-driven MRI-compatible series viscoelastic actuator[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2018, 40(8): 2440-2453.
- [16] WU Qingcong, WANG Xingsong, DU Fengpo, et al. Torque transmission characteristics and friction compensation for a tendon-sheath actuation system in pull-pull configuration[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(5): 22-29.
- [17] ZHANG Qi, WANG Xingsong, TIAN Mengqian, et al. Modeling of novel compound tendon-sheath artificial muscle inspired by hill muscle model[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(8): 6372-6381.
- [18] 吴跃飞, 马大卫, 姚建勇, 等. 基于修正 LuGre 模型的自适应鲁棒控制在机电伺服系统中的应用[J]. 机械工程学报, 2014, 50(22): 207-212.
- WU Yuefei, MA Dawei, YAO Jianyong, et al. Application of adaptive robust control in mechatronic servo system based on modified LuGre model[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(22): 207-212.

作者简介: 窦昆鸿, 男, 1997 年出生。主要研究方向为两足机器人伺服控制。

E-mail: dou@seu.edu.cn

潘晟, 男, 1994 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为液压式机械臂规划与控制。

E-mail: p_sheng@seu.edu.cn

罗翔(通信作者), 男, 1968 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机器两足步行的机理及步态优化方法, 冗余度机器人的路径优化方法, 工业机器人控制技术。

E-mail: luox@seu.edu.cn