

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1904753

基于 FNTFSMC 的国产腹腔镜手术机器人轨迹控制*

凌 颖^{1,2}, 王国慧¹, 易 波¹, 李建民³, 朱晒红¹

(1.中南大学湘雅三医院 长沙 410013; 2.中南大学机电工程学院长沙 410082;
3.天津大学 机构理论与装备设计教育部重点实验室 天津 300350)

摘要:针对国产腹腔镜手术机器人轨迹跟踪控制的关键问题,在动力学模型的基础上,构建了自适应模糊滑模控制系统。该方法采用快速非奇异终端滑模面,确保系统能够在有限时间内收敛,并且避免了控制奇异的问题,同时运用模糊逻辑控制,根据系统误差的变化动态调节滑模切换项的大小,在保留滑模控制鲁棒性的基础上,减小了系统的抖振,提高了被控系统的跟踪精度和鲁棒性。仿真结果显示,所设计的方法具有收敛速度快、稳态精度高、力矩脉动小的特点,能够将位置的收敛时间从0.6~0.9 s减小到0.1 s,稳态误差峰值由0.035 rad减小到0.01 rad。针对动物活体组织的实验结果显示,所设计的控制系统能够实现机械手臂对医生操作信息的准确跟踪,为手术的顺利实施提供了保障。

关键词: 国产腹腔镜手术机器人; 轨迹跟踪控制; 快速非奇异终端模糊滑模控制; 抖振

中图分类号: TP241.3 TH69 R608 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8050 320.27

Trajectory control of domestic laparoscopic surgery robot based on FNTFSMC

Ling Hao^{1,2}, Wang Guohui¹, Yi Bo¹, Li Jianmin³, Zhu Shaihong¹

(1.The Third Xiangya Hospital of Central South University, Changsha 410013, China;

2.College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410013, China;

3.Key Laboratory of Mechanism Theory and Equipment Design (Tianjin University), Ministry of Education, Tianjin 300350, China)

Abstract: Aiming at the key issue of trajectory tracking control for domestic laparoscopic surgery robot, an adaptive fuzzy sliding mode control system is constructed based on dynamic model. This method uses a fast non-singular terminal sliding mode surface to ensure that the system can converge in a limited time and avoid the singularity of control. At the same time, the fuzzy logic control is used to dynamically control the size of the sliding mode switching term according to the dynamic variation of the system error. The chattering of the system is reduced, and the tracking accuracy and robustness of the controlled system are improved on the basis of retaining the robustness of sliding mode control. The simulation results show that the designed method possesses the characteristics of fast convergence speed, high steady-state accuracy and small torque ripple. The method can reduce the position convergence time from 0.6 s~0.9 s to 0.1 s and the peak value of the steady-state error reduces from 0.035 rad to 0.01 rad. The experiment results on living animal tissues show that the designed control system can achieve the aim the mechanical operating arm accurately tracks the operation information of the doctor, which provides a guarantee for the smooth implementation of the operation.

Keywords: domestic laparoscopic surgery robot; trajectory tracking control; fast nonsingular terminal fuzzy sliding mode control; chattering

0 引 言

随着诊疗技术和传感技术的不断变革,机器人在医疗康复领域得到越来越广泛的应用^[1-3]。1987年法国完成了

世界上第一例腹腔镜胆囊切除术,开启了微创手术的新时代^[4],腹腔镜手术综合运用了医疗、电子信息、光电等技术,与传统的开放性手术相比,具有创伤小、病人痛感轻、手术过程中出血少的特点,大大降低了病人感染的机率,提高了病人术后的恢复速度^[4],受到临床各科的广泛关

注。将机器人技术应用于腹腔镜手术具有以下优点:1)定位精确、操作微创;2)缓解医生疲劳程度;3)操作灵活、直观可视;4)可预先模拟、可设定区域、可记忆位置,是外科手术发展的必然趋势^[5]。本文基于天津大学自主研发的“妙手”腹腔镜手术机器人平台,该手术机器人除了具备国外同类设备功能之外,其可移动性也得到了较大的改善。

腹腔镜手术机器人需要在狭窄的空间内进行大量的操作,其对于机器人的精度要求非常高。能够对精度产生影响的因素主要包括以下方面:1)机器人及工具的结构设计复杂;2)传动钢丝绳的蠕变以及部件的摩擦;3)外部环境的干扰;4)人工操作的个性化及熟练程度。多种因素导致的系统误差将会极大的影响系统的操作精度,对手术的成功实施带来不可预知的不利影响^[6]。因此针对国产腹腔镜手术机器人设计具有高轨迹跟踪精度且具有良好鲁棒性的控制系统具有重要意义。

滑模变结构控制(sliding mode control, SMC)具有优良的鲁棒性能,适合用于解决机器人系统中各类非线性扰动。相关的研究成果经历了线性滑模^[7-8]、终端滑模(terminal sliding mode control, TSMC)^[9-12]和非奇异终端滑模的阶段。文献[13]针对不确定系统设计了自适应非奇异滑模控制方法,解决了传统终端滑模方法存在奇异性的问题,同时显著提高了系统状态远离滑模面时的收敛速率。文献[14]针对机器人系统设计了非奇异快速终端滑模控制方法,仿真和实验数据显示,收敛时间均优于传统终端滑模控制方法,根据这一思路,本文将该方法用于腹腔镜手术机器人控制系统,以改善系统的收敛性能。

除了收敛速率的问题,滑模控制器的设计必须考虑削弱抖振。将新型滑模控制方法与其它控制理论相结合能够在保证滑模优良鲁棒性的前提下,削弱抖振现象。文献[15]针对微创血管介入手术机器人时延问题,提出了基于等效控制和切换控制的模糊控制来削弱抖振的滑模控制器,改善了时延条件下手术机器人的位置跟踪和力跟踪性能。文献[16]针对手术机器人广泛存在的震颤情况,设计基于模糊神经网络滑模控制器,进行震颤抑制。文献[17-18]分别针对不同类型的穿刺手术机器人系统采用模糊逻辑对滑模控制的抖振进行抑制,取得了良好的效果,同时能够降低被控系统对模型参数的依赖。本研究中对于滑模抖振的抑制也采用基于模糊逻辑的框架。

在梳理已有成果的基础上,本研究针对手术机器人的作业环境和实际运行情况,提出了快速非奇异终端模糊滑模控制(fast nonsingular terminal fuzzy sliding mode control, FNTSMC)方法,采用了基于模糊逻辑的自适应快速非奇异终端滑模控制方法,通过快速非奇异滑模面的设计保证系统误差能够在较短的时间内收敛到零,同时利用模糊逻辑,随着轨迹跟踪误差的变化自动调节滑模切换项的大小,在误差较小时,可利用较小的滑模鲁棒

项保证系统达到和保持稳定状态,以达到削弱抖振的目的。本文的主要创新点如下:

1)针对项目组研发的手术机器人详细分析了影响操作精度的内部和外部关键因素;

2)针对该手术机器人设计了基于新型快速非奇异终端滑模面的控制方法,以改善系统的收敛性能;

3)针对该手术机器人,将自适应模糊控制应用于控制系统以削弱滑模控制抖振导致的机器人末端的震颤现象,并进行了系统仿真和活体动物实验验证。

1 国产腹腔镜手术机器人的动力学模型

图1所示为国产“妙手”腹腔镜手术机器人三维结构模型,该手术机器人可以近似为一个具有 n 个旋转连杆的刚性机器人,为了尽可能提高手术机器人的操作精度,考虑到机器人存在建模的误差以及系统存在内部的不确定性,动力学特性可以表达为以下形式^[19-20]:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + F(\dot{q}) + f = \tau \quad (1)$$

式中: \ddot{q} 、 \dot{q} 、 q 分别是机器人旋转关节的角加速度矢量、角速度矢量和角位置矢量,本文角位置矢量 q 是可以测量的。 $M(q) \in R^{n \times n}$ 为惯性矩阵, $C(q, \dot{q}) \in R^{n \times n}$ 为科氏力和离心力矩阵, $G(q) \in R^{n \times 1}$ 为关节自身所受到的重力矢量, $F(\dot{q}) \in R^{n \times 1}$ 为关节间的摩擦力矢量 $f = \Delta M(q)\ddot{q} + \Delta C(q, \dot{q})\dot{q} + \Delta G(q) + \Delta F(\dot{q}) + \tau_d$ 为建模误差、内部不确定性和外部扰动矢量的总和。 $\tau_d \in R^{n \times 1}$ 为机器人系统受到的各类外部扰动矢量, $\tau \in R^{n \times 1}$ 为作用于关节上的控制力矩矢量。

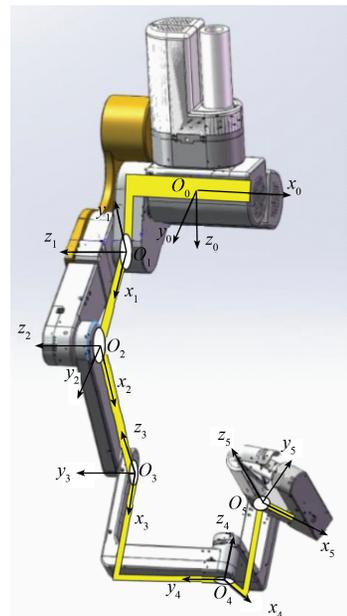


图1 国产“妙手”腹腔镜手术机器人三维结构模型
Fig.1 Three-dimensional structure model of the “Smart Hand” domestic portable laparoscopic surgery robot

同时为了便于开展控制方法的设计工作,对手术机器人动力学做如下假设^[21]。

假设 1 惯性矩阵 $M(q) \in R^{n \times n}$ 是对称正定矩阵且一致有界连续, 且其逆矩阵 $M^{-1}(q) \in R^{n \times n}$ 存在: $m_1 \|x\|^2 \leq x^T M(q)x \leq m_2 \|x\|^2, \forall x \in R^{n \times 1}$ 。

假设 2 $M(q) - 2C(q, \dot{q})$ 是斜对称矩阵, 即对于任意向量 q , 存在如下关系: $q^T [M(q) - 2C(q, \dot{q})] q = 0$ 。

假设 3 假设期望轨迹 q_d 是一个连续二次可微的函数。

假设 4 假设外部扰动和不确定性是有界的, 即 $\|f\| \leq F$, 其中 F 是正常数。

本文研究的控制目标为通过设计合适稳定的控制方法, 使得手术机器人的关节角位置矢量 q 能够快速准确的跟踪期望轨迹 q_d 。

2 快速非奇异终端模糊滑模控制器的设计

图 2 所示为快速非奇异终端模糊滑模控制系统结构框图。控制律共有两部分组成, 分别是等效控制部分和模糊切换控制部分。利用模糊控制, 根据滑模面的大小自动调节切换项 Y 的大小, 动态匹配扰动的变化, 模糊控制参数是由自适应律 $\tilde{\sigma}_{y_i}$ 动态调节的。控制输出信号 τ_3 送给机器人关节控制器, 使机器人末端的轨迹 q 能够准确的跟踪理想的轨迹 q_d 。

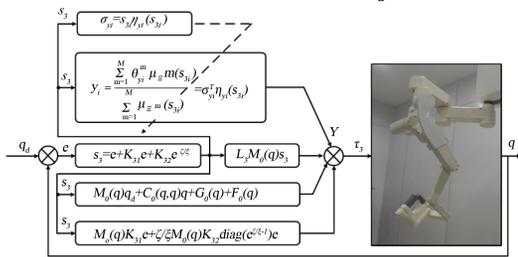


图 2 FNTFSMC 控制系统结构

Fig.2 Structure block diagram of FNTFSMC control system

首先定义系统的轨迹跟踪误差及其导数为^[22]:

$$\begin{cases} e = q_d - q \\ \dot{e} = \dot{q}_d - \dot{q} \\ \ddot{e} = \ddot{q}_d - \ddot{q} \end{cases} \quad (2)$$

设计快速非奇异终端滑模面为^[23]:

$$s = \dot{e} + K_1 e + K_2 e^{\zeta/\xi} \quad (3)$$

式中: $s = [s_1; s_2; \dots; s_n]$; K_1, K_2 均为待设计的正矩阵, $K_1 = \text{diag}(k_{11}, k_{12}, \dots, k_{1n}), K_2 = \text{diag}(k_{21}, k_{22}, \dots, k_{2n}), k_{1i} > 0, k_{2i} > 0, i = 1, 2, \dots, n; e^{\zeta/\xi} = [e_1^{\zeta/\xi}; e_2^{\zeta/\xi}; \dots; e_n^{\zeta/\xi}]$, ζ, ξ 均为待设计的正奇数且 $\zeta < \xi$ 。

快速非奇异终端滑模控制器可设计为^[23]:

$$\tau = \tau_0 + \tau_{eq} + \tau_{rob} \quad (4)$$

其中:

$$\tau_0 = M(q)\ddot{q}_d + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + F(\dot{q})$$

$$\tau_{eq} = M(q)K_1 \dot{e} + \zeta/\xi M(q)K_2 \text{diag}(e^{\zeta/\xi-1}) \dot{e}$$

$$\tau_{rob} = LM(q)s + Y$$

$$L = \text{diag}(l_1, l_2, \dots, l_n), l_i > 0, Y = [y_1; y_2; \dots; y_n]$$

根据模糊系统的万能逼近定理^[21], $Y = [y_1; y_2; \dots; y_n]$ 可以由模糊函数得到, 通过选取合适的模糊控制算法, 以滑动模态为输入, 切换项为输出并根据滑动模态的大小进行动态调整, 从而达到有效削弱抖振的目的。为了简化描述, 选取 $\hat{Y} = M^{-1}(q)Y = [\hat{y}_1; \hat{y}_2; \dots; \hat{y}_n]$, $\hat{f} = M^{-1}(q)f = [\hat{f}_1; \hat{f}_2; \dots; \hat{f}_n]$ 。

定理 1 模糊项 $\hat{y}_i = \sigma_{y_i}^T \eta_{y_i}(s_i)$ 为扰动 \hat{f} 的逼近值, 根据万能逼近定理, 存在 $v_i > 0$ 和极小正实数 ρ_i 满足^[24] 式(5)。

$$|\hat{f}_i - \sigma_{y_i}^T \eta_{y_i}(s_i)| \leq v_i \leq \rho |s_i| \quad (5)$$

其中 $\tilde{\sigma}_{y_i} = \tilde{\sigma}_{y_i} - \tilde{\sigma}_{y_i^*}$

设计自适应律^[24] 如下:

$$\dot{\tilde{\sigma}}_{y_i} = s_i \eta_{y_i}(s_i) \quad (6)$$

注意到此处采用的自适应律是只与滑模面 s_3 有关的函数, 无需增加新的待设计参数, 可以根据滑动模态的运动自动调节。

定理 2 对于手术机器人系统(1), 设计滑模控制律(4)和自适应律(6), 可以确保轨迹跟踪误差在规定的时间内收敛到 0, 同时系统可以达到镇定状态。

稳定性证明:

选取 Lyapunov 函数^[23] 如下:

$$V = \frac{1}{2} s^T s + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (\tilde{\sigma}_{y_i}^T \tilde{\sigma}_{y_i}) \quad (7)$$

对式(7)进行求导可得:

$$\dot{V} = s^T \dot{s} + \sum_{i=1}^n (\tilde{\sigma}_{y_i}^T \dot{\tilde{\sigma}}_{y_i}) \quad (8)$$

由式(1)和(2)可得:

$$\begin{aligned} \dot{e} &= \dot{q}_d - \dot{q} = \ddot{q}_d - M^{-1}(q) [\tau - C(q, \dot{q})\dot{q} - \\ &G(q) - F(\dot{q}) - f] = \ddot{q}_d - M^{-1}(q) \cdot \\ &[\tau_0 + \tau_{eq} + \tau_{rob} - C(q, \dot{q})\dot{q} - G(q) - F(\dot{q}) - f] = \\ &-M^{-1}(q) (\tau_{eq} + \tau_{rob} - f) \end{aligned} \quad (9)$$

由式(8)和(9)可得:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s^T \dot{s} + \sum_{i=1}^n (\tilde{\sigma}_{y_i}^T \dot{\tilde{\sigma}}_{y_i}) = \\ &s^T [\ddot{e} + K_1 \dot{e} + \zeta/\xi K_2 \text{diag}(e^{\zeta/\xi-1}) \dot{e}] + \sum_{i=1}^n (\tilde{\sigma}_{y_i}^T \dot{\tilde{\sigma}}_{y_i}) = \\ &s^T [-M^{-1}(q) (\tau_{eq} + \tau_{rob} - f) + K_1 \dot{e} + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \zeta/\xi K_2 \text{diag}(e^{\zeta/\xi-1}) \dot{e} + \sum_{i=1}^n (\tilde{\sigma}_{y_i}^T \tilde{\sigma}_{y_i}^T) = - \\ & s^T Ls + \sum_{i=1}^n s_i [\hat{f}_i - \sigma_{y_a}^T \eta_{y_i}(s_i) - \sigma_{y_b}^T \eta_{y_i}(s_i)] + \\ & \sum_{i=1}^n (\tilde{\sigma}_{y_i}^T \tilde{\sigma}_{y_i}^T) = -s^T Ls + \sum_{i=1}^n s_i [\hat{f}_i - \sigma_{y_a}^T \eta_{y_i}(s_i)] \quad (10) \end{aligned}$$

根据定理1中关于 ρ_i 的规定,此处假设 $0 < \rho_i < 1$,则有 $s_i |\hat{f}_i - \sigma_{y_a}^T \eta_{y_i}(s_i)| \leq \rho_i |s_i|^2 = \rho_i s_i^2$,因此由式(10)可得:

$$\begin{aligned} \dot{V} & \leq -s^T Ls + \sum_{i=1}^n \rho_i s_i^2 = \sum_{i=1}^n (-l_i s_i^2 + \rho_i s_i^2) = \\ & \sum_{i=1}^n (-l_i + \rho_i) s_i^2 \quad (11) \end{aligned}$$

当取 $l_i > \rho_i$ 时,可得 $\dot{V} \leq 0$,当且仅当 $s=0$ 时, $\dot{V}=0$,根据LaSalle不变集原理,闭环控制系统渐进稳定,被控系统在平衡点是全局稳定的。由此,定理2得证。

3 国产腹腔镜手术机器人控制仿真分析

为了验证所设计方法的有效性,本节以手术机器人为控制对象,基于文中的假设对其进行简化,在MATLAB R2016a平台上进行仿真验证,考虑到摩擦以及外部扰动,手术机器人的动力学方程如式(1)所述,列写如下:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + F(\dot{q}) + \tau_d = \tau$$

手术机器人的系统参数为:

$$M(q) = \begin{bmatrix} M_{11}(q_2) & M_{12}(q_2) \\ M_{21}(q_2) & M_{22}(q_2) \end{bmatrix}$$

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} C_{11}(q_2) & C_{12}(q_2) \\ C_{21}(q_2) & C_{22}(q_2) \end{bmatrix}$$

$$G(q) = \begin{bmatrix} G_1(q_1, q_2) \\ G_2(q_1, q_2) \end{bmatrix}$$

$$M_{11}(q_2) = (m_1 + m_2)l_1^2 + m_2l_2^2 + 2m_2l_1l_2\cos(q_2)$$

$$M_{12}(q_2) = M_{21} = m_2l_2^2 + m_2l_1l_2\cos(q_2), M_{22}(q_2) = m_2l_2^2$$

$$C_{11}(q_2) = -m_2l_1l_2\sin(q_2)\dot{q}_2$$

$$C_{12}(q_2) = -m_2l_1l_2\sin(q_2)(\dot{q}_1 + \dot{q}_2)$$

$$C_{21}(q_2) = m_2l_1l_2\sin(q_2)\dot{q}_1, C_{22}(q_2) = 0$$

$$G_1(q_1, q_2) = (m_1 + m_2)l_1g\cos(q_2) + m_2l_2g\cos(q_1 + q_2)$$

$$G_2(q_1, q_2) = m_2l_2g\cos(q_1 + q_2)$$

$$F(\dot{q}) = \begin{bmatrix} F_1(\dot{q}_1) \\ F_2(\dot{q}_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.2\text{sign}(\dot{q}_1) \\ 0.2\text{sign}(\dot{q}_2) \end{bmatrix}$$

$$\tau_d = \begin{bmatrix} 0.1 \sin(t) \\ 0.1 \sin(t) \end{bmatrix}$$

式中: m_1 和 m_2 是关节1和关节2的质量, l_1 和 l_2 是关节

1和关节2的长度, g 代表重力加速度。两个关节的具体参数是 $m_1 = 3 \text{ kg}$ 、 $m_2 = 2 \text{ kg}$ 、 $l_1 = 0.8 \text{ m}$ 、 $l_2 = 1 \text{ m}$ 、 $g = 10 \text{ m/s}^2$ 。关节位置的期望值为 $q_{1d} = \cos(2\pi t) \text{ rad}$ 、 $q_{2d} = \sin(\pi t) \text{ rad}$,关节位置的初始值 $q_0 = [0.6 \ 0.5]^T \text{ rad}$,关节速度的初始值为 $\dot{q}_0 = [0.5 \ 0.5]^T \text{ rad/s}$ 。仿真参数如表1所示。

表1 仿真参数表

Table 1 Simulation parameter table							
FNTFSMC	k_{1i}	k_{2i}	l_i	λ	ζ	ξ	ρ_i
	20	10	100	100	5	7	0.1

为了对比说明本文所设计的控制器FNTFSMC有效性,与另外2种控制方法的效果进行了对比,分别是传统滑模控制方法(SMC)和终端滑模控制方法(TSMC),仿真结果及其分析如图3所示。

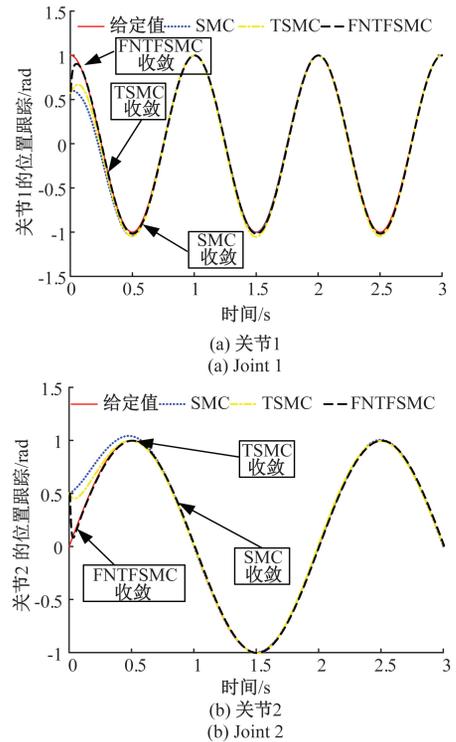


图3 关节的位置跟踪

Fig.3 Joint position tracking

图3所示为关节的位置跟踪曲线,位置信号的给定值为余弦和正弦曲线,给定值的初值为 $[0.6 \ 0.3]^T$,每个关节在零时刻的实际输出值为 $[0 \ 0]^T$,通过曲线可以看到,在3种控制方法作用下,关节的实际值都能够准确跟踪给定值。对于关节1来说,SMC、TSMC、FNTFSMC三种方法的收敛时间大约分别为0.6、0.3、0.1s。对于

关节 2 来说,SMC、TSMC、FNTFSMC 三种方法的收敛时间大约分别为 0.9、0.5、0.1 s。分析表明,所设计的 FNTFSMC 方法在收敛速度上显著优于其它两种对比方法,同时,TSMC 在收敛速度上也优于传统的 SMC,与理论分析是一致的。

图 4 所示为关节在 3 种控制方法作用下,稳态误差的局部放大曲线,时间区间为 1~3 s,此时 3 种控制方法均已达到稳态。通过曲线可以看到,对于关节 1 来说,SMC、TSMC、FNTFSMC 三种方法的稳态误差的峰值大约分别为 0.02、0.03、0.01 rad。对于关节 2 来说,SMC、TSMC、FNTFSMC 三种方法的稳态误差的峰值大约分别为 0.01、0.013、0.005 rad。分析表明,本文所设计的 FNTFSMC 方法在收敛精度上显著优于其他两种对比方法,与理论分析是一致的。

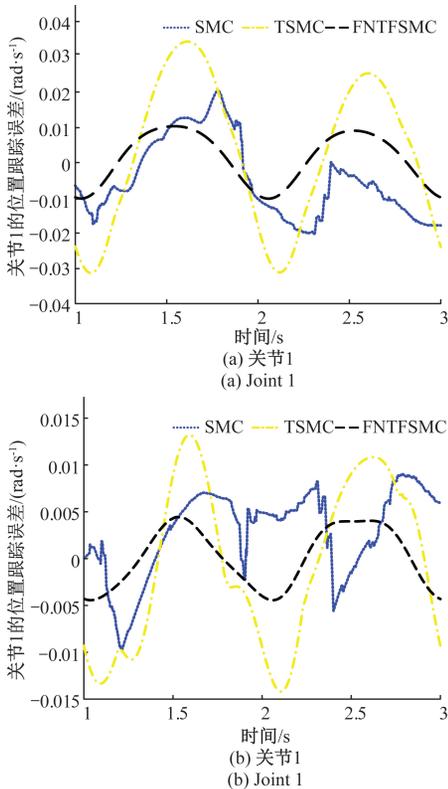


图 4 关节的位置跟踪误差
Fig.4 Joint position tracking error

图 5 所示为 3 种控制方法的控制输入,通过曲线可以看到,由于滑模需要较大的滑模切换项抑制系统的扰动和不确定性,SMC 方法存在明显宽幅的抖振现象。相比之下,TSMC 和 FNTFSMC 的抖振现象得到明显的削弱,同时,FNTFSMC 的曲线更为平滑,削弱抖振的效果好于 TSMC。

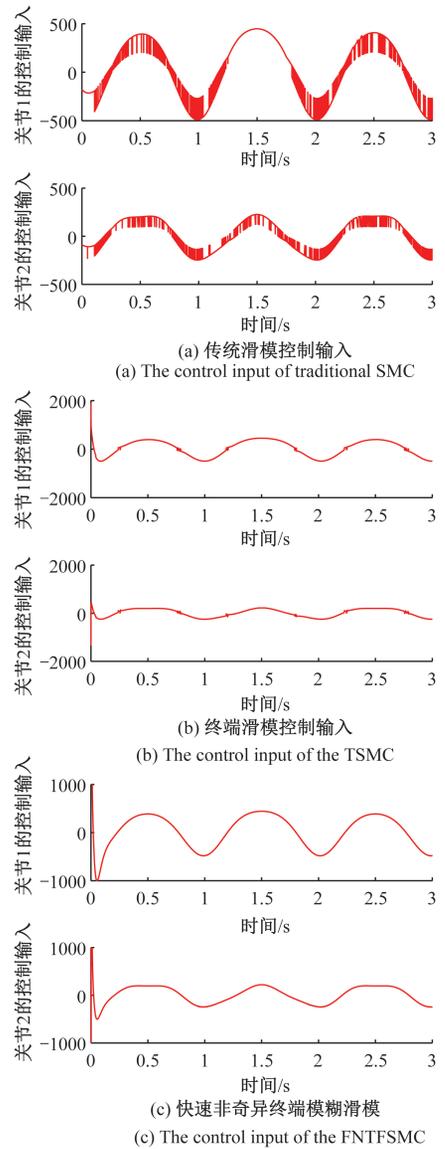


图 5 3 种方法的控制输入

Fig.5 The control inputs of three methods

4 国产腹腔镜手术机器人控制实验验证

国产“妙手”腹腔镜手术机器人系统由天津大学自主研发,主要用于腹腔镜微创手术,达到减少开刀范围,降低患者病痛,加快恢复时间的目的。该手术机器人要求机械臂控制系统能够实时准确跟踪医生手部给出的路径和操作信息,完成各种手术操作。图 6 所示为国产“妙手”腹腔镜手术机器人整体系统示意图。

为了验证机器人执行系统整体性能及检验机器人系统在实际手术中的实用性能,本验证性实验的活体动物对象是猪,重约 26 kg,为了充分验证控制方法的有效性并尽可能减少对猪的影响,选取胆囊进行摘除和缝合手

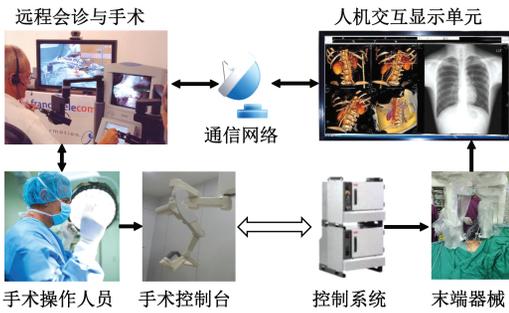
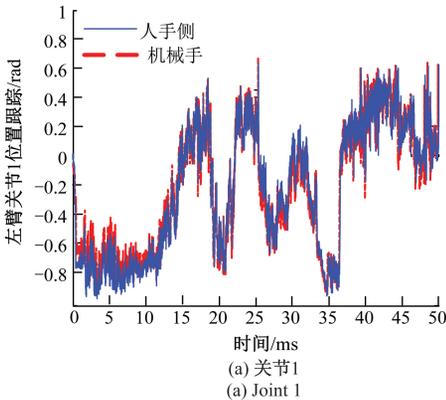


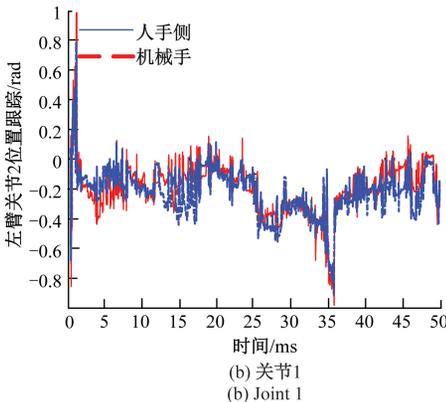
图6 国产“妙手”腹腔镜手术机器人整体系统示意

Fig.6 Schematic diagram of the overall system of the “Smart Hand” domestic portable laparoscopic surgery robot

术,时长 50 min。负责本次动物胆囊摘除实验的主要由 4 名成员组成,其中一名负责操作医生控制台的主操作手进行具体手术操作,另外一名负责手术现场的指导及辅助工作,手术过程中还有部分机器人系统设计的技术人员参与,负责机械臂的术中摆位及器械的术中更换工作。实验过程中左臂和右臂的轨迹跟踪情况如图 7~10 所示。



(a) 关节1
(a) Joint 1

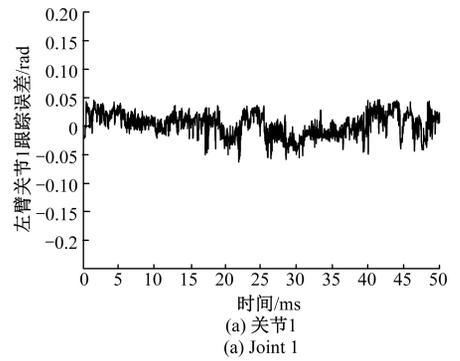


(b) 关节1
(b) Joint 1

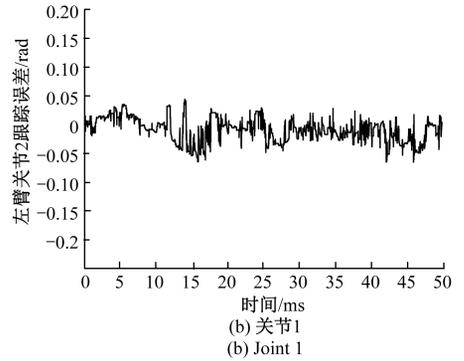
图7 左臂关节的位置跟踪

Fig.7 Position tracking of left arm joint

验证性实验过程进展顺利,各子部分工作正常,实现了设定的手术目标。实验数据展示的是在手术过程中的



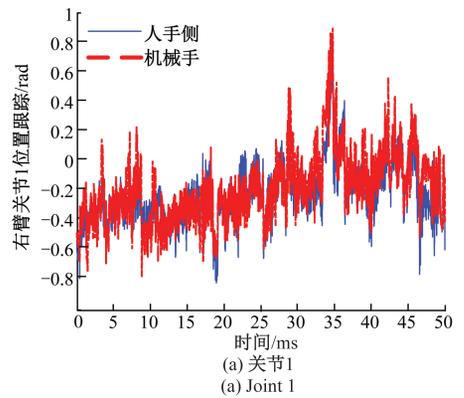
(a) 关节1
(a) Joint 1



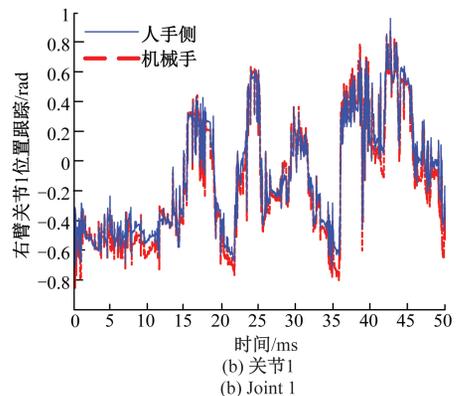
(b) 关节1
(b) Joint 1

图8 左臂关节的跟踪误差

Fig.8 Tracking error of left arm joint



(a) 关节1
(a) Joint 1



(b) 关节1
(b) Joint 1

图9 右臂关节的位置跟踪

Fig.9 Position tracking of right arm joint

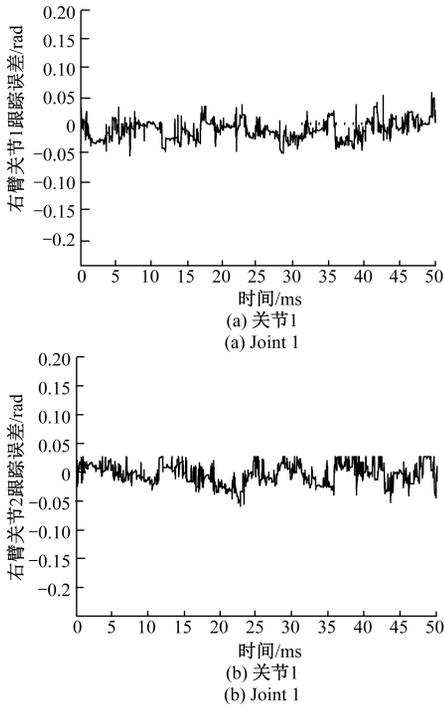


图 10 右臂关节的跟踪误差

Fig.10 Tracking error of right arm joint

一段操作,由图 7 和 9 可知,利用本文所设计的控制方法,机械手臂能够实现对医生手部运动信息的准确跟踪,为手术的顺利实施提供了保障。图 8 和 10 为放大后的关节跟踪误差,由图 7~10 可以看出,所设计的方法存在能够收敛于稳定状态,存在一定程度的稳态误差。

5 结 论

随着机器人技术和医疗技术的快速发展,腹腔镜手术机器人得到越来越深入的研究和广泛的应用,精准稳定的轨迹跟踪性能是腹腔镜手术机器人的关键和核心指标。针对这一问题,本文设计了基于快速非奇异终端模糊滑模的腹腔镜手术机器人的轨迹跟踪控制系统。相比于其他控制方法,滑模控制具有优良的鲁棒性能,可以从算法角度提高系统的抗干扰能力。相比于传统的滑模控制方法和终端滑模控制方法,本文的方法能够将位置的收敛时间从 0.6~0.9 s 减小到 0.1 s,稳态误差峰值由 0.035 rad 减小到 0.01 rad,加快了系统的收敛速度和精度,并且显著削弱了滑模控制的抖振现象,减小了力矩输出的波动。

同时利用模糊逻辑动态适应跟踪误差的大小,可以大大减小滑模鲁棒项的增益,从根本上削弱抖振现象。仿真结果显示,本文采用的方法进一步提高了手术机器人系统的跟踪精度,减小稳态误差。基于活体动物组织

的验证性实验结果显示,能够实现末端器械对医生操作信息的快速准确跟踪,确保了实验的顺利进行。

参考文献

- [1] 倪得晶,宋爱国,李会军.基于虚拟现实的机器人遥操作关键技术研究[J].仪器仪表学报,2017,38(10):2351-2363.
NI D J, SONG A I G, LI H J. Connectivity-preserving approach for distributed adaptive synchronized tracking of networked uncertain nonholonomic mobile robots [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(10): 2351-2363.
- [2] 徐国政,宋爱国,高翔,等.基于焦虑情绪与混杂控制的机器人辅助临床康复实验[J].仪器仪表学报,2017,38(10):2364-2372.
XU G Z H, SONG A I G, GAO X, et al. Robot-assisted clinical rehabilitation experiment based on anxiety emotion and hybrid control [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(10): 2364-2372.
- [3] 倪自强,王田苗,刘达.医疗机器人技术发展综述[J].机械工程学报,2015,51(13):45-52.
NI Z Q, WANG T M, LIU D. Survey on medical robotics[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(13): 45-52.
- [4] 王伟,王伟东,闫志远,等.腹腔镜外科手术机器人发展概况综述[J].中国医疗设备,2014,29(8):5-10,35.
WANG W, WANG Y D, YAN ZH Y, et al. Development review of laparoscopic surgical robotic[J]. China Medical Devices, 2014, 29(8): 5-10, 35.
- [5] 赵燕江,黄磊,杜海艳,等.基于改进 RRT 算法的套管柔性针运动规划[J].仪器仪表学报,2017,38(3):620-628.
ZHAO Y J, HUANG L, DU H Y, et al. Motion planning of the cannula flexible needle based on the improved RRT algorithm [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(3): 620-628.
- [6] 黄祖良.手术机械臂系统优化与轨迹跟踪控制研究[D].上海:上海工程技术大学,2016.
HUANG Z L. Research on optimization and trajectory tracking control of manipulator system [D]. Shanghai: Shanghai University of Engineering Science, 2016.
- [7] 牛瑞燕,许午啸,刘金琨.欠驱动机械臂滑模控制与实验研究[J].仪器仪表学报,2016,37(2):348-355.
NIU R Y, XU W X, LIU J K. Sliding mode control and experiment study for underactuated manipulator [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(2): 348-355.
- [8] 刘金琨.滑模变结构控制 MATLAB 仿真(第三版)基本理论与设计方法[M].北京:清华大学出版社,2015.
LIU J K. Sliding Mode Control Design and MATLAB Simulation The Basic Theory and Design Method [M]. 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2015.

- [9] ZAK M. Terminal attractors for addressable memory in neural networks [J]. Physics Letters, 1988, 33 (12) : 18-22.
- [10] LOCHAN K, ROY B K, SUBUDHI B. Robust tip trajectory synchronisation between assumed modes modelled two-link flexible manipulators using second-order PID terminal SMC [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2017(97) : 108-124.
- [11] VIJAY M, JENA D. Backstepping terminal sliding mode control of robot manipulator using radial basis functional neural networks [J]. Computers & Electrical Engineering, 2018(67) : 690-707.
- [12] TRAN M D, KANG H J. Adaptive terminal sliding mode control of uncertain robotic manipulators based on local approximation of a dynamic system [J]. Neurocomputing, 2017(228) : 231-240.
- [13] BOUKATTAYA M, MEZGHANI N, DAMAK T. Adaptive nonsingular fast terminal sliding-mode control for the tracking problem of uncertain dynamical systems [J]. ISA Transactions, 2018(77) : 1-19.
- [14] CHEN G, JIN B, CHEN Y. Nonsingular fast terminal sliding mode posture control for six-legged walking robots with redundant actuation [J]. Mechatronics, 2018(50) : 1-15.
- [15] 姜明明. 微创血管介入手术机器人系统远端主从控制研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2014.
JIANG M M. Study of master slave robot catheter system for minimally invasive surgery [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2014.
- [16] 杨铨浩. 微创手术机器人震颤机理及其抑制方法研究 [D]. 天津: 天津工业大学, 2017.
YANG CH H. Research on the mechanism and suppression method of tremor of minimally invasive surgical robot [D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2017.
- [17] 郑鹏. 核磁兼容气动针刺手术机器人控制系统设计 [D]. 天津: 天津大学, 2011.
ZHENG P. Control system design of a MRI-compatible pneumatic needle insertion robot [D]. Tianjin: Tianjin University, 2011.
- [18] 娄金龙. 核磁图像导向的乳腺穿刺手术机器人建模与控制研究 [D]. 天津: 天津大学, 2016.
LOU J L. Study on the modeling and control system of magnetic resonance imaging guided needle insertion robot for breast surgery [D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.
- [19] LEE J, CHANG P H, JIN M. Adaptive integral sliding mode control with time-delay estimation for robot manipulators [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(8) : 6796-6804.
- [20] CHIN C S, LIN W P. Robust genetic algorithm and fuzzy inference mechanism embedded in a sliding-mode controller for an uncertain underwater robot [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2018, 23 (2) : 655-666.
- [21] WANG H. Adaptive control of robot manipulators with uncertain kinematics and dynamics [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2017, 62 (2) : 948-954.
- [22] CUI R, CHEN L, YANG C, et al. Extended state observer-based integral sliding mode control for an underwater robot with unknown disturbances and uncertain nonlinearities [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(8) : 6785-6795.
- [23] 胡盛斌. 非线性多关节机器人系统滑模控制 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.
HU SH B. Sliding Mode Control for Nonlinear Multi Joint Robot System [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015.
- [24] TAYEBIHAGHIGHI S, PILTAN F, KIM J M. Control of an uncertain robot manipulator using an observation-based modified fuzzy sliding mode controller [J]. International Journal of Intelligent Systems and Applications, 2018, 10(3) : 41-49.

作者简介



凌颢, 2011 年于湖南大学获得学士学位, 2014 年于英国兰卡斯特获得硕士学位, 同年于中南大学开始博士研究, 现就职于中南大学湘雅三医院, 主要研究方向为微创手术机器人界面及其相关设备研究。
E-mail: jolene_ling@163.com

Ling Hao received her B. Sc. degree in 2011 from Hunan University. She received her M. Sc. degree in 2014 from Lancaster University, UK and began her doctoral study in Central South University at the same year. Now, she works in the Third Xiangya Hospital of Central South University. Her main research interest includes minimally invasive surgery robot and related equipment.



朱晒红 (通信作者), 1986 年于中南大学湘雅医学院 (原湖南医科大学) 获得学士学位, 2000 年于中南大学湘雅医学院 (原湖南医科大学) 获得硕士学位、博士学位, 2005 年于中南大学博士后出站, 现为中南大学湘雅三医院教授, 主要研究方向为医用材料与器械、代谢外科。

E-mail: shzhu@mail.csu.edu.cn

Zhu Shaihong (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 1986 from Xiangya School of Medicine, CSU (former Hunan Medical University). He received his M. Sc. and Ph. D. degrees in 2000 from Xiangya School of Medicine, CSU (former Hunan Medical University) and finished his post-doctor research in 2005 from Central South University. Now, he is a professor in the Third Xiangya Hospital of Central South University. His main research interest includes medical materials and equipment, and metabolic surgery.