

基于模糊变导纳的颅颌面手术机器人接触力控制

王泽华, 胡陟, 陆玮铭, 倪双涛

上海工程技术大学电子电气工程学院, 上海 201620

【摘要】针对机器人辅助颅颌面外科手术过程中环境参数不固定带来的力控效果差问题,在导纳控制的基础上,提出一种基于模糊变导纳的机器人力控制方法。通过在UR5机器人末端安装力传感器实现接触力的检测并设定合适的期望力,然后根据环境参数变化自动地调整导纳控制模型并跟踪期望力,最后对提出的控制方法进行接触力跟踪以及位置误差仿真分析,并对机器人辅助拉开仿真颌面部组织这一手术过程进行力控制实验验证该控制方法的有效性。结果表明,在动态时变的外科手术环境中,模糊变导纳控制方法可以达到理想的力控制效果,接触力峰值降低10.77%,系统震荡次数减少50%,稳定调节时间缩短18.75%,一定程度上可以避免由于接触力过大对人造成的伤害,满足手术的安全性要求。

【关键词】手术机器人;导纳控制;模糊控制;接触力控制

【中图分类号】R318;TP242

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2022)12-1544-06

Controlling contact force in robot-assisted cranio-maxillofacial surgery using fuzzy variable admittance

WANG Zehua, HU Zhi, LU Weiming, NI Shuangtao

School of Electronic and Electrical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China

Abstract: A robot force control method based on fuzzy variable admittance is proposed for solving the problem of poor force control caused by unstable environmental parameters during robot-assisted cranio-maxillofacial surgery. The detection of the contact force is realized by a force sensor installed at the end of UR5 robot, and the appropriate expected force is set. According to the changes in environmental parameters, the admittance control model is automatically adjusted and the expected force is tracked. Finally, contact force tracking and position error simulation analysis are carried out, and force control experiments is conducted to verify the effectiveness of the control method during the operation process of robot-assisted pulling apart the simulated maxillofacial tissues. The results show that in a dynamic time-varying surgical environment, the fuzzy variable admittance control method can achieve the ideal force control, reducing peak contact force by 10.77%, reducing the number of system oscillations by 50%, and shortening the stable adjustment time by 18.75%. To some extent, the proposed method can avoid the injury caused by excessive contact force and meet the safety requirements of surgery.

Keywords: surgical robot; admittance control; fuzzy control; contact force control

前言

颅颌面在维护人体面部功能方面起到巨大的作用,如说话、咀嚼、吞咽等,这方面的疾病会给病人的日常生活带来巨大的障碍。外科手术是治疗颅颌面疾病的重要手段,由于颅颌面剖面结构复杂,操作视

野狭小,传统手术很难满足其手术精度要求;另外,医生的生理颤抖和长时间手术操作的疲劳等因素,均可能对颅颌面部重要神经和组织造成不可逆的损伤^[1-2]。利用机器人辅助医生进行颅颌面外科手术,不仅可以消除人手颤抖带来的不良影响,还能够提供医生力反馈,增强力感知能力,提高手术的安全性^[3-4]。

应用机器人辅助进行颅颌面外科手术时,为了避免机器人末端产生过大的接触力损伤患者的颅颌面部组织,还需要对机器人与颌面部组织间的接触力进行控制。在实际工作中,通常使用阻抗或导纳

【收稿日期】2022-05-10

【基金项目】国家重点研发计划(2019YFC0119303)

【作者简介】王泽华,硕士,研究方向:机器人技术,E-mail: wang791648-024@126.com

控制实现对机器人的力控。阻抗和导纳控制模型是对机器人与环境接触这一动态过程的动力学特性的一种简化建模,最终目标是建立输入力与输出位置或速度之间的对应关系^[5]。近年来,阻抗和导纳控制作为一种可行的机器人力控制方法,激起了广大学者的研究兴趣。Pires等^[6]采用了位置内环PI控制,外环基于导纳控制的方法,实现了对机器人位置的精确控制,缺点是被控机器人与环境的接触力振幅较大。Ott等^[7]设计了一种阻抗导纳混合的控制器,将阻抗和导纳控制作为同一控制器的两种极端,并使用KUKA轻量级机器人进行实验评估,但是他们的分析集中在单一自由度的案例研究上,并没有拓展到非线性多自由度的实际操作情况上来。徐国政等^[8]提出一种基于模糊逻辑的机器人力控制方法,实时调整阻力保证康复病人的肌力训练,但是根据患者的康复程度调整作用力用的是离散的模型参数,在时间上不连续。

以上提及的阻抗/导纳控制方法都是使用固定的模型参数或者用离散的模型参数调整接触力,没有考虑到连续的模型参数变化的情况。本研究针对颅颌面外科手术这一时变的动态过程(手术同时涉及到颌面部软组织和病人颅骨,环境参数通常不是默认固定值)中的机器人力控制,提出一种基于模糊变导纳的机器人力控方法。在传统导纳控制的基础上,以机器人末端与环境接触力的误差及其变化率作为控制器输入,通过设置相应的模糊规则,实时修正目标模型的导纳参数,将机器人末端与环境的接触力限制在合理范围内,达到理想的控制效果。

1 导纳控制原理

导纳控制将机器人与外界环境接触过程等效为一个弹性模型进行处理,不同于阻抗控制,它不需要对机器人的动力学方程进行建模,而是通过建立机器人位置与末端接触力的关系,然后通过调节导纳参数来实现机器人与环境接触力的控制^[9-10]。

机器人与外界环境接触的交互过程可以等效为一个“质量-弹簧-阻尼”模型,如图1所示。其中, K_e 为环境刚度, F 为机器人与环境接触力, X_e 为环境参考位置, X 为机器人末端实际位置。将环境看成弹性体,则:

$$F = -K_e(X_e - X) \quad (1)$$

考虑如下的环境目标导纳控制模型:

$$M_d(\ddot{X} - \ddot{X}_d) + B_d(\dot{X} - \dot{X}_d) + K_d(X - X_d) = F_d - F \quad (2)$$

式中, M_d 为机器人的期望惯量, B_d 为期望阻尼, K_d 为期望刚度,通常都是 $n \times n$ (n 为机器人的自由度)的正定对角矩阵。 \ddot{X} 、 \dot{X} 、 X 分别为机器人末端的实际加速

度、速度、位置向量, \ddot{X}_d 、 \dot{X}_d 、 X_d 分别为机器人末端的期望加速度、速度、位置向量, F 为实际机器人末端与环境接触力, F_d 为期望机器人末端与环境接触力。由于手术的操作方向只涉及到机器人Z轴,故用小写符号表示一维导纳控制模型:

$$m_d(\ddot{x} - \ddot{x}_d) + b_d(\dot{x} - \dot{x}_d) + k_d(x - x_d) = f_d - f \quad (3)$$

对式(3)进行拉氏变换,得到导纳控制的控制律:

$$x = x_d + \frac{f_d - f}{m_d s^2 + b_d s + k_d} \quad (4)$$

其中, f 与 f_d 之间的差值为力误差 Δf :

$$\Delta f = f_d - f \quad (5)$$

位置误差 Δx 为:

$$\Delta x = \frac{f_d - f}{m_d s^2 + b_d s + k_d} \quad (6)$$

整个导纳控制流程首先通过安装在机器人末端的力传感器检测机器人与环境的实际接触力 f ,并根据力误差 Δf 计算位置偏差 Δx ,然后再根据位置偏差实时修正期望位置 x_d ,最后通过内环位置PD控制器驱动机器人到达指定目标病灶点。

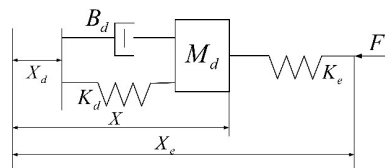


图1 机器人与环境接触交互过程等效模型示意图

Figure 1 Schematic diagram of the equivalent model of the interaction process between the robot and the environment

2 模糊变导纳控制器设计

在颅颌面外科手术过程中,用力传感器测量机器人末端拉钩与病人颅颌面组织的接触力时,发现手术过程存在下述问题。在驱动机器人进行拉开病人颌面部组织操作过程中,由于人体颅颌面结构复杂,手术拉钩极易碰到病人颅骨等刚度很大的器官,造成交互模型参数时变,引起接触力的不稳定。

针对环境参数的动态时变,本研究提出一种结合模糊控制的变导纳控制方法,以机器人与环境的实际接触力和期望接触力的误差 Δf 及其变化率 $\Delta \dot{f}$ 作为模糊控制器的输入,以目标导纳模型的期望阻尼 b_d 、期望刚度 k_d 作为模糊控制器的输出,使控制器可以随着接触环境的变化实时调整导纳参数。整个模糊变导纳控制系统由位置控制内环、导纳控制外环和模糊控制环组成,如图2所示。

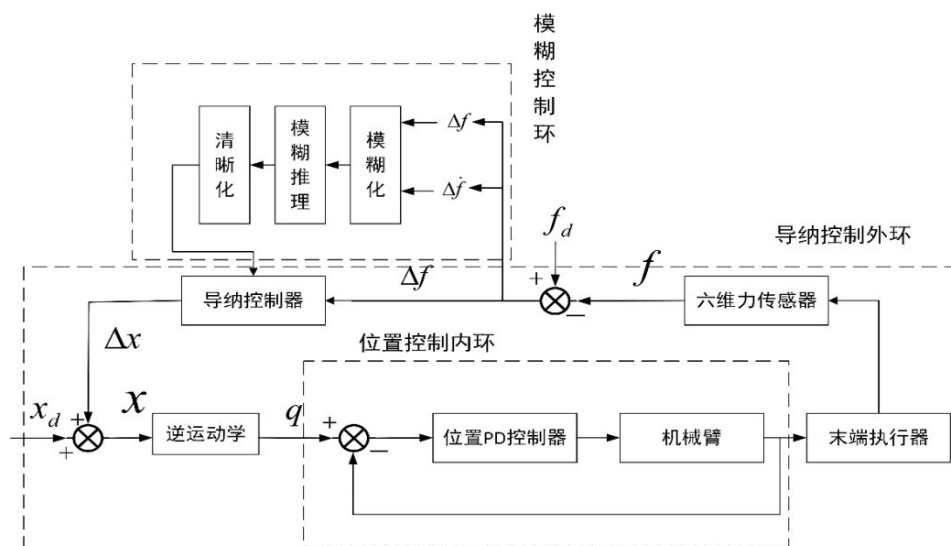


图2 模糊变导纳控制原理示意图

Figure 2 Schematic diagram of fuzzy variable admittance control principle

假设模糊控制的输入变量为 $\bar{\lambda}$,其基本论域为 $[a, b]$,将其转化为论域区间 $[-n, n]$ 内的值 λ 为:

$$\lambda = k_i \left[\bar{\lambda} - \frac{a+b}{2} \right] \quad (7)$$

$$k_i = \frac{2n}{b-a} \quad (8)$$

模糊控制环的输入量隶属度函数分布如图3所示,

Δf 对应 F_error ,论域区间为 $[-3, 3]$ 、 $\Delta \dot{f}$ 对应 F_error_dt ,论域区间为 $[-6, 6]$ 。采用七级模糊语言把输入量进行模糊化,按照习惯分别为负大(NB)、负中(NM)、负小(NS)、零(Z)、正小(PS)、正中(PM)、正大(PB)7种状态表述。模糊控制的输出量隶属度函数分布如图4所示,采用相同的模糊语言状态表述。

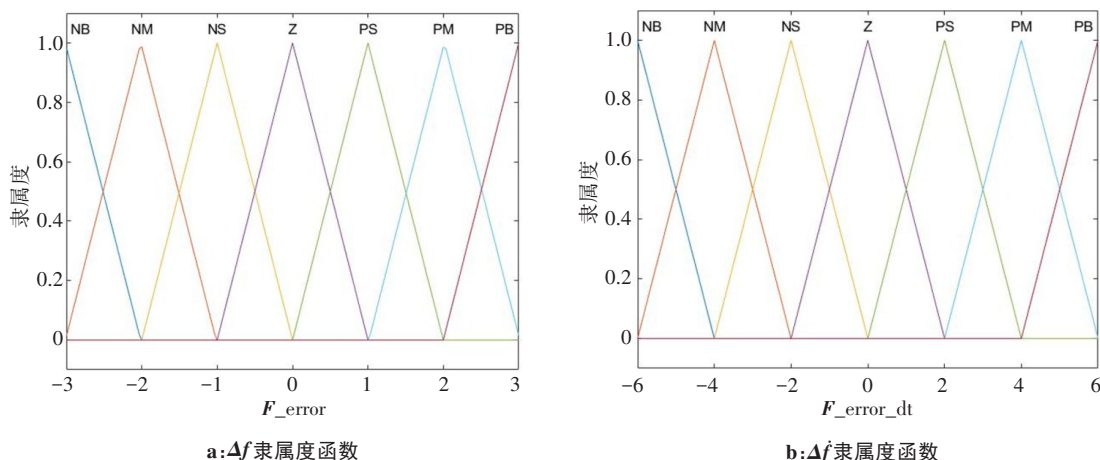


图3 输入量隶属度函数分布

Figure 3 Distribution of input membership function

定义模糊控制输入量与输出量的原则:当输入量偏大时,降低系统超调量和震荡,以便系统快速接近期望力;当输入量偏小时,消除微小干扰,以便系统迅速维持稳定。最后,使用“面积重心法”对输出进行清晰化,得到结果 μ ,其论域区间为 $[\mu_{min}, \mu_{max}]$ (设定输出 b_d, k_d 的论域区间分别为 $[-50, 50]$ 和 $[-10, 10]$),再将其进行论域反变化,得到实际控制量 $\bar{\mu}$,其范围

为 $[\bar{\mu}_{min}, \bar{\mu}_{max}]$ 。

$$\bar{\mu} = \frac{\mu_{max} + \mu_{min}}{2} + \bar{k} \left(\mu - \frac{\mu_{min} + \mu_{max}}{2} \right) \quad (9)$$

$$\bar{k} = \frac{\mu_{max} - \mu_{min}}{\mu_{max} - \mu_{min}} \quad (10)$$

根据输入输出原则制定的模糊控制规则表如表1所示。

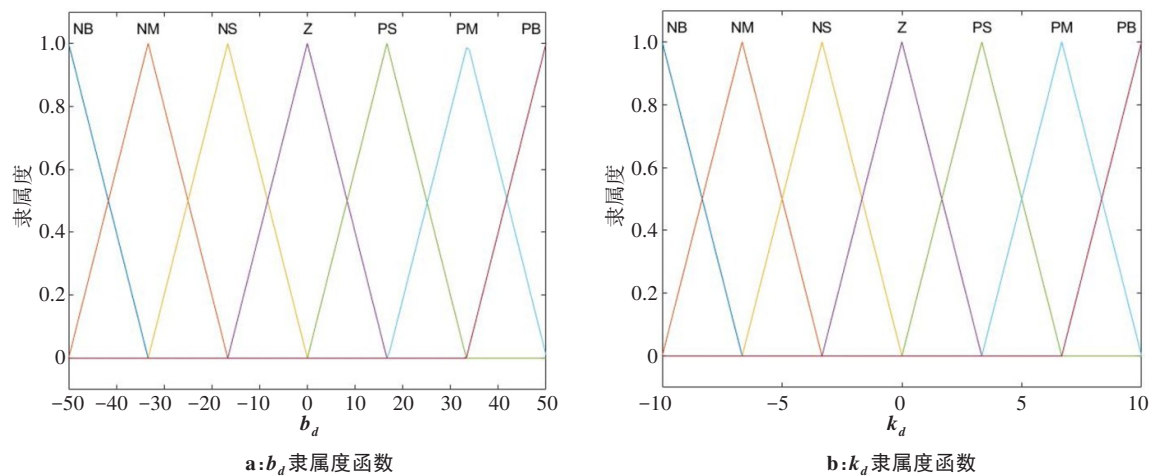


图4 输出量隶属度函数分布

Figure 4 Distribution of output membership function

表1 输出 b_d 、 k_d 的模糊控制规则表

Table 1 Fuzzy control rule table for outputs b_d and k_d

$\Delta f/\Delta \dot{f}$	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PB	PM	PS	PS	PS	NM	NS
NM	PB	PM	PS	PS	PS	NM	NS
NS	PM	PS	Z	PS	Z	NS	NM
Z	PM	PS	Z	Z	Z	NS	NM
PS	PM	PS	Z	NS	Z	NS	NM
PM	PS	Z	NS	NS	NS	Z	NB
PB	PS	Z	NS	NS	NS	Z	NB

3 仿真与实验验证

颅颌面外科手术实验平台如图5所示,手术机器人采用丹麦 UR5 机器人,六维力传感器为 Robotiq-FT300,机器人控制基于 ROS 系统,机器人辅助环节为拉开患者颅颌面组织的操作,拉开方向为图中的运动方向。

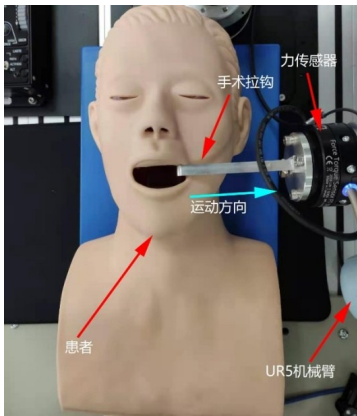


图5 颅颌面手术机器人实验平台

Figure 5 Experimental platform for robot-assisted cranio-maxillofacial surgery

为了避免接触力过大损伤患者的颅颌面部组织,首先需要进行颅颌面组织的最大承受力阈值实验。由于手术的操作方向只涉及到机器人Z轴,所以只需要测量Z轴方向上的期望力。通过实验测得的仿真人体颅颌面部组织的受力过程如图6所示,在1.8 s时刻,组织受力到达顶峰11.8 N,1.85 s之后,组织由于形变过度已经破裂,应力骤减。整个手术拉开过程中,颌面部组织受力阈值为11.8 N,因此,设定控制系统的期望接触力 $f_d = 10$ N。

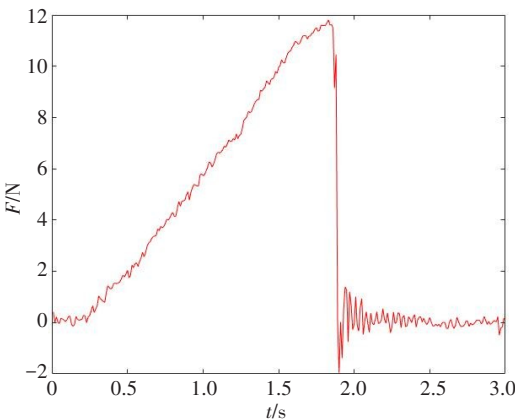


图6 颅颌面受力阈值测量结果图

Figure 6 Results of cranio-maxillofacial force threshold measurement

在使用机器人辅助进行颅颌面组织拉开操作时,如果不加入力控环节,得到的机器人末端拉钩与颌面部组织的接触力如图7所示。可以看到,在时间1~5 s区间内,Z轴接触力由于环境参数的动态时变经历了两次较大的波动。接触力大幅度波动对于整个力控系统的稳定性,是一个相当大的挑战。

相较于传统的导纳控制,为了使机器人能在动态时变的手术环境中保持更加稳定的力控效果,根

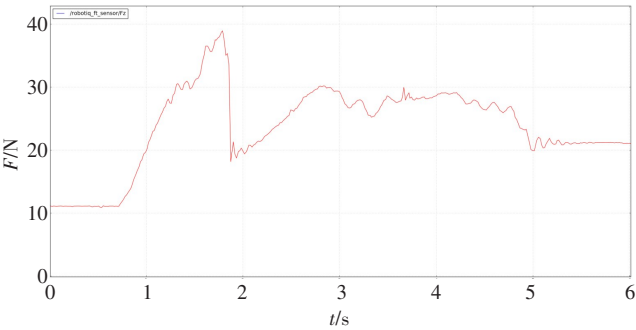
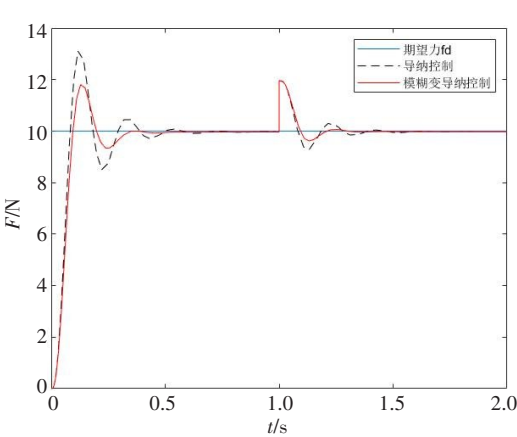


图 7 末端拉钩与环境 Z 轴实际接触力

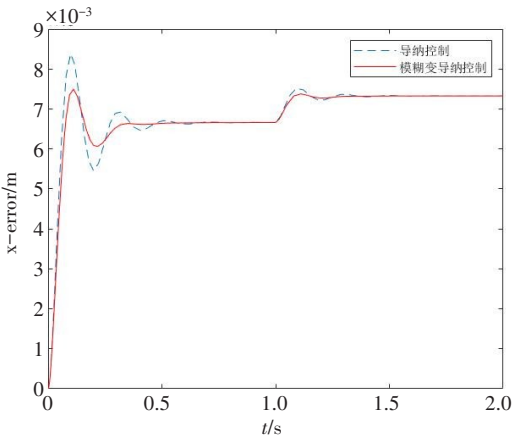
Figure 7 Actual Z axial contact force between the end hook and the environment

据第 2 节设计的模糊变导纳控制器,在 Matlab 中进行仿真验证方法的有效性。设置输入为阶跃信号

的期望位移,并在 1 s 时刻给系统一个 Z 轴方向上的 2 N 力冲击,得到 Z 轴接触力跟踪和位置误差的结果如图 8 所示。由仿真结果可知,本研究提出的模糊变导纳力控制方法,可以大幅度提升整个系统的动态特性。接触力峰值降低 10.77%,系统震荡次数减少 50%,稳定调节时间缩短 18.75%,并且在应对环境参数动态变化的情况时,新的控制系统可以更快调节系统并使之平稳。但是,在系统受到力冲击之后,机器人位置误差将会增大,力冲击会给系统的位置控制内环带来影响。最后,将提出的模糊变导纳力控制方法运用到搭建的手术实验场景中,得到机器人与颅颌面组织的接触力跟踪结果如图 9 所示。



a: 两种不同方法力跟踪仿真结果示意图



b: 两种不同方法位置误差仿真结果示意图

图 8 两种不同方法控制效果对比

Figure 8 Comparison of control effects between two different methods

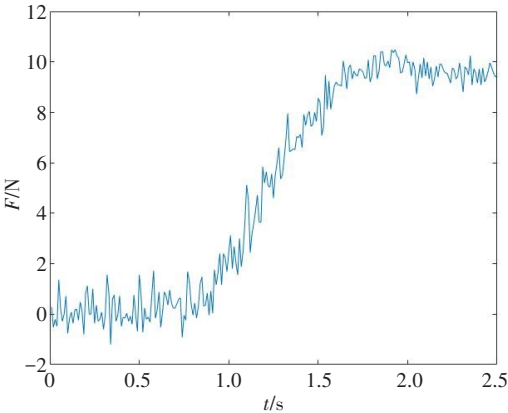


图 9 模糊变导纳控制接触力跟踪结果图

Figure 9 Results of fuzzy variable admittance controlled contact force tracking

1.0 s 时刻手术拉钩接触到颅颌面组织,应力逐渐上升,1.6 s 时刻开始由于有模糊变导纳力控制方

法的限制,接触力保持约为 10 N,始终小于颌面部组织受力阈值 11.8 N。实验表明,模糊变导纳控制方法在机器人辅助颅颌面手术中有良好的接触力控制效果,可以满足手术的安全性需求。

4 结 论

本文针对机器人辅助颅颌面外科手术过程中环境参数不固定带来的力控效果差问题,提出一种模糊变导纳控制方法。该方法在导纳控制的基础上,加入模糊控制器,通过实验测量并选定合适期望力以及实验验证,得出如下结论:(1)运用模糊控制器对环境导纳参数进行实时调整,可以有效应对环境参数的动态时变给系统带来的影响,系统的超调量和振荡次数以及位置误差也有所减小,一定程度上提高了整个系统的控制效果;(2)本研究提出的基于模糊变导纳的机器人力控制方法是在机器人与环境

接触的一个方向建立的,没有考虑到实际颅颌面外科手术中的目标点多方向受力情况。针对机器人辅助颅颌面外科手术多点受力等情况要如何进行力控制还需要进一步的研究。

【参考文献】

- [1] 周朝政. 颅颌面整形外科手术机器人关键技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
Zhou CZ. Research on the key technology of cranio-maxillofacial plastic surgery robot[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2017.
- [2] 孔祥战. 颅颌面穿刺诊疗手术机器人关键技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
Kong XZ. Research on the key technology of cranio-maxillofacial puncture diagnosis and treatment robot[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
- [3] 刘航航, 罗恩. 手术机器人在颅颌面非肿瘤性疾病治疗中的应用[J]. 国际口腔医学杂志, 2018, 45(1): 85-90.
Liu HH, Luo E. Application of surgical robots in the treatment of cranio-maxillofacial non-neoplastic diseases[J]. International Journal of Stomatology, 2018, 45(1): 85-90.
- [4] Lathrop RA, Rucker DC, Webster RJ. Guidance of a steerable cannula robot in soft tissue using preoperative imaging and conoscopic surface contour sensing[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2010: 5601-5606.
- [5] 杜志江, 王伟, 闫志远, 等. 基于模糊强化学习的微创外科手术机器人人机交互方法[J]. 机器人, 2017, 39(3): 363-370.
Du ZJ, Wang W, Yan ZY, et al. Human-computer interaction method of minimally invasive surgical robot based on fuzzy reinforcement learning[J]. Robot, 2017, 39(3): 363-370.
- [6] Pires JN, Godinho T, Araújo R. Force control for industrial applications using a fuzzy PI controller[J]. Sens Rev, 2004, 24(1): 60-67.
- [7] Ott C, Mukherjee R, Nakamura Y. Unified impedance and admittance control [C]//IEEE International Conference on Robotics & Automation. IEEE, 2010: 554-561.
- [8] 徐国政, 宋爱国, 李会军. 基于模糊逻辑的上肢康复机器人阻抗控制实验研究[J]. 机器人, 2010, 32(6): 792-798.
Xu GZ, Song AG, Li HJ. Experimental research on impedance control of upper limb rehabilitation robot based on fuzzy logic[J]. Robot, 2010, 32(6): 792-798.
- [9] Hogan N, Buerger S. Impedance and interaction control, robotics and automation handbook[M]. Pub Location: Boca Raton, 2005: 1-608.
- [10] Al-Shuka HF, Leonhardt S, Zhu WH, et al. Active impedance control of bioinspired motion robotic manipulators: an overview[J]. Appl Bionics Biomech, 2018, 2018: 8203054.

(编辑:陈丽霞)