

## 微创血管介入手术导管辅助机器人自整定模糊 PID 控制

赵希梅<sup>1 2\*</sup> 游健康<sup>1</sup> 刘浩<sup>2</sup> 李洪谊<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(沈阳工业大学电气工程学院 沈阳 110870)

<sup>2</sup>(中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室 沈阳 110016)

**摘要:** 传统的微创血管介入手术,医生长时间遭受大量射线的辐射,会对医生造成一定的损伤。而用手术机器人代替医生操作导管能够克服上述缺点。为此,针对微创血管介入手术导管辅助机器人系统,首先运用 D-H 法建立了导管运动学模型,以便获得导管近端到导管末端的运动传递关系,接着选择无刷直流电机作为机器人关节执行器,采用自整定模糊 PID 控制方法来适应血管介入手术过程中系统参数变化及不确定性因素的影响,实现从端辅助机器人精确快速地跟踪主手的控制指令,进而提高系统的控制精度。仿真结果表明,与传统 PID 控制相比,自整定模糊 PID 控制方法能够快速跟踪系统的指令,使系统的跟踪误差减小到 0.3mm 以下。

**关键词:** 微创血管介入手术; 辅助机器人; 自整定模糊 PID 控制; 无刷直流电机

中图分类号 R318.08 文献标志码 D 文章编号 0258-8021(2014)01-0123-05

## Self-Tuning Fuzzy PID Control of Minimally Invasive Vascular Interventional Surgery Catheter Assisted Robot

ZHAO Xi-Mei<sup>1 2\*</sup> YOU Jian-Kang<sup>1</sup> LIU Hao<sup>2</sup> LI Hong-Yi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

<sup>2</sup>(State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

**Key words:** minimally invasive endovascular surgery; assisted robot; self-tuning fuzzy PID control; brushless DC motor

### 引言

许多心脑血管疾病,如心律失常,是血管介入手术的主要应用领域。在传统的血管介入手术中,医生直接操作导管,在医学影像的辅助下,经血管把导管送到病灶处,进行诊断和治疗<sup>[1]</sup>。与传统的开刀手术相比,它具有伤口小、出血少、术后恢复快且并发症少等优点。但是导管操作需要有经验的医生经过反复尝试才能获得良好的效果,这样医生和病人长时间接触射线,长期工作会对医生造成一定损伤。将机器人技术与血管介入手术有机地结合,则能克服上述缺点,促进血管介入手术的推广。在这一领域,国内外已有相关的研究。

郭等设计一套新的具有力反馈功能的主从机器人导管操作系统,并采用比例-积分-微分(PID)算法控制导管的插入和旋转运动<sup>[2-4]</sup>。Ganji 等设计了一套导管的导航平台,通过简单的比例(P)控制方法来控制导管的位置<sup>[5]</sup>。Penning 等设计了导管输送机电系统的闭环控制方案,通过积分(I)和前馈结合的方法控制导管位置<sup>[6]</sup>。国内也对相关的技术进行了研究<sup>[1,7-10]</sup>。上述研究主要侧重于导管机器人系统的搭建和相关的关键技术研究,在控制方面,控制方法多数为 PID 算法。然而,可控导管是高度柔性的设备,辅助机器人的运动量并不一定全部由导管近端传递到末端,手术过程中,需要实时调整控制器的控制参数,确保导管输送精确、快速以及手术安全。本研究针对辅

doi: 10.3969/j.issn.0258-8021.2014.01.019

收稿日期: 2013-09-02, 录用日期: 2013-11-22

基金项目: 国家自然科学基金(61105099); 沈阳市科技计划项目(F12-277-A-70)

\* 通信作者。E-mail: 185277847@qq.com

助机器人的控制问题,利用 D-H 法建立导管运动学模型,提出了自整定模糊 PID 控制方法,实时在线调整 PID 控制器的参数,从根本上提高系统的跟踪性能。

## 1 导管介入系统及运动学模型

### 1.1 导管介入系统的组成

为了减少医生接触射线,导管介入系统采用主从控制。主从控制系统由主手、手术控制台、从端控制卡、辅助机器人、导管、位姿传感器及数字减影血管造影(DSA)引导图像这几部分组成。主端由主手和手术控制台组成,其中主手为 Falcon 手柄,它成本低、精度高,其 3 个自由度分别与导管的进退、旋转和弯曲这 3 种运动相对应。从端部分由从端控制卡和辅助机器人组成。辅助机器人完成对导管的进退、旋转和弯曲操作,从而实现导管末端位置的控制。导管介入系统结构如图 1 所示。

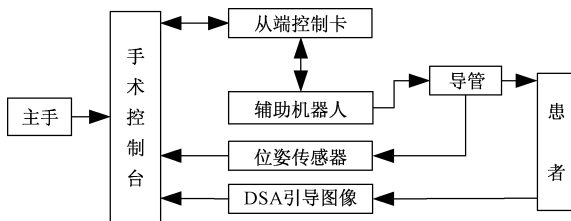


图 1 导管介入手术系统结构

Fig. 1 Structure of catheter interventional surgery system

### 1.2 导管远端运动学模型

导管是血管介入手术的主要设备之一。本研究所使用的导管是通用的钢丝牵引可控导管,由手柄、旋钮、鞘管段和可控弯曲段组成。实现对导管的控制,需要知道导管近端操作与导管末端运动之间的传递关系,即其运动学模型。将导管远端弯曲段用 3 自由度的刚性连杆机构表示,下面将分析导管的远端运动学模型。假设导管弯曲段为圆弧并且在弯曲过程中不产生扭转。在该假设下,导管远端弯曲段在 D-H 坐标系中的运动学模型如图 2 所示。

在图 2 中,  $\{O_0\}$  表示基坐标系,  $\{O_6\}$  表示末端点坐标系。根据 D-H 法则可获得两个坐标系之间的齐次变换矩阵,具体变换过程可表示为  $\{O_0\}$  坐标系沿  $Z_0$  平移  $d_1$ ,绕  $Z_1$  顺时针旋转  $\theta$  角度,绕  $X_2$

顺时针转  $\alpha/2$  角度,沿  $Z_3$  平移  $d_4$ ,绕  $X_4$  顺时针转  $\alpha/2$  角度,沿  $Z_5$  平移  $d_6$ 。这样可通过计算得到齐次变换矩阵和导管末端原点在基坐标系  $\{O_0\}$  中的位置,如式(1)所示。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_6 \sin \theta \sin \alpha + d_4 \sin \theta \sin(\alpha/2) \\ d_6 \cos \theta \cos \alpha + d_4 \cos \theta \cos(\alpha/2) \\ d_1 + d_6 \cos \alpha + d_4 \cos(\alpha/2) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,  $d_6$  是到导管末端刚性部分的长度为常量。

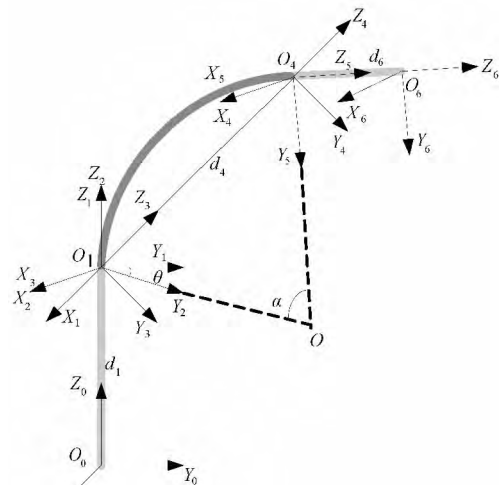


图 2 导管在 D-H 坐标系中的模型

Fig. 2 Catheter model of D-H coordinate

导管可控弯曲段的长度在导管弯曲时是不变的,长为  $L_0$ 。根据弯曲段为圆弧的假设,可以计算出  $d_4$  与  $\alpha$  之间的关系式

$$d_4 = \frac{2L_0 \sin(\alpha/2)}{\alpha} \quad (2)$$

把式(2)代入式(1)中,虚拟关节变量变为 3 个:  $d_1$ 、 $\theta$  和  $\alpha$ ,分别对应导管的“进退”、旋转和弯曲运动。由以上两式,可得到  $3 \times 3$  阶的雅克比矩阵,它表示导管末端位置变化与这 3 个关节变化量之间的关系。

医生的目的是控制导管末端位置,可以通过逆运动学来实现。因此,除在奇异点外,需要对雅克比矩阵求逆,如式(3)所示,其中 s 和 c 分别表示  $\sin$  和  $\cos$ 。通过式(3)把导管末端位置变化转换成导管各关节参数的变化,然后通过导管辅助机器人对这 3 个参数进行控制,在引导图像帮助下,操作导管末端运动到病灶处。

$$J^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{-s\theta\left(-d_6s\alpha + \frac{L_0c\alpha}{\alpha} - \frac{L_0s\alpha}{\alpha}\right)}{d_6c\alpha + \frac{L_0s\alpha}{\alpha} - \frac{L_0(1-c\alpha)}{\alpha^2}} & \frac{-c\theta\left(-d_6s\alpha + \frac{L_0c\alpha}{\alpha} - \frac{L_0s\alpha}{\alpha}\right)}{d_6c\alpha + \frac{L_0s\alpha}{\alpha} - \frac{L_0(1-c\alpha)}{\alpha^2}} \\ \frac{c\theta}{d_6s\alpha + \frac{L_0(1-c\alpha)}{\alpha}} & \frac{-s\theta}{d_6s\alpha + \frac{L_0(1-c\alpha)}{\alpha}} \\ \frac{s\theta}{d_6c\alpha + \frac{L_0s\alpha}{\alpha} - \frac{L_0(1-c\alpha)}{\alpha^2}} & \frac{c\theta}{d_6c\alpha + \frac{L_0s\alpha}{\alpha} - \frac{L_0(1-c\alpha)}{\alpha^2}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

## 2 辅助机器人自整定模糊 PID 控制

### 2.1 辅助机器人的执行器

电机是辅助机器人的执行器,电机的性能直接影响辅助机器人动、静态的控制精度。无刷直流电机由于其高动态响应、高效、寿命长、运行无噪声、便于维护等一系列优点,得到广泛应用。因此,选用无刷直流电机作为辅助机器人的执行驱动器,其简化的模型如图 3 所示。

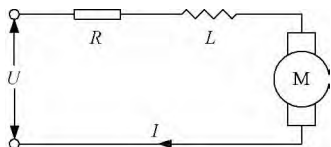


图 3 无刷直流电机模型

Fig. 3 Brushless DC motor model

图 3 中,  $U$  是电枢电压,  $I$  是电枢电流,  $R$  是电枢电阻,  $L$  是电枢电感,  $M$  代表电机。其动态方程可由式(4)描述<sup>[11]</sup>。其中  $K_E$  和  $K_T$  分别是电机的反电势系数和转矩系数;  $T_e(s)$  和  $T_L(s)$  分别是电机的电磁转矩和负载阻转矩;  $GD^2$  是电机转子飞轮力矩 ( $N \cdot m^2$ );  $n(s)$  是电机的转速。根据式(4), 可得出电机的动态结构图, 如图 4 所示。

$$\begin{cases} U(s) = E(s) + (R + Ls)I(s) \\ T_e(s) = K_T I(s) \\ T_e(s) - T_L(s) = \frac{GD^2}{375} sn(s) \\ E(s) = K_E n(s) \end{cases} \quad (4)$$

### 2.2 自整定模糊 PID 控制器设计

由于导管自身的柔性特点,导管近端的输送指令与末端位置没有一一映射的关系,而且导管的运动学模型只是近似的,加之患者心跳、呼吸等因素,必然会影响导管在血管内运动,系统参数会发生变化,模型的精确性会变差,导管运动产生严重的不确定性。因此,在导管输送过程中,需要调整控制

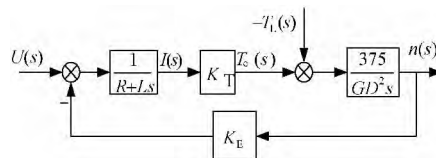


图 4 无刷直流电动机动态结构图

Fig. 4 Dynamic structure diagram of brushless DC motor

参数,来适应导管及其运动环境的不确定性和参数的变化。而模糊控制不依赖被控对象的精确模型,且具有良好的控制性能,正好能适应这种控制的需要。自整定模糊 PID 控制,能够根据偏差和偏差的变化量实时调整 PID 控制器的控制参数,对参数变化具有适应性,能够提高 PID 控制器的性能。

所选用二维模糊控制器,它以关节误差  $e$  和误差的变化率  $ec$  作为模糊控制器的输入,模糊化后变为  $E$  和  $EC$ , 然后经过模糊控制器的推理,得到 PID 控制器参数的调整值  $\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$ , 实现 PID 控制器参数的实时自调整。输入变量  $E, EC$  和输出变量  $\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$  的模糊子集均取为 {NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB}, 子集中的元素分别代表负大、负中、负小、零、正小、正中、正大。各变量的论域均设定为  $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$ , 输入变量和输出变量的隶属函数均为三角形函数, 如图 5 所示。

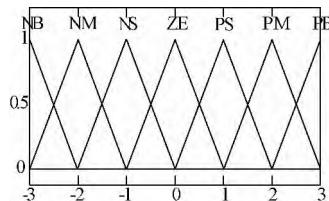


图 5 输入输出变量的隶属度函数

Fig. 5 The membership function of input variables and output variables

模糊控制器的核心和难点是确定输出变量和

输入变量之间的模糊关系,即模糊规则,通过实时调整控制参数来达到最佳的控制效果。模糊控制器的参数调整原则如下<sup>[12]</sup>:

(1) 当  $|E|$  较大时,应取较大的  $\Delta k_p$  (使系统加快响应) 和较小的  $\Delta k_d$  (防止  $|EC|$  瞬时值过大),且使  $\Delta k_i$  为 0 (避免过大的超调)。

(2) 当  $|E|$  中等大小时,应取较小的  $\Delta k_p$  (使系统响应具有较小的超调),  $\Delta k_i$  和  $\Delta k_d$  的取值适当;

(3) 当  $|E|$  较小时,应取较大的  $\Delta k_p$  和  $\Delta k_i$  (使系统响应具有良好的稳态性能),  $\Delta k_d$  取值适当,避免在平衡点附近振荡。

根据以上原则可以建立  $\Delta k_p$ 、 $\Delta k_i$ 、 $\Delta k_d$  的模糊控制规则,如表 1 至 3 所示。

表 1  $\Delta k_p$  的模糊控制规则

Tab. 1 Fuzzy control rules of  $\Delta k_p$

EC	E						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	PS	ZE
NM	PB	PB	PM	PM	PS	ZE	ZE
NS	PM	PM	PM	PS	ZE	NS	NM
ZE	PM	PS	PS	ZE	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZE	NS	NS	NM	NM
PM	ZE	ZE	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZE	NS	NS	NM	NM	NB	NB

### 2.3 基于自整定模糊 PID 控制的主从介入系统

在血管介入手术中,医生通过主手给出期望的目标位置,并发送到手术台中,在控制台将该期望目标位置变换为导管末端的目标位置。同时,控

表 2  $\Delta k_i$  的模糊控制规则

Tab. 2 Fuzzy control rules of  $\Delta k_i$

EC	E						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NM	NM	ZE	ZE
NM	NB	NB	NM	NM	NS	ZE	ZE
NS	NM	NM	NS	NS	ZE	PS	PS
ZE	NM	NS	NS	ZE	PS	PS	PM
PS	NS	NS	ZE	PS	PS	PM	PM
PM	ZE	ZE	PS	PM	PM	PB	PB
PB	ZE	ZE	PS	PM	PB	PB	PB

表 3  $\Delta k_d$  的模糊控制规则

Tab. 3 Fuzzy control rules of  $\Delta k_d$

EC	E						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PS	PS	ZE	ZE	ZE	PB	PB
NM	NS	NS	NS	NS	ZE	NS	PM
NS	NB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM
ZE	NB	NM	NM	NS	ZE	PS	PM
PS	NB	NM	NS	NS	ZE	PS	PS
PM	NM	NS	NS	NS	ZE	PS	PS
PB	PS	ZE	ZE	ZE	ZE	PB	PB

制台实时接收位姿传感器测得的导管末端位置信号,计算期望目标位置与实际位置的偏差,运用逆运动学,使用逆雅克比矩阵,把位置偏差转变成导管的 3 个关节偏差量。然后,根据关节偏差,通过自整定模糊控制器调整 PID 控制器的比例、积分、微分参数,给出合适的控制指令,发送到从端,作为辅助机器人的控制指令,辅助机器人操作导管到达目标位置。图 6 是系统的控制原理框图。

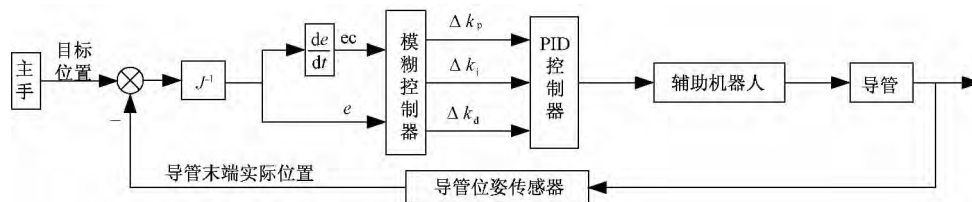


图 6 导管辅助机器人系统的自整定模糊 PID 控制原理框图

Fig. 6 The self-tuning fuzzy PID control principle diagram of catheter assisted robot system

## 3 系统仿真实验结果

通过对比仿真来验证所提出的控制方法的有效性。在介入手术中,医生对导管进退、旋转和弯曲操作是独立进行的,且辅助机器人的 3 个自由度也是相互独立的,每个自由度负责实现导管的一种操作。因此,选择一个关节量,如以导管的进退运动来仿真。在导管进退运动的仿真中,PID 控制器

参数为:  $k_p = 70$   $k_i = 10$   $k_d = 0.32$ 。系统的位置跟踪曲线如图 7 和 8 所示。图 7 中,主手输入为 1 cm 阶跃位置信号;同时,为了验证系统的抗扰动性能,在 0.4 s 时加入幅值为 1 mm 的阶跃扰动信号。图 8 中,主手输入位置信号为阶梯信号。

通过仿真实验来验证导管辅助机器人的自整定模糊 PID 算法,从仿真结果图 7 和图 8 可以看出,当输入的导管位置信号为阶跃信号时,自整定模糊

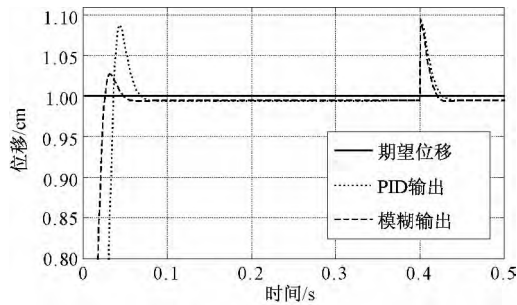


图7 输入阶跃信号时导管机器人系统的位置跟踪响应曲线

Fig. 7 Position tracking response curve of catheter robot system when input is step signal

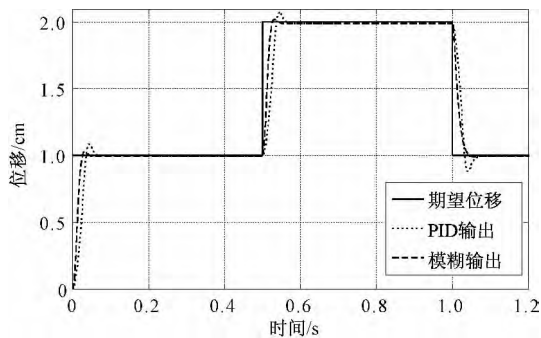


图8 输入阶梯信号时导管机器人系统的位置跟踪响应曲线

Fig. 8 Position tracking response curve of catheter robot system when input is staircase signal

PID 算法在快速性、超调量和抑制干扰方面均优于 PID 算法。在减少超调方面,所提出的控制算法超调在 3% 左右,传统 PID 控制算法在 8% 左右,这样所提出的算法在导管操作安全性方面有很大优势;在其它方面,所提出的控制算法的性能好于 PID 控制算法,但不是特别明显,这就需要对该算法进行进一步的改进,来提高这些方面的性能。因此,所提出的控制方法相对于 PID 方法具有优越性,能够使手术更加安全。但应指出,所提出的算法存在不足,例如还未通过实际系统的导管介入实验来评估该算法的性能。

## 4 结论

针对微创血管介入手术中辅助机器人的 PID 控制所存在的问题,提出了自整定模糊 PID 控制算法。

仿真实验结果表明,自整定模糊 PID 控制算法比 PID 控制算法响应快,将超调量减少到输入位置指令的 3% 左右,使系统的跟踪误差减小到 0.3 mm 以下,验证了本研究所提出的控制方案具有快速的跟踪性能和较强的抗干扰能力。因此,所提出的自整定模糊 PID 控制方法在控制导管辅助机器人时,能够提高手术的安全性。

## 参考文献

- [1] 刘达,刘登岭. 血管介入手术机器人推进机构的精度试验研究[J]. 机械设计与研究, 2010, 26(6): 41-44.
- [2] Guo Jian, Guo Shuxiang, Xiao Nian, et al. A New Master-slave Robotic Catheter System [C]// International Conference on Complex Medical Engineering. Harbin: IEEE Computer Society, 2011: 610-613.
- [3] Ma Su, Guo Shuxiang, Xiao Nian, et al. Development of a PID Controller for a Novel Robotic Catheter System [C]// International Conference on Complex Medical Engineering. Harbin: IEEE Computer Society, 2011: 64-68.
- [4] Guo Jian, Guo Shuxiang, Xiao Nian, et al. A novel robotic catheter system with force and visual feedback for vascular interventional surgery [J]. International Journal of Mechatronics and Automation, 2012, 2(1): 15-24.
- [5] Ganji Y, Janabi-Sharifi F, Cheema AN, et al. Robot-assisted catheter manipulation for intracardiac navigation [J]. International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, 2009, 4(4): 307-315.
- [6] Penning RS, Jung J, Ferrier NJ, et al. An Evaluation of Closed-Loop Control Options for Continuum Manipulators [C]//2012 International Conference on Robotics and Automation. SaintPaul: IEEE, 2012: 5392-5397.
- [7] 付宜利,高安住,刘浩,等. 导管机器人系统主从介入[J]. 机器人, 2011, 33(5): 579-584.
- [8] 付宜利,李凯,刘浩,等. 机器人辅助导管自动介入的研究[J]. 机械设计与制造, 2012, 4: 159-161.
- [9] 段星光,陈悦,于华涛,等. 微创血管介入手术机器人控制系统与零位定位装置设计[J]. 机器人, 2012, 34(2): 129-136.
- [10] Cheng Ji, Hou Zengguang, Xie Xiaoliang. Guidewire navigation and delivery system for robot-assisted cardiology interventions [C]// Proceedings of 10th IEEE International Conference on Cognitive Informatics & Cognitive Computing. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2011: 330-335.
- [11] 郭庆鼎,赵希梅. 直流无刷电动机原理与技术应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008: 27-31.
- [12] 韦巍. 智能控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 64-65.