

形状记忆合金驱动导管机器人的动力学仿真研究^①

付宜利^② 颜增翼^③ 刘 浩

(哈尔滨工业大学机器人技术与系统国家重点实验室 哈尔滨 150080)

摘 要 研究了由骨架弹簧和形状记忆合金(SMA)螺旋弹簧组成的柔性导管机器人的动态特性。基于导管力学模型、SMA 的本构和传热方程,系统地提出了一套完整的建模方法。由于 SMA 具有滞回和饱和等强非线性属性,传统的比例积分微分(PID)控制方法用于导管机器人中很难获得精确的控制效果,因此针对性地设计了参数自整定模糊 PID 控制器。仿真结果验证了模型的正确性,并显示出模糊 PID 对这种结构具有良好的控制效果。这种建模和控制方法,为单个 SMA 弹簧驱动导管机器人的实际应用和多驱动器的导管机器人的控制研究奠定了基础。

关键词 形状记忆合金(SMA),导管机器人,弯曲角度,滞回非线性,模糊 PID

0 引 言

介入手术常用于血管疾病的治疗。这种手术借助于手术导管通过血管管腔到达体内较远的病变部位,然后实现微创治疗。传统的介入手术是有丰富经验的操作人员在 X 光图像的引导下进行插管操作,但这种操作常因偶然出错而损伤血管。介入手术医疗中的主动导管驱动器的最佳材料是形状记忆合金(shape memory alloy, SMA),这种材料具有诸多优点,如能产生大的弹性变形,能重比高,驱动电压低,并且易于小型化。医生通过实时控制导管机器人的弯曲角度来选择血管分支,大大降低了介入手术的难度,使得手术进程更为顺畅,减少患者的痛苦^[1]。

由于主动导管是柔性臂,而且 SMA 具有很强的非线性,导致这种机构的动力学方程的推导和求解都变得较为复杂。目前,主动导管的研究主要集中在设计、加工和性能测试方面^[2-4]。有关 SMA 导管机器人的动力学模型研究还比较少见。Veeramani 使用 Seelecke Muller Achenbach 建立了 SMA 丝驱动的导管机器人^[5]。但与 SMA 丝相比,SMA 弹簧能够提供更大的输出位移,使系统具有更快的响应速度。因此,有必要对 SMA 弹簧驱动的导管机器人的动力学模型进行研究。但是,当对 SMA 驱动器采用传统

的比例积分微分(PID)进行控制时,由于 SMA 本身固有的滞回和饱和等强非线性属性,这种控制方法很难获得满意的控制效果^[6,7]。本文针对一种 SMA 驱动导管机器人,首先从其动态特性研究出发,分析系统动力学方程,然后结合 SMA 的本构方程与热传导方程,获得了系统模型,并对这个模型进行了仿真验证。最后,应用参数自整定模糊 PID 对所建模型进行控制,并将其控制结果与普通 PID 的控制结果进行对比。

1 SMA 相变特性与导管机器人的工作原理

当温度变化时,SMA 内部的微观结构发生了马氏体和奥氏体之间的相互转换。从宏观角度来看,在没有外力作用的情况下,其经典的滞回特性如图 1 所示。其中横轴 T 表示温度,纵轴 P 表示位移。

对系统进行持续加热,当温度上升超过点 5 后,然后进行彻底的降温,温度与位移的关系沿曲线 1→2→3→4→5→6→7→1 变化。如果降温到点 7 后,对其进行升温到点 4,再进行全面的降温,此时温度与位移关系沿曲线 7→3→4→6→7 变化。上述两条路径形成了大、小滞回环,描述了 SMA 弹簧在完全相变和不完全相变时的行为。其中 M_s 、 M_f 、

① 863 计划(2007AA04Z237)资助项目。
② 男,1966 年生,博士,博士生导师,教授;研究方向:机器人智能自主控制理论,机器人传感器技术,虚拟现实与机器人技术,医疗辅助机器人技术,机器人新型机构等;E-mail: meylfu@hit.edu.cn
③ 通讯作者,E-mail: yanzengyi@gmail.com
(收稿日期:2009-04-09)

A_s 和 A_f 分别代表 SMA 在没有外力作用的情况下马氏体相变开始、马氏体相变结束、奥氏体相变开始和奥氏体相变结束时的温度。

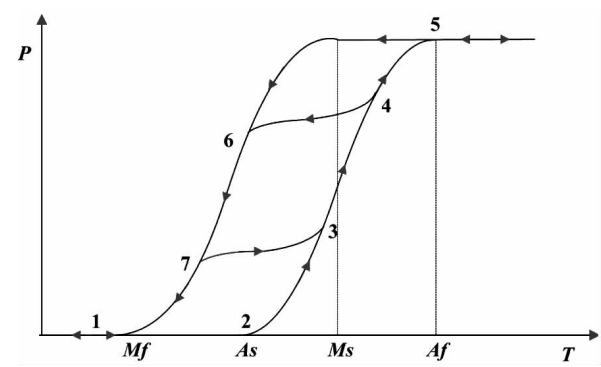


图 1 SMA 驱动器的典型滞回曲线

导管机器人的结构由如图 2 所示的弯曲单元组成,每个弯曲单元由一个 SMA 螺旋弹簧驱动器、一个不锈钢偏置弹簧和连接件组成。当对 SMA 弹簧两端通电加热时,SMA 弹簧收缩,使得该装置发生弯曲。当停止加热后,SMA 弹簧自然冷却散热,输出力逐渐减小并在偏置弹簧回复力的作用下,恢复到初始状态。通过控制 SMA 弹簧两端输入电压的大小,就能有效地控制该装置的弯曲角度。

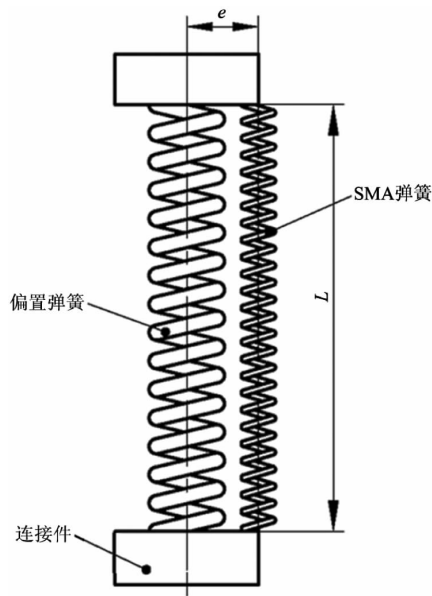


图 2 SMA 驱动器结构示意图

2 SMA 驱动导管机器人的动力学建模

2.1 导管机器人的动力学方程

导管机器人可以简化为一端固定,另一端自由的柔性臂,且不受剪切力的影响。由于机器人与外

部环境接触的表面积小,并且机器人动作速度慢,因而由环境所产生的摩擦阻力较小,可以忽略阻尼项。忽略重力作用,考虑到以上因素,能量积分方程^[8]可以表示为

$$\begin{aligned} \text{势能: } PE &= \frac{1}{2} \int_0^L \hat{EI} \theta'^2 ds \\ \text{动能: } KE &= \frac{1}{2} \int_0^L \{ \rho_m \dot{x}(s, t)^2 + \rho_j \dot{\theta}(s, t)^2 \} ds \end{aligned} \tag{1}$$

应用哈密顿能量原理,可得到动力学方程和边界条件如下:

$$\begin{cases} \rho_m \ddot{x} = 0 \\ \rho_j \ddot{\theta} - EI \theta'' = 0 \end{cases} \tag{2}$$

$$\hat{EI} \theta'(L, t) = F(t) e \tag{3}$$

在式(1)-(3)中, $\theta(s, t)$ 为主动导管的弯曲角度, $x(s, t)$ 为导管中心轴线的位置; $\dot{\theta} = \partial \theta / \partial t$, $\theta' = \partial \theta / \partial s$, $s \in [0, L]$, $x(s, t)$ 的偏微分表达方式与 $\theta(s, t)$ 相同; ρ_j 为转动惯量, ρ_m 为导管材料密度; $F(t)$ 为 SMA 弹簧输出力; $\hat{EI}$ 为偏置弹簧的等效刚度; e 为装置的偏置距离。

试验研究证明,导管在弯曲的过程中,形状基本近似为圆弧^[9],从而有 $\partial \theta / \partial s = Q(t)$, $Q(t)$ 是一个只与 t 有关而和 s 无关的函数,这样动力学方程可以弱化成一个边界条件。

此时,有

$$\theta(L, t) = \frac{eL}{\hat{EI}} F(t) \tag{4}$$

SMA 弹簧输出的位移为

$$Y = L - l_0 - \theta e \tag{5}$$

式(5)中, L 是导管机器人的长度; l_0 是 SMA 弹簧不受外力且处于纯马氏体状态下的原长。

2.2 SMA 弹簧的本构方程

Liang 的 SMA 弹簧的本构方程^[10]为

$$\dot{F} = -A \dot{\xi} + B \dot{\xi} + E \dot{T} \tag{6}$$

式中, ξ 为马氏体百分含量, T 为 SMA 弹簧的温度, A 、 B 和 E 分别代表与 SMA 驱动器、相变阶段和热力扩张相关的系数,其表达式分别如下:

$$A = \frac{d_{SMA}^4 G}{8nD_{SMA}^3}, B = \frac{\pi d_{SMA}^3 \Omega}{8\sqrt{3}D_{SMA}}, E = \frac{\pi d_{SMA}^3 \Theta}{8\sqrt{3}D_{SMA}} \tag{7}$$

$$G(\xi) = G_A + \xi(G_M - G_A) \tag{8}$$

$$\Omega(\xi) = -2(1 + \nu)\epsilon_L G(\xi)$$

在式(7)和(8)中, d_{SMA} 、 D_{SMA} 和 n 分别为 SMA 弹簧

的丝径、外径和圈数, G_M 和 G_A 分别为马氏体和奥氏体状态时的剪切模量, ε_L 和 ν 分别为最大残余应力和泊松比, Θ 为热弹性系数。

2.3 导管机器人的传热学方程

导管机器人采用电阻加热自然冷却的方法,其方程如下:

$$mc_p \left(\frac{dT}{dt} \right) = \frac{u^2}{R} - hW(T - T_0) \quad (9)$$

其中, m 、 c_p 和 W 分别是 SMA 弹簧的质量、比热和表面积; u 为加热电压; T_0 为周围环境的温度; R 为 SMA 弹簧的电阻,经实验测量,其经验公式^[11]为

$$R = R_A + (R_M - R_A)\xi \quad (10)$$

h 为驱动器与周围环境的传热系数,结合开环实验测量结果,为提高高温时的传热性能,假定表达式为二次多项式^[12],如式

$$h = h_0 + h_2 T^2 \quad (11)$$

式(10)和式(11)中, R_M 和 R_A 分别是 SMA 弹簧在纯马氏体和奥氏体状态下的阻值, h_0 和 h_2 分别是零阶和二阶传热系数。

2.4 导管机器人的动力学模型

在 Liang 的模型中,马氏体百分含量的动力学方程表示如下:

当 $M \rightarrow A$ 时,有

$$\xi = \frac{\xi_M}{2} \{ \cos[a_A (T - A_S) + b_A \sigma_{\text{eff}}] + 1 \}$$

当 $A \rightarrow M$ 时,有

$$\xi = \frac{1 - \xi_A}{2} \cos[a_M (T - M_f) + b_M \sigma_{\text{eff}}] + \frac{1 + \xi_A}{2} \quad (12)$$

式(12)中 $\sigma_{\text{eff}} = \frac{F(t)}{S}$, $S = \frac{\pi d_{\text{SMA}}^3}{8\sqrt{3}D_{\text{SMA}}}$, ξ_A 和 ξ_M 是发生相变时马氏体的百分含量; a_A 、 a_M 、 b_A 和 b_M 是与四个相变温度有关的材料系数。

对式(12)关于时间进行求导,可得

$$\dot{\xi} = C\dot{T} + D\dot{F} \quad (13)$$

式(13)中, C 和 D 取决于相变过程,其表达式如下:

当 $M \rightarrow A$ 时,为

$$\begin{aligned} C &= -\frac{\xi_M}{2} \sin[a_A (T - A_S) + b_A \sigma_{\text{eff}}] a_A \\ D &= -\frac{\xi_M}{2S} \sin[a_A (T - A_S) + b_A \sigma_{\text{eff}}] b_A \end{aligned} \quad (14)$$

当 $A \rightarrow M$ 时,为

$$\begin{aligned} C &= \frac{\xi_A - 1}{2} \sin[a_M (T - M_f) + b_M \sigma_{\text{eff}}] a_M \\ D &= \frac{\xi_A - 1}{2S} \sin[a_M (T - M_f) + b_M \sigma_{\text{eff}}] b_M \end{aligned}$$

联立式(4),(5),(6)和(13),可得

$$\dot{\theta} = \frac{(BC + E)eL}{(1 + Ae^2L/\hat{EI} - BD)\hat{EI}} \dot{T} \quad (15)$$

$$\dot{\xi} = \left(C + \frac{D(BC + E)}{(1 + Ae^2L/\hat{EI} - BD)} \right) \dot{T} \quad (16)$$

此时,将式(4),(7) - (12)和(14) - (16)整合到 Simulink/Matlab 中,可以得到模型的仿真框图,如图3所示。所使用的尺寸参数见表1,其余参数详见文献[13]。由于存在残余角度,弯曲角度初始值不为零。

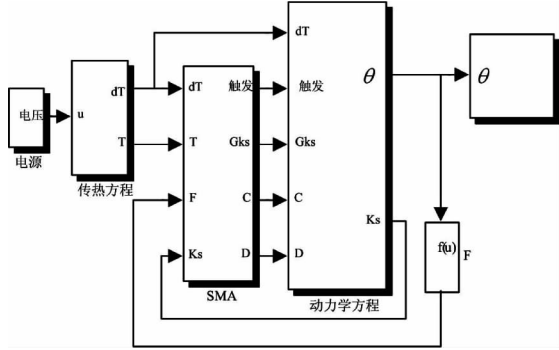


图3 模型仿真框图

表1 导管机器人尺寸参数

SMA 弹簧的丝径 d_{SMA} (mm)	0.05
SMA 弹簧的外径 D_{SMA} (mm)	0.2
偏置距离 e (mm)	0.48
主动导管长度 L (mm)	4.5

图4描述了对模型输入连续方波时,温度与时间、弯曲角度与时间以及温度和角度之间的关系。可以看出,不同周期和占空比可以导致 SMA 发生完全相变和不完全相变,相应地形成了温度与弯曲角度之间的大、小滞回环。以上仿真结果证明了这个模型能够正确地描述结构的特性。

3 导管机器人的控制仿真

PID 控制器控制结构简单,易于设计,广泛应用于各种工业控制中,但是用常规的 PID 来控制非线性系统时,由于不能实时整定控制器参数,控制效果往往不佳。另一方面,模糊控制是基于人的操作经验,利用一种模糊化的启发式语言来模拟人类的思维方式,进行控制决策,从而可以用它来自动整定 PID 控制器参数^[14]。这种模糊 PID 控制比普通 PID 控制有更快的响应特性和更小的超调,同时它又比普通的模糊控制器具有更高的稳态精度,而且鲁棒性较强^[15],其控制结构如图5。

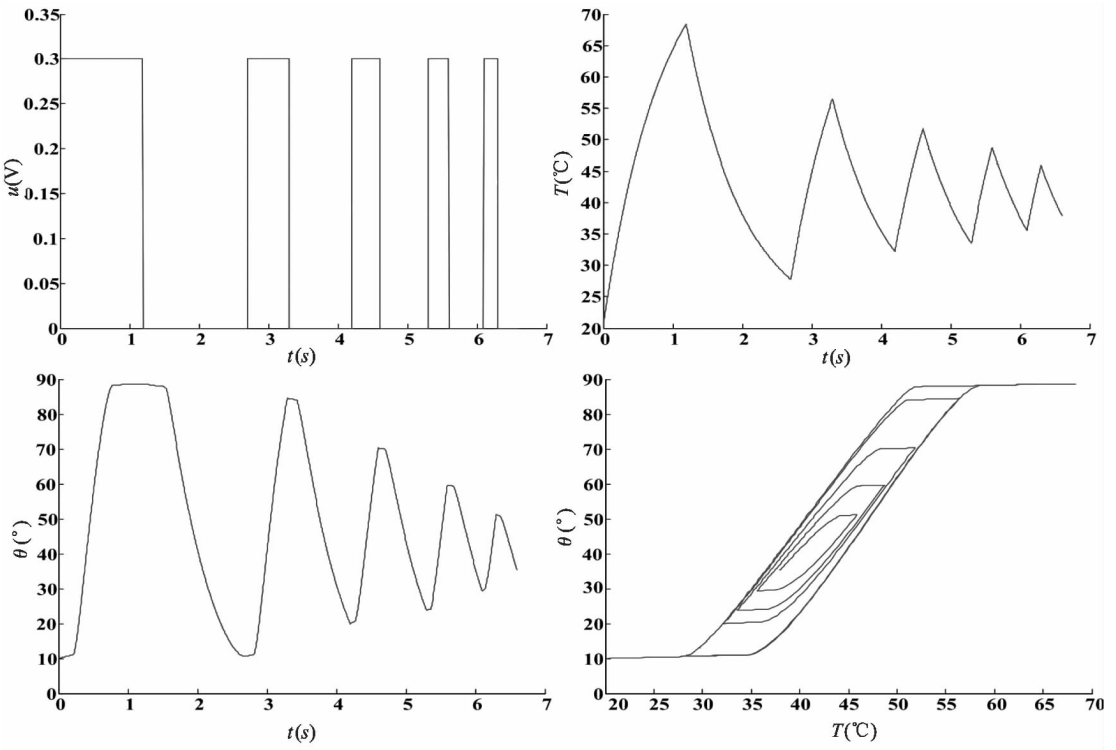


图 4 连续方波输入时 SMA 模型的滞回曲线

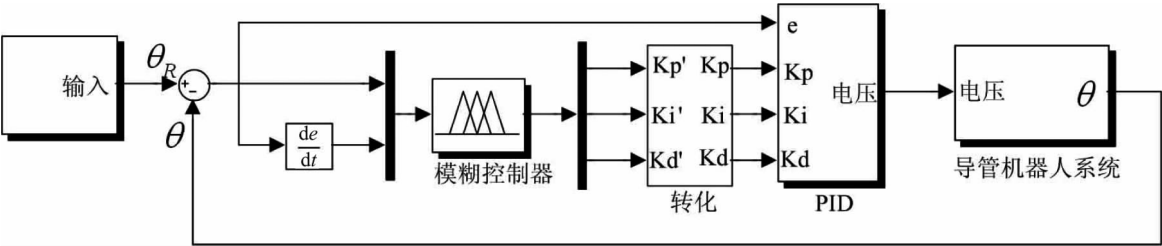


图 5 模糊 PID 控制框图

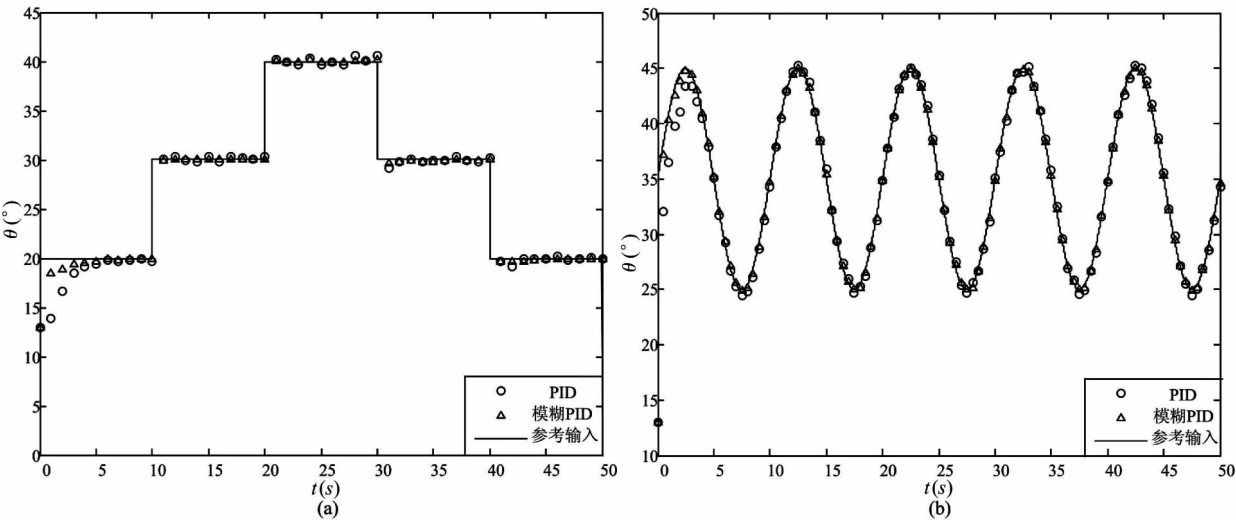


图 6 方波(a)和正弦波(b)参考输入下的系统响应

首先根据控制模型的特性,估算 3 个 PID 控制参数的范围,并对它们进行归一化处理,其次预测误差和误差变化率范围,确定好量化因子及相应的论域,然后确定输入输出各自的语言变量和隶属函数,最后根据 PID 的控制特性,确定模糊规则及清晰化方法。

两个输入的语言变量均设置 7 个,3 个输出的语言变量均设置为 4 个,从而对应到各个输出量的模糊规则有 49 条,其模糊规则格式如下:

If $e(t)$ is A_i and $de(t)$ is B_i then K'_p is C_i , K'_d is D_i and K'_i is E_i , $i = 1, 2, \dots, n$.

图 6 显示了系统分别在方波和正弦波(0.1Hz)的参考输入下,当受到输入电压 $\pm 0.03V$ 和外界温度 $\pm 2^\circ C$ 干扰时,PID 和模糊 PID 控制的控制效果。从仿真结果看,模糊 PID 比普通 PID 的控制效果优良,体现了该控制系统超调量小、跟踪快、抗干扰能力强的性能,也表明该参数自整定模糊 PID 控制器很好地补偿了 SMA 滞回非线性的影响。

4 结 论

本文从导管机器人的动力学分析出发,结合 SMA 驱动器的本构方程和传热方程,进行了系统的推导,建立起单个 SMA 驱动导管机器人的动力学模型。对其输入周期和占空比变化的连续方波,能够获得大、小滞回环,证明了所推导的模型能够正确地描述这种结构的特性。针对 SMA 驱动器固有的滞回非线性使其运动控制困难的问题,设计了参数自整定模糊 PID 控制器。仿真结果表明,在参考输入为方波或正弦波时,并且对模型同时引入温度和电压扰动,控制系统能够抑制 SMA 的滞回非线性,快速跟随性能良好,抗干扰能力强。本文提出的 SMA 驱动导管机器人的运动建模仿真为后期多驱动器的导管机器人研究与应用奠定了基础,并且该方法在 SMA 驱动结构中具有一定的通用性。

但是,多驱动器的导管机器人具有超强耦合性,使得很难用常规的解耦方法对系统进行解耦,同时,系统除了受到温度和电压的扰动外,还受到人体心脏搏动等不确定外力因素的影响,这进一步增加了系统的控制难度。设计多驱动器的导管机器人的控制系统和抑制多种扰动对系统控制的影响是将来需要进一步研究的内容。

参考文献

- [1] 谭璐, 常程康, 毛大立. 形状记忆合金在微创介入医疗领域中的应用. 上海金属, 2005, 1(27): 35-37
- [2] Speekumar M, Singaperumal M, Nagarajan T, et al. Recent advances in nonlinear control technologies for shape memory alloy actuators. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 2007, 8(5): 818-829
- [3] Song G, Ma N. Control of shape memory actuators using pulse-width pulse-frequency (PWWF) modulation. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2003, 1(14): 15-22
- [4] Rustighi E, Brennan M J, Mace B R. A shape memory alloy adaptive tuned vibration absorber: design and implementation. *Smart Materials and Structures*, 2005, 14: 19-28
- [5] Arun S V, Gregory D B, Stephen B O. Modeling the dynamic behavior of a shape memory alloy actuated catheter. *Smart Materials and Structures*, 2008, 17(4): 1-14
- [6] Jayender J, Patel R V, Nikumb S, et al. Modeling and control of shape memory alloy actuators. *Transactions on Control Systems Technology*, 2008, 16(2): 279-287
- [7] Akihik K, Tien I L, Paul H. Control of shape memory alloy actuators with a neuro-fuzzy feedforward model element. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2006, 17: 45-56
- [8] Ian A G, Christopher D R, Ian D W. Large deflection dynamics and control for planar continuum robots. *Transactions on Mechatronics*, 2003: 299-307
- [9] 张世武, 吴月华, 杨杰等. 管道微型机器人系统运动的力学分析和控制. 中国科学技术大学学报, 2001, 1(31): 79-84
- [10] Liang C, Rogers C A. Design of shape memory alloy springs with application in vibration control. *Journal of Vibration Acoustics*, 1993: 129-135
- [11] Koji I, Masahiro T, Shigeo H. Shape memory alloy servo actuator system with electric resistance feedback application for active endoscope. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Philadelphia, USA, 1988. 427-430
- [12] Jayender J, Patel R V, Nikumb S, et al. A robust controller for shape memory alloy actuators. In: Proceedings of the IEEE Conference on Decision & Control, San Diego, USA, 2006. 4369-4374
- [13] Hyo J L, Jung J L. Time delay control of a shape memory alloy actuator. *Smart Materials and Structures*, 2004, 13(4): 227-239
- [14] 李士勇. 模糊控制、神经控制和智能控制论. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006. 10-73, 254-350
- [15] Nguyen B K, Kyoung K A. Position control of shape memory alloy actuators by using self tuning fuzzy PID controller. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Electronics and Applications, Singapore, 2006. 1-5

Simulation research on the dynamics of shape memory alloy actuated catheter robots

Fu Yili, Yan Zengyi, Liu Hao

(State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080)

Abstract

This study focused on the dynamic behavior of a flexible catheter robot which is composed of a bias spring and a shape memory alloy (SMA) coil spring. Based on the mechanical model of the catheter and SMA's constitutive equation and heat transfer equation, a complete set of modeling methods for SMA actuated catheter robots were brought forward. In consideration of the fact that it is difficult to obtain a precise position control by the conventional proportional-integral-differential (PID) controller due to the presence of the nonlinearity of SMA such as hysteresis and saturation, a self tuning fuzzy PID controller was designed for such situation. The simulation results validated the accuracy of the model and the controller's effectiveness. These modeling and control methods are useful for the practical application of catheter robots actuated by a single SMA spring and provide the foundation for the control study for multi-SMA actuated catheter robots.

Key words: shape memory alloy (SMA), catheter robot, bending angle, hysteresis nonlinearity, fuzzy PID