

两自由度导管机器人的动力学仿真研究^①

付宜利^② 刘 浩 颜增翼 王树国

(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 对三形状记忆合金(SMA)螺旋弹簧驱动的导管机器人的动态特性进行了研究。首先基于综合力学方程、SMA 的本构方程和传热方程建立了动力学模型,然后针对双输入双输出(TITO)系统的 2 个自由度间存在强耦合和因 SMA 的高度非线性使得难以采用解耦实现对相邻 SMA 驱动器控制的现象,设计了具有混合结构的模糊控制器。它用传统的模糊控制器控制系统的 2 个自由度,同时用耦合模糊控制器补偿 2 个自由度之间的耦合作用。仿真结果表明,所推导的动力学模型能够正确描述这种结构的特性,并且混合模糊控制器具有良好的控制效果。

关键词 形状记忆合金(SMA), 导管机器人, TITO 系统, 混合模糊控制器

0 引 言

导管是微创介入手术的主要工具,借助于它可以实现流体的排放和注射,或者为其它手术器械提供通道以实施多种类型的手术。传统导管的缺点是不易导向,操控技术要求过高,对血管组织伤害较大等,为了改善导管的操控性能和提高插管的成功率,研究人员进行了大量导管机器人研究。导管机器人多数由形状记忆合金(shape memory alloy, SMA)驱动器驱动,它能够在三维空间主动地选择方向并适应血管狭窄曲折的形貌^[1-3]。它一般是由位于中心的弹性元件和周向均匀分布的多个偏心设置的 SMA 驱动器组成,并设计成多节串联的形式以实现大的弯曲角度和复杂的外形。当施加或去除热量时,SMA 驱动器将在高温奥氏体相和低温马氏体相之间转化,实现收缩和拉伸,并因此使得导管弯曲和恢复。

尽管已经出现了多种新型的导管,并能成功地对其进行测试,但这方面的研究主要集中在设计、加工和尺寸缩小上。迄今为止,这种结构的动态响应特性研究的进展仍然有限。导管机器人的性能主要依赖于 SMA 驱动器,而 SMA 所具有的迟滞大、带宽低、响应慢和非线性强的特点使得难以对其控制^[4]。Langelaar 等人为激光切割 SMA 管获得的类似支架形状的导管提出了一种新型本构模型,但采用的是 R 相变的 SMA,因此忽略了迟滞效应^[5]。Veeraman 利用 SeeleckeMullerAchenbach 模型描述 SMA 的驱动

特性,并建立了单 SMA 丝驱动的导管机器人的动力学模型^[6],但是,在同样长度的前提下,SMA 螺旋弹簧的输出位移远比 SMA 丝的要大,因此很有必要推导 SMA 螺旋弹簧驱动的导管机器人的动力学模型,这将有助于提高导管的性能并利于闭环控制算法的实现。我们前期对单 SMA 螺旋弹簧驱动的导管机器人的动态特性进行了研究^[7]。本文在以上工作的基础上进行了扩展,对三 SMA 螺旋弹簧驱动的导管机器人的动态特性进行了研究。首先,对导管机器人的力学模型进行了推导,然后结合 Liang 的 SMA 本构方程以及传热方程建立起导管机器人的动力学模型,并通过仿真验证其正确性。最后为所推导的双输入双输出(two-input two-output, TITO)系统设计了一种具有混合结构的模糊控制器。

1 导管机器人的力学模型

具有多个 SMA 驱动器(以下简称驱动器)的导管机器人除了具有弯曲功能外,还能够实现周向 360°的偏转,这在一定程度上可取代传统插管术中的扭转操作。由于工作环境为人体血管,驱动器的数量不能过多,以避免尺寸过大,因此一般采用 3 个驱动器协同工作来实现上述 2 个自由度。1 个弯曲单元的结构和受力弯曲原理如图 1 所示。图中,虚线表示初始位置; $\sum OXYZ$ 为以近端连接件 2 为固定基座建立的坐标系; θ 和 β 表示 2 个自由度,分别为弯曲角度和偏转角度; L 为单元的自然长度; R

^① 863 计划(2007AA04Z237)资助项目。

^② 男,1966 年生,博士,教授;研究方向:医疗辅助机器人,医学图像处理;联系人,E-mail:meiyifu@hit.edu.cn
(收稿日期:2009-06-24)

为导管轴线的弯曲半径 ($R = L/\theta$); e 为驱动器的偏心距离。图 2 为图 1 的俯视图,展示了弯曲后各驱动器轴线与导管轴线的几何关系。理论推导和实验都表明导管弯曲的挠曲线 $\widehat{OO_1}$ 可以近似为圆弧。

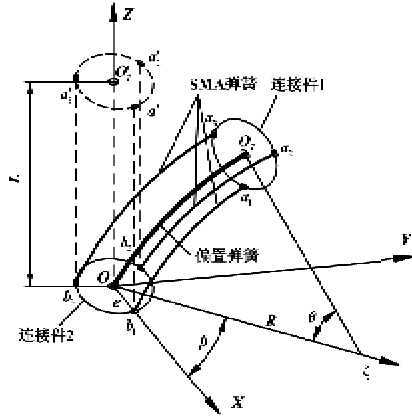


图1 结构与弯曲原理示意图

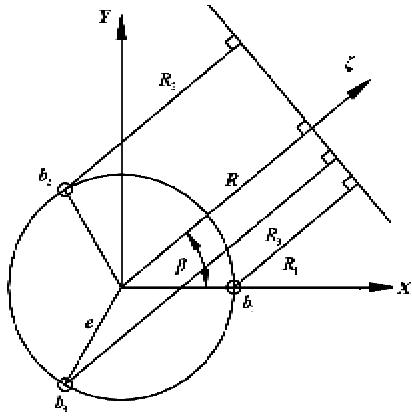


图2 几何关系示意图

令 $\alpha_1 = -\beta$, $\alpha_2 = -\beta + \frac{2\pi}{3}$, $\alpha_3 = -\beta - \frac{2\pi}{3}$, 由图 2 可知各驱动器的弯曲半径 $R_i (i = 1, 2, 3)$ 为

$$R_i = R - e \cos \alpha_i \quad (1)$$

各驱动器的长度 $L_i (i = 1, 2, 3)$ 为

$$L_i = R_i \theta = L - e \theta \cos \alpha_i \quad (2)$$

令初始长度为 l_0 , 则各驱动器的输出位移 $Y_i (i = 1, 2, 3)$ 可表示为

$$Y_i = L_i - l_0 \quad (3)$$

根据导管机器人的力平衡条件可得

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^3 F_i e \sin \alpha_i = 0 \\ \sum_{i=1}^3 F_i e \cos \alpha_i = \frac{\overline{EI}}{L} \theta \end{cases} \quad (4)$$

式中, $F_i (i = 1, 2, 3)$ 为各驱动器的输出力, $\overline{EI}$ 为导管的等效抗弯刚度。

此处仅列出驱动器 1 和 2 协同工作实现 $0^\circ \leq \beta \leq 120^\circ$ 的推导, 其余偏转角度区间与此类似。此时, 驱动器 3 处于非工作状态, 可按照弹性系数恒定为 k_3 的普通弹簧处理:

$$F_3 = k_3 Y_3 \quad (5)$$

令 $k = \frac{2\sqrt{3}}{3} \cdot \frac{\overline{EI}}{eL}$, 求解方程组可得

$$\begin{cases} F_1 = k \theta \sin \alpha_2 + F_3 \\ F_2 = -k \theta \sin \alpha_1 + F_3 \end{cases} \quad (6)$$

2 导管机器人的动力学模型

本文仍采用 Liang 的本构方程来描述 SMA 的特性^[8]:

$$\dot{F}_i = A_i \dot{Y}_i + B_i \dot{\xi}_i + E_i \dot{T}_i \quad (7)$$

$$\dot{\xi}_i = C_i \dot{T}_i + D_i \dot{F}_i \quad (8)$$

式(7)和式(8)中, ξ_i 为马氏体百分含量; “ $\cdot$ ”表示关于时间的微分, 参数 A_i, B_i, C_i, D_i, E_i 含义参见文献[7]和[9]。

将 Y_i 和 F_i 对时间求导可得

$$\dot{Y}_i = -e(\dot{\theta} \cos \alpha_i + \theta \dot{\beta} \sin \alpha_i) \quad (9)$$

$$\begin{cases} \dot{F}_1 = k \dot{\theta} \sin \alpha_2 - k \theta \dot{\beta} \cos \alpha_2 + \dot{F}_3 \\ \dot{F}_2 = -k \dot{\theta} \sin \alpha_1 + k \theta \dot{\beta} \cos \alpha_1 + \dot{F}_3 \\ \dot{F}_3 = -ek_3(\dot{\theta} \cos \alpha_3 + \theta \dot{\beta} \sin \alpha_3) \end{cases} \quad (10)$$

再将式(8)、(9)和(10)代入式(7)中, 并令

$$\begin{aligned} M_1 &= (1 - B_1 D_1)(k \sin \alpha_2 - ek_3 \cos \alpha_3 \\ &\quad + A_1 e \cos \alpha_1) \\ N_1 &= -(1 - B_1 D_1)(k \cos \alpha_2 + ek_3 \sin \alpha_3) \\ &\quad + A_1 e \sin \alpha_1 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} M_2 &= -(1 - B_2 D_2)(k \sin \alpha_1 + ek_3 \cos \alpha_3) \\ &\quad + A_2 e \cos \alpha_2 \\ N_2 &= (1 - B_2 D_2)(k \cos \alpha_1 - ek_3 \sin \alpha_3) \\ &\quad + A_2 e \sin \alpha_2 \end{aligned} \quad (12)$$

则双 SMA 驱动导管机器人的动力学模型可表示为

$$M_i \dot{\theta} + N_i \dot{\beta} = (B_i C_i + E_i) \dot{T}_i \quad (i = 1, 2) \quad (13)$$

由式(13)可以将 θ 和 β 表示为

$$\begin{aligned} \dot{\theta} &= \frac{(B_1 C_1 + E_1) N_2 \dot{T}_1 - (B_2 C_2 + E_2) N_1 \dot{T}_2}{M_1 N_2 - N_1 M_2} \\ \dot{\beta} &= \frac{(B_1 C_1 + E_1) N_2 \dot{T}_1 - (B_2 C_2 + E_2) N_1 \dot{T}_2}{-(M_1 N_2 - M_2 N_1) \theta} \end{aligned} \quad (14)$$

驱动器的驱动方式采用电阻加热和自然冷却, 其传热方程为

$$mc_p \dot{T} = u^2/R - hW(T - T_0) \quad (15)$$

式中, m 、 c_p 和 W 分别是驱动器的质量、比热和表面积; u 为电压; T_0 为环境温度; R 为电阻, h 为传热系数, 具体表达式参见文献[7]。

将式(14)、式(15)及相关的参数集成到 Matlab/

Simulink 中可以得到两自由度导管机器人的动力学模型框图, 如图 3 所示。它包括 2 个驱动器的传热方程、本构方程和动力学方程。仿真过程选择 Runge-Kutta 定步长求解器 ODE4 进行数值积分, 并将步长设置为 0.01s。

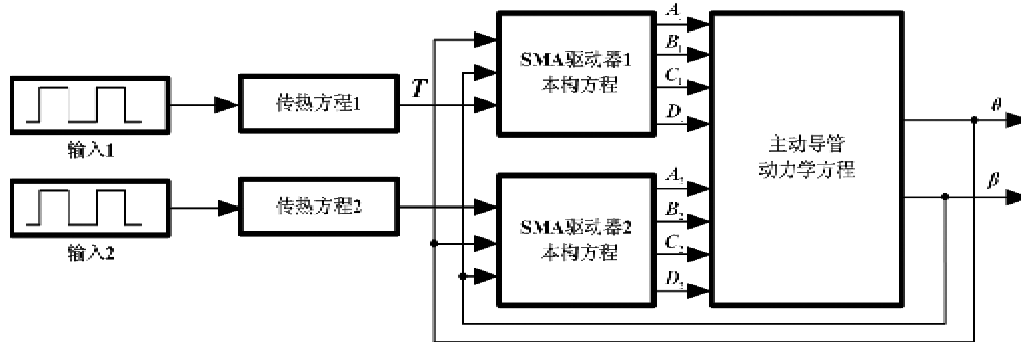


图 3 两自由度导管机器人的动力学模型框图

我们在前期工作中已经对单 SMA 螺旋弹簧驱动的导管机器人进行了研究: 当施加周期变化的电压方波信号时, 能够获得对应于完全和不完全相变的温度-弯曲角度大、小滞回环, 表明所推导的动力学模型能够正确地描述单 SMA 驱动的导管机器人

的特性。本文研究的导管机器人在周向等间隔增加了 2 个驱动器, 其材料参数与部分导管机器人的尺寸参见文献[7]。对 2 个驱动器施加同样的电压方波, 可以得到如图 4 所示的开环响应曲线。

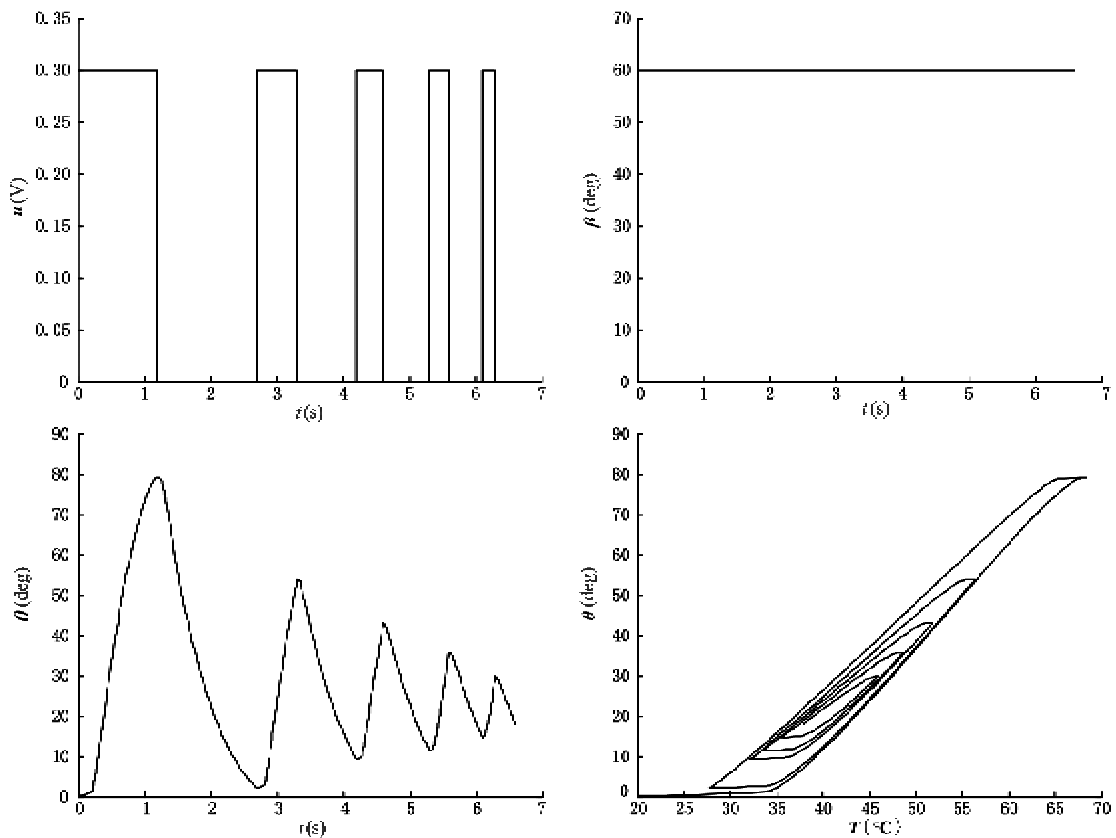


图 4 相同电压方波输入的开环响应

可以看出,当2个驱动器的输入相同时,输出的偏转角度恒定,弯曲角度则反复增大与减小。这个过程中,仍然能够获得对应于完全相变和不完全相变的大、小滞回环。现在的滞回曲线与单 SMA 驱动时所获得的曲线在形状上存在一定的差异,这是由于2个驱动器相互作用造成的,反映了动力学方程所描述的2个自由度间存在着耦合。因此所推导的动力学模型能够正确描述两自由度导管机器人的瞬态特性。

3 混合模糊控制器

由式(14)可知导管机器人的动力学模型存在很强的耦合,而且 SMA 材料本身存在大的非线性,因此难以通过对其解耦来设计控制器。传统的基于模型的控制方法也难以在这种复杂的控制系统中实施。一方面,虽然通过数值计算方法能够对模型进行求解,但这个过程会消耗大量的运算时间。另一方面,在建模过程中对一些参数做了理想化的假设,而且 Liang 的本构模型是维象的,并未完善地描述 SMA 的相变机理,致使所建立的模型并不能精确地描述系统的真实输出。因此在对所研究的模型进行简化以综合其它控制方法之前,先考虑将不依赖于控制对象的精确数学模型的模糊控制方法用于这种结构中,并用所开发的动力学模型来验证模糊控制器的效果。

模糊控制方法已经广泛地应用于各种单输入单输出系统中^[10],但对于多输入多输出(MIMO)系统,由于强动力学耦合特性,难以直接根据输入输出变量制定控制规则。而且模糊规则的数量随着变量的增加呈指数增长,使得计算量急剧增加,甚至无法实现^[11]。显然,MIMO 系统的控制难点在于如何解决自由度之间的耦合问题。本文借鉴文献[12]中的方法,设计了混合结构的模糊控制器(mixed fuzzy controller, MFC)。它包括传统的模糊控制器(traditional fuzzy controller, TFC)(分别控制系统的每个自由度)和耦合模糊控制器(coupling fuzzy controller, CFC)(用于补偿多个自由度之间的耦合作用)。

导管机器人由相邻2个处于工作状态的驱动器共同作用决定 θ 和 β 这2个自由度,这是一个双输入双输出(TITO)系统。仍以驱动器1和2工作为例,当 $0^\circ \leq \beta_r \leq 60^\circ$ 时,驱动器1对 θ 的调节占主导作用,驱动器2对 β 的调节占主导作用;当 $60^\circ \leq \beta_r \leq 120^\circ$ 时,情况恰好相反。因此在这两个 β 区间

上,分别采用2个 TFC 操作2个驱动器以实现2个自由度的控制,它们之间的耦合作用通过2个 CFC 来补偿。当 β_r 跨过 60° 时,需要将2个驱动器的输入进行切换,保证每个自由度都由起主导作用的驱动器来控制。所设计的闭环控制系统如图5所示。

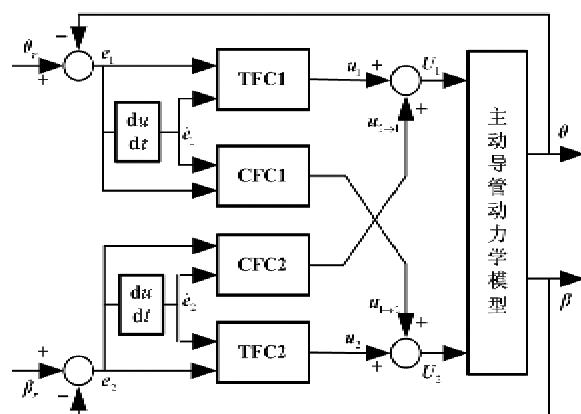


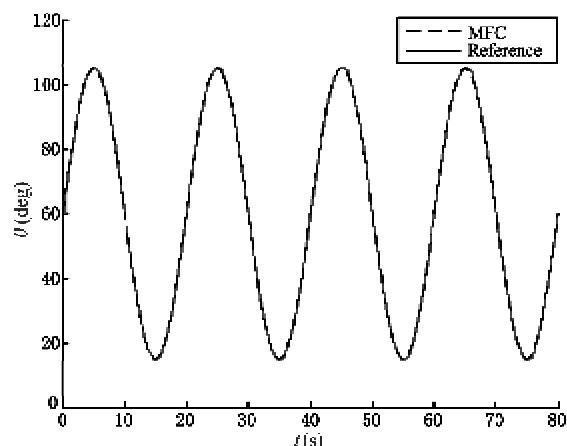
图5 采用 MFC 的 TITO 闭环控制系统框图

TFC 的输入是由参考输入和反馈综合的误差及其微分,输出是驱动器的输入电压信号分量 u_i ($i = 1, 2$)。首先根据操作经验将输入输出变量转化至合适的论域,并采用三角形隶属函数将它们对应于7个语言变量(NB, NM, ..., PB)。然后制定模糊规则,采用 MAX-MIN 方法进行模糊推理。最后采用面积法进行清晰化。

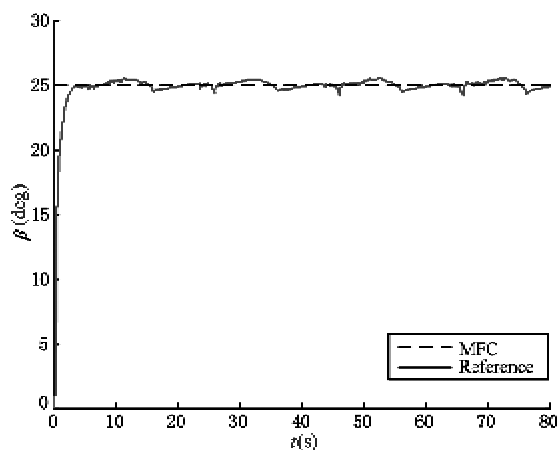
CFC 通过操作误差和误差微分来补偿耦合作用,其设计过程与主模糊控制器相似。由于 CFC 起到调节作用,在自由度的决定因素中占次要地位,因此其语言变量取为3个,相应的模糊规则减少为9条。这样做是为了降低计算负担,便于模糊控制器的实施。CFC1 的规则与 TFC1 的相同,而 CFC2 的规则与 TFC2 的规则相反。在每个采样时间,耦合作用均不相同且没有累积效应,因此 CFC 的输出 $u_{2→1}$ 和 $u_{1→2}$ 直接叠加到 u_i ($i = 1, 2$)上,形成驱动器的输入电压 U_i ($i = 1, 2$)。

图6是当参考输入 θ_r 为阶跃信号, β_r 为频率1/20Hz的正弦信号时,闭环控制系统的输出响应曲线。对输入电压和外界温度分别施加了幅值为 ± 0.02 V 和 $\pm 5^\circ\text{C}$ 的随机干扰信号。仿真结果显示, β 能够较好地跟随 β_r , θ 则在 θ_r 上下有小幅(最大幅值分别为 $+0.5^\circ$ 和 -0.9°)的波动。这表明将 MFC 用于导管机器人这种多驱动器柔性并联机构,能够有效地抑制 SMA 的非线性,补偿2个自由度之间的

耦合作用,获得良好的跟随性能,并具有较强的抗干扰能力。



(a)偏转角度



(b)弯曲角度

图 6 参考输入下的闭环系统响应

4 结 论

本文综合导管弯曲的力学模型、SMA 的本构方程和传热方程建立了具有弯曲和周向 360° 偏转 2 个自由度的导管机器人的动力学模型。对 2 个驱动器施加相同的变占空比的电压波形,能够获得恒定的偏转角度以及温度与弯曲角度的大、小滞回曲线,表明所推导的动力学模型能够正确描述这种结构的特性。针对 SMA 具有大的迟滞非线性,且导管机器人的 2 个自由度之间存在着很强的耦合的现象,设计了混合结构模糊控制器(MFC)。使用 2 个传统模糊控制器(TFC)分别控制导管的 2 个自由度,同时用 2 个耦合模糊控制器(CFC)对 2 个自由度之间的耦合作用进行补偿。仿真结果表明,当参考的弯曲

角度为阶跃信号,偏转角度为正弦信号,并且引入温度和电压扰动时,系统能够有效地抑制 SMA 的非线性,补偿自由度间的动力学耦合作用,具有良好的跟随和抗干扰性能。本文所采用的建模方法以及所设计的混合控制器在类似多 SMA 驱动的柔性并联机构中具有一定的通用性。

参考文献

- [1] Haga Y, Tanahashi Y, Esashi M. Small diameter active catheter using shape memory alloy. In: Proceedings of the 11th Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, Heidelberg, Germany, 1998. 419-424
- [2] Mineta T, Mitsui T, Watanabe Y, et al. Batch fabricated flat meandering shape memory alloy actuator for active catheter. *Sensors and Actuators*, 2001, 88(2): 112-120
- [3] Tung A T, Park B H, et al. Laser-machined shape memory alloy actuators for active catheters. *IEEE/ASME Trans on Mechatronics*, 2007, 12(4): 439-446
- [4] 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
- [5] Langelaar M, Keulen F V. Modeling of a shape memory alloy active catheter. In: Proceedings of the 45th AIAA/ASME / ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, California, USA, 2004. 1653
- [6] 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
- [7] 付宜利, 颜增益, 刘浩. 形状记忆合金驱动导管机器人的动力学仿真研究. *高技术通讯*, 2010, 20(5): 499-504
- [8] Liang C, Rogers C A. Design of shape memory alloy springs with applications in vibration control. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 1997, 8(4): 314-322
- [9] Lee H J, Lee J J. Time delay control of a shape memory alloy actuator. *Smart Materials and Structures*, 2004, 13(1): 227-239
- [10] 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
- [11] Lian R J, Lin B F. Design of a mixed fuzzy controller for multiple-input multiple-output systems. *Mechatronics*, 2005, 15(10): 1225-1252
- [12] Lygouras J N, Kodogiannis V S, Pachidis T, et al. Variable structure TITO fuzzy-logic controller implementation for a solar air-conditioning system. *Applied Energy*, 2008, 85(4): 190-203

Dynamic simulation research on a 2-DOF catheter robot

Fu Yili, Liu Hao, Yan Zengyi, Wang Shuguo

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

Abstract

This study focused on the dynamic behavior of an active catheter actuated by 3 shape memory alloy (SMA) coil springs. The bending mechanics, the SMA's characteristic described by Liang's model, and a heat transfer model were combined to derive the dynamic model. A mixed fuzzy controller (MFC) was designed under the consideration that it is difficult to control 2 adjacent SMA actuators by decoupling since there exists strong coupling effect between two degrees of freedom (DOFs) of such a two-input two-output (TITO) system, and the SMA possesses high nonlinearity. In the controller two traditional fuzzy controllers control 2 DOFs respectively and two coupling fuzzy controllers compensate for the dynamic coupling between 2 DOFs. The simulation results indicate the derived dynamic model can accurately describe the characteristic of such a structure and the MFC possesses an effective performance.

Key words: shape memory alloy(SMA), catheter robot, two-input two-output (TITO) system, mixed fuzzy controller