

移动机器人的鲁棒自适应控制器设计

柯海森¹, 叶旭东¹, 钱建海²

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 中国石化集团杭州炼油厂, 浙江 杭州 310015)

摘 要: 对一类满足匹配条件的输入干扰不确定性非完整约束移动机器人, 借助无源化设计方法提出了一种饱和鲁棒自适应控制器. 该控制器不需要事先确定未知干扰的上界值, 它通过事先定义的逻辑切换方式在线调节未知干扰上界值参数的估计值. 通过在控制器中引入饱和函数对控制信号进行平滑处理使得控制过程光滑平稳. 从理论上证明了该鲁棒自适应控制器能够保证闭环系统的所有状态有界, 并且当未知干扰为零时, 还能够保证闭环系统所有状态渐近稳定.

关键词: 鲁棒控制; 自适应控制; 无源性; 移动机器人

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1008-973X(2006)07-1127-05

Robust adaptive controller design for mobile robot

KE Hai-sen¹, YE Xu-dong¹, QIAN Jian-hai²

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Hangzhou Refinery China Petrochemical Corporation, Hangzhou 310015, China)

Abstract: Presented here is a passivity technique used to design a saturated robust adaptive controller for a class of nonholonomic mobile robot subjected to input disturbances and satisfying the matched condition. The controller did not require a priori knowledge on the bounds of the disturbances and can get the estimates of the upper bounds of the disturbances via an on-line switching logic. In the course of the design, a saturated function was introduced to make the control law continuous and smooth. It was proved that the robust adaptive controller developed in this paper can guarantee that all states of the closed-loop mobile robot were bounded and asymptotically stable when the disturbances equaled zero at the equilibrium point of the open-loop mobile robot.

Key words: robust control; adaptive control; passivity technique; mobile robot

非完整约束移动机器人因其本身固有的非线性特性及其广泛的应用范围, 近年来已经受到越来越多学者的密切关注. 由于非完整约束的限制, 机器人所需的控制输入数目要小于移动机器人的自由度, 这时仅通过传统的状态反馈控制是不能达到所需的控制目标的. 为了解决这类问题, 迄今为止的解决方案主要有以下两种: 第一种是利用时变状态反馈技巧^[1-3], 这类方法通过增加外部持续激励使得系统的

控制设计得以完成, 这种方法的缺点是系统状态收敛速度较慢; 第二种是利用时不变不连续状态反馈技巧^[4-8], 这种方法的优点是可以获得指数收敛率. 在本文设计中, 为了获得状态的快速收敛, 选用时不变不连续状态反馈控制方法. Tayebi 等人^[4]首先利用时不变不连续状态反馈控制方法处理了一类匹配不确定性系统的控制问题. Kim 等人^[7]利用时不变不连续状态反馈控制方法设计出了一个受显式上界

收稿日期: 2005-03-18.

浙江大学学报(工学版)网址: www.journals.zju.edu.cn/eng

基金项目: 教育部“跨世纪优秀人才培养计划”基金资助项目(教技函 2002); 教育部回国留学人员基金资助项目.

作者简介: 柯海森(1977-), 男, 山西芮城人, 博士生, 主要从事非线性系统自适应控制、鲁棒控制的研究及其应用.

E-mail: kehaisen@zju.edu.cn

约束的饱和输入控制器. 本文进一步将系统放宽至有界干扰输入并且干扰的上界值未知的情况. 利用无源性分析技巧^[9]和鲁棒控制方法^[10]在逻辑切换的基础上设计出了全局稳定的饱和鲁棒自适应控制器.

1 机器人运动学模型

本文研究对象为具有同轴的两个驱动轮和两个平衡轮的四轮移动机器人. 为了研究的方便, 用机器人两驱动轮的轴中点 P 在坐标中的位置及航向来表示实际机器人的运动情况. 如图1所示. 其中 $P=[x, y, \theta]^T$ 表示机器人的当前位姿, (x, y) 为点 P 的坐标, θ 为机器人沿 X 轴逆时针旋转所得到的机器人运动方向角. 移动机器人的运动特征由机器人的线速度 v 和角速度 ω 来描述.

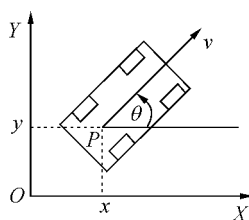


图1 移动机器人模型

Fig. 1 Model of mobile robot

假设机器人的两驱动轮仅作旋转运动而没有滑动现象, 从而得到如下运动学模型:

$$\begin{cases} \dot{x} = (v + \xi_1) \cos \theta, \\ \dot{y} = (v + \xi_2) \sin \theta, \\ \dot{\theta} = \omega + \xi_3. \end{cases} \quad (1)$$

式中: ξ_1, ξ_2 是随输入 ω, v 的变化而变化的干扰, 并且有

$$|\xi_i| \leq d_i; i=1, 2; \quad (2)$$

v 和 ω 被看作控制输入并且受到如下约束的限制:

$$|v(t)| \leq v_{\max}, |\omega(t)| \leq \omega_{\max}, \forall t \geq 0, \quad (3)$$

式中: v_{\max}, ω_{\max} 是给定的任意正常数.

现在控制目标转化为寻找满足约束(3)的时不变不连续控制输入:

$$\omega = \alpha_1(x, y, \theta), v = \alpha_2(x, y, \theta), \quad (4)$$

使得系统(1)在控制律(4)作用下的闭环系统所有状态全局渐近指数收敛到零.

为了实现控制目标, 对系统(1)作坐标变换:

$$\begin{cases} x_1 = \theta, \\ x_2 = x \cos \theta + y \sin \theta, \\ x_3 = x \sin \theta - y \cos \theta. \end{cases} \quad (5)$$

则系统(1)可以转化为

$$\dot{x}_1 = \omega + \xi_1, \quad (6a)$$

$$\dot{x}_2 = v - \omega x_3 - x_3 \xi_1 + \xi_2, \quad (6b)$$

$$\dot{x}_3 = \omega x_2 + x_2 \xi_1. \quad (6c)$$

因为坐标变换(5)是全局的并且保留了系统(1)的平衡点, 所以控制问题就转化为对系统(6)寻找满足约束(3)的时不变不连续饱和控制输入 ω, v , 这使得系统(6)在控制律(4)作用下的闭环系统所有状态全局渐近指数收敛到零.

2 自适应控制器设计

当干扰的上界值 $d_i (i=1, 2)$ 已知时, 可以利用鲁棒控制器的设计方法进行系统稳定鲁棒控制器的设计. 但是, 在实际操作中存在如下两个问题: 第一, 这些干扰的上界值不容易获得; 第二, 尽管可以确定这些干扰的范围, 但由鲁棒控制的思想可知必须选择足够大的上界值来确保系统稳定, 此时干扰将被放大, 因此所需的控制作用也将随之增大, 这在实际控制中是不允许的, 尤其对于输入饱和控制系统.

利用逻辑切换控制方法^[10], 在不要求 $d_i (i=1, 2)$ 值的情况下, 利用分层设计的方法给出系统的鲁棒自适应控制器. 设计过程如下: 第一层, 在假设估计参数 \hat{d}_i 为固定值的基础上设计一个包含估计参数 \hat{d}_i 的鲁棒控制器; 第二层, 设计估计参数 \hat{d}_i 的在线调节机制, 使得第一层设计的鲁棒控制器可以保证闭环系统的渐近稳定性.

2.1 鲁棒控制器设计

在假设估计参数 \hat{d}_i 是固定值的情况下设计控制输入 ω, v . 首先对式(6a)设计如下鲁棒控制律:

$$\alpha_1 = -c_1 \frac{x_1}{\sqrt{1+\gamma^2}} - \operatorname{sgn}(x_1) \hat{d}_1. \quad (7)$$

式中: \hat{d}_1 是 d_1 的估计值; $\gamma = \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2}$; c_1 是待设计的正常数, 并且保证 $|\alpha_1| \leq \omega_{\max}$,

对式(6a)取如下 Lyapunov 函数:

$$V_1 = x_1^2 / 2. \quad (8)$$

由式(8)对时间微分并将式(6a)和(7)代入计算可得

$$\dot{V}_1 = -c_1 \frac{x_1^2}{\sqrt{1+\gamma^2}} - |x_1| [\hat{d}_1 - \operatorname{sgn}(x_1) \xi_1]. \quad (9)$$

当 $\hat{d}_1 \geq |\xi_1|$ 时, 由方程式(9)可得

$$\dot{V}_1 \leq 0. \quad (10)$$

因此 $V_1(t)$ 和 $x_1(t)$ 在 $[0, \infty)$ 上都是有界的, 不会出现有限时间逃逸现象. 对式(9)两边积分可得 $x_1(t)$ 在 $[0, \infty)$ 上也是平方可积的, 进一步有 $\dot{x}_1(t)$ 在 $[0, \infty)$ 上有界. 应用巴巴拉特引理可以获得状态 $x_1(t)$ 的渐近稳定, 即 $\lim_{t \rightarrow \infty} x_1(t) = 0$.

在控制律(7)作用下,系统(6)转化为

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= -c_1 \frac{x_1}{\sqrt{1+\gamma^2}} - \operatorname{sgn}(x_1)\hat{d}_1 + \xi_1, \\ \dot{x}_2 &= v + \left[c_1 \frac{x_1}{\sqrt{1+\gamma^2}} + \operatorname{sgn}(x_1)\hat{d}_1 \right] x_3 - x_3 \xi_1 + \xi_2, \\ \dot{x}_3 &= - \left[c_1 \frac{x_1}{\sqrt{1+\gamma^2}} + \operatorname{sgn}(x_1)\hat{d}_1 \right] x_2 + x_2 \xi_1. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

现将系统的控制问题转化为寻找饱和控制输入 v 使得状态 $x_2(t)$ 、 $x_3(t)$ 稳定.

情况 1: 当 $\alpha_1 \neq 0$ 时, 对 (x_2, x_3) 子系统选用如下储能函数:

$$V_2(x_2, x_3) = 0.5x_2^2 + 0.5x_3^2. \quad (12)$$

由式(12)对时间微分并将系统(11)中后两个方程代入计算可得

$$\dot{V}_2 = x_2(v + \xi_2). \quad (13)$$

这就意味着 (x_2, x_3) 子系统关于输入 v 和输出 x_2 是无源的, 并且无源特性与 ω 的取值无关.

选择如下的鲁棒控制律:

$$\alpha_2 = -c_2 \frac{x_2}{\sqrt{1+\gamma^2}} - \operatorname{sgn}(x_2)\hat{d}_2. \quad (14)$$

式中: \hat{d}_2 是 d_2 的估计值; $\gamma = \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2}$; c_2 是待设计的正常数, 并且保证 $|\alpha_2| \leq v_{\max}$.

将式(14)代入式(13)计算可得

$$\dot{V}_2 = -c_2 \frac{x_2^2}{\sqrt{1+\gamma^2}} - |x_2|[\hat{d}_2 - \operatorname{sgn}(x_2)\xi_2]; \quad (15)$$

当 $\hat{d}_2 \geq |\xi_2|$ 时, 由方程(15)可得

$$\dot{V}_2 \leq 0. \quad (16)$$

因为 V_2 正定并且关于状态 (x_2, x_3) 是径向无界的, 所以 $V_2(t)$ 、 $x_2(t)$ 和 $x_3(t)$ 在 $[0, \infty)$ 上都是有界的, 因此状态 (x_2, x_3) 也不会出现有限时间逃逸现象. 对方程(15)两边积分可得 $x_2(t)$ 在 $[0, \infty)$ 上也是平方可积的, 进一步有 $\dot{x}_2(t)$ 在 $[0, \infty)$ 上有界. 应用巴巴拉特引理, 并结合无源性分析方法可获得状态 $x_2(t)$ 、 $x_3(t)$ 的渐近稳定, 即 $\lim_{t \rightarrow \infty} x_2(t) = 0$, $\lim_{t \rightarrow \infty} x_3(t) = 0$.

情况 2: 当 $\alpha_1 = 0$ 时, 虽然 (x_2, x_3) 子系统的无源特性与 ω 的取值无关. 但由方程组(11)中后两个方程可知, 此时仅有状态 x_2 可控, 状态 x_3 是不可控的. 为了实现对状态 (x_2, x_3) 的控制, 将控制输入 ω 修改为如下控制律:

$$\omega = \begin{cases} \alpha_1; \alpha_1 \neq 0 \text{ 或 } \gamma = 0; \\ \omega^*; \alpha_1 = 0 \text{ 且 } \gamma \neq 0. \end{cases} \quad (17)$$

式中: $\omega^* \leq \omega_{\max}$, 这样利用情况 1 的设计方法就可以完成系统(11)所有状态的稳定设计问题.

因为符号函数的出现会引起抖振现象, 这在实

际控制中是不期望出现的, 为此用饱和函数代替符号函数对控制信号进行平滑处理, 饱和函数如下:

$$\operatorname{sat}(u) = \begin{cases} 1; & u \geq 1, \\ u; & |u| < 1, \\ -1; & u \leq -1. \end{cases} \quad (18)$$

式中: $u = x/\varepsilon$, ε 是一个小的正常数.

在下节中, 将给出参数 \hat{d}_i 的在线调节机制, 使得 $\dot{V}_i \leq 0$ ($i=1, 2$). 此时, 系统(6)在控制律(14)、(17)作用下的闭环系统所有状态有界, 并且最终渐近收敛到零.

2.2 参数调节机制设计

本研究的设计目的是要保证 $\dot{V}_i \leq 0$, 即要保证系统(6)在控制律(14)和(17)作用下处于负反馈. 下面给出 $\dot{V}_i \leq 0$ 的设计过程.

为了简化鲁棒自适应控制器的设计和闭环系统的分析, 采用一种分段常参数的方式调节估计参数 \hat{d}_i ($i=1, 2$). 假设对估计参数 \hat{d}_i 选择了一个正序列 $H = \{h(i) : i=1, 2, \dots, \infty\}$, 对于函数 $h(i)$ 的惟一要求就是它是严格单调递增的并且有 $\lim_{i \rightarrow \infty} h(i) = \infty$, 首先令 $\hat{d}_i = h(1)$, $t_i = 0$.

定义切换条件为: 当 $t > t_i$ 时:

$$V_i(t) > V_i(t_i) + c; i=1, 2; \quad (19)$$

或当 $t > t_i + \tau$ 时,

$$V_i(t) - V_i(t_i^+) > - \int_{t_i}^t c_i \frac{x_i^2(s)}{\sqrt{1+\gamma^2}} ds; i=1, 2. \quad (20)$$

式中: t_i ($i=1, 2, \dots$) 为切换时刻, $V_i(t_i^+)$ 为切换后的值, τ, c 为待设计的正常数.

定义切换逻辑为: 当切换条件(19)或(20)满足时, 将参数 \hat{d}_i 切换到 $h(2)$, 然后将 \hat{d}_i 切换到 $h(z)$, 令 $h=t$ 并且重复上述过程.

对于固定有限的 \hat{d}_i 值, 闭环系统的解显然存在. 因此, 在一个切换区间 (t_i, t_{i+1}) 内, 当正定函数 $V_i(t)$ ($i=1, 2$)、增加 c 或者不等式(20)成立时, 闭环系统的解也存在. 所以 $V_i(t)$ 和 $x_i(t)$ ($i=1, 2, 3$) 在 (t_i, t_{i+1}) 上都是有界的, 同时 $x_i(t)$ ($i=1, 2$) 也是平方可积的, 在 (t_i, t_{i+1}) 上不会出现有限时间逃逸现象.

3 稳定性分析

定理 1 将 2 章中得到的鲁棒自适应控制器(14)和(17)作用于系统(6). 那么对于任意初始条件, 闭环系统的所有状态在 $[0, \infty)$ 上有界, 并且当干扰为零时, 进一步可以获得所有状态的渐近稳定, 即, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, $x(t) \rightarrow 0$.

证明:因为对于固定有限的 \hat{d}_i 值(即切换有限次时),闭环系统的解在 $(0, t_1)$ 上存在, t_1 为最后切换时刻. 现在仅需要证明如下两个问题:

1) 当 \hat{d}_i 仅切换有限次时,闭环系统所有状态在 $[t_1, \infty)$ 上有界并且最终收敛到零.

2) \hat{d}_i 只能切换有限次.

第一步:假设 \hat{d}_i 切换了有限次(l 次),取最后切换时刻为 t_1 ,由切换条件(19)和(20)可得

$$V_i(t) \leq V_i(t_1) + c; t > t_1, i = 1, 2, \quad (21)$$

和

$$V_i(t) \leq V_i(t_1^+) - \int_{t_1}^t c_i \frac{x_i^2(s)}{\sqrt{1+\gamma^2}} ds; \quad t > t_1 + \tau, i = 1, 2 \quad (22)$$

否则就会有进一步的切换发生. 由式(21)和(22)可以得到所有 $V_i(t)$ 在 $[t_1, \infty)$ 上是有界的, 因为 $V_i(t)$ 正定并且关于状态 (x_1, x_2, x_3) 是径向无界的, 所以 $x_i(t)$ 在 $[t_1, \infty)$ 上也是有界的. 由式(22)可得 $\dot{x}_i(t)$ 在 $[t_1, \infty)$ 上是平方可积的. 由于假设 \hat{d}_i 有界, 进一步可以得到控制 v, ω 在 $[t_1, \infty)$ 上有界, 从而 $\dot{x}_i(t)$ ($i=1, 2, 3$) 在 $[t_1, \infty)$ 上有界. 由巴巴拉特引理及无源性分析方法可以得到 $\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = 0$.

第二步:现在来证明 \hat{d}_i 实际上只能切换有限次. 首先证明 \hat{d}_1 只能切换有限次. 假设 \hat{d}_1 可以切换无限次, 取时刻 t_1 使得 \hat{d}_1 切换了 l 次并且有

$$\hat{d}_1 \geq |\xi_1|. \quad (23)$$

设 t_2 为下一切换时刻, 那么, 由切换条件(19)和(20)有

$$V_1(t_2) > V_1(t_1) + c, \quad (24)$$

或

$$V_1(t_2) - V_1(t_1^+) > - \int_{t_1}^{t_2} c_1 \frac{x_1^2(s)}{\sqrt{1+\gamma^2}} ds. \quad (25)$$

同时, 因为在 (t_1, t_2) 上没有切换发生, 由式(9)及式(23)可得

$$\dot{V}_1 \leq -c_1 \frac{x_1^2}{\sqrt{1+\gamma^2}} \leq 0; t \in (t_1, t_2). \quad (26)$$

这就意味着式(24)及(25)都不能成立. 因此, \hat{d}_1 只能切换有限次. 利用与上面相同的反证法可以证明 \hat{d}_2 实际上也只能切换有限次. 证明完成.

4 仿真实验

将本文设计的饱和鲁棒自适应控制器作用于系统(6)的控制仿真实验. 系统初始状态取为 $x(t) = [1.5 \ 1 \ 2]^T$; 控制上界值取为 $\omega_{\max} = 1.5, v_{\max} = 1.5$; 干扰取为 $\xi_1 = -0.2\omega, \xi_2 = 0.2v$, 干扰上界估计

参数取为 $\hat{d}_1(0) = \hat{d}_2(0) = 0.03$; 正序列取为 $H = \{0.03i : i=1, 2, \dots\}$; 设计正参数取为 $c = 0.01, \tau = 0.1, c_i = 1, i=1, 2, \epsilon = 0.001$. 仿真结果如图2~4所示.

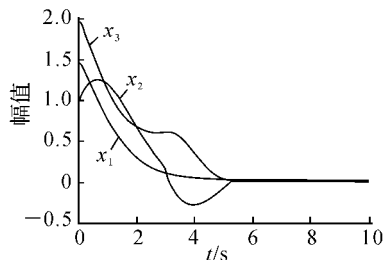


图2 状态变量随时间的变化

Fig. 2 Evolution of variable states

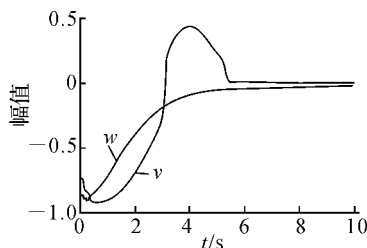


图3 控制变量随时间的变化

Fig. 3 Evolution of controls

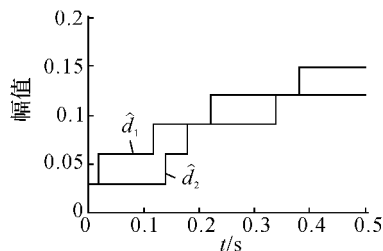


图4 自适应参数随时间的变化

Fig. 4 Evolution of adaptive parameters

5 结 语

对于非完整约束移动机器人中存在的输入干扰不确定性, 且其不确定性满足匹配条件, 本文借助无源性分析方法设计出了一种时不变非连续的鲁棒自适应控制器, 该控制器可以保证移动机器人所有状态以指数方式渐近收敛. 在实际控制中, 考虑到机器人的运动学约束及电机转速的限制, 设计了饱和控制律并且受显式上界值的约束. 仿真结果显示在本文设计的控制器作用下, 移动机器人的所有状态在外界干扰为零时均以指数方式收敛到零.

参考文献 (References):

[1] SAMSON C. Control of the chained systems application

- to path following and time-varying point-stabilization of mobile robots [J]. **IEEE Transactions on Automatic Control**, 1995, 40(1):64-77.
- [2] JIANG Z P, NIJMEIJER H. A recursive technique for tracking control of nonholonomic systems in chained form [J]. **IEEE Transactions on Automatic Control**, 1999, 44(2):265-279.
- [3] JIANG Z P. Saturated stabilization and tracking of a nonholonomic mobile robot [J]. **Systems & Control Letters**, 2001, 42:327-332.
- [4] TAYEBI A, RACHID A. Backstepping-based discontinuous adaptive control design for the stabilization of nonholonomic mobile robot with matched uncertainties [C]// **Proceeding of the 36th Conference on Decision and Control**. San Diego: IEEE, 1997: 3664-3669.
- [5] JIANG Z P. Robust controller design for uncertain nonholonomic systems [C] // **Proceeding of the American Conference**. San Diego: IEEE, 1999:3525-3529.
- [6] TUKAO T, NAKAGAWA H, ADACHI N. Adaptive tracking control of a nonholonomic mobile robot [J]. **IEEE Transactions on Robotics and Automation**, 2000, 16(5): 609-614.
- [7] KIM B, TSOTRAS P. Controllers for unicycle-type wheeled robots: theoretical results and experimental validation [J]. **IEEE Transactions on Robotics and Automation**, 2002, 18(3): 294-307.
- [8] MINF F. Recursive backstepping stabilization of a wheeled mobile robot [C]// **IEEE conference on Robotics and Automation**. Hammamet: IEEE, 2004:135-139.
- [9] 冯纯伯,张侃健. 非线性系统的鲁棒控制[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 148-155.
FENG Chun-bo, ZHANG Kan-jian. **Robust control for nonlinear systems** [M]. Beijing: Science Press, 2004: 144-155.
- [10] YE X D. Global adaptive control of nonlinearly parameterized systems [J]. **IEEE Transactions on Automatic Control**, 2003, 48(1): 169-173.

(上接第 1116 页)

制精度为 10 nm. 试验时控制精度低于仿真时的原因:一方面,在于恒温室的环境温度还有微弱变化;另一方面数学模型有一点摄动.

4 结 语

基于惩罚函数的多模态控制策略,经仿真及试验证明,在 2 个模态之间平稳过渡是有效的. 该控制策略可以推广到多个模态之间的平稳过渡,但在多个模态之间平稳过渡时,要求对惩罚函数进行加权. 另外惩罚函数可根据系统的特性作出不同的定义,惩罚函数中的系数也可根据系统的要求作出适当调整.

参考文献 (References):

- [1] 邹伯敏. 自动控制理论 [M]. 北京:机械工业出版社, 2002.
- [2] AHN Kyoungkwan, YOKOTA Shinichi. Intelligent switching control of pneumatic actuator using on/off solenoid valves [J]. **Mechatronics**, 2005, 15(6):683-702.
- [3] LEE T H, TAN K K, HUANG S N, et al. Intelligent control of precision linear actuators [J]. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, 2000, 13(6): 671-684.
- [4] TAN S H, YU Y. Adaptive fuzzy modeling of nonlinear dynamical systems [J]. **Automatica**, 1996, 32(4):637-643.
- [5] 胡旭晓,赵亮. 基于变形体的热驱动部件多模态控制策略研究[J]. 浙江大学学报:工学版, 2005, 39(5):632-636.
HU Xu-xiao, ZHAO Liang. Multi-modality control of thermal drive part based on deformable body [J]. **Journal of Zhejiang University: Engineering Science**, 2005, 39(5):632-636.
- [6] 陈国良,黄心汉,王敏. 基于模糊 PD 控制的微操作机械手真空微夹研究[J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2005, 33(2):37-40.
CHEN Guo-liang, HUANG Xin-han, WANG Min. Study of the micro-tool for micromanipulator based on fuzzy PD control [J]. **Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science Edition**, 2005, 33(2):37-40.