

一种高效能的机器人模糊控制方案¹⁾

李 伟

(智能技术与系统国家实验室 清华大学计算机系 北京 100084)

Janocha Hartmut

(Lehrstuhl für Prozeß automatisierung, University of Saarland Saarbrücken 66041, Germany)

摘 要

本文提出一种高效能的模糊控制方案,来提高机器人当存在摩擦力和负载等不确定因素时以及动力学参数变化时的系统响应特性。该控制方案是由一个模糊逻辑(FL)控制器(主控制器)和一个传统的微分(D)控制器(辅助控制器)所构成。FL控制器用来提高系统的瞬态特性和稳态精度,D控制器用来保证系统的稳定性。在这一控制方案基础上,获得理想控制特性的主要思想是研究和调整语言变量的隶属度函数。模拟结果表明了这一控制方案的有效性和鲁棒性。此外,这一控制方案具有结构简单且易于实现的优点。

关键词: 模糊控制,机器人,非线性。

1 引言

目前,绝大多数商品化的机器人都是把传统的PID控制器作为角关节的控制,因为这类控制器结构简单。然而,PID控制器难以保证机器人在全局范围内获得理想的控制特性,因为它的运动学方程是高度非线性而且紧耦合。另外,由于动力学方程的参数难以精确估算以及摩擦力和负载等不确定因素的存在,都将使系统的控制特性变坏。自适应控制方法能够用来改善其控制性能,但是它们的算法对实时控制来说又太复杂。

基于经验知识的模糊控制器不需要一个精确的数学模型,所以人们设法用模糊逻辑对机器人进行控制。在文献[1],一种模糊控制方案被用于具有线性动力学的单关节机械手。文献[2]中提出一种分层体系基于知识的机器人控制方案,但它的控制结构比较复杂。使用自组织的模糊控制方法^[3,4]看来难以在少的采样次数内完成规则库的调节。Lim和Higama^[5]提出一种具有简单结构的模糊控制方法,这种控制方案是由一个主导的PI控制器与一个辅助的FL控制器组成,但是其所给出的研究结果只限于控制在给定初始姿态下施加单一幅值阶跃响应,并且没有考虑摩擦力和负载等不确定等因素。

本文提出一种新的机器人模糊控制方案^[6,7],如图1所示。它是由一个FL控制器和一个D控制器组成。与文献[5]中的方案不同,在这一方案中,FL控制器作为主导控制

1) 国家智能技术与系统重点实验室基金资助。
本文于1992年11月30日收到

器用来改善系统的瞬态和稳态性能,而 D 控制器作为辅助控制器用来保证系统的稳定性。该文的主要目的是研究如何选择合适的语言变量的隶属度函数以便获得理想的控制性能。我们对一个两关节机械手(见图 2)的控制作了多种不同情况下仿真实验,如:在相同初始姿态下施加不同幅值阶跃输入 (Global Problem), 动力学参数改变 (Robust Problem), 摩擦力和负载等不确定等因素存在 (Uncertain Problem)。研究结果表明此控制方案的有效性和鲁棒性。

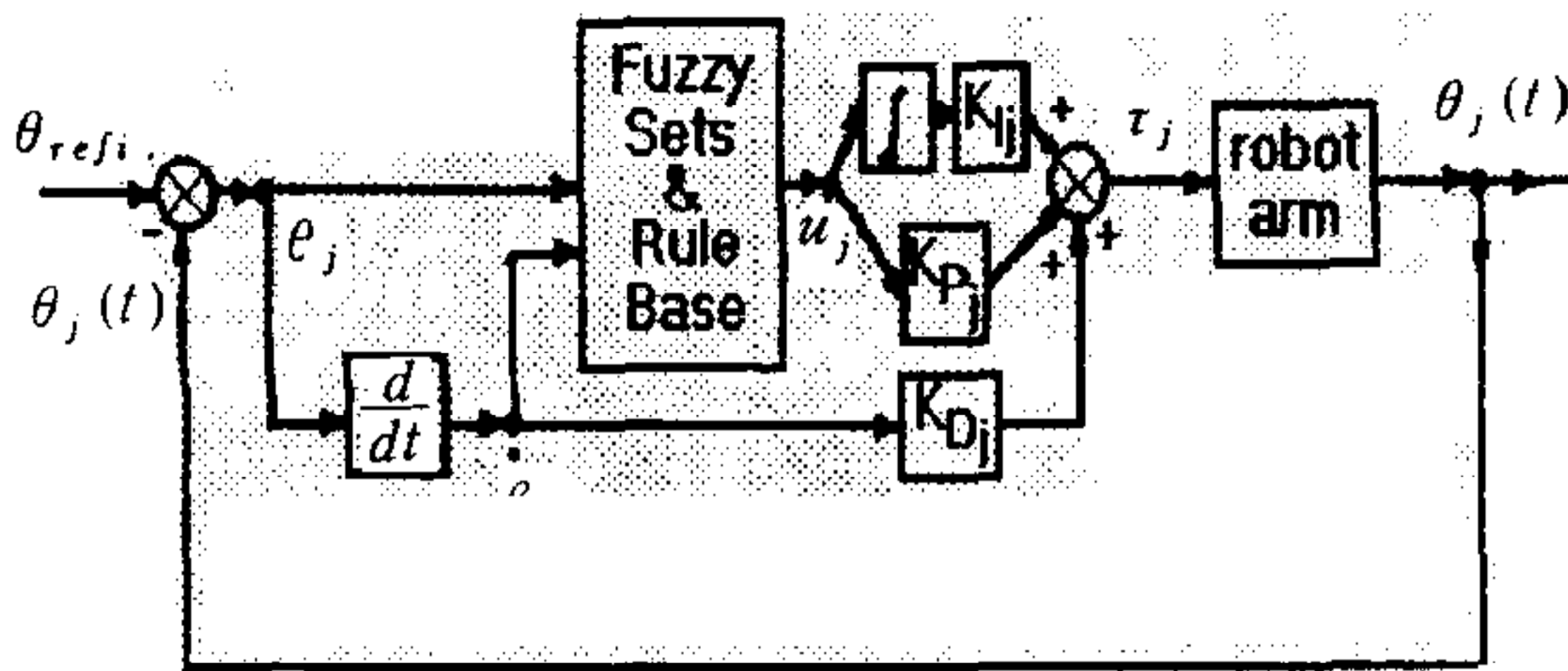


图 1 机器人的模糊控制方案

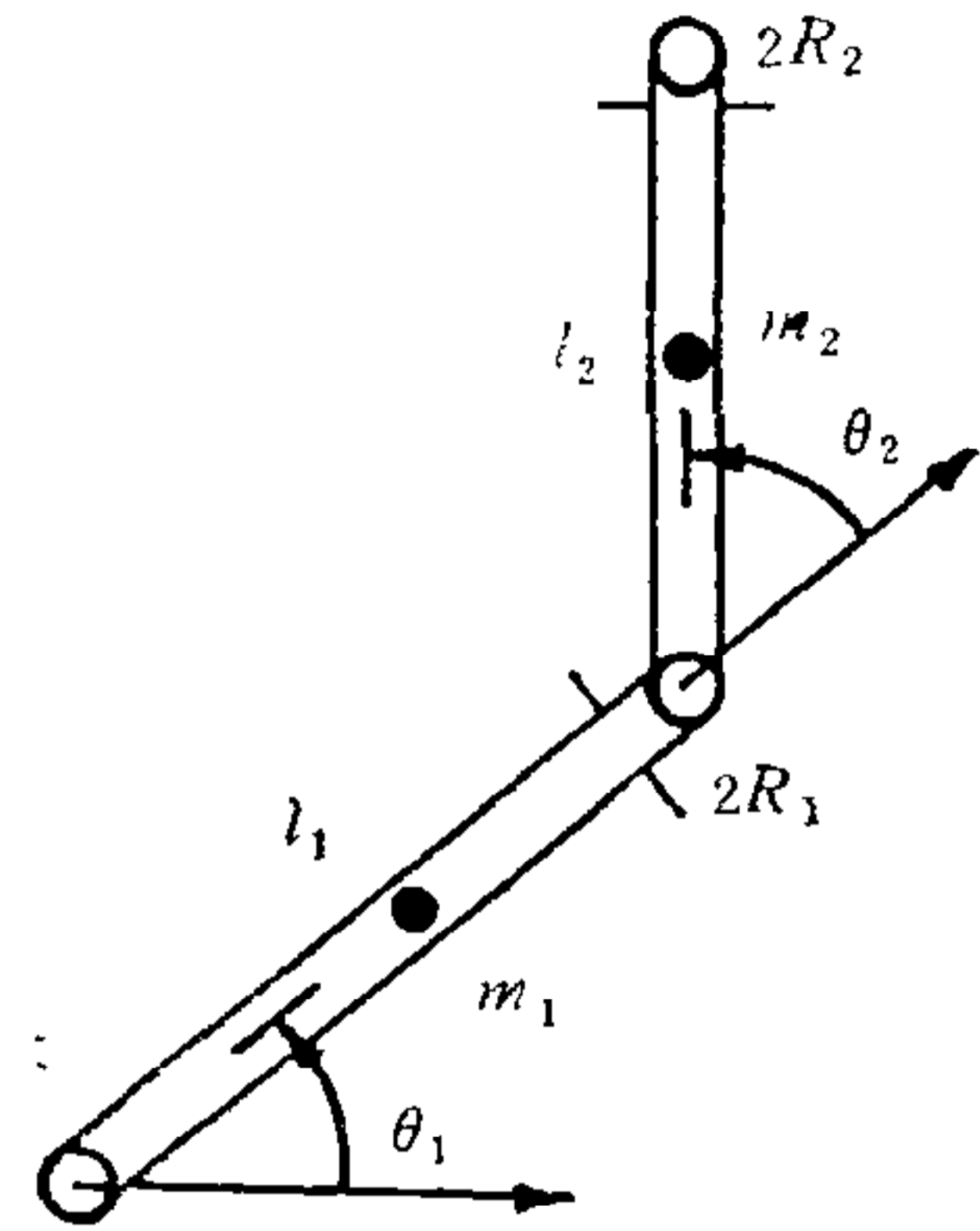


图 2 两关节的机械手

2 动力学模型和 PID 控制

使用 Lagrange-Euler^[8] 和 Newton-Euler^[9] 方法可以得到一般化的机器人动力学方程。图 2 给出了一个两关节杆的机械手,其对应的(含负载项和摩擦力项)动力学方程^[10]如下:

$$\begin{aligned} \tau_1 = & \left[\frac{1}{4} (m_1 R_1^2 + m_2 R_2^2) + \frac{1}{3} (m_1 l_1^2 + m_2 l_2^2) + m_2 l_1^2 + m_2 l_1 l_2 \cos \theta_2 \right] \ddot{\theta}_1 \\ & + \left(\frac{1}{4} m_1 R_2^2 + \frac{1}{3} m_2 l_2^2 + \frac{1}{2} l_1 l_2 m_2 \cos \theta_2 \right) \ddot{\theta}_2 - \frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_2^2 \sin \theta_2 \\ & - m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 + \frac{1}{2} m_2 l_2 g \cos(\theta_1 + \theta_2) + \left(\frac{1}{2} m_1 + m_2 \right) l_1 g \cos \theta_1 \\ & + v_1 \dot{\theta}_1 + l_1 \sin \theta_2 f_x + (l_2 + l_1 \cos \theta_2) f_y + n_z \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \tau_2 = & \left(\frac{1}{4} m_2 R_2^2 + 2m_2 l_1 l_2 \cos \theta_2 + \frac{1}{3} m_2 l_2^2 \right) \ddot{\theta}_1 + \left(\frac{1}{4} m_1 R_2^2 + \frac{1}{3} m_2 l_2^2 \right) \ddot{\theta}_2 \\ & + \frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1^2 \sin \theta_2 + \frac{1}{2} m_2 l_2 g \cos(\theta_1 + \theta_2) + v_2 \dot{\theta}_2 + l_2 f_y + n_z \end{aligned} \quad (2)$$

这里 $\theta_1(t)$ 与 $\theta_2(t)$ 是关节转角, $\tau_1(t)$ 和 $\tau_2(t)$ 是关节力矩, m_1 和 m_2 分别是臂 1 和臂 2 的质量。所有质量假设集中于臂的中心^[10]。从动力学方程组 (1)–(2) 可以看

出,其动力学特征既是非线性的又相互耦合。此外,实际上动力学方程组中的参数,如质量 m_1 和 m_2 及臂长度 l_1 和 l_2 都很难精确得到。

采用 PID 控制,提供给第 j 个角关节的力矩可以由下式计算^[11]:

$$\tau_j = K_{Pj}e_j(t) + K_{Ij} \int e_j(t)dt + K_{Dj}\dot{e}_j(t) \quad (3)$$

这里 K_{Pj} , K_{Ij} 和 K_{Dj} 是控制器的参数, $e_j(t) = \theta_{refj} - \theta_j(t)$ 是第 j 个角变量误差,其中 $j = 1, 2$ 。

3 模糊控制方案

图 1 给出了控制方案的框图。在 FL 控制器中,其模糊化部分是将实际的物理量通过隶属函数转变为模糊量。FL 控制器包含一个模糊规则集和 Min-Max 推理算法,以获得合适的模糊控制值。隶属函数和模糊规则集根据专家的知识或操作者的经验确定。第 j 个角关节控制器的输入信号是关节角误差 $e_j(t)$ 以及它的微分量 $\dot{e}_j(t)$,控制器的输出信号 $u_j(t)$ 由模糊规则集确定。语言变量 PB(positive big), PM(positive medium), PS (positive small), NS (negative small), NM (negative medium), NB (negative big) 和 ZO (zero) 用于模糊化 $e_j(t)$ 和 $u_j(t)$,而 P (positive), N (negative) 和 ZO (zero) 用来模糊化 $\dot{e}_j(t)$ 。图 3 所示。角关节 1 和角关节 2 的模糊规则集在逻辑上是一致的,如表 1 所示。一般而言,三角形的隶属函数常用于模糊控制中。这篇文章的主要目的是研究如何选择语言变量的隶属函数以获得理想的控制性能。由经验可知道,系统的瞬态响应取决于 $\dot{e}_j(t)$ 的隶属函数,而稳态误差则受 $u_j(t)$ 的隶属函数的影响。因此,我们提出如下准则:

- 1) 如果 $\theta_j(t)$ 远离 θ_{refj} , 那么角关节上应施加强加的加速控制以减少其误差 $e_j(t)$ 。
- 2) 如果 $\theta_j(t)$ 接近 θ_{refj} , 则应施加强加的减速控制以抑制角关节的速度。
- 3) 如果在瞬态过程之后存在一个稳态误差,那么 FL 控制器应产生一个合适的输出 $u_j(t)$ 以便消除这一误差。

表 1 机械手角关节 1 和 2 的模糊规则集

\dot{e}_j \ e_j	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
N	PB	PM	PM	PS	ZO	NS	NM
ZO	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NS
P	PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NB

因为稳态误差与 $u_j(t)$ 的隶属函数 $\mu(PB)$, $\mu(PM)$, $\mu(PS)$, $\mu(NS)$, $\mu(NM)$ 和 $\mu(NB)$ 无关,因此我们只需要研究 $u_j(t)$ 的隶属函数 $\mu(ZO)$ 对稳态误差的影响以及研究 $e_j(t)$ 的隶属函数与瞬态特性的关系。按照上述准则,我们在常用的三角形隶属函

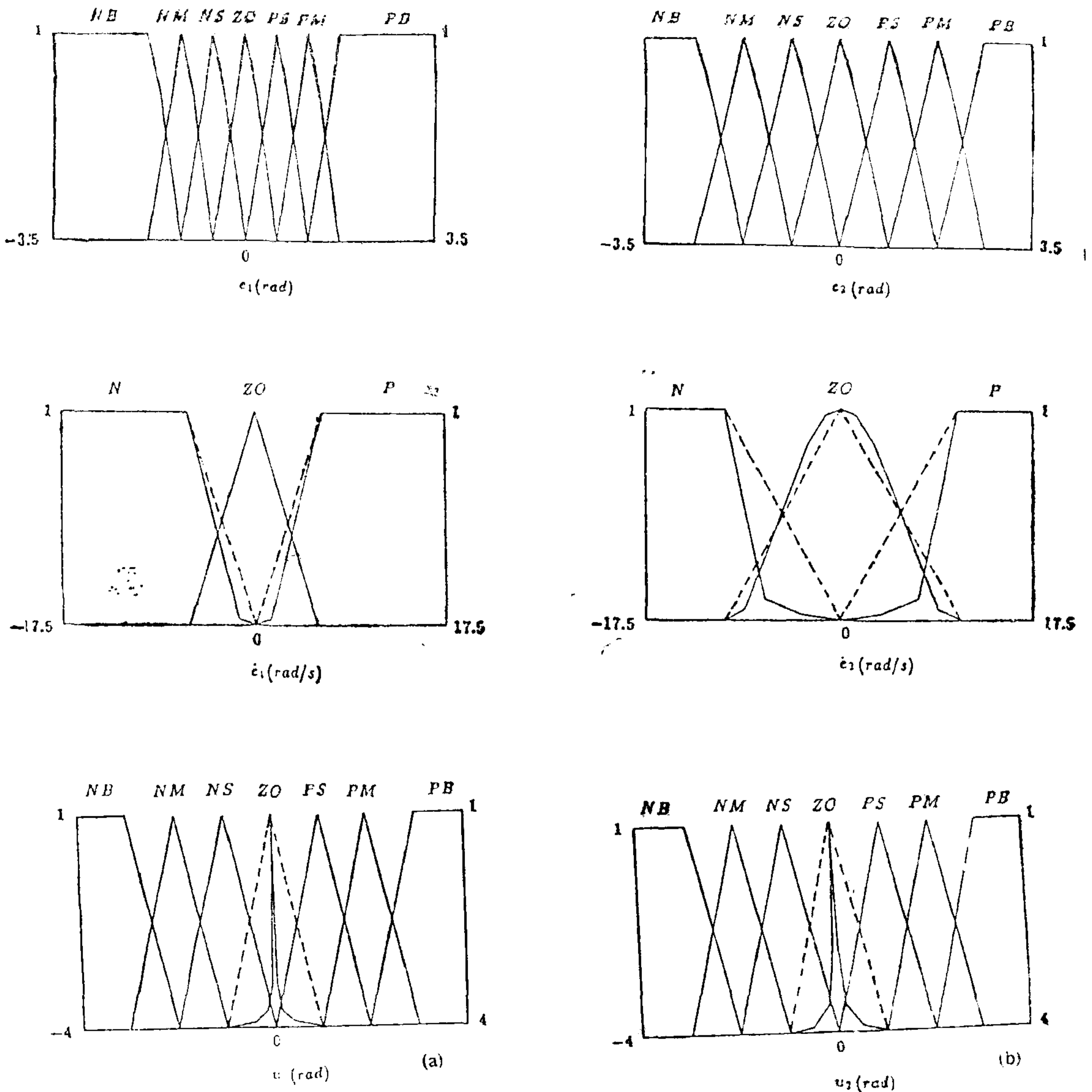


图3 对应于角关节1和2的隶属度函数

数的基础上通过增加插值点的办法来修改 $\dot{e}_j(t)$ 的隶属函数 $\mu(P)$, $\mu(ZO)$ 和 $\mu(N)$ 以及的隶属函数 $\mu(ZO)$, 并通过仿真研究机器人的控制性能。如果控制性能满意, 就得到所要求的隶属函数。因为角关节1和2的动力学特征不同, 所以所得到的隶属函数也不同。用质心法将模糊量再一次变换成为实际物理量。如果 $u_j(t)$ 采用图3所给出的隶属函数 $\mu(ZO)$, 当角关节量 $\theta_j(t)$ 移向其参考值 θ_{refj} 时在其附近有时会出现小幅度的高频脉冲振荡。D控制器可以用来保证响应的平滑性。使用这一控制方案, 加给第 j 个角

表 2 机械手和控制器的参数

Manipulator Data					
m_1	m_2	l_1	l_2	R_1	R_2
15.91kg	11.36kg	0.4325m	0.4325m	0.09 m	0.11m
Controller Parameters					
$K_{P_1} = 800\text{Nm/rad}$		$K_{I_1} = 200\text{Nm}/(\text{rad} \cdot \text{s})$		$K_{D_1} = 50(\text{Nm} \cdot \text{s})/\text{rad}$	
$K_{P_2} = 630\text{Nm/rad}$		$K_{I_2} = 100\text{Nm}/(\text{rad} \cdot \text{s})$		$K_{D_2} = 50(\text{Nm} \cdot \text{s})/\text{rad}$	

关节的力矩可如下计算:

$$\tau_j(t) = K_{P_j}u_j(t) + K_{I_j} \int u_j(t)dt + K_{D_j}\dot{e}_j(t) \quad (4)$$

4 模拟结果

为了说明所提出的控制方案的有效性和鲁棒性,我们进行了不同的模拟,如在给定初始姿态下施加不同幅值的阶跃输入和动力学参数改变后的系统响应。在表 2 中给出了机器人和控制器的参数。在所有的模拟过程中,时间步长 ΔT 选为 2ms; 角关节的初始值 $\theta_1(0)$ 和 $\theta_2(0)$ 置为零。

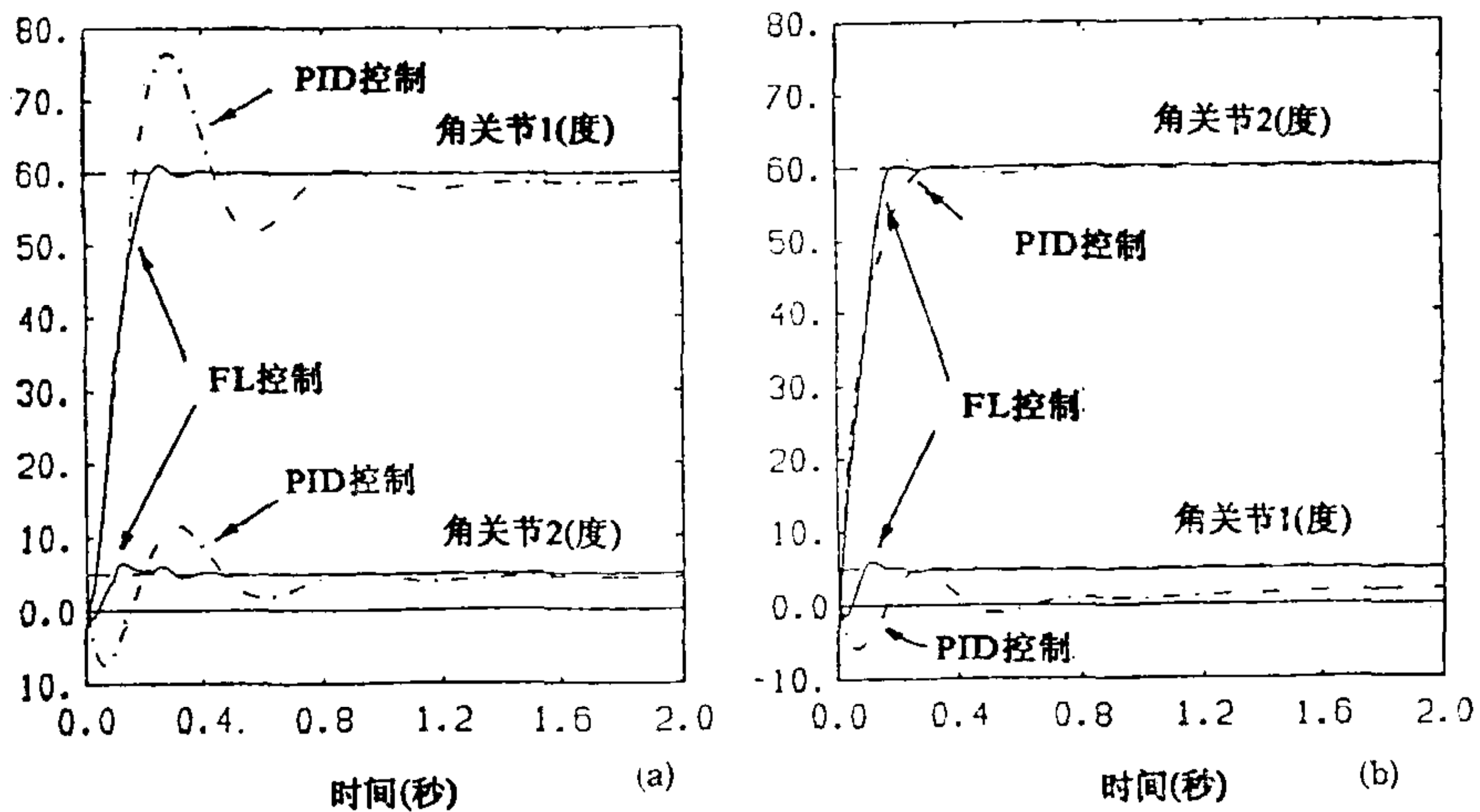


图 4 不同幅值的阶跃响应

(a) ($\theta_{ref1} = 60^\circ, \theta_{ref2} = 5^\circ$) (b) ($\theta_{ref1} = 5^\circ, \theta_{ref2} = 60^\circ$)

模拟 1. 不同幅值的阶跃响应

图 4(a) 的参考值为 $\theta_{ref1} = 60^\circ, \theta_{ref2} = 5^\circ$ 。在这一情况下, $e_1(0)$ 很大而 $e_2(0)$ 很小, 所以当角关节 $\theta_1(t)$ 以很高的速度移向 θ_{ref1} 时, 角关节 2 将经受一个由 $\theta_1(t)$ 产生的耦合力矩。在 PID 控制下, 在起动阶段 ($0s < t < 0.2s$) 角关节 $\theta_2(t)$ 由于耦合力矩

向参考值相反的方向运动,如图 4(a) 所示。然而,模糊控制能够有效地补偿这一耦合影响,同样获得理想的控制性能。

图 4(b) 给出的例子与图 4(a) 的模拟相反。因为 $e_1(0)$ 很小而 $e_2(0)$ 很大,当角关节 2 $\theta_2(t)$ 以高速向 θ_{ref2} 运动时,角关节 1 将经受一个由角关节 $\theta_2(t)$ 所产生的耦合力矩。类似地,角关节 1 的 PID 控制不能有效地补偿来自角关节 2 $\theta_2(t)$ 的耦合力矩,如图 4(b) 所示角关节 1 $\theta_1(t)$ 的响应特性变得非常差,这是由于控制器的参数不适合这一姿态。

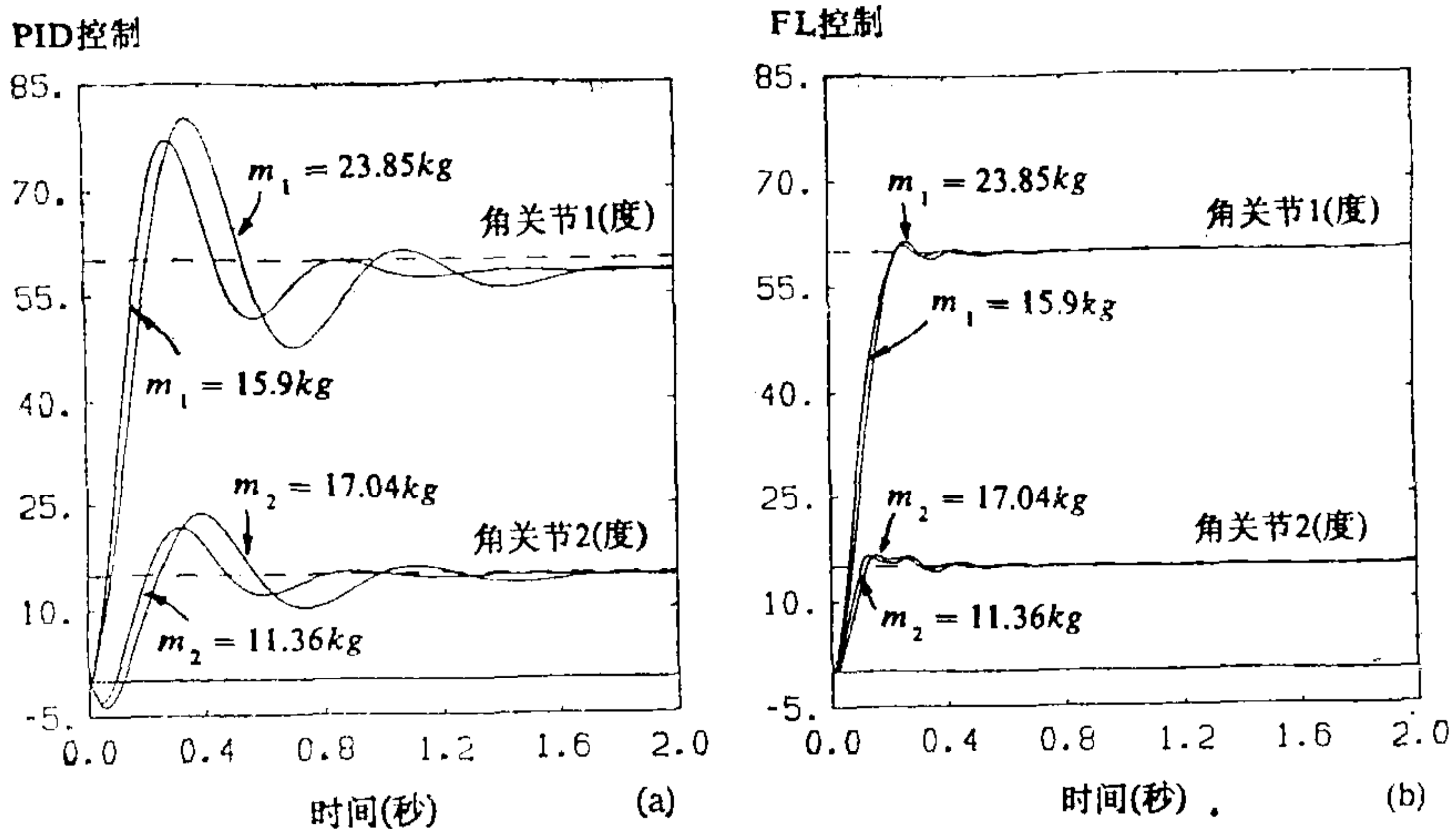


图 5 质量改变 50% 的阶跃响应 ($\theta_{ref1} = 60^\circ$, $\theta_{ref2} = 15^\circ$)

模拟 2. 质量的改变

在这一模拟中,假定其参考值 $\theta_{ref1} = 60^\circ$ 和 $\theta_{ref2} = 15^\circ$ 。我们将动力学方程中的质量 m_1 和 m_2 增加 50% (在实际当中尽管 m_1 和 m_2 不能准确获得但不会相差 50%), 然后模拟控制系统在这一条件下的鲁棒性。图 5(a) 给出的模拟结果表明,在质量 m_1 和 m_2 分别增加 50% 以后由 PID 控制的系统其响应特性变坏,如超调量增加而且振荡次数增加。而 FL 控制在质量 m_1 和 m_2 增加 50% 的条件目下仍能获得非常理想的控制特性如图 5(b) 所示。

模拟 3. 臂长的改变

在这一模拟中,仍假定其参考值 $\theta_{ref1} = 60^\circ$ 和 $\theta_{ref2} = 15^\circ$ 。我们将动力学方程中的几何参数 l_1 和 l_2 增加 50% (在实际中臂 l_1 和 l_2 也不会由于不准确而导致 50% 的误差)。显然,由于臂长度 l_1 和 l_2 的增加,将增加系统的不稳定性。图 6(a) 给出的模拟结果表明,在臂长 l_1 和 l_2 增加 50% 以后, PID 控制器将使系统的超调量和振荡次数明显增大。要使系统在这一几何参数改变的条件目下仍能良好地工作,应相应改变控制器的参数。而模糊控制同样展示了非常良好的鲁棒性(图 6(b))。

模拟 4. 摩擦力的变化

图 7 给出了当存在角关节摩擦力时控制机器人的模拟结果。参考值仍设置为 $\theta_{ref1} =$

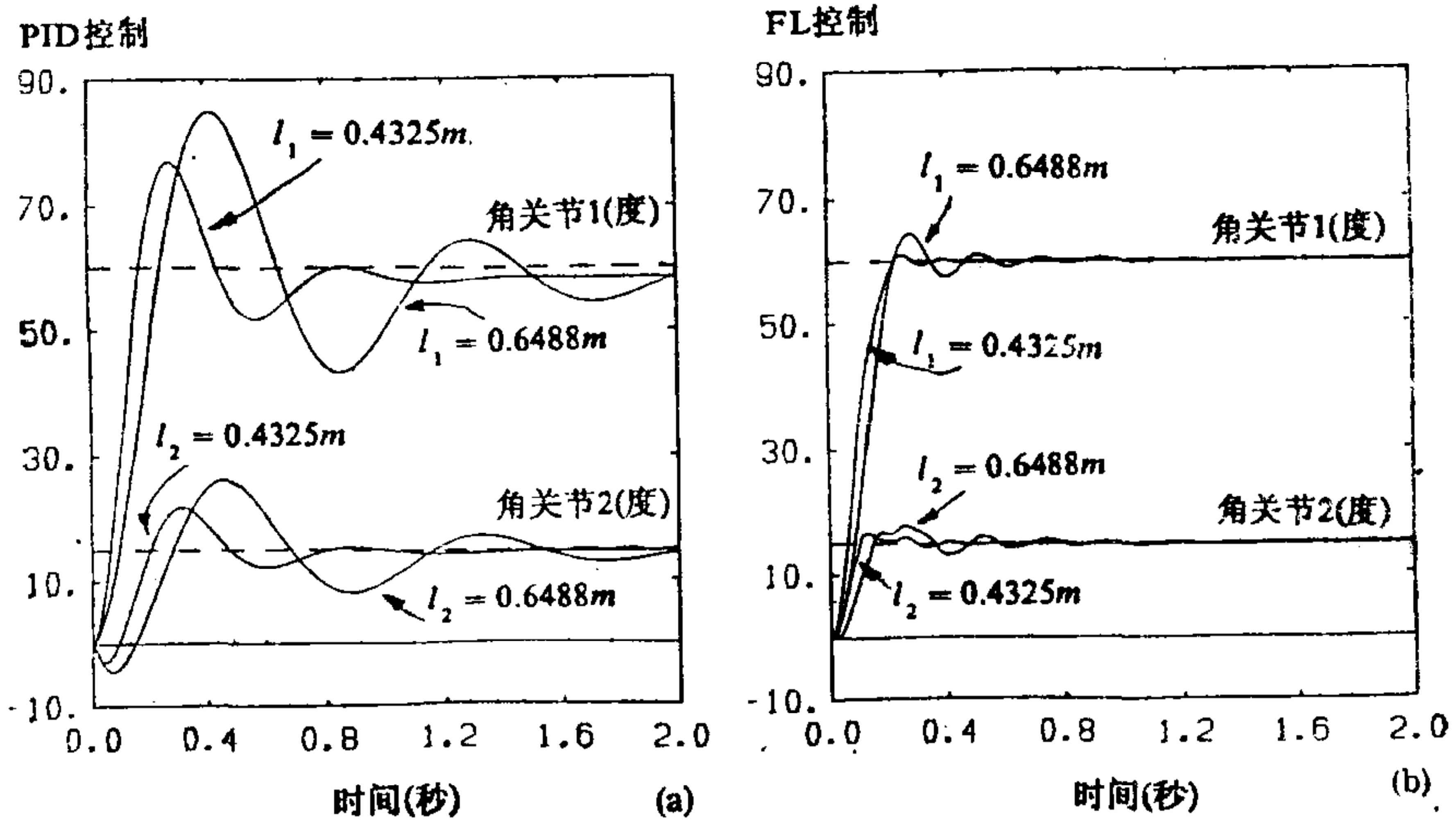


图6 臂长改变 50%的阶跃响应 ($\theta_{ref1} = 60^\circ, \theta_{ref2} = 15^\circ$)

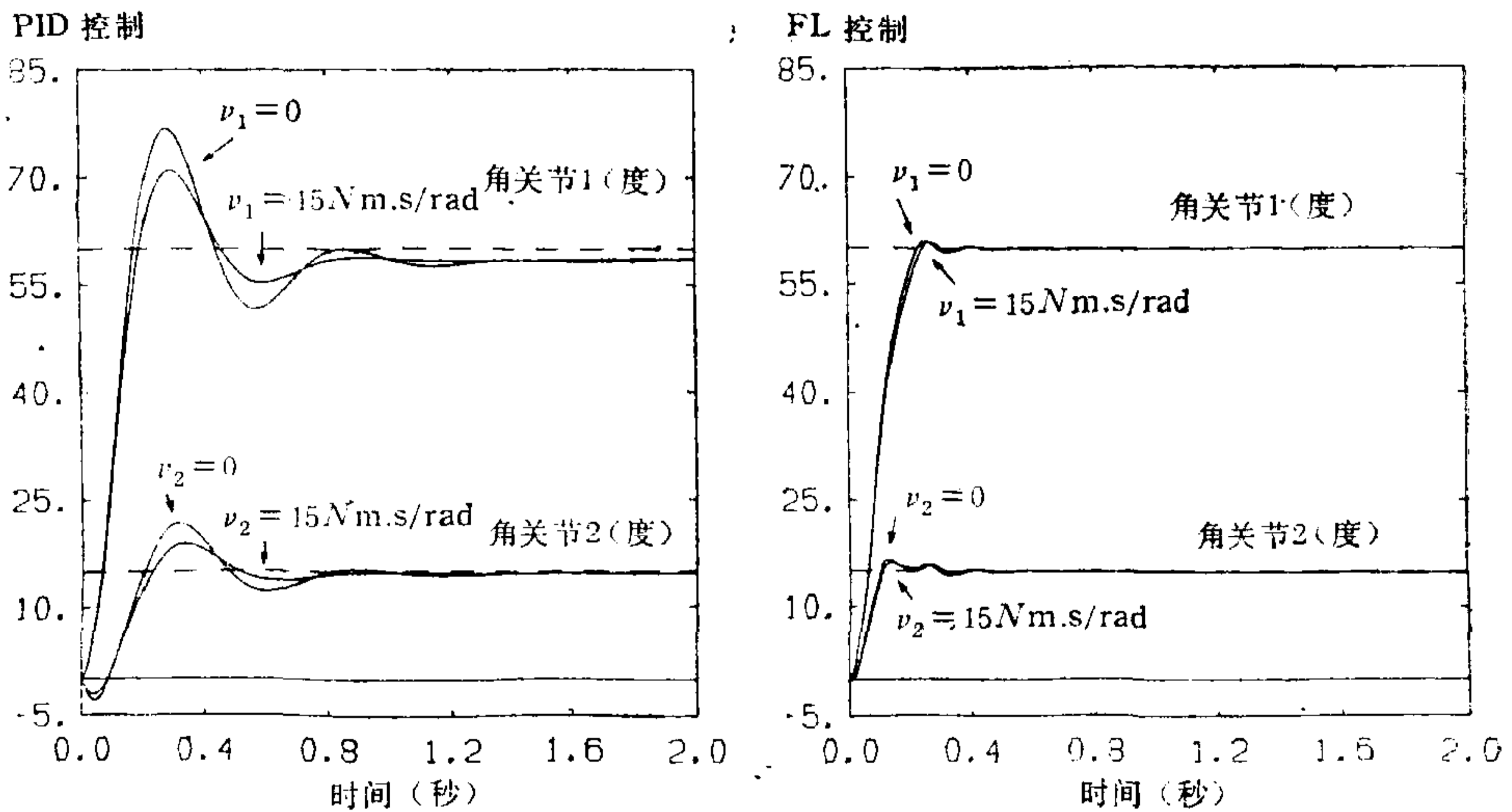


图7 摩擦力改变时的阶跃响应 ($\theta_{ref1} = 60^\circ, \theta_{ref2} = 15^\circ$)

60° 和 $\theta_{ref2} = 15^\circ$ 。在图 7(a) 中摩擦力的系数为: $\nu_1 = 0$ 和 $\nu_2 = 0$; 在图 7(b) 中摩擦力的系数为: $\nu_1 = 15 \text{ Nm} \cdot \text{s}$ 和 $\nu_2 = 15 \text{ Nm} \cdot \text{s}$ 。比较图 7(a)、(b), 可以发现使用 PID 控制器时摩擦力的变化对机器人的动态响应有着较大的影响。而 FL 控制器能够自适应补偿这些摩擦力, 以至于在没摩擦力和有摩擦力时均能获得理想的控制特性。

模拟 5. 负载的变化

图 8 给出了当负荷变化时控制机器人的模拟结果。参考值仍设置为 $\theta_{ref1} = 60^\circ$ 和 $\theta_{ref2} = 15^\circ$ 。在图 8(a) 中为空载: $f_x = 0, f_y = 0$ 和 $n_z = 0$; 在图 8(b) 中负载为: $f_x = 25 \text{ N}, f_y = 30 \text{ N}$ 和 $n_z = 20 \text{ Nm}$ 。比较图 8(a)、(b), 可以发现使用 PID 控制器时

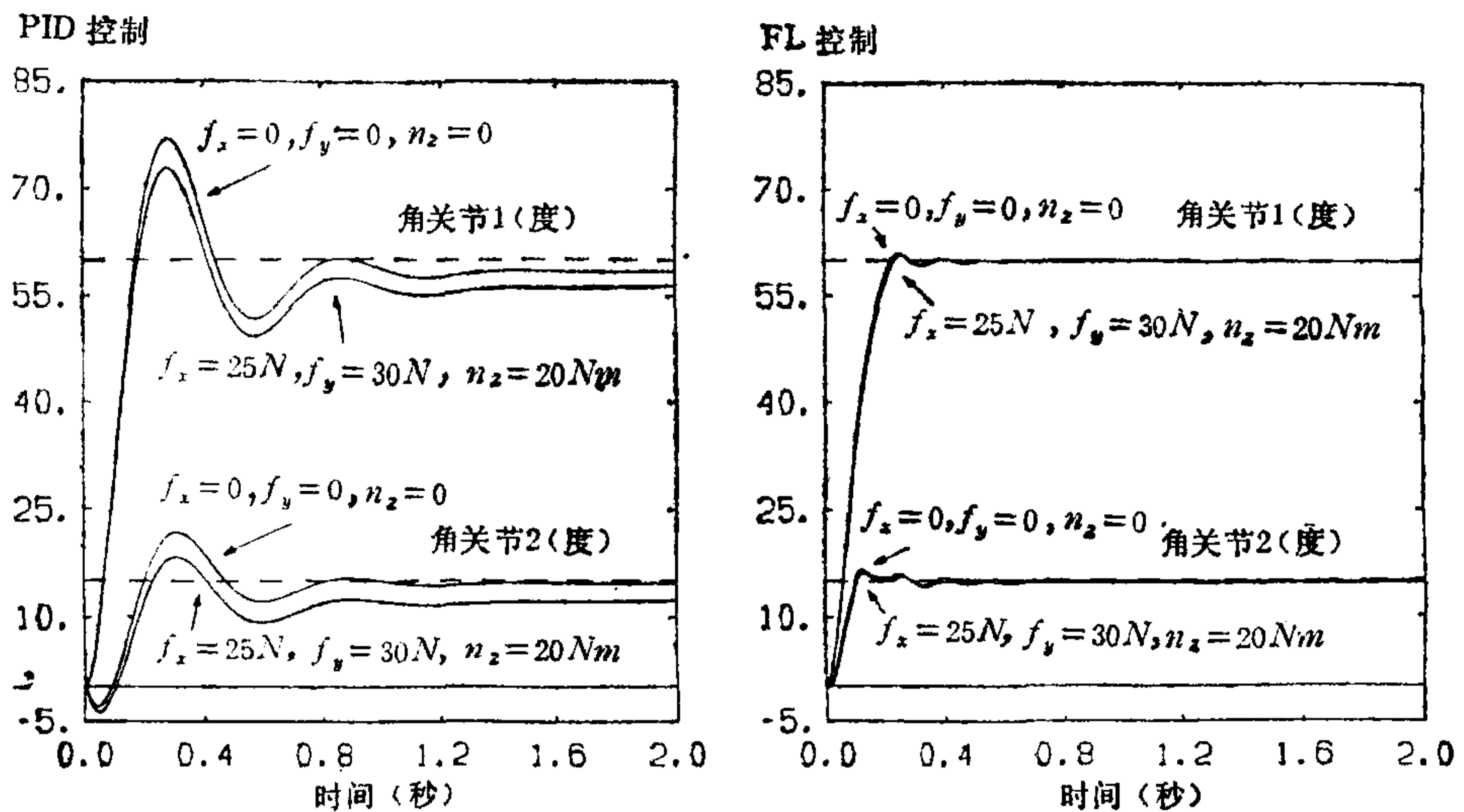


图 8 负荷和摩擦力变化时的阶跃响应 ($\theta_{ref1} = 60^\circ$, $\theta_{ref2} = 15^\circ$)

负载的变化对机器人的静态精度有着较大的影响。而 FL 控制器能够自适应补偿这些负载的变化,以至于在负载的变化时均能获得非常高的静态精度。

5 结论

在这篇文章中我们提出一种高效性的机器人模糊控制方法。其研究背景是与德国 Lehrstuhl für Prozeß automatisierung, University of Saarland 所研究的高精度机器人定标系统相结合。因为目前所有的定标系统都难以有效的考虑到机器人动态过程中的非确定因素(例如,摩擦力和负载变化的影响),所以我们设法在一简化的机器人模型基础上设计模糊控制器,然后利用这种控制器的鲁棒性在摩擦力和负载变化时仍能有效的获得理想的机器人控制特性。模拟结果表明,这一控制方法适用于像机器人这样具有非线性动力学特征的系统。由于它的鲁棒性,即使系统参数不能精确估算以及摩擦力和负载变化时仍能获得理想的控制特性。

另外,在这篇文章中我们通过研究语言变量的隶属度函数来获得理想的控制响应。如何利用系统的响应特性自适应的优化语言变量的隶属度函数,可参阅作者文献[12]中提出的一种方法。

致谢 该项研究工作的主要部分是在 Lehrstuhl für Prozeß automatisierung, University of Saarland, Germany 完成的。作者感谢张钺教授以及李耀通研究员和评审人对本文所提出的建设性修改意见。

参 考 文 献

- [1] Rattan K S. et. al. Rule-Based Fuzzy Control of a Single-Link Flexible Manipulator in the

- Presence of Joint Friction and Load Changes. Proc. of the 1989 American Control Conference, 2749—2750, 1989.
- [2] De Silva C W. and Machfarlane A G J. Knowledge-Based Control Approach for Robotic Manipulators. *International Journal of Control*, 1989, **50**(1):249—273.
- [3] Koh K C. et al. Application of a Self-Organizing Fuzzy Control to the Joint Control of a PUMA760 Robot, Proc. of IEEE International Workshop on Intelligent Robots and System'90, 537—554, 1990.
- [4] Wakileh B A M. and Gill K F. Robot Control Using Self-Organizing Fuzzy Logic. *Computers in Industry*, 1990, **15**:175—186.
- [5] Lim C M and Higama T. Application of Fuzzy Logic Control to a Manipulator. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1991, RA-7: 687—691.
- [6] Li W and Zhang B. Fuzzy Control of Robotic Manipulators in the Presence of Joint Friction and Loads Changes. The 1993 ASME International Computers in Engineering Conference, San Diego, CA, 1993.
- [7] Li W, et al. Effect of Membership Functions of Linguistic Variables on Control Performance. The First Chinese World Congress on Intelligent Control and Intelligent Automation, 866—876, Beijing, 1993.
- [8] Hollerbach J M. A Recursive Lagrangian Formulation Of Manipulator Dynamics and a Comparative Study of Dynamics Formulation Complexity. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1980, **SMC-10**: 730—736.
- [9] Luh J Y S, Walker M W and Paul R P C. On-line Computational Scheme for Mechanical Manipulators. *ASME Journal of Dynamic System, Measurement, and Control*. 1980, **102**:69—76.
- [10] Brady M et al. Robot Motion: Planning and Control. Cambridge, MA: MIT-Press, 1982.
- [11] Craig J J. Introduction to Robotics Mechanics and Control. Massachusetts: Addison-Wesley, 1986.
- [12] Li W. A New Self-Organizing Fuzzy Controller. The 3rd International Workshop on Advanced Motion Control. (to appear), at the University of California at Berkeley, USA, March 20—23, 1994.

AN EFFECTIVE FUZZY CONTROL SCHEME FOR ROBOTS

LI WEI

(Department of Computer Science, National Laboratory of Intelligent Technology and Systems, Tsinghua University, Beijing 100084)

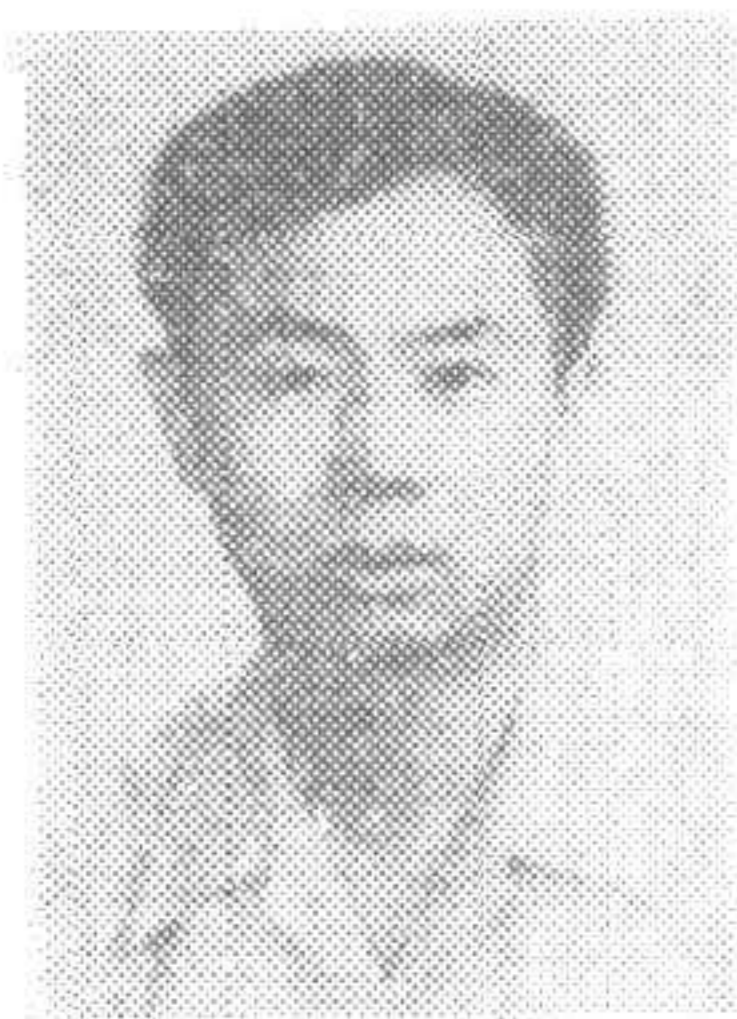
JANOCHA HARTMUT

(Lehrstuhl für Prozeß automatisierung, University of Saar land Saarbrücken 66041, Germany)

ABSTRACT

In this paper an effective fuzzy control scheme for robots is presented to improve the control performance of robot systems in the presence of friction and load changes as well as geometric parameters changes of dynamics. This scheme consists of a fuzzy logic (FL) controller, which is used as a main controller to ensure desired transient and steady-state behaviors, and a conventional derivative (D) controller, which is used as an auxiliary controller to stabilize the system. On the basis of this scheme, the main idea of achieving a desired control performance is to investigate the membership functions of linguistic variables. Simulation results demonstrated the effectiveness and robustness of the proposed fuzzy control scheme. Besides, the scheme is quite simple in structure and can be easily implemented.

Key words: Fuzzy control, robots, nonlinear systems



李 伟 1957年12月生。1982年和1984年于北方交通大学获学士和硕士学位，1991年在德国萨尔州大学获博士学位，其后在德国萨尔州大学和清华大学计算机系从事博士后研究。现为清华大学计算机系副教授。

目前的研究方向是：机器人运动规划与图形仿真、机器人模糊控制与导航等。在国内外杂志和会议上发表过数篇论文，并有专著《Graphical Simulation and Collision Avoidance of Robots》并有译著《交流传动调速系统》。