

文章编号 1004-924X(2006)02-0285-06

# 基于改进 Smith 预估器的显微视觉伺服

谢 晖, 孙立宁, 荣伟彬

(哈尔滨工业大学机器人研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:**针对视觉延迟的问题,提出采用改进的 Smith 预估器(MSP)来改善视觉伺服系统的控制品质。在对基于位置的动态“look-and-move”视觉伺服系统特性分析的基础上,建立了基于 MSP 视觉伺服系统的结构,同时建立了视觉伺服系统的分时模型。在微操作机器人平台上进行了点到点、抗干扰和微齿轮的跟踪抓取实验。结果表明,与只有 PID 控制器的视觉伺服系统相比,带 MSP 的视觉伺服系统具有更好的控制品质。克服了由于图像采集、传输和处理导致的视觉伺服延迟而严重影响控制系统的品质局限,并克服了传统方法通过减小系统增益来增强系统的鲁棒性,但同时降低了系统响应特性的缺点。

**关键词:**微操作;视觉延迟;Smith 预估器;分时模型;控制品质

**中图分类号:**TP242.62 **文献标识码:**A

## Visual servoing with modified Smith predictor for micromanipulation

XIE Hui, SUN Li-ning, RONG Wei-bin

(*Robotic Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*)

**Abstract:** A control scheme with a Modified Smith Predictor (MSP) for the position-based dynamic look-and-move visual servoing for the control of micromanipulation was proposed. The position-based dynamic look-and-move control scheme was applied to the vision servoing system with a dual-loop control scheme, in which the local controller was used as a position-controlled device, and the outer one as a vision servoing controller. The control scheme with a similar structure to the Smith predictor called modified Smith predictor was employed to eliminate the vision delay. The detailed analysis and experiments show that the vision control system with the proposed control scheme has better dynamics performance than the vision control system with a single PID controller. The proposed control scheme resolves the problems of vision servoing's inherent time delay induced by time consuming image acquisition transferring and processing and improves the dynamic response properties and antijamming ability of the vision servoing.

**Key words:** micromanipulation; vision delay; modified Smith predictor; timing modeling; performance

## 1 引言

微操作技术在微机电系统 (MEMS) 的装配和集成中的成功应用满足了 MEMS 功能日趋增多、结构逐渐复杂的要求。显微视觉以其信息量大、非接触和测量精度高的特点,成为了获得高精度、高可靠性微操作的重要手段。在过去的 10 多年中,显微视觉伺服已经广泛用于微操作机器人控制<sup>[1-3]</sup>,实现目标跟踪、定位、抓取和组装等微操作作业。视觉伺服涉及到图像处理、控制以及实时计算等关键技术。为了提高显微视觉伺服系统的性能,针对微操作的特点,研究人员在图像处理、特征提取、跟踪算法和伺服控制策略等方面做了大量的研究<sup>[4-6]</sup>,但是,针对视觉的延迟问题的研究相对很少。Vincze 和 Liu 等人分别在视觉伺服动态品质分析和分时模型建立时充分考虑了由图像采集和图像处理而导致的视觉伺服延迟,后者通过建立精确的分时模型,成功地实现了高效、可靠的机器人的控制<sup>[7-8]</sup>。

视觉伺服的延迟时间主要包括图像采集和图像处理时间,一般超过 60 ms,对于复杂的图像处理,经常会超过 1 s。当控制系统包含大延时环节时,会使系统的闭环特征方程式包含纯延迟因子,这就必然导致系统的稳定性降低,甚至造成系统的不稳定。为此,本文针对显微视觉的特点,以基于位置的动态视觉伺服方式为研究对象,在伺服控制结构引入改进的史密斯预估器(MSP),以改善视觉控制系统的动态响应品质和抗干扰能力。

## 2 Smith 预估器

对于大延迟系统的控制,传统的方法往往采用降低系统的增益系数,增大系统的阻尼来提高系统的稳定性,但同时降低了系统的动态响应特性。Smith 预估器(SP)是一个针对大延迟控制系统的有效的控制算法。其基本思想是预先估计过程在基本扰动下的动态响应,然后由预估器进行补偿,试图使被延迟了的控制量超前反馈到控制器,使控制器提前动作,改进控制系统的品质。图 1 为基于传统 Smith 预估器(阴影部分)的控制系统结构图<sup>[9]</sup>。

$u$ ,  $y$  和  $d$  表示输入、输出和干扰量。系统的

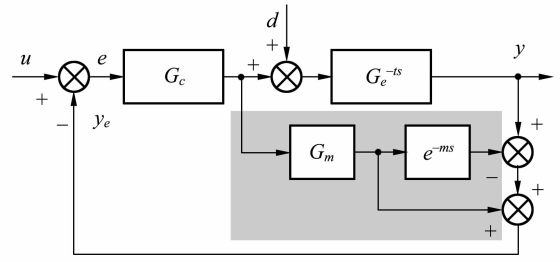


图 1 基于传统 SP 的控制系统结构

Fig. 1 Closed-loop system with conventional SP

闭环传递函数为:

$$G_{ym}(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{G_{PI}G_e e^{-\tau s}}{1 + G_c(G_m + Ge^{-\tau s} - G_m e^{-ms})}, \quad (1)$$

$$G_{yd}(s) = \frac{y(s)}{d(s)} = \frac{(1 + G_c(G_m - G_m e^{-ms}))G_e e^{-\tau s}}{1 + G_c(G_m + Ge^{-\tau s} - G_m e^{-ms})}. \quad (2)$$

从式 1、2 可知,如果  $Ge^{-\tau s} = G_m e^{-ms}$ ,那么系统的闭环特征方程中不再有纯滞后环节。因此,采用 Smith 预估器补偿方法可以消除纯滞后环节对控制系统品质的影响。从而,当系统延迟较大的时候,系统可以获得较好的目标跟踪和抗干扰能力<sup>[10-11]</sup>。

## 3 基于 MSP 的视觉伺服系统

系统的位置信息可以通过各个轴的位置反馈获得,目标点的空间位置可以通过路径规划计算获得。但是,由于位置反馈误差、系统标定误差,以及位姿估算误差,视觉伺服需在提高位置精度的同时动态预估微操作器和操作对象之间的相对位置关系。

### 3.1 视觉伺服控制结构

传统的基于位置的动态 look-and-move 视觉伺服结构如图 2 所示,系统包含两个位置环,内环为机器人关节位置反馈,外环为视觉伺服控制器。 $P_C$  和  $P_O$  分别为输入和视觉输出,从图中可以看出,机器人的当前位置可通过其关节位置反馈估计。但由于编码器的反馈误差、系统标定误差和位姿估计误差,需采用实时视觉反馈来估计微器件之间或微器件与微操作器之间的位姿关系,实现微操作机器人的实时控制。

设定一个视觉伺服周期包含  $n$  个机器人关节

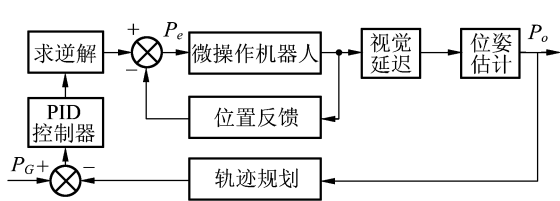


图 2 单一视觉伺服控制系统结构

Fig. 2 Single feedback vision servoing architecture

伺服周期,当前的位置  $P(t)$  对于如图 2 所示的视觉伺服结构,由于视觉延迟,在  $t+nT$  时刻才反馈到控制器中, $T$  为关节伺服周期。改进视觉伺服结构的目的是综合视觉和机器人关节的反馈信息,预估  $t$  时刻位置,提前动作,降低超调量,并加速调节过程。基于 MSP 的视觉伺服系统的结构如图 3 所示,MSP 包含一个传统的 SP 和一个伺服周期为  $T$  的预估器(阴影部分),称之为改进的史密斯预估器。该预估器用于估计一个视觉伺服周期内的某一时刻  $t+mT(m \leq n)$  机器人位姿,并结合  $t$  时刻的视觉反馈,预估  $t+nT$  时刻的位姿信息。

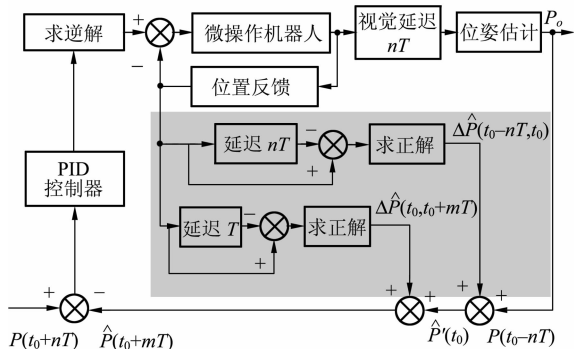


图 3 基于 MSP 的视觉伺服结构

Fig. 3 Visual servoing architecture based on MSP

$t_0$  为视觉反馈的有效时刻,  $P(t_0 - nT)$  为通过视觉反馈的  $t_0 - nT$  时刻的机器人位姿信息,  $\Delta \hat{P}(t_0 - nT, t_0)$  和  $\Delta \hat{P}(t_0, t_0 + mT)$  分别表示由机器人关节反馈得到的  $t_0 - nT$  到  $t_0$  和  $t_0$  到  $t_0 + mT$  时刻的位置差的预估值,  $\hat{P}(t_0 - nT)$  表示由机器人关节信息获得的  $t_0 - nT$  时刻的位置预估值,  $\hat{P}'(t_0)$  表示  $t_0$  时刻机器人的位置预估值,  $\hat{P}(t_0 + mT)$  是  $t_0 + mT$  时刻位置预估值。有

$$\hat{P}'(t_0) = P(t_0 - nT) + \Delta \hat{P}(t_0 - nT, t_0), \quad (1)$$

$$\hat{P}'(t_0 + mT) = \hat{P}'(t_0) + \Delta \hat{P}(t_0, t_0 + mT), \quad (2)$$

其中  $\Delta \hat{P}(t_0 - nT, t_0)$  和  $\Delta \hat{P}(t_0, t_0 + mT)$  为:

$$\Delta \hat{P}(t_0 - nT, t_0) = nT \times \dot{\hat{P}}(t_0 - nT), \quad (3)$$

$$\Delta \hat{P}(t_0, t_0 + mT) = \frac{mT}{n} [\dot{\hat{P}}(t_0 - nT) - \dot{\hat{P}}(t_0 - 2nT)], \quad (4)$$

其中  $\dot{\hat{P}}(t_0 - nT)$  表示由  $t_0 - nT$  的机器人速度得到的  $t_0$  时刻的速度预估。

$$\dot{\hat{P}}(t_0 - nT) = \dot{\hat{P}}(t_0 - 2nT) + [\Delta \hat{P}(t_0 - nT, t_0) - \Delta \hat{P}(t_0 - 2nT, t_0 - nT)] / nT, \quad (5)$$

从以上各式可得  $\hat{P}'(t_0 + mT)$ :

$$\hat{P}'(t_0 + mT) = \hat{P}'(t_0) + \frac{mT}{n} \times [\dot{\hat{P}}(t_0 - nT) - \dot{\hat{P}}(t_0 - 2nT)], \quad (6)$$

因此误差信号  $e(t_0 + nT)$  为:

$$e(t_0 + nT) = P(t_0 + nT) - \hat{P}'(t_0 + mT), \quad (7)$$

防止积分饱和的 PID 控制器为<sup>[12]</sup>:

$$u_i(n) = K_P \left[ e(n) + \frac{k_i}{T_I} \sum_{i=0}^n e_i T + T_D \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \right], \quad (8)$$

式中,  $K_P$ : 比例系数;  $T_I$ : 积分时间常数;  $T_D$ : 微分时间常数;

采用积分分离法防止积分饱和。定义为:

$$k_i = \begin{cases} 0 & |e(n)| > \epsilon, \text{PD 控制器} \\ 1 & |e(n)| \leq \epsilon, \text{PID 控制器} \end{cases}, \quad (9)$$

式中,  $\epsilon$ : 积分分离的积分界限。

### 3.2 分时模型的建立

Smith 预估补偿器对模型误差十分敏感,如果模型的时滞时间和实际值相差较大,则系统的品质就会大大降低。而在实际的应用中,视觉延迟时间往往是不确定的,需规划系统的时间分配,建立精确的分时模型。工业用图像系统的采集频率为 30 Hz 或 40 Hz,延迟分别是 33.3 ms 和 25 ms。复杂的图像处理,比如图像分割、特征提取,往往超过采集时间。由于图像采集和处理时间分配结构的不同,视觉延迟也不相同。通常有四种结构,分别为 on-the-fly, serial, parallel 和 pipeline<sup>[7]</sup>。其中 on-the-fly 适合图像处理十分简单的系统,而后三种结构适合图像处理较为复杂的系统,符合实际应用的要求。

如图 4 所示,系统采用并行结构,为了提高运行效率,开辟 2 个内存缓冲区用于轮换存储图像。图像传输方式采用 DMA, CPU 资源完全由图像处理占用,提高了处理的效率。一般情况下,图像处理时间大于采集时间,因此,视觉延迟主要由图

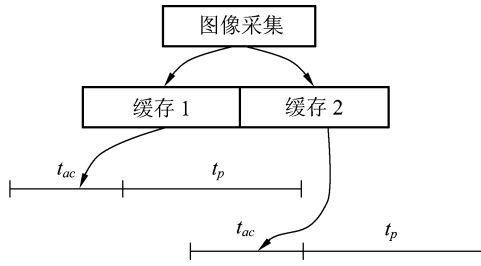


图 4 图像并行处理结构

Fig. 4 Architecture of the parallel processing

像采集时间  $t_{ac}$  和处理时间  $t_p$  组成。

分时分配模型如图 5 所示,描述了视觉伺服环节和机器人关节的时间分配,其中  $t_p$  为图像处理时间, $T$  为机器人关节伺服周期, $l_1$  和  $l_2$  分别为图像存储和处理的滞后时间。从上到下分别表示图像采集、图像处理和关节伺服周期,横轴为时间。从图中可以看出  $t_p = nT$ 。由此,各个环节的时间得到了精确的分配,使得系统协调运行。

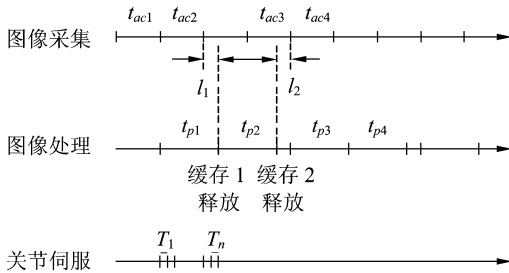


图 5 控制系统的分时模型

Fig. 5 Timing model of control system

## 4 实验结果

### 4.1 微操作系统的组成

微操作系统如图 6 所示,系统主要包括微操作手、定位系统和视觉系统。图中 A: 光学显微镜, B: 自动调焦机构, C、D: 分别为定位系统和微操作手粗定位工作台, E、F: 分别为定位系统和微操作手的精密定位工作台, G: 微操作器, H: 夹具。

微操作手是系统的核心。其运动模块包括  $x$ ,  $y$  和  $z$  三个粗定位自由度和  $z$ ,  $\alpha$  和  $\beta$  三个精密定位自由度。粗定位精度可达  $3 \mu\text{m}$ , 由压电陶瓷驱动的精确定位工作台直线精度可达  $50 \text{ nm}$ , 旋转精度可达  $0.0002^\circ$ 。视觉系统由调焦机构、

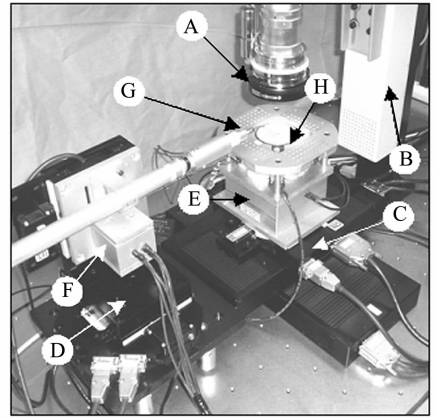


图 6 微操作机器人

Fig. 6 Micromanipulation robot

$1/2''$  CCD 和一台 HIROX MX-5030R 显微物镜组成,其放大倍数为  $1\times \sim 6\times$ 。系统可实现自动调焦功能。

### 4.2 实验结果与分析

视觉和关节伺服周期分别为  $100 \text{ ms}$  和  $5 \text{ ms}$ , 包括点对点、跟踪和抗干扰实验。为了比较带有 MSP 的伺服系统和只有 PID 控制器伺服系统的性能,两者具有相同的参数。显微镜放大倍数为 4.5, 视场为  $1.42 \text{ mm} \times 1.07 \text{ mm}$ , 机器人运行速率限制在  $1 \text{ mm/s}$  以下。图 7 为带 MSP 和仅有 PID 控制器的对比实验曲线。(a)、(b) 为点对点的性能测试, (c)、(d) 为抗干扰测试曲线。实验前,把大径为  $450 \mu\text{m}$  的微齿轮放置于显微镜视场中央。以像素为单位,从视场中点(320, 240)到点(480, 400)做点对点的实验,实验表明,带 MSP 的视觉伺服系统具有很小超调量和较少的调整时间。在外抗干扰的情况下,保持微齿轮位于视场中心,完成抗干扰实验,在相同的干扰量下,带 MSP 的视觉伺服系统调整时间少,具有较强抗干扰能力。

图 8 为微齿轮的夹取过程,操作过程中,保持微夹持器不动,移动定位工作台,使得微齿轮沿如图中的轨迹移动到夹取位置。齿轮和夹持器轮廓的最小间隙为 20 个像素,在带 MSP 的显微视觉导航下,微齿轮沿着轨迹光滑的移动到夹取位置,而在仅有普通 PID 控制器的视觉导航下,运行轨迹不平滑,而且还出现了和夹持器轮廓碰撞的现象,导致了系统不稳定,不能实现精确夹持。

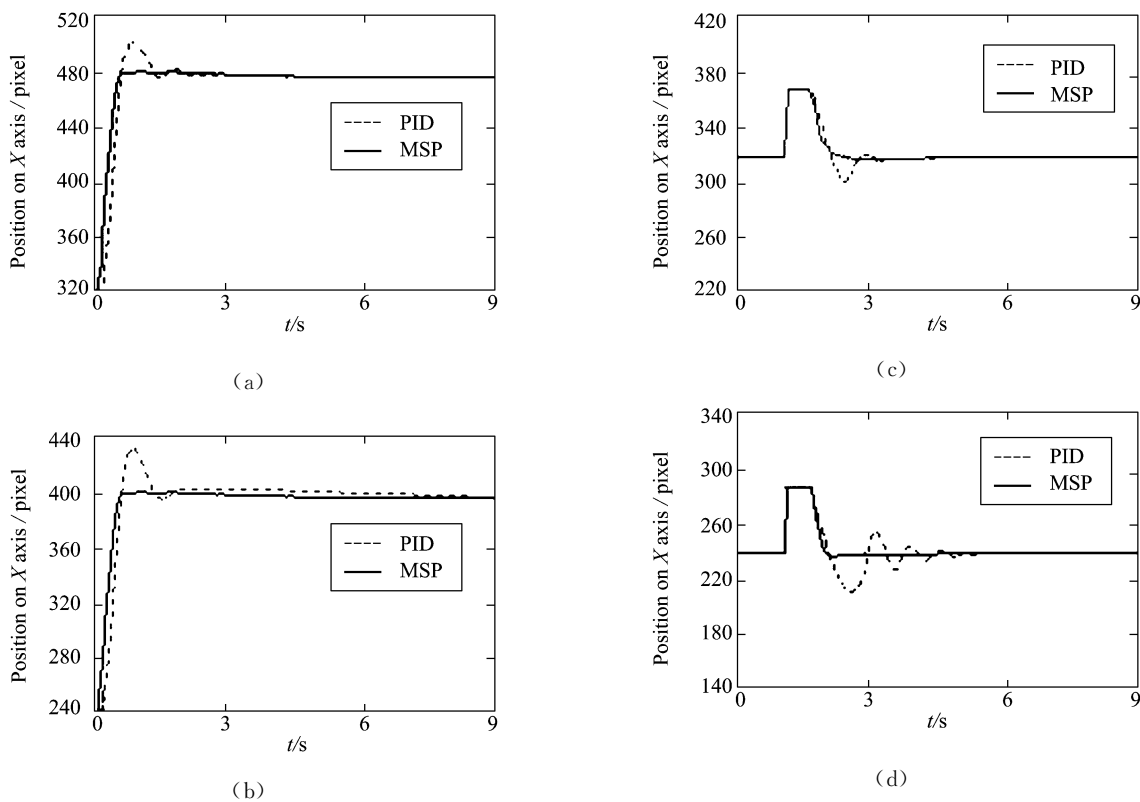


图 7 性能对比测试曲线

Fig. 7 Curve of performance testing

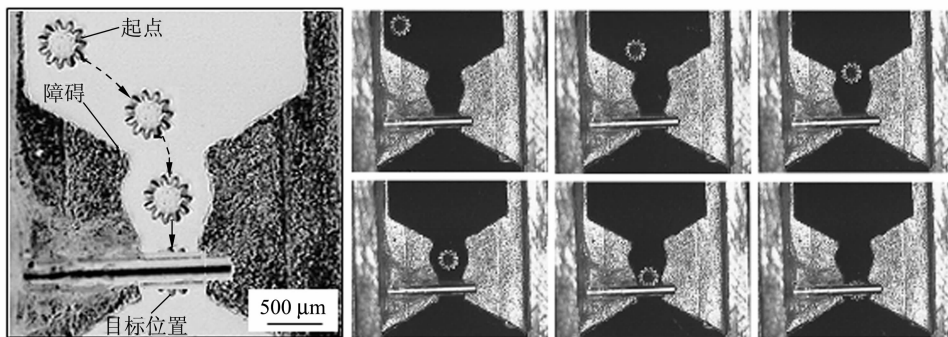


图 8 微齿轮的抓取过程

Fig. 8 Grasping process of miniaturized gear

### 5 结 论

延迟特性是影响视觉伺服系统稳定性的重要因素,提出了采用改进的 Smith 预估器来改善视觉伺服系统的控制品质。在微操作机器人平台

上,以基于位置的动态视觉伺服结构为研究对象,通过点到点、外部干扰和微齿轮的跟踪抓取导航的对比实验,验证了带 MSP 的视觉伺服系统相比仅有 PID 控制器的视觉伺服系统具有良好的控制品质。

## 参考文献:

- [1] VIKRAMADITYA B, NELSON B J. Visually guided microassembly using optical microscopes and active vision techniques [C]. *IEEE International Conference Robotics and Automation*. Albuquerque, USA, 1997; 3172-3177.
- [2] FEDDEMA J T, SIMON R W. Visual servoing and CAD-driven microassembly [J]. *IEEE Robotics and Automation Magazine*. 1998, 5(4): 18-24.
- [3] FERREIRA A, CASSIER C, HIRA S. Automatic microassembly system assisted by vision servoing and virtual reality [J]. *IEEE Transactions on Mechatronics*. 2004, 9(2): 321-323.
- [4] MUKUNDAKRIHNNAN B, NELSON B J. Micropart feature design for visually servoed microassembly [C]. *IEEE International Conference Robotics and Automation*. San Francisco, USA, 2000; 965-970.
- [5] NICKELS K, HUTCHINSON S. Estimation uncertainty by SSD-based feature tracking [J]. *Image and Vision Tracking*. 2002, 20: 47-58.
- [6] RALIS S J, VIKRAMADITYA B, NELSON B J. Micropositioning of a weakly calibrated microassembly system using coarse-to-fine visual servoing strategies [J]. *IEEE Transactions on Electronics Packing Manufacturing*. 2000, 23(2): 123-131.
- [7] VINCZE M. Dynamics and system performance of visual servoing [C]. *IEEE International Conference Robotics and Automation*. San Francisco, USA, 2000; 644-649.
- [8] LIU Y, HOOVER A W, WALKER I D. A timing model for vision-based control of industrial robot manipulators [J]. *IEEE Transaction on Robotics*, 20(5): 891-898.
- [9] 方康玲. 过程控制系统[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2002: 171-175.  
FANG K L. *Process control system* [M]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology Press, 2002: 171-175. (in Chinese)
- [10] HAGGLUND T. A predictive PI controller for process with long dead times [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 1992, 12(1): 57-60.
- [11] STOJIC M R, MATIJEVIC M S, DRAGANOVIC L S. A robust smith predictor modified by internal models for integrating process with dead time [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2001, 46(8): 1293-1298.
- [12] 陈维山, 赵杰. 机电系统计算机控制[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1999.  
CHEN W S, ZHAO J. *Computer control of mechanical and electrical system* [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1999: 40-66. (in Chinese)

作者简介: 谢 晖(1974—), 男, 湖北人, 哈尔滨工业大学机器人研究所博士研究生, 主要研究方向为微操作机器人。E-mail: xiehui@hit.edu.cn