

文章编号: 1002-0446(2002)04-0314-06

# 机器人多指灵巧手基关节力矩/位置控制系统的研究\*

何 平 金明河 刘 宏 谢宗武

(哈尔滨工业大学机器人研究所 哈尔滨 150001)

**摘 要:** HIT-1 型机器人手是一种具有多种感知功能的仿人多指灵巧手. 目前对多指手单关节单自由度控制的研究较多, 而对两自由度的手指基关节的研究却较少. 本文分析了 HIT-1 型手两自由度基关节的运动学和动力学模型, 并在此基础上建立了基关节的位置和力矩反馈控制系统. 本文采用工业中常用的 PID 控制算法分别实现了手指基关节在自由空间的位置控制和在约束空间的力矩控制, 并对实验结果进行了分析.

**关键词:** 多指灵巧手; 位置控制; 力矩控制多指

**中图分类号:** TP24 **文献标识码:** B

## STUDY OF POSITION AND TORQUE FEEDBACK CONTROL SYSTEM OF MULTI-FINGERED DEXTEROUS ROBOT HAND

HE Ping JIN Ming-he LIU Hong XIE Zong-wu

(Harbin Institute of Technology Robotics Research Institute, Harbin 150001)

**Abstract:** There was more research on single DOF of single finger than on the base joint that has two DOFs. This paper gives a brief description of HIT-1 hand, a multi-fingered dexterous hand, and simply analyzes the base joint's kinematics and dynamics model. Then the position and torque feedback control system is constructed based on the model analysis. The traditional PID algorithm has been employed to complete both position control in free space and torque control in constrained environment, and some experimental results has been analyzed.

**Keywords:** multi-fingered dexterous hand, position control, torque control

### 1 引言( Introduction)

目前国内外有很多机构在进行机器人多指灵巧手的研究, 国外在这个领域中具有代表性的是德国宇航中心研制的 DLR 手<sup>[1]</sup>和美国宇航中心的 NASA 手<sup>[2]</sup>, 它们的特点是具有丰富的感知功能, 在外形上和人手接近, 具有很好的灵巧性; 国内目前具有代表性的是北航研制的三指手. 本文介绍的机器人多指灵巧手由三个手指和与之相对的拇指组成, 共有 12 个自由度, 如图 1 所示. 灵巧手的模块化结构使其外形尺寸和人手接近, 手指上面两个指节通过一定的方式耦合实现和人手类似的运动, 手指基关节通过齿轮差动实现翘曲和外展/内收两个自由度. 灵巧手的驱动系统由人工肌肉和腱传动系统组成, 其中人工肌肉是一种基于无刷直流电机(BLDC)、直线/旋转转换及减速机构和直线导轨的微直线驱动

器. 灵巧手具有丰富的感知功能, 每个手指模块具有指尖五维力/力矩传感器、关节力矩传感器、基关节二维力矩传感器和多种位置传感器.

手指基关节由两个微直线驱动器驱动, 每个驱动器具有直线位置传感器(直线电位计)、电机位置传感器(霍尔传感器)和光电极限位置传感器. 经过对直线电位计和霍尔传感器输出信号的实验比较, 本文采用直线电位计的测量信号计算基关节的角度, 采用霍尔传感器输出信号计算电机的速度和角加速度. 手指基关节二维力矩传感器可以感知多指手在约束空间所受的力矩.

本文采用工业中常用的 PID 控制算法设计手指基关节的位置和力矩反馈控制系统, 要求手指基关节能够跟踪期望状态(位置和力矩). 这要求设计合适的 PID 控制参数以获得良好的控制信号, 使手指

基关节能够在自由空间较准确地跟踪期望轨迹, 在约束空间能够较准确地跟踪期望力矩。

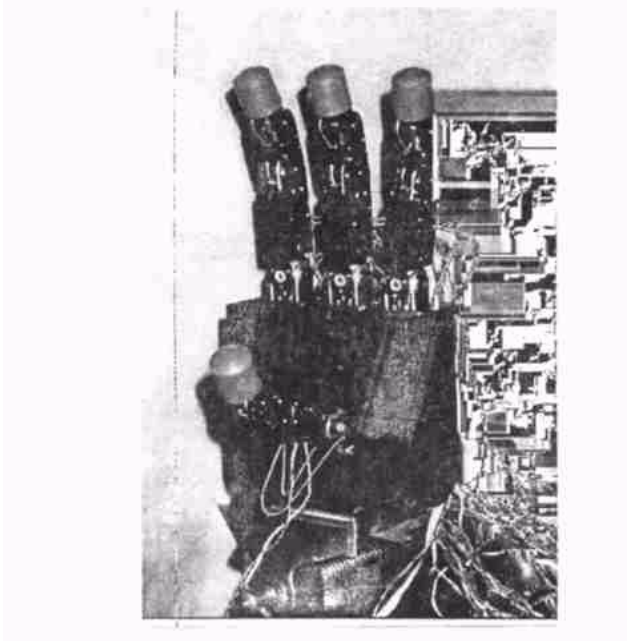


图 1 HIT-1 多指灵巧手

Fig. 1 HIT-1 hand

## 2 基关节运动学模型 (Kinematics model of base joint)

本文假设手指基关节的两个自由度分别由两个连杆完成, 根据这个假设建立手指基关节的连杆坐标系如图 2 所示。

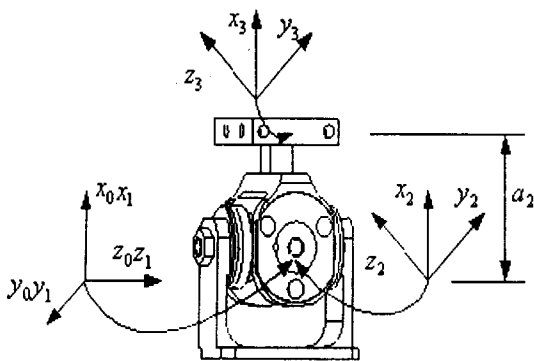


图 2 基关节连杆坐标系

Fig. 2 Coordinate of base joint

这样可以得到手指基关节正逆运动学方程

$$\begin{aligned} x_3 &= c_1 c_2 a_2 \\ y_3 &= s_1 c_2 a_2 \\ z_3 &= s_2 a_2 \\ \theta_1 &= \arctg \frac{y_3}{x_3} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\theta_2 = \arctg \frac{z_3}{x_3^2 + y_3^2} \quad (2)$$

式(1)为关节正运动学方程, 可以看出如果给定基关节的转动角度  $\theta_1, \theta_2$ , 就可以得到  $O_3$  在基坐标系中的唯一的空间位置. 式(2)为关节逆运动学方程, 可以看出只要已知  $O_3$  在基坐标系中的位置  $(x_3, y_3, z_3)$ , 就可以唯一确定  $\theta_1$  的值, 而  $\theta_2$  的正负号取决于  $z_3$ , 当  $z_3 > 0$  时,  $\theta_2$  为正; 当  $z_3 < 0$  时,  $\theta_2$  为负; 当  $z_3 = 0$  时,  $\theta_2 = 0$ .

## 3 基关节动力学模型 (Dynamics model of base joint)

手指基关节动力学模型主要包括: 1) 基关节动力学模型; 2) 基于无刷直流电机的微直线驱动器的动力学模型; 3) 腱传动系统动力学模型。

### 3.1 微直线驱动器动力学模型

微直线驱动器采用行星传动方式将 BLDC 输出的高速旋转运动转换成低速直线运动, 驱动器输出的直线位移通过腱传动系统转换成手指基关节的角位移. 定义直线驱动器的输出直线位移与电机转子转过的角度之比, 单位是: m/rad.

$$n = \frac{l}{2\pi} \left( \frac{1}{1 + R_a/R_b} \right) \quad (3)$$

式中  $l$  是丝杠的螺距;  $R_a$  是中心轮半径;  $R_b$  是内轮半径。

结合 BLDC 的基本特性可以得到微直线驱动器的动力学方程

$$T_e = J \frac{d^2 x}{dt^2} = B \frac{dx}{dt} + T_L + f_m \quad (4)$$

式中  $x = \theta_e/n$ ;  $\theta_e$  为电机转子机械转角;  $T_e$  是 BLDCM 的电磁转矩;  $J$  是直线驱动器的转动惯量;  $B$  是直线驱动器的阻尼系数;  $f_m$  是折算到电机端的摩擦转矩;  $T_L$  是折算到电机端的负载转矩。

### 3.2 基关节动力学模型

为了简化基关节封闭式动力学方程的推导, 假设基关节连杆质量都集中于它的末端, 这样使其在质心坐标系中表示的刚体惯性张量为零矩阵<sup>[3]</sup>. 利用迭代的 Newton-Euler 动力学算法可以计算出驱动基关节需要的驱动力矩  $t_1$  和  $t_2$ , 其具体形式如下:

$$\begin{aligned} t_1 &= ma_2^2 c_2^2 \ddot{\theta}_1 - ma_2^2 c_2 s_2 \ddot{\theta}_1 \ddot{\theta}_2 - ms_1 a_2 c_2 g \\ t_2 &= ma_2^2 c_2 s_2 \ddot{\theta}_1 + ma_2^2 \ddot{\theta}_2 - ma_2 c_1 s_2 g \end{aligned}$$

上面两个等式清楚地表示了关节力矩与关节转角、速度和加速度之间的函数关系, 即为基关节封闭式动力学方程. 如果令

$$\tau = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \end{bmatrix}, \quad \Theta = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix}$$

$$M(\Theta) = \begin{bmatrix} ma_2^2 c_2^2 \\ ma_2^2 \end{bmatrix}$$

$$V(\Theta, \dot{\Theta}) = \begin{bmatrix} ma_2^2 c_2 s_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \\ ma_2^2 c_2 s_2 \dot{\theta}_1^2 \end{bmatrix}$$

$$G(\Theta) = \begin{bmatrix} ms_1 a_2 c_2 g \\ -ma_2 c_1 s_2 g \end{bmatrix}$$

则可以得到基关节封闭形式的动力学方程的一般结构

$$\tau = M(\Theta)\ddot{\Theta} + V(\Theta, \dot{\Theta}) + G(\Theta) \quad (5)$$

### 3.3 腱传动系统动力学模型

理论分析和实验表明: 当腱的长度较短、重量较轻时, 在一定频率范围内可以将腱传动系统建模为简单的弹簧-阻尼并联系统, 如图 3 所示, 则可以得到如下的腱驱动动力学方程

$$T_1 = K_t(x_1 - R\theta) + B_t(\dot{x}_1 - r\dot{\theta}) + T_{10} \quad (6)$$

$$T_2 = K_t(x_2 - R\theta) + B_t(\dot{x}_2 - R\dot{\theta}) + T_{20} \quad (7)$$

式中,  $K_t$  是腱的刚度系数;  $B_t$  是腱的非线性阻尼系数;  $x_1$  和  $x_2$  是直线驱动器的位移;  $R$  和  $\theta$  分别是滑轮半径和转角;  $T_1$  和  $T_2$  分别是相应点处腱的张力;  $T_{10}$  和  $T_{20}$  相应点腱的预紧力。

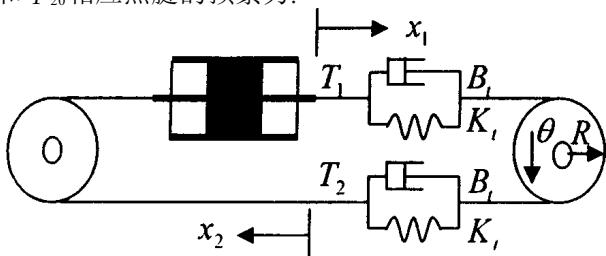


图 3 手指基关节腱驱动系统

Fig. 3 Tendon driven

## 4 手指基关节位置控制(Position control of base joint)

图 4 为手指基关节齿轮差动示意图, 如果设齿轮 1 和 3 为主动轮, 其角位移分别为  $\theta_{1a}$  和  $\theta_{3a}$ , 设基关节的两个自由度方向的角位移为  $\theta_1$  和  $\theta_2$ , 则存在:

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{1a} \\ \theta_{3a} \end{bmatrix}$$

位置控制要求基关节两个自由度方向的角位移可以很好地跟踪预定的轨迹。本文采用带有抛物线过渡域的线性轨迹路径插补算法, 在关节空间中得

到一系列的控制设定点, 即期望关节位置、角速度和角加速度序列<sup>[3]</sup>。把这些生成的路径插补点从关节空间变换到直线驱动空间得到关节-驱动器运动学正变换方程

$$\begin{bmatrix} x_d \\ \dot{x}_d \\ \ddot{x}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_d \\ \dot{\theta}_d \\ \ddot{\theta}_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中,  $\theta_d$ 、 $\dot{\theta}_d$  和  $\ddot{\theta}_d$  分别是轨迹规划器生成的关节期望位置、角速度和角加速度;  $x_d$ 、 $\dot{x}_d$  和  $\ddot{x}_d$  分别是直线驱动器期望的直线位置、速度和加速度;  $x_0$  是关节处于零位时对应的直线驱动器的位置;  $R$  是与锥齿轮固连的滑轮的半径。

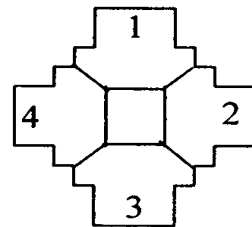


图 4 基关节示意图

Fig. 4 Schematic of base joint

为了观察关节的实际运动状态, 在每个控制周期需要把直线驱动器的实际状态变换为关节的状态, 得到关节-驱动器运动学逆变换方程

$$\begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/R & 0 & 0 \\ 0 & 1/R & 0 \\ 0 & 0 & 1/R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \ddot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -x_0/R \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中,  $x$ 、 $\dot{x}$  和  $\ddot{x}$  分别为直线驱动器的实际位置、线速度和线加速度;  $\theta$ 、 $\dot{\theta}$  和  $\ddot{\theta}$  分别是关节的实际角位置、角速度和角加速度。结合手指基关节的运动学方程, 根据式(5)、(8)和(9)设计基关节位置控制系统如图 5 所示。

## 5 手指基关节力矩控制(Torque control of base joint)

四个相同锥齿轮的啮合运动使得手指基关节的力矩传递关系得以简化。设两个主动齿轮上的力矩分别为  $\tau_{1a}$  和  $\tau_{3a}$ , 其大小为对应的驱动器输出力与对应的滑轮半径的乘积, 设关节两个自由度方向所受的力矩分别为  $\theta_1$  和  $\theta_2$ , 令

$$M = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$M^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

则基关节的正逆动力学变换方程分别为

$$\begin{aligned} \begin{vmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{vmatrix} &= \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \tau_{1a} \\ \tau_{2a} \end{vmatrix} \\ \begin{vmatrix} \tau_{1a} \\ \tau_{2a} \end{vmatrix} &= \begin{vmatrix} \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{vmatrix} \end{aligned} \quad (10)$$

根据式(4)和(10)设计手指基关节的力矩控制系统,

其框图如图 6 所示. 图中  $f_l$  为等效摩擦力矩,  $M$  和  $M^{-1}$  为力矩变换矩阵;  $\theta_j, \theta_m$  分别是关节和 BLDC 转角矩阵;  $U_j, U_m$  分别是关节驱动力矩矩阵和 BLDC 输出力矩矩阵;  $K_p, K_s, K_v$  分别是比例、微分和积分控制参数矩阵;  $\tau_d$  是关节期望力矩矩阵;  $\theta_{jd}$  是关节期望位置矩阵.

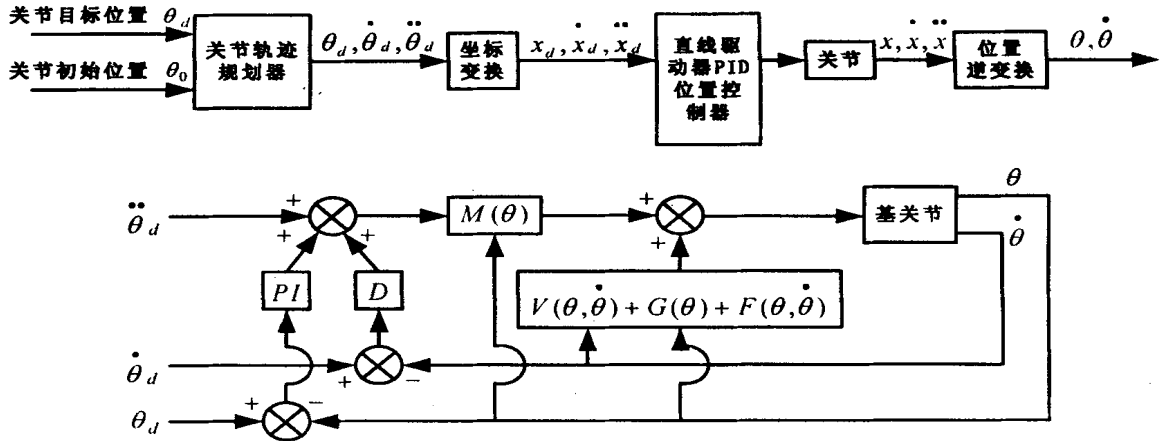


图 5 手指基关节位置控制系统方框图

Fig. 5 Block diagram of base joint position control system

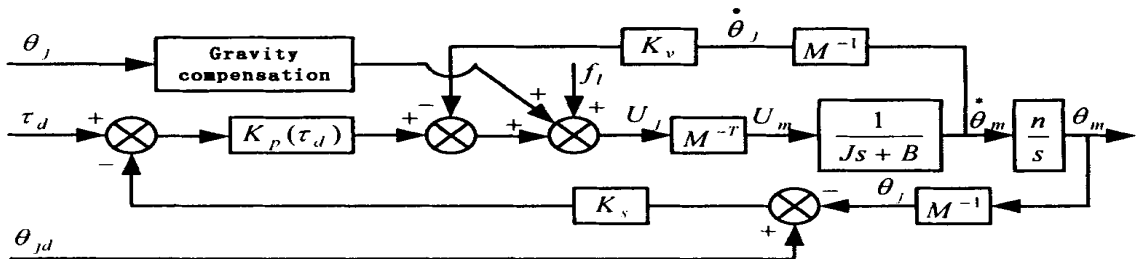


图 6 手指基关节力矩控制方框图

Fig. 6 Block diagram of base joint torque control system

## 6 实验及结果分析(Results analysis of experiment)

### 6.1 积分分离的 PID 位置控制

PID 是工业中常用的控制算法,它具有设计简单,参数易调的特点.本文采用位置误差作为控制信号,为了防止误差项累积造成积分饱和,减小系统超调,以及消除系统本身存在的延迟,本文采用积分分离的 PID 控制算法实现手指基关节的位置控制.图 7~ 图 10 分别给出了基关节两个自由度方向有无积分分离的 PID 位置跟踪控制实验曲线,其中图 7 和 9 是基关节位置跟踪曲线,图 8 和 10 是控制信号曲线.比较两种曲线可以看出积分分离 PID 控制具有更快的响应速度,而且消除了控制信号的积分饱和.

### 6.2 PID 力矩控制

根据图 6 手指基关节力矩控制框图,考虑基关节翘曲方向的力矩控制情况,即基关节外展/内收方向的力矩  $\tau_2$  保持不变,考察对力矩  $\tau_1$  的跟踪情况.图 11 和 12 给出了力矩控制的实验结果.

人工肌肉和腱传动系统相结合的方式使基关节在弯曲和伸直的过程中其腱的张紧程度不一致,同时由于基关节初始零位的标定不理想,这使得基关节的力矩控制结果出现了毛刺,如图 11 所示.从图中可以看出曲线毛刺的分布和作用力矩的关系,力矩增加较力矩减小时的毛刺明显,这反映了腱张紧程度的不同;而基关节外展/内收方向力矩跟踪曲线的毛刺较翘曲方向的毛刺明显,这反映了基关节的

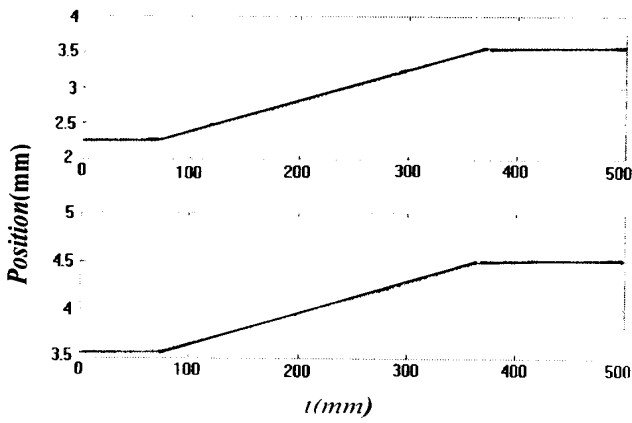


图 7 积分分离 PID 位置控制跟踪曲线  
Fig. 7 Position curve with separate integral

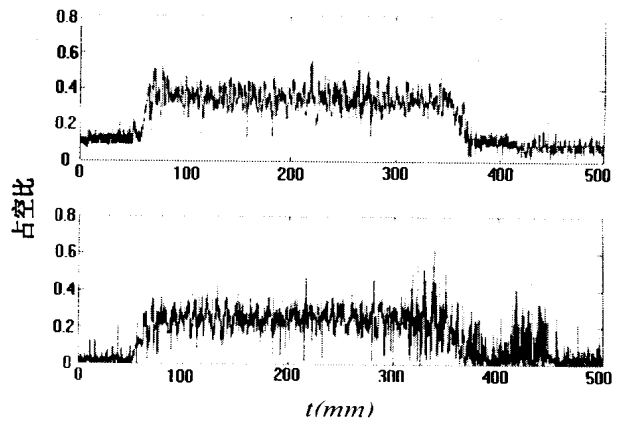


图 8 积分分离 PID 位置控制信号曲线  
Fig. 8 Control signal with separate integral

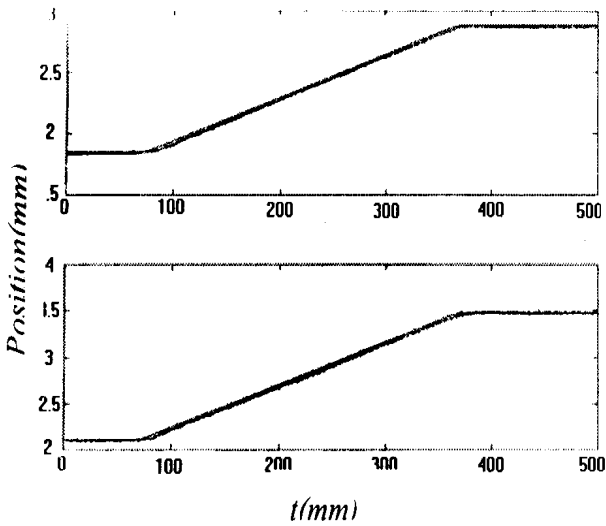


图 9 无积分分离 PID 位置控制跟踪曲线  
Fig. 9 Position curve without separate integral

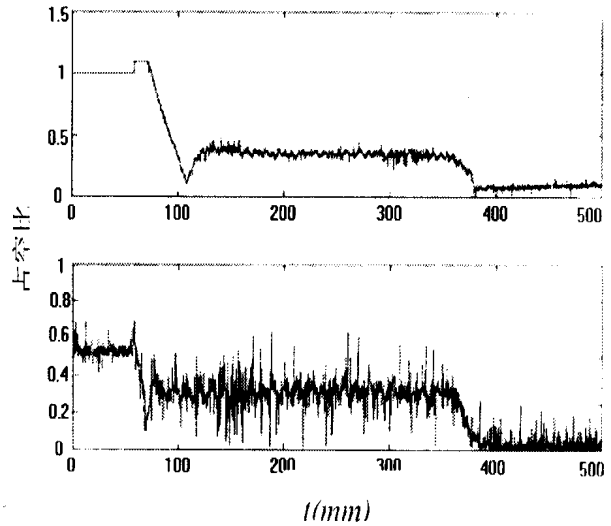


图 10 无积分分离 PID 位置控制信号曲线  
Fig. 10 Control signal without separate integral

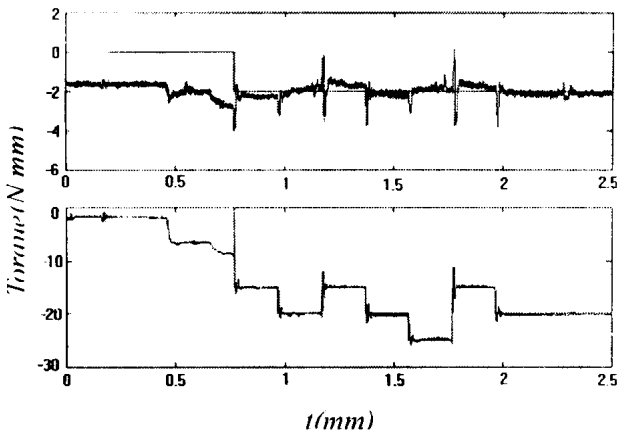


图 11 PID 力矩控制跟踪曲线  
Fig. 11 Position curve of PID torque control

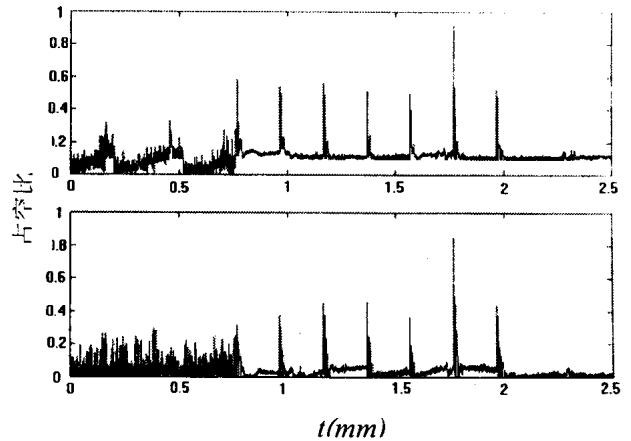


图 12 PID 力矩控制信号曲线  
Fig. 12 Control signal curve of PID torque control

(下转第 328 页)