

文章编号 1004-924X(2005)06-0703-06

# 微驱动定位系统及其在误差补偿机器人中的应用

晏祖根, 孙立宁, 节德刚

(哈尔滨工业大学 机器人研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:**介绍了基于偏摆误差补偿的高速高精度机器人系统组成及偏摆误差补偿原理,利用有限元分析软件 ANSYS,设计了双层平行板弹性铰链结构、压电陶瓷(PZT)直接驱动的微位移工作台。采用模糊 PI 控制算法对微动工作台进行闭环控制,既利用模糊控制灵活、适应性强的优点,又利用 PI 控制精度高的优点。实验结果验证了模糊 PI 控制算法的有效性,采用微动工作台补偿偏摆误差,机器人的运动性能得到较大提高。

**关键词:**微驱动;压电陶瓷;误差补偿;有限元分析;机器人

**中图分类号:**TP242 **文献标识码:**A

## Research of micro-driven table based on PZT and its control system

YAN Zu-gen, SUN Li-ning, JIE De-gang

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

**Abstract:** The high-speed high-precision robot based on error compensation was presented. The micro-driven table was designed by means of ANSYS. The table consisted of a parallel board framework and direct-driven by PZT which integrated high-resolution strain transducer. Experiments demonstrate that the steady time of the micro-driven table has been shortened significantly by adopting the fuzzy PI controller, and the motion performance index of robot is improved by using the micro-driven table to compensate the swing displacement

**Key words:** micro-driven; PZT; error compensation; finite element analysis; robot

## 1 引言

随着机器人的应用深入到 IC 后封装、高速精密加工与装配等领域,人们对机器人性能指标的要求越来越高,并不断追求机器人的高速度、高精度和大工作范围<sup>[1]</sup>,伺服电机/滚珠丝杠驱动、直线电机驱动、平面并联机构和宏/微双重驱动等诸多驱动与机构方式,应用摩擦力预测补偿控制、神

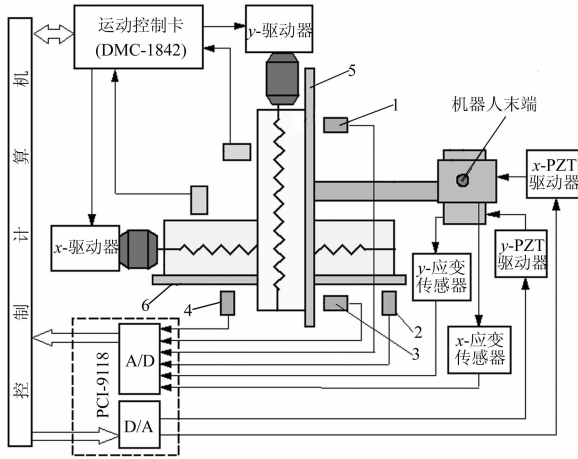
经网络交叉耦合控制等诸多先进控制技术都被用来提高机器人的性能指标。

在诸多高速高精度机器人中,基于伺服电机/滚珠丝杠驱动、直线光栅位置反馈的 XY-table 型机器人是典型的一种。由于滚珠导轨等刚性薄弱环节的影响,XY-table 机器人在高速运动时,机器人末端会出现偏摆误差。针对上述问题,本文提出基于偏摆误差补偿的高速高精度机器人方案,用宏动工作台实现大范围高速运动,微驱动补

偿工作台进行偏摆误差补偿,实现高精度运动。

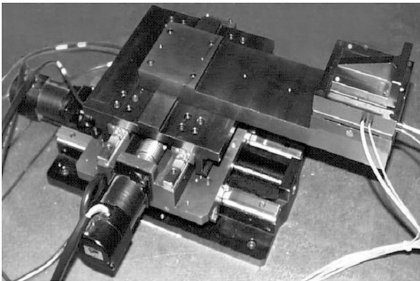
## 2 基于误差补偿的机器人系统原理

图 1 所示为基于偏摆误差补偿的高速高精度机器人系统原理图。宏动工作台采用伺服电机、滚珠丝杠驱动和直线光栅位置反馈的形式,实现机器人的大行程、高速运动。微动工作台通过悬臂梁安装于宏动工作台上,实现偏摆误差补偿位移的输出。偏摆检测传感器 1、2、3、4 以安装于宏动工作台侧面的高精度直线平尺 5、6 为基准,检测宏动工作台的偏摆误差。



(a) 系统框图

(a) Schematic diagram



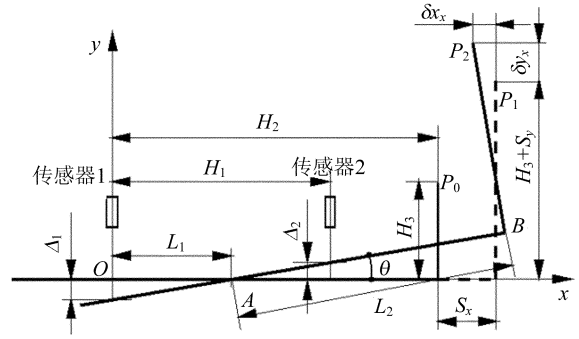
(b) 实物图

(b) Photograph

图 1 基于误差补偿的高速高精度机器人系统原理

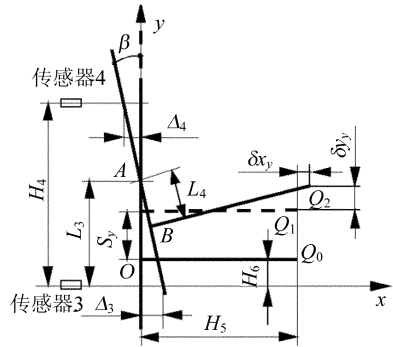
Fig. 1 System of high-speed high-precision robot based on error compensation

图 2 为偏摆误差检测原理图,由于 Y 轴宏动工作台固定于 X 轴宏动工作台上,属串联机器人



(a) x 轴

(a) x-axis



(b) y 轴

(b) y-axis

图 2 偏摆误差检测原理图

Fig. 2 Principle of the measurement of yaw error

形式,因此,可分别计算各轴的偏摆误差后进行叠加,得到总的偏摆误差。根据几何关系,导出总的偏摆误差的表达式为:

$$\begin{cases} \delta x = \frac{H_3 + S_y}{H_1} (\Delta_1 - \Delta_2) + \frac{H_4 - H_6 - S_y}{H_4} \Delta_3 + \frac{H_6 + S_y}{H_4} \Delta_4 \\ \delta y = \frac{H_1 - H_2 - S_x}{H_1} \Delta_1 + \frac{H_2 + S_x}{H_1} \Delta_2 + \frac{H_5}{H_4} (\Delta_3 - \Delta_4) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\delta x$ 、 $\delta y$  分别为工作点沿  $x$ 、 $y$  轴方向的偏摆误差值; $H_1 \sim H_6$  分别为工作点的初始状态值; $\Delta_1 \sim \Delta_4$  分别为偏摆检测传感器 1、2、3、4 所测得位移变化量; $S_x$ 、 $S_y$  分别为  $x$ 、 $y$  宏动工作台的运动距离。

机器人工作原理:运动伺服卡 DMC-1842 控制机器人大行程高速运动,数据采集卡 PCI-9118 实时采集偏摆传感器信息,根据式(1),推算出机器人末端的偏摆误差值,驱动微动工作台反向运动等值位移,实现机器人的偏摆误差补偿,提高机器人的运动精度。

### 3 微驱动补偿工作台的研制

对宏动工作台进行测试实验,结果表明:机器人末端 X 轴方向的偏摆位移为  $\pm 18 \mu\text{m}$ ,振动固有频率为 84 Hz; Y 轴方向的偏摆位移为  $\pm 10 \mu\text{m}$ ,振动固有频率为 110 Hz。根据机器人的运动性能指标及测试结果,微驱动补偿工作台的设计要求如表 1 所示。

表 1 微动工作台设计要求

Tab.1 Specification of micro-table

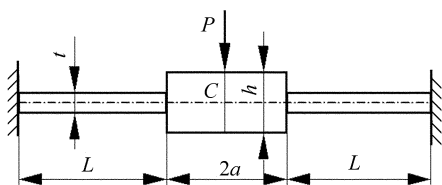
	X 轴	Y 轴
闭环有效行程/ $\mu\text{m}$	40	25
闭环系统线性度/%	0.5%	0.5%
刚度/ $\text{N} \cdot \mu\text{m}^{-1}$	8	8
固有频率/Hz	600	800

基于应用的灵活性和可扩展性,采用模块化设计思想,设计了双层平行板弹性铰链结构、压电陶瓷(PZT)直接驱动的一维微动工作台;将两个一维微动工作台连接即形成运动解耦、两自由度的微驱动补偿工作台。

#### 3.1 理论计算

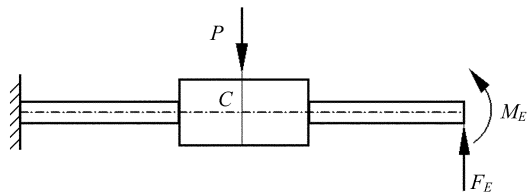
简化分析,平行板弹性铰链简化成一静不定变截面梁,进行弹性变形分析,如图 3(a)所示,图中:  $P$  为作用于梁中点  $C$  处的力,  $b$  为梁的宽度,  $L$ 、 $a$  为梁不同截面段的长度,  $t$ 、 $h$  为梁不同截面段的厚度,  $J_1$ 、 $J_2$  为相应的惯性矩,  $J_1 = \frac{bt^3}{12}$ ,  $J_2 = \frac{bh^3}{12}$ ,  $E$  为材料的弹性模量。

将梁右端的多余约束除去,得到一个静定变截面悬臂梁,在右端添加未知的力矩  $M_E$  和力  $F_E$ ,得到原静不定变梁的相当系统,如图 3(b)所示。根据结构对称性,推出  $F_E = P$  和  $C$  处的转角



(a)简化的静不定变截面梁

(a)Simplified variable cross-section beam



(b)相当的变截面梁

(b)Equivalence variable cross-section beam

图 3 平行板弹性铰链力学分析简图

Fig.3 Mechanical sketch of parallel beam flexible hinge

为零,即变形协调条件  $\theta = 0$ 。

分别计算力  $P$ 、力  $F_E$  和力矩  $M_E$  单独作用时  $C$  处的挠度和转角,将结果进行叠加,得  $C$  处总的挠度和转角

$$\begin{cases} \theta = \frac{M_E}{E} \left( \frac{a}{J_2} + \frac{L}{J_1} \right) + \frac{P}{2E} \left( \frac{a^2 + 2aL}{2J_2} + \frac{L^2}{2J_1} \right) \\ v = \frac{M_E}{E} \left( \frac{a^2}{2J_2} + \frac{L^2 + 2aL}{2J_1} \right) + \frac{P}{2E} \left( \frac{a^3 + 3a^2L}{6J_2} + \frac{L^3 + 3aL^2}{6J_1} \right), \end{cases} \quad (2)$$

将变形协调条件  $\theta = 0$  代入式(2),并进行变形,得到  $C$  处的挠度

$$v = \frac{P a^4 \left( \frac{J_1}{J_2} \right)^2 + (6a^2 L^2 + 4a^3 L + 4aL^3) \frac{J_1}{J_2} + L^4}{2E \cdot 12J_1 \left( a \frac{J_1}{J_2} + L \right)}, \quad (3)$$

由于  $J_1$  远小于  $J_2$ ,而  $a$ 、 $L$  取同一数量级,则式(3)可近似为

$$v = -\frac{P L^3}{2E12J_1} = -\frac{PL^3}{2Ebt^3}, \quad (4)$$

平行板弹性铰链的刚度

$$K_1 = \left| \frac{P}{v} \right| = \frac{2Ebt^3}{L^3}, \quad (5)$$

微动工作台采用双层平行板弹性铰链结构,其刚度

$$K = 2K_1 = \frac{4Ebt^3}{L^3}, \quad (6)$$

#### 3.2 有限元分析

根据微动工作台设计要求及前述微动工作台刚度计算公式,初步确定结构尺寸  $b$ 、 $t$ 、 $L$ ,材料选用 LY12。利用有限元分析软件 ANSYS8.0,建立微驱动补偿工作台的有限元模型,采用三维实体四面体单元 SOLID92 对实体模型进行单元划

分, Y 轴微动工作台有限元网格模型如图 4 所示。

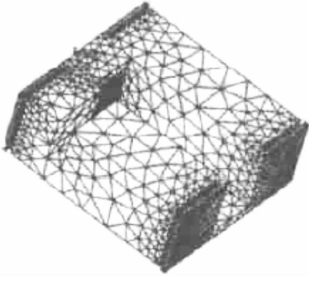


图 4 Y 轴微动工作台的有限元网格模型  
Fig. 4 Mesh model of Y-axis micro-table

将双层平行板弹性铰链与基座相连平面上所有节点的所有自由度全部约束, 在 PZT 输出力方向和相对应的节点上施加 150 N 的力, 利用 ANSYS 计算出其静态输出位移、平行板铰链的应力分布、工作台的振动模态和相对应的固有频率。根据有限元分析结果并进行优化设计, 使工作台在满足输出位移要求的基础上, 提高微动工作台的固有频率, 增强微工作台的抗振能力。PZT 采用德国 PI 公司内部集成高性能应变传感器的 P-841.20 和 P-841.30, 实现微驱动补偿工作台的机构、驱动、检测一体化。对有限元模型进行局部修改, 研制出两自由度、运动解耦的微驱动补偿工作台。

## 4 模糊 PI 控制器设计

模糊控制是一种以模糊数学、模糊语言形式的知识表示和模糊逻辑的规则推理为理论基础, 采用计算机控制技术构成的一种闭环结构的智能控制系统, 其主要优点是其控制系统不依赖于系统的精确数学模型, 且模糊控制中的模糊知识、模糊规则和合成推理是基于专家知识或以往的经验, 并通过学习可不断更新, 具有一定的智能性和自学习性。

PZT 是一种理想的微位移系统驱动元件, 但是它存在着迟滞、蠕变等固有缺陷, 这给 PZT 驱动微动系统的建模和控制带来困难。PZT 驱动微动系统控制有其特殊性, 就闭环 PID 控制而言, 微分系数  $K_d$  对系统性能的影响很小,  $K_d$  值一般取零或者设置很小。

综合上述因素, 为简化控制器设计, 本文设计

的模糊 PI 控制器, 其模糊推理器只对 PI 控制器的比例系数  $K_p$  和积分系数  $K_i$  进行修正, 模糊 PI 控制器原理如图 5 所示。

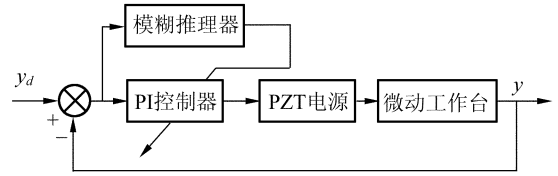


图 5 模糊 PI 控制器  
Fig. 5 Fuzzy PI controller

工作原理: 计算机根据参考输入  $y_d$  和反馈信号  $y$ , 计算实际位置和理论位置之间的偏差以及当前的偏差变化速率, 在模糊推理器中借助模糊经验进行模糊推理, 模糊推理器的输出为 PI 控制器的比例系数  $K_p$  和积分系数  $K_i$ , 即实时调整的  $K_p(n)$  和  $K_i(n)$ ; 由于每一次控制时 PI 控制器的参数都是根据具体控制情况进行实时修正的, 因而能够实现控制的最优化。

模糊推理器的输入为系统当前的偏差, 输出为 PI 控制器的比例系数和积分系数, 这是一个单输入双输出的系统。由于比例系数和积分系数对误差的敏感程度不同, 在控制器设计中对不同增益参数的调整采用不同的论域与隶属度函数。基于此思想, 将单输入双输出的推理器结构转变为两个单输入单输出的子推理器进行分别设计, 这一转变实际上是忽略了参数之间的耦合关系, 从而使问题求解的难度大大降低。为弥补一般模糊控制分档造成的阶梯变化, 模糊推理器的输出并非控制器的实际参数  $K_p(n)$  和  $K_i(n)$ , 而是控制器参数的修正量: 比例修正系数  $C_p(n)$  和积分修正系数  $C_i(n)$ 。控制器实际参数为

$$\begin{cases} K_p(n) = K_{p_0} C_p(n) \\ K_i(n) = K_{i_0} C_i(n) \end{cases}, \quad (7)$$

式(7)中,  $K_{p_0}$ 、 $K_{i_0}$  分别为比例系数原值和积分系数原值, 它们在事先输入; 这在一定程度上弥补了模糊推理中对变量进行模糊化及在推理器简化时忽略控制参数之间耦合关系所造成的误差, 同时提高了控制器对环境变化的适应能力。模糊推理器结构如图 6 所示。图中  $k_{cp}$ 、 $k_{ci}$  分别为各自控制器的比例因子。

最终整定的模糊控制规则如表 2 所示。

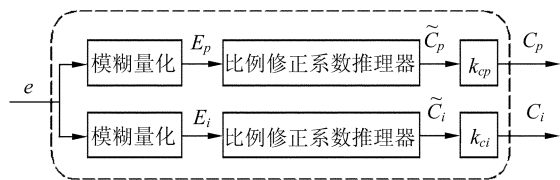


图 6 模糊推理器

Fig. 6 Fuzzy inference ruler

表 2 模糊控制规则表

Tab. 2 Look-up table for fuzzy PI controller

$E_p$	$\tilde{C}_p$	$E_i$	$\tilde{C}_i$
		-4	4
-3	3	-3	3
-2	2	-2	2
-1	1	-1	1
0	0	0	0
1	1	1	1
2	2	2	2
3	3	3	3
		4	4

## 5 实验研究

采用模糊 PI 控制方法对微驱动补偿系统进行闭环控制实验,图 7 为实验所得 X 轴微动工作台的 0~10 μm 上升阶跃特性曲线。从曲线可看出,采用模糊 PI 控制器控制微驱动系统,取得了满意的控制效果。

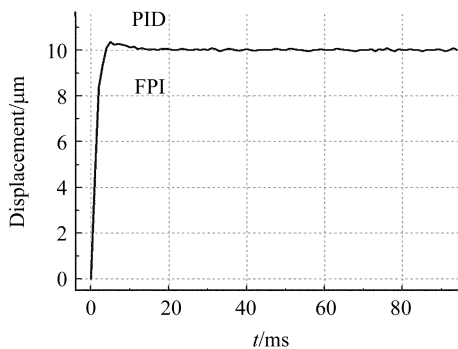


图 7 模糊 PI 控制的 X 轴微动台的阶跃曲线

Fig. 7 Test curve by PID and fuzzy PI

利用微动工作台补偿宏动工作台的偏摆误差,机器人的运动性能得到较大提高。为更好地显示微动工作台的补偿效果,做如下实验:锁定 y 轴宏动工作台,以消除 y 轴的偏摆误差影响;x 轴宏动工作台停止运动,于机器人末端沿 y 轴方向激振机器人,微动工作台进行偏摆误差补偿;利用德国 Heidenhain 公司的二维平面光栅 PP281R 测试补偿效果。图 8 为测试结果,图中:线 1 为微动工作台的与偏摆误差等值、反方向的运动曲线,线 2 为根据式(1)推算的机器人末端点的偏摆误差曲线,线 3 为平面光栅测试的机器人末端点的实际运动曲线。由图 8 可看出,利用微动工作台进行误差补偿,机器人末端在 ±2 μm 的范围内波动,机器人运动精度得到较大的提高。

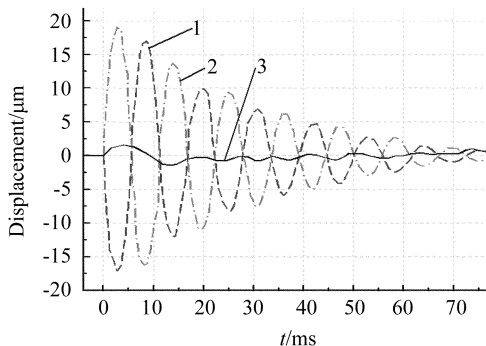


图 8 微动工作台补偿末端点偏摆误差测试曲线

Fig. 8 Test curve of error compensation

## 6 结论

本文介绍了基于偏摆误差补偿的高速高精度机器人系统的组成,重点讨论了该机器人系统的关键技术之一:微驱动补偿工作台的理论计算、有限元分析和实验研究。设计模糊 PI 控制器进行微驱动系统闭环控制,取得了满意的控制效果。利用微动工作台对机器人的偏摆误差进行补偿,机器人的运动轨迹精度得到较大的提高。

## 参考文献:

[1] 节德刚,刘延杰,孙立宁,等.一种宏微双重驱动精密定位机构的建模与控制[J].光学精密工程,2005,4:171-177. JIE D G, LIU Y J, SUN L N. Modeling and control of a macro-micro dual-drive ultra-precision positioning mechanism[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, 4: 171-177. (in Chinese)

[2] RAHMAN M, HEIKKALA J, LAPPALAINEN K. Modeling, measurement and error compensation of multi-axis

- machine tools[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2002, 40:1535-1546.
- [3] 刘品宽, 孙立宁, 荣伟彬. 新型智能电化学微加工系统的研究[J]. 高技术通讯, 2002, (6):83-87.  
LIU P K, SUN L N, RONG W B. Research on the system of electrochemical micromachining[J]. *High Technology Letters*, 2002, (6):83-87. (in Chinese)
- [4] XU W, KING T. Flexure hinges for piezoactuator displacement amplifiers: flexibility, accuracy and stress considerations [J]. *Precision Engineering*, 1996, 19(1):4-10.
- [5] 孙立宁, 孙绍云, 曲东升, 等. 基于 PZT 的微驱动一系统及控制方法的研究[J]. 光学精密工程, 2004, 12(2):55-59.  
SUN L N, SUN SH Y, QU D SH. Micro-drive positioning system based on PZT and its control[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, 12(2):55-59. (in Chinese)
- [6] WOO ZH W, CHUNG H Y, LIN J J. A PID type fuzzy controller with self-tuning scaling factors[R]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2000:321-326.

**作者简介:**晏祖根(1973—),男,江西人,博士研究生,主要研究方向为机器人控制、精密定位技术;

孙立宁(1964—),男,黑龙江人,教授,博士生导师,现任哈尔滨工业大学机器人研究所所长,研究领域为机器人机构与控制、微驱动与微操作机器人、微小型机器人。