

新型三自由度微机器人及其控制系统*

杨宜民 章 云

吴一辉

(广东工业大学机器人研究所·广州, 510090) (长春光机所19室·长春, 130022)

摘要: 本文提出一种新型三自由度微机器人的机械结构及其控制系统. 微机器人的机构具有三轴共体、体积小和内藏传感器等特点, 其控制器的鲁棒性强. 计算机仿真和实验结果表明, 该微机器人的动态性能好、重复精度高. 该微机器人可以单独使用, 也可安装在一般工业机器人的终端执行器上, 从而构成高精度装配机器人和能进行各种微操作的高精度机器人.

关键词: 微驱动器; 压电元件; 微机器人; 鲁棒性

1 引言

随着社会的进步、技术的发展, 在超精机械、光纤通讯、仪表、IC 和计算机系统、生物工程等领域中, 急需微型自动装置、微机器人. 近十年来, 美国、日本、德国等先进国家率先从事这方面的研究, 每年召开一次专门的国际学术会议进行学术讨论和交流. 经过几年的努力, 已经取得可喜的成绩, 并展示了广阔的应用前景.

我们在 1987 年完成微型直线驱动器的研究^[1], 并于 1988 年完成了一种三自由度微机器人的研究(MR-1 型)^[2]. 这种微机器人的 x, y 轴驱动是由两个微型直线驱动器正交叠装来完成的, 因而带来了安装的麻烦、要求高、控制器参数不同、调试复杂、轴间干扰等问题. 为了解决这些问题, 我们研制了二坐标微驱动器^[3]. 在此基础上, 我们完成了另一种新的三自由度 MR-2 型微机器人的研制.

2 微机器人的机械结构和动作原理

2.1 二坐标微驱动器

如图 1(a), (b) 所示, 平行四边形的 O 点固定. 如果在 A 点加上一个向右的力, 则 F 点移到 F_1 ; 在 B 点加一个向上的力, 则 F 点移到 F_2 ; 如果在 A, B 点同时加上力, 则 F 点移到 F_3 .

利用上述原理的二坐标微驱动器的机械结构如图 1(c) 所示, 由压电元件和带圆弧缺口的双平行四边形杠杆机构所组成. 当压电元件 PZT_1 受控伸长或收缩时, 则驱动器的输出端 F 作上下运动; 当压电元件 PZT_2 受控收缩或伸长时, 则驱动器的输出端 F 作左右运动. 这样, 控制 PZT_1, PZT_2 则可以控制驱动器输出端 F 在平面内 (x, y 轴方向) 运动.

2.2 微机器人的机械结构和动作原理

在上述二坐标微驱动器的输出端 F 上粘结双压电型(Bimorph) 压电驱动器 PZT_3 , 便组成一个三轴共体、无摩擦传动的三自由度微机器人, 如图 2 所示. 如果在 PZT_3 的输出端 M 处装上刀架和刀具 N , 通过控制 PZT_1, PZT_2 , 可使刀具 N 在平面内作加工运动; 通过控制 PZT_3 , 能使刀具 N 作进刀、退刀运动.

* 国家 863 计划资助项目.

本文于 1994 年 9 月 10 日收到. 1995 年 5 月 3 日收到修改稿.

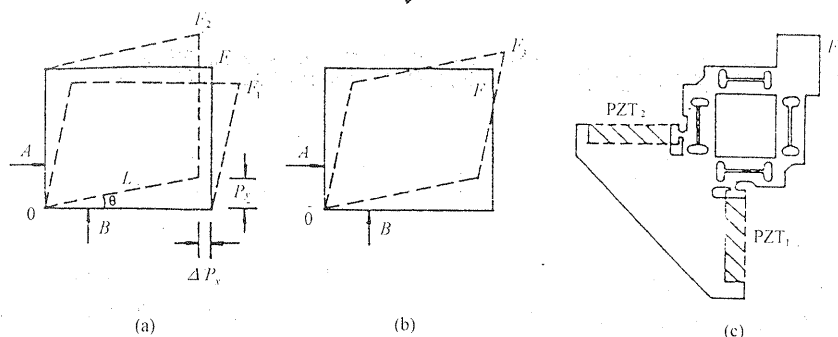


图1 二坐标微驱动器的动作原理及机械结构

在微机器人机构的圆弧缺口处和 PZT₃ 的上下面上均贴有半导体应变片,以检测 x, y, z 三个方向的变位,并用于构成变位闭环控制系统,以提高微机器人的定位控制精度.

3 微机器人的控制系统

3.1 数学模型及控制器的设计

从微机器人的结构可知, x, y 轴分别为压电元件与一个弹性杠杆机构的组合,它们的传函等效为一个积分环节和一个二阶欠阻尼环节的串联. z 轴也具有相同的性质. 经实测,它们的传函分别为:

$$G_x(s) = \frac{b_{x0}}{s(s^2 + a_{x2}s + a_{x1})} = \frac{3.372 \times 10^3}{s^3 + 984.7s^2 + 3.836 \times 10^7 s}, \quad (1a)$$

$$G_y(s) = \frac{b_{y0}}{s(s^2 + a_{y2}s + a_{y1})} = \frac{2.688 \times 10^3}{s^3 + 399.4s^2 + 3.567 \times 10^7 s}, \quad (1b)$$

$$G_z(s) = \frac{b_{z0}}{s(s^2 + a_{z2}s + a_{z1})} = \frac{7.33 \times 10^8}{s^3 + 21.26s^2 + 2.234 \times 10^5 s}. \quad (1c)$$

下面以 x 轴为例说明控制器的设计. 图 3 为 x 轴控制器方框图,其中 P_x 为 x 轴的变位输出, $V_x = K_x P_x$ 为变位测量电路的电压输出, N_y 为干扰项. $G_{x0}, G_{kx}(s), G_{hx}(s)$ 组成控制器.

从图 3 可得

$$\begin{aligned} \frac{V_x(s)}{U_x(s)} &= \frac{G_{x0} G_x(s) K_x}{1 + G_{x0} G_x(s) K_x G_{hx}(s) + G_{kx}(s)} \\ &= \Phi_x(s). \end{aligned} \quad (2)$$

根据微机器人动态指标的要求,取如下期望传递函数

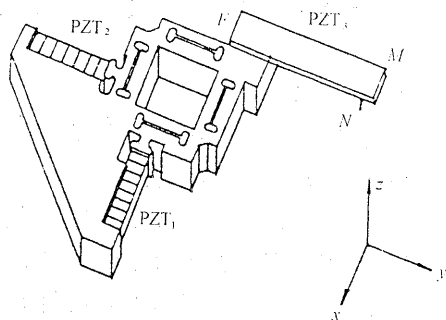
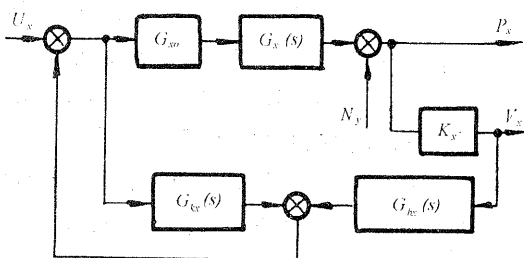


图2 微机器人的机械结构示意图

图3 x 轴控制器方框图

$$\begin{aligned}\Psi_x(s) &= \frac{\omega_0 \omega_1^2}{(s + \omega_0)(s^2 + 2\zeta\omega_1 + \omega_1^2)} \\ &= \frac{6283 \times 3141.6^2}{(s + 6283)(s^2 + 3141.6s + 3141.6^2)}.\end{aligned}\quad (3)$$

那么,依据 EMM 法^[4],若要 $\Phi_x(s)$ 与 $\Psi_x(s)$ 匹配,则对应的控制器为:

$$G_{x0} = 230.2, \quad (4a)$$

$$G_{kx}(s) = \frac{K_2 s^2 + K_1 s + K_0}{s^2 + q_1 s + q_0} = \frac{8435.3s + 2.529 \times 10^7}{s^2 + 5024s + 5024^2}, \quad (4b)$$

$$G_{hx}(s) = \frac{h_2 s^2 + h_1 s + h_0}{s^2 + q_1 s + q_0} = \frac{-1.9s^2 - 14224s + 2.524 \times 10^7}{s^2 + 5024s + 5024^2}. \quad (4c)$$

同理,选取

$$\Psi_y(s) = \Psi_x(s), \quad (5a)$$

$$\Psi_z(s) = \frac{1256 \times 628.3^2}{(s + 1256)(s^2 + 628.3s + 628.3^2)}. \quad (5b)$$

可得到 y 轴和 z 轴的控制器:

$$G_{y0} = 230.2, \quad (6a)$$

$$G_{ky}(s) = \frac{9020.6s + 3.562 \times 10^7}{s^2 + 5024s + 5024^2}, \quad (6b)$$

$$G_{hy}(s) = \frac{-1.2s^2 - 17983s + 2.524 \times 10^7}{s^2 + 5024s + 5024^2}, \quad (6c)$$

$$G_{z0} = 67.56, \quad (7a)$$

$$G_{kz}(s) = \frac{1884s + 723931}{s^2 + 942s + 942^2}, \quad (7b)$$

$$G_{hz}(s) = \frac{-6.1s^2 - 4205.2s + 887363.9}{s^2 + 942s + 942^2}. \quad (7c)$$

3.2 渐近解耦和鲁棒性分析

从微机器人的结构知, z 轴与 x, y 轴完全独立, 它的运动对 x, y 方向无影响, 但 x 与 y 轴之间存在耦合. 从图 1(a) 知, 当 y 轴产生变位 P_y 时会在 x 轴产生 ΔP_x 的变化, 即

$$\begin{aligned}P_x &= L \sin \theta, \\ \Delta P_x &= L - L \cos \theta, \\ \frac{\Delta P_x}{P_y} &= \frac{L - L \cos \theta}{L \sin \theta} \doteq \frac{1}{2} \theta.\end{aligned}\quad (8)$$

由于 θ 很小, 故这种耦合影响不大.

另一方面见图 3, N_y 为 y 轴对 x 轴的轴间干扰, 此时

$$P_x(s) = \frac{1}{K_x} \Phi_x(s) U_x(s) + \frac{1}{1 + G'_x(s) G_{hx}(s) + G_{kx}(s)} N_y(s).$$

式中

$$G'_x(s) = G_{x0} G_x(s) K_x.$$

令 $U_x(t) = 0$, $N_y(t) = N \cdot I(t)$, 则

$$P_{xs} = \lim_{s \rightarrow 0} P_x(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{s}{1 + G'_x(s) G_{hx}(s) + G_{kx}(s)} N_y(s) = 0. \quad (9)$$

可见,轴间干扰并不影响变位 P_x 的稳态值.

由于存在测量误差及建模的简化,所以得到的数模与实际系统有差异,下面给出系统参数在多大范围变化时,仍能保证闭环稳定.

设 x 轴的参数有如下摄动

$$b_{x0} = b_{x0}^0 + \Delta b_{x0}, \quad |\Delta b_{x0}| \leq \delta_x b_{x0}^0, \quad (10a)$$

$$a_{x2} = a_{x2}^0 + \Delta a_{x2}, \quad |\Delta a_{x2}| \leq \delta_x a_{x2}^0, \quad (10b)$$

$$a_{x1} = a_{x1}^0 + \Delta a_{x1}, \quad |\Delta a_{x1}| \leq \delta_x a_{x1}^0. \quad (10c)$$

式中 $b_{x0}^0, a_{x2}^0, a_{x1}^0$ 为(1a)中的实测值. 据 Kharitonov 定理^[5],经计算机计算可得

$$\delta_x = 8\%.$$

同理有

$$\delta_y = 8\%, \quad \delta_z = 8\%.$$

可见本系统能在较大范围内保证闭环系统稳定.

图 4(a)表示 x 轴阶跃响应的仿真和实测结果,另外两轴相似,可见其动态耦合影响很小,从图 4(b)可以看到 x, y, z 轴的幅频特性与期望特性基本吻合, x, y 轴的带宽在 400Hz 以上, z 轴的带宽为 80Hz.

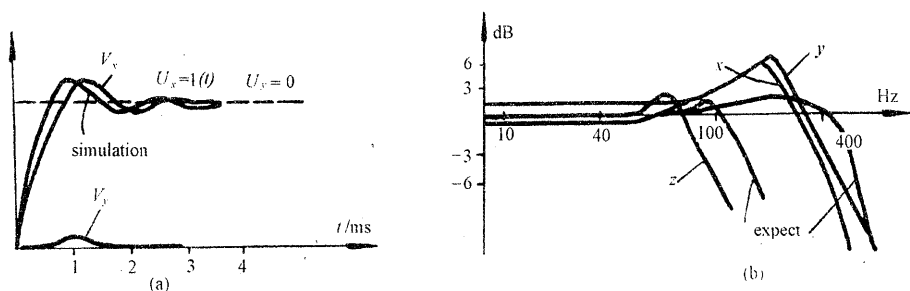


图 4 x 轴的阶跃响应和 3 轴的幅频特性

3.3 微机器人的控制系统

微机器人的控制系统框图如图 5 所示.

图中的控制器是上述的三输入三输出控制系统,其中有电流环和变位环. 电流环使压电元件实现恒流控制,加上变位环使微机器人的定位精度得以提高. 微型计算机有二个功能,一是根据用户要求给出微机器人的 x, y, z 轴的数字动作指令,经 D/A 变换后送入控制器;另一是显示微机器人 x, y 方向的指令图形和实际运动图形,方便用户监视微机器人的工作情况.

4 实测结果

采用 HP—5528A 双频激光干涉仪、BK3010 信号发生器和 MP3350 数字存储示波器对 MR—2 型微机器人进行测试. MR—2 型微机器人主要技术参数如下:

驱动范围: $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m} \times 250\mu\text{m}$,

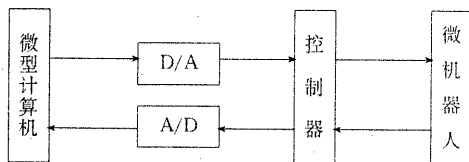


图 5 微机器人的控制系统框图

重复精度: $0.03\mu\text{m}(x, y \text{ 轴}), 0.1\mu\text{m}(z \text{ 轴})$,

驱动力: $0.74\text{N}(x, y \text{ 轴}), 0.2\text{N}(z \text{ 轴})$,

系统带宽: $400\text{Hz}(x, y \text{ 轴}), 80\text{Hz}(z \text{ 轴})$,

体积: $55 \times 80 \times 10\text{mm}^3$.

使用 MR-2 型微机器人进行刻字加工,其结果如图 6 所示.

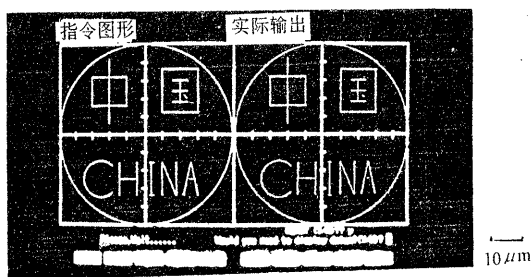


图 6 使用 MR-2 型微机器人的刻字加工结果

5 结束语

本研究以高精度和动态性能好为目标,提出一种具有三轴一体、带压电元件的无摩擦一体化机构的新型三自由度微机器人机构,并设计它的鲁棒控制器.由于机械结构独特、压电元件采用恒流控制、内藏传感器并构成变位闭环控制、用 EMM 法设计控制器,因此 MR-2 型微机器人具有第四部分给出的优良性能.同时,由于采用微型计算机构成控制系统,用户能方便对微机器人进行控制,并能直观地监视微机器人的工作.

MR-2 型微机器人可以单独使用.略为改变微机器人的安装结构,把它安装在一般工业机器人的终端执行器上作二次驱动,则可提高机器人的动作精度,从而构成高精度装配机器人,也可构成用于大规模 IC 的修理或生物医学中进行各种微操作的高精度机器人.

参 考 文 献

- [1] 杨宜民等.微机器人的机构和控制的研究.机器人,1988,(4):13—16
- [2] 杨宜民等.生物及医学工程用的微型机器人的基础研究.全国第二届机器人学术会议论文集,沈阳,1989,672—678
- [3] 章云等.新型两坐标微驱动器鲁棒控制器.中国自动化学会(中南六省区)第十届学术会议论文集,广东,佛山,1992, 61—68
- [4] 市川邦彦.最新自动制御讲义.日本学献社,1986,134—143
- [5] Yeung, K. S. and Wang, S. S.. A Simple Proof of Kharitonov's Theorem. IEEE Trans Automat. Contr. ,1987, AC-32 (9):822—823

A New 3DOF Micro-Robot and Its Control System

YANG Yimin and ZHANG Yun

(Research Institute of Robotics, Guangdong University of Technology • Guangzhou, 510090, PRC)

WU Yihui

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanism • Changchun, 130022, PRC)

Abstract: This paper presents a new mechanism and control system of a micro-robot with 3DOF. The micro-robot features three axes in a body, small dimension, internal sensors and strong robust stability. Computer simulation and experimental results show that the micro-robot has good dynamic characteristic

and high repeatability. It can not only be used as a single equipment, but also can be installed on the end effectors of widely-used industrial robots to compose high accuracy assembly robots and micro-operation robots with high accuracy.

Key words: micro-actuator; PZT; micro-robot; robust

本文作者简介

杨宜民 1945年生, 1969年毕业于广东工学院, 毕业后留校任教, 先后在国内东北大学、北方工业大学、中山大学研习四年, 在日本筑波大学、东京大学从事“微驱动器、微机器人”研究二年半, 现为广东工业大学教授、机器人研究所所长, 研究领域: 自动控制、机器人。

章云 1963年生, 副教授, 1982, 1986年先后在湖南大学获学士、硕士学位, 随后留校任教, 1989年调入广东工业大学, 主要研究领域: 智能控制、机器人、离散事件动态系统。

吴一辉 1965年生, 1986年毕业于天津轻工业学院, 1991年在长春光机所取得硕士学位, 现为在读博士生, 主要兴趣为微机构、微定位技术。

第二届“关肇直奖”得主揭晓

东南大学的田玉平博士和黄一博士在《'95中国控制会议》上荣获第二届“关肇直奖”。

经过第二届“关肇直奖”评奖委员会认真、严肃的初审, 从10篇请奖论文中选拔出4篇“关肇直奖”候选论文, 这四篇论文的作者们在《'95中国控制会议》上报告了各自论文的结果和方法, 评奖委员会认真听取了他们的报告。

在《'95中国控制会议》的闭幕式上, 第二届“关肇直奖”评奖委员会主任黄琳教授宣布了本届“关肇直奖”的得主为东南大学的田玉平博士和黄一博士, 他们的获奖论文题目为《具有线性和非线性不确定性的多变量系统的鲁棒稳定性》。中国自动化学会理事长、中国科学院院士杨嘉墀教授向田玉平博士和黄一博士颁发了证书和奖金, 并鼓励他们在攀登控制科学高峰、促进我国自动化技术的发展中做出更好的成绩。

(张纪峰)