集成式6自由度微动并联机器人系统

第六图书馆

基于机构、驱动、检测一体化的思想,研制出了压电陶瓷驱动的6自由度集成式并联微动机器人,对该机器人的机构、驱动、 检测、控制及误差补偿方法进行了研究。采用6自由度(6-SPS)并联结构设计了微动并联机器人的构型,对结构参数进行了优 化,并进行了运动空间分析和刚度分析。基于模块化设计思想将压电陶瓷驱动电源、微位移传感器检测电路、中央控制器组 合在一起,通过自定义的内部总线相连构成了并联机器人的驱动和控制系统。最后,给出了该机器人位姿测量方法,并分别在 压电陶瓷的开环与闭环控制状态下进行位姿测量,进而实现误差补偿。实验结果表明:该并联微动机器人可实现10mm平动重复 定位精度;0.0001。转动重复定位精度;具有定位精度和可靠性高,使用灵活方便的特点,满足多自由度精密定位的要求。基于 机构、驱动、检测一体化的思想,研制出了压电陶瓷驱动的6自由度集成式并联微动机器人,对该机器人的机构、驱动、检测 、控制及误差补偿方法进行了研究。采用6自由度(6-SPS)并联结构设计了微动并联机器人的构型,对结构参数进行了优化,并 讲行了运动空间分析和刚度分析。基于模块化设计思想将压电陶瓷驱动电源、微位移传感器检测电路、中央控制器组合在一 起,通过自定义的内部总线相连构成了并联机器人的驱动和控制系统。最后,给出了该机器人位姿测量方法,并分别在压电陶 瓷的开环与闭环控制状态下进行位姿测量,进而实现误差补偿。实验结果表明:该并联微动机器人可实现10nm平动重复定位精 度;0.0001。转动重复定位精度;具有定位精度和可靠性高,使用灵活方便的特点,满足多自由度精密定位的要求。并联微动机 器人 压电陶瓷 位姿测量 误差补偿光学精密工程王振华 陈立国 孙立宁哈尔滨工业大学机器入研究所,黑龙江哈 尔滨1500802007第六图书馆

第六图书馆 www.6lib.com

文章编号 1004-924X(2007)09-1391-07

集成式6自由度微动并联机器人系统

王振华,陈立国,孙立宁

(哈尔滨工业大学机器人研究所,黑龙江哈尔滨150080)

摘要:基于机构、驱动、检测一体化的思想,研制出了压电陶瓷驱动的6自由度集成式并联微动机器人,对该机器人的机构、驱动、检测、控制及误差补偿方法进行了研究。采用6自由度(6-SPS)并联结构设计了微动并联机器人的构型,对结构参数进行了优化,并进行了运动空间分析和刚度分析。基于模块化设计思想将压电陶瓷驱动电源、微位移传感器检测电路、中央控制器组合在一起,通过自定义的内部总线相连构成了并联机器人的驱动和控制系统。最后,给出了该机器人位姿测量方法,并分别在压电陶瓷的开环与闭环控制状态下进行位姿测量,进而实现误差补偿。实验结果表明:该并 联微动机器人可实现 10 nm 平动重复定位精度;0.000 1°转动重复定位精度;具有定位精度和可靠性高,使用灵活方便的 特点,满足多自由度精密定位的要求。

关 键 词:并联微动机器人;压电陶瓷;位姿测量;误差补偿 中图分类号:TP242.6 **文献标识码**:A

Integrated 6-DOF parallel micro-positioning robot

WANG Zeer-hua, CHENC i guo GUN I -ring

(Robotics Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: A piezoelectric element ariven 6-DOI parallel micro-positioning robot is designed based on integration of mechanism, driver and measurement. By-using the 6-SPS mechanism to develop the parallel robot, the mechanical parameters of the structure are optimized, and the working space and stiffness of the structure are analyzed. Then the driver, sensor and controller are integrated together with a defined internal bus based on the modularization. Finally, the poses of a parallel robot are measured both in open loop and close loop control conditions, and the error compensation is executed. The experimental results indicate that the liner precision and the rotation precision are 10 nm and 0.000 1°, respectively, which shows that the robot has high positioning precision and high reliability, and can be used expediently for the high integration structure.

Key words: parallel microrobot; PZT; pose measurement; error compensation

收稿日期:2007-01-25;修订日期:2007-03-01.

基金项目:国家 863 高技术计划资助项目(No. 2006AA04Z256)

1引言

微动机器人具有高精度定位特性,是微操作 系统不可或缺的组成部分,在精密工程、生物工程 等多个领域得到广泛重视。随着微操作对象尺度 的不断减小以及操作过程复杂度要求不断增加, 多自由度、高精度、高集成度成为微动机器人发展 的重要方向。

单自由度、纳米级定位精度的驱动和控制技术已经得到了较为深入研究,而在多自由度定位方面,通常采用串联式或积木式结构。随着自由度数的增多,串联结构会产生误差积累、精度下降、系统刚度低、响应速度慢、承载能力下降等问题。针对这些问题,Ellis最早提出了一种压电陶瓷驱动的并联微动结构^[1];Hudgens采用六个旋转输入实现了六自由度微动并联结构^[2];Grace研制了一种六自由度并联微动操作手实现了眼外科手术作业^[3];Wang研究了6自由度弹性铰链并联微操作手的动力学和运动学模型^[4]。与串壁和积木结构相比,并联机器人具音制度大、承载盒力强、误差小、精度高、响应速度快、自重符合比六等优点,而且很容易实现6自由度运动,更适合作为多自由度微动机器人^[5-6]。

目前压电/电致伸缩陶瓷驱动的柔性支承微 位移机构具有结构紧凑、体积小、无机械摩擦、无 间隙、具有很高的位移分辨率等特点。由于压电 或电致伸缩器件的机电耦合效应效率高,速度快, 来不及与外界热交换,因此不存在发热问题,同时 没有噪声,适用于在各种介质环境下工作,是比较 理想的微位移器件^[7-9]。

为了满足高精度、多自由度定位的要求,本文 将压电陶瓷致动器与并联机构相结合设计了一种 新型的压电陶瓷驱动并联微动机器人,可作为理 想的多自由度精密定位平台使用。

2 6 自由度微动并联机器人结构设 计

2.1 机构形式

图 1 是作者研制的集成式 6-DOF 微动并联 机器人,图 2 是该机构的原理图。这种机器人属 于六杆件双平台结构,上下两个平台通过六个运 动副结构形式相同的分支以并联方式相联接。根 据压电陶瓷直线输出位移的特点,本文采用标准 6-SPS 结构形式,每个杆的两端是两个球铰,中间 是一个移动副。六路驱动杆采用压电陶瓷作为驱 动器,同时作为支撑结构和位移传感器,实现了驱 动、机构、检测一体化集成。压电陶瓷选择德国 PI 公司生产的 P841.20 型压电陶瓷。其行程为 30 μm(100 V),内置电阻应变片式传感器,方便 实现闭环控制,两端带有连接螺纹,其开环分辨率 可达到 0.3 nm, 刚度 27 N/μm,出力达到 1 000 N。





图 2 6-SPS 并联机构原理图 Fig. 2 Sketch of parallel robot

并联机构末端空间自由度数,可通过如下公 式计算:

$$M = 6(n - g - 1) + \sum_{i=1}^{k} f_i, \qquad (1)$$

式中 M-机构自由度数;

n —组成机构的杆件数;

g一机构中运动副的数目;

 f_i 一第 i 运动副的相对自由度数。

通过上式计算可知,该机构的动平台自由度 数为6。

2.2 铰链形式选择及尺寸设计

为实现微动机器人六自由度运动,要求柔性

铰链可以实现绕三个正交轴的转动,所以需采用 万向柔性铰链(柔性球铰)。

柔性铰链的设计要求转动精度高、寄生运动 小,本文采用理论计算与有限元分析的方法对柔 性铰链进行优化设计。首先采用 solidworks 软 件进行实体建模,有限元分析软件采用 cosmos works,模型如图 3 所示。考虑到实际加工能力 和结构强度,铰链最小直径 D=2 mm。



图 3 柔性铰链有限元模型 Fig. 3 Flexible hinge analysis

在分析中分别采用铝合金和尼龙两种结构材 料,分析结果如表1。

表1 有限元分析数据

Tab. 1 Analysis results

项目	铝合金	
旋转方向刚度	2.1 N/mrad	0.02 N/mrad
弯曲安全系数	1.63(1 N)	8(1 N)
最大弯曲力 N	0.8(FOS=2)	4(FOS=2)
轴向刚度	45.5 N/μm	5.26 N/ μ m
轴向安全系数	7.6(5 N)	38(5 N)
最大轴向力 N	19 (FOS=2)	95(FOS=2)

由于压电陶瓷抗剪切力和抗扭曲力的能力较差,在保证结构强度前提下,选择旋转刚度较小的 材料利于改善压电陶瓷的受力状态。综合上述因素,在本设计中采用尼龙作为柔性铰链材料。

2.3 其它参数选择

为了扩大工作空间,上下平台半径之比一般 取为μ=0.7~1.2,现取上平台直径为85 mm(铰 链点所在圆周),下平台直径为110 mm(铰链点 所在圆周),上平台短边夹角取30°,为了计算方 便,将上平台短边连线与下平台长边连线投影重合。

	3	6 -DOF	微动产	F联机器	人	性能	分	紤
--	---	---------------	-----	------	---	----	---	---

3.1 运动学分析

根据 6-SPS 并联机构运动学逆解方程:

$$\mathbf{R} = \mathbf{T}\mathbf{R}' + \mathbf{P} , \qquad (2)$$

P一动坐标系原点在固定坐标系中的位置矢量。

对于运动范围在微米级的微动机器人,上述 转换矩阵中的正弦及余弦函数,因为转角足够小 (微弧度级),可近似认为 sin $\theta_x \approx \theta_x$ 、cos $\theta_x \approx 1$ 、 sin $\theta_y \approx \theta_y$ 、cos $\theta_y \approx 1$ 、sin $\theta_z \approx \theta_z$ 、cos $\theta_z \approx 1$ 。

于是T矩阵可简化为:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & -\theta_z & \theta_y \\ \theta_x \theta_y + \theta_z & 1 - \theta_x \theta_y \theta_z & -\theta_x \\ \theta_x \theta_y - \theta_y & \theta_y \theta_z + \theta_x & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

忽略高阶无穷小,可简化得到:

$$\begin{vmatrix} & -\theta_z & \theta_y \\ \theta_z & 1 & -\theta_x \\ \theta_z & \theta_z & 1 \end{vmatrix}.$$
(4)

··2 工作空间分析 当结构尺寸确定以后,各铰链点在空间中的

位置也随之确定,根据前述运动学逆解方程,采用 Matlab软件进行理论求解,其结果如下:

- 绕 x 轴方向:±0.033°; 绕 y 轴方向:±0.035°;
- 绕 z 轴方向:±0.1°。

假设绕 x、y、z 角为 0 时,平台中心运动空间 仿真结果如下:

杆长变化最大 0.032 mm;

沿 x 轴方向:±0.050 mm;

沿 y 轴方向:±0.058 mm;

沿 z 轴方向:0~0.033 mm。

图 4 为通过仿真计算得到的微动并联机器人 在绕 x、y、z 角为 0 时的工作空间。

3.3 刚度分析

采用 cosmos works 软件对模型进行工作台 整体刚度分析和安全校核,分析结果如图 5 所示。



图 4 微动并联机器人工作空间

Fig. 4 Working space of the parallel micro robot



(a)法向刚度分析(a)Normal stiffness analysis





、し、云向安全校核

(LIN armal s fet)

(c) 切向刚度分析
 (d)切向安全校核
 (c) Tangent stiffness analysis
 (d) Tangent safety verify
 图 5 微动并联机器人刚度分析
 Fig. 5 Stiffness analysis

表	2	机器	人整	体分	·析数据	
---	---	----	----	----	------	--

Tab. 2 🛛	Analysis	results	of the	whole	system
----------	----------	---------	--------	-------	--------

	数值		
法向刚度	20. 2 N/µm		
法向安全系数	7.9		
(负载=50 N)	1.2		
切向刚度	0.67 N/ μ m		
切向安全系数	2 2		
(负载=20 N)	L. L		

分析数据见表 2。

可见,并联机器人法线刚度要远大于切向刚 度,法向承载能力也远大于切向承载能力。从结 果来看,法向承载50N时,其安全系数足够大,但 切向承载20N时,安全系数接近安全下限。

4 控制系统设计

压电陶瓷具有体积小、质量轻、分辨率高、响 应速度快等优点,同时也存在迟滞、蠕变、非线性 等不足。本设计基于主从计算机控制系统,采用 数字 PID 控制算法对压电陶瓷驱动器进行位置 闭环控制。

该系统采用工控机作为主控计算机,实现人 机交互功能和运动轨迹的规划,而从计算机高速 数字信号处理器 DSP 单片机实现并联微动机器 人六个压电陶瓷的控制。主计算机直接接收外界 的控制命令和参数,对机器人位置实时监控,显示 信息,向下级发出各种控制命令等。从计算机接 收上一级计算机送入的命令和相应的位置信息, 实时检测被控压电陶瓷的状态值;依据给定量和 头际检测员前差值进行控制策略的计算,以求出 被控对综广 的控制信息。信息通讯口采用高速 EPP 接口方式,实现两级计算机之间信息的通 讯,此接口传递两级计算机协调控制所必需信息, 并订实现乡古从计算机的级连。系统中压电陶瓷 的位置反馈信号来源于集成在压电陶瓷内部的半 导体应变片的电压,此电压经精密运算放大电路 和 A/D 转换电路送入到单片机内部。压电陶瓷 的驱动采用哈工大博实精密测控有限公司研制的 HPV 系列压电陶瓷驱动电源。



图 6 数字化精密定位闭环控制器 Fig. 6 Digital controller

采用模块方式将压电陶瓷驱动电源、微位移

传感器检测电路、中央控制器组合在一起,通过自 定义的内部总线相连,外部通过 EPP 数字接口和 主计算机相连,设计了一个数字化的精密定位闭 环控制器,其实物照片如图 6 所示。每一台控制 器可同时控制两路压电陶瓷,三台该控制器级连 使用可同时控制六路压电陶瓷。

5 微动并联机器人测试及误差补偿

5.1 系统测试

本机器人具有六个独立自由度,因此要全面 测量空间姿态需要六路测量装置,测量装置采用 LVDT式(电感式)测微仪,为了提高测量精度及 实现测量装置的合理摆放,专门研制了测量支架, 如图 7 所示。图中 $d_1 \sim d_6$ 为六路 LVDT 微位移 传感器,分布在互相垂直的三个平面上。这个测 试块可以直接连接在工作平台上,通过直接测试 这个测试块的运动情况,得到工作台的运动姿态。 对较大。误差曲线如图 8(a)所示。







开坏测量中,将丽述的精密定位闭坏控制器 传感器反馈通道隔离,根据理论计算值给压电陶 瓷加一定的电压,输出对应的位移。由于受压电 陶瓷本身迟滞、蠕变等特性的影响,使其位移与电 压的对应关系造成的误差较大。相比而言,z、 θ_x 、 θ_y 方向的误差相对较小,而x、y、 θ_z 方向的误差相

图 8 开环、闭环测试曲线 Fig. 8 Measurement results with open loop and close loop

(b) Close loop

对压电陶瓷的闭环控制实验中,加入传感器

反馈通道,传感器实时检测压电陶瓷的位移状况, 根据控制器的控制策略使理想位移与实际位移保 持一致,控制精度为 0.1%,基本消除了压电陶瓷 的迟滞与蠕变影响。闭环测试曲线如图 8(b)所 示。可见闭环试验结果比开环效果明显要好得 多。

虽然末端姿态位置误差受到压电陶瓷驱动杆 长度误差、上下平台铰链的空间位置误差的直接 影响,但不是各误差源的简单线形叠加,而是同时 可能含有不同程度的部分重叠或抵消,这也正是 并联机构优于串联机构的优点之一。

5.2 初始误差修正

 $x = x_0 + \Delta x, y = y_0 + \Delta y \cdots , \theta_z = \theta_{z_0} + \Delta \theta_z.$

重复以上过程,直到 max $|\Delta L|_i$,小于指定的 允差值 ϵ 止。这时可认为平台初始位姿测量值已 求出来了。测量各个杆长初始值为:(63.062, 62.996,63.025,63.033,63.041,62.942),由程序 计算初始位姿误差为(-0.000 34,0.000 18, 0.000 3,-0.001 2,0.000 17,-0.000 028)。对 各输入电压进行修正,在实验输入电压前,六路电 压要分别减去(2.8,0.2,-0.7,-0.3,0.7,3)V。 5.3 误差补偿

前面提到的闭环测量实际上只是针对压电陶 瓷的闭环,只是消除了压电陶瓷的迟滞与蠕变对 定位精度的影响,并没有消除系统其它误差因素, 对于整个系统确切的应为半闭环。下面提出全闭 环思想,并通过试验来验证。

上位机中给出理论末端姿态,计算出各杆的 伸长量,将指令发送给闭环控制器,闭环控制器驱 动机器人动作。由 LVDT 测量出实际的末端姿 态,将数据传回上位机,上位机处理后将补偿量指 令送到闭环控制器,调整机器人的姿态,再由 LVDT 测出实际值,送回上位机。如此直到末端 位姿达到一定误差范围内的值。

对(10,10,15,0,0,0)和(8,8,16,0,0,0)两种 机器人位姿进行了误差补偿。其中(10,10,15,0, 0,0)的测量值为(11.07,9.36,13.4,0.001 1, 0.002 3,0.001 7),第一次补偿后为(9.79, 10.01,14.89,0.000 9,0.002,0.001 5),已经达 到很高精度,如果再次补偿,LVDT的误差开始 影响数据精度;(8,8,16,0,0,0)的测量值为 (7.83,9.72,14.51,0.000 7,0.001 2,0.004 2), 第一次补偿后为(7.48,8.43,15.64,0.001,0.001 1,0.002 5),第二次补偿后为(7.88,8.2,16.1, 0.000 7,0.001 2,0.001 4)。从上述数据可以看 田,经过两次补偿后,系统误差明显减小,但由于 材构耦个113,并不能完全消除定位误差。

结

.CUIIL

论

本文将压电陶瓷与并联机构相结合,设计了 一种集成式的并联微动机器人,该微动机器人采 用压电陶瓷微驱动元件,充分利用其高精度、高分 辨率、高频响、无发热、体积小、出力大等优点。采 用柔性铰链机构作为传动机构,具有无间隙、无摩 擦、高稳定性、高重复性的特点。整体采用 6-SPS 并联机构形式,具有结构紧凑、体积小、重量轻、刚 度大、在工作范围内一般不存在反解的多值性等 优点。该机器人将机构、驱动、检测一体化设计, 显示出很好的集成性。通过修正压电元件迟滞、 蠕变等误差因素,获得了很高的定位精度。实验 表明,该机器人可以实现 10 nm 直线重复定位精 度和 0.000 1°转动重复定位精度。该机器人具有 集成度高、定位精度高的特点,可以方便地集成到 精密操作系统中实现多自由度、高精度定位。

参考文献:

- [1] ELLIS G W. Piezoelectric micromanipulators[J]. Science Instruments and Techniques, 1962,138: 84-91.
- [2] HUDGENS J C, TESAR D. Analysis of a fully-parallel six degree-of-freedom micromanipulator[C]. Proceedings of IEEE International Conference on Advanced Robotics, Pisa, Italy, 1991: 814-820.
- [3] GRACE K W, COLGATE J E, GLUCKBERG M R. A six degree of freedom micromanipulator for ophthalmic surgery [C]. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Atlanta, USA, 1993: 630-635.
- [4] WANG S C, HIKITA H, KUBO H, et al.. Kinematics and dynamics of a 6 degree-of-freedom fully parallel manipulator with elastic joints[J]. Mechanism and Machine Theory, 2003, 38: 439-461.
- [5] 黄真,礼令富,方跃法. 并联机器人机构学理论及控制 [M]. 北京:机械工业出版社, 1997.
 HUANG ZH, KONG L F, FANG Y F. Theory and Control of Parallel Robotics Mechanism [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1997. (in Chinese)
- [6] 安辉. 压电陶瓷驱动六自由度并联微动机器人的研究 [D]. 哈尔滨工业大学博士学位论文,1995. AN H. 6-DOF parallel robot driven by PZT [D]. Graduate Harbin Institute of Technology, 1995. (in Chinese)
- [7] 田延岭,张大卫,闫兵.二自由度微定位平台的研制 [J].光学 精密工程,2006,14(1):95-99.
 TIAN Y L, ZHANG D W, YAN B. Development of a 2-DOF micropositioning table [J]. Opt. Precision Eng., 2006,14(1): 95-99. (in Chinese)
- [8] 邵兵,孙立宁,曲东升.自由空间光通信 ATP 系统中精瞄偏转镜的设计[J]. 光学 精密工程,2006,14(1):43-46. SHAO B, SUN L N, QU D SH. Design of fine pointing tip/tilt mirror of ATP system for free space optical communication [J]. Opt. Precision Eng., 2006, 14(1): 43-46. (in Chinese)
- [9] 马立,荣伟彬,孙立宁. 三维纳米级微动工作台的设计与分析[J]. 光学 精密工程,2006,14(6): 1017-1024. MAL, RONG W B, SUN L N. Decis, and enclosis of a royel s-1元 F n roperationing stage [J]. Opt. Precision Eng., 2006, 14(6): 1017-1024. (in t, ine se)

作者简介:王振华(1974-),男,黑龙江人,哈尔滨工业大学博士研究生,主要从事微驱动技术方面的研究。E-mail: wzh @ hit. edu. cn

陈立国(1974-),男,辽宁省人,哈尔滨工业大学副教授,硕士研究导师,主要从事微操作及显微视觉等方面的研究。E-mail: clg@hit.edu.cn

孙立宁(1964一),男,黑龙江人,哈尔滨工业大学教授,博士生导师,主要从事微操作、微驱动及机器人学等方面的研究。E-mail: lnsun@hit.edu.cn