

文章编号 1004-924X(2007)04-0529-06

# 三支链六自由度并联柔性铰微动机器人的研究

王乐锋, 荣伟彬, 孙立宁

(哈尔滨工业大学 机器人研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:**提出了一种过程中采用的新型三支链六自由度并联微动机器人结构。采用两端分别带有柔性球铰和柔性旋转铰的支杆以简化结构,整体加工包含三个二自由度单元的基平台来有效减小装配误差,并用压电陶瓷驱动弹性平板获得高分辨率高精度。根据运动影响系数理论对其运动学进行分析,求出了其平动台、支杆和柔性铰链的速度表达式。考虑柔性铰链的弹性变形,基于虚功原理建立了其刚度模型。分析了此类并联微动机器人的设计目标和柔性铰链设计原则,采用模块化精密定位控制器设计了控制系统。实验结果表明,所设计的微动机器人可达到纳米级精度,简化了六支链六自由度并联微动机器人的复杂结构,减小了装配误差。

**关键词:**微动机器人;柔性铰链;运动学;刚度分析

**中图分类号:**TP242.6 **文献标识码:**A

## Research on a three-link six-DOF micromanipulator with flexure hinges

WANG Le-feng, RONG Wei-bin, SUN Li-ning

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

**Abstract:** A three-link six degree-of-freedom (DOF) parallel micromanipulator is presented. Three inextensible limbs with the spherical flexure joints and single-axis rotary flexure joints at the two ends are adopted to simplify the complex structure and a monolithic base plate that consists of three 2-DOF compliant units is utilized to reduce the assembly error. The piezoelectric elements are used as the high resolution actuators. The kinematics solutions are analyzed using the kinematic influence coefficient theory, as a result, the velocity of a movable platform, the limbs and the flexure hinges are derived. The stiffness model of the micromanipulator is determined considering the elastic deformations of the flexure hinges based on virtue work principle. The design targets and the design principles are discussed and the precise position controller modules are used to control the micromanipulator. Finally, the primary experiment tests are performed and the results show that the nanometer scale precision is attained.

**Key words:** micromanipulator; flexure hinge; kinematics; stiffness analysis

收稿日期:2006-09-30;修订日期:2006-12-25.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50605013);哈尔滨工业大学优秀青年教师培养计划资助项目(No. HITQNJS.2006.032)

## 1 引言

微动机器人作为微操作系统的重要组成部分,在精密机械工程、光纤对接、生物工程等领域具有广阔的应用前景。微动机器人模块也可与常规宏动机器人结合,用于误差补偿以实现大范围高分辨率运动。随着微纳米技术的快速发展,对具有纳米级定位精度的多自由度微动机器人性能提出了更高的要求。

并联机构因运动链封闭而具有关节运动误差累积小、刚度大及局域性运动灵活度高等特点。为实现微动机器人的高运动精度,微动机构的运动关节通常采用柔性铰链代替传统关节,以避免间隙和磨损。在并联微动机器人研究方面, Ellis 首先提出采用压电陶瓷驱动的并联微动机器人<sup>[1]</sup>。之后许多并联微动机器人样机相继诞生,其中六自由度并联微动机器人多采用六支链结构。如 Hudgens 和 Tesar 提出一种完全并联的 Stewart 平台式微操作手<sup>[2]</sup>;安辉研制了压电陶瓷驱动的 6-PSS 并联微动机器人<sup>[3]</sup>;金振林等提出了基于 6-PSS 三维平台机构的并联微动结构<sup>[4]</sup>。这些并联微动机器人相对串联结构而言,具有结构紧凑,刚度大等优点,但作为精密微动机器人,这些六支链并联微动机器人也存在传动链多,结构复杂,装配误差大等不足。

本文采用 3-PPSR 构型研制了三支链六自由度并联柔性铰微动机器人,并运用了整体式加工的二维精密微动单元,相比常规的六支链结构有效减小了装配误差并简化了结构。根据运动影响系数理论对其运动学进行分析,基于虚功原理建立了其刚度模型。考虑并联微动机器人的指标和柔性铰链特点,分析了和此类微动机器人设计有关的问题。在建立其控制系统基础上,进行了测试实验。本文采用的分析方法对其他并联柔性铰机器人也具有适用性。

## 2 结构组成

图 1 和图 2 分别为三支链六自由度并联微动机器人 CAD 图和结构示意图。

三条固定长度的支杆连接动平台和底座。支杆下端采用柔性球铰链,上端采用单轴旋转柔性

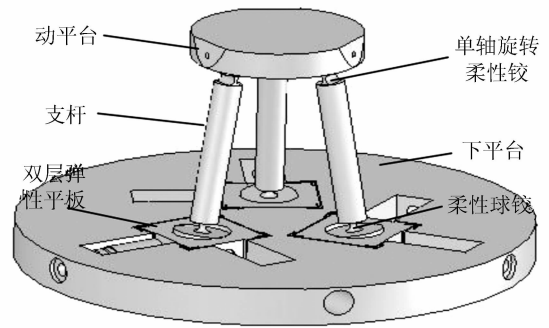


图 1 三支链六自由度微操作手

Fig. 1 Three-link 6-DOF micromanipulator

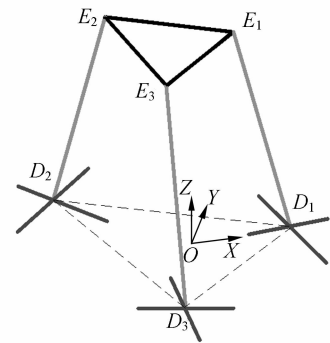


图 2 结构示意图

Fig. 2 Sketch of the structure

铰链。支杆上端三个铰链中心点和下端三个铰链中心点均呈等边三角形分布。下平台包含整体加工的三个二自由度微动单元,通过压电陶瓷输入位移。为简化结构,本文采用二自由度的直角双层弹性平板结构<sup>[5]</sup>,其具体模型可见本文第 4 部分。选用压电陶瓷驱动器具有体积小,位移分辨率高,响应速度快,输出力大等优点。将驱动器全部配置在基平台上,驱动器重量不构成其它驱动器的负载,因此可以有更高的预载,更少的功率损耗。支杆下端和上端采用柔性铰链代替常规运动副,具有无摩擦、无间隙、无需润滑等优点。因此这种并联微动机器人结构非常紧凑,并有助于提高精度和简化设计。

## 3 运动学分析

### 3.1 位置分析

根据图 2 中的表示,此类并联微动机器人的位置方程可表示为:

$$(X_{E_i} - X_{D_i})^2 + (Y_{E_i} - Y_{D_i})^2 + Z_{E_i}^2 = l^2, \quad (1)$$

$$\mathbf{E}_i \mathbf{D}_i \cdot \mathbf{D}_{i+1} \mathbf{D}_{i+2} = 0, \quad (2)$$

方程(1)表示杆长为定值, 方程(2)表示向量  $\mathbf{E}_i \mathbf{D}_i$  和  $\mathbf{D}_{i+1} \mathbf{D}_{i+2}$  垂直, 注意  $i, i+1$  和  $i+2$  的轮换性, 即  $i=1$  时,  $i+1, i+2$  分别代表 2, 3;  $i=2$  时,  $i+1, i+2$  分别代表 3, 1;  $i=3$  时,  $i+1, i+2$  分别代表 1, 2。

根据这两个方程, 当动平台增量位置和姿态  $\Delta \mathbf{U} = [\Delta X, \Delta Y, \Delta Z, \Delta \alpha, \Delta \beta, \Delta \gamma]^T$  给定时,  $\mathbf{E}_i$  的位置可知, 进而可求得输入端六维广义增量坐标  $\Delta \mathbf{q} = [\Delta M_1, \Delta N_1, \Delta M_2, \Delta N_2, \Delta M_3, \Delta N_3]^T$ 。由于压电陶瓷的位移量很小, 求解时可略去高阶无穷小量。写成矩阵形式即为

$$\Delta \mathbf{q} = \mathbf{J} \cdot \Delta \mathbf{U}, \quad (3)$$

### 3.2 Denavit-Hartenberg 坐标

考虑单条支链的 Denavit-Hartenberg 坐标, 假定  $S_1, S_2$  为驱动轴线方向,  $S_3, S_4, S_5, S_6$  为旋

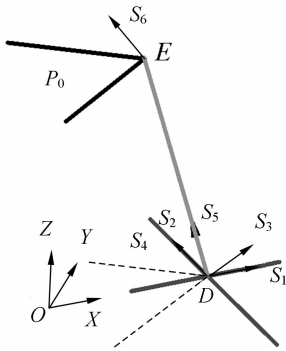


图 3 单支链 D-H 坐标

Fig. 3 D-H coordinates of a branch

$$\mathbf{G}_q^p = \begin{bmatrix} S_1 & S_2 & S_3 \times (P - \mathbf{R}_3) & S_4 \times (P - \mathbf{R}_4) & S_5 \times (P - \mathbf{R}_5) & S_6 \times (P - \mathbf{R}_6) \\ 0 & 0 & S_3 & S_4 & S_5 & S_6 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

其中  $\mathbf{R}_3, \mathbf{R}_4, \mathbf{R}_5$  代表与  $D_i$  有关的位置向量,  $\mathbf{R}_6$  代表与  $E_i$  有关的位置向量。则:

$$\mathbf{G}_q^L = \mathbf{G}_{\phi_{14}}^{L \ (i)} \mathbf{g}_{q \ \phi_{14}}^{\phi \ (i)} = \mathbf{G}_{\phi_{14}}^{L \ (i)} \mathbf{G}_{\phi_{14}}^{p \ -1 \ (i)} \mathbf{G}_q^p, \quad (13)$$

所以  $L^{(i)}$  的六维速度作为广义速度的函数可表示为:

$$\mathbf{V}_L^{(i)} = \mathbf{G}_q^L \dot{\mathbf{q}}, \quad (14)$$

### 3.5 弹性关节角速度

由于平台运动范围和弹性关节的变形均极其微小, 因此可以在弹性变形范围内用线性模型描述弹性关节的变形。

$$\dot{\phi}_{MD}^{(i)} = \dot{\phi}_3^{(i)} + \dot{\phi}_4^{(i)}, \quad (15)$$

转轴线方向。令  $\lambda_i$  表示  $OD_i$  与  $X$  轴正向夹角, 则  $\lambda_i = (i-1) \times 120^\circ, i=1, 2, 3$ 。如图 3 所示, 第  $i$  支链各轴线的单位矢量易表示为:

$$\mathbf{S}_1^{(i)} = OD_i / |OD_i| = [\cos \lambda_i, \sin \lambda_i, 0]^T, \quad (4)$$

$$\mathbf{S}_2^{(i)} = [\cos(\lambda_i + \pi/2), \sin(\lambda_i + \pi/2), 0]^T, \quad (5)$$

$$\mathbf{S}_6^{(i)} = \mathbf{S}_4^{(i)} = \mathbf{S}_2^{(i)}, \quad (6)$$

$$\mathbf{S}_5^{(i)} = (\mathbf{E}_i - \mathbf{D}_i) / |\mathbf{E}_i - \mathbf{D}_i|, \quad (7)$$

$$\mathbf{S}_3^{(i)} = \mathbf{S}_2^{(i)} \times \mathbf{S}_5^{(i)}. \quad (8)$$

### 3.3 平台速度

根据一阶运动影响系数理论<sup>[6]</sup>, 输入和输出间的运动关系可写为:

$$\mathbf{V}_p = \mathbf{G}_q^p \dot{\mathbf{q}}, \quad (9)$$

公式中  $\mathbf{G}_q^p$  代表一阶影响系数矩阵, 通常也被称为雅克比矩阵。  $\mathbf{V}_p = \{\mathbf{v}_p^T; \boldsymbol{\omega}_p^T\}^T$ , 其中  $\mathbf{v}_p = \{v_{p_x}, v_{p_y}, v_{p_z}\}^T$ , 代表平台质量中心的三维线速度,  $\boldsymbol{\omega}_p = \{\omega_{p_x}, \omega_{p_y}, \omega_{p_z}\}^T$ , 代表平台绕质量中心旋转的角速度。  $\dot{\mathbf{q}}$  代表驱动端的六维广义速度。

### 3.4 支杆速度

第  $i$  支链支杆  $L^{(i)}$  速度可表示为:

$$\mathbf{V}_L^{(i)} = \mathbf{G}_{\phi_{14}}^{L \ (i)} \dot{\phi}_{14}^{(i)}, \quad (10)$$

这里  $\mathbf{G}_{\phi_{14}}^{L \ (i)}$  是 64 矩阵, 由  $\mathbf{G}_q^p$  的前四列组成。

$\dot{\phi}_{14}^{(i)} = \{\dot{\phi}_1, \dot{\phi}_2, \dot{\phi}_3, \dot{\phi}_4\}^{T(i)}$  表示  $\dot{\phi}^{(i)}$  的前四个元素,  $\dot{\phi}^{(i)} = \{\dot{\phi}_1, \dot{\phi}_2, \dot{\phi}_3, \dot{\phi}_4, \dot{\phi}_5, \dot{\phi}_6\}^{T(i)}$  表示第  $i$  分支各运动副沿 Denavit-Hartenberg 坐标运动的速度。它们可表示为:

$$\dot{\phi}^{(i)} = \mathbf{g}_q^{\phi \ (i)} \dot{\mathbf{q}}, \quad (11)$$

这里  $\mathbf{g}_q^{\phi \ (i)} = \{\mathbf{G}_{\phi}^{p \ -1}\}^{(i)} \mathbf{G}_{p \ q}$ ,

$$\dot{\phi}_{ME}^{(i)} = \dot{\phi}_6^{(i)}, \quad (16)$$

$$\dot{\phi}_N^{(i)} = \dot{\phi}_5^{(i)}. \quad (17)$$

进一步有:

$$\dot{\phi}_{MD}^{(i)} = \sum_{j=3,4} \mathbf{g}_{q \ j}^{\phi \ (i)} \dot{\mathbf{q}}, \quad (18)$$

$$\dot{\phi}_{ME}^{(i)} = \mathbf{g}_{q \ 6}^{\phi \ (i)} \dot{\mathbf{q}}, \quad (19)$$

$$\dot{\phi}_N^{(i)} = \mathbf{g}_{q \ 5}^{\phi \ (i)} \dot{\mathbf{q}}. \quad (20)$$

这里  $\dot{\phi}_{MD}^{(i)}, \dot{\phi}_N^{(i)}$  表示第  $i$  分支支杆下端球铰的弯曲和扭转角速度,  $\dot{\phi}_{ME}^{(i)}$  表示第  $i$  分支支杆上端弯曲铰弯曲角速度, 符号  $\mathbf{A}_k$  表示  $\mathbf{A}$  矩阵的第  $k$  行。将上三式写成矩阵形式

$$\dot{\phi}_{MN}^{(i)} = J_f^{(i)} \dot{q}, \quad (21)$$

其中  $\phi_{MN}^{(i)} = [\dot{\phi}_{M_x}^{(i)}, \dot{\phi}_{M_y}^{(i)}, \dot{\phi}_N^{(i)}]^T$ 。

由于此类机器人运动范围微小,所以弹性关节处的微变形与驱动端微位移的关系可写为:

$$\Delta\phi_{MN}^{(i)} = J_f^{(i)} \Delta q, \quad (22)$$

## 4 刚度分析

### 4.1 下平台直角弹性平板刚度模型

根据结构力学理论可求得直角弹性平板  $X$  和  $Y$  方向传动刚度为<sup>[5]</sup>:

$$K_d = \frac{5 \cdot E_1 \cdot t_1 \cdot b_1^3}{2 \cdot l_1^3}, \quad (23)$$

其中  $E_1$  为材料弹性模量,  $t_1$ 、 $b_1$  和  $l_1$  分别为弹性平板厚度、宽度和长度。可见在弹性平板三个尺寸参数中,其宽度和长度比厚度对刚度有更大影响。

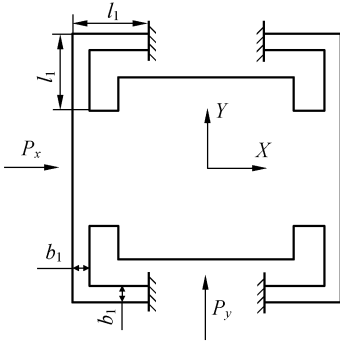


图 4 直角弹性平板结构模型

Fig. 4 Structural model of the 2-dimensional elastic plate

### 4.2 支杆处柔性铰链刚度模型

此类采用柔性铰链的并联微动机器人,其刚度不仅和直角弹性平板传动刚度有关,还与支杆两端柔性铰链的刚度有关。支杆上端单轴旋转柔性铰链(图 5a)采用直圆铰链形式,弯曲刚度近似为<sup>[7]</sup>:

$$k_{R_a} = \frac{2 \cdot E \cdot b \cdot \sqrt{t^5}}{9\pi \cdot r}, \quad (24)$$

其中  $E$  为材料弹性模量;  $b$ 、 $t$ 、 $r$  分别为铰链宽度、最小铰链厚度和铰链切削半径。可以看出在单轴直圆柔性铰链的三个尺寸参数中,最小铰链厚度对弯曲刚度影响最大,而铰链切削半径影响最小。

支杆下端柔性球铰(图 5(b))弯曲刚度  $k_{B_a}$  和

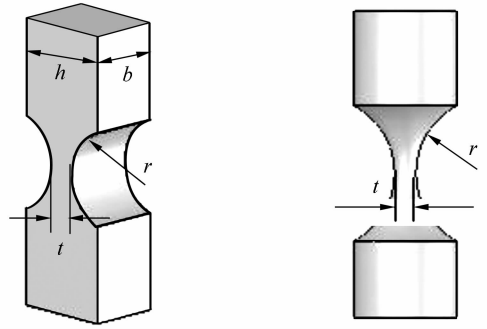


图 5 (a) 单轴旋转柔性铰链 (b) 柔性球铰

Fig. 5 (a) Single-axis rotational flexure hinge (b) flexible spherical joint

材料弹性模量  $E$ , 最小铰链厚度  $t$ , 铰链切削半径  $r$  有直接关系<sup>[8]</sup>, 由于公式冗长, 此处省略。扭转刚度为:

$$k_{B_y} = \frac{k_{B_a}}{1 + \nu}, \quad (25)$$

其中  $\nu$  为材料泊松比。

### 4.3 微动平台刚度模型

设并联微动机器人终端广义力矢量  $F_w = [F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z]^T$ , 驱动力为  $F_d = [F_{d1}, F_{d2}, F_{d3}, F_{d4}, F_{d5}, F_{d6}]^T$ 。假定并联微动平台末端微位移为  $\Delta U^s = [\Delta x^s, \Delta y^s, \Delta z^s, \Delta \alpha^s, \Delta \beta^s, \Delta \gamma^s]^T$ , 传动刚度引起的驱动位移变形为  $\Delta q^s = [\Delta M_1^s, \Delta N_1^s, \Delta M_2^s, \Delta N_2^s, \Delta M_3^s, \Delta N_3^s]^T$ , 柔性铰链变形为  $\Delta \phi^s = [\Delta \phi_{MN}^{(1)}, \Delta \phi_{MN}^{(2)}, \Delta \phi_{MN}^{(3)}]_{9 \times 1}^T$ 。

给系统以虚位移, 令终端虚位移为  $\delta U$ , 驱动端虚位移为  $\delta q$ , 柔性铰链虚变形为  $\delta \phi$ 。

根据虚功原理:

$$F_w^T \cdot \delta U - F_d^T \cdot \delta V - \Delta \phi^{sT} \cdot K_f \cdot \delta \phi = 0, \quad (26)$$

由于

$$F_d = K_d \cdot \Delta V^s = K_d \cdot J \cdot \Delta U^s, \quad (27)$$

$$\delta q = J \cdot \delta U, \quad (28)$$

$$\Delta \phi^{sT} = (J_f \cdot \Delta q^s)^T = (J_f \cdot J \cdot \Delta U^s)^T. \quad (29)$$

其中  $K_d$  为并联柔性铰机器人的传动刚度矩阵,  $K_d = \text{diag}(k_{d_i}), (i=1, 2, \dots, 6)$ ,  $k_{d_i}$  为第分支的传动刚度。式中  $K_f$  为系统柔性铰刚度矩阵, 可根据 4.2 中的描述求出。

将式(28)-(30)代入(27)可得:

$$F_w = (J^T \cdot K_d \cdot J + (J_f \cdot J)^T \cdot K_f \cdot (J_f \cdot J)) \cdot \Delta U^s, \quad (30)$$

其中  $J^T \cdot K_d \cdot J + (J_f \cdot J)^T \cdot K_f \cdot (J_f \cdot J)$  即为系统刚度矩阵。可以看出这类含有柔性铰的并联

微动机器人机构,其刚度不仅和传动刚度有关,而且与柔性铰链刚度直接相关。

## 5 样机研制

对常规并联机构,可操作度和运动稳定性是重要的性能指标。对基于柔性铰链的并联机构,可操作度依旧重要,然而运动稳定性应由刚度指标代替,因为关节刚度可用于阻止不期望的运动。

### 5.1 设计目标

一般意义上,并联微机器人的设计指标包括分辨率、精度、工作空间、承载能力、刚度、成本等等。因此其设计问题是一个特定约束下的多目标优化问题。本文的设计中,除了基本的分辨率、重复定位精度指标外,还考虑了工作空间和刚度两个性能指标,设计变量包括支杆柔性铰位置和尺寸和弹性平板的尺寸。并联机器人工作空间与逆解矩阵直接相关,可以用如下变量衡量。

$$\mu_w(J) = \left( \prod_j s_j(J) \right), \quad (31)$$

其中  $s_j(J)$  表示  $J$  的特征值。

对于压电陶瓷驱动并联微机器人,压电陶瓷的最大伸长量也直接影响其工作空间。

对于刚度指标,以最大化刚度矩阵特征值的乘积或最小化其乘积的倒数为目标

$$\mu_K(K_T) = \prod_j s_j(K_T), \quad (32)$$

$s_j(K_T)$  表示  $K_T$  的特征值。

下平台直角弹性平板参数及支杆两端柔性铰链对刚度会有影响,而对工作空间的影响可以忽略,因此设计中在分配刚度时,必须考虑柔性铰链参数。

### 5.2 柔性铰链设计

柔性铰链不仅影响系统刚度,而且对整个工作台的定位精度也有很大影响,因此必须要求其转动精度高、寄生运动小。设计微动工作台柔性铰链时应考虑满足以下条件:

(1) 铰链最大变形时的恢复力要小于驱动杆的最大驱动力。

(2) 铰链最大变形时的最大应力要小于其许用应力。

(3) 使微动台具有较高的固有频率以确保工作台具有较好的动态特性。

上面的三条原则是进行微动工作台柔性铰链

设计时应该满足的基本要求,也是进行柔性铰链设计的目标。

### 5.3 控制系统

压电陶瓷驱动器具有位移分辨率高,响应速度快等优点,但同时存在迟滞和蠕变现象,对定位精度会有一定影响,因此本文采用了闭环控制以提高压电陶瓷定位精度。

压电陶瓷驱动控制器采用哈尔滨工业大学博实精密测控有限责任公司生产的 PPC 系列数字式精密定位控制器。此系列精密定位控制器采用模块化设计,将压电陶瓷驱动电源、微位移检测模块、控制模块集成为一体,通过驱动电源模块驱动压电陶瓷,由传感模块对传感器反馈信号进行检测处理,通过以 DSP 为核心的主控模块对系统进行精密控制。针对所设计的六自由度并联微机器人,通过级联控制实现了对六路压电陶瓷及工作台的精密定位控制。

### 5.4 样机测试

针对微纳米操作的应用,根据以上的分析,综合考虑工作空间和刚度,研制了三支链六自由度微机器人样机。利用德国 SIOS 公司的 SP500 型激光干涉仪,对分辨率、重复定位精度和运动范围这些基本性能指标进行测试(图 6),测试结果如表 1 所示。



图 6 样机测试

Fig. 6 Test of the prototype

表 1 基本性能指标

Tab. 1 Primary specification

		运动范围	运动分辨率	重复定位精度
平动	X	5.876 $\mu\text{m}$	10.1 nm	0.089 $\mu\text{m}$
	Y	5.735 $\mu\text{m}$	10.1 nm	0.067 $\mu\text{m}$
	Z	1.021 $\mu\text{m}$	10.8 nm	0.048 $\mu\text{m}$
转动	X	8.79"	0.049"	0.178"
	Y	7.18"	0.047"	0.197"
	Z	26.64"	0.052"	0.141"

可以看出,此类并联微动机器人的  $X$ 、 $Y$  向平移运动范围大于  $Z$  向平移运动范围,但绕  $X$ 、 $Y$  轴的转动范围小于绕  $Z$  轴的转动范围,这是由其结构特性决定的,压电陶瓷的最大行程很大程度上影响了运动范围,如果需获得更大工作空间,可选择更大量程的压电陶瓷。由于在纳米级测试中,仪器和环境控制非常重要,因此本文给出的测试结果偏于保守。

动机器人结构,具有结构紧凑、装配简单、易于保证精度等特点。采用运动影响系数理论对其运动学进行了分析,得出了各部分速度关系。考虑了柔性铰链的弹性变型,根据虚功原理推导其刚度模型,其刚度不仅和传动刚度有关,而且与柔性铰链刚度有关。讨论了柔性铰链的设计原则,并采用模块化控制器设计了微操作手的控制系统。样机测试结果表明了设计的合理性。

## 6 结 论

提出的压电陶瓷驱动三支链六自由度并联微

### 参考文献:

- [1] ELLIS G W. Piezoelectric micromanipulators[J]. *Sci. Instrum. Tech.*, 1962, 138: 84-91.
- [2] HUDGENS J C, TESAR D. A fully-parallel six degree-of-freedom micromanipulator: kinematic analysis and dynamic model[C]. *Proc. 20<sup>th</sup> Biennial ASME, Mechanisms Conf. Trends and Development in Mechanisms Machines and Robotics*, 1988, 15(3): 29-37.
- [3] 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:哈尔滨工业大学, 1995.  
AN H. *Study of six degree-of-freedom parallel micro robot driven by piezoelectric electric element*[D]. Harbin Institute of Technology, 1995. (in Chinese)
- [4] 金振林, 高峰. 新型基于 6-PSS 三维平台机构的并联微动机器人[J]. *仪器仪表学报*, 2001, 22(6): 566-569.  
JIN ZH L, GAO F. A novel parallel micro-motion manipulator based on 6-PSS three dimensional platform mechanism[J]. *Chin. J. Sci. Instrum.*, 2001, 22(6): 566-569. (in Chinese)
- [5] 孙立宁, 马立, 荣伟彬, 等. 一种纳米级二维微定位工作台的设计与分析[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(3): 406-411.  
SUN L N, MA L, RONG W B, *et al.*. Design and analysis on a 2-DOF nanopositioning stage[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3): 406-411. (in Chinese)
- [6] 黄真, 赵永生, 赵铁石. 高等空间机构学[M]. 北京:高等教育出版社.  
HUANG ZH, ZHAO Y SH, ZHAO T SH. *Advanced Spatial Mechanism*[M]. Beijing: Higher Education Press. (in Chinese)
- [7] PAROS J M, WEISBORD L. How to design flexure hinges [J]. *Mach. Des.*, 1965: 151-157.
- [8] 王纪武, 陈恳, 李嘉, 等. 典型柔性铰链精度性能的研究[J]. *清华大学学报*, 2001, 41(11): 49-52.  
WANG J W, CHEN K, LI J, *et al.*. Precision of typical flexible hinges[J]. *J. Tsinghua Univ.*, 2001, 41(11): 49-52. (in Chinese)

作者简介:王乐锋(1980—),男,哈尔滨工业大学博士研究生,研究方向为微纳米操作技术。E-mail: lefengwang@126.com