

文章编号: 1001-2486 (2001) 01-0040-04

## 平面二自由度并联执行机构的设计与实现\*

吴学忠, 吴宇列, 李圣怡

(国防科技大学机电工程与自动化学院, 湖南长沙 410073)

**摘要:** 介绍了作者研制的一种用于半导体制造设备上的  $x-y$  并联执行机构。通过增加一个冗余运动链, 使得该机构在工作空间内没有奇异点。该机构的最大特点是可以大大减少现有机构的体积, 并具有较高的刚度, 可以在高速运动条件下具有较高的运动精度和跟踪性能。实验结果表明, 该系统的轨迹跟踪误差均低于 0.5 mm。

**关键词:** 并联执行机构; 奇异性; 冗余

**中图分类号:** TP164 **文献标识码:** A

## A Design of the Parallel X-Y Manipulator for High Speed Application

WU Xue-zhong, WU Yu-lie, LI Sheng-yi

(College of Mechatronics and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** A parallel  $x-y$  manipulator system for an epoxy writing application is developed. The best advantage of the system is a significant reduction in size of the present epoxy writing system. The other primary advantage is to increase rigidity of the parallel mechanism, thus ensure faster operation with higher accuracy and improved tracking performance. It shows that the tracking error is smaller than 0.5 mm.

**Key words:** parallel manipulator; singularity; redundancy

众所周知, 并联机构具有许多传统机构所不具备的优点, 但也存在一些致命的缺点, 如奇异性问题。如果机构处于奇异位置上, 此时系统的可控性较差, 即系统的刚度和精度都很低。为了克服以上问题, 本文提出了一种新的结构, 即通过增加驱动冗余来消除奇异点, 从而提高系统的可控性<sup>[1-3]</sup>。

## 1 基本原理

迄今为止, 人们已经对平面并联机构进行了广泛研究。这类机构一般由三个独立的运动链组成。其中每条运动链由三个单自由度的铰链组成。运动链的一端固定不动, 而另一端与运动平台相连。根据不同的铰链类型 (移动 P 和转动 R), 可以将机构分为 RPR, RRR, PPP 等。但是, 这些机构普遍存在奇异点多, 工作空间小等问题。

基于以上分析, 我们提出以下结构的并联机构, 如图 1 所示。该机构由三个运动链组成, 每条链的一端与驱动电机相连, 而另一端不是连到一个运动平台上, 而是交于中心点。这样, 机构就减少了一个旋转自由度。但由于增加了一个冗余驱动链, 使得该机构在工作空间内没有奇异点, 且运动学正解是唯一的<sup>[4,5]</sup>。

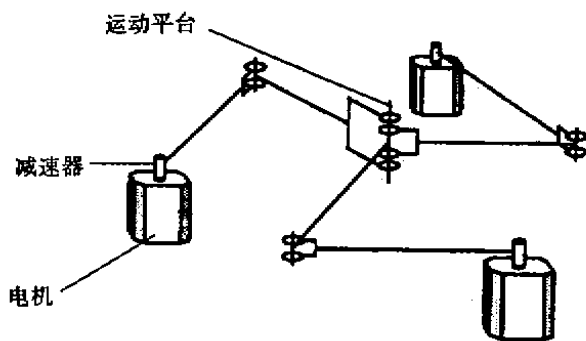


图 1 平面并联机构原理图

Fig.1 Schematic diagram of the planar parallel manipulator

\* 收稿日期: 2000-10-12

基金项目: 海外青年学者合作研究基金 (50029501)

作者简介: 吴学忠 (1966-), 男, 副教授, 博士。

1.1 运动学分析

图 2 所示为该机构的广义坐标。为了计算和加工方便，假设每条运动链的各个连杆的长度相等。

$$A_1B_1 = A_2B_2 = A_3B_3 = l_1$$

$$B_1C = B_2C = B_3C = l_2$$

$A_i$  代表第  $i$  个驱动关节，其在固定坐标系中的坐标为  $x_{Ai}$

$= [x_{Ai} \ y_{Ai}]^T$ 。 $B_i$  代表第  $i$  个非驱动关节，其坐标为  $x_{Bi} =$

$[x_{Bi} \ y_{Bi}]^T$ ， $C$  代表末端执行器，其坐标为  $x_C = [x_C \ y_C]^T$ 。

该机构的运动学正解问题可以表述为：已知三个驱动器的位置参数  $\theta_1, \theta_2$  和  $\theta_3$ ，求运动点  $C$  的位置。由图 2 可知

$$|x_C - x_{Bi}|^2 = l_2^2, \quad i = 1 \ 2 \ 3 \quad (1)$$

式中

$$x_{Bi} = x_{Ai} + l_1 \begin{bmatrix} \cos\theta_i \\ \sin\theta_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

$\theta_i$  为第  $i$  个驱动关节的转角。解  $x_C$  和  $y_C$  可得下列运动学  $x_C$  的正解方程：

$$x_C = \frac{|x_{B1}|^2(y_{B2} - y_{B3}) + |x_{B2}|^2(y_{B3} - y_{B1}) + |x_{B3}|^2(y_{B1} - y_{B2})}{2[x_{B1}(y_{B2} - y_{B3}) + x_{B2}(y_{B3} - y_{B1}) + x_{B3}(y_{B1} - y_{B2})]} \quad (3)$$

$$y_C = \frac{|x_{B1}|^2(x_{B3} - x_{B2}) + |x_{B2}|^2(x_{B1} - x_{B3}) + |x_{B3}|^2(x_{B2} - x_{B1})}{2[x_{B1}(y_{B2} - y_{B3}) + x_{B2}(y_{B3} - y_{B1}) + x_{B3}(y_{B1} - y_{B2})]} \quad (4)$$

如果没有第三条运动链，任何二条支链的  $x - y$  执行机构的运动学正解都有两个解，而本机构的运动学正解是唯一的。

该机构的运动学反解问题可以表述为：已知运动点  $C$  的位置，求解三个驱动器的位置参数  $\theta_1, \theta_2$  和  $\theta_3$ 。由图 2 中的三角形  $A_iB_iC$  可得

$$l_2^2 = l_1^2 + A_iC^2 - 2l_1A_iC\cos(\theta_i - \varphi_i) \quad (5)$$

式中  $A_iC^2 = |x_C - x_{Ai}|^2$  而  $\varphi_i = \arctan \frac{y_C - y_{Ai}}{x_C - x_{Ai}}$ 。解  $\theta_i$  得

$$\theta_i = \arccos \frac{l_1^2 - l_2^2 + A_iC^2}{2l_1A_iC} + \varphi_i \quad (6)$$

由于  $\arccos$  函数的不确定性，由方程 (6) 可以得到两个解。这样，对该机构而言，三条运动链总共有八个解。本研究中选择了位型较好的一种，该位型在工作空间内的作用力更具对称性及各向同性，且在工作空间内没有奇异点。

根据要求可以列出下列约束方程：

$$y_{A_1} + 2l_1 \leq 260 \quad (7)$$

$$x_{A_2} + 2l_1 \leq 200 \quad (8)$$

$$l_1 + r_d + r_m \leq l_2 \quad (9)$$

式中  $r_d$  为电机法兰半径， $r_m$  为固连在运动平台上的旋转轴半径。为了研究方便并满足系统要求，我们将该机构的三个驱动电机放置在等腰三角形的顶点上。

根据方程 (7) ~ (9) 我们可以选择下列最优解： $l_1 = 70, l_2 = 70$ 。则  $A_1(0, 62), A_2(184, 0), A_3(184, 124)$ 。假设运动坐标系的坐标原点位于  $(92, 62)$ ，则

$$\varphi_1 = 0, \varphi_2 = -146.023, \varphi_3 = 146.023$$

由方程 (6) 可得

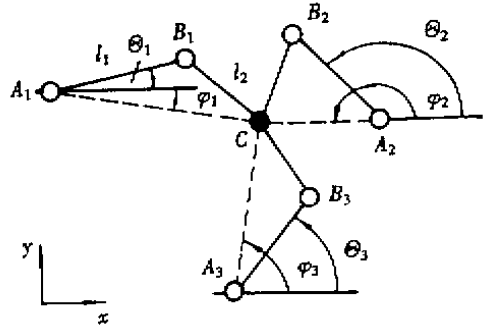


图 2 并联机构的广义坐标

Fig.2 The general coordinates

$$\theta_1 = \arccos \frac{l_1^2 - l_2^2 + A_1 C^2}{2l_1 A_1 C} + \varphi_1 = 48.918$$

$$\theta_2 = \arccos \frac{l_1^2 - l_2^2 + A_2 C^2}{2l_1 A_2 C} + \varphi_2 = 251.563$$

$$\theta_3 = \arccos \frac{l_1^2 - l_2^2 + A_3 C^2}{2l_1 A_3 C} + \varphi_3 = 183.609$$

以上分析表明,在机构中增加了一个冗余运动链和一个冗余驱动器,使得该机构在工作空间内没有奇异点,并使运动学正解具有唯一解。

## 1.2 控制系统设计

本控制系统硬件部分由一块四轴运动控制板和伺服电机驱动器组成。四轴运动控制板具有精密的PID控制功能。PC计算机负责信息流和数据流的管理,以及从运动控制板读取位置数据,并经过计算后将控制命令发送给运动控制板。计算机控制系统的流程图如图3所示。

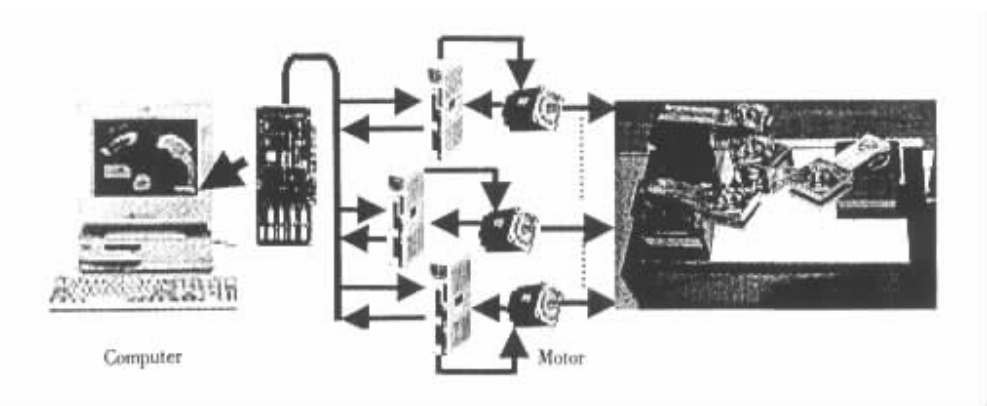


图3 PC基运动控制系统

Fig.3 Motion control system

本控制系统中的控制器采用PID算法加速度前馈,称为PID+Vff算法。PID+Vff控制算法计算如下:

$$E(n) = TP(n) - AP(n)$$

$$U(n) = E(n) * Kp + (E(n) - E(n-1)) * Kd + \text{Int}(E(n)) * Ki / 256$$

$$+ Tv * Kvff / 4 + Mbias$$

其中

- $E(n)$  为第  $n$  个采样时刻的位置误差;
- $TP(n)$  为第  $n$  个采样时刻的目标位置;
- $AP(n)$  为第  $n$  个采样时刻的实际位置;
- $\text{Int}(E(n))$  为第  $n$  个采样时刻的积分和;
- $Tv$  为第  $n$  个采样时刻的理想速度;
- $Mbias$  为电机偏差。

## 2 实验结果

本文给出了几组轨迹跟踪的实验结果,如图4所示。图中的前三个图为三个驱动电机的跟踪性能曲线,最后一个图为系统的位置跟踪性能曲线。由实验结果可以发现,系统在  $x$  和  $y$  方向上的跟踪误差均低于 0.5 mm。

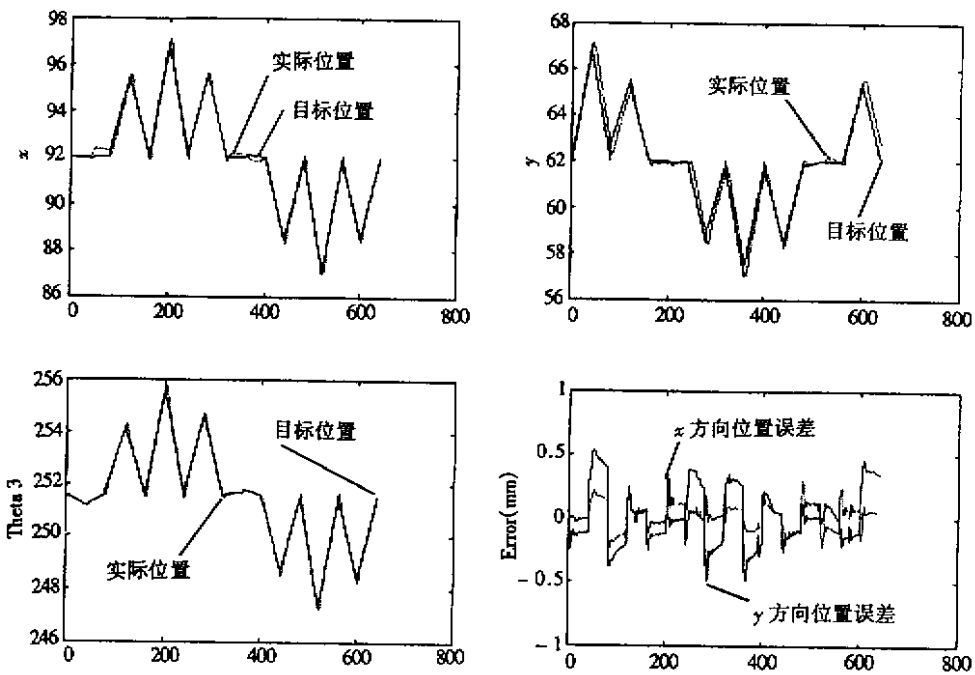


图 4 系统跟踪性能曲线

Fig.4 Position tracking performance

### 3 结论

本文介绍了作者研制的一种平面并联运动机构。该机构增加了冗余驱动，使得系统在工作空间内没有奇异点。实验结果表明，该系统的轨迹跟踪误差均低于 0.5 mm。但该精度还远远没有满足设计要求，原因在于，由于并联机构自身的特点，其控制方法应区别于传统的控制系统。因此，为提高该系统性能，需要研究适合于并联机构的控制算法。该算法应使机构在高速运动条件下其内部作用力最小，以便减少关节中的摩擦力。此外，可以对机构进行进一步优化设计，使系统在高速运动过程中具有较好的动态特性。

### 参考文献：

- [1] Merlet J P. Direct kinematics of planar parallel manipulators [ A ]. Proc. 1996 IEEE Int. Conf. On Rob. And Autom. , Minneapolis , Apr 1996 : 3744-3749.
- [2] Merlet J P. Redundant parallel manipulators [ J ]. Journal of Lab. Rob. &Autom. , 1996 , 18 : 17-24.
- [3] Gosselin C M , Merlet J P. The Direct kinematics of planar parallel manipulators : Special Architectures and number of solutions [ J ]. Mech. Mach. Theory , 1994 , 29 ( 18 ) : 1083-1097.
- [4] Buttolo P , Hannaford B. Advantages of actuation redundancy for the design of haptic displays [ A ]. Proc. ASME 4th Annual Symp. On Haptic Interf. For Virtual Environm. And Teleoperation Systems , San Francisco , Nov 1995 , DSC57-2 : 623-630.
- [5] Kock S , Schumacher W. A parallel x - y manipulator with actuation redundancy for high - speed and active - stiffness applications [ A ]. Proc. Of IEEE Int. Conf. On Rob. And Autom. Belgium , May 1998.

