

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.05.016

基于压电驱动器的 Stewart 微动平台 迟滞补偿和解耦控制研究*

何亚林, 赵新龙

(浙江理工大学 机械与自动控制学院, 浙江 杭州 310018)

摘要:针对基于压电驱动器驱动的 Stewart 微动平台同时存在强耦合性和迟滞特性的问题,对 Stewart 微动平台的耦合特性和迟滞特性进行了研究。对耦合特性与迟滞特性的特点进行了归纳,提出了一种基于迟滞补偿和输入端解耦的控制方式,建立了数学模型,并设计了控制器;先通过旋转变换矩阵进行了位姿反解,得出了 Stewart 平台各支腿长度;再在系统动力学模型的基础上,通过在输入端引入动力学逆模型的方法,对系统进行了输入端解耦,采用 Bouc-Wen 模型来描述压电驱动器的迟滞特性,并用逆模型方法对迟滞特性进行了补偿;最后设计了控制器,并通过仿真验证了定点运动和连续运动两种方式的有效性。研究结果表明:该控制方式能同时对压电驱动器驱动的 Stewart 平台进行迟滞补偿和解耦控制,响应速度快、稳定性好。

关键词: Stewart 微动平台;压电驱动器;Bouc-Wen 迟滞模型;逆模型

中图分类号:TH703.8;O231

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2020)05-0547-06

Hysteresis compensation and decoupling control of Stewart micro-motion platform based on piezoelectric actuator

HE Ya-lin, ZHAO Xin-long

(Faculty of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at the problem of strong coupling and hysteresis characteristics of Stewart micro-motion platform driven by piezo driver, the coupling characteristics and hysteresis characteristics of Stewart micro-motion platform were studied. The characteristics of coupling characteristics and hysteresis characteristics were summarized. A control method based on hysteresis compensation and input decoupling was established. The mathematical model was established and the controller was designed. Firstly, the length of each leg of the Stewart platform was obtained by the inverse transformation of the rotational transformation matrix. Then, based on the system dynamics model, the input end was decoupled by introducing the dynamic inverse model at the input. The Bouc-Wen model was used to describe the hysteresis characteristics of the piezoelectric actuator and the inverse model was used to compensate the hysteresis characteristics. Finally, the controller was designed and verified by simulation to verify the effectiveness of both fixed-point motion and continuous motion. The results indicate that the control method can simultaneously provide hysteresis compensation and decoupling control for the Stewart platform driven by the piezoelectric actuator, and the response speed is fast, and with good stability.

Key words: Stewart micro-motion platform; piezoelectric actuator; Bouc-Wen hysteresis model; inverse model

0 引 言

Stewart 微动平台由动平台、定平台和连杆通过铰链链接而成,可以实现 6 自由度运动。其作为一种并联机器结构,具有结构刚度大、位置精度高、载重比高等优点,被广泛应用于电子元件生产中的夹持系统、精密机床中的刀具控制和钻铣等领域。

在驱动方面,Stewart 平台常采用电液驱动方式。电液驱动方式精度较低,压电驱动器则具有高分辨率、高带宽、执行速度快等特点,能实现亚纳米范围内的运动。然而,压电驱动器固有的迟滞特性会影响平台的控制精度,引起振荡甚至会造成系统不稳定。另一方面,Stewart 微动平台具有强耦合性,采用常规的方法难以实现基于压电执行器的 Stewart 微动平台的精确控制。

在建模方面,用于 Stewart 平台的动力学方法主要有 Newton-Eular 法、Lagrange 法和 Kane 法等。其中,Newton-Eular 法因比较直观,应用最为广泛。DO 等^[1]基于 Newton-Eular 法建立了忽略关节摩擦和支腿轴向转动惯量时的逆动力学模型;DASGUPTA 等^[2]在充分考虑惯性和支腿摩擦的基础上,提出了改进的 Newton-Eular 闭环动力学模型;LEE 等^[3]考虑了支腿的柔性作用,采用 Lagrange 方法对 Stewart 平台进行了动力学建模;焦健等^[4]采用基于 Kane 方程的方法,结合虚功原理推导了 Stewart 平台的动力学方程。对压电驱动的 Stewart 平台,必须结合迟滞补偿才能更准确地实现压电驱动 Stewart 平台的建模。

在控制器设计方面,由于 Stewart 平台的强耦合特性和复杂非线性会影响 Stewart 平台的工作,造成系统的不稳定,控制器设计问题一直是该平台的研究重点。目前,主要有基于主动干扰抑制(ADRC)的干扰解耦控制和基于干扰观测器(DOB)的控制^[5]。但是该类方法需要建立逆动力学模型,控制器参数复杂。YANG^[6]通过建立多通道数学模型对耦合特性进行了定性分析,并设计了耦联系统控制器;MA 等^[7]在利用 Kane 方法建立了系统多体动力学模型,设计了多体伺服控制器,找出并解决了自由度之间耦合的对应关系;LIN^[8]基于等价输入干扰(EID)方法,同时抑制了多个干扰,并且不需要先验扰动信息。

对压电驱动 Stewart 平台,迟滞特性和耦合特性的相互结合影响控制精度进一步增加了控制器设计的难度,常规的建模和控制方法不再适用。

本文首先引入雅可比矩阵的逆和系统动力学逆模

型,在输入端对系统进行解耦;然后用 Bouc-Wen 模型描述压电驱动器的迟滞特性^[9],利用逆模型方法实现对迟滞特性的补偿;最后在迟滞补偿和输入端解耦的基础上设计控制器。

1 系统建模

Stewart 微动平台结构图如图 1 所示。

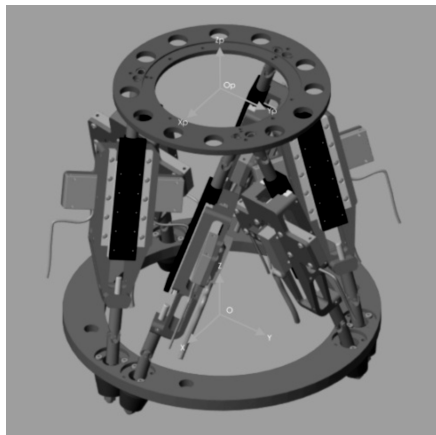


图 1 Stewart 微动平台结构图

图 1 中,压电驱动器利用万向节和平台、底座链接,通过伸缩运动驱动动平台运动,从而在三维空间中实现 6 自由度的运动^[10]。

笔者首先建立动坐标系 $O_p - X_p Y_p Z_p$ 和静坐标系 $O - XYZ$ 。两坐标系原点分别为动、静平台的质心,坐标平面 $O_p X_p Y_p$ 与动平台重合,坐标平面 OXY 与静平台重合, Z_p 轴和 Z 轴垂直 OXY 平面竖直向上。

在对平台进行控制时,需要从任务空间转换至关节空间。任务空间采用位姿 $q = [x_p y_p z_p \alpha \beta \gamma]^T$ 进行描述,关节空间采用 $l = [l_2 l_3 l_4 l_5 l_6]^T$ 进行描述。支腿 i 上端坐标为 $[P_{ix} P_{iy} P_{iz}]^T$,下端坐标为 $[O_{ix} O_{iy} O_{iz}]^T$ 。计算长度时,需要统一坐标系,即通过转换矩阵将动坐标系 $O_p - X_p Y_p Z_p$ 中的坐标转换到静坐标系 $O - XYZ$ 中。变换矩阵为:

$$T = \begin{bmatrix} C\beta C\gamma & S\alpha S\beta C\gamma - C\alpha S\gamma & C\alpha S\beta C\gamma + S\alpha S\gamma & x_p \\ C\beta C\gamma & S\alpha S\beta C\gamma + C\alpha C\gamma & C\alpha S\beta S\gamma - S\alpha C\gamma & y_p \\ -S\beta & S\alpha C\beta & C\alpha C\beta & z_p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $S\alpha = \sin\alpha$, $C\alpha = \cos\alpha$,其他类似; x_p, y_p, z_p —动坐标系原点在静坐标系中的坐标; α, β, γ —动平台沿 X_p 轴、 Y_p 轴、 Z_p 轴的旋转角度。

将动坐标系中的坐标转换至静坐标系后为:

$$[P_{ix}' P_{iy}' P_{iz}' 1]^T = T [P_{ix} P_{iy} P_{iz} 1]^T \quad (2)$$

根据支腿两端坐标,可得支腿长度为:

$$l_i = \sqrt{(P_{ix}' - O_{ix})^2 + (P_{iy}' - O_{iy})^2 + (P_{iz}' - O_{iz})^2} \quad (3)$$

采用拉格朗日方程法建立 6 自由度动力学模型为:

$$F = J^T f = D(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) \quad (4)$$

$$h(q, \dot{q}) = m(j^T + J^T j) - mC(q, \dot{q}) \quad (5)$$

式中: F —作用在关节上的广义力向量; J —雅可比矩阵; f —驱动器的驱动力; $C(q, \dot{q})$ —离心力矩阵; $G(q)$ —重力项。

$$q = [q_1 q_2 q_3 q_4 q_5 q_6]^T = [x_p y_p z_p \alpha \beta \gamma]^T \quad (6)$$

$$F = [F_1 F_2 F_3 F_4 F_5 F_6]^T \quad (7)$$

$$D(q) = \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + mJ^T J \quad (8)$$

$$M = \text{diag}[mmm] I = \text{diag}[I_x I_y I_z] \quad (9)$$

式中: m —上平台质量; I_x, I_y, I_z —上平台绕 3 个坐标轴 x, y, z 的转动惯量。

式(4 ~ 5) 中各个算式的具体表达式为:

$$j = \begin{bmatrix} \dot{q}^T \frac{\partial J_{(i;)}}{\partial q} \\ \vdots \\ \dot{q}^T \frac{\partial J_{(i;)}}{\partial q} \end{bmatrix} \quad j_{(i;)} = \frac{dJ_{(i;)}}{dt} = \dot{q}^T \frac{\partial J_{(i;)}}{\partial q} \quad (10)$$

$$\frac{\partial J}{\partial q_1} = \begin{bmatrix} \frac{\partial J_{11}}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial J_{16}}{\partial q_1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial J_{61}}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial J_{66}}{\partial q_1} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} \dot{q}^T \left(\frac{\partial J}{\partial q_1} \right)^T J \\ \vdots \\ \dot{q}^T \left(\frac{\partial J}{\partial q_6} \right)^T J \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\frac{\partial J}{\partial q} = \begin{bmatrix} \frac{\partial J_{11}}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial J_{16}}{\partial q_1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial J_{11}}{\partial q_6} & \dots & \frac{\partial J_{16}}{\partial q_6} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial J_{61}}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial J_{66}}{\partial q_1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial J_{61}}{\partial q_6} & \dots & \frac{\partial J_{66}}{\partial q_6} \end{bmatrix}_{36 \times 6} \quad (13)$$

$$\frac{\partial J^T}{\partial q} = \begin{bmatrix} \frac{\partial J_{11}}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial J_{61}}{\partial q_1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial J_{16}}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial J_{66}}{\partial q_1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial J_{16}}{\partial q_6} & \dots & \frac{\partial J_{66}}{\partial q_6} \end{bmatrix}_{36 \times 6} \quad (14)$$

然后对压电驱动器采用 Bouc-Wen 迟滞模型^[11-12]进行描述,其数学关系为:

$$\begin{cases} f = kU - \eta \\ \dot{\eta} = A\dot{U} - B| \dot{U} | \eta - T\dot{U} | \eta | \end{cases} \quad (15)$$

式中: A —控制幅度; B, T —控制迟滞环的形状^[13]的参数; k —增益; U —压电驱动器的输入电压; η —中间变量。

联立式(4, 5, 15), 基于压电驱动器的 Stewart 微动平台的完整数学模型为:

$$\begin{cases} F = J^T f = D(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) \\ h(q, \dot{q}) = m(j^T J + J^T j) - mC(q, \dot{q}) \\ f = kU - \eta \\ \dot{\eta} = A\dot{U} - B| \dot{U} | \eta - T\dot{U} | \eta | \end{cases} \quad (16)$$

2 控制器设计

基于输入端解耦和迟滞补偿的 Stewart 控制系统原理图如图 2 所示。

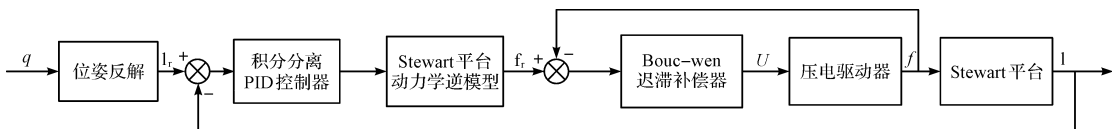


图2 系统原理图

首先笔者通过位姿反解,完成从任务空间到关节空间的转换。根据支腿两端在动、静坐标系中的坐标计算可得到预期支腿长度 l_r 。

再引入系统的逆模型进行解耦^[14],通过雅可比矩阵的逆和系统动力学逆模型完成解耦过程。 f_r 表示期

望输出驱动力,即:

$$f_r = (J^T)^{-1} (D(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q})\dot{q} + G(q)) \quad (17)$$

然后,笔者采用逆模型的方法对迟滞特性进行补偿,其中, $D(q), h(q, \dot{q}), G(q)$ 与式(3, 4) 中相同。

对 Bouc-Wen 迟滞模型逆运算,得:

$$U = \frac{1}{k}(f_r + \eta) \quad (18)$$

最后,将反馈回的实际驱动器驱动力 f 和实际支腿长度 l 与预期值进行比较,通过积分分离PID控制算法形成闭环控制,以保证系统的稳定性。

3 仿真及结果分析

为了验证控制器的有效性,笔者对定点运动(即

阶跃响应)和连续运动进行仿真分析,采用积分分离PID控制器形成闭环控制。其参数取 $K_p = 4 \times 10^4$, $K_i = 90, K_d = 1 \times 10^3$ 。迟滞补偿器参数取 $A = 1.2, B = 0.05, T = 0.01, k = 1.5$ 。

(1) 期望位姿为: $q = [0.025\sqrt{3}; 0.1875; -0.0125; -0.05; 0.05; 0.05]$, 此时各支腿长度变化和误差曲线图分别如图(3 ~ 4)所示。

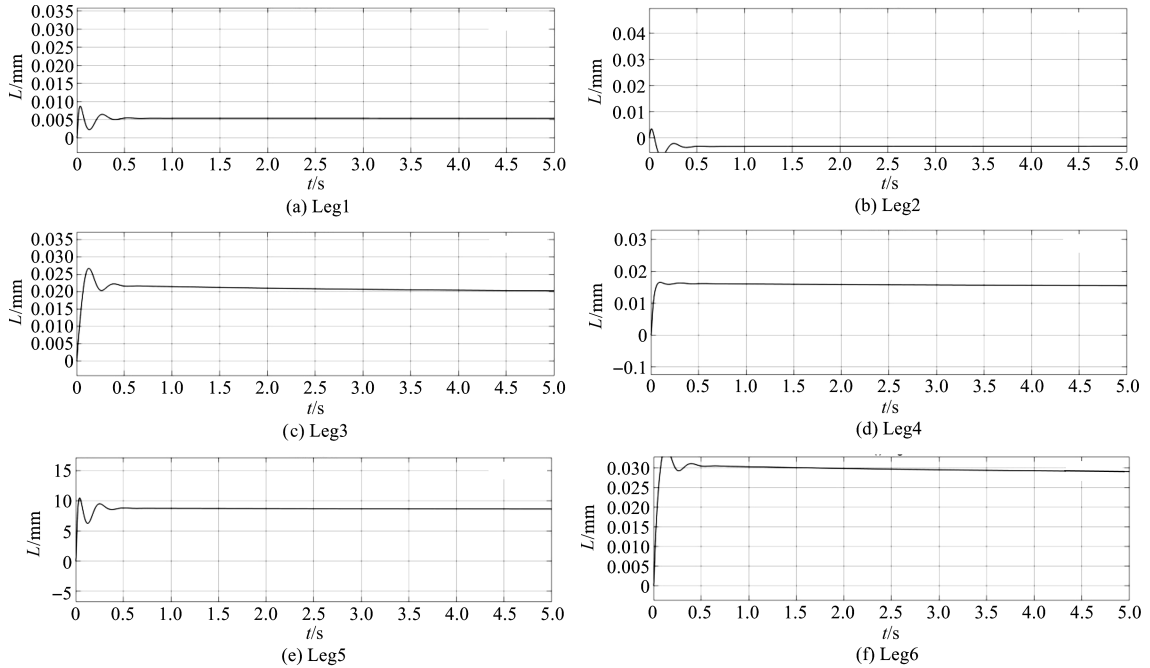


图 3 定点运动响应曲线

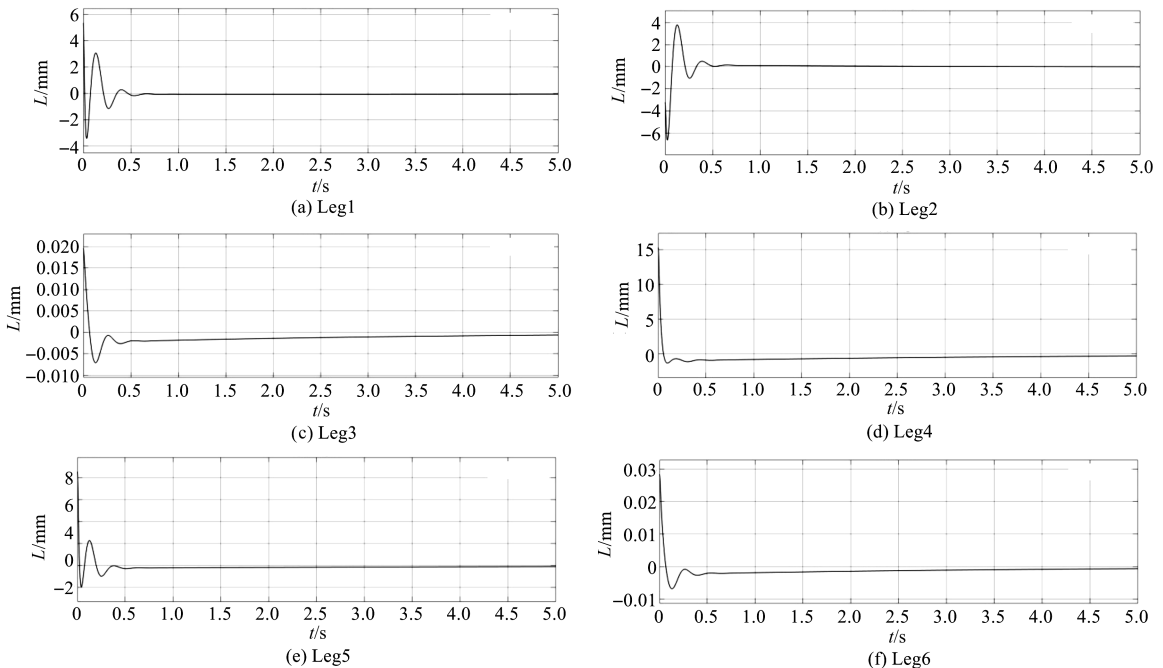


图 4 定点运动误差曲线

(2) 期望轨迹为正弦函数拟合的周期性连续运动,即位姿为:

$$q = \left[0.05\sin 2t; 0.005; \sin\left(2t + \frac{\pi}{2}\right) + 0.19; \right. \\ \left. 0.025\sin\left(2t + \frac{\pi}{2}\right); -0.1\sin\frac{t}{2}; 0.1\sin\frac{t}{2}; 0.1\sin\frac{t}{2} \right],$$

此时各支腿长度变化和误差曲线图分别如图(5 ~ 6)所示。

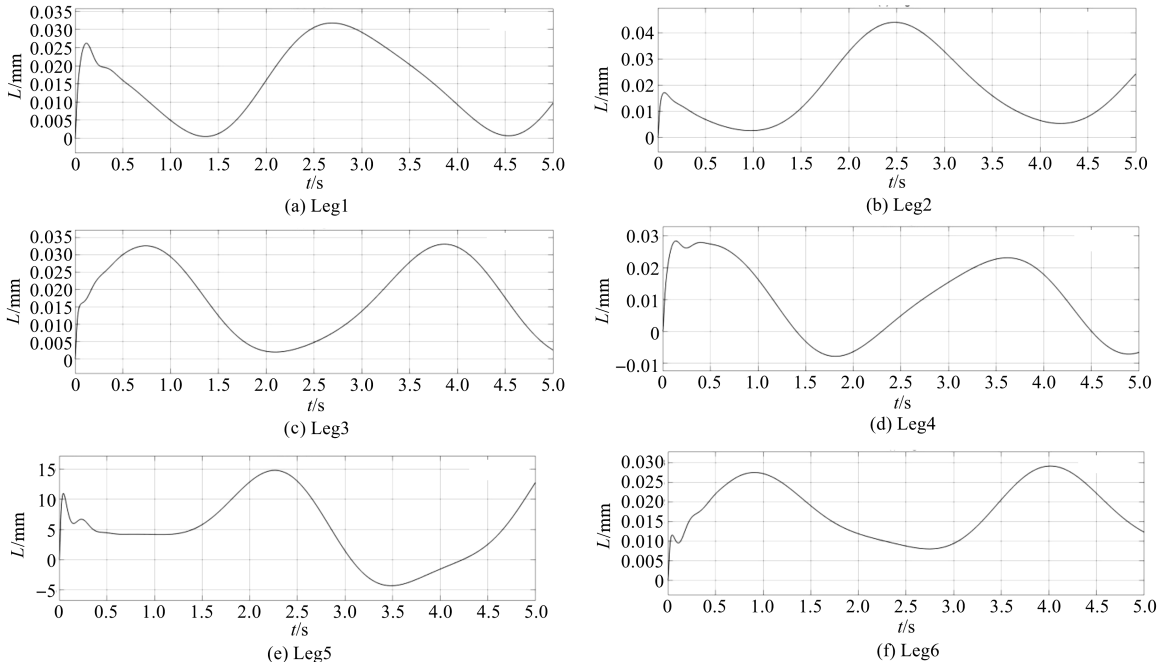


图5 连续周期运动响应曲线

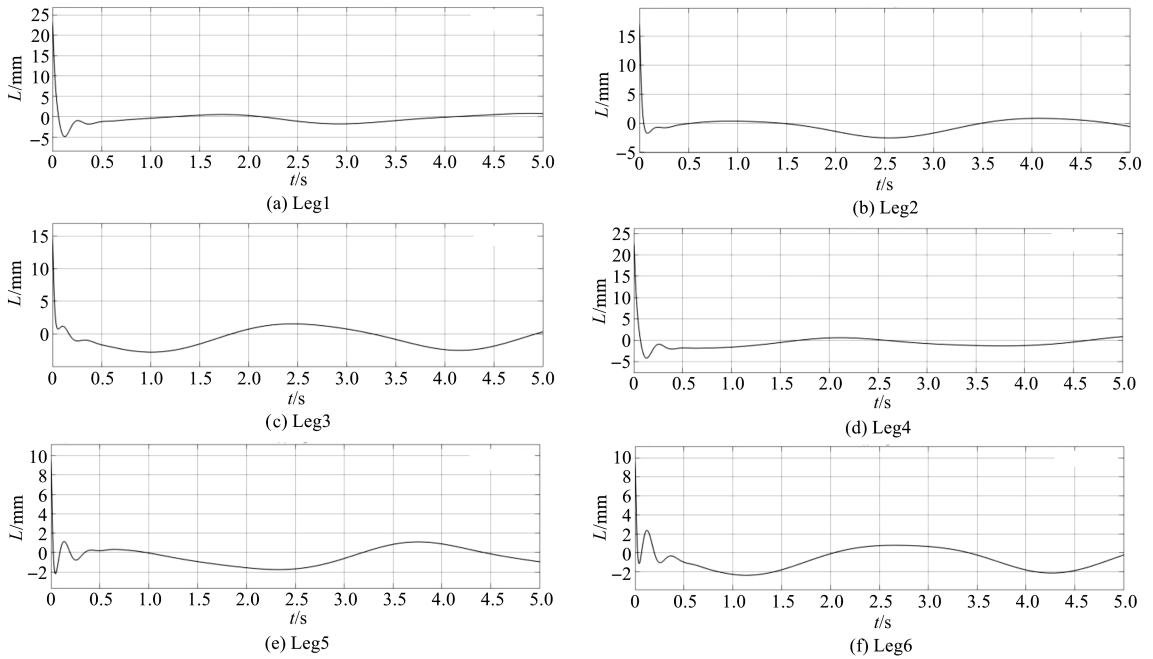


图6 连续周期运动误差曲线

由此可见,在经过解耦控制和迟滞补偿后,系统的响应曲线良好。

由图(3,4)可知:在0.5 s左右,定点运动到达指定姿态,并且误差接近于0;响应速度较快且最终误差几乎为0。

由图(5,6)可知:当平台启动后,在进行连续周期运动时,6个支腿长度变化曲线也呈周期性变化,动态定位误差皆为5%以内,且不会引起系统振荡,可见达到了稳定的控制效果。

4 结束语

针对压电驱动器的 Stewart 微动平台同时存在强耦合性和迟滞特性的特点,笔者采用拉格朗日方程法建立了压电驱动 Stewart 平台动力学模型,先通过旋转变换矩阵进行位姿反解,得出了 Stewart 平台各支腿长度,再设计了基于平台的输入端解耦和迟滞逆模型补偿的控制器,对 Stewart 微动平台实际输出进行了定点运动状态和连续运动状态的跟随。

最终的实验结果表明,该控制器能对 Stewart 平台实现稳定良好的控制效果。

参考文献 (References) :

- [1] DO W Q D, YANG D C H. Inverse dynamic analysis and simulation of a platform type of robot[J]. **Journal of Field Robotics**, 2010,5(3):209-227.
- [2] DASGUPTA B, MRUTHYUNJAYA T S. Closed-form dynamic equations of the general stewart platform through the newton-euler approach[J]. **Mechanism and Machine Theory**, 1998,35(7):993-1012.
- [3] LEE J D, GENG Z. A dynamic model of a flexible stewart platform[J]. **Computers & Structures**, 1993,48(3):367-374.
- [4] 焦 健,庞世伟,吴 迎,等. 基于 Kane 方程的柔性 Stewart 平台动力学建模研究[C] 第十二届全国振动理论及应用学术会议论文集,南京:中国振动工程学会,2017.
- [5] ZHENG Q, CHEN Z, GAO Z. A practical approach to disturbance decoupling control [J]. **Control Engineering Practice**, 2009,17(9):1016-1025.
- [6] HAO Q Y, KE D Z, SHENG L W U. Study of load coupling in the hydraulic 6-DOF motion system of a flight simulator [J]. **Mechanical Science and Technology**, 2004(12):1470-1472.
- [7] MA J, HE J, XIONG H, et al. Simulation of coupling characteristic of hydraulically driven stewart platform based on dynamics model[C]. International Workshop on Modelling, Hong Kong: IEEE,2008.
- [8] LIN P, SHE J, WU M, et al. Decoupling control for parallel robot based on equivalent-input-disturbance approach [C]. Control & Decision Conference, Chongqi: IEEE, 2017.
- [9] 阳 丹,王湘江. 迟滞非线性系统辨识与补偿控制研究[J]. 机电工程,2014,31(1):57-61.
- [10] YANG Chi-fu, HUANG Qi-tao, HAN Jun-wei. Decoupling control for spatial six-degree-of-freedom electro-hydraulic parallel robot [J]. **Robotics and Computer Integrated Manufacturing**, 2011,28(1):14-23.
- [11] 赵小兴,姜 伟,李 巍,等. 压电陶瓷作动器非对称迟滞的建模与补偿控制[J]. 机电工程,2013,30(2):138-141.
- [12] PARK Y J, WEN Y K, ANG H S. Random vibration of hysteretic system under Bi-directional ground motion[J]. **Earthquake Engineering & Structural Dynamics**, 1986,14(4):543-557.
- [13] RU C, SUN L. Improving positioning accuracy of piezoelectric actuators by feedforward hysteresis compensation based on a new mathematical model[J]. **Review of Scientific Instruments**, 2005,76(9):469-471.
- [14] 李子君,余锦华,何王勇. 基于等价输入干扰方法和滑模控制的 Stewart 平台位姿控制[C]. 第 37 届中国控制会议,武汉:中国自动化学会控制理论专业委员会,2018.

[编辑:方越婷]

本文引用格式:

何亚林,赵新龙. 基于压电驱动器的 Stewart 微动平台迟滞补偿和解耦控制研究[J]. 机电工程,2020,37(5):547-552.

HE Ya-lin, ZHAO Xin-long. Hysteresis compensation and decoupling control of Stewart micro-motion platform based on piezoelectric actuator[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2020,37(5):547-552.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>