

文章编号 1004-924X(2014)11-3067-07

多轴亚微米级平面定位台的滑模观测器无传感控制

佃松宜*, 向国菲, 蒲明

(四川大学 电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要:针对 Sawyer 电机驱动的平面定位台的多轴精密定位问题(X 、 Y 和 θ_z 轴),提出了一种新的部分无传感控制方法。用激光干涉仪检测定位台一个方向上的平移运动和摆动,并构建相应的闭环控制;同时,应用滑模观测器估计另一个方向上的平移运动并构建对应轴的闭环控制。在此基础上,通过实验从开环控制、多轴全闭环控制及部分无传感控制三方面对比了定位性能。实验结果表明:采用部分无传感控制,多轴平面定位台的重复定位精度达到亚微米($0.25\ \mu\text{m}$)级;部分无传感控制下的动子行程与开环控制相同(X 轴 $300\ \text{mm}$ 、 Y 轴 $300\ \text{mm}$),远大于基于多轴位置传感的全闭环控制下的动子行程(X 轴 $100\ \text{mm}$ 、 Y 轴 $100\ \text{mm}$);获得的结果可满足应用设计要求。

关键词:平面定位台;滑模观测器;无传感控制;精密定位

中图分类号: TP274; TH703 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142211.3067

Sensorless control of sliding mode observer for multi-DOF submicron-order planar motion stage

DIAN Song-yi*, XIANG Guo-fei, PU Ming

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

* Corresponding author, E-mail: scudiansy@scu.edu.cn

Abstract: A novel Partial Sensorless Control (PSC) method was proposed to improve the precision positioning capability of multi-DOF (X , Y and θ_z) motion for a planar motion stage driven by Sawyer motor. For the position estimation, a laser interferometer was used to detect the translational motion and swing in one direction and to construct a closed-loop control; a sliding mode observer-based technique was taken to estimate the translational motion in another direction and to construct a closed-loop control for a corresponding axis. The positioning performance on open-loop control, closed-loop control and PSC was compared by experiments. The experimental results verify that the PSC is an available way to obtain submicron-order positioning accuracy ($0.25\ \mu\text{m}$) with a $300\ \text{mm}$ (X) \times $300\ \text{mm}$ (Y) travel range, which is more larger than that of $100\ \text{mm}$ (X) \times $100\ \text{mm}$ (Y) travel range from the closed loop control of a multi-DOF (X , Y and θ_z) location sensing. The result meets the design requirement of positioning accuracy and travel range for planar motion stages.

Key words: planar motion stage; sliding mode observer; sensorless control; precision positioning

收稿日期:2013-12-27;修订日期:2014-02-25.

基金项目:四川省高校院所应用成果转化计划资助项目(No. 12DXYB171JH-002)

1 引言

由 Sawyer 驱动的平面定位台因具有高速度和高加速度,且能在平面内实现两个及以上自由度(Degree-of-Freedom, DOF)的精密运动等特点而被广泛应用于半导体测试、表面测量、自动装配等精密制造和测量等领域^[1]。然而,这种驱动装置在开环状态下运行时,易失步、调节时间长、抗扰性能差,并且由于定位台动子与定子齿之间的不同步还会出现摆动等问题^[2],从而降低了系统的动静态性能。因此,近年来一些学者针对此类精密定位平台提出了一些先进控制方法和运动轨迹优化策略^[3-9]。这些方法不仅克服了开环控制的上述缺陷,也使得定位精度提高到亚微米级。但应用上述闭环及先进控制方法时,位置传感是必不可少的部分。位置传感器通常为多轴激光干涉系统或高精度编码器等机械/光学传感器,用于平面定位台的精密位置测量。这些检测手段增加了平面定位台的成本和复杂程度^[10],使用多轴位置测量传感器还会限制定位台的运动行程。这是因为定位台动子的多轴运动测量往往受光束或多传感器的交互作用的影响。

为了克服这些问题,无传感控制是一个不错的选择,且已经取得了一些成果^[11-13]。但现有的这些方法仅成功应用于开环控制或针对单轴定位台上的无位置传感闭环控制,对于多轴精密平面定位台全部轴或部分轴实施无位置传感控制的研究未见报道。

文中 Sawyer 电机驱动的多轴平面定位台是表面形貌测量装置的运动机构,具体应用指标包括:1)重复定位精度小于 $0.5 \mu\text{m}$;2) X 轴和 Y 轴方向平动,运动行程大于 280 mm;3)受机械安装尺寸限制和节省成本考虑,采用单轴激光干涉仪进行位置精密测量。

针对设计要求和 Sawyer 电机驱动的多轴平面定位台的运动特性,本文提出了一种新型部分无传感控制方法,即用激光干涉仪检测定位台一个方向上的平移运动和摆动,并构建相应的闭环控制;同时,用滑模观测器(Sliding Mode Observer, SMO)估计另一个方向上的平移运动并构建对应轴的闭环控制。通过实验比较了本文提出的部分无传感控制(Partial Sensorless

Control, PSC)、开环控制(Open Loop Control, OLC)以及基于多轴位置传感的全闭环控制 3 种方式下定位台的定位性能。

2 基于 SMO 的位置和速度估计

2.1 多轴平面定位台的基本构造

基于 Sawyer 电机的平面定位台如图 1 所示。Sawyer 电机由钢制定子(Platen)和动子(Mover)构成,其中动子内部对称地安装有 3 种由绕组制成的推力器(Forcer),其内部结构如图 2 所示。推力器用于产生驱动力,分别将它们命名为 X, Y_1, Y_2 : X 用于产生使动子沿 X 方向运动的驱动力; Y_1, Y_2 不仅会产生使动子沿 Y 方向运动的力,实际运行时也会产生不必要的摆动惯量,从而产生 θ_z 轴的运动。文献[14]详细给出了该定位台的建模过程。

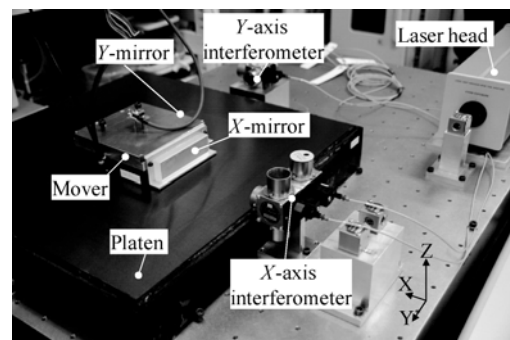


图 1 基于 Sawyer 电机驱动的平面定位台

Fig. 1 Planar position stage driven by Sawyer motor

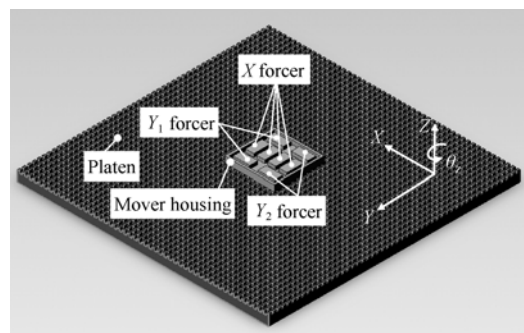


图 2 动子的内部结构示意图

Fig. 2 Inner structure diagram for mover

2.2 Sawyer 电机的 D-Q 模型

对于无传感控制,线性的 D-Q 模型是至关重要的。本文拟估计 X 轴的状态空间方程如式(1)

所示:

$$\begin{aligned} \frac{di_a}{dt} &= -\frac{R}{L}i_a - \frac{K_f}{L}\cos\left(\frac{2\pi}{p}x\right)v + \frac{u_a}{L} \\ \frac{di_b}{dt} &= -\frac{R}{L}i_b - \frac{K_f}{L}\sin\left(\frac{2\pi}{p}x\right)v + \frac{u_b}{L} \\ \frac{dv}{dt} &= \frac{K_f}{m}i_a\cos\left(\frac{2\pi}{p}x\right) + \frac{K_f}{m}i_b\sin\left(\frac{2\pi}{p}x\right) \\ \frac{dx}{dt} &= v \end{aligned}, \quad (1)$$

式中: i_a, i_b 分别表示绕组 X 的 A 相和 B 相电流 [A]; u_a, u_b 分别表示 A 相和 B 相电压 [V]; R 表示相电阻 [Ω]; L 表示相电感 [H]; K_f 表示推力常数 [N/A]; m 表示动子质量 [kg]; x 表示动子的实际位置 [m]; v 表示动子的实际速度 [m/s]; p 为定位台的齿间距 [m]。

对式(1)进行如式(2)所示的 Park 变换, 可得到 D-Q 模型, 如式(3)所示:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} w_d \\ w_q \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{2\pi}{p}x\right) & \sin\left(\frac{2\pi}{p}x\right) \\ -\sin\left(\frac{2\pi}{p}x\right) & \cos\left(\frac{2\pi}{p}x\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_a \\ w_b \end{bmatrix}, \quad (2) \\ \frac{di_d}{dt} &= -\frac{R}{L}i_d + \frac{2\pi}{p}i_qv - \frac{2K_f}{L}v + \frac{u_d}{L} \\ \frac{di_q}{dt} &= -\frac{R}{L}i_q - \frac{2\pi}{p}i_dv + \frac{u_q}{L} \\ \frac{dv}{dt} &= \frac{K_f}{m}i_d \\ \frac{dx}{dt} &= v \end{aligned} \quad (3)$$

2.3 Sawyer 电机的反馈线性化

经过 D-Q 变换, 电机模型的非线性仅存在于式(3)的前 2 个方程中, 采用式(4)的反馈非线性方法便可消除模型的非线性。

$$\begin{aligned} u_d &= u_d^* - L\frac{2\pi}{p}i_qv + x \\ u_q &= u_q^* + L\frac{2\pi}{p}i_dv + x \end{aligned} \quad (4)$$

所以, 式(3)改写为式(5)的形式:

$$\begin{aligned} \frac{di_d}{dt} &= -\frac{R}{L}i_d - \frac{2K_f}{L}v + \frac{x}{L} + \frac{u_d^*}{L} \\ \frac{di_q}{dt} &= -\frac{R}{L}i_q + \frac{x}{L} + \frac{u_q^*}{L} \\ \frac{dv}{dt} &= \frac{K_f}{m}i_d \\ \frac{dx}{dt} &= v \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)表明将 Sawyer 电机 X 轴的方程经过

Park 变换和反馈线性化后所得到的系统是完全线性的, 其原理框图如图 3 所示。

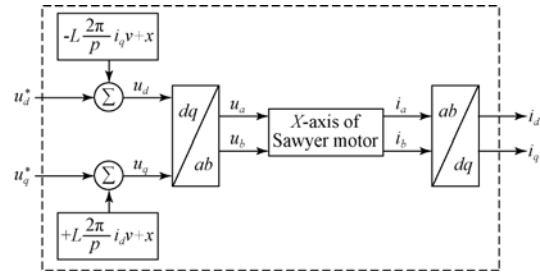


图 3 Sawyer 电机的反馈线性化(X轴)

Fig. 3 Feedback linearization of Sawyer motor (X-axis)

将式(5)改写为状态空间方程式(6), 引入状态变量 $\mathbf{X}(t) = [i_d, i_q, v, x]^T$, 输出变量 $\mathbf{Y}(t) = [i_d, i_q]^T$, 输入变量 $\mathbf{U}(t) = [u_d^*, u_q^*]^T$, 于是有:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{X}(t) + \mathbf{B}\mathbf{U}(t) \\ \mathbf{Y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{X}(t) \end{cases}, \quad (6)$$

其中:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & -\frac{2K_f}{L} & \frac{1}{L} \\ 0 & -\frac{R}{L} & 0 & \frac{1}{L} \\ \frac{K_f}{m} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

2.4 位置和速度估计

根据文献[15]对系统(A, B, C)进行线性坐标变换 \mathbf{T}_o , 则式(6)具有如式(7)所示的结构:

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_o\mathbf{A}\mathbf{T}_o^{-1} &= \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{12} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{A}_{22} \end{bmatrix}, \\ \mathbf{T}_o\mathbf{B} &= \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{B}_2 \end{bmatrix}, \mathbf{C}\mathbf{T}_o^{-1} = [0 \quad \mathbf{I}_p]. \end{aligned} \quad (7)$$

则式(6)可重写为式(8):

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}}_1(t) = \mathbf{A}_{11}\mathbf{X}_1(t) + \mathbf{A}_{12}\mathbf{Y}(t) + \mathbf{B}_1\mathbf{U}(t) \\ \dot{\mathbf{Y}}(t) = \mathbf{A}_{21}\mathbf{X}_1(t) + \mathbf{A}_{22}\mathbf{Y}(t) + \mathbf{B}_2\mathbf{U}(t) + \mathbf{B}_2\boldsymbol{\xi} \end{cases}, \quad (8)$$

其中: $\mathbf{X}_1 \in \mathfrak{R}^{(n-p)}$, $\mathbf{Y} \in \mathfrak{R}^p$, 且矩阵 \mathbf{A}_{11} 全部极点稳定。

对式(6)应用文献[12]所述的状态观测器,得到式(9):

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\mathbf{X}}}(t) &= \mathbf{A}\hat{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{B}\mathbf{U}(t) - \\ &\mathbf{G}_1(\mathbf{C}\hat{\mathbf{X}}(t) - \mathbf{Y}(t)) + \mathbf{G}_n v, \end{aligned} \quad (9)$$

其中线性增益和非线性增益如式(10)所示:

$$\mathbf{G}_1 = \mathbf{T}_o^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{12} \\ \mathbf{A}_{22} - \mathbf{A}_{22}^s \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G}_n = \mathbf{T}_o^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{I}_p \end{bmatrix}. \quad (10)$$

将式(10)中的 \mathbf{A}_{22}^s 设计为稳定的矩阵,若 \mathbf{P}_2 对 \mathbf{A}_{22}^s 是对称正定的 Lyapunov 矩阵,且 $\mathbf{P}_2 \in \mathfrak{R}^{p \times p}$, 则非连续的输出误差信号 v 由式(11)定义:

$$v = \begin{cases} -\rho(t, \mathbf{X}(t), \mathbf{U}(t)) \|\mathbf{B}_2\| \frac{\mathbf{P}_2 e_Y}{\|\mathbf{P}_2 e_Y\|}, & e_Y \neq 0 \\ 0, & e_Y = 0 \end{cases}, \quad (11)$$

其中, $e_Y = \hat{\mathbf{Y}} - \mathbf{Y}$ 为输出估计误差,函数 ρ 为 $\xi(t, \mathbf{X}(t), \mathbf{U}(t))$ 幅值的上边界。式(9)中,观测器的输出值是动子的位置 \hat{x} 及速度 \hat{v} , 则观测器的输出方程表达如下:

$$\hat{\mathbf{Z}}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \hat{\mathbf{X}}(t) = \begin{bmatrix} \hat{v} \\ \hat{x} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

由式(9)及式(12)联立,则观测器的状态方程可表达为式(13):

$$\begin{cases} \dot{\hat{\mathbf{X}}}(t) = \mathbf{A}\hat{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{B}\mathbf{U}(t) + \mathbf{G}_n v - \mathbf{G}_1(\mathbf{C}\hat{\mathbf{X}}(t) - \mathbf{Y}(t)), \\ \dot{\hat{\mathbf{Z}}}(t) = \mathbf{C}_o \hat{\mathbf{X}}(t), \end{cases} \quad (13)$$

$$\mathbf{C}_o = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

基于 SMO 的位置和速度估计原理框图如图 4 所示。

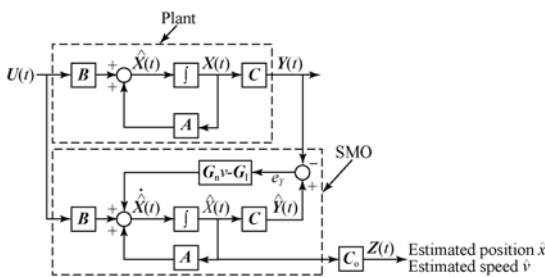


图 4 用 SMO 观测器估计位置和速度的原理框图

Fig. 4 Principle diagram for position and speed estimation based on SMO

若状态估计误差 $e_1 = \hat{\mathbf{X}}_1 - \mathbf{X}_1$, 则状态估计误差方程和输出误差方程可分别表达为式(14)和式(15):

$$\dot{e}_1(t) = \mathbf{A}_{11} e_1(t), \quad (14)$$

$$\dot{e}_Y(t) = \mathbf{A}_{21} e_1(t) + \mathbf{A}_{22}^s e_Y(t) + v - \mathbf{B}_2 \xi, \quad (15)$$

在滑模运动过程中,由于 $e_Y = 0$ 且 $\dot{e}_Y = 0$, 所以式(15)为:

$$\mathbf{0} = \mathbf{A}_{21} e_1(t) + v_{eq} - \mathbf{B}_2 \xi, \quad (16)$$

其中: v_{eq} 即等效输出信号,其描述了非连续因子 v 的平均作用效果,以及在滑模面运动的必要条件。根据式(11)以及 \mathbf{A}_{11} 是稳定的条件可以得出 $e_1(t) \rightarrow 0$ 。这意味着估计的位置和速度可以准确地收敛于实际的位置和速度,并且其估计值可作为基于 Sawyer 电机的平面定位台 X 轴的闭环控制的反馈信号。

3 观测器的稳定性分析和基于 SMO 的部分无传感控制

3.1 SMO 的二次稳定性

假设将 $\mathbf{Q}_1, \mathbf{Q}_2$ 设计为对称正定矩阵, \mathbf{P}_2 为 Lyapunov 方程的唯一对称正定解,且有:

$$\mathbf{P}_2 \mathbf{A}_{22}^s + (\mathbf{A}_{22}^s)^T \mathbf{P}_2 = -\mathbf{Q}_2. \quad (17)$$

通过计算 \mathbf{P}_2 , 那么 $\hat{\mathbf{Q}}$ 定义为:

$$\hat{\mathbf{Q}} = \mathbf{A}_{21}^T \mathbf{P}_2 \mathbf{Q}_2^{-1} \mathbf{P}_2 \mathbf{A}_{21} + \mathbf{Q}_1, \quad (18)$$

其中: $\hat{\mathbf{Q}} = \hat{\mathbf{Q}}^T > 0$, 让 $\mathbf{P}_1 \in \mathfrak{R}^{(n-p) \times (n-p)}$ 是 Lyapunov 方程的唯一对称正定解,则有:

$$\mathbf{P}_1 \mathbf{A}_{11} + (\mathbf{A}_{11})^T \mathbf{P}_1 = -\hat{\mathbf{Q}}. \quad (19)$$

为了验证观测器在滑模面运动的稳定性,选择如下 Lyapunov 方程:

$$\mathbf{V}(e_1, e_Y) = e_1^T \mathbf{P}_1 e_1 + e_Y^T \mathbf{P}_2 e_Y. \quad (20)$$

将式(20)沿系统的轨迹进行微分有:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{V}} &= -e_1^T \hat{\mathbf{Q}} e_1 + e_1^T \mathbf{A}_{21}^T \mathbf{P}_2 e_Y + e_Y^T \mathbf{P}_2 \mathbf{A}_{21} e_1 - \\ &e_Y^T \mathbf{Q}_2 e_Y + 2 e_Y^T \mathbf{P}_2 v - 2 e_Y^T \mathbf{P}_2 \mathbf{B}_2 \xi, \end{aligned} \quad (21)$$

而式(22)恒成立:

$$\begin{aligned} (e_Y - \mathbf{Q}_2^{-1} \mathbf{P}_2 \mathbf{A}_{21} e_1)^T \mathbf{Q}_2 (e_Y - \mathbf{Q}_2^{-1} \mathbf{P}_2 \mathbf{A}_{21} e_1) &= \\ e_Y^T \mathbf{Q}_2 e_Y - e_1^T \mathbf{A}_{21}^T \mathbf{P}_2 e_Y - e_Y^T \mathbf{P}_2 \mathbf{A}_{21} e_1 + \\ e_1^T \mathbf{A}_{21}^T \mathbf{P}_2 \mathbf{Q}_2^{-1} \mathbf{P}_2 \mathbf{A}_{21} e_1. \end{aligned} \quad (22)$$

将式(22)代入式(21),为了便于叙述,用 \tilde{e}_Y 替换 $(e_Y - \mathbf{Q}_2^{-1} \mathbf{P}_2 \mathbf{A}_{21} e_1)$, 则:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{V}} &= -e_1^T \hat{\mathbf{Q}} e_1 + e_1^T \mathbf{A}_{21}^T \mathbf{P}_2 \mathbf{Q}_2^{-1} \mathbf{P}_2 \mathbf{A}_{21} e_1 - \\ \tilde{e}_Y^T \mathbf{Q}_2 \tilde{e}_Y + 2 e_Y^T \mathbf{P}_2 v - 2 e_Y^T \mathbf{P}_2 \mathbf{B}_2 \xi &= -e_1^T \hat{\mathbf{Q}} e_1 - \\ \tilde{e}_Y^T \mathbf{Q}_2 \tilde{e}_Y + 2 e_Y^T \mathbf{P}_2 v - 2 e_Y^T \mathbf{P}_2 \mathbf{B}_2 \xi &= -e_1^T \hat{\mathbf{Q}} e_1 - \\ \tilde{e}_Y^T \mathbf{Q}_2 \tilde{e}_Y - 2\rho(t, \mathbf{X}, \mathbf{U}) \|\mathbf{B}_2\| \|\mathbf{P}_2 e_Y\| - 2 e_Y^T \mathbf{P}_2 \mathbf{B}_2 \xi &< 0 \text{ for } (e_1, e_Y) \neq 0, \end{aligned} \quad (23)$$

所以,SMO 的误差系统是二次稳定的,得证。

3.2 平面定位台的部分无传感控制

为构建闭环系统,用激光干涉仪检测 Y 轴和

θ_z 轴的位置信息,而 X 轴的位置信息则通过 SMO 观测器来估计。部分无传感控制的总体方案如图 5 所示。图 5 的虚线框内表示用估计的速度和位置实现对 X 轴的速度和位置进行闭环控制;利用控制输出信号(u_d^* , u_q^*)和测量的电机相电流(i_a , i_b),经式(15)计算得到动子在 X 轴方向运动位置和速度的估计值。经过位置调节和速度调节,可得到系统的控制命令(u_d^* , u_q^*)。在式(4)中使用估计位置和估计速度,可计算 Sawyer 电机 D-Q 模型的输出信号(u_d , u_q),然后, (u_d , u_q) 经过 Park 反变换可计算出实际输入信号(u_a , u_b),最后将其施加给微步驱动器。另外,采用常规的 PID 算法实现 Y 轴和 θ_z 轴的运动控制,这 2 个轴的位置反馈信息由含有分光镜的单轴激光干涉仪位置测量系统检测。

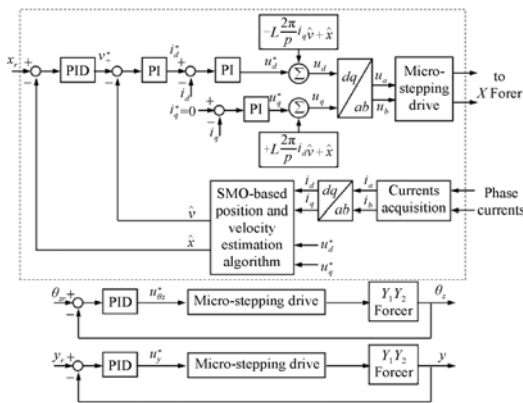


图 5 部分无传感控制总体框图

Fig. 5 Overall structure of partial sensorless control (PSC)

4 实验结果及分析

4.1 实验装置

实验系统的核心处理器采用主频为 167 MHz 的 DSP (TMS320C6701), 然后通过 16 位的 D/A 将控制信号转换成模拟信号; 测量机构采用精度为 0.625 nm 的多轴激光干涉仪检测动子的运动。对于部分无传感控制, X 轴激光干涉仪仅用来比较估计位置和实际位置的差值; 对于开环控制, X 轴和 Y 轴激光干涉仪均用于测量动子位置; 对于全闭环控制, X 轴和 Y 轴激光干涉仪检测的位置量(X 轴、Y 轴以及 θ_z 轴) 作为对应轴的闭环反馈信息。实验系统框图如图 6 所示。

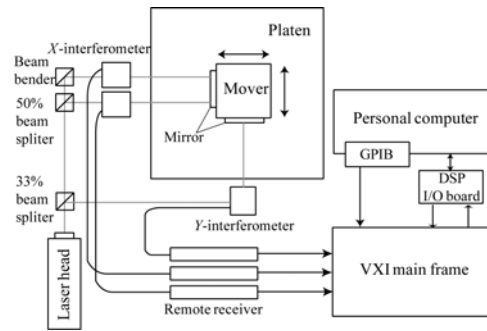
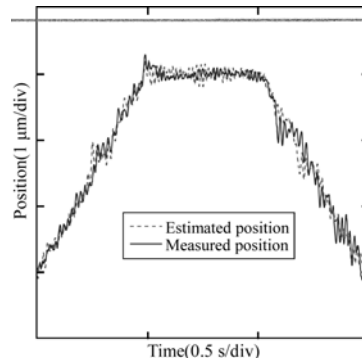


图 6 实验系统框图

Fig. 6 Schematic diagram of experimental setup

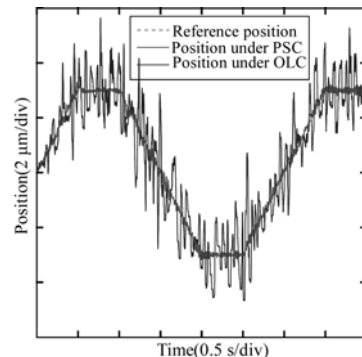
4.2 定位性能比较

图 7 比较了定位台在部分无传感控制和开环控制方式下的定位性能。图 7(a) 是部分无传感控制方式下通过滑模观测器得到的估计位置和实际测量位置的比较结果, 由图 7(a) 可知, 估计位置可以较好地跟踪实际位置, 最大跟踪误差为 $\pm 0.18 \mu\text{m}$; 图 7(b) 是定位台在不同控制方式下进行 $3 \mu\text{m}$ 斜坡运动的响应比较结果。



(a) 估计位置与实际位置比较

(a) Comparison of estimated position by SMO and measured position by PSC



(b) 不同控制方式下的定位性能比较

(b) Comparison of position performance in different control methods

图 7 X 轴运动定位性能

Fig. 7 Positioning performance at X-motion

在图 7(b)中,部分无传感控制下的定位跟踪误差为 $\pm 0.13 \mu\text{m}$;而在开环控制方式下,其定位跟踪误差达到了 $\pm 1.6 \mu\text{m}$ 。实验结果表明,相较于开环控制,部分无传感控制的定位性能得到了大幅度提升。表 1 比较了定位台在开环、部分无传感控制和 X/Y 轴均使用激光干涉仪的全闭环控制下的定位性能,其中全闭环控制参见文献[14]。

表 1 不同控制方式下的定位性能比较

Tab. 1 Comparison of positioning performance in different control methods

控制方法	重复定位精度/ μm	X 轴和 Y 轴的行程/mm
全开环控制	2.5	300×300
PSC	0.25	300×300
全闭环控制	0.1	100×100

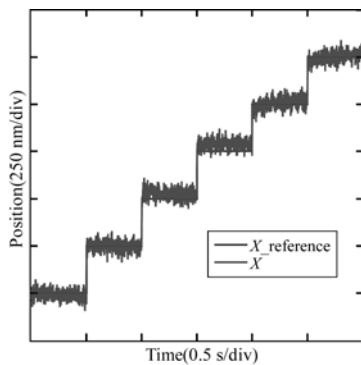


图 8 PSC 方式下 X 轴的 250 nm 连续阶梯响应

Fig. 8 250 nm consecutive step response for X-direction in PSC

参考文献:

- [1] PELTA E. Two-axis Sawyer motor for motion systems[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 1987, 7(5): 20-24.
- [2] SOLTZ M A, YAO Y L, ISH-SHALOM J. Investigation of a 2-D planar motor based machine tool motion system[J]. *Int. J. of Machine Tools & Manufacture*, 1999, 39(7): 1157-1169.
- [3] 张刚, 刘品宽, 张波, 等. 直线电机精密运动平台轨迹跟踪控制器设计[J]. *光学 精密工程*, 2013, 21(2): 371-379.
- ZHANG G, LIU P K, ZHANG B, *et al.*. Design of trajectory tracking controller for precision posi-

4.3 PSC 方式下的阶梯响应

图 8 显示了动子每隔 0.5 s 步进 250 nm 时的阶梯响应曲线。图中,最大轨迹跟踪误差为 $\pm 0.10 \mu\text{m}$ 。实验结果表明部分无传感控制方式下的平面定位台定位精度可达到亚微米级。

5 结 论

本文针对 Sawyer 电机驱动的多轴平面定位台的精密定位问题(X、Y 和 θ_z 轴),提出了一种新颖的部分无传感控制方法。首先对 Sawyer 电机进行 D-Q 建模和反馈线性化,从而得到线性化的电机模型;进而应用滑模观测器实现对定位台的位置和速度的估计,并对 SMO 的二次稳定性进行了论证;最后构建了基于 DSP 的实验系统,并完成了针对多轴运动平台的部分无传感控制的实验验证。实验结果表明:(1)平面定位台在部分无传感控制下的重复定位精度达到亚微米($0.25 \mu\text{m}$),而开环控制下重复定位精度为 $2.5 \mu\text{m}$,全闭环控制下重复定位精度为 $0.1 \mu\text{m}$;(2)部分无传感控制下的动子行程与开环控制相同(X 轴为 300 mm、Y 轴为 300 mm),远大于基于多轴位置传感的全闭环控制下的动子行程(X 轴为 100 mm、Y 轴为 100 mm)。本文提出的方法可用于精密平面定位台上,重复定位精度和运动行程均满足设计要求。

tion table driven linear motor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2):371-379. (in Chinese)

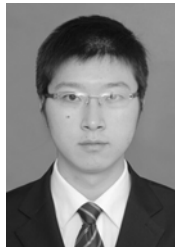
- [4] WANG H Y, FAN K C, YE J K, *et al.*. A long-stroke nanopositioning control system of the coplanar stage [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2014, 19(1): 348-356.
- [5] SHEN J C, LU Q Z, WU C H, *et al.*. Sliding-mode tracking control with DNLRX model-based friction compensation for the precision stage[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2014, 19(2): 788-797.
- [6] GAO W, TANO M, KIYNO S, *et al.*. Precision positioning of a Sawyer motor-driven stage [J]. *J. of Japan Society for Precision Engineering*,

- 2005, 71(4): 523-527.
- [7] TANO M, GAO W, DIAN S, *et al.*. Construction of a measurement and control system for a Sawyer motor-driven planar motion stage [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2006, 4(3): 182-189.
- [8] KRISHINAMURTHY P, KHORRAMI F. Robust adaptive control of Sawyer motors without current measurements [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2004, 9(4): 689-696.
- [9] DIAN S, ARAI Y, GAO W. Precision positioning control of a Sawyer motor-based two-axis planar motion stage [C]. *Proc. 3rd International Conference on Positioning Technology, Shizuoka*, 2008: 143-149.
- [10] GAO W, DIAN S. *Precision Control of Planar Motion Stages-Design and Implementation of Precision Motion Control Strategies*[M]. Berlin: Verlag, 2010.
- [11] YANG S M, KUO E L. Damping a hybrid stepping motor with estimated position and velocity [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2003, 18(3): 880-887.
- [12] BENDJEDIA M, AIT-AMIRAT Y, WALTHER B, *et al.*. Sensorless control of hybrid stepper motor [C]. *2007 European Conference on Power Electronics and Applications, Alborg*, 2007: 1-10.
- [13] HIRAI J, KIM T W, KAWAMURA A. Position-sensorless drive of linear pulse motor for suppressing transient vibration [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2000, 47(2): 337-345.
- [14] DIAN S, ARAI Y, GAO W. Precision positioning control of a Sawyer motor-based two-axis planar motion stage [J]. *Int. J. Surface Science and Engineering*, 2009, 3(2): 253-271.
- [15] SHTESSEL Y, EDWARDS C, FRIDMAN L, *et al.*. *Sliding Mode Control and Observation* [M]. New York: Springer, 2014.

作者简介:



佃松宜(1972—),男,湖北荆州人,博士,副教授,1996年、2002年于四川大学分别获得学士、硕士学位,2009年于日本东北大学纳米机械电子工程专业获得工学博士学位,主要从事微纳米精密定位、精密运动控制、滑模控制理论及应用等方面的研究与开发工作。E-mail: scudiansy@scu.edu.cn



向国菲(1990—),男,四川巴中人,硕士研究生,2012年于四川大学获得学士学位,主要从事电机驱动及控制、精密运动控制等方面的研究工作。E-mail: xiangguofei@gmail.com

(本栏目编辑:马 健)