

文章编号: 1001-0920(2009)04-0557-03

一种自适应振动主动控制策略 及其在 C 型三维表面检测系统中的应用

田园, 马孜, 胡英, 汪洋
(大连海事大学 自动化研究中心, 辽宁 大连 116026)

摘要: 基于广义最小方差和一步超前预报理论, 围绕三维型面扫描系统中所存在的周期性微振动问题, 提出了一种新的自适应振动主动控制算法. 以 C 型臂式三维激光扫描系统为应用背景, 基于来自于该系统的数据样本建立了系统的振动动态自回归滑动平均模型 (ARMA 模型). 采用所提出的自适应控制算法对该模型进行了振动主动控制仿真研究. 仿真结果验证了所提出的方案可以有效地抑制 C 型臂运动过程中产生的振动, 提高系统的整体三维检测精度.

关键词: 振动主动控制; C 型臂式激光扫描系统; 自适应控制

中图分类号: TP301 **文献标识码:** A

Application of adaptive vibration active control strategy on C three dimension scanning system

TIAN Yuan, MA Zi, HU Ying, WANG Yang

(Automation Research Center, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China. Correspondent: MA Zi, E-mail: zima@newmail.dlmu.edu.cn)

Abstract: Based on generalized least variance and optimal prediction theory, a novel adaptive vibration control algorithm is developed to restrain periodical micro-vibration in three dimension (3D) scanning system. Based on the sample data, which are from the C-arm scanning system, an autoregression and moving average (ARMA) vibration model is established and the successful simulation is obtained. The simulation results show that the presented scheme can control vibration effectively. Therefore, 3D scanning precision can be improved obviously.

Key words: Vibration active control; C-arm scanning system; Adaptive control

1 引言

在高精度测量系统中, 解决微振动导致的检测精度损失是具有挑战性的课题. 在实际工作现场中, 由于环境噪声及系统自身运行的影响, 测量核心机构在运动过程中产生微振动而严重影响测量的精度, 是亟待解决的问题. 本文的目的是针对一种典型的三维型面激光扫描系统的微振动控制方案, 找到一种对在线或在位三维型面测量系统微振动控制的有效途径.

基于广义最小方差理论^[1]和自适应控制算法^[2], 围绕振动补偿问题, 对性能指标函数进行了重新考虑, 推出了一种自适应振动补偿新策略. 为了验证这种算法对在线测量系统微振动控制的有效性,

建立了 C 型臂式激光扫描系统的动态振动误差模型^[3,4]. 以此作为仿真对象, 采用本文算法进行仿真实验, 结果证明了算法对微振动控制的有效性.

2 自适应振动主动控制算法设计

自适应振动控制系统结构如图 1 所示. 振动位移系统可以描述为

$$A(z^{-1})Y(t+k) = B(z^{-1})U(t) + V(t). \quad (1)$$

其中: $Y(t)$, $U(t)$ 和 $V(t)$ 分别代表系统振动位移 (即测头的振动位移)、控制输入和干扰输入; k 是时间延迟. 假设 $V(t)$ 为有界振幅及频率未知的振动信号, 在模型 (1) 中, $A(z^{-1})$ 和 $B(z^{-1})$ 是单位后移因子的函数^[5,6], 即

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n}, \quad (2)$$

收稿日期: 2008-04-01; 修回日期: 2008-06-10.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50575029).

作者简介: 田园 (1978—), 女, 沈阳人, 博士生, 从事振动控制、智能控制的研究; 马孜 (1955—), 女, 沈阳人, 教授, 博士生导师, 从事机器人控制、自适应控制的研究.

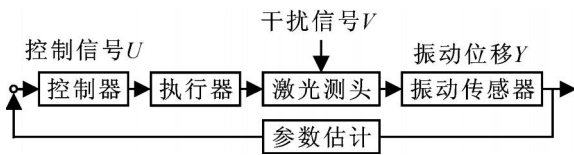


图1 自适应振动控制系统结构

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_{n_b} z^{-n_b}. \quad (3)$$

上述系统的性能指标定义为

$$J = E E_m(t+k)^2, \quad (4)$$

其中

$$E_m(t+k) = P(z^{-1})Y(t+k) - Q(z^{-1})U(t) + F(z^{-1})v(t). \quad (5)$$

在式(5)中, $P(z^{-1})$ 和 $Q(z^{-1})$ 是阶数分别为 n_p 和 n_q 的加权多项式,其作用在于获得满意的闭环系统特性,实现极点配置,同时用于消除振动导致的机构偏移.

在算法中给定一个辅助输出量 $\phi(t+k)$, 定义为 $\phi(t+k) = P(z^{-1})Y(t+k)$, 该量的最优预报为 $\phi^*(t+k/t) = G(z^{-1})Y(t) + H(z^{-1})B(z^{-1})U(t) + H(z^{-1})v(t)$,

其中 $G(z^{-1})$ 和 $H(z^{-1})$ 满足

$$P(z^{-1}) = H(z^{-1})A(z^{-1}) + z^{-k}G(z^{-1}), \quad (7)$$

$H(z^{-1})$ 和 $G(z^{-1})$ 的阶数 n_h 和 n_g 分别为 $n_h = k - 1$ 和 $n_g = n_a - 1$.

定理1 能够使系统性能指标(4)极小的控制律方程为

$$\phi^*(t+k/t) - Q(z^{-1})u(t) - F(z^{-1})v(t). \quad (8)$$

系统的闭环方程为

$$[Q(z^{-1})A(z^{-1}) + B(z^{-1})P(z^{-1})]Y(t+k) = [Q(z^{-1}) - F(z^{-1})B(z^{-1})]v(t). \quad (9)$$

证明略^[2].

为了获得满意的系统动态特性,预先离线选定一个理想的特征多项式 $T(z^{-1})$, 多项式 $P(z^{-1})$ 和 $Q(z^{-1})$ 由如下的 Diophantine 方程获得^[1]:

$$B(z^{-1})P(z^{-1}) + Q(z^{-1})A(z^{-1}) = T(z^{-1}). \quad (10)$$

式(10)中 $P(z^{-1})$, $Q(z^{-1})$ 和 $T(z^{-1})$ 的阶数可确定为

$$n_p = n_a - 1, n_q = n_b - 1, n_t = n_a + n_b - 1, F(1) = Q(1)/B(1). \quad (11)$$

基于上述控制系统设计,提出自适应方案如下:为实现系统参数辨识,系统(1)描述为

$$Y(t+k) = \vartheta X^T + V(t). \quad (12)$$

其中

$$\vartheta = [-a_1 - a_2 \dots - a_n b_0 b_1 \dots b_{n_b}], \quad (13)$$

$$X = [y(t-1) y(t-2) \dots y(t-n_a) \times u(t-k-1) u(t-k-2) \dots u(t-k-n_b)]. \quad (14)$$

基于 ARMA 模型(12)中的数据向量 X , 通过最小二乘算法可以获得系统参数向量的估计值 $\hat{\vartheta}$, 该向量包括估计值 $\hat{\alpha}_i (i = 1, 2, \dots, n_a)$ 和 $\hat{b}_i (i = 1, 2, \dots, n_b)$. 参数辨识算法可描述为

$$\hat{\vartheta}_t = \hat{\vartheta}_{t-1} + L_t \epsilon_t. \quad (15)$$

其中

$$\hat{\vartheta}_t = [\hat{\alpha}_{1t}, \dots, \hat{\alpha}_{n_a t}, \hat{b}_{0t}, \dots, \hat{b}_{n_b t}], \quad (16)$$

$$L_t = P_t X_t^T, \quad (17)$$

$$P_t = (P_{t-1} - \frac{P_{t-1} X_t^T X_t P_{t-1}}{1 + X_t P_{t-1} X_t^T}) / \lambda_t, \quad (18)$$

$$\lambda_t = \lambda_{t-1} + (1 - \lambda_0), \quad (19)$$

$$\epsilon_t = Y_t - X_t \hat{\vartheta}_{t-1}. \quad (20)$$

基于式(15)~(20),可获得参数估计向量 $\hat{\vartheta}$. 将自适应振动控制算法归纳成下面步骤:

Step1: 应用算法(15)~(20),估计系统参数 $\hat{\alpha}_i$ 和 \hat{b}_i .

Step2: 基于方程(10),参数估计 $\hat{\alpha}_i$ 和 \hat{b}_i , 计算 Q_t 和 P_t 的系数.

Step3: 基于方程(7),参数估计值 $\hat{\alpha}_i, \hat{b}_i$ 和 P_t , 计算权值 H_t 和 G_t 的系数.

Step4: 使用最优预报方程(6)和最优控制率方程(8),并基于 Q_t, G_t, H_t 和 B_t , 计算控制输出.

3 自适应振动主动控制系统及仿真实验

3.1 系统实验平台介绍

由于本实验涉及到采样、传感、驱动、计算机控制等方面的问题,建立如图2所示的系统实验平台^[7-9].

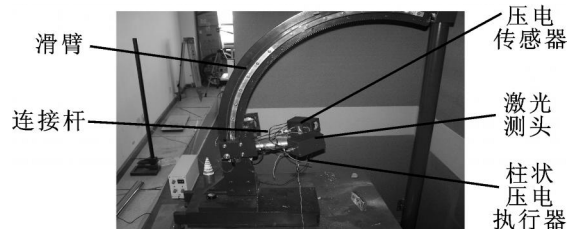


图2 实验平台

在C型臂的运行过程中,外界的环境干扰将通过连接杆传递到测头上,引起测头的振动.另外,测头本身在运动的过程中也会有微振动,使检测精度降低^[10].因此在本实验中测头为主要控制对象.将传感器安置在激光测头的上端,下端为柱状压电陶瓷执行器,采用PC机作为数字控制器,基于压电陶瓷执行器的C型臂式激光扫描系统作为控制对象.

压电加速度传感器(型号为 YD82)采集到的振动信号通过双积分电荷放大器(型号为 DHF-12)转换成标准的 - 10 ~ 10V 电压,再经 NI 公司的标准采集卡(型号为 6221)传给 PC 机,然后经过自适应控制算法后输出相应的指令,经过数模转换和功率放大器驱动压电陶瓷执行器。

3.2 仿真结果

在上述控制系统中离线辨识模型参数,对压电陶瓷作动器输入一频率为 40 Hz,幅值为 40V 的正弦信号 u ,通过压电加速度传感器读出的数据为 y ,得到 3000 对数据作为测量数据序列 $\{u(k), y(k)\}$,用最小二乘法辨识出模型的参数 a 为 $[1 \ 0.80]$, b 为 $[0 \ 0.24]$ 。通过辨识得出的模型描述为

$$(1 + 0.8z^{-1})Y(t + 1) = 0.24z^{-1}U(t) + V(t)$$

另外,选取一组输入电压为 30V,频率为 30 Hz 的信号作为测试数据,将该数据代入模型求出的输出数据与实际测量的输出数据做比较,得到建模误差如图 3 所示。由图 3 可以看出误差很小,基本在 0 附近,由此得到辨识出的模型能够真实地反映系统实际情况的结论。

假设模型中的干扰为有界周期函数 $V(t) =$

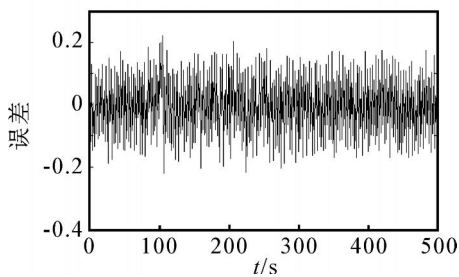


图 3 系统的建模误差

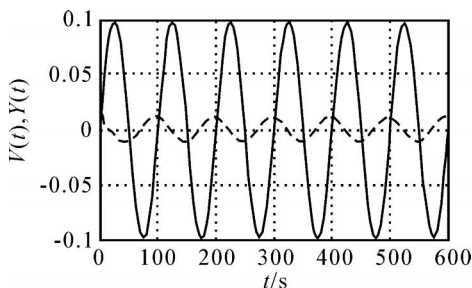


图 4 自适应振动控制系统仿真曲线

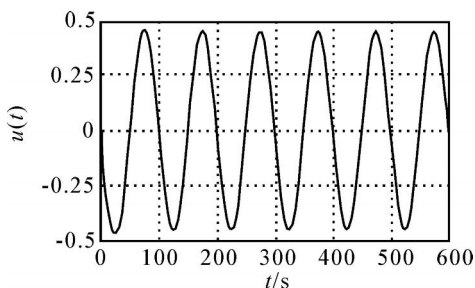


图 5 自适应振动控制系统控制动态曲线

$0.1 \sin(2 \pi t/60)$ 。通过 Matlab 仿真可以看出,基于所给出的控制算法,有效地抑制了系统干扰,使其将干扰的幅值由 0.1 衰减到 0.01 以下。图 4 给出了系统输出和外部干扰的动态过程曲线,实线为振动干扰信号 $V(t)$,虚线为系统输出信号 $Y(t)$ 。图 5 给出了控制输出动态曲线。由此可见达到了很好的控制效果。

4 结 论

本文基于广义最小方差和一步超前预报理论,提出了一种自适应振动控制算法,并将其应用在自行研制的 C 型臂式激光扫描系统。仿真结果表明,该控制算法合理、有效,达到了很好的减振效果。另外可以将此自适应振动控制算法进一步延伸到此类系统,使系统对环境的适应能力增强、检测精度提高。后续工作将把算法应用于实时精密测量在位检测系统中,算法中将考虑加入对建模误差的补偿。

参考文献(References)

- [1] Goodwin G C, Sin K S. Adaptive filtering prediction and control [M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1984.
- [2] Ma Z, Jutan A. Control of a pressure tank system using a decoupling control algorithm with a neural network adaptive scheme [J]. IEEE Proc Control Theory Application, 2003, 150(4): 389-400.
- [3] Jie Liu, Kefu Liu, Hao Bai. Application of a time-delayed control system in vibration suppression [C]. Proc of the IEEE Int Conf on Mechatronics and Automation. Canada: Niagara Falls, 2005: 230-235.
- [4] Amor Jnifene, William Andrews. Experimental study on active vibration control of a single-link flexible manipulator using tools of fuzzy logic and neural networks [J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 2005, 54(3): 1200-1208.
- [5] 沈少萍. 特征模型自适应控制方法在悬臂梁振动主动控制中的应用[J]. 振动与冲击, 2007, 26(11): 410-414.
(Shen S P. Application of adaptive control method based on characteristic model in active vibration suppression of cantilever beam[J]. J of Vibration and Shock, 2007, 26(11): 410-414.)
- [6] 何敏, 王建国. 自适应神经网络模糊推理系统在结构振动主动控制中的研究[J]. 安徽建筑工业学院学报, 2006, 14(4): 11-13.
(He M, Wang J G. Application of adaptive network-based fuzzy inference system in structural vibration active control[J]. J of Anhui Institute of Architecture and Industry, 2006, 14(4): 11-13.)

(下转第 564 页)

- 43.
- [3] 谢晓锋, 张文俊, 杨之廉. 微粒群算法综述[J]. 控制与决策, 2003, 18(2): 129-134.
(Xie X F, Zhang W J, Yang Z L. Overview of particle swarm optimization[J]. Control and Decision, 2003, 18(2): 129-134.)
- [4] Parsopoulos K E, Vrahatis M N. On the computation of all global minimizers through particle swarm optimization [J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2004, 8(3): 211-224.
- [5] Kadiramanathan V, Selvarajah K, Fleming P J. Stability analysis of the particle dynamics in particle swarm optimizer [J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2006, 10(3): 245-255.
- [6] Clerc M, Kennedy J. The particle swarm-explosion, stability and convergence in a multidimensional complex space[J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2002, 6(1): 58-64.
- [7] 刘洪波, 王秀坤, 谭国真. 粒子群优化算法的收敛性分析及其混沌改进算法[J]. 控制与决策, 2006, 21(6): 636-640, 645.
(Liu H B, Wang X K, Tan G Z. Convergence analysis of particle swarm optimization and its improved algorithm based on chaos [J]. Control and Decision, 2006, 21(6): 636-640, 645.)
- [8] F van den Bergh, Engelbrecht A P. A study of particle swarm optimization particle trajectories[J]. Information Sciences, 2006, 176(8): 937-971.
- [9] Shi Yuhui, Eberhart R. A modified particle swarm optimizer [C]. Proc IEEE Int Conf on Evolutionary Computation. 1998: 69-73.
- [10] 马东升. 数值计算方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
(Ma D S. Methods of numerical value calculation[M]. Beijing: China Machine Press, 2001.)
- [11] Li J J, Wang X H. A modified particle swarm optimization algorithm [C]. Proc of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation. Hangzhou, 2004: 354-356.
- [12] Eberhart R C, Shi Y. Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization[C]. Proc of the IEEE Conf on Evolutionary Computation. California: IEEE Service Center, 2000: 84-88.
- [13] 王俊伟, 汪定伟. 一种带有梯度加速的粒子群算法[J]. 控制与决策, 2004, 19(11): 1298-1300, 1304.
(Wang J W, Wang D W. Particle swarm optimization algorithm with gradient acceleration [J]. Control and Decision. 2004, 19(11): 1298-1300, 1304.)

(上接第 559 页)

- [7] 左元华, 姜斌, 陈复扬. 悬臂梁主动控制与模型参考自适应控制比较研究[J]. 计算技术与自动化, 2007, 26(4): 1-4.
(Zuo Y H, Jiang B, Chen F Y. A comparative research of routine active control and model reference adapting control on overhanging-beam[J]. Computing Technology and Automation, 2007, 26(4): 1-4.)
- [8] 黄群, 文立华, 李双. 基于压电堆式作动器的主动隔振研究及其仿真分析[J]. 西安工业大学学报, 2006, 26(4): 361-364.
(Huang Q, Wen L H, Li S. Study and simulation of active vibration isolation system with piezo electric stack acutators [J]. J of Xi 'an Technological University, 2006, 26(4): 361-364.)
- [9] 司洪伟, 李东旭. 自适应变论域模糊控制器在结构振动控制中的应用[J]. 振动与冲击, 2007, 26(5): 81-84.
(Si H W, Li D X. Active control of structural vibration using a fuzzy control method based on adaptive scaling universes of discourse [J]. J of Vibration and Shock, 2007, 26(5): 81-84.)
- [10] Bayer V, Bucher C. Important sampling for first passage problems of nonlinear structures, international [J]. J of Probabiistic Engineering Mechanics, 1999, 14(1): 27-32.
- [11] Carbone V, Caroccim, Savio E. Combination of a vision system and a coordinate measuring machine for the reverse engineering of freeform surface [J]. Int J of Advanced Manufacturing Technology, 2001, 17(4): 263-271.