

基于 DSP 的伺服控制系统在非球面检测平台上的研究

杨平¹, 郭隐彪^{1*}, 刘建春²

(1. 厦门大学微纳加工与检测联合实验室, 2. 厦门大学机电工程系, 福建 厦门 361005)

摘要: 根据高精度非球面表面检测的要求, 提出一种用于微纳精度测量的非球面检测平台伺服控制系统. 系统基于高性能数字信号处理器(以下简称 DSP) 芯片控制技术, 采用德州仪器(Ti)公司的 TM S320F2812 运动控制开发板对三轴伺服电机进行实时控制. 系统硬件上设计了 DSP 外围驱动电路, 实现了对交流伺服系统的控制. 反馈电路采用模块化设计, 完成了对电机编码器和直线光栅尺输出信号的采集. 在 Windows 操作系统下, 用 CCS2.0 开发工具完成了 DSP 芯片软件上编程, 包括数字比例-积分-微分(以下简称 PID)算法, 数字测速 M/T 法等, 简化了外围硬件设计. 系统具有完整的 DSP 芯片的运动函数编程以及硬件模块的扩展功能. 最后通过实验在双轴工作平台上进行定位分析和稳定性仿真, 系统达到较高的位置控制.

关键词: 非球面; 检测; 数字信号处理器; 伺服电机; 运动控制

中图分类号: TH 741

文献标识码: A

文章编号: 0438-0479(2006)05-0638-05

非球面镜作为一种高性能光学元件, 其应用领域日益广泛. 对光学非球面镜片加工技术和检测技术成了亟待解决的问题. 在非球面加工过程中, 由于砂轮的形状精度、尺寸精度及机床误差的影响, 实际加工无法完全按照理想加工曲线加工. 为了提高非球面的加工精度, 我们需要多次检测所加工的工件曲面, 进而进行补偿加工^[1], 得到高精度的成品. 提高检测的精确性, 高效的运动检测平台的构建成为必要条件之一^[2]. 因此如何提高检测平台多维的位置定位以及高效的信号反馈成为我们需要解决的问题.

为了实现设计要求, 本文采用数字信号处理器(以下简称 DSP) 为核心控制器. DSP 作为一项日渐成熟的技术, 与传统的模拟信号处理相比, 具有灵活、精确、抗干扰能力强、设备尺寸小、速度快、性能稳定和易于升级等优点^[3]. DSP 是利用计算机或专用的处理设备, 以数值计算的方式对信号采集、变换、综合、估计等加工处理, 从而达到对系统的控制和信号的采集^[4].

本文针对以上问题, 提出搭建多维检测平台的控制方案: (1) 建立适用于高精度复杂零件(光学非球面)的检测平台; (2) 设计基于 TMS320F2812 芯片为核心的三维运动控制系统.

1 测量平台的结构设计

高精度检测平台的主体结构(图 1)主要有: 非接触式激光传感器、CCD 摄像头、龙门式桥架、三轴伺服运动工作平台、回转轴、花岗石基座等. 由于花岗岩材料内应力小, 稳定性高, 刚性大, 热膨胀系数小, 用来制作测量机的工作平台与固定式桥架, 可提供一个良好的参考面. 三轴定位平台均采用线性模块组合, 以减小传动机构的摩擦系数. XYZ 轴传动机构均由交流伺服电机、弹性联轴器和摩擦轮构成, 用以驱动被测非球面和测头. 各运动轴的定位均采用直线光栅(0.1 μm)反馈坐标, 回转轴采用高精度圆盘光栅反馈角度, Z 轴微动由传感器测量. 在龙门桥架上加载 CCD 视频头, 放大测头部份图像以便于安装调试, 并利用减震台等防止外部系统干扰.

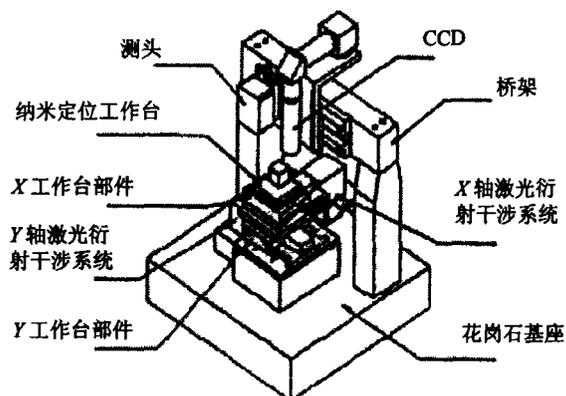


图 1 测量平台结构简图

Fig. 1 Diagram of measurement platform structure

收稿日期: 2006-03-01

基金项目: 国家“863”计划(8638042416)项目, 厦门大学创新团队资助

作者简介: 杨平(1981-), 男, 硕士研究生.

* 通讯作者: guoyh@xmu.edu.cn

2 三轴伺服运动控制平台结构设计

为了获得高精度定位和高速程序处理能力, 伺服运动控制系统采用 PC 机+ 多轴运动控制器的控制方式. 这种基于开放式可编程运动控制系统的结构以 Ti 公司最新推出的 DSP 运动控制芯片 TMS320F2812 为下位核心控制, 以 PC 机标准插件函数形式的可编程语言为上位控制核心. 系统采用模块化设计, 方便地支持用户的开发和扩展.

2.1 控制系统硬件设计

运动控制系统采用 DSP2812 数字信号处理器为核心, 提供多轴运动控制、数/模转换、逻辑控制、资源处理、同主机的交互等强大的功能, 有软硬件全面的开放性, 是一款高性能的运动控制开发平台. 图 2 是交流伺服电机硬件系统设计框图.

系统采用混合闭环控制, 通过交流伺服电机编码器半闭环反馈伺服系统转速, 后经过安装在三轴上的高精度线性光栅尺全闭环反馈系统的定位信号, 达到精调机械系统的移动位置. 在中断程序中, 采集反馈信号经过运算处理进入数字 PID 控制器调节, 最终调整运动控制卡输出的脉冲信号, 实现系统的自整定控制.

系统主要由交流伺服电机驱动传动机构, 要保证系统能够准确地控制电机转动的方向、角度和速度, 首先取决于准确、快速地获得电机编码器的反馈信号. 伺服放大器采用脉冲串输入控制, 简化了交流伺服电机控制上的设计, 并能与 DSP 运动控制卡输出的 PWM 信号高效地衔接, 达到协调控制; 伺服电动机装配 16bit 增量式光电编码器, 有效地提高了电机转角与速度信号的反馈精度.

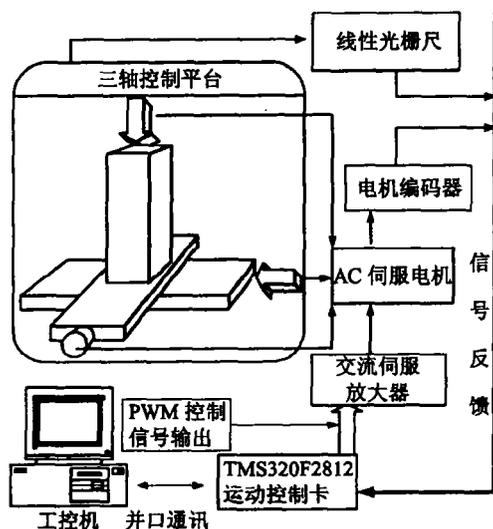


图 2 三轴交流伺服平台控制方案

Fig.2 Control project of three-axis AC servo system

图 3 为 DSP 数字控制总体控制方案. DSP 控制器利用事件模块提供的具有正交解码电路功能的捕获单元(QEP), 可捕获到来自电机光电码盘互差 90° 的正交脉冲信号 A 相和 B 相(CA、* CA、CB、* CB 为编码器差分输出信号), 以及码盘输出的 Z 相脉冲信号(CZ、* CZ 为编码器差分输出信号). 捕获的脉冲信号通过 DSP 四倍频计数, 进一步提高了反馈信号的精度. 通过定时采集信号, 并对码盘信号计数可计算出电机转角的位置信息, 以及转速信息, 达到电机转轴和转速信号的采集. 电机转速信号的采集, 采用 DSP 芯片的 2 个定时/计数器, 分别对光电编码器输出的脉冲和时钟脉冲计数, 根据电机转速范围值, 选取不同的采样周期内捕获的脉冲数, 计算出电机的转速. 检测值通过半闭环反馈函数运算后, 与初始信号的差值输入数字 PID 控制器, 输出校正量完成调速控制. 通过仿真实验确定了使用此测速方法可以满足系统的精度要求.

根据交流伺服电机的转速与转角方程:

$$V = \frac{60\alpha f}{65536\beta} \tag{1}$$

式中, V 为电机转速; f 为输入脉冲频率; α 为命令脉冲补偿分子; β 为命令脉冲补偿分母.

式(1)得到伺服电机转速初始值. 转角由 DSP 芯片输出的脉冲数决定, 因此改变输入交流伺服放大器的脉冲频率与脉冲数, 可以非常方便设定电机的初始转速和转角. (转速范围) 数字 PID 控制器、闭环反馈信号处理(如转速调节器、光电编码器信号运算、输入与输出信号滤波等)均由 CCS2.0 软件对 DSP 芯片编程完成.

精调控制通过 DSP 对直线光栅尺捕捉反馈脉冲

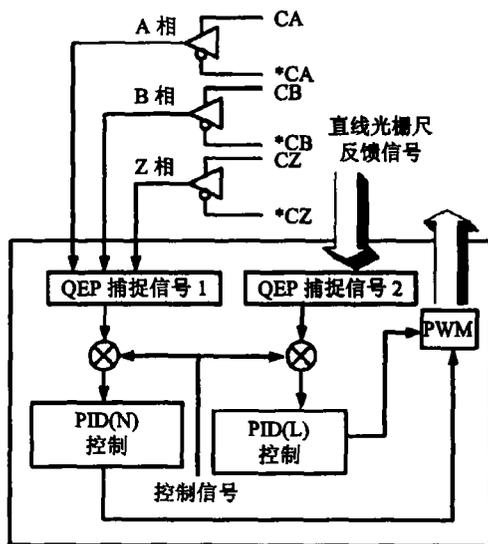


图 3 DSP 数字控制总体控制方案

Fig.3 Main control project of DSP digital command

信号, 信号通过 DSP 捕捉单元四倍频计数. 计数值运算后可得出传动机构的位移量, 此数值输入位置全反馈函数回路与初始值差值比较输入数字式 PID 控制器, 输出位移校正量实现位置上的自适应控制.

2.2 控制系统软件设计

本实验平台的控制系统软件部分主要采用 C 语言编写, 而且实行模块化编程. 这不仅提高了 DSP 的运行效率, 而且增加了程序的通用性和可移植性, 有利于系统的维护和改进.

系统测速采用 DSP 的软硬件资源来实现数字测速 M/T 法, 可使得方案灵活, 简便易行. 此模块利用 DSP 芯片上自带的两个定时/计数器 T0 和 T1. T0 和 T1 的中断服务子程序如图 4 所示. 在系统初始化中, 设置了两个数据存储单元 M1 和 M2, 分别存储计数值 m_1 和 m_2 ; 同时定义 4 个标记 START、STARTED、READY 和 FINISH, 其意义分别为启动测量、测量进行、预定时间和测量结束. 设置 T0 为定时器, 在每 1 ms 产生中断, 并用发生中断时间作为基准时钟, 在其中断服务程序中实现对 m_2 的计数. 设计 T1 为计数器, 并对信号脉冲下降沿进行计数, 并对每个测速脉冲的下降

沿均产生一次溢出中断, 在其中断服务程序中实现对 m_1 的计数. 主程序通过设置 START = 1 来允许一次测量, 而测量需要等待测速脉冲的下一个下降沿的同步才能真正启动. 因此在 T1 的中断服务程序中以 STARTED = 1 来表示测量正在运行. 在 T0 中断服务程序中执行对 m_2 的计数, 并通过计数判定 T1 是否到达. T1 到达后设置 READY = 1, 在测速脉冲即将到来的下一个下降沿结束本次测量, 设置 FINISH = 1, 通知主程序测量已经结束, 即可对 m_1 和 m_2 数据进行速度的计算.

为提高系统响应的快速性, 及稳态运行时的稳定性, 采用了多区间变参数 PID 控制算法. 本系统根据实际情况采用两区间变参数 PID 控制算法.

$$K_p, K_i, K_d = \begin{cases} K_{p1}, K_{i1}, K_{d1}, & |e(k)| > |e_0| \\ K_{p2}, K_{i2}, K_{d2}, & |e(k)| \leq |e_0| \end{cases} \quad (2)$$

式中, $e(k)$ 为位置跟踪偏差; e_0 是一个可调参数, 其具体数值可根据实际对象由实验确定. e_0 将整个位置跟踪偏差值范围分为了 2 个区间. 当 $|e(k)| > |e_0|$ 时, 希望转子位置快速接近中心值, 则需要相对增大 K_p 和 K_d 的值; 一旦其位置跟踪偏差值进入 $|e(k)| \leq |e_0|$ 区间时, 则有必要降低系统动作幅度, 从而相对减小 K_p 和 K_d 的值, 此时可适当选取 K_i 的值, 进一步提高精度.

采样-控制程序是最主要的中断服务程序之一, 它

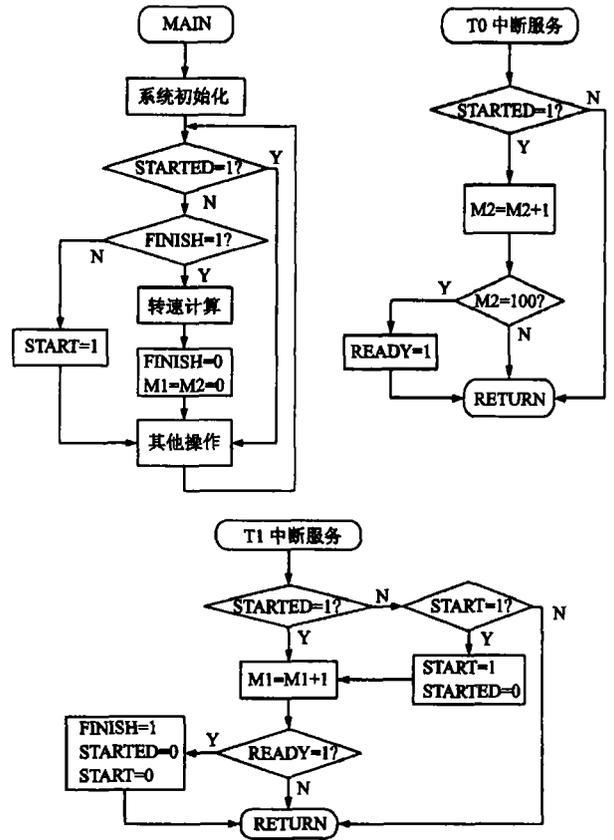


图 4 编码器反馈信号 M/T 法测速流程图

Fig. 4 Flow chart of M/T method of encoder feedback signal

的控制算法将直接影响控制的效果. 采用数字 PID 算法的采样-控制程序流程如图 5 所示. 进入中断服务子程序, 系统采样控制输入值 $r(k)$ 和码盘反馈信号测速值 $w(k)$, 两值相减得出控制偏差 $e(k)$. 同输入参数 e_0 比较, 调用在 DSP 芯片中对应偏差值的比例、积分和微分参数, 运行数字 PID 控制器, 输出当前的控制量 $u(k)$ 控制电机运转, 同时将本次的控制偏差值和当前控制量保存, 为下一步运行做准备.

3 位置控制模块仿真

3.1 系统模型与算法实现

为了对伺服系统的数学描述, 实际上就是建立系统各个环节的传递函数, 然后求出整个系统的传递函数. 本仿真以伺服运动控制部分为模型, 如图 6 所示.

$$J_L \frac{d^2 X_L}{dt^2} + f_L \frac{dX_L}{dt} + K_L X_L = \frac{l}{2\pi} K_L \theta \quad (3)$$

式中 J_L : 丝杆的总惯量; f_L : 丝杆的导轨粘性阻尼系数; K_L : 丝杆的机械传递总刚度; l : 丝杆导程; θ : 联轴器输出的转角.

设机械传动装置的传递函数 $G_L(s)$ 为

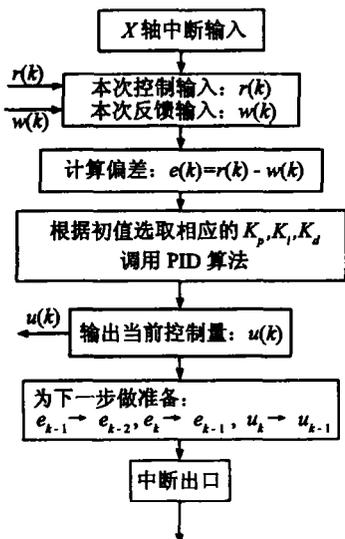


图 5 单轴 PID 控制器流程控制图

Fig.5 Flow chart of single axis PID controller

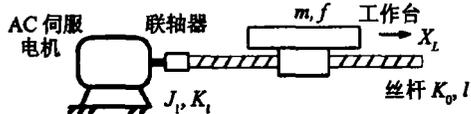


图 6 单轴结构简图

Fig.6 Structure diagram of single axis

擦系数 $f_L = 0.1 \text{ N}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$, 减速比为 1/1, 负载总惯量 $J_L = 0.86 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $K_L = 191 \text{ N}/\text{m}$, $\zeta = 0.39$, $\omega_n = 1490$, 机械效率 = 0.9, $K_s = 6.28 \times 10^{-3}$, $K_v = 0.06$; 交流伺服系统其主要参数为: 额定输出功率 = 400 W, 额定转矩 = 1.27 N·m, 额定转速 = 3000 r/min, 最大转速 = 5000 r/min, 最大转矩 = 3.28 N·m, 惯性矩 = $2.46 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 额定电流 = 2.7 A, 最大电流 = 8.1 A, 耐振动 = $49 \text{ m}/\text{s}^2$ (5G), $\alpha = 8192$, $\beta = 125$, 初始命令脉冲数 = 1000, 初始命令脉冲频率 = 1 kHz.

代入式(3) 传递函数可得:

$$G_L(s) = \frac{3533}{s^2 + 1192s + 2220100} \quad (7)$$

系统采用 Matlab 中的 Simulink 软件包对数字 PID 各项参数选取进行仿真试验. 其中系统的临界比例增益 K_c 和振荡周期 T_c 由计算机仿真试验确定. 得出对象参数 K_c 和 T_c 后, 按照 Ziegler-Nicholes 公式得出相应的比例、积分和微分整定参数(见表 1), 然后进行仿真.

表 1 数字控制器参数整定表

Tab.1 Table of digital controller parameters adjustment

控制器	$K_p (\times 10^3)$	K_i	K_d	e_0
P	1.754			
P	1.0524			
PD	1.0524		0.6	≥ 5
PID	1.0524	0.01	0.6	< 5

通过仿真, 系统在无外加 PID 参数的开环条件下(图 7a), 系统的稳态误差仅为 0.002, 静态误差达 0.998, 远不能满足跟随设定值的要求. 加入 P 校正后, 整定出系统的临界比例增益 K_c 和振荡周期 T_c (如图 7b). 加入数字 PID 控制器整定系统后稳态误差达到 0.63, 响应时间缩短为 1.2 ms, 与单独 P 校正相比, 系统对阶跃信号的反馈时间更短, 稳定性能更好. (图 7c)

4.2 结语

本文在光学非球面检测平台中采用 2812 芯片控制交流伺服系统. 三轴运动控制平台采用混合闭环数字型 PID 控制器, 硬件电路上简化了设计, 软件编程上采用模块设计, 方便移植, 缩短了设计周期.

通过 Matlab 仿真平台运行控制, 系统的定位精度高, 加速快, 稳态性能好. 而且没有超调和振荡, 具有较强的鲁棒性和抗干扰性.

在对数字型 PID 控制器比例、积分、微分项的选取和调试过程中, 可得出:

$$G_L(s) = \frac{X_L(s)}{\theta(s)} = \frac{\frac{l K_L}{2\pi J_L}}{s^2 + \frac{f_L}{J_L} s + \frac{K_L}{J_L}} = \frac{l}{2\pi} \cdot \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4)$$

式中 $\omega_n = \sqrt{\frac{K_L}{J_L}}$ 是无阻尼系统的进给频率, $\xi =$

$\frac{f_L}{2\sqrt{J_L K_L}}$ 是进给系统的阻尼比.

富士 AC 伺服系统位置控制传递函数增益为 K_s ,

$$K_s = \frac{2\pi\alpha}{65536\beta} \quad (5)$$

式中 α : 命令脉冲补偿分子; β : 命令脉冲补偿分母.

富士 AC 伺服系统速度控制传递函数增益为 K_v ,

$$K_v = \frac{60\alpha}{65536\beta} \quad (6)$$

式中 f : 命令脉冲频率.

4 仿真实验及结果分析

4.1 仿真实验参数与 Simulink 仿真

上述机械结构主要参数为: 丝杆螺距 = 10 mm, 丝杆 = 20 mm, 长度 $L = 300 \text{ mm}$, 输出质量 = 20 kg, 摩

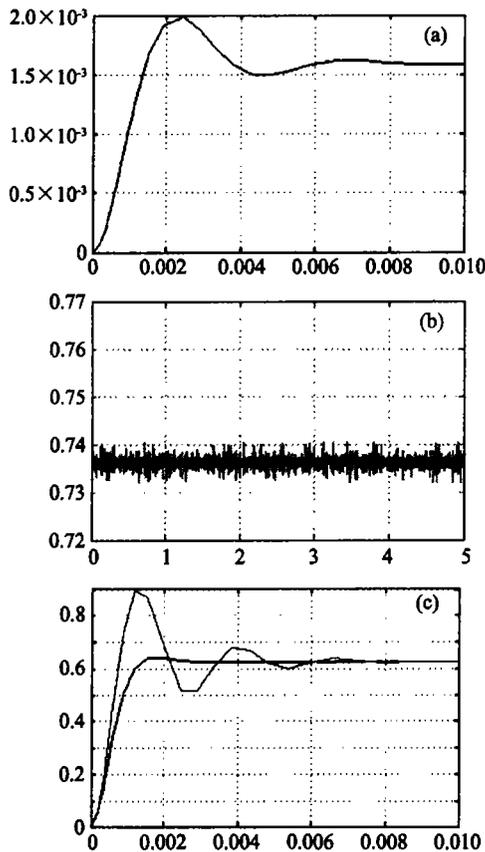


图7 仿真试验及响应曲线
(a) 系统开环阶跃响应; (b) 系统闭环临界比例增益(K_c)阶跃响应; (c) 系统PID阶跃响应

Fig.7 Simulation and step response curve

(1) 在控制器中比例项不是单独作用的, 它与积分项和微分项是并行的. 比例项增加到一定数值, 系统会产生共振(图 7b), 此时不能单独通过修改 P 相改变传递函数的幅度, 它需要与积分项和微分项相互作用, 共同整合出系统的传递函数零点位置.

(2) 只要反馈信号, 并对误差信号(值不为 0)积分, 伺服环路就不会容忍稳态的伺服误差.

(3) 微分项的设计对系统的性能有关键性的影响, 它的加入是为了克服系统的惯性, 对伺服环路的阻尼和稳定性影响最大. 通过图 7c 可以直观的看到这一结论.

参考文献:

[1] 郭隐彪, 杨继东, 庄司克雄. 轴对称非球面模具加工中的补偿技术研究[J]. 中国机械工程, 2000, 10(4): 415-417.
 [2] 苏奎峰, 吕强, 耿庆锋, 等. TMS320F2812 原理与开发[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
 [3] 张崇巍, 李汉强. 运动控制系统[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2002: 240-244.
 [4] TMS320F28x Peripherals Reference Guide[M]. Texas Instrument Incorporated, US, 2002.
 [5] TMS320F28x Optimizing C/C++ Compiler User's Guide[M]. Texas Instrument Incorporated, U S, 2001.

Study on Servo Control System Based on DSP of Measurement Platform for Optical Aspheric Surface

YANG Ping¹, GUO Yin-biao^{1*}, LIU Jian-chun²

(1. Incorporated Laboratory of Machining and Measurement for Micro/ Nanometer, Xiamen University,
 2. Dept. of Mechanical and Electronic, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: In order to realize the high precision measurement of aspheric surface, a servo control system used for the micro-nanometer accuracy measurement platform for optical aspheric surface is established. The system is based on the control technology of high performance digital signal processor (DSP) chip. The chip is TMS320F2812 produced by Texas Instrument Incorporated. It is used as a real-time processor for the 3-axis servo motor. Under windows operating system and CCS2.0, the software development is accomplished. The software functions include digital proportion-integral-derivative (PID) controller and M/T method that simplify the peripheral hardware circuit. The system is designed to achieve the aims of motion control and expanded the hardware module. The stability of the system is analyzed by simulation. The results show that the system has better performance in positioning control.

Key words: aspheric surface; measurement; digital signal processor; servo motor; motion control