

基于 INtime 的六自由度运动平台实时测控系统

黄茫茫^{1,2}, 周晓军^{1,2}, 魏燕定^{1,2}

(1. 浙江大学 现代制造工程研究所, 杭州 310027; 2. 浙江省先进制造技术重点实验室, 杭州 310027)

(20925025@zju.edu.cn)

摘要:在六自由度运动平台的测控系统中,既需要满足控制的实时性和较高的定时精度,又需要有较强的图形图像交互功能。针对现有测控系统采用的上下位机分开实现方式带来的缺点,设计了一种基于 INtime 的六自由度运动平台实时测控系统。该测控系统通过 INtime 进程对数据采集和控制板卡的直接操作实现实时性,同时在 Windows 进程中并行运行非实时任务,能够在一台工业控制计算机上实现测控系统的要求。实际运行测试结果显示,该系统具有高实时性能,满足实时控制的要求,图形渲染流畅,验证了该方案的可行性和有效性。

关键词:INtime; 实时; 测控系统; 六自由度平台

中图分类号: TP368.4 **文献标志码:** A

Real-time inspection and control system for six DOF platform based on INtime

HUANG Mang-mang^{1,2}, ZHOU Xiao-jun^{1,2}, WEI Yan-ding^{1,2}

(1. Institute of Modern Manufacturing Engineering, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang 310027, China;

2. Zhejiang Province Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang 310027, China)

Abstract: As for six Degree Of Freedom (DOF) platform, its inspection and control system should not only meet the requirement for real-time control, but also has powerful graphic interface. Because of the disadvantages of the existing system, this paper designed a real-time inspection and control system which can meet both requirements in an industrial computer based on INtime. In this system, the method of direct operating on data acquisition and control cards was adopted by INtime process, to obtain real-time performance; in the meantime, nonreal-time tasks were handled by Windows process. The test results of real running demonstrate that the system has high real-time performance, and the animation of platform in user interface is rendered fluently, and verifies the feasibility and effectiveness of the system.

Key words: INtime; real-time; inspection and control system; six Degree Of Freedom (DOF) platform

0 引言

六自由度并联运动平台由于具有结构稳定、承载能力大等特点,越来越广泛地应用于飞机、车辆等运动模拟试验设备上^[1]。六自由度平台的测控系统主要包括两部分功能:一部分是控制功能,即对6个液压缸的实时闭环反馈控制;另一部分是监测功能,即以图形界面的方式显示平台的运动状态^[2]。这两部分功能中,前者由于直接关系到平台运动性能的优劣,对实时性要求较高,后者主要是显示运动状态供控制台人员监测,对实时性要求不高,但需要有容易编程的图形交互界面。

现有的六自由度平台实时测控系统采用 Windows 系统和专用实时操作系统。Windows 操作系统具有良好的用户界面,强大的图形显示功能,编程方便,但 Windows 在实时性方面的表现不佳。专用的实时操作系统虽然能够满足实时性的要求,但是大部分的通用功能不够强大,图形和界面功能较弱。现有的测控系统采用上下位机的方式实现,上位机运行非实时操作系统,下位机运行实时系统,这样不仅增加了成本和开发难度,还增加了上下位机通信造成的延时。采用实时扩展(Real Time eXtension, RTX)对 Windows 进行实时功能扩展在工业上已有一定的应用^[3-4]。本文基于另一种实时扩展系统 INtime 设计了一种六自由度运动平台实时测控系统,能

够在一台计算机上实现测控系统的要求。

INtime 是与 Windows 操作系统共享硬件平台的一个实时扩展操作系统,它将工业级实时控制与丰富的 Windows 功能相结合,从而使应用程序能够充分利用所有 Windows 特性以及现有的应用程序,并且增强实时性能^[5]。当 INtime 应用程序运行时,所有 Windows 下的进程都被打包成一个 INtime 线程,这个线程在 INtime 中具有最低的优先级,保证了 INtime 线程的实时性。通过使用 INtime 可以获得非常准确且稳定的微秒级响应时间,定时时间间隔最低可以到 100 ms,其定时精度高,可以满足机械控制系统的要求。

1 系统结构

针对六自由度平台测控系统的要求,本文基于 INtime 设计实时测控系统,其体系结构如图1所示,该测控系统在一台计算机上同时运行两个进程:Windows 进程和 INtime 进程。其中 Windows 进程为非实时进程,负责将6个液压缸的位移数据通过正解算法解算得到平台的位姿,并将整个平台的运动状态通过三维动画、数值和曲线3种方式实时显示在监控界面上。INtime 进程为实时进程,需要实时采集6个液压缸上位移传感器的信号,与目标控制量比较,按照设计的控制算法输出控制信号,该控制信号经放大后到伺服阀,驱动阀芯位移进而控制液压缸运动的方向和位移,实现闭环反馈控制。

收稿日期:2011-04-06;修回日期:2011-07-01。

作者简介:黄茫茫(1987-),男,浙江温州人,硕士研究生,主要研究方向:车辆运动模拟器、测控系统;周晓军(1958-),男,浙江绍兴人,教授,博士生导师,主要研究方向:车辆工程、车辆测试、制造自动化;魏燕定(1970-),男,浙江金华人,教授,博士生导师,主要研究方向:车辆运动模拟器、光机电一体化。

实时进程必须在规定的时间内完成数据采集、处理和解算,严格按照一定的定时间隔输出控制信号;否则会影响控制效果。测控系统利用 INtime 的高实时性能,通过在 INtime 进程中对数据采集和控制板卡的直接操作实现实时性控制,同时 Windows 进程并行运行非实时任务,它们之间通过共享内存的方式进行数据交互。该系统既能保证控制的实时性又保留了 Windows 的通用功能,使系统有很强的扩展功能。

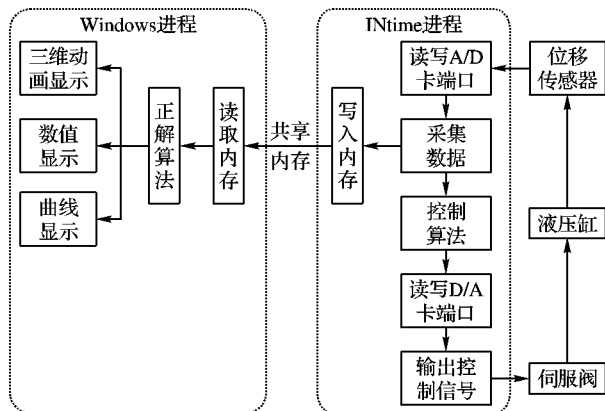


图1 测控系统体系结构

系统的硬件平台为 IACP-4000 工业级控制计算机,由于需要对 6 个液压缸进行控制,因此系统至少需要 6 路 A/D 转换输入、6 路 D/A 输出信号,系统中采用一块研华 PCL-818HG 多功能板卡,最大可支持 16 通道单端 A/D 转换,最大采样率为 100 kS/s,满足 6 路模拟量输入的要求,另外 PCL-818HG 还具有 16 路 DI、16 路 DO 和定时器等功能,可以为系统扩展其他功能。D/A 模拟量输出卡采用研华 PCL-726,可以同时输出 6 通道 12 位精度的模拟量信号。

2 软件设计

2.1 INtime 进程

2.1.1 对工业板卡的操作

工业板卡一般只有基于 Windows 或 Linux 的驱动,因此在 INtime 下使用工业板卡需要从底层编写驱动程序,本系统采用的工业板卡均为 ISA 总线,ISA 总线将板卡上的寄存器映射到计算机的 I/O 端口上,INtime 支持对 I/O 端口的直接操作,在 INtime 中编写程序对 I/O 端口的物理地址进行直接操作,可以完成板卡的初始化设置、A/D 转换数据的读取以及 D/A 模拟量的输出。这些操作是在 INtime 中对硬件的直接访问,不会受到 Windows 系统的干扰,由于 INtime 的高实时性能和高优先级,可以保证数据采集和控制信号输出的实时性。

2.1.2 进程间数据交互

INtime 进程需要将采集到的液压缸位移信号发送给 Windows 进程,INtime 进程与 Windows 进程之间的通信可以采用邮箱、共享内存、信号量等方式^[6],本系统中由于进程间的实时性不同,读写数据并不同步,因此实时任务和非实时任务之间的数据交互通过邮箱和共享内存实现。在系统初始化时,INtime 进程创建内存区块,将内存区块映射到物理内存,Windows 进程准备完毕后,通过邮箱通知 INtime 进程,INtime 进程收到通知后,将共享内存区块的句柄再通过邮箱返回给 Windows 进程。在系统运行时,INtime 线程将 A/D 转换的数据每隔一定时间写入共享内存,而 Windows 进程则在需要时通过句柄从共享内存块中读取数据,进行解算。

2.1.3 控制算法

为保证对 6 个液压缸的准确控制,在保证控制信号实时

输出的同时,本测控系统对 6 个液压缸的控制采用专家 PID 控制算法。PID 控制算法是应用最广泛、最基本的控制算法,离散化的 PID 控制律为:

$$u(kT) = k_p \left\{ e(kT) + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^k e(jT) + \frac{T_d}{T} [e(kT) - e(kT - T)] \right\}$$

其中: T 为采样周期; k_p 为比例系数; k_p/T_i 为积分系数; $k_p T_d$ 为微分系数; $e(kT)$ 和 $e(kT - T)$ 分别为第 kT 和第 $(kT - T)$ 时刻的偏差,当 T 足够小时,就保证了模型离散化的精度。

在基本 PID 控制算法的基础上,根据偏差及其变化,基于受控对象和控制规律,自动整定控制器的参数,设计专家 PID 控制模型^[7]。

2.2 Windows 进程

测控系统中,平台的运动状态需要实时显示,要准确得到平台的位姿,可以安装高精度的传感器,但限于成本,目前常采用容易测量的液压缸的伸缩量来计算平台的位姿,即六自由度平台位姿正解法,正解算法相对于反解算法(即已知平台位姿计算液压缸伸缩量)计算量大、迭代复杂,但由于其实时性要求不高,因此将正解算法由 Windows 进程进行解算。本文采用的正解算法是 Newton-Raphson 迭代法^[8]。其迭代步骤为:

$$\vec{a}_{n+1} = \vec{a}_n - \left[\frac{\partial \vec{f}(\vec{a}_n)}{\partial \vec{a}_n} \right]^{-1} \cdot \vec{f}(\vec{a}_n)$$

$$\vec{a}_n = [X, Y, Z, \psi_x, \psi_y, \psi_z]^T$$

其中: \vec{a}_n 为平台位姿, $\vec{f}(\vec{a}_n)$ 为选取的迭代式。

建立欧拉坐标系如图 2 所示, XZY 为下平台体坐标系(静坐标系), $x_1y_1z_1$ 为上平台体坐标系, 设上铰点在 $x_1y_1z_1$ 坐标系中的坐标为 \vec{A}_i , 下铰点在 XYZ 坐标系中的坐标为 \vec{B}_i , \vec{C}_i 为上平台质心在 XYZ 坐标系中的坐标, \vec{l}_i 为上下平台两铰点之间的长度向量, 以上 $i = 1 \sim 6$ 。

根据几何关系, 有 $\vec{l}_i = \vec{C} + \vec{T}'\vec{A}_i - \vec{B}_i$, 其中 \vec{T}' 为转移矩阵, 则选取的迭代式 $\vec{f}(\vec{a}_n)$ 可表示为:

$$\vec{f}(\vec{a}_n) = [\vec{f}_1(\vec{a}_n), \vec{f}_2(\vec{a}_n), \vec{f}_3(\vec{a}_n), \vec{f}_4(\vec{a}_n), \vec{f}_5(\vec{a}_n), \vec{f}_6(\vec{a}_n)]^T$$

其中 $\vec{f}_i(\vec{a}_n) = \vec{l}_i^T \vec{l}_i - |\vec{l}_i|^2$ 。

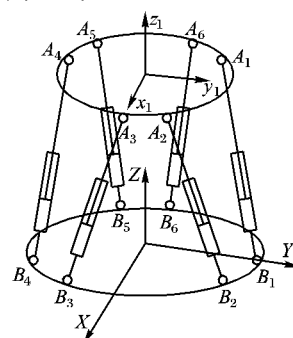


图2 六自由度平台坐标系

在 VC++ 中编写正解算法程序, 不断循环迭代, 当满足精度要求时, 停止迭代, 将所得的迭代逼近解作为平台位姿可行解。监测界面中三维动画仿真采用 OpenGL 实现, 根据平台位姿可行解作为参数建立六自由度平台模型, 并通过不断刷新显示, 产生动画的效果, OpenGL 具有很强的渲染能力, 利用 OpenGL 建立的六自由度平台三维仿真动画具有良好的视觉效果。

3 实际运行测试

本测控系统采用图形交互界面, 运行时监测界面如图 3

所示,在此界面中,六自由度平台的运行状态分别通过数值、曲线和动画3种形式显示。监测界面中三维仿真动画的输出帧率一直保持在31 fps左右,没有卡顿现象,渲染效果较好,可以满足观察的要求。

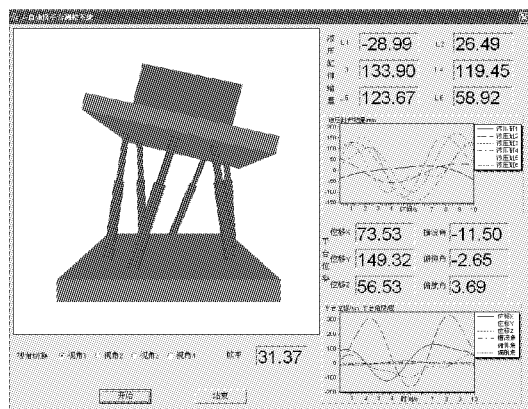


图3 测控系统监测界面

监测界面中显示6个液压缸的位移曲线如图4所示,经正解算法得到的平台位姿曲线如图5所示。

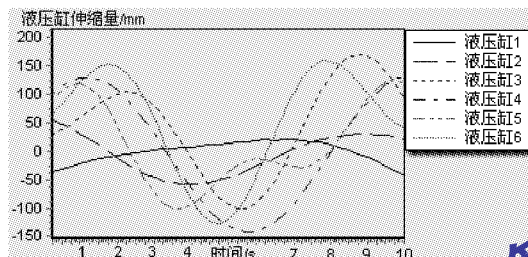


图4 6个液压缸位移曲线

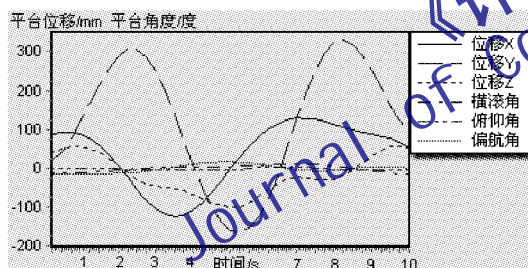


图5 平台位姿曲线

在实际运行测控系统过程中,利用外部高精度DSP处理器采样2000个输出控制信号,测量信号的定时间隔,测试结果如表1所示,可以看到,在INtime中,控制信号的输出时间间隔能保持在非常稳定的值,定时精度高,实时性好,且误差值均在允许的范围内,可以满足液压控制系统的要求。

基于INtime开发的测控系统中,INtime系统拥有对

Windows系统的管理权,这就减少了由于Windows的不可靠性引起的系统事故。在测控系统实际运行时,即使Windows系统出现死机甚至蓝屏,INtime进程仍能正常运行,使六自由度平台平稳复位至安全位置,这对保证人员和设备安全至关重要。

表1 输出信号定时精度测试结果

设定定时 间隔	实际输出				μs
	平均值	最大值	最小值	标准差	
2000	2000.463	2009.533	1991.360	0.9533	
1000	1000.382	1008.193	992.027	0.6991	
500	500.141	507.487	492.793	0.5370	
250	250.071	254.453	245.460	0.3530	
200	200.056	207.493	192.687	0.4200	
125	125.033	131.373	118.867	0.4000	
100	100.034	104.813	95.220	0.3250	

4 结语

本文基于INtime开发了一种六自由度平台测控系统,在一台计算机上同时完成实时任务和非实时任务,实时任务对六自由度平台的6个液压缸进行实时闭环控制,通过共享内存的方式与非实时进程交互数据,非实时进程显示平台的运动状态。本方案消除了上下位机通信造成的延时,节省了硬件成本。经实际运行测试,该系统定时精度高,可以满足实时控制的要求,图形交互功能较强,其通用性平台可以对该系统进行进一步的功能扩展,具有很好的实际应用价值。

参考文献:

- [1] WU DONGSU, GU HONGBIN. Adaptive sliding control of six-DOF flight simulator motion platform [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2007, 20(5): 425-433.
- [2] 王宣银, 刘荣, 贾光政, 等. 车辆运动模拟6自由度平台的协同控制研究[J]. 机械工程学报, 2008, 40(4): 160-163.
- [3] 宫厚良, 陈曾汉. 基于RTX和LabVIEW的多任务实时测控系统[J]. 计算机应用, 2007, 27(6): 1151-1152.
- [4] 周密, 李彦. 基于Windows/RTX烟支实时测控系统研究[J]. 计算机集成制造系统, 2008, 14(12): 2393-2400.
- [5] INtime for Windows [M]. Beaverton, USA: TenAsys Corporation, 2011.
- [6] INtime 3.1 user's guide [M]. Beaverton, USA: TenAsys Corporation, 2008.
- [7] 刘金琨. 先进PID控制Matlab仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 94-102.
- [8] 张兰芳. 基于Visual C++开发的并联六自由度平台测控系统[D]. 杭州: 浙江大学, 2002.
- [9] 周冠华, 唐军武, 田国良, 等. 内陆水质遥感不确定性: 问题综述[J]. 地球科学进展, 2009, 24(2): 150-157.
- [10] 徐迪威, 蔡建新. 物联网及其应用剖析[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(15): 229-231.
- [11] 刘忠宝. 物联网技术应用与研究[J]. 信息与电脑, 2010(10): 43-46.
- [12] 徐健, 李小珉. 基于AT86RF212的无线传感器网络节点设计[J]. 传感器与微系统, 2010, 29(4): 117-119.
- [13] 黄仁, 郇辉, 任军华. 非时隙CSMA/CA性能分析与研究[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(7): 108-118.
- [14] 徐明霞, 赵民建, 陈杰, 等. 应用于无线传感器网络的自适应TDMA协议[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2008, 42(11): 1915-1919.
- [15] 李楠, 刘成良, 李彦明. 无线传感器网络节点长寿命太阳能供电系统研究[J]. 高技术通讯, 2010, 20(11): 1201-1205.
- [16] 吕恒, 江南, 李新国. 内陆湖泊的水质遥感监测研究[J]. 地球科学进展, 2005, 20(2): 185-192.
- [17] HERMAN J, MARTIN T, STEVEN W. MERIS satellite chlorophyll mapping of oligotrophic and eutrophic waters in the laurentian great lakes [J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(11): 4098-4105.
- [18] 段洪涛, 张寿选, 张渊智. 太湖蓝藻水华遥感监测方法[J]. 湖泊科学, 2008, 20(2): 145-152.

(上接第2843页)