

MEMS 在运动轨迹显示中的应用

冯玉光 单 珊 奚文骏
(海军航空工程学院 烟台 264001)

摘要: 为便于通过运动轨迹分析研究物体运动特征,设计了一个运动轨迹测量显示装置,利用微机电系统(micro-electronic mechanical system, MEMS)技术与可视化设计,以 Freescale Semiconductor 公司生产的三轴低重力加速度传感器 MMA8450Q 和计算机为核心搭建硬件平台,以 NI(National Instruments)公司开发的 LabWindows/CVI 8.5 为平台编写具有可视化虚拟操作界面的控制程序,并通过性能验证实验,完成了基于 MEMS 技术的运动轨迹测量显示装置的设计、实现、调试与实验过程。

关键词: 运动轨迹;测量显示装置;MEMS;串口通信

中图分类号: TP212.9 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4099

Application of MEMS in motion trajectory display

Feng Yuguang Shan Shan Xi Wenjun
(Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: In order to make it convenient to study motion features by motion trajectory analysis, this paper designed a motion trajectory measurement and display device, where MEMS (Micro Electronic Mechanical System) technology and visualization technology were put into use. MMA8450Q, a 3-axis, low-g acceleration sensor of Freescale Semiconductor Corporation, and a computer played the core role of hardware development platform, while LabWindows/CVI 8.5, developed by National Instruments (NI) Corporation, was used in visual programming. After series of performance validation experiments, the procedure of designing, complement, debugging and experiments of the motion trajectory measurement and display device based on MEMS was accomplished.

Keywords: motion trajectory; measurement and display device; MEMS; serial communication

1 引言

微机电系统(micro electronic mechanical system, MEMS)^[1],是目前非常流行的一种多学科交叉的综合集成系统,以其低成本、微型化、集成化程度高、可批量生产等特点被广泛应用^[2-3],其最重要的部分是 MEMS 传感器。目前,在惯性测量方面广泛应用 MEMS 技术进行加速度、速度以及位移的测量控制^[4-5]。

在生产生活及国防军事各领域中,常要用到运动轨迹分析进行智能控制或安全控制,如机器人控制^[6]、船舶走锚后的安全性控制、飞行器或舰船航向姿态^[7]分析、武器系统的精确制导系统、目标轨迹跟踪^[8]、弹药运输的安全性控制等方面。而加速度数据是运动的特征参数,它能全

面反映物体运动状态的变化情况,因此对物体的运动轨迹进行分析通常是通过对加速度数据进行采集、处理和分析进行的。本文即是从加速度数据入手,利用 MEMS 技术和可视化设计,设计了一个运动轨迹测量显示装置,来实时记录、复现运动轨迹。

2 运动轨迹测量显示装置系统设计

2.1 运动轨迹测量显示装置功能结构

运动轨迹测量显示装置必须完成这些功能:采集加速度数据,对其进行分析处理后得到位置坐标数据,绘制实时运动轨迹,显示所绘制的轨迹。基于此,设计的运动轨迹测量显示装置的基本结构主要由采集模块、处理模块和显示模块 3 部分构成,其功能结构图如图 1 所示。

收稿日期:2015-03

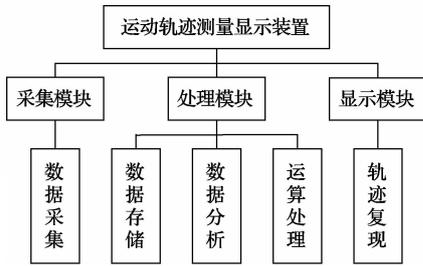


图1 运动轨迹测量显示装置功能结构

在功能上这3部分是紧密联系、有机结合的,它们之间的功能流程如图2所示。

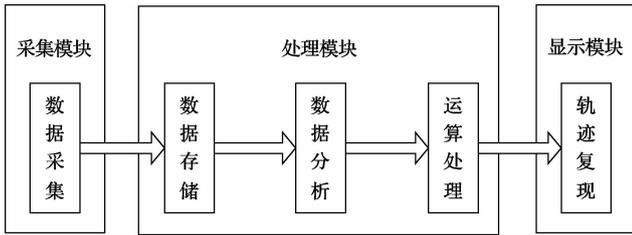


图2 运动轨迹测量显示装置功能流程

2.2 系统总体结构

根据对运动轨迹测量显示装置的功能结构与流程进行分析,可知该装置应由硬件和软件两部分组成,硬件部分的核心是加速度传感器,通过一套具有虚拟操作界面的控制程序控制其工作,并与计算机进行数据传输与处理,运动轨迹测量显示装置组成如图3所示。

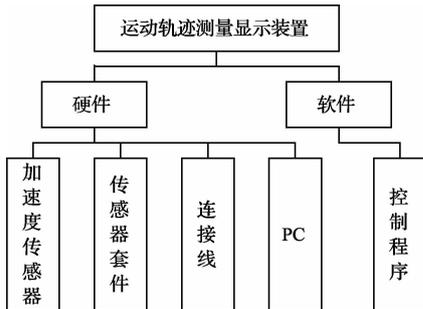


图3 运动轨迹测量显示装置组成

3 硬件设计

由运动轨迹分析可知,复现运动轨迹的关键在于获得准确的加速度数据,因此需选用一个加速度传感器作为数据采集工具,它必须能够提供较为准确的三轴加速度数据,技术成熟度要高,与处理器间的通信协议较为开放常见,通信过程简便易实现。根据 Freescale Semiconductor 公司给出的对其生产的3种加速度传感器 MMA8450Q、MMA7455L 和 MMA7660FC 的性能对比,最终选择了数字能力、重力加速度单元/传感单元和嵌入式功能/特性3个方面都略胜一筹的低重力加速度、低功耗的三轴加速度传感器 MMA8450Q 作为本文设计的数据采集工具。

对采集到的数据进行存储、分析、运算,并最终显示复

现的轨迹就需要用到处理器和显示器,因此还需要1台个人计算机(personal computer,PC),对本文设计来说,一般配置的PC都可以满足设计要求。

为保证加速度传感器与PC之间的正常通信,还需要与之配套的开发板和通信板。

最终本文设计的运动轨迹测量显示装置的硬件平台组成框图如图4所示,其中LFSTBEB8450为MMA8450Q的开发板,LFSTBUSB为通信板。

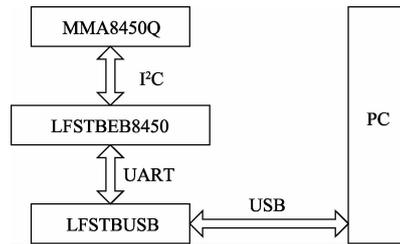


图4 硬件平台组成

4 软件设计

设计的运动轨迹测量显示装置所需的软件开发平台必

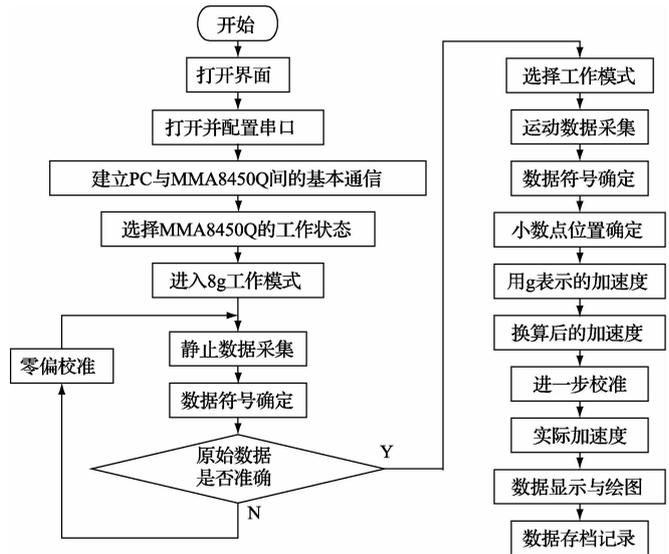
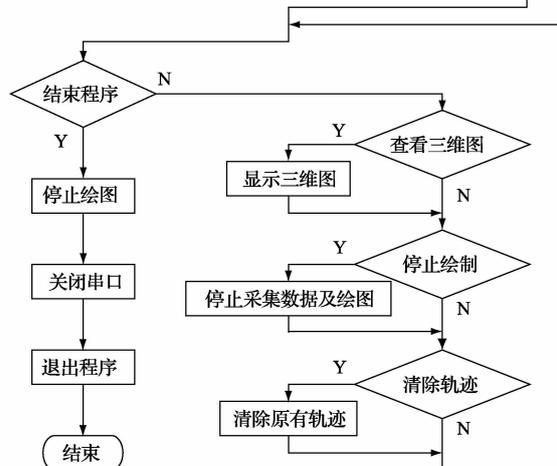


图5 控制程序流程



须具有以下性能要求:具备串口通信功能,具有图形用户界面或图形用户接口(graphical user interface, GUI)开发能力,具备生成实时曲线的功能。经查阅资料与综合考虑实验室的现有条件,最终选择了美国 NI(National Instrument)公司开发的 LabWindows/CVI 8.5^[9]作为本次设计的软件开发平台,开发的控制程序的流程如图5所示。

4.1 上位机与 MMA8450Q 间的通信

MMA8450Q 与上位机间的硬件通信虽然是依靠 USB 连接线完成的,而整个硬件开发套件实质上是串口通信,在 LFSTBUSB 板上有完成 USB 到通用异步接收/发送装置(universal asynchronous receiver/transmitter, UART)接口转换的芯片 FT232BL,因此上位机在控制 MMA8450Q 时,应采用串口通信。LabWindows/CVI 8.5 具有专门面向 RS232 接口的函数库,能够实现对该接口完全的控制^[10],因此选择串行通信库函数实现 PC 与 MCU 之间的命令通信。

根据 MMA8450Q 的技术文件所提供的命令格式,PC 与 MCU 间互相发送的所有命令都应空格字符(0X20)开始,以\r字符结束(0X0D),第2个字符一般为控制字符。在命令的实际传输过程中,所有命令都以二进制形式发送。这样的格式为验证命令是否正确发送并被正确处理提供了方便,在编写通信程序时就选择了按结束字符读函数(ComRdTerm();),并根据各命令格式的相似性编写了命令格式子函数,不仅大大简化了通信过程,也保证了通信的正确进行。

由于 PC 向 MCU 发送命令所用的函数是按字符串形式发送命令,而很多十六进制数对应的字符无法正常写出或显示,因此先选用格式转换函数对其进行转换,然后将其用于命令发送。最终控制程序完成了打开并配置串口、部分重置系统命令、发送 GetID 命令、建立器件的 I²C 通信、工作模式(MMA8450Q 采集量程)选择、数据输出速率选择、FIFO 配置、工作中对串口的读写操作以及关闭串口等通信任务。

4.2 算法与数据处理

由于加速度数据在运动过程中是不断产生的,因此在配置 MMA8450Q 自动采集后,采用时钟控件控制数据采集与处理过程。

根据 MMA8450Q 的使用说明书可知,一个加速度数据是以一个 12 位二进制数的形式读回的,其中高 4 位与低 8 位分两个寄存器存储。因此要获得可用于计算的加速度数据,首先要对读回的寄存器中的数据初步处理,将高有效位寄存器存储的数据左移 4 位然后与低有效位寄存器存储的数据相加。由于读回的命令是字符型的,因此还需将其强制转换成无符号整型才能用于计算。同时,由于高有效位寄存器中的数据的高 4 位可能是 F,读回后会被自动当做符号标志,因此需要将该数据与 0X0FF 做与运算。

由于合成的数据是 12 位无符号整型数,因此要确定数据的符号并通过计算将符号显示在最终结果中。对于

任一 X、Y、Z 数据,最高位 Bit 11 都代表符号位,0 为非负,1 为负。因此,在确定数据符号时,只需看该轴数据高有效位寄存器的数据是否大于 0X7F(01111111B),大于则为负值,不大于则为非负值,均为补码形式。经过符号判断与码制变换得到对应的有符号负数据原码。

在数据采集时,装置会受到很多因素的干扰而造成偏差,因此在采集数据前应该进行零偏校准,以减小环境及系统误差。根据 MMA8450Q 的技术文件给出的零偏校准方法可得到三轴加速度的校准数据,然而调试过程中发现一次零偏校准操作得到的校准数据具有较大的误差,因此需要多做几次以提高校准值得准确性。实验中发现,循环 4 次后,可使校准值较为稳定。

然而本文在调试中发现即使获得了较为稳定的校准值,MMA8450Q 还会受到自身分辨力和环境噪声等影响,导致其静止不动时的校准后加速度数值并不恰好为 0,而由于位移具有叠加性,微小的偏差将会产生积累,导致没有运动而有轨迹绘制的情况。为了解决这一问题,进行了反复的实验,最终确定了 3 种工作模式下静止时三轴加速度数据偏差的极限值,在程序中利用赋值方式进行进一步的零偏校准,固定零运动轨迹坐标。同时,由于 MMA8450Q 正面向上摆放时,Z 轴加速度数据会受重力加速度的影响,这一数据在时间上的积累也会导致轨迹图中有位移的产生,而实际上 MMA8450Q 可能并没有运动。因此在 Z 轴加速度数据必须先进行重力加速度的剔除才能用于计算。

经过以上处理得到的三轴加速度数据经过下列计算可得三轴的位置坐标数据。

$$v_i = v_{i-1} + a_i \cdot \Delta t \quad (1)$$

$$x_i(\Delta t) = v_{i-1} \cdot \Delta t + \frac{1}{2} a_i \cdot (\Delta t)^2 \quad (2)$$

$$x(t) = \sum_{i=1}^n x_i(\Delta t) \quad (3)$$

$$x_i(t) = x_0 + x(t) \quad (4)$$

式中: t 为运动时间; $x(t)$ 为 t 时刻的位移大小; n 为分解运动的次数; i 为分解后的微小运动标号, $i = 1, 2, 3, \dots, n$; Δt 为分解运动的运动时间; $x_i(\Delta t)$ 为第 i 次分解运动的位移大小; $x_i(t)$ 为 t 时刻末的位置坐标; x_0 为初始时刻的位置坐标; v_{i-1} 为第 $i-1$ 次分解运动的末速度大小,也是第 i 次分解运动的初速度大小; a_i 为第 i 次分解运动的加速度大小。

4.3 运动轨迹的绘制与复现

通过主界面与子界面中的 3 个 Graph 控件分别完成 3 个投影面内轨迹的绘制和合运动轨迹的复现。由于 Graph 控件是一个二维曲线图控件,而复现合运动轨迹时需要绘制三维轨迹图。因此开发了坐标变换模型。在对 XY 平面内的点、Z 轴上的点、XZ 平面内的点、YZ 平面内的点以及三维空间中任一点 5 种情况进行讨论之后最终得出三维空间向二维空间的坐标变换模型为:

$$x_2 = x_1 - z_1 \cos \frac{\pi}{4} \quad (5)$$

$$y_2 = y_1 - z_1 \sin \frac{\pi}{4} \quad (6)$$

式中: x_1 为三维空间中某点的 X 轴坐标; y_1 为三维空间中某点的 Y 轴坐标; z_1 为三维空间中某点的 Z 轴坐标; x_2 为该点变换到二维平面内的 X 轴坐标; y_2 为该点变换到二维平面内的 Y 轴坐标。

4.4 数据存档记录及其他辅助功能设计

对加速度数据的记录工作对持久分析运动特征来说至关重要。设计的控制程序可创建一个名为 DataLog.txt 的文件, 在运行程序时及时写入经变换后的三轴实时加速度数据, 进行数据的存档记录。

此外, 为完善装置功能, 还加入了停止绘制轨迹、清除画板、关闭串口、退出程序等辅助功能设计。

5 运动轨迹测量显示装置性能验证

5.1 人机交互性验证

设计的运动轨迹测量显示装置可以通过人员对虚拟界面的操作控制上位机与加速度传感器之间进行数据传输与处理, 因此在对人机交互性进行验证时首先是对操作动作与响应命令的正确性进行验证。在每次发送命令后读回 MCU 的响应命令, 并将其与 MMA8450Q 的读写命令格式与规范进行对照, 得到的实验结果如表 1 所示。

表 1 操作动作与响应命令正确性验证实验结果

发送命令 (十六进制)	响应命令 (十进制)	响应命令 (十六进制)	结论
单击 OPENCOM 按钮			
部分重置系统 20 76 01 16 AD 0D	32 86 13	20 56 0D	响应命令 正确
GetID 命令 20 69 0D	32 73 48 1 64 3 64 2- 1-1 13	20 49 30 01 40 03 40 02 FF FF 0D	响应命令 正确
建立 I ² C 通信 20 76 01 14 3A 0D	32 86 13	20 56 0D	响应命令 正确
单击状态按钮进入 Standby 模式			
设置待机模式 20 6D 01 38 00 0D	32 77 13	20 4D 0D	响应命令 正确
单击进入 2g 工作模式			
配置为正常模式 20 6D 01 39 40 0D	32 77 13	20 4D 0D	响应命令 正确
设置 2g 工作 模式, 输出数 据速率为 400Hz 20 6D 01 38 01 0D	32 77 13	20 4D 0D	响应命令 正确

发送命令 (十六进制)	响应命令 (十进制)	响应命令 (十六进制)	结论
单击 Acquire 按钮			
配置纵/横向 状态寄存器 20 76 01 18 00 0D	32 86 13	20 56 0D	响应命令 正确
配置 FIFO 20 76 04 10 06 05 04 00 0D	32 86 13	20 56 0D	响应命令 正确

由表 1 给出的实验结果可知, 当操作者进行相应操作时, 上位机向 MMA8450Q 发送相应的命令, 得到了 MMA8450Q 的正确响应, 表示发送命令成功并被正确执行。

另一方面, 由于串口操作速度通常较慢, 但一个有良好人机交互性的设计应该让操作者感觉舒适迅捷。因此验证人机交互性时还要对通信速度与操作流畅性进行验证, 采用调用函数取系统时钟的方法, 得到每条读写操作所需的命令执行时间如表 2 所示。

表 2 上位机与 MMA8450Q 间每条命令通信
时长与操作动作时长

操作动作	包含的 通信命令	写操作 时长/ms	读操作 时长/ms	动作 时长/ms
单击 OPENCOM 按钮	部分重置 系统命令	0.049	1.948	35.478
	GetID 命令	0.017	18.036	
	建立装置 I ² C 通信	0.021	15.407	
单击进入 Standby 模式	设置待机 模式	0.026	15.401	15.427
单击进入 2g 工作模式	配置为 正常模式	0.023	15.415	30.968
	设置 2g 工作模式, 输出数据 速率为 400 Hz	0.019	15.511	
单击 Acquire 按钮	配置纵/横向 状态寄存器	0.025	2.010	15.465
	配置 FIFO	0.014	13.416	

由表 2 可知, 即使是耗时最长的操作动作, 完成时间也小于 36 ms, 这对操作者来说是非常快的, 可以使操作者在进行面板操作时几乎感觉不到动作的延时, 因此该装置的操作流畅性还是不错的。

5.2 数据采集与轨迹复现准确性验证

令 MMA8450Q 在 XY 平面内的固定两点 A、B 间做

10次时间与轨迹均不相同的任意运动,但两点间的直线距离经测量均为 $l=5.20\text{ m}$ 。

每次实验后利用 DataLog.txt 文件中记录的数据,根据式(1)~(3)建立的算法计算出 X、Y 轴的位移大小 x_i 、 y_i ,然后根据式(7)计算出两点间的直线运动距离 l_i ,再根据式(8)计算出 10 次实验得到的直线距离平均值,然后根据式(9)求得该算术平均值与 AB 间距离的相对误差。

$$l_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \quad (7)$$

$$\bar{l} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} l_i \quad (8)$$

$$r = \frac{\bar{l} - l}{l} \times 100\% \quad (9)$$

式中: i 为实验序号, $i=1,2,\dots,10$; x_i 为第 i 次实验求得的沿 X 轴的位移大小; y_i 为第 i 次实验求得的沿 Y 轴的位移大小; l_i 为第 i 次实验求得的两点间的距离大小; \bar{l} 为 10 次实验求得的两点间的距离大小的算术平均值; r 为测得的两点距离平均值与实际距离的相对误差。

实验最终求得相对误差 $r=0.4\%$,相对误差较小,可见数据具有可信性,说明该装置能够较为准确地完成运动数据的复现。

6 结论

在需求分析与功能分析的基础上从加速度数据入手,利用 MEMS 技术和可视化设计,设计并实现了一个运动轨迹测量显示装置。该装置由加速度传感器及其开发套件、计算机、连接线及可视化控制程序组成,能够对传感器直接采集到的原始数据进行分析和解构,形成人工可辨识的加速度数据与位置坐标数据,并对数据进行实时存储与记录。同时本次设计在轨迹分析的基础上,开发了坐标变换模型,完成了分运动运动轨迹与合运动运动轨迹 2 种轨迹的绘制,对运动轨迹作出较完整的复现,实现了三维运动轨迹的实时绘制功能。同时,由于 MEMS 技术的低成本、微型化等特点,使得该系统的应用更具广阔的前景,可以此为基础做出更具实用性的产品。

参考文献

- [1] 李旭辉. MEMS 发展应用现状[J]. 传感器与微系统, 2006(5):7-9.
- [2] 尤文坚. 现代传感器输出特性拟合技术研究进展[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(3):25-27.
- [3] 姚成凯. 基于嵌入式的 MEMS 加速度传感器测控仿真系统[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2009.
- [4] 汪少初, 刘昱, 郝文飞, 等. 基于惯性传感的人员行进动作识别方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(6):630-636.
- [5] 宋颖, 鲍其莲. 导航系统 MEMS 加速度计的设计[J]. 自动化技术与应用, 2006(5):56-58.
- [6] 夏凌楠, 张波, 王营冠, 等. 基于惯性传感器和视觉里程计的机器人定位[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(1):166-172.
- [7] 宋丽君. 基于 MEMS 器件的航向姿态测量系统的研究[D]. 西安:西北工业大学, 2007.
- [8] 胡三庆. 基于 MEMS 加速度传感器的空间运动轨迹追踪系统设计与实现[D]. 武汉:华中科技大学, 2009.
- [9] 孙晓云, 郭立炜, 孙会琴. 基于 LabWindows/CVI 的虚拟仪器设计与应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2005:5.
- [10] 赵弘, 苏鑫, 黄涵宇. 基于虚拟仪器的清管器内检地图标记测试系统[J]. 电子测量技术, 2015, 38(1):69-73.

作者简介

冯玉光, 1965 年出生, 教授, 硕士生导师。主要研究方向为自动测试系统集成与装备综合保障等。

单珊, 1990 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为武器系统测试与健康健康管理。

E-mail: ssfewy@sina.com