

支持笔交互的手写设备设计与实现*

罗健飞^{1,2}, 吴宝元², 申飞³, 吴仲城³

(1 中国科学技术大学自动化系 合肥 230026; 2 中国科学院合肥智能机械研究所 合肥 230031;
3 中国科学院强磁场科学中心 合肥 230031)

摘要: 针对目前常用手写设备存在的信息获取不全面问题,提出了一种支持笔交互的手写输入设备;该设备不仅可以获得笔交互过程静态轨迹的信息,而且还可以全面获取手写动态信息,特别是手写多维力信息;整个系统由传感器模块、数据测量模块、主控系统模块和显示模块组成;分析了各个模块的工作和设计原理,并给出具体的实现结构框图;讨论了系统的优化设计,以提高系统的性能;实验部分通过设计一个简单的笔迹显示程序验证了笔交互设备的性能,结果表明,设计的笔交互设备能够实现对手写交互过程手写全力信息的获取,并提供了一种自然的交互效果。

关键词: 笔式交互; 手写输入; 手写力信息; 笔迹显示

中图分类号: TP216.2 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.804

Design and implementation of the handwriting device supporting pen-interaction

Luo Jianfei^{1,2}, Wu Baoyuan², Shen Fei³, Wu Zhongcheng³

(1 Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

2 Institute of Intelligent Machines, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

3 High Magnetic Field Laboratory, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Aiming at the insufficiency of present pen-interaction devices on handwriting information acquisition, a novel handwriting device is designed and implemented. The device is capable of capturing both the static trajectory of the writing pen and the dynamic handwriting information, particularly the multi-axis handwriting force information. The system consists of sensor module, data measurement module, main control system module and display module. The operation and design principles of the four modules are analyzed, and the concrete implementation block diagram is given. The system optimization design is discussed, which can improve the system performance. A simple handwriting display program was designed and it can be used to verify the performances of the handwriting device. The results show that the designed handwriting device has the capability of acquiring all the handwriting force information during pen interaction process and provides a nature interaction effect and experience.

Key words: pen interaction; handwriting device; handwriting force information; pen trajectory display

1 引言

笔式交互,作为一种自然的人机交互方式,随着普适

计算的发展,日益成为人们关注和研究的热点。人们希望人与计算机的交互能够像现实生活中人与纸笔交互一样自然,从而帮助人们高效地完成各种活动。通过对手写物理过程进行建模分析得到,笔交互过程是一个包含

信息丰富的交互过程,这些信息包括静态的手写信息,如轨迹、角度等,和动态的手写信息,如手写字力、速度等,而动态的手写信息是笔交互过程中不可见和隐藏的信息,但正是这些被隐藏的交互信息,使得人们在笔交互过程中感觉自然和随意,其中尤以动态的手写字力信息为重点,因为它更能体现书写者由于自身书写习惯和生理特征而形成的唯一性和差异性^[1],例如毛笔在宣纸上书写时由于握笔的力道和方向的不同,而形成不同的书写风格^[2]。因此,要使得人与机器之间的交互能够得到与纸笔互动的感觉,必须要对物理纸笔交互过程中产生的信息,特别是动态力信息加以全面获取^[3-7],以真正实现人机交互的自然性。

目前世界上商业的各种数字笔输入设备或平台非常多,如日本的 Wacom 公司、美国的 Interlink 公司以及中国的汉王公司产品,此外,国内外的各研究机构也投入人力研究笔式交互,如美国的微软研究院、日本的东京大学、中国的中科院软件所等,这其中以日本的 Wacom 公司、美国的微软研究院和中国的中科院软件所为代表。Wacom 公司作为世界上最为先进的手写设备制造商利用其电磁感应专利技术不仅提供了 1 024 级压力感应,而且能获取笔式交互过程中笔的倾斜、旋转,以及位置信息等,美国的微软公司一直致力于研究笔式交互过程中墨水的表达效果,而中国的中科院软件所提出的笔式交互范式也推动了国内笔式交互的研究进展。通过对比文献[8-12],发现现有的笔交互设备绝大部分都存在对笔交互过程信息获取不完整的问题,表现在这些设备在获得笔迹等静态信息的同时,仅能获得单维动态力信息变化,如 Wacom 公司最新的 Cintiq 产品和 Intuos4 产品都提供了良好的交互体验,但是它仍然存在无法完整获取笔交互过程中隐含的全力信息,这种对力信息获取的不足,使得其在信息安全领域的应用,受到很大的阻碍;文献[12]通过采用 5 个单维力传感器组合来实现对手写三维力信息的获取,不仅使得设备的设计过于复杂,而且将手写过程和视觉反馈分开,大大降低了交互的自然性。因此,如何提高笔交互设备在交互过程中获取动态信息,尤其是动态力信息的能力,同时提高设备本身的性能,已成为众多笔交互研究中的重点。

2 设计方法

2.1 多维力信息获取

前面已分析,基于单维力信息获取设计,或者组合多个单维力传感器实现三维力信息获取设计,都存在动态力信息获取不全面或设备研制复杂而无法满足实际需求的问题。

例如,基于单维力信息获取方法,虽然可以实现较为

良好的交互效果,如模拟点击、移动等通用鼠标行为,但是这种单维力信息并不能真实体现传统书写所体现的内涵,更无法代表书写者真实的书写身份和个性书写风格。

此外,基于单维力或组合单维力设计的设备由于无法同时获取完整的笔交互信息,例如手写字力信息、手写字力矩信息等静态信息以及手写字形、笔锋等静态信息,使得其在身份认证和识别领域存在很大的误拒率(false refuse rate, FRR)和误识率(false accept rate, FAR),而采用多维力信息或融合多维力信息和字形信息的方法能显著提高在身份认证和识别领域中的误拒率和误识率,表 1 给出了本实验室人员在设计的笔交互设备上采用隐马尔科夫模型 HMM(hidden Markov model)方法对手写字力信息特征进行签名认证测试的结果^[13]。

表 1 基于动态力信息的认证结果

Table 1 Verification results based on dynamic force information

标号	特征值	FAR(%)
1	F_x	10.091 6
2	F_y	9.874 3
3	F_z	8.874 2
4	(F_x, F_y, F_z)	7.856 3

从表中可以得知,当使用同一认证算法(HMM)时,采用单维力信息来进行签名认证时,其对应误识率 FAR 要明显大于同时采用三维力信息进行签名认证的 FAR。

基于此,本文采用实验室拥有的多维力传感器专利技术设计一种专用于笔式交互过程的五维力传感器系统,该系统可同时直接获取交互过程中产生的全力信息,具体包括三维空间的手写字力信息和二维空间的手写字力矩信息,这些动态力信息真实体现了手写的物理过程,同时,本文给出了相应的外围系统设计,以实现基于多维力信息下的应用展示。

2.2 数据处理

数据处理是一个不可或缺的步骤,大部分的商业手写设备将数据处理放在外部设备上,典型如外部计算机,以实现实时的处理效率,或将数据的前端处理,如模数转换放在手写平台进行,再将转换后的数字化数据传输至计算机端,完成复杂算法。

如汉王的手写板,通过有线的方式将手写板和计算机进行连接,然后通过压磁感应笔在书写板上书写,产生的数据通过连接线缆传输至计算机端,完成计算,最终实现显示。这种方式降低了手写板自身计算能力,无法真正实现移动性和便携性。

本文设计的笔交互平台为了解决上述问题,引入了嵌入式控制系统以实现数据的在系统计算功能,以实时处理模拟转换后的多维力传感器输出数据。

由于研制的设备在外形上为封闭,具有金属外壳的独立装置,因此受到外界电磁场的干扰可以忽略。经过分析,对模拟转换后的多维力传感器输出数据产生影响主要为 2 个方面:一个是振动干扰;另一个是零点漂移。振动会引起多维力传感器输出非手写输入条件下的数据,主要表现为脉冲形式,而零点漂移则会引起多维力传感器输出的数值偏离设定的基准。基于这种情况,为了减小干扰对有用数据的影响,本文对模拟转换后的多维力传感器输出数据采用了融合窗口移动算法和数据平均值算法来实现对数据的滤波处理。

1) 数据滤波

由上所述,数据滤波融合了窗口移动算法和数据平均值算法来完成。原理简述如下:

假设 f_1, f_2, f_3, f_4 和 f_5 为按照时间顺序采样的离散数据值, DAT 为当前采用的数据值,则过程如下:

$$f_5 = f_4; f_4 = f_3; f_3 = f_2; f_2 = f_1; f_1 = DAT;$$

首先,对上述数据进行移动,为了保证数据的稳定性,要进行一次排序处理,剔除最大值和最小值,这是因为,一般来说,如果当发生脉冲形式干扰即采集的数据会出现奇异值,不是最大值,就是最小值,因此通过数据排序方法可以去掉该奇异值的影响。

$$C = \begin{pmatrix} 0.000\ 954\ 71 & 0.000\ 015\ 34 & 0.000\ 111\ 60 & 0.000\ 028\ 06 & -0.000\ 119\ 36 \\ 0.000\ 012\ 99 & -0.000\ 995\ 01 & -0.000\ 021\ 77 & 0.000\ 182\ 53 & -0.000\ 005\ 09 \\ 0.000\ 005\ 75 & 0.000\ 002\ 75 & 0.001\ 904\ 88 & 0.000\ 023\ 23 & -0.000\ 032\ 82 \\ -0.000\ 014\ 13 & -0.000\ 023\ 75 & 0.000\ 241\ 515 & -0.003\ 892\ 2 & -0.000\ 079\ 45 \\ -0.000\ 067\ 12 & 0.000\ 045\ 93 & -0.000\ 307\ 0 & -0.000\ 302\ 50 & 0.003\ 448\ 15 \end{pmatrix}$$

得到解耦矩阵后,就可以根据解耦转换,降低多维力传感器在多维通道上的耦合现象,得到准确的多维力数值。

图 1 给出了原始采集数据显示的笔迹信息通过滤波处理和解耦处理后得到的结果示意图。



图 1 对比结果示意图

Fig. 1 Comparison results after filtering and decoupling

3 系统设计

针对目前笔交互设备存在的问题,本文研发和设计了一款新型的支持笔交互的手写设备平台—F-Pad。该设备是基于实验室多维力/力矩传感器专利技术,能够直

然后对排序后的数据进行一次数据的平均值计算,得到的平均值作为最后所需的数据。设经过排序处理后的数据为 f_1, f_2, f_3 和 f_4 ,数据平均值为 avg ,则计算公式为:

$$avg = \frac{f_4 + f_3 + f_2 + f_1}{4} \tag{1}$$

此外,由于多维力传感器自身的问题,会引起应变片在应力作用下输出的数据产生耦合现象,表现为单通道受力作用时,会在其他通道上相应输出,这种情况会影响力值检测准确度,进而会影响基于力信息计算的位置信息,因此,需要通过解耦算法来完成抵消五维通道上的耦合现象。

1) 解耦算法

为了抵消多维力传感器在五维通道上的耦合现象,需要事先对多维力传感器进行标定,通过标定过程,记录有关的桥路输出数据,根据输入和输出的关系,计算一个解耦矩阵,计算公式为:

$$C = F \cdot V^{-1} \tag{2}$$

式中: C 为解耦矩阵, F 为标准加力矩阵, V 为通过模数转换读取的数值矩阵。下面为经过标定后得到的一个解耦矩阵 C 。

接测量出笔交互过程中产生的动态全力信息,具体包括三维力信息和二维力矩信息,并通过特定的结构设计和力/力矩平衡原理获得力作用点的位置信息,同时完成“所写即所见”的自然交互功能。此外,利用获取的多维力信息和点位置信息,可间接得到笔交互过程中产生的其他信息,包括字形、书写速度等几乎所有的笔交互信息。

图 2 给出了设计的手写设备系统总体结构,主要采用了嵌入式模块化设计思想,将整个系统分解成几个模块,从而使得系统级设计目标明确并且开发效率高,系统主要由 4 个模块构成:传感器模块,实现对笔交互过程中手写力信息的感知和获取;数据测量模块,完成对传感器模块获取信息的前端处理;主控系统模块,负责整个设备的信息集中处理、控制、参数调节以及交互动作等;显示模块,提供人机交互接口以实现笔交互过程的视觉反馈;此外,网络接口提供了 F-Pad 与外部设备互联,存储等功能接入。

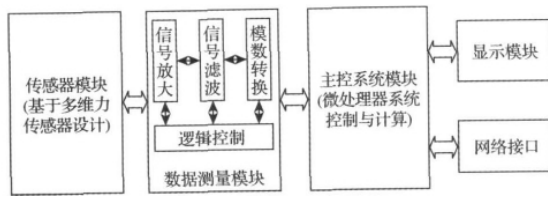


图2 系统的总体结构

Fig. 2 Block diagram of the system

3.1 传感器模块

传感器模块基于多维力传感器系统设计,主要负责完成对笔交互过程中产生的作用力信息进行获取。与目前市场上其他笔交互设备设计方法不同的是,F-Pad平台是一个全力感知平台,可以完整地获取到笔交互过程产生的多维力信息,这些力信息完整地记录了笔交互过程中力作用原理,并唯一表示了书写字者自身的生理特征。

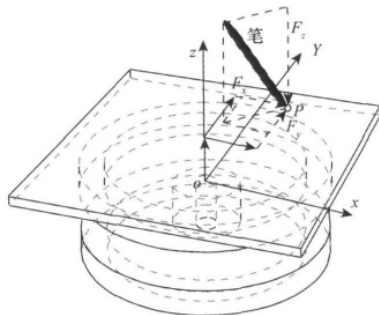


图3 F-Pad 受力作用原理

Schematic diagram of the force action of the F-Pad

F-Pad 手写设备受力作用原理如图3所示。坐标系O-XYZ以多维力传感器中心为坐标原点,当书写笔在任意书写点P(x, y)处书写时,书写笔将在该点产生三维笔写力信息 F_x, F_y, F_z 并相对于坐标中心产生两维力矩 M_x 和 M_y 。该三维力和二维力矩信息可以直接由多维力/力矩传感器直接测得,根据几何关系和力作用原理,通过力矩平衡可计算P点坐标如式(3)所示:

$$x_p = \frac{M_y - F_x \cdot h}{F_z} \tag{3}$$

$$y_p = \frac{M_x - F_y \cdot h}{F_z}$$

式中:h表示书写平面到传感器原点的垂直距离,此量设备整体装配后为常量。另外,可进一步按照式(3)推出式(4)计算获得笔交互时的速度信息,按照式(4)推出式(5)计算获得笔交互时的加速度信息。从而实现了对笔交互过程全部信息的获取。

$$v_x(t) = \frac{x(t + \Delta t) - x(t)}{\Delta t} \tag{4}$$

$$v_y(t) = \frac{y(t + \Delta t) - y(t)}{\Delta t}$$

式中: $x(t)$ 和 $x(t + \Delta t)$ 分别表示t时刻和t + Δt时刻笔迹在x轴方向的坐标值; $y(t)$ 和 $y(t + \Delta t)$ 分别表示t时刻和t + Δt时刻笔迹在y轴方向的坐标值。

$$a_x(t) = \frac{v_x(t + \Delta t) - v_x(t)}{\Delta t} \tag{5}$$

$$a_y(t) = \frac{v_y(t + \Delta t) - v_y(t)}{\Delta t}$$

式中: $v_x(t)$ 和 $v_x(t + \Delta t)$ 分别表示t时刻和t + Δt时刻书写在x轴方向的速度值; $v_y(t)$ 和 $v_y(t + \Delta t)$ 分别表示t时刻和t + Δt时刻书写在y轴方向的速度值。

3.2 数据测量模块

F-Pad 数据测量模块完成对笔交互过程中手写全力信息的获取,通过利用电阻应变片的变化来直接反映和测量作用在传感器上的力信息变化,即当有力作用在传感器上时,引起传感器内部梁的微小形变,从而导致粘贴在这些形变处的电阻应变片阻值发生变化,通过外加激励源,可以将变化的电阻值转换为相应的桥路电压变化输出,然后经过放大、滤波和模数转换,最终通过控制逻辑以总线形式将测量数据传输至下一模块处理。图4给出了数据测量模块的工作流程图。

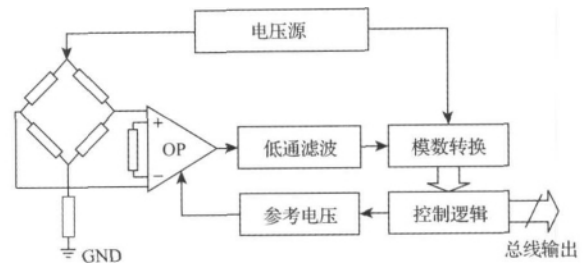


图4 数据测量模块工作流程图

Fig. 4 Operation flow chart of the data measurement module

桥路输出的是模拟电压信号,其信号值一般在几个mV左右,易于受到噪声的干扰,因此在进行模数转化前,进行了一级放大处理,采用ADI公司的INA122来实现弱信号放大功能,能够实现5~10 000 V/V的放大倍数,具体通过外接放大电阻来得到预定的放大倍数,计算公式为:

$$R_c = \frac{20\ 000}{(V_o/V_c) - 5} \tag{6}$$

式中: V_o 为预定的满幅电压输出, V_c 为没有放大前加载时的原始输出, R_c 为设计需要的反馈电阻阻值,为了保证放大的稳定性, R_c 一般要求为精密电阻。

此外,由于手写过程是一个低频信号产生过程,因此放大后的模拟信号经过低通滤波,以减小高频信号的影响;另外,为了提高F-Pad设备对手写力信息的测量精度和分辨率,采用了ADI公司生产的高速、低功耗的12位AD转换器AD7888来完成模数转化功能,以降低笔交互

过程中的动态信息丢失^[14]。

3.3 主控系统模块

主控系统是整个 F-Pad 设备的核心,负责实现整个系统的控制、任务调度、数据计算处理、协调、数据融合和存储等功能。例如主控系统会随时监测信号测量模块状态,以发现是否有新的数据到来,如果有,则立即对采集到的数据进行计算和融合,并将处理后的数据驱动到显示模块。根据应用需求分析,主控系统模块需要完成以下 3 个主要任务:

1) 在系统计算任务:主控系统模块完成对整个数据的处理过程,包括数据通信、数据分析和数据显示。数据通信实现读取数据测量模块,以获取多维力数字化信息;数据分析则根据读取的数据判断数据的有效性;数据显示根据有效数据实现对笔交互过程的视觉反馈。

2) 存储资源任务:在进行笔交互过程的数据处理中,需要耗费大量的计算资源,如时间片和存储空间。其中存储空间是嵌入式系统设计的制约因素,为了防止存储资源的耗尽,主控系统模块应该根据手写实际需求,合理设计存储空间和分配存储资源。

3) 接口支持任务:面向不同应用领域时,需要 F-Pad 能够快速和其他设备形成互联,以共同完成任务,因此提供丰富和通用的接口是实现 F-Pad 便携式和快速集成应用的重要因素,另外,嵌入式控制系统的软件功能升级和固件代码下载可通过丰富的接口来实现对 F-Pad 设备的代码更新任务。

在自行设计的主控电路系统中,选择采用三星公司的 ARM 处理器 S3C2410A,该系统在板上集成了 64 MB SDRAM、64 MB Flash、USB Host、USB Slave 以及标准串口等设备接口,同时,为了方便操作显示模块,主控系统模块设计支持 TFT LCD 型真彩液晶接口,以提供实时的手写显示反馈功能。此外,为了降低功耗,设计时可以通过使能/禁止外部功能来优化系统功耗,并可通过外部中断将处理器从掉电模式中唤醒,图 5 给出了主控系统模块的整体结构框图。

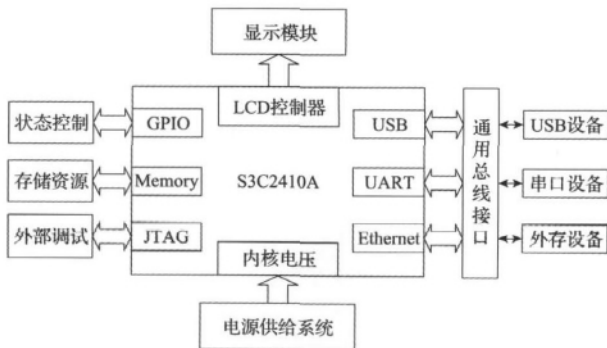


图 5 主控系统模块结构框图

Fig. 5 Block diagram of the main control module

为了能够更加合理和优化管理主控系统的各个任务,防止任务间竞争等问题,移植了嵌入式操作系统来管理整个主控系统,采用微软的嵌入式操作系统 Windows CE 5.0 为运行平台,利用其良好的人机交互界面来实现 F-Pad 的易用性;同时,利用操作系统内核的管理组件,开发针对 F-Pad 的特定硬件驱动,如数据测量模块驱动、显示驱动等,并开发基于驱动的软件应用载体,从而最终实现 F-Pad 的整体化应用目标。

3.4 显示模块

为了达到“所写即所见”的效果,提高笔交互过程的自然性,在 F-Pad 设备中引入了真彩液晶显示模块。通过主控系统模块自带的 LCD 控制器和自行设计的真彩液晶驱动电路,可以很方便地完成与多种型号 TFT LCD 连接,从而实现 F-Pad 设备实时手写笔迹显示的功能。在本设计中,为了提高人机交互界面显示的视觉性能,选择支持全真彩模式的 TFT 型 LCD,采用台湾 Top-Sun 公司生产的 3.5 寸 TS35ND2502。

在 TFT LCD 显示控制中,为了完成数据扫描,需要 TFTLCD 内置的晶体开关轮流开启和关闭。当晶体开关开启时,数据通过源极驱动器加载到显示电极,显示电极和公共电极间的电压差再作用于液晶,从而实现显示。因此在显示驱动设计上,需要提供能控制晶体开关闭合的开启电压 V_{ON} (+15 V)、关闭电压 V_{OFF} (-10 V),以及加到公共电极上的电压 V_{COM} (+3.3 V 的方波)。此外,还需要提供像素输出线正常工作所需要的 +3.3 V 和 +5.0 V 工作电压。

为了满足上述要求,需要设计一个可以提供 5 种类型电压供应的驱动电路,设计中采用 Maxim 公司生产的芯片 MAX1664 来完成,该芯片带有一个脉冲宽度调制 (pulse width modulation, PWM) 的升压转换器,一个具有正负电压双输出转换器和一个 LCD 底板电源驱动器,因此通过使用 MAX1664 作为显示模块的驱动芯片,可大大简化电路设计的复杂性,图 6 给出了基于 MAX1664 设计的显示驱动电路结构图。

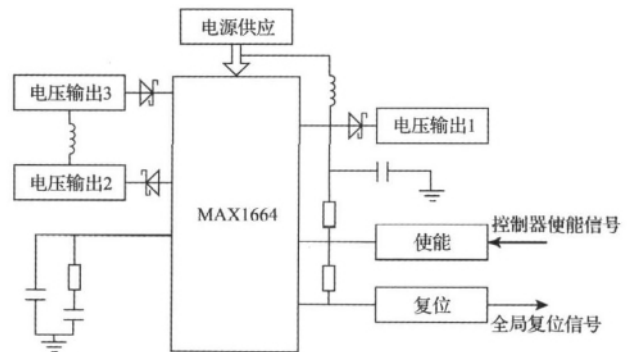


图 6 基于 MAX1664 设计的显示驱动电路

Fig. 6 Display driver circuit designed based on MAX1664

另外,由于 TFT 型 LCD 上的每一个显示点必须加正负交替的电压才能显示。所以,还必须要设计一个能产生 LCD 像素背后的公共电极电路。该公共电极典型形式为一个占空比固定的方波信号,具体设计时,可以简单地通过 NPN 型三极管和 PNP 型三极管的级联方式将液晶初始化时产生的 POL 信号转化成此公共电极信号 V_{COM} 来实现,实用电路原理如图 7 所示。

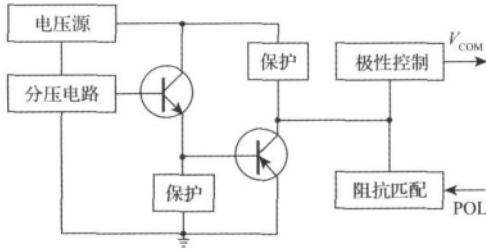


图 7 V_{COM} 信号的电路设计

Fig. 7 The circuit design of V_{COM} signal

4 优化设计

4.1 多维力传感器动态特性

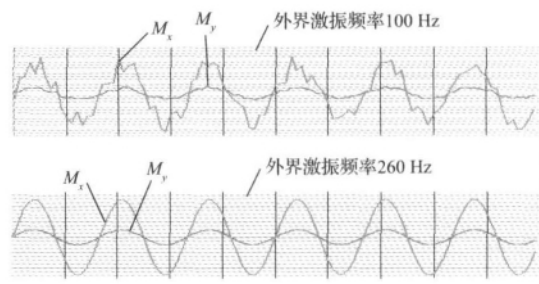
本文提出设计的 F-Pad 手写设备可实现对手写动态信息,尤其是实现手写动态力信息的获取,这就需要对多维力传感器的动态特性进行优化设计,以使得设计的多维力传感器动态性能满足手写动态输入需求。

传感器的动态特性,主要指动态灵敏度、频率响应和固有频率等。其中 F-Pad 手写设备采用的多维力传感器固有频率设计为 262 Hz,图 8 实际给出了在自行设计的动态实验台上测得的一阶固有频率结果,其中,图(a)为基于 LabVIEW 设计的动态实验控制用户界面,图(b)给出了在不同外界激振频率下力传感器 M_x 和 M_y 的输出曲线显示,分别显示了在外界激振频率为 100 Hz 条件下



(a) 动态实验控制界面

(a) The control interface window of the sensor



(b) 不同激振频率下的 M_x, M_y 输出

(b) The Outputs of M_x and M_y under different excitation frequencies

图 8 传感器动态测量范围性能测试

Fig. 8 Performance measurement of sensor dynamic frequency range

和 260 Hz 条件下,多维力传感器 M_x, M_y 上的测量输出,可以看出,在激振频率 260 Hz 下,多维力传感器达到了一阶共振,输出的达到最大。而人手写输入信息的频率一般在 20 Hz 左右,因此设计的多维力传感器的动态测量带宽足以满足实现对手写动态输入信息的获取。

对于多维力传感器的测量精度(见表 2),给出实施 $-F_z$ 向间隔加载(20 kg, 40 kg, ..., 100 kg)后的测试结果,如图 9 所示。

表 2 多维力传感器主要精度指标

Table 2 Multi-axis F/T sensor characteristics

参数描述	指标
非线性误差($F_s\%$)	≤ 0.35
零点稳定性误差($F_s\%$)	≤ 0.2
I 类综合误差($F_s\%$)	≤ 0.5
II 类综合误差($F_s\%$)	≤ 0.78
力值灵敏度	0.3 mV/(N · V)
力矩值灵敏度	6.9 mV/(Nm · V)

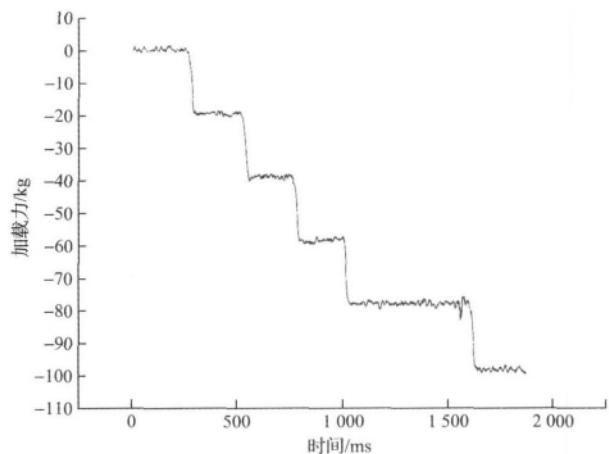


图 9 $-F_z$ 向间隔加载的输出

Fig. 9 Output of interval force loading on $-F_z$

4.2 控制系统电路优化

对于 F-Pad 手写设备来说,系统抗干扰性和数据传输的速率至关重要。主控系统模块高速运行的频率大概在 400 MHz,因此产生的高频数字信号将会对数据测量模块中信号转换和处理产生影响,而数据传输速率则会影响 F-Pad 实时处理数据的能力,例如会导致笔迹显示的滞后现象。为了提高该系统的抗干扰性和数据传输速率,还得需要对整个系统进行优化,影响该系统抗干扰性和数据传输速率有 2 个方面:一个是整个系统信号强度分布的处理;另一个是数据传输总线的实现。

整个 F-Pad 系统电源供应可以分为三大子系统:传感器系统电源供应、主控系统电源供应和液晶显示模块电源供应,其中传感器系统电源为模拟电压供应,主控系统电源和液晶显示模块电源则为数字电源供应,且涉及高频信号。因此为了提高系统的抗干扰性能主要就是处理好电源地、信号地和模拟地之间的耦合,以防止在某些区域由于地干扰而产生高信号强度分布。其中电源地和信号地由于是数字化信号,将包含有很多其他高频成分信号,如果不加以处理,将会给传感器系统带来很大的影响。因此,在电路设计中,采用高频磁珠滤波电路,专用总线驱动隔离芯片和零电势平面隔离缝合技术,以降低整个系统地平面中杂波信号的影响,从而提高 F-Pad 系统的抗干扰能力,这样才能更好地发挥 F-Pad 系统整体性能。

整个电路系统的结构布局如图 10 所示,图 11 给出了针对图 10 的系统电路设计信号强度真实分布仿真结果。可以看出,经过优化后的电路设计布局,信号强度分布趋于平均^[15]。

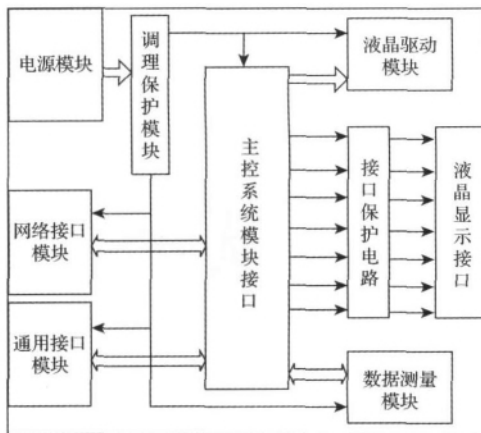


图 10 系统级结构分布图
Fig. 10 System level architecture layout

数据测量模块在完成对手写过程信息的测量后,需要实时地将数据传输至主控系统模块,以完成处理和显

示,因此这其中数据传输总线的选择和实现关系到整个 F-Pad 处理数据和分析数据的效率。此外,数据总线的选择要考虑电气接口、传输速率以及稳定性等因素。

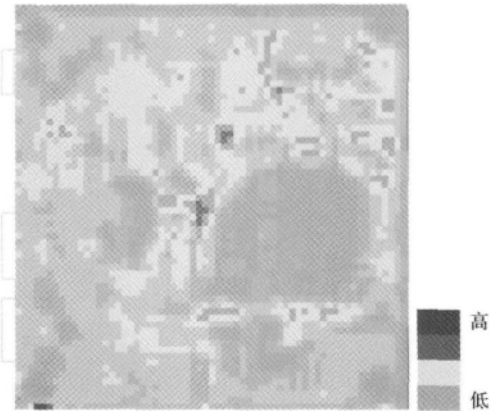


图 11 F-Pad 系统电路设计板信号强度分布仿真结果
Fig. 11 Simulation results of signal intensity distribution of the F-Pad system circuit board

主控系统模块采用高性能 CPU 设计,处理速度(工作频率 400 MHz)较快,数据测量模块则基于相对低速的 MCU 设计(工作频率 25 MHz),这就要求实现两个模块之间的数据通信总线能较好地符合双方的速率性能。为了满足和实现高速的数据传输,传统的芯片级通信总线,如 SPI 总线和 IIC 总线,已不适合板级通信需求,为此 F-Pad 采用了 USB 总线来建立两个模块的数据通信,通信协议采用 USB 1.1 规范。USB 总线是一种串行高速总线,USB 1.1 规范的理论传输速率可达到 12 Mb/s,在实际使用中,F-Pad 可测的 USB 通信速率大概在 500 ~ 800 Kb/s,而 F-Pad 实时处理速度要求的数据通信速率在 400 Kb/s,系统最大通信速率可设定为 800 Kb/s,因此,选择设计的 USB 总线足以满足应用对通信速率的需求。

图 12 具体给出了实际设计的未装配物理图,并对关键部件进行了标注。表 3 具体给了研制的设备在电气和性能参数上的明细。

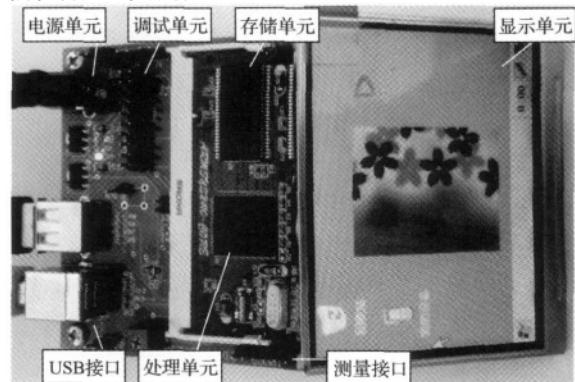


图 12 实物图

Fig. 12 The photograph of the system

表3 系统电气和性能参数表

Table 3 System electric parameters and characteristics

参数描述	单位	最小值	最大值
操作系统			Windows CE 5.0
工作电压 V_C	V	4	9
工作电流 I_m	A	0.045	0.4
采样频率 F_s	Kb/s		125
力值	N	0	25 N(F_x, F_y); 50 N(F_z)
力矩值	N · m	0	1 N · m(M_x, M_y)
力分辨率	N	0	0.1
力矩分辨率	N · m	0	0.003
存储空间	MB		64(SDRAM); 64(ROM)
外观尺寸	mm		190(W) × 150(H) × 24.5(D)

5 实验结果

为了验证 F-Pad 设备的功能,本文设计了一个简单的笔迹演示系统,该系统的结构如图 13 所示,主要分为输入部分、笔迹处理部分和输出部分。使用的输入信息为多维力传感器采集到的手写多维力信息,包括三维接触力矢量和二维力矩矢量,该部分工作由传感器模块和数据测量模块共同实现;笔迹处理部分则完成对输入力信息的计算处理,包括数据滤波处理、力-位置信息计算等,该部分工作在主控系统模块中实现;输出部分提供对笔迹显示的界面支持,在 F-Pad 平台中,该部分是由一块 3.5 英寸的液晶屏和真彩液晶驱动模块组成。

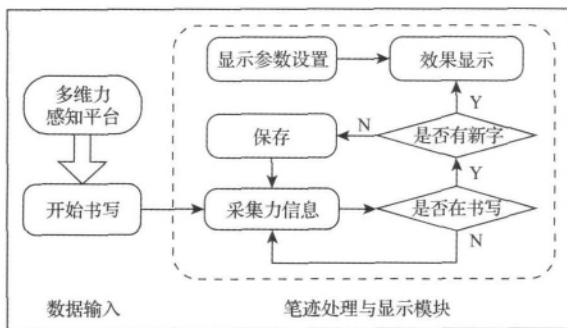


图 13 笔迹演示系统流程框图

Fig. 13 The flow chart of the handwriting demonstration system

5.1 手写字信息采集实验

测试人员在启动 F-Pad 后,按照液晶显示界面的内容,通过鼠标点击笔迹显示应用程序图标即可进入相应的演示系统。然后,采用任何一支笔或具有笔形状的物体在玻璃面板上(安装在液晶显示模块上面,用于保护液晶显示屏)进行书写,此时,固定在液晶显示模块下方的多维力传感器会实时感应并输出书写多维力信息,数据测量模块采集传感器输出的多维力信息,完成信号转换,

并通过 USB 总线传输到主控系统模块,主控系统接收数据并进行数据转换和计算处理,以得到反映整个手写过程的动态多维力信息数值,同时根据式(3)计算可进一步得到反映手写过程的静态坐标轨迹信息,最后将计算获取到的信息实时显示在液晶显示屏上,得到的结果如图 12 和图 13 的(a)和(b)所示。

图 14 展示了手写过程产生的笔迹信息,该笔迹形成过程是实时完成的,参与测试的用户并没有感觉手写过程与笔迹显示过程之间存在延时,手写过程很自然,表明设备架构的设计具有合理性;另外也可以看出,笔迹的形成和显示完整保留了用户书写的风格,如笔顺、笔锋以及连笔等操作显示,从而为用户提供了一种“所写即所见”的良好交互效果。

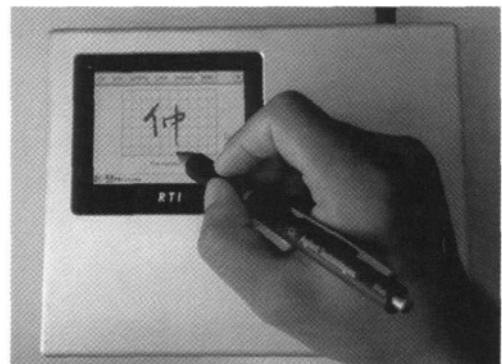
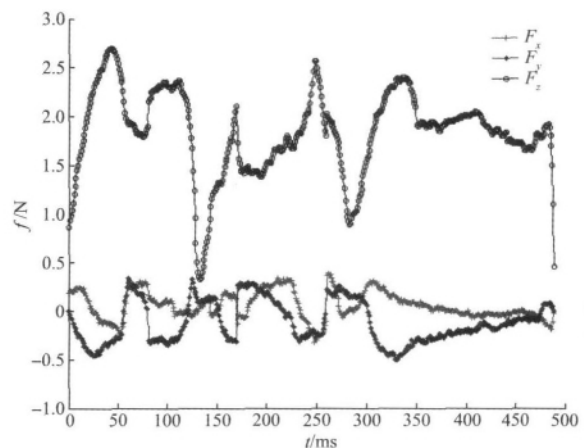


图 14 笔迹显示

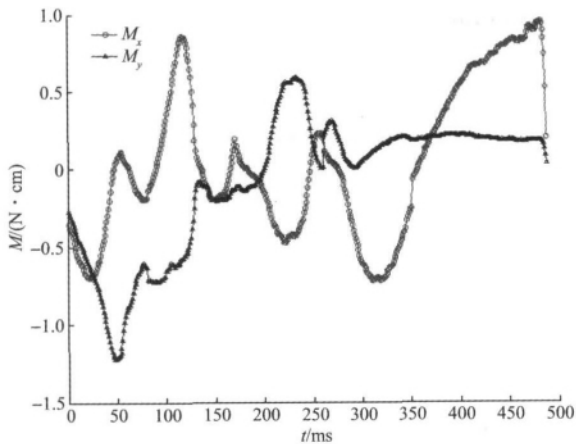
Fig. 14 Handwriting display

图 15(a)和(b)给出了 F-Pad 采集到的在书写汉字“仲”中产生的实时三维力信息曲线和二维力矩信息曲线显示,可以看出,设计的手写设备科完整获取手写全力信息;同时,这些信息是隐藏在用户实际的书写过程中,能真实反映书写者自身的特征差异,并不易或很难被他人所模仿,因此,可通过基于采集的手写全力信息来进行书写者身份认证,从而可提高认证的有效性。



(a) 三维力信息

(a) 3-D force information



(b) 二维力矩信息
(b) 2-D torque information
图 15 手写字力信息采集

Fig. 15 Handwriting force information acquisition

5.2 手写字力信息显示实验

笔交互过程中,笔迹的形成是由于人手作用力带动笔尖相对于纸张运动产生的,且这个过程具有随意性和主观性,即书写者可随意控制“运力”的大小和方向来使得显示的笔迹各具特色。

图 16 给出了测试人员基于设计的 F-Pad 平台,通过控制手作用力的大小,来实现书写笔迹的显示效果实验,可以看出,通过施加不同大小的手写字力和手写字方向,得到的笔迹显示效果具有很强的“个性化”,因此,设计的 F-Pad 笔交互平台可以很好地保留用户的手写风格,例如在练习写字时,用户可根据显示的力曲线来有意地控制自己的书写字力大小,从而形成具有个人特色的书写风格,达到一种训练和娱乐共存的应用。

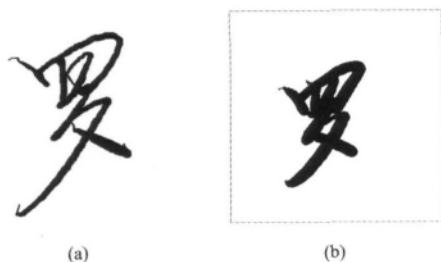


图 16 基于力信息的手写显示控制

Fig. 16 Handwriting display control based on force information

6 结 论

本文主要是针对目前笔交互设备普遍存在信息获取的问题,特别是无法实现对手写全力信息的获取,设计了

一种笔交互设备平台 F-Pad,即利用拥有的多维力传感器专利技术应用于笔交互过程中,以解决手写全力信息获取的问题。

本文提出和实际了一种新型的笔交互设备 F-Pad,并给出了 F-Pad 的系统架构以及相应的模块工作原理和组成部分;从提高设备的性能角度,对整个系统的设计进行了优化分析和讨论,具体包括对多维力传感器的动态性能的分析以及对整个手写设备控制系统电路设计的优化;为了验证自行研制设备的功能,设计了一个用户书写程序来测试笔交互设备 F-Pad 在手写全力信息获取和交互自然性等方面能力。

实验室结果表明,F-Pad 能够完整实现对笔交互过程中全力信息的获取,并在没有引入复杂数据处理算法基础上提供一种“所写即所见”的自然交互效果。

在此基础上,后续的进一步工作将围绕:

- 1) 多维力数据分析和处理,特别是如何对采集的多维力信息进行数值分析,以提取书写者的行为特征,从而建立手写评估模型,并应用于手写签名认证等信息安全领域;
- 2) 人-计算机笔式交互应用,特别是基于 F-Pad 手写设备,利用获取到的多维手写字力信息,提出一种新型的笔式交互范式;
- 3) 设计手写字力信息的墨水表达,以提供一种“富内容”的笔迹表达形式,同时利用数字墨水标准实现数字环境下,异构网络和应用平台中手写数据的共享和处理。

参考文献

- [1] JAIN A K, ROSS A, PRABHAKAR S. An introduction to biometric recognition[J]. IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol., 2004, 14(1): 4-20.
- [2] 邢冲, 吴仲城. 基于三维力信息的笔交互毛笔墨书法效果表达[J]. 计算机系统应用, 2008, 18(10): 144-147 31.
XING CH, WU ZH CH. Handwriting representation of chinese brush calligraphy based on three-dimension force information [J]. Computer Systems & Applications, 2010, 18(10): 144-147 31.
- [3] HOOKE A W, PARK J, SHIM J K. The forces behind the words: Development of the Kinetic Pen[J]. J. Biomechanics., 2008, 41(6): 2060-2064.
- [4] SHIMIZU H, KIYONO S, MOTOKI T, et al. An electrical pen for signature verification using a two-dimensional optical angle sensor[J]. Sensors and Actuators, 2004, 111: 216-221.
- [5] WU Z C, KANG L, SHEN F, et al. The closed human-computer interface: Active information acquisition for vision-brain-hand to computer interaction based on force

- tablet [C]. Proceedings of International Conference on Neural Interface and Control, 2005: 1-5.
- [6] 张小瑞, 孙伟, 宋爱国, 等. 双通道力/触觉交互的虚拟肺手术仿真系统 [J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(2): 421-428.
ZHANG X R, SUN W, SONG AI G, et al. Virtual lung surgery simulation based on double-channel haptic interaction [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(2): 421-428.
- [7] 文辞, 宋爱国, 王爱民. 适用于力反馈的圆筒式磁流变液执行器的设计 [J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(9): 1921-1926.
WEN C, SONG AI G, WANG AI M. Design of a cylindrical magnetorheological fluid actuator for force feedback [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(9): 1921-1926.
- [8] MENG M, GE Y J, WU Z C, et al. Accuracy of a force sensitive digital tablet in determining the position of force application [C]. Proceedings of the 2005 IEEE, International Conference on Information Acquisition, 2005: 285-289.
- [9] EVERITT K M, MORRIS M R, BRUSH A J, et al. DocuDesk: An interactive surface for creating and rehydrating many-to-many linkages among paper and digital documents [C]. 3rd IEEE International Workshop on Horizontal Interactive Human Computer Systems, 2008: 25-28.
- [10] KHOLMATOV A, YANIKOGLU B. SUSIG: An on-line handwritten signature database, associated protocols and benchmark results [J]. Pattern Analysis & Applications, 2009, 12(3): 227-236.
- [11] QIN Y, YU C, JIANG H, et al. pPen: Enabling authenticated pen and touch interaction on tabletop surfaces [C]. ACM Int. Conf. Interactive Tabletops and Surfaces, Saarbrücken, Germany, 2010: 283-284.
- [12] WANG D, ZHANG Y, YAO C, et al. Toward force-based signature verification: A pen-type sensor and preliminary validation [J]. IEEE Trans. Instrum. Meas., 2010, 59(4): 752-762.
- [13] 孟明, 吴仲城. 基于笔段特征和 HMM 的在线签名认证方法研 [J]. 模式识别与人工智能, 2007, 20(1): 95-100.
MENG M, WU ZH CH. Online signature verification based on segment features and HMM [J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2007, 20(1): 95-100.
- [14] 王云新, 刘铁根, 朱均超, 等. 嵌入式人体手背静脉图像采集系统的研制 [J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(2): 308-312.
WANG Y X, LIU T G, ZHU J CH, et al. Development of an embedded image acquisition system for human dorsal hand vein [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(2): 308-312.
- [15] 刘孝保, 杜平安, 夏汉良, 等. 一种面向动态分析的 PCB 板等效建模方法 [J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(4): 863-869.
LIU X B, DU P AN, XIA H L, et al. Dynamic property analysis-oriented PCB equivalent modeling method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(4): 863-869.

作者简介



罗健飞, 2007 年于安徽大学获得学士学位, 现为中国科学技术大学博士研究生, 主要研究方向为人机交互接口设计、传感器接口标准化设计等。

E-mail: jfluo@mail.ustc.edu.cn

Luo Jianfei received B. Sc. degree from Anhui University in 2007. He is currently working toward Ph. D. degree at University of Science and Technology of China. His research interests include design of human-computer interface and sensor interface standard.



吴仲城 (通讯作者), 1990 年和 1995 年于合肥工业大学获得学士和硕士学位, 2001 年于中国科学院合肥物质科学研究院获得博士学位, 现为中国科学院磁场科学中心研究员、博士生导师, 主要研究方向笔式计算、机器感知接口设计等。

E-mail: zcwu@iim.ac.cn

Wu Zhongcheng (Corresponding author) received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Hefei Poly-Technical University of China in 1990 and 1995, respectively; and received Ph. D. from Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences in 2001. He is currently works in High Magnetic Field Laboratory, Chinese Academy of Science as a researcher and Ph. D. Supervisor. His research interests include pen computing, machine sensing interface design and etc.